

Research Reports of Tokyo National College of Technology

東京工業高等専門学校

研 究 報 告 書



第 35(2) 号

2004.1

東京工業高等専門学校研究報告書 第35(2)号 目次

傷と癒し（其の一）ーヘミングウェイの短編を中心にー	岩崎 健	1
認知文法と教育文法の接点：二重目的語構文を中心に	相澤 俊行	11
東京高専学生のキャンパスライフと意識	古屋 正俊 大澤 昇 小杉 暁子 白崎 由香里 根本 葉子	19
技術者倫理教育に関わる現状分析とカリキュラム化への試み	河村 豊 川北 晃司 浅野 敬一	27
圧電素子を用いたホロノミックなマイクロロボットの試作研究（第1報）	松林 勝志 内田 雄大 平沼 千紘 小坂 敏文	43
代数幾何符号を構成する定義曲線の種数に関する一解釈	市村 洋 鈴木 雅人	47
微分方程式と線形代数	拜田 稔	55
活性汚泥呼吸阻害試験による化学物質の処理特性と有害性評価	庄司 良 成田 昇	63
三宅島火山灰のアルカリ溶融法によるゼオライト転換とアンモニア性窒素の吸着性	平田 房雄 鄭泳彦 庄司 良 奈良 麻里子 山田 圭 須藤 義孝	69
『新撰万葉集』注釈稿（上巻 秋部 五八～五九）	津田 潔 半澤 幹一	(1)

Research Reports of Tokyo National College of Technology No. 35 (2)

CONTENTS

Tatsuru IWASAKI	Wound and Healing (Part One) —Based on Hemingway's Short Stories—	1
Toshiyuki AIZAWA	The Interface of Cognitive Grammar and Pedagogical Grammar : Focus on "the Ditransitive Construction"	11
Masatoshi FURUYA Noboru OSAWA Akiko KOSUGI Yukari SHIRASAKI Youko NEMOTO	On the Campus life and Consciousness of the Students of Tokyo National College of Technology	19
Yutaka KAWAMURA Koji KAWAKITA Keiichi ASANO	Issues on the Current Education of Engineering Ethics and on Attempt for the New Curriculum	27
Katsushi MATSUBAYASHI Odai UCHIDA Chihiro HIRANUMA Toshifumi KOSAKA	Prototype Development of a Holonomic Micro-Robot Driven by Piezoelectric Actuators (1st Report)	43
Hiroshi ICHIMURA Masato SUZUKI	An Interpretation of the Genus of Defined Curve for Algebraic Geometric Codes	47
Minoru HAIDA	Differential Equations and Linear Algebra	55
Ryo SHOJI Noboru NARITA	Evaluating toxicity and treatability of chemicals by activated sludge respiration inhibition test	63
Fusao HIRATA Cheong YOUNG-EON Ryo SHOJI Mariko NARA Kei YAMADA Yoshitaka SUDO	Conversion of Miyake Island Volcanic ashes into zeolite by alkali melting method and the adsorption of the ammoniac nitrogen	69
Kiyoshi TSUDA Ken'ichi HANZAWA	The Annotation of the Shinsen-man'yōshū (10)	(1)

傷と癒し（其の一）

—ヘミングウェイの短編を中心に—

岩 崎 健*

Wound and Healing (Part One)

—Based on Hemingway's Short Stories—

Tatsuru IWASAKI

Astonishing words suddenly come out of the mouths of Hemingway's heroes soon after they are wounded not only physically but also spiritually. The words are not sorrowful ones, but ones that are filled with the decision to overcome the wound and live actively. For example, Nick, a young boy of 'Indian Camp' is wounded not only physically but also spiritually by seeing baby's birth and man's death at the same time. He is violently shocked, but he overcomes the shock and says to himself that he will never die.

(Keywords : wound, healing, growth)

ヘミングウェイ (E. Hemingway) の登場人物たちは時々、実に胸のすくような言葉を口にする。「胸のすくような」というのは、その言葉に重みがあるからである。苦渋の決断の末に、胸の中から搾り出された言葉だからである。そして何よりもその言葉が、その言葉を発した人の存在そのもの、命そのものとに密接に結びついているからである。つまりその言葉の主は、己の全生命を賭けてその言葉を発したのである。それゆえに私たちはその言葉に接すると、思わず胸のすくような思いに駆られる。ヘミングウェイの登場人物たちのこのような傾向はかなり早くから見られる。

ヘミングウェイの事実上の最初の作品は『われらの時代に』(*In Our Time*, 1925) という短編集である。この短編集の中に「兵士の家」('Soldier's Home') という作品がある。

主人公のクレブス (Krebs) は戦争帰りの若者である。彼は1917年海兵隊に入り、第一次大戦に参戦している。大学在学中に出兵したというから20歳前後なのだろう。クレブスにとって戦争での体験はあまりにも強烈だったようである。その衝撃の反動は大きく、帰国後の彼はまさにもぬけの

殻同然である。何に対しても積極的になれない。女の子も見ているだけで満足し、自ら進んでどうしようなどという気は毛頭ない。つまり、女の子を手に入れるためにはいろいろやっかいなことをやらなければならないのだが、それが面倒くさいのである。「……でも彼は女の子を手に入れるために長い時間費やさねばならないことが嫌だった」("…but he did not want to have to spend a long time getting her") (93)¹⁾。もちろん、仕事をする気など全くない。このようなクレブスを心配して彼の母が尋ねる。「何をするのか決めたの、ハロルド」("Have you decided what you are going to do yet, Harold?") (98)。「いいえ、……僕はそんなこと、考えたこともない」("No, … I hadn't thought about it")。更に母親が問いつめる。

"God has some work for everyone to do" his mother said. "There can be no idle hands in His Kingdom." "I'm not in His Kingdom," Krebs said. "We are all of us in His Kingdom." Krebs felt embarrassed and resentful as always. (98)

「神様は一人一人がすべき仕事を与えているのよ」、彼の母が言った。「神様の王国には、怠け者は一人もいないことになってるの」。

「僕は神様の王国にはいません」クレブスが言った。「私たちはみんな神様の王国にいるのです」。クレブスはいつものように困惑し、憤慨した。

クレブスが「胸のすくような」言葉を発するのは、このようなやりとりの後である。自分の思いがさっぱり息子に伝わらないことに業を煮やした母親がクレブスに言う。「あんたはお母さんを愛していないの」("Don't you love your mother, dear boy?"). クレブスが即座に答える。「はい」("No") (99)。クレブスの答に母親は大変なショックを受ける。「彼の母親はテーブル越しに彼を見た。その目は光っていた。彼女は泣き出した」("His mother looked at him across the table. Her eyes were shiny. She started crying") (100)。

息子から「愛していません」と言われた母親の悲しみがいかに深いものであるかは十分に察しがつく。血を分けた親子の関係が深いのは当たり前である。それは理屈ではなく、本性である。クレブスも、自分が口にしてはならぬ言葉を口にしてしまったことに気づいている。そこで母親の涙を見て、あわてて付け加える。「僕は誰も愛していません」("I don't love anybody")。

クレブスが人を愛せなくなってしまったのは仕方ないことである。彼が戦場でどのような経験をしたかについては、この作品の中ではほとんど触れられていない。しかし彼が戦場で経験したことの一つが「愛の空しさ」といったものであるらしいことは容易に察しがつく。なぜなら、生きるか死ぬかの戦いの場においては、「愛」などというものは何の役にも立たないであろうから。戦場において確実なものは、銃弾などの具体的なものだけである。銃弾の前でいくら「愛」などという抽象的な言葉を唱えてみても、それは銃弾という具体的なものの前では何の役にも立たず、影のようなものに過ぎないのだから。

『武器よさらば』(A Farewell to Arms, 1929) で、膝に瀕死の重傷を負った、クレブスと同じような若者フレデリックがつぶやく。

I was always embarrassed by the words sacred, glorious, and sacrifice and the expression in vain. ...abstract words such as glory, honor, courage or hallow were obscene beside the concrete names of villages, the numbers of roads, the names of rivers, the numbers of regiments and the dates.²⁾

私はいつも神聖な、とか栄光的な、とか犠牲、といった言葉、空しく、といった表現に当惑していた。……栄光、名誉、勇気、あるいは神に捧げる、といった抽象的な言葉は、村、道路番号、川の名前、連帯番号、日付といった具体的な名前の前では卑猥であった。

戦争に出かける前のクレブスが「愛」を、具体的なものを通してではなく、抽象的な言葉を通して学んでいたらしいことは間違いない。このことはクレブスの家庭が、その当時のアメリカ中西部の中流階級特有の、上品な伝統を持つ家庭であったらしいことなどからも十分に察しがつく。上品な伝統を持つ家庭というのは経済的に裕福で——クレブスの家庭が裕福であったらしいことは、「もしあなたが誰かいい女の子をドライブに連れ出したいと言うなら、私たちにはこんなに嬉しいことはない」("If you want to take some of the nice girls out riding with you, we are only too pleased") (99) と、クレブスのために家の車を提供しようとしていることから分かるし（時代は20世紀初頭のことである）——、アメリカの建国の礎となったピューリタンの思想をその根底に持つ、信仰心の篤い家庭——クレブスの家庭が信仰心の篤い家庭であったらしいことは、前述の母親の「私たちはみんな神様の王国にいるのです」といった言葉、更にクレブスをメソディスト派の大学に通わせていたことなどからも分かる。「クレブスはカンザスのメソディスト派の大学から戦争へ行った」("Krebs went to the war from a Methodist college in Kansas") (89) ——の ことである。嶋忠正はクレブスの育った環境を「宗教的規律のきびしい、お上品な学校なり家庭」³⁾と言っている。

戦場で、無惨な人間の死、といったものを目の

当りにしたとき、クレブスの中から「愛」などといった抽象的な言葉は吹き飛んでしまっただろう。銃弾の前にあっては、人間の愛がいかに空しく、空虚なものであったかを骨の髄まで知らされたことであろうから。戦場で彼の体験はクレブスに、人を愛することを不可能にさせていた。そこで母親の、「あなたはお母さんを愛していないの」という問いに「はい」と答えてしまうのである。

このように繕うことなく、そのくせ心の中では幾多の葛藤を繰り返した言葉をはっきりと口にすることを聞くと、私たちは思わず「胸のすくような」思いに駆られる。私たちには到底できないことであるから。

ヘミングウェイの最初の意味ある作品、それは「インディアンキャンプ」('Indian Camp')である、とヘミングウェイの研究家フィリップ・ヤング (Philip Young) は語る。「アーネスト・ヘミングウェイの最初の短編集の最初の短編は――それは実際彼の最初の意味ある作品なのですが――『インディアンキャンプ』と呼ばれています」

("The first short story in Ernest Hemingway's first book of short stories――it was indeed his first significant book of any kind――is called "Indian Camp")⁴⁾。ヤングの言葉を待つまでもなく、「インディアンキャンプ」がヘミングウェイの最初の意味ある作品であることは、ヘミングウェイの研究家全てが認めるところであろう。それ故にもし「インディアンキャンプ」がヘミングウェイの最初の意味ある作品であるとしたら、私が今取り上げているような問題――ヘミングウェイの登場人物は時々胸のすくような言葉を口にする――が早くもこの作品に萌芽をのぞかせているはずである。なぜなら、最初の作品というものはその作家がその後扱うであろう問題をしばしば内蔵させているものだから。

「インディアンキャンプ」の主人公ニック (Nick) は何歳くらいだろうか。12、3歳というところだろうか。ニックは父親に連れられてインディアンキャンプにやってくる。どうやら父親はニックに人生のイニシエーションを授けたいらしい。つまり、出産という場に立ち合わせることでニックを精神的に鍛え、逞しい男に育てようと企んでいるらしい。しかし父親の思惑は必ずしも予想していたようにはいかない。インディアン

キャンプの妊婦は帝王切開でなければ出産できなかったからである。そのために妊婦は陣痛の痛みに泣き叫ぶ。妊婦の泣き声に耐えられなくなったニックが言う。「ねえお父さん、彼女に何かやって泣き止めさせることはできないの」 ("Oh, Daddy, can't you give her something to make her stop screaming?") (17)。ニックは出産という人間の生涯の中で最も大切な局面に立ち合わせられ、極度の緊張を強いられる。しかしニックが直面する人生のイニシエーションはこれだけに留まらない。その妊婦の夫というのが、妊婦が横たわっている寝台の上の棚に寝ていたのだが（この男は2、3日前に斧で足に大怪我をしていたので）、妊婦が麻酔薬なしでの帝王切開の手術を受け、苦しみ始めると、その苦しみに耐え切れずに剃刀で喉を掻き切って自殺してしまう。この惨状をも目撃して、生と死というまさに人間の生に直に触れたニックのショックは大きい。

"Do ladies always have such a hard time having babies?" Nick asked.

"No, that was very, very exceptional."

"Why did he kill himself, Daddy?"

"I don't know, Nick. He couldn't stand things, I guess."

"Do many men kill themselves, Daddy?"

"Not very many, Nick."

"Do many women?"

"Hardly ever."

"Don't they ever?"

"Oh, yes. They do sometimes."

"Daddy?"

"Yes."

"Where did Uncle George go?"

"He'll turn up all right."

"Is dying hard, Daddy?" (21)

「女の人は子供を生むときにはいつもあんなに大変な思いをするの」ニックが尋ねた。

「いいや、あれは極めて例外的なんだ」

「なぜあの人自殺したの、お父さん」

「分かんないな、ニック。いろんなことに耐えられなかったんじゃないかと思うよ」

「多くの男の人が自殺するの、お父さん」

「多くはないよ、ニック」
 「女の人」
 「女の方はほとんど自殺しないよ」
 「ほとんど」
 「そうだよ、たまにはすることもあるよ」
 「お父さん」
 「うん」
 「ジョージ叔父さんはどこへ行ったの」
 「すぐに来るよ」
 「死ぬって苦しいこと、お父さん」

これほどのショックを受ければ並の少年だったら動転し、言葉を失い、呆然自失し、正気を維持することさえ難しくなるであろう。それ故、たとえばニックが突然無口になり、意識に混乱を起こしたとしても誰もこれを責めることはできないであろう。現にニックの父親でさえ、ニックに耐え難いほどの思いをさせてしまったと後悔している。「おまえを連れてきて大変申し訳なかった、ニック。……おまえに試練を与えようとしたのは大変な失敗だった」("I'm terribly sorry I brought you along, Nickie. … It was an awful mess to put you through") (20)。しかし、さすがヘミングウェイの主人公である。この作品の幕切れのニックの言葉（というよりも意識）は、私に胸のすくような快感を与える。次の描写は、インディアン部落を後にして湖をボートで帰るニックの様子である。

…Nick trailed his hand in the water. It felt warm in the sharp chill of the morning.

In the early morning on the lake sitting in the stern of the boat with his father rowing, he felt quite sure that he would never die. (21)

……ニックは水の中に手を漂わせた。水は、朝の鋭い冷たさの中で温かく感じられた。

早朝の湖で、父が漕ぐボートの船尾に座り、彼は自分は決して死んだりはしないとしっかりと確信した。

「自分は決して死んだりはしない」というニックの確信はすごい。ニックは人間の生と死という、ものすごい衝撃に打ちのめされてはいない。いや、

それどころかその衝撃をはねのけ、それをバネにして一段と逞しく成長しようとしている。ニックのこの姿には思わず拍手を送りたくなるし、胸のすくような思いに駆られる。

「自分は決して死んだりはしない」という確信を持ってニックは人生の門出をする。その姿勢は明らかに逞しく生きる方向を目指す。この意味においてニックの父親のイニシエーション教育はみごとに成功したと言えるだろう。となると、次に気がかりなことはその後のニックのことである。

その後のニックを描いた作品は『われらの時代に』の中にたくさんある。しかしそれらの作品は必ずしもはっきりと生への方向を目指しているわけではない。いや、目指しているのかも知れないが、成長期特有のさまざまな障害に阻まれて迷路をさまよっている、といった感じを受ける。この迷路を抜け出し、一つの方向性を示しているのが「殺し屋」('The Killers') のニックであるように思われる。

この頃のニックは何歳くらいだろうか。17、8歳くらいだろうか。ヘンリー食堂にいたニックにある災難が降りかかる。アル (Al) とマックス (Max) という2人の殺し屋が食堂にやってきたのである。2人は悠々と食事をしながら盛んに時間を気にしている。やがてアルが料理人のサム (Sam) とニックを調理場に押し込めて縛り上げると、マックスが店の主人ジョージ (George) に向かって言う。「俺たちはあるスウェーデン人を殺そうとしているのだ。オーレ・アンドレソンというでっかいスウェーデン人を知ってるだろう」("We're going to kill a Swede. Do you know a big Swede named Ole Andreson?") (85)⁵⁾。マックスによるとアンドレソンは6時にここへ食事に来るはずである。自分たちはある男に頼まれてアンドレソンを始末するためにやってきたのだ、と言う。ところが、いくら待ってもアンドレソンはやってこない。7時10分になっても来ない。ついに2人は諦めて食堂を出て行く。監禁から開放されたニックにジョージが言う。「オーレ・アンドレソンの様子を見に行った方がいい」("You better go see Ole Andreson") (90) と。ニック自身もそうした方がいいと思っていたらしく、すぐにアンドレソンの下宿へ駆けつけて彼に事の顛末を告げる。「……そして2人の男がやってきて僕と

料理人を縛り上げ、あなたを殺すのだと言ってました」(…and two fellows came in and tied up me and the cook, and they said they were going to kill you") (92)。しかしニックのこのような言葉にアンドレソンは全く反応しない。ただ壁の方を向いたままで、「さんざん逃げ回ったんだ。……今はすべきことなんて何もない」("I'm through with all that running around. …There ain't anything to do now") (93)。ヘンリー食堂に戻ってニックはジョージと、アンドレソンのことについて話す。

"I wonder what he did?" Nick said.

"Double-crossed somebody. That's what they kill them for."

"I'm going to get out of this town," Nick said.

"Yes," said George. "That's a good thing to do."

"I can't stand to think about him waiting in the room and knowing he's going to get it. It's too damned awful."

"Well," said George, "you better not think about it." (95-96)

「彼は何をしたんだろう」ニックが言った。

「誰かを裏切ったのだろう。それで奴らは殺そうとしているんだ」

「僕はこの町から出て行こうと思う」ニックが言った。

「そうだね」ジョージが言った。「それがいい」

「僕はあの男が殺されると知りながら部屋で待っていると考えることに耐えられないんだ。ひどく恐ろしいことだ」

「そうだね」ジョージが言った。「それについては考えないほうがいいよ」

ニックの目は明らかに生きることに据えられている。命を奪われることを知りながらおめおめとその機会を与えようとしてしまうアンドレソンの気持が彼には全く理解できない。おそらくニックには、生きることは勝ち取るものであって、自然に放置しておくものではない、という強い認識があるのだろう。もちろん、町を出るということは

大変なことである。過去を棄て、未来を目指すわけだから。命を守る、という観点から見たら、町に留まることとは比較できないほどの危険があるだろう。しかし生きることを目指すニックには、アンドレソンの態度もさることながら、生きることに背を向けているような町の雰囲気にも耐えられないのだろう。例えば、サムはこのような事件には関わらないほうが賢明だと言う。「こんなことには関わらないほうがいいですよ」("You better not have anything to do with it at all") (90)。ジョージは、ニックが「殺されると知りながら部屋で待っていると考えることに耐えられないんだ」と言うのと、「それについては考えないほうがいいよ」と言う。それだけにニックの「僕はこの町から出て行こうと思う」という言葉には胸のすくような思いがする。ニックがこの言葉を軽々しく口にしたわけではないことは明白である。何しろニックはまだ成人にも達していない若者である。それこそ町を出てしまったら幾多の苦難、危険に遭遇するにちがいないことは目に見えている。それだけにこの言葉には重みがある。と同時に、ニックの全生命が賭けられていることも明らかである。

「胸のすくような」言葉、と言えど何ととっても「アルプスの牧歌」('An Alpine Idyll')を取り上げないわけにはいかない。これは1927年の作であるから、1925年の「兵士の家」、1924年の「インディアンキャンプ」とそれほど創作時期が離れているわけではない。

語り手の私("I") ―たぶん「インディアンキャンプ」のニック、「兵士の家」のクレブスが更に成長して24、5歳になった時の、というのは「彼(ヘミングウェイ)の作品の主人公たちはあまりにもお互いに良く似ているので、私たちは彼らを単数で(heroesではなくheroで)話すことになっている」⁶⁾というヤングの指摘が当を得ているように思われるので――と称する若者が友人のジョン(John)と一緒にシルヴレッタ山で1か月ほど春スキーを楽しんで、谷に下りてくる。谷はすっかり春になっていて、どちらかというと暑いくらいである。町の教会の墓地では折しも葬式が終わったところで、寺男が掘り起こしたばかりの土をシャベルで埋めている。寺男のそばには一人の農夫がいて、寺男が疲れると代わってシャ

ベルを握っている。「こんな日に埋葬されるなんて想像してみな」("Imagine being buried on a day like this") (188)。語り手の「私」がジョンに言う。それは5月の晴朗な朝で、まさに葬式とは全くそぐわない。この不釣り合いが、彼らがこれから出会う事件の奇妙さをほのめかす。

やがて二人は宿屋に入っていく。その宿はどうやら二人が山に登る前に宿泊していたところらしい。主人ともなじみだし、彼ら宛の郵便物もたくさん溜まっているので。二人は酒場でビールを飲み出す。1か月ぶりのビールの味は格別である。まもなく2人の男が酒場に入ってくる。墓地にいた寺男と農夫である。寺男はワイン、農夫はブランデーを飲むが、農夫はすぐに出ていってしまう。寺男との間に何か気まずいことがあったらしい。農夫が出ていった後、寺男は宿の主人と話し始める。寺男は面白がっているが、宿の主人は嫌がっている。「私たちと一杯やりませんか」("Won't you have a drink with us?") (193) という「私」の誘いにやってきた宿屋の主人は「あの百姓共はけだものですよ」("Those peasants are beasts") と、いきなり切り出す。「どういうことなんですか」("How do you mean?") という問いに、宿屋の主人は寺男を呼んで、その農夫にまつわる話をさせる。

農夫のオルツ (Olz) は去年の12月に夫人を亡くした。死亡届は役場へ出したのだが、雪深い土地ゆえ夫人の屍体を町へ運んでくることができなかった。それでその屍体を小屋の中の、薪にする木の上に横たえておいた。そして夜、小屋で薪を切る仕事などをするときにはその屍体を壁に立てかけ、開いていた口にカンテラをぶら下げておいたのだと言う。そのために夫人の顔はひどくゆがんでしまったので、事情を何も知らない牧師は、埋葬のために運ばれてきたその屍体を見ると埋葬するのは嫌だと言い出した。そしてオルツに尋ねる。「どうして彼女の顔はこんなふうになったのですか」("How did her face get that way?")

(196)。初めのうちこそ「知りません」("I don't know") と言っていたオルツだが、やがて前述したような事情を話し出す。牧師は更に尋ねる。

「胸のすくような」言葉が出てくるのはこの後である。

"Why did you do that" asked the priest.

"I don't know" said Olz.

"Did you do that many times?"

"Every time I went to work in the shed at night"

"It was very wrong," said the priest. (196)

「なぜあなたはそんなことをしたのですか」
牧師が尋ねた。

「分かりません」オルツが言った。

「何度もそんなことをしたのですか」

「夜、小屋に仕事をしに行ったときはいつも」「それは本当にまずいことだった」

屍体の口にカンテラをぶら下げるなんて、死者に対するとんでもない冒瀆である、断じて許されるべきことではない、というのが牧師の考えである。宿屋の主人の言葉を借りるなら、とても「信じられないこと」("You wouldn't believe it") (194) であり、そのようなことをするのはまさにけだもの同然、ということになる。「奴はけだものだ」("He's a beast") (193)。

しかし、オルツには宿屋の主人に指摘されているような罪悪感があっただろうか。もしオルツに罪悪感があったら、奥さんの屍体に対してやったことを他人に喋ったりするだろうか。決して喋ったりしないだろう。オルツが一部始終を喋っているのは彼に罪悪感が全くないからであろう。確かにオルツのやったことは客観的に見て「信じられないこと」かもしれない。常軌を逸しているかもしれない。しかし、考えようによってはそんなにひどいことではないのかもしれない。例えば梅原猛によると、「アイヌ、沖縄の信仰では、人が死ぬと魂はその肉体を離れてあの世へ行くことになります。従って屍は、つまり蛇の抜け殻のようなもので、何の価値もありません。古代日本語では「葬る」ことを「ハフル（放る）」と言いますが、それはやはり文字通り、肉体を魂の抜け殻として、山に捨てたことを意味するのであります⁷⁾。オルツがどのような宗教を信じ、どのような思想の持ち主であるかはよく分からないが、山里に住んでおり、しかも農夫である、と考えると、彼は極めて素朴な人物であり、プリミティブな思想の持ち主であると想像できる。とすると、文明に毒さ

れない考え、例えば前に紹介したようなアイヌや沖縄の人のような死生感を持っているかもしれない。アイヌや沖縄の信仰では、屍は蛇の抜け殻のようなものでもはや魂は宿っていない、と考えられ、屍体は山などに捨てたという。オルツにこのような考えがないとは否定できない。はっきりしていることは、彼は自分のやったことに罪悪感を持っていないということである。

ところで、オルツの「夜、小屋に仕事をしに行ったときはいつも（妻の屍体の口にランタンをぶら下げておいた）」という言葉には「胸のすくような」思いがする。オルツは、寺男や宿屋の主人が主張するような“けだもの”のような人間でもなんでもなく、ただ純朴な農夫なのであろう。確かに、妻の屍体にランタンをぶら下げて仕事をするなんてことは異常なことのように思われる。まともな神経ではとてもできないことであろう。ましてやオルツは生前の妻を愛していたようなので。妻を愛していたら、その屍体にランタンをぶら下げるなんてことは絶対にできないだろうと考えた牧師がオルツに尋ねる。「あなたは奥さんを愛していたのですか」("Did you love your wife?")「もちろん愛していました。……とても愛していました」("Ja, I loved her, …I loved her fine") (196)。オルツの言葉に嘘偽りはないであろう。

オルツは間違いなく妻を愛していた。しかも「とても」愛していた。その愛していた妻が亡くなると、その屍体にカンテラをぶら下げる。なぜそんなことができるのだろうか。前に紹介したような、アイヌや沖縄の人のような死生観を持っていたからだろうか。どうもそうではないように思われる。

オルツは極めて現実的な人間なのではないだろうか。言うなれば、理性と感情をはっきりと分け、しかもそれを実行に移すことのできる人間。概して人間というのは、理性と感情をはっきりと分けることができないものである。いや、たとえ分けることができて、それを実行に移すことはできないものである。極めて現実的なオルツからしてそうであるように思われる。オルツは極めて冷めた人間で、感情などもののみごとに打ち捨てることのできる人間であるように思われる。

ところが、である。そんなオルツにしてもやは

りそのことは大変な難儀だったようだ。妻を無事に埋葬できてホッとしたのであろう、妻の埋葬をしてくれた寺男と一緒に、「私」たちが滞在する宿の酒場にやってくる。どうやら一杯引っかけるつもりらしい。しかし、酒場に入ってきたオルツはぼんやりしている。

The girl came in and stood by their table. The peasant did not seem to see her. He sat with his hands on the table. He wore his old army clothes. There were patches on the elbows. "What will it be?" asked the sexton. The peasant did not pay any attention. (191)

（その酒場の）女が入ってきて、彼らのテーブルのそばに立った。その農夫は彼女を見ているようには思われなかった。彼はテーブルに手をおいて座っていた。彼は古ぼけた軍服を着ていた。肘のところには継ぎが当たっていた。「何にするかね」、寺男が尋ねた。農夫は全く耳を傾けていなかった。

妻の思い出に耽っているのか、あるいはようやくの思いで長い間の懸念を果たすことができているのか、心ここにあらず、といった様子なのである。更には、注文したブランデーを飲みながらも、まさに心ここにあらずといった様子で、窓の外をじっと見ている。「彼は窓の外を見ていた。……農夫は窓の外を見ていた」("He looked out of the window. …The peasant looked out of the window") (192)。そしてすぐにその酒場から出て、別の酒場へ行ってしまおう。おそらく一人で感慨に浸りたかったのであろう。

人間はなかなか理性と感情を分けることができないものである。分けることができず、いつまでもぐずぐずと感情に引き摺られているものである。いや、たとえ分けることができて、それを実行に移すことはできないものである。だからこそ私にはオルツのように、たとえ心残りであったとしても理性と感情をはっきりと分け、理性に基づいて行動できる人間が羨ましいのである。従ってオルツの「夜、小屋に仕事をしに行った時はいつも（妻の屍体の口にランタンをぶら下げておいた）」という言葉を聞くと「胸のすくような」思

いに駆られるのである。

ついでのことながら、このようなオルツの姿は、2年後のヘミングウェイの傑作『武器よさらば』（*A Farewell to Arms*, 1927）の最後の場面のフレデリック（Frederic）を思い出させる。

But after I had got them out and shut the door and turned off the light it wasn't any good. It was like saying good-bye to a statue. After a while I went out and left the hospital and walked back to the hotel in the rain.⁸⁾

でも彼女たち（看護婦）を追い出し、ドアを閉め、明かりを消しても、何の役にも立たなかった。まるで彫像に向かってさよならを言っているようなものだった。しばらくしてから私は外に出て、病院を去った。そして雨の中をホテルまで戻った。

最愛の妻を失って、フレデリックは奈落の底に突き落されている。ほんの数時間前まではやさしい言葉を交わしあっていたその最愛の人が、いま目の前に横たわっている。それ故にその人にしがみつき、激しく涙を流したとしても、誰も彼を責めることはできないだろう。いや、むしろそうする方が自然であろう。人間らしいだろう。しかし、フレデリックの姿を見よ！ いま彼はその人を抱きしめることもなく、涙をあふれさせることもなく、その最愛の人を、物であるかのように見ている。「彫像」とはなんと冷たい言葉なのか。では、彼の心は冷血鬼のそれになっているのか。とんでもない、心の中では滝の涙を流している。このことは、間断なく降り続き、彼をびしょりと濡らす雨が象徴する。生命を失った瞬間、それを物と見なす、この割り切り方には驚く。この割り切り方は、フレデリックが心の冷たい冷血鬼だから、というわけではないだろう。もしいつまでも感情に引き摺られていたら、フレデリックに成長はない。彼がこの後更に成長したのは⁹⁾、このように心の底に感情を封印させることができたからであろう。このようなフレデリックの「まるで彫像に向かってさよならを言っているようなものだった」という言葉を聞くと、私は「胸のすくような」思いがする。

ジキルとハイド氏ほどではないにしても、人間は二面性を持つ。外向けの己と内向けの己。これを非難できる人はいないだろう。人はみな、程度の差こそあれ、二重人格者なのだから。ヘミングウェイの作品に登場するコードヒーローと呼ばれる人物には特にこの傾向が強いように思われる。というのは、ヘミングウェイのコードヒーローたちはコード（掟）によって生きているから。つまり、ヘミングウェイの言葉を借用するなら、「重圧の下での品位」を持っているようだから。

The code hero, then, offers up and exemplifies certain principles of honor, courage, and endurance which in a life of tension and pain make a man a man, as we say, and enable him to conduct himself well in the losing battle that is life. He shows, in the author's famous phrase for it, "grace under pressure."¹⁰⁾

それ故、このコードヒーローは、緊張と苦痛の人生に於て、言うなれば、人間を人間たらしめる誇り、勇気、そして忍耐などの行動指針を、そして、人間に勝ち目のない闘い——これが人生なのだが、——の中で立派にふるまわせる行動指針を差し出し、例をもって示す。彼は、この作家の有名な言葉を借りるなら、「重圧の下での品位」を示す。

すなわち、「重圧の下での品位」というのは、内向けの己を封印し、外向けの己で生きようと努めること、ではないのだろうか。例えば、卑近な例で申し訳ないが、最近の日本の若者にはこの「重圧の下での品位」など全くなくなってしまった、と思っている。

通勤電車の中でよく見かけることだが、彼らは電車の中でも平然と飲食をする。飲食するだけならまだしも、その後の片づけもしないで、空缶などを電車内に残したまま立ち去ってしまう。この場合、彼らにとっての「重圧」は「空腹」である。この「空腹」を克服し、必死に我慢して行儀よくしていることが「重圧の下での品位」であろう。あるいは、やむを得ず飲食せざるを得ないとしたら、きちんと後片づけをして行くのが「重圧の下での品位」であろう。

ヘミングウェイの作品にはこのような「重圧の下での品位」を持つ人物が時々登場する。「賭博師と尼とラジオ」("The Gambler, the Nun, and the Radio")のカエターノ(Cayetano)もその一人である、と前述のヘミングウェイのコードヒーローの定義をしたヤングはその直後で語る。「……腹に2発の銃弾を受けたカエターノは、苦しんでいる様子などチラッともしさない」("Cayetano, …who with two bullets in his stomach will not show a single sign of suffering")。ヤングの言う通り、カエターノは辛抱強い。腹に2発の銃弾を受けているにもかかわらず、人前では涙を見せないようにしているのだから。

しかし、ヤングの説を大筋で認めるとしても、私にはカエターノは、氏が主張するほど「重圧の下での品位」を前面に押し出して生きている人物とは思われない。このことは語り手のフレイザー(Frazer)とのやりとりの中に表わされている。

"What about the pain?"

"Not now. For a while I was crazy with it in the belly, I thought the pain alone would kill me." Sister Cacilia was observing them happily.

"She tells me you never made a sound," Mr. Frazer said.

"So many people in the ward," the Mexican said deprecatingly. "What class of pain do you have?"

"Big enough. Clearly not as bad as yours. When the nurse goes out I cry an hour, two hours. It rests me. My nerves are bad now."

"You have the radio. If I had a private room and a radio I would be crying and yelling all night long."

"I doubt it."

"Hombre, si. It's very healthy. But you cannot do it with so many people."⁽¹⁾

「痛みはどうですか」

「今はありません。しばらくは腹のその痛みのために気が狂いそうでした。その痛みが私を殺してしまうのではなからうか、と思いました」シスター・セシリアは二人を楽しそう

に観察していた。

「あなたは声一つ立てなかった、とこの人が言っています」フレイザーが言った。

「あの病室には人がたくさんいましたから」そのメキシコ人がたしなめるように言った。

「あなたのはどの程度の痛みですか」

「大変なものですよ。確かにあなたほどひどくはありませんがね。看護婦が行ってしまうと、1、2時間泣くのです。すると休まります。神経は今はよくありません」

「あなたはラジオをお持ちですね。私に個室があり、ラジオがあったら私だって一晩中泣き叫んでいるでしょうよ」

「まさか」

「人間ですよ。健康にとっても良いのです。でも多くの人がいるところでは泣けないのです」

カエターノは、表向きはまるで鉄仮面のごとく、何の表情も表わさず、腹に受けた2発の銃弾の痛みを耐えているように見えるが、フレイザーとのやりとりから判断するとかなり無理をしている。更に言うなら、やせ我慢をしていると思われる。もちろんやせ我慢をすることが「重圧の下での品位」を保つことであろうが、このようにそのやせ我慢ぶりをべらべらと喋ってしまうと、なんだかその「重圧の下での品位」が安っぽくなってしまいうように思われる。ここはあの『日はまた昇る』(The Sun Also Rises, 1925)のコードヒーロー、ロメロ(Romero)のように無言のままでいてもらいたい。

もっとも私が「胸のすくような」思いを抱くのは、「私に個室があり、ラジオがあったら、私だって一晩中泣き叫んでいるでしょうよ」というカエターノの言葉に対してであるが。鉄仮面の如く、何の表情も表わさず、泣き言一つ言わず、平然と冷静さを装っていた男が、内では実はもがき苦しんでいたと知るとなぜかホッとするのである。

ヘミングウェイの登場人物たちは時々、実に「胸のすくような」言葉を口にする。「胸のすくような」というのは、その言葉に重みがあり、苦渋の決断の末に心の中から搾り出された言葉だからである。そして何よりもその言葉が、その言葉を発した人の存在そのものの、換言するなら、その

人の命そのものと深く結びついているからである。
（この稿続く）

《註》

- 1) Ernest Hemingway, *In Our Time* (New York, Charles Scribner's Sons, 1958)。なお、このテキストからのこれ以降の引用は全てこのように括弧を設け、その中にページ数を記す。
- 2) Ernest Hemingway, *A Farewell to Arms* (New York, Charles Scribner's Sons, 1969) P. 185
- 3) 嶋 忠正、『ヘミングウェイの世界』（東京、北星堂書店、1975）P. 165
- 4) Philip Young, *Ernest Hemingway* (Tokyo, Kenkyusha, 1961) P. 3
- 5) Ernest Hemingway, *Men without Women* (New York, Charles Scribner's Sons, 1955) なお、このテキストからのこれ以降の引用は全てこのように括弧を設け、

その中にページ数を記す。

- 6) Philip Young, *Ernest Hemingway* (Tokyo, Kenkyusha, 1961) P. 3
- 7) 梅原 猛、「日本人のあの世観」（東京、中央公論社、1989）PP. 13-14
- 8) Ernest Hemingway, *A Farewell to Arms* (New York, Charles Scribner's Sons, 1969) P. 332
- 9) このことについては、拙書『「武器よさらば」の23の謎を追う』（蒼洋出版、1997）の22、23章参照。
- 10) Philip Young, *Ernest Hemingway* (Tokyo, Kenkyusha, 1961) P. 8
- 11) Ernest Hemingway, *The Short Happy Life of Francis Macomber and Other Stories* (Victoria, Penguin Books, 1936) PP. 174-175

（平成15年 8 月29日 受理）

認知文法と教育文法の接点：二重目的語構文を中心に

相 澤 俊 行*

The Interface of Cognitive Grammar and Pedagogical Grammar : Focus on "the Ditransitive Construction"

Toshiyuki AIZAWA

The place of grammar in foreign and second language teaching and learning has long been a critically debated issue in applied linguistics. In this paper it is argued that construction grammar can greatly contribute to pedagogical grammar, focusing on the ditransitive construction. The notion *construction* has a time-honored place in linguistics, especially among traditional grammarians. However, Goldberg (1995) argues that particular semantic structures together with their associated formal expression must be recognized as constructions independent of the lexical items which instantiate them. This paper aims to convince more practitioners of the importance and the potential of construction grammar. It is concluded that the development of new materials based on cognitive grammar will be necessary. They may help to meet the professional demands of English language teachers.

(keywords : construction grammar, ditransitive construction, pedagogical grammar)

はじめに

本論文は、文法に関する認知的アプローチのひとつである構文理論(construction grammar)¹の可能性に注目し、二重目的語構文の扱いに焦点を当て、語彙意味論と構文理論の折衷的アプローチによる教育文法の可能性を検討するものである。

「感動シカゴした先週を見て。」(moved, Chicago, week, seeing, last, I, by, was.) 一体何のことなのか意味が分からない。これはまともな日本語/英語ではない、と日本語母語話者/英語母語話者は瞬時に判断できる。しかし、なぜこれはまともな日本語ではないと判断でき、さらに少し時間をかければそれをまともな日本語/英語である「先週シカゴを見て感動した」(I was moved by seeing Chicago last week.)と直せるのだろうか。

これは極めて大きな問題であり、解明すべきこ

とが多くある。しかし、それが生得的「言語能力 (linguistic competence)」(Chomsky, 1965)であれなんであれ、一つだけ確かなことがある。まともな日本語/英語であるためには、当然それなりの規則 (rule)が守られていなければならない。母語話者はその規則を身につけているから、瞬時にまともな文かそうでないかを判断でき、さらに修正することもできる。

少し言語学 (科学的) 文法に傾くが、「ことばの背後に隠されている意味を生成する統語的装置」を、文法とひとまず呼ぶことにしよう。今この文法の捉え方に認知言語学から二つのアプローチが提案されている。一つは、語彙論(lexicology)ないしは語彙意味論(lexical semantics)と呼ばれる、語彙項目こそが統語的装置の重要で多大な情報を提供していると考えられるアプローチである。Rosch(1973)の「プロトタイプ理論」、田中茂範(1989)が提案す

る「コア」「ネットワーク理論」で代表されよう²。もう一つのアプローチは、Goldberg (1995)に代表される、「構文そのものが文中の単語の意味からは独立して意味を持つと考える(Goldberg, 1995, p.1)」立場である³。すなわち、「個々の動詞とは独立して存在」(Goldberg, 1995, p.1)し「特定の意味構造と、それに結合する形式とを併せたものが「構文」である、とする立場である。

筆者は英語教育の実践家の立場から、日本人英語学習者の英語能力向上に効果のある教育文法の体系化を目指したいと考える。そのためには理論文法としての構文理論と臨床としての教育文法の橋渡しが必要となる。語彙意味論と構文理論は相互補完的に英語学習者に寄与できると思われる。すなわち、学習英文法の体系化とその教育的意義においては、理論的に折衷的(eclectic)であることを厭わない、というのが筆者の立場である。

以下では、二重目的語構文を語彙意味論と構文理論のアプローチから比較検討し、そこからさらに文法とコミュニケーションの非階層性に言及する。最後に、教育文法への応用可能性を論ずる。

1. 動詞による意味の生成と構文理論

英語学習において動詞が重要視されるのは、そもそも言語が線形的に展開するからである。つまり、語はその話線の方角に従って前後に配置される故に、語順(word order)に規則性が生ずることになる。その時情報の流れを支配し、意味を決定しているのが動詞である。ヴァレンツ(結合価)文法(valency grammar)では、動詞がいくつの補足成分(Valenz/valence)を取り得るかによって、0 価動詞(例えば rain), 1 価動詞(例えば, die), 2 価動詞(例えば read), 3 価動詞(例えば, give)といった分類がなされる。

「項構造(argument structure)」(Fillmore, 1968 Goldberg, 1995)も動詞の振る舞いに着目する。動詞とそれに関係を持つ1つまたは2つ以上の名詞(句)や各種代名詞の関係を表すのが「項(argument)」である。例えば、

1 項構造: Milly jogs.

2 項構造: Lloyd drank the beer.

Andrew lives in Richmond.

3 項構造: Len gave me a book.

Rhonda put the vase on the table.

(from Celce-Murcia & Larsen-Freeman, 1999, p.40)

3 価動詞であれ、3 項構造であれ、意味の生成の中心で支配的役割を演じているのは、動詞という語(lexis)であると考えている点では共通である。ところが、Goldberg(1995)は下位クラスとして「項構造構文(argument structure constructions)」が存在するとしながらも、構文そのものが動詞の意味からは独立して意味を生成すると考えるのである。彼女が提案する項構造構文は以下の5つである。

1. 二重目的語構文 (Ditransitive)

a. Syntax: Subj V Obj Obj₂

b. Semantics: X CAUSES Y to RECEIVE Z

Pat faxed Bill the letter.

(パットはビルにその手紙をファックスで送った。)

2. 移動使役構文(Caused Motion)

a. Syntax: Subj V Obj Obl (Obl 前置詞句)

b Semantics: X CAUSES Y to MOVE Z

Pat sneezed the napkin off the table.

(パットはくしゃみをしてナプキンをテーブルから吹き飛ばした)

3. 結果構文(Resultative)

a. Syntax: Subj V Obj Xcomp

b Semantics: X CAUSES Y to BECOME Z

She kissed him unconscious.

(彼女は彼にキスをして意識を失わせた)

4. 自動詞移動構文(Intrans. Motion)

a. Syntax: Subj V Obl

b. Semantics: X MOVES Y

The fly buzzed into the room.

(そのハエはぶんぶん音を立てて部屋へ入ってきた)

5. 動能構文(Conative)

a. Syntax: Subj V Obl_{at}

b. Semantics: X DIRECTS ACTION at Y

Sam kicked at Bill.

(サムはビルに蹴りかかった)

従って、同じ動詞が異なる構文に用いられた時意味の差が生じる原因は、語彙意味論のように動詞の多義性に由来するのではなく、特定の構文の側に直接見出せる事になる。これは、いわば短文における意味の生成理解のコペルニクスの転回(a Copernican revolution)である。さらに、言語獲得・習得の過程で行われる、言語・文化情報を理解あるいは記憶するためにそれぞれの語や概念をいくつかの意味ある固まりに分類する、学習ストラテジー(方略)としてのチャンキング(chunking)を想起するならば、この構文理論は優れてチャンキングと言える。従って、この構文理論が持つ英語動詞知識の学習方略としての有効性がここで指摘されるべきであろう。

次に、二重目的語構文に焦点を当てて、構文と意味の生成の実態を教育文法と関連させながら、見てみることにしよう。

2. 二重目的語構文

- (1) May gave the dog a cookie.
- (2) May gave a cookie to the dog.

(1)と(2)の文は相互に言い換えることができるとし、意味もほぼ同義であるとされ、高校段階では書き換え問題によく出題されている。しかし、仮に全く同じ意味なら、異なる形式で表現される必要があるのだろうか。それは、言語の経済性にも反するのではないか。もし、認知言語学が主張するように形が異なれば意味も異なるとすれば、どのような意味の使い分けをしているのだろうか。これは実際のコミュニケーションの場面でも、重要な知識だと考えられる。では、それらの疑問に対する下の3つのアプローチをそれぞれ検討してみることにする。

2.1 伝統的学習文法アプローチ

(1)と(2)は言い換え可能であることは自明として、その理由については記述しない。否むしろ、第4文型から第3文型に変るとし、動詞によってto, for, ofの前置詞を伴うと示して終わりとする(塩澤, 1993 等)。しかし、恐らく以下のような規則が一応考えられる。

[V NP_y NP_x] ⇔ [V NP_x to NP_y]
 (gave the dog a cookie) (gave a cookie to the dog)
 しかし、このような形式的同義性の可能性は実際には妥当しない例があることで、速やかにその正当性は失われることになる。例えば、

- (3) a. *I explained Mary the problem.
 b. I explained the problem to Mary.
- (4) a. *The book cost me \$10.
 b. The book cost \$10 to me.

(3)と同様な振る舞いをする動詞としては、donate, announce, recommend, reveal, confess, introduce, narrate, describe, transmit, refuse, deny 等がある。(4)に関しては、bill, (over)charge 等がある。一般的には、ラテン語由来の動詞に(3)のような振る舞いが多いとされるが、形式、意味の違いを語彙に還元したのでは、そもそも文型を仮定することの意義が著しく損なわれることになる。さらに言えば、それは外国語学習者にとっては生産性を高めるよりむしろ阻害する知識ともなりかねない。なぜなら、初学者に対して、なんの標識もない英語動詞をアングロサクソン由来のものとフランス語由来の動詞に識別することを求めることになるのだから。いずれにせよ、伝統文法の5文型に依拠する説明では、学習者は実際の意味の違いも、その理由も知らされないまま、ただ機械的に二つの文は同義だとして暗記する事を求められることになる。これでは、生成的ないしは創的文法力養成にはつながらないのは明らかだ。即ち、伝統的文法は「二重目的語構文」の本質を何も伝えていないのである。では、次に語彙に文法を見出すアプローチではどうであろうか。

2.2 語彙意味論アプローチ

認知意味論の知見を多く取り入れて編集されている『Eゲイト英和辞典』(田中茂範編)の記述を中心に参照しながら考えることにしよう。giveの中核的意味は、「自分のところから何かを出す」(田中, 1994, p.693) だとし、(1)と(2)は意味は完全に同義ではないものの、相互に言い換えられるとする。(1)は「犬に与えた」のだという事実がまず述べられ、メイが犬の近くににいるというイメージが可能であり、クッキーは実際に犬に与えられた様子ま

で想像できる, とする。一方, (2)の方は「メイがクッキーをやった」ということが強調されていて, クッキーを犬が食べなかった可能性も考えられる, とする。このような意味の違いが生ずる理由としては, 「give の直後に何を持ってくるかによって生じている」としている。

さらに「強調」概念を用いて, 動詞に近い位置に来る語が「強調されていて, このことが意味の違いにつながっている。」と説明する。

しかし, この説明は良く知られている end focus あるいは end weight の原則, つまり「英語話者は新情報を句の最後に置く」という原則に (Celce-Murcia & Larsen-Freeman, 1999, p.24, Larsen-Freeman, 2003, p. 57)当てはめると, 矛盾する事になる。まさに, 旧情報を動詞の近くに置き, 「強調」されるべき「新情報」が句の最後の位置にある以上, 「動詞に近い語が強調される」と主張するのは end-focus の原則に矛盾する。

本来このような議論では循環論に陥る。つまり, 動詞 give は give BA と語句を置くから α の意味が生じ, give A to B と置くから β の意味が生じると主張しているのである。しかしこれは同時に, α の意味を持つためには give BA と並べ, β の意味を持つためには give A to B と並べるのだ, と議論する事になり, ここで循環性(circular argument)が生じる。即ち, なぜ give BA とすれば give A to B と意味が異なるのかの必要十分な説明にはなっていないのである。

さらに言えば, (1) が代名詞になって We sent him a cookie.のような例では最早この論理は妥当性を持たない。なぜなら, 動詞近くにある旧情報である him は聞き手(読み手)に取って強調される根拠はなく, 必然的に動詞から遠い位置にある a cookieこそが聞き手(読み手)にとって新情報であるために強調されることになり, 動詞に近い語が「強調されていて, このことが意味の違いにつながる」とする『Eゲイト英和辞典』の論理は破綻する。

いずれにせよ, 動詞が形(syntax)も意味(meaning)も決定するとする語彙論(lexis), 認知意味論(cognitive semantics)の限界がここに見られる。そうすると, 形が異なれば, 異なる構文として考える認知文法の考え方をしてみる必要性が出てくる。ではそれを次に見てみよう。

2.3 構文理論アプローチ

Goldberg(1995)では, 「個々の語彙項目が多大な情報を供給していることは疑う余地のないこと。There is no question that a large amount of information is contributed by individual lexical items.」(p.1)だとした上で, 「しかし, 完全に語彙のみに依存するボトムアップ方式では英語のデータの全てを説明できない。However, in this work it is argued that an entirely lexically-based, or bottom-up, approach fails to account for the full range of English data.」(p.1)と主張する。それに代わるものとして, 彼女は「構文」を提案する。無論このような概念は彼女の独創ではなく, Fillmore, Kay らが提唱し発展させてきたものだ (Fillmore, Kay and O'Connor 1988, Fillmore 1988, Kay 1997)。

「構文(construction)」とは, 特定の形式には特定の意味が対応するのであって, 言語における基本単位のことである。従って, (2) の様な前置詞付き与格構文(dative construction)は(1)の様な二重目的語構文(double-object construction)とは統語構造(形式)が異なることから, 当然異なる意味を持つものとされる。いわば, 「文法形式の非同義性の原理 the Principle of No Synonymy of Grammatical Forms」(Goldberg, p. 3)を作業仮説としている。

構文理論に依れば, (1) は二重目的語構文であり, 「英語の二重目的語構文の中心的意味は, 意思性を持つ動作主から自発的な受容者への移送の成立。In this chapter the central sense of the ditransitive construction has been argued to be associated with a highly specific semantic structure, that of successful transfer between a volitional agent and a willing recipient (Goldberg, p. 151)」である。即ち,

- a. Syntax: [Subj [V Obj Obj2]]
- b. Semantics: X CAUSES Y to RECEIVE Z

である。従って, (1) においては犬はクッキーを受け取った事になる。

他方, (2) は「移動使役構文(caused-motion construction)」であり, 使役者(causer)項が直接主題(theme)に働きかけて, 前置詞による方向表現で示される経路に沿って移動する, というものである。即ち,

- a Syntax: [Subj [V Obj OBL]] OBL(前置詞句)
 b Semantics: X CAUSES Y to MOVE(to/from) Z

である。

従って、クッキーは犬に向かって移動したことは間違いでないが、犬が実際クッキーを受け取ったかどうかをこの構文では意味する事ができない。このような意味の違いはgiveという動詞に由来するのではなく、あくまで構文に由来するのである。そのことをさらによく示す例として(5)を示そう。

- (5) * Bill told Mary a story, but she wasn't listening.

(5)では、第一目的語が「自発的な」受容者項ではないので意味的に成り立たないということになる。あえて言うならば、このような洞察は伝統文法アプローチからは得られない。

従って、この構文理論の考え方に依れば、認知意味論の循環議論が回避され、文の意味を動詞の多義性に由来させる必要が無く、意味論の経済性は極めて高いと考えられる。このことは英語学習者にとっての学習負荷の軽減につながる可能性を持つと思われる。

最後に、構文と意味の密接な関係を調べた興味ある実験を最後に紹介する。

- (6) * She topamased him something.

Goldberg(1995)は、無意味語であるtopamasedが(6)の文でどのような意味を持つかを英語母語話者に尋ねた。すると、10人の言語学に無関係の被験者のうち優に6人がtopamasedがgiveの意味であると答えた。この実験結果から、話者が二重目的語構文と意味の関係を意識している事が確かめられるのである(p.35-36)。

3. 文法とコミュニケーションのインターフェイス

文法はひとつの静止した状態(a state)であるのに対して、コミュニケーションは動きを伴った過程(a process)と捉えられることが多いが、実際は両者ともに静的であると同時に動的特徴を持つもの

である(Cf. Larsen-Freeman's *Grammaring*, 2003)。文法に規則があるように、コミュニケーションにも慣用がある。本論の最初にも指摘したように、成人母語話者であれば誰でも何が文法的で、どの言い回しが適切であるかを心得ている。言い換えると、文法にもコミュニケーションにも宣言的知識(declarative knowledge)があることになる。我々が話し、書き、読み、聞く時、このような宣言的文法知識にアクセスし、正確で意味を持った理解と表出が行われる。従って、よりコミュニケーションを指向した文法力を考えると、先のより言語学(科学的)文法観に傾いた「ことばの背後に隠されている意味を生成する統語的装置」を変更する必要があると考えられる。

Widdowson(1990, p.157)に拠れば、言語学習は2つの側面を持つ：知識を得ることと、その知識を使って何かができることの二つである“Language learning has two sides to it: knowing and doing (competence and performance)”。実際、文法とコミュニケーションは相互にお互いを形作る。発話時の原初的意図(ソシユールの言う motivation に近い)あるいは表現衝動が生まれるのも、表出形式の選択も、創出もすべてどちらが前で後だとも区別化はない。話す場合も書く場合も最初に最終的な完成した文を頭に浮かべて表出が始まるわけでもない。処理過程は単線的ではなく、出発点はあっても、終着点は見えないのが現実のコミュニケーションだ。話者はまず語彙を選択し、それから統語規則に則ってそれらを正しい順序に並べ、それを音声化し、さらに適切なプロソディも施しながら調音する、という文節化したプロセスではない。語彙に含まれる文法(lexico-grammar)に加えて、項構造構文による制限とも相互に関りあいながら、さらに伝えるべき情報そのものとも相互作用を及ぼしながら、脈絡に適した最終的意味を生成しているのが実態である。従って、それらを踏まえた新たな文法の定義は、Diane Larsen-Freeman(2003)に倣って「言語の定型形式に関する動的言語処理の一つであり、それは人間によって文脈に適切なやり方で意味生成を行うために使われる能力だ grammar(ing) is one of the dynamic linguistic processes of pattern formation in language, which can be used by humans for making meaning in context-appropriate ways.」(p. 142)としよう。言い

換えれば、ここに至って文法とコミュニケーションは非階層的(nonhierarchical)関係と捉えられるべきことになる。

3.1 L1 フィルターの問題と構文理論

母語獲得の過程を内省してみれば、新しく未知な単語はもとより、それまでに遭遇したことのない新しい型の文に遭遇することが最早ない、といった程度までに、十全な言語サンプルが乳幼児期の日常場面で与えられているとは到底考えにくい。ところが、幼時は3歳程度で十全な文法能力を獲得している (Pinker, 1989)。そうであれば、観察とカテゴリー化という認知に基づきながらも、限定された範囲の文法(統語規則)を吟味していると考えられる、とするのが認知言語学の立場だ。つまり、不十分な言語材料からでも導き出され得る限定された小数の構文を想定するのが、最も合理的である。その意味で語彙意味論よりむしろ、構文理論のアプローチの方が L1 文法獲得の実態に近いと思われる。

しかし、外国語である英文法学習の場合はそれだけで十分とはいえない。なぜならば、英語母語話者である Goldberg 等が当然視している各動詞の「コア」の意味が、日本人英語学習者には知識として学習されなければならないからだ。

さらに、L2 学習者は白紙の状態から英語を学習するわけではない。「学習は既存の知識を活用して行われる」ことから、母語(L1)である日本語の影響を免れることは、原理的にできない。即ち、英語のインテイクは L1 フィルター(first language filter:L1 filter)を通して処理されることになる。例えば、take という動詞を学習することを考えてみよう。仮に『ジーニアス英和大辞典』に挙げられている46個の take の用例のある期間内で学習者に提示したとする。それぞれの用例に L1 の対応語を与えても、L1 フィルターの問題は解消されないままに対応語のリストが長くなるだけである。英語の方は take 一語であるのに、多数の語義を与えられた日本人英語学習者は当惑するだけである。この L1 フィルターの問題を最小限にするのが、認知意味論から得られる。即ち、take の持つ「コア」である「自分のところに取り込む(田中, 1994)」を捉えさせることで学習者に認知上の負荷を減らすことができるのである。

従がって、外国語としての教育文法を考えたとき、「コア理論」「プロトタイプ理論」「ネットワーク理論」等の語彙意味論からの意味生成に基軸を置きながら、単文レベルでの構文からの意味生成をも視野に入れた構文理論との折衷的アプローチこそが最も教育的(学習上)意義があると考えられる。

3.2 コミュニケーション能力における構文理論の妥当性

生成文法的に言えば、文法は私達誰もが持っている言語能力で、「ことばの背後に隠されている意味を生成する統語的装置」である。重要なのはこの能力は言語獲得の過程を通して母語話者にはほとんど意識される事無く獲得される事実である。この点が他の知識獲得と根本的に異なる点であり、Chomsky のように言語獲得専用の特別なメカニズム(LAD)が脳内に存在することを仮説するのもそのためである。しかし、構文理論を提案する Goldberg は、「言語の知識は広義の知識に含まれる knowledge of language is knowledge.」(p.5)という公理を採用している。構文理論は、藤井聖子(2001)も「人間の言語能力は、認知能力の一部として捉えられるべきものであり、言語に特殊化された特徴はあるにせよ、一般的認知力と切り離された自立的な言語能力の存在を前提にして言語能力を解明することはできない(p.14)」としている。

また、外国語学習においては文法能力を意識化した状態の知識から、母語同様に無意識化した知識にまで自動化が深まるか否かこそが問題となる。なぜなら、コミュニケーションの場においては情報の伝達こそが第1義的に重要であり、統語法たる文法に思考資源の多くを費やす余裕はないからである。言い換えると、文法の観察できる対象としての文は既に完了した記録でしかなく、その文を生成するコミュニケーションの渦中はいくまでも局所的であり、進行中の行為そのものの理論が必要なのである。その点、構文理論のわずか5種類の構文は、学習者が意識化すべき形式が少なく、自動化(automaticity)された知識への転化が容易である利点がある。さらに、5種類という少数の「構文」によってほぼ無限に近い短文が生産できる極めて生産性の高いこの「構文理論」を学習することで、自らが文を創造する能力開発に貢献する可

能性がある。

さらに、私達は言語獲得の過程において、全ての言語用法に遭遇することなしに子どもが文法能力を獲得する事実や、否定証拠の欠如(*poverty of the stimulus/negative evidence*)の事実を知っている。このことを合理的に説明する理論としても、少数の構文が動詞の語彙意味論と相まって文の意味生成を決定している、とする構文理論は妥当性を有している可能性が高いと思われる。

以上から、実際のコミュニケーションの場で有効性のある教育文法への応用可能性を、この構文理論は持っていると考えられるのである。

まとめ

新しい教育英文法の展開に構文理論が強力な貢献をする可能性があることが、チャンキングを基に「語彙知識と統語的構文知識は連続性を持っている」ことと文法とコミュニケーションとの非階層的関係性から指摘できた。今後求められるべきは、この理論的アプローチを実際の教材にいか反映させるかであろう。その意味で、新たな教育文法生成には CALL(Computer-Assisted Language Learning: コンピューター援用外国語学習)を含めた新たな教材論の展開が必要となろう。

注

1. construction grammar の訳語については、大堀(2001)に従い「構文理論」を採用することにした。
2. 動詞の統語的な下位範疇フレームが、動詞の語彙的意味から予測可能ではないかとし、語彙意味論的研究を行ってきた研究者は、他に Levin (1985), Levin & Papoport (1988), Pinker (1989)らがいる。
3. 構文理論(Construction Grammar)は必ずしも厳格に規定された文法理論ではない。基本的考え方は、意味と形式の対応物である「構文」の条件のもと、語用論的な情報や文脈を考慮に入れて構文の成立を定式化し、周辺の現象も射程に含めて言語構造全体を明らかにしようというものである。代表的研究者には Fillmore (1988), Kay (1997)がいる。

(平成15年9月29日 受理)

参考文献

- Celce-Murcai, M. & Larsen-Freeman, D. (1999) *The Grammar Book*. 2nd ed MA.: Heinle & Heinle.
- Chomsky, N. (1965) *Aspects of the Theory of Syntax*. Cambridge, Mass.: MIT Press.
- Fillmore, C. J. (1968) "Lexical Entries for Verbs." *Foundations of Language*, 4, pp.373-393.
- Fillmore, C. J. 1988. "The mechanisms of 'Construction Grammar'." *BLS* 14, pp.35-55.
- Fillmore, Charles J., Paul Kay, and Catherine O'Commor. (1988) "Regularity and Idiomaticity in Grammatical Constructions: The Case of Let Alone." *Language* 64, pp. 501-538.
- 藤井聖子 (2001) 「構文理論と言語習得」『英語青年』12月号. pp.12-16.
- Goldberg, Adele E. (1995) *A Construction Grammar Approach to Argument Structure*. Chicago: The University of Chicago Press.
- Kay, P. (1997) *Words and the Grammar of Context*. CSLI Publications
- 小池生夫 (2003)『応用言語学事典』. 東京：研究社
- 小西友七, 南出康世編. (2001) 『ジーニアス英和大辞典』. 東京：大修館書店.
- Larsen-Freeman, D. (2003) *Teaching Language: From Grammar to Grammaticing*. Boston: Thomson/Heinle.
- Levin, B. (1985) "Lexical Semantics in Review: An Introduction." In B. Levin, ed. *Lexical Semantics in Review: Lexicon Project Working Papers* 1. Cambridge, Mass.: MIT Center for Cognitive Science.
- Levin, B. and T. Rapoport. (1988) "Lexical Subordination." *CLS* 24, Part 1, pp.275-289.
- 大堀俊夫 (2001) 「構文理論—その背景と広がり」『英語青年』12月号 pp.2-6.
- Pinker, S. (1989) *Learnability and Cognition.: The Acquisition of Argument Structure*. Cambridge, Mass.: MIT Press.
- Rosh, E. (1973) "On the Internal Structure of Perceptual and Semantic Categories." In T. Moor (ed.) *Cognitive Development and the Acquisition of Language*. Academic Press.

塩澤利雄. (1993) *Forward English Grammar*.

東京：桐原書店

Tamasello, M. (2003) *Constructing a Language*.

Cambridge, Mass. And London: Harvard University Press.

田中茂範, 武田修一, 川出才紀編 (1994) 『E

ゲイト英和辞典』東京：ベネッセ

Widdowson, Henry G (1990) *Aspects of Language*

Teaching.. Oxford: Oxford University Press.

東京高専学生のキャンパスライフと意識

古屋正俊*, 大澤 昇**, 小杉暁子**, 白崎由香里**, 根本葉子***

On the Campus life and Consciousness of the Students of Tokyo National College of Technology

Masatoshi FURUYA, Noboru OSAWA, Akiko KOSUGI, Yukari SHIRASAKI, Youko NEMOTO

The purpose of this paper is to examine the future student support plan of this college on the basis of the data of "the questionnaire regarding campus life". We carried out this survey in accordance with the middle period goal of the counseling room. Middle period goal is as follows : 1) The improvement of counseling, 2) The improvement of study consultation, course consultation and employment consultation, 3) The improvement of the mental health of the student and the teaching staffs, 4) The improvement of the consultation of the teaching staffs, 5) The improvement of the research and the public relations, 6) The improvement of the quality of campus life.

(keywords : Tokyo National College of Technology, Campus life, Consciousness)

1、研究の目的

少子化、グローバル化、技術革新の進展といった社会構造の変化にともない、初等中等教育、高等教育を通じ、教育会全体の構造改革が大きく進んでいる。国立高等専門学校においても、平成 16 年 4 月には独立法人化され、制度的に一つの法人機構として、新たなスタートを切ることになった。

文部科学省は、法人化の意義は「国立高専の裁量の拡大」と、それによる「個性化・活性化・教育研究の高度化の一層の推進」にあるという。¹⁾ 法人化により競争的な環境が醸成され、厳しい競争と淘汰の論理の中で、国立高専においても「生き残り」を模索する時代に入ったといえる。

法人化を目前に控え、東京高専でも様々な改革案が検討されている。^{2) 3) 4)} この変革期を迎え、東京高専はこれからどのような「学生を育て」、「個性が輝く活気のある学校づくり」を目指し、「創造性豊かな実践的技術者の育成」といった社会的な期待に、どのように応えようとするのか。

法人化により、一番変化するのが教育サービスだといわれている。⁵⁾ 既に「顧客重視」の改革に取り組み、自主性を一層発揮し、個性化・活性化を推進している大学もある。^{6) 7) 8)} 高専でも個性化、活性化、教育研究の高度化を課題とし、顧客（学生、地域、近隣企業）重視の視点からの具体的な取り組みが求められている。^{9) 10)}

このような現状認識に立ち、本校の学生相談室

では、学生支援体制の一層の充実を目指し、以下の中期計画を掲げている。①カウンセリングの充実、②学習・進路・就職相談の充実、③学生・教職員のメンタルヘルスの充実、④コンサルテーションの充実、⑤調査研究・広報活動の充実、⑥キャンパスライフの質の向上。

本校の学生支援策を積極的に展開し、教育サービスの質の向上を目指す上で、学生の現状把握は不可欠である。そこで学生相談室としては、中期計画に示す「調査研究」の具体的な取り組みとして、平成 14 年度に、東京高専の全学生（1 年から 5 年生）を対象とした「高専生活に関するアンケート」を実施した。

本研究の目的は、「高専生活に関するアンケート」の分析結果を基に、東京高専における学生支援の課題を明らかにし、今後の学生支援策を検討する基礎資料を得ることである。

2、調査について

調査項目：高専生活に関する質問（71 項目）

調査方法：質問紙を各クラスに配布し、一斉調査

調査時期：平成 14 年 12 月

調査対象：平成 14 年度在籍学生（1,026 名）

回収率：84.9%

3、高専生の日常生活

図1の睡眠時間では、高学年になるに従い減少傾向がみられ、4、5年生では約5割の学生が6時間未満の睡眠時間となっている。

図2の勉強時間（授業以外の1日の勉強時間）では、各学年とも「ほとんど勉強をしない」が過半数を超え、高学年になるほど不勉強の傾向は強まっている。パソコンの利用時間（図4）や読書量（図6）は4、5年生で急増しており、不勉強の傾向は、生活時間配分との関係も考えられる。

一日の生活時間で机に向かう時間はあっても、それが「勉強時間」には切り替わっていない様である。全体としては、極度の不勉強の傾向は確かであり、基本的な学習習慣をどの様に身に付けさせるか、学校改革の根幹に関わる大きな課題である。

図1、睡眠時間(%)

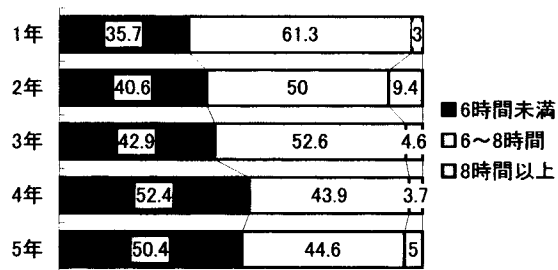


図2、勉強時間(%)

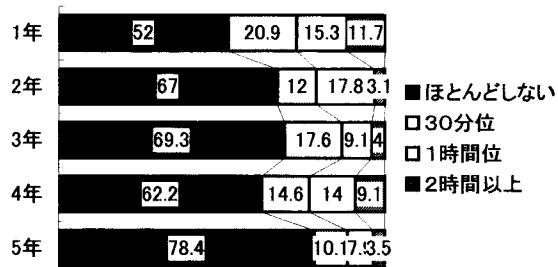


図3のテレビ視聴時間は、高学年で若干減る傾向はみられるが、各学年とも約6割の学生が1日1時間以上テレビを見ており、1、2年生では4割強の学生が2時間以上テレビを見ている。

図4のパソコン利用時間では、高学年になるほど利用時間が急増し、1日に3時間以上もパソコンに向う学生が5年生では5割近くとなっている。

図5のパソコンの利用目的では、インターネット利用が8割を超え、次いでゲーム利用となっており、勉強や専門性に関わる活用は低調である。

図3、テレビ視聴時間(%)

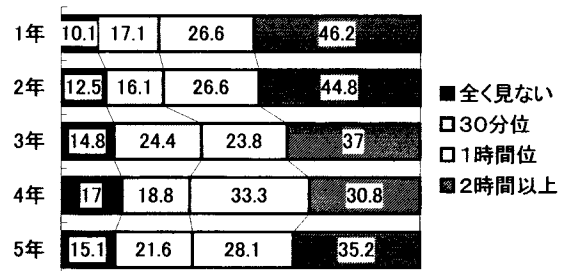


図4、パソコン利用時間(%)

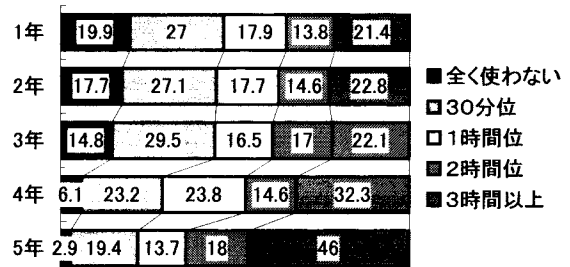


図5、パソコンの利用目的(複数回答・%)

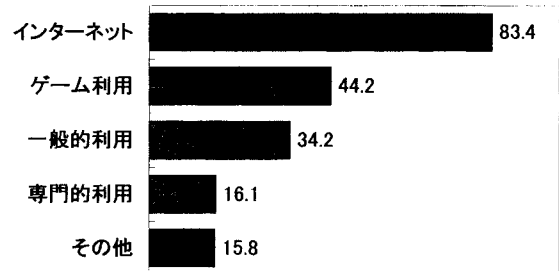


図6の読書量（まんが以外の書籍）では、低学年で「ほとんど読まない」学生が約2割いる。しかし、高学年では若干読書量が増える傾向にあり、4、5年生では約5割の学生が定期的な読書習慣を身につけているようである。また、勉強時間との相関も有り、勉強時間の長い学生ほど読書量も増える傾向が見られた。

図6、読書量(%)

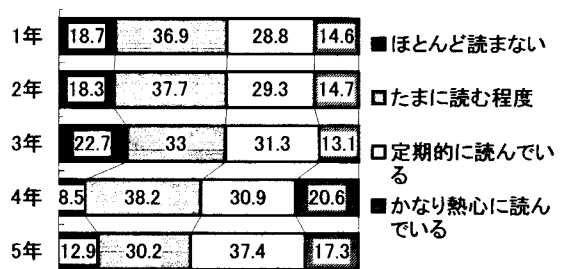


図7の携帯電話については、約9割近くの学生が保有しており、その主な利用目的は「用件等の連絡」であり、「友達関係の改善」「おしゃべり」等の副次的な利用目的は2割程度であった。

図7. 携帯電話の保有と利用目的(複数回答・%)

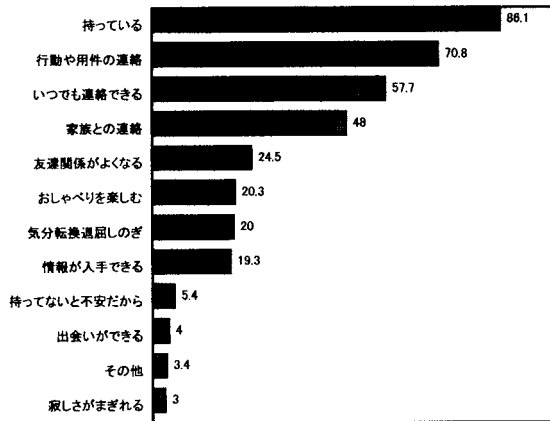


図8. 情報源(複数回答・%)

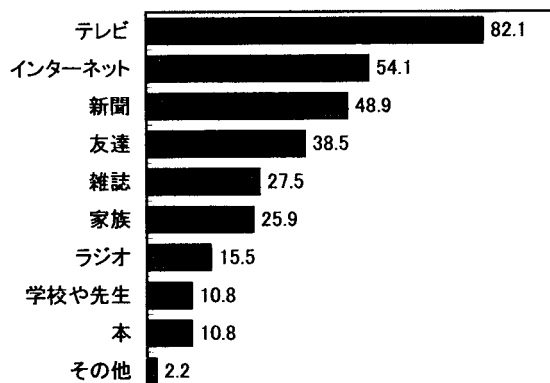


図9. 誰からの影響が最も大きいですか(複数回答・%)

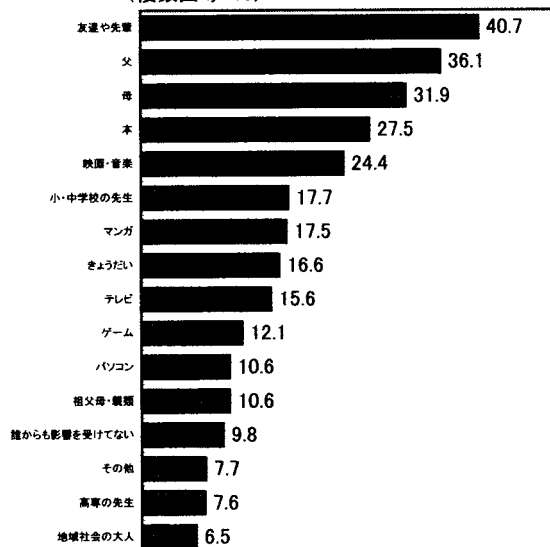


図8は、世の中の動きや出来事を知るための、情報源についての回答結果である。主な情報源はテレビが約8割、次いでインターネット、新聞の順になっている。

図9は、自分の考え方や生き方に強く影響を与えた人や物についての回答結果である。最も影響力のあったのが「友達や先輩」で、次いで「父」「母」であった。「小・中学校の先生」の影響が上位にあるのに対して、「高専の先生」の影響はかなり低い結果となっている。

4. 高専生の「興味や関心」と「悩み」について

表1は、15項目について高専生の興味・関心の程度を学年別に集計したものである。表では「かなり関心ある」「やや関心ある」の合計のパーセントを表示した。

全体としては、「仲間に関して」が最も関心が高く、次いで「音楽や映画」「異性に関して」であった。「教養アップや資格取得」「語学力の向上」等も、「スポーツ」と同程度の関心事となっており、「ファミコン」「バイク」よりも高い関心を示している。

高専関係の項目は、今回調査した興味や関心事の下位に全てランクされ、「高専の授業」に5割の関心を示しているが、「学生会活動」への関心は最低となっている。

学年間の比較では、高学年ほど「異性」や「スポーツ」や「政治・経済」への関心が高まる傾向にある。しかし、高専関係の項目に関しては、「学生会活動」を除いて、高学年になるほど関心の低下が見られ、特に「高専の授業」と「ロボコン」に関しては、1年生に比べて関心の低下が顕著である。

図10は、高専生活で悩んだり困ったりした経験についての回答である。「よくある」「たまにある」の合計を「ある」としてパーセント表示した。2年生で悩みが若干減る傾向も見られるが、各学年とも約7割の学生が、高専生活で悩んだり困った経験を持っていることが分かった。

表2は、高専生活で気がかりな事や悩み事の内容を、学年別に比較したものである。表では悩みが「かなりある」「ややある」の合計のパーセントを表示した。

今回の調査結果では、「授業や成績関係」が、各

学年とも、高専生活の悩みや不安項目のトップとなっている。全体的には、学年進行とともに悩みや不安感が高まる傾向にあり、3、4 年生でピークを迎える不安項目が多い。

「金銭や生活面」「進学」「性格・精神面」は3 年生で、「就職」「進路変更」は4 年生で最も不安感が高まっている。各項目ともに5 年生になると悩みや不安感が急減するのは、この調査が、5 年生

の就職や進学がほぼ内定し、卒論の見通しもついた 12 月に実施されたためと考えられる。¹¹⁾

この結果を踏まえ、学生相談室としても従来の個別カウンセリングと並行して、3、4 年生を対象とした不安要因軽減のための予防的なカウンセリング等の、新たな学生支援策を具体的に検討する必要がある。

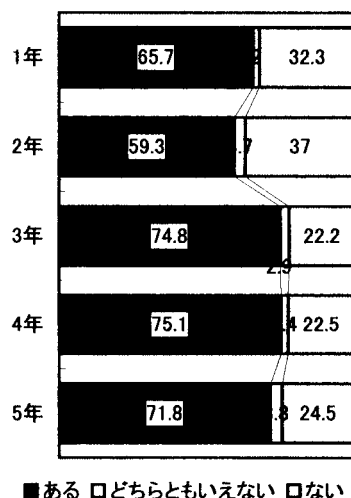
表 1、興味や関心のあること

(興味ありの%) 関心項目		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
		仲間に関して	音楽や映画	異性に関して	教養アップや資格取得	スポーツ	語学力の向上	ファミコンやゲーム	バイクや車	政治・経済・社会の動向	高専の授業	高専の課外活動	学校行事や各種企画	高専体育大会	ロボコンやプロコン	学生会活動
学年	1 年	83.3	78.4	63.6	66.5	59.4	57.1	68.9	51	42.2	64.5	44.9	37.9	38.2	39.1	16.1
	2 年	81.4	75.4	70.1	63.4	64.9	51.6	66.5	62.6	58.6	48.4	40.2	34.2	27.8	30.5	17.8
	3 年	87.2	80.5	77.9	74.5	61.9	65.1	53	64.2	49.7	55	30.6	35.9	25.6	23.9	16.8
	4 年	83.6	78.8	75.4	79.2	67.1	72	55.7	50.9	60.1	50.9	32.2	34.6	27.3	27.3	15.2
	5 年	77.8	81.6	72.6	62.5	73.5	59.2	52.2	58.5	63	33.3	32.1	27.6	23.1	15.1	17.9
全体平均		82.9	78.8	71.6	69.2	64.8	61.7	60	57.4	54	51.5	36.6	34.4	30.9	28.1	16.7

表2、高専生活で気がかりな事や悩み事など

(悩みありの%) 悩みの項目		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
		授業や成績関係	金銭や生活面	就職関係	進学に関して	性格や精神状態	異性に関して	身体や健康	進路変更	家族に関して	友人関係
学年	1 年	83.3	59.1	43.9	44.6	38.3	33.8	40.2	27.4	23.5	24.8
	2 年	75.7	57.5	49.7	52.7	44.7	45.4	35.7	38.3	27.2	28.9
	3 年	83.3	74.6	65.3	64.2	55.2	52.1	47.6	46.5	39.9	34.3
	4 年	75.9	61.6	70.7	55.5	50.6	44.7	43.4	48.2	35.6	36.2
	5 年	59.4	57	42.5	31.4	48.4	36.7	44.1	23.6	33.6	20.3
全体平均		76.6	62.1	54.5	50.6	47.1	42.6	41.9	37.2	31.4	29.2

図10、高専生活で悩む事は



■ある □どちらともいえない □ない

5、高専生活に関する意識

図 11 は、高専で学ぶ意義についての回答結果である。約 7 割近くの学生が「専門的知識を身につける」と回答し、次いで「職業的技能を身につける」が多くなっている。

同様の調査で、¹²⁾ 大学生のトップ回答が「友達との友情を育む」であった点と比較しても、高専生がかなり明確な目的意識を持っていることが分かる。このことは学生たちが専門性に特化した高専の教育環境や、周囲からの高専に対する「社会的な期待」を敏感に感じ取っている結果でもある。

図 12 は、高専生活での熱中体験や感動体験の回答結果である。熱中・感動体験をした学生の比率は、学年進行とともに増加し、5 年生で 4 割強の学生が「熱中・感動体験をした」と回答している。しかし、最終学年の 5 年生でも感動体験のない学生が 4 割強の比率を占め、1 年生から 3 年生では、過半数の学生がキャンパスで感動体験を味わっていない状況にある。

創造的な学習環境は、本来は「楽しさ」を内包しているはずである。学校への帰属意識を高め、学生生活を活性化し、キャンパスの魅力を高める上でも、感動体験をキャンパスライフの中にどの様に創造するべきか、今後の学生支援策の大きな課題といえる。

図 13 は、キャンパスの中にリラックスできる空間があるか、といった質問に関する回答結果である。約 3 割の学生がキャンパス内にリラックスできる居場所を確保しており、5 年生ではその比率が 4 割近くに急増している。

5 年生で「居場所」保有の意識が急増するのは、卒研室を優先的に利用できるためと思われる。「居場所」として人気があるのは、教室、図書館、部室の順で、1 年生は教室が主な「居場所」となっており、学年進行とともに「居場所」は分散化の傾向がみられる。¹³⁾

しかし、過半数の学生はリラックスできる居場所はないと回答しており、ホッと和めるような、居心地の良い居場所は持っていないようである。学生達が「群れる」ことの出来る居場所は、「学生集団の自己教育力」が期待できるという。¹⁴⁾ 今後は「居場所」づくりの視点からも、学生支援策を検討することが必要であろう。

図 11、高専で学ぶ意義は

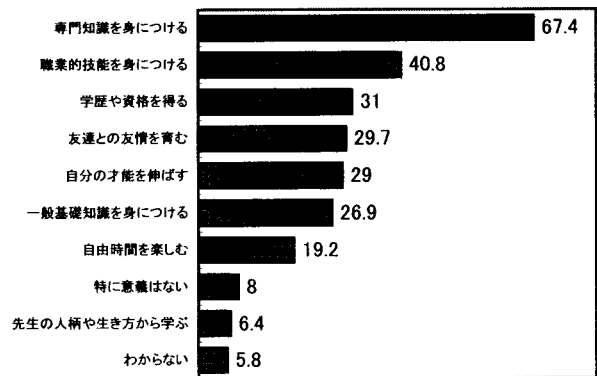


図 12、高専生活での熱中感動体験は

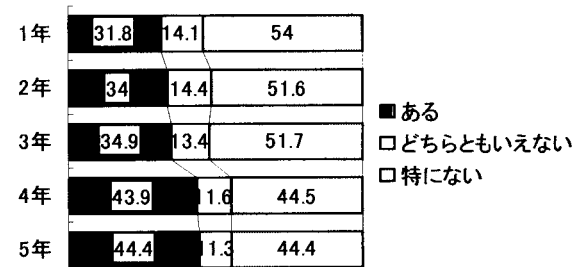
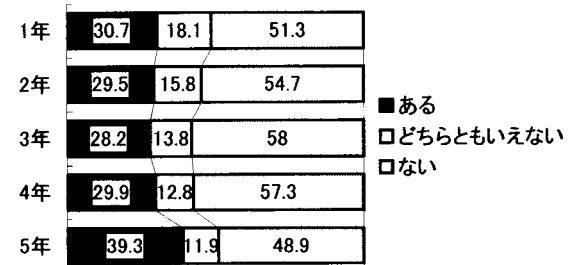


図 13、学内の居場所



6、学生側の東京高専に対する評価

図 14 は、高専生活への「満足度」についての結果である。高専生活に「大変満足」「やや満足」を「満足」とし、「やや不満足」「大変不満足」を「不満足」としてパーセント表示した。満足派は 1 年生で 6 割強を占めるが、2 年生以降では急減し、逆に不満派が増え、特に 4 年生では過半数が不満派となっている。

「満足度」は個人の主観の問題ではあるが、そのあり様が、学習意欲や高専の諸活動への取り組み等、高専生活全般に大きな影響を及ぼすと考えられる。学生支援策を検討する上で、「満足」「不満足」の背景について、早急な精査が必要である。

図 15 は、高専に対するイメージの変化を見たものである。図 14 の「満足度」と同様に、高専のイメージが入学前より「向上した」とする学生の比率は、学年進行とともに低下し、逆にイメージが「低下した」とする学生が 2 年生以上で 6 割以上を占めている。特に 4 年生では 7 割強の学生が、高専のイメージが「低下した」と回答している。

図 16 は、保護者の高専に対する期待感を、学生の判断で回答した結果である。親の期待感の高低は同程度の比率であったが、2、3 年生の保護者は高専に対する期待度が低下傾向にある。学生支援に、家庭からの積極的な協力を得るためには、高専の教育方針を十分理解してもらい、保護者からの信頼感や期待感を高める、具体的な取り組みが必要と思える。

図14、高専生活の満足度

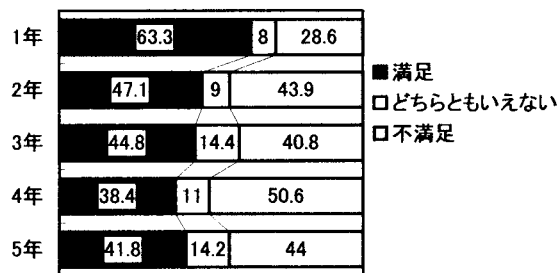


図 17 から図 19 は、高専の教官の「親しみやすさ」「人間的魅力」「頼りがい」について、学生の主観的評価の結果である。全体としては、いずれもマイナス評価が過半数を超え、厳しい結果となっている。学年比較では、教官のプラス評価において、特に 2 年生の落ち込みが顕著である。またマイナス評価は 2 年生で急増し、さらに 5 年生で増加する 2 段階の傾向がみられる。

学校教育の成否は、その直接の担い手である教官の資質能力に負うところが大きい。¹⁵⁾ 今回の調査では、厳しい教官評価が示されたが、この種の教官評価は、「教室の中」よりも「教室の外」空間での、学生指導のあり方（学生との交流の質）に大きく左右されるといえる。魅力的な教育環境の創造のためには、教官の資質向上に加え、「顧客重視」の視点からの、教育サービスのあり方を再検討する必要がある。

図17、教官の親しみやすさ

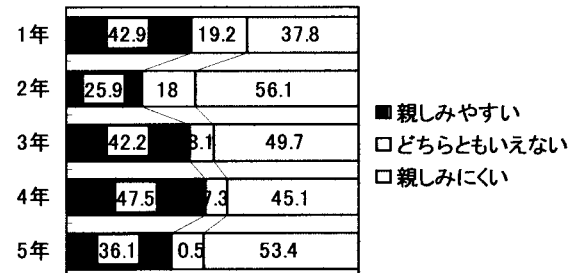


図15、高専のイメージ

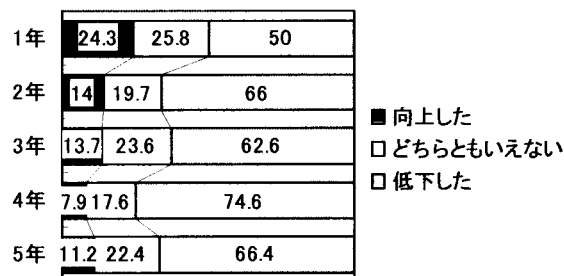


図18、人間的魅力を感じる教官は

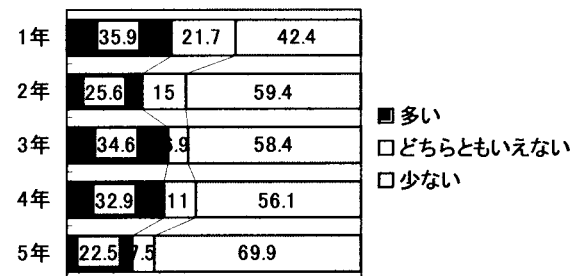


図16、親の高専に対する期待度

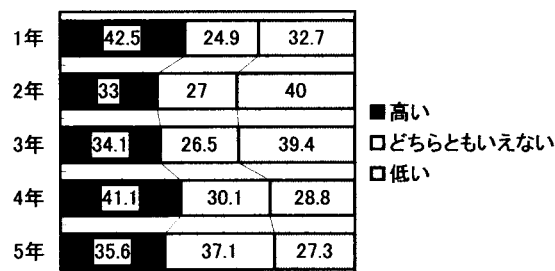
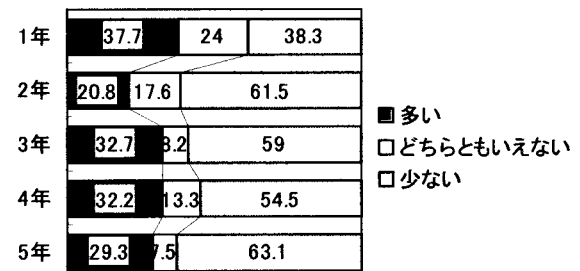


図19、頼りがいのある教官は



7、まとめ

本研究の目的は、「高専生活に関するアンケート」の分析結果を基に、東京高専における学生支援の課題を明らかにし、今後の学生支援策を検討する基礎資料を得ることであった。

調査結果を分析した結果、以下の学生支援の課題が明らかになった。

- 1) 確かな勉強時間の確保と基本的な学習習慣の確立。
- 2) 高専の授業や課外活動、行事、学生会活動等の高専生活全般への関心を高め、それを意欲的に継続させる工夫。
- 3) 「授業や成績」に代表される、学生生活上の不安要因の軽減にきめ細かく対処。特に予防的なカウンセリング等の検討。
- 4) 熱中・感動体験の機会の提供と、学生達の意欲的な取り組みへの積極的な支援。
- 5) 学生達の「居場所」づくりに配慮。
- 6) 高専生活の満足・不満足感を生み出す背景の精査と、高専イメージや満足感向上のための具体的方策の検討。
- 7) 保護者からの信頼感や期待感を高める工夫。
- 8) 学生から高く評価される、教官の資質の向上と、質の高い教育サービスの検討。
- 9) 各学年の状況に応じた学年別の学生支援策の検討が必要。特に2年、3年、4年生への支援策が課題。

今回の高専生活に関する調査結果は、学年比較を中心とする単純集計であった。限られた紙面では、項目間の関係等の詳細な分析まで十分な検討を加えることができなかった。「勉強時間」、「満足感」、「教官評価項目」をキーワードに、項目間の関連性を見ると、興味深い傾向が読み取れたが、また稿を改めて整理し報告したい。

最後に、今回の調査は、71項目といった大量の調査項目にもかかわらず、各項目とも丁寧に回答し、貴重な意見をいただいた学生の皆様と、お忙しい中、調査に協力していただいた担任の先生方に、この紙面をお借りして、心より感謝を申し上げます。

- 1) 平成 15 年度全国高等専門学校長会議における文部科学大臣挨拶
- 2) 東京高専中期計画（案）2003.4.14
- 3) 学生募集と低学年教育についての検討資料 2003.7.28
- 4) 低学年時教養教育のあり方に関するプロジェクトチーム設置規定（案）2003.9.11
- 5) 連続シンポジウム「転機教育」（朝日新聞主催）の討論内容 2003.9.26
- 6) 東京工業大学、学生支援ワーキンググループ報告書、2002.
- 7) 広島大学、学生表彰制度、1999.
- 8) 徳山大学、2001.
- 9) 今後の国立高等専門学校の在り方に関する検討会 配布資料、2002
- 10) 高専生活の活性化に向けての試み（2）
—くぬぎだフォーラムの可能性—
東京工業高等専門学校研究報告書
第 34(2)号 2003.1
- 11) 東京高専・学生相談室だより 22 号
2003.6
- 12) 第 6 回世界青年意識調査報告書 1998.1
- 13) 東京高専・学生相談室だより 21 号
2003.2
- 14) 朝日新聞コラム・私の視点
「大学改革・学生交流の整備から」2003.10.6
- 15) 平成 13 年度文部科学白書
「21 世紀の教育改革」p64 2002.1

（平成15年 9 月30日 受理）

技術者倫理教育に関わる現状分析とカリキュラム化への試み

河村 豊*, 川北晃司*, 浅野敬一*

Issues on the Current Education of Engineering Ethics and on Attempt for the New Curriculum

Yutaka KAWAMURA, Koji KAWAKITA, Keiichi ASANO

Technological development has vital importance to modern society and gives us great advantage. However, technology inflicts damage on human beings and/or the environment in some cases. We must minimize the technological abuses in order to maximize its benefit. Accordingly, it is time to consider the ethical problem facing engineers. Teachers at Tokyo National College of Technology (TNCT) who have different academic disciplines have been trying to establish the teaching methods of engineering ethics from various points of view ; ethics, history of science & technology, business administration and so forth. This article will present a tentative plan to incorporate engineering ethics in the five - year course of TNCT.

(keyword : Education of Engineering Ethics)

第 1 章 はじめに

1. 課 題

科学技術者をめぐる社会状況は近年大きく変化している。国際的には冷戦後の対テロ戦争下の科学技術政策、国内的には不況対策での科学技術政策が存在し、このような中で新時代に対応した変革を技術者養成機関へも求める動きが活発になっている。技術者養成機関の一翼を担ってきた高等専門学校（以下、高専と略す）制度にとっては、2004 年度から施行される国立高専の独立行政法人化の動きや、世界で活躍できる能力を持った技術者を評価・認定しようとする動きが、時代に対応した技術者養成機関への変革を促す今日的な契機となっている。

このような高専教育改革期の中で、一般科目の 1 つを担う社会系教養教育も従来までの枠組みを超える変化が求められている。本稿は、新しい動きとして登場した「技術者倫理教育」をこれからの高専社会系教養教育のひとつの柱と捉え、本校社会系教官である 3 名が新たな社会系科目構築の検討・試作を試みたものである。

2. 技術者倫理を考える前提

まず、技術者倫理を考える前提として、社会における科学技術問題を二側面から検討しておきたい。

第一は「科学技術への期待」である。「科学技術」という用語は、戦時期の 1940 年にその起源があるという。つまり、ある種の非常事態に直面すると、それを乗り切るために既存の手段に代わる新規の手段が必要となるが、科学技術はその期待を背景に登場したことになる。また 1995 年に施行された「科学技術基本法」も、長期におよぶ平成不況下の中で、まさに非常事態克服の主要手段として注目されている。2001 年から始まった第二次科学技術基本計画では総額約 25 兆円が科学技術につぎ込まれている。平成 14 年版『科学技術白書』のサブタイトルは「知による新時代の社会経済の創造に向けて」と題され、担い手としての研究者・技術者の育成整備が謳われている⁽¹⁾。

第二は「科学技術に対する疑い」である。科学技術が社会経済に積極的な役割を担ってきた一方で、その副作用とも言うべき問題も同時に

発生し、無視できないレベルに達してきた。足尾鉍毒汚染やメチル水銀を原因物質とした水俣病に代表される公害問題も、現代では各種微量物質による土壌汚染、水質汚染、大気汚染として地球規模に拡大し、環境破壊問題として捉えられている。また機械利用の拡大に伴い、産業、軍事や日常生活での機械技術への依存度が急速に高まり、大量輸送部門では、自動車事故、船舶事故、航空機事故などの大規模化、軍事部門では大量殺戮兵器の開発競争を招いている。最近では、高度医療技術に伴う医療倫理問題や高度情報技術に伴う情報管理問題なども登場している。「技術の高度化」に伴い、技術が持つ積極面での機能に注目するばかりでなく、否定面での副作用についても事前に把握・評価することが不可欠となってきた。ただし十分な対策が構築されていない現状においては、一般の人々は科学技術そのものを疑い、開発を担う技術者へ不信感を持つ傾向が続いている⁽²⁾。

3. 技術者倫理教育の登場

専門家が社会的責任を果たすべきであるという職業倫理は古くから存在し、これまでも多くの技術者が社会的責任を果たしてきたことは言うまでもない。しかし近年の「技術者倫理」への関心は新しい動きの中で登場していると考えられる。まず、技術倫理、工学倫理、テクノエシックス (techno-ethics) など技術者倫理に類似した用語も登場している。意味する内容やニュアンスの違いもあるが、共通項としては、技術者教育の必須項目として倫理的知識を取り上げようとしている点である⁽³⁾。具体的には、活躍中のエンジニアに対しては各種学協会の倫理綱領の制定にあわせて、その遵守が期待されるようになり、一方、技術者教育の段階では組織内での専門家としての意志決定法や倫理的ジレンマに直面した場合を想定した訓練などを受けることが期待されるようになった。こうした背景には、前節で取り上げた技術関連の事故、技術者による不祥事などの拡大もあるが、直接的には技術者を取り巻く社会環境の変化があろう。つまり各種の規制緩和、企業における雇用関係の変化などから、これまでである企業内に限定された集団組織に組み込まれていた技術者が、転

職機会の拡大などにより「一人のエンジニア」として活躍する機会が増え、このために技術者個人の能力や信頼性といった保証をこれまでとは異なる方法で、示す必要が生まれたことにある⁽⁴⁾。

すでにアメリカ合衆国にはプロフェッショナル・エンジニア (PE) 制度、またアジア太平洋経済協力会議 (APEC) にはエンジニア登録制度も作られている。わが国では技術士制度がこれらに相当する。職業倫理を十分に身につけた専門技術者を仮に「未来派指向の技術者」と呼ぶならば、こうした技術者を養成するための教育プログラムは、国際基準に合致するようその品質が保証されなければならない。技術士制度の改訂の中で、1999 年に発足した日本技術者教育認定機構 (JABEE) はわが国における技術者教育の学習・教育目標について認定基準を設定したが、その中に技術者倫理教育が加えられた。専門技術者をめぐるこのような世界的な動きは、技術者倫理教育の必要性を高めたひとつの要因といえる⁽⁵⁾。

4. 技術者倫理に関わる研究動向

技術者倫理教育はここ数年に登場した新規の教育テーマであるため、その具体的内容はまだ試行段階に留まっている。そのため複数の研究グループが作られ、シンポジウムや研究会を開催して教育内容の検討に当たっている状況にある。一部ではすでにシンポジウム報告書や研究報告あるいは教育実践を踏まえた教科書も刊行されているので、ここでは代表的な研究グループを紹介しその活動について検討しておく。

(1) 金沢工業大学では、1997 年 4 月に科学技術応用倫理研究所が設置され、2001 年 12 月には「科学技術倫理プログラミングの構築」に関わる国際シンポジウムが開催された (同年度文科省科研費基盤研究 (B) を受けたもの)。わが国で開催された技術者倫理関係のシンポジウムとしては最初のもので評価できよう⁽⁶⁾。

(2) 名古屋工業大学では、同共通講座教室・言語文化講座教官を代表として、名古屋工学倫理研究会が 2001 年 3 月に発足した。同研究会では、「第一の目的は、現代の科学技術、および技術者が直面する倫理的問題を具体的かつ

理論的に明らかにすることにある。技術者の活動現場との生きた接触の中から、知的生産システムとしての工学の実践的特性を解明することを目指している。そして、技術者のための倫理教育プログラムを、大学の工学教育の現場で使用できる形で提案し、工学倫理教育の発展に寄与すること、これが第二の目的である」として教育プログラム開発を目的の1つに掲げた。また2001年10月には「工学倫理公開シンポジウム」と題して「工学倫理と企業倫理—組織の中の技術者—」を開催した(同年度科学研究費基盤研究(B))⁽⁷⁾。また、2003年3月からインターネット上に科学技術倫理オンラインセンターを開設した⁽⁸⁾。

(3) 北海道大学では文学研究科教官を代表者とする「科学技術倫理教育システムの調査研究」プロジェクトが、文部科学省科学技術振興調整費(科学技術政策提言)を受け2002年から開始されている。すでに、北海道大学プロジェクト研究「科学技術倫理の研究及び教育方法の開発」編「公開シンポジウム「テクノエシックスの現在」報告書」(2002年)を刊行し、さらに2003年7月に開催されたワークショップでは「技術者倫理教育の実践例」を扱い、技術者倫理を扱ったテキストの検討も行っている⁽⁹⁾。

(4) 東京工業大学では自主ゼミとして技術者倫理研究会が2001年5月に発足し、1ヶ月1度程度の定期的研究会活動を行っている。科学史・技術史研究者による検討に加え、現場のエンジニアの聞き取り調査などが行われている点に特徴がある⁽¹⁰⁾。

これ以外のものとして、関西大学の関西工学倫理研究会に加え、京都大学哲学教室、千葉大学倫理学教室の応用倫理学研究などで、工学倫理、技術者倫理に関する組織的研究活動が行われている⁽¹¹⁾。さらに、学協会での取り組み例もある⁽¹²⁾。こうした研究会活動に加えて、近年は大学、高専での技術者倫理教育に対応したテキスト、参考書も刊行されるようになった。これらの文献の内容は、以下のような3つの特徴としてまとめることができる。第一は、技術士会が主体となって編纂した技術者倫理教育文献である。主にはアメリカにおける技術者倫理に関わる議論の翻訳を通して、日本へ技術者倫理教

育方法を紹介している⁽¹³⁾。第二は、元エンジニアの体験に基づく考察・論考である。経験に根ざした記述の中には、実践事例や教訓となる事例などが示されている⁽¹⁴⁾。第三は、大学生および高専生などを対象とした教科書である。共同執筆の形式を取って、網羅性を追求している例が多いが、強調点はそれぞれ大きく異なっている。倫理問題を主体としているもの、事例を中心に論じているもの、トピック記事を多く取り上げているものなどの違いがある⁽¹⁵⁾。

5. われわれの検討課題

金沢工業大学の札野順は、科学技術倫理を4つのレベルに区分しているが、この区分を利用しながらわれわれの課題を説明してみたい。札野によれば科学技術倫理は、「メタレベル」と「それ以外」に区分でき、「それ以外」はさらに「マクロ」、「メゾ」、「ミクロ」に分けられ、全体として4つに区分できるという。それぞれの考察対象は、順番に「技術そのもの」、「技術と社会」、「技術と制度・組織」、「技術者個人の行動」とする⁽¹⁶⁾。こうした区分が正当性をもつかの検討を行うことも必要であるが、ここでは技術者倫理を特定の視点からのみ取り扱うことでは不十分で、複数の分析視角から検討することが不可欠であることを示す論拠として利用したい。

さて、5年間の教育課程をもつ高専(専攻科を含めれば7年間)に対応した技術者倫理教育のカリキュラム作成を試みようというのが、われわれ執筆者の目標である。本稿の執筆者3人は、本校一般科目社会系に属し、それぞれ倫理学、科学技術史、経営学を専門としている。技術者倫理教育は社会系教官が唯一の担当者である必然性はないが、技術者倫理科目の全体像を分析し、カリキュラム作成に向けての基礎作業を行うには、社会系教官の各専門分野を生かす、共通の土俵で検討することは、上記の4区分に照らして、有利に働くと判断した。

具体的には、まず以下の3つの側面からの検討を各人が加えることとした。すなわち、第2章で扱う、技術者倫理問題の基礎としての倫理学からの視点(メタ、ミクロのレベルに対応)、第3章で扱う、技術者倫理問題を過去の事例を

通して捉える科学技術史からの視点（マクロレベルに対応）、第4章で扱う、技術者倫理問題を現在の社会問題を通して捉える経営学からの視点（メゾレベルに対応）、である。これらの問題を3名の教官が各専門分野に引きつけて分析した。さらに第5章では、執筆者らによる数回の検討会で出された議論を踏まえて、高専にふさわしい技術者倫理教育のカリキュラム案を提案した。

第2章 倫理学からのアプローチ

1. 応用倫理学における技術者倫理の位置

技術者倫理とは、最近とみに研究の盛んな応用倫理の一分野である。応用倫理は、道徳的な原理や規則を、人間の営為のさまざまな領域において、どのように活用して実践していくかに関わっている。しかしながら、応用倫理は、原理や規則を現実には当てはめていくだけの活動ではない。諸原則それ自体が、現実の状況の精密な知覚にもとづいて形成され、諸原則それ自体が道徳経験の一部をなしている、という点が重要である⁽¹⁷⁾。

このような応用倫理の研究は、生命倫理、環境倫理、ビジネス倫理、情報倫理、といった分野に分かれてはいるが、それらは、いずれも技術ないし技術者の倫理としての側面を持っていることが指摘されている。例えば、生命倫理では、延命技術や遺伝子操作やクローン技術などの開発による、命への技術の介入がどの程度許されるのか、といった倫理的問題を扱う。また環境倫理では、技術は自然をどこまで変形・人工化してよいのか、さらに、情報倫理では、情報電子技術の急速な発達によって、電子ネットワークにおいて個人のプライバシーをどう保護するのか、といった問題を取り扱う。

しかし、齊藤了文、坂下浩司編著『はじめての工学倫理』（昭和堂、2001年）では、生命倫理と対比させて以下のように記されている。「あらゆる決定は可能な限り自己決定に還元するという個人主義、自由主義が生命倫理のモットーである。一方、工学倫理は、これほど大幅な自由主義をとらない。技術者は専門家であり、かつ、多くは被雇用者だから、自由よりもむしろ

責任や義務が問題となる」（184頁）。

だが、生命倫理は、概念として個人主義、自由主義との必然的な結びつきはないことを、指摘しておかねばならない。インフォームド・コンセント（納得診療）にしても、それは、患者を「完成した自律的主体」とであると前提し、自己決定を「押し付ける」ような、行き過ぎた自立（律）至上主義（autonomism）に陥ってしまう傾向が指摘されている。「生命倫理における自立（律）尊重原理（the principle of respect for autonomy）」とは、決して患者に自己決定・自己責任を押し付ける概念ではない⁽¹⁸⁾。それでも大きな流れとしては、技術者倫理も、医療分野におけるインフォームド・コンセントと同様に、「専門家の説明責任、情報公開という流れ」の中に、位置づけられよう⁽¹⁹⁾。

つぎに環境倫理については、個人ではなく全体の生存可能性を重視するという全体主義、すなわち、人間の自然性、社会性、未来性の強調が、環境倫理のモットーである。工学倫理も、これに学ぶところがあるだろう。技術者のつくる人工物は環境の一部となり、他者や他の環境に影響を及ぼすからである。しかし、「工学倫理は環境倫理のようなラディカルな体制変革的主張を含まず、むしろ近代市民社会の倫理を肯定する守旧派である」との見立てが存在する⁽²⁰⁾。ただし、ここでもやはり、環境倫理が根本的な体制変革的主張を必然的に伴う、と考えるのは早計である。そのような主張は、現実的ではなく、好ましくもない、と考える環境論者も、存在するからである⁽²¹⁾。

また、技術者倫理は、当面その専門職業にとってのみ意味があるが（ただし、公衆の福利に影響を受けることは別として）、環境倫理は、あらゆる人間に適用される。技術者は、その専門職の義務を果たす過程において、環境との間で非常に密接な相互関係をもっており、技術者倫理と環境倫理という両方の倫理を考慮しなければならない、とヴェジリンドらは言う。「技術者は、われわれの惑星をケアすることにおいて、重要なことができる特別な立場にいる。[・・・・]環境倫理は、社会における技術者の役割の、かつてないほどの大きな部分を占めるだろう。倫理ある技術者は、重要な変化を起こすことが

できる」⁽²²⁾。

なるほど、米国の初期の技術者倫理綱領では、技術者と雇用主との関係や、他の技術者との関係などに関する規定が中心で、専門職内部の行動規範を強調していた。そこでは、伝統的な技術者気質にある、従順、忠実、信頼、専門能力といった価値が重視されていた。

しかし、1947年以降は、技術者の社会的使命として、「公衆の安全、健康、福利を最優先する」という価値観が、基本憲章に含まれるようになった。加えて、1985年に世界の八十カ国の技術に関連する学協会の連合体であるWFEO (The World Federation of Engineering Organizations) が技術者の環境に対する責任を明確に謳った環境倫理綱領を発表してからは、「持続可能性」という価値を倫理綱領の中に取り入れる学協会が増えてきている⁽²³⁾。

結局、技術者倫理がこれまでの(応用)倫理学と決定的に異なるのは、それが倫理教育の実践を不可避のものとして含んでいるという点にある。いかにふるまうべきかを研究するだけでは十分ではない。いかにしたらそうふるまってもらえるかを研究しなければならない。そのため、集団的自閉を防ぎ、「他者」との連関を保つ工夫がなされているべきであり、鍵をにぎるのは「他者」である、と山田健二らは言う。どのような「他者」をどのような仕方で介入させるか、それを考察するのは、広義の「人間学」であろう⁽²⁴⁾。

加えて、パターナリズム(善意の先走り)の側面にも着目する。工学者の行為は、依頼者以外の第三者に被害を与えることがありうるが、その第三者には、予め情報を与えることも同意を得ることも比較的難しい。したがって、そのような製造物に対して、多重の仕方で安全性を確保するということは、工学者のパターナリスティックな行動と考えられる。ある意味でパターナリスティックな配慮を必要とする、限定合理的な人間をモデルにして倫理を見直すことを示唆する点が、工学倫理の「新奇さ」を示す、というのが齊藤了文の所見であった⁽²⁵⁾。それはフル・プルーフ(馬鹿よけ設計)といった概念にも反映されている。そこでは「安全」こそが、中心的価値となる。安全とは何か、そ

れが一大課題となる。

2. 代表的教科書のどこが特に 道徳面で示唆的か

(1) C.ハリスらが著した『科学技術者の倫理／その考え方と事例』(日本技術士会訳編、丸善、1998年)は、原著が1995年刊の大著である。この本は、技術系学生が生来の分析的才能を、新しい領域、すなわちモラル思考に向けるのを助けようとする。この本は、モラル上の不一致とみられるものは、多くは事実についての不一致か、決定的に重要な用語の定義についての不一致であること、および、モラル上の不一致の所在は、分析によってのみ発見できることを、正しくも強調する。また、危害を引き起こさないことの重要性を否定することなく、それ以外の一般的な価値、すなわち有用性、負担可能性、環境への影響、および消費者の好み等の要素をもまた、勘案している。その他、アービング・ジェニスが集団思考(groupthink)と呼ぶもの、すなわち、集団が批判的思考を犠牲にして合意に達する状況に注意を促し、決疑論(casistry)の有効性および設計問題とのアナロジーにも言及している⁽²⁶⁾。

(2) C.ウィットベック(札幌順、飯野宏之訳)『技術倫理1』(みすず書房、2000年)。原著は1998年になる本著で、著者のウィットベックは、倫理的問題の解決が、設計問題の工学的解決と非常に類似していると説得的に述べている。それは、一義的な解はなくてもよりよい解はありうるとか、可能な解は問題の定義と分離できないとか、時間圧の下での行為が基本だといった論点である。そして倫理問題を解決する際に、所与の選択肢の中から適切なものを選択するのではなく、選択肢そのものを考え出すことの重要性を強調している。さらに、道徳的責任と職務上の責任の違いについて分析している。職務上の義務および責任は、人が自分の意志で仕事あるいは職に就く限りにおいて、道徳的責任および道徳的義務になる。しかし、道徳的責任は職務上の責任の範囲にとどまるわけではない。実際、職務上の責任や義務の中には反道徳的なものもありうるとした場合、「自分の仕事をしたまでだ」とか「命じられたことをし

ただけだ」というせりふは、非倫理的な行動への言い訳として大人の世界では通用しない。また、エンジニアが仕事の質を高め、顧客を満足させようとたえず心を配るのも、競争があるおかげ、という面が強いが、起こりうる有害な誤用のすべてを防ごうとするのは、パターンリズムの濫用になりかねない。そもそも費用と安全とをはかりにかけるとは、必ずしもつねに道徳的に反対されるべきだというわけではない。リスクにさらされる当人が、ある程度コントロールできるような危険に対しては、防護策のある程度限定することも許容される。そして民主主義国家では、エンジニアやその他の技術の専門家だけでなく、一般にすべての市民が、たとえば交通政策などといった技術の分野に関する重大な決定について、よく考え、発言するように期待されている。民主主義国家のすべての市民には、その社会における技術の利用に対して何らかの責任があることになる、といった指摘は、説得的と思われる。

（3）齊藤了文、坂下浩司編著『はじめての工学倫理』（前掲）。個々のエラーを犯すのは人であるが、そのエラーの背景には、組織がある。個人を非難して終わり、ではなく、「エラーは原因ではなく結果である」（J.リーズン）と考え、エラーを生じさせた組織の体質を点検することが重要だろう、と説く。また、行政基準を満たせば十分なのか？と問う。市場に出回っている製品等について、行政がなんらかの基準を定めている場合がある。しかし、技術革新が進むと行政よりも企業の方がより豊富な情報を持つようになるし、製品が多様化すると画一的な基準では対応できなくなってしまう。したがって、「安全」を考える際、行政や業界の基準は必要最低限の基準であって、技術者は、同業他社の安全レベル、世界的視野での技術情報、これまでの事故や裁判から学ぶ必要が生じるのである。

（4）杉本泰治、高城重厚著『大学講義／技術者の倫理 入門』（丸善、2001 年）。モラルは本来、人それぞれ自分の行為に責任をもち、互いに信頼し合う関係を築くのが目標である。良好なモラルが、相互不信のうえに築かれるはずはない。密告による“内部告発”は、会社内部の

人の相互不信を前提とするもので、そのようなことは安易に奨励されてはならない。密告は、人の心を蝕む。また、技術者倫理における意識と知識の割合は、あえていえば、意識 80 %、知識 20 %だろう。ただし、この数字は重要性の重み付けではない、との観察がなされる。

（5）藤本温・編著『技術者倫理の世界』（森北出版、2002 年）。「技術者倫理」とは、道徳的に問題のあるひとを立派な徳のあるひとにするような学ではない。技術者倫理においてわたしたちが考察すべきことは、ひとびと（公衆）の安全の確保のためにはどのように行動すればよいか、迷ったときにどのような考え方をすればよいか、等々である。技術者倫理では、内部告発者のような「モラル・ヒーロー」を生み出さないようにするためにはどうしたらよいか、ということが課題になる。また、「安全で」あっても問題が残ることがある。たとえば、クローン技術の問題は、安全であれば許容されるのか？安全であっても、その国の歴史や文化、また家族関係や社会的影響を考えると許されないこともあるのではないかと考えると、ここでも専門家と非専門家の溝を埋める努力が必須なものとなることは、容易に想像できよう。

3. 若干の教育方針

したがって、「安全」の意義と限界を論議し、専門家と非専門家の中で存在した問題史を、技術者倫理教育のなかで、もっと教訓として伝えていく方向が考えられてよいだろう。次章でも説かれるであろうように、そのひとつとして公害（の裏舞台）史の学習は不可欠であろう。工業廃水の処理技術者である宇井純は以前、「専門のわくのなかだけでつじつまをあわせようとする技術」がある限り、公害の被害者は救われないし、その専門のすき間から公害は出てくる、と論じたことがある。そして、製品の流れはあるけれども、廃棄物の流れは全然書いてない、そういった技術を「半分だけの技術」、「かたわな科学技術」とさえ、呼称した⁽²⁷⁾。

同時に、「技術とか科学の信頼が失われ、全然非論理なものに頼ってしまうことの危険性」

（宇井純）もまた、正しく教えられねばならないだろう。リスク管理上の失敗例である「公害」

の学習のみならず、「化学物質のリスクとベネフィットを十分ふまえた総合管理について正しい理解を深めるための課程を組み込んでいくことが重要」と説かれるゆえんである⁽²⁸⁾。そしてこの主題については、技術者倫理教育においては、非専門家への積極的な情報公開の必要性、という文脈で取りあげても良いだろう。

第3章 科学技術史からのアプローチ

1. 技術者倫理に関わる

過去の事例分析の意味

ここでは科学技術史分野から、技術者倫理問題を扱う論点を示してみたい。従来までの科学技術史の描き方（方法論）には、科学史では法則の発見などの自然認識の発展論、技術史では特許・新技術の発明などの技術革新論などが含まれている。いずれも科学技術が人類にもたらした積極的な役割を分析するという論点でもあり、努力の末に新技術開発に成功したというサクセスストーリー、近年 NHK で放映されている番組名をもじって、「プロジェクト X」史観と表現される場合もある。一方で、こうした側面だけからの歴史教育アプローチには限界があることも認識されている。特に技術開発の場合は、本来の要求課題に応じて生まれた技術でも、性能優先、効率優先のみを追求した結果、公害、薬害、事故などに代表されるような深刻な副作用、二次効果が現れてきたという問題である。単純な発明史あるいは勝利者史観では、技術の開発史そのものも理解するができないことが理解されつつある。ここでは、このような科学技術史の最近の傾向を踏まえながら、技術者倫理問題およびその教育について検討してみたい。

さて、過去の事例の中には、現在の視点から見て、すでに克服されたように判断できる問題も多い。しかし事故・災害がどのように引き起こされたかをめぐる「真相」は、意外にも 10 年あるいはそれ以上過ぎた頃になってはじめて明らかにされる場合がある。ここ数年に日本で発生した事故・災害について考えると、責任者の処罰が議論の中心となり、肝心の発生経過や原因分析に関わる情報がほとんど公開されないことに気づく。冷静に事実を見つめるためには、

ある程度の時間を経過し、しかも原因の究明が進んだ事例を取り上げることが重要である。

その事例の 1 つを、公害問題の原点と呼ばれる水俣病に見ることができる。1956 年に公式に確認された「水俣病」は、新日本窒素肥料会社（現チッソ）がメチル水銀を含む工場排水を水俣湾に流したことが原因であるが、この点を政府が認めたのは 12 年後の 1968 年、未解決のままであった未認定患者救済のための最終案を政府が決定したのは実に 39 年後の 1995 年であった。このような時間を経たあと、チッソ水俣工場の元技術者らも公に自らの体験を語るようになり、現場の技術者がメチル水銀を水俣病の原因物質と認識しながら、さらに工場排出を継続し続けた理由の一端がさらに明らかになった。こうした中で得ることができた教訓の 1 つは、当時の技術者が正義感に欠けていたという問題に還元できないという論点である。戦後復興から高度成長に移りつつあった日本で、企業は生産拡大に走り、働く技術者は増産に不可欠な工夫を着実に研究していた。この当たり前の活動の中に最悪の公害を発生させてしまう原因が隠されていたという事実注目する必要がある。技術者倫理を問題とするとき、歴史分析の役割は現場にいた技術者の視点から災害・事故の原因を考えること、こうしたリアリティに目を向けることが不可欠である。

2. 事例分析を含む技術者倫理テキストの傾向と課題

近年刊行された技術者倫理テキストの中で、事例として多く取り上げられるものは、国外のものでは、スペースシャトル・チャレンジャー号事件、シティーコープ・ビル事件など、国内では、JCO 臨界事故、雪印食中毒事件などである。こうした事件の中で技術者個人の取った行動を分析し、その行動規範を検討するというのは、もちろん技術者倫理教育の一部を構成している。ただし、前述した札幌の区分ではこれはミクロレベルの考察に留まり、原因分析にまで達していないという問題が残る。もちろん事件の詳細が公表されているアメリカの事例の場合は、マクロレベルの考察も可能であろう。例えばチャレンジャー事故の場合は、国家的威信を

賭けた取り組みであり、しかし予算削減、打ち上げ遅延を背景にして経営的視点も事件の背景にあったことが分かっているからである（第 4 章 3 で詳述する）。

ただし、ある国家、地域、時代に限定された事例研究や報道情報に依拠した事例紹介では、問われるべき技術者倫理問題の表面的理解に終わる危険性がある。技術と社会との関わりを検討し、技術者倫理をより広い視点（マクロレベル）から論ずるためにも、歴史的評価が下された過去の事故・災害などの事例を技術者倫理教育の素材として選ぶことが不可欠であろう。

3. マクロレベルの議論としての歴史分析

技術者倫理問題登場の背景には、社会における技術の影響が拡大したことにあることはすでに指摘した通りであるが、そのような拡大の実態は、公害、環境破壊、薬害、各種技術事故などが、近代社会の中でどのように表面化し、拡大してきたかを系統的に見ることではじめて理解できる。例えば公害の場合、前述した水俣病を 1 つのコアにして、近代日本でいつからどれほどの公害問題が発生し、現在では環境問題としてどのように継続しているかという通史的考察は、問題の全体像をつかむために重要な視点を提供する。さらに各種技術事故については、スペースシャトル爆発に限らず、自動車事故、鉄道事故、船舶事故、航空機事故などが存在し、被害領域や被害規模が次第に拡大しつつある事実を歴史的に振り返り、こうした認識を通して技術事故の本質、あるいは全体像をつかむことが求められる⁽²⁹⁾。さらに歴史分析の課題に加える内容としては、専門職業家としての技術者自身を歴史的に捉える視点がある。技術者が現在直面している多様な課題は、近代社会の中で技術者集団がどのように形成され、社会的機能、社会的地位、社会的責任をどのように高めてきたかを理解することで、多くの現実問題を整理して捉えることができる⁽³⁰⁾。また現代日本の科学技術を捉えるために、近年では第 2 次大戦期における科学技術の制度化問題が注目されている。戦後日本の技術発展が戦時中に策定された動員体制に大きな影響を受けており、戦時下の技術を分析することで、今日の技術者倫理に不

可欠なマクロレベルの問題をより身近に理解することができるからである⁽³¹⁾。

第 4 章 経営学からのアプローチ ー倫理問題の実務的解決を目指してー

1. 組織における倫理問題

技術者倫理に係る従来の研究は、組織が技術者に与える影響を軽視していたことは否めない。そのため、技術者倫理教育の場でも、組織に対する個人の自律性を強調する場合や組織との対立を顕在化させないように慎重な行動を推奨する場合等、混乱が生じている⁽³²⁾。

しかし、組織との対立は、技術者が陥りやすい倫理的ジレンマのひとつである。近年多発する内部告発も、解決し得ないジレンマへの対応策であり、正当な内部告発と告発者の保護は不可欠である。ただし、技術者倫理が、常に内部告発的行動による問題の解決を求めれば、技術者に過剰な負担を強い、実際の事故防止にも寄与しない。内部告発を最終手段として留保しつつ、こうした事態を極力回避できる多様な手段を提示することが技術者倫理の実践性を高めるのである。

一方で、我々が再度認識すべきは、人間は、環境から自由にはなれないという事実である。技術者も、会社の就業規則やマニュアル及び各種法令等、強制力を伴う他律的規範の影響を含めた一定の合意事項に従いながら業務を遂行する。つまり、多くの場合は、技術者個人が倫理的か否かを問わず、技術者を取り巻く諸規定や組織の体質が、公衆に与える便益または損害の内容を決するのである。後述のスペースシャトル・チャレンジャー号の事故も示すように、致命的欠陥を有する規定の「遵守」が、各人の判断を混乱させ、悲劇を招く場合さえある。優秀な部品を組み合わせるだけでは優秀な機械とならないように、高い倫理観を有する個人を構成員としても、組織が望ましい結果を生むとは限らないのである。

技術者自身の倫理観が重要であることは当然である。しかし、公衆に損害を与える状況を実際に防止するには、技術者と組織の対立を回避し、かつ技術者が倫理観に従い行動できる環境

が必要である。そこで、経営学に関連する分野の成果を用いながら、「技術者倫理」の領域を技術者個人の自律的規範に限定せず、組織全体の規範へ伸張させることで、技術者が直面する倫理問題を実務的に解決する方法を探ることにする。

2. 戦略論とリスクマネジメントの活用

狭義の戦略は、中長期的に望む成果を得るための行動を選択することだが、その前提には、組織が目指す将来像が必要である。まず、全ての組織は、社会が求める便益を供しない限り存続を許されないの、組織の社会的有効性を提示しなければならない。これに続き、10～20年後、5年後と想定時間を短縮しながら、より具体性が増すように順序だてて目標を規定する。当然、営利企業の場合には、投資収益率向上等の利益目標が中心となる。

将来像や目標を定めた後は、それを達成する戦略を策定する。具体的には、組織の活動領域の設定、経営資源の獲得や配分及び当該分野内での自らの組織の位置づけを行うが、この段階で、技術者倫理を実現する具体策を戦略に組み込むことが重要である。事故防止や環境保護等を重視する戦略を策定することで、組織と技術者の対立を相当程度回避できるのである。

しかし、事故防止や環境保護等を重視した戦略策定は、コスト増を伴う場合が多いため、利益増大の目標に反するという批判が予想される。また、組織が戦略を実行するためには、より具体的戦術が必要である。そこで、次のアプローチとして、リスクマネジメントの考え方をを用いる。組織の活動は、利益等の正の結果のみならず、損失や事故等の負の結果を強いられるリスクを含む。リスクには、景気変動、需要構造の変化及び政策の変更等、社会的要因に基づくものもある。この種のリスクの多くは、組織が関与し得る範囲を越える場合もあるが、組織に利益をもたらす可能性も高い。一方、組織内部に主因があるリスクには、法令違反、経理処理のミスおよび雇用差別等の経営管理的リスク、製品の回収・修理、事故および環境汚染等の工学的リスクがある。これらのリスクが顕在化した場合、組織は損失のみを被るが、そのマ

ネジメントは可能である。当然、技術者との関係では、工学的リスクのマネジメントが重要であり、以下の作業により、損失の防止と利益の確保を図る。

第一は、リスクの抽出である。技術者は、日常的に工学的リスクを熟知しているが、逆に発生頻度の低いリスクを看過する危険性も有している。そこで、日常の経験を離れ、対象となる施設や工程を選定した後、発生の原因、発生の場所及び発生した場合の被害の対象という多角的視点からリスクを抽出する。リスクが抽出されない限りは、発生頻度や損失の程度を推測できず、対策は講じられないので、全く予想外の損失を被る場合がある。

第二の作業は、抽出したリスクによる事故等の発生頻度と損失の程度を推定し、リスクの大きさを評価することである⁽³³⁾。その際に、最も注意すべきは、大規模な損失の可能性があるリスクだ。こうしたリスクは、一般には顕在化する頻度が低く、損失算定が困難である一方、人命、環境及び組織の存続に回復不能な損害を与える場合がある。また、工学的リスクの顕在化は、売上低迷、株価下落、賠償金、原状回復費用等々、金銭換算できる損失だけでも甚大で、かつ組織の外部への影響も大きいので、損失規模を重視した評価が必要である。

第三に、評価されたリスクの大きさに基づき、リスクへの対策を検討する。対策の中心は、損失は小さいが頻度が高いものと頻度は低い損失が大きなものである。具体的には、事故の発生を防ぐ対策と発生時の損害を最小化する対策を併用し、リスクを削減する。これに対して、損失が大きく、発生頻度も高いものは、リスクの軽減のみならず、代替品利用や業務撤退等、リスクの回避も検討する。一方、損失が小さく、頻度も低いものは、準備金や経常費用等による経済的復旧を担保したリスクの保有も可能である。

第四に、対策の監視と再評価が必要である。如何なる対策も、時間とともに効果を失っていく。設備の保全や更新、マニュアルの精査、従業員教育等、継続的取り組みが不可欠である。また、新たな技術の導入および規制や社会的要請の変化等に伴い、リスクも変化する。コスト

とのバランスを確保しながら、効果的にリスクを低減するためには、リスクの再抽出と再評価を行い、さらに対策を講じるサイクルを確立することが必要である⁽³⁴⁾。

悲劇の大半は、悪意ではなく、市民としては善良な人々が、一時の不注意、混乱、逸脱等に陥ることで起きている。戦略的リスクマネジメントを活用することは、こうした事態を予防し、倫理的ジレンマへの直面を回避するとともに、事故や環境破壊を防ぐことで、技術者倫理の実効性を高めるといえる。

また、実務的解決策には、波及的效果も期待できる。第一に、技術者倫理に対する組織的合意が得やすくなる。安全や環境保護等を企業戦略の一部に位置づけること及びリスクマネジメントにより損失を回避することは、技術者倫理が利益目標に貢献する可能性を明示し、技術者の発言力と自律性を強化することにもつながる。第二に、安全や環境保護への意識を全社的に醸成できる。経営者や事務系従業員と技術者の間の認識格差は、事故や対立の要因のひとつである。格差の完全な排除を求めることは無意味だが、リスク情報の周知は可能であり、必要な施策である。一方で、技術者自身は、設備や技術を無意識のうちに過信し、それらが破綻した際のリスクを軽視する傾向もある。全社的取り組みを促すことは、技術者自身の客観性も高めるのである。

3. 二つのスペースシャトル事故再考

ーチャレンジャー号の教訓は活かされたのかー

1986 年のスペースシャトル・チャレンジャー号の事故は、技術者倫理の教科書が頻繁に扱う事例のひとつで、組織と対立する技術者のジレンマを描くものだ。事例の大半は、チャレンジャーの固体燃料ロケットを製造するモートン・サイオコール社（以下、「サ社」と略す。）の担当技術者、ロジャー・ボイジョリーが、打上げの前夜に、打上げ中止を求める場面から始まる。明朝の打上げ時には、従来にない低い気温が予想され、彼は、ロケット接合部にある O 型シールド・リングの弾性低下とそれに伴う燃料漏れを懸念したのである。しかし、NASA は彼の主張を受け入れず、サ社経営陣も打上げ中

止勧告を撤回した。チャレンジャーは予定通りに発射台を離れ、搭乗員 7 名の命が失われた。事故後、ボイジョリーは、サ社経営陣が打上げ中止勧告を撤回した事実を証言したために、つまり従業員としての守秘義務違反により、サ社から懲戒処分を受けた。ところが、彼は、後に、アメリカ科学技術進歩協会（AAAS）から、「惨事は防げなかったが、専門職としての責任を遂行した」倫理的技術者として表彰され、多くの教科書でも紹介されている。一方、サ社経営陣と NASA の担当者には、安全を軽視して、打上げを強行した印象が与えられた。

確かに、悲劇的事故は、サ社経営陣と NASA の判断の誤りを証明した。しかし、人的エラーの原因を即ち個人の倫理観に求めても、チャレンジャーをはじめとする重大事故の核心には到達できず、再発は防げない⁽³⁵⁾。そこで、NASA とサ社の組織にまで分析の対象を広げ、打ち上げ前夜以前の問題点を指摘した後、採用可能であった解決法を検討する。

第一の問題点は、NASA 内部で O リングに係るリスク情報が滞留したことである。O リングは、事故には至らなかったが、過去のフライトで度々トラブルを起こしていた。安全管理部門も問題を把握していたが、情報は他の部署に伝達されなかった。一方、シャトルの各部品は、実際のトラブルとは別に、トラブル発生時の重大性に応じてランク付けされる。O リングのランクは、事故前に最高度に変更されていたが、多くの規定には変更が反映されず、安全管理部門さえも変更を把握していなかった。NASA は、O リングのリスクを抽出及び評価していたが、発生頻度の情報と損失規模のそれが統合されず、組織としてはリスクが過少評価された状態を放置していたのである。結局、打上げ前夜、全ての NASA の職員は、誤った O リングのリスク評価を前提に、着々と作業を進めていたのである。

第二に、NASA とサ社が、O リングの問題を議論した状況の悪さである。NASA 安全管理部門は、低温時の O リングの問題を認識しており、サ社でも改良への模索が続いていた。しかし、両者が、この問題を打上げの可否と結びつけて検討したのは、驚くべきことに打上げ前夜

であった。ボーイングが必死で中止を求めても、もはやダイヤどおりに出発する列車を止めるようなものである。サ社の技術担当副社長は、「いつもは準備完了の証明を求められたが、そのときは未了の証明を求められた。」と証言したが、これは単に NASA の担当者が打上げを焦ったのではない。打上げ可能気温の下限が明確でない状況では、ルールを遵守しようとしたのは NASA 側で、「ルールを破ろうとする」サ社に説明を求める奇妙な状況が生まれていた。当然、「ルールを破る」ことは難しく、チャレンジャーは悲劇を迎えたのだ。

このように、当事者たちの倫理観や打上げ前夜の判断のみを問うだけでは、事故の核心を理解し、再発を防ぐことはできない。協力会社のサ社を含め、シャトル計画におけるリスクマネジメントの欠如が、打上げ前夜という切迫した状況で、関係者の判断を誤らせた点にこそ着目すべきである。そこで、再発防止の観点から、NASA が事前に採り得た施策を検討する必要がある。

第一に、情報の取扱方法を厳密に規定する必要がある。Oリングに関する情報の滞留は、周知すべき情報の種類が規定されていなかったことを示している。また、Oリングのリスク評価の変更が他の規定に反映しなかったことは、各種規定の相互関係及び改正手続きが不明確であったためだ。組織では様々な価値観の者が混在し、情報の選別を個人の判断に委ねれば、必要な情報が滞留し、不要な情報の氾濫で必要情報が埋没する。また、情報の伝達先を各人が判断すれば、伝達の漏れや遅れは避けられない。リスク情報を中心に、伝達すべき情報の種類及び伝達先等の取扱方法を明確に規定する必要がある。

第二に、打上げの意志決定を規定化する必要がある。この事故では、打上げ前夜になって中止が検討された。客観的判断を求めることは必要だが、既述のとおり、人間は状況に影響されることを前提にすべきである。特に、時間や環境の制限を受けながら試行錯誤の対応をすると、過誤が生じやすいため、極力事前に規定化する必要がある。このケースでも、Oリングの改良が完了しない限り、打上げ可能最低気温等

を事前に規定し、それを下回る気温の場合には、機械的に打ち上げが中止されるようにすべきであった⁽³⁶⁾。

チャレンジャーの事例は、事故の原因を個人の問題に矮小化せず、実際に事故を予防する仕組みの必要性を示しているが、肝心の NASA には浸透しなかった。2003 年 2 月 1 日、地球へ帰還途上のコロンビアが空中分解、再び 7 名の命が失われた。同年 1 月 16 日の打上げ時に、外部燃料タンクから脱落した断熱材が機体左翼を損傷、大気圏突入の際に、損傷部から高温の空気が流入し、機体を破壊したのである。シャトルでは、過去にも断熱材の脱落が頻発していたが、NASA は、対策を講じていなかった。2003 年 8 月 26 日に公表されたコロンビアの最終事故調査報告書も、NASA における安全管理の欠如を厳しく批判したが、その内容の多くはリスクマネジメントの確立や飛行スケジュールの緩和等、17 年前の報告書とほぼ同様のものである⁽³⁷⁾。チャレンジャー事故に関する従来事例研究の多くは、個人の倫理観を重視するが、組織全体の戦略やマネジメントを改善しない限り、事故は防げないのである。

4. 技術者倫理と組織の接合

このように、如何に技術者個人の倫理観が高くとも、技術者の生み出す便益や損害が組織を通じて公衆に供される現実の前には、安全や環境を重視する組織戦略とそれを実現するマネジメントが不可欠である。確かに、戦略策定やマネジメントは、技術者の業務や技術者倫理の領域ではないとの考えもあるだろう。しかし、技術による危害の防止及び福利の増大という技術者倫理の目的を勘案すれば、そのための戦略策定や工学的リスクのマネジメントは、技術者の本来業務である。技術者倫理教育の実効性を高めるには、技術者の特殊性を十分に考慮した領域を設定し、問題を解決する具体的方策を提示する必要があるのだ。

幸い、技術者倫理と同様の背景から、経営倫理の研究・教育も進んでおり、社会に貢献することで利益を得るという組織の根本的使命を迫る努力が払われている⁽³⁸⁾。特に、近年は、米国ではエンロンやワールドコムに代表される

不正会計問題、日本では BSE に係る補助金搾取や食品の不正表示等、経営管理的要因による事件が相次ぎ、経営倫理への関心は高まっている。これらの成果は、技術者の特殊な状況に全ては対応できないが、組織の側からも、技術者倫理との接合点が用意されつつあるといえる。

第5章 カリキュラム案と今後の展望

1. われわれのとるべき基本方針

これまでの検討を踏まえ、本章では技術者倫理教育実施のための基本方針を具体的に検討してみたい。

まず、高専に技術者倫理カリキュラムを設置しようと仮定すると、以下のような2つの異なる基本方針が存在することに気づく。一方を「ミニマム対応」、他方を「マキシマム対応」と仮に呼び表してみよう。前者は、技術者倫理に関わる2～3の事例を数回の講義で理解すれば足りるとする考えである。これは主に大学院課程や実務経験のあるエンジニアへの教育を前提としているが、必要最小限の対応で足りるとする方針ともいえる。後者のマキシマム対応に関しては、より広い知識を付与することが不可欠であるとする考えであるが、この場合は必要となる教育内容の範囲をどのように設定するかが問題となる。

われわれは後者の方針を採用したいと考えているが、その教育内容の範囲を設定する方針として、JABEE 副会長の小野田武（三菱化学（株））による次のような説明に注目した。小野田によれば技術者倫理には、「人間としての倫理」、「職業倫理」、「一般的技術者倫理」、「専門分野技術者倫理」の4層構造があるという。さらに個人的感触と断った上で、「それ故、技術者教育の入口から出口に到る適切な段階での豊富な事例により、現実感のある形で習得させることが必要になるのではないかと指摘している⁽³⁹⁾。もちろん4層構造という指摘そのものについての有効性を検討することも不可欠ではあるが、それでも小野田による指摘は、技術者倫理教育の範囲および取り組み方に1つの見通しを与えている。特に、高専本科（5年制）の場合、エンジニア教育を受ける年齢が、中学卒

業から成人になるまでと長く、また心身両面での成長期に当たっており、そのため、成長に合わせて4層構造に相当する倫理教育を実施することは、技術者倫理教育の成功の決め手になると考えられるからである。

したがって、われわれは「ミニマム対応」ではなく各学年ごとに対応した技術者倫理教育を行うという「マキシマム対応」の立場に立ち、以下のような技術者倫理教育カリキュラム案を提案したい。

2. 学年対応の段階別カリキュラムの提案

高専本科の場合を想定し、学年別に対応したカリキュラムとして、次のような4段階別の教育方針を提案してみたい。

第1の段階は、1，2年次に行うもので、特定の一般科目、専門科目の中に「技術者倫理」問題に接する最初の機会をつくる。これは「人間としての倫理」の段階と考えても良い。また一部に「職業倫理」を加えても良いだろう。第2の段階は、3年次に特定の一般科目の中で扱う。歴史的事例を利用して「職業倫理」について学習すると考えても良い。第3の段階は、4年次に独立した科目として「技術者倫理」を設置し、ここで総合的に「技術者倫理」を学ぶ。技術者倫理そのものについて体系的に学び、グループ討論などを通して、学生自身の倫理観を明確な形へと造り上げるきっかけとする。第4の段階は、5年次に専門科目の中で数回、技術者倫理に関わる内容を教える。技術者一般というレベルではなく、機械工学や物質工学などの特定の専門科目に限定して、実際の研究機関、企業等において想定される問題を素材にして、実践的な技術者倫理問題を検討する。これは「専門分野技術者倫理」に相当するといっても良い。

3. 独立「技術者倫理」科目の場合

各科目の一部で取り上げる倫理教育の検討は今後の課題とし、ここでは上記の第3段階に想定される独立科目としての「技術者倫理」（一般的技術者倫理に相当する内容）について、そのシラバス原案を提示してみたい。期間としては、半期（1単位、15回、演習含む）、講義形態としては、座学を中心としながらも、映像講

習, 演習 (グループ討論など) を組み合わせて行うものと想定する。

- (1) なぜ技術者倫理なのか? : 技術者倫理が問題となった事例 (最近の事例)
- (2) いま技術者倫理はどのように扱われているのか? : 「技術者倫理」講義成立の背景 (海外動向, JABEE, 学会綱領), 討論
- (3) ~ (5) 技術者倫理を理解するための基礎知識
 - (1) : 倫理学と技術者倫理 (環境倫理, 生命倫理, 情報倫理, 安全学など), 討論
- (6) ~ (8) 技術者倫理を理解するための基礎知識
 - (2) : ケーススタディ (公害, 環境汚染, 巨大事故, 技術評価), 討論
- (9) ~ (11) 技術者倫理を理解するための基礎知識
 - (3) : 企業活動と技術者 (企業倫理, 製造物責任法, 規制法, 失敗学など)
- (12) ~ (13) 技術者倫理を理解するための基礎知識
 - (4) : 映像資料などを利用した事例研究
- (14) ~ (15) 現実問題に見る技術者倫理問題
実務経験者などによる事例研究, 事例分析

4. 残された課題

すでに技術者倫理教育を実施した実践報告によれば, 受講生に業務経験がある場合とない場合で, 技術者倫理問題への理解度が大きく異なるという。これも学年に対応した段階区分の必要性を示している例かもしれない。ただし, われわれの提案したカリキュラム案にも克服すべき課題が存在していることも説明しなければならない。

内容面では, 学生の意識をどのように高めることができるかである。知識としての技術者倫理を伝えることは, ある意味では容易であるといえる。しかし技術者倫理教育の目指していることは, 現実社会で引き起こされるきわめて実践的で複雑な問題の理解である。社会経験の少ない学生にどれだけ差し迫った問題として課題を伝えるか, 学生が主体的に技術者倫理の問題に関わることができるのか。形式的な教育に終わらないためのカリキュラム研究が不可欠である。また運営面では, 教官の連携体制が不可欠であるという点だ。技術者倫理教育を担当する専門教官も不可欠であるが, 問題は専門教官を中心として, その他の一般科目教官, 専門科

目教官とがどのように「技術者倫理教育」という課題を共有できるかにある。一部の教官にしか寄せを被らせることなく, 適切な協力関係が構築されることが理想である。また講師として技術者 OB, 高専 OB などに協力を依頼することも検討すべき課題であろう。

高専における技術者倫理教育が形式的な科目に留まらず, 技術者教育, エンジニア教育の不可欠な科目となるかどうかの成否は, こうした協力体制にかかっているとみえる。

注と文献

- (1) 文部科学省編『平成 14 年版 科学技術白書一知による新時代の社会経済の創造に向けて』財務省印刷局, 2002 年。
- (2) 毎日新聞社科学環境部『理系白書—この国を静かに支える人たち』講談社, 2003 年, では理系人をオタクと同じようなイメージで捉える人がいることを紹介している。また技術者に十分な「自覚」があるかも問題視されている。オウム真理教サリン事件 (1995 年) や東海村 JCO 臨界事故 (1999 年) あるいは一連のコンピュータ・ウイルスの拡大などは「社会常識に欠ける専門技術者」, 「閉鎖された空間で働く専門技術者」というイメージを広めてしまったともいえる。
- (3) 札幌順は, 科学技術倫理 (Science and Engineering Ethics: SEE) を, 「科学および技術の実践で為される行為の善悪, 正不正や, その他の関連する価値に対する判断を下すための規範体系の総体, ならびに, その体系の継続的・批判的検討」であると説明している。北海道大学プロジェクト研究「科学技術倫理の研究及び教育方法の開発」編『公開シンポジウム「テクノエシックスの現在」報告書』2002 年, 21 頁。
- (4) 例えば, 柴山知也「論説 土木技術者の倫理教育」『工学教育』49 巻 2 号, 2001 年, 21 頁, がある。
- (5) JABEE が示す基準の中で, 以下の説明が技術者倫理の内容に相当すると見なせる。「技術の社会および自然に及ぼす影響・効果に関する理解力と技術者としての技術および組織に対する責任を自覚する能力」。
- (6) 情報源として http://www.cs.kyoto-wu.ac.jp/jssts/upcoming_events/2001/info.pdf がある。また同 HP の

- 情報によれば、同研究所の紹介として以下のような説明がされている。「学技術者に関わる倫理・道徳・法律上の問題を批判的に分析・検討し、科学技術者の社会的責任について総合的な研究を行い、その成果を教育に還元する方法を研究しています。」
- (7) シンポジウムの内容は、大貫徹他『工学倫理の条件』晃洋書房、2002 年、より刊行されている。
<http://www.info.human.nagoya-u.ac.jp/lab/phil/need/> .
- (8) <http://www.info.human.nagoya-u.ac.jp/lab/phil/OCSTE/index.html> 参照.
- (9) <http://www.hucc.hokudai.ac.jp/~k15696/home/teigen.htm> 参照.
- (10) <http://www.histec.me.titech.ac.jp/course/rinri2001.htm> 参照.
- (11) 京都大学哲学教室で発表された論文を次の HP で閲覧できる。<http://www.bun.kyoto-u.ac.jp/phil/>
- (12) 日本機械学会「技術と社会」部門に設置された「技術者倫理分科会」、日本工学教育協会、関東工学教育協会などでの取り組みなどがある。また 2001 年に設立した科学技術社会論学会でも、技術者倫理に関わる研究が報告されている。
- (13) 日本技術士会訳編『科学技術者の倫理 その考え方と事例』丸善、1998 年、同『科学技術者倫理の事例と考察』丸善、2000 年。
- (14) 古野二三也『工学の倫理を考えるー四十余年の体験を通して』日本図書刊行会、1997 年、はやや理念的議論が強い。また中村収三『実践的工学倫理ーみじかく、やさしく、役に立つー』化学同人、2003 年、は PL 法などにテーマを絞り、コンパクトなテキストとしているが、修士課程で行った講義を元に執筆された点からも分かるように、初学者にはやや情報不足の感じが残る。
- (15) 杉本泰治、高城重厚『第二版 大学講義 技術者の倫理』丸善、2002 年、齊藤了文、坂下浩司『はじめての工学倫理』昭和堂、2001 年、谷垣昌敬、吉村忠与志、戸島貴代志『技術者倫理入門』オーム社、2003 年。
- (16) 科学技術者倫理が Transdisciplinary であると札野順は指摘している。前掲 注 (3)、22 頁。
- (17) M. Quante, A. Vieth, "Angewandte Ethik oder Ethik in Anwendung?" *Jahrbuch für Wissenschaft und Ethik*, Bd.5, W. de Gruyter, 2000, S.8
- (18) 水谷雅彦、越智貢、土屋俊編著『情報倫理の構築』新世社、2003 年、217 頁。
- (19) 藤本温編著『技術者倫理の世界』森北出版、2002 年、56 頁。
- (20) 齊藤了文、坂下浩司編著『はじめての工学倫理』昭和堂、2001 年、185 頁。
- (21) そのような環境論者について以下の拙稿で論じた。川北晃司「環境保護の逆説と手段ー M. リドレーの「技術と環境」論によせて」『生命・環境・科学技術倫理研究 VII-1』千葉大学、2002 年、75-84 頁。
- (22) 日本技術士会訳編『環境と科学技術者の倫理』丸善、2000 年、140 頁。
- (23) 札野順「技術の実践における倫理の諸問題と技術者倫理教育」『哲学』日本哲学会編、2003 年、48 頁。
- (24) 山田健二「倫理工学としての工学倫理」京都大学哲学研究室 *Prospectus* No3、2000 年。
- (25) 齊藤了文「工学倫理の考え方」京都大学哲学研究室 *Prospectus* No3、2000 年。パターナリズムは、父を意味するラテン語の *pater* から派生した語である。自分の子ではない相手に対して、あたかも親のようにふるまうことは、特定の状況において正当化されることもあれば、されない場合もあるだろう。パターナリズムは、患者に対する処置をめぐって医学や医療の分野でよく問題になるところである。
- (26) 決疑論とは、与えられた事例における行為の適正なモラル評価を、参考事例と比較して決める方法である。参考事例は、モラル評価に疑問のないものである。そして設計問題とのアナロジーについては、倫理学者としては S. トゥールミンがすでに類似の見解を 1951 年の著 *The Place of Reason in Ethics* のなかで展開している。
- (27) 宇井純『公害原論／合本』1990 年（原文は 1971 年初出）、亜紀書房、62 頁、225 頁。
- (28) 宮本純之『反論！化学物質は本当に怖いものか』化学同人、2003 年、208 頁。
- (29) 河村豊「技術事故の歴史についての予備的考察ー環境に与える技術事故の影響と事故原因論の枠組みー」『イル・サジアトーレ』No.24、1996 年 31-38 頁。
- (30) 例えば、三好信浩『明治のエンジニア教育ー日本とイギリスのちがい』中公新書、1983 年や、L. ロルト（磯田浩訳）『工作機械の歴史ー職人の技

からオートメーションへ』平凡社, 1989 年, などがある。

- (31) 河村 豊, 田中浩朗, 山口直樹, 矢島道子, 常石敬一「シンポジウム: 日本戦時科学史の現状と課題」日本科学史学会第 50 回年会, 2003 年 6 月。
- (32) 例えば, 武田邦彦他「技術者倫理教育と工学教育の整合性」『工学教育』50 巻 1 号, 2002 年, 32 頁, は, 技術者の身分が保障されていない現状を考えれば, 「たった今講義を行った倫理に沿った行為は行わないほうがよいとの注釈をつけざるをえない。」として, 慎重な技術者倫理教育を求めている。
- (33) 定量的には, $\text{リスクの大きさ} = \text{発生頻度} \times \text{損失規模}$ の式で評価できる。
- (34) リスクマネジメント実施体制の詳細は, JIS Q2001 を参照。簡便な解説書としては, 三菱総合研究所政策工学研究部編『リスクマネジメントガイド』日本規格協会, 2000 年他。
- (35) 以下の業績も同様の評価を与えている。D. Vaughan, *The Challenger Launch Decision*, Chicago Univ. Press, 1996, J. リーズン (塩見弘監訳)『組織事故』日科技連, 1999 年。
- (36) 指摘した内容を含め, チャレンジャーの事故調査報告書は, 計 9 項目の勧告を行った。U.S. Presidential Commission on the Space Shuttle Challenger Accident, *Report*, 1986。
- (37) Columbia Accident Investigation Board, *Report*, 2003。
- (38) 例えば, 水谷雅一『経営倫理学の実践と課題』白桃書房, 1995 年, 梅津光弘『ビジネスの倫理学』丸善, 2002 年等。
- (39) 小野田武「工学教育の向上と国際標準化」, 前掲注(3) 30 頁。

「技術者倫理」基本文献一覧

- ・米国科学アカデミー編 (池内了訳)『科学者をめざす君たちへ』化学同人, 1996 年。
- ・吉野二三也『工学の倫理を考えるー四十余年の体験を通してー』日本図書刊行会, 1997 年。
- ・日本技術士会訳編『科学技術者の倫理ーその考え方と事例ー』丸善, 1998 年。
- ・C・ウィットベック (札野順, 飯野弘之訳)『技術倫理 1』みすず書房, 2000 年。
- ・京都大学哲学研究室紀要 *Prospectus* No.3, 2000。

＜特集・工学倫理を考える＞, 内容: 齊藤了文「工学倫理の考え方」, 伊藤 均「倫理綱領に関する一考察」岩崎豪人「工学倫理と技術者の倫理」, 羽地亮「工学倫理はペイするかー美浜原発 3 号機のコンクリート大量加水事件をめぐって」, 山田健二「倫理工学としての工学倫理」。

- ・齊藤坂下『はじめての工学倫理』昭和堂, 2001 年。
- ・芝山知也『建設技術者の倫理と実践』丸善, 2001 年。
- ・伊藤 均「設計問題と倫理問題のアナロジー 工学倫理教育を接点として」京都大学哲学研究室 *Prospectus* No.4, 2001。
- ・中村収三「工学倫理教育を考えるー日米を比較して」『化学』Vol.56 No.7, 2001 年。
- ・杉本泰治, 高城重厚『第二版 大学講義 技術者の倫理入門』丸善, 2002 年。
- ・藤本温編, 川下智幸, 下野次男, 南部久幸, 福田孝之『技術者倫理の世界』森北出版, 2002 年。特徴: 佐世保高専関係者による執筆であること。
- ・R.シンジガー, M.マーティン (西原英晃他訳)『工学倫理入門』丸善, 2002 年。
- ・飯野弘之『新・技術者になるということーこれからの社会と技術者 三訂版』雄松堂出版, 2002 年。
- ・大貫徹, 坂下浩司, 瀬口昌久編『工学倫理の条件』晃洋書房, 2002 年。
- ・D.G.ジョンソン (水谷雅彦, 江口聡監訳)『コンピュータ倫理学』オーム社, 2002 年。
- ・荒木芳彦「工学倫理をどう学ぶか」日本化学会編『化学と工業』2002 年 11 月, 12 月号。
- ・新田孝彦, 石原孝二, 柏葉武秀 (北海道大学大学院文学研究科倫理学講座編)「公開シンポジウム「テクノエシックスの現在」報告書, 北海道大学プロジェクト研究「科学技術倫理の研究及び教育方法の開発」, 2002 年。
- ・菊池重秋「日本化学会・会員行動規範の制定過程」『埼玉学園大学紀要 経営学部篇』第 2 号, 2002 年 2 月, 83-91 頁。
- ・中村収三『実践的工学倫理ーみじかく, やさしく, 役に立つー』化学同人, 2003 年。
- ・谷垣昌敬, 吉村忠与志, 戸島貴代志『技術者倫理入門』オーム社, 2003 年。

(平成15年 9 月30日 受理)

圧電素子を用いたホロノミックなマイクロロボットの試作研究 (第 1 報)

松林勝志*, 内田雄大**, 平沼千紘***, 小坂敏文****

Prototype Development of a Holonomic Micro-Robot Driven by Piezoelectric Actuators (1st Report)

Katsushi MATSUBAYASHI, Odai UCHIDA, Chihiro HIRANUMA, Toshifumi KOSAKA

Various micro-robots are developed in order to realize the "Desktop Factory". It is the system that throngs of self-propelled micro-machines, that are equipped with machine tools or measuring devices, manufacture ultraprecision products. Because of the limitation of motion characteristics due to the mechanism of conventional micro-robots, the feasible operation of those robots is also limited. In this study, a prototype of holonomic micro-robot that has the ability of omnidirectional movement and no limitation in its feasible operation is developed successfully.

(keywords : Holonomic, Micro-robot, Desktop Factory, PZT)

1. はじめに

工作・計測機器を搭載した、多数の小型自走機械が卓上で群れをなして超精密加工を行う「デスクトップファクトリー」の実現に向けて様々なマイクロロボットの開発研究が行われている。しかし、いずれのマイクロロボットでもその構造に起因する運動特性の制約から、実現できる作業が限定されてしまうことが多い。本研究では全方向に移動でき、実現できる作業が限定されることのない、ホロノミックなマイクロロボットを試作したので報告する。

ホロノミックなマイクロロボットとしては圧電アクチュエータ（以下、PZT）を 4 個用いた十字型のマイクロロボットが開発されている¹⁾が、本研究では PZT 3 個で実現し、かつ、てこ機構を用いて高速に移動できる機構を提案し、駆動回路・ソフトウェアを開発した。最終的には、地球に対する月の運動のように、同じ面を向けながら円筒の周りを公転・自転し、ミクロンオーダーの精度で円筒の溶接が行える運動を実現したい（図 1）。

2. マイクロロボット

2.1 駆動機構・PZT・電磁石

マイクロロボットに搭載される駆動機構は、小

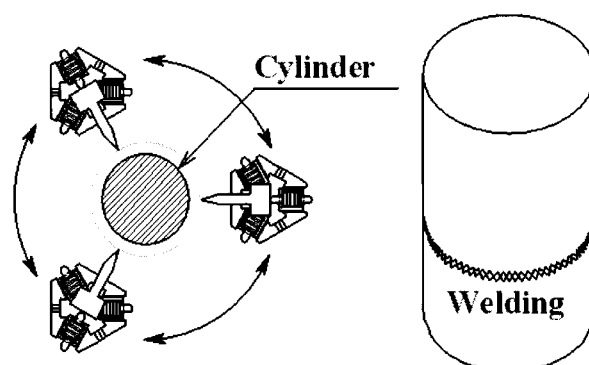


図 1 ミクロンオーダーでの円筒溶接

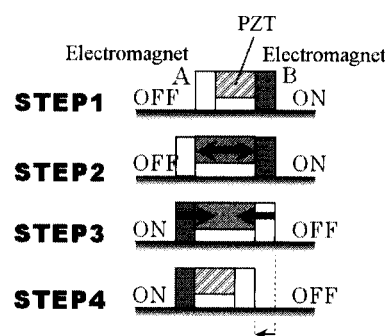


図 2 インチワーム（尺取り虫）動作機構

型で軽量、高速かつ安定した移動が求められるほか、マイクロロボットを用いて加工を行うことを考えると定盤の上に固定できる必要がある。この条件を満たす駆動機構として PZT と電磁石を用

いたインチワーム（尺取り虫）駆動機構を用いている。図 2 にその基本動作を示す。

PZT はサイズと最大変位の大きさから（株）TOKIN 製の"AE0505D08"を使用した。仕様を表 1 に示す。駆動波形は基本的に正弦波であるが、定盤への電磁石の食い付きをよくするため、上下の頂を平らにしている。また発熱による破損の条件から最大駆動周波数を 500Hz とした。

電磁石は、コイル幅を 10mm とし、鉄心材料の磁気特性の悪化を防ぐため発熱量を 1.0W と仮定した。表 2 にコイルの基本仕様を示す。

基本仕様から鉄心の周りにニクロム線を n 回巻いたときにコイルに流せる最大電流 I と、発生磁化力 H を求めた。 H をそのときの電磁石の自重で割り、その値が最も高いコイル巻き数(7 層 290 回)を採用した。理論計算の結果を表 3 に示す。

2.2 従来型

(1) 非ホロノミックなマイクロロボット

インチワーム駆動方式を用いたマイクロロボットとしては標準的な構造である PZT 2 個を平行に配置した構造のロボット³⁾を製作し、駆動回路とソフトウェアを独自に開発することで、基礎技術と開発に必要なノウハウを取得した(図 3)。しかしこの構造では、前進・後退・旋回・回転動作のみで、全方向への移動はできない(図 4)。

(2) 走行性能

図 5 に走行性能の例として直線駆動させた場合の結果を示す。PZT 駆動周波数 500Hz において 30mm/s 以上の速度を実現した。これまで開発されてきた同種のロボットの速度が数 mm/s であること³⁾を考えると格段に高速である。また左右の PZT の駆動波形の位相を 180° ずらし、旋回運動させたところ、約 2.5deg/sec となった。

2.3 ホロノミックなマイクロロボット

(1) 駆動原理

全方向に移動させるため、図 6 に示すように PZT と電磁石をそれぞれ 3 個ずつ用い、三角形を成すように配置した。例えば、E0 方向への直線運動と時計回りの回転運動をする場合の駆動シーケンス例を表 4 に示す。

PZT の駆動電圧、すなわち振幅を制御しない場合は、 60° 毎の 6 方向に直線移動可能である。

表 1 PZT の仕様

型式	AE0505D08		
使用温度範囲[$^\circ\text{C}$]	-25~85	発生力[N]	850
最大駆動電圧[V]	150	共振周波数[kHz]	138
推奨駆動電圧[V]	100	引張り強度[N]	100
変位量(推奨電圧時)[μm]	6.1 ± 1.5	ヤング率[GPa]	44
絶縁抵抗[M Ω]	50		
静電容量[pF]	$0.75 \pm 20\%$		

表 2 コイルの基本仕様

コイル幅[mm]	10
鉄心直径[mm]	4.4
鉄心質量[g]	4.74
ニクロム線直径[mm]	0.26
コイル発熱量[W]	1.0

表 3 コイルの巻き数

層数	巻き回数	コイル外径[mm]	ニクロム線長さ[m]	電磁石質量[g]	抵抗値[Ω]	電流値[A]	磁化力[$\times 10^3 \text{ A/m}$]	磁化力 $\times 10^{-3}$ / コイル質量
5	208	7.3	3.67	6.22	1.38	0.85	17.7	2.85
6	250	7.8	4.59	6.59	1.72	0.76	19.0	2.88
7	292	8.2	5.57	6.99	2.09	0.69	20.1	2.89
8	333	8.7	6.62	7.41	2.49	0.63	21.1	2.85
9	375	9.2	7.73	7.86	2.90	0.59	22.0	2.80

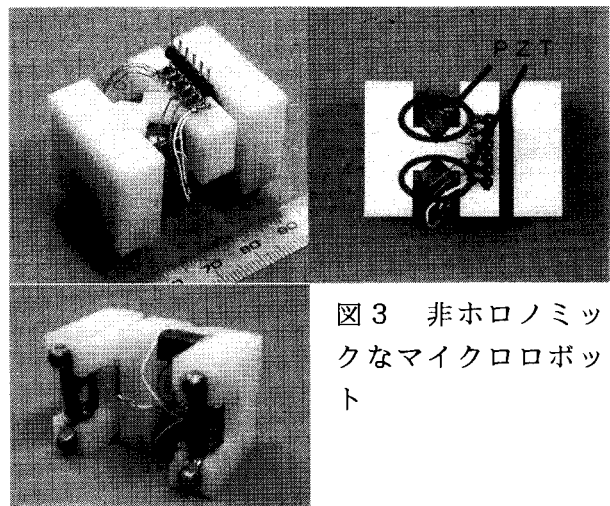


図 3 非ホロノミックなマイクロロボット

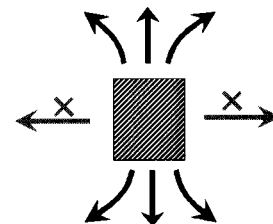


図 4 運動特性の制約

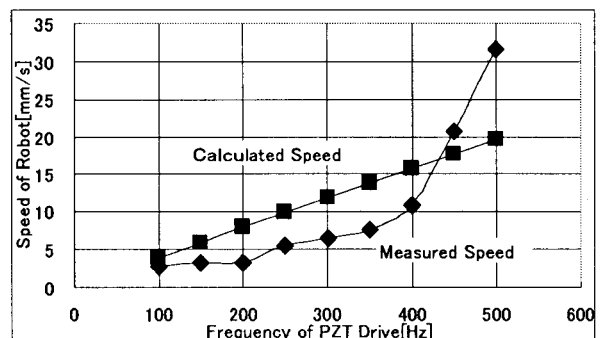


図 5 走行性能（直線駆動）

PZT の振幅を制御する場合は、移動方向の制約はなくなる。しかし、PZT の振幅がミクロンオーダーであることと、数百 Hz で PZT を駆動することを考慮すると、6 方向の組み合わせにより移動方向の制約を解消する方がソフトウェアの負担は軽くなる。微少な歩幅が必要な場合には PZT の振幅の制御が有効である。

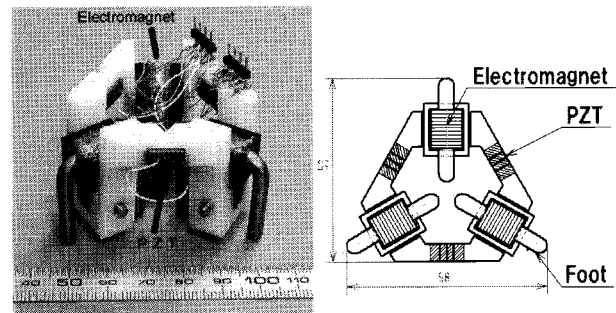


図6 ホロノミックなマイクロロボット

(2) てこによる変位拡大機構

使用した PZT の変位は、約 $6 \mu\text{m} / 100\text{V}$ と非常に小さいので、高速移動を実現するため、PZT と電磁石の間にてこ機構を用いて変位を拡大している (図7)。低速移動あるいは微少な歩幅が必要な場合は、PZT の駆動周波数・電圧を変更して調整する。

(3) 足の回転自由度

ある程度の不整地や曲面であっても移動動作を可能にするため、図8に示すように電磁石に回転自由度を持たせた。

(4) 駆動回路

従来型のマイクロロボット開発時に設計した回路を元に、ホロノミックタイプロボット駆動用に設計変更し基板を開発した。この基板は従来型のロボットにも使用できるよう汎用性を持たせてある。PZT はマイコンの D/A 出力を増幅し、両振幅で 100V の正弦波で駆動する。電磁石は必要な磁力を急峻に発生させ、定盤への食い付きをよくするため電流値をフィードバックし、0.7A 定電流で駆動する (表3)。

(5) システム全体

図9、図10にシステム全体を示す。マイコンは4枚使用する。1台をホストとし、残りの3枚それぞれがクライアントとして1組の電磁石/PZT の駆動を担当する。このような構成にすることで、多少のリソースの無駄は発生するが、クライアントマイコンはすべて同じソフトウェアで済み、またホストマイコンは、オブジェクト指向的なプログラミングを行うことができる。コントローラは操作性に優れたプレイステーション用のゲームパッドを使用した。

(6) 駆動試験

図11に直線駆動の走行試験結果を示す。ソフトウェアの調整が完全ではなく、実験の駆動周波数は 300Hz までとなった。単純にロボットの幾

表4 駆動シーケンス例

	Sequence	Electromagnet			PZT			Motion
		E0	E1	E2	P0	P1	P2	
Straight (E0)	1	OFF	ON	OFF	[←→]	[←→]	[←→]	E0-UP
	2	ON	OFF	OFF	[←→]	[←→]	[←→]	E1 2-UP
Rotation (CW)	1	OFF	ON	ON	[←→]	[←→]	[←→]	E0-CW
	2	ON	OFF	ON	[←→]	[←→]	[←→]	E1-CW
	3	ON	ON	OFF	[←→]	[←→]	[←→]	E2-CW

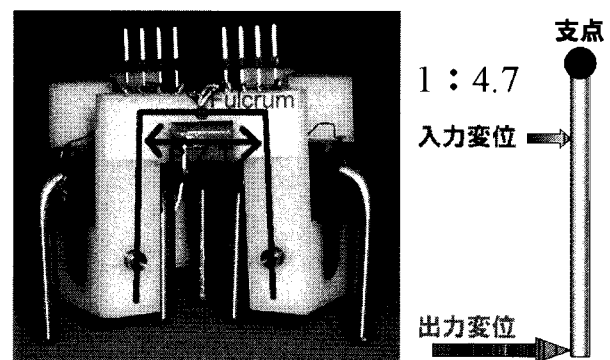
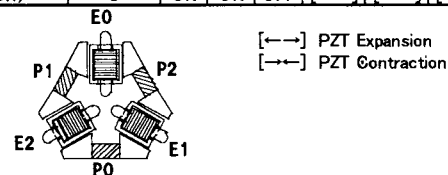


図7 てこによる変位拡大

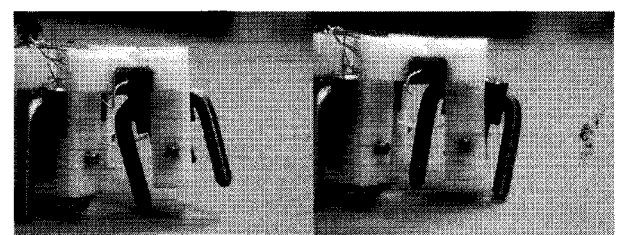


図8 足 (電磁石) の回転自由度

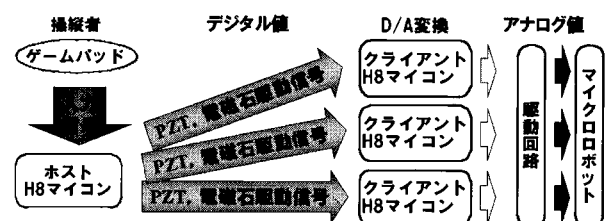


図9 システム全体

何学的な形状から計算される移動量は 1 パルスあたり $24.4 \mu\text{m}$ であることから、ロボットの速度を計算すると、

PZT 駆動周波数 50Hz 時、 1.22mm/s

PZT 駆動周波数 300Hz 時、 7.32mm/s

となる。走行試験の結果はこの計算値の $1/3 \sim 1/4$ 程度ということになる。

その場での回転（自転）駆動についての実験結果を表 5 に示す。測定値は計算値の $1/4 \sim 1/5$ 程度となった。

(7) 考察

(6)での計算値は

- ・ロボット本体が支点以外は剛体で変形が無い
- ・ベアリング、軸受部のガタが無い
- ・足と定盤の間で滑りが無い

という条件での計算結果であり、現実にはこのようなことはありえないので、測定値は実験値より小さくなる。

図 1 1 の約 180Hz 付近で移動速度が極小になっている。これは、図 1 2 に示すように、ロボット本体はジュラコン（ポリアセタール）の一体構造となっており、1 カ所の PZT を駆動するとその振動はボディ全体に伝わってしまうことを確認している。つまりなんらかの共振現象による可能性がある。

3. まとめ

PZT 3 個を用いて全方向に移動できるホロノミックなマイクロロボットを提案・試作し、駆動回路・ソフトウェアを開発し、駆動実験に成功した。今後の課題を示す。

- ・高周波数駆動のためのソフトウェアの改良
- ・足（電磁石）の回転自由度付近のガタの調整
- ・ロボット本体の共振現象の数値解析

参考文献

- 1) 淵脇大海, 庄司裕一, T.Chomchana、青山尚之、小型自走機械群による超精密生産機械システム（第 49 報）XY θ の自走機械の開発, 2001 年度精密工学会春季大会講演論文集, p.627-628, 2001.3
- 2) 青山尚之、小型自走機械群による超精密生産機械システム（第 1 報）自走機械の設計と試作,

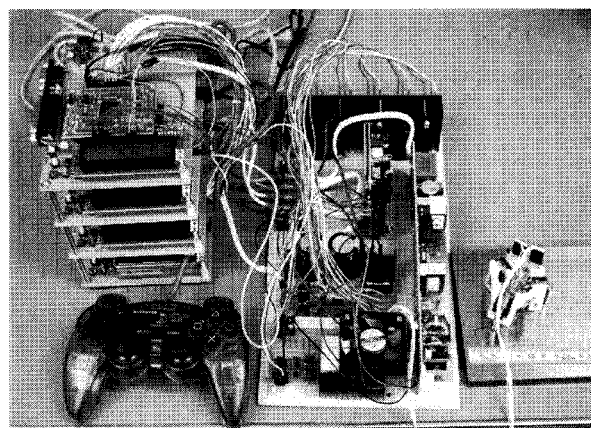


図 1 0 システム全体
左上：マイコン 4 台，左下：コントローラ
中央：駆動回路・電源，右：ロボット

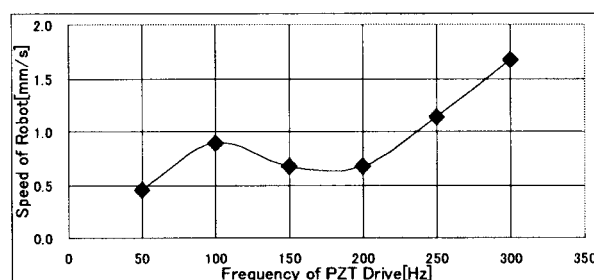


図 1 1 走行試験（直線）

表 5 走行試験（回転）

	Angular Speed [deg/s]	
Measurement	1.46	1.30
Calculation	6.27	6.27

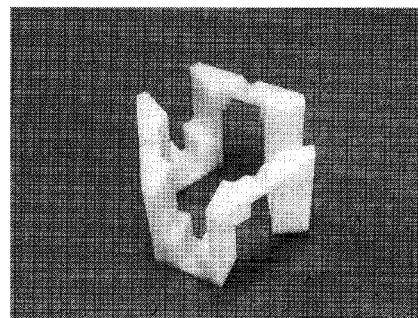


図 1 2 ジュラコン製の本体

1991 年度精密工学会秋期大会講演論文集, p.539-540, 1991.9

3) 平沼千紘, 圧電素子を用いたマイクロロボットに関する研究, 平成 13 年度卒業論文, 東京高専機械工学科

4) 内田雄大, 圧電素子を用いたマイクロロボットに関する研究, 平成 14 年度卒業論文, 東京高専機械工学科

(平成15年 9 月30日 受理)

代数幾何符号を構成する定義曲線の種数に関する一解釈

市村 洋*, 鈴木雅人*

An Interpretation of the Genus of Defined Curve for Algebraic Geometric Codes

Hiroshi ICHIMURA, Masato SUZUKI

In this paper, we report an interpretation of the genus of a defined curve for algebraic geometric codes. We were able to calculate the genus on defined curves with all non-singular points and were able to guarantee the propriety, but could not guarantee that with the singular point using the classical mathematics. We were able to infer the corrective genus with the singular point using the gap sequence of rational functions, the degree of differential form and Hasse-Weil-Serre theorem.

(keywords: Algebraic Geometric Codes, Genus, Differential Form, Euler-Poincare' Theorem, Riemann-Roch Theorem)

1. はじめに

代数幾何符号は、誤り検出訂正符号の一つである代数的符号であり、その中で最長符号を作ることができ、且つ長符号長において $(k/n, d/n)$ の関係が最も優れている。そしていつでも実用化可能なところまで研究がすすんでいる¹⁾。

筆者は、高専情報工学科の卒業研究として、長年この符号の符号構成及び復号法をソフトウェア実装として指導してきた²⁾⁻⁹⁾。そして、その実績を基に情報工学科4年情報数学 II において、誤り検出・訂正符号の応用を意図した離散系代数を教授している。このなかで、有限体上の代数曲線(定義曲線)の種数の概念の説明に苦心している。

本報告では、先ず教科情報数学 II の授業概要を示し、そのなかでの種数(genus)の出現箇所を示し、次いで種数の幾何学的 Euler 標数, Riemann 面の torus (Riemann 面を海に囲まれた島に例え、島の中の湖・沼の数や島を囲む海)²¹⁾の image 的理解方法を示す。そして、複素数上の特異点のない定義曲線の接線数・重複点を Euler-Poincare'の公式への適応を示し、種数の幾何学的解釈法を示す。最後に特異点を有する定義曲線に関して、数学的厳密性を取って無視し、幾何学的直感的理解による導き方を提示する。

情報工学分野は抽象数学が適応できる一分野である。しかしその完全理解や証明が完全にできるまでを待っているのは何時になっても工学への応用はおぼつかない。工学は、公式・定理の本質を理解すれば手段として数学を使い切り、創造的応用の道を切り開くものである。本報告は、有限体上の定義曲線から派生する種数・微分形式に対して直感的解釈を与え、工学教育(代数幾何符号)の有用性を示す。数

学的厳密性は、各学生の以後の向上心に期待したい。

2. 代数幾何符号の概要

誤り検出・訂正符号は、一言 (n, k, d) で表現される。 n :符号長, k :情報記号数, d :設計距離である。良い符号とは、符号長 n が長くとれ、 $(k/n, d/n)$ 順序対が最良のものを言う。代数幾何符号はこれら条件を満たす符号であるとともに、代数的符号(例えば Hamming 符号, BCH 符号, Reed-Solomon 符号等)はすべて代数幾何符号を基に導かれることが知られている¹⁰⁾。電子工学における量子力学の位置づけに似ていると言えよう。このことから工学的応用の側面から代数幾何学を教授することは重要な意味を持つ。

代数幾何符号の概要¹¹⁾⁻²⁰⁾を以下述べよう。

- ・情報記号長 k の 1 記号は有限体 $GF(q)$ の q 。
- ・符号長 n は、 $GF(q)$ 上の定義曲線の有理点。
大きな種数の定義曲線は多くの有理点をとれ、代数幾何符号の特徴である。Reed-Solomon 符号は $g=0$ 。
- ・有理点の一つを生成点に選び(1 点代数幾何符号), Riemann-Roch の定理から微分形式, 有理関数を導く。生成点の微分形式を有理点(生成点を除く。符号長 n)に埋め込み写像し、その像を送信符号に選ぶ。情報記号数 k は微分形式の線形独立元の内を決める。この結果 $n-k$ は送信符号の冗長分となる。
- ・微分形式を構成する線形空間は、有理関数を構成する線形空間と直交する。この性質を使って、有理関数を受信時の検査符号とする。受信符号にこの検査符号を乗算(内積)したものを syndrome と呼ぶ。通信路に雑音が印加されなければこの syndrome は零である。
- ・syndrome が零か非零かを検証するのが誤り検出

*情報工学科

である。

- ・非零の場合、雑音が印加されたと見做し、誤り訂正を行う。誤り訂正は代数幾何学の範囲ではなく、多変数連立方程式の解法問題に帰着し、高速復号の一手法は Gauss の消去法が基になっている。
- ・最大訂正能力は設計距離 d に依存する。代数幾何符号においては、この d は、微分形式の有理点上の埋め込み写像において、零となる最大数によって決まる。その零数を z 、有理点数 n (符号長) とすれば、設計距離は $d \geq n - z$ となる。

3. 代数幾何符号の準備 (情報数学 II)

情報数学 II は、代数幾何符号の応用を強く意図しての授業としている。群・環・体の一般論を教授した後、代数幾何符号の数学的準備として次のような事項を授業している。

(1) 有限体 特に $GF(2^n)$

(2) 座標形

斉次座標形

斜影座標形・affine 座標形

(3) 定義曲線

斉次座標形 $F(X, Y, Z) = 0$

①

affine 座標形 $f(x, y) = 0$

②

over $GF(2^n)$ の有理点、有理関数

(4) 有理関数に関する Riemann-Roch の定理

有理関数の独立性

独立関数集合、次数及び種数*の関係

*空隙値数列として現れる

(5) 定義曲線 over $GF(2^n)$ における微分形式

微分形式の実数上の image

Riemann-Roch の定理

微分形式の独立性

独立元数、次数及び種数**の関係

**微分形式の独立元数として現れる。

(6) 符号 (n, k, d) におけるよい符号とは

$(k/n, d/n)$ の関係

(7) 符号生成における

独立微分形式と有理点の関係

(8) 誤り検出・訂正(復号)とは

行列演算

復号における独立有理関数

高速復号法

(9) 代数幾何符号生成・復号の種数の役割

設計距離までの復号と種数***の関係

***未知 syndrome の推定必要上の種数

以上の数学の枠組みにおいて、本報告では種数の解釈を

- ・ Euler-Poincare' の公式
- ・ Riemann-Hurwitz の公式

・ 複素数上の Riemann 面

・ 定義曲線 over 複素数における接線数及び特異点での尖点・結節点

の関係の基にして、数学的厳密性を犠牲にして image 的に理解できるように工夫する。

4. 種数の解釈

4. 1 定義曲線の種数について

定義曲線(代数曲線)には

・ Fermat 型 斉次座標形 $X^n + Y^n + Z^n = 0$ ③

(例 1 $X^3 + Y^3 + Z^3 = 0$)

・ Klein 型 $X^{n-1}Y + Y^{n-1}Z + Z^{n-1}X = 0$ ④

(例 2 $X^3Y + Y^3Z + Z^3X = 0$)

・ Hermite 型 $X^n + Y^{n-1}Z + YZ^{n-1} = 0$ ⑤

(例 3 $X^5 + Y^4Z + YZ^4 = 0$)

がある。代数幾何符号においては、このうち、有理点数が多くとれ (Hasse-Weil-Serre の限界式 $n \leq q + 1 + g \lfloor 2 \sqrt{q} \rfloor$ ⑥、ただし g は種数、 q は有限体の位数)、有理関数形は簡潔な Klein 型および Hermite 型定義曲線が用いられる。

種数 g は、特異点がない定義曲線においては次数 n より Riemann-Hurwitz の公式から

$$g = (n-1)(n-2)/2 \quad ⑦$$

として求まり、双有理変換において不変な量であり、定義曲線の特徴を示す重要なものである。

定義曲線上の生成点 Q を基にした独立有理関数 f_{ij} は、Riemann-Roch の定理

$$L(mQ) = \{f_{ij} \mid (\text{div}(f_{ij}) + mQ \geq 0, \text{位数 } m \in \text{非負整数})\} \quad ⑧$$

から導かれ、その次元(独立数)は

$$\dim L = \deg L - g + 1 + i(L) \quad ⑨$$

ただし $i(L)$ は、Special Index と称し、有理関数空間 L と相補関係にある微分形式空間 Ω に関係。となり、独立した有理関数 f_{ij} の位数が g 個不連続になる。例えば affine 座標形の Hermite 形定義曲線

$$f(x, y) = x^5 + y^4 + y = 0 \text{ over } GF(q) \quad ⑩$$

生成点 $Q(0:1:0)$

を例にとると、独立有理関数列は

$$L(mQ) = \{1, -1, -2, -3, x, y, -4, -5, x^2, xy, y^2, -6, x^3, x^2y, xy^2, \dots (\text{以下連続})\} \quad ⑪$$

となり、種数 $g=6$ の分だけ不連続な位数 $-i, i=1, 2, \dots, 6$ (空隙値数列) が存在する。

また定義曲線上の微分形式空間 Ω の Riemann-Roch の定理

$$\Omega(mQ - \sum_{i=1}^n P_i) = \{\omega_{ij} \mid \text{div}(\omega_{ij}) - mQ + \sum_{i=1}^n P_i \geq 0\}$$

ただし、 Q は生成点、 $P_i, i=1, 2, \dots, n$ は生成点を除く有理点(符号を構成する点)。

⑫

より求まる。微分形式 ω_{ij} は

$$\omega_{ij} = f_{ij} \omega \quad ⑬$$

であり, その次元は

$$\dim \Omega = \deg \Omega + g - 1 + l(\Omega), \quad l(\Omega) \text{ Special Index} \quad (14)$$

であり, この f_{ij} は⑧式の有理関数である。

ω は, 実数及び複素数上の次の 1 次全微分の image そのものである (図 1)。有理点 $P(x_p, y_p)$ において

$$(\partial f / \partial x)_P \cdot dx = -(\partial f / \partial y)_P \cdot dy \quad (15)$$

が成り立つ。これは,

微少変分 dx による変化量 $(\partial f(x,y) / \partial x)_P$ が緩やか (ごく微少変化) ならば, 対応するごく微少変分 dy による変化量 $(\partial f(x,y) / \partial y)_P$ は急変 (微少変化) となり,

$$\omega = dx / (\partial f / \partial y)_P = -dy / (\partial f / \partial x)_P \quad (16)$$

は, 有理点 P 近傍での定義曲線の属性を示す特徴量と解釈できる。

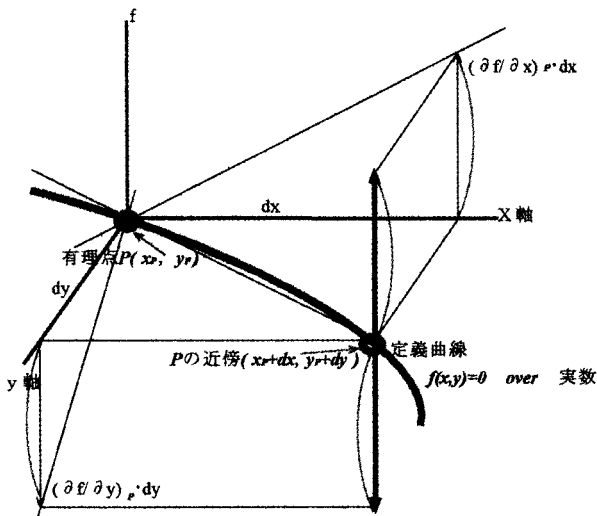


図 1. 実数及び複素数上の 1 次全微分の image 図

4. 2 Euler 標数・Euler-Poincaré'公式・Riemann 面
種数 g は, 幾何的には Euler 標数, その拡張形 Euler-Poincaré'の公式から, そして代数幾何的には Riemann-Hurwitz の公式から導き出せる。

一方, Riemann 面の torus (浮き袋) の空洞数 (空隙数) と微分形式における積分路数 $2g-2$ の解釈ができる。

まず, 立方体の頂点数, 辺数そしてそれら頂点と辺によって閉じた面数をそれぞれ v (vertex), l (line), s (surface) とすると, Euler の標数

$$l - (v + s) = -2 \quad (17)$$

が成り立つ (図 2)。3 角錐の l 数, v 数及び s 数は, それぞれ 6, 4, 4 であり

$$l - (v + s) = 6 - (4 + 4) = 6 - 8 = -2$$

が成り立つ (⑩式通りである)。図 2 は 3 角錐の例であるが, 4 角錐, 多角錐, 立方体, そして多面体でも成り立つ。これらは閉じた立方体に空洞 (空隙) が無い場合であった。

空隙のある場合は, Riemann 面で馴染みのある torus

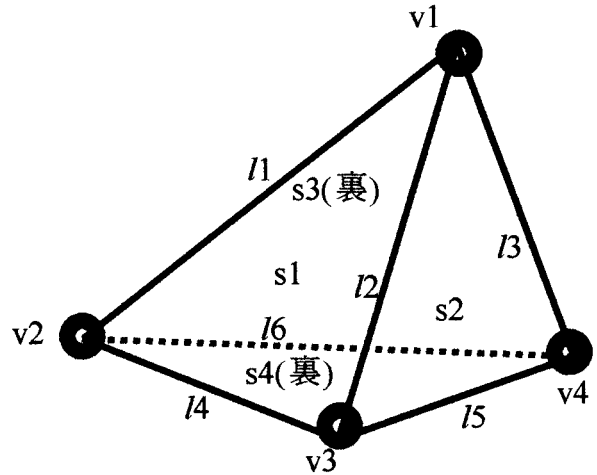


図 2. 三角錐の Euler 標数

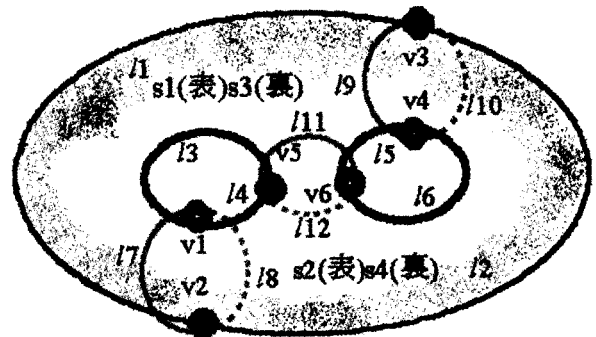


図 3. torus の Euler-Poincaré'公式

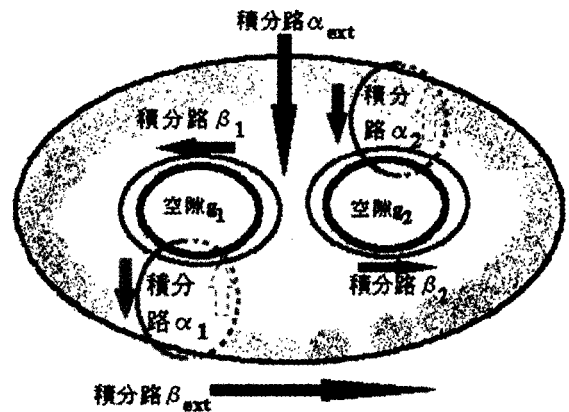


図 4. Riemann 面での積分路

(浮き袋) でこのことを扱うことが多い。ここでもそれに倣う。

torus の空隙数を g とすると, Euler-Poincaré'の公式

$$l - (v + s) = 2g - 2 \quad (18)$$

が成り立つ (図 3)。 $g=2$ の場合, l 数, v 数及び s 数は, それぞれ 12, 6, 4 であり

$$l - (v + s) = 12 - (6 + 4) = 2, \quad 2g - 2 = 2 \cdot 2 - 2 = 4 - 2 = 2$$

⑩式が成り立っている。

次に Riemann 面に複数の空洞(空隙)のある torus (図 4)について次に考察しよう。

空隙値数を g としよう(図 4 では 2)。torus 内の空隙値番号 i の周りの積分路は, $\alpha_i, \beta_i (i=1, 2, \dots, g)$ の 2 つがある。また Riemann 面は, 外側に 1 つの空隙に囲まれているとみなし, 外空隙の積分路を $\alpha_{\text{ext}}, \beta_{\text{ext}}$ とする。そしてこの外側の空隙の周りは, 留数定理で周知のように, 内側の積分値を正とするならば, 負の値をとる。このことから

積分路 on 空隙 $g = 2g-2$ ⑬
が言える。

立方体の Euler 標数, その拡張としての torus 上の Euler-Poincare' の公式を幾何学的な解釈を与えた。さらに $2g-2$ が解析数学的な Riemann 面の積分路数と一致する解釈を与えることができた。

次に, 定義曲線の種数算出法を

- Euler-Poincare' の公式
- Riemann-Hurwitz の公式

からみてゆくことにする。

4. 3 定義曲線の種数算出法

代数幾何符号でよく用いる定義曲線は Hermite 型である。この Hermite 型を基にして種数の算出を幾何的直感的に試みる。そして先ずは, 特異点のない場合について試みる。

A. 通常点のみの定義曲線の種数

Hermite 型定義曲線 over C (複素数), $n \in$ 自然数として

$$\text{斉次座標形 } F(X, Y, Z) = X^n + Y^{n-1}Z + YZ^{n-1} = 0 \quad (5)$$

$$\text{affine 座標形 } f(x, y) = x^n + y^{n-1} + y = 0$$

$$\text{ただし } x = X/Z, y = Y/Z \quad (20)$$

を考える。affine 平面上の②式は

$$\begin{aligned} f(x, y) &= x^n + y^{n-1} + y \\ &= x^n + y(y^{n-2} + 1) \\ &= x^n + y(y + a_1)(y + a_2) \cdots (y + a_{n-2}) \quad (21) \\ &= 0, a_i \in C, i=1, 2, \dots, n-2 \end{aligned}$$

と展開でき

- 生成点 $Q(0:1:0)$
- n 重に接する零点 $n-1$ 個

$$P_1(0:0:1), P_2(0:a_1:1), P_3(0:a_2:1), \dots, P_{n-1}(0:a_{n-2}:1)$$

である(図 5)。

接線数が $n-1$ あって, 各接線は定義曲線と n 重に接している。これは, n 次の曲線(定義曲線 $f(x, y)=0$)において, n 重点を持つ接線数が $n-1$ により

$$\text{総減頂点数} = n(n-1) \quad (22)$$

である。これは, 1 次曲線(直線)により作られる立方体の Euler-Poincare' 公式⑬式において, 頂点数 v が

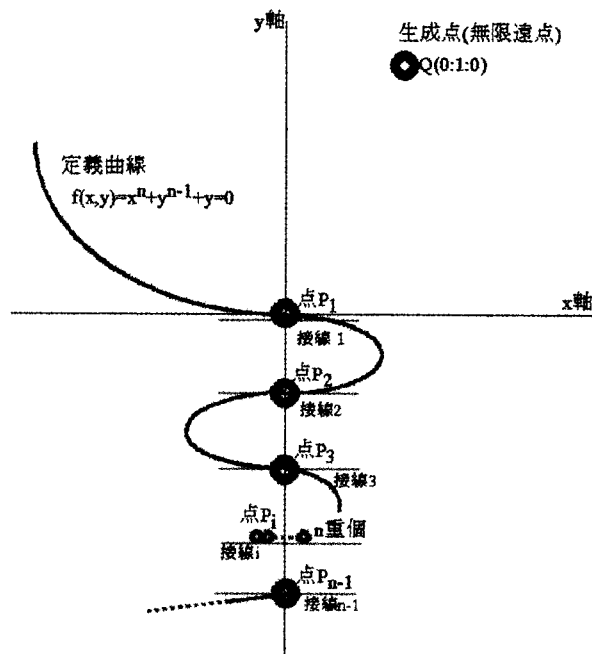


図 5. affine 平面上の定義曲線の幾何学的意味

$v-n(n-1)$ となること(総頂点数減)を意味する。

$$\begin{aligned} 2 \cdot g_{n \text{ 次}} - 2 &= n \cdot \{l - (v+s)\} \text{直線} + \text{総減頂点数} \\ &= n \cdot \{l - (v+s)\} \text{直線} + n \cdot (n-1) \quad (23) \end{aligned}$$

これは Riemann-Hurwitz の公式

$$\begin{aligned} 2 \cdot g_{n \text{ 次}} - 2 &= n \cdot (2g_{\text{直線}} - 2) - \sum P_i (e_{P_i} - 1) \\ e_{P_i} &\text{は各 } P_i \text{ での分岐指数} \quad (24) \end{aligned}$$

でもある。Hermite 型定義曲線例では(21)式のように, 接線数 $n-1$ に分離するので

$$\begin{aligned} 2 \cdot g_{n \text{ 次}} - 2 &= n \cdot \{l - (v+s)\} \text{直線} + n \cdot (n-1) \\ &= n \cdot \{-2\} + n \cdot (n-1) \end{aligned}$$

$$g_{n \text{ 次}} = (n-1)(n-2)/2$$

となり, ⑦式そのものである。

B. 特異点を有する定義曲線の種数

通常点のみ有する定義曲線の種数 g は, 曲線の次数 $n=1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, \dots$ に従って

$$0, 0, 1, 3, 6, 10, 15, 21, \dots$$

n の自乗の order で増加する。代数幾何符号の教育的演習においては, これらの間にある種数も必要になってくる。この種数をつくるには, 特異点(Singular Point)を有する定義曲線が必要となり, その定義曲線の幾何学的構造を考察する。

特異点を有する定義曲線は

斉次座標形

$$F(X, Y, Z)_{\text{singular}} = X^n + Y^{n-m}Z^m + Y^rZ^{n-r} = 0 \quad (25)$$

affine 座標形

$$\tilde{f}(x, y)_{\text{singular}} = x^n + y^{n-m} + y^r = 0 \quad (26)$$

$$\text{ただし } n-1 > n-m \geq 1, n-m > r \geq 1$$

である。(25)式は

$$f(x,y)_{\text{singular}} = x^n + y^r (y^{n-m-r} + 1) = 0$$

に変形できる。項 $y^{n-m-r+1}$ は、複素数 ($b_i \in C^9$ 上で $y+b_i$, $i=1, 2, \dots, n-m-r$ 個) に因数分解できる。すなわち各零点 $P_1, P_2, \dots, P_{n-m-r}$ では n 重の接線をもつ。

このことは、1 次曲線(直線)により作られる立方体の Euler の標数⑩式において、頂点数 v が $v-n(n-m-r)$ となること(総減頂点数)を意味する。

$$\text{総減頂点数} = n(n-m-r) \quad (27)$$

それでは y^r なる不分離項は何を意味するか。この意味を考察しよう。

y^r 項が関係する特異点を $P_{\text{singular}}(0:0:1)$ としよう。ここでは、数学的厳密性は欠くが、この特異点での定義曲線の振る舞いを幾何学的な直感による記述より求める。それは、代数幾何学の blowing up 法 (22)-(25) により特異点解消等の厳密解を求めずとも代数幾何符号の学習及び開発は出来るからである(厳密解に興味を持つ学生は更に数学の次の段階へ進むことを期待して)。次の具体例で検証してゆこう。

$$f(x,y)_{\text{singular}}=x^5+y^2+y=0 \quad (28)$$

この定義曲線の生成点を $Q(0:1:0)$ とすると、この生成点(無限遠点)が特異点である。実数上での定義曲線の通常点 $(0:0:1)$ 及び $(0:-1:1)$ の振る舞いを図 6. a に示す。無限遠点での振る舞いを考察するために斉次座標形 $X^5+Y^2Z^3+YZ^4=0$ の $Y \neq 0$ 面の affine 座標形は次式になる。

$$f(x,z)_{\text{singular}} = x^5 + z^3 + z^4 = 0, \quad x := X/Y, \quad z := Z/Y \quad (29)$$

実数上での特異点 $(0:1:0)$ 及び通常点 $(0:1:-1)$ の振る舞いを図 6. b に、そして特異点での微細構造を図 7 に示す。

(29)式を z について因数分解すると

$$x^5+z^3+z^4=x^5+z^3(z+1)=0$$

となる。通常点 $P_2(0:1:-1)$ において x 軸に 5 重に接する(図 7 接線 2)。特異点 $Q(0:1:0)$ は、 x 軸には 5 重に接する(接線 1)と同時に、直線 $z=cx$ ($c \neq 0$) とは 3 重に接し、特殊な振る舞いをする。総重点数は $5 \cdot 2 + (3-1) = 12$ となり、総減頂点数 $= 12$ と解釈できる。これを (23) 式に代入すると

$$\begin{aligned} & 2 \cdot g_5 \text{ 次 singular} - 2 \\ &= n \cdot \{1 - (v+s)\} \text{ 直線} + \text{総減頂点数} \\ &= 5 \cdot \{-2\} \text{ 直線} + 12 \\ &= -10 + 12 \\ &= 2 \end{aligned}$$

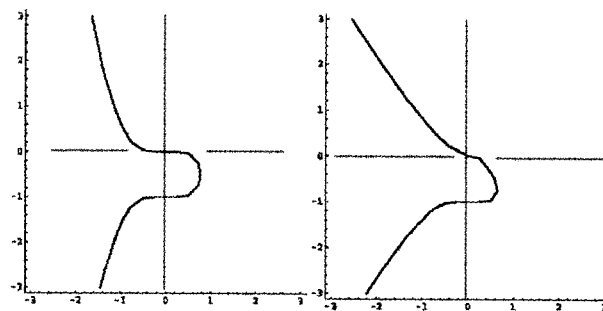
であり、種数 g_5 次 singular=2 となる。

次にこのことに関して代数幾何符号構成法を下記の観点から検証しよう。

- ・有理関数の空隙値数 g
- ・微分形式の次数 $2g-2$

(28) 式, (29) 式の齊次座標形

$$F(X,Y,Z)=X^5+Y^2Z^3+YZ^4=0 \text{ over GF}(2^n) \quad (30)$$



a. 通常点 (0:0:1) 近傍の振る舞い b. 特異点 (0:1:0) 近傍の振る舞い

図 6. $X^5+Y^2Z^3+YZ^4=0$ over 実数の affine 平面

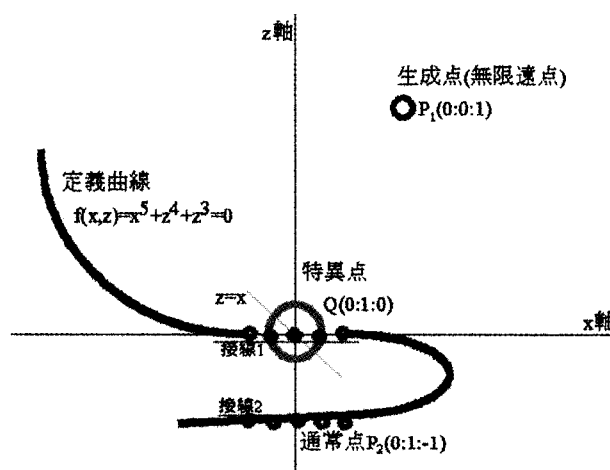


図7. 特異点の微細構造

の主因子 (Principal Divisor) は

$$X=0 \rightarrow F(0,Y,Z)=Y^2Z^3+YZ^4=YZ^3(Y+Z)=0$$

$$\text{div}(X) = P_1(0:0:1) + 3O(0:1:0) + P_2(0:1:1)$$

$$Y=0 \rightarrow F(X,0,Z)=X^5=0$$

$$\operatorname{div}(Y)=5P_1(0:0:1)$$

$$Z=0 \rightarrow F(X,Y,0)=X^5=0$$

$$\text{div}(Z) = 5Q(0:1:0)$$

$$\text{div}(x) = \text{div}(X/Z) = -2O(0:1:0) + P_1(0:0:1) + P_2(0:1:1)$$

$$\operatorname{div}(\mathbf{y}) = \operatorname{div}(Y/Z) = -5Q(0:1:0) + 5P_1(0:0:1)$$

となり，有理関数空間に関する Riemann-Roch の定理

⑧式から有理関数 f_{ij} は

$f_{00}=1, f_{10}=x, f_{20}=x^2, f_{01}=y, f_{30}=x^3, f_{11}=xy, \dots$
が求まり、生成点 O での極位数はそれぞれ

$0, 2, 4, 5, 6, 7, \dots$

となり，空隙値極位数は 1, 3 である。

このことより

$$\therefore g=2$$

$\Omega(mO)$ 空間の微分形式 ω を導出しよう。

生成点 Q での一意化局所変数は $t_Q = y/x^3$ であるから,

⑫式の部分空間の微分形式は

$$t_{p_1}=x, \quad t_{p_2}=x, \quad dt_{p_1}=dt_{p_2}=dx$$

$$t_0 x^3 = y, \quad x^3 dt_0 + t_0 x^2 dx = dy$$

$$x^5 + y^2 + y = 0, \quad x^4 dx + dy = 0$$

$$\begin{aligned} dx &= x^4/y^2 dt_Q \\ \omega &= dx/(\partial f/\partial y)_Q = dy/(\partial f/\partial x)_Q \\ &= dx/1_Q = dy/x^4_Q = x^4/y^2_Q dt_Q, dt_{P_1}, dt_{P_2} \\ &= 0^2 dt_Q, dt_{P_1}, dt_{P_2} \end{aligned}$$

となる。標準因子 (Canonical Divisor) は
 $\text{div}(\omega) = 2Q(0:1:0) + 0P_1(0:0:1) + 0P_2(0:1:1)$

となり、次数は

$$\deg(\omega) = 2 = 2g - 2$$

である。

$$\therefore g = 2$$

C. 各定義曲線の種数一覧

特異点を持つ各種 Hermite 型定義曲線の種数を表 1 に示す。

$$x^n + y^{n-m} + y = 0 \quad (z^n + z^m + z^{n-1} = 0), \quad 2 \leq m \leq n-2 \quad (31)$$

において n が偶数 (表 1 においては $n=4, 6$) の場合 g の

- ・直感的幾何学的計算
- ・有理関数の空隙値数計算
- ・微分形式の次数計算

が非負有理数となってしまうときがある (g は非負整数)。種数は非負整数であるので、特異点を有す定義曲線の真の種数は高度な数学的厳密解から導けようが、ここではその代わりに、前述 3 つの計算方法に Hasse-Weil-Serre の限界式

$$n \leq g + 1 + g \lfloor 2 \sqrt{q} \rfloor \quad (6)$$

も加えて、真の種数を推定することにした。そのことを備考に示す。

表 1. 特異点を含む定義曲線の種数一覧

定義曲線		種数	備考
$x:=X/Z, y:=Y/Z$	$x:=X/Y, z:=Z/Y$		
$x^4+y=0$	$x^4+z^3=0$	0	
$x^4+y^2+y=0$	$x^5+z^2+z^3=x^5+z^2(z+1)=0$	1	† 1
$x^4+y^3+y=0$	$x^4+z+z^3=x^5+z(z+i)(z-i)=0$	3	
$x^5+y=0$	$x^5+z^4=0$	0	
$x^5+y^2+y=0$	$x^5+z^3+z^4=x^5+z^3(z+1)=0$	2	
$x^5+y^3+y=0$	$x^5+z^2+z^4=x^5+z^2(z+i)(z-i)=0$	4	
$x^5+y^4+y=0$	$x^5+z+z^4=x^5+(z-1)(z+a)(z+b)=0$	6	
$x^6+y=0$	$x^6+z^5=0$	0	
$x^6+y^2+y=0$	$x^6+z^4+z^5=x^6+z^4(z+1)=0$	2	† 2
$x^6+y^3+y=0$	$x^6+z^3+z^5=x^6+z^3(z+i)(z-i)=0$	5	† 3
$x^6+y^4+y=0$	$x^6+z^2+z^5=x^6+z^2(z-1)(z+a)(z+b)=0$	7	† 4
$x^6+y^5+y=0$	$x^6+z+z^5=x^6+z(z+a)(z+b)(z+c)=0$	10	

備考 † 1 $x^4+y^2+y=0$

- ・ $x^4+z^2+z^3=0$ over 複素数
 $2g-2=-4 \cdot 2+4 \cdot 2+0$ (孤立 1 点は vertex), $\therefore g=2$
- ・ GF(3) 有理点 $P_0(0:1:0), P_1(0:0:1), P_2(0:2:1)$
 $P_3(1:1:1), P_4(2:1:1)$
GF(32) の場合、有理点は 15 点。

有理関数の主因子 $x:=X/Y, z:=Z/Y$

$$\text{div}(x^2/z) = -2P_1 + 2P_2$$

$$\text{div}(x) = -3P_1 + 2P_0 + P_2$$

$$\text{div}(z) = -4P_1 + 4P_0$$

$$\text{ただし } \text{div}(x/z^{1/2}) = -P_1 + P_2 \quad x/z^{1/2} \notin L(mP_1)$$

・有理関数列は

$$\{1, -1, x^2/z, x, z, x^3/z, \dots\}$$

であり、空隙値数 1 すなわち $\therefore g=1$ 。

・一意化局所変数 $tp_1^4=1/z, tp_0^4=z, tp_2=x$

$$dz = z dt_{P_0}/tp_0, dz = tp_0^3 dt_{P_0}, dx = dt_{P_2}$$

$$\text{微分形式 } \omega = z/x^3 dt_{P_1}/tp_1, z/x^3 dt_{P_0}/tp_0, 1/2z dt_{P_2}$$

$$\text{標準因子 } \text{div}(\omega) = 0^4 dt_{P_1} + 0^3 dt_{P_0}$$

$$\text{次数 } \deg(\omega) = 4-3=1=2g-2$$

$$\therefore \text{種数 } g=1.5$$

・Hasse-Weil-Serre の限界式

$$5=n \leq g+1+g \lfloor 2 \sqrt{q} \rfloor, q=3 \Rightarrow 5 \leq 4 \quad \text{矛盾}$$

$$g=0 \rightarrow 5 \leq 4 \quad \text{矛盾}$$

$$g=1 \rightarrow 5 \leq 7 \quad \text{妥当}$$

$$15=n \leq g+1+g \lfloor 2 \sqrt{q} \rfloor, q=3^2 \Rightarrow 15 \leq 10 \quad \text{矛盾}$$

$$g=0 \rightarrow 15 \leq 10 \quad \text{矛盾}$$

$$g=1 \rightarrow 15 \leq 16 \quad \text{妥当}$$

以上から種数 $g=1$ と推定。

備考 † 2 $x^6+y^2+y=0$

・ $x^6+z^4+z^5=0$ over 複素数

$$2g-2=-6 \cdot 2+6 \cdot 2+2, \therefore g=2$$

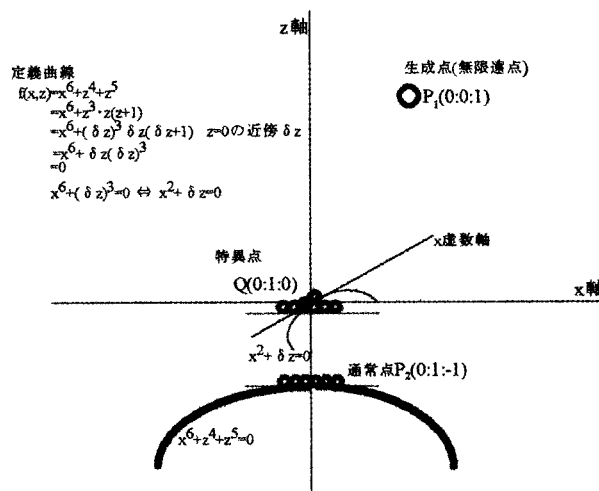


図 8. $x^6+z^4+z^5=0$ 特異点の微細構造

・GF(3) 有理点 $Q(0:1:0), P_1(0:0:1), P_2(0:2:1)$
 $P_3(1:1:1), P_4(2:1:1)$

有理関数の主因子 $x:=X/Y, z:=Z/Y$

$$\text{div}(x^3/z^2) = -3P_1 + 3P_2$$

$$\text{div}(x^2/z) = -4P_1 + 2Q + 2P_2$$

$$\text{div}(x) = -5P_1 + 4Q + P_2$$

$$\text{div}(z) = -6P_1 + 6Q$$

$$\text{div}(2z+1) = -6P_1 + 3P_3 + 3P_4$$

ただし

$$\operatorname{div}(x/z^{1/2}) = -2P_1 + Q + P_2, \quad x/z^{1/2} \notin L(mP_1)$$

・有理関数列は

$$\{1, -1, -2, x^3/z^2, x^2/z, x, z, x^5/z^3, \dots\}$$

であり, 空隙値数 2 すなわち $\therefore g=2$.

・一意化局所変数 $t_{P_1}^5=1/x, t_{Q^4}=x, t_{P_2}=x, t_{P_3}=t_{P_4}^3=2z+1$

$$dx=2xdt_{P_1}/t_{P_1}, dx=t_Q^3dt_Q, dx=dt_{P_2}, \dots$$

$$\text{微分形式 } \omega = z/x^3 dt_{P_1}/t_{P_1}, z/x^3 dt_Q/t_Q, 1/2z dt_{P_2}, \dots$$

$$\text{標準因子 } \operatorname{div}(\omega) = 0^{12}dt_{P_1} + 0^{15}dt_Q + 0^3dt_{P_3} + 0^3dt_{P_4}$$

$$\text{次数 } \deg(\omega) = 12 - 15 + 3 + 3 = 3 = 2g - 2$$

$$\therefore \text{種数 } g=2.5$$

・Hasse-Weil-Serre の限界式

$$5=n \leq q+1+2|g| \sqrt{q}|_g| = 3+1+2|g| \sqrt{3}|_g| = 4+2|g| \cdot 1.7 \cdot |g|$$

$$g=0 \rightarrow 5 \leq 4 \quad \text{矛盾}$$

$$g=1 \rightarrow 5 \leq 6 \quad \text{妥当}$$

$$g=2 \rightarrow 5 \leq 10 \quad \text{妥当}$$

以上から種数 $g=2$ と推定。

備考 ↑ 3 $x^6+y^3+z^5=0$

・ $x^6+z^3+z^5=0$ over 複素数

$$2g-2=-6 \cdot 2+6 \cdot 3+2, \therefore g=5$$

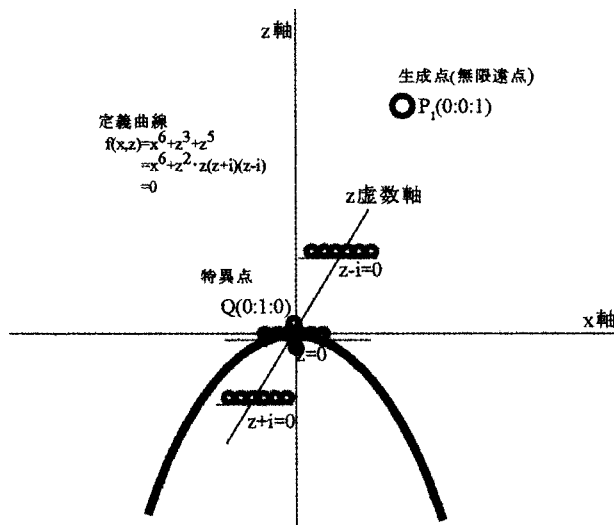


図 9. $x^6+z^3+z^5=0$ 特異点の微細構造

・GF(5) 有理点 $Q(0:1:0), P_1(0:0:1), P_2(0:2:1), P_3(0:3:1)$

有理関数の主因子 $x:=X/Y, z:=Z/Y$

$$\operatorname{div}(x^2/z) = -4P_1 + 2P_2 + 2P_3$$

$$\operatorname{div}(x) = -5P_1 + 3Q + P_2 + P_3$$

$$\operatorname{div}(z) = -6P_1 + 6Q$$

ただし

$$\operatorname{div}(x/z^{1/2}) = -2P_1 + Q + P_2, \quad x/z^{1/2} \notin L(mP_1)$$

・有理関数列は

$$\{1, -1, -2, -3, x^2/z, x, z, -4, x^4/z^2, x^3/z, \dots\}$$

であり, 空隙値数 4 すなわち $\therefore g=4$.

・一意化局所変数 $t_{P_1}^6=1/z, t_{Q^6}=z, t_{P_2}=t_{P_3}=x$

$$dz=zdt_{P_1}/t_{P_1}, dz=zdt_Q/t_Q, dx=dt_{P_2}=dt_{P_3}$$

$$\text{微分形式 } \omega = z/x^5 dt_{P_1}/t_{P_1}, z/x^5 dt_Q/t_Q, dt_{P_2}/3z^2, dt_{P_3}/3z^2, \dots$$

$$\text{標準因子 } \operatorname{div}(\omega) = 0^{18}dt_{P_1} + 0^{10}dt_Q + 0^0dt_{P_2} + 0^0dt_{P_3}$$

$$\text{次数 } \deg(\omega) = 18 - 10 + 0 + 0 = 8 = 2g - 2$$

$$\therefore \text{種数 } g=5$$

・Hasse-Weil-Serre の限界式

$$46=n \leq q+1+2|g| \sqrt{q}|_g| = 52+1+g|2| \sqrt{52}|_g| = 26+g|10|_g|$$

$$g=0 \rightarrow 46 \leq 26 \quad \text{矛盾}$$

$$g=1 \rightarrow 46 \leq 36 \quad \text{矛盾}$$

$$g=2 \rightarrow 46 \leq 46, g=3 \rightarrow 46 \leq 56, g=4 \rightarrow 46 \leq 66$$

$$g=5 \rightarrow 46 \leq 76$$

以上から種数 $g \geq 2$ であり, 4 or 5 と推定。

備考 ↑ 4 $x^6+y^4+z^5=0$

・ $x^6+z^2+z^5=0$ over 複素数

$$2g-2=-6 \cdot 2+6 \cdot 4+0 (\text{孤立 1 点は vertex}), \therefore g=7$$

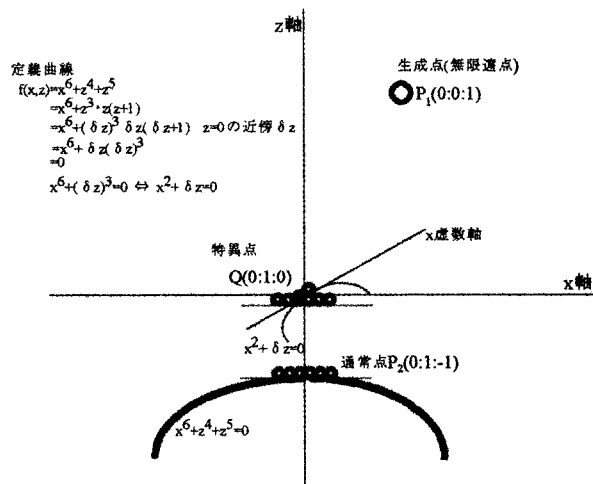


図 10. $x^6+z^2+z^5=0$ 特異点の微細構造

・GF(7) 有理点 $Q(0:1:0), P_1(0:0:1), P_2(0:3:1), P_3(0:5:1), P_4(0:6:1)$

有理関数の主因子 $x:=X/Y, z:=Z/Y$

$$\operatorname{div}(x) = -5P_1 + 2Q + P_2 + P_3 + P_4$$

$$\operatorname{div}(z) = -6P_1 + 6Q$$

$$\operatorname{div}(x^3/z) = -9P_1 + 3P_2 + 3P_3 + 3P_4$$

$$\text{ただし } \operatorname{div}(x^{2/3}/z^{1/3}) = -3P_1 + P_2 + P_3 + P_4$$

$$x^{2/3}/z^{1/3} \notin L(mP_1)$$

・有理関数列は

$$\{1, -1, -2, -3, -4, x, z, -5, -6, x^3/z, x^2, xz, z^2, -7, x^4/z, x^3, x^2z, xz^2, \dots\}$$

であり, 空隙値数 7 すなわち $\therefore g=7$.

・一意化局所変数 $x:=X/Z, y:=Y/Z$

$$\operatorname{div}(x) = -4Q + P_1 + P_2 + P_3 + P_4$$

$$\operatorname{div}(y) = -6Q + 6P_1$$

$$t_{Q^4}=1/x, t_{P_1}=t_{P_2}=t_{P_3}=x$$

$$dx=4t_Q^3x^2dt_Q, dx=dt_{P_2}=dt_{P_3}=dt_{P_4}$$

$$\text{微分形式 } \omega = t_Q^3x^2dt_Q/(y^3+2), 2dt_{P_1}/(y^3+2),$$

$$\begin{aligned}
 & dt_{p_2}/(y^3+2), dt_{p_3}/(y^3+2) \\
 \text{標準因子 } \operatorname{div}(\omega) &= 0^3 \cdot 8^+ 1^8 dt_{Q_2} \cdot 0^0 dt_{p_1}/t_{p_1} \cdot 0^0 dt_{p_2} \cdot 0^0 dt_{p_3} \\
 &= 0^1 3 dt_{Q_2} \cdot 0^0 dt_{p_1}/t_{p_1} \cdot 0^0 dt_{p_2} \cdot 0^0 dt_{p_3} \\
 \text{次数 } \deg(\omega) &= 13+0+0+0=13=2g-2 \\
 \therefore \text{種数 } g &= 7.5
 \end{aligned}$$

以上から種数 $g=7$ と推定。

5. まとめ

代数幾何符号は種数の大きい定義曲線上で意味を持ってくる。しかし筆算による符号構成及び復号法を学ぶのには、多大な労力を要する。そこで情報数学においては比較的小さい種数の定義曲線をつくり教授している ($g=2$ 程度)。しかし特異点のない定義曲線の種数は、 $\{0, 1, 3, 6, 10, 15, 21, \dots\}$ と増加してゆき、 $g=2, 4, 5, 7$ はつくれなない。特異点を有する定義曲線によりそれをつくることができた (表 1) が、一方、その計算法は数学的に高度で難解な方法でないと厳密解を求められない。これでは工学教育には有効ではない。本報告では、工学応用を意図して直感的に算出し、その結果を image 的に理解できる方法を示した。また、種数の本質を数学教科書で引用される Euler 標数, Euler-Poincaré 公式及び Riemann 面からも関連づけさせることができ、種数の直感的理解を容易化した。紙面の都合で割愛したが、授業では Bezout の曲線の交差も触れ、より直感的理解を容易にしている。

本報告では Hasse-Weil-Serre の限界式を用いて種数の推定確度を高める方法を述べたが、備考 2-4 においては、符号長を最長にする有限体 $GF(q)$ との関係から種数推定を明示できなかった。このことは最適有限体を見つけることであり今後の課題としたい。

参考文献

- 1) 松井 一, 馬継尚弘, 三田誠一: "代数曲線符号 に対する二次元シストリックアレー復号器の性能", 第 25 回情報理論とその応用シンポジウム予稿集 Vol.II, pp.487-490 (2002-12).
- 2) 市村 洋, 中林 撰, 佐々木信一, 大野 研: "通信プロトコルの目視検証システムの試作", 情処学会第 41 回全国大会, 1C-5, pp.1・9-10 (1990-09).
- 3) 市村 洋: "誤り検出・訂正の目視検証システムの試作", 電情通学会, 信学技報 ET94-52, pp.55-62 (1994-07).
- 4) 市村 洋: "卒業研究の工学実験還元方法の一考察 (その 2 誤り検出・訂正の目視検証)", 平成 6 年度高専情処教育研究会, 研究発表会論文集, pp.77-80 (1994-08).
- 5) 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", 東京高専研報第 26 号, pp.47-63 (1994-12).
- 6) 今井 繁, 沼上幸夫, 市村 洋: "誤り検出・訂正符号の目視検証システムにおける復号部分のハードウェア化", 平成 7 年度電情通学会東京支部学生研究発表会, 32, 1 頁 (1996-03).
- 7) 沼上幸夫, 今井 繁, 市村 洋: "多重誤り検出・訂正の目

視検証システム", 平成 7 年度電情通学会東京支部学生研究発表会, 33, 1 頁 (1996-03).

- 8) 市村 洋, 藤井敦子, 南川千恵, 岩下信親, 沼上幸夫, 今井 繁: "通信規約/誤り検出・訂正符号の目視検証システムの開発", 東京高専研報第 28 号, pp.49-56 (1996-12).
- 9) 市村 洋, 青野正宏, 鈴木雅人, 小野寺 栄, 岩佐千夏, 原田 健: "BMS アルゴリズムを用いた代数幾何符号高速復号のソフトウェア実装と教育的応用", 東京高専研報第 33 号, pp.63-70 (2001-09).
- 10) R.Pellikaan, B.-Z.Shen, and G.J.M. van Wee: "Which Linear Codes are Algebraic-Geometric?", IEEE, Transaction on Information Theory, Vol.37, No.3, pp.583-602 (1991-05).
- 11) 市村 洋, 桂川泰祥: "(9, 6) 代数幾何符号の生成因子について", 東京高専研究報告書第 26 号, pp.65-71 (1994-12).
- 12) 市村 洋, 桂川泰祥: "BSC 手順の制御文字誤りに対する符号理論の部分的適用の一考察", 情報理論とその応用学会, SITA'95 予稿集 [第 1 分冊], pp.17-20 (1995-10).
- 13) 市村 洋, 桂川泰祥: "代数幾何符号における標準因子・微分形式とその応用例", 東京高専研報第 27 号, pp.61-68 (1995-12).
- 14) 市村 洋, 鈴木雅人: "代数幾何符号における微分形式の一考察", 情報理論とその応用学会, 情報理論とその応用学会, SITA'96 予稿集 [第 2 分冊], pp.541-544 (1996-12).
- 15) 市村 洋, 鈴木雅人: "代数幾何符号の復号法と検査行列の種数に伴う規則性について", 東京高専研究報告書第 29 号, pp.51-58 (1997-12).
- 16) 市村 洋: "代数幾何学は何故協力的な誤り訂正符号をつくれるか", 東京高専科学技術センター年報第 6 号, pp.32-35 (1997-03).
- 17) 市村 洋, 鈴木雅人: "代数幾何符号の検査行列を構成する有理関数と種数の規則性について", 情報理論とその応用学会, SITA'97 予稿集 [第 1 分冊], pp.17-20 (1997-12).
- 18) 市村 洋, 鈴木雅人: "代数幾何符号における未知シンδροーム推定時の BMS アルゴリズム乗数と Feng_Rao 階段行列・階数の関係について", 情報理論とその応用学会, SITA'98 予稿集 [第 2 分冊], pp.547-550 (1998-12).
- 19) 市村 洋, 鈴木雅人: "誤り訂正符号の復号における行列式による極小多項式の簡潔表現について", 東京高専研報第 30 号, pp.41-48 (1998-12).
- 20) 市村 洋, 鈴木雅人: "代数幾何符号復号の BMS アルゴリズムと行列式表現の関係について", 東京高専研報第 31 号, pp.29-36 (1999-12).
- 21) 難波 誠: "代数曲線の幾何学", 現代数学社 (1995-09).
- 22) 河田敬義: "代数曲線論入門", 至文堂 (1968-05).
- 23) 飯高 茂: "代数幾何学 I, II, III", 岩波書店 (1976-09).
- 24) 上野健爾: "代数幾何入門", 岩波書店 (2001-07).
- 25) H. Stichtenoth: "Algebraic Function Fields and Codes", Springer-Verlag (1993).

(平成15年 8 月28日 受理)

微分方程式と線形代数

拜 田 稔*

Differential Equations and Linear Algebra

Minoru HAIDA

Here we would like to complement our lessons in linear algebra taught at our college. We apply linear algebra to solve linear differential equations. We omit proofs of some famous theorems. Please refer to books cited at the end.

(keywords : Differential Equation, Linear Algebra)

1 線形代数の基礎

定義 1.1 線形空間 U から線形空間 V への線形写像 f に対して、像空間 (image) $\text{Im } f$ と核空間 (kernel) $\text{Ker } f$ を

$$\text{Im } f := \{f(\vec{x}) \in V; \vec{x} \in U\} \quad (1.1)$$

$$\text{Ker } f := \{\vec{x} \in U; f(\vec{x}) = \vec{0}\} \quad (1.2)$$

と定義する。

定義 1.2 m 行 n 列の行列 $A = (a_{ij})$ によって表される、 $\mathbf{R}^n$ から $\mathbf{R}^m$ への線形写像を T_A で表す。特に、 A が n 次の正方行列のとき、 A のトレース $\text{Tr } (A)$ を、 $\text{Tr } (A) := \sum_{i=1}^n a_{ii}$ と定義する。また、 A の p 個の行と p 個の列の交差する成分から成る行列を A の p 次小行列といい、その行列式を p 次小行列式という。さらに、正則行列 P が存在して、 $P^{-1}AP$ が対角行列となるとき、 A は P で対角化可能という。

定理 1.3 $A = (a_{ij})$ は m 行 n 列の行列とし、 $\text{rank } (A) = r$ とするとき、

$$\dim \text{Im } T_A = r, \quad \dim \text{Ker } T_A = n - r. \quad (1.3)$$

よって、 $\vec{x} = {}^t(x_1, x_2, \dots, x_n)$ とするとき、方程式 $A\vec{x} = \vec{0}$ は $n - r$ 個の 1 次独立な解をもつ。また、次元公式：

$$\dim \text{Im } T_A + \dim \text{Ker } T_A = n \quad (1.4)$$

が成り立つ。

証明 $\text{rank } (A) = r$ より、正則行列 P, Q が存在して、

$$PAQ = \left(\begin{array}{c|c} E_r & O \\ \hline O & O \end{array} \right)$$

が成り立つ。ただし、 E_r は r 次単位行列で、 O は適当な零行列とする。このとき、

$$\begin{aligned}\dim \operatorname{Im} T_A &= \dim\{A\vec{x}; \vec{x} \in \mathbf{R}^n\} \\ &= \dim\{PAQ\vec{y}; \vec{y} \in \mathbf{R}^n\} \\ &= \dim\{{}^t(y_1 \ y_2 \cdots y_r \ 0 \ 0 \cdots 0) \in \mathbf{R}^n; y_1, y_2, \cdots, y_r \in \mathbf{R}\} \\ &= r.\end{aligned}$$

一方、 $\vec{y} = Q^{-1}\vec{x}$ とおくと、 $A\vec{x} = \vec{0}$ と $PAQ\vec{y} = \vec{0}$ は同値であるから、

$$\begin{aligned}\dim \operatorname{Ker} T_A &= \dim\{\vec{x} \in \mathbf{R}^n; A\vec{x} = \vec{0}\} \\ &= \dim\{\vec{y} \in \mathbf{R}^n; PAQ\vec{y} = \vec{0}\} \\ &= \dim\{({}^t(0 \ 0 \cdots 0 \ y_{r+1} \ y_{r+2} \cdots y_n) \in \mathbf{R}^n; y_{r+1}, y_{r+2}, \cdots, y_n \in \mathbf{R}\} \\ &= n - r.\end{aligned}$$

あとは自明。□

定理 1.4 $A = (a_{ij})$ は m 行 n 列の行列とし、 $\operatorname{rank}(A) = r$ とする。このとき、

$$r = A \text{ の } 1 \text{ 次独立な列ベクトルの個数} \quad (1.5)$$

$$= A \text{ の } 1 \text{ 次独立な行ベクトルの個数} \quad (1.6)$$

$$= A \text{ の } 0 \text{ でない小行列式の最大次数} \quad (1.7)$$

証明 A の第 i 列を $\vec{a}_i$ とし、 $\vec{x} = {}^t(x_1 \ x_2 \cdots x_n)$ とすると、 $A\vec{x} = x_1\vec{a}_1 + x_2\vec{a}_2 + \cdots + x_n\vec{a}_n$ であるから、 $\operatorname{Im} T_A$ は $\vec{a}_1, \vec{a}_2, \cdots, \vec{a}_n$ によって張られる。ところで、定理 1.3 より、 $\dim \operatorname{Im} T_A = r$ である。よって、(1.5) が言える。さらに、 $\operatorname{rank}({}^tA) = \operatorname{rank}(A)$ であるから、(1.6) も言える。最後に、 A の 0 でない小行列式の最大次数を s とすると、 A の小行列式で

$$\begin{vmatrix} a_{i_1 j_1} & \cdots & a_{i_1 j_s} \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{i_s j_1} & \cdots & a_{i_s j_s} \end{vmatrix} \neq 0$$

となるものがとれる。この小行列の s 個の列ベクトルは 1 次独立であるから、 $\vec{a}_{j_1}, \vec{a}_{j_2}, \cdots, \vec{a}_{j_s}$ も 1 次独立である。したがって、(1.5) より、 $s \leq r$ である。逆に、(1.5) より、1 次独立な r 個の列ベクトル $\vec{a}_{q_1}, \vec{a}_{q_2}, \cdots, \vec{a}_{q_r}$ が存在する。このとき、(1.6) より、行列 $(\vec{a}_{q_1} \ \vec{a}_{q_2} \ \cdots \ \vec{a}_{q_r})$ は r 個の 1 次独立な行ベクトル $(a_{p_i q_1}, a_{p_i q_2}, \cdots, a_{p_i q_r})$ ($i = 1, 2, \cdots, r$) をもつ。このとき、

$$\begin{vmatrix} a_{p_1 q_1} & \cdots & a_{p_1 q_r} \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{p_r q_1} & \cdots & a_{p_r q_r} \end{vmatrix} \neq 0$$

であるから、 $r \leq s$ である。ゆえに、 $s = r$ を得る。□

ここで、像空間や核空間に慣れるために、定理 1.3 の応用例として、次の定理を紹介しておく。

定理 1.5 A は l 行 m 列の行列とし、 B は m 行 n 列の行列とするととき、

$$-m + \text{rank}(A) + \text{rank}(B) \leq \text{rank}(AB) \quad (1.8)$$

証明 行列 A によって表される、 $\text{Im } T_B$ から $\mathbf{R}^l$ への線形写像を T とするとき、 $\text{Im } T = \text{Im } T_{AB}$ であるから、定理 1.3 より、

$$\begin{aligned} \text{rank}(B) &= \dim \text{Im } T_B = \dim \text{Ker } T + \dim \text{Im } T \\ &\leq \dim \text{Ker } T_A + \dim \text{Im } T_{AB} \\ &= m - \text{rank}(A) + \text{rank}(AB). \end{aligned}$$

ゆえに、(1.8) を得る。□

最後に、行列の固有値・固有ベクトル・対角化に関する定理をまとめておく。

定理 1.6 A と B は n 次正方行列とするととき、

- (1) $|AB| = |A||B|$, $\text{Tr}(AB) = \text{Tr}(BA)$
- (2) A の固有値を $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ とするとき、ある正則行列 P が存在して、 $P^{-1}AP$ は $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ を対角成分とする上半三角行列 ($i > j$ であるすべての (i, j) 成分が 0 である行列) となる。
- (3) (2) の条件下で、 $|A| = \lambda_1 \lambda_2 \cdots \lambda_n$, $\text{Tr}(A) = \lambda_1 + \lambda_2 + \cdots + \lambda_n$

証明 (1)、(2) は省略。(1)、(2) より (3) が得られる。□

定理 1.7 n 次正方行列 A の異なる k 個の固有値 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_k$ に対する固有ベクトル $\vec{u}_1, \vec{u}_2, \dots, \vec{u}_k$ は、互いに 1 次独立である。

証明 仮に $\vec{u}_1, \vec{u}_2, \dots, \vec{u}_k$ が 1 次独立でないとすると、ある自然数 l ($l < k$) が存在して、 $\vec{u}_1, \vec{u}_2, \dots, \vec{u}_l$ は 1 次独立である一方、 $\vec{u}_1, \vec{u}_2, \dots, \vec{u}_{l+1}$ は 1 次従属であり、

$$\vec{u}_{l+1} = c_1 \vec{u}_1 + c_2 \vec{u}_2 + \cdots + c_l \vec{u}_l \quad (1.9)$$

を満たす定数 $c_1, c_2, \dots, c_l \in \mathbf{C}$ が存在する。このとき、(1.9) の両辺に左から A を掛けると、 $\vec{u}_1, \vec{u}_2, \dots, \vec{u}_{l+1}$ が A の固有ベクトルであることより、

$$\lambda_{l+1} \vec{u}_{l+1} = c_1 \lambda_1 \vec{u}_1 + c_2 \lambda_2 \vec{u}_2 + \cdots + c_l \lambda_l \vec{u}_l \quad (1.10)$$

を得る。(1.10) の左辺に (1.9) を入れると、

$$\lambda_{l+1} (c_1 \vec{u}_1 + c_2 \vec{u}_2 + \cdots + c_l \vec{u}_l) = c_1 \lambda_1 \vec{u}_1 + c_2 \lambda_2 \vec{u}_2 + \cdots + c_l \lambda_l \vec{u}_l$$

が成り立つから、

$$c_1 (\lambda_{l+1} - \lambda_1) \vec{u}_1 + c_2 (\lambda_{l+1} - \lambda_2) \vec{u}_2 + \cdots + c_l (\lambda_{l+1} - \lambda_l) \vec{u}_l = \vec{0}$$

を得る。ところで、 $\vec{u}_1, \vec{u}_2, \dots, \vec{u}_l$ は 1 次独立であるから、

$$c_1 (\lambda_{l+1} - \lambda_1) = c_2 (\lambda_{l+1} - \lambda_2) = \cdots = c_l (\lambda_{l+1} - \lambda_l) = 0$$

である。さらに、 $\lambda_{l+1} \neq \lambda_i$ ($i = 1, 2, \dots, l$) より、 $c_1 = c_2 = \cdots = c_l = 0$ である。しかし、このとき (1.9) より $\vec{u}_{l+1} = \vec{0}$ となり、矛盾。したがって、 $\vec{u}_1, \vec{u}_2, \dots, \vec{u}_k$ は、互いに 1 次独立である。□

定理 1.8 A は n 次正方行列とする。

- (1) A が対角化可能であるための条件は、 A が n 個の 1 次独立な固有ベクトルを持つことである。
- (2) A が異なる n 個の固有値をもてば、対角化可能である。
- (3) A の固有多項式が $(t - \lambda_1)^{n_1}(t - \lambda_2)^{n_2} \cdots (t - \lambda_k)^{n_k}$ のとき (このとき、 n_i を A の固有値 λ_i の重複度という)、すべての i ($i = 1, 2, \dots, k$) について、固有値 λ_i に対する 1 次独立な固有ベクトルが n_i 個ずつ存在すれば、 A は対角化可能である。

証明 (2) と (3) は、(1) と定理 1.7 より明らか。よって、(1) のみ示す。 A の固有値を $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ とし、対応する固有ベクトルをそれぞれ $\vec{u}_1, \vec{u}_2, \dots, \vec{u}_n$ とすると、 $A\vec{u}_i = \lambda_i\vec{u}_i$ ($i = 1, 2, \dots, n$) が成り立つ。ここで、 n 個の固有ベクトルを列ベクトルにもつ行列を $P = (\vec{u}_1 \ \vec{u}_2 \ \cdots \ \vec{u}_n)$ とおくと、

$$\begin{aligned} AP &= A(\vec{u}_1 \ \vec{u}_2 \ \cdots \ \vec{u}_n) \\ &= (\lambda_1\vec{u}_1 \ \lambda_2\vec{u}_2 \ \cdots \ \lambda_n\vec{u}_n) \\ &= (\vec{u}_1 \ \vec{u}_2 \ \cdots \ \vec{u}_n) \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \cdots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & \lambda_n \end{pmatrix} = P \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \cdots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & \lambda_n \end{pmatrix} \end{aligned}$$

が成り立つ。ここで、仮に $\vec{u}_1, \vec{u}_2, \dots, \vec{u}_n$ が互いに 1 次独立であるとする、定理 1.4 より、 P は正則である。よって、

$$P^{-1}AP = \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \cdots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & \lambda_n \end{pmatrix} \quad (1.11)$$

が成り立つ。逆に、 A が対角化可能であるとする、(1.11) のように、 $P^{-1}AP$ が対角行列になるような正則行列 P が存在するから、(1.11) を導いた式の変形を逆にたどれば、 P の n 個の列ベクトルが A の互いに 1 次独立な固有ベクトルであることがわかる。(固有値はもちろん、その対角行列の対角成分である。) $\square$

定理 1.9 (1) 実対称行列は、直交行列で対角化可能。

(2) 正規行列 ($\overline{i}AA = A\overline{i}A$ をみたす行列 A) はユニタリ行列 ($\overline{i}UU$ が単位行列となる行列 U) で対角化可能。

証明 省略。 $\square$

2 定数係数線形微分方程式

定義 2.1 n 次の正方行列 A に対して、

$$A^0 := E = (n \text{ 次の単位行列}), \quad \exp(A) := \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{k!} A^k$$

と定義する。

定理 2.2 n 次の正方行列 A, B が $AB = BA$ をみたすとき、

$$\exp(A) \exp(B) = \exp(B) \exp(A) = \exp(A + B)$$

が成り立つ。

証明 省略。□

定理 2.3 (解の存在と一意性) $\mathbf{R}^{n+1}$ から $\mathbf{R}^n$ への関数 $f(t, \vec{x})$ は、 t について連続で、 $\vec{x}$ の成分 $x_1, x_2, \dots, x_n$ については微分可能であるとする。このとき、初期値問題

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \vec{x} &= f(t, \vec{x}) \\ \vec{x}(a) &= \vec{u} \end{aligned}$$

は、ただ1つの解をもつ。

証明 省略。□

定理 2.4 A は実成分の n 次の正方行列、 $\vec{x}, \vec{u}$ は n 次元列ベクトル、特に $\vec{u}$ は定ベクトルとすると、初期値問題

$$\frac{d}{dt} \vec{x} = A \vec{x} \tag{2.1}$$

$$\vec{x}(0) = \vec{u} \tag{2.2}$$

は、ただ1つの解

$$\vec{x}(t) = \exp(tA) \vec{u} \tag{2.3}$$

をもつ。もっと一般に、 $\vec{b}(t)$ は与えられた連続な n 次元列ベクトルとすると、初期値問題

$$\frac{d}{dt} \vec{x} = A \vec{x} + \vec{b}(t), \quad \vec{x}(a) = \vec{u} \tag{2.4}$$

は、ただ1つの解

$$\vec{x}(t) = \int_a^t \exp\{(t-s)A\} \vec{b}(s) ds + \exp\{(t-a)A\} \vec{u}$$

をもつ。

証明 後半のみ示せばよい。定理 2.3 より、(2.4) はただ 1 つの解を持つ。そこで、その一意解を $\vec{x}(t)$ とし、 $\vec{y}(t) = \exp(-tA)\vec{x}(t)$ とおくと、

$$\begin{aligned}\frac{d}{dt}\vec{y} &= \exp(-tA)(-A)\vec{x} + \exp(-tA)\frac{d}{dt}\vec{x} \\ &= -\exp(-tA)A\vec{x} + \exp(-tA)(A\vec{x} + \vec{b}) \\ &= \exp(-tA)\vec{b}.\end{aligned}$$

したがって、

$$\vec{y}(t) = \int_a^t \exp(-sA)\vec{b}(s)ds + \vec{y}(a).$$

ゆえに、定理 2.2 より、

$$\vec{x}(t) = \int_a^t \exp\{(t-s)A\}\vec{b}(s)ds + \exp\{(t-a)A\}\vec{u}.$$

□

定理 2.4 の条件下で、 A が対角化できるとき、すなわち、 n 個の 1 次独立な固有ベクトルを持つときは、 $\exp(tA)$ は容易に求められる。すなわち、 A の固有値 α_i に対する固有ベクトルの 1 つを $\vec{v}_i (i=1, 2, \dots, n)$ とし、 $P = (\vec{v}_1, \vec{v}_2, \dots, \vec{v}_n)$ とおくと、 $P^{-1}AP$ は $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ を対角成分とする対角行列であるから、 $\exp(tA) = P \exp(tP^{-1}AP)P^{-1}$ と計算できる。 $\exp(tP^{-1}AP)$ が $e^{t\alpha_1}, e^{t\alpha_2}, \dots, e^{t\alpha_n}$ を対角成分とする対角行列であることは容易にわかる。このとき、(2.3) より、(2.1)-(2.2) の解は $\vec{x}(t) = P \exp(tP^{-1}AP)P^{-1}\vec{u}$ である。

ところで、 $\vec{x}_i := e^{t\alpha_i}\vec{v}_i (i=1, 2, \dots, n)$ とおくと、これらは明らかに (2.1) の 1 次独立な解であるから、一般解は $\vec{x} := c_1\vec{x}_1 + c_2\vec{x}_2 + \dots + c_n\vec{x}_n$ とおける。ここで、 $\vec{c} := {}^t(c_1, c_2, \dots, c_n)$ とおくと、 $\vec{x} := P \exp(tP^{-1}AP)\vec{c}$ であるから、(2.2) をみたすための条件は、 $\vec{x}(0) = P\vec{c} = \vec{u}$ 、すなわち、 $\vec{c} = P^{-1}\vec{u}$ である。このことから、(2.1)-(2.2) の解 $\vec{x} = P \exp(tP^{-1}AP)P^{-1}\vec{u}$ が得られる。

次に、 A が対角化できないときを考える。 A の固有多項式、最小多項式をそれぞれ

$$f_A(t) = |tE - A| = (t - \alpha_1)^{n_1}(t - \alpha_2)^{n_2} \dots (t - \alpha_k)^{n_k} \quad (2.5)$$

$$\varphi_A(t) = (t - \alpha_1)^{m_1}(t - \alpha_2)^{m_2} \dots (t - \alpha_k)^{m_k} \quad (2.6)$$

とし、固有値 α_i に対する固有空間と広義固有空間をそれぞれ

$$W_{\alpha_i} = \text{Ker}(A - \alpha_i E), \quad \widetilde{W}_{\alpha_i} = \text{Ker}(A - \alpha_i E)^{m_i}$$

とするとき、 $1 \leq m_i \leq n_i (i=1, 2, \dots, k)$ であり、

定理 2.5

$$\dim \widetilde{W}_{\alpha_i} = n_i \quad (2.7)$$

$$\mathbf{R}^n = \widetilde{W}_{\alpha_1} \oplus \widetilde{W}_{\alpha_2} \oplus \dots \oplus \widetilde{W}_{\alpha_k} \quad (\text{直和}) \quad (2.8)$$

が成り立つことが知られている。したがって、定理 1.7 より、各 $\widetilde{W}_{\alpha_i} (i=1, 2, \dots, k)$ の中に、

$$(A - \alpha_i E)^{\beta_j} \vec{w} \neq \vec{0} \text{ かつ } (A - \alpha_i E)^{\beta_j+1} \vec{w} = \vec{0} \quad (2.9)$$

をみたす整数 β_j ($0 \leq \beta_j \leq m_i - 1$) が存在するような 1 次独立な $\vec{w} =: \vec{w}_{ij}$ が n_i 個 ($j = 1, 2, \dots, n_i$) ずつあることがわかる。ところで、(2.9) が成り立つとき、

$$\begin{aligned} \exp(tA)\vec{w} &= \exp(t\alpha_i E) \exp\{t(A - \alpha_i E)\}\vec{w} \\ &= e^{t\alpha_i} \left\{ E + t(A - \alpha_i E) + \frac{t^2}{2!}(A - \alpha_i E)^2 + \dots + \frac{t^{\beta}}{\beta!}(A - \alpha_i E)^{\beta} \right\} \vec{w} \end{aligned}$$

と計算できる。したがって、(2.1)-(2.2) の解は $\exp(tA)\vec{w}_{ij}$ ($1 \leq i \leq k, 1 \leq j \leq n_i$) の線形結合となり、(2.2) をみたすように係数を決めればよい。

最後に、(2.1) が $\vec{x} = \vec{x}_1 + i\vec{x}_2$ ($\vec{x}_1, \vec{x}_2$ は実ベクトル) を解にもつとき、その実部 $\vec{x}_1$ と虚部 $\vec{x}_2$ も解である。さらに、もし A が虚数 $\lambda = \alpha + i\beta$ (α, β は実数で、 $\beta \neq 0$) を固有値にもち、対応する固有ベクトルの 1 つが $\vec{v} = \vec{v}_1 + i\vec{v}_2$ ($\vec{v}_1, \vec{v}_2$ は実ベクトル) であるとき、(2.1) は

$$\begin{aligned} \vec{x}(t) &= e^{\lambda t} \vec{v} = e^{(\alpha + i\beta)t} (\vec{v}_1 + i\vec{v}_2) \\ &= e^{\alpha t} (\cos \beta t \vec{v}_1 - \sin \beta t \vec{v}_2) + ie^{\alpha t} (\cos \beta t \vec{v}_2 + \sin \beta t \vec{v}_1) \end{aligned}$$

を解にもつが、この実部と虚部も 1 次独立な解である。これは、 $\vec{v}$ と、固有値 $\bar{\lambda} = \alpha - i\beta$ に対する固有ベクトル $\bar{\vec{v}} = \vec{v}_1 - i\vec{v}_2$ とが 1 次独立であることからわかる。

3 微分方程式の定性理論

微分方程式

$$\frac{d}{dt} \vec{u} = f(t, \vec{u})$$

の 1 つの解を $\vec{u}(t) = {}^t(x(t), y(t))$ とすると、 t が大きくなるにつれて、点 $(x(t), y(t))$ は xy 平面上を動く。この点の描く曲線を解 $\vec{u}(t)$ の軌道といい、 xy 平面を特に相平面という。定理 2.3 より、解の軌道は初期値 $(x(0), y(0))$ が異なれば交わらない。これらすべての軌道の動向がわかるように、1 つの相平面上に何本かの軌道を描いた図を、相平面図という。相平面図上の各軌道には、 t が増えるにつれて軌道上の点 $(x(t), y(t))$ が進む向きに矢印をつける。ここで、簡単な例を挙げる。

例 3.1 微分方程式

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$$

の一般解は、 $x(t) = ae^{-t}$, $y(t) = be^{2t}$ (a, b は任意の実定数) であるから、相平面図は、

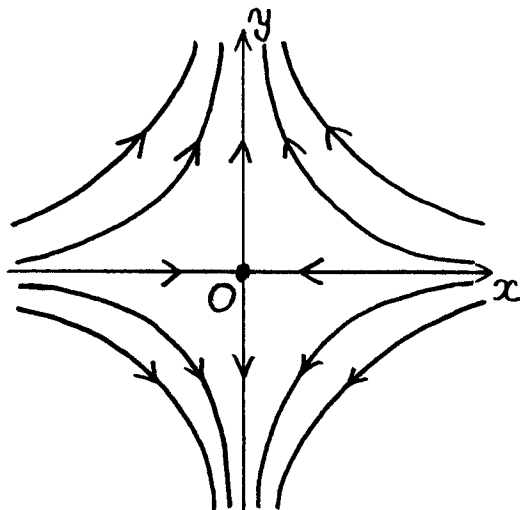
$a, b \neq 0$ のときに生ずる、 $y = \frac{a^2 b}{x^2}$ (x 軸から遠ざかる向きの矢印を持つ曲線群)

$a = 0, b \neq 0$ のときに生ずる、 y 軸 (原点から遠ざかる向きの矢印を持つ)

$a \neq 0, b = 0$ のときに生ずる、 x 軸 (原点に向かう矢印を持つ)

$a = b = 0$ のときに生ずる、原点

から成る (図 1 参照)。



[図 1]

例 3.2 (ロトカとボルテラの生存競争モデル) 時刻 t における、シマウマとライオンのような被食者と捕食者の個体数をそれぞれ $x(t)$, $y(t)$ とすると、近似的に、

$$\frac{dx}{dt} = (A - By)x, \quad \frac{dy}{dt} = (Cx - D)y \quad (A, B, C, D \text{ は正定数})$$

という微分方程式が成り立つことが予想できる。この相平面図の第 1 象限は、点 $(\frac{D}{C}, \frac{A}{B})$ を中心とする、反時計回りの閉曲線群となる。この点は定常解であり、平衡点という。

例 3.3 (RLC 回路) 抵抗 R 、コイル L 、コンデンサー C を 1 個ずつつないだ閉回路を RLC 回路という。電流を x 、コンデンサーにかかる電圧を y とおくと、

$$L \frac{dx}{dt} = y - Rx, \quad C \frac{dy}{dt} = -x$$

すなわち、

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{R}{L} & \frac{1}{L} \\ -\frac{1}{C} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$$

という微分方程式が成り立つ。この相平面図は、 L と C が正定数で $R \geq 0$ としたとき、行列 $\begin{pmatrix} -\frac{R}{L} & \frac{1}{L} \\ -\frac{1}{C} & 0 \end{pmatrix}$ の固有値が実数であるかないか、純虚数であるかないかなどにより、 $R > \sqrt{\frac{4L}{C}}$, $R = \sqrt{\frac{4L}{C}}$, $0 < R < \sqrt{\frac{4L}{C}}$, $R = 0$ という 4 つの場合に大きく分類される。

参考文献

- [1] M.Braun 著, 一楽・一楽・河原・河原 訳, シュプリンガー東京 (2001).
- [2] W.Hirsch and S.Smale 著, 新井・水谷・田村 訳, 力学系入門, 岩波書店 (1976).
- [3] 岩堀長慶編, 線形代数学, 裳華房 (1982).
- [4] 木村俊房著, 常微分方程式, 共立出版 (1974).

(平成15年 9 月 8 日 受理)

活性汚泥呼吸阻害試験による化学物質の処理特性と有害性評価

庄司 良*, 成田 昇*

Evaluating toxicity and treatability of chemicals by activated sludge respiration inhibition test

Ryo SHOJI, Noboru NARITA

Various human activities, such as industry and house keeping, have produced a number of chemicals containing toxicants, and most of them should be carried to sewage treatment plant. In most of the water treatment plants, biochemical treatments using activated sludge have been adopted. Because of biogeocinosis of activated sludge, it is difficult to imitate treatment mechanisms and degradability. In order to operate safely to human health or ecology, it is necessary to develop methods that enable us to control toxicant throughout the detention period in activated sludge treatment.

Bioassay is generally studied as a way to evaluate toxicity of chemicals. Activated sludge respiration inhibition (ASRI) test have already proposed by OECD (Organization for Economic Cooperation and Development) TG (test guideline) 209 as a bioassay method for ecotoxicological safety based on the change in respiratory activity that can be measured by DO (Dissolved Oxygen).

In this study, significant and useful approach was represented with results of 9 chemicals from ASRI. Comparison of EC_{50} (effective concentration to reduce 50% of the respiration activity) values at 30 min and 3 h led biodegradability and removal characteristics of chemicals. Chemicals that $E_{3h}C_{50}$ were lower than $E_{30min}C_{50}$ were indicated long-term toxicity and persistency.

(keywords: activated sludge respiration inhibition test, removal characterization, toxicity assessment, EC_{50} values)

1. はじめに

現在、活発な人間活動によって、我々の生活や産業から多くの化学物質が作られており、その数は1千万を超えている。それに伴って有害物質の種類も増加し、人為的に合成された物質などは環境で分解されにくいなどの問題も起きており、化学物質の管理は一層重要になってきている。

こういった様々な化学物質を含んだ排水は下水処理場に送られて処理され、環境中に放流するか上水へ送られる。上水に送られる場合は更に処理を重ねるが、元々含まれていた有害性の大半は下水処理場で処理されている。多くの下水処理場では比較的安価な活性汚泥による生物学的処理が行われている。活性汚泥は無数の微生物の集合体で、それ自体が生態系を成しているために、有害物質の処理のメカニズムや活性汚泥の処理能の変化は要因が非常に複雑なため、長い間ブラックボックス的に運転されてきた。しかし、排水の性質が一層複雑になっていく中、より精度の良い

処理が待望される。

バイオアッセイは披見物質の有害性を生物の応答性から評価する手法であり、広く盛んに研究されている。活性汚泥呼吸阻害試験は OECD のテストガイドライン 209¹⁾や ISO8192²⁾に提示されており知名度も高いアッセイ法である。これは活性汚泥の呼吸活性から披見物質の有害性を評価する手法で、溶液中の DO(Dissolved Oxygen)の測定から簡単に得られる。この方法は長い間研究され、感度や再現性の向上及び迅速簡便化については様々な検討がされている。また、他にも CO_2 生成による呼吸阻害試験や菌体濃度、ATP、酵素活性の測定等から得られる試験³⁾もあり、中には精度に優れた試験もあるが、DO 測定による呼吸阻害試験が最も簡単で良く検証されている試験法である。

呼吸阻害試験のエンドポイントは30分と3時間であるのが最も標準的であるが、他方で迅速かつ簡便な方法として試験条件や DO センサーの

感度を良くして 30 分のみをエンドラインとすることの提案、試行もされている(Rapid ASRI⁴⁾)。しかし、単に急性毒性を評価するのであれば 30 分のみで充分だが、活性汚泥で評価する大きな利点とは、活性汚泥は他の生物と違って代謝のみならず比較的強い自浄作用をもっているために、有害物質に対する抵抗、回復、馴化を踏まえた生分解性までを 3 時間後の応答で評価できることにある。すなわち、既往の研究で明らかになっていない処理特性と毒性との関係を 30 分と 3 時間の呼吸阻害試験で評価が可能であると考えられる。しかし、まとまったデータの蓄積が成されていないのは呼吸阻害試験の有用性を多くの研究者が認識していない事にあると考える。

本研究では 9 種類の化学物質で呼吸阻害試験を行って 30 分と 3 時間の EC₅₀を算出した。そして E_{30min}C₅₀と E_{3h}C₅₀を比較して活性汚泥の活性の挙動と処理特性について検討を行い、呼吸阻害試験の有用性を確認した。同時に、代謝作用の低い *Daphnia magna* (大ミジンコ) の遊泳阻害試験と比較し、有害性発現の時間依存性について考察した。また、活性汚泥中に存在する硝化細菌による EC₅₀と比較し、有害性発現特性や感度の違いについて考察した。

2. 実験方法

2-1 被検物質

本研究で検討した 9 種類の化学物質を Table 1 に示した。

Table 1 Chemicals tested in this study

Chemical	Cas No.	M.W.
Phenol	108-95-2	94.11
Thiourea	62-56-6	76.12
Copper (II) sulfate	7759-98-7	159.6
Catechol	120-80-9	110.11
Aniline	62-53-3	93.13
2-Mercaptobenzothiazole	149-30-4	167.26
Potassium cyanide	151-50-8	65.12
Resorcinol	108-46-3	110.11
Boric acid	10043-35-3	61.83

これらの物質は農薬、溶剤などとして広く一般的に用いられており、環境中に高濃度で検出される例もあるため適切な処理、管理が求められている。

2-2 活性汚泥呼吸阻害試験

活性汚泥の呼吸活性から化学物質の有害性を評価する試験で、OECD のテストガイドライン 209 や ISO8192A としても提示されている。呼吸活性は溶液中の DO(Dissolved Oxygen; 溶存酸素)値を測定(100-833, Shimadzu, Kyoto, Japan)し、式(1)から算出される OUR(Oxygen Uptake Rate; 酸素消費速度[mg/L・h])で表した。

$$\text{OUR}[\text{mg/L}\cdot\text{h}]=-(\text{DO}-\text{DO}_0)/(\text{t}-\text{t}_0) \quad (1)$$

DO₀: initial DO value, t₀: initial reacting time

さらに、算出した OUR を式(2)によって呼吸率で表した。

$$\text{Respiratory rate}[\cdot]=\text{OUR}/\text{OUR}_0\times 100 \quad (2)$$

OUR₀: initial OUR value

試験に際しては 100ml ビーカーを 12 個用意して時間差をつけて曝露し、30min と 3h で曝気を止めて経時的に DO を測定した。DO 値は独立した 2 回の平均値とした。温度は 23±2℃、曝気量は 2000±200ml/L・min として行った。

2-3 データ解析

EC₅₀算出のために Ecotox statics Version 2.2 を使用した。用量作用曲線のデータを式(3)に示したロジスティック式にフィッティングして EC₅₀を算出した。同時に X 2 乗値と AIC(情報量基準)値も算出した。

$$\text{Ln}(y/(1-y))=b+a\cdot x \quad (3)$$

y : respiratory rate, a,b: constant, x: Log (Conc.)

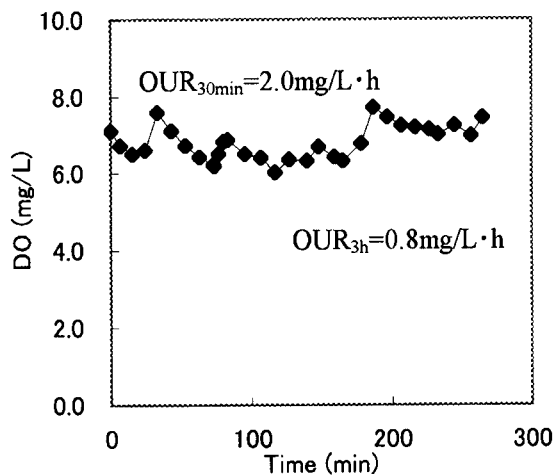
3. 結果

活性汚泥に被検物質を曝露し、OUR 測定時に曝気を止めて DO 変化を測定した。Fig. 1 に硫酸銅(II)80ppm を曝露した時の DO の経時変化を示した。曝気を止めた時、活性汚泥が呼吸をしていると DO の減少が見られる。

DO の減少はほぼ直線で近似でき、その傾きから OUR を得た。一般的に DO が 2mg/L を下回ると活性に悪影響が出るとされているため下回らないように曝気を制御した。OUR は阻害を受けると低下し、活性化すると上昇する。曝気を停

Table 2 EC_{50} and AIC values of activated sludge respiration inhibition test and nitrifying bacteria respiration inhibition test

Chemical	Activated sludge respiration inhibition test			Nitrifying bacteria respiration inhibition test		
	$E_{30min}C_{50}$ (ppm)	$E_{3h}C_{50}$ (ppm)	AIC_{30min} (-)	AIC_{3h} (-)	EC_{50} (ppm)	AIC (-)
Phenol	570	0.30	1600	1400	3.3	500
Thiourea	47000	250	1400	1500		
Copper (II) sulfate	54	29	1500	1400	26	300
Catechol	10000	5.8	520	-		
Aniline	140	2500	750	730		
2-Mercaptobenzothiazole	15	34000	660	720	2.2	660
Potassium cyanide	0.061	2.0	520	600	66	870
Resorcinol	7.7	5.3	710	750	25	-
Boric acid	7.6	2900	530	-		

Fig. 1 Changes in DO when exposed Copper (II) sulfate 700 μ M

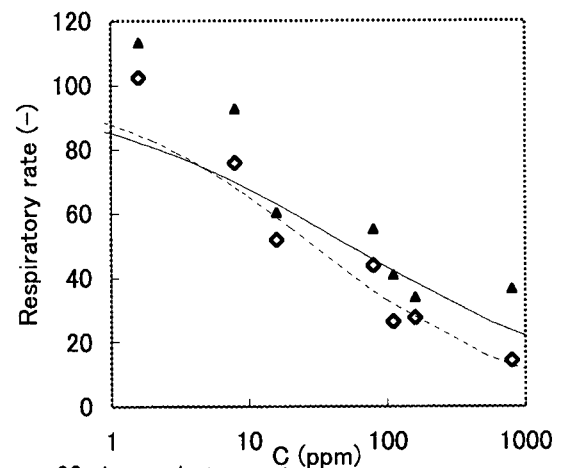
止する直前で DO 値が跳ね上がったのは DO センサーの電極部に付着していた活性汚泥を取り除く操作のためである。

用量作用曲線を得るためにコントロール、30 分、3 時間の OUR を式(1)によって算出して式(2)より呼吸率を算出した。硫酸銅の用量作用曲線を Fig. 2 に示した。濃度の上昇につれて呼吸率は減少を示した。一般的に、どの生物を使っても用量作用曲線はロジスティック式で定式化できる。

硫酸銅(II)の曝露時間 3 時間の用量作用曲線をロジスティック式に回帰したときの適合度を以下に示した。

$$X^2=16, AIC=1400$$

活性汚泥呼吸阻害試験では重金属の用量作用曲線は広い濃度範囲で濃度の対数に対して直線的になる事が知られており⁶⁾、そのためにロジスティック式との適合度が低くなったと考えられた。しかし、



▲ 30min respiratory rate
◆ 3h respiratory rate
----- Logistic regression curve of 30min respiratory rate
———— Logistic regression curve of 3h respiratory rate

Fig. 2 Dose response curve of copper (II) sulfate

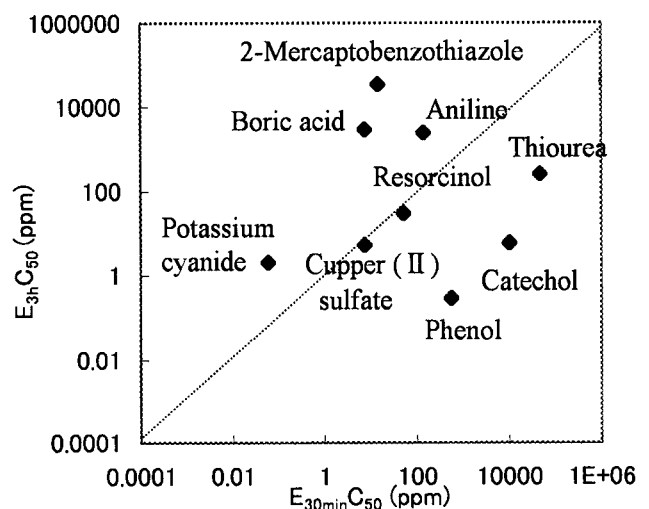


Fig. 3 Comparison of $E_{30min}C_{50}$ and $E_{3h}C_{50}$ derived from dose response curve of activated sludge respiration inhibition test exposed to various chemicals

EC₅₀は直線増加範囲の傾きと依存性がないでロジスティック式の適用に問題は無いといえる。

有機、無機、重金属を含む全 9 種類の有害性化学物質について同様に活性汚泥呼吸阻害試験を行った。どの化学物質においても濃度が低い範囲では呼吸率が 100 を上回った値を示した。これは呼吸活性の上昇を意味する。このとき濃度の減少は確認できなかった。被検物質が馴化されて基質になったとは考えられない。従って、本質的な意味の活性化が起きているとはいえず、筆者らは活性が上昇するこの現象を“抵抗”と呼んでいる。

次に、EC₅₀を Table 2 に示した。更に、E_{30min}C₅₀ と E_{3h}C₅₀ の値を Fig. 3 で比較し相関を検証した。硫酸銅とゾルニールは E_{30min}C₅₀ と E_{3h}C₅₀ の間に違いが少なかった。有害性が時間に対して横這いであることを示す。シアン化カリウム、朴素、2-メルカプトベンゾチアゾールは E_{3h}C₅₀ より E_{30min}C₅₀ の方が小さく、3 時間よりも 30 分の方が低濃度で有害性が現れる、つまり阻害が大きいことを示すので急性毒性を有するといえる。フェノール、カテコール、チオ尿素は 3 時間の方が有意に阻害が現れた。これは時間の経過に応じて有害性が発現している事を示す。シアン化カリウムは比較的 E_{30min}C₅₀、E_{3h}C₅₀ とともに低く、E_{30min}C₅₀ では他の物質よりも 2 桁以上開いた。フェノールも E_{3h}C₅₀ が特に低かった。これらは人体や動物実験において呼吸器官に影響を及ぼすことが確認されており、活性汚泥でも同様に強い呼吸阻害が及んだことと考えられる。

有害性物質の生分解には馴化期間が必要で、難分解性を有するものほどその期間が長い。Fig. 3 で E_{30min}C₅₀ より E_{3h}C₅₀ が小さい物質は長期間毒に侵されているため、馴化されにくいと考えられる。そうすると当然生分解もされにくい難分解性を有するものであると考えられる。そこで、E_{30min}C₅₀ より E_{3h}C₅₀ が小さかったフェノールについてその消長と OUR の挙動を確かめた。菌体濃度は 4000mg/L、曝露濃度は 10ppm で実験を行った。結果を Fig. 4 に示した。

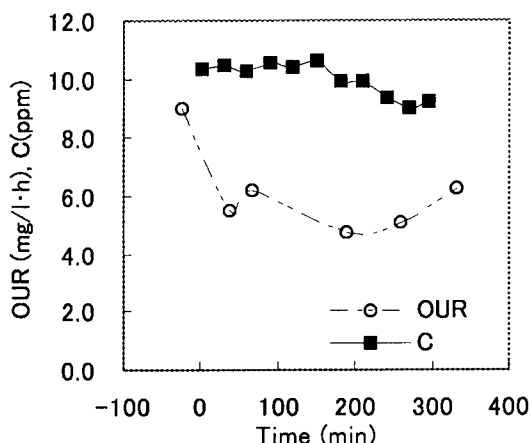


Fig. 4 Changes in OUR and concentration when exposed phenol 10 ppm

フェノールの濃度の低下は 200 分経過後から始まったが 300 分の時点で約 0.9ppm しか処理されていなかった。従って、Fig. 3 の検討通り、E_{30min}C₅₀ より E_{3h}C₅₀ が低い物質は有害性の発現が長期的になって馴化が遅くなり、分解性は悪くなることが確認できた。

4. 考察

本研究は活性汚泥呼吸阻害試験のエンドポイントの設定と試験から得られる重要な知見について検証した。そもそも 30 分と 3 時間の測定は、評価する意味が異なる。活性汚泥を構成する微生物の世代時間が 2~5 日であることを考えると、それぞれ急性、亜急性毒性の評価に相当する。

活性汚泥呼吸阻害試験で 30 分と 3 時間の時点のエンドポイントとすることに関して、30 分では馴化が起こる事は考えられないので、曝露される事による正味の急性毒性が評価できる。他方 3 時間を評価する意義とは、化学物質の有害性のみでなく、活性汚泥の回復や馴化作用の働きが含まれることにある。本研究において、抵抗とは毒性が比較的小さい時に活性化を示すことをいい、馴化とは本来消費できないものを消費できるようになること、すなわち基質として働くようになる事を意味する。馴化のメカニズムは、活性汚泥中に対象物質を分解する遺伝子をもっているか、もしくは誘発する微生物が対象物質にさらされつづけているうちに次第に分解活性を表し、他の微生物より優位になっていき、最終的に活性汚泥がそれを分解するようになる事である。有害物質の馴化は有害性が解消され、回復を示してから起こると考えられる。最終的に馴化されて基質になりやすい物質は有害性も早期に解消されると考えられる。一方、長期にわたって阻害を及ぼす物質は馴化も遅れると考えられる。曝露されてから 3 時間後の阻害の影響を 30 分の時と比べる事で有害性の時間依存性が評価でき、更に馴化のされやすさが予想できると考えられる。馴化は活性汚泥の特有の機能であり、廃水の処理や特異的なバイオアッセイ法としてもまた特筆すべき性質といえる。優れた代謝および自浄作用を持つ活性汚泥と代謝機能が弱い生体とで有害性発現の時間依存性について比較を行うため、Fig. 5 にミジンコの遊泳阻害試験の E_{24h}C₅₀ と E_{48h}C₅₀ の比較を示した。これら遊泳阻害試験のデータは OECD Ecotox database から引用した。活性汚泥呼吸阻害試験に比べてエンドポイントが長く設定されているが、ミジンコの世代時間が 1~2 ヶ月であるため急性毒性に相当するので活性汚泥呼吸阻害試験との比較が可能といえる。

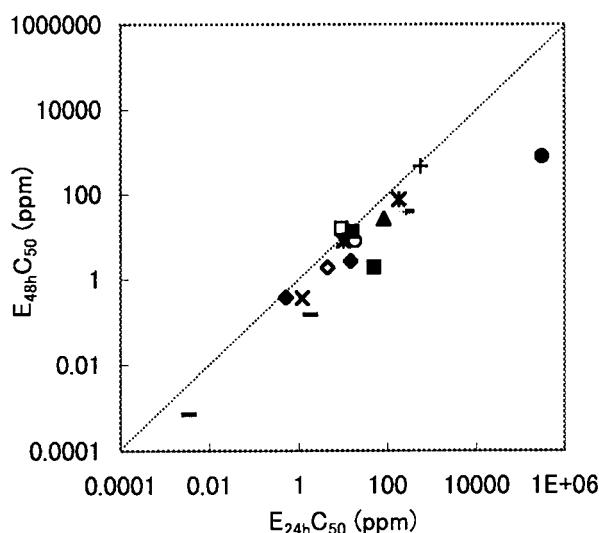


Fig. 5 Comparison of $E_{24h}C_{50}$ and $E_{48h}C_{50}$ derived from dose response curve of *Daphnia magna* acute immobilisation test exposed to various chemicals

殆どの物質で $E_{24h}C_{50}$ より $E_{48h}C_{50}$ が小さい値を示した。これは活性汚泥と他の生体との大きな違いであり、ミジンコには活性汚泥のような優れた代謝活性に基づく自浄作用がないために、時間とともに有害性が有意に発現した結果である。有害性の強度が必ずしも時間と共に増加しない活性汚泥呼吸阻害試験は、自浄作用を含めた水圏生態系や下水処理における化学物質の影響を模倣するのに優れた試験であるといえる。

続いて、活性汚泥中にも存在し、独立した窒素処理プロセスとしても使われている硝化細菌を用いた呼吸阻害試験の結果で有害性発現特性と感度の比較をした。硝化細菌は活性汚泥中に存在する単一微生物としてはアッセイのデータが比較的多く存在している。実験に際しては純粋培養した硝化細菌 *Nitrosomonas europaea* ATCC 25987 を固定化した微生物膜と溶存酸素電極でセンサを構成し、フローセル中でセンサに一定濃度のアンモニア態窒素を供給して呼吸速度を DO 変化から測定した。被検物質の曝露から 20 分後をエンドポイントとして式 (3) より呼吸阻害率 Γ を測定し、容量作用曲線を作成した。

$$\Gamma = (OUR_0 - OUR) / OUR_0 \times 100 \quad (3)$$

本データは文献⁹⁾から引用し、本研究の9種類の被検物質の内フェノール、硫酸銅、レゾルシノール、ジソ化カリウム、2-メルカプトベンゾチアゾールの5物質のデータを得た。呼吸阻害率で表されていた用量作用曲線を呼吸率に換算

して Ecotox statics で EC_{50} を算出した。硝化細菌の呼吸阻害試験は急性毒性を評価しているといえるので、同様に活性汚泥呼吸阻害試験の $E_{30min}C_{50}$ と比較した。硝化細菌の呼吸阻害試験の EC_{50} 値は Table 2 に示した。フェノール、硫酸銅、2-メルカプトベンゾチアゾールの EC_{50} は硝化細菌の方が低い値を示した。全体的に硝化細菌の方が感度は良いように伺えるが、ジソ化カリウムに限っては活性汚泥よりも EC_{50} が特に高い値を示した。前述の通り、ジソ化カリウムは人体や動物実験において呼吸器官に障害が起こることが確認されており、活性汚泥呼吸阻害試験では比較的強い呼吸阻害を示した。硝化細菌はアンモニア態窒素を亜硝酸に、亜硝酸を窒素ガスへと転換する機能を持っている。また、有機体窒素をアンモニア態窒素に変える働きもあるため、分子組成に窒素を含むジソ化カリウムは低い有害性を示したと考えられる。活性汚泥中に存在する生物を単一でアッセイすることは精度の改善が図れるが、このように感度や毒性発現のパターンの違いを考慮する必要性がでてくる。

次に、処理特性と有害性の関係について、Fig. 3 において $E_{30min}C_{50}$ と $E_{3h}C_{50}$ を比較することで活性汚泥の有害性の発現過程と被検物質の処理特性の関係が確認できた。 $E_{3h}C_{50}$ より $E_{30min}C_{50}$ が低い物質は活性汚泥が受けた阻害は早期に解決され、馴化も早い段階で起こると考えられた。一方、 $E_{30min}C_{50}$ より $E_{3h}C_{50}$ が低い物質は長時間有害性が顕著に表れることから、生分解性の低下が考えられるので、処理には最も時間が費やされると考えられた。活性汚泥処理において、有害性を示す化学物質は馴養を施さない限りは基質とはなりにくいので、多くは生分解よりも先にブロックへの吸着によって処理されると考えられる⁹⁾。吸着のメカニズムは Freundlich か Langmuir のモデル式に従うと考えられている^{10),11)}。本研究で使用した活性汚泥はフェノールを含め全ての被検物質で馴養をしていないので、吸着によって処理されると考えられる¹²⁾。フェノールの場合で個別に実験を行い、濃度の消長に伴った OUR の上昇が確認できた。フェノールは $E_{3h}C_{50}$ の方が低いため生分解はおきないと考えられるので、濃度の消長に伴う呼吸の活性化は吸着に際してブロックの中に有害物質が徐々に浸透していく事で起こる抵抗のためであると考ええる。処理特性が吸着か生分解のいずれにしても、濃度の消長と呼吸活性は程度が変われどもリンクしているといえる。このように、本研究では呼吸阻害試験を 30 分と 3 時間で行うことで、被検物質の急性毒性と処理特性および活性汚泥の処理能が考察できることを確認した。

活性汚泥呼吸阻害試験はデータの蓄積が不足している現状にあるが、以上の検証よりその有用性が

実証された。活性汚泥処理の研究を二つのアプローチに大別すると次のように分けられる。有害性化学物質もしくは物質群が活性汚泥に与える影響や、活性汚泥や単離された菌による処理特性の解明と、他方、活性汚泥処理の数理的モデルおよびシミュレーション化である。特に最近は後者が注目されており、シミュレーションモデルを成す各種パラメータを如何に決定するかが実用化に際しては問題となる。現在シミュレーションモデルの代表としては IWA (International Water Association) から活性汚泥モデルが提案されており、一部実用段階まで至っている。しかしこれはパラメータの決定が困難で、有害性化学物質の流入に対する備えにも欠けていると考えられる¹³⁾。そこで先にあげた研究のアプローチの前者の発展が望まれるが、近年では再現性の低さから呼吸阻害試験の検討は敬遠されがちである。同時に、呼吸阻害試験のデータの蓄積が不足している要因ともいえる。しかし、本研究によって有害性物質の有害性の時間依存性や処理特性について呼吸阻害試験によって非常に重要なパラメータを得られると考えられた。複雑な活性汚泥処理を厳密に再現するモデルはパラメータの数が多くなり、更に測定も困難になることが多い。しかし、簡単でより定量的に表すことに執着するとパラメータに精度が失われる。例えば COD 値での評価が典型的だが、これは排水の性質を無視することになるために安全な管理が望めない。活性汚泥呼吸阻害試験は排水の有害性を総括に評価でき、処理特性とも関係性が高いと考えられる。更に他の生体を用いたアッセイと比較する事で例えば人体のリスクも検討することが可能となる。以上の見解から、活性汚泥呼吸阻害試験は有害性評価手法としてだけでなく、安全な処理管理に導く有意なパラメータとしても期待される。

inhibition tests, Japanese journal of water treatment biology, Vol. 31, No. 3, pp. 185-191 (1995)

5) Britt-Marie Wilen et al.: The effect of dissolved oxygen concentration on the structure, size and size distribution of activated sludge flocs, Vol. 33, No. 2, pp. 391-400 (1999)

6) Kay Anderson et al.: Evaluation of INT-dehydrogenase assay for heavy metal inhibition of activated sludge, Wat. Res., Vol. 22, No. 3, pp. 349-353 (1988)

7) U.S. EPA (United States Environmental Protection Agency), ECOTOX Database system, AQUIRE

8) 内海英雄ら: 化学物質による生物・環境負荷の総合評価手法の開発に関する研究, 未来環境創造型基礎研究推進制度平成 9 年度報告書 (1997)

9) 斎藤剛ら: 化学物質の下水処理工程における除去効果の改善, 水環境学会誌, 第 25 巻, 第 2 号, pp. 97-103 (2002)

10) Guven Ozdemir et al.: Heavy metal biosorption by biomass of *Ochrobactrum anthropi* producing exopolysaccharide in activated sludge, Bioresource technology, Vol. 90, pp. 71-74 (2003)

11) Wang Jianlong et al.: Bioadsorption of pentachlorophenol (PCP) from aqueous solution by activated sludge biomass, Bioresource technology, Vol. 75, pp. 157-161 (2000)

12) 庄司良ら: 活性炭吸着及び活性汚泥処理による環境汚染物質の有害性削減評価, 東京工業高等専門学校研究報告書, Vol. 34, No. 2, pp. 73-80 (2003)

13) L. Rieger et al.: The EAWAG Bio-P module for activated sludge model No. 3, Water research, Vol. 35, No. 16, pp. 3387-3903 (2001)

(平成15年 9 月24日 受理)

5. 参考文献

1) Organization for Economic Cooperation and Development. Method 209. Activated sludge respiration inhibition test. Adopted April 4, 1984. OECD Guidelines for Testing of Chemicals. Paris (1987).

2) International Standards Organization. Test for Inhibition of Oxygen Consumption by Activated Sludge, ISO Method 8192A (1986)

3) Yang Hongwei et al.: INT-dehydrogenase activity test for assessing anaerobic biodegradability of organic compounds, Ecotoxicology and environmental safety, Vol. 53, pp. 416-421 (2002)

4) Masaharu Tadokoro et al.: Evaluation of wastewater toxicity using rapid activated sludge respiration

三宅島火山灰のアルカリ溶融法による ゼオライト転換とアンモニア性窒素の吸着性

平田房雄*, 鄭 泳彦***, 庄司 良*, 奈良麻里子**, 山田 圭**, 須藤義孝****

Conversion of Miyake Island volcanic ashes into zeolite by alkali melting method and the adsorption of the ammoniac nitrogen

Fusao Hirata, Cheong Young-Eon, Ryo Shoji
Mariko Nara, Kei Yamada, Yoshitaka Sudo

Zeolites were synthesized from volcanic ashes of Miyake Island by irradiation of microwave. Crystal structure of silicon and aluminum should be changed by chemical reaction caused in alkaline solution. Iron oxides can be vibrated by microwave irradiation in volcanic ash. Alkali melting method by the microwave was examined to recrystallize the volcanic ash. X-ray diffraction or was used to analyze the structure of zeolites synthesized in this study. The zeolite synthesized in this study was detected as a gismondine crystal.

Concentration of ammonium ion could effectively be reduced by ion-exchange ability of the zeolite. From the result, zeolite synthesized in this study have a feasibility to be applied as a water purification material. The adsorbability of the ammoniac nitrogen was examined by zeolite synthesized by and alkali melting method. Also the adsorption experiment of ammonia nitrogen was conducted by the artificial zeolite in order to compare the adsorbability. The adsorption isotherm and the surface diffusion coefficient were computed. Freundlich type equation was able to formulate the adsorption isotherm. Moreover, the surface diffusion coefficient (Ds) had the certain amount of adsorbability. However, compared to natural zeolite or synthesized zeolite, the amount of adsorption and the surface diffusion coefficient were much smaller.

(keywords: Volcanic ashes, alkali melting, adsorption, ammoniac nitrogen)

1. 緒言

近年、東京都三宅島で雄山が噴火し、火山灰の大量の堆積により農業に壊滅的な影響を与えている。これは、火山灰に含まれる硫黄分と土壌の保水性を下げるという火山灰の性質によって土壌からの作物の育成、収穫が不可能となったためである。そのため、三宅島火山灰の有効的な処理または利用法が検討されている。そこで、我々は大量にある火山灰の有効利用の一つとして、三宅島火山灰のゼオライト化を試みている。これまでの研究により、火山灰とゼオライトの主成分がケイ素とアルミニウムであることから、ア

ルカリ水熱処理することにより転換可能¹⁾であり、同時に脱硫処理²⁾を行える事が明らかとなっている。アルカリ水熱法によるゼオライト化には長時間の操作が必要であり、その合成時間の短縮が課題であった。これに対し、G. Morey ら³⁾の利用したアルカリ溶融法は短時間でのゼオライト転換が可能であることがわかっている。しかし、アルカリ溶融法を利用したゼオライト転換は大量の熱量を必要とする。

そこで、マイクロ波の照射による金属の温度上昇を利用する事により、アルカリ水熱処理に変わる実験方法として、より短時間での合成を行える

アルカリ熔融法を利用してのゼオライト転換の可能性を検討した。また、ゼオライトは排水中のアンモニウムイオンの吸着に用いられており、火山灰由来ゼオライトの応用の一つとして注目されている⁴⁾。本研究では、マイクロ波の照射によるアルカリ熔融法の検討と三宅島火山灰をアルカリ水熱合成法及びマイクロ波加熱法により合成した火山灰由来のゼオライトについてアンモニア性窒素の吸着実験を行い、また対照としてモルデナイトといった天然ゼオライト、合成ゼオライトについても同様に吸着実験を行った。そして、吸着平衡関係と有効表面拡散係数 D_s を算出し吸着特性を調べることを目的とした。

2. 実験

2.1 アルカリ熔融法によるゼオライト化

火山灰は 2000 年 7 月に東京都三宅島の雄山から噴出したもので、 $600\mu\text{m}$ 以下に粉碎し、 120°C で一昼夜以上乾燥したものを用いた。

反応装置を Fig. 1 に示す。反応容器には一番外側にアルミナレンガをくり抜いた物に、100ml アルミナるつぼ、その内側にアルミナウール、30ml アルミナるつぼという五層構造とした。これはマイクロ波加熱の選択性によりアルミナが過熱されないことと、温度効果を抑制することで生成物の再結晶化が促進されるからである。

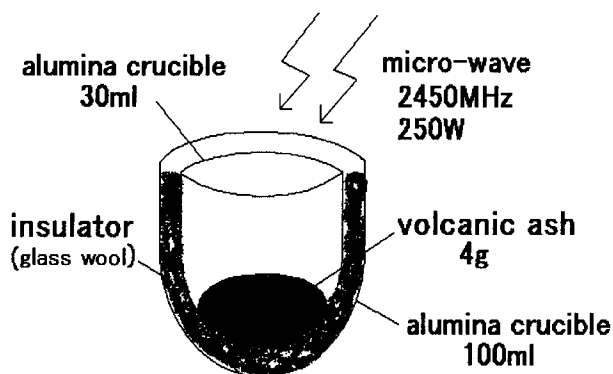


Fig.1 Reactor for zeolite synthesis

火山灰 6.0g に水酸化ナトリウム添加量、Si/Al 比を変化するよう、金属アルミニウムを 0、0.4、0.5、1.0、2.0、3.0g を溶解させた 0~50M 水酸化ナトリウム水溶液として 2ml を加え、マイクロ波照射装置 (電子レンジ ER-235, Toshiba) を用いて、マイクロ波 (2450MHz, 250W) を一定時間直接照射した。2 時間放冷した後、生成物を蒸留水に懸濁、水洗

し、遠心分離機により 5000rpm で遠心分離した。

この操作を pH が中性になるまで繰り返し、 120°C の恒温乾燥器に入れ、4 時間以上乾燥させた。反応生成物は X 線回折装置 (RAD-II A、理学電機) を用いて、ゼオライトの種類の同定を行った。また、実体顕微鏡により生成状態を確認した。

2.2 アンモニウムイオン吸着の測定

アンモニウムイオン吸着測定には天然ゼオライト、合成ゼオライト、アルカリ熔融法より合成した、火山灰由来のゼオライト、の 3 種類を用いた。

吸着性の比較のため、市販のゼオライトとして、天然ゼオライトと合成ゼオライトを使用した。天然ゼオライトは日東粉化工業株式会社製の日東ゼオライト #2 号 (サイズ $1.9-0.8\text{mm}$ モルデナイト) を粒径 $1000-1168\mu\text{m}$ の範囲を使用した。また、合成ゼオライトは和光純薬工業 (株) の合成ゼオライト A-4、粒状、 $0.05-1.18\text{mm}$ (1-30 mesh、東ソー株式会社) を使用した。

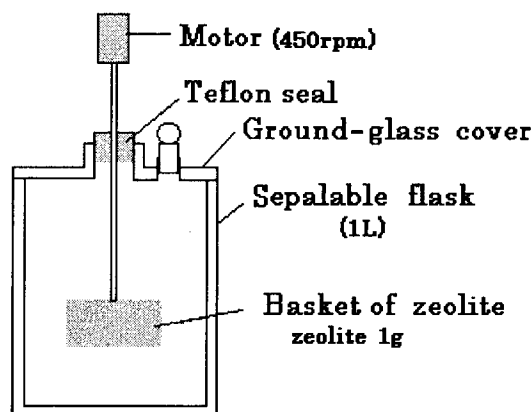


Fig. 2 Ammonium ion adsorber

吸着実験には Fig. 2 に示した回分式装置を用いた。吸着容器に、アンモニウムイオン濃度 1mg/L の溶液 1L 中にステンレス製金網 (150 mesh) バスケットに合成生成物 1.0g を入れ回転数 450rpm 以上で攪拌し、吸着させた。一定時間後に試料を 10ml づつ 2 本サンプリングし、630nm の波長でインドフェノールブルー吸光度法により吸光度を測定し、アンモニウムイオン濃度を定量し、吸着平衡に達するまで経時的に測定した。

3. 結果及び考察

3.1 アルカリ溶融法によるゼオライト化

Table 1 に各条件で合成したゼオライトの X 線回折分析での同定結果を示した。×は X 線ピークが火山灰とほとんど変わらない。◎はジスモンジンと同定できた。○の組成は $\text{Na}_6\text{Al}_6\text{Si}_{10}\text{O}_{32}$ であったが、該当するゼオライトの結晶は確認できなかった。

Fig.3 は火山灰と生成物とジスモンジンの X 線回折ピークを簡単に表した物である。X 線回折分析の結果、ピークの類似性から、合成したゼオライトはジスモンジン (Gismondine, $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) に比較的近い結晶構造を有すると考えられる。また、実態顕微鏡によって生成物の中に火山灰とは異なる結晶が確認された。このことから、生成物はゼオライト(ジスモンジン)が一部含まれており、火山灰とは明らかに異なる物質の混合物であることが確認された。

アルカリ水熱法によるゼオライト化⁵⁾では水酸化ナトリウムの濃度と溶液の各種成分濃度に強く起因し、カンクリナイト型ゼオライト、ノゼアン型ゼオライトが確認されているが、今回アルカリ溶融法で合成したゼオライトとは全く異なった。

Table 1 Condition of the amount of the aluminum and the sodium hydroxide added to synthesize zeolite from volcano ash

Al NaOH	0g	0.4g	0.5g	1g	2g	3g
0g	No.12	No.11		No.13		
	×	×		×		
0.6g		No.17	No.18			
		×	×			
1.3g		No.8				
		○				
1.5g			No.6			
			○			
3g	No.9		No.26	No.25	No.24	No.23
	◎		◎	◎	○	○
4g			No.29			
			◎			

×: Remained Volcanic Ash、

○: Zeolite ($\text{Na}_6\text{Al}_6\text{Si}_{10}\text{O}_{32}$)

◎: Gismondine ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$)

Table 1 からアルカリが高濃度であり、Si/Al 比が

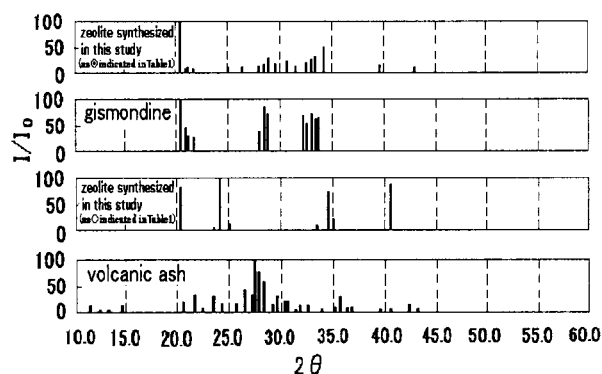


Fig. 3 X-ray diffraction diagram of volcanic ash and the zeolites

小さい時の X 線回折パターンによって、ゼオライト生成が確認された。アルカリ濃度が中濃度の場合や Al 添加量が多い場合に確認された X 線回折パターンはどのピークも弱く、結晶性は十分高くなかったためゼオライトと同定できなかった。

これは、アルカリに溶ける火山灰の量が少ないために、再結晶化が不十分となるためであると考えられる。実態顕微鏡観察により火山灰の表面に、粒子の付着が確認された。ゼオライトは火山灰の表面から反応し、温度降下とともに徐々に再結晶化していくというプロセスなので、この粒子が生成したゼオライトの一部であると考えられる。

アルカリ溶融法で合成する事で、アルカリ水熱法の合成時間が 24 時間から 10 分にまで短縮出来た。また、アルカリ水熱法では妨害物質となる硫黄を除去する為、1 時間毎に水を交換し、5 時間の攪拌洗浄操作が必要であったが、本研究で検討したアルカリ溶融法では、合成時の高熱によって硫黄が揮発するため、アルカリ水熱法の硫黄除去操作を省略する事が出来た。これにより、アルカリ水熱法の火山灰の前処理として行っていた硫黄除去操作にかかっていた 5 時間を短縮する事ができた。

3.3.2 アルカリ溶融法で合成した火山灰由来のゼオライトの吸着

アンモニウムイオン濃度 1mg/L での火山灰とアルカリ水熱法による生成物とアルカリ溶融法による生成物および三宅島火山灰の吸着実験より得られた濃度変化曲線の一例を Fig.4 に示した。Table 1 で示した×の生成物はまったく吸着

せず、○の C/C_0 は 0.87 となった。一方、◎のジスモンジンの C/C_0 は 0.748 とよく吸着しており、○に比較して約 2 倍のアンモニウムイオン吸着能を示した。吸着平衡に達する時間は 2 時間となった。これは水熱法で合成したゼオライトと同等の値であった。加えて、市販のゼオライトによるアンモニア吸着の場合、平衡到達時間は 5 時間以上であるため、これに比較して速くなった。平衡吸着量が異なるため、一概に比較はできないが、アルカリ熔融法で合成したゼオライトによるアンモニウムイオン吸着でも、十分な表面拡散係数が得られることが明らかとなった。また、最もアンモニウムイオン吸着能が高く、ジスモンジンに近い結晶性を有する生成物は火山灰 6g に粉末アルミニウム 0.5g、水酸化ナトリウム 3g の配合比による生成物であった。この場合、25% のアンモニアを除去でき、吸着量は 0.252 mg/g-zeolite となった。

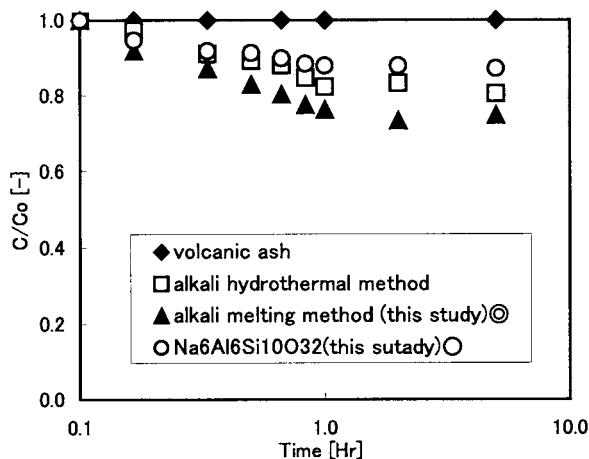


Fig.4 Kinetics of the concentration of ammonium ion adsorbed by zeolites synthesized in this study(298K)

Fig. 5 に、アルミニウム添加量 0.5g、合成時間 10 分の条件下で、水酸化ナトリウム添加量を変化させ、合成したゼオライトの水酸化ナトリウム添加量と平衡吸着量との関係をグラフにした。水酸化ナトリウム添加量が増えるほど吸着量が増えた。これは、アルカリが増えるほど火山灰の溶ける量が増えるため、ゼオライト転換する火山灰が増える事によるものと考えられる。しかし、水酸化ナトリウム添加量 3g と 4g の吸着量の差は

0.008mg/g と微量であるため、コスト面から見ても、水酸化ナトリウム添加量は 3g が適量であると言える。

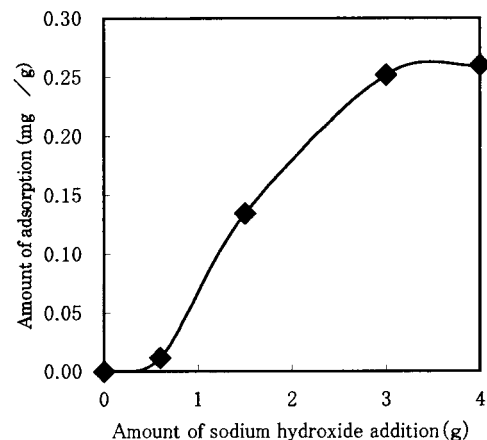


Fig. 5 The relation of the amount of adsorption and the sodium hydroxide addition to synthesize zeolites

Fig.6 に Si/Al 比によるアンモニウムイオン吸着能の変化を示す。Si/Al 比 2.33、3.1 の時が一番吸着量が高く、この時のアルミニウムの添加量はそれぞれ 0.5g、0g であった。一般的に生成ゼオライトの Si/Al 比を小さくした場合、ゼオライトの親水性が大きくなり、同じく親水性であるアンモニウムイオンの吸着量は相対的に減少する。しかしながら、酸化ケイ素を 2g 加え、Si/Al 比を大

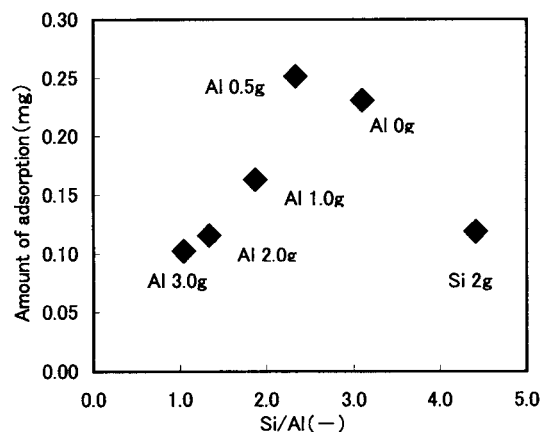


Fig. 6 The relation of the amount of adsorption and the ratio of silica and aluminium

きくした生成物のアンモニウムイオン吸着量は減少している。これは、合成の過程でケイ素を中心

とした非結晶の化合物が大量に発生したためと考えられる。また、アルミニウム添加量 0g の生成物のアンモニウムイオン吸着量は 0.234 mg/g-zeolite とアルミニウム添加量 0.5g の生成物と大差ない。したがって、添加量 0g でもアンモニウムイオン吸着量はほとんど変わらないためアルミニウムの添加は不要と判断され、製造コストの削減につながる見込みを得た。

3.4.4 吸着等温線と表面拡散係数

Fig. 7 のグラフは市販の天然ゼオライトと合成ゼオライトと火山灰由来ゼオライト No.26 の吸着等温線である。それぞれ直線性を示したことより、実測の濃度範囲では Freundlich 型吸着で整理できることがわかった。Mordenite の k , n の値は 8.80(-), 10.0(-)、4A の k , n は 10.0(-), 12.5(-) であり今回のゼオライトは k , n の値 $k=0.33(-)$, $n=1.25(-)$ と k がかなり違うため、吸着性は劣る。また、Freundlich 型の場合、吸着等温線より求めた n より、この n に見合う Suzuki & Kawazoe の理論曲線(Suzuki and Kawazoe, 1974)を実測の濃度変化曲線とカーブフィッティングし、 $Ts = Ds \cdot t / R^2$ より表面拡散係数 Ds を算出した。

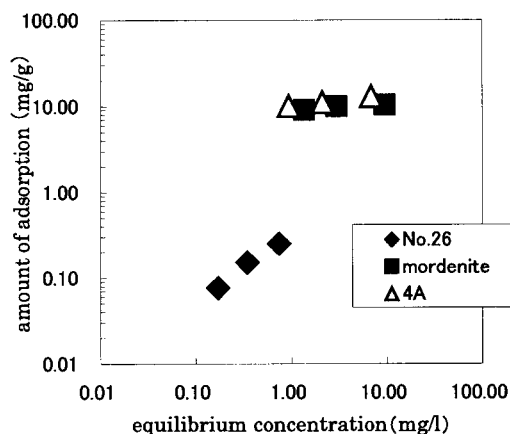


Fig. 7 Isotherm of mordenite and zeolite 4A and zeolite synthesized in this study (298K)

市販の天然ゼオライトの表面拡散係数と比較すると Mordenite の Ds は 7.8×10^{-8} 、4A の Ds は 1.2×10^{-7} であるのに対し、火山灰由来ゼオライトは $Ds=1.6 \times 10^{-14}(\text{m}^2/\text{s})$ であり、6 から7桁もの違いがあった。本研究で合成した火山灰由来ゼオラ

イトは希薄溶液中での吸着に向いていることがわかった。また、火山灰由来ゼオライトの細孔が完全にゼオライト化しておらず有効な吸着サイトが少なく、粒子径が小さいためバスケットに入れても底に沈殿してしまい、ゼオライトが回転しないために表面拡散が十分に働かなかったと考えられる。上記のデータより本研究で合成したゼオライトの吸着性能では水質浄化材としての利用には不十分であることがわかる。しかし、水族館などの常に希薄なアンモニウムイオン濃度の段階で吸着を行わなければならないような施設での吸着材としての利用には適しているといえる。

本実験の目的である火山灰のゼオライト転換による有効利用を満たしたといえるが、火山灰の大量消費という点からみた場合、需要の大きい水質浄化材として利用できるように吸着性能を上げる必要がある。そのためには、再結晶化を促すためのより効果的な保温方法の確立が必要である。

アルカリ溶融法によって合成したゼオライトは市販のゼオライト(合成モルデナイト)と比較すると、その吸着量は 1/25 にとどまった。火山灰のゼオライト化は温度低下の速度が遅いほど再結晶化が進むので、保温の方法を改良する事でより吸着能の高いゼオライトの合成が可能となると考えられる。いずれにせよ本法によるゼオライト合成はきわめて短時間であり、アルカリ水熱法に必要な脱硫操作を省略する事ができるため、大量に合成するプロセスを確立すれば、水処理プロセスとして実用的な吸着剤となりえると考えられる。これらより、火山灰のマイクロ波の照射によるアルカリ溶融法を利用したゼオライト化が三宅島火山灰の有効利用の一つとして実施可能であるとえられる。

4. 結論

アルカリ溶融法で合成した火山灰由来ゼオライトはジスモンジン (Gismondine) ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) に比較的近い結晶構造であった。

アルカリ溶融法はアルカリ水熱法より合成時間が約 24 時間短く、合成中の高温により硫黄を揮発させることができるため、脱硫操作にかかる 5 時間を省略できるため、併せて約 29 時間短縮できた。

三宅島火山灰はアルカリ溶融法により、ゼオ

ライト化して、アンモニウムイオン吸着能が生じ、Si/Al比は2.33付近が最もアンモニウムイオン吸着量が多く、アルカリ水熱合成法の Si/Al 比 1.33~2.33 と同様であった。

アンモニア性窒素の吸着性についてはアンモニウムイオンの初期濃度が異なるので、直接比較は出来ないが、アルカリ水熱法で合成した火山灰由来のゼオライトは天然、合成両ゼオライトの 1/10~1/5、アルカリ熔融法で合成した火山灰由来のゼオライトは 1/25~1/40 の吸着性能であった、更に吸着性能を上げる必要がある。そのためには、水熱法では加圧、超音波照射、熔融法では再結晶化を促すためのより効果的な保温方法の確立が必要である。

火山灰由来ゼオライトの表面拡散係数 D_s は $1.6 \times 10^{-14} (\text{m}^2/\text{s})$ に対し、Mordenite や 4A は 7.8×10^{-8} 、 1.2×10^{-7} 程度と約 7 桁の隔たりがあり、このことが細孔内の拡散速度の違いに反映されたものと考えられる。

実測の濃度範囲では Freundlich 型吸着で整理できることがわかった。ここでは表面拡散係数 D_s の近似的な値として算出し、境膜抵抗を含んだ補助拡散係数 D とした。天然、合成両ゼオライトの表面拡散係数 D_s と比べると 1/10 と小さかった。これは、境膜抵抗が大きく影響しているためだと考えられる。

大量に合成するプロセスを確立すれば、水処理プロセスとして実用的な吸着剤となりえると考えられる。

参考文献

- 1) 須藤義孝、奈良真理子、広瀬聡一郎、仁田隆、鈴木基之、三宅島火山灰のゼオライト化によるアンモニア窒素の吸着 日本吸着学会要旨集 pp. 37 (2001)
- 2) 平田房雄、庄司 良、成毛章容、須藤義孝、三宅島火山灰の土壌改良、東京高専研究報告書第 34(2)号、pp.91(2003)
- 3) G.W.Morey, E. Ingerson, Econ. Geol., 32, 607 (1937)
- 4) 陶山容子、片山恵一、目黒勝「石炭灰から合成したゼオライトのアンモニウムイオン吸着特性」日本化学会誌、No.22、pp.136-140(1996)
- 5) 平田房雄、庄司 良、広瀬聡一郎、須藤義孝、三宅島火山灰のアルカリ水熱法によるゼオライト化、東京高専研究報告書第 35(1)号、pp.51(2003)
- 6) 庄司 良、平田房雄、須藤義孝、鈴木基之、農薬 2,4-D・フミン質共存系の活性炭吸・吸着、化学工学論文集、vol.29,No.3, pp.406~411(2003)
- 7) Suzuki,M. and Kawazoe, K., Concentration decay in a batch adsorption tank, Seisan Kenkyu, 26, pp. 275-276 (1974)

(平成15年9月30日 受理)

『新撰万葉集』注釈稿(上巻 秋部 五八～五九)

一般科目 津 田 潔 ・ 共立女子大学 半澤 幹 一

The Annotation of the Shinsen-man'yōshū (10)

Kiyoshi TSUDA, Kan'ichi HANZAWA

This paper is the annotation of the Shinsen-man'yōshū edited in 893?
(Key-word: the Shinsen-man'yōshū)

58 雁之声丹 管子纏於砥之 夜緒寒美 虫之織服 衣緒曾假

雁がねに くだまくおとの 夜を寒み 虫の織りきる 衣をぞかる

【校異】

類従本・羅山本・無窮会本は、本文第二句中の「纏」を「縹」とし、
結句の「曾」を欠くも、訓は同じ。

同歌は、寛平御時后宮歌合(十卷本、秋歌、一〇六番)にあり(ただし二句目「おどろく秋の」、下句「虫の織り出す衣をぞ着る」、また夫木抄(巻一二、秋部三、雁、四八八一番)に「寛平御時后宮歌合 読人不知」としてある(ただし二句目「おどろく秋の」下句「むしのおりだすころもをぞきる」)。

【通釈】

雁の声とともに(機織りの)管を巻く(ような虫の)声のする夜が寒いので、その虫が織って着る衣を借りよう。

【語釈】

雁がねに 「雁がね」については、本集四六番歌【語釈】「鳴く雁がねぞ」の項および五〇番歌【語釈】「雁がねの」の項を参照。当歌においては、雁の鳴き声とも雁そのものともとれるが、第二句が「おと」を取

58 鳴雁鳴虫一一清、 鳴雁鳴虫一一清く、

秋花秋葉班班声。 秋花秋葉に班班たる声あり。

誰知両興無飽足。 誰か知らむ両興の飽き足ること無きを。

山室沈吟独作情。 山室に沈吟して独り情を作す。

【校異】

「一一清」を、永青文庫本・久曾神本「一一忙」に作る。「班班声」を、永青文庫本・久曾神本「斑斑聲」に作り、また元禄九年版本・元禄十二年版本・文化版本・下沢文庫本・道明寺本・京大本・大阪市大本・天理本・林羅山本・無窮会本・日本詩紀「斑斑声」に作り、「声」に和学講談所本・道明寺本・京大本・大阪市大本・天理本「聲本作」を校注する。本詩の末尾に和学講談所本・道明寺本・京大本・大阪市大本「菅根」の注記があるが、それは次の五九番歌に対する注記。なお、五九番歌の【校異】を参照のこと。

【通釈】

雁の鳴き声と虫の鳴き声が、一つ一つすがすがしく聞こえてきて、秋の花や落葉のあたりではことさらキリキリギイギイと車の軋るような声がすることだ。この雁の鳴き声と虫の鳴き声の二つの興趣に私が十分満

り上げているのに合わせて、前者にとっておく。 **くだまきおとの** 本

集五〇番歌【語釈】「くだまき音の」の項参照。五〇番歌では「雁がねの羽風を寒みはたおりのくだまき音のきりきりとする」のように、「くだまき音」とは「はたおり」という虫の鳴き声であり、それは「雁がねの羽風」が寒いことによる、となっている。当歌においても、第四句「虫の織りきる」との関係から、「くだまき」主体は虫であり、初句「雁がねに」との関係は、「今朝の朝明雁が音寒く聞きしなへ野辺の浅茅そ色付きにける」（万葉集八一・五四〇）「雁が音の寒き朝明の露ならし春日の山をにほはすものは」（万葉集一〇・二一八）などから、雁の鳴き声が寒そうに聞こえる状況つまりは秋の夜寒になって虫が鳴く、ということであろう。寛平御時后宮歌合や夫木抄では第二句が「おどろく秋の」となっているが、それはおそらく初句の「雁がね」の「ね」と「おと」や第四句「虫の織りきる」の「織り」と「くだまき」などの意味的な重複を避けようとしたからであろう。 **夜を寒み** 形容詞のミ語法に

ついては、本集五〇番歌【語釈】「羽風を寒み」の項で言及した。「夜を寒み」という表現は万葉集に一例、八代集では拾遺集までに七例、それ以降は見られない。当歌では「雁がねにくだまきおとの」が「夜」を修飾し、夜が寒いことを、雁と虫の鳴き声によって具体的に表現していることになる。なお、同様の修飾例は「ささのはにおくはつしもの夜をさむみしみはつくとも色にいでめや」（古今集一三・六六三）のみである。また「夜をさむみ衣かりがねなくなへに萩のしたばもうつろひにけり」（古今集四・二二一、本集上巻七七番）「夜をさむみ衣かりがねなくなへにはぎのしたばは色づきにけり」（拾遺集一七・一一九）のように、「夜をさむみ」の後に「衣かりがね」と続け、「夜が寒いので衣を借りようと思うが借りることができない雁」の意を表す、「借り」と「雁」という掛詞を用いた表現も見られる。当歌の結句「衣をぞかる」に類似するが、その主体は「雁」とは考えにくい。 **虫の織りきる** 「織りきる」という複合動詞は、万葉集に「勝鹿の真間の手児名が麻衣に青衿付け ひとさ麻を裳には織り着て」（万葉集九一・一八〇七）

足するということがないのを、いったい誰が知っているだろうか。それで山中の庵にこもって詩文の構想を練りながら、ひとり心に満足を覚えるのだ。

【語釈】

鳴雁 鳴く雁。雁の鳴き声。嵇叔夜「幽憤詩」に「噫噫鳴鴈、奮翼北遊」（『文選』卷二三）とあり、李善は『毛詩』邶風・匏有苦葉に「雝雝鳴雁、旭日始旦」とあるのを指摘する。 **鳴虫** コオロギなどの鳴く声。王昌齡「送十五舅」詩に「夕浦離觴意何已、草根寒露悲鳴虫」、薛能「中秋旅舍」詩に「雲卷庭虛月逗空、一方秋草盡鳴虫」とある。雁と虫の取り合わせも、李百藥「送別」詩に「雁行遙上月、虫声迴映秋」、劉禹錫「擣衣曲」詩に「報寒驚辺雁、促思聞候虫」、白居易「叫曙嗽嗽雁、啼秋唧唧虫」とあるなど、秋の風物詩として漢詩では常見のこと。 **一清** 「一一」は、五五番詩【語釈】該項参照。劉希夷「嵩嶽聞笙」詩に「風止夜何清、独夜草虫鳴」などがある。「清」の異文「忙」では通押しない。 **秋花** 菊・萩などの秋に咲く花。白居易「秋蝶」詩に「秋花紫蒙蒙、秋蝶黃茸茸」、菅原道真「翫秋花」詩に「秋花得地在春宮、万歲將看一箇叢」（『菅家文章』卷一）、具平親王「秋花先秋開」詩に「一畝家園映夕陽、秋花驚見先秋芳」（『本朝麗藻』卷上）などがある。 **秋葉** 秋になって色づき落ちる木の葉。庾肩吾「有所思行」詩に「別前秋葉落。別後春花芳」（『玉臺新詠』卷八）、空海「荒城大夫奉造幡上仏像願文」に「況復春蕊風飄、秋葉雨散」（『性靈集』卷七）、紀在昌「北堂漢書竟宴詠史得蘇武」詩に「賓鴈繫書秋葉落、牡羊期乳歲華空」（『扶桑集』卷九、『和漢朗詠集』詠史）などがある。 **班班聲** 「班班」は、車輪の軋る音を形容する擬音語。『後漢書』五行志に「京都童謡曰、城上烏、尾畢逋。公為吏、子為徒。一徒死、百乘車。車班班、入河間。班班、入河間者、言上將崩、乘輿班班入河間迎靈帝也」とある。「班班」については一六番詩【語釈】該項参照。「聲」は下平声十四清韻、異文「馨」は下平声十五青韻で、隣接する韻だけれども後者は独用であり、他の押韻字「清・情」がともに下平声十四清韻であることから、異文

一例あるが、八代集には見られない。「織って着物にして、着る」(日本国語辞典第二版)の意とすれば、当歌における「織る」も「きる」も主体は「虫」ということになる。寛平御時后宮歌合や夫木抄では「織りきる」を「おりだす」とするが、「おりだす」については本集四九番歌【語釈】「織りいだすはぎの」の項で触れた。当歌で「織りきる」よりも「おりだす」を良しとする理由はとくに見当たらず、結句の「かる」を「着る」にしたことによるものと考えられる。

衣をぞかる

「ころ」と「きぬ」については、本集五五番歌【語釈】「木の葉のきぬを」の項参照。当歌においても、音数律から「ころも」と訓んでおく。「かる」は借りるの意で、万葉集から八代集まで用いられているが、その対象は「宿」であることが圧倒的に多く、「衣」に対する例としては、万葉集では「人妻とあぜかそを言はむ然らばか隣の衣を借りて着なほも」(万葉集一四一三四七二)の一例、八代集には「夜をさむみ衣かりがねなくなへに萩のしたばもうつろひにけり」(古今集四一二二一)「いもせやまみねのあらしやさむからんころもかりがねそらになくなり」(金葉集三一二二一)のように、先に示した「雁」との掛詞の例として見られる。衣を借りることに関連することは、本集五一番歌【語釈】「衣無き身は」の項で取り上げた。

【補注】

当歌は【語釈】でも触れた本集の「雁がねの羽風を寒みはたおりのくだまく音のきりきりとする」(五〇番)と「はなすすきそよともすれば秋風の吹くかとぞ聞く衣無き身は」(五一番)、さらに「秋風の吹き立ちぬればきりぎりす己が綴りと木の葉をぞ刺す」(七三番)などを組み合わせたような成り立ちとみなされる。すなわち三句目までが五〇番歌、四句目が七三番歌、結句が五一番歌という具合である。

その結果ゆえにというべきか、全体としてバランスの取れた表現とは言いがたい。たとえば「虫」については第二句と第四句で繰り返されるのに対して、初句の「雁がねに」は孤立して後に生きていない。これが「雁がねは」という表現ならば、「衣かりがね」という掛詞もあるから、

「馨」は非。なお、【補注】を参照されたい。 誰知 いったい誰が知っ

ているのか、誰も分かりはしない。反語。顔延年「五君詠五首 劉參軍」

詩に「韜精日沈飲、誰知非荒宴」(『文選』卷二二)、荊助仁「五言詠美

人」詩に「誰知交甫珮、留客令忘歸」(『懷風藻』)、菅原道真「筆」詩に

「豈見焚無意、誰知招滅声」(『菅家文草』卷五)とあり、本集にも「誰

知我乘指南車」(六九番)などがある。 両興 「興」は、楽しみ、おも

しろみ、おもむき、の意。この場合は去声。【補注】にも述べたように、

ここは五〇番歌詩との関連から雁の声と虫の声。白居易に「聞崔十八宿

予新昌弊宅時予亦宿崔家依仁新亭一宵偶同兩興暗合因而成詠聊以写懷」

詩があるが、詩語としては極めて稀な語。 無飽足 「飽足」は、十分

に満足する・させる、の意の、やや口語的な語。一般の韻文に語例が無

く、寒山「詩三百三首其一四」詩に「始取驢飽足、卻令狗飢頓」とあ

り、「春秋左氏伝序」の「饜而飫之、使自趨之」の「正義」に「其大義

飽足学者之好、使自奔趨其深致」とあり、本集にも「君思鶴恋院飽足」

(二三四番)とある。 山室 僧侶などが住む山中の住まい。江淹「訪

道經」詩に「寂寞兮山室。德經兮道表」、魏書「馮亮伝に「亮不敢還山、

遂寓居景明寺。敕給衣食及其従者数人。後思其旧居、復還山室」、嵯峨

天皇「贈寶和尚」詩に「苦行独老山中室、盤嗽偏宜林下泉」(『凌雲

集』)とあり、本集には「雪後朝朝興万端、山家野室物班班」(九〇番)

とある。 沈吟 詩文の構想を練りながら低い声でくちさむこと。

「沈吟」には、物思いに沈み、深く思う、の意もあるが、ここは五〇番

詩(含毫朗詠依依処、専夜閑居賞一時)との関連から採らない。謝莊

「月賦」に「沈吟齊章、殷勤陳篇」(『文選』卷一三)とあり、李善は王

逸「九思・悼乱」に「哀我兮寡独、靡有兮齊倫。意欲兮沈吟、迫日兮黃

昏」(『楚辭後語』卷六)とあるのを指摘する。白氏もこの語を好んで用

いるが、その多くは後者の意で用いる。ただ白居易「首夏南池独酌」詩

の「慚無康樂作、秉筆思沈吟。境勝才思劣、詩成不称心」のような例も

ある。紀長谷雄「延喜以後詩序」に「若夫觀物感生、隨時思動、任志所

之、不劳敢沈吟」(『本朝文粹』卷八)とあるほか、藤原為時「夏日同賦

結句と結び付くことも考えられよう。また、上二句は「夜」を修飾し、その寒さを具体化していると言えるものの、続き柄には多少無理が感じられる。

結句の「衣をぞかる」主体が詠み手自身とすると、当歌は秋の夜寒を歌い、その趣向として虫が織るとされる衣を持ち出したことになるが、「ぞ」による強調の仕方も含め、一首としての収斂性に乏しいと言える。

———
 馨」であると、その「両興」とは雁や虫と萩や落葉という、動物と植物を指すこととなって、歌意から大きく逸れることになってしまっているのである。

ここは是非とも、この「班班」を車の軋る音として、「くだまくおと」を写したものと考えなくてはならない。五〇番歌には「くだまくおとのきりきりとする」とあるからである。一六番詩【語釈】該項に示したように、この「班班」（あるいは「斑斑」）の語は、諸辞書ともに擬態語としての解釈が一般であるのだが、『大漢和』『大字源』は、【語釈】に挙げた『後漢書』五行志の「京都童謡曰、城上烏、尾畢逋。公為吏、子為徒。一徒死、百乘車。車班班、入河間。：車班班、入河間者、言上将崩、乘輿班班入河間迎靈帝也」の一節を擬音語としての用例とする。ちなみに『漢語大詞典』や『聯綿字典』『辞源』ではこれを通行が絶えない様、たくさんある様と、擬態語に解釈する。結論的にいえば、この一節も擬態語と解すべきと思われるが（その典故を意識する、杜甫「憶昔二首其二」詩の「齊執魯縞車班班、男耕女桑不相失」の一節も、仇注、鈴木注ともに擬態語と解する）、注意すべきは現代でもこれを擬音語と解する解があることであって、作者もこれを車が軋る音と解していたのではない。

「くだ」およびその「おと」については、五〇番歌【語釈】該項を参照されたいが、「秋花秋葉」のあたりでキリギリスがキリキリと車輪の軋るような声で鳴いていると言いたかったのだろうと推測する。ま ←

未飽風月思」詩に「未飽多年詩思侵、清風朗月久沈吟」（『本朝麗藻』巻下）、藤原伊周「余近曾有到寂上人：敬以答謝」詩に「適交懷旧詩篇末、抱筆沈吟整葛巾」（『本朝麗藻』巻下）など、『本朝麗藻』にはこの意で用いる例が四例もある。本集にも「撫瑟沈吟無異態、試追蕩客贈詞華」（一一四番）とある。**独作情** 「作情」は「為情」に同じ。但し、古典における用例を知らない。あるいは俗的な用法か。心に自得すること。ゆったりと自分を取りもどすこと。恐らく平仄の關係から本来「為情」とすべき所を「作情」としたのだろう。或いは「ナス」という訓が脳裏にあったのかもしれない。崔日用「餞唐永昌」詩に「冬至冰霜俱怨別、春來花鳥若為情」、李白「三五七言」詩に「相思相見知何日、此時此夜難為情」、杜甫「泛江送客」詩に「離筵不隔日、那得易為情」、耿漳「新蟬」詩に「今朝蟬忽鳴、遷客若為情」、李端「送皎然上人歸山」詩に「適來世上豈緣名、適去人間豈為情」、韓愈「桃源圖」詩に「人間有累不可住、依然離別難為情」とある。

【補注】

韻字は既述のように「清・声・情」で、下平声十四清韻。平仄は転句の第六字「飽」が、平でなければならぬところが仄であるので、二四不同、二六対の基本的規則にあてはまらない。

承句「秋花秋葉班班声」の解釈について述べる。この句を普通に読むならば、その「班班声」は「秋花秋葉」の声でなければならぬ。対句である「鳴雁鳴虫一一清」の「一一清」が、「鳴雁鳴虫」の鳴く声であれば、尚更である。しかし「秋葉」はともかく「秋花」が音を出すかという、それは余程の風でもない限りあり得ないことだろう。そこに異文「馨」の存在する余地が生まれる。ただ、それでは韻が合わないし、意味的にも和歌にそぐわなくなってしまう。

本歌は五〇番歌とその構成要素を同じくする同想の作品であって、五〇番詩ではそれを「爽候催来両事悲、秋鴻鼓翼与虫機」と詠んでいた。「両事」とは、和歌にあった「秋鴻鼓翼」と「虫機」であること言うまでもない。ところが本詩の場合、「鳴雁鳴虫一一清、秋花秋葉班班」 ↗

た更に、本作品では起句に雁の鳴声に対する言及があり、転句にも「兩興」とあるところから、この「班班」には雁声の比喩も含まれるものと考えたい。何故なら白詩に特有の、雁声の比喩であった櫓声も、船べりと櫓とが軋る音であり、車軸の軋る音と類似するからである。

起句と承句の、一字ないし数字を挟む同字を含む一句が互に対応する対句は、『文鏡秘府論』東巻・二十九種対には「双擬対」と言う、

【比較・対照】

本歌上二句は詩起句の「鳴雁鳴虫」に対応しようが、それらに対する感覚が歌は「寒し」であるのに対して詩は「清」であり、関連はするが一致はしない。このことは、歌では夜寒を表現するのに対して、詩はまったくそれを取り上げていないことに通じる。

また本詩【補注】に述べるように、承句が歌の「くだまくおと」を写したとすれば、起句との関係で、雁と虫との描写のバランスは明らかに悪いが、それは歌における両者のバランスの悪さに見合っているとさえなくもない。しかも、詩が歌の第三句以降を全く無視し、かつ歌から離れた後半部分を持つことと考えると、詩は音声の情趣にこそ主眼を置いたと考えられる。詩後半は詠み手自身のことを歌い、それ自体は歌結句と共通するものの、歌結句が音声の情趣を感じ取っているとはみなしがたい。

それでは、詩の転句で「誰知兩趣無飽足」のように展開するのはなぜであろうか。想像されるのは、歌の第三句をはさんでの前後の展開を、詩では別様に仕組んだのではないかということである。歌の上二句だけを見るかぎりでは、雁と虫の鳴き声を鑑賞するとそれなくもない。それが、第三句以降は一転して衣を借りたいほどの夜寒という、いわば現実的な、そしておそらくは一人身の淋しい状況を歌っている。歌における、この鑑賞に浸ってはいられない現実というのを、もし「誰知兩趣無飽足」によって表現したとすると、詩はそこから別様の、しかし本集の他詩にも見られるような、一人詩想に耽り満足するという方向に展開したのではないだろうか。

歌【補注】に述べたように、本歌が収斂性に乏しいのは、鑑賞的な素材を持ち出しながら現実的な寒さを歌うというところにあったと考えられる。その点、詩は後者を捨てて鑑賞によって全体をまとめようとしたと見ることもできよう。

とあり、『懷風藻』にも、藤原史「五言遊吉野二首其二」詩に「夏身夏色古、秋津秋氣新」とあるほか、釈弁正「五言在唐憶本郷一絶」詩に「日辺瞻日本、雲裏望雲端。遠遊勞遠国、長恨苦長安」と、全編この対句から成るものまである。猶、この対句の中国詩における用例等に関しては、王利器『文鏡秘府論校注』（中国社会科学出版社）を参照のこと。

59 秋風丹 音緒帆丹拳手 来船者 天之外巨 雁丹曾阿里芸留

秋風に こゑを帆に挙げて 来る船は 天のと亘る 雁にぞありける

59 唳唳秋鴻乱碧空、 唳唳たる秋鴻碧空に乱るれば、

濤音櫓響響相同。 濤音櫓響と響き相同じ。

羈人拳櫓權歌処、 羈人^{かぢ}櫓を挙げて權歌する処、

海上悠悠四遠通。 海上悠悠として四遠に通ず。

【校異】

本文結句の「曾阿」を、類従本・羅山本・無窮会本・永青文庫本・久曾神本は「佐」とし、「^や」と訓む。

同歌は、寛平御時后宮歌合（十卷本、秋歌、一一〇番）にあり（ただし三句目は「ゆく舟は」、結句は「雁にざりける」、また古今集（巻四、

【校異】

「秋鴻」を底本等版本「秋雁」に作り、元禄九年版本「鴻」文化写本「鴻群」を校注するも、類従本・和学講談所本・道明寺本・京大本・大阪市大本・天理本・林羅山本・無窮会本・永青文庫本・久曾神本に従う。

秋歌上、二二二番）に「寛平御時きさいの宮の歌合のうた 藤原菅根朝臣」としてあり（同文）、古今和歌六帖（第六、とり、四三三九番）に「かり みつね」としてある（ただし結句「かりにざりける」）。

【通釈】

秋風とともに、声を帆のように（高々と）挙げて来る舟は、空にある通り路を渡る雁であったことよ。

【語釈】

秋風に 本集四三番歌【語釈】「秋風に」の項参照。 **こゑを帆に挙げて** 本集では「音」を「おと」よりも「こゑ」と訓むのが適当な例が多くその点では問題ないが、何の音声かという点で「おと」と「こゑ」のどちらが適当なのかが問題になる。第二句は文脈的には第三句「来る船は」につながるものであるから、船の発する音声、具体的には梶の音と考えられる（初句の「秋風に」という表現から、風を受ける帆の音という可能性もあるが、それを証する例が見当たらない）。梶の音は「我のみや夜舟は漕ぐと思へれば沖辺の方に梶の音〔於等〕すなり」（万葉集一五・三六二四）「：海人の小舟は 入江漕ぐ 梶の音〔於等〕高し：」（万葉集一七・四〇〇六）などのように「おと」と表現されるのが普通であって、「こゑ」を用いる例は見られない。この限りでは「おと」の方が適当とみなされるけれども、歌全体としては、結句によってその正体が「雁」であることが示されるのを先取りする形で表現し結び付けたとすれば「こゑ」の方が適当と考えられる。「帆」の例は万葉集・八代集を通して「海人小舟帆かも張れると見るまでに艫の浦回に波立てり見ゆ」（万葉集七・一一八二）があるのみで、「帆に挙ぐ」という表現はもとより見られない。比較的早い時期の私家集・私撰集には「こゝろとはねは ゆくふねのほにあげてこそ うらみられけれ」（伊勢集「正保版」四九六）「こぎはなれうらこぐふねのほにあげていほでもこそかなしかりけれ」（古今和歌六帖五・二六五〇）などの例が見られ、これらにおいては、比喩的にはっきり目立つようにする意を表している。「帆」と「穂・秀」との語源の別は定かではないが、同じような比喩的

類従本「雁イ」を校注する。「響相同」を、永青文庫本・久曾神本「是相同」に作る。「權歌処」を、類従本・林羅山本・無窮会本「楫歌処」に作り、永青文庫本・久曾神本「催歌処」に作る。

【通釈】

秋になって飛来する雁たちがまだ暗い未明の空にレイレイと鳴き乱れると、その鳴き声と波音に混じる櫓の響きとが同じように聞こえてくる。旅人は舟を漕ぎ出そうと楫を持ち上げて舟歌を口ずさむと、海はただ遙か彼方まではてしなく広がり、その声は四方どこまでも広がっていく。

【語釈】

唳唳 雁の高く澄んだ鳴き声を形容する重言の擬声語。ただし、日中ともにその用例を知らない。そもそも「唳」は、鮑照「舞鶴賦」に「唳清響於丹墀、舞飛容於金閣」（『文選』卷一四）とあるその李善注に「唳、鶴声也」といい、「鶴唳」の語があるように、鶴の鳴き声を表すのが一般である。しかし、謝惠連「秋懷」詩に「蕭瑟含風蟬、寥唳度雲鴈」（『文選』卷三三）、常建（韋建）「湖中晚霽」詩に「遲回漁父問、一雁声唳唳」、韋応物「往富平懷」詩に「飄風忽截野、嘹唳雁起飛」などであることから、「唳」が雁と縁のない字であったわけではない。菅原文時「唳雲胡雁遠」詩にも「胡雁新来自朔方、唳雲飛遠暗成行」（『天徳三年八月十六日闕詩行事略記』）とある。 **秋鴻** 秋に飛来する雁。五〇番詩【語釈】該項参照。意味上の大差はないが、「鴻」は平声、「雁」は去声であるので、平仄上から異文「秋雁」は非。 **乱碧空** 「碧」は、深く濃い青色。だから、隋煬帝楊広「冬至乾陽殿受朝詩」に「碧空霜華淨、朱庭皎日光」とあるのは、早朝のまだ暗い空をいうのであり、殊に唐詩にあつては盧綸（陳羽）「長安疾後首秋夜即事」詩に「紫陌夜深槐露滴、碧空雲尽火星流」、李賀「溪晚涼」詩に「白狐向月号山風、秋寒掃雲留碧空」、元稹「會真詩三十韻」詩に「微月透簾櫳、螢光度碧空」、白居易「晚秋夜」詩に「碧空溶溶月華靜、月裏愁人弔孤影」とあるように、秋の「碧空」は例外なく夜空を意味する。本集下巻の「玄英碧空雪不閑」（二〇一番）に対応する歌にも「天の川」の言葉があるところを見ると、

な意味を担うようになったものであろう。本歌の場合は未だそのように慣用化された表現ではなく、続く「船」との関係においてその船の帆のように高々と「こゑを挙げて」という実質的な比喩性を持っているとらえられる。

来る船は

この表現で一句を成す例は、万葉集にも八代集にも見当たらない。「行く舟」なら、「いさなとり 海を恐み 行く舟の 梶引き折りて…」(万葉集二二二〇)「我が恋を夫は知れるを行く舟の過ぎて来べしや言も告げなむ」(万葉集一〇一九九八)、「月かげのさすにまかせてゆくふねはあかしのうらやとまりなるらん」(金葉集三一二〇八)「清見がた関にとまらでゆく船は嵐のさそふこのはなりけり」(千載集五二三六二)などの例がある。

天のと亘る

この句の分節は「天(あま)のと」「亘る」であろう。「天のと」は万葉集に「ひさかたの 天の門開き 高千穂の 岳に天降りし 皇祖の…」(万葉集二〇一四四六五)の一例があるが、これは天の岩戸の意。八代集にはこれから転じたと見られる「うき世とは思ふものからあまのとのあくるはつらき物にぞ有りける」(後撰集一四一九九六)「いつしかとあけゆくそらのかすめるはあまのとよりや春はたつらん」(金葉集一一三)などの例が目につく。本歌における「天のと」はそれとは異なり、「(大空を海に見立てた語。「門(と)」は渡って通る所の意) 太陽や月の渡る道」(小学館古語大辞典)で、「さ夜ふけてあまのと渡る月影にあかずも君をあひ見つるかな」(古今集一三一六四八)「ゆく人もあまのとわたる心ちして雲のなみぢに月をみるかな」(詞花集九一二九七)などと同様であるが、本歌の場合「天のと亘る」主体が「月」ではなく「雁」である点、異色である。ただし「とわたる」という類義の動詞があり、「山のはのささらえをとこ天の原門渡る光見らくし良しも」(万葉集六一九八三)のように月を主体とする例のほか、「天河かりぞとわたるさほ山のこずゑはむべも色づきにけり」(後撰集七二三六六)「夕なぎにとわたるちどり浪間よりみゆる小島の雲に消えぬる」(新古今集六一六四五)などのように、鳥を主体とした例も見られる。

雁にぞありける

竹岡正夫『古今和歌集全評釈』では古今集所載の同歌に対して、「文型は「A

あるいは本詩においても夜をイメージしているのかもしれない。ただし采女比良夫「五言春日侍宴応詔」詩に「淑景蒼天麗、嘉氣碧空陳」(『懷風藻』)、高階積善「林花落灑舟」詩には「花滿林梢映碧空、落来片片灑舟紅」(『本朝麗藻』卷上)とある。なお「乱」れているのは、恐らく雁の声であって、雁の飛翔する姿ではないだろう。言うまでもなく雁の飛行は「雁行」の語で表されるような乱れぬものが特徴であるからである。

濤音

大波の音。ただし、この語の用例を日中ともに知らない。恐らく、柳詒「奉和晚日楊子江応教詩」に「未覩織羅動。先聽遠濤声」、劉禹錫「浪淘沙九首其七」詩に「八月濤声吼地来、頭高教丈触山回」、白居易「杭州春望」詩に「濤声夜入伍員廟、柳色春藏蘇小家」とある。「濤声」を改変したものであろうが、本集三〇番詩【語釈】に既述したように、「音」と「声」の原義からすれば、中国ではあり得ない造語であろう。本集には「濤音聳耳応秋風」(一八五番)とある。

櫓響

舟を漕ぐ櫓の音。ただし、この語の用例を日中ともに知らない。恐らくは、劉禹錫「步出武陵東亭臨江寓望」詩に「戍搖旗影動、津晚櫓声促」と初出する「櫓声」の語を改変したものの。

響相同

「秋雁」の「唳唳」たる

鳴き声と、「濤音」に混じる「櫓響」とが同じ音であるということ。雁の鳴き声と櫓の音との類似を言うのは、白居易「河亭晴望」詩の「晴虹橋影出、秋雁櫓声来」と白居易「秋日与張賓客舒著作同遊龍門醉中狂歌凡二百三十八字」詩の「翠藻蔓長孔雀尾、彩船櫓急寒雁声」であり、そこから島田忠臣「秋日諸客会飲賦屏風一物得舟」詩に「雲叶雁声疑櫓動、風吹鷁首怪帆留」(『田氏家集』卷上)、菅原道真「聞早雁寄文進士」詩に「下弦秋月空驚影、寒櫓曉舟欲乱声」(『菅家文章』卷四)、菅原道真「重陽後朝同賦秋雁櫓声来応製」詩序に「秋雁者月令之賓也、櫓声者風窓之聴也」とあり、その詩にも「碧紗窓下櫓声幽、聞説蕭々旅雁秋」(『菅家文章』卷五)とあるなど、この比喩が広まったというのが定説(たとえば、小島憲之『古今集以前』一九七〇八頁)。ちなみに中国では白居易の前にも後にもこうした表現はない。

羈人

旅人のこと。また「羈人」とも。鮑照「代悲哉行」詩に「羈人感淑節。縁感欲回轍」、

はBにぞありける。」の型で、「最後の説明で、種明かしをするといった趣向本位の歌」ともなる。この型は集中に多く見られ、AとBとの間の微妙な共通点を発見してAとBとを結びつけるものであるが、悪くするとクイズの類に墮してしまう場合もある。この歌など、そこまでは墮していない」と説明する。これは見立てとしての表現型をいうものであって、「にぞありける」という歌末表現を持つ歌は万葉集には「妹とありし時はあれども別れては衣手寒きものにぞありける」（万葉集一五―三五九一）の一例あるものの見立てではなく、古今集には一四例見られるが、同歌を除けば典型的な見立ての歌は「風ふけど所もさらぬ白雲はよをへておつる水にぞ有りける」（古今集一七―九二九）だけである。また雁を舟に見立てる歌は万葉集にも八代集にも見られない。なお【校異】で示したように、「雁にぞありける」の「ぞあ」の連続を「ざ」とするのは縮約形であって、勅撰集には認められない（長沼英二「和歌表現の定型化と縮約形―八代集時代の縮約形『ざりける』―」『古代中世文学論考 第三集』新典社、平成十一年十月参照）。

【補注】

本歌は雁を船に見立てたものであるが、その見立てのポイントについて、古今集の諸注釈書は、形状（雁が列をなして飛ぶ様と船の形）と音声（雁の鳴き声と梶で漕ぐ音）の二つを挙げ、音声については白詩「河亭晴望」の「秋雁櫓声来」という表現の影響を指摘している。後者は「こゑを帆に挙げて」という表現もあるので見立てと認めやすいが、前者はそれと直接知りうる表現を見いだしがたい。

手がかりがあるとすれば「天のと」である。「と」は狭い通り路のことであり、「天のと」は天空にそのような路を想定したものである。その想定の根拠になったのはまさに雁の飛ぶ様すなわちその列が横に広がったものではなく縦に並んだ様であったと考えられる。それが中央からたわめるように深く二つに折ったような形になっていけば、船の形にさらに類似したものになるう。なお、これは船を上あるいは下から見た形としてであって、窪田空穂『古今和歌集評釈』の説く「翼を張って来

劉長卿「吳中聞潼関失守因奉寄淮南蕭判官」詩に「一雁飛吳天、羈人傷暮律」とある。なお、四七番詩【語釈】「羈夫」の項を参考のこと。

挙楫「楫」は「楫」の別体字。オールを持ち上げて、まさに舟を漕ぐうとすること。趙冬曦「和尹懋秋夜遊澠湖二首其一」詩に「吹笙虛洞答、挙楫便風催」、劉禹錫「競渡曲」詩の自注に「競渡始於武陵、及今挙楫而相和之。其音咸呼云何在、斯招屈之義」とあり、詩には「靈均何年歌已矣、哀謠振楫從此起」とある。

櫂歌処

「櫂歌」は、舟歌のこと。

同音同義なので「棹歌」とも書く。張衡「西京賦」に「齊棹女縱櫂歌、発引和校鳴葭」（『文選』卷二）とあり、李善は「棹女、鼓棹之女。漢書音義、韋昭曰、棹楫也、楊至切。櫂歌、引櫂而歌也。西都賦曰、櫂女謳」といい、漢武帝「秋風辭」に「橫中流兮揚素波。簫鼓鳴兮發棹歌」（『文選』卷四五）とあるのを引用する。陸機「櫂歌行」詩に「名謳激清唱、榜人縱櫂歌」とあり、小野岑守「奉和江亭曉興詩」に「棹唱全聞辺俗語、漂歌半雜上都音」（『凌雲集』）、菅原道真「正月二十日有感」詩に「廻頭左右皆潮戸、入耳高低只棹歌」（『菅家文章』卷三）などがある。

海上

海面。江淹「雜體詩三十首阮步兵詠懷籍」詩に「青鳥海上遊、鸞鵠蒿下飛」（『文選』卷三一）とある。ただし、空海『三教指歸』巻下に「是故海上頑人、疑如魚木。山頭愚士、怪如木魚」、菅原道真「海上月夜」詩に「秋風海上宿蘆花、況復蕭々客望賒」（『菅家文章』卷二）、

菅原道真「早春内宴聽宮妓奏柳花怨曲」詩に「余音縱在微臣聽、最歎孤行海上沙」（『菅家文章』卷三）、菅原道真「依病閑居聊述所懷奉寄大学士」詩に「含情海上久蹉跎、猶恨虛勞動宿痾」（『菅家文章』卷四）、菅原道真「海上春意」詩（『菅家文章』卷六）など、日本漢詩のほとんどは、海のほとりの意で用いる。**悠悠** 遠く遙かに際限のない様を形容する重言の擬態語。陳子昂「宿襄河驛浦」詩に「天河殊未曉、滄海信悠悠」、張宣明「使至三姓咽麵」詩に「東都日宵宵、西海此悠悠」とあり、小野岑守「江樓春望」詩に「春雨濛濛江樓黑、悠悠雲樹盡微茫」（『文華秀麗集』卷上）、菅原道真「仮中書懷」詩に「悠々皆果報、出入苦生涯」（『菅家文章』卷五）、菅原道真「近以冬至書懷詩：重以呈之」

る一列の雁影を、水平線の舟と見た」という横から見た形ではあるまい。

とあるように、大船の両側に設置された大形の長いオールをいう。また、時にそのオール1本を船尾に付けて、左右に揺り動かしながら舟を進めることもあり、後代にはもっぱら後者を言うことになった。

「楫」は、舟を進めるために水をかくオールのこと。小型の舟に用いる、比較的短いオール。ちなみに「漁父」の「漁父莞爾而笑、鼓枻而去」

(『楚辞』)の「枻(yì)」は、「楫(zhì)」の楚地方の方言だろうという。

「櫂(zhào)」は、「棹(zhào)」とも書く。「棹」は『釈名』釈船に

「在傍撥水曰棹」、「方言」九に「楫……或謂之棹」とあり、『楚辞』

にも登場することから、「楫」の楚地方の方言かという。「棹」は「帰去来辞」に「或命巾車、或棹孤舟」とあるように、本来動詞であったものが名詞化したもののようである。ただ、「棹」は「楫」と区別されて、特に長く大きいオールを指すことになる。

【比較・対照】

本詩前半は、雁を船に音声という点で見立てる歌の表現を、より詳細・明確にしたものと言える。この見立ては歌【補注】にも述べたように、表現自体からも推測しやすいが、その前提として「この歌が白詩を出典とすることは、白詩を愛読した当時の平安官人には、直ちに判明したことであろう。しかも彼等はこれを巧みに歌に詠みこんだと感じ入ると共に、各人各様、歌をめぐる「あやの場」を設定したものと思われる」(小島憲之「古今集の表現の成立」『解釈と鑑賞』第三五巻二号、昭和五二年二月)。詩【語釈】および【補注】に示された日本漢詩におけるこの見立ての普及はそのことを裏付けていよう。

問題は、形状に関する見立てが詩にはまったく写されていないことである。その理由として考えられることは二つある。一つは、そもそも本歌に形状の見立てを認めなかったということである。歌【補注】に述べたように、表現上の手がかりが弱いというだけでなく、万葉集以来、雁が詠まれる場合に取り上げられるのはもっぱらその鳴き声であって、飛ぶ様子を主体に描写した歌は、「白雲にはねうちかはしとぶかりのかずさへ見ゆる秋の月の月」(古今集四一九一)「うすずみにかくたまづさとみゆるかなかすめるそらにかへるかりがね」(後拾遺集一七二)など、きわめて稀である。本注釈も、あくまでも本歌における形状の見立ての可能性を指摘したにすぎない。

もう一つは、かりに形状の見立てを認めたとしても、白詩からの影響と見られる音声の方の見立てを重視したということである。その態度は結果的に、詩の後半に歌には全く現れない舟歌を取り上げることにより、全体的に聴覚的描写を中心にとめているところにもうかがえるように思われる。

しかしいづれにしても、本歌が雁を船に見立てることを眼目とする点に変わりはないが、詩の方は必ずしもそうではない。というよりむしろ、転句で船自体の存在を示すことによって、承句の「濤音櫓響響相同」は見立てという、一方の非現前を前提とした想像上の同定ではなく、雁の鳴き声と櫓

詩に「感徹悠々不道疎、雷声在晦甚寛舒」(『菅家文草』巻一)、菅原道真「賦得赤虹篇」詩に「挙眼悠々宜雨後、廻頭眇々在天東」(『菅家文草』巻一)、本集にも「悠悠雲路流晴月」(二四一番)とある。四遠通

四方の遙か彼方まで通じる。四一番詩【語釈】該項参照。

【補注】

韻字は「空・同・通」で、上平声一東韻。平仄にも基本的誤りはない。雁の声と櫓の音とのアナロジーは、村上天皇「幾行寒雁去」詩に「驚弓斜避三更月、引櫓遙過万里雲」(『新撰朗詠集』雁)、村上天皇「塞雁隨風遠」詩に「陣影半經胡塞斷、櫓声猶過洞庭遙」(『類題古詩』遠)、菅原文時「雲雁報秋声」詩に「漢晴乱櫓波翻曉、村静和砧露結時」(『類題古詩』)、菅原文時「啖雲胡雁遠」詩に「万里和砧凝処滅、千程引櫓散時長」(『天徳三年八月十六日闍詩行事略記』)などとあるように、村上朝の十世紀中頃に再び流行したようである。

更に贅言すれば、「櫓」は、『釈名』釈船に「船尾曰櫓、在傍曰櫓」

の響きをともしに耳にし、両者の実際上の類似性を描写したものと解釈される。白詩「河亭晴望」には、船が登場しないからこそ「秋雁櫓声来」という一句が見立ての表現になるのである。

本詩作者がその詩全体を知り、かつ歌の見立ても認めた上で、あえて実景描写として表現したとするなら、それこそ「歌をめぐる」で「あやの場」を設定した」と言えば言えるかもしれない。

〔注〕本稿は、『共立女子大学文学部紀要』第四〇集～第四九集（平成六年二月～平成一五年一月）および『東京工業高等専門学校研究報告書』第二六号～第三四（二）号（平成六年二月～平成一五年一月）の続稿である。

（平成一五年九月九日 受理）

東京工業高等専門学校研究報告書

第 35 (2) 号

平成15年度

平成16年1月10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.

