

Research Reports of Tokyo National College of Technology

東京工業高等専門学校

研 究 報 告 書



第 34(1) 号

2002.9

東京工業高等専門学校研究報告書 第34(1)号 目次

ハックの「事実の真実」と「心の真実」との闘い（其の2）	岩 崎 健	1
フォニックスの指導方法について（3）	荒 木 英 彦	11
日本語データ圧縮法に関するカオス応用の検討	平 尾 友 一	19
Flows around an Inclined Step with an Opening Part on Divided Wall in a Duct	鈴 木 良 幸	25
	藤 野 宏	
	飯 島 敏 雄	
時間領域差分法を用いた密結合モノポールの音響特性解析	森 下 達 哉	31
	多 氣 昌 生	
自動車道路周辺の降水成分	高 橋 義 人	35
	加 藤 格	
	桑 原 大	
音源追尾型4輪移動ロボットの開発	小 坂 敏 文	41
	牧 野 兼 武	
	吉 本 定 伸	
	西 村 亮	
	松 林 勝 志	
2階楕円型微分方程式の境界値問題の解の存在定理	拜 田 稔	45
異機種間カラー画像通信のための標準色空間の現状と課題	杉 浦 進	53
データリンクプロトコルの体系的学習システム	青 野 正 宏	59
	佐 藤 伸 一	
	林 はるか	
	小 嶋 徹 也	
	市 村 洋	
高次統計量を用いた独立成分分析の厳密解に関する一考察	小 嶋 徹 也	65
	青 野 正 宏	
黒鉛層間化合物の電子状態	土 屋 賢 一	73
	新 田 光 善	

高専における分子生物学導入教育のための初歩的実験の確立	庄 司 良	77
	飯 田 裕	
	石 井 宏 幸	
	三 谷 知 世	
活性炭による農薬・フミン質の競争吸着	平 田 房 雄	83
	庄 司 良	
	須 藤 義 孝	
	峯 野 枝 奈	
	馬 部 晋	
	鈴 木 基 之	
『天徳三年八月十六日闘詩行事略記』訳注稿（六）	津 田 潔	(1)
	小 野 泰 央	

Research Reports of Tokyo National College of Technology No. 34 (1)

CONTENTS

Tatsuru IWASAKI	Huck's conflicts between tangible reality and intangible one (Part two) ···	1
Hidehiko ARAKI	On the Teaching Method of Phonics (3) ·········	11
Yuuiti HIRAO	A Consideration to Applying the Chaos to a Data Compression of Japanese Text ·······	19
Yoshiyuki SUZUKI Hiroshi FUJINO Toshio IJIMA	Flows around an Inclined Step with an Opening Part on Divided Wall in a Duct ·······	25
Tatsuya MORISHITA Masao TAKI	Numerical simulation of tight-coupled monopole based on finite difference time domain method ·······	31
Yoshihito TAKAHASHI Itaru KATO Masaru KUWAHARA	Chemical Composition of Rainwater in the Surroundings of a Roadway for Motor Vehicles ·······	35
Toshifumi KOSAKA Kenbu MAKINO Sadanobu YOSHIMOTO Makoto NISHIMURA Katsushi MATSUBAYASHI	Development of a Four-Wheel Robot Pursuing Sound Source ·······	41
Minoru HAIDA	Existence theorem of solutions of boundary value problems for second order elliptic differential equations ·······	45
Susumu SUGIURA	Issues on the current standard color spaces for network based color image communication ·······	53
Masahiro AONO Shin-ichi SATO Haruka HAYASHI Tetsuya KOJIMA Hiroshi ICHIMURA	Systematical Learning System of Data Link Protocol ·······	59
Tetsuya KOJIMA Masahiro AONO	On the Strict Solutions of Independent Component Analysis Using Higher-Order Statistics ·······	65

Ken-ichi TSUCHIYA	Electronic States of Graphite Intercalation Compounds	73
Mitsuyoshi NITTA		
Ryo SHOJI	Development of Preliminary Experiment for Education of Molecular	77
Hiroshi IIDA	Biology in College of Technology	
Hiroyuki ISHII		
Tomoyo MITANI		
Fusao HIRATA	Competitive Adsorption of Pesticide and Humic Substances	83
Ryo SHOJI	on Activated Carbon	
Yoshitaka SUDO		
Shina MINENO		
Aki UMABE		
Motoyuki SUZUKI		
Kiyoshi TSUDA	The Annotation of the Tentokutōshi (6)	(1)
Yasuo ONO		

ハックの「事実の真実」と「心の真実」との闘い（其の2）

岩 崎 健*

Huck's conflicts between tangible reality and intangible one (Part two)

Tatsuru IWASAKI

Lionel Trilling says that “Cervantes begins to show that the world of tangible reality is not the real reality after all. The real reality is rather the wildly conceiving, the madly fantasizing mind of the Don.”

I doubt whether Trilling is right. I think that there are two kinds of reality in this world, that is, tangible reality and intangible reality. In fact, Huck, the protagonist of *The Adventures of Huckleberry Finn* suffers from the conflicts between the two reality throughout the book.

In this paper I will deal with a continuation of my essay in *Research Reports No. 21*.

(Keyword : Reality)

葦辺ゆく鴨の羽がひに霜降りて
寒き夕は大和し思ほゆ

『万葉集』の研究者・犬養孝は、志貴皇子のこの歌の解説に際して「この世の真実には『事実の真実』と『心の真実』との2種類がある。そして『葦辺ゆく……』の歌は『心の真実』を歌ったものである」といった趣旨のことを述べている¹⁾。

このことの詳細については、『全国高等専門学校英語教育学会研究論集21号』の「ハックの『事実の真実』と『心の真実』との闘い」(其の1)²⁾の中で触れたので、ここでは避ける。「心の真実」というものが、「事実の真実」とは対照的に極めて主観的なものである³⁾ということになると、それは多分に独善的なもの、という印象を与える。何しろ「心の真実」というのは、「事実の真実」とは異なり、手で触れることもできず、目で見ることもしない。しかし、「心の真実」というのは決して独善的なものではないと思う。なぜなら、もし独善的であるとしたら、「心の真実」を歌っている「葦辺ゆく……」の歌が、これほど多くの人々の心を捉えることはなかったであろうから。

現に私が現在扱っているマーク・トウェインの傑作『ハuckleberry・フィンの冒険』の主人公

ハックだって、絶えず「事実の真実」と「心の真実」との板挟みにあい⁴⁾、その都度「心の真実」を優先させるのだが、私はといえば、いつもハックのその判断に対して激しく心を揺すぶられ、拍手喝采をせざるを得なくなる。私が、(いや、私ばかりではなく多くの人が)ハックの判断に対してこのような反応を示すということは、ハックの「心の真実」に普遍的な真理があるからであろう。とは言え、結論を出すのには事例が少なすぎる。「ハックの『事実の真実』と『心の真実』との闘い(其の1)」の中で扱ったわずか3つの事例で結論を出すのでは早急すぎる。そこで更にハックの「事実の真実」と「心の真実」との葛藤の場面を追いかけていくことにする。

筏でミシシッピ河を南下するハックとジムの計画は、オハイオ河がミシシッピ河に流れ込んでいくケアロウまで行き、そこで筏を売って蒸気船に乗り、オハイオ河を遡って自由州に入り、そこで自由の身になる、というものだった。ところがこの計画はうまく行かない。濃霧などのせいもあって、いつの間にかケアロウを見過ごしてしまったから。落胆する2人に更に不運が追い討ちをかける。というのは、別の、やはり濃霧の晩に、2人の乗った筏が川を上ってきた大きな蒸気船に飲み込まれてしまったから。命からがら水中に飛び込

んだ2人は、またもや離れ離れになってしまう。ようやくの思いで岸にたどり着いたハックは、グレンジャーフォード家という一家に拾われる。このグレンジャーフォード家というのは大変な大富豪で品がよく、血統もよく、気位も高い一家だった。

The old gentleman (Col. Grangerford) owned a lot of farms, and over a hundred niggers. Sometimes a stack of people would come there, horseback, from ten or fifteen miles around, ... These people was mostly kin-folks of the family. The men brought their guns with them. It was a handsome lot of quality, I tell you.

There was another clan of aristocracy around there — five or six families — mostly of the name of Shepherdson. They was as hightoned, and well born, and rich and grand, as the tribe of Grangerfords. (pp. 143—144)⁵⁾

その紳士はたくさんの農場を所有していた。黒人だって100人以上所有していた。時々多くの人たちがそこにやってきた。馬に乗って10マイルも15マイルも離れた所から。……こういった人々はたいていその一家の親戚だった。その人たちは銃を携えていた。それはそれはお上品な上流階級の人たちだった。

このあたりには更に別の貴族の一族がいた。5、6家族から成り、ほとんどがシェパードソンという名だった。彼らもグレンジャーフォード家同様に上品で、生まれがよく、金持ちで、気位が高かった。

ハックがかつて世話になっていたダグラス未亡人もかなり高貴な生まれの人で、気位が高かった。しかしグレンジャーフォード家の人、特に主人のグレンジャーフォード大佐は、ダグラス未亡人とは異なる、気品のある、高貴な人物らしい。というのは、2人に対するハックの反応が全く違うから。反応が違うということは、対象が大きく違っているということだろう。ハックは、ダグラス未亡人の上品さに対しては、激しい拒否反応を示し

ていた。「……未亡人がその全てにおいてひどくきちんとし、上品であるということを考えると、その家で四六時中暮らすのは耐えがたかった。それで、もはや我慢できなくなったとき、俺は逃げ出した」(“... but it was rough living in the house all the time, considering how dismal regular and decent the widow was in all her ways, and so when I couldn't stand it no longer, I lit out”) (1)。しかしハックは、(ハックばかりでなく多くの人々が) グレンジャーフォード大佐の上品さには強く引きつけられる。「彼は誰に対してであろうと行儀に気をつけるように、と言う必要はなかった。彼がいるところではみんな行儀がよかった。みんなが彼の周りにいたがった。彼はいつも日の光のようだった。……(ひとたび彼に会うと、誰だって) 1週間は再び道を誤ることはないだろう」(“He didn't ever have to tell anybody to mind their manners — everybody was always good mannered where he was. Everybody loved to have him around, too ; he was sunshine most always ... there wouldn't nothing go wrong again for a week”) (143)。

ダグラス未亡人の上品さとグレンジャーフォード大佐の上品さとの違いはどこにあるのだろうか。両者の差は自然発生的なものか否か。更に言うなら、無理があるか否か。つまり円熟しているか未熟なのか、にあるように思われる。このことはダグラス未亡人の上品さはハックを行儀よくさせることに汲々としなければならないのに、グレンジャーフォード大佐のそれは、ハックをして大佐の前では行儀よくしていようと思わせる、というところにはっきりと現われているように思う。社会生活を営む私たちにとって、「行儀よくする」ということは一つの真理である。私たちが円滑な社会生活を送るための潤滑油である。これに異議を唱えることはできない。しかし、ダグラス未亡人の上品さの場合には、これを他人に実行させるためには言葉をつくし、脅しを使い、無理強いしなければならない。それ故明確で、具体的で、目で見ることさえできる。よってダグラス未亡人の上品さは言わば「事実の真実」とでも言うべきものである。

一方、グレンジャーフォード大佐は、「行儀よくする」ということに関しては一言も言及しない。

ただ黙ってそこにいるだけである。だから、グレンジャーフォード大佐が何を体現しているのかは全く分からない。しかし、グレンジャーフォード大佐の前に立つと、ハックを初めとしてみんなが、「行儀に気をつける」ことを心がけるという。そして、ひとたび彼に会うと、「1週間は再び道を誤ることはないだろう」という。ということになると、グレンジャーフォード大佐が体現しているものは「行儀をよくする」というものであることが分かる。これこそが「心の真実」というものであろう。本来「心の真実」というものはこういうものであろう。つまり、受け手に自然に感じられるもの、外からの強い強制ではなく、自ずと心の中にしみ込んでくるもの、そして受け手はそれに素直に納得させられ、従属させられていくもの、「心の真実」とはまさにこういうものではなからうか。

志貴皇子の「葦垣行く……」の歌のどこに、犬養孝が解説しているような「もうあらゆるもの、空気までが凍てついて、足元では霜柱がサクサクとし、胸の中の、身体の中の血まで凍ってしまいそうな感じ……」という言葉が語られているだろうか。このようなことを直接語っている言葉は一言もない。しかし私たちはこの歌に接すると、まさに犬養孝が解説しているような印象を受ける。直接言葉にされていないのに、そのように感ずる。何と抽象的で、主観的であろうか。が、そのくせ私たちの心を動かし、私たちをある方向へと導いてゆく。

グレンジャーフォード大佐の上品さもこれに通ずるものがある。彼は何も語らない。ゆえに抽象的であり、主観的で、目で見たり、手で触れたりすることはできない。しかし、およそ上品さとは縁遠いハックでさえも、彼に接すると心を動かされ、「行儀に気をつけ」ようと思うという。確かにこの事例の場合は、ダグラス未亡人とグレンジャーフォード大佐との板挟みにあっている、という状況ではない。しかしもし板挟みの状況が生じたとしたら、ハックが何の躊躇もなくグレンジャーフォード大佐の方を、つまり「心の真実」の方を選択することは間違いないであろう。ゆえにハックには「心の真実」を素直に受け入れる下地がある。ということは、ハックの本質は強制を嫌い、直感的、本能的なものを大切にす、

ということにあるらしい。

このようにハックはグレンジャーフォード大佐の上品さに心を動かされ、そこに一つの真実を見、そちらへと心を傾けていく。しかし、人間の存在は複雑なものである。光と闇を同時に併せ持つものである。上品で、気高い名門であるがゆえに、それらしく振舞わなければならなかったのだろう。グレンジャーフォード大佐は一家の名を守るために、シェパードソン一家と「宿怨」(feud)

(146) 関係を持たざるを得ない。宿怨関係の根底にあるものは憎悪である。憎悪は上品さ、気高さと対立する。しかし大佐の中では、この両者は併存する。

アメリカ人の常として、グレンジャーフォード家の人々も日曜には教会に行く。教会での説教は、同胞愛(“brotherly love”) (147) といったことが中心になっている。みんな「それ(同胞愛の説教)が結構な説教であった、と言い、家に帰る間中そのことについて喋り、信仰だとか、善行だとか、分け隔てのない神の恵みなどについて大いに語った」(“… everybody said it was a good sermon, and they all talked it over going home, and had such a powerful lot to say about faith and good works and free grace …”) (147)。教会での牧師の説教は真理である。一字一句も間違いはないであろうし、その説教を聞いたグレンジャーフォード家の人々がその説教に興奮し、信仰だの善行だの、分け隔てのない神の恵みなどという言葉は何度も繰り返したことは正しいことである。それは、いかにも上品で気高い、名門一家にふさわしいものである。つまり、彼らの言動には1点の非の打ち所もない。それゆえ、彼らの言動は「事実の真実」である。客観的で、具体的で、はっきりしている。しかしハックは、牧師の説教を「ろくでもない説教」(“ornery preaching”) (147) と言う。みんなが信仰だとか善行だとか分け隔てのない神の恵みだのと喋っていた分だけ「俺にとって、それは今までの中で最もひどい日曜日だったように思われた」(“… it did seem to me to be one of the roughest Sundays I had run across yet”) (147) と語る。というのは、「同胞愛」等の説教に興奮していたグレンジャーフォード家の人々が、その日やったことはどんなことであったか。たとえそれが「宿怨」というやむを得ないものであったに

しろ、彼らがその日やったことは、人殺しという、「同胞愛」とは全く相反する暴挙であった。

ハックは決して上っ面のことに踊らされたりはしない。あることが「事実の真実」だからといって、それを鵜呑みにしてしまうようなことはしない。自分の心にじっと耳を傾け、素直に反応するだけである。だから牧師の「同胞愛」の説教も、「ろくでもない説教」と言い放ってしまう勇氣がある。ではハックは「同胞愛」といったことを馬鹿にしているのだろうか。とんでもない。彼が実際にやっていることは「同胞愛」そのものである。黒人奴隷（黒人はその当時人間扱いされていなかった。いや、このように断定してしまうのはよくない。オハイオ州などのような、人間扱いされていた州もあり、そのためにジムはそこへ行くことを目指していたのであるが、）のジムと再会し、彼の声を聞いた瞬間のハックの反応を思い出してほしい。「それはジムの声だった。今までにこんなに嬉しい声を聞いたことはなかった」（“It was Jim’s voice. — nothing ever sounded so good before”）（154）。ハックは人種の差、年齢の差、言葉の差、そしてあらゆるものの差を超越してジムを愛している。これこそが嘘偽りのない「同胞愛」というものであろう。そして、こういうものこそが「心の真実」とでも言うべきものであろう。ハックは「心の真実」に極めて忠実な少年である。再度繰り返すが、「心の真実」を受け入れる下地を持っている。

グレンジャーフォード家とシェパードソン家との宿怨から逃れ、ハックとジムの2人は淡々とミシシッピ河を下っていく。ケアロウを通り過ぎてしまった2人にはもはやはっきりとした目的はない。それだけに河を下る2人の生活には張りつめたものがない。川の流れに任せ、時に流され、漂っていくだけである。でも、無為というわけではない。彼らの生活には何かがある。自然との一体化、などといった大げさなものではないが、置かれた環境を享受できる何かがある。その享受ぶりについてハックは言う。「……俺達はパイプに火を付け、水の中に足をブラブラさせ、……俺達はずっと裸だった。……服は全く好きじゃなかったんだ」（“… we lit the pipes, and dangled our legs in the water … we was always naked, … I didn’t go much on clothes, nohow”）（157–158）。

自然の中に置かれるとき、人間は自分自身の感情に素直になれるのだろう。自然はごまかさない。あるがままに私達を受け入れる。原因、結果のきちんとした因果関係を持ち、二心を持たない。だから人間は自然に対しては素直に接することができるのだろう。自分の全てをさらけ出して向かい合うことができるのだろう。水中に足を入れることが快いと感じるなら、水にそのことを委ねればいいし、皮膚に触れる大気に快さを覚えるなら、裸になって大気にそのことを任せればいい。水も大気も私達を裏切らない。水も大気も私達が感じるままの存在であり、私達がそれらの主体となることを許してくれる。束縛を嫌うハックが自然を好むのは、おそらくその辺に理由があるのだろう。ハック以外の人間が「冷たい」と感じる大気でも、ハックにとってそれが快ければ、それはそれでよし、と自然は無理強いせず、容認してくれる。が、人間、社会、文化といったものはこれを認めてはくれない。曰く、「人前で裸になってはいけない」「裸でいると身体を冷やす」「裸では危険である」等々。ハックの有りようは「心の真実」を重んじる。

ハックが「心の真実」を受け入れる下地を十分に持っていることについては既に述べてきた。

「心の真実」を受け入れる下地を十分に持っているということは、Aを取るか、Bを取るかの岐路に立たされたとき、その判断基準は、彼にとっての「心の真実」によってなされることは十分に想像できる。では、ハックにとっての「心の真実」とはいかなるものか。それは、彼の心に自然に憐憫の情を引き起こすものである。しかし、その基盤には彼の心の琴線に自然に響いてくるもの、という大前提がある。このことについて具体例を挙げて説明してみる。

ハックとジムの乗った筏に突然2人の男が乗り込んでくる。彼らがホラ吹きでありペテン師であることは、彼らの言葉からして明らかである。若い方の男が言う。「そう、俺は歯から歯石を取るものを売ってたんだ。で、確かにそいつは歯石が取れるんだ。が、大抵一緒にエナメル質も取れてしまうんだ。しかし一晩長いすぎてしまったんだ」（“Well, I’d been selling an article to take the tartar off the teeth — and it does take it off, too, and generly the enamel along with it — but I

stayed about one night longer than I ought to”)

(160)。どうやらその30くらいの若い男は、インチキな物を売る商売をしていたらしい。そしてもう一方の70くらいの禿げた男も若い男に負けず、ペテンによって生活していたらしい。彼が言う。

「そう、俺はあそこでちょっとした禁酒更生運動を1週間ほどやってたんだ。女共には、年寄りから若いのまでもてはやされた。なぜなら俺は、ラムの飲み手たちをこっぴどくやっつけていたから。そして1晩に5、6ドルも稼いでいた。1人頭10セント取り…、俺がこっそりと自分のジョッキで時を過ごす習慣があるという、ちょっとしたうわさが昨晚広まった」(“Well, I’d ben a-runnin’ a little temperance revival thar, ’bout a week, and was the pet of the women-folks, big and little, for I was makin’ it mighty warm for the rummies, I tell you, and takin’ as much as five or six dollars a night — ten cents a head, … a little reprt got around, last night, that I had a way of puttin’ in my time with a private jug, on the sly.”) (160)。この、明らかにホラ吹きであり、ペテン師である2人が、それぞれ公爵の末裔だの、王様の息子だのと言って、ハックとジムに、公爵や王様にふさわしい取り扱いを強要しても、ハックは彼らに対して怒ることもせず、黙認する。ハックにとっては、そんなことはどうでもいいのである。そんなことは彼の心に憐憫の情を引き起こさない。第一、彼の心の琴線に自然に響いてくるものではない。2人の言動はハックにとっては雑音に過ぎないのだろう。だから適当に扱い、適当にあしらっている。

It didn’t take me long to make up my mind that these liars warn’t no kings nor dukes, at all, but just low-down humbugs and frauds. But I never said nothing, never let on ; kept it to myself ; it’s the best way ; then you don’t have no quarrels, and don’t get into no trouble. If they wanted us to call them kings and dukes, I hadn’t no objections, long as it would keep peace in the family ; (165)

この嘘つきどもが全く王様でも公爵でもな

く、単に下品なペテン師であり、詐欺師であることが俺にはすぐに分かった。でも俺は何も言わなかった。おくびにも出さず、胸の中にしまっておいた。それが一番いいやり方だ。そしたら喧嘩にもならず、面倒なことにもならない。もしこいつらが俺達に自分たちを、王様だの公爵だのと呼ばせたいのなら、そして、それでみんなが丸くおさまるんだったら、俺には文句はない。

そしてこの王様と公爵の2人は、小さな町が見えてくるとそこに上陸し、一儲けしようと企む。町ではちょうど野外集會が開催中とかで、町中の人々全てが森の中に集まっている。野外集會では折しも説教師が人々に賛美歌を歌わせていた。説教師が賛美歌を2行読み上げる。すると人々がそれを大声を張り上げて歌うといった具合である。そんなことをしているうちに人々はだんだんと興奮してくる。人々の興奮が高まったところで、説教師が説教を始める。「おお、悔い改める者よ来たれ、ベンチの所へ来たれ、罪に汚れた者よ」(“Oh, come to the mourners’ bench! Come, black with sin!”) (172) といった調子である。人々は説教師の巧みな誘導によって酔ったように興奮してくる。王様がこの機会を捉える。説教師の勧めもあって演壇の上に立ち上がると、王様は悔い改めの話を始める。要するに、自分はこの30年間インド洋で海賊をやってきた。この春、戦闘があつて多くの手下をなくしたので、新しい仲間を探しに故国へ帰ってきた。ところが昨夜金を盗られ、一文無しになったので、蒸気船から下ろされてしまった。しかしそのことを今は喜んでいる。というのは、生まれ変わったようで、生涯で初めて幸福な気分を味わっているのだ。それで、これからすぐにインド洋に出かけ、他の仲間を真人間に立ち戻らせることにこの先の生涯を捧げたい、などといったことを喋る。そして最後に「(仲間の海賊を悟らせる毎に、) わしに礼を言うな。……これは全てポークヴィルの野外集會の親愛なる人々のおかげなんだ……」(“Don’t you thank me, … it all belongs to them dear people in Pokeville camp-meeting, …”) (173) と言おうと思う、と語る。興奮状態にあった人々はこれでコロッとまいってしまい、カンパとして87ドルもの

金を海賊を改心させるための支度金として手渡す。このようなペテンを目撃してもハックは大した衝撃を受けている様子はない。ジムが尋ねる。

「ハック、俺達はこの旅でもっと多くの王様に出くわすと思うかい」(“Huck, does you reck’n we gwyne to run acrost any mo’ kings on dis trip?”)。ハックが答える。「そうとも思わない」(“I reckon not”)。王様のペテンに対してハックが何らかの反応を示しているのはたったこれだけである。確かにこれでは彼の心の中までは分からない。しかしその後もこの王様と公爵はそのペテンによって人々を騙すのだが、それに対してもハックの反応は鈍い。彼らの更なる悪党ぶりにジムがたまにかねたかのようにハックにその判断を迫る。しかしジムの言葉に対してハックの返事はそっ気ない。

“Don’t it s’prise you de way dem kings carries on, Huck?” “No,” I says, “it don’t.” “Why don’t it, Huck?” Well, it don’t, because it’s in the breed. I reckon they’re all alike.” “But Huck, dese kings o’ ourn is regular rapsallions ; dat’s jist what dey is ; dey’s reglar rapsallions.” “Well, that’s what I’m a-saying ; all kings is mostly rapsallions, as fur as I can make out.” (199)

「この王様たちがやってることにあんた、驚かないかね、ハック」「いいや」と、俺は言った。「驚かないね」「なぜ驚かないんだね、ハック」「えっと、驚かないね。だって血筋だもん。王様はみんな同じだと思うよ」「でもハック、俺達のこの王様たちは本物の悪党だよ。悪党であるということこそ奴らの正体なんだ。本物の悪党だ」「うん、それこそ俺の言ってることだ。俺が知る限りでは、全ての王様が大体は悪党なんだ」

ハックの「心の真実」は、この程度のものに対しては反応しない。彼の心の琴線に響いてこないし、憐憫の情を引き起こされたりはしない。このような意味に於ては、ハックの「心の真実」は余程のことでもない反応しないようだ。例えば、父親を射殺されて涙にくれる娘の姿を目撃しても

憐憫の情を引き起こされたりはしない。「とてもかわいくて、優しそうだった」(“very sweet and gentle-looking”) (187) といった反応しか示していない。通りすがりの目撃した事件だったので、心が煮詰まっていなかったためだろうか。どうもハックの心が動くためには、対象に対するかなり深い関わり合いが必要であるように思われる。2人のペテン師のやることに一向に反応しなかったハックだが、ついにその心を動かされる時がやってくる。とうとう2人のペテン師は彼の心の琴線を刺激し、憐憫の情を引き起こしたようである。ハックの「心の真実」がすっと立ち上がってくる。王様と公爵と称する2人のペテン師と旅を始めてから4つ目ほどの村(町)に差ししかかったときである。筏に乗せてやった田舎者の若者が王様に向かって喋り始める。「あなたを最初に見たときに思ったんです。『きっとウィルクスさんだ。この人はすんでのところで間に合った』……」

(“When I first see you I says to myself, ‘It’s Mr. Wilks, sure, and he come mighty near getting here in time’……” (205)。若者のこの言葉を耳にすると、王様のペテン師としての鋭い感覚が何かを感じ取ったようだ。言葉巧みにその若者に應對していく。「いいや、わしの名前はプロジェクトだ。……わしは神の従僕の一人なんだ」(“No, my name’s Blodgett … I’m one o’ the Lord’s poor servants”) (205) などと言って相手をすっかり信用させ、その若者からウィルクスに関する情報を引き出し始める。彼はその若者から、ウィルクスというのはハーヴェー・ウィルクスといい、ピーター・ウィルクスという皮なめし屋の弟で、現在はイギリスに住んでいること、このピーターはハーヴェーに大変会いたがっていた。というのは、ピーターはかなりの年で、1、2か月前に病気ににかかってしまい、今は死期が迫っていること、また、ピーターにはジョージという、アメリカへ一緒にやってきた弟がいたのだが、このジョージも昨年、その妻とほとんど時を同じくして死んでしまったこと、また、このジョージ夫妻には3人の娘がいるのだが、裕福だったピーターはその娘たちに、彼の財産である土地や何軒かの家、それに現金3、4千ドルを与えようとしていたらしいこと、そしてこのピーターは昨日死んでしまったこと、更にハーヴェーとその弟のウィリアムはど

うやらイギリスを発ってアメリカに向かっているらしいこと、などを聞き出す。これらの話を聞いた王様は早速、公爵をウィリアムに、自分はハーヴェーに成り済まして村に乗り込んでいく。王様の魂胆は、ピーターがジョージの娘たちに残した財産を横取りしてしまおう、といったことのようなのである。

村に着いた王様と公爵はその持前のペテン師としての才能で、ジョージの娘たちだけでなく村人までもすっかり騙し、ハーヴェーとウィリアムに成り済ます。そのあまりにもひどいペテンぶりにさすがのハックもあきれ果て、彼らのことが自分のことのように恥ずかしくなってしまう。「こんなこと（王様たちのペテンぶり）に出くわしたのは初めてだった。自分が人間であることを恥ずかしく思うのに十分だった」（“Well, if ever I struck anything like it, I’m a nigger. It was enough to make a body ashamed of the human race”）（210）。王様たちのペテンぶりに、自分が人間であることが恥ずかしくなった、というのだから、ハックのその気持ちの純粋さには驚嘆する。同じ人間として、王様のような人間がいるということ、そしてまた自分も人間であるということが、人間の一人として恥ずかしい、というのである。ハックのこの感性がすばらしい。この瑞々しい感性があるからこそ、そして彼の「心の真実」がこれをよりどころとして生まれてきているからこそ、彼の「心の真実」は信用できるのである。

ハーヴェーとウィリアムに成り済ました王様と公爵の2人は実に巧みに村人たちを、そしてジョージの3人の娘たちを騙し、ピーターがジョージの娘たちに遺産として与えようとしていた財産を巻き上げてしまおうとする。いや、そればかりではない。その手始めとして、ピーターが屋敷の地下に隠しておいた金貨6千ドル（実際には415ドル不足していたのだが）をも奪ってしまった。ところが騙されているジョージの娘たちのなんと純真なことか。この一連の事件は、ハックの心の琴線に自然に響いて来、彼の心の憐憫の情をかき立てる。「俺はあいつ（王様）が彼女から彼女の金を盗むままにさせている」（“I’m letting him rob her of her money”）（225）と、繰り返し繰り返し自分を責め、「あの娘たちのために必ずあの金を手に入れてやる」（“I’ll hive that

money for them or bust”）（225）と決心し、実行する。

ハックは決して倫理観とか道徳といったものによって決断する少年ではない。彼は自分の感性、心によって決断する少年である。このことについて亀井俊介氏は語る。

『ハックルベリー・フィンの冒険』の小説としての第二の魅力として強調したいのは、常に受動的に生き、自分の正体をくまますことによって辛うじて存在を保ってきた主人公が、追いつめられた状況の中から人間本来の正義感を自覚し、そのために自分の存在をかけるという積極的な生き方に転じていく過程にあると言えるように思う。ハックがジムに向かって、「おらたちに追手がかかっている！」と叫んだとき、いろんな社会的制約を忘れて、本能的な「心」が彼を動かしていた、という私の思いは既に述べた。だがその後、彼はつとめてハートを抑え、まわりの悪者たちに「好きなようにやらせ」で生きている⁶⁾。

亀井氏もハックは「心」によって決断する少年であると語っている。しかし、氏と私との間にはこの辺の解釈について微妙な違いがあるように思われる。私が氏の言葉の中で引っかかるのは、「常に受動的に生き、自分の正体をくまますことによって辛うじて存在を保ってきた主人公が、追いつめられた状況の中から人間本来の正義感を自覚し、……」の部分である。果たしてハックは危機に出会うまでは「常に受動的に生き、自分の正体をくまますことによって辛うじて存在を保ってきた」少年なのだろうか。氏の解釈に対する疑問についてはこの後で、氏の定義するハックの「心」と、私の定義するハックの「心の真実」の相違の問題に絡めて考えてみようと思う。

ハックの強い決断と運の良さなどもあって、ことはハックの思惑通りになり、ジョージの3人の娘は、ピーターから譲り受けた全ての遺産を、王様と公爵から取り戻す。そして王様と公爵は再び元の放浪生活を強いられることになる。さまざまなペテンに失敗し、万策尽き果て、さっぱり金に縁のなくなった王様と公爵の2人は、ついにジムを逃亡奴隷としてフェルプス農場に売ってしまう。

ハックの「心の真実」の真価が遺憾なく発揮されるのはこの時である。ジムがフェルプス農場に売られた、ということを知ったとき、ハックの心は二分され、「事実の真実」と「心の真実」との板挟みにあい、煩悶する。一つの心がハックに語る。ジムの所有者であるミス・ワトソンに手紙を書き、懸賞金を払ってジムを取り戻してもらおう。どうせ奴隷の身分でいなくてはならないとするなら、家族と一緒にいるほうがジムにとってはずっといいだろう、と。ハックがこのように行動しようと決意した根拠は、要するに、自分は何の罪もない年老いたワトソンからジムを盗んだも同然のことをしている。なぜなら、自分はジムが逃亡奴隷であることを十分承知していながら、そのことをワトソンに知らせようともせず、ジムが自由の身になることを手助けしているのだから。神はそのことを天から見て知っている。神はこのような邪な行為を許すはずがない。盗みは断じて許されることではない⁷⁾。しかしもう一つの心がハックに語る。「もしジムをワトソンに返したらどうということになるだろうか。彼女はジムが逃げたことに腹を立て、彼を悪い奴、恩知らずな奴、と恨み、売り飛ばしてしまうかも知れない。いや、たとえこのような扱いを免れたとしても、同じような惨めな思いをするかも知れない。つまり、他のみんながジムを恩知らずの人間と軽蔑し、絶えずそのことを彼に思い出させるかも知れない」と。ハックのこのような思いには、ジムに対する愛がある。ジムはハックを世界で一番の友達と言ひ、すっかりハックを信じている。このようなジムを裏切ってはならない。前者は神の目、社会の目から見た事実である。盗みは神によって強く戒められている悪である。故に「事実の真実」である。後者はハックの感性がその中心にある。ジムに対する強い思いが主体となっている。故に「心の真実」である。前者の「事実の真実」が求めていることは、ジムをミス・ワトソンに引き渡すこと。しかし、これはジムを裏切ることになる。後者の「心の真実」が求めていることは、ジムが自由の身になることを手助けすること。しかしこれは神を裏切ることになる。どちらを取っても裏切ることになる。「際どいところだった。……俺は震えていた。だって、2つのうちのどちらかに決めなければならなかったのだ」(“It was a close place. … I was

a trembling, because I’d got to decide, forever, betwixt two things”) (270)。ハックはどちらを選んだらうか。「事実の真実」か「心の真実」か。ハックの態度は常に決まっている。「事実の真実」と「心の真実」との二者択一を迫られると必ず「心の真実」の方を選ぶ。「よろしい、それでは俺は地獄に行こう」(“All right, then, I’ll go to hell”) (271) と言って、ハックは地獄に行くことを選ぶ。「地獄に行くという考えは恐ろしい考えであり、言葉だった」(“It was awful thoughts, and awful words”) と思ってもびくともしない。その決断ぶりは、とても14歳の少年のものとは思われない。

… but they (awful words) was said. And I let them stay said ; and never thought no more about reforming. I shoved the whole thing out of my head ; and said I would take up wickedness again ; which was in my line, being brung up to it, and the other warn’t. And for a starter, I would go to work and steal Jim out of slavery again ; and if I could think up anything worse, I would do that, too ; because as long as I was in, and in for good, I might as well go the whole hog. (271)

しかし、その言葉は言われちゃったんだ。そして、俺はそれを言われたままにしておき、決して取り消したりはしなかった。俺は頭の中から全てを押し出した。そして再び邪なことを始めよう、と言った。それこそが俺の進むべき道だ。そのように育てられているもんだから。その反対じゃあ駄目なんだ。そして、手始めに徐々にやって、またジムを奴隷の状態から盗み出すんだ。で、もっと悪いことを思いついたらそれもやるんだ。どうしてかって、悪に染まって永遠にその中にいるんだとしたら、徹底的にやるのがいいだろうから。

この決断ぶりはすごい。「徹底的にやる」とハックは言う。自分自身で決断し、自分自身で実行に移す。これができるのは、他人からの強制ではなく、自分の心に忠実だからである。まさに

「心の真実」に基づいて行動しているからである。

この箇所のエピソードに関して前出の亀井俊介氏は語る。「しかし、やがて『良心』と『ハート』との真の対決の時が来る。それは2人の悪党にジムを売り払われてしまった時のことである」。氏はハックの「ハート」を本能的なものと見ている。「ハックは本能的な『ハート』にかられて……」。そして「良心」を、学校や教会の教え、そして世間の常識であると見ている。『『良心』は、ずっと大きな社会的重みを持っている。学校や教会の教えが世間の常識にそむき、また結局は自分に親切にしてくれていたミス・ワトソンを裏切って、逃亡奴隷を助けるようになったことで、彼は『良心』の呵責を感じるのである⁸⁾。とすると、私が言うハックの「心の真実」は、氏が言うハックの「ハート」、「事実の真実」は「良心」ということになるのだろうか。

確かにこの場面に関しては、氏の言うハックの「ハート」は私の言う「心の真実」であり、氏の言う「良心」は私の言う「事実の真実」であるように思われる。しかし、氏と私との間にはかなり大きな差がある。というのは、氏の言う「ハート」あるいは「良心」は、ジムとの関係に於て強く意識されている概念である。このことは、氏がハックの「ハート」は、11章で逃亡奴隷の身となり高額の懸賞金が賭けられているジムに、追手が迫っていることを知ったハックが、ジムに対して「ジム、起きろ、頑張るんだ！ 一刻の猶予もない。奴らが俺達の後を追っている」(“Git up and hump yourself, Jim! There ain’t a minute to lose. They’re after us!”) (75) と叫んだ場面を取り上げ、「ここで注目したいのはこの『おらたち』である。これはもちろんジムとハックの2人を指す。本当は追手がかかっているのはジムだけなのだが、ハックは我知らずジムと自分の運命を一緒にしてしまったわけである。……夢中の際の本能的な「心（ハート）」が、逃亡奴隷を助けてはいけない、という『良心』を忘れさせ、こういう叫びを生んだことは否定できないだろう。そしてこのことがハックの旅を、単なる『脱走』から自由の『探求』へと変える転機ともなるのである」と語っているところに明らかである。つまりジムを意識したときに、氏の言う「ハート」「良心」という概念が現れる、ということらしいが、私の言うハッ

クの「心の真実」は、ジムだけに限らず、あらゆる人に対して現れる、というものである。具体的には、私の言うハックの「心の真実」は、ジムの身に追手が迫っていることを知った2人が、ミシシッピ河を筏で逃亡していく途中で出会った難破船内の殺人未遂事件の時に初めて現れる、というのである。

つまり、逃亡の旅に出て10日目、2人は大嵐に遭う。雷が鳴り稲妻が走り、激しく雨が降る。やがて行く手に1隻の難破船が浮かび上がってくる。ハックはジムを誘って難破船に乗り込む。折しも難破船の中では殺人事件が起こりつつある。3人からなる強盗団が仲間割れを起こし、ビルとジェイク・パッカードという2人の男がジム・ターナーをピストルで殺そうとしている。しかし自らの手で殺すのはちょっと抵抗がある、ということで、難破船の中に置いてけぼりにするということになる。やがて難破船は沈み、ターナーもその船と運命を共にするであろうから、というわけである。このことを盗み聞きしたハックは、彼らのボートを奪って（自分たちの筏は流されてしまっていたので）、難破船を後にする。しかしハックの心中は穏やかではない。「たとえ殺人者であろうと（彼らは他にも殺人事件に関係しているらしい）、あのような目にあう（難破船に取り残される）ことは、どんなに恐ろしいことだろうか、と俺は考え始めた」(“I begun to think how dreadful it was, even for murders, to be in such a fix”)

(87)。そこでハックは、3人を救出する策を考え始める。岸に着くといろいろ知恵を絞って、その難破船に救援隊を向かわせるようにし、自分もその難破船に駆けつける。しかし、時すでに遅し。難破船は水浸しになっていて、3人が生きている気配はない。一瞬何とも言えない悲しみがハックを襲う。「俺は強盗団に対して少々気が重くなった。でも大したことはないさ。あの2人にだってそれ（ターナーを殺そうとしたこと）に耐えられたんだから、俺にだってできるだろう」(“I felt a little bit heavy-hearted about the gang, but not much, for I reckoned if they could stand it I could”) (91)。強盗団に対してこのような同情心を起こしているものこそ、ハックの「心の真実」である、と私は考えている。このことを発端としてハックの「心の真実」は、この事件以外で

も頻繁に現れてくる。とすると、亀井氏の「ハート」とはかなりの差があるように思われる。つまり氏の「ハート」「良心」は、主としてジムに関して現れるものであり、私の「心の真実」「事実の真実」は、ジムを初めとしてあらゆる人々に関して現れるものである。このように考えてみると、ハックが「常に受動的に生き、自分の正体をくまますことによって辛うじて存在を保ってきた」少年であるとはどうてい思えないのである。このことの追究は更に（其の3）の中で語り継いでゆこうと思う。

《註》

- 1) 犬養 孝、『万葉のこだま』（京都、PHP、1983）、pp. 226—227
- 2) 岩崎 健、ハックの「事実の真実」と「心の真実」との闘い（其の1）（『研究論集21号』、全国高等専門学校英語教育学会、2002）
- 3) ライオネル・トリリングは、その論文「アメリカの現実」（1984）の中で次のように語る。「セルバンテスは手でさわることのできるリアリティは結局は本当のリアリティではないと示し始める。本当のリアリティというのは、むしろドンの激しく気違いじみて空想する心である」。私も氏の意見に同意する。
- 4) 『ハックルベリー・フィンの冒険』の中に、「心の真実」と「事実の真実」との対決を見ようとする私の読み方はあながち間違いでもなさそうな気がする。
- 「彼（マーク・トウェイン）は、自分を忘れるほどに自分の奥底からの「真実」をつかみ出す仕事に没頭した。何が「真実」か、——自分の、そして人間の「真実」の姿は何であるのか。その解答を彼は求めた。……いっそう激しく「真実」を探求する意欲の輝きを発したと言えよう——真の「自由」はあるのか、真の「人間」はどこに存在しうなのか……」。このような思いから、この作品はできあがったと言う。（亀井俊介『マーク・トウェインの世界』東京、南雲堂、1995、336—337頁）マーク・トウェインが探求したという「人間の『真実』の姿」、これはおそらくハックの「心の真実」として作品の中で結晶しているものであろう。
- 5) Mark Twain, *The Adventures of Huckleberry Finn* (Berkeley, University of California, 1988)。なおこれ以降のこのテキストからの引用はすべてこのように括弧を設け、その中にページ数を記す。
- 6) 亀井俊介、『マーク・トウェインの世界』、東京、南雲堂、1955、371頁
- 7) *ibid.*, 335—336頁
「当時、南部地方では、逃亡奴隷を助けることは社会的にも宗教的にも罪悪であると、学校でも教会でも教えられ、広く信じられていた。（学校にも教会にも行かなかった）ハックのような自然の子でも、そういう社会的な『良心』は身につけさせられていた」という。
- 8) *ibid.*, p. 374

（平成14年5月7日受理）

フォニックスの指導方法について (3)

荒 木 英 彦*

On the Teaching Method of Phonics (3)

Hidehiko ARAKI

The fixed rules exist between spelling and pronunciation of English. It is phonics to read English words aloud by finding the rules. In the general teaching method of phonics, there are many problems. This paper attempts to introduce some of those problems and the more effective teaching method by the solution of those problems.

(Keyword : phonics)

フォニックスの指導方法について (2) の続き

とである。

Part 7 フォニックスの補足説明を必要とする語

[ə] の発音方法

[ə] の発音方法は、そのつづり字のフォニックスに従った発音を弱く発音すればよい。

例 : a [æ] → a [ə] 弱いア

o [ɔ] → o [ə] 弱いオ

u [ʌ] → u [ə] 弱いウ

・drill

a [ə] ← [æ]

a an and than am

as at shall

o [ə] ← [ɔ]

of from

e [i, ə] ← [i:]

the

are [ə] ← [εə]

are

2. 母音字+特定の子音字

《母音字フォニックス I・II 補足》

『母音字の後ろがある特定の子音字の場合、フォニックスに従えば、母音字が短音になるはずなのに、長音になる』

a [ɔ:] all [ɔ:l]

i [ai] child [tʃaɪld]

kind [kaɪnd]

1. 弱音化する語

《母音字フォニックス補足》

『一音節の冠詞、前置詞、接続詞、助動詞、be 動詞の母音字は弱音化する場合がある』

フォニックスに従った発音 弱音化した発音

and [ænd] → [ənd]

of [ɒv] → [əv]

the [ði:] → [ði], [ðə]

are [εə] → [ə]

・指導上の留意点

一音節語である冠詞、前置詞、接続詞、助動詞、be 動詞の母音字は、フォニックスに従った場合の発音の、アクセントがなく短い音になることがあり、たとえば、「and」の発音はフォニックスに従うと [ænd] となるが、[ənd] となることが多いことなどを説明する。そして母音字「a」の発音が [æ] から [ə] とアクセントがない弱く短い音になることを弱音化ということを説明する。

大切なことは、ここででてくる新しい発音記号である [ə] について以下のように説明し、つづり字によって発音方法が異なるので、つづり字に注意することが必要であることを強調しておくこ

- night [nait]
 o [ou] old [ould]
 most [moust]
 both [bouθ]
- ㊦ 1. 「a」の場合の長音は [ei] ではなくて [ɔ:] になる。
 2. 「al」が [ɔ:] と発音される場合は、「l」は黙字になることが多い。
 例: talk [tɔ:k]
 3. wind(風)は [wind]、cost は [kɔ(:)st] と発音する。

・指導上の留意点

母音字の後ろがある特定の子音字である場合、フォニックスに従えば、母音字が短音になるはずの語のなかに、長音になる語があることを説明し、特に母音字の後ろが「l」を含む子音字の語に多いことに注目させる。

・drill

al [ɔ:]				
talk	walk	chalk	salt	false
all [ɔ:]				
all	ball	fall	hall	tall
wall	small	call		
ild [ai]				
wild	child			
ind [ai]				
find	kind	mind	wind	grind
igh(n) [ai]				
high	thigh	sigh	sight	tight
night	knight	fight	light	flight
right	bright	sign		

㊦上の語の「gh」または「g」は黙字。

old [ou]				
old	gold	hold	cold	scold
oll [ou]				
roll				
ost [ou]				
host	ghost㊦	post	most	
oth [ou]				
both				

3. W(h)+a, ar, or

《母音字フォニックス I・VII補足》

『「w(h)」に続く「a, ar, or」は特別な音になる』

w(h)+a [ɑ, ɔ(:)]

w(h)+ar [ɔ:ɹ]

w(h)+or [ə:ɹ]

・指導上の留意点

母音字の発音を説明し、「w」または「wh」まで含めた発音で覚えさせるとよい。また「qu」に続く場合も同様だが、ここでは説明しなくてもよい。

・drill

w(h)a [wɑ, wɔ(:)]

what want wash watch

war [wɔ:ɹ]

war warm

wor [wə:ɹ]

word work worm world worst
 worth worse

4. 分離した二重母音字

《母音字フォニックスVI補足》

『二重母音字が2つの母音で発音される場合がある』

ea→e [i:] + a [ə] → [í:ə]

eo→e [i:] + o [ə] → [í:ə]

eu→e [i:] + u [ə] → [í:ə]

ia→i [ai] + a [ə] → [áiə]

ie→i [ai] + e [ə] → [áiə]

io→i [ai] + o [ə] → [áiə]

oe→o [ou] + e [ə] → [óuə]

・指導上の留意点

二重母音字がひとつの母音でなく2つの母音で発音される場合があることと、その場合は「長音＋弱音」になることを説明し、具体的な発音を覚えさせながら、弱音について復習させるとよい。

・drill

ea [í:ə]

real

ia [áiə]

giant

ie [áiə]

quiet

science

io [áiə]

lion

oe [óuə]
poem

5. 母音字 + r + 母音字

《母音字フォニックスⅦ補足》

『「母音字 + r」の後ろに、さらに母音字が続く場合はフォニックスと異なる発音になる』

フォニックスに従った発音

ar + 母音字 [ɛər + 母音] ← ar [ɑ:ɹ]
er + 母音字 [íər + 母音] ← er [ə:ɹ]
ir + 母音字 [áiər + 母音] ← ir [ə:ɹ]
or + 母音字 [ɔ: r + 母音] ← or [ɔ:ɹ]
ur + 母音字 [júər + 母音] ← ur [ə:ɹ]

・指導上の留意点

以下の例を提示し、「母音字 + r + 母音字」の発音は「母音字 + r + e」の発音の最後の [ɹ] が、次に母音字があるために子音の [r] になったと説明すると覚えさせやすい。

care [kɛəɹ]
→ parent [pɛərənt]
here [hiəɹ]
→ period [píəriəd]
fire [fáiəɹ]
→ iris [áiəris]
more [mɔ:ɹ]
→ story [stɔ:ri]
pure [pjueɹ]
→ during [djúəriŋ]

覚え方

are [ɛəɹ]
→ ar + 母音字 [ɛər + 母音]
ere [iəɹ]
→ er + 母音字 [íər + 母音]
ire [áiəɹ]
→ ir + 母音字 [áiər + 母音]
ore [ɔ:ɹ]
→ or + 母音字 [ɔ: r + 母音]
ure [juəɹ]
→ ur + 母音字 [júər + 母音]

・drill

ar + 母音字 [ɛər + 母音]
parent(s)
er + 母音字 [íər + 母音]
series hero zero

ir + 母音字 [áiər + 母音]

iris iron[㊦]

㊦「o」は発音されないので、例外的な発音になる。

or + 母音字 [ɔ: r + 母音]

orange[㊦] 1 forest[㊦] 2 story[㊦] 3 chorus

㊦ 1. 「a」は [i] と発音される。

2. 「e」は [i] と発音される。

3. 「y」は [i] と発音される。

ur + 母音字 [júər + 母音]

during

・drill—不規則動詞の変化（５）

原形	過去形	過去分詞形
A	B	An
be [am, is, are]	was, were	been
fall	fell	fallen
A	B	B
light	lighted, lit	lighted, lit
find	found	found
wind	wound	wound
grind	ground	ground
hold	held	held
sell	sold	sold
tell	told	told

Part 8 フォニックスの例外語

1. 母音字フォニックスⅠ・Ⅱの例外語

『フォニックスに従えば短音になるはずの語で、他の音になるものがある』

・指導上の留意点

単語の終わりが「母音字 + 子音字」の場合は、その母音字はフォニックスに従えば短音になるはずだが、他の音になることを説明し、母音字の後ろの子音字に注目させる。そして母音字の発音はその後ろにある子音字の影響を受けていることを理解させる。

・drill

a [ɑ:] ← [æ, ɔ:]

calm[㊦] palm[㊦]

㊦「l」は黙字。

a [ei] ← [æ]

ache[㊦] 1 change strange able table
haste taste waste vague[㊦] 2

これらの語は語尾が「e」で終わっていて、母音字の後ろが子音字 2 個以上なのでフォニックス I に従うはずだが、フォニックス V に従った音になる。

①「ch」は [k] と発音される。

2. vague は母音字フォニックス I の例外語ではないが、「gu」は [g] と発音され、「a」は [ei] と発音される。

i [ai] ← [i]

climb Christ^①1 ninth isle^②2

①「ch」は [k] と発音される。

2. 「s」は黙字。

o [ʌ] ← [ɑ/ɔ]

son ton tongue^① front month

①語尾の「ngue」は [ŋ] と発音される。

o [wa] ← [ɑ/ɔ]

once

o [u] ← [ɑ/ɔ]

wolf

o [ou] ← [ɑ/ɔ]

comb folk^① won't noble

①「l」は黙字。

o [u:] ← [ɑ/ɔ]

whom^① tomb

①「wh」は通常 [hw] となるが、「o」[u:] の前では [h] となる。

u [u] ← [ʌ]

put bush push bull full
pull

u [u:] ← [ʌ]

truth

2. 母音字フォニックスIV・Vの例外語

『フォニックスに従えば長音になるはずの語で、他の音になるものがある』

・指導上の留意点

単語の終わりが母音字の場合や「母音字+子音字(1個)+e」の場合は、その母音字はフォニックスに従えば長音になるはずだが、他の音になることがあることを説明し、特に「母音字+v+e」の語が多いことに注目させる。

・drill

(1) 母音字フォニックスIVの例外語

i [i:] ← [ai]

ski

o [u:] ← [ou]

do to two^① who^②

①「w」は黙字。

2. 「wh」は通常 [hw] となるが、「o」[u:] の前では [h] となる。

(2) 母音字フォニックスVの例外語

a [æ] ← [ei]

have

i [i] ← [ai]

live^①

①live は形容詞の場合は [laiv] と読む。

i [i:] ← [ai]

suite^①

①「su」は例外的に [sw] と発音される。

o [ʌ] ← [ou]

come some none love glove

o [wʌ] ← [ou]

one

o [u:] ← [ou]

lose whose^① move grove prove

①「wh」は通常 [hw] となるが、「o」[u:] の前では [h] となる。

3. 母音字フォニックスVIの例外語

『フォニックスと異なる発音になる二重母音字を含む語がある』

・指導上の留意点

二重母音字を含む語のなかで、フォニックスと異なる発音になる語があることを説明するとともに、フォニックスに該当しない二(三)重母音字を含む語もあることを付け加える。

・drill

ai [ai] ← [ei]

aisle^①

①「s」は黙字。

ay [i:] ← [ei]

quay^①

①「qu」は [k] と発音される。

au [æ(:)] ← [ɔ:]

aunt laugh^① draught^②

①「gh」は [f] と発音される。

ea [ei] ← [i:, e]

break steak great

ea [í(:)ei] ← [í:ə]

create

eigh [ai] ← [ei]

height

ei [i:] ← [ei]

seize

ey [i:] ← [ei]

key

ew [ou] ← [ju:]

sew

ie [e] ← [i:]

friend

oa [ɔ:] ← [ou]

broad

oe [u:] ← [ou]

shoe

oo [ʌ] ← [u, u:]

blood flood

oo [ou] ← [u, u:]

brooch

ou [ə, u] ← [au]

could would should

㊦これらの語の「l」は黙字。

ou [ou] ← [au]

soul though dough

ou [u:] ← [au]

you soup group wound through

rouge route

ou [ɔ:] ← [au]

cough㊦ ought thought

㊦「gh」は [f] と発音される。

ui [i] ← [u:]

build

ui [u(:)i] ← [u:]

ruin

ao [éiə]

chaos㊦

㊦「ch」は [k] と発音される。

eo [i:]

people

uy [ai]

buy

owe [ou]

owe

eou [ou]

Seoul

eye [ai]

eye

iew [ju:]

view

4. 母音字フォニックスⅧの例外語

『フォニックスと異なる発音になる「二重母音字 + r」を含む語がある』

・指導上の留意点

「二重母音字 + r」を含む語のなかで、フォニックスと異なる発音になる語があることを説明し、それらは読み間違えることが多い語であることを注意させる。

・drill

ear [ɛə] ← [iə, ə]

bear pear wear

ear [ɑ:ɹ] ← [iə, ə]

heart

our [uə] ← [áuə]

tour yours

5. 子音字フォニックスⅡの例外語

『「g」はフォニックスと異なる発音になる場合がある』

・指導上の留意点

「g」は子音字フォニックスⅡに従えば、後ろに「i(y)」が続く場合には [dʒ] となるが、[g] となる場合が多いことを説明し、例外語が基本的な語に多いことに注意させる。

・drill

get gear gift girl give㊦

㊦give は母音字フォニックスⅤの例外語でもある ([ai] → [i])。

・drill—不規則動詞の変化(6)

原形	過去形	過去分詞形
A	— A	— A
put	put	put
A	— B	— A
come	came	come
A	— B	— An
give	gave	given
A	— B	— B

have [has]	had	had
win	won [ʌ]	won [ʌ]
lose	lost [ɔ:]	lost [ɔ:]
say	said [e]	said [e]
build	built	built
buy	bought [ɔ:]	bought [ɔ:]
seek	sought [ɔ:]	sought [ɔ:]
fight	fought [ɔ:]	fought [ɔ:]
think	thought [ɔ:]	thought [ɔ:]
bring	brought [ɔ:]	brought [ɔ:]
A	—	B — Bn
get	got	gotten, got
break	broke	broken
A	—	B — C
do [does]	did	done [ʌ]
go	went	gone [ɔ:]
bear	bore	born
wear	wore	worn

・その他指導をする必要のある事項

Part 8 までの説明で一通りのフォニックスについての説明ができたが、まとめと確認の意味で、以下のことを指導するとフォニックスをより効果的に身につけることができる。

(1) 「ア」と聞こえる音

次の発音記号で表される音は、日本語のカタカナでその発音を表すと、すべて「ア」となる。しかし 5 つともすべて異なる音である。そのためこの 5 つの音をきちんと区別して覚える必要がある。

発音記号	発音	おもな該当するつづり字
[æ]	「ア」と「エ」の中間音 「エ」の口で「ア」	「a」
[ʌ]	「ア」	「u」
	ほぼ日本語の「ア」と同じ	
[ɑ]	「ア」と「オ」の中間音 一番口を大きく開けて「オ」	「o」
[ə]	弱い「ア、イ、ウ、エ、オ」 つづり字によって異なる音 (アクセントがない母音字)	「a, o, u」
[əʊ]	こもった音の「ア」 「ウ」の口で舌先を丸めて「ア」	「er」

(2) 注意すべき子音字

1. 「ch」

- ① [tʃ] chair change
- ② [k] chorus ache Christ

chaos Christmas

- ③ [ʃ] machine

2. 「gh」

- ① 通常は (語末や後ろが「t」の場合は) 黙字になる。この場合、「gh」の前のアクセントをもつ母音字はフォニックスに従わない音になる場合が多い。

[x] high eight

- ② 語頭にある場合は [g] となる。この場合は「h」は黙字になる。

[g] ghost

- ③ 語末にある場合は [f] となる場合がある。

[f] laugh cough enough

3. 「th」

- ① 語尾では [θ]、ただし「with, smooth」は例外

- ② 語尾の「ths」は「mouths, bath」[ðz] を除きすべて [θs]

4. 「gu」

- ① 通常は [g]

guest guess guide guard

- ② 例外的に [gw] (「ngu」)

language

- ③ 語尾の「gue」は [g]

league vague

例外: tongue [tʌŋ]

5. 「qu」

- ① 通常は [kw] quite

- ② 例外的に [k] quay

- ③ 語尾の「que」は [k] unique

6. 黙字

子音字フォニックス V に該当するつづり字は黙字になる。そして次に挙げられたつづり字は例外的に黙字となる (通常は黙字ではない)。

- ① c muscle

- ② h rhythm ghost

- ③ al の l half talk walk
chalk calm palm

- ④ ol の l folk

- ⑤ p corps

- ⑥ sl の s isle aisle

- ⑦ st の t castle whistle

- ⑧ w two sword

⑨ 子音字フォニックス V に該当するつづり字

語頭にある kn の k	knock	know
語頭にある wr の w	wrong	write
語末にある bt の b	debt	doubt
語末にある gh(t)の gh	high	eight
語末にある gn の g	sign	reign
語末にある mb の b	bomb	climb

(3) 同音異義語

発音が同じで、つづり字・意味は異なる語を同音異義語という。これまでに drill で提示した語のなかから同音異義語をまとめると次のようになる。

[ail]	aisle (名)通路
	isle (名)小島
[εəγ]	air (名)空気
	heir (名)相続人
[bεəγ]	bare (形)裸の
	bear (動)産む (名)熊
[bau]	bough (名)大枝
	bow (名)おじぎ
[breik]	brake (名)ブレーキ
	break (動)こわれる
[blu:]	blew<blow (動)風が吹く
	blue (形)青い
[sent]	cent (名)セント (貨幣単位)
	sent<send (動)送る
	scent (名)香り
[diər]	dear (形)親愛な
	deer (名)鹿
[dju:]	dew (名)露
	due (形)当然の
[dai]	die (動)死ぬ
	dye (動)染める (名)染料
[fεəγ]	fair (形)公平な
	fare (名)料金
[flauəγ]	flour (名)小麦粉
	flower (名)花
[faul]	foul (形)きたない (名)不正
	fowl (名)鳥類
[gest]	guest (名)客
	guessed<guess (動)推測する
[hiər]	hear (動)聞く
	here (副)ここに
[hi:l]	heel (名)かかと
	heal (動)いやす

[hou]	hole (名)穴
	whole (形)全体の
[nait]	knight (名)騎士
	night (名)夜
[ki:]	key (名)鍵
	quay (名)波止場
[meid]	made<make (動)作る
	maid (名)メイド (お手伝い)
[meil]	mail (動)郵送する (名)郵便
	male (名)男 (形)男の
[mi:t]	meat (名)肉
	meet (動)会う
[nou]	know (動)知っている
	no (副)いいえ
[wʌn]	one (形)1つの
	won<win (動)勝つ
[pi:s]	peace (名)平和
	piece (名)一片
[pεəγ]	pair (名)1組
	pear (名)ナシ
[plein]	plain (形)平らな
	plane (名)飛行機
[rein]	rain (名)雨 (動)雨が降る
	reign (動)支配する
[reiz]	raise (動)上げる
	rays<ray (名)光線
[red]	read<read (動)読む
	red (形)赤い
[rait]	right (形)正しい
	write (動)書く
[roud]	road (名)道路
	rode<ride (動)乗る
[ru:t]	root (名)根
	route (名)行程
[roul]	roll (動)ころがる
	role (名)役割
[seil]	sale (名)販売
	sail (動)航海する
[si:n]	scene (名)光景
	seen<see (動)見る
[si:]	sea (名)海
	see (動)見る
[si:m]	seam (名)縫い目
	seem (動)～と思われる

[sou]	sew (動)縫う
	sow (動)種子をまく
[soul]	sole (名)靴の底 (形)ただひとつの
	soul (名)魂
	Seoul (名)ソウル
[sʌm]	some (形)いくつかの
	sum (名)合計
[sʌn]	son (名)息子
	sun (名)太陽
[steəɪ]	stair (名)(階段・はしごの) 段
	stare (動)じっと見る
[sti:l]	steal (動)盗む
	steel (名)鋼鉄
[swi:t]	suite (動)一組、スイートルーム
	sweet (形)甘い
[teil]	tale (名)話
	tail (名)尾
[θru:]	threw<throw (動)投げる
	through (前)～を通して
[wei]	way (名)道、方法
	weigh (動)～の重さがある
[weit]	wait (動)待つ
	weight (名)体重
[wi:k]	weak (形)弱い
	week (名)週
[wud]	wood (名)木
	would<will (助)～するつもり

⑨イギリス英語とアメリカ英語では発音は同じで、綴りが異なる語がいくつかある。

[grei]	gray (米)
--------	----------

	grey (英)
[plau]	plow (米)
	plowgh (英)
[draɛft]	draft (米)
	draught (英)

(4) 発音記号一覧

いままで使用してきた発音記号をまとめて一覧表等にして復習するとよい。

5. 最後に

フォニックスの指導は特に英語学習の導入部分において大変役に立つものである。そこで今回提示した指導例を英語入門期のフォニックス指導や発音指導にぜひ役立てもらいたい。

しかし、フォニックスは万能ではなく、その有効範囲(単語数)はあまり広くない。有効範囲を広げるためには補足の説明や例外語のピックアップ等が必要である。そしてより多くの語(2音節以上の語)にフォニックスを応用できるようにするためには、アクセントの位置に関する知識が必要になってくる。

そのため、今後はアクセントの位置についての調査・研究をしていきたい。またその効果的な指導法も考えてみたい。

6. 参考文献

- 1) A. W. ハイルマン：「フォニックス指導の実際」玉川大学出版部
- 2) 成田義光他：「発音・綴り・語形成」講座・学校文法の基礎研究社

(平成14年6月12日受理)

日本語データ圧縮法に関するカオス応用の検討

平 尾 友 一*

A Consideration to Applying the Chaos to a Data Compression of Japanese Text

Yuuiti HIRAO

I considered a data compression method of digital data, especially Japanese text data being processed in computers and communication equipment. The Japanese language has from the sixth to the eleventh largest speakers in the world, that is to say, more than 1,2 hundred million men speak it. Therefore it is certain that a high performance data compression method, in particular, the one made for Japanese text, will be much demanded.

In this report, Firstly I calculated entropies and made another analyses of the simple chaos, and secondly analyzed and considered a data compression method by using the chaos. To obtain statistical data, I analyzed the “TENISEI JINGO” of the Asahi Shimbun (The Asahi Shimbun Company) of 1,292 days as a typical Japanese text data which I thought.

(Keywords : Japanese Text, Data Compression, Chaos, One Dimensional Mapping)

1. まえがき

コンピュータ、通信機器において扱われるデジタル・データの内、日本語文字データに関し、その圧縮法を考察する。世界の言語人口の多さを考える時、様々な調査があるが、日本語は第6～11位に位置する。Internetの世界だけを考えると英語に次いで第2位という調査もある。また、0歳児からを含めた日本人の総人口は現在120,000,000人余りであり、日本語を使用する人間の絶対数は全世界ではその値とほぼ同数であるとされる。この事から日本語文字データに特化した高能率のデータ圧縮法に対し、ある程度の需要が見込めると考えられる。

本報告ではまずエントロピ[1]を求める等の情報理論的な解析を簡単なカオス[2]に対して行い、次にそのカオスを利用したデータ圧縮法につき解析、考察した。また、日本語文字データの統計的性質を得る為に日本語文として比較的典型的と思われる朝日新聞(朝日新聞社)「天声人語」を用いた。

期間:平成10年8月5日～平成14年6月19日の内

日数:1,292日分

総文字数:941,091文字(仮名、漢字等)

File Size:1,931,923[Bytes]

2. 解析方法

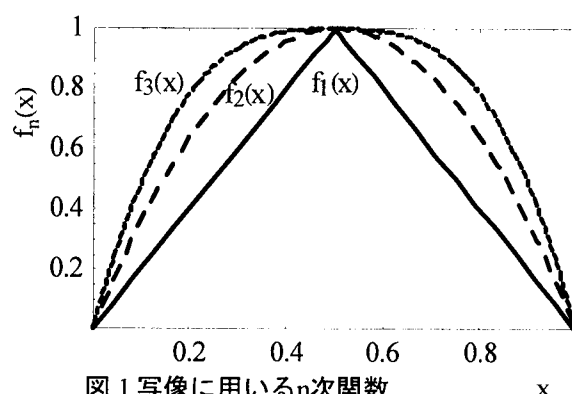


図 1. 写像に用いるn次関数

本解析は米Wolfram Research社の科学技術計算ソフトウェアMathematica Ver. 3.0[3]を用いて行った。Mathematicaでは精度を任意に設定し、計算が行える可変精度計算を採用している。また文献[3]においては「精度(precision)」と「確度(accuracy)」という用語が使用されており、一般に精度は有効桁数で相対誤差の大きさ、確度は小数点以下の桁数で絶対誤差の大きさの表示に用いられるとなっている。本報告中では全て「精度」を用いた。

以下にカオス・データの生成方法について記す。カオス・データを生成させる為の非線形関数として1,2,および3次関数を用いた(図1.)1次元写像を定義する。それぞれの式は式(1)となる。 $f_1(x)$ はテント写像、 $f_2(x)$ はロジスティック写像といわれ

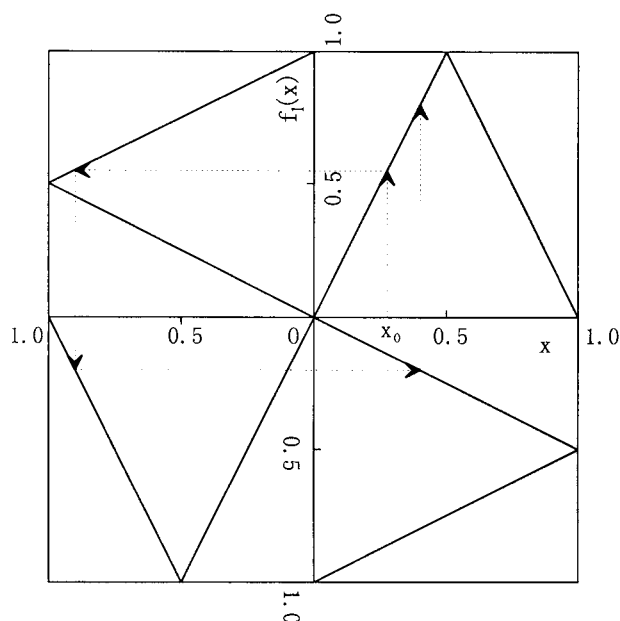


図 2. 1次関数写像による時系列データ $\{x_n\}$ の生成

$$\begin{aligned}
 f_1(x) &= 2x & (0 \leq x \leq 0.5) \\
 f_1(x) &= -2x + 2 & (0.5 < x \leq 1) \\
 f_2(x) &= -4x^2 + 4x & (0 \leq x \leq 1) \\
 f_3(x) &= 8x^3 - 12x^2 + 6x & (0 \leq x \leq 0.5) \\
 f_3(x) &= -8x^3 + 12x^2 - 6x + 2 & (0.5 < x \leq 1)
 \end{aligned} \quad (1)$$

いるものである。まず初期値 x_0 を適当に定め、漸化式(2)を用いて数列 $\{x_n\}$ を作成し時系列データとする。ただし $k=1,2,3$ である。

$$x_{n+1} = f_k(x_n) \quad (2)$$

図2.に1次関数(写像、以下本文では特に必要が無い場合関数とのみいう)によるカオス・データ、す

表 1. 初期値 x_0

①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩
$\frac{1}{4}\pi$	$\frac{1}{5}\pi$	$\frac{1}{6}\pi$	$\frac{1}{7}\pi$	$\frac{2}{7}\pi$	$\frac{1}{8}\pi$	$\frac{1}{9}\pi$	$\frac{2}{9}\pi$	$\frac{1}{10}\pi$	$\frac{3}{10}\pi$

なわち時系列データ $\{x_n\}$ 生成の様子を示す。本報告にて使用した初期値 x_0 は適当な表1.の値であり、精度 $p=\infty$ である(ただし Mathematica の大域変数 $\$MaxPrecision=65536$ と設定[3]してある)。

2.1 時系列データの統計的性質

(1) 精度と時系列データのデータ長

上記の方法にて得られた時系列データ $\{x_n\}$ は理論的にはその不規則性はどこ迄も続くが、その計算過程における精度 p が有限である為、明らか

に不規則性が失われるところがある[4]。数値計算により精度 p と不規則性が失われる迄の $\{x_n\}$ の項数(以下本文ではデータ長 n_r という)を求めた。

(2) 記号の出現頻度、エントロピ

以下の方法にて符号化を行う。 $\{x_n\}$ の各項(データ)の値により符号 "0", "1" を割り当てる方法を

$$0 \leq x_n \leq 0.5 \rightarrow "0"$$

$$0.5 < x_n \leq 1 \rightarrow "1"$$

とし2値系列 $\{c_n\}$ を作成して、これを符号とする。

記号長 $l=1$ 個([bit])単位で1記号(symbol)とし記号 "0", "1" それぞれの個数 f_a を、記号長 $l=2$ [bits] 単位で記号 "00", "01", "10", "11" それぞれの個数 f_a を数えた。同様に記号長 $l=4, 8$ [bits] 単位における記号の出現頻度 f_a を数えた。なお、記号長 $l=2$ [bits] 以上の場合符号の重なりは考慮していない。

次に $\{c_n\}$ のエントロピ H をマルコフ過程(M.P.) を0~最大3次迄として求めた。

(3) 自己相関関数、周波数スペクトラム

$\{c_n\}$ の自己相関関数 $\phi(\tau)$ を求めた。

$\{c_n\}$ をFFTによりフーリエ変換し、その周波数スペクトラムを求めた。

2.2 日本語文字データの統計的性質

(1) 記号の出現頻度、エントロピ

朝日新聞「天声人語」(1,292日分、1,931,923

[Bytes])を解析データとし、記号長 $l=1,2,4,8$ [bits] 単位での記号の出現頻度 f_a を求めた。日本語文字コードはShift-JISコードを用いた。この作業は文献[5]の内容と同じであるが、解析データ量を増やしデータの信頼度を向上させている。また、データ中には、例えば「天声人語」1日分、1記事の最初に半角数字の日付等、その他にも8 [bits] の制御コード等が非同期に含まれている。

2.3 符号化

(1) 時系列データより初期値を求めるプログラム $\{c_n\}$ より初期値 x_0 を求めるプログラムを作成した。

(2) 写像関数の決定

2.2(1)により求めた日本語文字データ中の記号出現頻度 f_a から、符号化に適した写像関数を求めた。

(3) 1次折れ線関数を用いた場合のデータ長(精度)

2.2(2)により求めた関数 $f_k(x)$ による $\{x_n\}$ のデータ長 n_r を解析した。

(4) 符号化とデータ圧縮率の推定

符号化を試行し、データ圧縮率Rを推定した。

3.解析結果

3.1時系列データの統計的性質

(1)精度と時系列データのデータ長

初期精度をMathematicaで機械精度[3]といわれている精度 $p=16$ とし、1次関数 $f_1(x)$ (式(1))を用いて時系列データ $\{x_n\}$ を生成させた。初期値 x_0 は表1.の10通りの値とした。 $\{x_n\}$ の後半は全て0となった。これは x_n の計算の度に精度 p が落ちていく為である。実際、Mathematicaの組み込み関数"Precision[]"[3]により計算結果の精度 $p=0$ である事を確認した。 x_n が連続する0となる、すなわち精度 $p=0$ となる前迄のデータ長 n_r は48~54であった(図3.)。この値は精度 $p=16$ 、すなわち有効桁数が16桁である事から、その数値の仮数部の情報量 $I = \log_2 10^{16} = 53.2$ [bits] (3)の値にほぼ等しい事がわかる。この $\{x_n\}$ の精度 $p=0$ となる迄の、明らかに値が不規則な部分の長さをデータ長 n_r と記す事とする。

次に初期精度 $p=320$ とし $\{x_n\}$ を1000項(符号長 $n=1000$)計算した。関数は1次関数 $f_1(x)$ 、初期値 x_0 は表1.① $\frac{\pi}{4}$ を用いた。 x_n の計算の際に精度 p が変化の様子を図4.に示す。 x_n の計算の度に精度 p が小さくなっている事がわかる。仮に初期値 x_0 の精度 $p=\infty$ としても計算の際の精度 p が有限値であ

れば、精度 p の値は有限値で、減る事はあっても自然に増える事はない。この事は初期値 x_0 の情報量 I が、 x_n の計算の際1度有限値となり、その後は保存されるか、または減るかのどちらかである事を示している。

以下、試みに x_n をデータ・ビット長 m [bits]の離散値とし

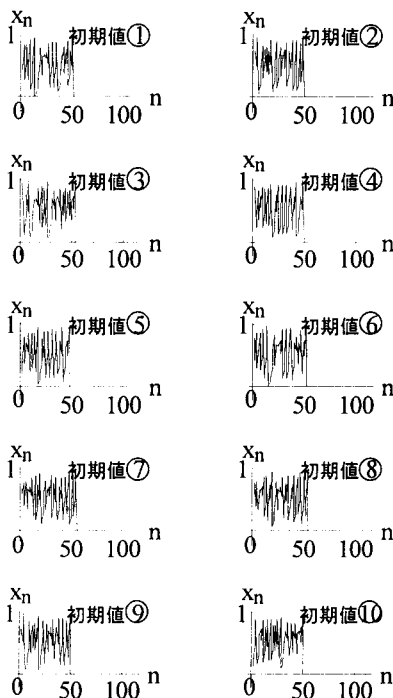


図3. $\{x_n\}$ の生成

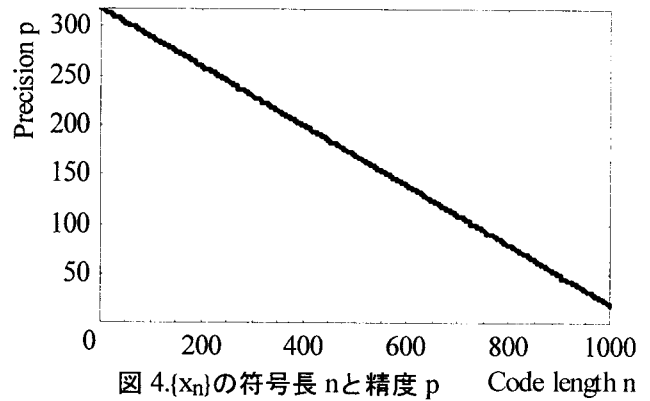


図4. $\{x_n\}$ の符号長 n と精度 p

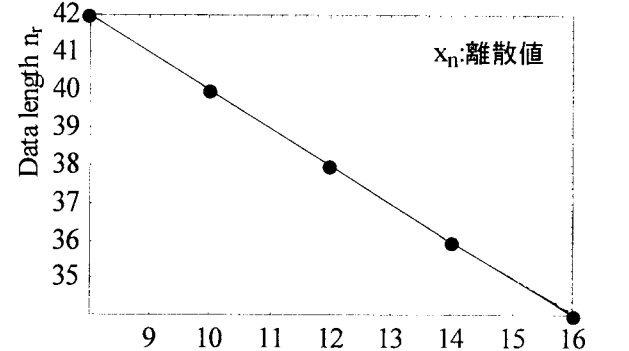


図5. x_n のbit長 m とデータ長 n_r bit length m [bits]

$$\begin{aligned} f_{1d}(x) &= 2x & (0 \leq x \leq 2^{(m-1)} - 1) \\ f_{1d}(x) &= -2x + 2^{(m+1)} & (2^{(m-1)} - 1 < x \leq 1) \end{aligned} \quad (1')$$

て計算した。すなわち初期値 x_0 を $0 \sim 2^m - 1$ の整数とし、関数を式(1')の1次関数 $f_{1d}(x)$ とすると、 x_n の取り得る値も $0 \sim 2^m - 1$ となる事から x_n の離散化が行える($f_1(x)$ (式(1))に対応している)。データ・ビット長 $m=8, 10, 12, 14, 16$ [bits]として $\{x_n\}$ の計算を行い、それぞれの場合のデータ長 n_r を求めた(図5.)。なお、初期値 x_0 は適当な5個の値 $\text{int}(\frac{1}{6}2^m), \text{int}(\frac{3}{8}2^m), \text{int}(\frac{5}{8}2^m), \text{int}(\frac{2}{3}2^m), \text{int}(\frac{5}{6}2^m)$

ただし $\text{int}(\cdot)$ は $\cdot$ の整数部

として計算し、データ長 n_r はその5個の結果中の最大値を採用した。図5.ではデータ・ビット長 m が1[bit]小さくなるとデータ長 n_r も1小さくなっている。この事から1回の計算で1[bit]の情報量が失われて行く事がわかる。

(2)記号の出現頻度、エントロピ

$\{x_n\}$ の各項に対し閾値0.5として符号"0","1"を割り当てる事により符号化を行い2値系列 $\{c_n\}$ とした。この $\{c_n\}$ を1個(記号長1)づつ区切りそれを1記号とし、記号の出現頻度 f_a 、出現確率 p_a [6]、およびエントロピ H [bits/symbol]を求めた。関数は1, 2, および3次関数を用いた。初期値 x_0 は表1.①~

⑩を用い、その10個の計算結果全てを単純につないだものを解析した。初期精度 $p=320$ とし1個の初期値 x_0 につき符号長 $n=1000$ 迄計算した。従って全符号長は $n=1000 \times 10$ 個となる。精度 p は最後迄0とまらない事を確認した。記号長 $l=1, 2, 4, 8$ [bits]とし、出現頻度 f_a をその順位 r 上位から並べた結果を図6.~8.に示す。横軸の出現頻度順位 r 、縦軸の出現頻度 f_a 共にそれらの最大値で除し、規格化をしてある。まず1次関数による写像(図6.)では記号長 $l=1, 2$ [bits]においては記号が均一に出現しているようである。記号長 $l=8$ [bits]となると記号の出現頻度 f_a にばらつきが見られる。2次関数による写像(図7.)では記号長 $l=1$ [bit]迄記号出現頻度 f_a は一樣であり、記号長 $l=2$ [bits]以上で出現頻度 f_a にばらつきが現れる。3次関数による写像(図8.)では記号長 $l=1$ [bit]から出現頻度 f_a にばらつきが現れている。表2.、図9.は $\{c_n\}$ のエントロピ H を示したものである。やはりエントロピ H の値はM.P.の次数が大きくなると、そのM.P.の次数における最大値より小さくなっている事が分かる。ここで記号長 $l=4$ [bits]に対するM.P.の次数 $MP=1$ 迄、記号長 $l=8$ [bits]に対するM.P.の次数 $MP=0$ 迄の計算である。例えば記号長 $l=8$ [bits]の時M.P.1次とすると、実質的に記号長 $l=8 \times 2$ [bits]となりその記号の種類(組合せ数、アルファベット数)は $2^{16} = 65536$ となり解析符号長 $n=10000$ より大きく、その解析結果が意味をなさない。記号長 l 自体の値を8[bits]迄としたのも同じ理由であるが、図6.~8.からわかるように記号長 $l=8$ [bits]とした時出現頻度 f_a にばらつきが現れている。解析符号長 n の値を大きくし、更なる解析が必要と思われる。

(3) 自己相関関数、周波数スペクトラム

図10.に自己相関関数を示す。初期精度 $p=320$ とし $\{c_n\}$ を符号長 $n=1000$ 、関数は1次関数、初期値 x_0 は表1.① $\frac{\pi}{4}$ を用いた。縦軸の自己相関係数の値 $\phi(\tau)$ は分散 σ^2 で除し規格化してある。横軸はタイム・ラグ(隔たり時間) τ で、符号長 $n=1000$ に対しタイム・ラグ $\tau=100$ 迄計算した。この範囲で自己相関はほとんどないと思われる。

また、上記 $\{c_n\}$ をFFTによりフーリエ変換した。 $\{c_n\}$ の周波数スペクトラムを図11.に示す。縦軸は各周波数成分の絶対値 $|F(k/N)|$ 、横軸は周波数 k である。図11.から周期性は見られない。

3.2 日本語文字データの統計的性質

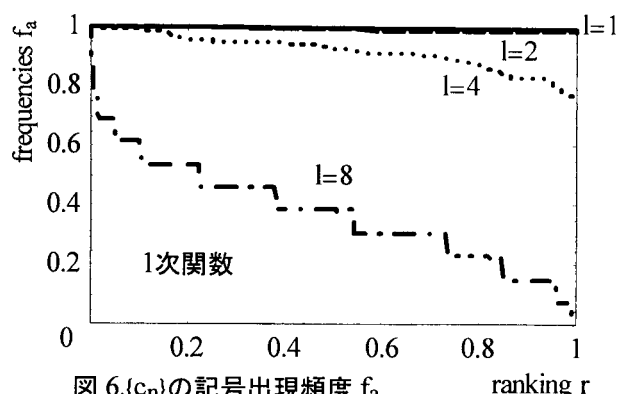


図 6. $\{c_n\}$ の記号出現頻度 f_a

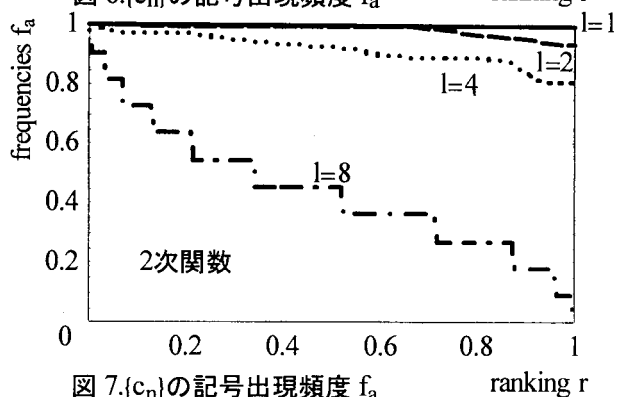


図 7. $\{c_n\}$ の記号出現頻度 f_a

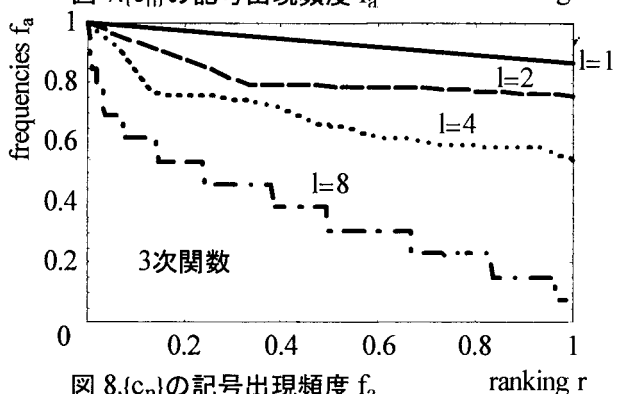


図 8. $\{c_n\}$ の記号出現頻度 f_a

(1) 記号の出現頻度、エントロピ

朝日新聞「天声人語」1,292日分、1,931,923

[Bytes]を用いて記号の出現頻度 f_a を求めた(図12.)。横軸の出現頻度順位 r 、縦軸の出現頻度 f_a 共にそれらの最大値で除し、規格化をしてある。記号長 l の値が大きくなる程、出現頻度 f_a の偏りが大きくなっている事がわかる。記号長 $l=8$ [bits]の時は特別である。日本語文字の2Bytes符号の第1Byte目である82H("H"は16進数を表す)が最も多く現われ、全体の25.5%の比率となっている。その次に出現頻度 f_a の大きい記号はやはり日本語文字コードの第1Byte目である81Hで全体の5.63%である。

3.3 符号化

(1) 時系列データより初期値を求めるプログラム

初期値 x_0 より $\{x_n\}$ は漸化式(2)を用いて求めら

表 2. $\{c_n\}$ のエントロピ H

写像	記号長 l	エントロピ H [bits/Symbol]			
		M.P.0	M.P.1	M.P.2	M.P.3
1 次関数	1	1.00013	0.99968	0.99963	0.99893
	2	1.99964	1.99775	1.99287	1.97553
	4	3.99342	3.92657	-	-
	8	7.83582	-	-	-
2 次関数	1	1.00013	0.99954	0.99953	0.99925
	2	1.99910	1.99742	1.99097	1.97158
	4	3.99453	3.92221	-	-
	8	7.83577	-	-	-
3 次関数	1	0.99644	0.99524	0.99512	0.99483
	2	1.99053	1.98892	1.98443	1.96266
	4	3.97600	3.90603	-	-
	8	7.81384	-	-	-

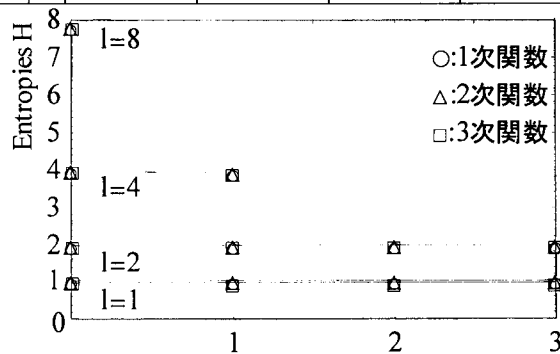
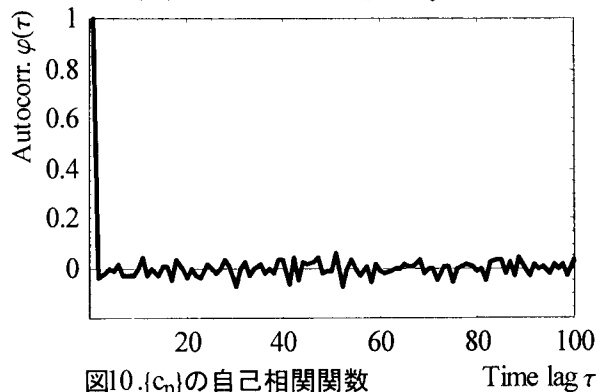
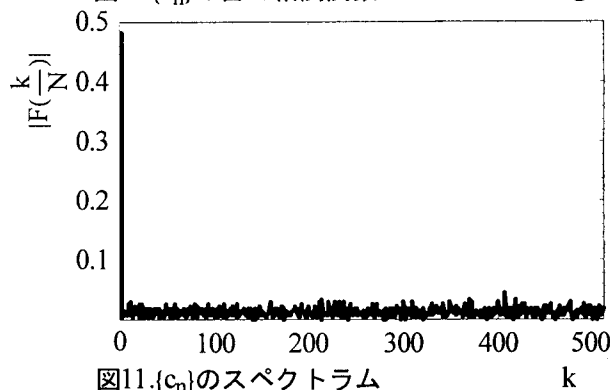
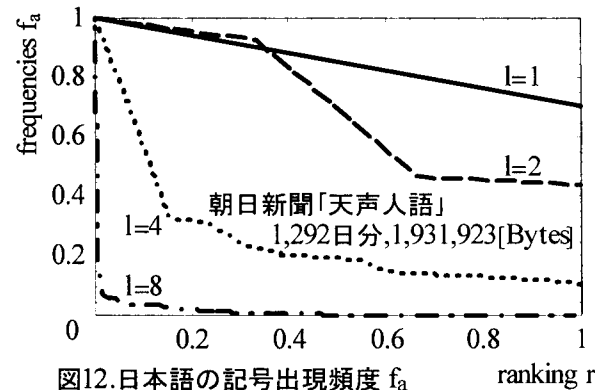
図 9. $\{c_n\}$ のエントロピ H [bits/Sym] M.P.図10. $\{c_n\}$ の自己相関関数図11. $\{c_n\}$ のスペクトラム

図12. 日本語の記号出現頻度 f_a ranking r
 れ、更に $\{c_n\}$ が求められるが、その逆を辿り $\{c_n\}$ から初期値 x_0 を求めるプログラムを作成した。初期値 x_0 が取り得る数値の区間が求められる。プログラミングはBorland社Turbo C++ Ver.5.01Jを用いて行った。プログラム中の変数の型はlong double型を用い、データ・ビット長は80[bits]である。今後Mathematicaにてプログラミングする事により、有効桁数を増やす事が可能である。

(2) 写像関数の決定

本報告では簡単の為、 $l=1$ [bit] の記号(符号)単位で考える。3.2(1)にて求めた日本語文(朝日新聞「天声人語」)中の記号出現確率 p_a は記号長 $l=1$ [bit] の時既に偏りが生じてい(図12.の出現頻度 f_a 参照)、

$$\text{記号} "0" \rightarrow p_a = 58.6\%$$

$$\text{記号} "1" \rightarrow p_a = 41.4\%$$

(4)

となっている。

ここで図13.に示すように記号"0","1"の出現確率 p_a (式(4))を用いて定義域の前半分[0,0.5]を比例分割する値を求めると、 $x=0.293$ となる。 $f_{ic}(x)=0.5$ との交点、すなわち点(0.293,0.5)を通る曲(直)線を写像関数と考える。本報告では1次関数(直線)を用いて点をつないだ。この図13.の関数 $f_{ic}(x)$ を以下本文では1次折れ線関数 $f_{ic}(x)$ という事とする。この1次折れ線関数 $f_{ic}(x)$ を用いて $\{c_n\}$ を生成させれば記号"0","1"の出現確率 p_a がそれぞれ式(4)の値になるであろうという単純な目論見である。実際に初期値 x_0 を表1.① $\frac{\pi}{4}$ 、符号長 $n=1000$ として $\{c_n\}$ を生成させたところ

$$\text{記号} "0" \rightarrow p_a = 58.6\%$$

$$\text{記号} "1" \rightarrow p_a = 41.4\%$$

(5)

となった。なお、図13.の関数 $f_{ic}(x)$ は $x=0.5$ を中心として線対称としているが、非対象とすれば、M.P.1次、または記号長 $l=2$ [bits] の出現確率 p_a を反映させられる。これは今後の課題である。

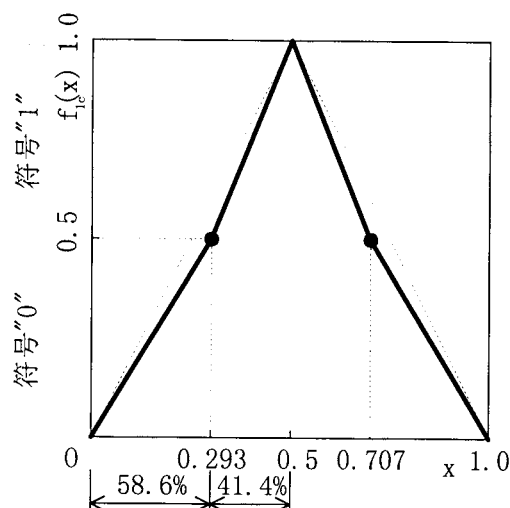


図13. 1次折れ線関数

(3) 1次折れ線関数を用いた場合のデータ長(精度)

3.3(2)にて決定した1次折れ線関数 $f_{lc}(x)$ により $\{c_n\}$ を生成させた。その際の符号長 n と精度 p との関係を図14.に示す。比較の為、3.1(1)にて求めた1次関数 $f_l(x)$ (式(1))による $\{c_n\}$ の精度 p も併せて記す。符号長 $n=701\sim 1000$ の範囲を示した。精度 p は $f_{lc}(x)$ による方が $f_l(x)$ によるより常に少しづつ大きくその差は徐々に拡大して行く。 $f_{lc}(x)$ による方では符号長 $n=1000$ 迄計算した後の最終的な精度 $p=23$ である。

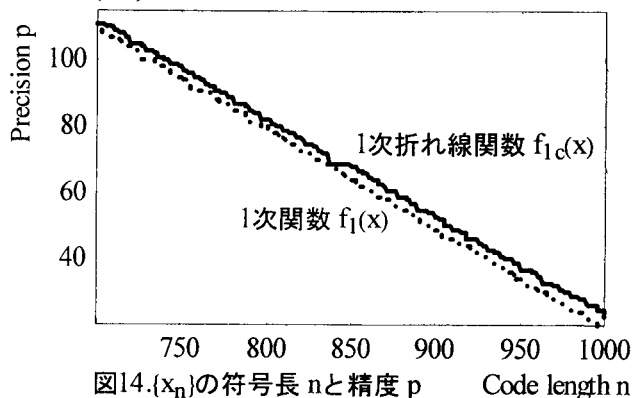
$n=1000$ 迄計算終了後の最終的な精度 p は用いる初期値 x_0 により少しづつ異なる。初期値 x_0 を表1. ①～⑩の10個を用いて符号長 $n=1000$ 迄計算した後の精度 p の平均値 p_{la} は

$$\begin{array}{ll} \text{1次関数 } f_l(x) & \dots\dots p_{la}=19.2 \\ \text{1次折れ線関数 } f_{lc}(x) & \dots\dots p_{la}=24.5 \end{array} \quad (6)$$

である。

(4) 符号化とデータ圧縮率の推定

3.3(1)に記した $\{c_n\}$ より初期値 x_0 を求めるプログラムを用いて初期値 x_0 を求め、逆に始めに与えた符号 $\{c_n\}$ が生成される事を確認した。ただし

図14. $\{x_n\}$ の符号長 n と精度 p

プログラムの数値(計算)精度 p の制約により記号長 $n=80$ 程度迄である。

3.3(3)の結果、式(6)より1次関数 $f_l(x)$ の場合と1次折れ線関数 $f_{lc}(x)$ の場合の精度の平均値 p_{la} の差 $\Delta p_{la}=5.3$ である事がわかった。精度 p は10進数の桁数であるので2進数の桁数への変換を行うと、上記の値 $\Delta p_{la2}=\log_2 10^{p_{la}}=17.6[\text{bits}]$ となる。この事は符号長 $n=1000$ に対しデータ長 n_r を $\Delta p_{la2}=17.6[\text{bits}]$ 短くできるという事である。従ってデータ圧縮率 R を次式(7)にて求める事ができる。

$$\begin{aligned} R &= \frac{\text{データ圧縮後のデータ・ビット数}}{\text{データ圧縮前のデータ・ビット数}} \times 100 = \frac{n - \Delta p_{la2}}{n} \times 100 \\ &= \frac{1000 - 17.6}{1000} \times 100 = 98.2 \quad [\%] \end{aligned} \quad (7)$$

4.まとめ

本解析により以下の結果が得られた。

- (1) 1,2および3次関数写像によるカオス・データの統計的性質を主に解析、確認した。
- (2) 朝日新聞「天声人語」を解析データとして日本語の統計的性質を調べた。
- (3) カオス・データより初期値を求めるプログラムを作成し、またカオスを応用した日本語文字データの圧縮をM.P.0次として試行し、データ圧縮率 $R=98.2[\%]$ の推定値を得た。

今後はM.P.高次のデータ圧縮を解析、考察する予定である。その為に種々の関数を用いた1次元写像によるカオス・データを解析する必要がある。

5.謝辞

本報告では解析データとして朝日新聞「天声人語」を使用させていただいた。朝日新聞社に謝意を表する。

6.文献

- [1] 細野敏夫: "情報工学の基礎", コロナ社(1967年)
- [2] 山口昌哉: "カオスとフラクタル", 講談社(1986年)
- [3] Stephen Wolfram: "The Mathematica Book Third Edition", Wolfram Research, Inc(1998)
- [4] 大石進一: "カオスと計算", 数理科学, No. 384, pp. 48-52 (1992年6月)
- [5] 平尾友一: "日本語の情報量とその特徴を活かしたデータ圧縮法の考察", 東京工業高等専門学校研究報告書, Vol.33, No.1, pp.91-96, Sept.2001
- [6] 細野敏夫: "エントロピーの科学", コロナ社(1991年)

(平成14年6月20日受理)

Flows around an Inclined Step with an Opening Part on Divided Wall in a Duct

Yoshiyuki SUZUKI*, Hiroshi FUJINO** and Toshio IJIMA***

Abstract

A study was carried out to elucidate the flow characteristics around the louvered fins used in a radiator and condenser for motorcars. The flow velocity and pressure distribution around an inclined forward facing step, imagined as a louvered fin, were measured in a duct as a parameter the flow rate in downstream of the step. Flows around the inclined forward facing steps of the two kinds of angle 90 and 30 degrees were examined using the fiberoptic Laser Doppler velocimeter (FLDV) and flow visualizing method by dye injection. The flow that goes over the step forms a re-circulation zone just behind the step due to flow separation. The flow through the opening part on divided wall just near the step is passably obstructed by a slow-moving vortex occurring on the opening part. The reattachment point length of the flow that goes over the step is obtained from flow velocity measured by FLDV.

On the other hand, a numerical simulation of flow around the step with angle of 90 degree was made on two-dimensional flow using a finite volume method. The validity of the present numerical scheme was verified through the comparison with the experimental data.

(Keywords : Inclined forward facing step, Flow around step, Flow visualization, Numerical simulation)

1 Introduction

The louvers are widely used as fins for radiating and cooling in the radiator and condenser for motorcars. The flow around louvered fins is dominated by their shape, installed angles and arrangement. The heat transfer of radiator and condenser increases because of the turbulence generated by louvers, but fluid energy loss increases too. There is a case in which the fluid energy loss for the flow separation by louvers surpasses the energy quantity increasing in heat transfer. In the energy balance, at first, it is necessary to rightly grasp the flow around louver fins in order to utilize the louver effect maximally. While retaining the louver effect, it is important to hold flow separation to a minimum in the radiator and condenser performances.

Experimental observation by flow visualization [1], [2], [3] and numerical analysis of two-dimensional flows around louvers [4], [5], [6], [7] were reported. But the flow characteristics in a duct having the opening part on divided wall just near the louver are not known enough. In this paper, with the purpose of elucidating the flow characteristics around louvered fins in a confined pathway, the flow around an inclined forward facing step in a duct was examined using flow visualization method by dye injection and the flow measurement by FLDV. Furthermore, the numerical simulation of the flow around inclined forward facing step with angle 90 degree was tried using the program CFD 2000 developed by Adaptive Research Co.

*Department of Mechanical Engineering

**Student Affairs Division

***Tokai University

2 Experimental Apparatus and Procedures

2.1 Test duct

A test step that is shown in Fig. 1 is placed at the center of duct length 1800 mm. Two ducts of height $H=32.5$ mm and width 20 mm made of transparent acrylic resin are joined together. The ratio A_1/A_2 of opening area of which inclined angles are 90° and 30° is the constant of 0.7. A_1 is the area between the step edge and the upper wall of duct. A_2 is the project area of opening part area normal to the inclined step. The steps were made of aluminum of thickness 3 mm. Inner diameter of the pipes for injecting tracer is 0.6 mm and the pipes have been installed for each 3 in upper duct and lower duct at the 10 mm pitch. In Fig. 1, Q with suffix shows the flow rate in duct.

2.2 Experimental apparatus

The summary of the experimental apparatus is shown in Fig. 2. The apparatus consists of test duct, head tank, receiver, pump and measuring equipment for flow visualization and velocity. Water was used as working fluid in the experiment. In the measurement of the flow, FLDV that it did not disturb the flow and that it can also measure the flow of reversed direction velocity was used.

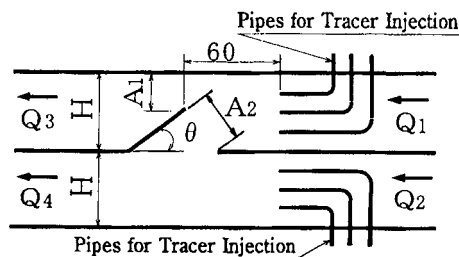


Fig. 1 Test section of duct with an inclined step

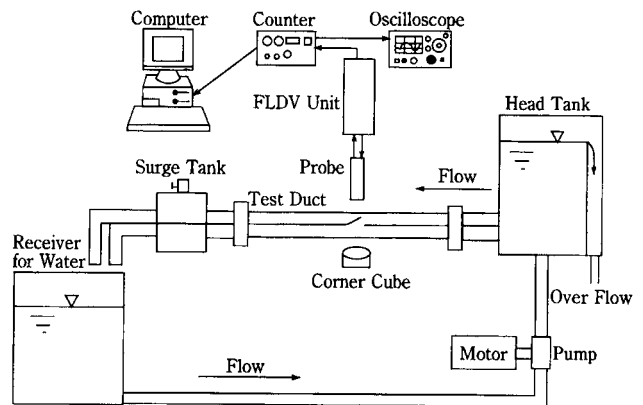


Fig. 2 Experimental apparatus

2.3 Experimental procedures

As a parameter the flow rate ratio Q_3/Q_4 , the velocity profile in the upstream and downstream of the step and the velocity profile of the projected area of opening part area normal to the step are measured by FLDV. The probe for measuring is vertically traversed along center of duct width 20 mm. In measurement of the flow velocity, a mixture of poster color and correcting fluid was used to get a precise Doppler signal for FLDV. The pressure profile of flow along the duct in longitudinal direction was measured by a piezometer connected through cook from pressure taps installed in the upper and lower duct. Q_3 and Q_4 which are a experiment parameter are measured by the weight method at the ends of discharge pipes. Also, Q_1 and Q_2 in the upstream of the step are measured by cylindrical nozzles installed in the upstream ducts. The flow visualization was carried out by a dye injection method. The aqueous solution of the paint of albedo is injected the flow in ducts from each thin pipe as shown in Fig. 1.

3 Experimental Results and Discussions

3.1 Effects of the inclined angle of step and flow rate ratio

Reynolds number Re in this experiment was in the range of $Re = 1 \times 10^3 \sim 7 \times 10^3$. The velocity profiles around the steps with inclined angles of 90° and 30° in the main flow direction in ducts are shown at $Q_3/Q_4 = 100 \text{ (cm}^3/\text{s)}/100 \text{ (cm}^3/\text{s)} = 1.0$ in Fig. 3 and Fig. 4. The distance x in the longitudinal direction of a duct is taken as a starting point from the edge of step. The velocity profile of flow that goes over the step shows the intense distribution biasing for upper wall. The flow that goes over the step has a re-circulation zone that is formed by negative velocity of the separation of flow in the just back of the step. Fig. 5 and Fig. 6 show the flow patterns visualized by dye injection method, when they are the same condition as Fig. 3 and Fig. 4. The velocity in lower duct is not affected for the inclined angle of step. Maximum velocity of flow that goes over the step is not occurred at minimum flow area between the step edge and the upper wall of duct, but that occurs at position a little behind from that. The position showing maximum velocity does not depend on the inclined angle of the step.

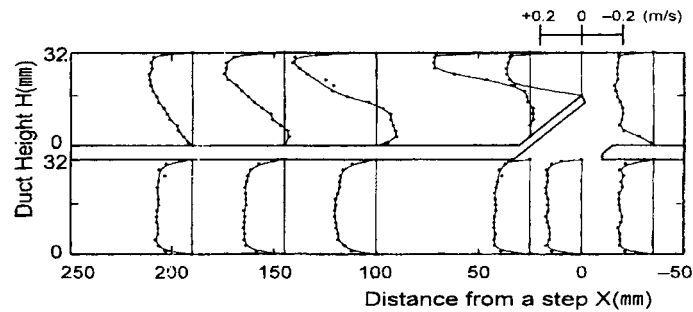


Fig. 3 Velocity profile around a step with inclined angle of 30° at $Q_3/Q_4=100(\text{cm}^3/\text{s})/100(\text{cm}^3/\text{s})=1.0$

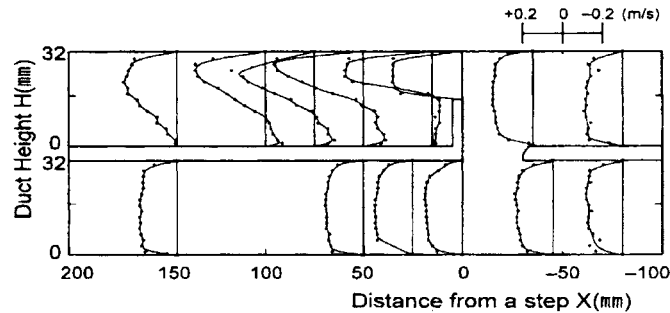


Fig. 4 Velocity profile around a step with inclined angle of 90° at $Q_3/Q_4=100(\text{cm}^3/\text{s})/100(\text{cm}^3/\text{s})=1.0$

In this experiment, the distance was in the range of 1.6~2.6 times of the height between the step edge and the upper wall in upper duct. The flow patterns around the step at $Q_3/Q_4 = 100 \text{ (cm}^3/\text{s)}/50 \text{ (cm}^3/\text{s)} = 2.0$ are shown in Fig. 7 and Fig. 8. The flow that goes over the step with the inclined angles of 90° and 30° leads a part of flow to the upper duct from the lower duct along the step. Because the flow in the lower duct is stimulated in flow that passes through an opening part A_2 , it increases the turbulence in the downstream from lower edge of step. The slow vortex is produced by accompanying inflow from lower duct to upper duct on the opening part of the inclined step of 30° . The flow patterns around the step at $Q_3/Q_4 = 50 \text{ (cm}^3/\text{s)}/100 \text{ (cm}^3/\text{s)} = 1/2$ are shown in Fig. 9 and Fig. 10. In both cases, a part of flow in the upper duct flows to the lower duct. The flow turbulence in the downstream from step is less than the case of $Q_3/Q_4 = 2.0$ as streak lines in Fig. 9 and Fig. 10. The pressures were measured along the flow in the longitudinal direction of upper and lower ducts. The pressure profile is hardly influenced by the inclined angle of step, when the flow rate that goes over the step is small. As Q_3/Q_4 increases, the pressure recovery of flow in duct with the step of 30° is bigger than that of 90° in the upper duct.

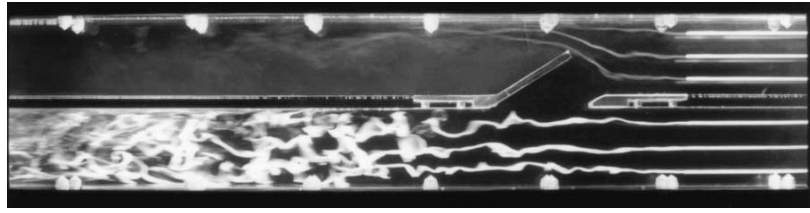


Fig. 5 Flow pattern around a step with inclined angle of 30 ° at $Q_3/Q_4=100(\text{cm}^3/\text{s})/100(\text{cm}^3/\text{s})=1.0$

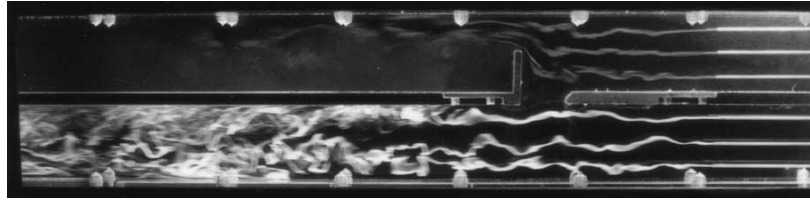


Fig. 6 Flow pattern around a step with inclined angle of 90 ° at $Q_3/Q_4=100(\text{cm}^3/\text{s})/100(\text{cm}^3/\text{s})=1.0$

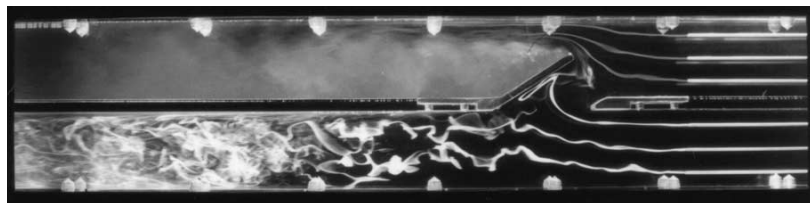


Fig. 7 Flow pattern around a step with inclined angle of 30 ° at $Q_3/Q_4=100(\text{cm}^3/\text{s})/50(\text{cm}^3/\text{s})=2.0$

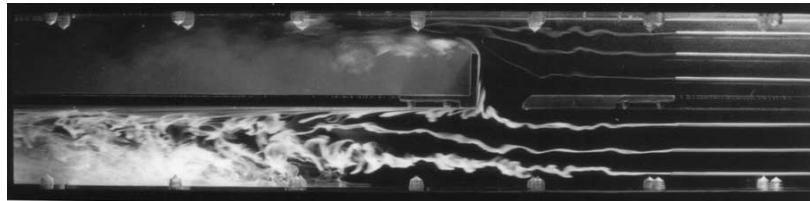


Fig. 8 Flow pattern around a step with inclined angle of 90 ° at $Q_3/Q_4=100(\text{cm}^3/\text{s})/50(\text{cm}^3/\text{s})=2.0$

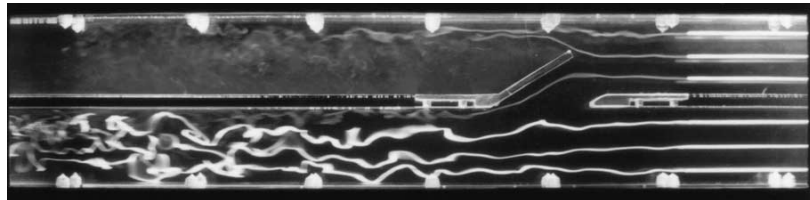


Fig. 9 Flow pattern around a step with inclined angle of 30 ° at $Q_3/Q_4=50(\text{cm}^3/\text{s})/100(\text{cm}^3/\text{s})=1/2$

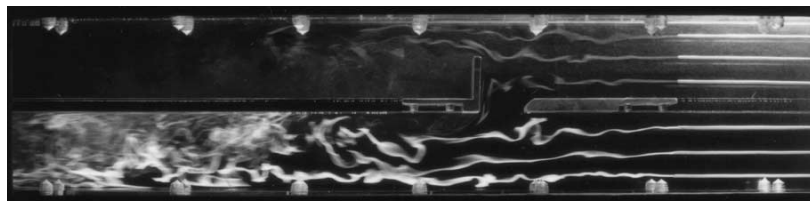


Fig. 10 Flow pattern around a step with inclined angle of 90 ° at $Q_3/Q_4=50(\text{cm}^3/\text{s})/100(\text{cm}^3/\text{s})=1/2$

The flow rate Q' through the opening part installed on divided wall at just front of the step is shown as a parameter Q_3/Q_4 in Fig. 11. Q' is positive the flow rate to upper duct from lower duct. Q' does not depend on angle θ of inclination of the step, but it is dominated by Q_3/Q_4 . In present, in actual opening area on divided wall, the areas of opening part at just front of the step of 90 ° and 30 ° are a little different. But Q' does not so affect the value of the area. As Q_3/Q_4 is decreased, Q' gradually changes for the negative value. In $Q_3/Q_4 = 1.0$, the flow rate Q' which passes the opening part is very little. The reattachment point length of the inclined step of 90 ° and 30 ° in shutting the opening part is shown in

Fig. 12. The closure of the opening part is to avoid the effect on the flow around the step from other factors. Dimensionless x/H of reattachment point length x divided by height H of the duct is shown in relationship with mean velocity v at the pathway between the step edge and the upper wall of upper

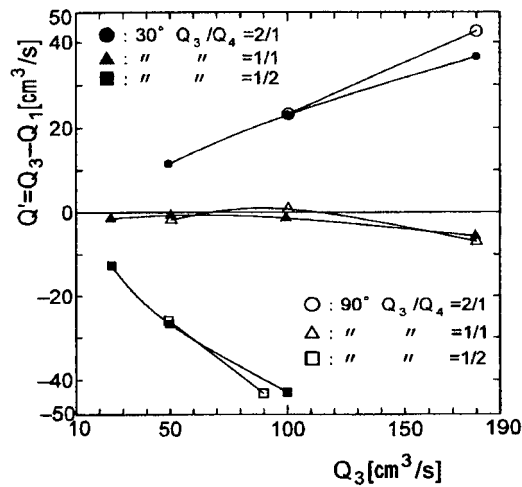


Fig. 11 Flow rate Q' along the step through opening part

duct. With the increase of v , x/H increases. It shows the peak at a certain v . After the peak, x/H gradually decreases with the increase of v . The maximum value of x/H of the step of 90° is bigger a little than the step of 30° . The flow that goes over the step of 30° is easy to receive the effect of the upper wall in duct in comparison with the step of 90° . The flow that blows against the upper wall separating from step edge gives the disturbing in the flow behind the step, since it has component unlike the mainstream direction. The flow that gives the disturbing seems to suppress the development of the re-circulation zone.

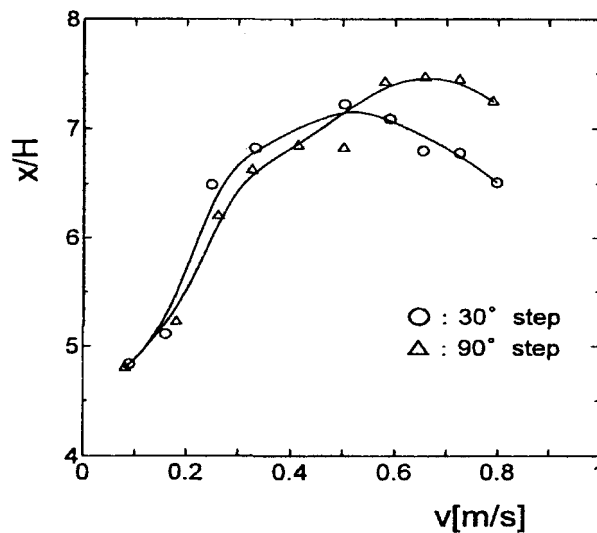


Fig. 12 Reattachment point length x/H of inclined step

3.2 Numerical simulation

Fig. 13 shows a numerical simulation of the flow around the step of 90° by finite volume method. The condition of simulation was the same as a measured value at $Q_3/Q_4 = 100 \text{ (cm}^3/\text{s)}/100 \text{ (cm}^3/\text{s)} = 1.0$ in Fig. 4. The meshes in the calculation were constructed by the quadrilateral element. Velocity vectors are shown in Fig. 13. The calculation in the downstream was carried out the range to 400 mm (12.3 times of duct height) from the step. Flow rate that is equal to the measured values Q_3 and Q_4 was given

in value of mean velocity at position of 400 mm. The flow separation is simulated at the lowest edge of step in lower duct, but it does not clearly shown in the measurement. Also, the aspect of the flow is simulated, while the flow in the downstream from the step zigzags in the simulation. The velocity profile in the measurement is only to show to downstream 200 mm from step.

The degree of the zigzag of flow can not grasped based on Fig. 4. In the measurement at $Q_3/Q_4 = 1.0$, though the flow rate Q' which passes through the opening part is very little, the flow rate by the simulation considerable flows into the lower duct considering the separation at lower edge of step and size of velocity vector in the upstream.

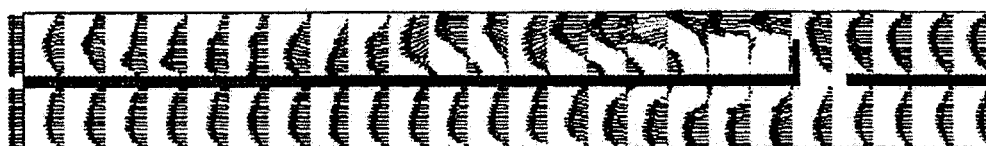


Fig. 13 Numerical simulation velocity vector of the flow around the step of 90 ° at $Q_3/Q_4=100(\text{cm}^3/\text{s})/100(\text{cm}^3/\text{s})=1.0$

4 Conclusions

Flows around the inclined forward facing step of the two kinds of angle 90 ° and 30 ° were examined using FLDV and flow visualization method by dye injection. The effects on the flow characteristics of the inclined angle of step and the flow rate ratio were considered. A numerical simulation of the flow around the step of 90 ° was tried by finite volume method. The conclusions are as follows.

- 1) The flow which goes over the step forms a re-circulation zone just behind the step. The slow vortex generated on the opening part near the step.
- 2) The reattachment point length x/H is affected the upper wall of the step. The maximum value of x/H of the step of 90 ° is bigger a little than the step of 30 °.
- 3) The flow rate Q' which passes the opening part depends on Q_3/Q_4 , the effect of the inclined angle of the step is hardly received. Q' shows the smallest value at $Q_3/Q_4 = 1.0$.
- 4) The zigzag flows in the downstream of step and the separation at lower edge of step were simulated in the numerical calculation of flow around step of 90 °. They have not appeared clearly in the measurement. Detail of considering needs for numerical simulation.

References

- [1] Ralph L. Webb : The flow structure in the louvered fin heat exchanger geometry, *SEA Tech. Pap. Ser. (Soc. Automotive Eng.)*, 13 p, 1990.
- [2] Hiramatsu M. and Ishimaru N. : Research on fins for air conditioning heat exchangers (1 st report), *Trans. of JSME (in Japanese)*, Ser. B, Vol. 55, No. 519, 3449-3456, 1989-11.
- [3] Suzuki Y. and Iijima T. : Flow characteristics around an inclined backward facing step in a duct, *Proc. of the Fourth Asian symposium on Visualization*, 637-640, 1996.
- [4] Suga K, Aoki H and Shinagawa T. : Numerical analysis on two-dimensional flow and heat transfer of louvered fins using overlaid grids, *Trans. of JSME (in Japanese)*, Ser. B, Vol. 55, No. 509, 221-226, 1989.
- [5] Hiramatsu M. and Ishimaru N. : Research on fins for air conditioning heat exchangers (2 nd report), *Trans. of JSME (in Japanese)*, Ser. B, Vol. 55, No. 519, 3457-3461, 1989-11.
- [6] Ikuta S, Sasaki Y, Tanaka K, Takagi M and Himeno R. : Numerical analysis of heat transfer around louver assemblies, *SAE Tech. Pap. Ser (Soc Automotive Eng.)*, 5 p, 1990.
- [7] Hiramatsu M. and Ishimaru N. : Research on fins for air conditioning heat exchangers (3 rd report), *Trans. of JSME (in Japanese)*, Ser. B, Vol. 55, No. 519, 3462-3466, 1989-11.

(Received June. 18 2002)

時間領域差分法を用いた密結合モノポールの音響特性解析

森下達哉*, 多氣昌生**

Numerical simulation of tight-coupled monopole based on finite difference time domain method

Tatsuya MORISHITA and Masao TAKI

In this paper we discussed the improvement in performance of the tight-coupled monopole (TCM) obtained by appropriate acoustical design based on the finite difference time domain (FDTD) method. Using the FDTD method, it is possible to design an arbitrary system configuration by considering the effects of the locations of the sensor and the secondary sources through simulation. The effectiveness of the proposed method is shown by numerical results and experimental results to evaluate the open loop frequency response and the transmission loss of TCM.

(Keywords : Tight-coupled monopole, Active noise control, Duct, FDTD method)

1 はじめに

フィードバック形の能動騒音制御 (Active Noise Control, ANC) システムとして, 音響仮想接地 (Acoustical virtual earth) や密結合モノポール (Tight-coupled Monopole, TCM) と呼ばれる ANC システムが提案されている [1]. これらのシステムについては, 1980 年代に最初の提案がなされているものの, 構成が簡単なことや小型化が可能なことなどから, 依然として有効な構成法であると考えられている.

TCM では, センサで検出した音場の情報を制御用音源から負帰還させることによって TCM 近傍の音圧を減少させる. 負帰還路に位相遅れがなく無限大の負帰還利得が得られる場合には, センサ位置で無限大の減音効果が得られる [2]. しかし, 現実のシステムの負帰還路には, 位相遅れが存在し, 負帰還利得がある値を越えると, システムは不安定になる. そのため, フィードバック形 ANC システムでは, その安定性によって減音効果が制限される.

また, TCM 近傍の音場では, 制御用音源によって不要な高次モード成分が生成され, TCM の安定性に影響を及ぼすことが知られている. TCM

の安定性に対する高次モード成分の影響を除去するために, センサと制御用音源を適切に配置することによって, TCM が安定性を損なわない範囲で減音効果を増加させる方法が理論的に明らかにされている [3].

一方, 時間領域差分 (Finite Difference Time Domain, FDTD) 法と呼ばれる数値解析法の音場特性解析への適用が近年提案されている [4]. FDTD 法は, 主に, 電磁界解析の分野で発展してきた数値解析法である [5]. FDTD 法を用いることによって, TCM 近傍の高次モード成分を含む任意形状の音場の時間領域での特性解析が可能になる.

以上をふまえて本稿では, 音響的設計の適切化による TCM の性能改善法に対する FDTD 法を用いた数値シミュレーションの適用について検討を行う. まず, 3 次元音場の特性解析を行うための FDTD 法の定式化を行う. 次に, 電気系と音響系とを統合した時間領域におけるシミュレーションを行う. このシミュレーションによって, TCM の安定性および減音効果の定量的評価が可能となる. 最後に, 同様のモデルを用いたシミュレーション結果と実験結果との比較によって, 提案するシミュレーション法の妥当性を検証する.

2 密結合モノポールの構成と動作特性

2.1 構成

TCM の構成を図-1(a) に示す. TCM はセンサ, 制御用音源および制御器で構成される. 図-1(b) は TCM の負帰還路のブロック図である. ここで, $P_m(s)$ はセンサ位置における音圧であり, $V_s(s)$ は制御用音源振動板の振動速度である. $H(s)(=H_m(s)H_s(s)H_a(s))$ は, 電気系の伝達関数である ($H_m(s)$ はセンサ, $H_s(s)$ は制御用音源, $H_a(s)$ は増幅器の伝達関数をそれぞれ表す). $Z(s)$ は $V_s(s)$ から $P_m(s)$ までの伝達関数を表す.

2.2 透過損失

TCM の減音特性の評価を行うためには, 減音効果を表す評価量を定める必要がある. そこで, 透過損失 $T(j\omega)$ を次式で定義する.

$$T(j\omega) = 20 \log_{10} \left| \frac{P_1^+(j\omega)}{P_2^+(j\omega)} \right| \quad \text{dB} \quad (1)$$

ここで, ω は角周波数を表し, $j = \sqrt{-1}$ である. $P_1^+(j\omega)$ は入射平面波音圧の複素振幅, $P_2^+(j\omega)$ は TCM からの透過平面波音圧の複素振幅を表す.

TCM では, 負帰還利得 $|H(j\omega)|$ が大きくなると TCM が安定な範囲では, 大きな透過損失が得られる [1]. しかし, 実システムでは, 電気系の位相遅れや, TCM 近傍の音場の高次モード成分の影響によって, 負帰還利得の大きさは制限される [3]. そのため, TCM の性能評価を行う場合には, TCM の安定性を考慮する必要がある.

2.3 安定性

図-1(b) のブロック図で $s = j\omega$ とすると, TCM の開ループ周波数応答は $L(j\omega) = Z(j\omega)H(j\omega)$ で与えられる. $L(j\omega)$ が $\angle L(j\omega) = 2n\pi[\text{rad}]$, ($n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$), となる周波数において $|L(j\omega)| < 1$ を満足すれば, TCM は安定である.

3 FDTD 法を用いたシミュレーション

3.1 定式化

TCM の動作特性のシミュレーションでは, 音響的な応答と電気系の応答の両者を計算する必要がある. まず, 本節では音響的な応答を計算するための FDTD 法の定式化を行う.

3 次元音場において, 音圧 p および音響粒子速度 $\mathbf{q}$ は以下の式を満足する.

$$\frac{1}{\rho_0 c_0^2} \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{q} = 0, \quad \rho_0 \frac{\partial \mathbf{q}}{\partial t} + \nabla p = 0 \quad (2)$$

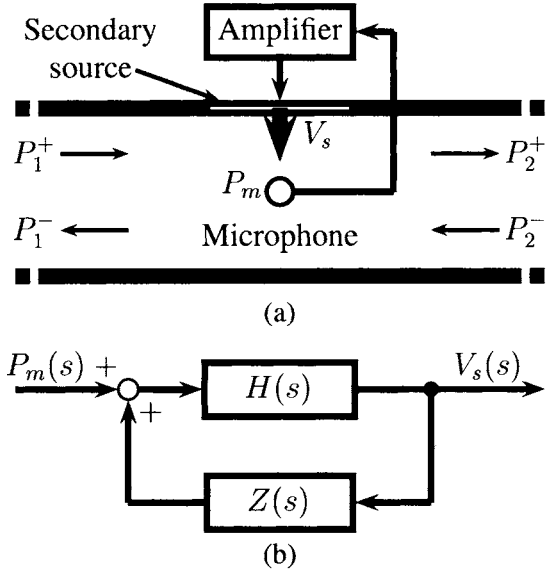


図-1 TCM の構成 (a) と TCM における負帰還路のブロック図 (b)

ここで, ρ_0 は空気の密度, c_0 は音速を表す.

FDTD 法では, x 軸方向, y 軸方向, z 軸方向の間隔を, それぞれ, $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ として空間を格子状に離散化して扱う. そこで, 格子の中心を $(I\Delta x, J\Delta y, K\Delta z) = (I, J, K)$ と表す. また, 時間についても時間ステップを Δt , 時間インデックスを n とし離散化して扱う. 以上より, 音場の構成要素を $F(I\Delta x, J\Delta y, K\Delta z, n\Delta t) = F(I, J, K)^n$ と表すことにする. 式 (2) について時間および空間について中心差分近似を行うことによって, 音圧の更新式が以下のように得られる.

$$p(I, J, K)^n = p(I, J, K)^m - \rho_0 c_0^2 \Delta t \times \left[\frac{1}{\Delta x} \left\{ q_x \left(I + \frac{1}{2}, J, K \right)^l - q_x \left(I - \frac{1}{2}, J, K \right)^l \right\} + \frac{1}{\Delta y} \left\{ q_y \left(I, J + \frac{1}{2}, K \right)^l - q_y \left(I, J - \frac{1}{2}, K \right)^l \right\} + \frac{1}{\Delta z} \left\{ q_z \left(I, J, K + \frac{1}{2} \right)^l - q_z \left(I, J, K - \frac{1}{2} \right)^l \right\} \right] \quad (3)$$

ただし, $l = n - 1/2, m = n - 1$ である. 粒子速度の更新式は次式で表される. ここでは, x 軸方向成分のみを示すが, 他の軸方向成分についても

全く同様である.

$$q_x \left(I + \frac{1}{2}, J, K \right)^k = q_x \left(I + \frac{1}{2}, J, K \right)^l - \frac{\Delta t}{\rho_0 \Delta x} [p(I+1, J, K)^n - p(I, J, K)^n] \quad (4)$$

ここで, $k = n + 1/2, l = n - 1/2$ である.

FDTD 法では計算の安定性のために, 次式で表される安定条件を満たすように格子間隔および時間ステップを決定する必要がある [5].

$$c_0 \Delta t \leq \left[\left(\frac{1}{\Delta x} \right)^2 + \left(\frac{1}{\Delta y} \right)^2 + \left(\frac{1}{\Delta z} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (5)$$

3.2 制御用音源のモデル

電気系のモデル化にあたり, センサおよび増幅器の伝達関数は実数で表されるものとする. これは, センサおよび増幅器については, 制御用音源の周波数応答と比較して, 振幅特性は平坦であり位相遅れは小さいためである.

制御用音源に対する入力電圧 $E(s)$ および制御用音源の振動板の振動速度 $V_s(s)$ までの伝達関数 $H_s(s)$ は, 次式で与えられる.

$$H_s(s) = \frac{V_s(s)}{E(s)} = \frac{A}{(R_e + L_e s) \left(R_m + M_m s + \frac{1}{C_m s} \right) + A^2} \quad (6)$$

ここで A は動電形電気音響変換器の力係数を表し, R_e と L_e はそれぞれ電気音響変換器の電気抵抗およびインダクタンスを表す. R_m, M_m , および C_m はそれぞれ機械抵抗, 質量およびコンプライアンスを表す. 式 (6) を逆ラプラス変換することによって, 制御用音源のインパルス応答 $h_s(t)$ を求めることができる.

シミュレーションにおいては, 制御用音源の振動板を剛体と仮定し, 制御用音源振動板の振動速度と等しい粒子速度成分をダクト壁上で与えることによって制御用音源から2次的な音場を発生させる. なお, ダクト壁上では, ダクト壁に対して垂直な粒子速度成分のみを与える.

4 結果

図-2 は TCM が設置されたダクトのモデルである. このモデルにおいて, 図-3 のようなセン

サと制御用音源の配置をもつ TCM について表-1 に示す条件のもとでシミュレーションを行なった. なお, 制御用音源のパラメータとしては, 動電形変換器における一般的な値を用いた.

図-4 は, TCM の利得余裕が 0 dB となるように H_a の値を設定した場合の開ループ周波数応答の計算結果である. 図-3 の構成と比較すると, 高次モード成分の影響を受けにくいセンサと制御用音源の配置 [3] をもつ (c) の構成の場合に, 低周波数域での負帰還利得が最も大きくなる.

図-5 は, TCM の利得余裕が 6 dB となるように H_a の値を設定した場合の透過損失の計算結果である. TCM の安定性を損なわずに最も大きな負帰還利得が得られる図-3(c) の構成を用いた場合に大きな透過損失が得られる.

以上の結果の妥当性を確認するために, TCM の構成をシミュレーションで用いたものと同様にした場合の実験を行なった. 図-6 は開ループ周波数応答の測定結果であり, 図-7 は利得余裕 6 dB とした場合の透過損失の測定結果である. 実験においても, 図-3(c) のような構成を用いた場合に, 安定性を損なわない範囲で比較的大きな負帰還利得が得られるとともに, 比較的大きな透過損失が得られる.

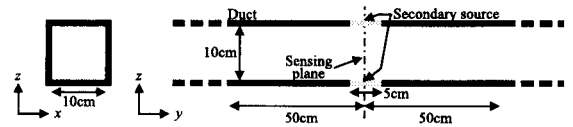


図-2 均一断面をもつダクトに設置された TCM のシミュレーションモデル

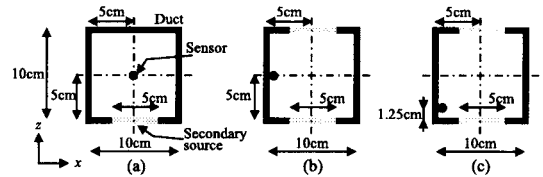


図-3 センサと制御用音源の断面内での配置

表-1 シミュレーションの条件

Time step Δt	4×10^{-6} s
Cell size $\Delta x = \Delta y = \Delta z$	2.5×10^{-3} m
Number of cells $x \times y \times z$	$40 \times 400 \times 40$
Sound velocity c_0	344 m/s
Air density ρ_0	1.2 kg/m^3
Absorbing boundary condition	Mur's 1st

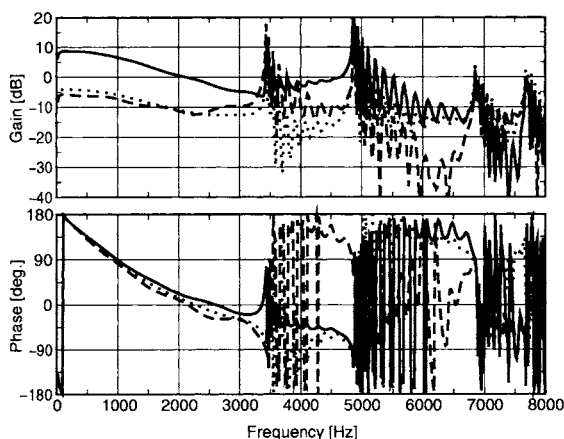


図-4 利得余裕 0 dB における開ループ周波数応答の計算結果. 点線:図-3 (a) の構成を用いた場合, 破線:構成 (b) を用いた場合, 実線:構成 (c) を用いた場合

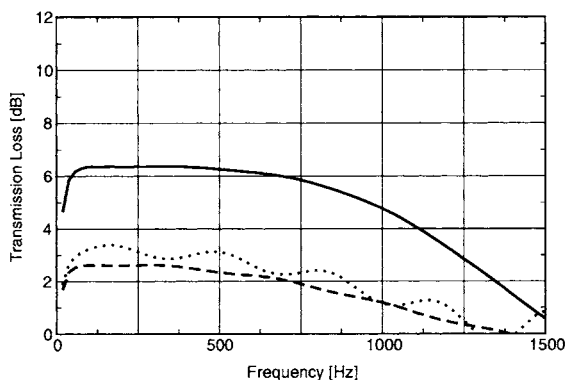


図-5 利得余裕 6 dB における透過損失の計算結果. 点線:図-3 (a) の構成を用いた場合, 破線:構成 (b) を用いた場合, 実線:構成 (c) を用いた場合

実験結果とシミュレーション結果とは同様の傾向を示していることから, 提案するシミュレーション法で得られた結果の妥当性を確認できた。

5 まとめ

本稿では, 音響的設計の適切化による TCM の性能改善法に対する FDTD 法を用いた数値シミュレーションの適用について検討した. TCM の電気系と音響系とを統合したシミュレーションを行い, 周波数応答および透過損失を計算し, TCM の動作特性の定量的な評価を行なった. シミュレーション結果の妥当性を, シミュレーションモデルと同様の装置を用いた実験を行って確認した。

提案する数値シミュレーション法を用いることによって, 実システムを用いた検証を行わずに TCM の動作特性の定量的評価が可能になるため, システムの設計・評価に関わるコストを低減しつ

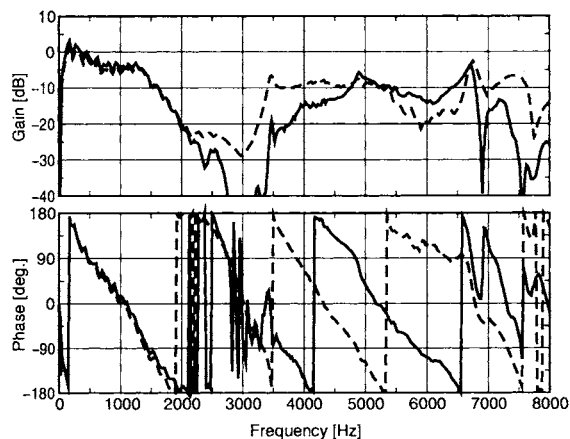


図-6 利得余裕 3 dB における開ループ周波数応答の実験結果. 破線:図-3 (b) の構成を用いた場合, 実線:構成 (c) を用いた場合

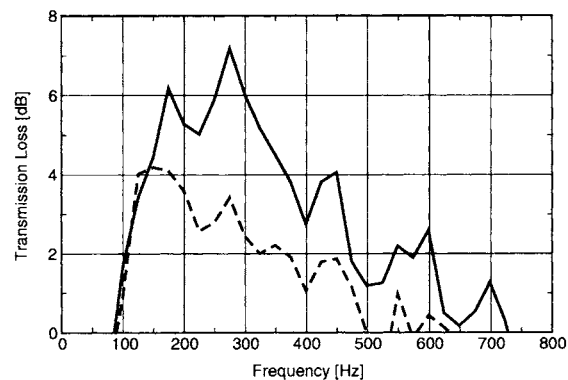


図-7 利得余裕 6 dB における透過損失の実験結果. 破線:図-3 (b) の構成を用いた場合, 実線:構成 (c) を用いた場合

つ, TCM の設計を最適化できる可能性がある。

参考文献

- [1] P. A. Nelson and S. J. Elliott, Active control of sound, Academic Press, London, Chapter 7 (1992).
- [2] M. L. Munjal and L. J. Eriksson, "An analytical, one-dimensional, standing-wave model of a linear active noise control system in a duct," J. Acoust. Soc. Am., **84**, pp.1086-1093 (1988).
- [3] 森下, 福島, 田中, 多氣, 森, "ダクト系騒音に対する密結合型能動騒音制御システムの安定性改善法," 日本音響学会誌, **51**, pp.948-956 (1995).
- [4] D. Botteldooren, "Acoustical finite-difference time-domain simulation in a quasi-Cartesian grid," J. Acoust. Soc. Am., **95**, pp.2313-2319 (1994).
- [5] A. Taflov and M. E. Brodwin, "Numerical solution of steady-state electromagnetic scattering problems using the time-dependent Maxwell's equations," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., **23**, pp.623-630 (1975).

(平成 14 年 6 月 20 日 受理)

自動車道路周辺の降水成分

高橋義人*, 加藤 格**, 桑原 大***

Chemical Composition of Rainwater in the Surroundings of a Roadway for Motor Vehicles

Yoshihito TAKAHASHI, Itaru KATO and Masaru KUWAHARA

At the point 50m apart from an expressway (Chuou Roadway for Motorcar), in the warm period (May ~Oct.), average concentration of hydrogen, ammonium, nitrate and sulfate ions in the initially fallen (~2 mm) rainwater proved to be higher than those of reference point by 47, 80, 88 and 59 $\mu\text{mol}/\ell$, respectively.

Over 30°C atmospheric temperature, considerable amounts of ammonia was detected in air-samples collected at the area apart 50~150m from the expressway, whereas, below 15°C, ammonia was scarcely detected even near the expressway.

(Keywords : Chemical composition of rainwater, Roadway for car, Car exhaust gas)

1. はじめに

自動車の排気ガスおよび排出ミストが道路の周辺環境に及ぼす影響に関する研究は多数行われているが、それらの排気成分の降水による沈着に関する研究はあまり行われていない。我々は以前に、ガソリンエンジン車から排出されるアンモニアが道路走行中の自動車から排出される酸性物質を中和しているために、自動車専用道路から250 m 程度離れた地点で採取した降水の酸性度はあまり高くなっていないことを報告した¹⁾。しかしながら、その後、我々は自動車専用道路の近傍の住民から、住宅の雨樋いなどの腐食が他の地域よりも激しいようだとの指摘を受けて、自動車専用道路のごく近傍 (50 m) の降水 (ミストやほこりなども含む) をほぼ1年間にわたって採取し、その成分を調べて、他の地域の降水成分と比較考察した。

自動車排ガス中のアンモニアについては、小野によって、NO_x 対策用触媒に関する解説の中で三元触媒を備えたガソリンエンジン車が理論空燃比 (A/F=14.6) よりも低い状態で運転されたときかなりの量のアンモニアが排出されることが述べられた²⁾。このことに関しては、その後も堀³⁾や鷺山⁴⁾によって調べられている。

本報では自動車排気の散布される成分の形態を

確かめるために、三種類の自動車エンジンからの排気を直接氷冷して得られた凝縮液 (水溶性の排気成分は凝縮水滴中に溶けて水溶液の形で回収される) の成分を比較した。また、自動車専用道路からの距離の異なる2地点での降水の酸性度が著しく違っているという事実は道路から飛来してくる自動車の酸性排出物、およびその中和剤として働いているアンモニアの濃度差に起因すると推定して、道路周辺の空気を吸引採取して、アンモニアおよびその他の成分の飛散状況を調べた。

2. 測定方法

2. 1 観測地域

降水等のサンプリング場所は Fig. 1 に示される。そこは東京の都心から西へ約40 km 離れた、八王子市の西の郊外で、関東平野が終わり山地にかかる場所である。自動車専用道路 (中央自動車道、日交通量4~9万台) が東西に走っている。風は通常、その場所を山地に沿って北または南より、すなわち、自動車専用道路にほぼ直交して吹いている。

2. 2 自動車専用道路近傍の降水の採集

降水のサンプリング地点 **A** (八王子市元八王子三丁目) は自動車専用道路のごく近傍 (道路より

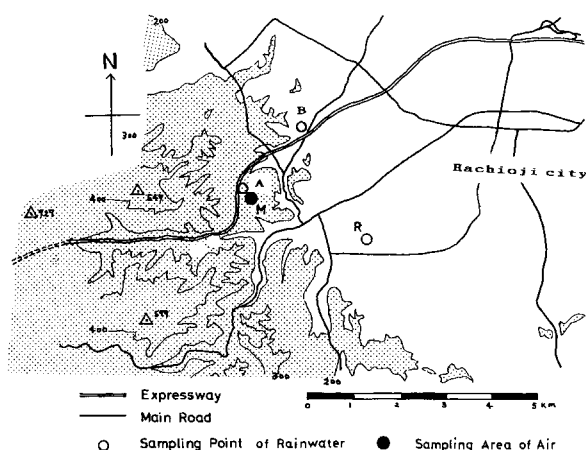


Fig. 1 Location of sampling points.

50 m) に、**B** (元八王子二丁目) は自動車専用道路より 250 m 離して、対照サンプリング地点 **R** (梶田町) は自動車専用道路より南側に 3 km 離れた道路からの排気の影響が比較的少ない場所に設置された。

A 地点の北西および南西側は山林で、**A**、**B** 地点とも住宅地に近い荒れ地である。**R** 地点は校内の 4 階建て建造物の屋上 (地上 20 m) にある。いずれの地点も半径 1 km 以内に豚舎、鶏舎などの大規模家畜小屋はない。降水試料は降水量 2 mm 以上の降雨について、風向にこだわらず、初期降水 (2 mm まで) をフタのない採雨器で乾性・湿性両降下物をいっしょに、18ヶ月間 (1993 年 12 月～1995 年 5 月) にわたって採取された。

2. 3 自動車排気凝縮液の分析

三元触媒付きのガソリンエンジン車、触媒なしのガソリンエンジン車、ディーゼルエンジン車について、それぞれ 30 分間空ブカシ運転をして、その排気をガラス管に導いて水冷して得られる凝縮液の化学組成を調べて比較した。

2. 4 自動車専用道路脇の空気中のアンモニア量

自動車専用道路周辺の空気のサンプリングは道路わきに高さ 2.5 m の遮音フェンスがある **M** 地域 (元八王子三丁目) で行われた。対照試料は降水試料の場合と同じ **R** 地点で採取された。地域断面図 (Fig. 2) に示すように、自動車専用道路から数十 m ごとにエアースンプラーを設置して、気温の変化の少ない時間帯をえらび、4 時間 (10 時 30 分～14 時 30 分) 同時に試料採取を行った。各サンプルの吸引空気量は 5.28 m^3 である。エアースンプラーによって吸引された空気は吸収ビン中の

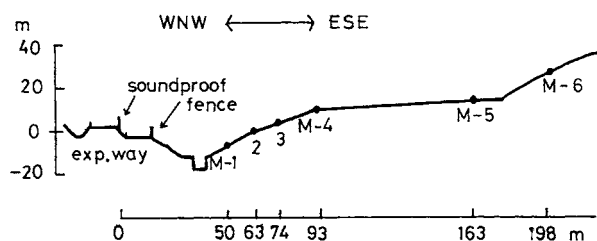


Fig. 2 Geographical cross section of M area.

200 ml の純水中に導かれ、水溶性成分が捕捉される。吸収液を純水にしたのは、この研究では降水によってウオッシュアウトされる成分を対象にしているからである。採取溶液中の H^+ イオンの量も調べた。

以上の実験の試料について、金属イオンは原子吸光法で、 NH_4^+ イオンはインドフェノール吸光法で、 H^+ イオン濃度は pH メータで、陰イオンは陰イオンクロマトグラフィーで定量分析された。

気象データは気温、雨量ともに現地で調べた。

中央自動車道の交通量 (Table 4 に記載) は日本道路公団東京第一管理局八王子支局より回答されたものである。

3. 結果と考察

3. 1 自動車専用道路周辺の降水成分の特異性

A および **B** 地点の初期降水の成分濃度と対照地点 (**R**) の同一時降水の成分濃度差を Table 1-a および 1-b に示す。表中でデータは暖候期 (5～10 月、日平均気温 $15\sim 30^\circ\text{C}$)、寒候期 (11～4 月、 $0\sim 15^\circ\text{C}$) ごとに横野線で仕切られている。対照地点 **R** の 1993～1995 年の初期降水の成分濃度と降水量は別報⁵⁾に記載されているので省略する。Table 1-a および 1-b のデータは試料中に動物の糞尿や昆虫の死骸などの有機体の混入がなく、かつ、**A**、**B** および **R** 地点で同時に採取できた試料についてのみ採用されている。

Table 1-a および 1-b のデータについて、各測定日における 2 地点間の (自動車排気起源の可能性のある) H^+ 、 NH_4^+ 、 NO_3^- および SO_4^{2-} イオン (以後、主要 4 成分と言う) の濃度差と自動車交通量間に単純な相関は見いだせない。それは個々のデータに自動車エンジンの種類とその全交通量に対する割合、気象学的条件、動植物の繁茂状態などの影響因子が複雑に作用するためである。

したがって、このデータの解析には短期間の気象学的な影響のゆらぎおよび、自動車交通の質的変動を相殺するために長期間にわたってデータを集め、測定地点と対照地点間の降水成分濃度差（汚染物質の発生源から各測定地点への飛来量の差と考える）を比較考察する方法が有効である。Table 1-aおよび1-bで、**A**、**B**両地点ともに Na^+ と Cl^- イオンの濃度が殆ど毎対照地点のそれよりも低い（統計学的有意差がある）のは、**A**、**B**地点が**R**地点より3 km だけ海岸からみて内陸側（**A**地点は相模湾岸より北側39 km、**R**地点は36 km）に位置しており、別報⁶⁾に報告したように、相模湾より飛来する海塩の影響度の違いに基づくものと考えられる。

主要4成分についてはいずれも Table 1-a より、暖候期に**A**地点の降水成分濃度は対照地点**R**の降水成分濃度より一般に高いと言えるが、寒候期の**A**地点および**B**地点の降水についてはこの

ままでは対照地点**R**の降水との成分濃度差の有無は明瞭でない。これらのデータを統計学的手法（ t 検定）で扱って、**A**地点と対照地点**R**および**B**地点と対照地点**R**の降水中の各成分について濃度差の有意性を確かめる。その検定結果を Table 2-aおよび2-bに示す。

自動車専用道路から50 m 離れた**A**地点の降水について（Table 2-a）、暖候期には主要4成分とも対照地点**R**の降水のものより非常に高い確率（危険率0.05以下）で高濃度であることが示された。それゆえ、**A**地点の降水が自動車の排気の影響を受けている可能性は極めて高い。しかし、その影響度を H^+ イオンに限って考えると、**A**地点と対照地点**R**の濃度差は影響度の大きい暖候期で平均 $50 \mu\text{mol}/\ell$ 程度、すなわち、対照地点でpH 4.5の降雨は**A**地点ではpH 4.1の降雨になる程度である。

寒候期における H^+ 、 NH_4^+ 、 NO_3^- イオン成分

Table 1-a Differences of the concentration of constituents on the initially-fallen rainwater (2 mm) samples between A point and R point for each rain-fall event (1993 Dec.~1995 May). unit : $\mu\text{mol}/\ell$

date	H^+	NH_4^+	Na^+	Ca^{2+}	Cl^-	NO_3^-	SO_4^{2-}	
Dec. 6	2	145	-104	-85	-171	95	101	*
20	91	-5	17	17	-36	-14	0	
Mar. 8	9	-63	-183	-42	-122	19	19	
Apr. 1	0	24	-17	-25	-16	32	31	
May 4	252	93	-174	-54	-179	270	95	**
11	6	20	-17	-24	-19	38	35	
14	158	190	-191	-67	-218	318	118	
26	35	18	-72	-36	-67	29	111	
June 10	157	140	-20	0	-37	172	52	
July 29	5	51	0	-47	-32	30	94	
Aug. 5	18	57	-8	-28	-13	48	54	
11	13	106	-47	-22	-40	31	80	
19	21	36	-18	-11	-20	25	44	
Sep. 1	7	9	-7	-3	-2	-15	12	
2	2	0	-3	-11	-17	19	14	
10	1	270	-82	-63	-108	100	65	
Oct. 1	57	115	-60	-24	-80	129	19	
Nov. 6	0	37	-84	68	-76	39	106	
Dec. 26	3	131	-3	98	41	5	37	
May 6	26	25	6	5	-20	25	19	**
12	10	83	-64	-74	-78	71	57	
30	-12	67	-96	-73	-109	123	71	

*...cold period **...warm period

Table 1-b Differences of the concentration of constituents on the initially-fallen rainwater (2 mm) samples between B point and R point for each rainfall event (1993 Dec.~1995 May). unit : $\mu\text{mol}/\ell$

date	H^+	NH_4^+	Na^+	Ca^{2+}	Cl^-	NO_3^-	SO_4^{2-}	
Dec. 6	0	5	-84	-32	-101	24	33	*
20	3	-1	-10	8	-21	-3	-2	
Mar. 8	-4	-20	-65	-10	-44	-5	7	
Apr. 1	0	16	-8	4	-7	12	10	
May 4	37	22	-105	-37	-128	40	31	**
11	-16	-1	-32	-39	-76	63	41	
14	87	115	-70	-57	-84	111	73	
26	4	8	-12	-20	-31	7	13	
June 10	15	58	-10	3	-13	70	21	
July 29	-17	7	-20	-6	-23	-2	-4	
Aug. 5	-53	146	-47	-68	-3	103	52	
11	-1	0	-24	-10	-34	17	5	
19	0	0	-3	-9	-9	-5	3	
Sep. 1	76	10	-21	-8	-17	10	10	
2	43	5	-24	-4	-20	13	1	
10	3	0	-29	3	-19	0	-2	
Oct. 1	81	49	-35	-14	-50	80	12	
Nov. 6	41	24	-41	34	-91	38	10	
Dec. 26	1	41	3	18	0	7	27	
May 6	8	83	-34	-20	-110	91	50	**
12	-17	108	-93	5	-114	64	3	
30	5	0	1	5	0	-2	7	

*...cold period **...warm period

Table 2 – a Test of the difference on con-centration of rainwater constituents between A point and R point.

	warm period n=16				cold period n= 6			
	H ⁺	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	H ⁺	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
$\bar{d}$	47.3	80.0	88.3	58.8	17.5	44.8	29.3	49.0
s	74.8	72.7	94.5	34.3	36.2	80.1	37.4	44.1
t ₀	2.5*	4.4**	3.7**	6.8**	1.2	1.4	1.9	2.7*

Table 2 – b Test of the difference on con-centration of rainwater constituents between B point and R point.

	warm period n=16				cold period n= 6			
	H ⁺	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	H ⁺	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
$\bar{d}$	15.9	38.1	41.3	19.8	6.8	10.8	12.2	14.2
s	39.2	49.2	41.3	23.0	16.9	21.1	16.5	13.2
t ₀	1.6	3.1**	4.0**	3.4**	1.0	1.2	1.8	2.6*

n…sample number

 $t_0 \cdots = (\bar{d} \times \sqrt{n}) \div s$ $\bar{d}$ …average of the difference of concentration ($\mu\text{mol}/\ell$)

*…significant

 $t_0 > t(n-1, 0.05)$

s…standard deviation

***…highly significant

 $t_0 > t(n-1, 0.01)$

のA地点への飛来量は暖候期のそれと比べて1/2程度になっている。対照地点との濃度差は明瞭でない。SO₄²⁻イオンの飛来量は若干減少した程度であるが、対照地点の量より明らかに多い。NH₄⁺イオンについては濃度のバラツキが非常に大きい。NH₄⁺イオンは自動車から排出されるときには気体のNH₃であり、水蒸気と共存している。したがって、その飛散落下到達距離は水蒸気の凝縮の程度（気温や湿度で変わる）によって著しく変化すると思われ、各地点における濃度差は複雑なものとなる。

自動車専用道路から250 m離れたB地点の降水成分濃度と対照地点の降水成分濃度の差について（Table 2 – b）、主要4成分はいずれもA地点の場合よりも濃度差の平均が1/2～1/4になっている。注目すべきは、H⁺イオンについて暖候期、寒候期ともに対照地点Rとの濃度差の有意差はない。すなわち、自動車専用道路の影響で降水が酸性化していない。NH₄⁺、NO₃⁻、SO₄²⁻イオンについては暖候期で対照地点より明らかに高濃度である。前報¹⁾で述べたように、自動車排気中のNH₃によって硫酸、硝酸などの酸性物質の中和が行われているものと考えられる。

以上に見られるように、A地点、B地点ともに道路よりの自動車排気が起源と推定される主要4成分の飛来があり、その量は季節によって変わる。SO₄²⁻イオン以外はいずれも暖候期のほうが寒候

期よりも2倍以上多い。H⁺イオンの沈着は暖候期にA地点で明らかだが、B地点では暖候期、寒候期ともに確かでない。

3. 2 自動車排気ガス凝縮液の化学分析

自動車排気中にNH₃が含まれること、および、共存成分の化学的形態を確認するために実験を行った。自動車排気ガスを直径4 cmのガラス管に導き直接氷冷して得られた凝縮液を1時間以内に化学分析した結果をTable 3に示す。

ディーゼルエンジン自動車の凝縮液は酸性で、NO₃⁻およびSO₄²⁻イオンを含む水溶液であった。その中のNH₄⁺イオンの含有量は僅かであり、NO₂⁻およびSO₃²⁻イオンも高速陰イオンクロマトグラフでは検出されなかった。したがって、走行

Table 3 Chemical composition of the condensed solution of car exhaust gas.

engine	pH	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
gasoline* with catalyst	7.8	82.0	trace	trace
gasoline** no catalyst	6.0	0.4	trace	n. d.
diesel***	2.9	0.6	41.0	43.0

unit : mg/ℓ driving condition : for 30 min. rev up

*…Toyota “Corolla” 1300 cc (1992 year type)

**…Suzuki “Alto” 550 cc (1990 year type)

***…Nissan “Terrano” 2700 cc (1990 year type)

中のディーゼル車から排出される NO_x 、 SO_x は十分に酸化されて硝酸、硫酸のミストとなって環境中に放出されていると推測される。

一方、三元触媒付きのガソリンエンジン自動車の凝縮液は微アルカリ性で、多量の NH_4^+ イオンを含む水溶液であった。しかしながら、その中に NO_3^- と SO_4^{2-} イオンは殆ど検出されなかった。すなわち、走行中の触媒付きのガソリン車からは排出される NH_3 ガスと水蒸気が結合して霧状のアンモニア水となって環境中に散布されている。

触媒なしのガソリンエンジン車からの排気の凝縮液からは NH_4^+ と NO_3^- イオンが微量検出され、水溶液は酸性であった。

3.3 道路よりの酸類およびアンモニアの飛散

前節の考察に従えば、走行中の自動車から希薄な硝酸、硫酸およびアンモニア水が環境中に排出散乱される。その大気中の分布状況は共存する水蒸気および水滴の浮遊性に関係すると思えるので、そのときの気温と湿度に影響されると考える。

M地域において採取した空気中の主要4成分（いずれも極めて水によく溶ける）について、気温別に高速道路からの距離に対する濃度分布を

Fig. 3～6に示す。ここで捕集された試料中の NH_4^+ イオンは前節で考察したように、自動車から排出された時には塩の形で存在するのではなく、アンモニア水または NH_3 と水蒸気の混合物であると考える。**M**地域での NH_3 の飛散に関して、Fig. 3に示される濃度分布とTable 4のサンプリング時の自動車交通量をあわせて考察すると、各地点での NH_3 の測定濃度は各測定日の日自動車交通量が4万台から8万台とまちまちであるのに拘わらず、気温範囲毎に近接値群をなしていて、 NH_3 の飛散量への影響度は（この範囲の交通量では）交通量に比べて気温のほうがより支配的であることが推測される。道路から50 mの地点で、気温 $33\sim 35^\circ\text{C}$ における空気中の NH_3 の濃度は約 $0.8\ \mu\text{mol}/\text{m}^3$ （ NH_3 として $0.014\ \text{mg}/\text{m}^3$ ）であり、気温 $21\sim 23^\circ\text{C}$ ではおよそその1/2の $0.4\ \mu\text{mol}/\text{m}^3$ となる。気温 15°C 以下では濃度は対照値とほぼ同じ $0.3\ \mu\text{mol}/\text{m}^3$ となり、道路からの NH_3 の飛散は実質的になくなる。道路脇50～200 mの範囲への NH_3 の飛散量は気温 30°C 付近で急激に増加して、最大 $1.4\ \mu\text{mol}/\text{m}^3$ の NH_3 濃度が観測された。また、 23°C 以上の気温では道路からの距離70～100 mの

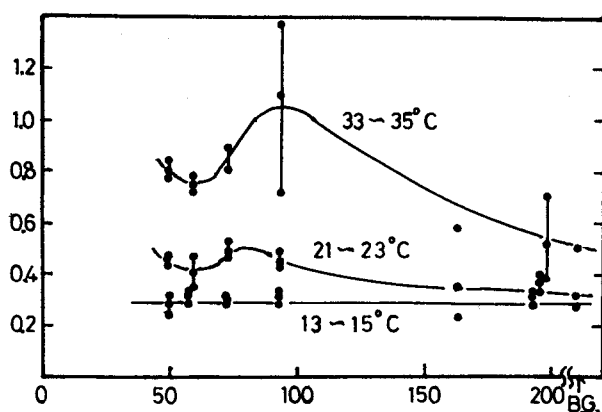


Fig. 3 Concentration of NH_3 in the air at M field.

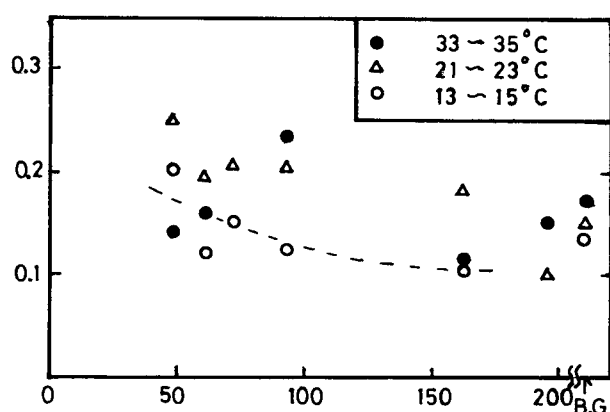


Fig. 4 Concentration of NO_3^- in the air at M field.

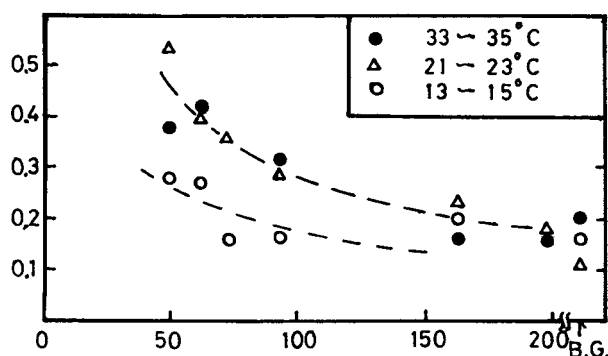


Fig. 5 Concentration of SO_4^{2-} in the air at M field.

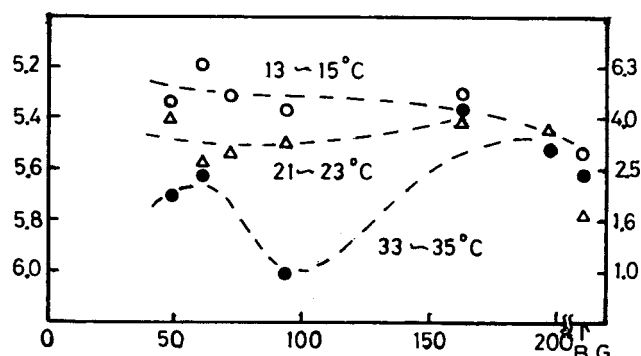


Fig. 6 pH value of the sampled solution at M field.

Table 4 Traffic volume and atmospheric temperature at sampling time.

date	temp.	cars/day
'95 Aug. 3 (Thu.)	35°C	67366
'95 Aug. 26 (Sat.)	36	80720
'96 Jul. 30 (Tue.)	33	61410
'95 Oct. 21 (Sat.)	22	79433
'95 Oct. 31 (Tue.)	23	37683
'96 Oct. 17 (Thu.)	21	69903
'95 Nov. 25 (Sat.)	14	51003
'95 Jan. 5 (Thu.)	14	54349
'97 Jan. 16 (Thu.)	9	39366

地点に濃度の極大点がある。

NO_3^- 、 SO_4^{2-} イオンは前節の実験結果より硝酸、硫酸のかたちで空气中を飛散していると考えられる。**M**地域では硝酸、硫酸 (Fig. 4 と Fig. 5) とともに NH_3 の場合と同様に 15°C 以下の低い気温の場合は道路より 100 m 以上離れると測定値は対照値とほとんど差がなくなる。20°C 以上の場合にはともに飛散量が増し、到達距離も 150 m 程度となる。

捕集試料中の H^+ イオンの濃度は硝酸、硫酸など酸物質と NH_3 の量的関係で決まってくる。Fig. 6 に見られるように捕集試料液の pH 値は 5.2~6.0 のごく弱い酸性であるが、気温 30°C 以上の場合に **M** 地域の道路近傍 100 m 前後で多量の NH_3 の飛来によって中性に近くなっている以外は対照試料の pH 値とあまり差はない。

4. まとめ

日交通量 4~9 万台の自動車専用道路（中央自動車道、元八王子地区）の近傍において、道路から飛来する汚染物質量を調べた。

道路より 50 m の極く近傍では暖候期に降水中の H^+ 、 NH_4^+ 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} イオン濃度が対照地のものより 50~90 $\mu\text{mol}/\ell$ だけ濃かった。しかし、寒候期にはそれらは対照地のものより 20~50 $\mu\text{mol}/\ell$ だけ濃くなっているにとどまる。道路より 250 m 離れた地域では暖候期に降水中の NH_4^+ 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} イオン濃度は対照地のものより高濃

度であるが、 H^+ イオン濃度は暖候期、寒候期ともに対照地の濃度との差が明らかでない。

種類の異なるエンジンを搭載する自動車それぞれの排気を直接水冷して得られた凝縮液の成分を調べた。ディーゼルエンジン車の排気凝縮液中には希薄な硫酸と硝酸が含まれていた。三元触媒を備えたガソリンエンジン車の排気凝縮液中には希薄な NH_3 が含まれていた。

自動車専用道路脇の空気を道路から数 10 m おきに同時にエアースAMPLER で採取して調べたところ、この道路のように交通量の多い道路では、周辺へのアンモニアの飛散量には自動車交通量よりも気温の方が支配的因子であることがわかった。 NH_3 は気温 15°C 以下では殆ど道路外に飛散しないが、30°C 以上では道路より 50~150 m の距離にかなりの量（約 1 $\mu\text{mol}/\text{m}^3$ または 17 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ）が飛散している。この飛散 NH_3 がその地域に降下した酸性物質を中和している。

試料採取に協力をしてくださった本校の平田房雄教官と分析化学教室の学生諸君に感謝いたします。また、資料提供をしてくださった日本道路公団八王子支局に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) Takahashi Y. and Hirata F.: Influence of an expressway on the chemical composition of rainwater., J. Japan Soc. Air Pollut. **28**, 38~43 (1993)
- 2) 小野哲嗣：自動車排ガス対策からみた NO_x 触媒，触媒，**19**, 142~150, (1977)
- 3) Hori S., Sato T. and Abe T.: Analysis of NH_3 emission characteristics from three-way catalyst cars., Int. J. of Vehicle Design, **11**, 188~200 (1990)
- 4) 鷺山亨志ら：自動車からのアンモニアの排出量について，第34回大気汚染学会講演要旨集 p. 318 (1993).
- 5) 平田房雄ら：東京西部（八王子）における酸性雨 X (1994年の降水)，東京工業高等専門学校研究報告書，**27**, 69~72 (1995)
- 6) 高橋義人ら：降水中の海塩の地域分布の調査，同誌，**29**, 59~61 (1997) （平成14年6月20日受理）

音源追尾型 4 輪移動ロボットの開発

小坂敏文*, 牧野兼武***, 吉本定伸*, 西村 亮*, 松林勝志**

Development of a Four-Wheel Robot Pursuing Sound Source

Toshifumi KOSAKA, Kenbu MAKINO, Sadanobu YOSHIMOTO,
Makoto NISHIMURA and Katsushi MATSUBAYASHI

In order to develop a kind of pet robot, the four-wheel robot has developed. It can move to any directions and can rotate about its own center with only the four special wheels called Omni-wheels. In addition, it has four small microphones so that it can detect the sound and move to the sound source. With the technique of cross co-relation and sound source searching algorithm, the robot can pursue the sound source.

In this report, the details of the robot are introduced and how it pursues the sound source is mentioned. (Keywords : Robot, Microphone, Sound Source)

1. はじめに

産業用ロボットが実用化されて以来, 多くのロボットに関する研究が盛んである。ヒューマノイドの開発等アミューズメント分野でのロボット開発も盛んに行なわれている。この報告では, 人と遊ぶペットロボットを目指して, 音源を追尾するロボットを製作したので報告する。

この開発は, 移動できる 4 輪台車ロボット, ロボット車輪駆動用モータ制御技術, 複数マイクロフォンを用いた音源方向探知技術とマイクロコンピュータ技術を復号させたもの作り教育の一環である。

なお, ここで用いた技術は本校に技術蓄積し, ロボットコンテスト等での使用がいつでも可能な状態にしておくこととした。また本報告は学生がロボット設計を行なう際の指針となるよう仕様設定から段階的に詳細設計に移る様子を示す手本となるよう心掛けることとした。また, もの作りに関して詳細な事項は紙面の関係でかけないので, これは Web サイトに掲載することとした。

2. 音源追尾型ロボットに必要な仕様

音源追尾型ロボットに必要な仕様を次のように考える。

- (A1) 自由な方向に直進運動が出来る。
- (A2) ロボットの重心を中心とした自転が出来る。
- (A3) 音源方向を探知できる。
- (A4) 自立型ロボットとして動作し, 電源供給

ラインおよび操縦のためのケーブルを引きずらない

また付加的な仕様として

- (B1) 音源追尾動作を行なうモードと遠隔操作モードの 2 つを使い分けて動作できる
- (B2) 遠隔操作モードでは赤外線通信を用い, ケーブルでつながることはない
- (B3) 遠隔操縦モードではコントローラは市販ゲーム器のコントローラを用い, だれでもすぐに操縦できるようにする。

このような仕様に基づき, 段階的に設計を進める。

3. 音源追尾型ロボットの基本構想

必要な仕様を踏まえた上での基本構想を次のように定める。

- (1) 自由な方向への直進運動, 自転運動を確保し, ロボットの重心位置に左右されない動作を

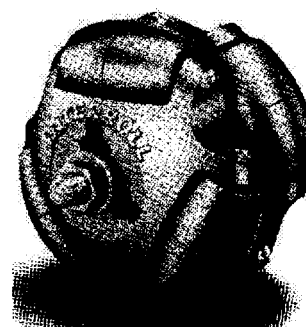


図1 オムニホイルの外形図
(株) 富士製作所…オムニホイルカタログより

行ない、倒れない安定性を確保するため、4 輪駆動とする。またモータ駆動系を単純化するため 4 輪操舵 4 輪駆動方式でなく、オムニホイール (図 1 に示すような、車輪進行方向には進行させる力を伝えるが、それと垂直方向には力を伝えない車輪) 4 輪駆動型を採用する。またモータ駆動はモータドライバモジュールを用い PWM 指令値を与えることとする。

(2) 音源方向探索のため、冗長だが 4 個のマイクロフォンを水平面に置く。4 個のマイクロフォンはお互いの距離をできるだけ遠くにおきたいため、正方形の各頂点に設置する。

(3) 充電を含むメンテナンスが簡単なため、自立動作のための電源は 12V 鉛蓄電池を用いる。ただし、論理回路系とモータドライブ系を分離するため、2つの電池を使うこととする。

(4) 4つのマイクロフォンからの4つのアナログ信号の処理、モータドライブのための PWM 動作、赤外線通信のため、マイクロコンピュータを利用することとし、4個以上の AD コンバータ、4個の PWM 発信機能を内蔵したマイクロコンピュータ日立 H8-3048 を用いたシングルボードマイクロコンピュータ AKI-H8 を制御のためロボットに搭載することとする。

(5) コントローラは SONY の PLAYSTATION で用いられているリモートコントローラを使用し、操縦者用 AKI-H8 で、ボタンの押し下げ状況を読み出すことにする。

(6) 操縦者用 AKI-H8 とロボット搭載 AKI-H8 は RS232C での通信を行なうが、通信ケーブルを使わないため、赤外線 ASK を用いた通信方式とする。

4. ロボット概要

前項の仕様を満足させるため、図 2 に示すような全体構想とする。操縦者側の CPU はリモートコントローラと赤外線発光器間のデータ転送を行

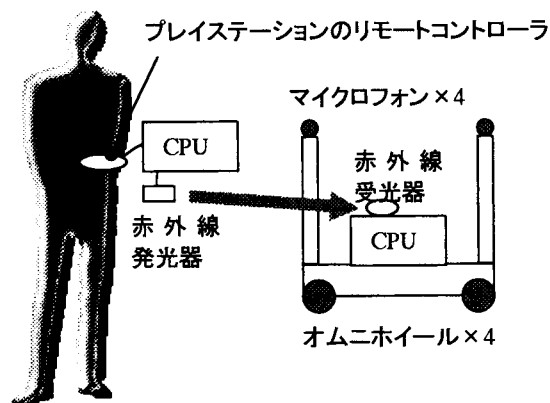


図2 音追尾ロボットの全体構想

表1 リモートコントローラのデータ形式

	bit7	bit6	bit5	bit4	bit3	bit2	bit1	bit0
byte0	←	↓	→	↑	start			select
byte1	□	×	○	△	R1	L1	R2	L2
byte2	Rスティック左右角度 00 - FF							
byte3	Rスティック前後角度 00 - FF							
byte4	Lスティック左右角度 00 - FF							
byte5	Lスティック前後角度 00 - FF							

ない、本体側の CPU は赤外線受光器からの信号と図 3 の 4 個のマイクロフォンで得られた音響信号の両方を解析し、4つの車輪駆動指令を発する役割を負う。

5. 操縦者用 CPU 周辺の動作

本項以降は、仕様の具体化について述べる。操縦者用 CPU の 1 ポートを割り当てて、リモートコントローラ (ジョイスティックを持っているためアナログコントローラと呼ばれている) と通信を行なった。⁽¹⁾通信プロトコルはリモートコントローラ独自の形式であり、インターネット上よりその仕様を調査取得した。また、CPU とのインタフェース (単純にプルアップ抵抗をつける程度)、プログラミングでのタイミングの取り方などは独自に試作し、動作チェックを行なう必要があった。この通信により、リモートコントローラの 14 個のボタンの ON-OFF 状況を CPU は知ることが出来るようになった。また 2 本のジョイスティックに関しても、それぞれ前後左右方向すなわち 4 つの傾き角を CPU は知ることが出来るようになった。表 1 のようにボタンの押し下げ状況およびジョイスティックの傾きは全部で 6 バイトのデータとして CPU は取り込むことが出来た。⁽²⁾

次にリモートコントローラより取得した 6 バイトのデータを、この CPU はシリアルコミュニケーションインタフェースを介して RS232C 通信を行

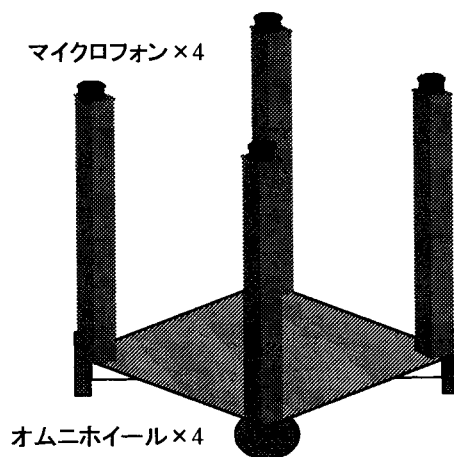


図3 音追尾ロボット本体の構想

表2 シリアル通信設定

項目	値
ビットレート	1200bps
データ	8bit
パリティ	none
ストップビット	1bit

表3 シリアル通信データ

	bit7	bit6	bit5	bit4	bit3	bit2	bit1	bit0
byte0	←	↓	→	↑	start	select	□	0
byte1	×	○	△	R1	L1	R2	L2	0
byte2	Rスティック左右角度 00 - 3F				予備	0		
byte3	Rスティック前後角度 00 - 3F				予備	0		
byte4	Lスティック左右角度 00 - 3F				予備	0		
byte5	Lスティック前後角度 00 - 3F				予備	0		
byte6	sum check							1

ない、ロボット本体のCPUに届ける。⁽³⁾

この時のシリアルコミュニケーションの設定は表2のようになっている。表3のように送信データは7バイト構成とし、第0ビットを見ることで最終バイトを判断している。また第6バイトではデータの信頼性のため、サムチェックを送るようにしている。なおスティックの角度データは上位6ビットのみ送ることとした。

このRS232C信号は途中で38kHzのASK信号となり、赤外線LEDより発光される。

6. ロボット本体のCPUの動作

ロボット本体のCPUへの入力には二つある。一つは赤外線受光素子によって38kHzASK赤外線信号を復調し、操縦者が押したりリモートコントローラのボタンを検出することである。これは各ボタンに割り当てた、直進動作、自転動作等の操縦者の意図を受け取る機能である。もう一つは4つのマイクロフォンからの信号から、音源を感知し、その方向への移動を可能にする機能である。

ASK赤外線信号の復調は赤外線受光モジュールが行なうので、あとは、受光ミスがあった場合についてプログラムでエラー処理するだけで、それ以外は通常に受信データを受け付けばよい。

マイクロフォンからの音響信号は片電源仕様オペレーショナルアンプを用いた60dB増幅回路およびH8CPUに内蔵されたAD変換器によってデジタル化し、音源方向感知が行なわれる。音源方向が感知されたら、ロボットは一定時間(数秒)音源方向に向かって移動し、停止後、次の音源方向探索を行なうようになっている。

移動用モータは4個あり、H8CPUが持つPWM駆動モジュールにより、正転逆転両方向に対してPWM駆動制御が出来る。PWM制御とは指令値がON-OFFの2値だけでデューティ比によってモータ駆動を行なう制御である。正逆転のPWM指令値はモータドライバユニットにより、電力増幅さ

れ、モータを駆動することになる。

7. 4個のマイクロフォンによる音源探知

水平面内に分布した4つのマイクロフォンを用いると、同一水平面内の遠方から音波が到来すると、その方向によりマイクロフォンへの到達時間に一定のずれが生ずる。このずれを利用すると音波の到来方向すなわち音源方向がわかるはずである。ずれの認識には信号処理の分野で言われる相互相関関数を用いる。

4つのマイクロフォンのうちの2つのサンプリングデータ列を $x_i(n)$, $x_j(n)$, ただし($i=0,1,2,3$, $j=0,1,2,3$, $i \neq j$)とする。相互相関関数 $r_{ij}(m)$ は2つの信号の平均値が0で標準偏差が等しいとし、1ブロックのサンプリングデータ数を N とした場合には

$$r_{ij}(m) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1-m} x_i(n) x_j(n+m)$$

と同等となる。一般に $x_i(n)$, $x_j(n)$ がともに非周期関数で、 $x_j(n)$ が $x_i(n)$ をサンプリング周期の m_1 倍の時間遅らせたサンプリングデータ列とした場合には、相互相関関数 $r_{ij}(m)$ は $m = m_{MAXij}$ で最大値(正の実数値)を持つ。

図4に示すように同一平面内に置かれた4つのマイクロフォンに、平面音波が到来すると、幾何学的に定まる6個の行路差が生ずる。4つのマイクでとらえられた4つのサンプリングデータ列の組み合わせで定められる6個の相互相関関数で、最大値を与える m_{MAXij} は行路差に依存している。

本ロボットでは、音の到来方向分解能を45度とした。そして、理論的に到来角度を $k\pi/4$ (ただし $k=0,1,2,3,4,5,6,7$)として最大値を与える m_{kij} を算出しておき、評価値

$$J = \sum_{i,j} r_{ij}(m_{kij})$$

が最大を持つ方向 k を音の到来方向と考えるとい

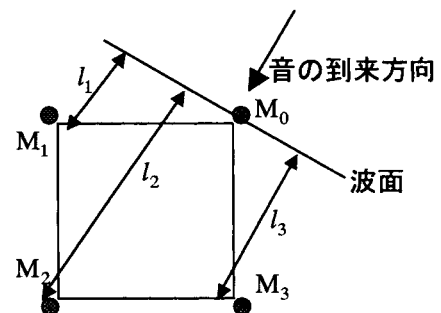


図4 4つのマイクロフォンに平面音波が到来した時の行路差の例

うアルゴリズムを採用している。

8. オムニホイールによる駆動系

図 5 に示すようにオムニホイールは正方形ロボットシャシの 4 つの頂点に 45 度傾いて 1:18 ギアドモータに直接取り付けられている。オムニホイールは車輪の回転方向には力を伝えるが、それとは垂直方向にはすべるだけで力を伝えないため、このような車輪配置が可能になっている。図には 4 つの車輪の正の回転方向が示されているが、4 つの車輪をそれぞれ個別に駆動すると表 4 のような動作が可能となる。

9. 製作した音源追尾型ロボットの性能

製作した音源追尾型ロボット（図 6 参照）の性能を検証した。

（1）赤外線 ASK 通信を利用したリモートコントローラによる遠隔制御は、予定通りの動作を実現した。

（2）音源追尾動作に関しては表 5 のような動作結果を得ている。手をたたいた時の音に対しては 100%の追尾動作成功を収めた。しかし人間

の声に対しては、約 90%の追尾動作成功しかえられていない。これは、人間の声は周期を持った成分が多く、惑わされることが多いと考えられる。

10. まとめ

音源追尾型ロボットを製作し、遠隔操縦および音源追尾動作を確認した。これはペットロボット開発の第 1 歩として意義がある。

参考文献

- 1) 藤田俊男: ソニープレステーション PAD/メモリの解析, <http://www.vector.co.jp/soft/dl/data/game/se020797.html>
- 2) HITACHI: H8/8048F ハードウェアマニュアル
- 3) ロボコンゼミ online 資料: 制御班の作成した H8 を中心とする制御部, <http://tnct20.tokyo-ct.ac.jp/~robosite/machine2001/control/control.html>

（平成 14 年 5 月 8 日受理）

表 5 ロボットの音源追尾動作試験結果

	試行回数[回]	成功回数[回]	成功率[%]
手たたき音	84	84	100
人間の声	199	176	88

表 4 4 つの車輪の回転方向とロボットの動作

(+は車輪が+方向に回転することを, -は車輪が逆方向に回転することを, 0 は車輪が回転しないことを示す)

	W0	W1	W2	W3
前へ移動	+	+	+	+
右前方へ移動	0	+	0	+
右へ移動	-	+	-	+
右後方へ移動	-	0	-	0
後へ移動	-	-	-	-
左後方へ移動	0	-	0	-
左へ移動	+	-	+	-
左前方へ移動	+	0	+	0
時計回り自転	-	+	+	-
反時計回り自転	+	-	-	+

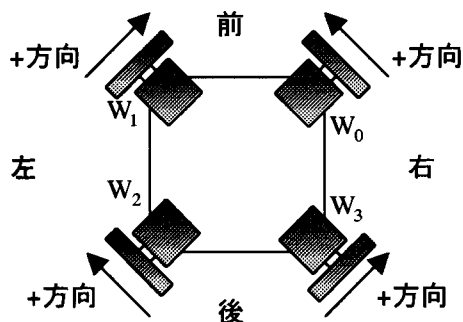


図 5 4 つの車輪（ギアドモータじか付け）の取り付け方と回転方向

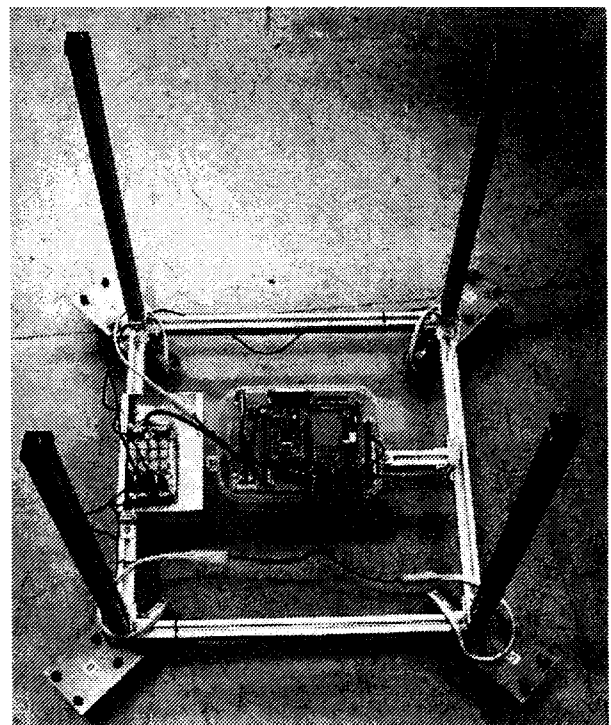


図 6 製作した音源追尾型ロボット
オムニホイールは4隅に45度の角度で取り付けられている。4本の柱の上には小型マイクが取り付けられている

2 階楕円型微分方程式の境界値問題の解の存在定理

拜 田 稔*

Existence theorem of solutions of boundary value problems for second order elliptic differential equations

Minoru HAIDA

We will show an existence theorem of solutions of boundary value problems for second order elliptic differential equations according to lectures given by Prof. S. Hildebrandt at Bonn University during winter semester in 1997.

(Keywords : elliptic, maximum principle)

1 存在定理と先験的評価式

ボン大学の S. Hildebrandt 教授の 1997 年度冬学期の講義に基づいて、2 つの Banach 空間の間の有界線形写像の連続性定理を用いて、2 階線形楕円型微分方程式の境界値問題の解の存在定理を示す。Schauder の評価式と呼ばれる、2 階線形楕円型微分方程式の境界値問題の解に対する先験的評価式が基礎となる。

$$\text{定義 1} \quad L := \sum_{j,k=1}^n a^{jk}(x) D_j D_k + \sum_{j=1}^n b^j(x) D_j + c(x).$$

定理 1 (存在定理 [1, Theorem 6.14]) Ω は $\mathbf{R}^n$ 内の有界な $C^{2,\alpha}$ 級領域 ($0 < \alpha < 1$) とする。さらに、

- (A1) 一様に楕円型 : $a^{jk}(x) = a^{kj}(x)$,
 $(a^{jk}(x))$ の固有値の最小値は λ , 最大値は μ ($0 < \lambda \leq \mu$),
 (A2) $a^{jk}, b^j, c \in C^\alpha(\overline{\Omega})$,
 (A3) $c(x) \leq 0$ for $\forall x \in \Omega$

とする。このとき、与えられた任意の $f \in C^\alpha(\overline{\Omega})$, $\varphi \in C^{2,\alpha}(\overline{\Omega})$ に対して、

$$Lu = f \text{ in } \Omega, u = \varphi \text{ on } \partial\Omega \quad (1.1)$$

の解 u がただ 1 つ、 $C^{2,\alpha}(\overline{\Omega})$ 内に存在する。

定理 2 (先験的評価式 [1, Theorem 6.6]) 領域 Ω は定理 1 と同じものとし、定理 1 の仮定 (A1) が成り立っているとする。さらに、ある正の定数 ν が存在して、

$$|a^{jk}|_{C^\alpha(\overline{\Omega})}, |b^j|_{C^\alpha(\overline{\Omega})}, |c|_{C^\alpha(\overline{\Omega})} \leq \nu \text{ for } \forall x \in \overline{\Omega}, \quad (1.2)$$

とする。さらに、 $\mathbf{R}^n$ 内の C^∞ 級領域 Ω_0 と、 $C^{2,\alpha}$ 級微分同相写像 $\psi \in C^{2,\alpha}(\overline{\Omega}; \mathbf{R}^n) : \overline{\Omega} \rightarrow \overline{\Omega}_0, \phi := \psi^{-1} \in C^{2,\alpha}(\overline{\Omega}_0; \mathbf{R}^n) : \overline{\Omega}_0 \rightarrow \overline{\Omega}$ と正の定数 κ が存在して、

$$|\psi|_{C^{2,\alpha}(\overline{\Omega}; \mathbf{R}^n)}, |\phi|_{C^{2,\alpha}(\overline{\Omega}_0; \mathbf{R}^n)} \leq \kappa \quad (1.3)$$

とする。このとき、ある正の定数 $C(\alpha, \lambda, \mu, \nu, \kappa, \Omega_0)$ が存在して、(1.1) の任意の解 $u \in C^{2,\alpha}(\overline{\Omega})$ は、

$$|u|_{C^{2,\alpha}(\overline{\Omega})} \leq C(\alpha, \lambda, \mu, \nu, \kappa, \Omega_0) \{ |u|_{C^0(\overline{\Omega})} + |f|_{C^\alpha(\overline{\Omega})} + |\varphi|_{C^{2,\alpha}(\overline{\Omega})} \} \quad (1.4)$$

により評価される。

注意 1 $\mathbf{R}^n$ 内の任意の $C^{2,\alpha}$ 級領域 Ω に対して、 $\mathbf{R}^n$ 内の C^∞ 級領域 Ω_0 と、 $\overline{\Omega}$ と $\overline{\Omega}_0$ の間の微分同相写像 $\psi \in C^{2,\alpha}(\overline{\Omega}; \mathbf{R}^n)$, $\phi := \psi^{-1} \in C^{2,\alpha}(\overline{\Omega}_0; \mathbf{R}^n)$ が存在する (cf. [1, Theorem 6.14 の証明])。

2 存在定理の証明

まず、証明に必要な定理を用意する。

定理 3 (連続性定理 [1, Theorem 5.2]) B と X は Banach 空間とする。 $\Lambda, L : B \rightarrow X$ は有界線形写像とし、 $\Lambda B = X$ とする。さらに、ある正の定数 c が存在して、任意の $u \in B$ に対して、 $c\|u\|_B \leq \|L_t u\|_X$ とする。ただし、 $L_t := (1-t)\Lambda + tL = \Lambda + t(L-\Lambda)$ ($0 \leq t \leq 1$) とする。このとき、任意の $t \in [0, 1]$ に対して、 $L_t B = X$ が成り立つ。

証明 ある $s \in [0, 1]$ に対し、 $L_s B = X$ とする。 s に依らない十分小さな $\epsilon > 0$ が存在して、任意の $t \in [0, 1] \cap [s, s+\epsilon]$ と $f \in X$ に対し、 $L_t u = f$ となる、つまり

$$L_s u - (t-s)(\Lambda - L)u = f \quad (2.1)$$

となる $u \in B$ が存在することを示せばよい。ところで、 $c\|u\|_B \leq \|L_s u\|_X$ より、 $L_s^{-1} : X \rightarrow B$ は有界線形写像である。 $Tu := (t-s)L_s^{-1}(\Lambda - L)u$ とおくと (2.1) は、

$$(1-T)u = L_s^{-1}f =: u_s \in B \quad (2.2)$$

と同値である。さらに、 $T : B \rightarrow B$ は有界線形写像であり、 $\epsilon > 0$ を十分小さくとおくと、

$$\|T\| \leq (t-s)\|L_s^{-1}\|\|\Lambda - L\| \leq \frac{\epsilon}{c}\|\Lambda - L\| < 1. \quad (2.3)$$

したがって、(2.2) を満たす $u = (1-T)^{-1}u_s = (1+T+T^2+T^3+\cdots)u_s \in B$ が存在する。□

定理 1 の証明 まず、解の一意性を示す。

$u = u_1, u = u_2$ を (1.1) の 2 つの解とする。 $w := u_1 - u_2$ とおくと、

$$w \in C^0(\overline{\Omega}) \cap C^2(\Omega), Lw = 0 \text{ in } \Omega, w = 0 \text{ on } \partial\Omega.$$

よって、弱最大値原理 ([1, Theorem 3.1]) より、

$$\sup_{\Omega} |w| = \sup_{\partial\Omega} |w| = 0.$$

ゆえに、 Ω 内で $w = 0$ 、すなわち $u_1 = u_2$ である。

次に、補題を用意する。

補題 1

$$f \in L^\infty(\Omega), \varphi \in C^0(\partial\Omega), \text{diam}\Omega \leq d, \\ a^{j,k}, b^j, c \in L^\infty(\Omega), \sum_{j,k=1}^n |a^{j,k}| + \sum_{j=1}^n |b^j| + |c| \leq \lambda^*$$

とし、定理 1 の仮定 (A1)、(A3) が満たされているとする。このとき、ある正の定数 $c = c(\lambda, \lambda^*, d)$ が存在して、(1.1) の各解 $u \in C^0(\overline{\Omega}) \cap C^2(\Omega)$ に対して、評価式

$$|u|_{L^\infty(\Omega)} \leq c(\lambda, \lambda^*, d) |f|_{L^\infty(\Omega)} + |\varphi|_{C^0(\partial\Omega)}$$

が成り立つ。

補題 1 の証明 一般性を失うことなく、

$$\overline{\Omega} \subset \{x; 0 \leq x^1 \leq d\}$$

としてよい。任意の $t \geq 1$ に対し、補助関数 $w \in C^\infty(\mathbf{R}^n)$ を、

$$w(x) := |\varphi|_{C^0(\partial\Omega)} + (e^{dt} - e^{x^1 t}) |f|_{L^\infty(\Omega)} \quad \text{for } x \in \overline{\Omega}$$

ととると、

$$0 \leq w(x) \leq |\varphi|_{C^0(\partial\Omega)} + e^{dt} |f|_{L^\infty(\Omega)} \quad \text{for } x \in \overline{\Omega}.$$

ところで、

$$L = a^{jk}(x) D_j D_k + b^j(x) D_j + c(x), \quad c \leq 0 \quad \text{in } \Omega.$$

よって、

$$\begin{aligned} -Lw &= (a^{11}t^2 + b^1t)e^{x^1 t} |f|_{L^\infty(\Omega)} - cw \\ &\geq (\lambda t - \lambda^*)t |f|_{L^\infty(\Omega)}. \end{aligned}$$

よって、あらかじめ $t = \max\{1, \frac{1+\lambda^*}{\lambda}\}$ ととっておくと、

$$-Lw \geq |f|_{L^\infty(\Omega)}.$$

ここで、 $v := u - w$ とおくと、

$$Lv = Lu - Lw \geq f + |f|_{L^\infty(\Omega)} \geq 0 \quad \text{in } \Omega, \quad v \leq 0 \quad \text{on } \partial\Omega.$$

したがって、強最大値原理 ([1, Theorem 3.5]) より、 v は $\overline{\Omega}$ 内で正の最大値を取り得ない。ゆえに、 Ω 内で $v(x) \leq 0$ 、すなわち $u \leq w$ である。一方、 $L(-u) = -f$ より、 $-u$ についても同様にして Ω 内で $-u \leq w$ がいえる。よって、 Ω 内で $|u| \leq w$ がいえ、 w のとりかたより、ある正の定数 $c = c(\lambda, \lambda^*, d)$ が存在して、

$$|u|_{L^\infty(\Omega)} \leq |\varphi|_{C^0(\partial\Omega)} + c(\lambda, \lambda^*, d) |f|_{L^\infty(\Omega)}$$

がいえる。□

補題 1 と定理 2 より、

定理 4 定理 2 の仮定と定理 1 の仮定 (A3) が満たされるならば、ある正の定数 $C(\alpha, \lambda, \mu, \nu, \kappa, \Omega_0)$ が存在して、(1.1) の任意の解 $u \in C^{2,\alpha}(\bar{\Omega})$ に対して、評価式

$$|u|_{C^{2,\alpha}(\bar{\Omega})} \leq C(\alpha, \lambda, \mu, \nu, \kappa, \Omega_0) \{ |f|_{C^\alpha(\bar{\Omega})} + |\varphi|_{C^{2,\alpha}(\bar{\Omega})} \} \quad (2.4)$$

が成り立つ。

さて、注意 1 より、定理 2 の仮定はすべて成り立っているとしてよい。このとき、任意の $x \in \bar{\Omega}$ に対し、 $y = \psi(x)$ とおくと、 $x = \phi(y)$ である。さらに、

$$z(y) := u(\phi(y)) = u(x) \quad (2.5)$$

とおくと、 $u(x) = z(\psi(x))$ である。さらに、

$$\begin{aligned} D_j u(x) &= D_p z(y) D_j \psi^{(p)}, \\ D_j D_k u(x) &= D_p D_q z(y) D_j \psi^{(p)} D_k \psi^{(q)} + D_p z(y) D_j D_k \psi^{(p)} \end{aligned}$$

であるから、

$$\begin{aligned} (Lu)(x) &= a^{jk}(x) D_j D_k u(x) + b^j(x) D_j u(x) + c(x) u(x) \\ &= a^{jk}(x) (D_p D_q z(y) D_j \psi^{(p)} D_k \psi^{(q)} + D_p z(y) D_j D_k \psi^{(p)}) \\ &\quad + b^j D_p z(y) D_j \psi^{(p)} + c z(y) \\ &= (a^{jk} D_j \psi^{(p)} D_k \psi^{(q)}) D_p D_q z(y) \\ &\quad + (a^{jk} D_j D_k \psi^{(p)} + b^j D_j \psi^{(p)}) D_p z(y) + c z(y) \end{aligned}$$

を得る。ここで、

$$\begin{aligned} \tilde{a}^{pq}(y) &:= a^{jk} D_j \psi^{(p)} D_k \psi^{(q)}, \\ \tilde{b}^p(y) &:= a^{jk} D_j D_k \psi^{(p)} + b^j D_j \psi^{(p)}, \\ \tilde{c}(y) &:= c(x), \\ \tilde{L} &:= \tilde{a}^{pq}(y) D_p D_q + \tilde{b}^p(y) D_p + \tilde{c}(y), \\ \tilde{f}(y) &:= f(x), \\ \tilde{\varphi}(y) &:= \varphi(x) \end{aligned}$$

とおくと、(1.1) の解を求めることは、

$$\tilde{L}z = \tilde{f} \text{ in } \Omega_0, \quad z = \tilde{\varphi} \text{ on } \partial\Omega_0 \quad (2.6)$$

の解を求めることと同値である。さらに、

$$\zeta := z - \tilde{\varphi}, \quad g := \tilde{f} - \tilde{L}\tilde{\varphi}$$

とおくと、 $z = \zeta + \tilde{\varphi}$ であるから、(1.1) の解を求めることは、

$$\tilde{L}\zeta = g \text{ in } \Omega_0, \quad \zeta = 0 \text{ on } \partial\Omega_0 \quad (2.7)$$

の解を求めることと同値である。よって、この境界値問題を解く。

ところで、 Ω_0 は C^∞ 領域であるから、 L^2 理論 [1, Theorem 8.14] より、

補題 2 もし $g \in C^\infty(\overline{\Omega_0})$ ならば、境界値問題

$$\Delta \zeta = g \text{ in } \Omega_0, \zeta = 0 \text{ on } \partial\Omega_0 \quad (2.8)$$

は解 $\zeta \in C^\infty(\overline{\Omega_0})$ を持つ。

しかも、

補題 3 与えられた任意の $g \in C^\alpha(\overline{\Omega_0})$ を、

$$|g_p - g|_{C^0(\overline{\Omega_0})} \longrightarrow 0 \quad (p \longrightarrow \infty), \quad (2.9)$$

$$[g_p]_{\alpha, \overline{\Omega_0}} \leq k |g|_{C^\alpha(\overline{\Omega_0})} \quad (2.10)$$

をみたすような $g_p \in C^\infty(\overline{\Omega_0})$ で近似することができる（ただし、 k は Ω_0 のみによる正定数）。

証明の概略 まず、 $\overline{\Omega_0}$ 上で定義された $g \in C^\alpha(\overline{\Omega_0})$ を、

$$\tilde{g} \in C_0^\alpha(\mathbf{R}^n), \quad (2.11)$$

$$|\tilde{g}|_{C_0^\alpha(\mathbf{R}^n)} \leq k |g|_{C^\alpha(\overline{\Omega_0})}, \quad (2.12)$$

$$\tilde{g} = g \text{ in } \overline{\Omega_0} \quad (2.13)$$

をみたすような $\mathbf{R}^n$ 上の関数 $\tilde{g}$ に拡張する（cf. [1, Lemma 6.37]）。ただし、 k は Ω_0 のみによる正定数である。さらに、任意の実数 $\epsilon > 0$ に対して、

$$\int_{\mathbf{R}^n} k_\epsilon(z) dz = 1, \quad k_\epsilon(z) > 0 \quad (|z| < \epsilon), \quad k_\epsilon(z) = 0 \quad (|z| \geq \epsilon) \quad (2.14)$$

をみたす関数 $k_\epsilon(z) \in C_0^\infty(\mathbf{R}^n)$ を 1 つ選び、

$$\begin{aligned} f_\epsilon \tilde{g}(x) &:= \int_{\mathbf{R}^n} k_\epsilon(x-y) \tilde{g}(y) dy \\ &= \int_{\mathbf{R}^n} k_\epsilon(z) \tilde{g}(x-z) dz \in C_0^\infty(\mathbf{R}^n) \end{aligned} \quad (2.15)$$

と定義する。このとき、

$$\lim_{\epsilon \rightarrow +0} |\tilde{g} - f_\epsilon \tilde{g}|_{C^0(\mathbf{R}^n)} = 0 \quad (2.16)$$

となる。ここで、 $\epsilon_p \searrow 0$ ($p \rightarrow \infty$) となる点列 $\{\epsilon_p\}$ をとり、 $g_p := f_{\epsilon_p} \tilde{g}$ とおくと、

$$|g_p - g|_{C^0(\overline{\Omega_0})} = |f_{\epsilon_p} \tilde{g} - \tilde{g}|_{C^0(\overline{\Omega_0})} \longrightarrow 0 \quad (p \longrightarrow \infty). \quad (2.17)$$

一方、

$$\begin{aligned} g_p(x) - g_p(x') &= f_{\epsilon_p} \tilde{g}(x) - f_{\epsilon_p} \tilde{g}(x') \\ &= \int_{\mathbf{R}^n} k_{\epsilon_p}(z) \tilde{g}(x-z) dz - \int_{\mathbf{R}^n} k_{\epsilon_p}(z) \tilde{g}(x'-z) dz \\ &= \int_{\mathbf{R}^n} k_{\epsilon_p}(z) \{\tilde{g}(x-z) - \tilde{g}(x'-z)\} dz. \end{aligned}$$

よって、

$$\begin{aligned}
 |g_p(x) - g_p(x')| &\leq \int_{\mathbf{R}^n} k_{\epsilon_p}(z) |\tilde{g}(x-z) - \tilde{g}(x'-z)| dz \\
 &\leq \int_{\mathbf{R}^n} k_{\epsilon_p}(z) [\tilde{g}]_{\alpha, \mathbf{R}^n} |x - x'|^\alpha dz \\
 &\leq k|g|_{C^\alpha(\overline{\Omega_0})} |x - x'|^\alpha \int_{\mathbf{R}^n} k_{\epsilon_p}(z) dz \\
 &\leq k|g|_{C^\alpha(\overline{\Omega_0})} |x - x'|^\alpha.
 \end{aligned}$$

したがって、

$$[g_p]_{\alpha, \mathbf{R}^n} \leq k|g|_{C^\alpha(\overline{\Omega_0})} \quad (2.18)$$

を得る。□

補題 2、補題 3 より、

補題 4 もし $g \in C^\alpha(\overline{\Omega_0})$ ならば、境界値問題

$$\Delta \zeta = g \text{ in } \Omega_0, \zeta = 0 \text{ on } \partial\Omega_0 \quad (2.19)$$

は解 $\zeta \in C^{2,\alpha}(\overline{\Omega_0})$ を持つ。

証明 補題 3 より、(2.9)、(2.10) をみたす $g_p \in C^\infty(\overline{\Omega_0})$ が存在する。さらに、補題 2 より、

$$\Delta \zeta_p = g_p \text{ in } \Omega_0, \zeta_p = 0 \text{ on } \partial\Omega_0 \quad (2.20)$$

をみたす $\zeta_p \in C^\infty(\overline{\Omega_0})$ が存在する。定理 4 より、 p によらない正の定数 C が存在して、

$$|\zeta_p|_{C^{2,\alpha}(\overline{\Omega_0})} \leq C|g_p|_{C^\alpha(\overline{\Omega_0})} \leq (g \text{ のみによる定数}) \quad (2.21)$$

が成り立つ。最後の不等号は、(2.9)、(2.10) による。よって、Arzelà-Ascoli の定理より、 $\zeta \in C^2(\overline{\Omega_0})$ と部分列 $\{\zeta_{p_j}\}$ が存在して、

$$\begin{aligned}
 |\zeta - \zeta_{p_j}|_{C^2(\overline{\Omega_0})} &\longrightarrow 0 \text{ for } j \longrightarrow \infty, \\
 |D^2 \zeta_{p_j}(x) - D^2 \zeta_{p_j}(x')| |x - x'|^{-\alpha} &\leq (g \text{ のみによる定数}) \\
 &\text{for } \forall j \in \mathbf{N}, \forall x, x' \in \overline{\Omega_0} \ (x \neq x')
 \end{aligned}$$

が成り立つ。この式で $j \longrightarrow \infty$ とすると、

$$|D^2 \zeta(x) - D^2 \zeta(x')| \leq (g \text{ のみによる定数}) \times |x - x'|^{-\alpha}$$

が得られる。よって、 $\zeta \in C^{2,\alpha}(\overline{\Omega_0})$ である。さらに、(2.20) の p を p_j に置き換えた式で $j \longrightarrow \infty$ とすると、(2.19) を得る。□

ところで、

$$C_0^{2,\alpha}(\overline{\Omega_0}) := \{\xi \in C^{2,\alpha}(\overline{\Omega_0}); \xi = 0 \text{ on } \partial\Omega\} \quad (2.22)$$

とおくと、補題 4 より、

$$\Delta C_0^{2,\alpha}(\overline{\Omega_0}) = C^\alpha(\overline{\Omega_0}) \quad (2.23)$$

ここで、

$$L_t := (1-t)\Delta + t\tilde{L}, \quad (0 \leq t \leq 1) \quad (2.24)$$

とおくと、 $L_t : C_0^{2,\alpha}(\overline{\Omega_0}) \rightarrow C^\alpha(\overline{\Omega_0})$ は有界線形写像で、 $L_0 = \Delta, L_1 = \tilde{L}$ である。さらに、定理 4 より、 $t \in [0, 1]$ によらない正の定数 C^* が存在して、

$$C^*|\zeta|_{C_0^{2,\alpha}(\overline{\Omega_0})} \leq |L_t\zeta|_{C^\alpha(\overline{\Omega_0})} \quad (2.25)$$

が成り立つ。 $C_0^{2,\alpha}(\overline{\Omega_0}), C^\alpha(\overline{\Omega_0})$ は Banach 空間であるから、(2.23)、(2.24)、(2.25) より定理 3 が適用できて、

$$L_1(C_0^{2,\alpha}(\overline{\Omega_0})) = C^\alpha(\overline{\Omega_0}). \quad (2.26)$$

すなわち、

$$\tilde{L}(C_0^{2,\alpha}(\overline{\Omega_0})) = C^\alpha(\overline{\Omega_0}). \quad (2.27)$$

ゆえに、(2.7) は無条件に解ける。これで定理 1 の証明が終わる。□

参考文献

- [1] D.Gilbarg and N.S.Trudinger, Elliptic Partial Differential Equations of Second Order, Second Edition (Revised Third Printing), Springer, Berlin-Heidelberg-New York-Barcelona-Budapest-Hong Kong -London-Milan-Paris-Santa Clara-Singapore-Tokyo, 1998.

(平成 14 年 6 月 5 日受理)

異機種間カラー画像通信のための標準色空間の現状と課題

杉 浦 進*

Issues on the current standard color spaces for network based color image communication

Susumu SUGIURA

Under the prediction of recent trend of the increase of connecting sophisticated color devices to the network for high quality color image communication, international standardization groups have introduced the standard color space around mid of 1990s but different color spaces were proposed from different groups based on their purposes such as color FAX and internet related color communication systems.

But in this moment, I think there are no standard color spaces that dominate in business actually. In this paper, I will review the each standard color space and will point out the their pros and cons. After that based on such review, I will propose that now it is about time to reconsider and to set the uniform color space that will be suited for color image communication including color FAX and internet related color systems.

(Keywords : Standard color space, color gamut, color communication, CIE)

1. はじめに

1990 年代中盤から専門家の間に、将来カラー画像周辺機器の高画質化が進み、更にネットワークが誰でも使える時代が来、その環境下でカラー画像の異機種間通信の時代が来ると予測、何時でも何処でも、高画質なカラー画像通信を簡便に実現出来るネットワーク上の標準色空間を設定することが重要と考え、検討されてきた。特に日本ではカラーファクシミリを中心に標準の色空間を検討してきた。一方マイクロソフト、ヒューレットパッカード社を中心にするグループがインターネット上の標準色空間*1を検討してきた。両者は結果的に異なる色空間を推奨する形になっている。本論文では現在提案されてきた代表的標準色空間を実用面からレビューし、ネットワーク環境下で使われる現在の標準色空間の課題と、著者らが提案したネットワーク上のカラー画像を通信に適する色空間も説明する。

日本では画像電子学会のメンバーを中心に 1995 年代、カラーファクシミリを念頭においたネットワーク上の標準色空間が検討された。その

結果 CIELAB が最適との結論で ITU-T に勧告し Continuous tone color representation method for facsimile とし国際標準になった。この検討の中には XYZ, NTSC-RGB, 並びに筆者らが提案した CES-RGB 色空間等も検討された。*2

一方ヒューレット・パッカード、マイクロソフトが中心となり Standard Default Color Space for the Internet - sRGB が 1996 年後半から検討され始め、国内でも幾つかのモニターメカを中心に sRGB を標準色空間とし関連製品の統一化を推進する動きが始まった。一方、印刷業界は長い経験により蓄積された CMYK 方式を事実上使用している。このように現状では必ずしも統一色空間でネットワーク上のカラー画像データが扱われていないのが現状である。これは、未だに異機種間でのカラー画像通信が広く普及していない事と、特別な業界を除き、余り厳しい色再現精度を要求されていないためであろう。

2. 現状の標準色空間の課題

ネットワーク上での異機種間カラー画像通信において、通信に使用する標準色空間は何をもって

定義するかの議論が最初にあるべきである。私は基本量の CIE・XYZ または XYZ へ容易に変換できる RGB が妥当と考える。これは RGB 値または XYZ 値から各アプリケーションの必要性に応じ CIE が推奨している各種均等知覚色空間にも変換できるし、今後の改良均等知覚色空間にも対応できるからである。CIE1976(L*,a*,b*) 均等知覚色空間は現在広く実用に用いられているが、他の均等色空間を使う利用者もある。

画像電子学会のカラーファクシミリ委員会が検討し選択した CIELAB 方式は CIE・XYZ 表色系を基に均等知覚色空間とし国際的に認められた空間である。しかし現実のスキャナから一義的に取り出せるデータは、色分解された 3 刺激値が求められる。この RGB が基本量で、この RGB の XYZ との変換精度が最も重要な事項である。当然 L*,a*,b* 値から XYZ 刺激値は計算で求められるが、これは基本量に逆戻りする事になる。通常の用途では入力装置から得た RGB データからアプリケーションの要求に応じ XYZ、CIEUVW, CIELab、Luv、CYMK のデータに変換するのが通常で、CIELAB から逆計算して XYZ 基本量に変換しても何ら実用上の利益を得ない。しかも将来更に改良された均等知覚空間が提案された時でも、XYZ に一義的に変換できる RGB であれば問題なく適用できる。従って、ネットワーク上での標準色空間は基本量である CIE・XYZ または一義的に精度良く XYZ と変換が出来る RGB が最適であると考えられる。

一方、マイクロソフト、ヒューレッド・パッカード社、更に日本のカラーモニタ・メーカーを中心に sRGB を中心とする標準色空間の動きが強くなってきている。sRGB 色空間は基本的にハイビジョンモニタの色空間と同じで、カラーモニタでは広く使われている標準色空間である。しかしカラープリンタ、カラーコピー並びに従来からの印刷分野においても印刷される色の中には sRGB 色空間より広い色も現実存在し、更に技術の進歩に合わせ色域の範囲を広げる努力をしている。

図 1 は各記録方式によるカラーパッチの色度及び sRGB 色空間と NTSC 色空間の比較図である。この図からわかるように、現在すでに幾つかの記録装置側の色度点がモニタ色空間より広い部分が

存在する。

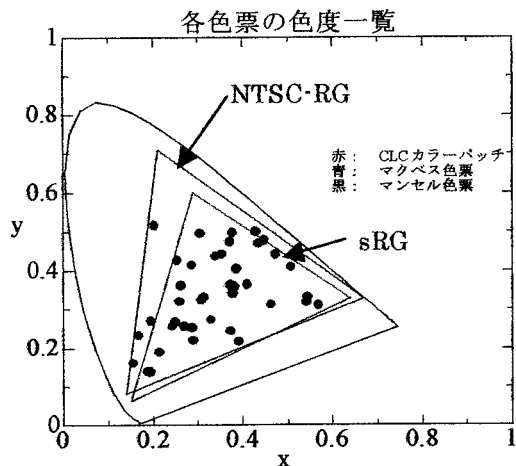


図 1. 各種印刷色及び NTSC,sRGB 色度図

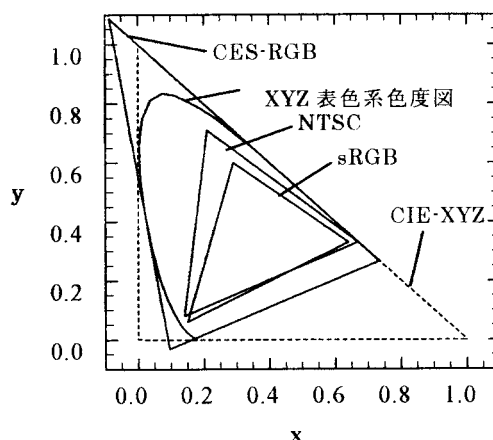


図 2 各種色空間比較

これらはカラー電子写真記録、オフセット印刷により記録されたものである。^{*3}

図 2 は代表的色空間の色度図である。同図において CES-RGB は著者らが画像電子学会に提案した色空間である。^{*4}

	赤		緑		青		基準白色		光源
	x	y	x	y	x	y	x	y	
NTSC	0.670	0.330	0.210	0.710	0.140	0.080	0.310	0.316	C
PAL SECAM	0.640	0.330	0.290	0.600	0.150	0.060	0.313	0.329	D65
HDTV	0.640	0.330	0.300	0.600	0.150	0.060	0.313	0.329	D65
sRGB	0.640	0.330	0.300	0.600	0.150	0.060	0.313	0.329	D65
CIE-XYZ	1.000	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	0.333	0.333	
CES-RGB	0.735	0.265	-0.086	1.086	0.096	-0.031	0.313	0.329	D65

図 3. 各種色空間の原刺激と基準白色

CIE・XYZ と変換するために、各色空間は原刺激、基礎刺激が定義されていることが重要である。

受信 3 原色の色度を $x_R, x_G, x_B, y_R, y_G, y_B, z_R, z_G, z_B$ とすると RGB-XYZ 変換は

$$R = (\Delta_{11} * X - \Delta_{21} * Y + \Delta_{31} * Z) / (\Delta_{11} * X_w - \Delta_{21} * Y_w + \Delta_{31} * Z_w)$$

$$G = (-\Delta_{12} * X + \Delta_{22} * Y - \Delta_{32} * Z) / (-\Delta_{12} * X_w + \Delta_{22} * Y_w - \Delta_{32} * Z_w)$$

$$B = (\Delta_{13} * X - \Delta_{23} * Y + \Delta_{33} * Z) / (\Delta_{13} * X_w - \Delta_{23} * Y_w + \Delta_{33} * Z_w) \quad (1)$$

ここに $\Delta = \begin{bmatrix} x_R & x_G & x_B \\ y_R & y_G & y_B \\ z_R & z_G & z_B \end{bmatrix}$ である。

(1)式から各色空間のXYZとRGB相互変換は表1のようになる。

表1に等色関数 $\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$ を代入すると各色空間での色分解分光特性が得られ図3から図5のようになる。

色空間	変換式
NTSC	$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.910041 & -0.53247 & -0.28822 \\ -0.98464 & 1.999121 & -0.02831 \\ 0.058309 & -0.11839 & 0.89761 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}$
	$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.60688 & 0.17351 & 0.20033 \\ 0.29891 & 0.58661 & 0.11448 \\ 0.00000 & 0.06610 & 1.11615 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}$
sRGB	$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3.240863 & -1.53733 & -0.49859 \\ -0.96924 & 1.875957 & 0.041555 \\ 0.055639 & -0.20401 & 1.057133 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}$
	$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.41240 & 0.35759 & 0.18045 \\ 0.21265 & 0.71517 & 0.07218 \\ 0.01933 & 0.11920 & 0.95039 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}$
CES-RGB	$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.085591 & 0.085968 & -0.10815 \\ -0.49228 & 1.36323 & 0.096094 \\ 0 & 0 & 0.918347 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}$
	$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.89555 & -0.05647 & 0.11137 \\ 0.32338 & 0.71316 & -0.03654 \\ 0 & 0 & 1.08891 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}$

表1 各色空間 RGB と CIE-XYZ の関係

PAL, SECAM, HDTV は sRGB と同じ原刺激、基準白色なので変換式は sRGB で代表した。

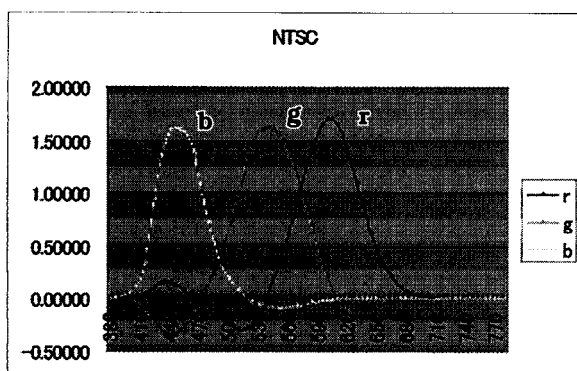


図4 NTSCシステムでの色分解特性

各色分解特性からわかるように NTSC, sRGB 色空間では色分解特性が負になる部分が存在するが CES-RGB 色空間では負の部分が存在しない。これは CIE-xy の色度図から判るように NTSC, sRGB 色空間とも視覚の内側にあるからで、変換

後に負の部分を生じることになる。CES-RGB 色

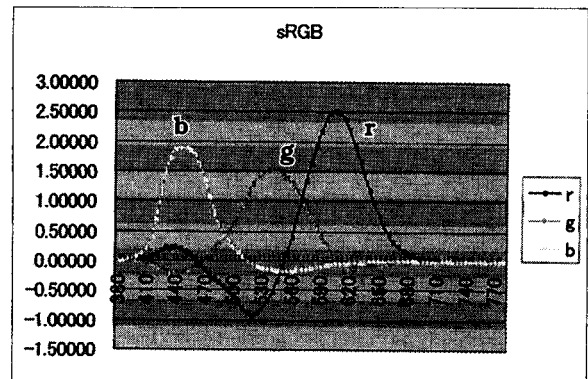


図5 sRGBシステムでの色分解特性

空間は視覚の範囲を接する外側まで空間が存在するため負の部分が発生しない。負の部分は補正特性を加味することにより問題は解決されるが、空間外に存在する色は異なった値とし読み出す可能性があるし、色分解精度的にも良い事ではない。

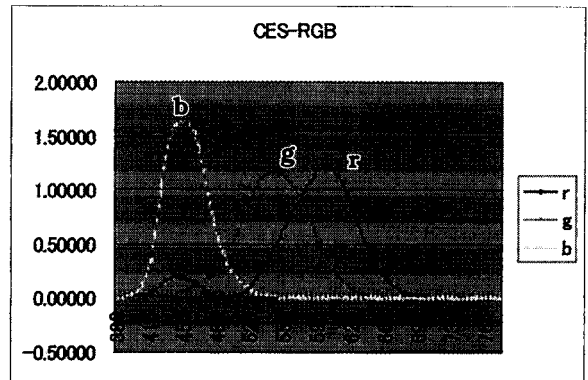


図6 CES-RGBシステムでの色分解特性

4) 各色分解フィルタによる測色のずれ評価

ここでは NTSC-RGB, sRGB, CES-RGB の色分解フィルタを用い、図1で示した各カラーパッチの分光特性と白色基準から計算し得られる RGB 推定値(r,g,b)と各カラーパッチの XYZ 値から RGB 変換した値(RGB)との相関関係を求めた。

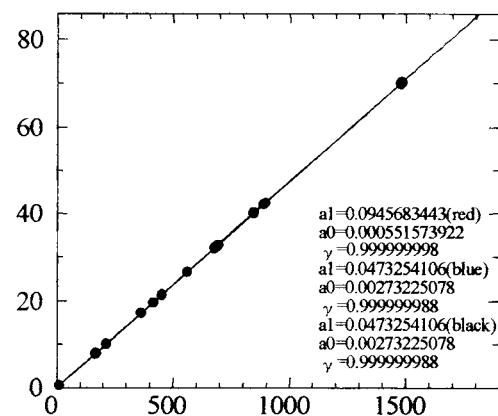


図7 NTSC の rR 特性

図7は NTSC の赤成分での rR 特性で、両者の相

関はほぼ 1 で精度良く各種カラーパッチの赤成分が読み取られていることがわかる。

同様に図 8 と図 9 は NTSC の緑、青成分での gG 特性、bB 特性を示すもので、共に、相関係数がほぼ 1 なり、各カラーパッチの緑、青成分が読み取られていることを示している。従って、NTSC 色空間では、少なくとも今回使用したカラーパッチ

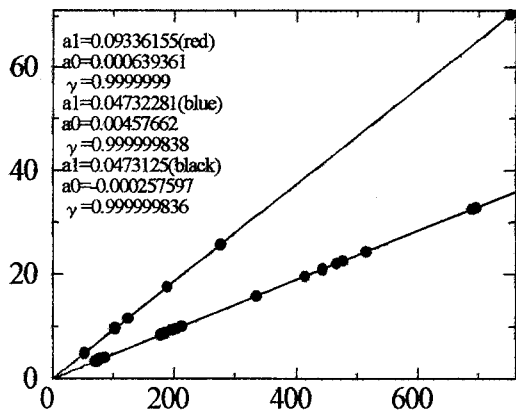


図 8 NTSC の gG 特性

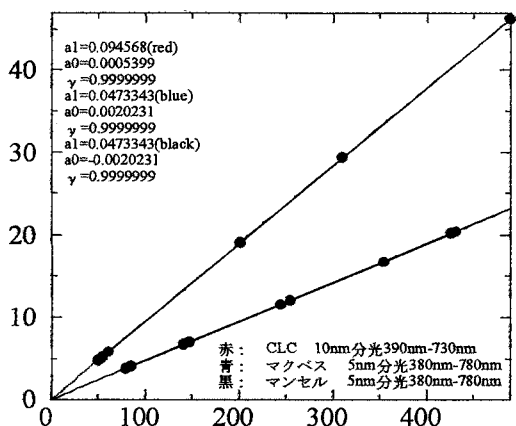


図 9 NTSC の bB 特性

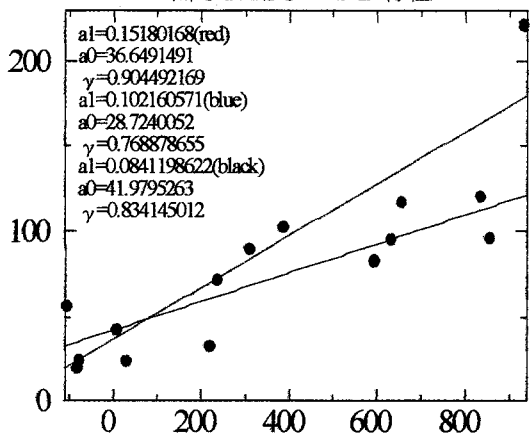


図 10 sRGB の rR 特

では 3 色の色成分を精度良く読み取れることが推定される。

図 10 は sRGB 色空間の赤成分に対する相関特性である。この場合の相関係数は 0.76 から 0.9 と悪くなり、この色空間が赤成分領域で歪みを起こし

て、読み取り精度を悪くしていることが推定される。

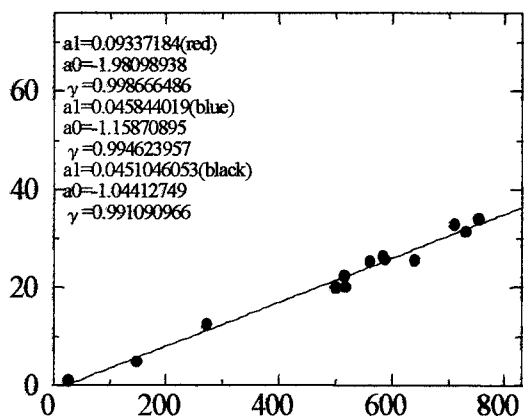


図 11. sRGB の gG 特性

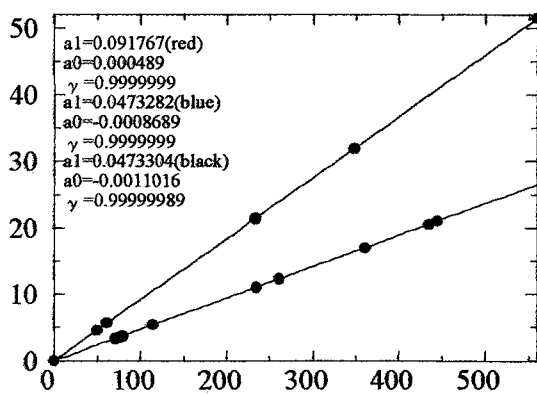


図 12. sRGB の bB 特性

しかし図 11 及び図 12 から緑、青成分では両方共に相関係数がほぼ 1 で、sRGB 空間を用いても精度の良い読み取りが推定される。

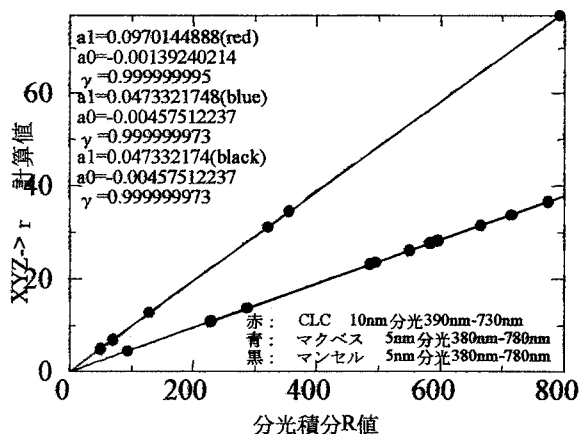


図 13. CES-RGB の rR 特性

図 13 は著者らが提案した異機種間カラー画像通信に適すると考えた色空間 CES-RGB の赤成分での相関特性である。相関係数はほぼ 1 で精度良く全てのカラーパッチを読み取れることが推定される。

同様に図 14, 15 は CES-RGB の gG, bB 特性を示すもので緑、青領域でも各々相関係数がほぼ 1 で、

精度良く色を推定できる。

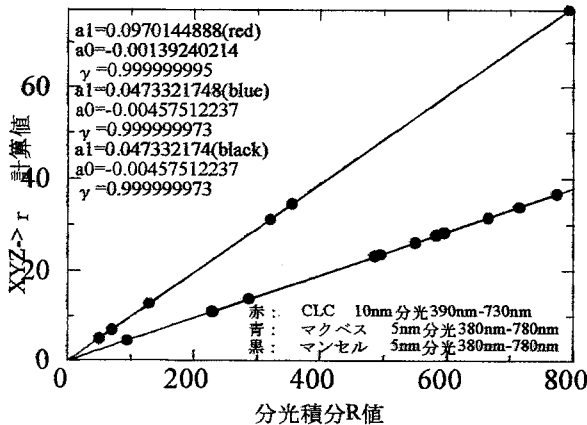


図 14. CES-RGB の gG 特性

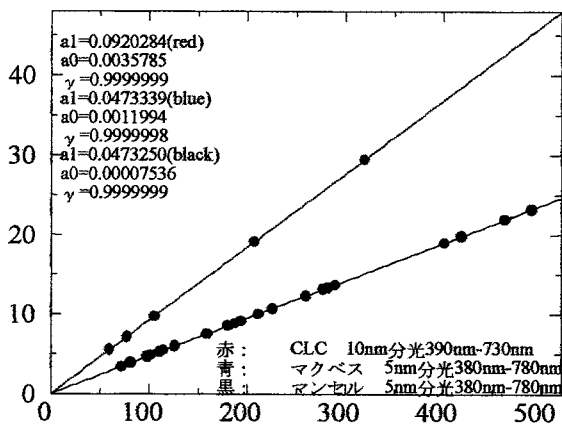


図 15. CES-RGB の bB 特性

5) 標準色空間の量子化問題

標準色空間を大きくすることは、一方では表現できる色域が大きくなる事で、精度良く量子化するのに大きなビット数を必要とする可能性がある。この課題に対しては、著者らの計算^{*4}では

sRGB	7-8 bits /color
NTSC	8 bits /color
CES-RGB	8-9 bits/color
CIE-XYZ	9 bits/color

を得ている。

6) 結論

以上の議論からネットワーク上で標準色空間はカラーファックス、インターネット関連カラー画像通信に拘らず、統一的な色空間が設定されるべきで、その時は

- (1) 標準色空間を用い伝送されるカラーデータがその後のアプリケーションに負担の少ない形のデータが利用されるのが好ましく、カラー画像データの基本量、即ち

CIE-XYZ または XYZ との簡単な相互変換が容易な RGB 色空間が好ましい。

- (2) プリンタ、印刷、及びモニター業界は今後も色域の拡大に努力し、より美しいカラー画像を実現するために日夜努力しているので、標準の企画面から制限の無いように設定したい。
- (3) 量子化ビット数も余り大きくなりすぎない範囲で選択したい。

この辺を目安に今後ともグローバルなカラー画像通に適する標準色空間を再考する時期ではないかと思う。

(注) 今回用いたカラーパッチは

- 1) カラーレーザープリンタで出力した YMCrgb の 5 色
- 2) JIS Z7826 及び に記載されているマクベスとマンセルのカラーパッチである。

参考文献

- 1) A Standard Default Color Space for the Internet - sRGB Michael Stokes, Matthew Anderson, Srinivasan Chandrasekar, Ricardo Motta Nov. 5, 1996
<http://www.w3.org/Graphics/Color/sRGB.html>
- 2) カラーファックス用色空間の評価; 池上、花村、会津、山田、遠藤、石川、金森、加藤、洪、木下; 画像電子学会誌 1995 Vol.24 NO.1, pp.87-110
- 3) マンセルカラーパッチ CIE1974; JISZ8726
- 4) 異機種間カラー画像通信における色空間; 杉浦、宇佐美; 画像電子学会誌 1993 Vol.22 NO.1 pp.11-19

(平成 14 年 6 月 6 日受理)

データリンクプロトコルの体系的学習システム

青野正宏*, 佐藤伸一**, 林はるか**, 小嶋徹也*, 市村 洋*

Systematical Learning System of Data Link Protocol

Masahiro AONO, Shin-ichi SATO, Haruka HAYASHI,
Tetsuya KOJIMA and Hiroshi ICHIMURA

One of the ways of understanding communications protocols is to learn through the experiment on the communications system. It is difficult for students to understand the purpose and the meaning of communications protocols sufficiently by the lecture. The experiment makes them understand protocols easily. We manufactured the experiment support system to understand the communications protocol and report on the outline of this system.

(Keywords : communication, protocol, Learning system, network)

1. はじめに

われわれは、情報通信工学の教育課程のひとつとして、通信プロトコルを教えている。その目的は、通信の仕組みを知ること、仕組みを知ることにより、システムの設計、ソフトウェアの設計、トラブルの解決手段などの基礎的素養を身につけることである。単に知識を教えるのではなく、知的訓練を行って身につけさせるのが望ましい。

通信プロトコルの説明の一般的な方法は、座学による講義である。教科書に記述されているプロトコルの原理・目的・意義を説明し、板書やビデオプロジェクトで重要点を理解させる。また、簡単なペーパーテストや授業中の演習を行なう。このような手段を効果的に組み合わせることにより、一定の教育効果は期待できる。特に、勉学に前向きに取り組む学生や抽象的な思考ができ、理解力がある学生はプロトコルの本質を十分吸収することはできる。しかし、残念ながら一般の学生、試験前のみ勉強する学生に対しては、座学だけでは十分にプロトコルの本質を理解させることは難しい。これらの学生は、理解したつもりになっても多少応用的な課題にぶつかると、それに対応できない。そのため、プロトコル理解の底上げを図るためには、学生にプロトコルを肌で感じさせることが重要である。本学科ではこのような考えの下で既に通信規約・誤り訂正の目視検証システム[1][2]を開発しているが、今回は通信プロトコル

に力点を置いて教材開発を試みた。

2. 学習システムの開発

肌で通信プロトコルを理解させるもっとも適切な手段は、実験・実習を通じて、主体的に学ぶことである。そのため、通信プロトコルの体系的学習システムの開発を計画した。なお、システムの開発とは、単にハードウェア上に構築したソフトウェアのみでなく、学習のさせかたの手順や方法のプロシージャアを作り上げることも目的のひとつとしている。

2. 1 開発の狙い

学習システム開発の狙いは以下のとおりである。

(1) 体系的に通信システムが理解できること。

最初のステップは直感的に十分に理解できる常識的な課題から、徐々に複雑な課題へと進めていく。

(2) 視覚的・直感的に理解できること。

観念的・理論的理解であれば、座学と大差がない。視覚的・直感的に理解できるシステムを目指す。そのため、プロトコルアナライザなどのツールの活用を行う。また表示・入力手段が限られているので制約が大きいですが、できるだけ解りやすいユーザインタフェースを目指す。

(3) 単純化したシステムとする。

実用システムであれば、例外処理やエラー処理

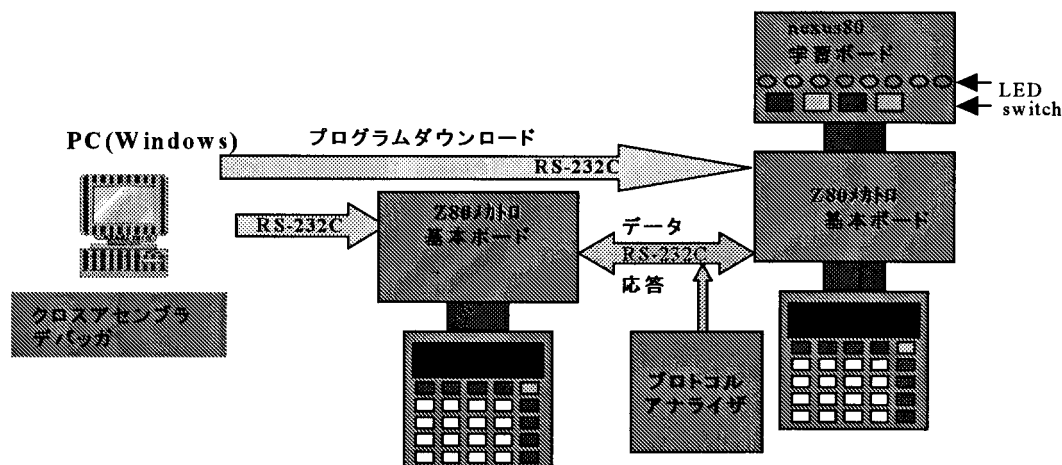


図 1 システム構成図

などが大きな比重を占める。しかし、本システムは教育システムであり、枝葉末節にとらわれ過ぎると本質的な部分の理解を妨げる。そのため、本質的部分を除いて単純化を行う。ただし、エラー処理などの必要性を理解させる目的の場合は、キチンと記述する必要がある。

(4) 通信プログラム開発演習の補助手段とする。

通信ソフトウェアを理解するもっとも良い手段は、実際に通信ソフトウェアを開発することである。しかし、チーム制をとって簡単なプロトコルのソフトウェアを開発するとしても、限られた授業時間では完成させることは難しい。そのため、ある部分は完成部品を与え、プログラム製作により理解力向上に効果的な部分を作らせることにより効果を高める。

(5) 卒業研究生の通信技術力向上

卒業研究生が本システムを開発することにより、研究生自身の通信技術力向上を図る。

2. 2 開発手段

プロセッサ間の通信プログラムを作成するのみであれば、汎用のパーソナルコンピュータを用い、パーソナルコンピュータ間の標準通信プログラムの上に擬似的にデータリンクプロトコルを載せ、通信のシミュレートを行う方法が妥当である。その方法は、ボードコンピュータを用いる方法よりも、教育的・視覚的に分かりやすいユーザインタフェースをディスプレイ画面上に表現すること

ができる点では効果的である。しかし、本システムの開発は、Z80 マイクロプロセッサを用いた NEXUS80 ボードコンピュータ[3]上に、アセンブラとC言語を用いて行った。その理由は次のとおりである。

- (1) プロトコルアナライザで実際のデータの流れを見せて初歩を理解させるためには、複雑な制御キャラクタは流れないほうが良い。
- (2) 直接、送受信のデータを色々加工するためには、原始的なレベルまで直接制御できる方式が良い。それには、アセンブラ言語が適している。
- (3) 一般学生や卒業研究担当者は、一度はアセンブラでプログラムを経験することにより、コンピュータの本質的な部分を理解することができる。開発したシステムのプログラムを一部を隠して学生にプログラムをアセンブラで開発させる経験を積ませることもできる。

図 1 にシステム構成の概念図を示す。この構成に加えて、過去の卒業研究で開発済みであるハード的に通信エラーを起こす雑音印加装置を利用することとした[1][2]。この装置は、自然にエラー状態を作り出せることができるので効果的である。しかし、計画的に一定の確率で通信エラーを起こすことは困難であるため、ソフトウェア的にエラー情報を生成する手段を主とし、雑音印加装置は補助手段とした。通信の伝送速度は視認できる程度にゆっくり流れることが望ましい。あえて、通

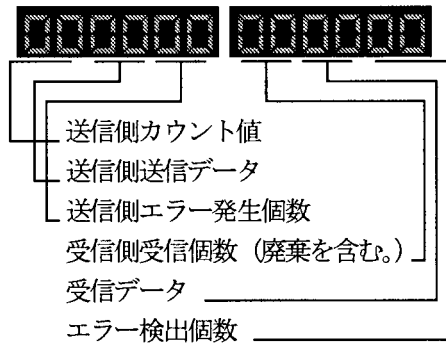


図2 7セグメント表示

信と通信の間にダミー時間を入れてゆつくりとメッセージを流すようにした。ただし、実験ケースによっては、多数のフレームを流して統計的差異を観察するケースもある。その場合はできるだけ早く多くのメッセージを流せるようにした。結果は図2に示す7セグメント表示に結果を示すようにした。

3. 学習システムのプロトコル

本システムは、現実に流通しているプロトコルの仕組みを覚えさせるのではなく、プロトコルの考え方を理解させることを目的としている。最初のステップとして、データリンクプロトコルについて実現する。教材としてタネンバウム著「コンピュータネットワーク」[4]は、プロトコルの仕組みを書籍で理解する目的として、極めて丁寧に解説されており、プロトコル理解の知的訓練目的には名著と言える。その著書で解説されているプロトコルを基本に考えられる中間ステップのプロトコルも加えて、簡単な手順から高度な手順を備えたプロトコルまで順次開発と学習の基準の設計を行う。さらに実用手順として、現実によく普及しており歴史もある HDLC 手順のサブセットを開発するものとする。直接、現実を使用することを目的としていないので、2.1 節で述べたように、複雑な例外処理/エラー処理などは省略する。

3. 1 非制限単方向プロトコル(単一バッファ)

(1) プロトコルの概要

最初に最も単純なプロトコルから学習を開始する。情報の送信元と受信先は固定とする。このプロトコルでは、単に送るのみであり、確認通知

も行わない。何もしないので、送信元のプログラムも受信先のプログラムもきわめて簡単である。確実に相手先にフレームを送るためのフロー制御も誤り制御も行わない楽観的プロトコルである。このプロトコルは、プロトコル処理にノードのプロセッサの処理時間を要することを惜しむような高信頼性/高速回線に適用される。万一、正常に通信できず、再送などの補正の必要が生じた場合は上位プロトコルで対処する。また、リアルタイムでの映像表示/音声出力など多少のエラーがあっても、やむを得ずそのまま次の情報を出力したほうが良いストリーム系情報の伝送の場合にも適用される。

(2) プロトコル学習の狙い

このプロトコル自体は自明である。ここでは、以下の異常状態を作り出し、その問題の確認とこの後に続く以下のプロトコルでその問題がどのように解消されるか確認比較の準備を行う。

- ① フレームにエラーを載せてエラーが発生した場合、フレームが紛失する。
- ② フレーム送信間隔が揺れて、フレーム受信処理間隔(定間隔)より短い場合が生じるとフレームが紛失する。
- ③ フレーム受信間隔が揺れて、フレーム送信間隔(定間隔)より短い場合が生ずるとフレームが紛失する。

(3) 必要な機能

プロトコル学習の狙いを実現するために、次の機能が必要である。

- ① フレームに障害を起こす機能。ソフトウェア的にエラーを起こす場合はエラーを起こす確率を指定し、乱数を用いてランダムにエラーを起こす機能。
- ② フレームの内容が不正であると、それを検出する機能
- ③ 送信したフレーム数, 受信したフレーム数, 正しく受信できたフレーム数を検出できる機能
- ④ フレーム平均送受信間隔及びその偏差を設定できる機能。
- ⑤ 受信のためのバッファは1つしか持たない。次の受信間隔に至るまでの間に、フレームを受信すれば、そのフレームを捨てる。

(4) 学習課題



図3. 非制限単方向プロトコル

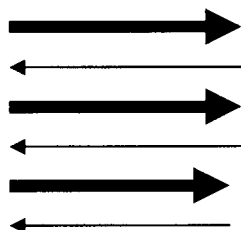


図4. 単方向逐次確認プロトコル

発生する事象は自明であるが、後述のプロトコルとの違いを確認するための準備として以下の課題が考えられる。

- ① 揺れによるフレーム紛失がない状態で設定したエラー率に近い状態でフレームが紛失することを確認する。
- ② 各状況において、理論的フレーム紛失率と実験上のフレーム紛失率が近いことを確認する。
- ③ なお、全体の送信時間を次のステップのプロトコルと比較するため計測しておく。

3. 2 非制限単方向プロトコル（受信バッファつき）

(1) プロトコルの概要

このプロトコルでは、受信局は、複数のバッファを持っているものとする。

(2) 学習の狙い

- ① バッファを設けることにより、送信または受信の揺れによるフレーム紛失が緩和される。
- ② バッファの数が多くなれば紛失するフレームの率が小さくなり、バッファの数が少なければ紛失フレーム数は多い。
- ③ バッファの数を多くして、リアルタイムで一定時間ごとに情報を消化するような場合、バッファを多くすれば、エンドーエンド間の経過時間は大きくなる。
- ④ 送信フレーム数が受信処理能力より大きければ

ばすべてのフレームを処理できない。

(3) 必要な機能

上記の学習の狙いを実現するために、以下の機能が必要である。

- ① 複数のバッファを設け受信先のノードで順次処理できる機能。
- ② 送信されたフレームが受信側の上位プロトコルで処理されるまでの時間を計測できる機能

(4) 学習課題

受信先が1バッファのみの場合と複数バッファの相違を理解する。

- ① 送信元のフレームの送信間隔を揺らせる。揺れの分散を変化させ、受信バッファの数も変化させる。揺れの大きさと受信バッファの数と受信成功率との相互関係のグラフを作成し、考察を行う。
- ② フレームの送信時間を計測し、バッファの大きさその相関関係を考察する。

3. 3 単方向逐次確認プロトコル

(1) 概要

このプロトコルでは、受信局から送信局へフレームの受信処理を行ったことを示す応答を返す。受信局がフレームを正しく受け取れなかった場合は、そのフレームは捨てて応答を返さない。送信局は一定時間応答が返ってこなければフレームを再送する。メッセージは送信局から受信局に流すと同時に受信局から送信局へもメッセージが流れることが必要である。この段階ではフロー制御を行うが、誤り制御はまだ考えない。図3に非制限単方向プロトコルを図4に単方向逐次確認プロトコルの流れを示す。

(2) 学習の狙い

- ① 送信間隔の揺れがあり、バッファ数が1つでも確実にフレームを送ることができることを学習する。（誤り発生の場合を除く。）
- ② 受信局から送信局に返す応答が、冗長な時間となることを学ぶ。

(3) 必要な機能

上記学習を実現するために以下の機能が必要である。

- ① 受信局が受信したフレームの処理を完了すると送信局へ応答を返す。受信が完了してから応答の開始までの時間は設定可能とする。

- ② 送信局は応答を受信してから、次のフレームの送信を開始する。
- ③ 送信フレームを無効にするような機能。
- (4) 学習課題
- ① 送信間隔が受信処理間隔より大きい場合に、受信バッファを増やしても解決できなかったフレームの紛失がなくなることを確認する。
- ② 最初のフレーム送信から最後のフレーム送信までの時間を計測する。受信が完了してから応答開始までの時間、フレーム送信間隔、揺れ、受信成功率などの要素によりどう変わるか確認する。
- ③ フレームにノイズがあつて受信局で受信できない場合または応答が無効になった場合、その時点で通信が中断することを確認する。

3. 4 単方向逐次確認無効メッセージ廃棄プロトコル

(1) 概要

このプロトコルでは、受信局が正しく受信できなければ、受信データを捨てて応答を返さないものとする。送信局では、応答がタイムアウトとなれば、フレームの再送を行う。確実にフレームを送信局から受信局に送ることができるが、応答が失われるとフレームの二重送信が発生する可能性がある。

(2) 学習の狙い

- ① フレームにノイズがあっても正しく送信できることを確認する。
- ② 応答が失われるとフレームの二重送信が発生する。
- ③ タイムアウト時間を長くすると、メッセージ全体を送信するのに時間がかかる。短くしすぎると二重送信の頻度が大きくなる。

(3) 必要な機能

- ① 受信局はフレームを正しく受信できるかノイズが加えられているか判断する機能
- ② 受信局はフレームを正しく受信できなかった場合、フレームを捨てて応答を返さない機能。
- ③ 送信局はフレーム送信後タイマを設定し、一定時間待っても応答が返ってこなければフレームを再送する機能
- ④ 受信局はフレームの重複をカウントする機能。
- ⑤ 送信フレームは指定した割合でノイズを発生

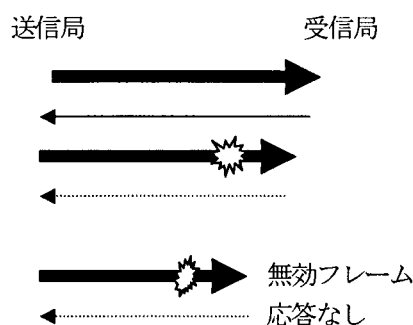


図5. 単方向逐次確認無効メッセージ廃棄プロトコル

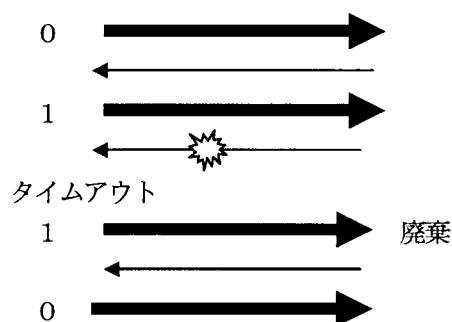


図6. 単方向逐次確認番号付きプロトコル

させる機能

- ⑥ 応答の紛失率を設定する機能
- (4) 学習課題
 - ① 送信のノイズ発生率をある値に設定、応答のエラー率をゼロに設定して正しく送信されることを確認する。
 - ② 設定したタイムアウト時間とメッセージ全体の送信時間の相関関係を考察する。
 - ③ 応答エラーが発生すると、二重送信が発生することを確認する。

3. 5 単方向逐次確認番号付きプロトコル (1 ビットスライディングウィンドウプロトコル)

(1) 概要

単方向逐次確認無効メッセージ廃棄プロトコルでは応答が失われると重複して送信され、受信者は二重に受け取ってしまう。その対策としてフレームのヘッダに順序番号をつける。順序番号は1ビットとする。(偶数と奇数の区別) 送信側 (m 送信に対し) タイムアウトには、 m を再送する。応答が受信側 (m_l に対する応答後) m を受信すれば捨

てて応答のみ返す。 $m+1$ を受信すれば正常処理である。 m に対する応答を受信しないと $m+2$ に進むことはない。 m と $m+2$ と確実に区別するため、タイムアウト判定は十分な長い間隔が必要である。

(2) 学習の狙い

送信局のメッセージがフレームの重複なしに正しく受信局に送信できることを確認する。

(3) 必要な機能

- ① フレームに 1 ビットの順序番号をつける機能
- ② 応答に順序番号を付して返す機能
- ③ 順序番号を確認して重複が発生すれば、そのフレームを廃棄する機能

(4) 学習課題

- ① メッセージをフレームに分解して送信し、応答にエラーを一定の確率で発生させる。それでも正しくメッセージが送信されることを確認する。

4. まとめ

4. 1 学習の目標

どんな場合にどんなプロトコルが良いか理解させる。そのため、メッセージの発生密度、メッセージの大きさを自由に設定し、通信メッセージのビット誤り、紛失、ビジー状態の設定を任意に行えるようにした。また、どんなデータの流れているか観察・理解させる。それには、具体的な文字やビットパターンの流れの観察をプロトコルアナライザを通して行う。さらに、2つのシステム間でプロトコルの齟齬が生じた場合、どのような問題が発生し、どのように解決するかを考えさせる。このためには、偶発的、または故意に生じさせたプロトコルの相違からトラブルを発生させて解決するまでの体験学習をさせるようにした。

4. 2 今後の計画

通信プロトコルの体系的学習システムの開発は、まだデータリンク層における初歩的なプロトコルを部分的に実現したのみである。今後、以下の点について充実を図っていく。

(1) より高度なデータリンクプロトコルの実現

双方向通信、スライディングウィンドウ、逐次応答と一括応答の相違などを理解するためのプロトコル学習機能を実現する。

(2) パソコン援用によるヒューマンマシンインタ

フェースの改善

Z80 及び学習ボードのみでは簡単な数字と LED 表示が利用できるのみであり、表現が不十分である。インタフェース装置にパソコンを後方に配置し、表示・入力機能を利用することにより、学生の理解力向上のための支援を行う。

(3) 現実のプロトコル (HDLC) の教育体系化

データリンク層のもっともポピュラーなプロトコルは HDLC である。Z80 上で HDLC のソフトウェア実装は過去の卒業研究で、基本機能ができあがっている。HDLC 学習のためにどのように体系化と応用を行うか、補足機能を加えるかを検討し、充実を図る。

(4) 他の層のプロトコル学習への拡張

データリンクプロトコルの上位プロトコルとして、まずネットワーク層がある。ネットワーク層の機能もいろいろあるが、特に抽象的に理解が難しいルーティングプロトコルについて、学習システムを充実させるのが、次の目的である。この層の理解のために、多くのコンピュータを接続して現実のネットワークを構築できれば理想的であるが、開発面・資材面などリソースの制約があるので、模擬的であるが視覚的なシミュレーション環境を構築して実現することを今後目指していく。

謝辞

本研究は、東京工業高等専門学校平成 13 年度重点配分経費(教育改善経費)「通信プロトコルの体系的学習実験システムの整備」より予算をいただいて実現したものである。

参考文献

- [1] 杉山務, 市村洋 “情報通信におけるデータ伝送の工学実験への応用”, 東京高専研究報告書第 26 号, pp.47-63(1994.12)
- [2] 市村洋, 藤井敦子, 南川信親, 沼上幸夫, 今井肇 “通信規約誤り検出・訂正符号の目視検証システムの開発”, 東京高専研究報告書第 28 号, pp.49-56(1996.12)
- [3] 竹田仰著 “Z80 シングルコンピュータの入門と実践” 日本システムインテグレーション社
- [4] A・S・タネンバウム著 “コンピュータネットワーク” ピュアソン・エデュケーション社 pp. 1-218

(平成 14 年 6 月 20 日受理)

高次統計量を用いた独立成分分析の厳密解に関する一考察

小嶋徹也*, 青野正宏*

On the Strict Solutions of Independent Component Analysis Using Higher-Order Statistics

Tetsuya KOJIMA and Masahiro AONO

The purpose of independent component analysis (ICA) is to extract the independent components from the given vector-valued signal. Various contrast functions for this problem have been proposed to measure the mutual independence among each component. Many of these functions are based upon the higher-order statistics such as fourth-order cumulants. It is also known that some of such functions can be minimized explicitly in some analytical ways. In this paper, we derive the sufficient condition where the contrast functions based on the higher-order cumulants could be explicitly minimized. The general form of such contrast functions is also evaluated.

(Keywords : independent component analysis (ICA), contrast function, cumulant)

1 はじめに

独立成分分析 (ICA : Independent Component Analysis) とは, ベクトル値をとる観測信号だけから互いに独立な成分を抽出する問題である. 特に, 互いに独立な情報源信号が線形に混合されたものを観測信号と考える場合は, この問題はブラインド情報源分離問題と呼ばれ, 画像や音声処理, さらには無線通信や医療情報処理分野などへの応用も提案されつつある [1, 15].

このような問題に対して, これまでに神経回路網モデルを用いたアルゴリズム [4, 9] をはじめ, 最尤法に基づく解法 [8], 相互情報量の最小化 [7, 13], Jacobi 法によるキュムラント・テンソルの同時対角化 [5, 6] など, 数多くの解法が提案されている.

これまでの多くの研究では, 独立な信号を抽出するためのコントラスト関数として, エントロピーや相互情報量が用いられている. これらの情報量を計算するためには, それぞれの信号の周辺確率密度関数を求めなければならないが, 一般にこれらの計算は困難であり, 多くの場合, 確率密度関

数に対してある種の近似が行なわれている. また, これらのコントラスト関数を最小化 (ないしは最大化) するために, 勾配法などの反復アルゴリズムを用いた手法が提案されており, それらの有効性や安定性も議論されている [2, 3]. しかし, いくつかの反復アルゴリズムに関しては, その収束性が常に保証されるとは限らない.

一方, 4 次のモーメントやキュムラントなどといった高次の統計量に基づくコントラスト関数を用いた手法も提案されている [5, 6, 10, 11, 14, 15]. これらのアルゴリズムの多くは, 観測信号の 2 次無相関化と直交変換 (回転) の二段階からなるアルゴリズムである. 前者が信号の 2 次の統計量に基づく解析であり, 原理的に主成分分析を行なっていることと同値であるのに対し, 後者においては 3 次以上の高次の統計量が重要な役割を果たす. 特に, 2 つの信号のみを観測して, そこから 2 つの独立成分を抽出する場合には, 高次のキュムラントを用いて定義されたコントラスト関数は, ただ 1 個の回転角 θ の関数として表すことができる. したがって, 独立成分分析の問題は, ただ 1

個のパラメータを推定する問題と考えることが可能となる。さらに、このようなコントラスト関数を最小化 (または最大化) するような最適な回転角は、しばしば解析的に厳密に求められることが指摘されている [6, 10, 11]。また、先に述べたエントロピーや相互情報量などといったコントラスト関数も、3 次や 4 次のモーメント、キュムラント等を用いて記述できることが示唆されており [5]、これら高次の統計量を用いた解析が、独立成分分析の解を求める上で本質的なものであると考えることもできる。

本論文の目的は、高次の統計量を用いて定義されたコントラスト関数の性質を、より深く考察することにある。具体的には、2 個の信号のみを考える場合に、最適な回転角が厳密に求められるための十分条件を導出する。また、これらの条件を満たすようなコントラスト関数の一般形も求める。

本論文は以下のように構成されている。第 2 節では、独立成分分析の問題の定式化といくつかの準備を行なうほか、高次統計量を用いた一般的な二段階アルゴリズムに関する説明を行なう。第 3 節では、これまでに提案された高次統計量に基づくいくつかのコントラスト関数とその性質についてまとめる。本論文の主要成果は第 4 節で与えられ、第 5 節で結論を述べる。

2 準備

2.1 問題の定式化

$\mathbf{x}(t) \stackrel{\text{def}}{=} [x_0(t), x_1(t), \dots, x_{m-1}(t)]^T$ を、離散時刻 $t = 0, 1, \dots, N-1$ における m 次元ベクトル値信号の実現値とする。(T は行列またはベクトルの転置を表す。) 各成分の時間系列 $\{x_i(t)\}_{t=0}^{N-1}$ は、定常エルゴードな確率過程と見なせるものと仮定する。

独立成分分析 (ICA) の目的は、このようなベクトル値信号のみを観測して、 n ($n \leq m$) 個の互いに独立な成分を抽出することである。すなわち、

$$\mathbf{z}(t) = W\mathbf{x}(t) \quad (1)$$

なる変換により、各成分が互いに独立な n 次元ベクトル値信号 $\mathbf{z}(t)$ を得る問題であると言い換えることもできる。ここで、 W は正則で時刻 t に依存

しない $n \times m$ 行列である。観測信号 $\mathbf{x}(t)$ として n 個の互いに独立な情報源信号が線形に混合されたものを考える場合、この問題はブラインド情報源分離問題 (BSS: Blind Source Separation) とも呼ばれる。本論文では、簡単のため、 $n = m = 2$ の場合のみを論じる。すなわち、2 次元ベクトル値信号を観測し、そこから 2 個の独立成分を抽出する問題を考える。このとき、 W は 2×2 行列である。

2.2 記号の定義

観測信号が定常エルゴードな確率過程と見なせるという仮定より、ある離散時間系列 $r \stackrel{\text{def}}{=} \{r(t)\}$, $t = 0, 1, \dots, N-1$ の標本平均 $\frac{1}{N} \sum_{t=0}^{N-1} r(t)$ は $N \rightarrow \infty$ のとき、期待値

$$E[R] \stackrel{\text{def}}{=} \int q_R(r) \cdot r \, dr \quad (2)$$

に収束する。ここで、 $q_R(r)$ は、信号 $r(t)$ の確率密度関数 (仮定により時刻 t によらない) であり、 R は q_R に従う任意の確率変数である。(以下、一般の定常時系列に対し同様の記法を用いる。) したがって、信号値系列の長さ N が十分大きいとき、以下の議論における信号値系列の期待値はすべて標本平均で置き換えても差し支えない。

m 次元ベクトル値信号 $\mathbf{r}(t)$ の平均値の周りにおける d 次モーメント (d -th order moment) を

$$\mu_{i_1 i_2 \dots i_d}^R \stackrel{\text{def}}{=} E \left[\prod_{k=1}^d (R_{i_k} - E[R_{i_k}]) \right] \quad (3)$$

で定義する。ここで、添え字 $i_1, i_2, \dots, i_d$ は、それぞれ $\{0, 1, \dots, m-1\}$ のうちいずれかの値をとるものとする。次に、信号 $\mathbf{r}(t)$ の d 次キュムラント (d -th order cumulant) を

$$\begin{aligned} \kappa_{i_1 i_2 \dots i_d}^R &\stackrel{\text{def}}{=} \partial_{i_1} \partial_{i_2} \dots \partial_{i_d} \Psi_R(\boldsymbol{\xi}) \Big|_{\xi_0 = \dots = \xi_{m-1} = 0} \end{aligned} \quad (4)$$

で定義する。ここで、微分演算子 ∂_{i_k} は、任意の添え字 $i_k \in \{0, 1, \dots, m-1\}$ に対し、

$$\partial_{i_k} \stackrel{\text{def}}{=} \frac{\partial}{\partial \xi_{i_k}}, \quad (5)$$

で定義されるものであり, $\Psi_R(\xi)$ はキウムラント母関数 (cumulant generating function)

$$\begin{aligned} \Psi_R(\xi) &= \Psi_R(\xi_0, \xi_1, \dots, \xi_{m-1}) \\ &\stackrel{\text{def}}{=} \log E \left[\exp \left\{ \sum_{k=0}^{m-1} \xi_k R_k \right\} \right] \end{aligned} \quad (6)$$

であるとする. 以下では, $\kappa_{i_1 i_2 \dots i_d}^R$ におけるすべての添え字 $i_1, i_2, \dots, i_d$ が同じとき, これを周辺キウムラント (marginal cumulant) と呼び, $i_1, i_2, \dots, i_d$ の中にただ 1 つでも異なるものがある場合, $\kappa_{i_1 i_2 \dots i_d}^R$ をクロスキウムラント (cross cumulant) と呼ぶ. クロスキウムラントは信号 $\mathbf{r}(t)$ の各成分が互いに独立な場合には, すべて 0 となる. また, モーメントやキウムラントはその定義より, 添え字どうしのいかなる置換に関しても不変である.

信号 $\mathbf{r}(t)$ の平均値の周りにおける 2 次モーメント (およびキウムラント) は $\mathbf{r}(t)$ の各成分の分散, あるいは共分散に相当する. すなわち, $\mathbf{r}(t)$ の分散共分散行列を $V_R \stackrel{\text{def}}{=} [v_{ij}^R]$ で表すと, $v_{ij}^R = \mu_{ij}^R$ と書くことができる. 一般に, 各成分が独立であればクロスキウムラントは 0 となるが, 2 次の場合においては, 信号 $\mathbf{r}(t)$ の各成分が無相関でありさえすれば, $v_{ij}^R = 0$ ($i \neq j$) が成り立つ. このように, 共分散が 0 であるような信号のことを, 以下では 2 次無相関な信号と呼ぶ.

今, 2 次元ベクトル値信号 $\mathbf{r}(t) = [r_0(t), r_1(t)]^T$ の分散共分散行列 V_R が単位行列 I で与えられると仮定すると, 3 次および 4 次のモーメントおよびキウムラントの間には以下のような関係が成り立つことが知られている [12]:

$$\begin{aligned} \kappa_{000}^R &= \mu_{000}^R, & \kappa_{111}^R &= \mu_{111}^R, \\ \kappa_{001}^R &= \mu_{001}^R, & \kappa_{011}^R &= \mu_{011}^R, \\ \kappa_{0000}^R &= \mu_{0000}^R - 3, & \kappa_{1111}^R &= \mu_{1111}^R - 3, \\ \kappa_{0001}^R &= \mu_{0001}^R, & \kappa_{0111}^R &= \mu_{0111}^R, \\ \kappa_{0011}^R &= \mu_{0011}^R - 1. \end{aligned} \quad (7)$$

ここで, ベクトル値信号 $\mathbf{r}(t)$ を任意の $m \times m$ 行列 U で線形変換した信号を $\mathbf{s}(t) \stackrel{\text{def}}{=} U\mathbf{r}(t)$ とする. 行列 U の (i, j) 成分を u_i^j で表すとする. 信号 $\mathbf{s}(t)$ の d 次キウムラントは

$$\kappa_{i_1 i_2 \dots i_d}^S = \sum_{j_1 j_2 \dots j_d} u_{i_1}^{j_1} u_{i_2}^{j_2} \dots u_{i_d}^{j_d} \kappa_{j_1 j_2 \dots j_d}^R \quad (8)$$

で与えられることが, 容易に示される.

2.3 二段階アルゴリズム

本論文で扱う ICA 解法アルゴリズムは, 以下に記すような二段階からなるものである.

アルゴリズム: ($m = 2$ の場合)

第 1 段階 観測信号 $\mathbf{x}(t)$ の 2 次無相関化.

- (a) 観測信号 $\mathbf{x}(t)$ の標本分散共分散行列 V_X を求める.
- (b) 固有値分解ないしは Cholesky 分解などの方法により, $V_X = LL^T$ を満たす行列 L を 1 つ求め, $\mathbf{x}(t)$ を

$$\mathbf{y}(t) := L^{-1}\mathbf{x}(t) \quad (9)$$

と変換する. このとき, 信号 $\mathbf{y}(t)$ の 4 次の標本モーメントを求め, さらに式 (7) と同様の関係を用いて, 4 次の周辺及びクロスキウムラントを計算しておく.

第 2 段階 2 次無相関な信号 $\mathbf{y}(t)$ の回転.

- (a) 信号 $\mathbf{y}(t)$ を行列

$$U(\theta) \stackrel{\text{def}}{=} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (10)$$

を用いて直交変換 (回転) した信号を $\mathbf{z}^\theta(t) \stackrel{\text{def}}{=} U(\theta)\mathbf{y}(t)$ とする. このような信号 $\mathbf{z}^\theta(t)$ の高次のキウムラントを用いて定義されるコントラスト関数 $F_Z(\theta)$ を最小にするような回転角 θ^* を求める.

- (b) 2 次無相関な信号 $\mathbf{y}(t)$ を式 (10) に従い角度 θ^* だけ回転して, 復元信号 $\mathbf{z}^{\theta^*}(t)$ を得る.

ここで, 上のアルゴリズムの正当性を検討してみる. 式 (1) より, 観測信号 $\mathbf{x}(t)$ の分散共分散行列は

$$\begin{aligned} V_X &\stackrel{\text{def}}{=} E[(\mathbf{X} - E[\mathbf{X}])(\mathbf{X} - E[\mathbf{X}])^T] \\ &= E[W^{-1}(\mathbf{Z} - E[\mathbf{Z}])(W^{-1}(\mathbf{Z} - E[\mathbf{Z}]))^T] \\ &= W^{-1} (E[(\mathbf{Z} - E[\mathbf{Z}])(\mathbf{Z} - E[\mathbf{Z}])^T]) W^{-T} \\ &= W^{-1} V_Z W^{-T} \\ &= (W^{-1} \sqrt{V_Z}) (W^{-1} \sqrt{V_Z})^T \end{aligned} \quad (11)$$

と書ける. ここで, $V_Z \stackrel{\text{def}}{=} \text{diag}[\sigma_0^2, \dots, \sigma_{m-1}^2]$ は各成分が独立な信号 $z(t)$ の分散共分散行列であり, また $\sqrt{V_Z} \stackrel{\text{def}}{=} \text{diag}[\sigma_0, \dots, \sigma_{m-1}]$ であるとする. 一方, V_X は上のアルゴリズムの第 1 段階 (b) により $V_X = LL^T$ と分解されていることに注意する. ただし, このような行列 L は必ずしも一意に定まるとは限らない. 一般に, 行列 B が与えられたとき, $AA^T = BB^T$ を満たすような任意の行列 A について, 常に

$$A = BQ^T \quad (12)$$

を満たすような直交行列 Q が存在する. したがって, 行列 L に対し, ある直交行列 Q_L が存在して

$$L = W^{-1}\sqrt{V_Z} Q_L^T \quad (13)$$

と表すことができる. このとき, この行列 L の逆行列 L^{-1} を用いて, 式 (9) のように観測信号 $x(t)$ を変換すると,

$$\begin{aligned} y(t) &= L^{-1}x(t) \\ &= Q_L \left(\sqrt{V_Z} \right)^{-1} WW^{-1}z(t) \\ &= Q_L \left(\sqrt{V_Z} \right)^{-1} z(t) \\ &= Q_L z^*(t) \end{aligned} \quad (14)$$

と書ける. ここで $z^*(t) \stackrel{\text{def}}{=} \left(\sqrt{V_Z} \right)^{-1} z(t)$ は, 信号 $z(t)$ をその分散共分散行列が単位行列 I となるように規格化した信号であり, 仮定よりその成分は互いに独立である. またこのとき, 信号 $y(t)$ の分散共分散行列 V_Y も I に等しく, $y(t)$ は 2 次無相関な信号であると言える.

アルゴリズムの第 2 段階では, あるコントラスト関数 $F_Z(\theta)$ を最小とするような直交変換 Q_L を求めることになる. $F_Z(\theta)$ は信号 $z^\theta(t)$ の高次キュムラントの関数として定義されるが, $z^\theta(t)$ のキュムラントは, 式 (8) より $y(t)$ のキュムラントと直交変換 Q_L により定まる. 一般に 2 次元ベクトルの直交変換は, 回転行列と反転行列の合成により表されるが, 今の場合, 信号の符号の反転を含む振幅の任意性を仮定すれば, 1 個の角度パラメータ θ による回転と見なして差し支えない. したがって, 信号 $y(t)$ のキュムラントをあらかじめ求めてしまえば, $F_Z(\theta)$ はただ 1 つの角度パラメータ θ の関数に他ならず, 多くの場合, 最適な回転角 θ^* を容易に求めることが可能である.

以上より, 本アルゴリズムにより, 観測信号 $x(t)$ を各成分が互いに独立な信号 $z^{\theta^*}(t)$ に変換できることがわかる. ただし, 得られた信号の振幅は, 分散が 1 となるように制限されている点に注意が必要である. また, このアルゴリズムは, $m \geq 3$ の場合にも容易に拡張が可能である. この点については文献 [5, 7, 10, 11, 14, 15] などに詳述されている.

次節では, 以上のようなアルゴリズムに用いられるコントラスト関数として, これまでに提案されてきた代表的なものを紹介する.

3 コントラスト関数

過去の多くの研究において, ICA における信号の独立性を測る尺度として相互情報量やエントロピーのような情報量が用いられてきた [4, 7, 13]. これらの情報量の計算では, しばしば周辺確率密度関数を求める必要が生じるため, Edgeworth 展開や Gram-Charlier 展開を用いてそれらの近似を行なうという手段が取られてきた. ところが, 実際にはこれらの情報量も信号の高次モーメントやキュムラントなどの統計量を用いて記述できることが指摘されている [5]. さらに, 相互情報量などの観点から独立性を測るのではなく, 高次のキュムラントそのものの関数としてコントラスト関数を定義する手法も, 数多く提案されてきた [5, 6, 10, 11, 14, 15].

本節では, このようなコントラスト関数のうちのいくつかを紹介する.

3.1 JADE コントラスト関数

JADE コントラスト関数 [5, 6] は第 1 添え字と第 2 添え字が異なるような 4 次のクロスキュムラントの二乗和, すなわち

$$F_Z^{\text{JADE}}(\theta) \stackrel{\text{def}}{=} \sum_{ijkl \neq iikl} \left(\kappa_{ijkl}^{Z^\theta} \right)^2 \quad (15)$$

として定義される. 添え字の対称性より, $m = 2$ の場合は,

$$\begin{aligned} F_Z^{\text{JADE}}(\theta) &= \left(\kappa_{0001}^{Z^\theta} \right)^2 + 2 \left(\kappa_{0011}^{Z^\theta} \right)^2 + \left(\kappa_{0111}^{Z^\theta} \right)^2 \end{aligned} \quad (16)$$

と書くことができる. このコントラスト関数は明らかに非負であり, また, クロスキウムラントの性質より, ベクトル値信号の各成分が独立であれば, 最小値 0 をとることもわかる. さらに, $m = 2$ の場合には, $F_Z^{\text{JADE}}(\theta)$ を最小とするような回転角 θ^* が厳密に求められることも指摘されている [5, 6].

今, $\mathcal{M}$ を $m \times m$ 行列が張る線形空間の直交基底の一つであるとする. このとき, 確率ベクトル Z^θ とある $m \times m$ 行列 $M \stackrel{\text{def}}{=} [M_{kl}] \in \mathcal{M}$, $(k, l = 0, 1, \dots, m-1)$ に対し, キウムラント行列 (cumulant matrix) を

$$C_{Z^\theta}(M) \stackrel{\text{def}}{=} [c_{ij}^{Z^\theta}(M)], \quad (17)$$

$$c_{ij}^{Z^\theta}(M) \stackrel{\text{def}}{=} \sum_{k,l=0}^{m-1} \kappa_{ijkl}^{Z^\theta} M_{kl}. \quad (18)$$

で定義する. 文献 [6] では, コントラスト関数 $F_Z^{\text{JADE}}(\theta)$ の最小化とキウムラント行列 $C_{Z^\theta}(M)$, $M \in \mathcal{M}$ の同時対角化が同値であることが示されている.

ちなみに, 略語 ‘JADE’ は固有行列の近似的同時対角化 (Joint Approximate Diagonalization of Eigenmatrices) に由来している [5].

3.2 拡張最尤推定量

Zarzoso & Nandi は, 前節で述べた二段階アルゴリズムの第 2 段階で求められる回転角 θ の推定量として,

$$\hat{\theta}_{\text{EML}} = -\frac{1}{4} \tan^{-1}(\eta \cdot \xi) \quad (19)$$

で与えられるものを提案した [14]. ここで, ξ は

$$\xi \stackrel{\text{def}}{=} \frac{4(\kappa_{0111}^Y - \kappa_{0001}^Y)}{\kappa_{0000}^Y - 6\kappa_{0011}^Y + \kappa_{1111}^Y} \quad (20)$$

で定義される統計量であり, η は

$$\begin{aligned} \eta &\stackrel{\text{def}}{=} \text{sgn}(E[(Y_0^2 + Y_1^2)^2] - 8) \\ &= \text{sgn}(\kappa_{0000}^Y + 2\kappa_{0011}^Y + \kappa_{1111}^Y), \end{aligned} \quad (21)$$

とする. $\text{sgn}(x)$ はいわゆる符号関数であり, $x \geq 0$ のとき 1 を, $x < 0$ のとき -1 を値としてとる.

この推定量は, 回転角 θ の最尤推定量 (ML : Maximum Likelihood estimator) [8] :

$$\hat{\theta}_{\text{ML}} \stackrel{\text{def}}{=} \arg \max_{\theta} \sum_{t=0}^{N-1} \log q_Y(\mathbf{Y}|\theta) \quad (22)$$

を改良することにより求められたもので, $\tan^{-1}$ の引数の符号を考慮する事により, $-\pi/4 \leq \theta \leq \pi/4$ の範囲で回転角が一意に求められる事を保証している. このため, この推定量は拡張最尤推定量 (EML : Extended Maximum Likelihood estimator) と呼ばれている. また EML 推定量は, 条件:

$$\kappa_{0000}^Z + \kappa_{1111}^Z \neq 0 \quad (23)$$

が満たされるならば, 不偏推定量であり, 強一致性を有することも示されている [14].

文献 [14] においては, 推定量 (19) そのものはいかなるコントラスト関数をも考慮することなく求められたと主張されている. しかし実際のところは, 次の定理が成り立つことが容易に示される.

定理 1 : 拡張最尤推定量 (19) は, コントラスト関数

$$F_Z^{\text{EML}}(\theta) = \kappa_{0011}^{Z^\theta} \quad (24)$$

を最小にするような回転角 θ^* と等しい.

また, 信号 $z^\theta(t)$ の分散共分散行列が単位行列 I に等しければ, クロスキウムラント $\kappa_{0011}^{Z^\theta}$ が非負であることも容易に確かめることができる.

3.3 3 次および 4 次クロスキウムラントの二乗和

ICA のためのコントラスト関数として

$$\begin{aligned} F_Z^{\text{KNH}}(\theta) &\stackrel{\text{def}}{=} (\kappa_{001}^{Z^\theta})^2 + (\kappa_{011}^{Z^\theta})^2 \\ &\quad + (\kappa_{0001}^{Z^\theta})^2 + 2(\kappa_{0011}^{Z^\theta})^2 + (\kappa_{0111}^{Z^\theta})^2 \end{aligned} \quad (25)$$

で定義されるものを用いる方法も提案されている [10, 11].

このコントラスト関数を最小とするような回転角は, 前述の 2 つの場合と同様に解析的に厳密に求めることが可能である. ただし, このことの証明には非常に込み入った計算が必要であり, 厳密解そのものも大変複雑な形をしているため, ここ

では記述を省略する．文献 [10, 11] では，このコントラスト関数が，画像信号や変調波を線形に混合した観測信号のブラインド分離に有効であることが，計算機シミュレーションによって示されている．

4 ICA の厳密解とコントラスト関数の一般化

$m = 2$ のとき，前節で紹介したコントラスト関数を最小とするような回転角は，いずれの場合も数値計算によらず厳密に求める事が可能である．本節では，これらのコントラスト関数 $F_Z^{\text{JADE}}(\theta)$, $F_Z^{\text{EML}}(\theta)$, $F_Z^{\text{KNH}}(\theta)$ に共通する特別な性質について考察し，これらと同じように厳密解が求められるようなコントラスト関数の一般式を導く．

線形変換に基づくキュムラントの変換式 (8) を用いることにより，以下の定理が成り立つことが容易に証明できる．

定理 2 : $U(\theta) = [u_i^j]$ を 2×2 の回転行列 (10) とし， H_{ijkl}^Y ($i, j, k, l \in \{0, 1\}$) を $\mathbf{y}(t)$ のキュムラントの θ によらない任意の関数とする．このとき，コントラスト関数 $F_Z(\theta)$ が

$$F_Z(\theta) = \sum_{ijkl} u_0^i u_1^j u_0^k u_1^l H_{ijkl}^Y \quad (26)$$

なる形式で表現できると仮定するならば，

$$F_Z(\theta) = A \sin 4\theta + B \cos 4\theta + K \quad (27)$$

$$= \sqrt{A^2 + B^2} \sin(4\theta + \phi) + K$$

が成り立つ．ここで係数 A, B, K および位相 ϕ は

$$A \stackrel{\text{def}}{=} \frac{1}{2} (H_{0001}^Y - H_{0111}^Y), \quad (28)$$

$$B \stackrel{\text{def}}{=} -\frac{1}{8} (H_{0000} - 6H_{0011}^Y + H_{1111}^Y), \quad (29)$$

$$K \stackrel{\text{def}}{=} \frac{1}{8} (H_{0000} + 2H_{0011}^Y + H_{1111}^Y), \quad (30)$$

$$\sin \phi = \frac{B}{\sqrt{A^2 + B^2}}, \quad (31)$$

$$\cos \phi = \frac{A}{\sqrt{A^2 + B^2}} \quad (32)$$

により与えられるものとする．

この定理より，条件 (26) が満たされれば，コントラスト関数はすべて θ に関する単なる正弦関数

として表現できることがわかる．したがって，次の系が明らかに成り立つ．

系 1 : 関係式 (26) が成り立ち，かつ $A \neq 0$ または $B \neq 0$ であるならば，コントラスト関数 $F_Z(\theta)$ は

$$4\theta + \phi = \frac{3\pi}{2} \pmod{2\pi} \quad (33)$$

であるとき，かつこのときに限り最小値 0 をとる．

系 2 : コントラスト関数 $F_Z^{\text{JADE}}(\theta)$, $F_Z^{\text{EML}}(\theta)$, $F_Z^{\text{KNH}}(\theta)$ を最小とするような回転角は，それぞれ $\text{mod } \pi/2$ で厳密かつ一意に求めることができる．

ここで，定理 2 における条件式 (26) は，コントラスト関数の最小値を与える回転角が厳密に求められるための十分条件に過ぎない点に注意しなくてはならない．すなわち，式 (26) を満たさなくても，そのような最適な回転角が厳密に求められるようなコントラスト関数が存在する可能性は残されている．ただし，著者の知る範囲において現在までにそのようなコントラスト関数は提案されていない．

ICA のためのコントラスト関数として意味を持つためには

1. 常に非負であること
2. ベクトル値信号の各成分が独立なとき最小値をとること

の 2 点が本質的に要求される．これらの条件を満たし，かつ定理 2 で与えられた十分条件 (26) を満足するようなコントラスト関数は，上述の 3 つに限らず他にも存在する．4 次のキュムラントまでに限定すれば，同じ性質を持つコントラスト関数のクラスは以下のように与えられる．

定理 3 : 4 次までのキュムラントを考慮するとき，定理 2 で示された十分条件 (26) を満たすようなコントラスト関数の一般式は

$$F_Z^{\text{Gen}}(\theta) \stackrel{\text{def}}{=} \alpha \left[\left(\kappa_{001}^{Z^\theta} \right)^2 + \left(\kappa_{011}^{Z^\theta} \right)^2 \right] + \beta \left[\left(\kappa_{0001}^{Z^\theta} \right)^2 + 2 \left(\kappa_{0011}^{Z^\theta} \right)^2 + \left(\kappa_{0111}^{Z^\theta} \right)^2 \right] + \gamma \cdot \kappa_{0011}^{Z^\theta} \quad (34)$$

で与えられる. ここで, 係数 α, β, γ は任意の非負の定数とする.

上で与えた一般式は常に非負であり, 信号 $\mathbf{z}(t)$ の各成分が独立であるとき最小値 0 をとる. 定理 3 の証明は省略するが, 以下のようにすれば簡単に検証することができる. まず, 3 次または 4 次のキウムラントおよびそれらの平方から, 1 個以上の統計量を任意に選び出し, これらの線形結合を考える. このようにして得られた量のうち, 定理 2 の十分条件, および非負性などの条件を満たすものは, 式 (34) の形で表現されるもの以外にあり得ない.

また, 前節で述べた 3 つのコントラスト関数 $F_Z^{\text{JADE}}(\theta)$, $F_Z^{\text{EML}}(\theta)$, $F_Z^{\text{KNH}}(\theta)$ が式 (34) の特別な場合であることは明らかである.

5 まとめ

本研究では, 独立成分分析 (ICA) のためのコントラスト関数として, 高次のキウムラントを直接用いて定義されたものを取り上げ, それらに共通する特別な性質について考察を行なった. 観測信号が 2 個で, そこから 2 個の独立成分を抽出することを考えた場合, いくつかのコントラスト関数では, それらを最小とするような回転角が解析的に厳密に求められる. すなわち, このことは観測信号から独立成分を抽出するために, いかなる近似や反復アルゴリズムも必要ないことを示しており, 信号処理の高速化や簡素化を考慮した場合, 非常に重要であると考えられる.

本論文では, そのような最適な回転角が, 厳密にかつ $\text{mod } \pi/2$ で一意に求められるための十分条件を導出した. 抽出した独立成分の置換や信号の実現値における符号の反転などを除けば, $\text{mod } \pi/2$ で一意に解が求められれば十分であり, 本論文で導いた条件を満たせば, $m = 2$ の場合の ICA の本質的な唯一の解が求められることになる. ただし, 本論文で導出された条件は, あくまでも十分条件に過ぎないため, これが必要十分条件であるのか検討することは, 今後の重要な研究課題である. また, 導出された十分条件を満たすようなコントラスト関数の一般形を求め, 過去に提案されたいくつかのコントラスト関数とその特別な場

合であることを示した.

本研究で取り上げたような ICA の解法の有効性は, 観測信号が定常エルゴードな確率過程であると考えられるときに限り保証される. しかし, 一般に画像や音声, 脳波, あるいはアンテナに到来した電磁波の復調信号など, ICA の応用が期待される分野で考慮しなければならない実際の信号は, ほとんどすべてが非定常な信号であるといって差し支えない. したがって, これらの分野に本研究で述べたようなコントラスト関数を用いた解法をそのまま適用しても, 必ずしも良い結果が得られるとは限らない. これに対し, そのような非定常な信号を, 一見定常な信号に見えるような小さなブロックに分割して前処理を行なうことにより, 解析の精度を向上させることが考えられる. このような試みはあまり例がなく, その有効性に対する検証も不十分であるため, 今後, 研究を進めることが重要である.

また, 観測信号に関する情報が事前にある程度わかっている場合, 例えば, 信号が顔画像である場合や特定の方式で変調された CDMA 信号の受信波である場合などは, これらの信号に関する事前知識をうまく利用することにより, 解析精度を向上させることが可能であると考えられる. さらに, 本研究で取り上げたような二段階式のバッチ処理型アルゴリズムをオンライン化し, 信号入力と同時に独立成分を出力するようなシステムを開発することも, 音声信号や無線信号を考慮する場合には非常に重要であると考えられる.

参考文献

- [1] S. Amari, "Blind Source Separation — Mathematical Foundations," in *Brain-Like Computing and Intelligent Information Systems*, ed. S. Amari and N. Kasabov, pp.153–166, Springer-Verlag, Singapore, 1998.
- [2] S. Amari and J.F. Cardoso, "Blind Source Separation—Semiparametric Statistical Approach," *IEEE Trans. Signal Processing*, vol.45, no.11, pp.2692–2700, Nov. 1997.
- [3] S. Amari, T.P. Chen and A. Cichocki, "Sta-

- bility Analysis of Learning Algorithms for Blind Source Separation," *Neural Networks*, vol. 10, no. 8, pp.1345–1351, Nov. 1997.
- [4] A.J. Bell and T.J. Sejnowski, "An Information - Maximization Approach to Blind Separation and Blind Deconvolution," *Neural Computation*, vol.7, no.6, pp.1129–1159, Nov. 1995.
- [5] J.F. Cardoso, "High-Order Contrasts for Independent Component Analysis," *Neural Computation*, vol.11, no.1, pp.157–192, Jan. 1999.
- [6] J.F. Cardoso and A. Souloumiac, "Blind Beamforming for Non - Gaussian Signals," *IEE Proc. F*, vol.140, no.6, pp.362–370, Dec. 1993.
- [7] P. Comon, "Independent Component Analysis, A New Concept?," *Signal Processing*, vol.36, pp. 287–314, 1994.
- [8] F. Harroy and J. L. Lacoume, "Maximum Likelihood Estimators and Cramer - Rao Bounds in Source Separation," *Signal Processing*, vol. 55, pp. 167–177, 1996.
- [9] C. Jutten and J. Herault, "Blind Separation of Sources, Part I : An Adaptive Algorithm Based on Neuromimetic Architecture," *Signal Processing*, vol.24, pp.1–10, 1991.
- [10] T. Kojima, K. Nagano and T.S. Han, "An Algebraic Approach to Blind Source Separation," 第 21 回情報理論とその応用シンポジウム (SITA'98) 予稿集, vol.2, pp.791–794, Dec. 1998.
- [11] T. Kojima, K. Nagano and T. S. Han, "An Algebraic Off - Line Algorithm for Blind Source Separation," 信学技報, NLP98-104, Feb. 1999.
- [12] A. Stuart and K. Ord, *Kendall's Advanced Theory of Statistics (6th ed.)*, vol.1, Edward Arnold, London, 1994.
- [13] H.H. Yang and S. Amari, "Adaptive On-line Learning Algorithms for Blind Separation : Maximum Entropy and Minimum Mutual Information," *Neural Computation*, vol.9, no.7, pp.1457–1482, Oct. 1997.
- [14] V. Zarzoso and A. K. Nandi, "Blind Separation of Independent Sources for Virtually Any Source Probability Density Function," *IEEE Trans. Signal Processing*, vol. 47, no. 9, pp. 2419–2432, Sep.1999.
- [15] V. Zarzoso and A. K. Nandi, "Blind Source Separation, " in *Blind Estimation Using Higher-Order Statistics*, ed. by A. K. Nandi, pp. 167 – 252, Kluwer Academic Publishers, Boston, 1999.

(平成 14 年 6 月 20 日 受理)

黒鉛層間化合物の電子状態

土屋賢一*, 新田光善**

Electronic States of Graphite Intercalation Compounds

Ken-ichi TSUCHIYA and Mitsuyoshi NITTA

In this work, electronic states of graphite intercalation compounds were estimated theoretically by using simple molecules of alkali metal or halogen doped coronenes. In the calculation, molecular orbitals of the compounds were calculated by using extended Hückel method. As a results, it was found that a Li atom created an electron at the LUMO (π^*) of coronene and a F atom created a hole at HOMO (π) of coronene. When Li and F were doped at a time, it was found that the created electron occupied the hole. (Keywords : GIC, MOPAC)

1. はじめに

黒鉛は層状構造を持ち、その層間に様々な物質を取り込んで、黒鉛層間化合物を生成する。その際、層間に入る物質によって異なった物性が生ずる。例えば、アルカリ金属が入ると電子が放出されて n 型のキャリアとなる事が予想される。同様に、ハロゲンが入った場合、電子がハロゲン原子に取り込まれることによって p 型のキャリアが生ずる事が予想される。本研究はシミュレーションによってこれらの電子状態を調べ、キャリアの生成状況を理論的に推定する事を目的とする。

2. 黒鉛層間化合物のモデル化

計算は MOPAC を用いて行うが、大きな系を想定して全ての C 原子と全ての層間物質を計算に含めるのは事実上不可能である。そこで、本研究においては、最も単純でしかも C 原子の sp^2 電子軌道によってできる平面を含んだ系として coronene ($C_{24}H_{12}$) を考え、その

上に 1 個の Li 原子や F 原子を置いた場合について計算を行った。このモデルが実際の系と異なるのは次の点である。

- (i) coronene は 1 枚の平面状分子であり、層状構造を持たない。
- (ii) C の数が少なく、少数の Li や F しか置く事ができない。
- (iii) coronene の外周が H でキャップされている。

これらの事によって層間の相互作用、層間物質間の相互作用を考慮する事ができなくなる。したがって、本研究の結果にはこれらの相互作用からの影響は含まれない。しかし、たとえ 1 枚の平面状分子であっても、黒鉛と同様、電気伝導に重要な役目を果たす π 電子があり、キャリアの生成状況について考察するために最低限の条件は備わっていると考えられる。また、外周に存在する H は Li や F が外周の C と結合してしまうのを避けるために取り付けたものであり、この事が結果に大きく影響するとは考えられない。

3. 構造最適化

まず coronene 上に Li をドーピングした系について MOPAC を用いてエネルギーを最小化する事によって構造最適化を行った。その結果を Fig.1 に示す。これを見ると Li は六角形の中央から垂直方向に $1.36\text{\AA}$ 離れたところで安定となり、coronene の構造自体にはほとんど変化が見られない事がわかる。

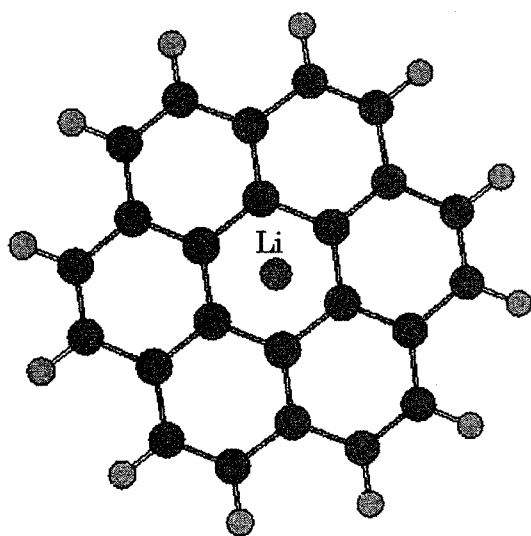


Fig.1 Optimized structure of
Li doped coronene

次に coronene 上に F をドーピングした系について計算した。その結果を Fig.2 に示す。これを見ると、F は 1 つの C 原子の真上に存在し、しかもその C 原子は coronene の平面から上に盛り上がっている事がわかる。これはこの部分の C の電子軌道が sp^2 から sp^3 に変化したためと考えられる。この際 F と盛り上がった C 原子の間の距離は $1.37\text{\AA}$ であった。

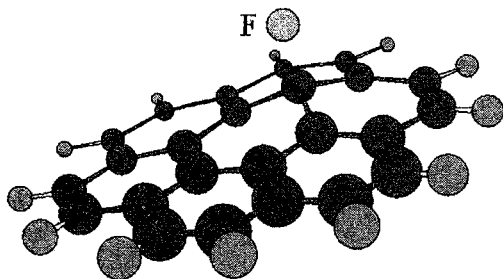


Fig.2 Optimized structure of
F doped coronene

この結果は Saito ら[1]の計算結果とも一致している。

最後に Li と F を同時にドーピングした場合について計算を行った。その結果を Fig.3 に示す。これを見るとほぼ Fig.1 と Fig.2 を重ねたような図になっているが、実際には Li の位置が六角形の中央の真上から少し F とは反対側にずれている。これは 1 個の C が盛り上がり、Li に接近したため、六角形を作る他の 5 個の C と同等間隔を保とうとして中央からずれたものと考えられる。

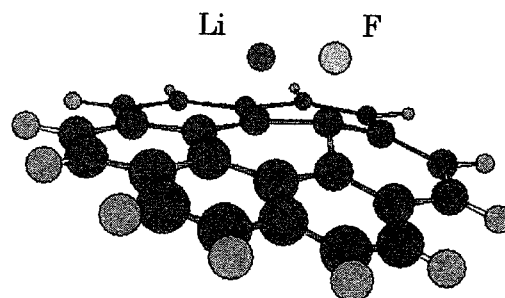


Fig.3 Optimized structure of
Li and F doped coronene

4. エネルギーレベル

ここでは、前節のように最適化された構造を持つ分子について、拡張 Hückel 法[2,3]を用いて分子軌道を計算した結果を示す。

まず coronene のみの場合を考える。この場合、24 個の C それぞれは、単独の原子の時ほとんど変わらない $1s$ 軌道を持ち、そこに入っている電子は分子軌道の形成にはほとんどかわらない。したがって分子軌道にかかわる電子の数は C ($2s^2 2p^2$) 及び H ($1s^1$) の数から考えて $24 \times 4 + 12 \times 1 = 108$ 個であり、分子軌道の数はその半分の 54 個である。この 54 番目の軌道が HOMO であり 55 番目の軌道が LUMO である。coronene に Li や F が加わった場合 HOMO 及び LUMO 付近の分子軌道に変化が見られ、それがキャリアの生成にかかわる。

占有された分子軌道の数は電子配置によって異なるが、それぞれの場合の計算結果は Table 1 のようになった。また、HOMO 及び

LUMO 付近のエネルギーレベルは Fig.4 のようになった。

Table 1 占有分子軌道の数

coronene	54
Li doped coronene	55
F doped coronene	58
Li and F doped coronene	58

Table 1 及び Fig.4 より以下の事がわかる。

- (a) Li をドーピングした場合、Li ($2s^1$)から放出された電子が coronene の LUMO に入り、そこが HOMO となった。すなわち、n 型のキャリアが生成された。
- (b) F をドーピングした場合、F ($2s^2 2p^5$)はその 3 個の $2p$ 軌道のうち 1 つしか詰まっていない軌道を使って C と共有結合をした。その結果、軌道は F の $2s$ とあわせて 4 個増えた。また、F と結合した C は sp^3 混生軌道を作り、盛り上がった。その際、電

子が 1 個足りなくなるため 1 個のホールが生じた。すなわち p 型のキャリアが生成された。

- (c) Li と F をドーピングした場合、軌道数は、F のみをドーピングした場合と変わらない。これは F の影響でできたホールを Li の影響でできた電子がうめてしまったためと考えられる。

ところで、coronene の HOMO は 2 重に縮退した π 軌道であり、LUMO は 2 重に縮退した π^* 軌道である。これら (2 重縮退の片方) を Fig.5 及び Fig.6 に示す。次に Li をドーピングした場合の HOMO 及び F をドーピングした場合の HOMO を Fig.7 及び Fig.8 に示す。これらの軌道は Fig.4 からわかるように、coronene の LUMO(π^*)および HOMO(π)の 2 重縮退が解けてできたものである。これらは、不純物によって coronene 分子の対称性が壊れた事に起因すると考えられる。

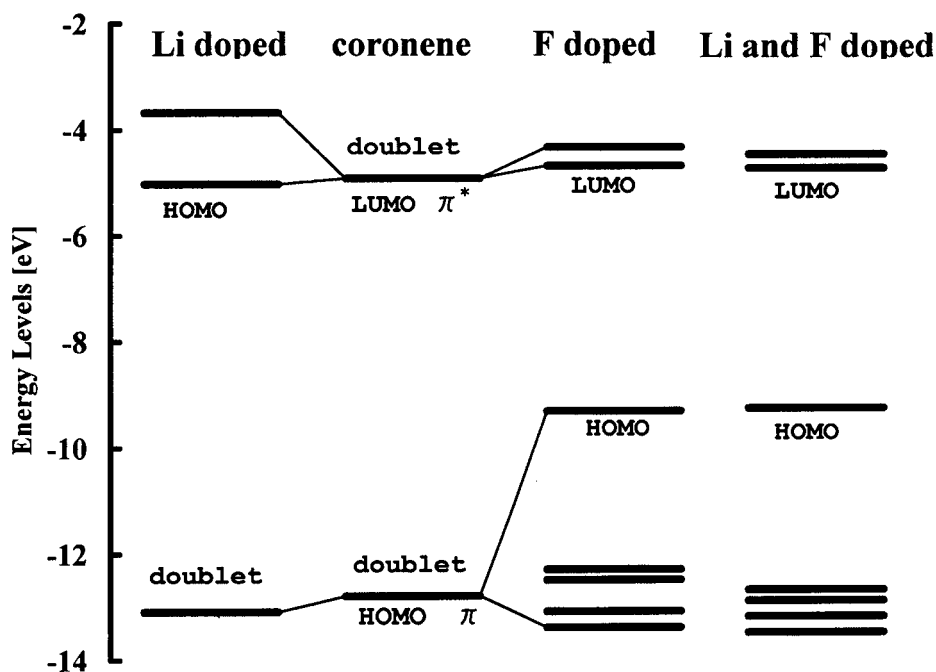


Fig.4 Energy Levels

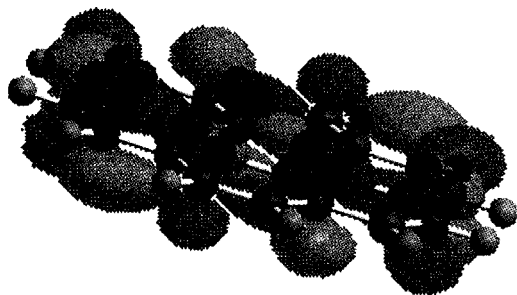
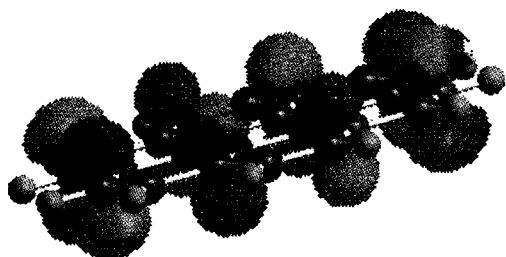
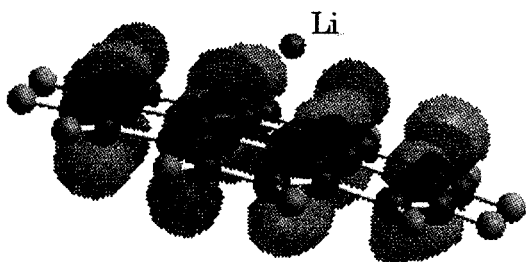
Fig.5 LUMO (π^*) of coroneneFig.6 HOMO (π) of coronene

Fig.7 HOMO of Li doped coronene

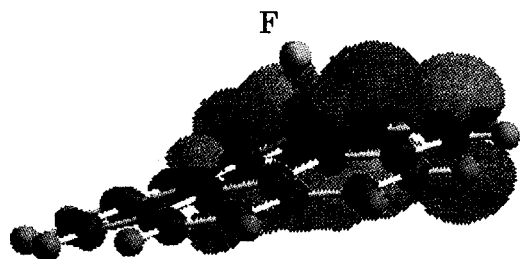


Fig.8 HOMO of F doped coronene

5. 結論

Li をドーピングした場合、Li が coronene の π^* 軌道に電子を供給する。F をドーピングした場

合、F が coronene の π 軌道にホールを作る。これらの事は C, Li, F の数を増やしても同様であると考えられる。また、coronene のように 1 枚の平面のみを考えないで、実際のグラファイトのように層を積み重ねても同様であると考えられる。しかし、グラファイトの層間距離は大きく、通常の方法では MOPAC が多層構造に対応できない。よって、これを確かめるには別の手段を用いる必要がある。

Li と F の両方をドーピングした場合、F の影響でできたホールを Li の影響でできた電子がうめてしまう。もしもこの計算を C, Li, F の数を増やして行くと Li と F の境界付近に空乏層ができ、そこを外れたところでは電子とホールが残って pn 接合ができる可能性がある。この事が起こるかどうかは本研究の結果からはわからないが、大変興味深い事であり、次の仕事としたい。

謝 辞

本研究を行うにあたり、電気通信大学 電子工学科 斎藤理一郎教授から MOPAC を用いた量子化学計算について親切なご指導をいただきました。心から感謝申し上げます。

また、東京工業高等専門学校 物質工学科 阿久沢昇教授及び電気工学科 玉田耕治助教授から貴重なご意見と励ましをいただきました。心から感謝申し上げます。

参考文献

- (1) R. Saito, M. Yagi, T. Kimura, G. Dresselhaus and M. S. Dresselhaus, "Chemical Reaction of Intercalated Atoms at the Edge of Nano-Graphene Cluster", Mol. Cryst. and Liq. Cryst., **340**,71(2000)
- (2) R. Hoffmann, "An Extended Hückel Theory I", J. Chem. Phys., **39**,1397(1963)
- (3) R. Hoffmann, "An Extended Hückel Theory II", J. Chem. Phys., **40**,2745(1965)

(平成 14 年 6 月 19 日受理)

高専における分子生物学導入教育のための初歩的実験の確立

庄司 良*, 飯田 裕*, 石井宏幸*, 三谷知世*

Development of Preliminary Experiment for Education of Molecular Biology in College of Technology

Ryo SHOJI, Hiroshi IIDA, Hiroyuki ISHII and Tomoyo MITANI

The principal macromolecules of the cell, proteins are synthesized from the small molecules, amino acids. The complex and precisely defined structures give them unique properties that enable them to carry out all of the most distinctive functions of the cell. On the other hands, molecular biology have been developed in recent years. For the students of College of Technology, it must be important to understand the property of protein in order to catch up with the developing molecular biology, in terms of education of morals for technical expert. In this paper, examples of basic experiment for molecular biology, especially on protein engineering, were introduced.

(Keywords : extraction of protein, electrophoresis, Bradford method)

1. はじめに

近年、技術者倫理教育の一環として分子生物学教育の充実が必要であるといわれてきている。この背景には分子生物学の発展と共に、ヒトクローンや遺伝子情報など生命の倫理の根本に関わる種々の問題が浮かび上がっていることが挙げられよう。しかし、中学校や高等学校、高等専門学校においては、必ずしも十分な生物学教育がなされているとはいえないため、技術的に誤った先入観を持っていることも多い¹⁾。

例えば、遺伝子という用語はメンデルの法則がまず教えられ、遺伝子という言葉は教科書の片隅にコラムのような形で掲載されているに過ぎない。一方、最近特に遺伝子という言葉が氾濫するようになり、ともすると全ての細胞の遺伝子は次世代に生命情報を伝播するためだけの分子であるという認識がなされる。そのため、遺伝子を組替えることは、新しい生物種を創造するため倫理的に良くないといった間違っただけの認識をもつことが多いが、この誤った認識が遺伝子治療によるガン治療や先天性の遺伝病の治療など次世代には全く影響を与えない技術の普及に大きな妨げとなっている。2002 年 6 月現在、本邦では遺伝子治療の臨床例はわずか 2 例であり、それらとて煩雑な手続きとリスクに関

する審査が必要であった。故に遺伝子には大きく二つの機能があり、異なる DNA と結びついて次世代を発生させる生殖系列に加えて、体細胞系列、すなわち転写した mRNA からタンパク質を合成し、それが様々な機能を発現するいわゆる一連のセントラル・ドグマを体系的に教育することが必要になる。

益々発展する分子生物学に対応できる技術者を育成すべき高等専門学校、特に生物学と密接に関連する化学を扱う物質工学科においては、分子生物学教育の更なる充実が必要不可欠である。そのため、昨年度より東京高専物質工学科の 4 年次に実施される化学工学・生物化学実験において、遺伝子教育のための初歩的実験として、生物組織からの遺伝子の抽出実験¹⁾を実施しているが、遺伝子がコードするタンパク質に対する学生の理解は依然としてあまり深いものではない。分子生物学の総合的な理解のためには、遺伝子の物理・化学的な性質の理解はもとより、様々な機能を発現するタンパク質の性質の理解とそれに基づく一連のセントラル・ドグマに対する理解が必要である。更にタンパク質自体、酵素として特異的な活性を示したり、薬物の解毒や輸送など様々な機能を発現する²⁾ため、タンパク質の化学的性質や機能の

*物質工学科

理解は分子生物学の理解に必要不可欠なものとなっている。

そこで、筆者らは前年度確立した生物組織からの遺伝子の抽出実験³⁾に加えて、文科省が定めるライザインスの実験に関する指針⁴⁾に違反しない生物試料を用いて、タンパク質の抽出・精製・同定などの基本操作の修得を目的とする学生実験の一例として、生物組織からのタンパク質の抽出を行う実験を確立し、4年次の学生実験として実施し、その教育的効果について検討したので報告する。この実験は週1日で効率的に基本的な操作を修得できるような実験内容を提供し、また記憶に留まるように配慮して視覚的な実験を組み入れたものである。様々な生物組織からタンパク質を抽出し、ついで各種分離操作を行った後に、電気泳動によって抽出したタンパク質の分子量を算出する実験である。この一連の操作により、タンパク質の物理的・化学的性質の理解と分子生物学実験の基本操作の修得を併せて目的とした。

2. 実験方法

2-1. 材料

主として花や野菜の植物の種子を利用した。これらはスーパーなどで容易に入手できるものであるため、分子生物学に関する学生実験には安全で優れた生物試料である。タンパク質の抽出効率を改善するためには、植物の種子は大きく且つ柔らかいものが望まれ、かつ脂質が少ないものが望ましい。

2-2. 器具と試薬

2-2-1. 器具

植物の種子をすりつぶし、細かくするために乳鉢と乳棒を使用する。抽出効率を更に改善するためにはホモジナイザーの使用が望ましい。10mL 遠沈管と遠心分離機が必要になるが、いずれも15000rpm という高速回転に耐えられるものが必要になる。また、夏場ではタンパク質分解酵素の活性を下げておく必要があるため、冷却しながら一連の操作を行う必要もある。そのため、遠心分離機は冷却機能を持つものが望ましい。

2-2-2. 試薬

ゲル調整用試薬としては 30%アクリルアミド保存液として、アクリルアミドと N,N'-メチレンビスアクリルアミドをそれぞれ最終濃度 30%(w/v), 0.8%(v/v)になるように混合した溶液、分離用ゲルバッファーとして Tris-HCl と SDS をそれぞれ最終濃度 0.5M, 0.4%(w/v)になるように混合した溶液、濃縮用ゲルバッファーとして Tris-HCl, SDS をそれぞれ最終濃度 0.5M, 0.4%(w/v)になるように混合した溶液を使用した。ゲル作成時には重合開始剤として 10%(w/v) 過硫酸アンモニウム、N,N,N',N'-テトラメチルエチレンジアミン (TEMED) を添加した。

泳動用バッファーとして Tris-HCl, SDS, グリシンをそれぞれ最終濃度 25mM, 1%(w/v), 14.3%(w/v)になるように調整した。SDS サンプルバッファーとしては SDS, グリセロール, BPB, Tris-HCl, 2-メルカプトエタノールをそれぞれ最終濃度 2%(w/v), 30%(v/v), 0.01%(w/v), 0.25M, 10mM になるように調整した。固定液としてはメタノール 100ml, 酢酸 20ml, 脱イオン水 80ml を混合して使用した。染色液はコロイド CBB 染色キットを使用した。

2-3. 実験操作

2-3-1. 試料の調整

まず、任意の植物種子の外殻を取り除き、電子天秤で精秤し、氷浴上で乳鉢に取り試料重量に対して 12 倍量の 50mM Tris-HCl buffer (pH7.4) を加え乳棒ですりつぶした。抽出液をガーゼでろ過しながら遠心管に入れ、15000rpm, 15 分間遠心の後、上清のみを分注し、更に 15000rpm, 15 分間遠心した。1.5ml のエッペンドルフチューブに 50 μ l のタンパク抽出液と 50 μ l の SDS サンプルバッファーを入れて湯浴で 3 分間沸騰させた。この操作でタンパク質の 2,3 次構造が破壊される⁵⁾。ここでの一連の操作は手に分泌されているタンパク質分解酵素による妨害を防ぐため、サクラメント手袋を着用して行った。

2-3-2. ポリアクリルアミドゲルの作製

まず泳動プレートを準備し、分離用ゲルを作成

するため、30ml の三角フラスコに分離用試薬を入れて混合した。この溶液中に酸素が存在すると、ゲル作成のための重合反応が遅れるため、7スピレーターで脱気し、直ちに 50 μ l の APS を加えた後、ゲル溶液を泳動プレートの上に流し込んだ。表面を乱さないように注意しながら脱イオン水をゲル溶液の上に 2mm 程度重層した。入れすぎるとゲルがつぶれるので注意が必要である。この脱イオン水の重層もゲル作製の為の重合反応の効率化のためである。30 分間静置し、ゲルが固まったら縦走した脱イオン水を捨てた。

更に濃縮ゲルを作成するため、30ml の三角フラスコに濃縮用ゲル試薬を加え、同様に 7スピレーターで脱気し、13 μ l の APS を加えた。次に既に固まっている分離用ゲルの上に濃縮ゲル溶液を流し込みコウムを差し込み、更にイオン水を重層した。固まり次第コウムを抜き取り作成されたウェルに脱イオン水を少量注いで、未重合の 7クリルミドを洗い流した。泳動プレートからマグネットクリップとシールガスを外して、泳動層に約 400ml の泳動用試薬を入れて泳動プレートをセットした。

以上の一連の操作をこなすことで、分子生物学の実験に必要不可欠であるピペットマン等の取り扱い方を習熟させると共に、 μ l 単位の取り扱いに慣れていくことを学生に期待した。

2-3-3. 電気泳動

前節で作成した泳動プレートのウェルに 5 μ l の分子量マーカーと 10 μ l の泳動試料を注入した。Table 1 に分子量マーカーとして使用したタンパク質混合溶液の組成と分子量を示す。

Table 1 分子量マーカーの組成

タンパク質	分子量(D)
Phosphorylase B	97,400
Bovine Serum Albumin	66,200
Glutamate Dehydrogenase	55,000
Ovalbumin	42,700
Aldolase	40,000
Carbonic Anhydrase	31,000
Soybean Trypsin Inhibitor	21,500
Lysozyme	14,200

この分子量マーカーで一般的な水溶性タンパク質の分子量範囲のほとんどをカバーできる。

安全のため泳動層に安全カバーをかぶせ、電源装置にコード類を接続した後、30mA (定電流モード) 15 分間泳動した。更に 50mA (定電流モード) にセットして泳動を再開した。色素がゲル下端から 5mm 程度まで移動したら泳動を終了した。泳動層から泳動プレートを外し、分離用ゲルのみをスパチュラで切り取り、泳動プレートからはがし取った。この際、ゲルを壊さないように注意する。100ml の固定液中にゲルを沈め、20 分間浸透し固定処理を行った後、固定液を捨て 100ml の染色液を入れ、20 分間浸透して染色処理を行った。染色液を捨て、200ml の脱イオン水で 10 分間浸透し、脱色処理した後、デジタルカメラでゲルを撮影して電気泳動の結果を確認した。

電気泳動による測定は高電圧を溶液に負荷するため、感電の危険がある。使用に留意が必要である。

2-3-4. Bradford 法によるタンパク質定量

抽出したタンパク質溶液を脱イオン水で 10, 100, 1000 倍に希釈し全量を 100 μ l に調整し、各試料に 1.5ml の Bradford 試薬を加え試験管ミキサーで攪拌し、5 分間静置した。分光光度計で 595nm における吸光度を測定し、タンパク質を定量した。希釈した試料全てで吸光度が 1 を超えてしまった場合、更に希釈倍率を高くした試料を調整した。

タンパク質の標準試料として、質量が既知で、吸光度が測定済みのタンパク質溶液を用意し、検量線作成のデータを提供した。その検量線 (Fig. 2) から今回抽出したタンパク質の質量を求めさせた。

2-4. 教育効果の確認

本実験を学生実験カリキュラムに組み込み、実際に実験させた場合の教育効果について確認した。その確認には口頭試問による理解度の評価とレポートの採点に拠り、行った。

2-4-1. 口頭試問

実験終了後、以下の問を口頭で試験し、理解度を確認した。

- 1) 電気泳動の原理
- 2) タンパク質の分子量の程度
- 3) タンパク質の染色の原理
- 4) 各抽出溶媒とタンパク質のアフィニティー
- 5) ポリアクリルアミドゲル重合反応

2-4-2. レポート

実験終了後、レポートを提出させ、実験結果についてのまとめと考察を行わせた。レポートの課題の例として以下の課題を調査させ、報告させた。

- 1) 極性アミノ酸と非極性アミノ酸の名前を列挙しなさい。
- 2) イソロイシンとアラニンではどちらの方が非極性の度合いが強いか、また、その理由はなぜか。
- 3) タンパク質の一次構造、二次構造、三次構造とはそれぞれ何をさすか述べなさい。
- 4) 種子が発芽するとき種子内ではどのような反応が起こっているか述べなさい。
- 5) SDS と 2-メルカプトエタノールはタンパク質の構造にどのような影響を与えるか述べなさい。
- 6) Bradford 法の原理を述べなさい。

以上の課題に加えて、電気泳動における泳動距離と分子量の関係(Fig. 3)をプロットさせ、これらの関係を考察させた。タンパク質の構造と機能解析などの追加課題も提出させ、いずれも本研究で提案する一般的な分子生物学研究手法である電気泳動が基本の一つになっていることを理解させた。

3. 結果と考察

3-1. 植物種子由来タンパク質の電気泳動

まず、各種植物の種子から抽出した水溶性タンパク質の電気泳動の結果をデジタルカメラによって撮影した画像を Fig. 1 に示す。

Lane 1 2 3 4 5

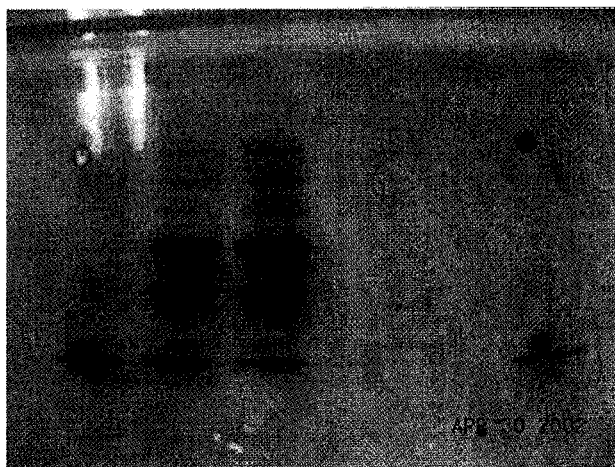


Fig. 1 植物由来タンパク質の電気泳動結果
(Lane 1,2,3;ソラマメ, 4;分子量マーカー,
5;二十日大根)

電気泳動の結果得られたゲル上の各バンドの濃さは十分であり、タンパク質の染色も良く出来ていることが確認された。

Lane 1-3 ではソラマメ特有のタンパク質が確認できた。Lane 1 では染色溶液を 10 倍に希釈したものだが、残念ながらバンドの濃さが不十分であった。Lane 2,3 は異なる学生が同じ試料について実験したものだが、両者に違いはほとんど無く、本研究で確立した実験は再現性が得られ易いといえる。また、この結果から分子生物学実験に特有な μl 単位の溶液操作も実験の過程において、学生にも容易に修得可能であることが明らかとなった。

Lane 5 は二十日大根の種子から抽出したタンパク質を電気泳動した結果であるが、残念ながら抽出効率が悪かったため、明確なバンドは確認できなかった。種子中に含まれる脂質成分が抽出の効率を下げたものと考えられる。このことから、生物材料として植物の種子は安価で入手し易いため、優れたものといえるが、脂質成分のなるべく少ない種子を選択する必要があることが示唆された。

Lane 4 で確認できる分子量マーカーの各バンドに相当する泳動距離と分子量の関係を Fig. 2 に示す。

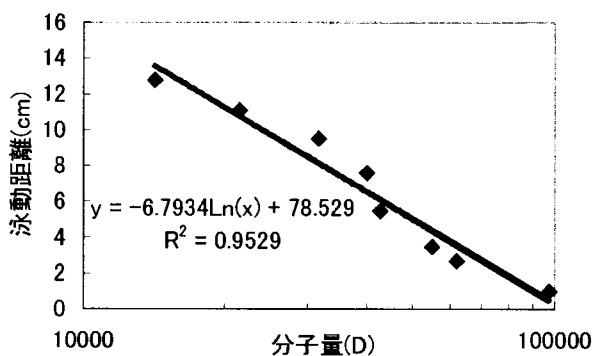


Fig. 2 分子量マーカーの電気泳動による分子量と泳動距離の関係

Fig. 2 よりタンパク質の分子量と泳動距離は、片対数で直線にまとめられる現象である事が確認された。加えて使用した分子量マーカーは網羅的に泳動され、各バンドが確認できた。このことから泳動分離に使用したポリアクリルアミドゲル濃度は適切であることが示され、本研究で確立した方法によれば、適切な泳動時間を設定することにより、タンパク質量 10000~100000(D)の分子量範囲のタンパク質を電気泳動により分離・同定できる可能性が示された。

3-2. タンパク質の分子量の確認

Bradford 法はタンパク質を定量する代表的な方法で、様々な分子生物学実験でよく用いられている方法である⁸⁾。本実験でも、タンパク質の電気泳動に加えて、泳動時間中に簡単に定量を行える方法として、余剰の試料を用いて Bradford 法によるタンパク質定量の実験を行った。Fig. 3 に Bradford 法によるタンパク質定量のための検量線として用いたタンパク質量と吸光度の関係を示す。

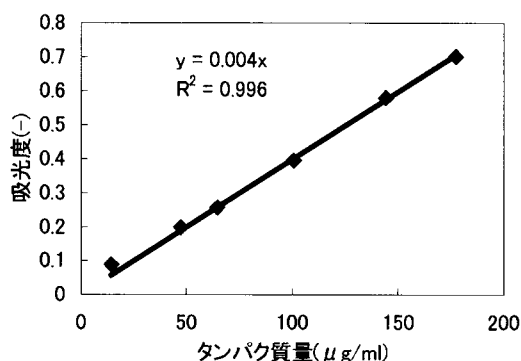


Fig. 3 タンパク質量と吸光度の関係 (Bradford法によるタンパク質定量用検量線)

Fig. 3 に見られるように今回検量線作成用に使用したタンパク質においては、Bradford 法で質量と吸光度の間に良好な直線関係が確認され ($R^2=0.996$)、この検量線で測定できるタンパク質量範囲(10-170 $\mu\text{g/ml}$)は一般的なタンパク質量のためには十分広いことが確認できた。

Fig. 3 を利用して学生が植物の種子より抽出したタンパク質の質量を測定したところ、ほとんどの学生は 50-150 $\mu\text{g/ml}$ 程度のタンパク質を抽出することに成功しており、種子の質量を基準とすると、種子中に含まれるタンパク質含量は 0.5-1%(w/w)であることが確認できた。学生には任意の植物の種子を持参させて、そのタンパク質を抽出させたため、値にばらつきがあるが、現在までの検討の結果、ほとんどの植物の種子に本研究で確立した実験が対応できることが明らかとなった。

3-3. 理解度の評価

実験に関してはほとんど学生がタンパク質の電気泳動の結果を得ることが出来ており、実験方法に関しては学生実験として導入するのに全く問題が無いことが確認された。一部の学位では μl 単位の扱いに困難さを感じたものもいたようだが、実験終了時点まででは、ほぼマイクロピペットの取り扱いに問題は見られなく、分子生物学実験の基本的な操作を修得できたものと判断された。口頭試問に関しては、タンパク質抽出溶媒の化学的性質を十分に理解できていないため、何故この操作でタンパク質だけを分離できるのかを理解できていない学生が散見された。実験操作の一つ一つの意味を明確に丁寧に理解させる必要があると考えられた。レポートに関しては、実験結果自体の考察に不十分な点が見られたが、課題として与えた調査に関しては、いずれの学生も詳細に考察を加えており、一定の評価に値すると判断された。以上の理解度の評価から判断すると、本実験の遂行によって、大半の学生は分子生物学、特にタンパク質の抽出と分離に関して一定の知識を身に付け、かつ必要最低限の実験手法を理解することが出来たと判断された。

加えて、座学としても 4 年次の分子生物学でタ

ンパク質の構造・機能・性質を教育しており、座学で学んだ内容を実験によって確かめることが本実験の導入によって可能となり、化学教育では必要不可欠であると考えられる座学と実験の相補的な関係の構築⁹⁾が具現され、学生のタンパク質の化学的性質に対する理解が一層深められた。

4. 結論

本研究で学生実験として導入したタンパク質の抽出と確認の実験は再現性に優れ、特殊な設備も必要ではない。一方、タンパク質工学に関する基本的な実験操作や物性などを理解させるうえで非常に効果的であるばかりか、分子生物学に対する学生の興味を引き立てることも可能である。今後、タンパク質の機能解析⁶⁾, ⁷⁾や同時に行っている遺伝子工学実験³⁾との連携を検討する予定である。

加えて、本研究で確立したタンパク質抽出の操作は、培養動物細胞から特定のタンパク質を検出することにも適用可能¹⁰⁾, ¹¹⁾, ¹²⁾であり、例えば薬物を負荷したさいに発現する薬物代謝酵素や解毒タンパク質の同定などに応用できる可能性がある¹³⁾, ¹⁴⁾ため、検討していく方針である。

分子生物学の益々の進歩によって、ヒトゲノムの解析が終了し、今後解読された遺伝子配列のそれぞれがどのようなタンパク質をコードし、そのタンパク質がどのような機能を発現しているのかを探るいわゆるポストゲノムの時代に突入していくものと考えられる。今回学生実験として導入したタンパク質の抽出から同定までの一連の操作は、こうしたタンパク質工学の基本的な操作を体系的に網羅しており、座学との連携により今後益々発展していくであろう分子生物学に技術的にも追随できる様な技術者の育成に非常に効果的な教育が施せるようになったことが本研究の最大の成果である。

参考文献

- 1) 庄司ら: 高専における分子生物学教育のための初歩的な遺伝子工学実験の開発, 2001 年電気化学秋季大会学術講演要旨集 (2001)
- 2) R. Shoji et al.: A new assay for hepatotoxicity using LDL-uptaking activity of

liver cells, Journal of Health Science, Vol. 46, No. 6, pp. 493-502 (2000)

- 3) 庄司ら: 高専における遺伝子教育の必要性と初歩的な導入実験の開発と提案, 東京工業高等専門学校研究報告書, Vol. 33 (1), pp. 101-107 (2001)

- 4) 文部科学省: ヒトゲノム・遺伝子解析に関する倫理指針等ライフサイエンスに関する指針等の遵守について (2001)

- 5) 林勝哉: 生物化学実験法 4 蛋白質の分子量・分子形, 学会出版センター (1971)

- 6) G. E. Schulz and R. H. Schirmer, Principles of Protein Structure, Springer-Verlag, (1979)

- 7) M. G. Rossmann et al.: Chemical and biological evolution of a nucleotide-binding protein, Nature, Vol. 250, pp. 194-199 (1974)

- 8) B. Alberts et al.: Molecular Biology of THE CELL, Garland, New York (1983)

- 9) 庄司ら: 高専における遺伝子工学教育のための初歩的な実験の確立と試行, 第 7 回高専シンポジウム講演要旨集, A-14, pp. 76 (2002)

- 10) K. Kang and B. J. McCoy: Protein Separation by Ion Exchange Chromatography: A Model for Gradient Elution, Biotechnology and Bioengineering, Vol. 33, pp. 786-790 (1989)

- 11) P. J. Dierickx and B. Ekwall: Long-term Cytotoxicity Testing of the First Twenty MEIC Chemicals by the Determination of the Protein Content in Human Embryonic Lung cells, ATLA, Vol. 20, pp. 285-289 (1992)

- 12) O. H. Lowry, et al.: Protein measurements with the phenol reagent, Journal of Biological Chemistry, Vol. 193, pp. 265-275 (1951)

- 13) P. Lombardi, et al.: Low-density lipoproteins are degraded in HepG2 cells with low efficiency, Biochemistry Journal, Vol. 290, pp. 509-514 (1993)

- 14) F. Zouhair and C. Y. Edna: Rapid fluorometric assay of LDL receptor activity by Dil-LDL, Journal Lipid Research, Vol. 34, pp. 325-330 (1993)

(平成 14 年 6 月 19 日受理)

活性炭による農薬・フミン質の競争吸着

平田房雄*, 庄司 良*, 須藤義孝**, 峯野枝奈***, 馬部 晋***, 鈴木基之****

Competitive Adsorption of Pesticide and Humic Substances on Activated Carbon

Fusao HIRATA, Ryo SHOJI, Yoshitaka SUDO, Shina MINENO, Aki UMAHE and Motoyuki SUZUKI

Recently, the sources of tap water have been polluted with a number of chemicals discharged from various industries. Of them, pesticides from golf links and agricultural areas can be considered as priority chemicals for water quality management. In water treatment processes, activated carbon is generally used to remove such chemicals. However, humic substances are also contaminated in environmental water, such as river water, that is generally used for the sources of tap water.

In this study, we examined adsorption isotherms and rates on activated carbon at various temperatures, in order to examine the basic characteristics of adsorption using activated carbon for removal of 2, 4-Dichlorophenoxy acetic acid (2, 4-D), humic substances, and the coexistence. 2, 4-D is a kind of typical pesticides used as a silvicide at agricultural area. We elucidated the interaction between 2, 4-D and humic substances in the coexistence samples. The isotherms were correlated with Freundlich-type equation in the concentration ranges tested. We can also conclude that surface diffusion was considered to be dominant.

(Keywords : Competitive Adsorption, Activated Carbon, Pesticides, Humic Substances)

1. 緒 言

近年、水道水源ともなる河川水は農薬等の様々な化学物質によって汚染されており、その人体に対するリスクは無視し得ないものとなってきた¹⁾。特に、多種多様な汚染物質の中で特にゴルフ場農薬等、短期間で莫大な量が散布される化学物質は河川の有害性の原因となっており、その対策が急がれている²⁾。そこで、我々は数年前より、上水処理プロセスとして代表的な活性炭による吸着処理により農薬類の処理特性を検証してきており³⁾、各種農薬の単一系では吸着等温線は Freundlich 式でまとめられる事を明らかにしてきた⁴⁾。これにより、農薬類を対象とした水処理には活性炭による吸着処理が有効であると結論できた。しかし、実際の河川水においては、土壌や水中で動植物が腐敗分解して生成されるフミン質と農薬の共存系であり、活性炭による農薬の吸着処理を実際に処理プロセスとして応用する場合、フ

ミン質と農薬との相互作用を考慮した共存系による吸着実験を行って、処理特性を解明していく必要がある⁸⁾。

活性炭による農薬とフミン質の共存系における吸着に関する既往の研究では、水に対する溶解度が高い親水性の農薬は吸着性が低く、フミン質の影響を受けやすいことが明らかになっている⁵⁾。加えて、フミン質が共存することにより農薬の吸着速度が減少するという報告も散見される⁶⁾。しかし、フミン質と農薬の共存系における吸着に関して、系統的な実験を行い、それらの相互作用について詳細に検討した研究は少ない⁷⁾。我々もフミン質と農薬の共存系における吸着現象を検証してきており、フミン質が活性炭の吸着サイトをふさぐため、農薬の活性炭における有効表面拡散係数が減少し、結果として吸着速度が減少することが明らかとなった⁸⁾。

そこで、本研究では農薬とフミン質の共存系における活性炭吸着特性メカニズムの更なる追及の

ため、農薬、フミン質の単独系と共存系との比較を詳細に検証し、特にフミン質を吸着させた活性炭による農薬の吸着現象と、逆に農薬を吸着させた活性炭によるフミン質の吸着現象を実験により明らかにし、両者の吸着平衡関係を解析した上で、共存系における脱着速度までを明らかにしたので報告する。

2. 実験

・使用材料

活性炭：東洋 Calgon 社の CAL、を粒径0.15～0.18 mm（平均粒径0.165 mm）にふるい分けし、数回水洗した後、煮沸洗浄を数回行なった後、110℃で乾燥、保管した。（比表面積；1,000～1,100 m²/g）

農 薬：フェノキシ系除草剤2,4-ジクロロフェノキシ酢酸（2,4D；WAKO、OSAKA）である。2,4D は環境ホルモン性作用が指摘されており。水田等に広く散布されている。

フミン質：0.1 M NaOH 4 L に枯葉など土中で腐食させた腐葉土400 g を浸し、室温で3日間抽出した。この抽出液を25 μm フィルターでろ過した。ろ液を1 M HCl で pH 7 に中和した後、更に0.45 μm でろ過して4℃で使用時まで保管した。このフミン質はフルボ酸、フミン酸やその他の不純物の混合物であるが、自然界の河川、湖沼等に存在しうる状態に近いものである。

・実験装置及び方法

吸着容器はセパラブルフラスコで蓋の部分に試料採水口とモーターの軸受け口が付いている。

モーターに直結している攪拌棒の先端にステンチール製金網のバスケットを取り付け、攪拌翼の役目をしており、吸着容器内にバッフル板を置き、攪拌効果を良くし、活性炭と液相の境膜抵抗を無視できるようにしている。なおバスケットは二重構造で左右にポケットを設けた攪拌翼の本体を100 mesh の金網で、活性炭を入れるカゴを150 mesh の金網で作製し、ポケットに入れて使用した。

水溶液初濃度は2,4D、フミン質共5～40 ppm の水溶液1 L を吸着容器に入れ活性炭をカゴに入れ450 rpm 以上で回転させながら、恒温水槽（25℃）中で吸着実験を行なわせた。水溶液の濃度変化の測定は測定時間毎に4 mL 程度をピペッ

トで採取し、紫外分光光度計（JASCO V-550）により測定した。測定波長は2,4D は228.4 nm、フミン質は283.0 nm で行った。それぞれ検量線法で濃度分析を行った。

3. 実験結果及び考察

3.1 吸着平衡関係

フミン質（H.S）を所定濃度吸着させ吸着平衡に達した後、2,4D を吸着させた時の2,4D 濃度変化曲線を Fig. 1 に示した。

2,4D の吸着平衡に達するまでの時間は2,4D 単独のときは10時間、フミン質飽和後は20～100時間を要した。このことから2,4D を所定濃度吸着させた活性炭ではフミン質吸着後の活性炭には吸着速度が低下することがわかった。

また、2,4D を所定濃度で飽和吸着させた後、フミン質を吸着させた場合を Fig. 2 示す。先に吸着していた2,4D の濃度が時間と共に高くなり、フミン質の吸着を始める際の2,4D 初濃度より高くなった。これは2,4D がフミン質の添加によって溶液濃度に平衡になるまで脱着したためである。

次に Fig. 1, 2 に示した濃度変化曲線から平衡濃度Cと平衡吸着量qを算出し、吸着等温線を得た（Fig. 3）。これらの吸着等温線は(1)式で示す Freundlich 型吸着で整理できた。

$$q = k \cdot C^{1/n} \quad (1)$$

吸着等温線の傾きより Freundlich 定数n、k を Table 1 に示した。

2,4D の平衡吸着量qは2,4D 単独の時に比べ、フミン質飽和吸着活性炭ではわずかに少なくなっ

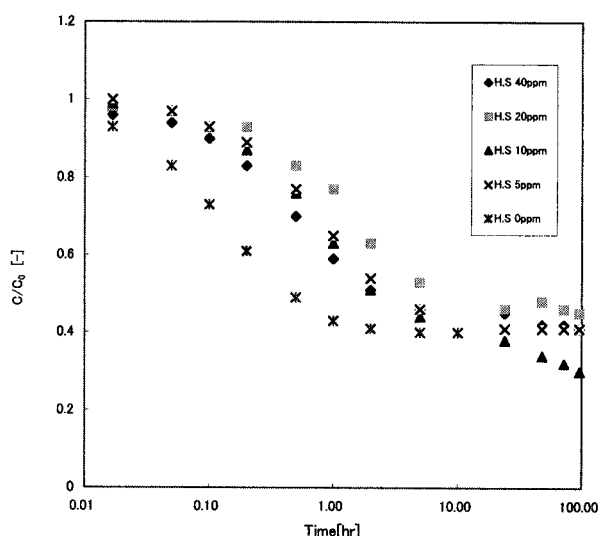


Fig 1 Changes in 2, 4-D Concentration

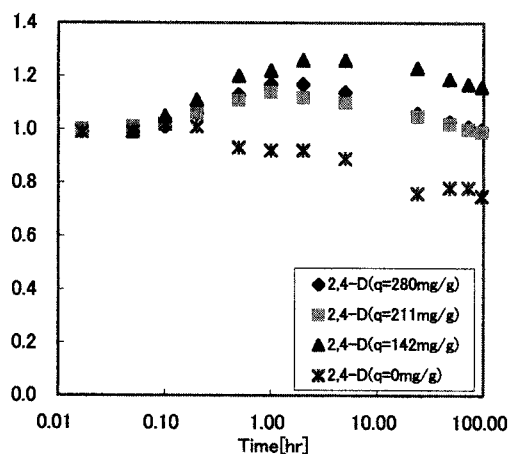


Fig. 2 Changes in H. S Concentration

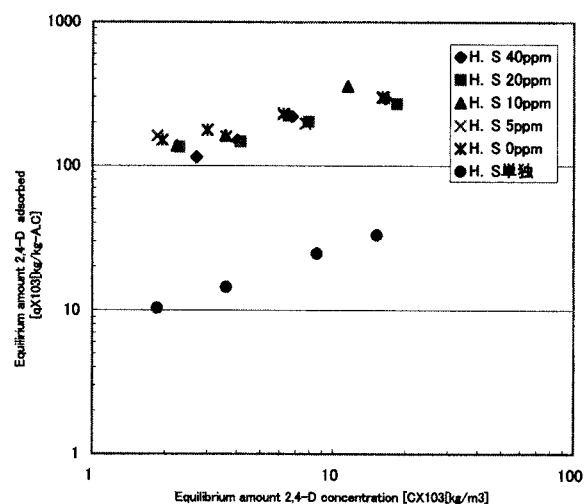


Fig. 3 Adsorption isotherms for 2, 4-D

Table 1 Constants of Freundlich equation

Concentration [ppm]	$k \times 10^3$ [kg/kg-A. C.]	n [(kg/kg-A. C.) (m ³ /kg) ^{1/n}]
0	117	3.03
5	103	2.56
10	90	2.10
20	81	1.98
40	70	1.78
H. S. only	5.2	1.56

た。この現象はフミン質濃度が高いほど影響が大きかった。この結果は吸着速度と関係があり、詳しくは次項で述べるが、分子量の大きいフミン質が活性炭の外表面付近に吸着して細孔を狭くし、2,4Dの吸着を阻害したためと考えられる。

3.2 表面拡散係数

活性炭による有機物の水溶液吸着は主に表面拡散係数支配であり、この係数は吸着速度を支配している値である⁹⁾。

Freundlich 型の場合、吸着等温線より求めた n により、この n に見合う Suzuki&Kawazoe の理論曲線¹⁰⁾を実測の濃度変化曲線とカーブフィッティングし、表面拡散係数 D_s を算出した。厳密には Muraki ら¹¹⁾の方法で D_s を算出すべきであるが、ここでは表面拡散係数の近似的な値として算出した。

$$\tau_s = D_s \cdot t / R^2 \quad (2)$$

カーブフィッティングして(2)式より求めた D_s と平衡吸着量 q を両対数プロットすると Fig. 4 が得ら

れた。それぞれ良好な直線性を示し、次式で整理された。

$$D_s = D_{s1} \cdot q^{n'} \quad (3)$$

D_{s1} と n' は定数でそれぞれ Table 2 に示した。平衡吸着量が多くなると表面拡散係数 D_s は増大した。また、それぞれの表面拡散係数 D_s を比較すると、2,4D 単独系が最も大きく、先にフミン質を吸着させた活性炭の場合は小さくなり、フミン質濃度が高い程、表面拡散係数 D_s は小さくなった。以上のことから、先にフミン質が吸着している場合にはフミン質が2,4Dの活性炭吸着を阻害し吸着速度を遅くさせてしまうことがわかり、かつその吸着速度はフミン質濃度に依存することが認められた。

次に表面拡散係数 D_s と平衡濃度 C との関係を両対数プロットし、Fig. 5 に示した。それぞれの直線関係が得られ、次式で示された。

$$D_s = D_{s2} \cdot C^\gamma \quad (4)$$

D_{s2} と γ はそれぞれ定数で Table 2 に示した。吸着量の場合と同様に表面拡散係数 D_s は濃度

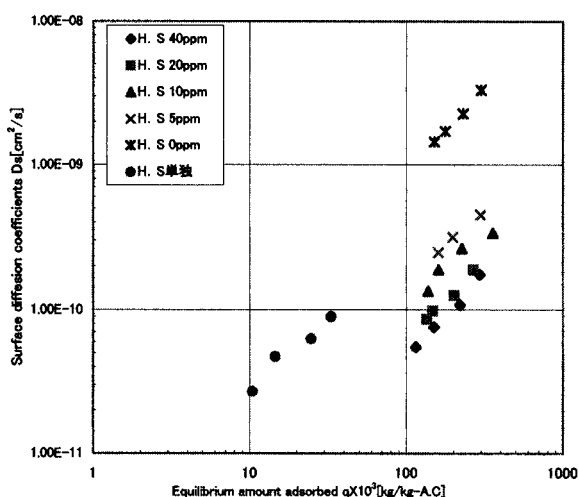


Fig. 4 Relation ships between surface diffusion coefficients, D_s , and equilibrium amount adsorbed, q

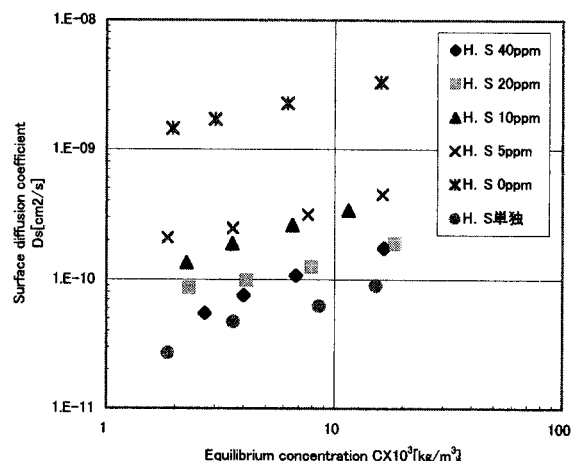


Fig. 5 Relation ship between surface diffusion coefficients, D_s , and equilibrium concentration, C

Table 2 Constants of equations, 3 and 4

Concentration [ppm]	$D_s = D_{s1} \cdot q^n$		$D_s = D_{s2} \cdot C^\mu$	
	$D_{s1} [\text{cm}^2/\text{s}]$	$n [-]$	$D_{s2} [\text{cm}^2/\text{s}]$	$\mu [-]$
0	1.37×10^{-10}	1.20	1.69×10^{-8}	3.93×10^{-1}
5	1.81×10^{-9}	1.10	2.35×10^{-9}	3.98×10^{-1}
10	1.12×10^{-9}	1.03	1.94×10^{-9}	4.11×10^{-1}
20	6.59×10^{-10}	1.00	1.32×10^{-9}	4.71×10^{-1}
40	4.64×10^{-10}	0.94	1.88×10^{-9}	5.83×10^{-1}
H. S. only	6.97×10^{-10}	0.65	1.06×10^{-9}	5.78×10^{-1}

依存性が認められ、平衡濃度 C が増加すると表面拡散係数も増大した。すなわち平衡濃度が増加する程、吸着速度が速くなるといえる。

3.3 脱着量

初めに2,4Dを飽和吸着させた後、フミン質を吸着させたときの2,4Dの脱着曲線の一例をFig. 6に、2,4Dの脱着量とフミン質の濃度の関係をFig. 7に示した。測定の初期において、2,4Dの脱着量はフミン質の濃度が高くなるにつれてわずかに多くなった。加えて2,4Dの平衡吸着量の大きい方が脱着量は多くなっていた。

液相吸着において、吸着剤－吸着質間には van der Waals 力、静電引力、水素結合、イオン交換、電荷移動などの相互作用力が働き吸着が起こる。吸着剤－溶媒間相互作用は吸着質の溶媒への溶解性と大きく関係しており、両者間の親和力が大きい場合には吸着質分子は溶媒中で安定に存在でき、

溶解度は高くなる。このような場合、吸着が起こるためには吸着相互作用エネルギーが吸着質－溶媒相互作用エネルギー（親和力、溶媒和）よりも大きくならなければならない。吸着剤－溶媒相互作用エネルギーが強いほど、吸着力は弱くなる。すなわち、吸着剤－溶媒間の親和力は吸着にマイナスに作用する。

いいかえると吸着剤－溶媒間の親和力により、溶媒分子は吸着剤に吸着し、吸着質分子の吸着と競合する。従って、この親和力は吸着質分子の吸着にマイナスに作用し、溶媒の吸着力が強くなれば吸着質の吸着力は低下する。

農薬におよぼすフミン質の影響として、農薬のフミン質への吸着は電荷移動が支配的であつ、フミン質が複雑な構造ほどより強い吸着がおこる。

2,4Dのフミン質添加による脱着に関しては、2,4Dの吸着量が溶液濃度に平衡になるまで脱着した。その際、2,4Dの最終濃度は添加したフミ

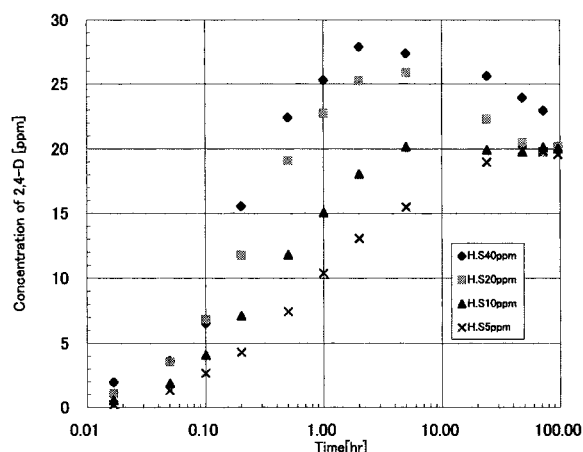


Fig. 6 Desorption curves for 2, 4-D $q=243 \times 10^{-3}$ [kg/kg—A. C]

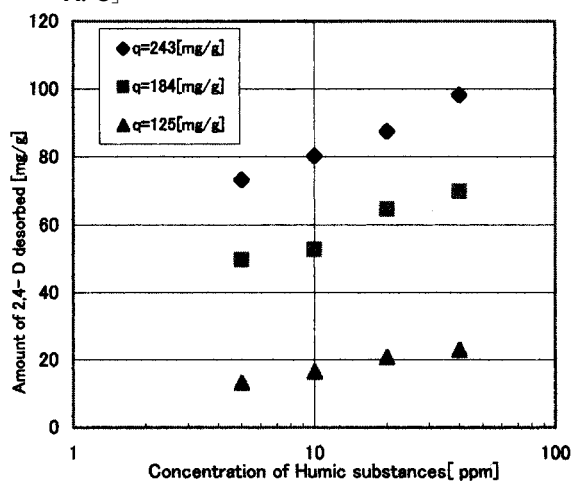


Fig. 7 Relationships between Humic substances concentration and desorption of 2, 4-D

ン質の濃度に影響されないものの、フミン質添加初期の脱着速度はフミン質濃度に大きく依存した。

このことから活性炭から脱着した2,4Dがフミン質に吸着される相互作用も働いていると考えられる。

4. 結 言

回分操作により、活性炭による2,4D、フミン質の競争吸着実験を吸着温度25℃で行い、次の事項が明らかになった。

- (1) 2,4D、フミン質の吸着平衡関係は単独系、共存系を問わず Freundlich 型吸着で示された。
- (2) 初めにフミン質を吸着させた活性炭に2,4Dを吸着させると、2,4D単独より吸着量はわずかに減少した。これは吸着しているフミン質に影響され、2,4Dの吸着量が減少したためである。

(3) 初めに2,4Dを吸着させた活性炭にフミン質を吸着させると、吸着していた2,4Dが脱着した。これはフミン質の吸着量は極わずかで、それ以上に吸着していた2,4Dが液相の濃度と平衡になるまで脱着したためである。

(4) フミン質吸着させた活性炭に2,4Dを吸着させると、2,4Dの表面拡散係数 D_s は2,4D単独の場合に比べ小さくなった。

(5) 2,4Dとフミン質では2,4Dの方が吸着性能が高く、この競争吸着では2,4D吸着量はフミン質濃度に依存した。

使用記号

C : equilibrium concentration [kg/m³]

C' : concentration in the liquid about certain time [kg/m³]

C₀ : initial concentration in the liquid [kg/m³]

D_s : effective surface diffusion coefficient [cm²·s]

D_{s1} : Constant Defined by Eq. 3 [kg/m³]

D_{s2} : Constant Defined by Eq. 4 [kg/m³]

k : Constant of Freundlich equation [kg/kg—A. C]

n : Constant of Freundlich equation [(kg/kg—A. C) (m³/kg) 1/n']

n' : constant defined by Eq. 3 [—]

q : equilibrium amount adsorbed [kg/kg—A. C]

R : particle radius of activated carbon [cm]

t : time [hr]

γ : constant defined by Eq. 4 [—]

τ : time modulus = $D_s \cdot t / R$

文 献

- 1) 鈴木基之, 庄司 良, 酒井康行, 迫田章義; 水環境学会誌, 20, 11, 746—751 (1997)
- 2) R. Shoji, A. Sakoda, Y. Sakai, and M. Suzuki : Wat. Sci. Tech., 42, 3-4, 115-124 (2000)
- 3) Y. Sudo, D. M. Misic and M. Suzuki : Chem. Eng. Sci., 33, 1287 (1978)
- 4) 須藤義孝, 鈴木基之: 化学工学論文集, 19, 5, 803 (1997)
- 5) 松井佳彦, 亀井 翼, 川瀬悦郎, 丹保憲仁: 水道協会雑誌, 63, 3, 85 (1994)
- 6) 松井佳彦, 亀井 翼, 川瀬悦郎, 古屋勇治: 水道協会雑誌, 63, 2, 30 (1994)

- 7) 篠塚則子：水環境学会誌, 18, 4, 261 (1995)
- 8) 須藤義孝, 榎本和行, LIM POH ANN, 久保陽太,
鈴木基之：東京工業高等専門学校研究報告
書, 33, 2, 101-107 (2002)
- 9) 須藤義孝；東京大学博士論文 (2001)
- 10) 鈴木基之, 河添那太郎；生産研究, 26, 7, 275-277
(1974)
- 11) M. Muraki, and Y. Iwashima ; J. Chem. Eng. Japan, 15,
34 (1982)

(平成14年 6 月20日受理)

『天徳三年八月十六日闕詩行事略記』訳注稿(六)

一般科目 津 田 潔 ・ 群馬高専 小野 泰 央

The Annotation of the Tentokutōshi (6)

Kiyoshi TSUDA, Yasuo ONO

This paper is the annotation of the Tentokutōshi.

(Key-word: the Tentokutōshi)

【本文】

第七 林開霧半収 左 文時 第七 林の開くるは霧半ば

収まればなり

左 菅原文時

風吹宿霧半収朝 風吹き 宿霧半ば収まる朝

林色初開望漸遙 林色初めて開くれば 望漸く遙かなり

靄未全褰深淺葉 靄全では褰げず 深淺の葉

光猶難尽両三条 光猶^{なほ}尽き難し 両三条松間紗帳舒還卷 松間の紗帳 舒びては還^{また}卷き竹下羅帷掩復飄 竹下の羅帷 掩ひては復^{また}飄へる

琪樹可晴晴可楽 琪樹晴るべく 晴るれば楽しむべし

欲遊仙境景蕭蕭 遊ばんとす 仙境の景の蕭蕭たるに

【校異】

なし

【語釈】

●風吹―風が吹くこと。詩題を因果関係で解釈した。「因^レ風吹^二薄霧^一、向^レ日誤^二輕埃^一」(元稹「蟲多詩 浮塵子三首其三」)、「風吹^二帆席^一随^二雲卷^一、鳥庄^二花枝^一覆^二水低^一」(「千載佳句」送別・无名「送^二李端遊^二嶺南^一」)、「露泛^二穿杯^一拙^二生玉^一、風吹^二旧服^一無^二復香^一」(「凌雲集」・良岑安世「九月九日侍^二宴神泉苑^一各賦^二一物^一得^二秋蓮^一」)とある。●宿霧―前夜から立ちこめていた霧。「朝霞開^二宿霧^一、衆鳥相与飛」(『文選』卷三十・陶淵明「詠^二貧士^一」)、「地際朝陽滿、天边宿霧収」(于良史「冬日野望詩」)、「宿霧随^二吟斂^一、蘭情逐^二詠濃^一」(『性靈集』卷一・「贈^二良相公^一」詩)、「于^レ時時雨間灑、宿霧漸暗」(『本朝文粹』卷十一・源道濟「初冬泛^二大井河^一詠^二紅葉蘆花^一和歌序」)とある。●半収―「半」は、不完全な状態の形容。「収」は、拡散・散在していたものが一ヶ所に集まることが原義。「万瓦宵光曙、重簷夕霧収」(虞世南「凌晨早朝」)、「金闕平明宿霧収、瑤池式宴俯^二清流^一」(蘇瓌「興慶池侍宴制」)、「新却藻煙^二雲散後^一、初宮^二波月^一靄^二収^一今」(『類題古詩』知不知・慶滋為政「池清知^二雨晴^一」)、「雲霧靄^二収^一松月曙、菰蒲煙卷水風秋」(『本朝麗藻』卷下・『類題古詩』清・藤原公任「晴後山川清」)とある。●林色―林の様子。特に、林にいい雰囲気がある様。「幽独空^二林色^一、朱蕤冒^二紫莖^一」

（陳子昂「感遇詩三十八首其二」）、「林色与溪古、深篁引幽翠」（王昌齡「候氏尉沈興宗置酒南谿留贈」）などであるが、この語の使用が一般化するのには晩唐のこと。「遠近峯粧經雨黛、東南林色欲霜顏」（『類題古詩』望・藤原惟成「山晴秋望多」）とある。●初開「初」は、

やっとしたばかり、の意。「開」は、それまで隠れていたものがあけすけになること。●望漸遙「遙か彼方まで少しづつ見渡せるようになってきた」。

●望漸遙「遙か彼方まで少しづつ見渡せるようになってきた」。「楚塞南行久、秦城北望遙」（張祐「江南作」）、「霽色明高嶽、関河独望遙」（許渾「秋霽潼関驛亭」）、「望遙通北極、上徹見東溟」（薛能「華嶽」）とある。大江以言に「霧晴山望迴」という詩題の作（『類題古詩』望）があり、さらに「專城望遙、眼穿黄河之日、劇官病迫、身動上池之浪」（『本朝文粹』卷六・大江以言「為宮道義行申安房能登淡路等守」状）とある。●霽「『広韻』に「雲状」とあり、「玄暉峻朗、翠雲崇霽」（『文選』卷二十・陸雲「大將軍譙云被命作詩」）、「流雲霽青闕、皓月鑑丹宮」（『文選』卷二十六・顏延年「直東宮答鄭尚書」）、「高旻開遠照、遙嶺霽浮烟」（『懷風藻』・長屋王「五言於宝宅宴新羅客」）とあるように、雲煙の濛々たる様を形容するのが原義。後、「杏霽無定狀、霏微常滿林」（高修「東峰亭各賦」一物得林中翠）、「霽盡無林色、喧餘有澗聲」（溫庭筠「月中宿雲居寺上方」）、「晴霞初寸截、晚霽擬分將」（『田氏家集』卷下・「五言禁中瞿麦花詩三十韻」）、「余霽收時峯倍黛、孤煙卷後水添音」（『類題古詩』清・藤原雅材「雨霽山河清」）のように名詞に転化して、

低くたれ込めた煙霧を意味する。『名義抄』には「キリ」の訓はあるが、「モヤ」が定訓化するのには近世以後。●未全霽「未全」は、まだ全部その様になってはいないということ。「片舒猶帶紫、半卷未全紅」（鮑泉「詠薔薇」）とある。「霽」は、「褰衣」「褰帷」「褰簾」等の語があるように、着物の端をちよつと持ち上げたり、日除けや簾を巻き上げ掲げる意。雲や霧もそれらに見立てて、「哀鴻鳴清耳、宿霧褰高旻」（韓愈「酬裴十六功曹巡府西廐塗中見寄」）、「茲辰始霽霽、纖雲尽褰開」（柳宗元「湘口館瀟湘二水所會」）、「山褰遠霽殘虹帶、風

落高天一雁聲」（『田氏家集』卷下・「秋晴」）、「至彼潺湲映而影半沈、霧霽褰而色高聳」（『本朝文粹』卷十・源順「初冬過源才子文亭」同賦「紅葉」）等という。●深淺葉「深淺」は色に濃淡があることで、霽

がまだ完全に消えずに、葉に濃淡があるように見える。「陰陽深淺葉、晚夕重輕烟」（唐太宗「初夏詩」）、「徑草漸生長短綠、庭花欲綻淺深紅」（『千載佳句』早春・鮑溶「春日」）、「黛色淺深山遠近、碧煙濃淡樹高低」（『千載佳句』眺望・楊収「望岳陽」）、「深淺始看青柳眼、寒溫且問粉梅脣」（『類題古詩』訪・菅原在躬「花間訪春色」）とある。

●光猶難尽「光はまだなかなかなくなるということ。『天徳三年八月十六日關詩行事略記』における本詩の前後の作品から考えて、「光」は恐らく月光のこと。朝に近いのだがまだ月はその輝きを失っていない、霧を通して幾筋かの月光が見えるというのだろう。「宿霧含朝光、掩映如殘虹」（元結「引東泉作」）という状態をいうのではあるまい。

●兩三条「条」は、枝のように細くて長いものを数える助数詞。「遙認微微入朝火、一条星宿五門西」（『白氏文集』卷五十五「登觀音臺望城」）、「玉皇夜入未央宮、長火千条照棲鳥」（溫庭筠「走馬樓三更曲」）、「秋月不知有古今、一条光色五更深」（『菅家文草』卷一・「八月十五夜月前話」旧各分一字）などである。ちなみに道真の詩にいう「五更」とは、午前四時頃のこと。●松間「松の木の間」。松間鳴好鳥、竹下流清泉」（張九齡「冬中至玉泉山寺」故有此作）、「松間白日照寶書、竹下香泉灑瑤席」（劉禹錫「送僧仲剛東遊兼寄呈靈澈上人」）、「松間蘋末、行子難尋同遊之情、雲尽燭晴居人不堪独吟之趣者也」（『本朝文粹』卷九・菅原雅規「暮春於文章院餞諸故人赴任同賦風月一朝阻」）とある。●紗帳「うすぎぬのカーテン。「紗」は、風をよく通すきわめて薄い絹織物。「帳」は、

「帷」「幕」「幄」などの総称。対語の「羅帷」とともに霧の比喩。「碧簾絳紗帳、夜涼風景清」（『白氏文集』卷五十六「酬夢得秋夕不寐見寄」）、「藤架如紗帳、苔牆似錦屏」（雍陶「和河南白尹西池北新葺水齋招賞十二韻」）とある。●舒還卷「蓆、釈也。可卷可舒」

〔藝文類聚〕薦蓆所引『釈名』とあるように、布などを巻いたり引き延ばしたりする正反対の動作。「風帶舒還卷、簪花拳復低」(謝偃「踏歌詞三首其二」)、「岸水飛還落、池荷卷且舒」(『凌雲集』・藤原冬嗣「神泉苑雨中眺矚応製」)とある。また雲や霧を布に見立てて「林渚紫映、煙霞卷舒」(崔知賢「三月三日宴王明府山亭」)、「有時白雲起、天際自舒卷」(李白「望終南山寄紫閣隱者」)、「道行無喜退無憂、舒卷如雲得自由」(『白氏文集』卷六十八「和楊尚書罷相後夏日遊永安水亭兼招本曹楊侍郎同行」)、「雨晴雲卷羅、霧盡峰舒蓮」(『懷風藻』・伊予部馬養「五言從駕應詔」)等という。

●竹下―「下」は、名詞のあとに用いて、一定の範囲や場所を表す。竹林の辺り。「松間鳴好鳥、竹下流清泉」(張九齡「冬中至玉泉山寺屬窮陰冰閉崖谷無色及仲春行縣復往焉故有此作」)、「為報山中侶、憑看竹下房」(『白氏文集』卷十八「郡齋暇日憶廬山草堂兼寄三林僧社三十韻多叙貶官已來出處之意」)等とある、その対語の「間」「中」などと同義。たとえば白居易は「穿籬遶舍碧透迤、十畝間居半是池」(『白氏文集』卷五十三「池上竹下作」)というその「閑居」を、「池上」「竹下」にあると云うのであり、同じ場所を「開襟何処好、竹下池辺地」(『開襟』)、「深閑竹間扉、靜掃松下地」(『閑居』)という。無論助字化するることによって原義が全く失われたということではないから、「池上竹下」を「池下竹上」と言い換えることはできないが、共に辺りの意を表す。

〔偏称三友〕数君須、竹下賢達谷裏愚」(『田氏家集』卷下「秋日竹日懷古」)、「数歩新廊壁也釘、青烟竹下白沙庭」(『菅家文草』卷二「小廊新成聊以題壁」)とある。

●羅帷―うすぎぬのとばり。「羅」は、「綺」の一種で、美しい花紋を織り出した極めて薄くて軽い絹織物。「帷」は、室内、屋外を問わず、人目を遮るために四隅に張り巡らすカーテン。「微風吹」閨闈、「羅帷自飄颻」(『文選』卷二七、「古樂府・傷歌行」)、「煙攢錦帳凝還散、風卷羅帷掩更開」(『千載佳句』艷情・白居易「閨情」)、「紫塞寒風苦鉄衣、紅樓夜月怨羅帷」(『文華秀麗集』卷下・巨勢識人「神泉苑九日落葉篇應製」)、「紈扇拋來青黛露、羅帷卷却翠屏

明」(『和漢朗詠集』山・「本朝麗藻」卷下・後中書王「遙山斂暮煙」)とある。後中書王の作は、暮煙の比喩。●掩復飄―「掩」は、上から覆い隠すこと。「飄」は、風に吹かれて物がひらひら舞い上がること。

「紅芳掩斂將迷蝶、翠蔓飄搖欲挂人」(皮日休「奉和魯望薔薇次韻」)、「飄掩煙霞何処去、敲斜杉竹向簾傾」(貫休「對雪寄新定馮使君二首其二」)とあり、また「柘歌泛寒渚、霞景飄秋風」(『懷風藻』・高向諸足「五言從駕吉野宮」)、「飄舞衣於花間、混歌曲於声裏」(『作文大体』・紀長谷雄「仁和寺円堂供養願文」)、「商飈掩乱吹洞庭、墜葉翩翻動寒声」(『文華秀麗集』卷下・嵯峨天皇「神泉苑九日落葉篇」)とある。

●琪樹―仙境にあるという宝玉のなる木。「陟降信宿、迄于仙都」建木滅景於千尋、琪樹璀璨而垂珠」(『文選』卷十一・孫綽「遊天台山賦」)とあり、呂延濟は「琪樹、玉樹」という。

そこから、赤や白の小さな実を付ける南天の木や、「玉琴清夜人不語、琪樹春朝風正吹」(劉禹錫「翰林白二十二學士見寄詩一百篇因以答贐」)のように庭の美しい樹木を意味したり、また「庭望玉人無脛到、林知琪樹有時加」(『田氏家集』卷中「元慶七年冬美濃大雪以詩記之」)のように、雪を戴く樹木の比喩にも用いられる。ただ、わが国では宮廷が仙境に比定されたため、「詠歌於琪樹之陰、踏舞於沙涯之畔」(『本朝文粹』卷十・菅原文時「暮春侍宴冷泉院池亭同賦花光水上浮應製」)のように、特に宮中の樹木の美称として用いられる。ここもそれ。

●可晴―ここの「可」は、適當の意。「晴」は、もと「青」が雲のない紺碧の空の「青」を表したが、のち雨が止むのも表すようになったため、字が分化して「晴」字となったといわれるように、名詞的用法が本来のもの。『藝文類聚』卷二・天部下に「霽」、「初學記」卷二・天部下には「霽晴」の部立てがあるように、元「霽」字が晴れるの意味を担っていたが、徐々に「晴」字が主流となっていた。

●晴可案―「可」は、可能。

●欲遊―「遊」は、「游」と同じで、水上に漂うように、きまったところに留まらずぶらぶらさまようことが原義。

●仙

境―仙人の住むところ。「仙界」。唐代以後の詩語。「自然碧洞窺仙境」

何必丹丘是福庭」(李嶠「石淙」)、「何処人間似仙境」(春山攜妓採茶時「劉禹錫」洛中送韓七中丞之吳興「口号五首其五」)、「庾信園非仙境月、陶潛家隔相門風」(『本朝麗藻』卷下・源孝道「暮秋於左相府宇治別業」即事)、「霞流仙境」天猶近、林変酔郷俗始移」(『類題古詩』対・橘直幹「醉中对紅葉」)とある。 ●景蕭蕭「景」は、光り、またはそれを受けて見える景色の意。「蕭蕭」は、重言の擬音語で、馬の鳴き声や風の吹く音、風に草木の鳴る音の形容などに用いられる。また時に、静かで寂しい様を表す擬態語としても用いられる。ここは後者。「蕭蕭晚景寒、独立望江壩」(姚合「秋晚江次」)、「暮景蕭々雲斷処、一行寒雁是我師」(『菅家文章』卷二・「八月秋奠聴講孝経賦」秋学礼)、「海鱗波森森、泥蛭景蕭蕭」(『菅家文章』卷四・「北溟章」)とある。

【口語訳】

風が吹いて昨夜からの霧が消えかけてきた朝だ。林の好ましい様子がやっと現れたばかりで、遙か彼方まで次第に見渡せるようになってきた。煙霧(のカーテン)はまだ完全に巻き上げられたというわけではないので、木々の葉の色は濃くあるいは薄く見え、(月の)光りもまだなかなか消えきらないで、二筋三筋見ることができる。

松のあたりに掛かる(霧の)カーテンは、伸びて視界を遮ったかと思うとまた巻き上げられ、竹林のあたりに掛かる(霧の)とぼりは、上から覆い隠したかと思うとまたひらひらと翻る。

宮廷の美しい木々は晴れたときに見るのが良く、晴れば本当に楽しむことができるだろう。(だからその時までしばらくの間)この仙境(宮中)の侘びしい風景の中でぶらぶら逍遙することにしよう。

【補注】

韻は「朝」「遙」「条」「飄」「蕭」で、「条」「蕭」が下平声三蕭韻、「朝」「遙」「飄」が下平声四宵韻であるが、両者は同用。

首聯では、題の字「霧半収」と「林」「開」をおき、頷聯では題の「林開」を「深淺葉」と「両三条」に、「霧半収」を「靄未全褰」と「光猶難尽」に表す。頸聯では霧のかかった林を、松林のカーテンや竹林のとぼりに譬えている。尾聯では、その林の状況を仙境に見立て、そこで遊ぶとする述懐を述べる。

公宴の詩文に詠まれる仙境は、院宮を意味している場合が多い。「侍宴雖知多許事、一年一日忝仙居」(『菅家文章』卷一「早春侍内宴」同賦無物不逢春応製)、「冷泉院者、万葉之仙宮」(『本朝文粹』卷十・菅原文時「暮春侍宴冷泉院池亭」同賦「花光水上浮」応製)などである。ここも宮中を仙境に譬えることによって、そこで開催されている宴を寿いでいると捉えるのが自然である。ただしそうとすると、結句はやや複雑になってくる。というのも【語釈】でも示したとおり、「蕭蕭」という語が物寂しい様子を意味するからである。このままの意味でとると、本闕詩が開催されている清涼殿を閑散とした場所として形容することになり、ひいてはそれは朝廷の衰退をも示してしまうことになる。よっていま口語訳に示したように、「蕭蕭」たる状況を一時的な風景と解し、言外に快晴を待ち望む意を含めた。

こう考えると、その天候が好転することへの期待の裏には、作者の何らかの個人的な願望が暗示されていると捉えることも可能となるか。

【本文】

右 維時

林開物色遇清秋	林開けて	物色清秋に遇ふ
暁後方知霧半収	暁の後	方に知る 霧半ば収まるを
紅葉猶応迷隠見	紅葉	猶隠見に迷ふべし
緑蘿不得辨疎稠	緑蘿	疎稠を辨ふを得ず
雁啼未露垂雲影	雁は啼けども	露れず 雲に垂る影のみあり
鶴宿纔分戴雪頭	鶴は宿れば	纔かに分かつ 雪を戴く頭と

若有商風吹掃却 若し商風の吹きて掃ひ却ること有らば
成行樹木足廻眸 行を成す樹木 眸を廻らすに足らむ

【校異】

●雁一鳥(類従本)に作る。

●商一傍注として「高扶桑」とあり。内閣1(26130)・内閣2(26131)

【語釈】

●林開―彼方の林への眺望が開けたということ。詩題「林開霧半収」(林が表れたのは霧が消えかけてきたからだ)は、『白氏文集』卷六十四「重修香山寺畢題二十二韻以紀之」詩に「千花高下塔、一葉往来舟。岫合雲初吐、林開霧半収。静聞樵子語、遠聽棹郎謳」とある、その一節。ただし、「弋林開曙景、釣渚發晴霓」(李嶠「王屋山第之側雜構小亭暇日与群公同遊」)、「逕迴銀燭、林開散玉珂」(王維「從岐王過楊氏別業」)、「深林開一道、青嶂成四鄰」(儲光義「終南幽居獻蘇侍郎三首時拜太祝未上其二」)、「花林開宿霧、遊目清霄極」(儲光義「京口題崇上人山亭」)、「林開揚子馭、山出潤州城」(孟浩然「渡揚子江」)、「岸轉千家合、林開一鏡空」(戴叔倫「暮春遊長沙東湖贈辛兗州巢父二首其一」)とあれば、その用例のほとんどが眼前の視界を遮る林が開けたということであって、僅かに儲光義の一例が白詩の類例といえそうである。また、「雨晴嶺画千程黛、露暖林開咫尺紅」(『類題古詩』意・藤原雅材「春心遠近同」)とあるのは、林に花が咲いたということ。●物色―『文選』卷十三は「物色」の部立の下に「風賦」「秋興賦」「雪賦」「月賦」を収め、さらに「春秋代序、陰陽慘舒。物色之動、心亦搖焉。蓋陽氣萌而玄駒步、陰律凝而丹鳥羞。微蟲猶或入感、四時之動物深矣。若夫珪璋挺其惠心、英華秀其清氣、物色相召、人誰獲安」(『文心雕龍』卷十・物色)、「猶如水中見日月、文章是景、物色是本、照之須了見其象也」(『文鏡秘府論』論文意)とあるので、自然の風物や風景の意。また「日暮行采歸、物色桑榆時」(『文選』卷二十一・顏延年「秋胡詩」)、「加以物色相召、烟霞有奔命之場、山水助仁、風月無息肩之地」(『懷風藻』・下毛野虫麻呂「五言秋日於長王宅宴新羅客」詩序)、「仲月春氣滿江鄉、新年物色變河陽」(『經國集』卷一・嵯峨天皇「春江賦」)とある。

●遇―「遇」+「季節」で、その季節に巡り会うこと。「夫燕蟬遇秋寒、將穴處而懷懼」(『文選』卷三三・宋玉「九辯五首其一」)の「嗚嘶而悲鳴」(王逸注)とあり、唐・李群玉に「洞庭遇秋」詩がある。また、「無勞北陸行殘雪、只望西成遇大秋」(『菅家文草』卷二・「喜被遙兼賀員外刺史」)とある。●清秋―爽やかな秋。「清」は、秋の清々しさを強調する語。「独有清秋日、能使高興尽」(『文選』卷二二・殷仲文「南州桓公九井作」)、「白日一何長、清秋不可見」(『白氏文集』卷十「苦熱喜涼」)、「不敢閑居任意愁、勸身江畔立清秋」(『菅家文草』卷四・「江上晚秋」)とある。●曉後―夜明け方。

「影映山辺水、枝凋曉後霜」(『菅家文草』卷二「黃葉」)、「曉後弥知煙竹滑、日中更愛露花瑩」(『本朝麗藻』秋・中書王「早秋賦」)、「秋從簾上生」等とあるものの、中国詩の用例を知らない。また、「上陽宮裏曉鐘後、天津橋頭殘月前」(『千載佳句』曉・「新撰朗詠集」曉・「白氏文集」卷六十五「曉上天津橋閑望遇逢廬郎中張員外携酒同傾」)とある。●方知―「方」は、ちょうど今、ちょうどその時に、の意。「既傷蔓草別、方知秋杜情」(『文選』卷三十一・江文通「雜體詩三十首王侍中懷德」)、「天晴更覺南山近、月出方知西掖深」(『千載佳句』禁中・「白氏文集」卷十九「中書寓直」)などがある。●霧半収―霧が消えつつあること。尚、左詩の【語釈】を参照のこと。「日氣映山浦、暄霧逐風收」(鮑照「代陽春登荊山行」)、「風歸花葉散、日舉煙霧收」(隋煬帝「臨渭源詩」)とある。●紅葉―赤く色づいた葉。

「紅葉」と「黃葉」に関しては、静永健「黃葉」が「紅葉」にかはるまで―白居易と王朝漢詩とに関する一考察―(『白居易研究年報』創刊号、二〇〇〇・四)を参照のこと。「白露傷紅葉、清風斷綠蘿」(武

元衡「晨興寄贈寶使君」(「林間暖酒燒紅葉、石上題詩掃綠苔」(『白氏文集』卷十四・「送王十八歸山寄題仙遊寺」)、「林疏曉日明紅葉、塵靜寒霜覆綠苔」(姚合「和劉禹錫主客冬初拜表懷上都故人」)、「林間尋路踏紅葉、巖畔側身攀綠蘿」(『本朝麗藻』山水・中書王「過秋山」)など、類似の色対は少なくない。●**猶**—まだ

であるに違いない。「猶」は、時間的にまだ盛んな、あるいは正常な状態にならないことをいう。「応」は、確度の高い推量を表す。「軍前仍欲破重圍、閨里猶應愁未歸」(劉長卿「疲兵篇」)、「兒童但喜迎賓守、故吏猶應記姓名」(劉禹錫「送李中丞赴楚州」)、「床下酒瓶雖不滿、猶應醉得兩三場」(『白氏文集』卷六十四「十二月二十三日作兼呈旭晦叔」)とある。●**迷**—模稜としてハッキリしない様

対語「辨」の反義語。たとえば「閑筵白昼眠迷處、夢聽阿師喻糞牆」(『田氏家集』卷下・「宰予」)とある。また「複嶂迷晴色、虛巖辨暗流」(王勃「焦岸早行和陸四」)、「蝶猶迷剪翠、人豈辨裁紅」(雍裕之「剪綵花」)、「火旗似辨吳門戍、水駟遙迷楚塞城」(李紳「早發」)、「已迷帝王力、安辨天地久」(『凌雲集』・淡海福良滿「早春田園」)、「石犬吠於經過、猶迷劉寵之行路。淵魚驚於筍角、未辨鄭公之釣潭」(『本朝文粹』卷三・橘直幹「辨山水」)などと、「辨」の対語として用いられることも稀ではない。●**隱見**—見え隠れすること

隠れたり現れたりすること。また「隱顯」とも。「日斜光隱見、風還影合離」(『藝文類聚』)、「梔子・梁簡文帝「詠梔子花」)、「山雨不作泥、江雲薄為霧」(明滅洲景微、隱見巖姿露「杜甫「雨」)、「行藏猶若契、隱見更如神」(『田氏家集』卷下・「省試賦得珠還合浦」)とある。

●**綠蘿**—青々とした葛(ツタ類の総称)。「綠蘿結高林、蒙籠蓋一山」(『文選』卷二十一・郭璞「遊仙詩七首其三」)とあり、李善は「陸機毛詩草木疏曰、松蘿蔓松而生、枝正青。毛詩(小雅・頍弁)曰、葛與女蘿、施于松柏。毛萇曰、女蘿、松蘿也」と注する。「鳥散綠蘿靜、蟬鳴紅樹凋」(許渾「秋霽潼關驛亭」)、「綠蘿剪作三春柳、紅錦裁成二月花」(『千載佳句』春興・沙門奉蚌「思故鄉」)、「野縫青葛柄、□□綠

蘿襟」(『經國集』卷十・良岑安世「五言別男子出家人山」)とある。●**辨**—區別する、明らかにする。●**疎稠**—「疎」は「疏」の俗字。「疏稠」は、まばらなものと密集しているのと。但し、この語の用例を、「等

度須當砌、疏稠要滿闌」(『白氏文集』卷十五「題盧秘書夏日新栽竹二十韻」)以外に知らない。「疏密」というのが一般だが、恐らくは押韻の関係から、この語が選ばれたのだろう。●**雁啼**—雁が鳴くこと。

「庭空雨鳴驕、天寒雁啼苦」(武元衡「秋夜雨中懷友」)、「洞庭明月一千里、涼風雁啼天在水」(李賀「帝子歌」)とあるが、「鳴」字が本来鳥が鳴くことを表すためか、「雁啼」の用例は中国詩に極めて少ない。なお、雁と鶴の対句は、「翩翩孤雁何所栖、依依別鶴半夜鳴」(『藝文類聚』怨・梁豫章王蕭綜「聽鐘鳴詩」)、「鶴鳴初警候、雁上欲凌寒」(李嶠「八月奉教作」)、「池中幾度雁新來、洲上千年鶴應在」(岑參「梁園歌送河南王說判官」)などとある。「鶴」の異文「鳥」との優劣に関しては【補注】を参照のこと。●**未露**—まだ(鶴の姿は)現れていない。「露」は、むき出しになること。「沈謀藏未露、鄰境帖無喧」(賈島「寄滄州李尚書」)とあるものの、詩語としては極めて珍しい。●**垂雲影**—「於時青陽告謝、朱明肇授、天決決以垂雲、泉涓涓而吐溜」(『文選』卷九・潘岳「射雉賦」)、「遠而望之、若摘朱霞而耀天文。迫而察之、若仰崇山而戴垂雲」(『文選』卷十一・何晏「景福殿賦」)とあれば、「垂雲」とは夏空にかかる白い積乱雲のこと。また「雲影」とは、雲の形、雲の姿ということ。「曉月籠雲影、鶯聲余霧中」(元稹「遣春十首其一」)、「洛水波聲新草樹、嵩山雲影旧樓台」(『千載佳句』山水・崔致遠「留贈洛中友人」)、「雲影斷時山影出、林花落盡草花生」(『千載佳句』山中・盧綸「春中題山居」)、「天涯馬踏浮雲影、山裏猿啼朗月光」(『文華秀麗集』卷上・巨勢識人「春日餞野柱史奉使存問渤海客」)、「征帆欲繫孤雲影、客館爭容數日局」(『菅家文章』卷二・「夏夜於鴻臚館餞北客歸鄉」)とある。●**鶴宿**—「宿」とは、ねぐらで休むこと。「風(一作鳳)鳴雲外鐘、鶴宿千年松」(楊衡「宿吉祥寺寄廬山隱者」)、「何人意緒還相似、鶴宿松

枝「月半天」(薛能「閨中秋夕」)、「更想青牛籠去跡、還疑素鶴宿香音」(『類題古詩』望・菅野名明「山明望松雪」) などとある。鶴と白髪あたまとの連想は恐らく「鶴首」「鶴髪」などという言葉からの言語遊び的な要素もあろう。

●**纒分**——「纒」とは、やつのこと、かろうじて、の意。「分」とは、判別する、見分ける、の意。「欄葉纒分」色、

山花不辨名(王勃「麻平晚行」)、「咽霧山鶯啼尚少、穿沙蘆笋葉纒分」(『千載佳句』早春・『和漢朗詠集』鶯・元稹「早春尋李校書」)、「漸失鄉國處、纒分山水形」(『白氏文集』卷一「夢仙」)とある。

●**戴雪頭**——白髪あたまのこと。「干戈況復塵隨眼、鬢髮還應雪滿頭」

(杜甫「寄杜位」)、「夜書細字綴語言、兩目眵昏頭雪白」(韓愈「短燈檠歌」)、「松寒未霜枝變、鶴老終無雪鬢愁」(『雜言奉和』・紀長谷雄「秋日陪左丞相城南水石之亭祝藏外史大夫七旬之秋」)

「應教」)、「鬢髮如雪、冠履不全」(『本朝文粹』卷九・紀長谷雄「白簪翁」)、「三千人裏頭梳雪、數十年前淚拭紅」(『本朝文粹』卷十二・藤原衆海「秋夜書懷」)、「頭戴白雪之堆、飢臥壁水之溪」(『本朝文粹』卷二・三善清行「意見封事」)とあり、更に嘆老の詩人白居易には、

「新豐老翁八十八、頭鬢眉鬚皆似雪」(『新豐折臂翁』)、「從此明鏡中、不嫌頭似雪」(『聞哭者』)、「蕭郎蕭郎老可憐、手顫眼昏頭雪色」(『畫竹歌』)、「如今格是頭成雪、彈到天明亦任君」(『聽夜箏有感』)、「君埋泉下泥銷骨、我寄人間雪滿頭」(『夢微之』)、「面黑頭雪白、自嫌還自憐」(『喜老自嘲』)「心灰不及爐中火、鬢雪多於砌下霜」(『千載佳句』冬興・『新撰朗詠集』炉火・「冬至夜」)など、直

喻暗喩を含めて類似的表現が非常に多い。

●**若有**——「若」は仮定。た

とえば「若有_二人及_レ此、傍觀為_二何如_一」(『白氏文集』卷七「題_二座隅_一」)とはあるものの、「若有_二作_レ姦犯科及為_レ忠善者_一、宜_レ付_二有司_一、論_二其刑賞_一、以昭_二陛下平明之理_一、不_レ宜偏私、使_二内外異_レ法也」(『文選』卷三七・諸葛孔明「出師表」)、「若有_レ難_レ審、上稟_二睿察_一」(『文華秀麗集』・仲雄王「文華秀麗集序」)、「若有_二知_レ吾者_一、無_レ隱_二之焉_一」(『本朝文粹』卷一・兼明親王「兔裘賦」)、「若有_二余興_レ者、与_二兒童_一

乘_二小船_一、叩_レ舷鼓棹。若有_二余暇_レ者、呼_二僮僕_一入_二後園_一、以糞以灌

(『本朝文粹』卷一二・慶滋保胤「池亭記」) というように、やや散文化的な語法である。「若有」は、韻文においては『楚辭』九歌・山鬼に「若有_二人兮山之阿_一、被_二薜荔兮帶_二女蘿_一」(『文選』卷三三)とあるのを初めとして、「若」は比況として用いるのが一般だが、「若有_二入_レ羌音_一、誰堪_二行子別_一」(『菅家文章』卷一「賦得折楊柳」)、「若有_二相思_一常服用、每_レ逢_二秋雁_一附_二寒溫_一」(『菅家文章』卷二「二十八字……重以戲之」)など、何故か道真には詩の末尾に用いた例が数例ある。

●**商風**

——「秋風」というに同じ。「商」は、五行で金、季節では秋、方位では西に当てるので。「輕霞冠_二秋日_一、迅商薄_二清穹_一」(『文選』卷二十・謝宣遠「九日從_二宋公戲馬臺集_一送_二孔令_一詩」)とあり、その李善注に「迅商、商風之迅疾也。楚辭(七諫・沈江)曰、商風肅而害_レ之、百草育而不_レ長。王逸曰、商風、西風也。秋氣起則西風疾」とある。また「商風初授、辰火微流。朱明送_二夏_一、少昊迎_二秋_一」(『藝文類聚』七月七日・晉潘尼「七月七日侍_二皇太子宴_一玄圃園詩」)、「一身暑氣施_レ未去、六尺商風展_レ得清」(『本朝麗藻』秋・中書王「早秋賦_二秋從_二簞上_一生_一」)、「商風眇眇凝嬌曉、蜀雨濛濛灑帶晴」(『類題古詩』・「天徳三年八月十六日闕詩行事略記」・菅原文時「秋声脆_二管弦_一」)とある。異文「高風」は、「風曰商風、……高風」(『初學記』秋・梁元帝「纂要」)、「高風催_二節變_一、凝露督_二物化_一」(『藝文類聚』「初學記」秋・晉江道詩)、「不_レ許_二高風樽下_一謝、暫_二曉露戸中_一收」(『類題古詩』惜・菅原輔昭「酌_二盃_一惜_二秋_一」)とあるので、「商風」と同義。

●**吹掃却**——「掃」は、表面をはいてき

れいにすること。「却」は、俗語。「忘却」「滅却」などのように、動詞の後に付いて、すっかりなくしてしまう意を表すが、「掃却」の語例を知らない。「帶_二日交_一簾影、因_レ吹掃_二席塵_一」(『藝文類聚』楊柳・梁元帝「詠_二陽雲樓簾柳_一詩」)、「微霜拂_二宮桂_一、淒吹掃_二庭槐_一」(張說「戲題_二草樹_一」)、「留_二取_一纓紅伴_二醉吟_一、莫_レ教_二少女來吹掃_一」(張碧「惜_二花三首_一其三」)とある。

●**成行樹木**——「成行」とは、整然と行列を作る

こと。「淒涼霸川曲、壟樹已成_レ行」(權德輿「贈_二鄭國莊穆公主挽歌_一二首

其二、「大業年中煬天子、種_レ柳成_レ行夾_二流水_一」（『白氏文集』卷四「隋堤柳」）などのように、墓や堤防に人工的に植えられた木々が列を作るのは当然だが、「桂木雜而成_レ行、芳盼向_レ之依依」（『藝文類聚』宮・漢劉歆「甘泉宮賦」）、「丹草周_レ隅、靈木成_レ行」（『藝文類聚』宮・魏卞蘭「許昌宮賦」）などであることから、ここもあるいは、この關詩が行われた宮中の樹木を指すのかもしれない。今、本詩の冒頭に「林」とあることから、清涼殿の西、二・三百メートルのところに存在したという「宴の松原」に比定してみたい。また「翡翠成_レ行煙暗色、瑠璃繞_レ地浪清音」（『本朝麗藻』卷上・『類題古詩』佳・右金吾「水樹多_二佳趣_一」）とあるのは、道長邸の松林の比喩。●廻眸——「裴令公有_二儁容姿_一、一旦有_レ疾至_レ困。惠帝使_二王夷甫往看_一、裴方向_レ壁臥。聞_二王使至_一、強回_二視之_一」（『世說新語』容止）とあり、劉孝標は「名士傳曰、楷病困詔遣_二黃門郎王夷甫省_レ之_一。楷回_二眸屬_二夷甫云_一」と注する。つまり「回（廻）眸」と「回視」は同じで、振り返ってこちらを見ること。また「迴眸炫晃別_二群玉_一、独赴_二異域穿_二蓬蒿_一」（柳宗元「寄_二韋珩_一」）、「幾度欲_二歸去_一、回_二眸情更深_一」（劉禹錫「海陽十詠 吏隱亭」）、「送_二我不出_一戶、決_二我不回_一眸」（元稹「陽城驛」）、「斂_二手辭_二双闕_一、回_二眸望_二兩京_一」（『白氏文集』卷十七「江州赴_二忠州至_二江陵已來舟中示_二舍弟五十韻_一」）、「指_二白日而請_二命_一、迴_二眸無_二再聞之期_一。叫_二蒼天以招_二魂_一、慰問斷_二重聞之答_一」（『菅家文章』卷十一・「為源大夫亡室藤氏七七日修功德願文」）などで分かるように、そこに強く惹かれ思いを残すから振り返るのであって、特にその所作を女性がする時、「回_二眸一笑百媚生_一、六宮粉黛無_二顏色_一」（『白氏文集』卷十二「長恨歌」）、「盼_二眄迴_二眸遠_一、纖衫整_二髻遲_一」（杜牧「舊遊」）などと、流し目と同じような媚態を含んだものとなる。「引_二手暫留鸚鵡翅_一、迴_二眸遙望麴塵糸_一」（『類題古詩』見・延喜御製「停_二盃看_二柳色_一」）、「迴_二眸翠柳如_レ煙処、極_二目紅桃似_二火時_一」（『類題古詩』望・寛弘御製「望_二春花景煖_一」）などは、本詩と同じく風景への執着。

【口語訳】

林への眺望が開けてくると辺りの自然はすっかり爽やかな秋の景色になっていった。夜明け方になった、ちょうどその時、霧が次第に消えつつあるのが分かった。

（しかし霧はまだ漂っている）赤く色づいた葉はまだぼうっとして見えたり隠れたりしているに違いない。青々としたツタ類もびっしり下がっているのかそうでないのかハッキリ見分けることができない。

（霧が漂っているので）雁は鳴いているのだが、まだその姿は見えず、ただ白い積雲が見えるだけだ。鶴が林に留まっているらしいが、老人の白髪あたまとかろうじて見分けられる。

もし秋風が吹いて、（霧を）全て吹き払ったならば、整然と立ち並ぶ宮中の木々は、きっと歩く人を振り返らせるに十分な美しさだろう。

【補注】

韻は「秋」「収」「稠」「頭」「眸」で、「秋」「収」「稠」「眸」が下平声十八尤韻、「頭」が下平声十九侯韻であるが、両者は同用。

まず解釈の揺れに関して二・三述べる。校異に指摘したように、第五句の「雁啼」は「鳥啼」の異文を持つ。これは本来「雁啼」であったものに、「鳥啼」の異文が生じたものと考えたい。というのは、一つは語釈に述べたように、「雁」は「啼」と本来言わないのに対して、「鳥」は樂府「夜烏啼」を初めとして、「鳴」よりも「啼」と結びつく方が寧ろ一般的であること、第二に、対語「鶴」との関係である。語釈には「雁」と「鶴」が対語となる用例を数例挙げたが、唐詩における対句の数量的なものでは、「雁」は「鳥」と対語を成す場合の方が圧倒的に多い。例えば、「鳥啼倦_二依托_一、鶴鳴傷_二別離_一」（陳子昂「駕鴛篇」）、「御座丹鳥麗、宸居白鶴驚」（寶希玠「奉_二和九日幸_二臨渭亭登_二高心_一制得_二明字_一」）、「啼鳥爭引_二子_一、鳴鶴不_レ歸_二林_一」（杜甫「晴_二二首其二_一」）の如くであり、白居易に

池鶴八絕句 鳥贈_二鶴_一

与_レ君白黒大明、縦不_二相親莫_レ見_レ輕。我毎夜啼君怨_レ別、玉徽琴裏泰_二同_レ声。（琴曲有_二烏夜啼、別鶴怨。）

池鶴八絶句 鶴答_レ烏

吾愛_レ棲_レ雲上_二華表_一、汝多_レ攫_レ肉下_二田中_一。吾音中_レ羽汝聲角、琴曲雖_レ同調不_レ同。（別鶴怨在_二羽調、烏夜啼在_二角調。）
 の作があるように、両者が対照的な性格を持つと考えられているからである。

しかし、それでも「雁」を本来のものと考えるのは、秋という季節、及び下語の「垂雲」との関係である。六朝詩や唐詩などの実作は勿論、藝文類聚や初学記などの類書でも烏と雲の関連は指摘がないが、雁については「雲飛」「寥唳度雲鴈」（『白氏六帖』鴈）などの語句があつて、上空高く飛ぶその生態とあわせて、雁の方がより相応しいと判断したのである。

更に、その「垂雲影」であるが、それを含む第五句は、「雁は鳴いているのだが、まだその姿は現れず、ただ雲に映る（雁の）影が見えるだけだ」との解釈も成り立つように見える。それは下句の「戴雪頭」との関連で「雲に垂る影」と訓読するとき、特にそのように思えるだろう。しかし、唐詩においてもそのような例はなく（「通中散碧腴垂雲膏」（白居易・元稹）、「垂雲髮」（温庭筠）が代表例で、何れも白雲のイメージによる命名であろう）、何よりもそれでは「霧半収」という題意を無視することになる。霧がまだ残っているからこそ、声は聞こえて姿が見えないのであり、雲に映る影が見えるようであれば、何故姿が見えないと記述するのかその根拠を失うことになるからである。

首聯は題字を「林開」と「霧半収」に二分して置く。頷聯での破題は「紅葉」と「緑蘿」が題の「林開」に、「猶応迷隠見」と「不得辨疎稠」が題の「霧半収」に対応しているのである。頷聯は声はすれども霧で姿が見えない雁の様子と、雪のような白い体をしている鶴の様子を描く。句題詩の定法ではここは比喩でなければならず、後者は「戴雪頭」が白髪の比喩になるが、前者にはそれが見あたらない。強いて言えば、「垂

雲影」が霧を暗示・比喩するのもかも知れない。何れにしろ、左詩の霧に對する明確な比喩とは一線を画するだろう。尾聯では霧が晴れたときのことを想像し、一応は作者自身が現れてくるのであるが、闕詩の他の詩に比べると、その述懐はあまりにもあつさりしたものになっている。あるいはこれは作者維時が比較的恵まれた地位にいて、あえて自己の欲求を主張する必要がなかったためであろうか。

【本文】

以右為勝。勸杯如前。

【校異】

なし

【訓読】

右を以て勝とす。杯を勸むること前のごとし。

【口語訳】

右を勝ちとする。前例に沿って（左に）罰杯を勧める。

【比較検討】

両詩はまず、題意をそのまま起聯で展開する。時間設定も同じ早朝としているなど、両者大差は無いが、左詩が「望漸遙」と、題字の「霧半収」から予想される範囲を出ないのに対して、右詩は「物色遇清秋」と概念的ではありながらも季節感を含ませた点で、僅かな優位を認めて良からう。

頷聯の対句は、左詩は靄と光の対立であるが、対語は「褰」に対して「尽」、「深淺葉」に対して「両三条」と、さほどその対比が鮮やかでないにの対して、右詩は眺望が開けた林の「紅葉」と「緑蘿」という、色

彩的にも補色関係の語を配し、「迷」に「辨」と反意語を列べ、「隠見」と「疎稠」という、熟語の上下字同士が反意語という対語を採るなど、極めて技巧的な対句になっている点、右詩の優位を認めざるを得ない。

頸聯の対句では、左詩は霧を「紗帳」「羅帷」という同じカーテンに見立て、それぞれを「舒還卷」「掩復飄」と形容する。その意味ではここも対句としての対比性対照性に乏しく、それを強いて挙げれば「松」と「竹」という、冒頭の語だけであろう。「舒」と「卷」は、互いに反意語だが、「掩」と「飄」は、必ずしもそうではない。一方、右詩は「雁」と「鶴」の対比にはじまり、補注にいうような意味上の問題点は多少残るものの、「垂」と「戴」、「雲」と「雪」というような、文字単位の微視的な対比もある。

こうした両詩の優劣が決定的になるのは、尾聯に於いてである。右詩も「若有」という散文的な措辞があるが、左詩の「可晴晴可」という語法は、明らかに樂府的な俗調のリズムであり、闘詩という公儀の場にそぐわないものと言わざるを得ない。更に、結句は右詩が霧が晴れた後の、美しい宮中を描写するのに対して、左詩は晴やらぬ前の現状の物寂しい宮中を描いている。尾聯で言うところの内容は、結果的に同様なものであったとしても、この末尾の表現の差異は極めて大きいと言わなければならない。

判者維時は、結局自作を勝ちとするが、その判断は一概に客観性に乏しいと非難することはできなかったと思われる。

(平成一四年六月二一日受理)

東京工業高等専門学校研究報告書

第 34 (1) 号

平成14年度

平成14年9月2日発行

編 集 者 東京工業高等専門学校図書専門委員会

発 行 者 東 京 工 業 高 等 専 門 学 校

東京都八王子市櫛田町1220の2

TEL 八王子 (0426) 68-5111

〒193-0997

印 刷 所 電算印刷株式会社

長野県松本市筑摩1-11-30

TEL 松本 (0263) 25-4329

〒390-0821

The name of the journal has been changed from “*Research Reports of Tokyo National Technical College*” into “*Research Reports of Tokyo National College of Technology*” since the 1984 issue.

