

久留米工業高等専門学校
紀 要

第14卷 第2号

MEMOIRS
OF
KURUME NATIONAL COLLEGE OF TECHNOLOGY

Vol. 14 No. 2
MARCH 1999

平成 11 年 3 月

久留米工業高等専門学校

久留米工業高等専門学校

紀 要

第14巻 第2号
(平成 11年 3月)

目 次

| | | | | | |
|--|----------|---------|--------|---------|----|
| 氷蓄熱システムの研究 — 食堂冷房システムの開発 — | 平松 山江 | 礫本 下崎 | 国健 友健 | 男一 廣司 | 1 |
| SPS システム用 RF-DC エネルギー変換電子管 | 杉大 上 | 森崎 田 | 欣邦 裕 | 三倫 人 | 7 |
| 可溶性ポリイミド (3) — 光反応性溶媒可溶型ポリイミド — | 津佐 野坂 | 田藤 上本 | 祐彌 哲禎弘 | 輔郎 郎英明 | 13 |
| DMO 法による Al 合金/Al ₂ O ₃ 複合体の形成 | 重久 馬榊 | 松保 越永 | 浩基 幹英 | 気郎 男明 | 23 |
| Duality Transformation for the Planar Rotator Model on the Two-Dimensional Lattice | Yoshiaki | TANAKA | | | 31 |
| 第二言語習得理論に基づく「実践英語」— その1 — インターネットを利用した英語教育事例の分析及び評価 | 米 永 | 正 敏 | | | 43 |
| ハンナ・アーレントの『行為』概念 (三) | 東 島 | 光 雄 | | | 80 |
| 真宗の葬送儀礼について | 遠 藤 | 一 | | | 47 |
| 剣道人間形成論考 (2) — 技術的要素と「道徳的精神性および行動規範」について — | 木 寺 | 英 史 | | | 51 |
| 表計算ソフト「エクセル」を用いて差分方程式を解く | 杉 森 | 欣 三 | | | 57 |
| 教育用電子計算機システムの構築と運用 | 小馬 栗江松大 | 田場 原頭本淵 | 幹隆 龍成健 | 雄男子 人一豊 | 61 |
| 第7回科学技術セミナー ハイテクノロジーの現状 極地から！深海から！地球環境への提言 | 鳥中 坂加鎌 | 井 藤 | 昭裕 翁秀吉 | 美之 介文助 | 67 |

一般論文

氷蓄熱システムの研究

— 食堂冷房システムの開発 —

平 瀨 国 男
松 本 健 一
山 下 友 廣
江 崎 健 司*

A Study of Ice Storage System — Development for Cafeteria Cooling System —

Kunio HIRAHAYA
Kenichi MATSUMOTO
Tomohiro YAMASHITA
Kenji ESAKI*

The ice storage cooling system for the cafeteria in Kurume national college of technology, were developed and tested. Ice freezing coils manufactured by us were equipped in the ice storage tank. In the ice freezing tests, ice on the coils were uniformly grown by use of the refrigerant R22 liquid distributor with orifice in diameter of 4mm. In the cooling tests, the temperature of system cooling water cooled by the storage ice were maintained about 4 to 7°C during cafeteria cooling time. As a result, the system freezing and cooling performances were achieved to the initial planning ones.

Key Words : Static Ice Storage Cooling System, Ice on Coil, Orifice Refrigerant Distributor

1. 緒 言

我が国において二度にわたるオイルショックを経験したことで、産業部門における省エネルギー対策が進展し、近年この部門でのエネルギー消費量の増加は見られてない。一方、運輸及び民生部門のエネルギー消費は増加を続けており、そのため我が国全体のエネルギー消費量を押し上げている。民生部門のエネルギー消費量増加の大きな割合を占めるのが冷房負荷の増加であり、とくに夏期昼間の電力需要が増大し、夜間との較差が2倍以上になっている。電力会社はこの昼間の最大負荷に対応する電力設備が必要であり、夜間はその半分以上の設備が休止する。この昼夜間電力需要の平準化による電力の安定供給と同時に需要者の利益や地球環境対策を目的として氷蓄熱システム¹⁻⁴⁾の開発が進められている。氷蓄熱システムは電力平準化による環境負荷(温暖化ガス)低減効果や、使用者にとっては冷房設備容量の低減や夜間の割安電気料金の利用が計れるなど、表1に示すような様々な特徴を持っている。

氷蓄熱システムは製氷方式により、スタティック型とダイナミック型に大別されるが、前報⁵⁾ではダイナミックシステムとして、直接接触法による流動性のある氷の製氷過程について報告した。本研究では著者らがこれまで行ってきた氷蓄熱システムの開発研究をもとに設計・製作し、久留米高専学内食堂に設置したスタティック型氷蓄熱冷房システムの概要とその製氷・冷房性能試験結果について報告する。

表1 氷蓄熱システムの特徴
(◎○：長所, ▲△：短所)

| [空調システム使用者] |
|--------------------|
| ◎ 熱源機器容量低減(夜間運転) |
| ◎ 契約電力低減(デマンド対策) |
| ◎ 運転費低減(夜間電力使用) |
| ○ 高効率定格運転(夜間運転) |
| ○ 蓄熱槽容量減少(氷融解熱利用) |
| △ 冷凍機性能低下(氷使用) |
| ▲ 設備費高(氷蓄熱槽設置) |
| [電源・地球環境] |
| ◎ 電力平準化(電源容量低減) |
| ○ 夜間高効率発電(温暖化ガス低減) |

平成10年11月20日 受理

*専攻科学生

2. 氷蓄熱食堂冷房システムの計画

夜間冷凍機を運転・製氷し、昼間それを使って冷房する氷蓄熱冷房システムは、冷凍機が冷房用に使用され始めた1930年代に米国において教会の冷房に使用されたのが始めと言われている²⁾。当時冷凍機は高価なうえ小容量で性能が低く、日曜日の限られた時間だけ教会の大空間を冷房するためにとられた冷房設備費低減対策であったと考えられる。しかし、冷凍機は高性能化と量産化によりそのコストが格段に低下し、逆に氷蓄熱設備のコスト増が全体の設備費を上げるようになり、その後このシステムの採用は見送られてきた。

これまで久留米高専では、学内食堂に冷房設備が無く、夏期には蒸し暑い環境の下での食事を余儀なくされていた。以前、食堂冷房設備の計画があったが、食堂の電源容量が足りず、新たに電源工事が必要であったことから、予算不足で実現できなかった経緯があった。また現在、学内では夏期に契約電力(デマンド)の限界に達する 경우가しばしば起き、デマンドを圧迫する大容量冷房設備の増設が困難な状況にある。久留米高専における積算電力及び最大電力の最近5年間の変化を図1に示す。積算電力及び最大電力ともに年々高い割合で増加を続けている。7月の最大電力が498kWのデマンドに達し、ここ数年間は冷房装置の部分的運転停止で対応している。

このような状況の下、夜間電力で冷凍機を運転・製氷し、昼間それを使って食堂を冷房する氷蓄熱冷房システムが計画された。久留米高専学内食堂は通常昼食時の11時から13時の間営業されている。食堂床面積は126m²であり、それに続く32m²の厨房があり、蓄熱装置なしの通常の冷房装置だけで空調を行うには、約12kW以上の空調機動力が必要と見積もられた。この電力をまかなうには現在の電源容量では不足し新たな電源工事が必要となる。著者らの実験室では学生実験実習設備としてヒートポンプ氷蓄熱空調装置が稼働しており、氷蓄熱槽の製作と性能試験を行っていることから、食堂冷房に氷蓄熱システムを導入するよう提案した。このシステムの運転パターンは図2に示すように、1.5kWの冷凍機を夜間16時間製氷運転し、その水を使って昼間2時間だけ食堂を冷房する。従って、このシステムの冷凍機動力は図3に示すように、冷房装置のみの場合に比べて1/8に低減され、電源容量も現在の設備でまかなえることが判った。また、夜間電力を使用するので、夏期昼間にしばしば発生する最大契約電力(平成10年：498kW)を圧迫しない。

氷蓄熱システムでは、冷凍機のコストを低減できるが、製氷装置と氷蓄熱槽が新たに必要になり、システム全体の設備費を高くし、このシステムの普及を阻害している。特に、本計画のような、小規模になるほど設備費が割高となる。そこで、このシステムの開発方針の主眼を、極力製作費を抑えることとし、各要素機器はメーカーの量産品を使用し、主要機器で設備費の高い氷蓄熱槽は著者らの研究室で開発・製作することにした。

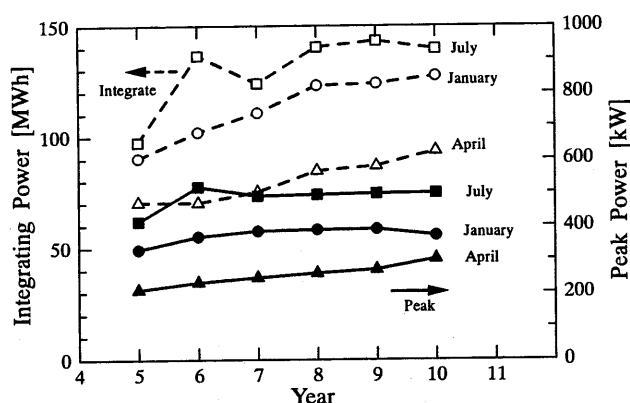


図1 久留米高専の月間使用電力の変化

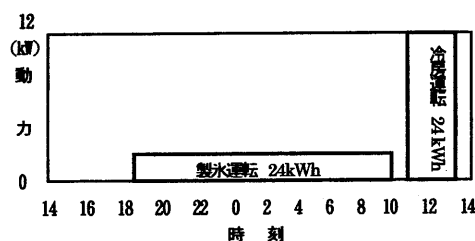


図2 食堂冷房の運転パターン

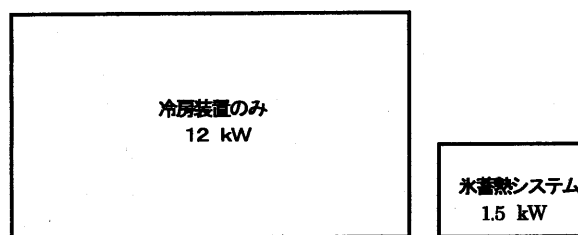


図3 食堂冷房の冷凍機容量の比較

3. 氷蓄熱食堂冷房システムの概要

本研究で設計・製作し性能試験を行った氷蓄熱食堂冷房システムの構成機器の写真と概略系統図をそれぞれ図 4 と図 5 に示す。本システムは冷凍機、氷蓄熱槽、冷水ポンプとファンコイルユニットより構成される。冷凍機は冷媒フロン R22 を用いた容量 1.5kW の蒸気圧縮式空冷スクロール型である。氷蓄熱槽は本研究室で開発・製作したもので、図 6 に示すように、規格品の容量 1.5m³ の FRP 製タンク内に、手製の 8 組の製氷コイルを挿入したもので、加工が容易で低コストで製作できた。各製氷コイルは外径 12.7mm、内径 11.9mm、長さ 11m の銅管を直径 240mm、ピッチ 92mm のコイル状に巻いたものである。

製氷運転において、冷凍機で液化された R22 は氷蓄熱槽内へ送られ、図 7 に示すオリフィス分配器を通して各製氷コイルに分配される。冷媒はコイル内を蒸発しながら流下し、その蒸発潜熱により管外面の水を冷却し氷を成長させる。蒸発した R22 蒸気は管寄せで合流して圧縮機へ戻る。

このシステムの運転手順を以下に示す。製氷運転では夜間電力で冷凍機を動作させ蓄熱槽の製氷コイルに製氷・貯蔵する。運転はあらかじめ設定された時間内でタイマーにより ON-OFF 制御される。運転時間内で水量センサーにより予定水量に達したと検出された場合、制御回路により製氷運転を停止する。

昼間の冷房運転時には冷凍機は休止する。氷蓄熱槽内で冷却された水は冷水ポンプで食堂の天吊り型ファンコイルユニットへ送られ、食堂を冷房した後氷蓄熱槽へと戻り循環する。

このシステムの性能試験における測定項目は、システムの積算電力量、製氷量、冷凍機各部の温度・圧力、氷蓄熱槽内の製氷コイル温度分布、槽内の水温分布、食堂内外の気温、などである。本システムは、電力会社との間で蓄熱調整契約を結んでおり、設置された積算電力計は夜間割引時間（22時～8時）と通常料金時間（8時～22時）の電力を別々に積算表示する。製氷量の測定は、凍結による水と氷の密度差による蓄熱槽内の水位変化を傾斜マンオメータで測定することにより求める。冷凍機各部における冷媒の温度と圧力測定用に熱電対とブルドン管圧力計が各所に取り付けられている。各製氷コイルには管表面温度測定用の熱電対が管外面に 3～5 か所に固着されている。蓄熱槽内中央には低面から高さ方向距離 30, 380, 730, 1080mm の位置に水温測定用

の熱電対を配置している。各部の温度はパソコンで制御されたデータ収録装置により自動的に計測記録される。

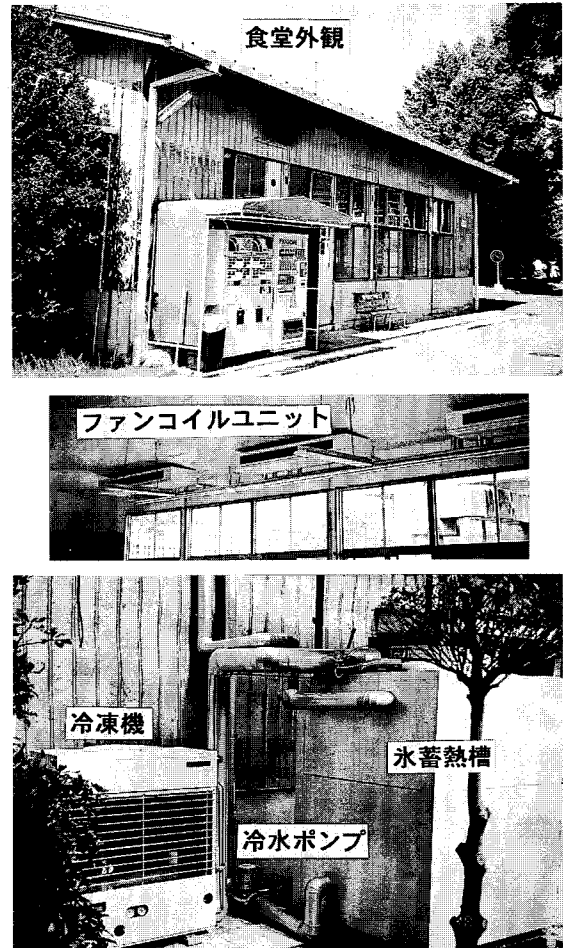


図 4 食堂冷房システム構成機器写真

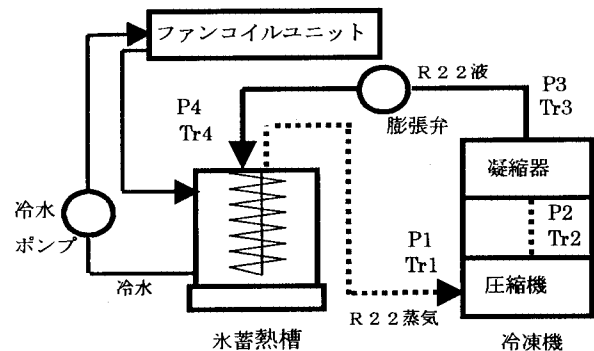


図 5 食堂冷房システム概略図

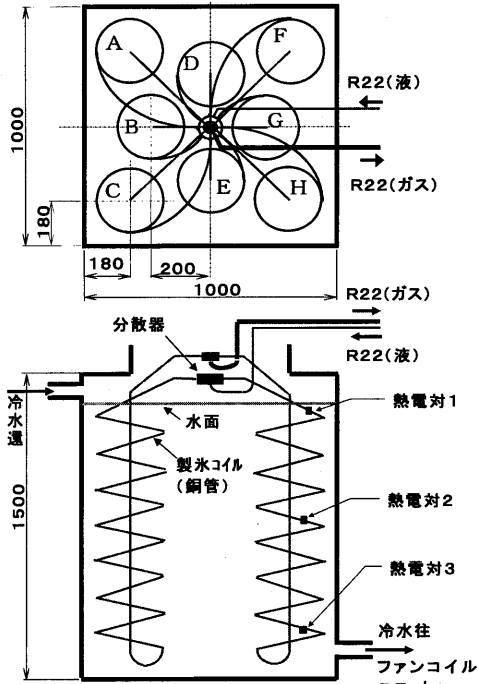


図 6 水蓄熱槽の製氷コイル配置

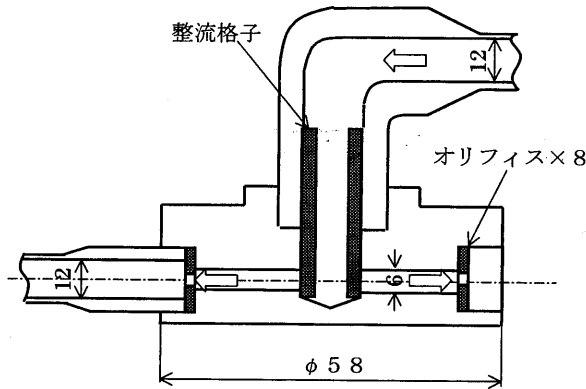


図 7 オリフィス冷媒分配器

4. 製氷特性試験

冷凍機で圧縮・液化された R22 液を各製氷コイルに均等に分配することが水蓄熱槽の製氷性能を大きく支配すると思われる。本研究では、R22 液分配器に、オリフィスなし (Exp1)、オリフィス径 2 mm (Exp2)、オリフィス径 4 mm (Exp3)、を用いた 3 通りの製氷性能試験を行った。それぞれの実験条件及び製氷量と積算電力を表 2 に示す。

オリフィスなし (Exp1)、オリフィス径 2 mm (Exp2)、オリフィス径 4 mm (Exp3) の条件で行われた製氷・冷房試験における積算電力及び製氷・蓄氷量の時間変化をそれぞれ図 8 及び図 9 に示す。図 8 において、積算電力は時間とともに直線的に増加

表 2 製氷試験実験条件・結果

| 実験番号 | Exp1 | Exp2 | Exp3 |
|----------|------|------|------|
| 実験日 月/日 | 6/18 | 7/2 | 9/17 |
| 製氷時間 min | 1153 | 1000 | 1145 |
| オリフィス mm | なし | φ2 | φ4 |
| 実験開始外気温℃ | 30 | 28 | 26 |
| 実験終了外気温℃ | 24 | 30 | 26 |
| 製氷量 kg | 509 | 307 | 591 |
| 積算電力 kwh | 44.4 | 39.3 | 41.3 |

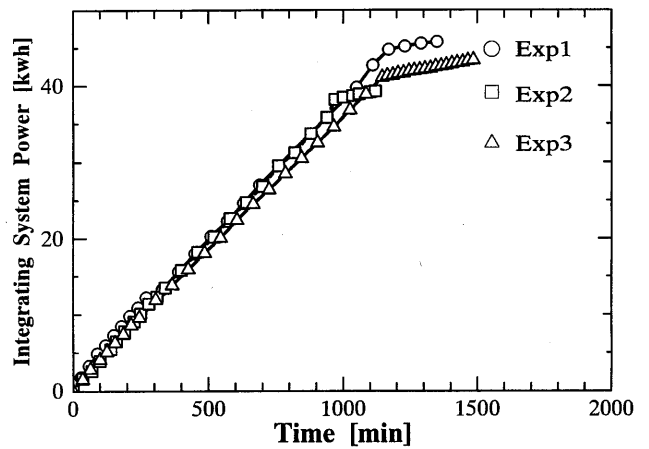


図 8 積算電力の変化

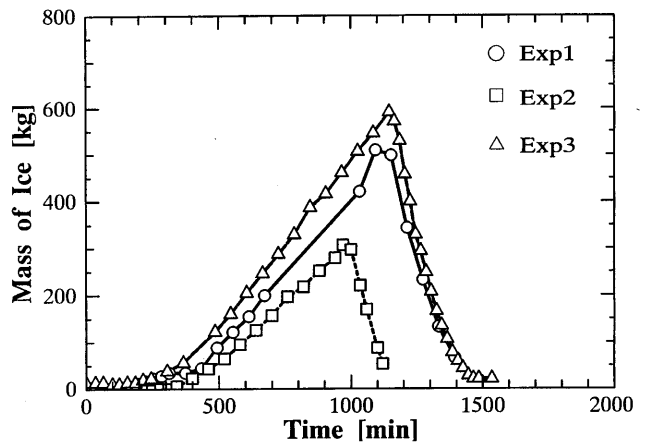


図 9 製氷・蓄氷量の変化

し、各実験条件による相違はほとんど現れていない。各実験においておよそ1000分経過後のゆるやかな積算電力の増加は冷房運転時の冷水ポンプ (0.4kW) 運転による。一方、図 9 における製氷量の時間変化は、各条件ごとにその勾配が異なり、オリフィス径 2 mm (Exp2)、オリフィスなし (Exp1)、オリフィ

ス径 4 mm (Exp3), の順に製氷性能が上昇している。各実験における 8 組の製氷コイル (A~H) における製氷運転終了時の最終着氷位置を図10に示す。オリフィスなし (Exp1) の製氷状況はコイル上部のみ (B, C, D), コイル中部まで (A, E), コイル底部まで (F, G, H) とばらつきが大きく, 冷媒流量の分配にばらつきがあることが分かる。しかし, オリフィス径 2 mm (Exp2) では, 製氷部なし (D, E), コイル上部のみ (B, C, H), コイル底部まで (F, G) と製氷状況のばらつきがかなり大きくなっている。これは, オリフィス径が小さいため, オリフィスの締め付け用のゴムが冷媒により損傷し, 部分的にオリフィスを閉塞し, 冷媒の流量配分に大きく影響したものと思われる。そこで, オリフィス締め付け用に金属バネを使用し, オリフィス径を 4 mm と大きくした実験を行った。冷媒分配器直前のエルボによる偏流も考えられたので, エルボ出口に整流用の金網を新たに取り付けた。このような配慮を行ったオリフィス径 4 mm (Exp3) の製氷実験では, コイル中部まで (A, B, D, F, G, H), コイル底部まで (C, D) とコイル毎の製氷状況はかなり均一になっており, 適当な寸法のオリフィスの使用により, 冷媒の分配が均一にできることが分かった。

図 9 において, いずれの条件においても製氷量は時間とともに直線的に増加し, 実験時間内では氷の成長に伴う製氷性能の劣化は見られない。これは, 管外に氷が成長するため伝熱面積が増加し伝熱劣化が緩和されること, 及び製氷コイル上流側の氷の成長につれて伝熱劣化が起これば凍結位置がコイル下流側へと進行するためと考えられる。

圧縮仕事に対する冷却効果の割合を示す冷凍機の成績係数 (COP)_r 及び, 冷凍システムに使われた総電力に対し製氷に要したエネルギーの割合を示す冷凍システム全体の成績係数 (COP)_s を図11に示す。(COP)_r, (COP)_s ともに Exp2, Exp1, Exp3 の順に高くなっており, 特に (COP)_s については製氷性能の相違が明瞭に現れている。

本実験で最高性能を示した Exp3 における製氷コイル各部の温度変化を図12に示す。製氷コイルの冷媒入口から下流に IN, A2, A3, OUT の順にほぼ等間隔に温度センサーが配置されている。IN と A2 については製氷運転開始からそれぞれ150分, 400分後に氷で覆われたとみられる温度低下が現れているが, A3 及び OUT の位置では氷点下への温度低下がみられないことから着氷していないことがわかる。

図14は蓄熱槽内中央の高さ方向における水温変化を示す。水温分布は槽底部の 4℃から水面に向けて順次 0℃に漸近し, 4℃を境にした水の密度の逆転を示している。

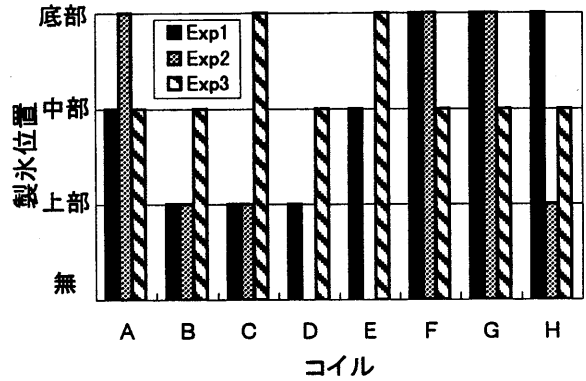


図10 製氷コイルの最終着氷位置

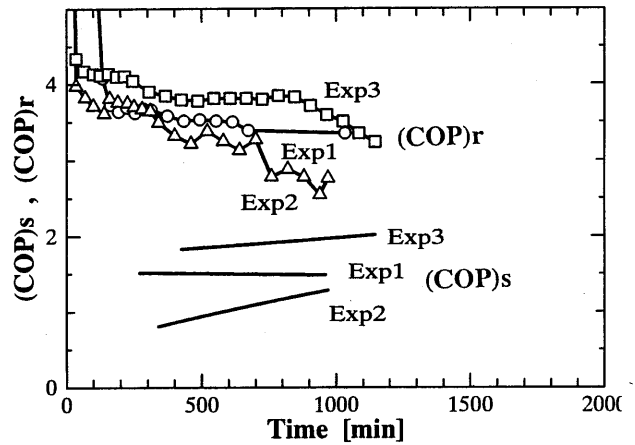


図11 冷凍機・システムの成績係数

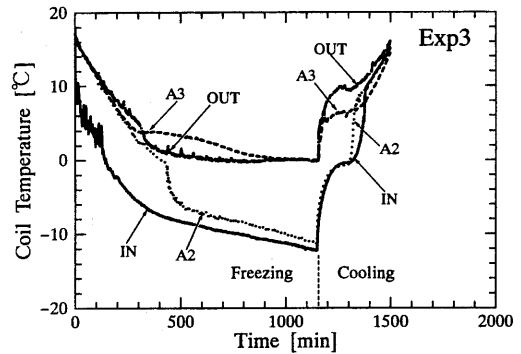


図12 製氷コイル温度分布

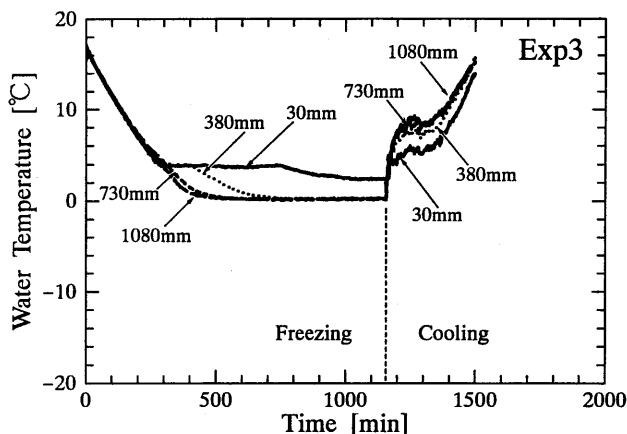


図13 蓄熱槽の水温分布

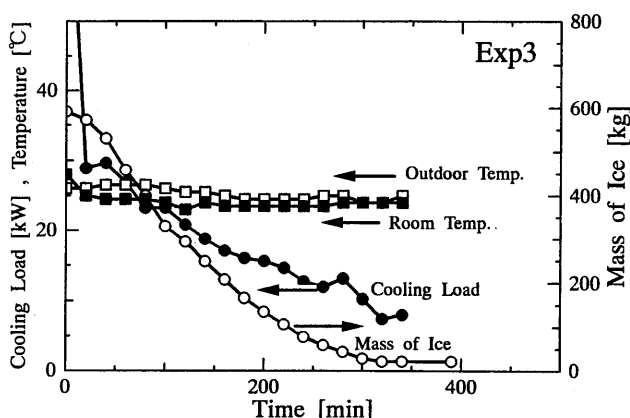


図14 冷房特性

5. 冷房特性試験

図14は Exp3 における昼間冷房運転時の冷房負荷、室内外温度、蓄水量の時間変化を示す。冷房負荷は冷房運転開始直後の30kW から時間とともに減少するが、4時間経過後も12kW 以上を維持しており、十分な冷房性能を示している。

図13に示す冷房運転時の槽内水温分布は、製氷時と逆に上部から順に降下し、冷水出口(30mm 付近)の水温は4時間経過後も4℃から7℃の範囲にあり、良好な温度特性を示す。これは冷水の槽内への戻り部に散水用の多孔管を槽上部に均一に配置し、吹き出し口を上方に向けたことにより、槽内の流れが抑制され水温分布が成層化されたものと考えられる。

6. 結 言

著者らがこれまで行ってきた氷蓄熱システムの開発研究をもとに、久留米高専校内食堂の氷蓄熱方式による冷房システムの設計・製作と実際の製氷・冷房運転を行い、所期の性能を達成した。また、本研究で製作した氷蓄熱槽の製氷性能試験と、その水による食堂冷房試験を行い、以下の結論を得た。

適当な寸法のオリフィスを使用することにより各製氷コイルへ流入する冷媒の分配を均等にでき、製氷性能が格段に上昇することが分かった。冷房試験において、戻り冷水の散布に上向き多孔管を使用することにより氷蓄熱槽の水温分布は成層化され、良好な氷融解性能と一定温度の冷水の供給が可能となった。システム全体の性能は当初の計画値にほぼ到達し、約3か月間の製氷・冷房運転を行うことができた。

今後、本システムの省エネルギー化・高性能化と普及に向けた低コスト化を進めるつもりである。

本食堂冷房システムは久留米高専谷口宏校長よりエネルギー対策費として製作費の援助を受けて実現した。また、日立冷熱(株)井上健氏には、本システムの設計と施工にあたりアドバイスを受けた。ここに記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 射場本・他：冷凍，62-714 (1987)，1-51.
- 2) 二瓶・他：冷凍，62-715 (1987)，3-56.
- 3) 鈴木・伊藤：エネルギー貯蔵システム，エネルギー・資源学会 (1992)，195-242.
- 4) 稲葉・他：冷凍，73-844 (1998)，2-76.
- 5) 平碧・松本：久留米高専紀要，14-1 (1998)，1-4.

一般論文

SPSシステム用RF-DCエネルギー変換電子管

| | | | |
|---|---|---|---|
| 杉 | 森 | 欣 | 三 |
| 大 | 崎 | 邦 | 倫 |
| 上 | 田 | 裕 | 人 |

RF to DC Energy Converter Electron Tube for SPS System Application

| | |
|----------|----------|
| Kinzo | SUGIMORI |
| Kuninori | OOSAKI |
| Hiroto | UEDA |

In this paper, we have discussed the possibility of microwave tubes as a RF to DC energy converter for the SPS (Solar Power Satellites) ground station. Usually, the microwave tubes are used as a microwave amplifier or oscillator. It was shown experimentally by using the conventional small power helix traveling-wave tube (TWT) that RF to DC energy conversion phenomenon was observed at the special operating condition of beam voltage. The DC output power of 7W was measured with the conversion efficiency of more than 40%, when microwave power of 17W was fed to the TWT input.

1. ま え が き

これまでの石油、石炭などの化石エネルギー資源に代わって、クリーンで恒久的な新エネルギー源開発の要求がこれまでに高まっている。そのような状況の中で、将来の有望なエネルギー源のひとつとして、太陽発電衛星 (Solar Power Satellite ; SPS) の構想が提案され¹⁾、国内外の研究機関でシステム、ハードウェアの両面から調査研究が行われている²⁾。

SPSシステムは宇宙に打ち上げた太陽発電衛星から、発電電力をマイクロ波 (RF) で地球に送電し、地上でこれを再び直流電力 (DC) に変換して、電力源として利用しようとするものである。図1にSPSの概念図を示す。

その中で、マイクロ波送受電技術はSPSを実現するうえで、特に重要なキイ技術のひとつである。筆者らは地上で受電したマイクロ波電力を直流に変換する過程に注目して、新しいRF-DC変換用マイクロ波電子管の可能性を検討している³⁾⁴⁾。

これまでRF-DC変換素子としては、受電アンテナと一体化した、いわゆるレクテナなど、固体ダイオードを用いている。しかし、高周波用固体ダイオードは1素子あたりの取扱電力が小さく、SPSのよ

うに本来、大電力を扱うシステムには必ずしも適していない。また多数個の素子の合成で構成するとしても、合成による電力損失や電気サージなどによる破損のばあいの信頼性低下などを考慮すれば、やはり適当ではない。そこで固体ダイオードに代わる大電力素子=RF-DC変換用マイクロ波電子管=があれば大変好都合である。マイクロ波電子管はその構造上、基本的に大電力、高電圧動作に適している。

従来よりマイクロ波電子管はマイクロ波を増幅、発振するデバイスであったが、これを逆にRF-DC変換用として開発試作する試みはこれまでわずかの例を除いて殆どなされていない⁵⁾⁶⁾。

マイクロ波電子管には進行波管 (TWT) 形、クライストロン形、ジャイロトロン形など、動作構造的にいろいろのタイプがある。ここではひとつの試

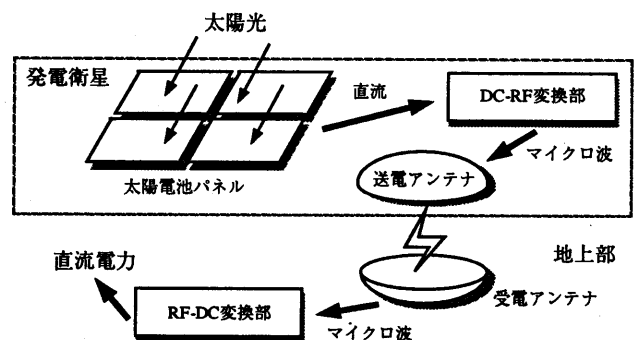


図1 SPSの概念図

みとして進行波管を取りあげ、これによる RF-DC 変換の可能性を検討し、実際に RF-DC 変換動作が得られることを実験で確認できたので報告する。

2. マイクロ波管における RF-DC 変換動作

2.1 マイクロ波と電子ビームとの相互作用

進行波管に限らず、一般にマイクロ波管では電子ビームとマイクロ波との相互作用によって、マイクロ波と電子との間でエネルギーのやりとりを行っている。通常のマイクロ波増幅動作では電子速度が減速して運動エネルギーを失い、マイクロ波エネルギーに変換される。図 2 は進行波管における電子ビームと RF 電界との相互関係を示すものである。同図 (a) は通常の増幅動作のばあい、電子速度は RF 電界の位相速度より若干速い状態にある。このばあいは電子は減速電界位相領域に集群し、電子は減速されてマイクロ波は増大、増幅される。一方、電子速度を RF 電界の位相速度より少し遅くすると、図 2(b) に示すように電子の集群の中心は遅れて加速電界位相領域にずれ込み、RF 電界は減衰して電子は加速され、エネルギーを増す。

2.2 直流出力を取り出す

このように電子速度 < RF 位相速度となるように条件を整えれば、進行波管内部でマイクロ波電力は電子の運動エネルギーに変換されるが、そのまま電子ビームがコレクタ電極に突入すれば、単にコレクタ熱損失を増加させるだけである。電子のエネルギー増加分をコレクタに消費させることなく、有効に外部に直流出力として取り出すには、通常の増幅管でも効率改善の手段として用いられている、電位低下

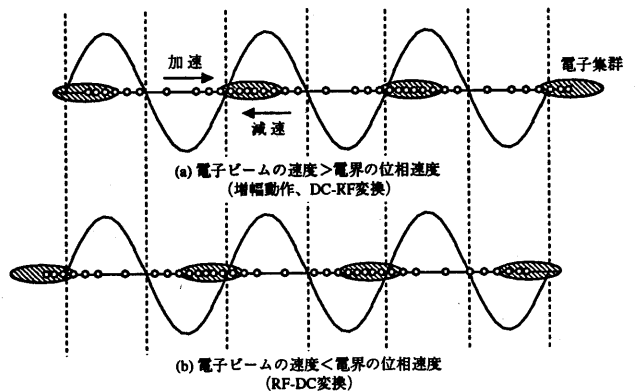
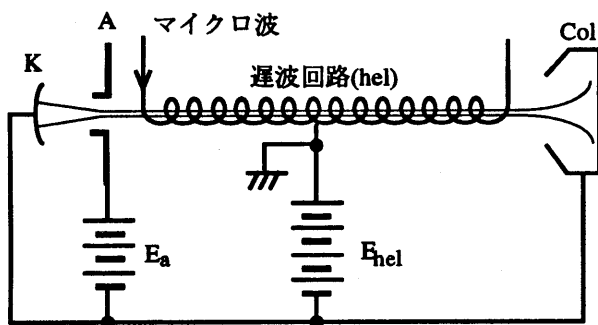
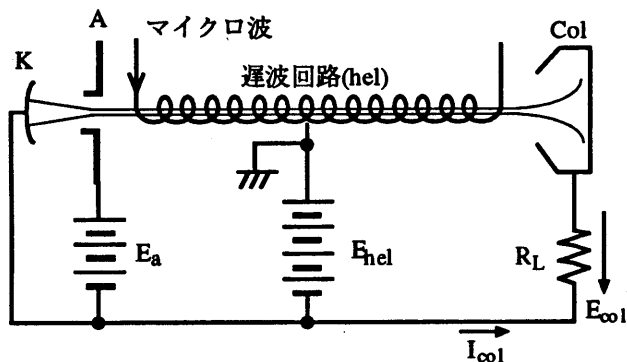
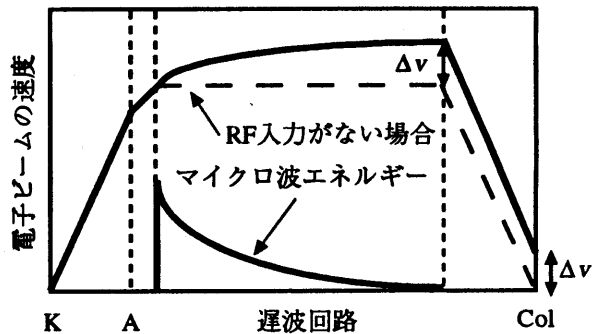


図 2 電子ビームとマイクロ波の相互作用



(a) コレクタをカソードに接続する



(b) 負荷抵抗 R_L を挿入する

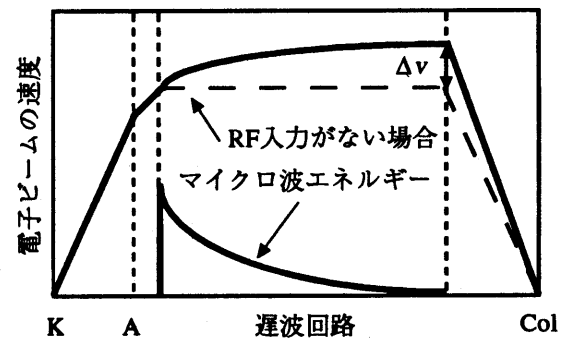


図 3 直流出力の原理

コレクタの技術を応用する。

図 3 はその動作原理を説明する図である。同図 (a) はコレクタ電極 (Col) をカソード電極 (K) と同電位に接続した状態で、マイクロ波入力がないばあいは同図点線のように、カソードから RF 遅波回路 (ヘリックス; hel) 電圧 (E_{hel}) まで加速された電子はコレクタで再び速度零まで減速されてコレクタに捕捉されるので、コレクタ損失は零である。

次にマイクロ波入力を印加すると、2.1項で述べたようにマイクロ波エネルギーが減衰すると同時に電子ビームはエネルギーを得て速度が ΔV だけ増加する。電子はマイクロ波入力零のばあいと同様に減速されてコレクタに捕捉されるが、速度増加分 (ΔV) に相当するエネルギーだけは残ってコレクタに熱損失として消費される。

そこで図 3(b) のようにコレクタを、負荷抵抗 R_L を介してカソードに接続する。このようにすると図中、矢印方向に流れるコレクタ電流 I_{col} のために、抵抗 R_L に $E_{col} = I_{col} \times R_L$ の電位差を生じ、コレクタ電位はカソード電位よりさらに負方向に押し下げられる。このためコレクタに突入する電子はさらに減速されて、ついにはコレクタに到達できず、遅波回路側に戻される電子が発生する。このような状態になるとコレクタ電流 I_{col} が減少してコレクタ電位が上昇するから、結果として電子がちょうど速度零で (すなわちコレクタ損失が零になるように)、コレクタ電流と電圧が自動的に決まる。

負荷抵抗 R_L に発生する電力 $P_{DC} = I_{col} \times E_{col}$ はこれまでコレクタ熱損失として失われていたエネルギーで、結果としてマイクロ波電力を直流出力として外部に取り出したことになる。ただし電子の速度増加分は一般に広がりがあり一様ではなく、すべての電子を速度零で捕捉することは困難なので、コレクタ損失を完全に零にすることは難しい。

3. 実 験

3.1 RF 出力電力と電子エネルギーの変化

実際に進行波管を使って、RF-DC 変換現象に関する実験を行った。表 1 に実験に使用した進行波管の仕様概要を示す。X バンド、20W ヘリックス形進行波管で、コレクタは 2 段電位低下型である。図 4 に進行波管と高圧電源のブロック図を示す。

RF-DC 変換実験を行う前にまず、通常の増幅動作特性を取得した。図 5(a) が測定結果でビーム電圧 (ヘリックス電圧, E_{hel}) に対する RF 利得の変化を示している。曲線 A は RF 入力定格値 1.5

表 1 進行波管の仕様概要

| 項目 | 性能 |
|--|---|
| 構造 | 遅波回路：ヘリックス型 (速度テーパなし) コレクタ：2 段電位低下型 |
| 周波数 入力/出力 利得 総合効率 | X バンド 1.5mW/22W 42dB 35% |
| カソード電流 ヘリックス電圧/電流 コレクタ 1 電圧/電流 コレクタ 2 電圧/電流 | 43mA 3.6kV/0.6mA 1.6kV/20mA 1.1kV/22mA |

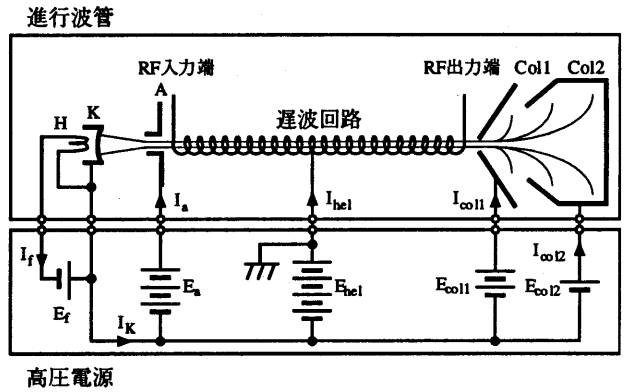
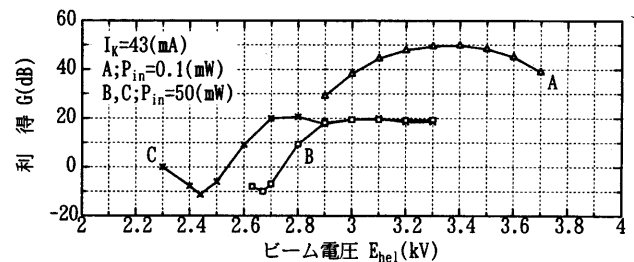
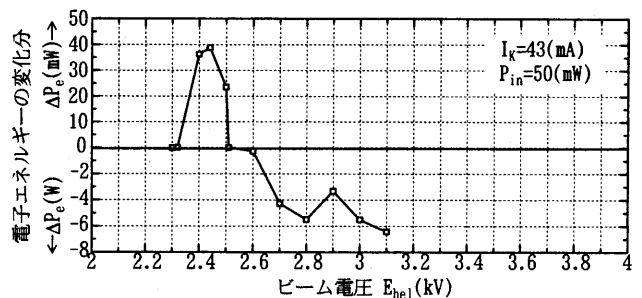


図 4 進行波管と高圧電源のブロック図



(a) マイクロ波利得対ビーム電圧 (A, B; 実験; C; 計算)



(b) 電子エネルギーの変化分 (計算)

図 5 ビーム電圧対 RF 利得、電子エネルギー特性

(mW) より約10(dB) 低い小信号動作である。また曲線 B は RF 入力定格値より約17(dB) 高いオーバードライブ動作である。この進行波管の定格動作ビーム電圧は3.6(kV) で、同期電圧は3.1(kV) である。ビーム電圧を定格値から下げていくと利得は次第に低下し、同期電圧3.1(kV) を過ぎるとその傾向はさらに顕著になる。小信号動作 (曲線 A) では出力電力が小さいため確認できなかったが、オーバードライブ動作 (曲線 B) では $E_{hel}=2.75(kV)$ で利得が 0(dB) , さらに $E_{hel}=2.66(kV)$ で利得が最小の -10(dB) となった。これよりさらに下げると利得はいったん、やや増加するがその後、同期から完全にはずれて出力は零になる。

この $E_{hel}=2.66(kV)$ における動作点では、前述2.1項で述べたような、マイクロ波電力から電子へのエネルギー変換が起きていると考えられる。これを確認するために実験曲線 B に対応するパラメータで大信号シミュレーション計算を行った (ただし進行波管減衰器部は考慮せず)。図 5(a) の曲線 C が利得の計算結果でビーム電圧に対して約 7% のずれがあるものの、傾向は実測結果の曲線 B とよく一致する。

このときの電子エネルギー変化の計算結果は図 5(b) に示すように、利得が最小 (-11dB) になるビーム電圧 ($E_{hel}=2.45(kV)$) で、電子エネルギーが 37(mW) 増加していることが確認できる。これはマイクロ波入力電力 50(mW) の 74(%) に相当する。

また増幅動作領域での電子エネルギー変化の計算値は 4 ~ 6W の減少で、RF 出力電力は実測値、計算値ともほぼ 5(W) なので、エネルギー授受はほぼつりあう。

3.2 直流出力の測定

つぎに図 6 に示すように、コレクタ 2(Col2) に電源の代わりに負荷抵抗 R_L を接続する。抵抗 R_L に流れる電流 I_{col2} と端子間の電位差 E_{col2} を測定して、この負荷抵抗 R_L に取り出される直流出力 $P_{DC}(=I_{col2} \times E_{col2})$ を確認する実験を行った。コレクタ 1 はコレクタ 2 で捕集できなかった電子を捕集する。

図 7 は負荷抵抗を $R_L=10(k\Omega)$, RF 入力を $P_{in}=6.7(W)$ と固定して、ビーム電圧を変えて直流出力 P_{DC} を測定した結果である (ビーム電流 $I_k=14.5(mA)$)。図から明らかなように、定格動作電圧 $E_{hel}=3.6(kV)$ より約 800(V) 低い、 $E_{hel}=2.78(kV)$ で直流出力 P_{DC} が最大値 1.2(W) を示した。

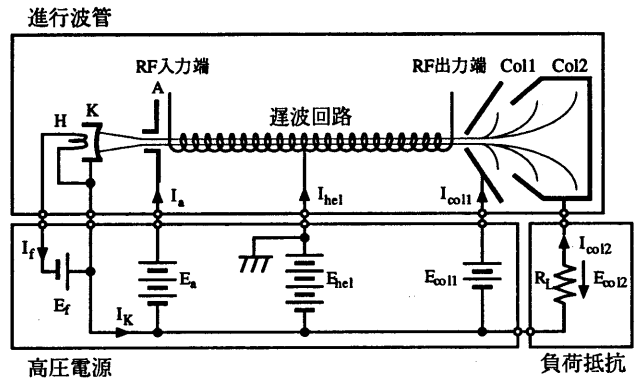


図 6 進行波管による RF-DC 変換回路の構成

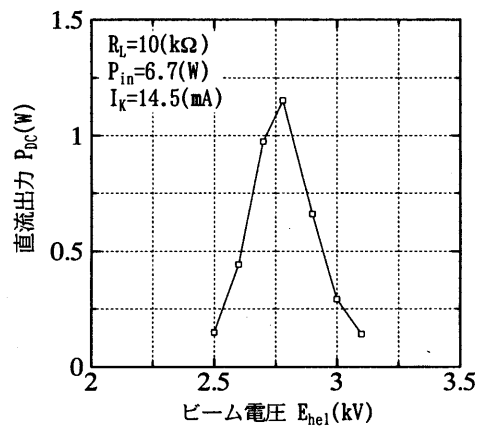


図 7 直流出力対ビーム電圧特性

前述の図 5(b) のビーム電圧に対する電子エネルギー増加のシミュレーション結果と定性的によく一致する特性である。

この実験で実際に進行波管で、ビーム電圧を本来の増幅動作電圧より低く調整設定することにより、RF-DC 変換が起こることが確認できた。

いま変換効率を η として、

$$\eta = \text{直流出力 } P_{DC} / \text{マイクロ波入力 } P_{in} \quad (1)$$

と定義すれば、上の実験での変換効率は $\eta=18$ (%) になる。

つぎに負荷抵抗 R_L を変えて、 I_{col2} , E_{col2} および直流出力 $P_{DC}(=I_{col2} \times E_{col2})$ を測定し、直流出力の負荷抵抗に対する依存性を調べた。ビーム電圧は負荷抵抗値を変える毎にその都度、直流出力が最大になるように調整した。

図 8 に測定結果を示す。図から明らかなように、負荷抵抗値を大きくするにつれて電位差 E_{col2} は大きくなるが、電流 I_{col2} は減少している。これはコレクタ 2 に突入する電子が速度分散を持っているため、電位差 E_{col2} が大きくなりコレクタ 2 の電位が低下すると、一部の電子がコレクタ 2 に到達

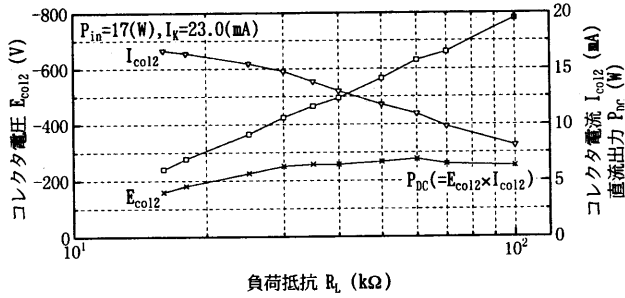


図 8 負荷抵抗に対する E_{col2} , I_{col2} , P_{DC} の変化

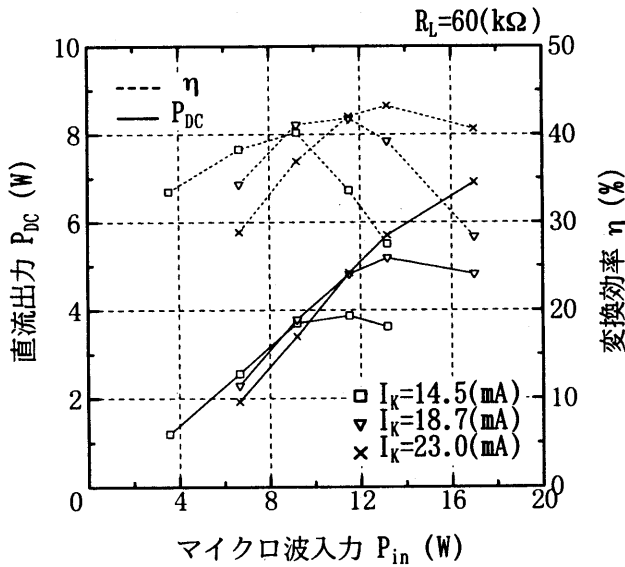


図 9 直流出力, 変換効率対マイクロ波入力

できず、コレクタ 1 側へ追い返される電子が増加するためと考えられる。

直流出力 P_{DC} は抵抗値 R_L に対してゆるやかに増加して、 $R_L=60(k\Omega)$ で最大になった。同図はビーム電流が $I_k=23.0(mA)$ 、マイクロ波入力が $P_{in}=17(W)$ のばあいであるが、 I_k および P_{in} を変えたばあいもほぼ同様の傾向であった。

最後に負荷抵抗 R_L を、上の実験で最大直流出力が得られた値、 $R_L=60(k\Omega)$ に固定して、ビーム電流 I_k をパラメータとして、マイクロ波入力 P_{in} に対する直流出力 P_{DC} と変換効率 η の変化特性を測定した。

測定結果を図 9 に示す。マイクロ波入力 P_{in} を増加すると直流出力 P_{DC} はほぼ直線的に増加するが、やがて飽和する。また飽和値はビーム電流 I_k によって決まり、 I_k を増加すると増加する。

一方、変換効率 η は同図点線に示すように、飽和 P_{DC} 値より若干手前で最大になる。またその最大効率はビーム電流 I_k が増加するにつれてゆるやかに

増加する傾向が見られる。

今回の実験では最大効率はビーム電流 $I_k=23(mA)$ 、マイクロ波入力 $P_{in}=13.2(W)$ 、直流出力 $P_{DC}=5.7(W)$ において $\eta=43(\%)$ が得られた。また効率は若干低下するが最大出力は $P_{in}=17(W)$ において、 $P_{DC}=7(W)$ が得られた。

実験で使用した進行波管の定格ビーム電流は $I_k=43(mA)$ であるが、ビーム電圧が本来の定格電圧 $3.6(kV)$ より約 $1(kV)$ も低い電圧での動作であったため、ビーム透過率が悪化し、ビーム電流は $I_k=23(mA)$ 以上は流すことはできなかった。

4. 効率について

効率については 3.2 項で、変換効率として式(1)で定義したが、実際には進行波管内で消費される電力や損失電力があるので、これらの諸損失を含めて効率を評価しなければならない。今これを総合効率 η_{ov} とすれば、 η_{ov} は次式で定義される。

$$\eta_{ov} = P_{DC} / [P_{in} + E_f \times I_f + E_{hel} \times I_{hel} + E_{col1} \times I_{col1}] \quad (2)$$

前項の実験で得られた変換効率の最高値 $43(\%)$ を、式(2)の総合効率で再評価をするとつぎのように低くなる。

$$\eta_{ov} = 5.7 / [13.2 + 3.9 \times 1.1 + 2.6 \times 2.3 + 0.37 \times 10.5] = 21(\%) \quad (3)$$

これは本来 RF-DC 変換用ではない従来の増幅用進行波管を用いたことが原因として大きいですが、これらを含めて将来の高効率化について方策をまとめるとつぎのようになる。

- a. ヒータ電力の低減
- b. ビーム透過率の向上 (I_{hel} の低減)
- c. 電子加速効率の向上 (巻き延ばしヘリックス等)
- d. 加速電子に適したエネルギー回収用電位低下コレクタの最適化

a 項は小電力管に特に顕著であるが、大電力管になればあまり問題にならない。さらに最近の FEA カソードを採用すれば解決する。b 項は現在の技術で対応できる。c 項および d 項がこれからの課題で、従来の増幅管の技術を若干視点を変えて導入する必要がある。

また構造的には発振防止用減衰部が不要になるので小型化され、ビーム透過率向上にも寄与するであろう。

3.1 項で述べたシミュレーションによる計算では変換効率 $74(\%)$ の結果も得られており、今後の開発により $80(\%)$ の高効率達成も夢ではない。

本稿では進行波管タイプに限って議論したが、クライストロン形その他いずれのタイプが適当か、さらにこれまでとは異なった電子管になるか、今後引き続き検討していくことが必要である。

5. あとがき

現在までの化石エネルギーに代わる、将来の代替エネルギー源のひとつとして、宇宙発電 (SPS) の構想が調査研究されている。この中でマイクロ波送受電技術は SPS システムを実現するうえで、重要な技術のひとつである。特に筆者らは地上で受電したマイクロ波電力を再び直流電力に戻す手段として、従来から提案されてきた固体ダイオードを多数個用いる方法に代えて、大電力高電圧動作に適したマイクロ波電子管で RF-DC 変換管を開発し、使用することを本稿で提案した。

既存の Xバンド、20W 級小出力進行波管を用いて実験を行って、従来の増幅動作とは異なる動作条件で、17(W) のマイクロ波入力に対して変換効率 40(%) 以上で約 7(W) の直流出力を得ることができた。また今回の実験では既存の進行波管を用いた

ため、総合効率は 21(%) と低い値にならざるを得なかったが今後、専用の RF-DC 変換管を開発すれば 80(%) の高効率変換も十分期待できる。

最後に、本研究に関してご協力戴いた (株) 東芝那須電子管工場の関係各位に感謝します。

参考文献

- 1) P. E. Glaser: "Power from the Sun: Its Future", Science, Vol.162, pp.857-861, 1968.
- 2) DOE and NASA report, "Satellite Power System; Concept Development and Evaluation Program", Reference System Report, 1979.
- 3) 上田, 大田, 大崎, 杉森: "SPS システム用 RF-DC エネルギー変換管", 1998年電子情報通信学会総合大会, B-9-5, p.448, 1998.
- 4) 上田, 大崎, 杉森: "SPS システム用 RF-DC エネルギー変換管 (その2)", 電気関係学会九州支部第51回連合大会, 956, p.536, 1998.
- 5) V. A. Vanke, V. L. Savvin: "Cyclotron-wave converter for SPS energy transmission system", SPS'91, B7.2, pp.515-520, 1991.
- 6) 北, V.A. Vanke, 松本, 篠原: "CWC (Cyclotron Wave Converter) の設計に関する研究", 1998年電子情報通信学会総合大会, B-1-24, p.24, 1998.

一般論文

可溶性ポリイミド (3)

— 光反応性溶媒可溶型ポリイミド —

| | | | |
|---|---|---|-----|
| 津 | 田 | 祐 | 輔 |
| 佐 | 藤 | 彌 | 三郎* |
| 佐 | 藤 | 哲 | 郎* |
| 野 | 上 | 禎 | 英** |
| 坂 | 本 | 弘 | 明** |

Soluble Polyimides (3)

— Photo-reactive Soluble Polyimides —

| | |
|-----------|------------|
| Yusuke | TSUDA |
| Yasaburo | SATOU* |
| Tetsuro | SATOU* |
| Yoshihide | NOGAMI** |
| Hiroaki | SAKAMOTO** |

Although polyimides have been widely investigated, the one of disadvantages of these polymers is that these are insoluble in common solvents. In this study, the authors has investigated the synthesis and properties of soluble polyimides containing long chain alkyl substituted benzophenone unit. The soluble polyimides were obtained from the diamine monomers containing long chain alkyl group and tetracarboxylic dianhydrides such as BTDA, and were found to have good thermal stability and solubility in common solvents. The UV radiation on these polyimide films caused the remarkable changes of surface energies and solubility.

1. 緒 言

ポリイミドは優れた耐熱性を有する高性能高分子の1つであり、電子材料などの分野で広範に用いられている¹⁾。その用途として最近着目されているのは液晶配向膜などに例示される機能性の有機薄膜である²⁻⁷⁾。ところが、ポリイミドは一般に溶媒に不溶である為、前駆体のポリアミック酸の段階でフィルム化し、加熱焼成してポリイミドを得なければならず、プロセス的に手間が掛かりイミド化率等の物性も制御し難いと言う欠点がある。そこで、このような欠点を改良する目的で、耐熱性を維持したまま溶解性を改良した可溶性(型)ポリイミドが研究されている⁸⁻¹⁷⁾。

本研究者は、ポリイミドの溶媒に対する溶解性不良に対し、有機化学的な方法により長鎖アルキルベンゾフェノンをも有する新規なジアミンモノマーを

合成し、このモノマーユニットをポリイミド骨格に導入することで改良を試みた。又、この可溶型ポリイミド骨格には側鎖に光反応性のベンゾフェノンをも有している。そこで、このポリイミドから得られたポリイミド薄膜に光照射し、表面物性の変化及び溶解性の変化を調べた。有機溶媒に可溶で加工し易く、かつ、光照射により表面物性の制御が可能なポリイミドが期待される。尚、本研究は平成8年度及び平成10年度の久留米・鳥栖地域技術振興センターの研究開発事業として実施された。

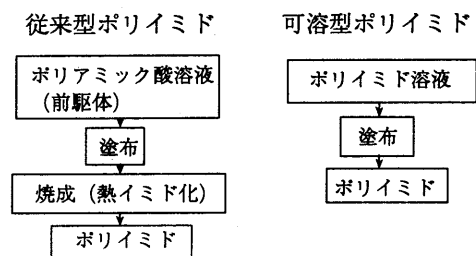


図1 従来型ポリイミドと可溶型ポリイミド

平成10年11月20日 受理

* (株) サンテアート

** (財) 久留米・鳥栖地域技術振興センター

2. 実 験

2.1 原料

2,3,5-トリカルボキシシクロペンチル酢酸二無水物 (TCA-AH) は日本合成ゴム (株) より提供を受けた。その他のモノマー類, すなわちピロメリット酸二無水物 (PMDA) (三菱ガス化学), 3,3',4,4'-ベンゾフェノンテトラカルボン酸二無水物 (BTDA) (三井東圧), 3,3',4,4'-ピフェニルテトラカルボン酸二無水物 (BPDA) (宇部興産), p-フェニレンジアミン (p-PDA) (和歌山精化), 4,4'-ジアミノジフェニルメタン (DDM) (三井東圧), 4,4'-ジアミノジフェニルエーテル (DDE) (和歌山精化) は市販品を使用した。無水酢酸 (片山化学), ピリジン (和光化学), N-メチル-2-ピロリドン (NMP) (三菱化成), ジメチルスルホキシド-d₆ (DMSO-d₆) (和光純薬), N,N-ジメチルホルムアミド (DMF), N,N-ジメチルアセトアミド (DMAC) (片山化学), 1,3-ジメチル-2-イミダゾリジノン (DMI) (片山化学), ジメチルスルホキシド (DMSO) (片山化学), m-クレゾール (片山化学), テトラヒドロフラン (THF) (片山化学), ジクロロメタン (片山化学) 及び濃硫酸 (片山化学) は市販品を使用した。長鎖アルキル基を有するアルキル置換ジアミノベンゾフェノン (Alkyldiaminobenzophenone, ADBP-9~14, 数字はアルキル鎖長の炭素数) の合成法は前報¹⁶⁾で述べた。

2.2 可溶性ポリイミドの合成

テトラカルボン酸無水物とジアミンとを等モル用い, NMP 中10~20wt%の濃度, 60℃で12~24時間重合しポリアミック酸を得た。一部をポリアミック酸溶液としてサンプリングした後, 残りの溶液に触

媒としてピリジン (5倍モル) 及び無水酢酸 (4倍モル) をポリマー骨格中に含まれる酸無水物に対して () 内に示すモル比で加え, 110℃, 5時間イミド化し, ポリイミド溶液を得た。ポリアミック酸溶液及びポリイミド溶液をメタノール, エタノールもしくは水などの貧溶媒に沈殿させ, ろ過の後, ポリアミック酸の場合は室温で2~3日, ポリイミドの場合は90℃で5時間真空乾燥し, 粉末状のポリマーを得た。得られたポリアミック酸及びポリイミドはキャノン・フェンスケ型粘度計を用い NMP 中 (濃度; 0.5g/100ml), 30℃における η_{inh} (dl/g) を求めた。ポリイミドは DMSO-d₆ 中で ¹H-NMR 測定を行い, ポリアミック酸の NH プロトンの消失程度を芳香族プロトンを基準ピークとして算出しイミド化率を求めた。尚, 生成するポリイミドが NMP に不溶の場合には, イミド化反応の初期で不溶物の析出もしくはゲル状物の生成が見られる。尚, 二種類のジアミンを用いる共重合体においては, ジアミンのモル数の合計がテトラカルボン酸無水物のモル数に等しくなるように留意し, モル分率 y (%) 及び z (%) を変化させた (図 3)。

2.3 熱分解温度

得られた可溶性ポリイミドの耐熱性を熱重量分析により調べた。熱重量分析装置は島津製作所製 TGA-50を用い, 10℃/min で窒素中もしくは空气中で昇温し, 一般に熱分解温度と判断される10%重量減少温度を耐熱性の尺度とした。

2.4 溶解性

得られた可溶性ポリイミドに各種の溶媒 (NMP, DMF, DMAC, DMSO, DMI, m-クレゾール, THF, CH₂Cl₂, H₂SO₄) を 5 wt% の濃度になるよ

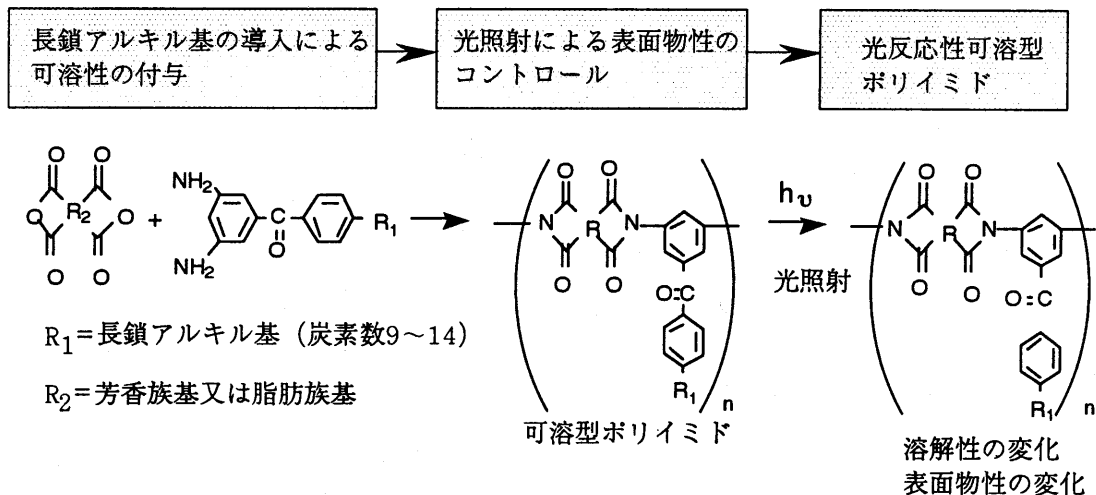


図 2 光反応性溶媒可溶型ポリイミド

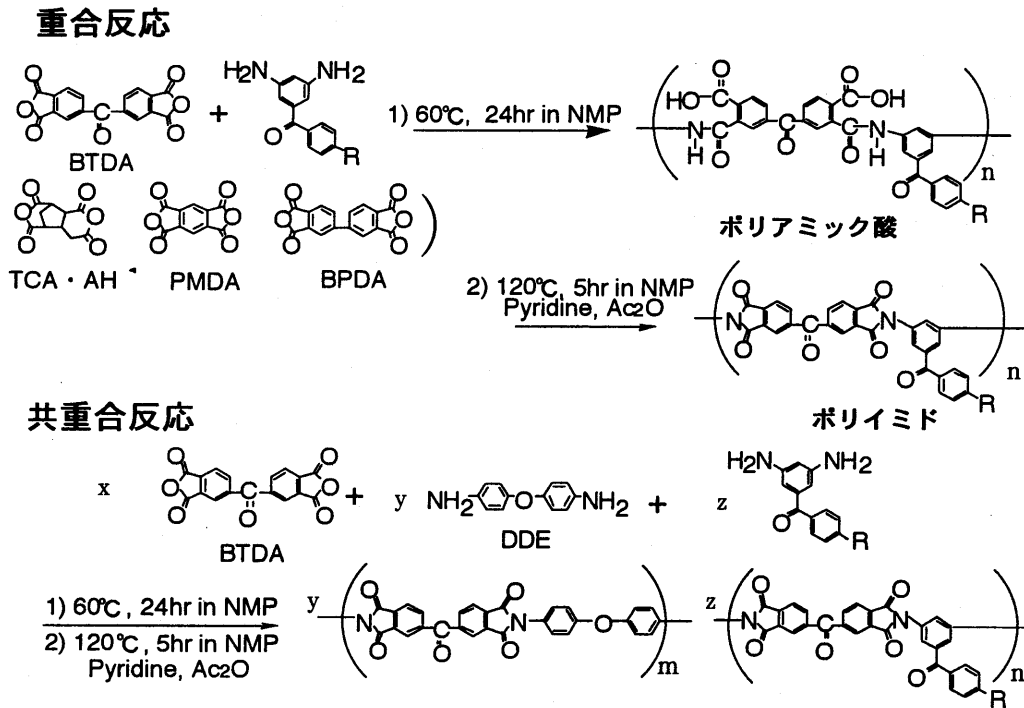


図3 可溶性ポリイミドの合成

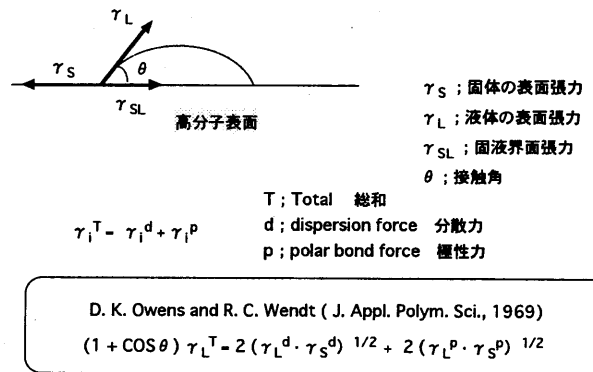
うに加え、室温で一晩放置し溶解性を判別した。室温で溶解しなかったポリイミドに関しては加熱時の溶解性の確認を行った。

2.5 光照射による表面物性の変化

精製し乾燥したポリイミドにNMPを加え、2wt%溶液にしたものをシリコンウェーハー上に滴下し、ホットプレート上で100~140℃で3分間、溶媒を揮発させ(プレバーク)、更に赤外線乾燥機を用い、150~200℃で2時間焼成した(バーク)。得られたポリイミド薄膜に、トランスイルミネーター(UVP社製TDS-20型, 254nm)を用い、1~24時間紫外線を照射した。紫外線未照射のポリイミド薄膜及び照射後のポリイミド薄膜の表面に、水(H₂O)及びヨウ化メチレン(CH₂I₂)を滴下し、それぞれの接触角を接触角計(協和界面化学・CA-DT・A型)を用いて測定した。また、FT-IR(日本分光製VOLOR-Ⅲ型)の測定も行った。

[表面エネルギーの計算]

接触角の測定結果より次のような方法で表面エネルギーの算出を行った。一般に高分子表面において固体の表面張力 γ_s は固液界面張力 γ_{SL} 、液体の表面張力 γ_L と液体の接触角 θ を用い、 $\gamma_s = \gamma_{SL} + \gamma_L \cos \theta$ と表される。又、表面張力 γ は表面張力の分散力成分 γ^d と極性力成分 γ^p の総和で表される。ここで、 γ_{SL} は実験的に求めることはできないが、



γ_L^d, γ_L^p が既知の2つの溶液の接触角測定で γ_s を求めることが可能。

図4 表面エネルギーの計算

γ_s と γ_L は実験的に求めること可能である。文献¹⁸⁾によれば、 γ_s と γ_L の分散力成分と極性力成分は、 $(1 + \cos \theta) \gamma_L^T = 2(\gamma_L^d \cdot \gamma_s^d)^{1/2} + 2(\gamma_L^p \cdot \gamma_s^p)^{1/2}$ という関係式で表されることがわかっている(図4)。すなわち、 γ_L^d, γ_L^p が既知の2つの溶液、つまり水とヨウ化メチレンの接触角を測定することにより γ_s を求めることができる。上式に2つの溶液の接触角の測定結果を代入すると、 γ_s^d, γ_s^p を未知数とする二元方程式が得られ、これを解くことにより γ_s が得られる。尚、この計算は表計算ソフトウェア(MS Excel)により算出した。

3. 結果と考察

3.1 長鎖アルキル基を有するジアミノベンゾフェノンに基づく可溶性ポリイミド

ジアミンとしてアルキル置換ジアミノベンゾフェノン体 (ADBP-9~14) を用い、酸無水物として TCA-AH, BTDA, BPDA 及び PMDA を用いて重合を行った結果を表1に示す。酸無水物が TCA-AH の場合、ADBP-9~14のいずれの場合においても可溶性ポリイミドが得られているが、TCA-AH は脂肪族テトラカルボン酸無水物であり、殆どのジアミン類と可溶性ポリイミドを与える為、ジアミンの長鎖アルキル基の効果は判定できない。一方、酸無水物に BTDA を用いた場合、一般的な芳香族ジアミンである PDA や DDM もしくは DDE との重合では NMP 可溶のポリイミドは得られなかったが、ADBP-10, 12, 14では NMP 可溶のポリイミドが得られた。この結果から側鎖に長鎖アルキル基を有するジアミンには NMP に対する可溶性向上の効果がある事が判明した。一方、BTDA とアルキル基の炭素数が奇数である ADBP-9, 11, 13の組み合わせの場合には、NMP 可溶のポリイミドは得られておらず、アルキル鎖長の偶奇効果が微妙に溶解性に影響を及ぼしていることが予想される。尚、テトラカルボン酸無水物として BPDA 及び PMDA を

用いた場合には ADBP-12~14のいずれでも可溶性ポリイミドは得られなかった。

側鎖に長鎖アルキル基を有するジアミンの可溶性向上の効果をも更に詳細に調べる為に、テトラカルボン酸無水物として BTDA, ジアミンとして一般的な芳香族ジアミンである DDE と長鎖アルキル基を有するジアミンとを用い、2種類のジアミンのモル比率を変化させた共重合検討を行った (表2)。共重合体 BTDA/ADBP-12/DDE では ADBP-12のモル分率が40~100%の範囲で可溶性ポリイミドが得られ、共重合体 BTDA/ADBP-14/DDE では ADBP-14が40~100%の範囲で可溶性ポリイミドが得られている。すなわち、一般的な芳香族ジアミンとの共重合においても特定量以上の ADBP を用いた場合には可溶性ポリイミドが得られる事が判明した。又、ADBP-13 及び DDE は BTDA との単独重合では可溶性ポリイミドは得られていないが、共重合体 BTDA/ADBP-13/DDE では可溶性ポリイミドが得られている。これは、長鎖アルキル基の効果に加えて、共重合によりポリマー鎖が柔軟になり溶解性が向上する効果が発現している為と考えられる。

3.2 熱分解温度

ADBP に基づく可溶性ポリイミドの熱分解温度を検討した (表3)。長鎖アルキル基は熱により分

表1 各種のテトラカルボン酸無水物の ADBP の組み合わせによる可溶性ポリイミド

| Monomers | | Polyamic acids | Polyimides | | |
|--------------|----------|----------------------------------|-------------------|----------------------------------|-----------------------|
| Dianhydrides | Diamines | η_{inh} (dL/g) ^a | Solubility in NMP | η_{inh} (dL/g) ^a | I.R. (%) ^b |
| TCA-AH | ADBP-9 | 0.25 | Soluble | 0.22 | 91 |
| BTDA | ADBP-9 | 0.37 | Insoluble | | |
| TCA-AH | ADBP-10 | 0.27 | Soluble | 0.23 | 95 |
| BTDA | ADBP-10 | 0.22 | Soluble | 0.29 | 100 |
| TCA-AH | ADBP-11 | 0.25 | Soluble | 0.24 | 92 |
| BTDA | ADBP-11 | 0.43 | Insoluble | | |
| TCA-AH | ADBP-12 | 0.17 | Soluble | 0.22 | 100 |
| BTDA | ADBP-12 | 0.34 | Soluble | 0.37 | 100 |
| BPDA | ADBP-12 | 0.18 | Insoluble | | |
| PMDA | ADBP-12 | 0.23 | Insoluble | | |
| TCA-AH | ADBP-13 | 0.15 | Soluble | 0.20 | 83 |
| BTDA | ADBP-13 | 0.22 | Insoluble | | |
| BPDA | ADBP-13 | 0.13 | Insoluble | | |
| PMDA | ADBP-13 | 0.18 | Insoluble | | |
| TCA-AH | ADBP-14 | 0.19 | Soluble | 0.21 | 100 |
| BTDA | ADBP-14 | 0.35 | Soluble | 0.38 | 100 |
| BPDA | ADBP-14 | 0.18 | Insoluble | | |
| PMDA | ADBP-14 | 0.31 | Insoluble | | |

^aMeasured at a concentration of g/dL in NMP at 30°C. ^bCalculated from proton NMR measurement. I.R.; Imidization Ratio

表 2 ADBP を用いたポリイミド共重合体

| monomers | | | Polyamic acids | | Polyimides | | |
|-----------------------|---------|-----|-----------------|--------------------------------|-------------------|--------------------------------|-----------------------|
| Dianhydrides Diamines | | | molar ratio (%) | η inh (dL/g) ^a | Solubility in NMP | η inh (dL/g) ^a | I.R. (%) ^b |
| x | y | z | x: y: z | | | | |
| BTDA | ADBP-12 | DDE | 100: 0:100 | 0.54 | Insoluble | | |
| | | | 100: 25: 75 | 0.24 | Insoluble | | |
| | | | 100: 40: 60 | 0.46 | Soluble | 0.46 | 100 |
| | | | 100: 50: 50 | 0.49 | Soluble | 0.37 | 100 |
| | | | 100: 75: 25 | 0.49 | Soluble | 0.46 | 100 |
| | | | 100:100: 0 | 0.34 | Soluble | 0.37 | 100 |
| BTDA | ADBP-13 | DDE | 100: 0:100 | 0.54 | Insoluble | | |
| | | | 100: 25: 75 | 0.36 | Insoluble | | |
| | | | 100: 40: 60 | 0.21 | Insoluble | | |
| | | | 100: 50: 50 | 0.25 | Soluble | 0.39 | 100 |
| | | | 100: 75: 25 | 0.25 | Soluble | 0.24 | 100 |
| | | | 100:100: 0 | 0.22 | Insoluble | | |
| BTDA | ADBP-14 | DDE | 100: 0:100 | 0.54 | Insoluble | | |
| | | | 100: 25: 75 | 0.38 | Insoluble | | |
| | | | 100: 40: 60 | 0.23 | Soluble | 0.67 | 100 |
| | | | 100: 50: 50 | 0.34 | Soluble | 0.64 | 100 |
| | | | 100: 75: 25 | 0.28 | Soluble | 0.48 | 100 |
| | | | 100:100: 0 | 0.35 | Soluble | 0.38 | 100 |

^aMeasured at a concentration of g/dL in NMP at 30°C. ^bCalculated from proton NMR measurement. I.R.; Imidization Ratio

表 3 ADBP に基づくポリイミドの熱分解温度

| Dianhydrides | Diamines | Polyimides | | 10% Weight loss temp. (°C) ^c | |
|--------------|----------|--------------------------------|-----------------------|---|-------------|
| | | η inh (dL/g) ^a | I.R. (%) ^b | in Air | in Nitrogen |
| TCA-AH | ADBP-9 | 0.22 | 91 | 372 | 464 |
| TCA-AH | ADBP-10 | 0.23 | 95 | 364 | 446 |
| BTDA | ADBP-10 | 0.29 | 100 | 442 | 442 |
| TCA-AH | ADBP-11 | 0.24 | 92 | 353 | 456 |
| TCA-AH | ADBP-12 | 0.22 | 100 | 376 | 458 |
| BTDA | ADBP-12 | 0.37 | 100 | 468 | 464 |
| TCA-AH | ADBP-13 | 0.21 | 83 | 356 | 368 |
| TCA-AH | ADBP-14 | 0.21 | 100 | 337 | 406 |
| BTDA | ADBP-14 | 0.38 | 100 | 464 | 475 |

^aMeasured at a concentration of 0.5g/dL in NMP at 30°C. ^bCalculated from proton NMR measurement. ^cMeasured at a heating rate of 10°C/min. I.R.; Imidization Ratio

解し易い為、これらの可溶性ポリイミドの熱分解温度は通常のポリイミドより低下する事が懸念されたが、テトラカルボン酸無水物として BTDA を用いた場合には、空气中及び窒素中での 10% 重量減少温度は 450°C 以上であり十分な耐熱性を有している事が判明した。一方、テトラカルボン酸無水物として脂肪族である TCA-AH を用いた場合の 10% 重量減少温度は空气中では 337~376°C、窒素中で 368~464

°C であり、耐熱性ポリマーの範疇では中程度の耐熱性と言えよう。

次に、ADBP に基づくポリイミド共重合体の熱分解温度を検討した (表 4)。共重合体 BTDA/ADBP/DDE の耐熱性は、ADBP のみを用いたポリイミドに比べてやや高くなる傾向にある。これは熱分解され易い ADBP の割合が DDE を導入することによって小さくなる為であろう。例えば、共重

表4 ADBPに基づくポリイミド共重合体の熱分解温度

| monomers | | | Polyimides | | 10% Weight loss temp. (°C) ^a | | |
|--------------|----------|-----|-------------|--------------------------------|---|--------|-------------|
| Dianhydrides | Diamines | | molar ratio | η inh (dL/g) ^a | I.R. (%) ^b | in Air | in Nitrogen |
| x | y | z | x: y: z | | | | |
| BTDA | ADBP-12 | DDE | 100: 40: 60 | 0.46 | 100 | 477 | 509 |
| | | | 100: 50: 50 | 0.37 | 100 | 498 | 500 |
| | | | 100: 75: 25 | 0.46 | 100 | 477 | 481 |
| | | | 100:100: 0 | 0.37 | 100 | 468 | 464 |
| BTDA | ADBP-13 | DDE | 100: 50: 50 | 0.39 | 100 | 477 | 485 |
| | | | 100: 75: 25 | 0.24 | 100 | 493 | 479 |
| BTDA | ADBP-14 | DDE | 100: 40: 60 | 0.67 | 100 | 463 | 499 |
| | | | 100: 50: 50 | 0.64 | 100 | 498 | 491 |
| | | | 100: 75: 25 | 0.48 | 100 | 474 | 478 |
| | | | 100:100: 0 | 0.38 | 100 | 464 | 475 |

^aMeasured at a concentration of g/dL in NMP at 30°C. ^bCalculated from proton NMR measurement. I.R.; Imidization Ratio ^cMeasured at a heating rate of 10°C/min.

表5 ADBPに基づくポリイミドの溶解性

| Monomers | | Polyimides | | Solubility ^c | | | | | | | | |
|--------------|----------|--------------------------------|-----------------------|-------------------------|------|------|------|-----|----------|-----|---------------------------------|--------------------------------|
| Dianhydrides | Diamines | η inh (dL/g) ^a | I.R. (%) ^b | NMP | DMF | DMAC | DMSO | DMI | m-Cresol | THF | CH ₂ Cl ₂ | H ₂ SO ₄ |
| TCA-AH | ADBP-9 | 0.22 | 91 | S | S | S | S | S | S | S | I | S |
| TCA-AH | ADBP-10 | 0.23 | 95 | S | S | S | S | S | S | S | I | S |
| BTDA | ADBP-10 | 0.29 | 100 | S | S(h) | S | S(h) | S | S | S | I | S |
| TCA-AH | ADBP-11 | 0.24 | 90 | S | S | S | S | S | S | S | S | S |
| TCA-AH | ADBP-12 | 0.22 | 100 | S | S | S | S | S | S | S | S | S |
| BTDA | ADBP-12 | 0.37 | 100 | S | S | S | S(h) | S | S | S | S | S |
| TCA-AH | ADBP-13 | 0.2 | 83 | S | S | S | S | S | S | S | S | S |
| TCA-AH | ADBP-14 | 0.21 | 100 | S | S | S | S | S | S | S | I | S |
| BTDA | ADBP-14 | 0.38 | 100 | S | S(h) | S(h) | S(h) | S | S | S | I | S |

^aMeasured at a concentration of 0.5g/dL in NMP at 30°C. ^bCalculated from proton NMR measurement. I.R.; Imidization Ratio ^cS, soluble; S(h), soluble at a heated temperture; I, insoluble.

合体 BTDA/ADBP-12/DDE では DDE のモル分率が60%の場合には窒素中における10%重量減少温度は509°Cまで向上した。

3.3 溶解性

これらの ADBP に基づく可溶性ポリイミドの溶解性を各種の溶媒を用いて検討した (表5)。これらのポリイミドは, NMP 等の高沸点の非プロトン性極性溶媒にはもちろん, m-クレゾール, THF, 濃硫酸及び ADBP-11~13を用いた場合にはジクロロメタン等の一般的な溶媒にも可溶であり, 良好な溶解性を示す事が判明した。次にこれらの ADBP に基づくポリイミド共重合体の溶解性を各種の溶媒を用いて検討した (表6)。ポリイミド共重合体も, NMP や DMF 等の非プロトン性極性溶媒に良好な

溶解性を示した。一方, THF, ジクロロメタン等では, ADBP のみを用いた可溶性ポリイミドより低下している。これは, 長鎖アルキル基を有する ADBP の割合が低下する為ではないかと考えられる。

3.4 光照射による表面物性の変化

1~24時間光照射したポリイミド薄膜に対する水及びヨウ化メチレンの接触角測定結果を表7にまとめた。どのポリイミドでも, 水の接触角は光照射により減少し, 例えば, TCA-AH/DDE ポリイミドの水の接触角は光照射前で66.8度であるが, 24時間光照射すると11.2度に減少している。特に, 長鎖アルキルケトンを含む ADBP を用いたポリイミドでは, 光照射前の水の接触角は95.6度, 光照射後は

表 6 ADBP に基づくポリイミド共重合体の溶解性

| Monomers | | | Polyimides | | | Solubility ^c | | | | | | | | |
|----------|---------|-----|----------------------------|-------------------------------------|--------------------------|-------------------------|------|------|------|-----|----------|-----|---------------------------------|--------------------------------|
| x | y | z | molar ratio (%) x: y: z | η_{inh} (dL/g) ^a | I.R. (%) ^b | NMP | DMF | DMAC | DMSO | DMI | m-Cresol | THF | CH ₂ Cl ₂ | H ₂ SO ₄ |
| | | | | | | | | | | | | | | |
| BTDA | ADBP-12 | DDE | 100: 40: 60 | 0.46 | 100 | S | S | S | S(h) | S | S | I | I | S |
| | | | 100: 50: 50 | 0.37 | 100 | S | S(h) | S | S(h) | S | S | I | I | S |
| | | | 100: 75: 25 | 0.46 | 100 | S | S(h) | S | S(h) | S | S | I | I | S |
| | | | 100:100: 0 | 0.37 | 100 | S | S | S | S(h) | S | S | S | S | S |
| BTDA | ADBP-13 | DDE | 100: 50: 50 | 0.39 | 100 | S | I | I | S(h) | S | S | I | I | S |
| | | | 100: 75: 25 | 0.24 | 100 | S | S(h) | S(h) | S(h) | S | S | I | I | S |
| BTDA | ADBP-14 | DDE | 100: 40: 60 | 0.67 | 100 | S | S | S | S(h) | S | S | I | I | S |
| | | | 100: 50: 50 | 0.64 | 100 | S | S(h) | S | S(h) | S | S | I | I | S |
| | | | 100: 75: 25 | 0.48 | 100 | S | S(h) | S | S(h) | S | S | I | I | S |
| | | | 100:100: 0 | 0.38 | 100 | S | S | S | S(h) | S | S | S | I | S |

^aMeasured at a concentration of 0.5g/dL in NMP at 30°C. ^bCalculated from proton NMR measurement. I.R.; Imidization Ratio ^cS, soluble; S(h), soluble at a heated temperature; I, insoluble.

表 7 光照射によるポリイミド表面の液滴に対する接触角の変化

| Dianhydrides/Diamines | Contact angle (H ₂ O, deg) | | | | | | Contact angle (CH ₂ Cl ₂ , deg) | | | | | |
|---------------------------|---------------------------------------|------|------|------|------|------|---|------|------|------|------|------|
| | UV radiation time (hr) | | | | | | UV radiation time (hr) | | | | | |
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 12 | 24 | 0 | 1 | 2 | 3 | 12 | 24 |
| TCA-AH/DDM | 68.8 | 58.8 | 32.2 | 28.8 | 13.0 | 12.6 | 29.3 | 43.6 | 31.8 | 34.8 | 32.9 | 32.6 |
| TCA-AH/DDE | 66.8 | 65.9 | 31.8 | 25.6 | 11.4 | 11.2 | 30.6 | 41.2 | 38.7 | 37.4 | 33.0 | 33.6 |
| TCA-AH/ADBP-12 | 94.4 | 75.4 | 58.4 | 26.8 | 12.4 | 10.8 | 50.2 | 46.7 | 44.6 | 43.0 | 37.4 | 34.4 |
| BTDA/ADBP-12 | 95.6 | 94.0 | 24.0 | 19.8 | 7.7 | 8.0 | 47.6 | 63.6 | 50.0 | 54.9 | 41.5 | 38.2 |
| BTDA//ADBP-12/DDE (40:60) | 94.2 | 61.3 | 36.3 | 15.8 | 12.5 | 11.6 | 42.7 | 51.9 | 51.4 | 32.5 | 28.2 | 25.8 |
| BTDA//ADBP-12/DDE (50:50) | 94.3 | 60.3 | 39.3 | 22.0 | 14.6 | 12.0 | 52.0 | 53.8 | 43.6 | 34.3 | 31.3 | 28.9 |
| BTDA//ADBP-12/DDE (75:25) | 96.2 | 70.9 | 42.6 | 9.8 | 9.5 | 10.8 | 44.6 | 55.8 | 48.8 | 35.5 | 25.8 | 31.5 |

表 8 光照射によるポリイミドの表面エネルギーの変化

| Dianhydrides/Diamines | Surface energy (dyne/cm) | | | | | |
|----------------------------|--------------------------|------|------|------|-------|-------|
| | UV radiation time (hr) | | | | | |
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 12 | 24 |
| TCA-AH/DDM | 47.7 | 47.7 | 65.1 | 66.3 | 72.4 | 72.5 |
| TCA-AH/DDE | 48.0 | 44.9 | 64.2 | 67.4 | 72.7 | 72.7 |
| TCA-AH/ADBP-12 | 34.2 | 39.2 | 47.7 | 66.2 | 72.0 | 72.7 |
| BTDA/ADBP-12 | 35.7 | 27.0 | 66.9 | 68.4 | 72.6 | 72.8 |
| BTDA//ADBP-12/DDE (40:60) | 38.3 | 44.0 | 60.0 | 71.6 | 73.0 | 73.5 |
| BTDA//ADBP-12/DDE (50:50) | 33.2 | 44.1 | 59.3 | 69.3 | 72.1 | 73.0 |
| BTDA//ADBP-12/DDE (75:25) | 37.4 | 37.7 | 56.4 | 72.8 | 73.9 | 73.0 |
| UV Radiation energy (J/cm) | | 28.8 | 57.6 | 86.4 | 245.6 | 491.2 |

8.0度と大きく減少していることがわかる。又、ADBPを含む共重合体においても、ADBPの組成によらず、水の接触角は照射により大きく低下している。一方、ヨウ化メチレンの接触角は、どのポリイミドにおいてもあまり変化がない。これらの測定結果より表面エネルギーを計算した結果を表8にまとめた。表面エネルギーは照射前は33.2~48.0 (dyne/cm)と低い値であるが、照射後は72.5~73.5 (dyne/cm)と水の表面エネルギーの値に近くなる。即ち、膜質が疎水性から親水性に変化していることが判る。

このような表面物性の変化の機構に関しては、ポリイミド表面の光酸化反応によるカルボキシル基や水酸基の生成が考えられ、特に、ADBPに基づくポリイミドの様にベンゾフェノン骨格を有するポリイミドではカルボニル基が照射によりノリッシュ型分解を起こしていることが予想される(図5)。即ち、照射前は長鎖アルキル基の影響で、膜表面は疎水性が特に大きく、照射後は長鎖アルキル基で置換されたベンゼン環が切断されていることが予想される。例えば、BTDA/ADBP-12ポリイミドのFT-IRの吸収スペクトルから、照射前に比べ照射後は、わずかではあるが、水酸基の吸収が増大しているのが確認できる(図6)。

2.7 照射による溶解性の変化

照射による表面物性の変化を接触角法で追跡した際に使用したポリイミド薄膜を用い、照射による

るポリイミドの溶解性の変化を調べた。即ち、TCA-AH/DDM, TCA-AH/DDE, TCA-AH/ADBP-12, BTDA/ADBP-12の4種類のポリイミドの照射前と24時間照射後の試験片をNMPに室温で約1日浸漬し、シリコンウェハー上のポリイミド薄膜の溶解程度を目視により確認した。その結果、TCA-AH/DDM及びTCA-AH/DDEポリイミドの場合、照射前後の薄膜はいずれもNMPに再溶解するが、長鎖アルキル基を有するADBPを含むTCA-AH/ADBP-12及びBTDA/ADBP-12では照射前のポリイミド薄膜は容易にNMPに再溶解するものの、24時間照射後のポリイミド薄膜は膨潤し完全には溶解していないことが判明した(図7)。即ち、照射により溶解性に寄与している長鎖アルキル基が切断され、溶解性が低下しているものと考えられる。この結果は本研究によるポリイミド薄膜が照射により溶解性のコントロールが可能であることを示唆しており、本研究のフォトレジストなどの光機能材料への応用を考えた

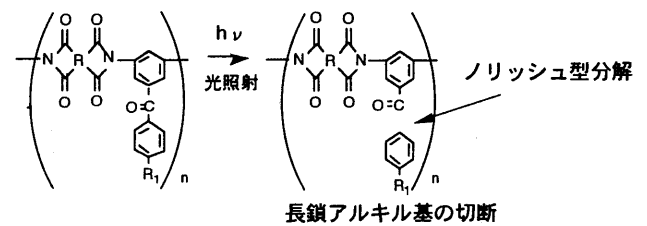


図5 照射によるノリッシュ型分解

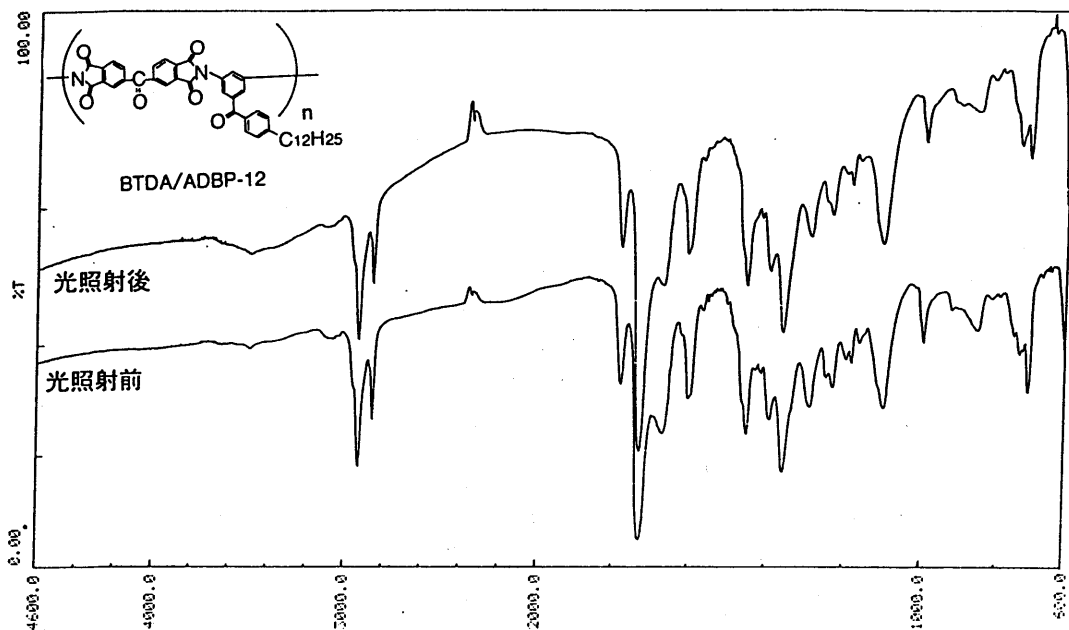


図6 照射による赤外吸収スペクトルの変化

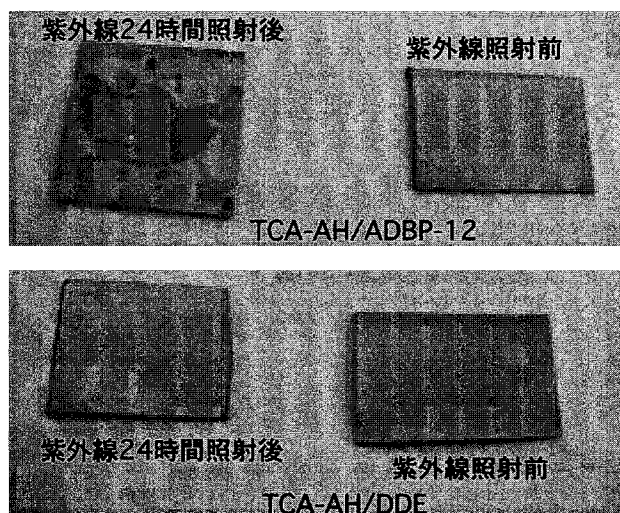


図7 ポリイミド薄膜のNMPに対する再溶解性

場合、極めて有用な知見であると考えられる。

4. 結 論

本研究においては、目的とした光反応性溶媒可溶性ポリイミドを合成することが可能である事を見出し、又、このポリイミドは種々の有用な性質を有していることが判明した。得られた成果をまとめると以下の様になる。

- (1) ADBPを用いるポリイミド及び共重合ポリイミドの合成方法を確立した。
- (2) ADBPのアルキル鎖長とポリイミドの溶解性との関係を明らかにした。
- (3) ADBPと他の一般的な芳香族ジアミンを用いる共重合ポリイミドでは可溶性ポリイミドを得るためのADBPの必要量を明確にした。
- (4) これらのポリイミドはポリイミドとして本来備えるべき十分な耐熱性を有していることを確認した。
- (5) これらのポリイミドは種々の極性溶媒に溶解することが可能であることを見出した。
- (6) これらのポリイミドに紫外線を照射すると表面の性質を著しく変化させることが可能であることを見出した。
- (7) 同じく、紫外線を照射した場合、溶解性を変化させることが可能であることを見出した。

このような知見より本研究によるポリイミドは以下の様な応用展開が可能であると考えられる。

- (1) 優れた溶解性を活かした耐熱性フィルム、電子材料用の薄膜。
- (2) 特に液晶配向膜の分野。

(3) 光反応性を活かしたパターンニング可能な電子材料用薄膜。

(4) 耐熱性フォトレジスト

本研究によるポリイミドは合成法が確立されており、基礎的物性も把握されているため、工業化も容易なものであると考える。

謝 辞

本研究を行うにあたり、貴重な御助言をいただきまし九州大学の高原淳助教授、岩手大学の石好行助教授及び日本合成ゴム(株)の松木安生博士及び西川通則博士に感謝いたします。本研究の実験に協力をいただいた、久留米高専工業化学科卒業生の福永千春氏、久留米高専専攻科修了生の日吉紀彦氏に感謝いたします。接触角測定法の御指導をいただきました久留米高専一般理科助教授の入江和隆助教授及び福岡県工業技術センターの有田明人氏に感謝いたします。平成8年度及び平成10年度に先端技術委託研究開発事業として経済的援助をいただいた(財)久留米・鳥栖地域技術振興センターに感謝いたします。

参 考 論 文

- 1) (a) K.L. Mittal, Ed. "Polyimides," Plenum Press, New York N.Y. (1984); (b) M.K. Ghosh and K.L. Mittal, Ed. "Polyimides," Marcel Dekker, New York, N. Y., (1996).
- 2) 西川通則, 津田祐輔, 別所信夫, ディスプレイアンドイメージング, **1**, 217 (1993).
- 3) 西川通則, 津田祐輔, 別所信夫, 信学技報, EID93-36, OME93-25, 13 (1993).
- 4) 西川通則, 宮本剛, 河村繁生, 菅沼孝吉, 津田祐輔, 別所信夫, 信学技報, EID92-107, ED92-140, 1 (1993).
- 5) M. Nishikawa, Y. Yokoyama, Nobuo Bessho, D.-S. Seo, Y. Iimura, and S. Kobayashi, Jpn. J. Appl. Phys., **33**, L810 (1994).
- 6) M. Nishikawa, T. Saganuma, Y. Tsuda, N. Bessho, Y. Iimura and S. Kobayashi, Jpn. J. Appl. Phys., **33**, L1113 (1994).
- 7) M. Nishikawa, T. Miyamoto, S. Kawamura, Y. Tsuda, N. Bessho, D.-S. Seo, Y. Iimura and S. Kobayashi, Mol. Cryst. Liq. Cryst., **258**, 258 (1995).
- 8) J.E. McGrath, M.E. Rogers, C.A. Arnold, Y.J. Kim and J.C. Hedrick, Macromol. Chem., Macromol. Symp. **51**, 103 (1991).
- 9) F.E. Arnold, Jr., S.Z.D. Cheng, S.L.-C. Hsu, C.J. Lee, F.W. Harris, and S.-F. Lau, Polymer, **33**, 5179 (1992).
- 10) Y. Oishi, M. Ishida, M. Kakimoto, Y. Imai, and T. Kurosaki, J. Polym. Sci., Polym. Chem. Ed., **30**, 1027 (1992).
- 11) M. Kusama, T. Matsumoto and T. Kurosaki, Macromolecules, **27**, 1117 (1994).

- 12) T. Matsumoto and T. Kurosaki, *Macromolecules*, **30**, 993 (1997).
 - 13) Y. Tsuda, Y. Tanaka, K. Kamata, N. Hiyoshi, S. Mataka, Y. Matsuki, M. Nishikawa, S. Kawamura and N. Bessho, *Polymer J.*, **29**, 574 (1997).
 - 14) Y. Tsuda, K. Etou, N. Hiyoshi, M. Nishikawa, Y. Matsuki and N. Bessho *Polymer J.*, **30**, 222 (1998).
 - 15) 津田祐輔, 日吉紀彦, 久留米工業高等専門学校紀要, 第13卷, 第1号, 9 (1997).
 - 16) 津田祐輔, 河内岳大, 古川龍太郎, 第13卷, 第1号, 19 (1997).
 - 17) 津田祐輔, 九州大学機能物質科学研究所報告, 第11卷, 第2号, 169 (1997).
 - 18) D.K. Owens and R.C. Wendent, *J. Appl. Polym. Sci.*, **13**, 1741 (1969).
-

一般論文

DMO 法による Al 合金/Al₂O₃ 複合体の形成

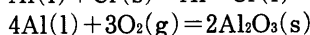
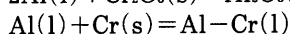
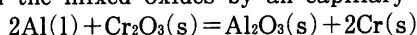
| | | | |
|---|---|---|-----|
| 重 | 松 | 浩 | 気 |
| 久 | 保 | 甚 | 一 郎 |
| 馬 | 越 | 幹 | 男 |
| 榊 | 永 | 英 | 明* |

Formation of Al Alloy/Al₂O₃ Composites by the Direct Metal Oxidation Method

| | |
|-----------|------------|
| Koki | SHIGEMATSU |
| Jinichiro | KUBO |
| Mikio | UMAKOSHI |
| Hideaki | MASUNAGA* |

The Al alloy/Al₂O₃ composites have been formed when the constructions of the green compacts of the Al powder and the mixed Cr₂O₃-10wt%MgO powders have been heated at temperatures 950-1100°C for 1-30 hours, which has been called as the DMO (Direct Metal Oxidation) method. The microstructures of composites and the growth rates of composite films have been studied in terms of a temperature, a heating time, a MgO content in the mixed Cr₂O₃-MgO oxides, an oxygen partial pressure in an atmosphere and a kind of oxide instead of Cr₂O₃, and the formation mechanism of the composite has been discussed.

The composites are mainly made up of two phases, that is, α-Al₂O₃ and Al-X (X=Fe, Cr, Co, Cu, Ni etc.) alloy. Both metal and ceramic phases are well dispersed in the dense composite films. The growth rate of the film increases with increments of a temperature and obey the parabolic laws. The activation energy for the rate constant is estimated to be 111.8kJ/mol. It is considered that the composites are formed from the following reactions when the liquid aluminum is rising through the pores in the mixed oxides by an capillary action.



The MgO additions to the mixed oxides in the range from 0.0 to 0.9 mole fraction increase the growth rates, which implies that the wettabilities between a liquid aluminum and oxides are improved. The oxygen partial pressure also has a little effects to the growth rates over the range of $p_{\text{O}_2}=0.1$ atm. The oxides such as Fe₂O₃, GeO₂, Cr₂O₃, CoO, CuO, NiO and SiO₂ are available for forming the composites, whereas Nb₂O₅, SnO₂, TiO₂, ZrO₂ etc. are useless regardless of the MgO addition.

1. はじめに

およそ二十年前から複合材料に関する研究が発展した。異なった性質を持つ二種類あるいは三種類の材料を組み合わせ、いくつかの優れた性質を同時に兼ね備えている複合材料の開発が、工業技術の進展とともに必要とされるようになったからである。これまで FRP (Fiber Reinforced Polymer) や FRM (Fiber Reinforced Metal) など優れた複合材料が開発され実用化されているが、問題点もいくつか指摘されている¹⁾。複合体の製造に関わるコ

スト高や、異なった素材間の熱的影響による剥離や変形などの技術的問題がそれである。

そこで本研究では、これらの問題を考慮しながら、耐熱性と耐摩耗性を持つ Al 合金/Al₂O₃ 複合体の形成を試みた。本方法は複合体の製造法の一つで、DMO (Direct Metal Oxidation) 法²⁻⁷⁾と呼ばれている。また、得られた複合体の微構造を調査し、複合体の生成機構について検討した。

2. 実験方法および装置

まずアルミニウム粉末 (和光純薬工業製, 粒径 50~100 μm) を 2.5g 秤取り, 金型成形器を用いて

平成10年11月20日 受理

*久留米高専専攻科物質工学専攻 (現在, (株) 三井三池製作所)

直径15mm, 高さ7mmの錠剤状に加圧成形する。成形荷重は480kg/cm²で, 加圧時間は2minとした。その成形体の上面に複合体の原料となる混合酸化物粉末を載せる。酸化物は酸化クロム (Cr₂O₃, 片山化学工業製, 粒径1~5μm) と酸化マグネシウム (MgO, 宇部化学工業製, 粒径0.012μm) で, その混合割合は重量比で90:10である。

なお, 酸化マグネシウムの混合割合により複合体の成長速度が異なるかどうかを調べるため, 混合割合を変えた実験も行った。また, Cr₂O₃/MgOの組合せだけでなく, Cr₂O₃の代わりに高純度の試薬である酸化鉄 (Fe₂O₃), 酸化ニオブ (Nb₂O₅), 酸化タングステン (WO₃), 酸化タンタル (Ta₂O₅), 酸化ガリウム (Ga₂O₃), 酸化スズ (SnO₂), 酸化ゲルマニウム (GeO₂), 酸化銅 (CuO), 酸化バナジウム (V₂O₃), 酸化ニッケル (NiO), 酸化コバルト

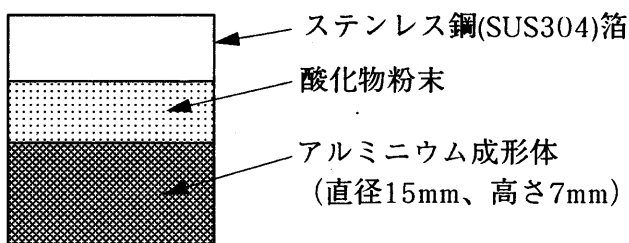


図1 試料の構成

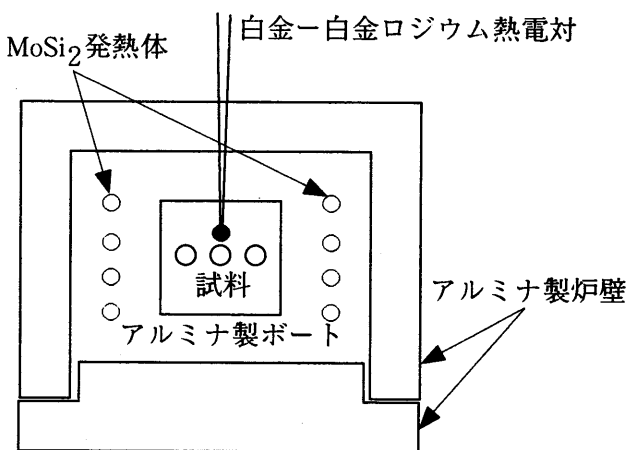


図2 実験炉 (スーパーカントル電気炉) の概略図

表1 複合体の形成反応条件

| | 条件 |
|-------|-----------------|
| 反応温度 | 950~1100℃で50℃間隔 |
| 反応時間 | 1~30hr |
| 炉内雰囲気 | 空气中 |

(CoO), 酸化珪素 (SiO₂), 酸化チタン (TiO₂) および酸化ジルコニウム (ZrO₂) と10wt%MgOの混合粉末を準備した。さらにこれら酸化物を単独に用いた場合の複合化実験も行った。

成形体上の混合酸化物粉末がこぼれないようにするため, ステンレス鋼 (SUS304) 箔を成形体に巻いた。また, 混合酸化物を成形体に載せるときは, エアポンプの振動を利用して少量づつ載せ, 粉末を均しながら均一に充填するように配慮した。これらを図1に示した。この試料を図2に示すスーパーカントル電気炉の均熱部に設置し, 表1に示す条件で複合体を形成させた。昇温および降温時間はともに60minである。なお, 一部の実験では雰囲気中の酸素分圧の影響を調べるため, アルゴン-酸素混合ガスも用いた。

複合体はアルミニウム成形体の上部に形成されるが, 複合体形成後の試料をそのまま樹脂に埋め込み, スカイッターで垂直方向に切断した。切断面を鏡面研磨した後, 複合体の成長厚さをメジャースコープ (日本光学工業製工場顕微鏡10型, 測定精度1/1000mm) で測定し, 成長厚さと保持時間や保持温度との関係を調査した。また, 複合体断面の光学顕微鏡および走査型電子顕微鏡 (日立製作所製 S-430, SEM) による組織観察やX線マイクロアナライザー (日立製作所製 X-560, EPMA) による成分分析を行った。さらに, 複合体の構成相をX線回折 (リガク製 RAD-2C) により同定した。

3. 実験結果および考察

3.1 複合体の微構造

Cr₂O₃-10wt%MgO酸化物混合粉末を用い, 1000℃, 3hr反応させて形成した複合体のSEM像を図3(a)に示した。この写真から分かるように複合体は非常に緻密であり, 複合体部分だけを取り出してアルキメデス法で測定した気孔率は0.03%であった。また図3(b)および(c)に示すように, EPMAによって測定したアルミニウムおよびクロムのKα線像から, 両元素とも複合体中にほぼ均一に分散していることが分かる。研磨した1cm角の複合体面のX線回折図形を図4に示す。この結果より, 主要な構成相はα-Al₂O₃とアルミニウムであり, 図3(b)のアルミニウムの部分にはクロムが合金化していることが分かる。MgCr₂O₄スピネルの回折ピークも観測されるが, この結果からだけではMgAl₂O₄と区別できない。

以上の結果を総合すると, 複合体の生成は, まず

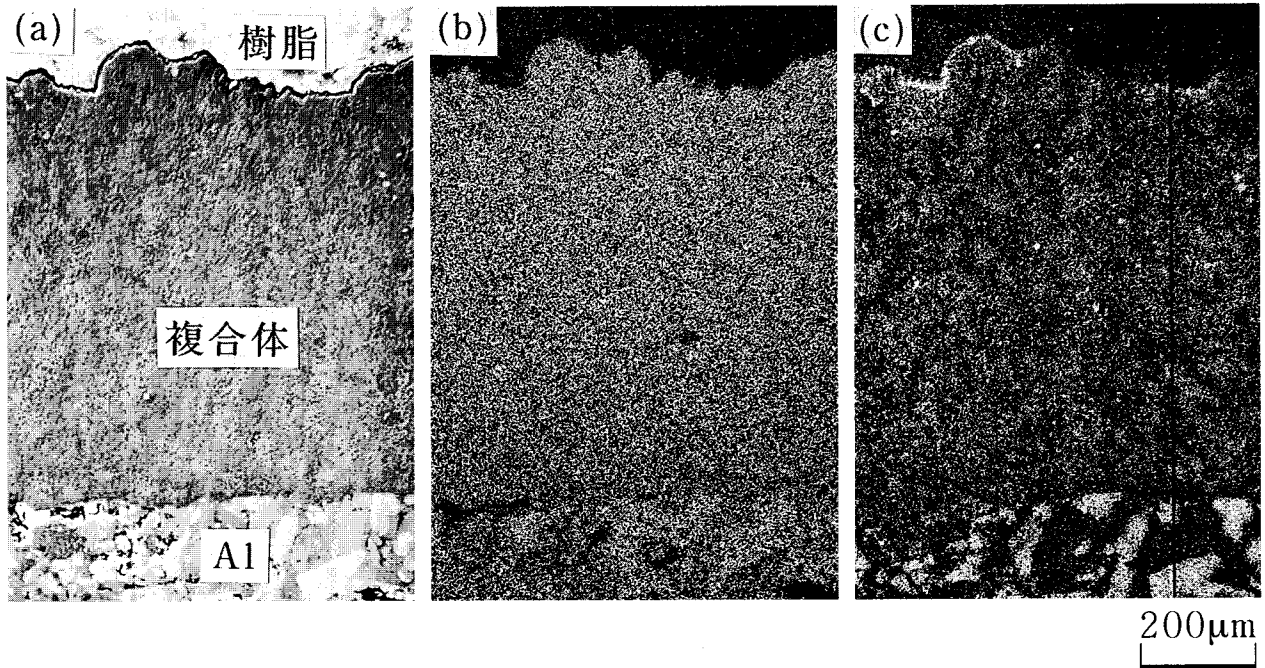


図 3 複合体横断面の SEM 写真 (Al/Cr₂O₃-10wt%MgO, 1000°C, 3hr)
 (a) SEM 像, (b) Al の K α 線像, (c) Cr の K α 線像

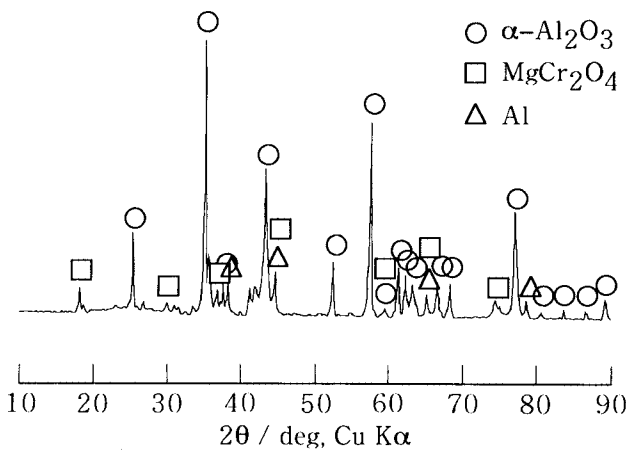
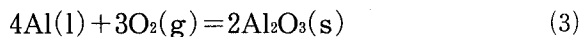
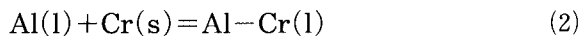
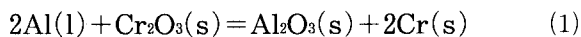


図 4 複合体の X 線回折図形
 (Al/Cr₂O₃-10wt%MgO, 1000°C, 3hr)

アルミニウムが溶融して混合酸化物中の気孔を毛管現象により上昇し、酸化物と接触して以下の反応によって進行すると考えられる。



(1)式はいわゆるテルミット反応による Al₂O₃ の生成を示し、(3)式は上昇するアルミニウム液体が空気中の酸素と反応して Al₂O₃ を生成する反応であるが、複合体中の α -Al₂O₃ が主にどちらの反応により生成したのかは本結果だけでは判定できない。また、上

昇するアルミニウム液体は(1)式で還元生成したクロムを溶解し、合金化すると考えられる。この複合層中の合金部分の化学組成は、EPMA 分析より Al92~95wt%および Cr5~8wt%であった。

3.2 複合体の成長速度

生成した複合体横断面の一例として、950°Cで1, 2および3hr 反応させた時の複合体横断面の光学顕微鏡写真を図5に示す。この結果から、複合層が時間とともに成長していることが分かる。そこで複合層の成長速度と反応時間および反応温度との関係を調べるため、Al/Cr₂O₃-10wt%MgO の配置における950, 1000, 1025, 1050, 1100°Cの各温度で複合体の成長反応を行い、一定時間毎に電気炉から試料を取り出して複合層の厚さを測定した。その結果を図6に示した。これより、時間の経過とともに複合層の厚さが成長していること、また反応温度が高いほど成長速度が大きいことが分かる。

成長速度が放物線則に従っているかどうかを調べるため、縦軸に複合層の厚さを、横軸に反応時間(s)の平方根をとってプロットしたのが図7である。どの温度についても、ほぼ直線関係を満足している。したがって、複合体の成長速度は複合層の厚さを L (mm)、反応速度定数を k(mm/s^{1/2})、反応時間を t (s) とすれば、次の(4)式で表わされる。

$$L = kt^{1/2} \quad (4)$$

複合体が形成されるまでの素過程を推定すると、

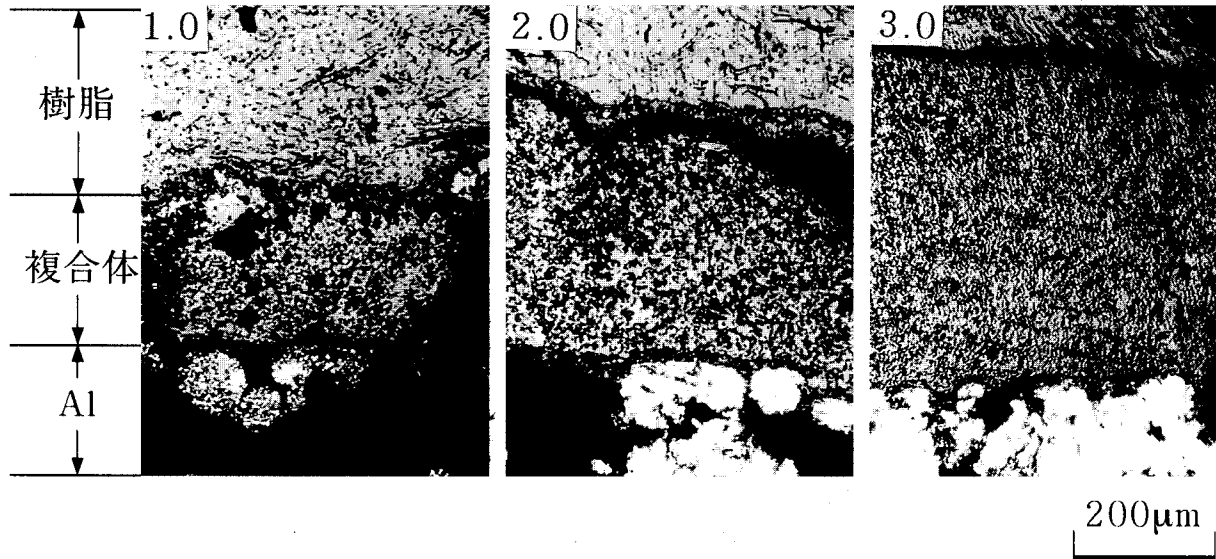


図5 複合体横断面の光学顕微鏡写真 (Al/Cr₂O₃-10wt%MgO, 950°C)
(*写真内の数字は反応時間 (hr) を示す。)

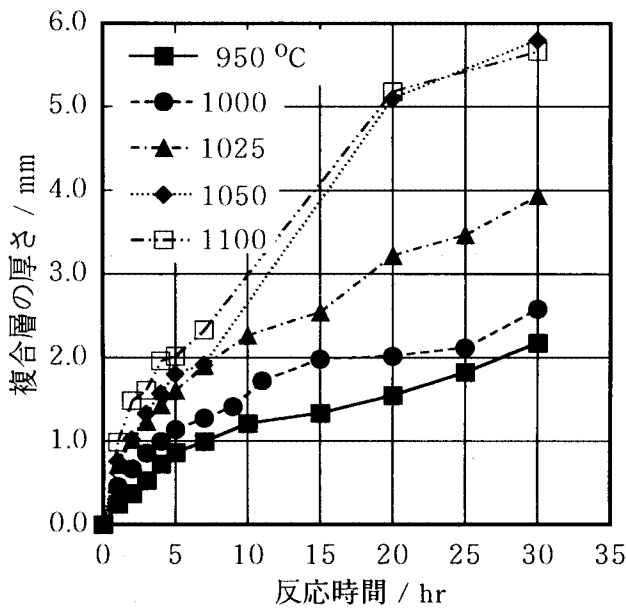


図6 種々の温度における複合層の厚さと反応時間の関係
(Al/Cr₂O₃-10wt%MgO)

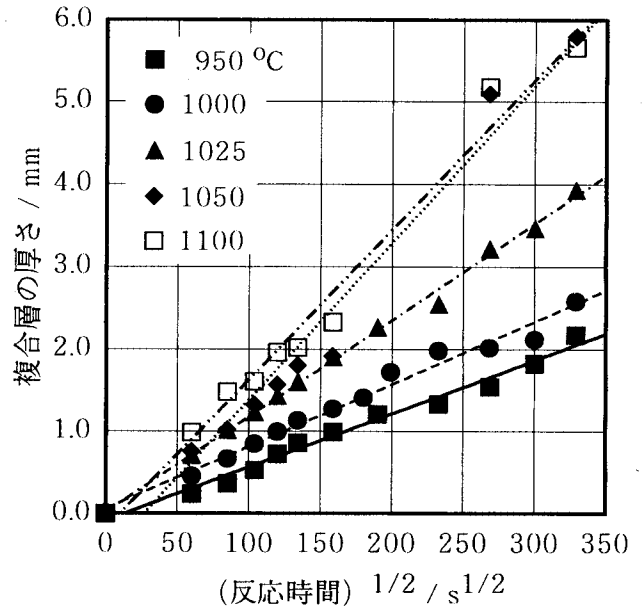


図7 種々の温度における複合層の厚さと反応時間の平方根の関係
(Al/Cr₂O₃-10wt%MgO)

(1)アルミニウム液体が酸化物中の気孔を毛管現象で上昇する。(2)アルミニウム液体が酸化物粒子と接触し、前出の(1)~(3)式に示す反応を開始する。(3)これらの反応が進行する過程において反応に関与する物質の移動を伴う。これらの過程の中で、律速段階は素過程(1)であると推定している。その理由は、アルミニウム液体が上昇した高さで複合体の厚さが一致するからである。仮に素過程(2)の物質移動過程が律速段階ならば、アルミニウムの上昇高さ>複合層の厚さになるはずである。しかも、一般的に液体が毛

管現象で上昇する高さHと上昇時間tの間には(5)式が成立する。kは定数であるが、(5)式からアルミニウム液体の上昇速度自体が、放物線則に従っていることが分かる。

$$dH/dt = k/H \tag{5}$$

このことも前述の律速段階を支持しており、(1)~(3)式の反応はアルミニウムと接触しさえすれば非常に速く進行していると考えられる。

次に、図7の結果から各温度における直線の勾配を最小自乗法により計算すると、(4)式中のkの値が

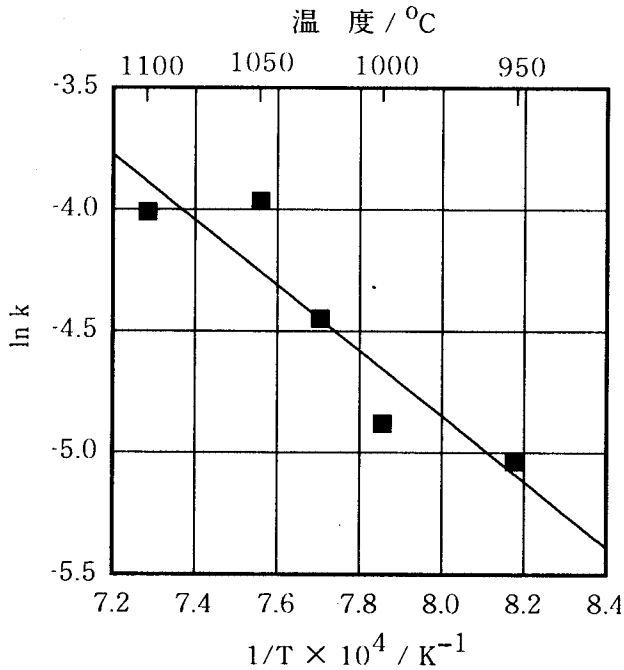


図8 反応速度定数のアレニウスプロット
(Al/Cr₂O₃-10wt%MgO)

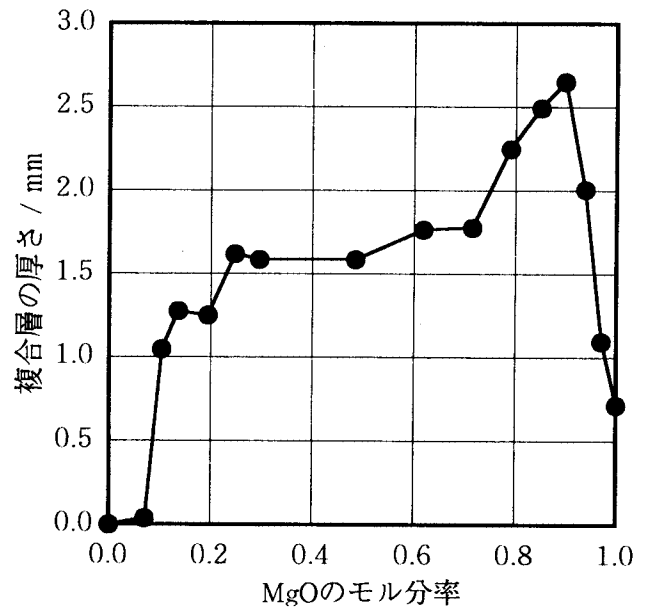


図9 複合層の厚さとMgOのモル分率の関係
(Al/Cr₂O₃-MgO, 1000°C, 10hr)

得られる。これらの値の対数をアレニウスプロットすると、図8になる。これよりk値の対数と温度の逆数はほぼ直線関係を満足し、直線の傾きから求めた活性化エネルギーは111.8kJ/molとなった。この活性化エネルギーは、アルミニウム液体がCr₂O₃-MgO混合酸化物中の気孔を上昇するのに要するエネルギーと考えられるが、値そのものの妥当性は分からない。

3.3 Cr₂O₃-MgO混合酸化物中のMgOの混合割合が複合体の生成速度に及ぼす影響

図6に示した複合層の厚さと反応時間の関係は、Cr₂O₃/MgOの重量比が90/10であった。この比が複合体の成長速度に及ぼす影響を検討するため、MgOのモル分率0.0~1.0の範囲で1000°C, 10hr反応させ、生成した複合層の厚さを測定した。ただし、MgOの混合割合を変えた場合、複合層中のAl₂O₃成分の濃度や組成は変化すると思われるので、高硬度の部分の複合体と見なし、その厚さを測定した。その結果を図9に示す。これより、MgOのモル分率0.2まで複合体の成長速度は大きくなり、0.2~0.7の範囲ではほぼ一定、0.7~0.9の範囲では再び成長速度が大きくなり、0.9を越えると逆に成長速度は小さくなるのが分かる。

またCr₂O₃単独の場合、複合体は成長しない。このことはCr₂O₃に対してアルミニウム液体が全く濡れないためアルミニウム液体が上昇しないことを意

味する。Cr₂O₃とMgOは1000°Cでは(6)式の反応によりMgCr₂O₄スピネルを生成するが、図9中のMgOのモル分率0.5まではCr₂O₃-MgCr₂O₄の混合酸化物であり、0.5以上ではMgO-MgCr₂O₄混合酸化物の状態である。

Cr₂O₃(s)+MgO(s)=MgCr₂O₄(s) (6)

Cr₂O₃-MgO二元系状態図⁸⁾を見ると、MgCr₂O₄を含む相が広範囲な組成領域に渡ることから、アルミニウム液体に対する濡れ性の大きさがMgCr₂O₄+MgO>MgCr₂O₄+Cr₂O₃>MgO>Cr₂O₃の順になっていると仮定すれば図9の結果が一応説明できる。なお、成長速度を決定する因子は混合酸化物に対するアルミニウム液体の濡れ性だけではないと考えられるが、現段階では他の因子は考慮しなかった。

3.4 複合体の成長速度に及ぼす雰囲気中の酸素分圧の影響

これまでに述べた複合体の形成は、空気中(p_{O₂}=0.21atm)で行った。しかし、複合体の主要な成分であるAl₂O₃は(1)式のテルミット反応だけでなく(3)式のように酸化物間隙中の空気に含まれる酸素ガスとの反応によっても生成するので、成長速度は雰囲気中の酸素分圧にも影響を受けると考えられる。

そこで、反応温度1000°C, 反応時間10hrにおいて、雰囲気中の酸素分圧1.0atmまでの範囲で複合体を形成し、複合層の厚さを測定した。その結果を図10に示す。これより、酸素分圧約0.1atmまで複

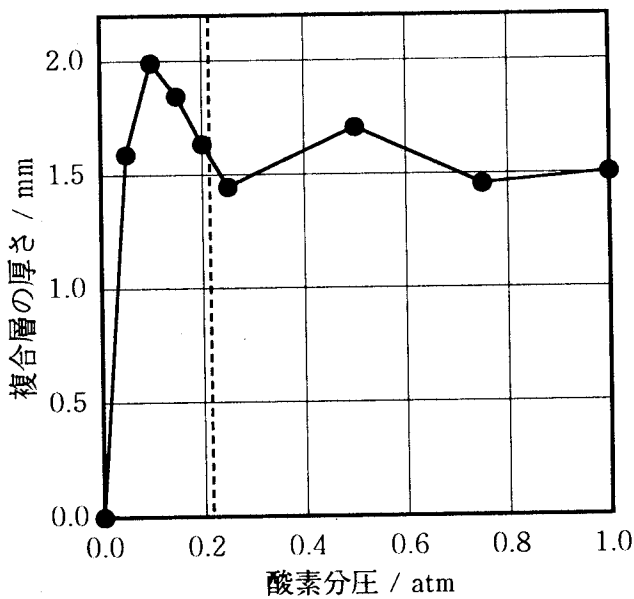
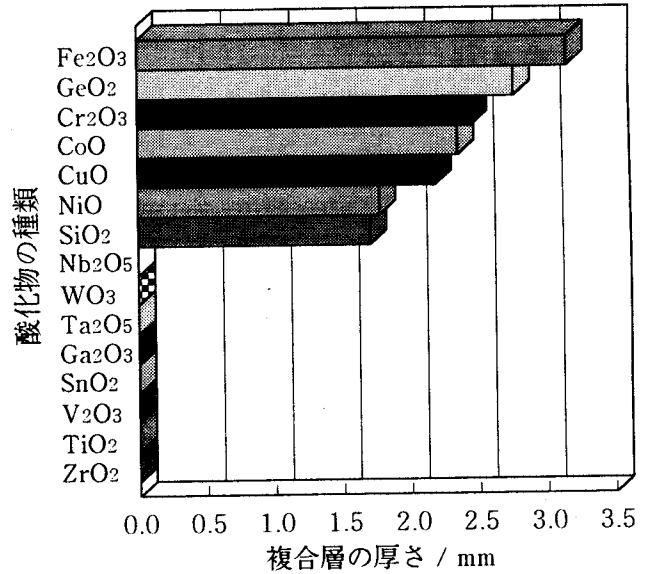


図10 複合層の厚さと雰囲気中の酸素分圧の関係 (Al/Cr₂O₃-10wt%MgO, 1000°C, 10hr)

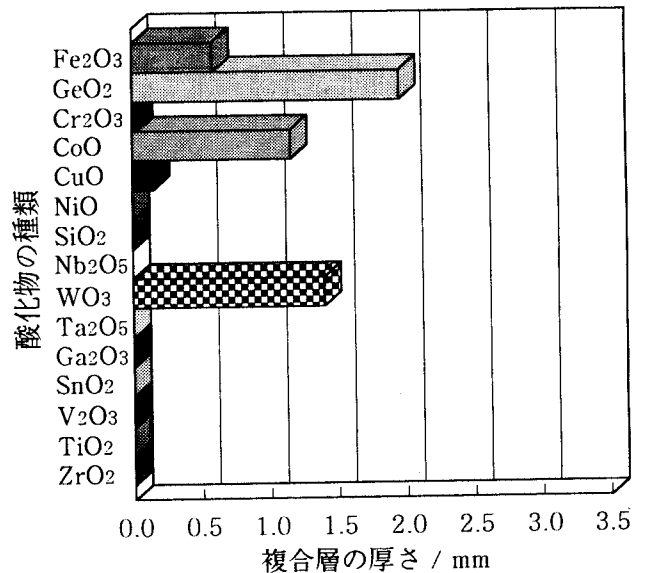
合層の厚さは増加するが、0.1atm 以上では複合層の厚さに大きな変化は見られなかった。したがって、複合体の主要成分である Al₂O₃ は、酸素分圧が0.1 atm 以上あれば十分に生成することが判明した。

3.5 複合体の形成に及ぼす酸化物の種類の影響

色々な種類の原料酸化物の使用によって多様な物理的・化学的性質を持った複合体を形成することが出来れば、様々な用途に対応でき本研究の実用性は大きく拡大すると考えられる。そこで M_xO_y (M は金属元素で Fe, Nb, W, Ta, Sn, Ge, Cu, V, Co, Ni, Ga, Cr, Si, Ti, Zr, また x と y は金属と酸素との化学量論比) と MgO (10wt%) の混合酸化物粉末を原料にしたとき、および MgO を混合しないで M_xO_y 単独の場合について、どの程度複合体が形成するかを調査した。いずれも反応温度は 1100°C, 反応時間は 10hr とした。各々の酸化物について、得られた複合層の厚さを図11に示す。この結果より、MgO を混合した場合、複合層の厚さ Fe₂O₃ > GeO₂ > Cr₂O₃ > CoO > CuO > NiO > SiO₂ の順に大きく、他の酸化物 SnO₂, TiO₂, WO₃, Ta₂O₅, V₂O₃, ZrO₂, Ga₂O₃, Nb₂O₅ は全く複合体を形成しなかった。一方、MgO を混合しない場合、複合層の厚さは GeO₂ > WO₃ > CoO > Fe₂O₃ > CuO の順に大きく、他の酸化物は全く複合体を形成しないことが判明した。なお、MgO だけを用いた場合 GeO₂ と同程度の複合体が形成された。また、複合層の厚さは MgO との混合酸化物の方が酸化物単独の場合よりも大きい、WO₃ の場合のみ酸化物単独のと



(1) M_xO_y-10wt%MgO の場合



(2) M_xO_y 単独の場合

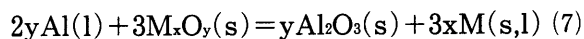
図11 酸化物の種類と複合層の厚さの関係 (1100°C, 10hr)

きだけ複合体が形成されることも判明した。この結果、MgO を混合してもしなくても複合体を生成する酸化物は、Fe₂O₃, GeO₂, CoO および CuO のみである。また、MgO の混合が複合体の成長速度を大きくするのは、3.2で説明したようにアルミニウム液体との濡れ性が改善されることが主因であると推測される。ただし、このアルミニウム液体と種々の酸化物との濡れ性に関する文献データが少なく、また著者等も実験的な確認を行っていない。さらに、MgO の混合、不混合に関わらず複合体を全く形成しない酸化物がある理由もアルミニウム液体と酸化

表 2 25℃における(7)式の反応の標準自由エネルギー変化、 ΔG° と1100℃、10hrの反応後形成した複合層の厚さ

| 酸化物 | 複合層の厚さ (mm) | ΔG° (kJ/mole of oxide) |
|--------------------------------|-------------|-------------------------------------|
| GeO ₂ | 1.96 | -508.3 |
| MgO | 1.94 | 92.6 |
| WO ₃ | 1.40 | -740.5 |
| CoO | 1.16 | -275.1 |
| Fe ₂ O ₃ | 0.59 | -768.0 |
| CuO | 0.15 | -38.0 |
| Cr ₂ O ₃ | 0.03 | -468.4 |
| Nb ₂ O ₅ | 0.00 | -748.9 |
| Ta ₂ O ₅ | 0.00 | -605.1 |
| Ga ₂ O ₃ | 0.00 | -595.8 |
| SnO ₂ | 0.00 | -532.5 |
| V ₂ O ₃ | 0.00 | -360.3 |
| NiO | 0.00 | -293.7 |
| SiO ₂ | 0.00 | -158.5 |
| TiO ₂ | 0.00 | -127.5 |
| ZrO ₂ | 0.00 | 11.8 |

物の濡れ性が大きく影響していると予想されるが、(7)式に示される複合体形成時の主要な反応、つまりアルミニウム液体による酸化物の還元反応の生じ易さも影響すると推定される。



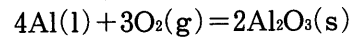
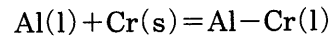
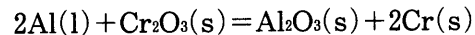
そこで、実験に供した酸化物について、25℃における(7)式の反応の標準自由エネルギー変化、 ΔG° を文献値⁹⁾より算出し、1100℃、10hrで生成した複合層の厚さが大きい酸化物(単独)の順に ΔG° の値を表2に示した。表2の結果から、CoOのように ΔG° が比較的大きな場合でも複合体を形成する一方、 ΔG° がNb₂O₅のように小さい場合でも複合体を形成しないなど、複合体の形成能と(7)式の反応の標準自由エネルギー変化との間には明確な相関性は認められなかった。

4. ま と め

アルミニウム成形体上にCr₂O₃-10wt%MgOを基本組成とする酸化物混合粉末を載せ、DMO法によりAl合金/Al₂O₃複合体を形成した。得られた複合体の性質を調べ、複合層の生成機構について検討し

た。その結果、以下に述べる事柄が明らかになった。

複合体の基本的な成分は α -Al₂O₃とAl合金であり、両相は均一に分散し気孔率が0.03%の緻密な複合体が生成した。 α -Al₂O₃とAl合金相は、まずアルミニウムが溶解し、アルミニウム液体が毛管現象で酸化物粉末中の気孔を上昇しながら以下の反応によって生成すると推定した。



複合体成長の律速段階はアルミニウム液体が酸化物粉末中の気孔を上昇する過程であり、アレニウスプロットから求めた活性化エネルギーは111.8kJ/molであった。酸化物にMgOを混合すると複合層の生成速度が大きくなるが、その理由は溶融アルミニウムと酸化物の濡れ性が改善されることによると推定された。複合体の形成過程において、雰囲気中の酸素分圧が大きくなると、 $p_{\text{O}_2} < 0.1\text{atm}$ の範囲では成長速度を大きくするが、 $p_{\text{O}_2} > 0.1\text{atm}$ ではほとんど酸素分圧の影響は認められなかった。

DMO法によって複合体を形成する酸化物はFe₂O₃、GeO₂、WO₃、CoOおよびCuOであり、MgOを混合するとCr₂O₃、NiOおよびSiO₂も複合体を形成することが分かった。またMgOの混合、不混合に関わらず、DMO法ではNb₂O₅、SnO₂、TiO₂およびZrO₂などの酸化物は、複合体を全く形成しないことが明らかになった。

参 考 文 献

- 1) 日本複合材料学会：複合材料ハンドブック，日刊工業新聞社，(1989)。
- 2) T. Beardsley: Nature, 318 (1985) 500.
- 3) M.S. Newkirk, A.W. Urquhart, H.R. Zwicker and E. Breval: J. Mater. Res., 1 (1986) 81.
- 4) M.S. Newkirk, H.D. Leshner, D.R. White, C.R. Kennedy, A.W. Urquhart and T.D. Claar: Ceram. Eng. Sci. Proc., 8 (1987) 879.
- 5) 松尾秀逸, 伊藤和男, 稲葉 毅, 坂井幸文: 金属, 59 (1989) 61.
- 6) 松尾秀逸, 稲葉 毅: セラミックス, 26 (1991) 222.
- 7) E. Breval, M.K. Aghajanian and S.J. Luszcz: J. Am. Ceram. Soc., 73 (1990) 2610.
- 8) E.M. Levin, C.R. Robbins and H.F. McMurdie: Phase Diagrams for Ceramists, 3rd Ed., American Ceramic Society, (1974) 111.
- 9) O. Kubaschewski and C.B. Alcock: Metallurgical Thermochemistry, 5th Ed., Pergamon Press, (1979) 378.

一般論文

Duality Transformation for the Planar Rotator Model on the Two-Dimensional Lattice

Yoshiaki TANAKA

Abstract

For the planar rotator model on the two-dimensional lattice, the duality transformations are discussed. This model is the system whose spin is the classical vector $S = (\cos \theta, \sin \theta)$, where the angle θ has discrete values i.e. $\theta = 2\pi r/R$ ($r=0, 1, \dots, R-1$). For the systems of $R=2, 3, 4, 5$ on the rectangular lattice, the exact critical temperatures are evaluated. With the aid of the star-triangle relation, for the systems of $R=2, 3, 4$ on the triangular and honeycomb lattices, the critical temperatures are exactly evaluated.

1. Introduction

It is well known that the exact critical temperature on the two-dimensional Ising lattice was found by Kramers and Wannier¹⁾²⁾ by use of the duality transformation. The partition function of the Ising system can be expressed as the summation of lattice diagrams, and then the only diagrams with closed-bond can be contributed to the partition function. Thereby we introduced the dual lattice corresponding to the original lattice. The dual lattice of the original rectangular is also rectangular. We are able to have the relation between the partition functions of the original lattice and dual lattice. As the critical temperature corresponds to the singular point of the partition function, if the system has only one singular point, we can obtain an exact critical temperature.

In this paper, we study the planar rotator model on the two-dimensional lattice whose Hamiltonian is given by

$$\mathcal{H} = \sum_{n=1}^{N/2} \sum_{m=1}^{M/2} \{ -J_1 [S(2n-1, 2m-1) \cdot S(2n-1, 2m) + S(2n, 2m) \cdot S(2n, 2m+1)]$$

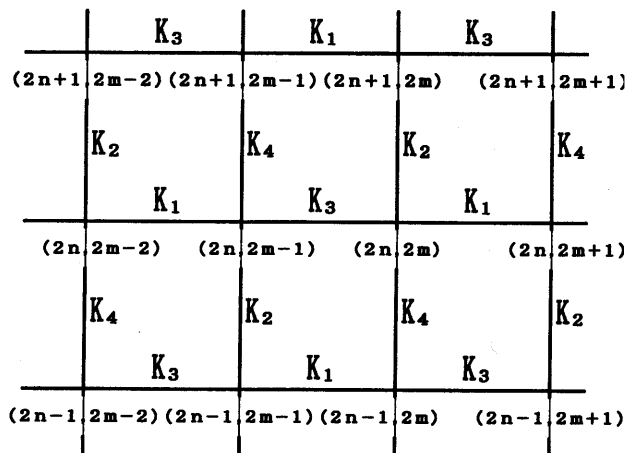


Fig. 1 The two-dimensional lattice.

$$\begin{aligned}
& -J_2[S(2n-1, 2m-1) \cdot S(2n, 2m-1) + S(2n, 2m) \cdot S(2n+1, 2m)] \\
& -J_3[S(2n-1, 2m) \cdot S(2n-1, 2m+1) + S(2n, 2m-1) \cdot S(2n, 2m)] \\
& -J_4[S(2n-1, 2m) \cdot S(2n, 2m) + S(2n, 2m-1) \cdot S(2n+1, 2m-1)]\}, \\
& ((N+1, m)=(1, m), (n, M+1)=(n, 1); N \rightarrow \infty, M \rightarrow \infty)
\end{aligned} \tag{1.1}$$

where $S(n, m)$ is classical spin vector at site (n, m) which has the components

$$S(n, m) = \{\cos[\theta(n, m)], \sin[\theta(n, m)]\}, \quad (0 \leq \theta \leq 2\pi) \tag{1.2}$$

and $J_i (i=1, 2, 3, 4)$ are the exchange interaction constants, and $M \times N$ (we assume that M and N are even number) is the total number of spin sites. The lattice satisfies the periodic boundary condition in two directions, so that the lattice is a torus, and then in the limit $N \rightarrow \infty$ and $M \rightarrow \infty$, the lattice is regarded as two-dimensional lattice. The partition function of the system is given by

$$Z = \sum_{\{S\}} \exp(-\mathcal{H}/k_B T), \tag{1.3}$$

where k_B is the Boltzmann constant, T is the temperature, and the notation $\{S\}$ means the sum is to be carried out for every spin.

In §2, we consider the duality transformation for the planar rotator model, making use of the transformation of the transfer matrix in the partition function. In §3, we discuss the critical temperature from the duality transformation, and also the star-triangle relation for the triangular and honeycomb lattices. In §4, the exact critical temperatures for some ferro-systems are given.

2. Theory

We rewrite the partition function as follows:

$$\begin{aligned}
Z = \sum_{\{\theta\}} \prod_{n=1}^{N/2} \prod_{m=1}^{M/2} & [\epsilon_1(2n-1, 2m-1) \cdot \epsilon_3(2n-1, 2m) \cdot \epsilon_2(2n-1, 2m-1) \cdot \epsilon_4(2n-1, 2m) \\
& \cdot \epsilon_3(2n, 2m-1) \cdot \epsilon_1(2n, 2m) \cdot \epsilon_4(2n, 2m-1) \cdot \epsilon_2(2n, 2m)],
\end{aligned} \tag{2.1}$$

where

$$\begin{aligned}
\epsilon_1(2n-1, 2m-1) &= \exp(K_1 \{\cos[\theta(2n-1, 2m-1) - \theta(2n-1, 2m)]\}), \\
\epsilon_1(2n, 2m) &= \exp(K_1 \{\cos[\theta(2n, 2m) - \theta(2n, 2m+1)]\}), \\
\epsilon_3(2n-1, 2m) &= \exp(K_3 \{\cos[\theta(2n-1, 2m) - \theta(2n-1, 2m+1)]\}), \\
\epsilon_3(2n, 2m-1) &= \exp(K_3 \{\cos[\theta(2n, 2m-1) - \theta(2n, 2m)]\}), \\
\epsilon_2(2n-1, 2m-1) &= \exp(K_2 \{\cos[\theta(2n-1, 2m-1) - \theta(2n, 2m-1)]\}), \\
\epsilon_2(2n, 2m) &= \exp(K_2 \{\cos[\theta(2n, 2m) - \theta(2n+1, 2m)]\}), \\
\epsilon_4(2n-1, 2m) &= \exp(K_4 \{\cos[\theta(2n-1, 2m) - \theta(2n, 2m)]\}), \\
\epsilon_4(2n, 2m-1) &= \exp(K_4 \{\cos[\theta(2n, 2m-1) - \theta(2n+1, 2m-1)]\}),
\end{aligned} \tag{2.2}$$

and $K_i = J_i/k_B T$ ($i=1, 2, 3, 4$).

We assume that the angle θ has discrete values i.e. $\theta = 2\pi r/R$ ($r=0, 1, \dots, R-1$), so that spin S has R states i.e. $[\cos(2\pi r/R), \sin(2\pi r/R)]$ -state ($r=0, 1, \dots, R-1$). We now define the $R \times R$ matrices ρ^x and ρ^z as

$$\rho^x = \begin{pmatrix} 0 & & & 0 & 1 \\ 1 & 0 & & 0 & 0 \\ & \ddots & \ddots & & \\ & & 0 & 1 & 0 \\ & & & & 1 & 0 \end{pmatrix}, \quad \rho^z = \begin{pmatrix} 1 & & & & \\ & \omega & & & \\ & & \omega^2 & & \\ & & & \ddots & \\ & & & & \omega^{R-1} \end{pmatrix}, \tag{2.3}$$

with $\omega = \exp(2\pi i/R)$ (i : imaginary unit) and we define a $R^m \times R^m$ unit matrix I_m by $I_m = I_1 \otimes \dots \otimes I_1$ ($R^m \times R^m$ unit matrix) with I_1 is a $R \times R$ unit matrix, and the symbol \otimes means the direct

product. We have the relations $(\rho^x)^R = (\rho^z)^R = I_1$ and $\omega^R = 1$.

We notice that, in the spin space $\{S(2n-1, 1)S(2n-1, 2)\cdots S(2n-1, M)\} \times \{S(2n-1, 1)S(2n-1, 2)\cdots S(2n-1, M)\}$, the quantities $\varepsilon_1(2n-1, 2m-1)$ and $\varepsilon_3(2n-1, 2m)$ are expressed by the following matrices:

$$\begin{aligned} \varepsilon_1(2n-1, 2m-1) &\rightarrow I_{2m-2} \otimes \begin{pmatrix} a_1(K_1) & & & \\ & a_2(K_1) & & 0 \\ & & \ddots & \\ 0 & & & a_R(K_1) \end{pmatrix} \otimes I_{M-2m}, \quad (\text{for } m=1, 2, \dots, M/2) \\ \varepsilon_3(2n-1, 2m) &\rightarrow \begin{cases} I_{2m-1} \otimes \begin{pmatrix} a_1(K_3) & & & \\ & a_2(K_3) & & 0 \\ & & \ddots & \\ 0 & & & a_R(K_3) \end{pmatrix} \otimes I_{M-2m-1}, & (\text{for } m=1, 2, \dots, M/2-1), \\ \begin{pmatrix} a_1(K_3) \otimes I_{M-2} & & & \\ & a_2(K_3) \otimes I_{M-2} & & 0 \\ & & \ddots & \\ 0 & & & a_R(K_3) \otimes I_{M-2} \end{pmatrix}, & (\text{for } m=M/2) \end{cases} \end{aligned} \quad (2.4)$$

where

$$a_r(K) = \begin{pmatrix} \exp\{K\cos[(1-r)(2\pi/R)]\} & & & \\ & \exp\{K\cos[(2-r)(2\pi/R)]\} & & 0 \\ & & \ddots & \\ 0 & & & \exp\{K\cos[(R-r)(2\pi/R)]\} \end{pmatrix}. \quad (r=1, 2, \dots, R) \quad (2.5)$$

Now we put

$$a_r(K) = \sum_{k=0}^{R-1} c_k(K) (\omega^{1-r})^k (\rho^z)^k. \quad (r=1, 2, \dots, R-1) \quad (2.6)$$

Making use of eqs.(2.5) and (2.6) for $r=1$, we obtain

$$c_k(K) = \frac{1}{R} \sum_{q=0}^{R-1} \omega^{-kq} \exp[K\cos(2\pi q/R)] = \frac{1}{R} \sum_{q=0}^{R-1} \cos(2\pi kq/R) \exp[K\cos(2\pi q/R)]. \quad (k=0, 1, \dots, R-1) \quad (2.7)$$

We note the relation $c_{R-k}(K) = c_k(K)$. the matrices in eq.(2.4) are written as

$$\begin{aligned} \varepsilon_1(2n-1, 2m-1) &\rightarrow \sum_{k=0}^{R-1} c_k(K_1) I_{2m-2} \otimes (\rho^z)^k \otimes (\rho^z)^{-k} \otimes I_{M-2m}, \quad (\text{for } m=1, 2, \dots, M/2) \\ \varepsilon_3(2n-1, 2m) &\rightarrow \begin{cases} \sum_{k=0}^{R-1} c_k(K_3) I_{2m-1} \otimes (\rho^z)^k \otimes (\rho^z)^{-k} \otimes I_{M-2m-1}, & (\text{for } m=1, 2, \dots, M/2-1) \\ \sum_{k=0}^{R-1} c_k(K_3) (\rho^z)^{-k} \otimes I_{M-2} \otimes (\rho^z)^k. & (\text{for } m=M/2) \end{cases} \end{aligned} \quad (2.8)$$

By using eq.(2.6), the quantities $\prod_{m=1}^{M/2} \varepsilon_1(2n-1, 2m-1)$ and $\prod_{m=1}^{M/2} \varepsilon_3(2n-1, 2m)$ are expressed by the matrices $A_1(K_1)$ and $A_3(K_3)$, respectively, where $A_1(K)$ and $A_3(K)$ are defined as follows:

$$\begin{aligned} A_1(K) &= \prod_{m=1}^{M/2} \left[\sum_{k=0}^{R-1} c_k(K) I_{2m-2} \otimes (\rho^z)^k \otimes (\rho^z)^{-k} \otimes I_{M-2m} \right], \\ A_3(K) &= \prod_{m=1}^{M/2-1} \left[\sum_{k=0}^{R-1} c_k(K) I_{2m-1} \otimes (\rho^z)^k \otimes (\rho^z)^{-k} \otimes I_{M-2m-1} \right] \cdot \left[\sum_{k=0}^{R-1} c_k(K) (\rho^z)^{-k} \otimes I_{M-2} \otimes (\rho^z)^k \right]. \end{aligned} \quad (2.9)$$

Similarly, in the spin space $\{S(2n-1, 1)S(2n-1, 2)\cdots S(2n-1, M)\} \times \{S(2n, 1)S(2n, 2)\cdots S(2n, M)\}$, the quantities $\prod_{m=1}^{M/2} \varepsilon_2(2n-1, 2m-1)$ and $\prod_{m=1}^{M/2} \varepsilon_4(2n-1, 2m)$ are expressed by the matrices $A_2(K_2)$ and $A_4(K_4)$, respectively, where

$$A_2(K) = \prod_{m=1}^{M/2} \left[\sum_{k=0}^{R-1} b_k(K) I_{2m-2} \otimes (\rho^x)^k \otimes I_{M-2m+1} \right], \quad A_4(K) = \prod_{m=1}^{M/2} \left[\sum_{k=0}^{R-1} b_k(K) I_{2m-1} \otimes (\rho^x)^k \otimes I_{M-2m} \right], \quad (2.10)$$

and

$$b_k(K) = \exp[K \cos(2\pi k/R)]. \quad (k=0, 1, \dots, R-1) \tag{2.11}$$

We note the relation $b_{R-k}(K) = b_k(K)$.

Similarly, in the spin space $\{S(2n, 1)S(2n, 2)\cdots S(2n, M)\} \times \{S(2n, 1)S(2n, 2)\cdots S(2n, M)\}$, or $\{S(2n, 1) S(2n, 2)\cdots S(2n, M)\} \times \{S(2n+1, 1)S(2n+1, 2)\cdots S(2n+1, M)\}$, the quantities $\prod_{m=1}^{M/2} \epsilon_3(2n, 2m-1)$ and $\prod_{m=1}^{M/2} \epsilon_1(2n, 2m)$, or $\prod_{m=1}^{M/2} \epsilon_4(2n, 2m-1)$ and $\prod_{m=1}^{M/2} \epsilon_2(2n, 2m)$ are expressed by the matrices $A_1(K_3)$ and $A_3(K_1)$, or $A_2(K_4)$ and $A_4(K_2)$, respectively. Using of these matrices A, we can express the partition function as follows:

$$Z = Z(K_1, K_2, K_3, K_4) = \text{Tr} \{ [A_1(K_1)A_3(K_3)A_2(K_2)A_4(K_4) \cdot A_1(K_3)A_3(K_1)A_2(K_4)A_4(K_2)]^{N/2} \}. \tag{2.12}$$

We now define a matrix W by $W = w \otimes \cdots \otimes w$ ($R^M \times R^M$ matrix) with w defined as follows:

$$w = \frac{1}{\sqrt{R}} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & \cdots & 1 \\ 1 & \omega^{-1} & \omega^{-2} & \cdots & \omega^{-(R-1)} \\ 1 & \omega^{-2} & \omega^{-4} & \cdots & \omega^{-2(R-1)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & \omega^{-(R-1)} & \omega^{-2(R-1)} & \cdots & \omega^{-(R-1)(R-1)} \end{pmatrix}. \tag{2.13}$$

By using the relations $w^{-1}\rho^x w = \rho^x$, $w^{-1}\rho^z w = (\rho^x)^{-1}$, we have

$$\begin{aligned} W^{-1}A_1(K)W &= \prod_{m=1}^{M/2} \left[\sum_{k=0}^{R-1} c_k(K) I_{2m-2} \otimes (\rho^x)^{-k} \otimes (\rho^x)^k \otimes I_{M-2m} \right], \\ W^{-1}A_3(K)W &= \prod_{m=1}^{M/2-1} \left[\sum_{k=0}^{R-1} c_k(K) I_{2m-1} \otimes (\rho^x)^{-k} \otimes (\rho^x)^k \otimes I_{M-2m-1} \right] \cdot \left[\sum_{k=0}^{R-1} c_k(K) (\rho^x)^k \otimes I_{M-2} \otimes (\rho^x)^{-k} \right], \\ W^{-1}A_2(K)W &= \prod_{m=1}^{M/2} \left[\sum_{k=0}^{R-1} b_k(K) I_{2m-2} \otimes (\rho^z)^k \otimes I_{M-2m+1} \right], \quad W^{-1}A_4(K)W = \prod_{m=1}^{M/2} \left[\sum_{k=0}^{R-1} b_k(K) I_{2m-1} \otimes (\rho^z)^k \otimes I_{M-2m} \right]. \end{aligned} \tag{2.14}$$

Next we define a $R^M \times R^M$ matrix V as follows:

$$V = (v \otimes I_{M-2})(I_1 \otimes v \otimes I_{M-3}) \cdots (I_{M-2} \otimes v), \quad V^{-1} = (I_{M-2} \otimes v)(I_{M-3} \otimes v \otimes I_1) \cdots (v \otimes I_{M-2}), \tag{2.15}$$

where

$$v = v^{-1} = \begin{pmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{22} & \sigma_{33} & \cdots & \sigma_{RR} \\ \sigma_{22} & \sigma_{33} & \sigma_{44} & \cdots & \sigma_{11} \\ \sigma_{33} & \sigma_{44} & \sigma_{55} & \cdots & \sigma_{22} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sigma_{RR} & \sigma_{11} & \sigma_{22} & \cdots & \sigma_{R-1, R-1} \end{pmatrix}, \quad (R^2 \times R^2 \text{ matrix}) \tag{2.16}$$

with $\sigma_{ij} = \{R \times R \text{ matrix; } (i, j) \text{ component} = 1, \text{ otherwise components} = 0\}$. For the terms in $W^{-1}A_1(K)W$, using the relations $v^{-1}(\rho^x \otimes I_1)v = \rho^x \otimes \rho^x$, $v^{-1}(I_1 \otimes \rho^x)v = I_1 \otimes (\rho^x)^{-1}$, $v^{-1}(\rho^z \otimes I_1)v = \rho^z \otimes I_1$ and $v^{-1}(I_1 \otimes \rho^z)v = \rho^z \otimes (\rho^z)^{-1}$, we have

$$\begin{aligned} V^{-1}[(\rho^x)^{-k} \otimes (\rho^x)^k \otimes I_{M-2}]V &= (\rho^x)^{-k} \otimes (\rho^x)^{-2k} \otimes \cdots \otimes (\rho^x)^{-2k}, \\ V^{-1}[I_{2m-2} \otimes (\rho^x)^{-k} \otimes (\rho^x)^k \otimes I_{M-2m}]V &= I_{m-2} \otimes (\rho^x)^k \otimes I_{M-2m+1}. \quad (m=2, 3, \dots, M/2) \end{aligned} \tag{2.17}$$

We define $B_i(K) = V^{-1}W^{-1}A_i(K)WV$ ($i=1, 2, 3, 4$). From eq.(2.17), we have

$$B_1(K) = \sum_{k=0}^{R-1} c_k(K) (\rho^x)^{-k} \otimes (\rho^x)^{-2k} \otimes \cdots \otimes (\rho^x)^{-2k} \cdot \prod_{m=2}^{M/2} \left[\sum_{k=0}^{R-1} c_k(K) I_{2m-2} \otimes (\rho^x)^k \otimes I_{M-2m+1} \right]. \tag{2.18}$$

Similarly we have

$$\begin{aligned} B_3(K) &= \prod_{m=1}^{M/2-1} \left[\sum_{k=0}^{R-1} c_k(K) I_{2m-1} \otimes (\rho^x)^k \otimes I_{M-2m} \right] \cdot \left[\sum_{k=0}^{R-1} c_k(K) (\rho^x)^k \otimes \cdots \otimes (\rho^x)^k \otimes (\rho^x)^{2k} \right], \\ B_2(K) &= \prod_{k=0}^{R-1} b_k(K) (\rho^z)^k \otimes I_{M-1} \cdot \prod_{m=2}^{M/2} \left[\sum_{k=0}^{R-1} b_k(K) I_{2m-3} \otimes (\rho^z)^k \otimes (\rho^z)^{-k} \otimes I_{M-2m+1} \right], \\ B_4(K) &= \prod_{m=1}^{M/2} \left[\sum_{k=0}^{R-1} b_k(K) I_{2m-2} \otimes (\rho^z)^k \otimes (\rho^z)^{-k} \otimes I_{M-2m} \right]. \end{aligned} \tag{2.19}$$

With the matrices B defined in eqs.(2.18) and (2.19), the partition function is expressed as

$$Z = \text{Tr} \{ [B_1(K_1)B_3(K_3)B_2(K_2)B_4(K_4) \cdot B_1(K_3)B_3(K_1)B_2(K_4)B_4(K_2)]^{N/2} \}. \quad (2.20)$$

In the thermodynamic limit $M \rightarrow \infty$, the effect of the boundary condition on the partition function in eq.(2.12) or (2.20) can be ignored, so that we have the expression of the matrices A(K) and B(K) as follows:

$$\begin{aligned} A_1(K) &= \prod_{m=-\infty}^{\infty} \left[\sum_{k=0}^{R-1} c_k(K) I_{2m-2} \otimes (\rho^z)^k \otimes (\rho^z)^{-k} \otimes I_{M-2m} \right], \\ A_3(K) &= \prod_{m=-\infty}^{\infty} \left[\sum_{k=0}^{R-1} c_k(K) I_{2m-1} \otimes (\rho^z)^k \otimes (\rho^z)^{-k} \otimes I_{M-2m-1} \right], \\ A_2(K) &= \prod_{m=-\infty}^{\infty} \left[\sum_{k=0}^{R-1} b_k(K) I_{2m-2} \otimes (\rho^x)^k \otimes I_{M-2m+1} \right], \quad A_4(K) = \prod_{m=-\infty}^{\infty} \left[\sum_{k=0}^{R-1} b_k(K) I_{2m-1} \otimes (\rho^x)^k \otimes I_{M-2m} \right], \end{aligned} \quad (2.21)$$

and

$$\begin{aligned} B_1(K) &= \prod_{m=-\infty}^{\infty} \left[\sum_{k=0}^{R-1} c_k(K) I_{2m-2} \otimes (\rho^x)^k \otimes I_{M-2m+1} \right], \quad B_3(K) = \prod_{m=-\infty}^{\infty} \left[\sum_{k=0}^{R-1} c_k(K) I_{2m-1} \otimes (\rho^x)^k \otimes I_{M-2m} \right], \\ B_2(K) &= \prod_{m=-\infty}^{\infty} \left[\sum_{k=0}^{R-1} b_k(K) I_{2m-1} \otimes (\rho^z)^k \otimes (\rho^z)^{-k} \otimes I_{M-2m-1} \right], \\ B_4(K) &= \prod_{m=-\infty}^{\infty} \left[\sum_{k=0}^{R-1} b_k(K) I_{2m-2} \otimes (\rho^z)^k \otimes (\rho^z)^{-k} \otimes I_{M-2m} \right]. \end{aligned} \quad (2.22)$$

Now we will assume that $c_k(K)$ in eq.(2.7) or $b_k(K)$ in eq.(2.11) are related by the following equation:

$$c_k(K) = D(K) b_k(K^*), \quad \text{or} \quad b_k(K) = [1/D(K^*)] c_k(K^*), \quad (k=0, 1, \dots, R-1) \quad (2.23)$$

where $D(K)$ is not dependent on k . Substituting eqs.(2.7) and (2.11) into eq.(2.23), we have

$$\frac{1}{R} \sum_{q=0}^{R-1} \cos(2\pi kq/R) \exp[K \cos(2\pi q/R)] = D(K) \times \exp[K^* \cos(2\pi k/R)],$$

$$\exp[K \cos(2\pi k/R)] = \frac{1}{RD(K^*)} \sum_{q=0}^{R-1} \cos(2\pi kq/R) \exp[K^* \cos(2\pi q/R)]. \quad (k=0, 1, \dots, R-1) \quad (2.24)$$

We confirm that $D(K)$ and K^* are well-defined for $R=2, 3, 4$ at arbitrary temperature, and $R=5$ at the special temperature, as follows:

(1) The case of $R=2$ (Ising spin): From eq.(2.24), we have $[D(K)]^2 = \cosh(K) \sinh(K)$, and then $\sinh(2K) \sinh(2K^*) = 1$. (2.25)

(2) The case of $R=3$: From eq.(2.24), we have $[D(K)]^3 = (1/3)^3 [\exp(K) + 2\exp(-K/2)] [\exp(K) - \exp(-K/2)]^2$, and then

$$(1/3) [\exp(3K/2) - 1] [\exp(3K^*/2) - 1] = 1. \quad (2.26)$$

(3) The case of $R=4$: From eq.(2.24), we have $D(K) = \sinh(K)/2$, and then

$$\sinh(K) \sinh(K^*) = 1. \quad (2.27)$$

(4) The case of $R=5$: The eq.(2.24) is reduced to

$$(1/5) \{ \exp(K) + 2\exp[K \cos(2\pi/5)] + 2\exp[K \cos(4\pi/5)] \} = D(K) \exp(K^*),$$

$$(1/5) \{ \exp(K) + 2\cos(2\pi/5) \exp[K \cos(2\pi/5)] + 2\cos(4\pi/5) \exp[K \cos(4\pi/5)] \} \\ = D(K) \exp[K^* \cos(2\pi/5)],$$

$$(1/5) \{ \exp(K) + 2\cos(4\pi/5) \exp[K \cos(2\pi/5)] + 2\cos(2\pi/5) \exp[K \cos(4\pi/5)] \} \\ = D(K) \exp[K^* \cos(4\pi/5)]. \quad (2.28)$$

At arbitrary temperature, the values of K^* obtained by the three equations of (2.28) are not coincide with each other. Namely, for $R=5$, we confirm that eq.(2.23) is not well-defined. However, we find the following fact, by numerically: at the special temperature T_0 , which K_0^*

3. Critical Temperature

In the previous sections, we obtained the relation between the partition function of the original lattice and that of the dual lattice. As the critical temperature T_c corresponds to the singular point of the partition function, if the system has only one singular point, we can get T_c . In this section, we make assumption that the system has only one singular point, so that we will obtain T_c of the system.

(I) Rectangular lattice ($J_3=J_1$ and $J_4=J_2$)

When $J_3=J_1$ and $J_4=J_2$ in Fig. 1, both the original and dual lattices are reduced to the rectangular lattices that the partition functions are given as follows, respectively:

$$\begin{aligned} Z(K_1, K_2, K_1, K_2) &= \text{Tr} \{ [A_1(K_1)A_3(K_1)A_2(K_2)A_4(K_2)]^N \}, \\ Z(K_2^*, K_1^*, K_2^*, K_1^*) &= \text{Tr} \{ [A_1(K_2^*)A_3(K_2^*)A_2(K_1^*)A_4(K_1^*)]^N \}. \end{aligned} \quad (3.1)$$

(I-1) The case of $R=2$ (Ising spin): From eq.(2.25), we have the equation for the critical temperature T_c as follows:

$$\sinh(2J_1/k_B T_c) \sinh(2J_2/k_B T_c) = 1. \quad (3.2)$$

(I-2) The case of $R=3$: From eq.(2.26), we have the equation for T_c as follows:

$$(1/3)[\exp(3J_1/2k_B T_c) - 1][\exp(3J_2/2k_B T_c) - 1] = 1. \quad (3.3)$$

(I-3) The case of $R=4$: From eq.(2.27), we have the equation for T_c as follows:

$$\sinh(J_1/k_B T_c) \sinh(J_2/k_B T_c) = 1. \quad (3.4)$$

(I-4) The case of $R=5$: For $R=5$, K_i^* ($i=1, 2$) are well-defined at the special temperature T_c . Therefore we can obtain T_c for the system with $K_2=K_1$, not for $K_2 \neq K_1$. From eq.(2.30), we have the equation for T_c as follows:

$$\exp[(J/k_B T_c) \cos(2\pi/5)] + \exp[(J/k_B T_c) \cos(4\pi/5)] = [(\sqrt{5}-1)/2] \exp[(J/k_B T_c)]. \quad (3.5)$$

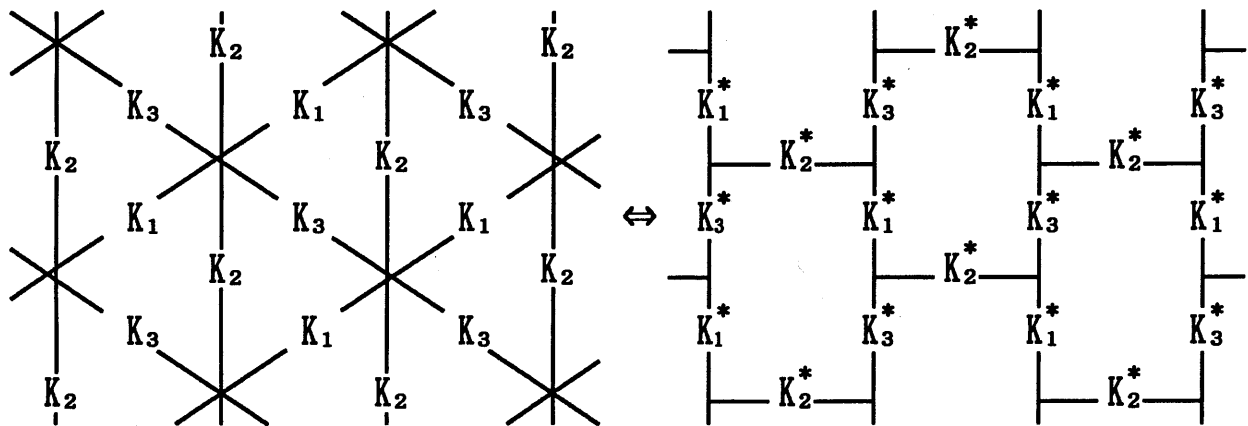
(II) Triangular lattice

By using eq.(2.33), we rewrite eq.(2.36) as follows:

$$\frac{Z(K_1, K_2, K_3, K_4)}{[D(K_1)D(K_2)D(K_3)]^{MN/4} [D(K_4)]^{MN/2}} = R^{MN/4} \times \frac{Z(K_2^*, K_1^*, K_4^*, K_3^*)}{[D(K_1^*)D(K_2^*)D(K_3^*)]^{MN/4}}. \quad (R=2, 3, 4, 5; M, N \rightarrow \infty) \quad (3.6)$$

In the limit $K_4 \rightarrow \infty$ in Fig. 1, the original lattice is reduced to the triangular lattice (Fig. 3), and then we have $D(K_4) \rightarrow (1/R) \exp(K_4)$, and

$$\frac{b_k(K_4)}{D(K_4)} \rightarrow \frac{\exp[K_4 \cos(2\pi k/R)]}{(1/R) \exp(K_4)} \rightarrow \begin{cases} R, & (k=0) \\ 0, & (k=1, 2, \dots, R-1) \end{cases} \quad (3.7)$$



(a) The original lattice

(b) The dual lattice

Fig. 3 The relation of the original and dual for the triangular lattice.

Using this for $A_4(K_4)$ and $A_3(K_4)$ in eq.(2.21), we have $A_4(K_4)/[D(K_4)]^{M/2} \rightarrow R^{M/2}I_M$, $A_2(K_4)/[D(K_4)]^{M/2} \rightarrow R^{M/2}I_M$, and then

$$\frac{Z(K_1, K_2, K_3, K_4)}{[D(K_1)D(K_2)D(K_3)]^{MN/4}[D(K_4)]^{MN/2}} \rightarrow \frac{R^{MN/2}\text{Tr}\{[A_1(K_1)A_3(K_3)A_2(K_2) \cdot A_1(K_3)A_3(K_1)A_4(K_2)]^{N/2}\}}{[D(K_1)D(K_2)D(K_3)]^{MN/4}}. \quad (3.8)$$

On the other hand, from eqs.(2.25),(2.26) and (2.27), in the limit $K_4 \rightarrow \infty$, we have $K_4^* \rightarrow 0$, and then the dual lattice is honeycomb lattice (Fig. 3). We have

$$c_k(K_4^*) \rightarrow \frac{1}{R} \sum_{q=0}^{R-1} \omega^{-kq^*} = \begin{cases} 1, & (k=0) \\ 0, & (k=1, 2, \dots, R-1) \end{cases} \quad (3.9)$$

Using this for $A_1(K_4^*)$ and $A_3(K_4^*)$ in eq.(2.21), we have $A_1(K_4^*) \rightarrow I_M$, $A_3(K_4^*) \rightarrow I_M$, and then

$$\frac{Z(K_2^*, K_1^*, K_4^*, K_3^*)}{[D(K_1^*)D(K_2^*)D(K_3^*)]^{MN/4}} \rightarrow \frac{\text{Tr}\{[A_1(K_2^*)A_2(K_1^*)A_4(K_3^*) \cdot A_3(K_2^*)A_2(K_3^*)A_4(K_1^*)]^{N/2}\}}{[D(K_1^*)D(K_2^*)D(K_3^*)]^{MN/4}}. \quad (3.10)$$

Therefore eq.(3.6) is written as

$$\frac{Z_{\text{tri}}(K_1, K_2, K_3)}{[D(K_1)D(K_2)D(K_3)]^{MN/4}} = \frac{1}{R^{MN/4}} \times \frac{Z_{\text{hon}}(K_2^*, K_1^*, K_3^*)}{[D(K_1^*)D(K_2^*)D(K_3^*)]^{MN/4}}, \quad (R=2, 3, 4, 5; M, N \rightarrow \infty) \quad (3.11)$$

where $Z_{\text{tri}}(K_1, K_2, K_3)$ and $Z_{\text{hon}}(K_2^*, K_1^*, K_3^*)$ are the partition functions for the triangular and honeycomb lattices, respectively, as follows:

$$\begin{aligned} Z_{\text{tri}}(K_1, K_2, K_3) &= \text{Tr}\{[A_1(K_1)A_3(K_3)A_2(K_2) \cdot A_1(K_3)A_3(K_1)A_4(K_2)]^{N/2}\}, \\ Z_{\text{hon}}(K_2^*, K_1^*, K_3^*) &= \text{Tr}\{[A_1(K_2^*)A_2(K_1^*)A_4(K_3^*) \cdot A_3(K_2^*)A_2(K_3^*)A_4(K_1^*)]^{N/2}\}. \end{aligned} \quad (3.12)$$

In order to relate the partition functions of the honeycomb lattice to that of the triangular lattice, we make use of the star-triangle relation²⁾. With the definition of the exchange constants K_i^+ ($i=1, 2, 3$) as shown in Fig.4, we assume the following relation:

$$\begin{aligned} & f \times \exp\{K_1^+ \cos[(2\pi/R)(r_2-r_3)] + K_2^+ \cos[(2\pi/R)(r_3-r_1)] + K_3^+ \cos[(2\pi/R)(r_1-r_2)]\} \\ &= \sum_{r=0}^{R-1} \exp\{K_1^* \cos[(2\pi/R)(r_1-r)] + K_2^* \cos[(2\pi/R)(r_2-r)] + K_3^* \cos[(2\pi/R)(r_3-r)]\}. \end{aligned} \quad (3.13)$$

It is well known that, for $R=2$ (Ising spin), K^+ are well-defined³⁾. However, for $R \geq 3$, whether K^+ are well-defined or not should be investigated later on. Substituting eq.(2.24) into the right-hand side of eq.(3.13), and using eq.(2.7) we have

$$\begin{aligned} & f \times \exp\{K_1^+ \cos[(2\pi/R)(r_2-r_3)] + K_2^+ \cos[(2\pi/R)(r_3-r_1)] + K_3^+ \cos[(2\pi/R)(r_1-r_2)]\} \\ &= \frac{F_{r_1 r_2 r_3}(K_1, K_2, K_3)}{D(K_1)D(K_2)D(K_3)}, \end{aligned} \quad (3.14)$$

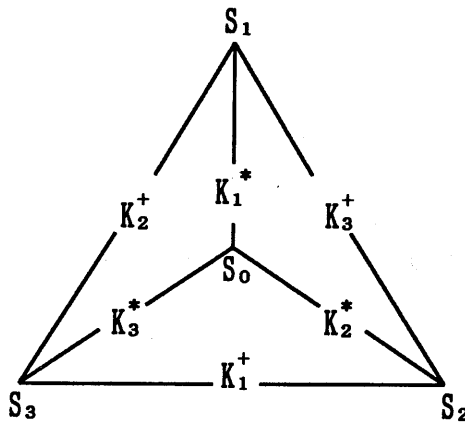


Fig. 4 The star-triangle relation.

where

$$F_{r_1 r_2 r_3}(K_1, K_2, K_3) = \sum_{r=0}^{R-1} [c_{r_1-r}(K_1) c_{r_2-r}(K_2) c_{r_3-r}(K_3)]. \quad (3.15)$$

From eq.(3.15), we have

$$\begin{aligned} \text{for } (r_1, r_2, r_3) = (0, 0, 0): f \times \exp(K_1^+ + K_2^+ + K_3^+) &= \frac{F_{000}}{D(K_1)D(K_2)D(K_3)}, \\ \text{for } (r_1, r_2, r_3) = (1, 0, 0): f \times \exp[K_1^+ + (K_2^+ + K_3^+) \cos(2\pi/R)] &= \frac{F_{100}}{D(K_1)D(K_2)D(K_3)}, \\ \text{for } (r_1, r_2, r_3) = (0, 1, 0): f \times \exp[K_2^+ + (K_3^+ + K_1^+) \cos(2\pi/R)] &= \frac{F_{010}}{D(K_1)D(K_2)D(K_3)}, \\ \text{for } (r_1, r_2, r_3) = (0, 0, 1): f \times \exp[K_3^+ + (K_1^+ + K_2^+) \cos(2\pi/R)] &= \frac{F_{001}}{D(K_1)D(K_2)D(K_3)}, \end{aligned} \quad (3.16)$$

and then

$$\exp\{2(K_1^+ + K_2^+ + K_3^+) [1 - \cos(2\pi/R)]\} = \frac{(F_{000})^3}{F_{100}F_{010}F_{001}}. \quad (3.17)$$

(II-1) The case of $R=2$ (Ising spin):

From eq.(3.17), we have well-known formula³⁾ for the critical temperature T_c as follows:

$$\exp[4(J_1 + J_2 + J_3)/k_B T_c] = \frac{(1 + v_{1c} v_{2c} v_{3c})^3}{(v_{1c} + v_{2c} v_{3c})(v_{2c} + v_{3c} v_{1c})(v_{3c} + v_{1c} v_{2c})}, \quad (3.18)$$

where $v_{ic} = \tanh(J_i/k_B T_c)$ ($i=1, 2, 3$).

(II-2) The case of $R=3$:

At the special temperature T_c , the values of $K_{ic}^+ = K_{ic}$ ($i=1, 2, 3$) obtained by eq.(3.14) are coincide with each other. Therefore from eq.(3.17), we have the equation for the critical temperature T_c ($K_c = J/k_B T_c$),

$$\exp[3(K_{1c} + K_{2c} + K_{3c})] = \frac{[F_{000}(K_{1c}, K_{2c}, K_{3c})]^3}{F_{100}(K_{1c}, K_{2c}, K_{3c})F_{010}(K_{1c}, K_{2c}, K_{3c})F_{001}(K_{1c}, K_{2c}, K_{3c})}, \quad (3.19)$$

where

$$\begin{aligned} F_{000} &= c_0(K_1)c_0(K_2)c_0(K_3) + 2c_1(K_1)c_1(K_2)c_1(K_3), \\ F_{100} &= c_1(K_1)c_0(K_2)c_0(K_3) + c_0(K_1)c_1(K_2)c_1(K_3) + c_1(K_1)c_1(K_2)c_1(K_3), \\ F_{010} &= c_0(K_1)c_1(K_2)c_0(K_3) + c_1(K_1)c_0(K_2)c_1(K_3) + c_1(K_1)c_1(K_2)c_1(K_3), \\ F_{001} &= c_0(K_1)c_0(K_2)c_1(K_3) + c_1(K_1)c_1(K_2)c_0(K_3) + c_1(K_1)c_1(K_2)c_1(K_3), \end{aligned} \quad (3.20)$$

with $c_0(K) = (1/3)[\exp(K) + 2\exp(-K/2)]$ and $c_1(K) = (1/3)[\exp(K) - \exp(-K/2)]$. In the special case of $K_1 = K_2 = K_3 \equiv K$, we obtain

$$\exp(3J/k_B T_c) - \exp(-3J/2k_B T_c) = 3. \quad (3.21)$$

(II-3) The case of $R=4$:

For the system of the general values K_i^+ ($i=1, 2, 3$), we also confirmed that K_i are well-defined at arbitrary temperature, by numerically. From eq.(3.17), we have the equation for the T_c as follows:

$$\exp[2(K_{1c} + K_{2c} + K_{3c})] = \frac{[F_{000}(K_{1c}, K_{2c}, K_{3c})]^3}{F_{100}(K_{1c}, K_{2c}, K_{3c})F_{010}(K_{1c}, K_{2c}, K_{3c})F_{001}(K_{1c}, K_{2c}, K_{3c})}, \quad (3.22)$$

where

$$\begin{aligned} F_{000} &= c_0(K_1)c_0(K_2)c_0(K_3) + 2c_1(K_1)c_1(K_2)c_1(K_3) + c_2(K_1)c_2(K_2)c_2(K_3), \\ F_{100} &= c_1(K_1)c_0(K_2)c_0(K_3) + c_0(K_1)c_1(K_2)c_1(K_3) + c_1(K_1)c_2(K_2)c_2(K_3) + c_2(K_1)c_1(K_2)c_1(K_3), \\ F_{010} &= c_0(K_1)c_1(K_2)c_0(K_3) + c_1(K_1)c_0(K_2)c_1(K_3) + c_2(K_1)c_1(K_2)c_2(K_3) + c_1(K_1)c_2(K_2)c_1(K_3), \\ F_{001} &= c_0(K_1)c_0(K_2)c_1(K_3) + c_1(K_1)c_1(K_2)c_0(K_3) + c_2(K_1)c_2(K_2)c_1(K_3) + c_1(K_1)c_1(K_2)c_2(K_3), \end{aligned} \quad (3.23)$$

with $c_0(K) = (1/2)[1 + \cosh(K)]$, $c_1(K) = (1/2)\sinh(K)$ and $c_2(K) = (1/2)[-1 + \cosh(K)]$. In the special case of $K_1 = K_2 = K_3 \equiv K$, we obtain

$$\exp(2J/k_B T_c) - 3\exp(-2J/k_B T_c) = 2. \quad (3.24)$$

For $R \geq 5$, we can not find values of K^+ and D at any temperature, that is, the star-triangle relation eq.(3.13) is not well-defined.

(III) Honeycomb lattice

By using eq.(2.33), we rewrite eq.(2.36) as follows:

$$\frac{Z(K_1, K_2, K_3, K_4)}{[D(K_1)D(K_2)D(K_4)]^{MN/4}} = \frac{1}{R^{MN/4}} \times \frac{Z(K_2^*, K_1^*, K_4^*, K_3^*)}{[D(K_1^*)D(K_2^*)D(K_4^*)]^{MN/4} [D(K_3^*)]^{MN/2}} \quad (M, N \rightarrow \infty) \quad (3.25)$$

In the limit $K_3 \rightarrow 0$ in Fig.1, the original lattice is reduced to the honeycomb lattice, and then $K_3^* \rightarrow \infty$, so that the dual lattice is triangular lattice. In a similar way of thinking on the original triangular lattice, we obtain (we finally replace K_4 to K_3)

$$\frac{Z_{hon}(K_1, K_2, K_3)}{[D(K_1)D(K_2)D(K_3)]^{MN/4}} = R^{MN/4} \times \frac{Z_{tri}(K_2^*, K_1^*, K_3^*)}{[D(K_1^*)D(K_2^*)D(K_3^*)]^{MN/4}} \quad (3.26)$$

For the honeycomb lattice, the star-triangle relation is written as

$$\begin{aligned} f \times \exp\{K_1^* \cos[(2\pi/R)(r_2 - r_3)] + K_2^* \cos[(2\pi/R)(r_3 - r_1)] + K_3^* \cos[(2\pi/R)(r_1 - r_2)]\} \\ = \sum_{r=0}^{R-1} \exp\{K_1^+ \cos[(2\pi/R)(r_1 - r)] + K_2^+ \cos[(2\pi/R)(r_2 - r)] + K_3^+ \cos[(2\pi/R)(r_3 - r)]\}. \end{aligned} \quad (3.27)$$

Substituting eq.(2.24) into the left-hand side of eq.(3.27), and using eq.(2.7), we have

$$\frac{f}{D(K_1)D(K_2)D(K_3)} \times c_{r_2 - r_3}(K_1)c_{r_3 - r_1}(K_2)c_{r_1 - r_2}(K_3) = G_{r_1 r_2 r_3}(K_1^+, K_2^+, K_3^+), \quad (3.28)$$

where

$$\begin{aligned} G_{r_1 r_2 r_3}(K_1^+, K_2^+, K_3^+) = \sum_{r=0}^{R-1} \exp\{K_1^+ \cos[(2\pi/R)(r_1 - r)] + K_2^+ \cos[(2\pi/R)(r_2 - r)] \\ + K_3^+ \cos[(2\pi/R)(r_3 - r)]\}. \end{aligned} \quad (3.29)$$

From eq.(3.28), we have

$$\begin{aligned} \text{for } (r_1, r_2, r_3) = (0, 0, 0): \quad & \frac{f}{D(K_1)D(K_2)D(K_3)} \times c_0(K_1)c_0(K_2)c_0(K_3) = G_{000}, \\ \text{for } (r_1, r_2, r_3) = (1, 0, 0): \quad & \frac{f}{D(K_1)D(K_2)D(K_3)} \times c_0(K_1)c_{-1}(K_2)c_1(K_3) = G_{100}, \\ \text{for } (r_1, r_2, r_3) = (0, 1, 0): \quad & \frac{f}{D(K_1)D(K_2)D(K_3)} \times c_1(K_1)c_0(K_2)c_{-1}(K_3) = G_{010}, \\ \text{for } (r_1, r_2, r_3) = (0, 0, 1): \quad & \frac{f}{D(K_1)D(K_2)D(K_3)} \times c_{-1}(K_1)c_1(K_2)c_0(K_3) = G_{001}, \end{aligned} \quad (3.30)$$

and then

$$\frac{c_1(K_1)c_{-1}(K_1)c_1(K_2)c_{-1}(K_2)c_1(K_3)c_{-1}(K_3)}{[c_0(K_1)c_0(K_2)c_0(K_3)]^2} = \frac{G_{100}G_{010}G_{001}}{(G_{000})^3}. \quad (3.31)$$

(II-1) The case of $R=2$ (Ising spin):

For $R=2$, the star-triangle relation (3.27) is well-defined. From eq.(3.31), we have well-known formula³⁾ for the critical temperature as follows:

$$\tanh^2(K_{1c})\tanh^2(K_{2c})\tanh^2(K_{3c}) = \frac{\cosh(-K_{1c} + K_{2c} + K_{3c})\cosh(K_{1c} - K_{2c} + K_{3c})\cosh(K_{1c} + K_{2c} - K_{3c})}{\cosh^3(K_{1c} + K_{2c} + K_{3c})}. \quad (3.32)$$

(II-2) The case of $R=3$:

The situation is similar for the triangular lattice. From eq.(3.31) we have the equation for

T_c as follows:

$$\left(\frac{c_1(K_{1c})c_1(K_{2c})c_1(K_{3c})}{c_0(K_{1c})c_0(K_{2c})c_0(K_{3c})} \right)_2 = \frac{G_{100}(K_{1c}, K_{2c}, K_{3c})G_{010}(K_{1c}, K_{2c}, K_{3c})G_{001}(K_{1c}, K_{2c}, K_{3c})}{[G_{000}(K_{1c}, K_{2c}, K_{3c})]^3}. \quad (3.33)$$

where

$$\begin{aligned} G_{000} &= \exp(K_1 + K_2 + K_3) + 2\exp(-K_1 - K_2 - K_3), \\ G_{100} &= \exp(-K_1/2 + K_2 + K_3) + \exp(K_1 - K_2/2 - K_3/2) + \exp(-K_1/2 - K_2/2 - K_3/2), \\ G_{010} &= \exp(K_1 - K_2/2 + K_3) + \exp(-K_1/2 + K_2 - K_3/2) + \exp(-K_1/2 - K_2/2 - K_3/2), \\ G_{001} &= \exp(K_1 + K_2 - K_3/2) + \exp(-K_1/2 - K_2/2 + K_3) + \exp(-K_1/2 - K_2/2 - K_3/2). \end{aligned} \quad (3.34)$$

In the special case of $K_1 = K_2 = K_3 \equiv K$, we obtain

$$\exp(J/k_B T_c) - \exp(-J/2k_B T_c) = 3^{2/3}. \quad (3.35)$$

(II-3) The case of $R=4$:

For $R=4$, the star-triangle relation (3.27) is well-defined. From eq.(3.31) we obtain the equation for T_c as follows:

$$\left(\frac{c_1(K_{1c})c_1(K_{2c})c_1(K_{3c})}{c_0(K_{1c})c_0(K_{2c})c_0(K_{3c})} \right)_2 = \frac{G_{100}(K_{1c}, K_{2c}, K_{3c})G_{010}(K_{1c}, K_{2c}, K_{3c})G_{001}(K_{1c}, K_{2c}, K_{3c})}{[G_{000}(K_{1c}, K_{2c}, K_{3c})]^3}. \quad (3.36)$$

where

$$\begin{aligned} G_{000} &= 2[1 + \cosh(K_1 + K_2 + K_3)], & G_{100} &= 2[\cosh(K_1) + \cosh(K_2 + K_3)], \\ G_{010} &= 2[\cosh(K_2) + \cosh(K_3 + K_1)], & G_{001} &= 2[\cosh(K_3) + \cosh(K_1 + K_2)]. \end{aligned} \quad (3.37)$$

In the special case of $K_1 = K_2 = K_3 \equiv K$, we have

$$\sinh(J/2k_B T_c) = (1/\sqrt{2}). \quad (3.38)$$

For $R \geq 5$, we can not find values of K^+ and D at any temperature, that is, the star-triangle relation eq.(3.13) is not well-defined.

4. Concluding Remarks

The following is a summary of the main results in § 2 and § 3 for the planar rotator model:

- (1) The duality transformation is well defined for $R=2, 3, 4$ at arbitrary temperature, and $R=5$ at the special temperature.
- (2) The star-triangle relation is well-defined for $R=2, 4$ at arbitrary temperature, and $R=3$ at the critical temperature.

We calculated the critical temperature T_c for the ferro-systems (exchange constants are positive). The values of T_c obtained using eqs.(3.2)~(3.5) for the rectangular ($K_1 = K_2 = K$) lattice, eqs.(3.18),(3.21),(3.24) triangular ($K_1 = K_2 = K_3 = K$), and eqs.(3.32),(3.35),(3.38) honeycomb ($K_1 = K_2 = K_3 = K$), respectively, are summarized in Table I. We note that the values of T_c for $R=4$ are half ones for $R=2$ (Ising model), on every lattices. For the system with $R=5$ on the

Table I The critical temperature $k_B T_c / J$ of the planar rotator model with the isotropic exchange constants $J > 0$, on the two-dimensional lattices.

| R/Lattice | Square | Triangular | Honeycomb |
|-----------|---------|------------|-----------|
| 2 | 2.26919 | 3.64096 | 1.51865 |
| 3 | 1.49246 | 2.37739 | 1.01064 |
| 4 | 1.13459 | 1.82048 | 0.75933 |
| 5 | 0.92909 | — | — |

rectangular lattice, we were unable to reach an accurate conclusion that the special temperature T_0 is the critical temperature T_c , and thus it is still only a hypothesis.

In the case of antiferro-systems (exchange constants are negative), T_c for $R=2$ and 4 on the rectangular and honeycomb lattices are the same values as ones of the ferro-systems. On the other hand, for the system with $R=3$, or the systems on the triangular lattice, we conjecture that the values of T_c are different as ones of the ferro-systems, because these systems are not simple. The analysis of these systems are problems to be studied in future.

References

- 1) H.A. Kramers and G.H. Wannier: Phys. Rev. **60** (1941) 252; **60** (1941) 263.
- 2) G.H. Wannier: Rev. mod. Phys. **17** (1945) 50.
- 3) Y. Tanaka and N. Uryû: J. Phys. Soc. Jpn **44** (1978) 1091.



一般論文

第二言語習得理論に基づく「実践英語」— その 1 —
インターネットを利用した英語教育事例の分析及び評価

米 永 正 敏

“Practical English” viewed by Theories of the Second Language Acquisition—No.1—:
Analysis and Evaluation of the English Education Utilizing the Internet

Masatoshi YONENAGA

The author has submitted a series of three reports on “English Education Utilizing the Internet” for the 5th grade students of 1996 & 1997 “Practical English” classes at Kurume National College of Technology. In those reports, the targets of the teaching plan and the procedures of the learners’ activities in the classes have been revealed and explained, because the author hopes that the characteristics of “Practical English” should be made clear before classes, and also has emphasized that the significance of “Practical English” should be recognized in the whole course of the curriculum at this technology-major college.

In this paper, those methods are reexamined from the view points of the theories of the Second Language Acquisition (SLA). That is why the author strongly believes that effective teaching practices should be supported by certain language learning theories. However, in fact, many teachers of foreign languages in Japan, whose teaching methods may very often be out of date, are proceeding their classes strictly based upon his/her teaching experiences.

This paper starts by clarifying the targets of English teaching at technology-major college, then makes a brief introduction of several major language learning theories, upon which “Practical English” classes are examined. Each stage of learning procedures is analyzed and evaluated by SLA theories in the following papers.

Finally, the author has a strong wish that this series of papers could trigger the controversies concerning with the English education, not only at this technology-major college, but also at schools all over Japan.

1. はじめに

筆者は、1996年1997年度の2年間、久留米高専の材料工学科5学年の「実践英語」を担当し、インターネットを利用した「実践英語」の教育事例を、3回にわたり久留米高専紀要に報告した。(久留米高専紀要、第13巻第1号、第2号、第14巻第1号) その「実践英語」教育事例を基にして、本論文から数回にわたり、第二言語習得理論の視点から分析および評価を下し、久留米高専における従来の英語教育に対する反省と、今後の英語教育改善への提言を述べることにする。

本論文執筆の理由を今一度確認しよう。筆者は、1996年度から始まった「実践英語」の授業を行うにあたり、まず、この教科の性質、意義、特徴をどのように捉えるのか?、教育目標をどのように設定す

るのか?、目標到達のために何を、どのように教育していくべきなのか? などという様々な疑問を抱いている。5学年に配当されている「実践英語」という科目こそ、高専5年間の英語教育の集大成をなすものでなければならないと、筆者は考える。そのためには、高専における5年間の英語教育の目的や目標といった本質的な疑問に対して、教科担当者として真摯な議論を重ねた上で、明確な回答を示すべきではないだろうか? しかし、現状では、教官また学習者にとって、果たして、5年間の英語教育の集大成という意識すらあるのだろうか? もちろん、各教官個人によって、英語教育の内容も目的も違っているであろうし、設定目標に対しての教育方法にも相違があるのは、当然である。しかし、その相違は、教官の個性を教育現場において実現させるという意味においてである。現在のように、毎年毎年担当教官が替わる度に、教育内容および教育方法が目まぐ

るしく変化しておれば、徒に学生を混乱に貶めているように思えるのだが、如何なるものであろうか？その中で、英語教育の目標といった大きなテーマを見失い、学生のみならず教官共々、まるで海図なき航海を強いられているかのように感じるのは筆者のみだろうか？

一個人の提言だけでは、こうした本質的な疑問に対しての回答あるいは明確な方向性を打ち出すには不十分であることも、承知しているつもりである。更には、教科全体として教育方法について統一見解を打ち出す必要があるのか、或いは必要ないのか、それすらも議論の余地を残しているのも事実である。が、高専における今後の英語教育をより有効なものとしていくためにも、英語科担当教官のみならず他の教官の意見も参考にする必要が十分あると思われる。本論文が、高専のみならず日本における英語教育の本質を巡る活発な議論の契機となることを大いに期待するものである。

2. 第二言語習得理論 (The Theories of Second Language Acquisition)

(1) 歴史的概説

第二言語習得理論が一つの研究分野として初めて確立されてきたのは、1960年代の終わり頃である。この頃、第二言語学習者についての初期の研究がいくつかが発表され、同時に第二言語習得に関する理論的な研究も進められた。

初期の第二言語習得理論の研究は、学習者言語の言語学的側面に焦点をあてた心理言語学的志向であったが、最近では、学習者言語の語用論的側面に注意を向けた社会心理学の分野にも進展しており、研究範囲はますます広がっている。更に、以前の単純な記述文法から、チョムスキー (Norm Chomsky) の

提唱した複雑な文法モデル (Universal Grammar) まで文法理論とも深く関わりをもち、応用言語学との関連も深まっている。もちろん、第二言語習得の普遍的な特徴のみならず、学習者の個人差も研究の対象となっている。現在に至るまで、様々な外国語教授法 (teaching method) が発案、試行され、そして評価されていった。中には成功を収めたものもあれば、一過性にすぎなかったものもあった。一つ一つの教授方法を比較検討すること自体が大変な労力を必要とする研究活動である。こうした第二言語習得理論の歴史的経緯については、Rod Ellis の *The Study of Second Language Acquisition* (1994. Oxford University Press) に詳しく叙述されている。高専における英語教育改善にあたっては、この第二言語習得理論に基づいて、授業実践の検証から始めるべきであろう。

(2) 基本的フレームワーク

ここでは、第二言語習得理論を分類および評価をするための基本的な枠組みと言うべき概念図を明らかにしておこう。それにより、第二言語習得理論と、一般的に使用される「教授方法」teaching method とを区別することが出来る。

図1は、第二言語習得理論における teaching method のフレームワークである。このフレームワークの中のキーワードを基に、数多くの教授方法が存在し、あるいは対立しているのだが、お互いの相関関係を明らかにし、長所短所を比較検討することは本論文の意図するところではない。キーワードを視点として、筆者の「実践英語」を分析評価することが、本論文の主旨である。

第二言語教授方法及び習得活動に関して基本的なフレームワークを提唱し、最初に包括的な捉え方をしたのは、アメリカの応用言語学者であるエドワー

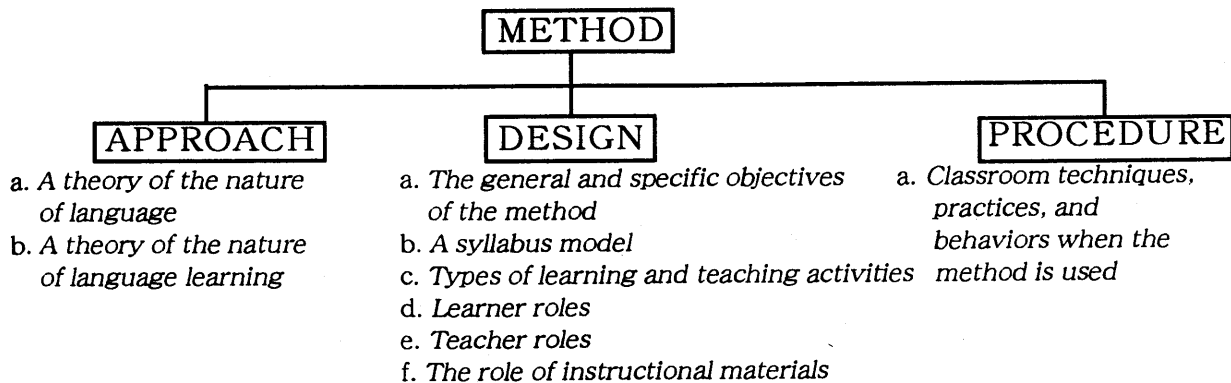


図1 第二言語教授方法についての基本的フレームワーク Summary of elements that constitute a method, (adapted from Richards & Rodgers, 1986)

ド・アンソニー (Anthony, E.M. 1963.) である。

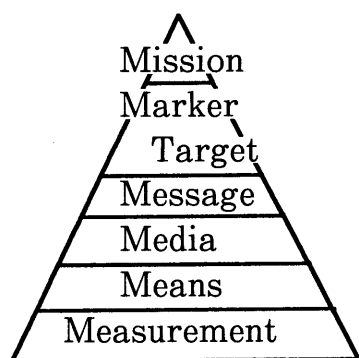
approach とは、言語及び言語学習に対して包括的な概念であり、自明 (axiomatic) である。同時に教授されるべき学習課題の本質にも言及するものである。Anthony によれば、approach とは、言語及び言語学習に関する仮説もしくは理論が、明記されるレベルであり、method は、言語理論が実践に移行されるレベルである。従って、教育内容、育成される言語技能、その方法論が明らかにされるべきである。ひとつの approach について、複数の method が考えられる。technique は、教室での授業展開がなされる際の技術にすぎない。

(Anthony, E.M. 1963. Approach, method and technique.)

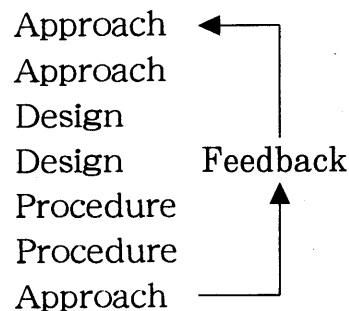
アンソニーの考え方を基に、リチャーズとロジャース (Richards, J. & Rodgers, T. 1986) は、第二言語教授方法の基本的フレームワーク及びその構成要素 (approach, design, procedure) について、次のように説明している (図 1 参照)。

method は approach と理論的に関与しており、design によって有機的に決定され、実践面において procedure によって現実化される。

A method is theoretically related to an



久留米高専の教育理念
久留米高専における外国語教育の理念
英語教育の目標
英語科から学生へ周知徹底
英語の授業実践
英語授業展開の創意工夫
英語教育の評価



ここで注意しなければならないのは、昨今、教育方法改善に関して授業方法の創意工夫などと声高に言われているが、英語の教授方法 teaching method を例にとっても、5 年間の一貫したカリキュラムの過程の中で、きちんと位置づけられるものであり、また同時に、第二言語習得理論や、認知心理学に基づく学習理論や応用言語学などの裏付けが必要とされる。況や、授業展開のテクニックの工夫といった小手先の対処療法をもってして教育方法改善などと標榜できるものでは決してない。

(2) シラバス

本校においても、ようやくシラバスの作成が行わ

approach, is organizationally determined by a design, and is practically realized in procedure. (Richards, J. & Rodgers, T. 1986.

Approaches and Methods in Language Teaching.)

3. APPROACH について

(1) アプローチとは

前節で明らかのように、アプローチは、語学教育にあたっての大前提となるもので、いわば教授者、学習者が「言語をどのように捉えるのか」という言語観を意味する。従って、本論文のテーマに沿えば、「実践英語」とは何か? 何をどのように教育すべきなのかという本質的な問題に対する回答となる。

「実践英語」の教育目標は、本校の教育理念との関連の中で考慮され設定されるべきであると、筆者は考える。ビジネスマーケティングの分野においてはごく当たり前となっている、目標実現のための 6 つの M のステップというアイデアを借りて、外国語習得という目標実現に至る過程と、第二言語習得理論における teaching method の基本的フレームワークを対比させるならば、次のように示される。

れているが、遅きに失した感がある。さらにシラバスの内容を見るに、本校の教育理念実現のために、各々の科目が有機的に組み合わせられて編成されているのか、或いは、年間計画を立案するにあたって、講義がデザインされているのか、各講義における教育目標は明確に示されているのか、その為の学習活動内容は学生に周知徹底されているのか、次から次へと疑問は尽きない。シラバス作成にあたり、単に採択した教科書の目次を書き写して、年間教育計画と称しているのではなからうか? アメリカやイギリスの大学や大学院のシラバス或いは、course description を読むにつけ、日本の教育現場におけ

るシラバスの在り方との差に感じざるを得ないのである。きちんとしたシラバスを作成する、即ち講義のデザインにあたっては、その教科に対する担当教官の価値観および教育理念が確立されるべきである。英語科担当教官であれば、英語という言語をどのように捉えているのか、更には、学習目標言語として、教育言語として、或いは研究対象言語として、出発点を明らかにする努力が必要ではなかろうか。シラバス作成にあたり、原点に立ち戻って教科内容を考えるのも、担当教官の学習者に対する責任であろうと思われる。

4. Approach to 「実践英語」

(1) What is 「実践英語」?

英語を学習することは、何であろうか? 英語は、教科書という閉鎖された狭い範囲の学習課題、或いは暗号解読のような文法演習問題、さらには英単語熟語の暗記力テスト(筆者は、この種にテストについては、ほとんど意味を見いだせない)の対象の一つにすぎないのであろうか? 今や、英語が世界の標準の言語であることは、議論の余地がない事実である。従って、学習者が触れるべき英語は、教科書の中の英語では不十分であること、更に教科書以外の英語に目を向けることにより、世界の標準言語としての英語を意識させ、国際的な感覚を発展させることが、実践英語の教育目標の一つであると信じる。よって、筆者の設定した「実践英語」の教育目標は、「教科書の中だけの英語ではなく、現実の社会で実際に使用されている英語に接することにより生きた英語を理解する。かつ英語を使って自らの意見を構築かつ発表できる技能の習得を目標とした英語教育である」(久留米高専紀要第13巻第2号、1998年3月)

(2) 久留米高専の「教育理念」と「実践英語」の教育目標

本校の教育理念と、筆者の考える「実践英語」の教育目標との関連に注目してみる。

本校の教育理念は、「自立の精神と創造性に富み、広い視野と豊かな心を兼ね備えた、社会に貢献できる技術者の育成」(1998年制定)である。この教育理念と関連付けて英語の教育目標を設定すべきである。教育理念検討委員会答申によれば、「広い視野」には国際性、「豊かな心」には環境に対して取り組む姿勢も含まれると解釈でき云々、と明言されている。

英語の教官が、国際化の最前線に立っているかの如く、海外の情報を全て掌握し、学習者への情報を

制限するなど、とても不可能である。現実には、学習者が、インターネットを利用し、情報入手のみならず情報発信も可能となっている時代である。こうした状況では、学習活動の全てを把握管理するという発想自体が旧態依然のものであり、抜本的な発想の転換をしなければ、効果的な英語教育改善は不可能である。

インターネットを利用すれば情報入手可能であるから、どのような分野であっても英語の情報であれば教育と言えるのかという疑問に対しては、筆者の「実践英語」では、年間のテーマとして「環境問題」を研究課題として与えることにより、学習面で大きな逸脱がないよう注意した。単に教科書から視線を外すだけではなく、インターネットを利用して英語の情報を収集整理し、環境問題についての研究を同時に実践することにより、「広い視野=国際性」、「豊かな心=環境問題への意識」を育むという、教育的効果を狙っている。このように、本校の「教育理念」と、筆者の「実践英語」の教育目標は一致しているのである。

以上、本校の教育理念と関連づけて「実践英語」のアプローチを検討してきたわけだが、次回からの論文は、「実践英語」の教育事例を design および procedure の視点から分析してみたい。

参 考 文 献

- Anthony, E.M. 1963. Approach, method and technique. *English Language Teaching*.
- Brown, H.D. 1991. *Breaking the Language Barrier, Creating Your Own Pathway to Success*. Intercultural Press
邦訳: H.D. ブラウン著、斎藤誠毅、新里眞男訳、「アメリカ風外国語学習法一言葉の壁を破る」, 研究社出版
- Brown, H.D. 1980. *Principles of Language Learning and Teaching*. New Jersey: Prentice Hall
- Ellis, R. 1994. *The Study of Second Language Acquisition*. Oxford: Oxford University Press
邦訳: R. エリス著、金子朝子訳、「第二言語習得序説—学習者言語の研究」, 研究社出版
- Ellis, R. 1997. *SLA Research and language Teaching*. Oxford: Oxford University Press
- Richards, J. & Rodgers, T. 1986. *Approaches and Methods in Language Teaching*. Cambridge: Cambridge University Press
- Scarcella, R.C. & Oxford, R.L. 1992. *The Tapestry of Language Learning: The Individual in the Communicative Classroom*. Heinle & Heinle / Thompson International
邦訳: R.C. スカーセラ? R.L. オックスフォード著、牧野高吉訳・監修/菅原永一ほか訳、「第2言語習得の理論と実践—タペストリー・アプローチ」, 松柏社

総合論文

真宗の葬送儀礼について

遠 藤 一

On Execution of a Funeral in Shin Buddhist Rites

Hajime ENDOH

前稿から

はじめにこの稿を起こすにあたってその意図したところは、確実に戦国期に成立したと考えられる本願寺教団の葬送儀礼について、その成立史的検討を試みるということである。私は以前に「死の作法」という観点から中世から戦国期にかけての真宗の葬送儀礼を検討したことがある。(拙著『戦国期真宗の歴史像』1991年 永田文昌堂に収録)

論文集としてまとめた以前の論文(本紀要での一般論文)・研究ノート(総合論文)として個別に発表してから10年前後が立ち、読み直してみるといくつか修正を迫られたり、新たに知りえた事実を付け加える必要性が生じ、稿を改める必要があると判断した。

そして、本稿では豊かな歴史的経緯を持って成立したと考えられる真宗の葬送儀礼成立にあたっての前史的考察を加える。

そもそも、私が真宗の葬送儀礼に興味を持ったのは、覚如の一代絵巻である『慕帰絵詞』に臨終仏と考えられる画像本尊が死の床についた覚如の枕元に掛けられている場面が描かれているのを知ったのがきっかけである。そして、戦国期の本願寺宗主の実如の葬送記である「実如上人闍維中陰記録」に、「代々の臨終仏」についての記述があり、名号本尊を尊重しているはずの本願寺でも臨終仏は「絵像」であることを興味深く思った。そして、民俗学から民俗不毛の宗旨との疎外される真宗が、葬送儀礼と墓制については意外にも豊かな史資料・習慣を持つことを知った。

もとより、戦前に神権的天皇制崇拜者として、外来宗教として日本の民俗と習合しないと過大評価された真宗は、神道習俗＝新国学を日本人の「たしなみ＝必要な習慣」として策定した柳田国男や折口信夫らに、神道を中心とする民俗は不毛とレッテルを

貼られたのである。しかしながら、日本人とは何かなどという視野狭窄の発想からくる日本文化論(それを民俗学＝新国学と勘違いする不幸な研究者の存在)などを無視して、意識されない行動の社会生活を民俗とみた場合、真宗は豊かな信仰世界を有しているの事実が存在するのである。

前稿への所感

この点に関して、私の何よりも興味を駆り立てたのは、1990年から5年間にわたり実施された絵系図研究会による滋賀県真宗仏光寺派の寺院文書調査の際に、蒲池勢至氏が行なった聞き取りを中心とした民俗調査報告である。

蒲池勢至氏「オソーブツ再考」(『仏教史学研究』38巻1号 1995年)によると、門徒の葬儀に貸し出される在家用とは考えられない大振りの「阿弥陀絵像」は、通称「オソーブツ」「ソーブツ」と呼ばれ、おそらく「葬仏」を意味する。そして、「葬仏」はもとよりは「惣仏」であって、地域によって差はあるもののかつて道場時代に本尊として使用され、寺院化する際に木仏に変わった際に門徒への貸出用に転用された、というのである。また、仏光寺派の墓制においても、湖東地域に特別には火葬の後に遺骨を収骨せずに廃棄し墓を作らない「無墓制」が数地域で確認できた。なかでも圧巻だったのは一部の地域では、土葬の「無墓」という墓制が存在し、遺骸を土葬したのち十数年たち俗名・法名・往生年月日を記した木の標が朽ち果てれば、その場所は別人が使用し故人は完全に土に帰って行くという葬送方法である。

おそらく、「惣仏」から「葬仏」へという蒲池勢至氏の推定は正しいものと考えているが、事実、道場から寺院へという形態を取らず、宗判と葬送を媒介として当初から寺院として立ち上がった博多・福岡の真宗寺院文書調査では「オソーブツ」や「無常仏」にお目にかかることはない。であるから、葬送儀礼

のありかたは、その地域の信仰生活の質を検討する有力な視点になる。

また、絵系図研究会では、地域の墓制を知るため墓地の見学も繰り返しおこなったが、土葬の墓地(埋葬)にたった時、日本にこんなに手厚い葬送儀礼を護持している地域があるのかと一同に感極まったことを昨日のこのように記憶している。考えてみれば、かつて井上光貞博士が、平安京に浄土教が広まった要因のひとつに「都市住民の孤独性」を強調したが、研究会の会員は皆「孤独な都市住民」であった。そして、遠方の農村寺院から嫁いできた「坊守」さんが、「自分が土葬の無墓に埋葬されることへの納得ができたのは何十年の間がたつたことであるが、先に往生した前住職・坊守・門徒の〈じいちゃん・ばあちゃん〉といった、大切な人々を埋葬した土地に、今は私も入りたいと考えようになりました」と語られるのが眩しかった。

その際、前稿を執筆したことが宗教史、特に信仰史という視点にたった際に的外れなものではないと確信した。ところが、私の論議の方法は、思わぬところに致命的ともいえる欠陥をもっていることを自覚することとなる。

それは、1989年に石川力山教授が『禅学研究』No.67(花園大学、禅文化研究所刊)に切紙を中心とした曹洞宗の葬送儀礼を検討した上で真宗葬送と禅の共通性を指摘されたことによる。私も、石川教授の論旨を検討した結果、真宗の葬送儀礼の下敷きは禅のそれであるという可能性の検討が必要である実感した。これは、本稿中において詳述するが、石川教授が駒沢大学仏教学部『論集』と『研究紀要』に1983年から連載し集成を試みた「中世曹洞宗切紙の分類試論」中の「追善・葬送供養」をみれば、いくつか真宗の葬送儀礼が禅を雛形とした考えざるをえない事実を発見した。

前稿への反省

では、私は、石川教授の論考の恵受を受けるまで、どのような事情で、同じく戦国期に全国展開した真宗と禅を比較するという単純な作業を怠ったのかを考えてみた。それは、ごく単純な思い込みで、『慕婦絵詞』と『存覚袖日記』をみると、覚如の葬送は浄土宗の僧侶によって執行されており、これが伝統的な浄土教の作法に従ったものであり、以後も先例とされたと早呑み込みしてしまったのである。少し詳細に、その事情を説明してみよう。

私が、早呑み込みした直接の原因は、存覚の系譜

を引くと考えられる京都市下京区常楽寺には、筆跡から子息慈観の書写にかかると判断できそうな『看病用心抄』が所蔵されおり写真版ではあるが確認したことにある。その根拠は、私がこの筆跡は当初は存覚の自筆ではあるまいかと考え、中世真宗古文書の権威である龍谷大学文学部平松令三教授にご覧にいたるところ、存覚と筆跡が酷似するが子息の木部慈観の筆ではなかろうかという鑑定をいただいた。平松教授は、私に常楽寺本『看病用心抄』の書体を、「これは宇冠の筆癖から、宇冠を一息に装飾せず書く書体から存覚ではなく慈観である」と、ご指導戴いた。

『看病用心抄』といえは、法然門下の良忠の作品であり、その源流は源信の『往生要集』に端を発する臨終儀礼を中心とした葬送儀礼集である。つまり、平安浄土教から続く伝統的な臨終儀礼をしめたものといえる。さらに、南北朝期の真宗の葬送儀礼が伝統的な浄土教のそれを規範とすると考えたのは、存覚が監修したと考えられる広島県沼隈町光照寺所蔵の「親鸞聖人伝絵」の往生の姿は、臨終仏の前で親鸞を上臥合掌させて描かせている。この事実から、1988年当時、龍谷大学学長であった千葉乗隆博士の監修された『真宗重宝聚英 No.10』の関連解説に『慕婦絵詞』に描かれた覚如の葬送儀礼についての寄稿を許され、その旨の論旨を展開した。

その際、ある程度の実証的根拠からして真宗の葬送儀礼は、浄土教の伝統を引くもの判断し、戦国期の葬送儀礼を検討する際もその点に深く検討することはなかった。そして、重要なことは、蓮如の時期に成立したと考えられる真宗の葬送儀礼が、初期真宗が継承した天台や浄土のそれを「雛形」にしなかったという点である。

前史検討の必要性

ところが、石川教授の「中世曹洞宗切紙の分類試論」中の「追善・葬送供養」中の「没後作僧」に関する項目を読むと、非法名授与者が死亡した場合に対する真宗の「お剃刀」(没後に真宗門徒としての帰敬式を行なう)がまさに禅宗に比較して簡略化されているとはいうものの相応する作法であると考ええるに至った。

例えば、具体的にすぎるが、1986年に浄土真宗本願寺派(編=法式調査委員会・勤式指導所)がの発行した『浄土真宗本願寺派 葬儀規範集』の示す、「納棺勤行」の規範でいえば、未帰敬式受者に「三帰依文」を唱え、御剃刀を施し「法名」を与え、棺

は七条袈裟で覆うという作法である。これは、未帰敬式受者を出家させるのが「葬送」であるという考え方であり、禅宗の「没後作僧」の発想とほぼ同じである。

実は、真宗の葬送が禅宗の「没後作僧」から来たのではないかと、つまり、禅の葬送が雛形になっていないかという推定は、1991年に出版した『戦国期真宗の歴史像』の時点で気がついてよかったのである。私は、証如が記した『天文日記』5年の条に存在する大坂寺内の住人が大病し臨終をむかえそうだから「御剃刀」を受けたいと申し出たところ、証如は御堂衆を向かわせたという記事を引用しているのである。

七袈裟で棺を覆うという作法でいえば、座棺であった時期は覆ったのか、棺の前後に置いたのか判然としないが1564（永禄7）年に実悟が記した「順興寺実従葬礼並中陰記」（自筆本・龍谷大学図書館蔵）に蓮如の葬送に際して始められたとある。また、蓮如の死に際して遺体礼拝が行なわれ、門徒の群集による混乱への配慮から茶毘の日が早められたという「空前聞書」も引用していた。宗主の遺体礼拝についていえば1904（明治37）年の明如の葬送まで、全ての宗主が行なったかは判明しないが継続されていた。石川教授の「禅の葬送」（『日本学』No.10 1987年）によれば、遺体を法衣に改め、下火（あこ）されるという中国で生まれた禅の「没後作僧」による葬送儀礼は、すでに鎌倉期に幕府得宗家の葬法として日本に伝来していることが『吾妻鏡』にみえるという。

では、どのような事情から在家者の葬送儀礼が「出家儀礼」＝「没後作僧」となっていったのであろうか。

義浄と無常経

禅宗と真宗の在家者の葬送儀礼が出家儀礼＝「没後作僧」になるに至ったにはそれなりの理由があった。伝統的な浄土教の葬送儀礼は、来迎思想に基づいた臨終儀礼が中心であり、没後の葬儀の執行は、葬地の選定の際の作法がすめば茶毘・拾骨までの過程は簡略であり、納骨後の追善が重要視される。

禅宗の場合の原因は中国での葬送儀礼のあり方の特殊性であると石川教授は指摘している。答えは頗る単純で、中国においては在家用の葬送の儀礼が行なわれなかったと言うのである。禅でいう「尊宿葬法」という出家者の葬送儀礼しかなく、そのために在家者を出家させる作法として葬送が執行されたの

である。だから、導師が亡者に授戒を行ない戒名がつき引導する「作僧」が在家者の葬儀の中心になったのである。

中国で在家者に対して、僧侶に死者に対して経典を読誦してもらうという形式の葬儀が行なわれるようになったのは、仏教が伝来してから相当に後の唐代後期のことである。701年に義浄が「無常経」という経典を翻訳し、以後、「無常経」による在家者の葬送儀礼が徐々にひろまったという。

岡部和雄教授の「『無常経』と『臨終方訣』」（平川彰博士古希記念『仏教思想の研究』1985年春秋社）によると、この「無常経」という経典は、インドにおいても僧侶の葬送時の読誦経典であり、部派仏教教団のなかで使用されていたという。

36行210字程度の『無常経』について、岡部教授も引用する平川彰博士は、『律蔵の研究』（春秋社）のなかで、部派仏教において、当初より、葬送用の読誦経典として編纂されたことは重大であると指摘している。

これは、石川教授の指摘にもあるように、無常を説くとはいうものの、釈尊の葬送や遺骨について冷淡だった仏弟子の態度（葬送と遺骨の分配は釈迦族を中心に行なわれたことが遺跡調査で確かめられている）からすれば、霊魂（アトマン）否定＝輪廻からの解脱を最終目標とする仏教の大きな変質を意味するものである。

ともかく義浄は、『開元録』によれば701年に翻訳した『無常経』を則天武後に奏上した。ここで私たちが注意しなければならないのは、日本は直接的に『無常経』の影響を受けなかったことである。これは、日本浄土教形成に大きな影響を与えた善導は、すでに世になく、従って、『無常経』は未見となり、日本浄土教の葬送儀礼は、『往生要集』を典型として臨終儀礼を中心に形成される。（このことについては別稿でのべる予定である。）

以後、中国では経典の思想内容でなく、葬儀には『無常経』を亡者の前で僧侶に読誦してもらうという習慣が定着していた。

『無常経』と『臨終方訣』

では、『無常経』の読誦を中心とする葬送儀礼は、どのように形成したのであろうか。義浄の『南海帰寄内法伝』では、部派の僧侶の葬儀の様子を記しているが、インドでの作法が持ち込まれたとは考えにくい。やはり、中国の社会習慣と習合することにより葬送儀礼に関しても中国版の作法が成立したので

ある。『臨終方訣』である。

私がテキストにした『大正新輯大蔵経』の『無常経』には、『臨終方訣』という文章がついている。具体的に臨終・葬送の作法が指示されている。

岡部教授によると、高麗版大蔵経・敦煌写経などにはみられず、宋・元・明版には、『臨終方訣』は、『無常経』に包摂されて収載されているという。高麗版や敦煌写経には『臨終方訣』はなく宋・元・明版には存在するということから、その年代は、10～12世紀の間と推定される。

『臨終方訣』が『無常経』に包摂されたということは、仏説として取り扱おうという中国仏教界の姿勢が知られて興味深い。当然、仏説に扱われたわけであるから、作者などが判明しにくいわけであるが、そこに本音が見え隠れするのであるから、次の機会では、この臨終方訣に示された死の作法が在家者の

葬送儀礼成立を説く鍵として検討の対象になる。

付 記

1997年8月、駒沢大学仏教学部石川力山教授は逝去された。真宗の宗門校の龍谷大学より国立の久留米高専に赴任した私を気遣い、関連する論文を発表すると、禅関係のものは手に入りにくだろうからと抜刷を恵与してくださり、改めて真宗の葬送儀礼を検討する機会を与えていただいた。石川教授に対し、怠惰な私は、前著以後に学恩をお返しできないでいたが、以前、教授と禅と真宗の葬送の関連について議論した際に、蓮如の末子で真宗の有職故実家である実悟が記した「順興寺実徒葬送並中陰記」（龍谷大学図書館蔵）の分析が重要になるので今後の課題としたいとお話した。本稿は、石川教授との果たせぬ約定を果たすための前史的考察として用意した。

総合論文

剣道人間形成論考(2)

— 技術的要素と「道徳的精神性および行動規範」について —

木 寺 英 史

What is Human Development in KENDO (2)
— The Relationship between 'Skills' and 'Mentality' —

Eishi KIDERA

はじめに

剣道人口の減少傾向がいわれるようになって久しいが、この課題が「人間形成」との関連として論じられることは希である。詳細な検討が必要ではあるが、現在の剣道人口の減少傾向は、社会全体が剣道の「人間形成」としての教育力に対して下した評価の表れであるとするのは乱暴であろうか。前稿¹⁾でも考察したが、この仮説は昭和40年代の剣道人口の増加傾向を検討することによって導き出されたものである。本仮説の根拠は大きく2点ある。1点目は、今回の剣道人口の減少傾向は昭和40年代に発現した増加傾向の終息であるということだ。よって、剣道人口の減少傾向の課題は、先の増加傾向を考察することによってより明らかになる。当時の増加傾向は青少年の剣道に対する自発的な欲求によるものではなく、親や大人が剣道の教育力に期待した結果であったと推測できる。よって今回の剣道人口の減少傾向はそれらの期待を裏切ったことへの代償といえるのではなかろうか。そして2点目は、剣道人口の増加傾向時期から減少傾向時期までおよそ20年を要しているということである。これは、剣道ブームの最中に青少年時代を送った世代が自分の子供に剣道を修得させることを拒否したといえるのではなかろうか。これらより、剣道人口の減少傾向の課題は、剣道の「人間形成」の課題として浮かびあがってくる。

そこで筆者は現代剣道における「人間形成」の課題の再検討を試みた。「人間形成」という用語は教育・教育学の分野で頻りに用いられている。しかし、それは明確な概念を有しているとは言い難い。特に、体育全般として「人間形成」が用いれる場合、その教授されるべき「媒体」²⁾は明確にされておらず、

それぞれの場面で様々なとらえ方がなされている。しかしながら、剣道の場合は多少その意味が狭められる。50年理念³⁾にも「剣道とは剣の理法の修練による人間形成の道である」と明記されているが、その内容については不明瞭のままである。ただ、「剣道修練の心構え」⁴⁾に「礼節」・「信義」・「誠」というような「武士道」的な徳目が示されている。さらに文部省は先の「格技」から「武道」への改称にあたり、「武道」は「人間形成」を担う特性を有しており、その特性とは「礼」に代表される「伝統的な行動の仕方」であるとしている。つまり、剣道での「人間形成」とは他のスポーツにはない日本的な考え方や行動様式を指しているといえる。これらを「道徳的精神性⁵⁾及び行動規範」というものとして論を進めたい。

さて、剣道における「人間形成」とは、「道徳的精神性及び行動規範」の獲得であるとするならば、それはいかなる方法によって修得が可能となるのであろうか。剣道とは身体運動である。よって、まず検討すべきはその身体運動（技術の修得や卓越の過程）と「道徳的精神性及び行動規範」との関連であろう。剣道技術の修得過程において「道徳的精神性及び行動規範」というような「人間形成」の課題が獲得されるのであろうか。そこで、本論文では、剣道の技術性と「人間形成」の課題を明確にする為に、現代剣道の技術的要素を取り出し、それらと「人間形成」との関わりを考察することをその目的とする。

1. 技術的要素の史的考察と「人間形成論」

現代剣道の技術的要素を取り出し検討を加える前に、剣道の技術的要素を検討する視点についてその史的考察を踏まえながら述べることにする。

現代剣道の技術を考察すれば、それは一般的なス

スポーツとは異なる特性を有していることが明確になる。筆者は数年来、剣道の技術をその「結果性」と「経過性」とに着目することにより、新しい剣道の技術論の構築を試み「芸術的結果技術論」として提唱してきた⁶⁾。

現代剣道の技術は競技としても成立している。しかし、その技術は競技技術とは全く異なる側面をも包含している。例えば、競技における技術の評価体系と稽古や審査における技術の評価体系に大きな相違があることは剣道の実践者の多くが認めるところである⁷⁾。それら異なる特性を有する技術が混在している技術こそ剣道の技術とするのが「芸術的結果技術論」である。これは、技術を相手を打突することを主目的とした「結果技術」と、いかに相手を打突するかという運動の経過を表現することを主目的とした「経過技術」とに区別する試みである。「芸術的結果技術論」は剣道の技術の史的変遷を考察することから導き出された。そこで、剣道についての技術の史的変遷を「人間形成」の内容をふまえて再検討してみたい。

剣道の技術の源は「結果性」を重視する技術であったはずである。その技術遂行の失敗は「死」を意味するものであり、剣道の技術が実用術として存在している時代は「相手を殺傷する」ことが第一の目的であったと考えてよい。よって、この時代の剣道の技術や教習体系に現在のような「人間形成」としての目的が含まれていたとは考えにくい。しかし、剣道史上、最も技術と「死」が関連していた時期であり、当時の剣道実践者がもつ「生死観」は後世のそれとは隔絶したものがあったと思われる。

実用術として発生した剣道も戦乱が収まるにつれて、「日本刀」の操法を修得すること自体にその意味を見いだすようになる。教習の体系が整備され、その技術は「型」⁸⁾として伝授されることとなった。そして、この時期に近世を代表する剣術書⁹⁾が残されている。これらの剣術書には技術的な要素にも言及しているものの、相手と立ち会った時の心のあり方（「求道的精神性」¹⁰⁾）への言及がその中心内容である。これらは、中世以来の宗教的・哲学的思想や近世の儒教思想の影響を受けている。江戸幕府成立後、幕藩体制が確立されるまでは約40年を要するが、著しい文教政策や他流試合の禁止によりさらに剣道はその実用術としての価値を失い、その技術は「結果技術」から「経過技術」へと移行する。即ち、技術の「型」化である。この時期の剣道は、一般的な史的考察からは、武士階級の軟弱化や実用術として

の価値の喪失から、剣道の衰退期ととらえられているが、「型」化の過程により「人間形成」としての価値を持ち得たとするならば、技術の「型」化と剣道の「人間形成」的課題や「精神性」との関連を詳細に検討することが必要ではなかろうか。

剣道の技術史上、最も大きな転換は「しない打ち剣道」の発現¹¹⁾であろう。それは現在の剣道と同様の「しない」と「防具」を用いた運動形態である。当時、「型」稽古から「しない打ち剣道」への稽古形態の移行は早急になされたのではなく、剣道実践者の意識や防具の工夫により徐々になされた。しかし、幕末には剣道の稽古形態の主流は完全に「しない打ち剣道」に移行した。「しない打ち剣道」の台頭と隆盛は「経過技術」が主流となった剣道の技術が再び「結果技術」を取り戻したことを意味する。「しない打ち剣道」での「結果技術」は言うまでもなく実用術としての「結果技術」ではなく、競技としての「結果技術」の原点となるものである。しかし、この時期の「結果技術」は現在のような競技としての「結果技術」として存在しうることはなかった。この根拠は、実体としての「日本刀」¹²⁾の存在にある。つまり、競技としての剣道の技術の原点がこの時期の「結果技術」であるとしても、それは常に実用術としての技術から遊離する事はできなかったのである。そして、「人間形成」の課題は、常に副次的な課題としてとらえられていたと言ってよい。

さて、明治維新は剣道の技術に何をもたらしたのであろうか¹³⁾。剣道の技術としては維新前後ではその相違はほとんど認知できないと言える。維新が剣道にその後影響を及ぼした事項は、実体としての「日本刀」と武士階級の消失である。これらは、その後の「人間形成」としての課題に多大な変容をもたらすこととなる。実体としての「日本刀」の消失は、剣道の技術が実用術としての価値を失うことである。よって、その技術は急速に競技としての技術の要素を強めることとなった。また、剣道の技術の目的が多様化し、その中から「人間形成」の課題も一次的目的として表出してくることとなった。

2. 現代剣道の技術的要素

さて、「芸術的結果技術論」を拠り所とし、剣道技術の史的変遷を「人間形成」の課題を踏まえながら考察したところで、現代剣道の技術的要素を整理したい。「芸術的結果技術論」は剣道の技術の「結果性」・「経過性」に着目するものである。しかし、本章では「人間形成」の課題を明確にするために現

代剣道の技術要素を「競技性」・「芸術性」・「求道性」・「実戦性」の4項目に再構築し、それぞれに「人間形成」としての課題を論述した。

(1) 競技性

現在の剣道は「競技」としても確立されており、「剣道競技」という表現も日常的に用いられている。よって、現代剣道の技術は競技技術としての特性を有するといつてよい。「競技」とは一般に競技会や大会に出場しそこでの試合に勝利を納めることを目的として実施されるスポーツの総称である。よって、そのスポーツが「競技」として確立するためには、広範囲においてルールが規定されていなければならない。そして、その技術は「合目的性」と「経済性」が要求される。現代剣道の技術は競技技術としても存在していると明言できる。よって、「人間形成」の観点からは他の競技スポーツと同様の身体的・精神的効果を得ることができるとするのが適当であろう。

(2) 芸術性

現代剣道の技術の中核が、すでに競技技術に移行していることは異論のないところであろうが、その技術には競技技術としては説明できない要素が含まれていることもまた事実である。「芸術的結果技術論」では剣道の競技技術を「結果技術」ととらえるが、現代剣道における芸術性とはその中に「経過技術」が内在していることである。剣道の「経過技術」とは「型」の運動形態を受け継いだものである。換言すれば現代剣道の技術は日本刀の操法を受け継いでいるのであり、競技性としての技術だけでなく、日本刀の操法を表現した芸術性が含まれているという認識が必要となる。更に、その芸術性には二つの側面があることを言及しておく必要がある。それは日本刀の操法の表現には、実戦における純然たる日本刀の操法と「型」に見られる洗練された操法が混在していることである。

(3) 求道性

先に、現代剣道の技術には「経過技術」が内在し、それは「型」という稽古形態から受け継がれてきたものであること、更にその技術の要素には二面性があることを述べた。実用術として存在した剣道の技術が、「型」化し「経過技術」の要素を増加させる過程で、その「経過技術」の目的が分化したと言えるのではないだろうか。実用術としての剣道の技術

が「型」化する過程の中で、当初は技術の「実戦性」の「型」化がなされたと考えられる。つまり、その運動の「経過性」で問題にされたのは実戦の中での「日本刀」の操法がいかに忠実に再現されているかであったはずである。最も合理的で経済的な、つまり理想的な「日本刀」の操法が表現された技術が「経過性」を持ち「型」化していった。しかし、「型」化した「経過技術」が実戦から離れる期間が長くなるに従い、「経過技術」の目的が「人間形成」的な要素を見出すことになったと考えられる。つまり、「型」の目的が剣の理法を体得するだけでなく、修行者の精神的向上をも含むものになったと考えられるのである。そして、「日本刀」の操法を体得することによって精神的向上がもたらされるとするのではなく、「型」化した「経過技術」の中に精神的向上、つまり「人間形成」を主目的とした技術が含まれてきたと考えられる。「しない打ち剣道」である現代剣道の技術にもこの求道的な「経過技術」とでもいふべき技術の要素が内在していると言えるのではないか。

(4) 実戦性

「実戦性」とは実用術として存在していた技術要素をさす。つまり、実戦に用いられた「日本刀」の技術である。これが「しない打ち剣道」である現代剣道の技術要素として取り上げることには賛否両論が存することと思われる。「芸術的結果技術論」では、現代剣道の技術に「実戦性」の要素は含まないとする立場をとる。しかし、これが「人間形成論」の課題として剣道の技術を考察すれば、多少の無理はあっても「実戦性」の技術をとりあげるべきである。それは、剣道と「生死」観の問題からである。現在でも剣道は他のスポーツに比して「人間形成」や「精神性」の獲得について、優れた特性を持つとする考え方がある。その根拠の一つが剣道の技術は「生死」をかけた技術であるという認識である。よって、剣道の技術の修得によって、より高い「精神性」の獲得が可能であるとされる。現在の剣道の技術に「実戦性」の技術の要素が実体としてどれほど含まれているのかという疑問は残るが、「人間形成」の課題として、技術要素に「実戦性」を取り上げることとした。

さて、現代剣道の技術要素を概観してきたのであるが、「人間形成論」での中心課題となる「道徳的精神性および行動規範」については、現代の技術要

素の考察からは導き出すことはできない。つまり、剣道の特性として取り上げられている「道徳的精神性及び行動規範」という教育的課題は、現在の剣道技術の修得からは獲得できないということである。言い換えれば、剣道技術そのものの修練の過程からは、期待される「人間形成」はなされないということが出来る。

む す び

最後に剣道における「人間形成」の課題と「道徳的精神性及び行動規範」について今後の研究課題を述べることにする。本稿で明らかにしたように、現在言われている剣道における「人間形成」とは、「礼儀」・「作法」に代表されるような剣道の技術とは直接関連しない内容をさしている。直接関連しないというのは、剣道そのものの修練の過程において、つまり剣道技術の修得過程からは獲得されない内容であるということである。それらは、剣道の技術の周辺に位置し、剣道の技術とは間接的には関連しているものの、剣道技術の習得以外の機会に修得すべき、または修得させるべき内容である。それらの源は何に存するのかを考察するときに、検討すべきは「武士道」である。「武士道」とは武士が生活や行動をする上での考え方や行動規範と言って差し支えないが、これらは当時の武士が剣道の修練によって身につけたものではなく、生誕以来の生活すべての場で養われたものである。つまり、「武士道」は剣道によって支えられていたのではなく、剣道が「武士道」の一要素であったとするのが自然である。

さて、前述したように、現代剣道の「人間形成」の課題、換言すればその教育的課題とはこの「道徳的精神性及び行動規範」を指していると言ってよい。しかし、これは剣道の技術性とは相即しない内容である。よって、これらの課題を明確にするためには特に近世の「武士道」とそれを取り巻く時代背景を検討することが必要不可欠であろう。また、「武士道」やその後の精神性及び行動規範を検討するにあたり、当時の文化が急速に「型」化したこととの関連としてもとらえる必要がある。近世は剣道の技術のみが「型」化したのではなく、日本文化の多くが「型」化している。禅の修行形態や仏教の儀式、また弓、馬などの他武術、さらには歌舞伎、能、茶、華道に至るまでがほとんど同時代に「型」化して行く。そのような日本文化の「型」化の過程に「武士道」や剣道の技術があるととらえれば、剣道における「人間形成」の課題は日本文化論の中心課題とも

なりうる。

注 釈

- 1) 拙稿「剣道人間形成論考(1)―現代剣道における人間形成論的課題―」, 1998(平10), 久留米工業高等専門学校紀要第14巻第1号
- 2) 体育において教授されるべき「媒体」は、「知識」・「技術」・「技能」・「技能の卓越」・「身体」・「体力」・「社会性」・「道徳性」等が考えられる。しかし、体育における「人間形成」とはこれらの要素の何を教授することによって達成されるのかという明確なものは示されていない。
- 3) 「50年理念」とは「全日本剣道連盟」が昭和50年(1975)に発表した「剣道の理念」を意味する(全日本剣道連盟通達―全剣連通達第56号)。
- 4) 「剣道修練の心構え」は上記「剣道の理念」と同時に発表された。
「剣道を正しく真剣に学び 心身を錬磨して旺盛なる気力を養い 剣道の特性を通じて礼節をととび 信義を重んじ 誠を尽くして 常に自己の修養につめ 以って 国家、社会を愛して 広く人類の平和、繁栄に 寄与せんとするものである」
- 5) 中林は剣道の精神性を系譜を大きく二つに分けている。「倫理・道徳的精神性」と「芸道的・求道的精神性」である。現代の剣道の「人間形成」としての特性は前者の流れである。しかし、「人間形成」の課題を個人レベル検討すれば「精神性」のみではなく、日常の行為や行動の規範、またはあるべき人間像を志向する。よって、本稿では「道徳的精神性及び行動規範」と表現することとした。
(中林信二「日本古武道における身体論」, 「理想」604号, 昭58)
- 6) 拙稿「現代剣道技術論序説―しない打ち剣道の技術的特性について―」, 1994(平6), 久留米工業高等専門学校紀要, 第9巻第2号(「剣道日本」スキージャーナル社, 1998, 7月号掲載)
拙稿「現代剣道の技術特性(1)―歴史的技術特性区分の試み―」, 1996(平8), 久留米工業高等専門学校紀要, 第12巻第1号
拙稿「現代剣道の技術特性(2)―芸術的結果技術論の構築―」, 1997(平9), 久留米工業高等専門学校紀要, 第12巻第2号
- 7) 現在では剣道における技術の二極化が進みつつある。つまり「結果技術」を重視する競技の技術と「経過技術」を重視する稽古や審査の技術に対する評価の体系が二分している。
- 8) 「かた」についての用語は、「型」または「形」が用いられる。一般に古流の「かた」という場合は「型」を、それらが形態として演じられた場合は「形」を用いるようである。しかし、これらの用い方は明確にはされていない。筆者は「型」を用いることとしている。
- 9) 当時の代表的な剣術書には、五輪書(宮本武蔵)・不動智神妙録(沢庵)・兵法家伝書(柳生但馬守宗)がある。
- 10) 5)の中林の「精神性」の系譜によれば、相手と立ち会った時の心気を表れ方をさす。よって、技の鍛練や技術を直接関連してくる「精神性」である。
- 11) 「しない打ち剣道」の発現については、江戸中期(正徳年間)に、直心影流の長沼四郎左衛門国郷が防具を発案し「しない」を用いての稽古をはじめ、さらに宝暦年間―一刀流、中西忠蔵がさらに防具を改善したと伝えられる。
- 12) 筆者は剣道における「日本刀」のとらえかたを二つに大別している。それは「実体としての日本刀」と「観念としての日本刀」である。これらを大別することにより剣道の

主に技術的課題の解明が容易になる。

13) 別稿により詳細に考察した。

拙稿「近代における剣道理念の多様化—脱刀令・廃刀令

が剣道に与えた影響について—」, 1997 (平 9), 久留米工業高等専門学校紀要, 第13巻第1号



教育研究報告

表計算ソフト「エクセル」を用いて差分方程式を解く

杉 森 欣 三

Solving the Difference Equations with the Aid of Computer program, "EXCEL"

Kinzo SUGIMORI

In this paper, a simple method is mentioned for solving the difference equations with the aid of computer program, "EXCEL". This numerical calculation method described here will be one of the useful tools for educating or training course of personal computer.

1. はじめに

筆者の担当する電気系の講義について例を挙げれば、電磁気学などがその典型であるが、それにとどまらず例えば流体力学、弾性論、熱伝導論など理工学系のいろいろな分野での基本的な物理法則は偏微分方程式で記述されることがきわめて多い。

しかしながら、それらの偏微分方程式に対して、どんな場合でも数学的な解析解が得られるわけでは必ずしもなく、むしろ現実的には解が得られない場合のほうが多い。一方、技術計算やエンジニアリングの分野では、解析解が得られなくても解かねばならず、ここに数値解法に期待するところが大きくなってくる。特に最近のコンピュータの発展普及によって、設計の現場においてはコンピュータを用いた数値計算による設計手法が一般的である。

電磁気学では、空間の任意の点 (x, y, z) における電位 $V(x, y, z)$ はラプラス (Laplace) の方程式、またはポワソン (Poisson) の方程式を満足する。この数値解法としては差分法、有限要素法、電荷重畳法などがよく知られており、実際にこれらの解法でコンピュータによる電子銃の電子軌道シミュレーションやマイクロ波素子の設計解析などがよく行われている¹⁾。

特に差分法では初学者には一見、扱いにくそうな2次あるいはさらに高次の偏微分方程式が簡単な、なじみのある1次の式に近似変換されるため、学生にとっても理解しやすいようである。筆者の講義においても差分法でラプラスの方程式を解いて電位分布を求める演習を課したところ、学生の理解度、反応もよく、差分法のみならず本来のラプラスの方

式に対する理解度も高まる好結果を得た。

いわゆるパソコンのプログラム・ソフトに表計算ソフトという分野があり、マイクロソフト社のエクセル (EXCEL) などはその代表的なものである。

ところで、このエクセルが差分化した方程式を解くのにまさにうってつけのツールであることが、前述の学生演習の準備の際に、試行してみてわかった。結果的にはごく当然のことだったので、このことは当初周知のことと置いていたが、いろいろ調べてみると案外知られていないようなので、あえて本稿で紹介した次第である。

学生のパソコン実習教育の一助として活用できれば幸いである。さらに最近のパソコンの大容量化、高速化はめざましく、一昔前の大型電算機をものぐほどのなので、表計算ソフトで差分法による数値解を求めるこの方法が十分実用的手段にもなりうると期待している。

2. ラプラス方程式の境界値問題

簡単のため2次元直交座標系を考える。平面上の点 (x, y) の電位 $V(x, y)$ は、式(1)に示すラプラスの方程式をある領域内で満たし、かつ領域を囲む境界上で指定された $V(x, y)$ (境界条件) を満足するように決定される。

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} = 0 \quad (1)$$

これを満たす解 $V(x, y)$ を求めるのがいわゆるラプラス方程式の境界値問題といわれるものである。

いま図1に示すように、X-Y平面上の領域を一片が h の十分小さい格子 (mesh) で分割する。次に同図中の任意の格子点の電位を V_0 とし、これを囲む上下左右4つの格子点の電位をそれぞれ V_1 ,

V_2, V_3, V_4 とすると、偏導関数 $\partial^2V/\partial x^2, \partial^2V/\partial y^2$ はそれぞれ式(2)のように「差分近似」される²⁾。

$$\frac{\partial^2V}{\partial x^2} = \frac{\frac{V_1 - V_0}{h} - \frac{V_0 - V_2}{h}}{h}$$

$$\frac{\partial^2V}{\partial y^2} = \frac{\frac{V_3 - V_0}{h} - \frac{V_0 - V_4}{h}}{h} \quad (2)$$

式(2)を式(1)に代入すればラプラスの方程式は結局、式(3)のような近似差分式に置き換えられる。

$$V_0 = \frac{V_1 + V_2 + V_3 + V_4}{4} \quad (3)$$

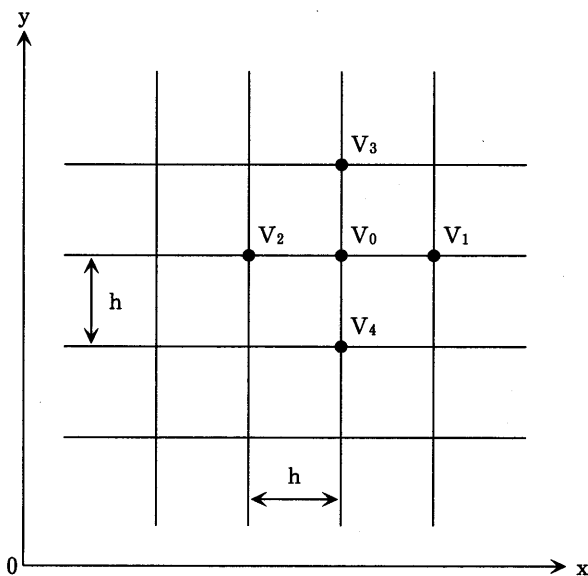


図1 差分法による格子分割と近似

各格子点を X 方向に $I=1, 2, 3, \dots, M$, Y 方向に $J=1, 2, 3, \dots, N$ と番号を付ければ、図1の X-Y 平面は図2に示すような I-J 平面に変換され、式(3)は式(4)のように書き換えられる。

$$V_{ij} = \frac{V_{i+1j} + V_{i-1j} + V_{ij+1} + V_{ij-1}}{4} \quad (4)$$

また境界条件は境界上の格子点 (I, J) と、その電位 $V(I, J)$ を規定することで与えられる。

3. 実際の応用例

簡単な例で、実際にラプラスの方程式を差分法により解いて電位分布を求めてみよう。

図3は本校電気工学科4年の「高電圧工学」講義で実施した演習問題の一つである。正方形の電極にそれぞれ電位が与えられているとき、その領域内の電位分布を求める問題である。筆算または電卓で計算できるように、格子点は $5 \times 5 = 25$ 点と少なくしてある。このうち $3 \times 3 = 9$ 点が領域内の点であり (図中黒点), 残り16点が境界上の点である。ただし外角の4点は計算には使用しないので、境界点としては12点になる (図中白点)。これを前節の式(4)に適用すれば、問題は9元連立1次方程式に帰着する。

連立1次方程式の解法は種々あるが、ここではコンピュータでしばしば多用される「逐次緩和法 (successive relaxation method)」で解く。その方法と手順を以下に述べる。

(1)まず初期値として、求めたい9点の格子点の電

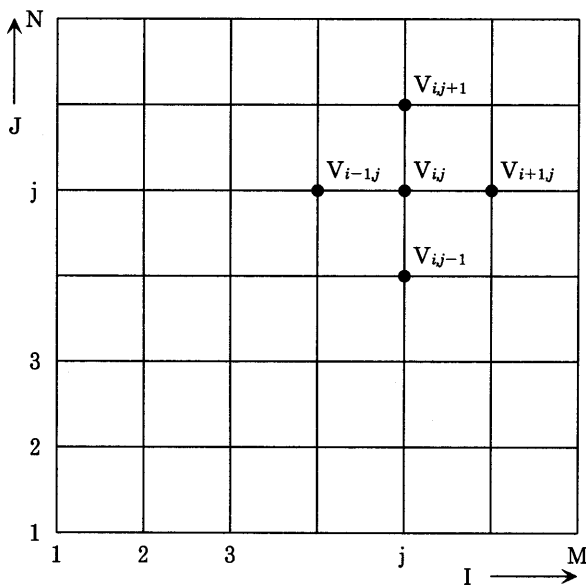


図2 格子分割による I-J 平面

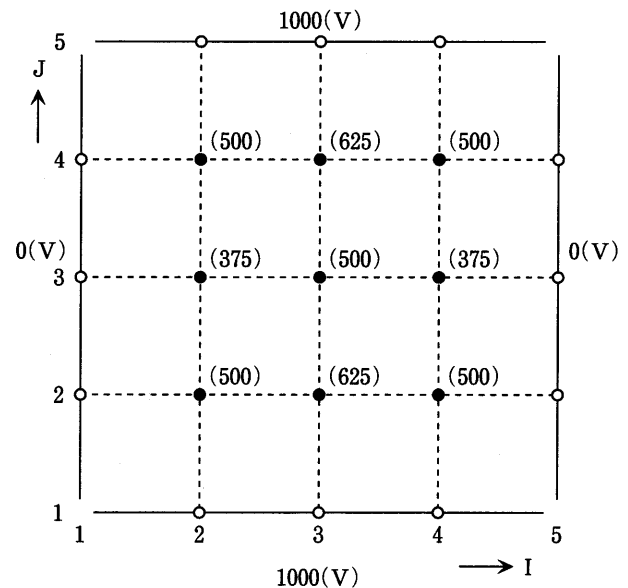


図3 正方形の電極に囲まれた電位空間

位 $V(I, J)$ を $V(I, J) = 0$ ($I = 2, 3, 4; J = 2, 3, 4$) とおく。

- (2) 左上角の格子点 ($I = 2, J = 4$) の電位 $V(2, 4)$ を、これを囲む4つの格子点の電位から、式(4)により計算する。
- (3) 次にとなりの格子点の電位 $V(3, 4)$ を同様にして求める。その際 $V(2, 4)$ は項(2)で求めた値を用いる。
- (4) 以下、同様にして $V(4, 2)$ まで計9点の格子点の電位 $V(I, J)$ を求める。
- (5) 初期値の代わりに、項(4)までで求めた値を用いて、再び項(2)から項(4)までの過程をくり返して、所望の誤差に収束するまで反復計算する。

以上が逐次緩和法といわれる方法であるが、初期値としては、 $0(V)$ よりも電極の配置その他からあらかじめ解を予測して、設定するほうが収束は早い。また格子点の走査は必ずしも、上述の順序である必要はなく、特に制約はない。上の演習では10回以下の反復で数ボルトの誤差内に収束した。前掲の図3にカッコで示した数値がその解である。

4. エクセルを使って解く

前節の演習では手計算で、できるように格子点数を少なくしているが、実際の設計デザインへの応用ではしばしば膨大な格子点数を要し、当然ながらコンピュータに頼らざるを得ない。また上の説明で既に明らかのように元来、逐次緩和法はコンピュータ向きの計算方法である。

パソコン用ソフトに表計算ソフトというものがあるが、マイクロソフト社のエクセル (EXCEL) などはその代表的なもので利用も多い。升目 (セル) が縦横に表になって並んでいる画面上で、いろいろな処理をするソフトである。

そこで、このセルがちょうど差分法で用いる格子点に相当することにふと思ひ至り、実際にエクセルの画面上で差分法で上記の演習問題を解くことを試みた。その結果、エクセルがまさに差分法を解くために開発されたのではないかと思う位なじみがよく、簡単な操作で解が得られた。

電極配置および電極電位は前掲の図3と同じであるが、格子点を $11 \times 11 = 121$ 点に増やして、やや細分化した。このうち $9 \times 9 = 81$ 点が領域内点であり、外角4点を除く36点が境界点である。

以下、エクセルによる解法の操作手順とその結果を説明する。

- (1) エクセル表をパソコン画面上に開く。
- (2) 境界点に対応する36のセルに指定の電極電位を入力する。(次に境界セルに囲まれた81の領域内セルに初期値を入力しなければならないが、エクセルを開いた時に既に全てのセルにゼロがセットされているので、改めて入力する必要はない)。
- (3) まず、領域内の左上角のセルに式(4)を入力する。例えばセル番地が (B3) なら、

$$=(C3+A3+B2+B4)/4$$
 となる。

式(4)を入力後 “Enter” キーを押すと、セル (B3) は計算結果の数字に変わる。

- (4) 次に残り80個のセルに、それぞれの番地に相当する式(4)を入力しなければならないが、これを次の手順で行う。まずセル (B3) をB列に沿って上から下へ「ドラッグ」する。その際、通常の設定では次の警告が表示されて、計算は実行されない筈である。

・「この数式を計算できません。数式の参照は…」

- (5) これを「キャンセル」して元の画面に戻して次の操作設定を行う。

・「ツール・バー」をクリックして開く。

・「オプション」をクリックする。

・「計算方法」をクリックする。

・「反復計算」をクリック (チェック印) し、さらに「最大反復回数」を設定する (例えば100)。最後に「変化の最大量」を設定 (例えば0.1) して、元の表画面に戻る。

- (6) 再びセル (B3) からまずB列をドラッグし、順次C列、D列とドラッグしていく (自動的に各セルに相当するように、式(4)が変形されて入力される)。

ドラッグすると同時にセルに数字がづぎづぎ表示され、すべてのセルをドラッグし終わると計算終了である。

以上の手順で計算した結果が表1および図4である。表1はエクセル表のプリントアウトであり、図4はこれを処理して、等電位線を3次元表示したものである。ちょうど馬の鞍のような形になっていることがわかる。

表 1 エクセルによる計算結果 (その 1)

| ラプラス方程式の境界値問題の数値解 (エクセルを用いて差分法で解く) | | | | | | | | | | |
|------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 |
| 0 | 500 | 696 | 783 | 823 | 835 | 823 | 783 | 696 | 500 | 0 |
| 0 | 304 | 500 | 614 | 674 | 692 | 674 | 614 | 500 | 304 | 0 |
| 0 | 217 | 386 | 500 | 565 | 586 | 565 | 500 | 386 | 217 | 0 |
| 0 | 178 | 327 | 436 | 501 | 522 | 501 | 436 | 327 | 178 | 0 |
| 0 | 166 | 309 | 415 | 480 | 501 | 480 | 415 | 309 | 166 | 0 |
| 0 | 178 | 327 | 436 | 501 | 522 | 501 | 436 | 327 | 178 | 0 |
| 0 | 217 | 386 | 500 | 565 | 586 | 565 | 500 | 386 | 217 | 0 |
| 0 | 304 | 500 | 614 | 674 | 692 | 674 | 614 | 500 | 304 | 0 |
| 0 | 500 | 696 | 783 | 823 | 835 | 823 | 783 | 696 | 500 | 0 |
| | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 |

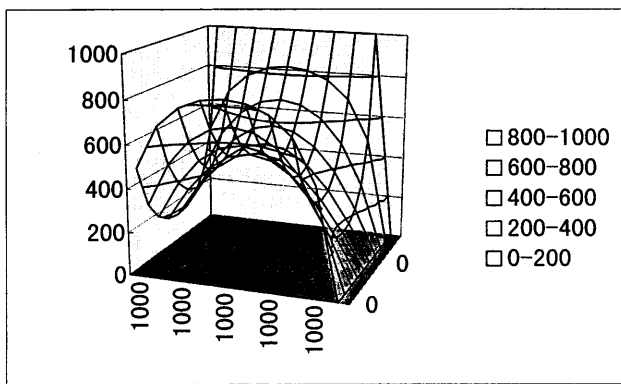


図 4 エクセルによる計算結果 (その 2)

5. あとがき

以上、表計算ソフト「エクセル」を使って、ラプラス方程式の境界値問題を差分法で解く方法を紹介した。結果的にはエクセルの機能からいって、まことに当然な結果で、当初わざわざ公にすべきかどうか、ためらいがあった。しかし、その後いろいろ調べてみたところ筆者の調査範囲内ではあるが、案外

知られていないことがわかって、ここに公表した次第である。

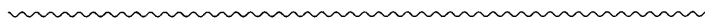
学生のパソコン実習教育の一助に、また研究などの実務上の一助になれば、望外の喜びである。

パソコン操作の説明に関しては内心じくじたるものがある。パソコン精通者にはまわりくどく、逆にパソコンに不慣れな読者からは説明不足のそしりを免れない。改めてこの種の説明の難しさを痛感した次第である。

なお、この計算方法を実用に供するには計算速度を改善する「逐次加速緩和法 (SOR)」や境界点の取り方など注意すべき点も多いが、ここでは本稿の趣旨を越えると考え、言及しなかった。

参 考 文 献

- 1) 日本学術振興会第132委員会編：「電子・イオンビームハンドブック第3版」pp.351-388, 日刊工業新聞社, 1998.
- 2) 例えば, 森口：「数値計算工学」pp.210-215, 岩波書店, 1989.



教育研究報告

教育用電子計算機システムの構築と運用

| | | | |
|---|---|---|---|
| 小 | 田 | 幹 | 雄 |
| 馬 | 場 | 隆 | 男 |
| 栗 | 原 | 龍 | 子 |
| 江 | 頭 | 成 | 人 |
| 松 | 本 | 健 | 一 |
| 大 | 淵 | | 豊 |

Design and Operation of a Computer System for Education

| | |
|---------|-----------|
| Mikio | ODA |
| Takao | BABA |
| Tatsuko | KURIHARA |
| Naruto | EGASHIRA |
| Kenichi | MATSUMOTO |
| Yutaka | OBUCHI |

Computer center at our college comprises computer exercise rooms for information processing classes and students take the classes using terminals of the computer system. The computer system, which consists of terminals, servers, printers and network apparatus, has been renewed every several years and the time of renewal has come at the end of the 1997 fiscal year. From the first half of the fiscal year the work towards renewal has been carried out, and a new computer system was delivered at the end of the year. This system includes the latest PC, network and multimedia technology and would be expected to be used for extensive purposes besides information processing classes. This paper describes the design and operation of the new computer system. In particular, request matters on the system from both an educational aspect and an administrative aspect are summarized and the compositions and features of the computer system to be satisfied with the requests are described.

1. はじめに

本校の設備の一つである電子計算機室は、電子計算機を用いた一斉授業に利用できる演習室を保有しており、全学科に情報処理教育の機会を提供している。これまで、演習室の電子計算機システムは、情報化社会の進歩を反映したシステムを5年ごとの更新時に導入してきたが、1997年度末にその時期を迎え、1997年夏より本作業にとりかかった。仕様策定委員会において電子計算機システムの仕様が策定され、入札、技術審査を経て、1997年度末に仕様に合致した電子計算機システムが納入された。

前電子計算機システムが導入されてからのこの5年間は、とくに計算機技術とネットワーク技術の進歩により、情報化社会は目覚しく進歩している。とくに、パーソナルコンピュータやワークステーショ

ンをベースとした技術、インターネットプロトコルをベースとした技術は著しく進歩した。その恩恵を享受し、さらにそのような社会に本校の学生が適合するためにも、それらの技術を含んだ電子計算機システムの構築が望ましい。また、これらの技術の進歩により、プログラミング言語教育やコンピュータリテラシ教育に限らず、他の教育分野への計算機利用の可能性も広がってきている。

このように、最新技術の導入と電子計算機システムを教育に最大限に利用することを目的とし、今回の電子計算機システムが構築された。本稿では、導入された電子計算機システムの構築と運用についてまとめ、まず、電子計算機システムへの要求事項を教育及び管理の立場から述べ、つぎに、導入された電子計算機システムの構成内容とその特徴、運用法について述べる。

2. 電子計算機システムの教育利用

2.1 前電子計算機システムの概要

以下に、前電子計算機システムの概要を簡単に述べる。前電子計算機システムは、EPSON386Pを端末機とし、OS (Operating System) としてMS-DOS 3.3及びWindows 3.0を実装していた。アプリケーションソフトウェアとして、日本語ワードプロセッサ、表計算ツール、プログラミングツール等を搭載しており、主にMS-DOSベースで使用されていた。また、プリンタとしてドットインパクト方式のラインプリンタが利用されていた。各端末機は、UNIXワークステーションにより管理されており、通常、ログイン認証を経て使用可能となる。UNIXワークステーションは、その他ローカルな電子メールサービス、電子伝言板等を提供していたが、利用率はあまり高くなかった。

基本的な構造化プログラミング教育やアルゴリズム教育には、搭載されているプログラミングツールで現在でも十分であると思われる。しかし、コンピュータリテラシ教育の場合、最近のリテラシ教育で扱われているOSあるいはアプリケーションソフトウェアが端末機に搭載できず、この点ではもはや不十分なシステムであろう。また、近年評価の高い有用なアプリケーションソフトウェアも搭載できない場合が多い。システム管理の点から見ると、端末機のシステムファイルの保護がされておらず、システムファイルの不正削除やシステム領域へのファイルの不正保存といったことが容易に行われ、安定した運用が保証されていなかった。

2.2 電子計算機システムへの要求

—教育の立場から—

まず、電子計算機システムを構築する上で重要な点の一つは、どのようなアプリケーションソフトウェアが搭載可能か、そしてどのようなアプリケーションソフトウェアを搭載するかである。また、他の重要な点はシステム管理が容易かどうかである。仕様策定の段階で、授業を担当される先生方の希望されるアプリケーションソフトウェアが調査された。以下に、電子計算機システムを利用する教育を大まかに3つに分類し、それぞれの教育分野において電子計算機システムに要求される事項をまとめる。

2.2.1 コンピュータリテラシ教育

現在のコンピュータリテラシ教育では、主にオペレーティングシステム (OS) の使用法、ワードプロセッサや表計算ソフトウェアなどのビジネスアプリケーションソフトウェアの使用法、さらに電子メー

ルの送受信やWWW (World Wide Web) へのアクセス法などを取り扱う。したがって、電子計算機システムには、現在主流の機能を備えたOS及び広く利用されているアプリケーションソフトウェアの実装が好ましい。端末機に実装するOSとしてUNIX, Windows, Mac OSの中でどのOSを選択するかという問題に対しては、リテラシ教育の容易さやアプリケーションソフトウェアの選択の幅を鑑みWindows NTが選択された。UNIX環境については、Windows上のターミナルソフトウェアを用いてUNIX機にログインする方法によりUNIX環境を提供する形態が選択された。

2.2.2 コンピュータプログラミング教育

コンピュータプログラミング言語にはいくつかの種類があるが、搭載希望調査により、C/C++, Visual Basicに絞られた。前電子計算機システムに搭載されていたアプリケーションソフトウェアの継続搭載の希望が大きかったが、当時Windows NTへ対応した製品がなく、市場で実績のあるソフトウェアの購入が決定された。

2.2.3 電子計算機を用いた教育支援

近年のアプリケーションソフトウェアの充実とインターネットによる電子計算機通信の発達により、これまで電子計算機を用いなかった教科に対して電子計算機の利用可能性が広がっている。搭載希望調査において、数式処理用ソフトウェアMathematica、図面作成ソフトウェアAuto CAD及び翻訳ソフトウェアE-J Bank, J-E Bankの搭載希望があり、これらの搭載が決定された。Mathematicaは、数学、物理の授業において学生の理解を深めるために非常に有用なツールであると思われる。Auto CADは、本電子計算機システムの活用の機会を増やすものである。また、電子メールやWWWなどの手段を利用した授業法も考え出されている。

2.3 電子計算機システムへの要求

—システム管理の立場から—

システム管理の立場からの重要な視点は、まず第一にシステム保護と安定した運用に向けられる。この点で、計算機のハードディスク上のシステムファイルやアプリケーションファイルの保護をどのようにするかが問題となり、一般利用者に対して、ハードディスク上のシステム領域へのファイルの書き込み、上書き、削除行為を制限する必要がある。この機能を提供しているOSとして、現状ではUNIX及びWindows NTがあるが、上述の理由よりWindows NTが選択された。

3. 電子計算機システムの構成

3.1 システム構成の概要

図 1 に示されるように、導入された電子計算機システムは、端末機 50 台、ユーザ管理機を含む 8 台のサーバ及び 6 台のプリンタを有する計算機システムである。各計算機は 100Mbps Ethernet のインターフェースを有し、クラス C のプライベートアドレスを用いた TCP/IP (Transmission Control Protocol / Internet Protocol) 及び NetBEUI をプロトコルとした高速 LAN (Local Area Network) を形成する。プリンタのインターフェースは、10Mbps Ethernet である。ネットワークの具体的な構成は後述することとし、ここでは示されていない。表 1 に各計算機の数量、型名、実装 OS 及びプリンタの数量、型名を示す。このシステムでは、端末機としてパーソナルコンピュータが用いられ、その OS として Windows NT Workstation が実装されている。各種サーバ機は、端末機のログイン認証、印刷処理、電子メールの送受信、UNIX 環境等を提供し、端末機とサーバ/クライアントモデルを形成している。サーバ/クライアントの関係は、大概して Windows NT 環境における関係と UNIX 環境における関係に分類でき、以下に詳細に示す。

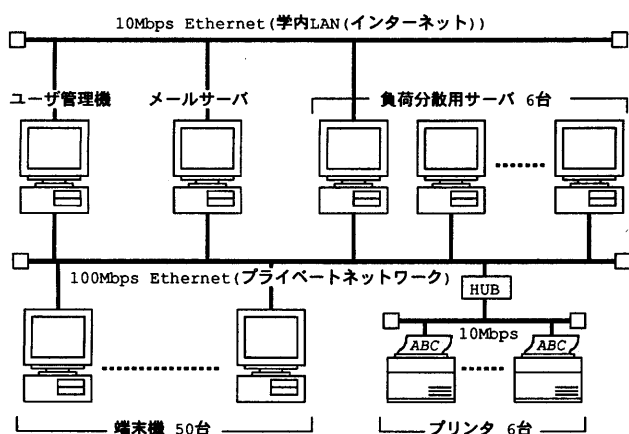


図 1 電子計算機システムの構成

3.2 Windows NT 環境によるサーバ/クライアントシステム

Windows NT 環境におけるサーバは、1 台のユーザ管理機である。OS として Windows NT 4.0 Server が実装されており、図 2 に示されるように、端末機に対して以下の Windows NT 独自のサービスを提供する。

3.2.1 ユーザ認証

ユーザ認証は、利用者の端末機に対するログインを制御するものであり、ユーザ管理機は、利用者より端末機に投入されたユーザ名及びパスワードを受信し、自身のデータベースを参照することにより不正使用の有無を判定する。ユーザ名、パスワードの組が一致した場合、端末機にログイン許可を通知し、要求者の利用が可能となる。このシステムを導入することにより、まず、端末機の利用者を特定することができ、システム内で発生したイベントがどの利用者によるものかがわかり、管理が容易になる。また、ユーザ名及びパスワードをユーザ管理機 1 台のデータベースで集中管理しているため、ユーザ名の削除、登録が容易になるという利点がある。

3.2.2 ユーザプロファイル転送

ユーザプロファイルは、デスクトップ環境を含む利用者の作業環境を保存したファイルである。上述のユーザ認証において、ユーザ管理機が端末機へログイン許可を通知するとともに、その利用者のプロファイルを転送する。これにより、利用者は、任意の端末機上に自身の作業環境を展開ことができ、端末機を選ぶ必要はない。利用者に変更した作業環境の内容は、ログアウト時にユーザ管理機に転送され更新される。

3.2.3 ホームディレクトリのマウント

ユーザ管理機のハードディスク領域の一部を作業領域として利用者に提供する。4G バイトの領域を使用しており、学生 1 人当たり平均 4M バイト程度の使用が可能である。この領域には、利用者ごとに独

表 1 構成要素一覧 (計算機及びプリンタ)

| 計算機の種別 | 数量 | 型名 | 実装 OS |
|----------|----|-----------------------------|----------------------------|
| ユーザ管理機 | 1 | Fujitsu GRANPOWER5000モデル270 | Windows NT 4.0 Server |
| メールサーバ | 1 | Fujitsu S-7/300U モデル170E | Solaris 2.6 |
| 負荷分散用サーバ | 6 | Fujitsu FMV-6233D9 | FreeBSD2.2.5R |
| 端末機 | 50 | Fujitsu FMV-6266T7 | Windows NT 4.0 Workstation |
| プリンタ | 5 | Richo PC LASER NX500 | - |
| プリンタ | 1 | HP Laser Jet5SiNX | - |

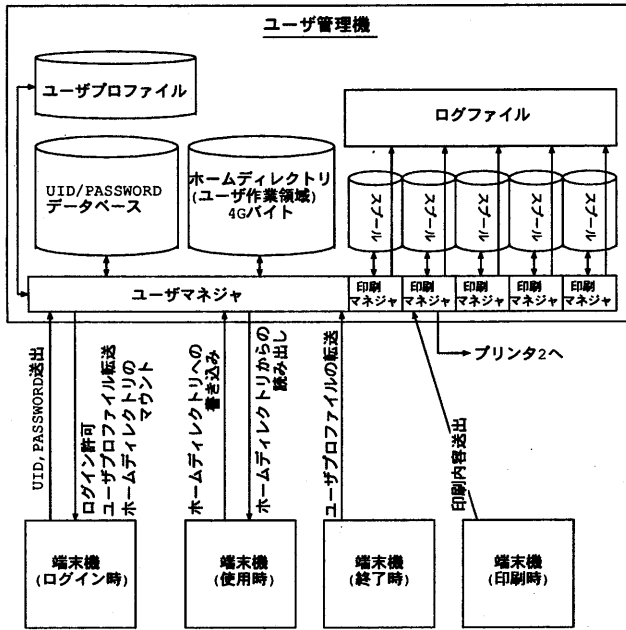


図 2 Windows NT 環境におけるサーバ/クライアントシステム

立のディレクトリが作成されており、他人からの不正アクセスは抑止されている。

3.2.4 印刷処理

ユーザ管理機は、端末機より印刷データを受け取り、その後の処理を代行する。これにより、端末機の負荷が低減される。また、ユーザ管理機では、印刷ジョブの履歴が保存されており、どの利用者がどれくらいの量の印刷をしたかということが把握できる。

3.3 UNIX 環境によるサーバ/クライアントシステム

図 3 に示されるように、UNIX サーバは、メールサーバ 1 台及び負荷分散用サーバ 6 台から構成される。メールサーバは、OS として Solaris 2.6 を実装しており、電子メールの送受信と UNIX 環境を提供するサーバである。電子メールのプールとして 1G バイトを有する。6 台の負荷分散サーバは NFS (Network File System) と NIS (Network Information System) によりネットワークを介してメールサーバのファイルシステム及びユーザ情報を共有している。負荷分散用サーバの役割は、メールサーバへの負荷を分散することと、1 台のサーバについては、電子計算機システムと学内 LAN とのファイアウォール、プライベートアドレス・グローバルアドレス間のアドレス変換及び外部のメールシステム間の SMTP (Simple Mail Transfer Protocol) による電子メールの配送である。

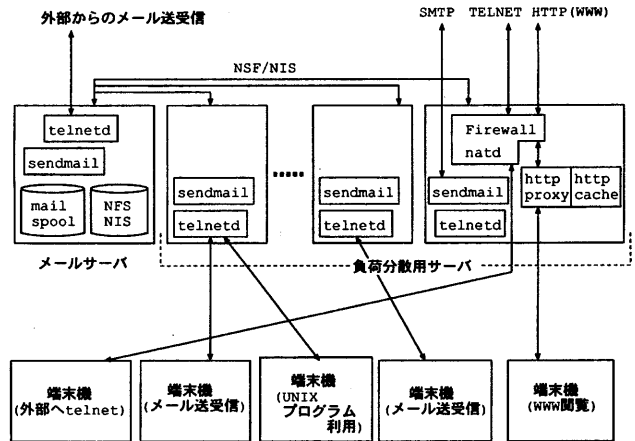


図 3 UNIX 環境におけるサーバ/クライアントシステム

3.3.1 電子メールの送受信及び UNIX 環境

端末機から電子メールを利用する場合、負荷分散を図るために実際には、端末機は 6 台の負荷分散用サーバのいずれかに接続される。これは、メールサーバと 6 台の負荷分散用サーバを上述したように NFS と NIS によりファイルシステム及びユーザ情報を共有することにより実現されている。一方、学内の他施設や学外から電子メールサービスを利用する場合は、メールサーバにログインする。メールサーバ及び負荷分散用サーバは、POP (Post Office Protocol) の提供をしておらず、サーバにログイン後、エディタである mule 及び rmail が使用される。1 台の負荷分散用サーバは、同時に最大 8 台程度の端末機からのアクセスを受ける。各端末機にはどの負荷分散サーバへアクセスするかが予め設定されており、利用者は無関心でよい。端末機から同様の方法により負荷分散用サーバにログインすれば、UNIX 環境の演習が可能となる。

3.3.2 WWW へのアクセス及び外部への TELNET

負荷分散用サーバのうち 1 台は、squid (WWW プロキシ)、Firewall 及び natd (Network Address Translation Daemon) を実装している。これにより、端末機から WWW へのアクセス及び外部ネットワーク上のコンピュータへのアクセスが実現される。squid のキャッシュ領域は、1G バイトである。

3.4 端末機

3.4.1 オペレーティングシステム

端末機は、OS として Windows NT 4.0 Workstation を実装している。Windows NT の特徴を以下に列記する。

- ・マルチユーザ、マルチタスク OS である。

表 2 端末機搭載のソフトウェア

| ソフトウェア名 | 種類 |
|-------------------------------|-------------------------|
| Word (マイクロソフト社製) | 日本語ワードプロセッサ |
| Excel (マイクロソフト社製) | 表計算ツール |
| Access (マイクロソフト社製) | データベース |
| Power Point (マイクロソフト社製) | プレゼンテーション資料作成ツール |
| C++ Builder (ボーランド社製) | C/C++プログラミングツール |
| gcc (GNU プロジェクト) | C/C++コンパイラ |
| Visual Basic (マイクロソフト社製) | Visual Basic プログラミングツール |
| Mathematica (ヒューリンクス社製) | 数式処理, 数値計算処理ツール |
| Auto CAD LT (オートデスク社製) | CAD |
| Netscape (ネットスケープ社製) | WWW ブラウザ |
| Internet Explorer (マイクロソフト社製) | WWW ブラウザ |
| Mule (GNU プロジェクト) | エディタ |
| E-J/J-E Bank (ATR 社製) | 英和/和英機械翻訳ツール (教授用端末機のみ) |

- ・ GUI (Graphical User Interface) を採用しており, ユーザフレンドリである。
- ・ ユーザ管理機 (Windows NT Server 搭載機) より種々のサービスが受けられる。
- ・ 端末機間のファイル転送が容易である。
- ・ NTFS 形式のファイルシステムを有し, ディレクトリ及びファイルごとの所有者と属性が設定できる。

Windows NT は, Windows 95 と比較して, 特にマシンの管理, サーバからのサービス提供及び端末機間の通信の点で優れている。マルチユーザ対応のため, ログイン作業が必要となり, 誰が端末機を利用しているかが把握でき, 例えば印刷処理においてユーザ名を含めた処理内容を履歴として保存できる。また, 端末機間のファイル転送が容易なため, 例えば, 先生使用の端末機 1 台に資料となるファイルを保存すれば, 各端末機から自由にアクセスが可能であり, 先生から学生への資料配布が容易となる。システム管理の点では, NTFS 形式のファイルシステムを有するため, システムファイルの更新, 上書き, 削除を防止でき, システムが保護できる。このことは, 電子計算機システムの保護と安定な維持に大きく寄与する。

3.4.2 搭載ソフトウェア

端末機に搭載されているアプリケーションソフトウェアの一覧を表 2 に示す。これらのソフトウェアを搭載することにより, コンピュータリテラシ教育, プログラミング教育, 計算機を使った教育支援の点

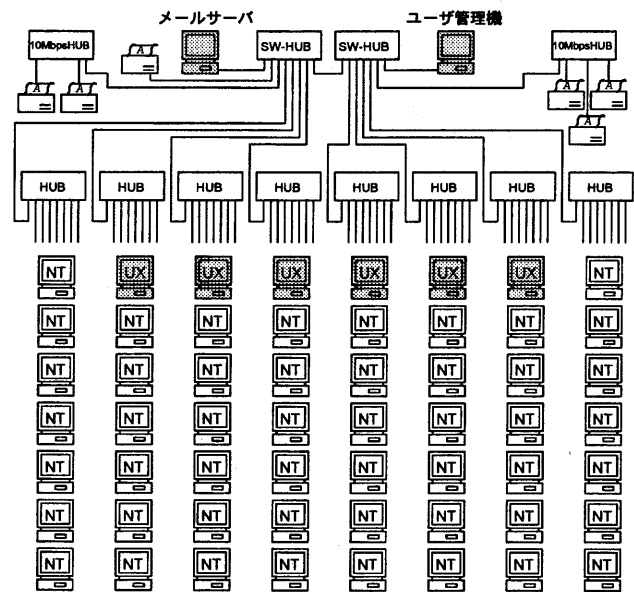


図 4 ネットワーク構成

から幅広い利用が可能であると思われる。

3.4.3 搭載ハードウェア

端末機には, 640M バイトの MO ディスクドライブが装備されており, 大容量のファイルの保存が可能である。したがって, 演習で作成したファイルを保存する場合, 学生 1 人 1 枚の MO 媒体が用意できれば, 5 年間の教育期間中容量超過にならずに継続使用ができるであろう。また, 端末機には, 音声出力端子が付属しており, 保管しているスピーカまたはヘッドフォンを接続すれば, 音声, 画像といったマルチメディアを利用した教育も可能である。

3.5 ネットワーク構成

Ethernet LANにおける伝送速度の主流は10 Mbps から100Mbps へ移行しつつあるが、ネットワーク機器の価格低下の恩恵を受け、本電子計算機システムも100Mbps Ethernet を採用した。システムの具体的なネットワーク構成を図4に示す。図中、SW-HUBはスイッチングハブ、UXは負荷分散用サーバ、NTは端末機を示す。本構成では、カスケード接続されたスイッチングハブ2台を中心とし、スイッチングハブとユーザ管理機及びメールサーバを直接接続し、端末機、負荷分散用サーバ、プリンタをハブ12台を介して接続した。6台の負荷分散用サーバは、6台のハブに分散して接続され、同じハブに接続されている負荷分散用サーバを接続サーバとして各端末機に設定することにより、スイッチングハブの利点を生かしたネットワーク全体の通信トラヒックの低減が図られる。

4. 電子計算機システムの運用

4.1 ヘルプファイルによる使用方法開示

利用者に対する端末機の使用方法の開示には、電子化したヘルプファイルを用い、端末機のデスクトップにアイコンとして表示した。ヘルプファイルは、WWWブラウザを用いて閲覧できるようになっており、ハイパーテキストリンクを用いて、利用上不明な点の説明が閲覧できる。

4.2 WWWへのアクセス管理

端末機からWWWへのアクセスは、負荷分散用サーバのHTTP (Hyper Text Transfer Protocol) proxyへのアクセス管理方式で管理されている。端末機よりWWWへアクセスする場合は、予め利用者が負荷分散用サーバにログインし、所定のコマンドを投入して使用許可を得る。HTTP proxyは、接続元と接続先のアドレスを保存しており、これらの情報より使用履歴が得られる。また、授業中などWWWへのアクセスや電子メールの使用を禁止したい場合は、負荷分散用サーバにおいて

所定のコマンドを実行することにより、詳細な条件により設定可能である。

4.3 プリンタの使用量把握

端末機からの印刷処理は、ユーザ管理機が管理しており、どの利用者がどのような印刷処理をしたかを示すログファイルが作成される。ログファイルを処理することにより、各利用者ごとの印刷量が把握できる。

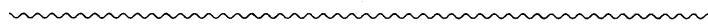
5. おわりに

1998年度初めに導入された電子計算機システムの構築と運用に関して、まず、電子計算機システムに要求される事項を教育と管理の立場から述べた。つぎに、その要求を満たすべく構築された電子計算機システムについて、その構成内容と特徴、運用方法について述べた。本電子計算機システムの主な特徴をまとめると以下ようになる。

1. 端末機のOSとしてWindows NT 4.0 Workstationが採用された。
2. 幅広いアプリケーションソフトウェアが搭載された。
3. サーバクライアントモデルとして、Windows NT独自の環境とTCP/IPをベースとしたUNIX環境の2系統のモデルが用いられ、それぞれの特徴を生かしたシステム構築がなされた。

今後、本電子計算機システムがさまざまな教育分野に利用されることを期待したい。一方、本電子計算機システムを有する演習室の空き時間がほとんどないのも現状であり、新規の授業が受け入れにくくなっているのも現実である。したがって、同程度の電子計算機システムを設備としてもつ第2演習室の早急な実現が望まれるところである。

最後に本電子計算機システムの構築にあたり仕様策定及び技術審査にあたられた委員の先生方、機器購入にあたりご尽力いただいた事務当局の方々に深く感謝いたします。



教育研究報告

第7回科学技術セミナー
ハイテクノロジーの現状
極地から！深海から！地球環境への提言

| | | | |
|---|---|---|----|
| 鳥 | 井 | 昭 | 美 |
| 中 | 鳶 | 裕 | 之 |
| 坂 | | 翁 | 介 |
| 加 | 藤 | 秀 | 文 |
| 鎌 | 田 | 吉 | 之助 |

The 7th Seminar of Science and Technology
The Current Trends in High Technology
From the polar region, from the deep sea, a suggestion to the global environment

| | |
|-------------|-----------|
| Akiyoshi | TORII |
| Hiroyuki | NAKASHIMA |
| Ohsuke | SAKA |
| Hidefumi | KATOH |
| Kichinosuke | KAMATA |

1. はじめに

本科学技術セミナーは、佐賀県地域産業支援センターとの共催で毎年開催されており第7回を迎えた。主に企業の方々を講師として様々な立場からの技術開発、アイデアについて御報告頂いてきた。第4回からは環境問題に重点を置き、リサイクル、省エネルギーにおける各企業の工夫・技術開発について、また各分野での新素材の研究開発についての多数の講演をいただいた。このため、佐賀県を中心とした企業、公設試験研究機関、教育機関等を中心に常に100名程度の参加者があった。特に第6回は、情報・液晶・フィルター及び新薬の各分野での新素材についてテーマに掲げたが、何れの講演も久留米工業高等専門学校を卒業された卒業生の方々を講師に迎えて行ったことにより佐賀県の中等教育機関の先生方に久留米高専のアピールをできた点でも意義あるセミナーとなった。第7回である今回は、特殊な地域から観た環境をテーマに、極地、深海の話を中心に開催された。

2. プログラム

日時：平成10年9月4日（金）

平成10年11月20日 受理

会場：マリトピア（佐賀市鍋島町八戸）

主催：国立久留米工業高等専門学校

（財）佐賀県地域産業支援センター

プログラム

13:30 開会挨拶 財団法人佐賀県地域産業支援センター 専務理事 高橋勝明

13:40-14:50

講演Ⅰ「極地から観た地球環境」

講師 国立極地研究所所長 平澤威男

〈座長〉久留米工業高等専門学校教授 鎌田吉之助

14:50-15:50

講演Ⅱ「深海底の温泉」

講師 岡山大学

固体地球研究センター教授 千葉 仁

〈座長〉久留米工業高等専門学校教授 加藤秀文

15:50-16:50

講演Ⅲ「オーロラから観た地球環境」

講師 久留米工業高等専門学校教授 坂 翁介

〈座長〉久留米工業高等専門学校助教授 中鳶裕之

16:50 閉会挨拶

国立久留米工業高等専門学校教授 鳥井昭美

3. セミナーの紹介

今回御講演いただいた先生方の簡単な紹介を行う。



写真1 主催者として開会挨拶をする
財団法人佐賀県地域産業支援センター
専務理事 高橋勝明氏



写真2 講演中の国立極地研究所所長
平澤威男氏



写真3 講演中の岡山大学固体地球研究センター
千葉 仁教授



写真4 講演中の久留米工業高等専門学校
坂 翁介教授

平澤威男先生は、東京大学理学部助手から昭和49年、極地研研究系の助教授に就任され、さらに教授、主幹等を経て現在同研究所の所長をなさっている。4回の越冬を含め、南極には10回以上おいでになっており、内3回は隊長を御経験である。

千葉仁先生は、岡山大学温泉研究所助手から同大学地球内部研究センター助手、シカゴ大学エンリコフェルミ研究所の研究員を経て、九州大学理学部地球惑星科学科助教授に就任後、今年の3月から岡山

大学固体地球研究センターの教授として地球化学を御研究になっている。

坂翁介先生は、九州大学理学部助手、更に助教授を経られて平成9年4月から久留米高専の一般物理学科の教授として御活躍になっている。昭和62年には第29次日本南極越冬地域観測隊員としての御経験をお持ちである。

以下に3氏の講演についての概要としてプログラムの内容を記載することにする。

資料 講演要旨集

極地から見た地球環境

国立極地研究所長
平澤 威男

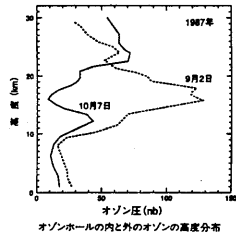
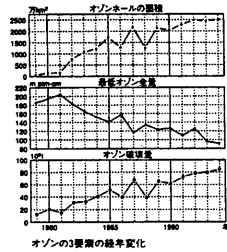
1. はじめに

南極と北極が人類の未来にとって非常に大きな意味を持ちはじめ、この両極から伝えられたさまざまな科学的メッセージが、地球環境問題に火をつけている。それは、地球規模の環境変動の兆候が最初に現れる場所が南極や北極だということが、はっきりしてきたからである。オゾン層の破壊も南極ではじめて観測された。もし、地球が温暖化し、赤道地帯の平均温度が 1 度上がったとすると南極や北極ではその 2~3 倍大きく変化する。また、「ヘイズ」とよばれる現象がある。これは文明地帯で排出された汚染物質が大気の流れとともに極地域に運ばれ、その寒さにより一種の“もや”または“煙霧”となって空中に漂う現象であり、地球大気の“汚れ”を計る物差しともいえるのである。

北極は南極に比べ、文明社会に近く人間生活による影響も大きい。北極と南極のデータを比較することによって、地球全体の環境変動をよりはっきりと知ることができる。それは両極地は地球全体の環境変動に対して敏感なセンサーの役割を果たしているからである。北極と南極から地球環境を監視して、人間が文明活動をすることによって作り出す環境破壊を防止するための貴重な情報を得ることができる。

2. オゾンホール

地球大気の上層 20km 位にある“オゾン層”は太陽からやってくる有害な紫外線を吸収し、人間を含めた動物や植物の生態系を守っている。このオゾン層は過去海中に生息した多様な植物が光合成で作った酸素が大気の上層まで達し、太陽の紫外線の作用により、オゾンとなり形成されたものである。今からおよそ 5 億年前にほぼ完成し、地球の表面はオゾン層に守られ、太陽紫外線の届かぬ安全な環境となった。その頃から動物植物が陸上で生活をはじめるといわれている。いま、数十億年かけて植物によって作られたオゾン層が人類が放出したフロンガスにより、破壊されている。「オゾンホール」とよばれ、広い南極大陸上空のオゾン層に穴が開く現象である。そして、この穴は年々広くなり南極地域以外へも広がりつつあるという。



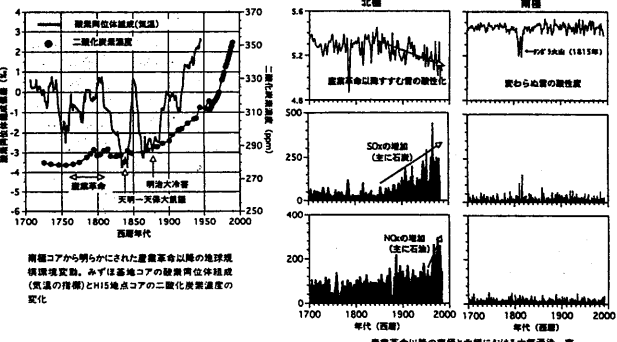
約 1 万年前、気温が急に上昇し、極域の大量の水が融け、洪水が起き、海面の水位が上がり、気候が変化し、自然環境に大きな変化が起きたといわれている。この変化に対応できずに数多くの動物植物が滅び去って行ったと考えられている。この過去の変動にくらべ、人間活動によって起こされている現在の環境変動は温室効果ガスの増加の速さからみて、約数百倍の速さで温暖化がおきると予想されている。この急激な変動に対応し生き残って行くことは自然の生態系は勿論のこと、人類にとっても困難なことであろう。

今後、温室効果ガス濃度、気温の上昇ほか、南極の大陸氷や海氷の増減、南極の弱い生態系の変化などのモニタリングを続け、地球の自然環境がどのように変化しつつあるのか南極で広く監視して行く必要がある。

4. 古環境の復元

地球の南の端、南極点の回りに存在する南極大陸は、自然の条件が非常に厳しい地域、夏のほんの一時期、沿岸地域で気温がプラスになることが数日あるかないか。あとは雪下の世界である。大陸に降る雪は日本の雪のように春ともなれば溶ける去るということではなく降り積ってゆく。下の雪は上の重さに押し固められ、氷の状態になっている。そうして厚さ 2500 メートルの氷が日本の約 37 倍にあたる広大な南極大陸を覆っている。南極大陸は巨大な氷の台地（氷床）である。

氷床を掘り下げていくと次第に古い時代に降った雪が氷となって存在している。1000 メートル位の深さの氷はおおよそ 5 万年、2500 メートルでは 16 万年~20 万年前のものと推定されている。雪が押し固められてきた南極の氷の中には当時の空気が小さな気泡となって含まれている。南極の氷でオンザロックを作ってみると氷が溶けることによって「ピチピチ」という音を立て、幾万年前の地球本来の清浄な空気がはじけだして来る。氷の中の空気や物質をさまざまな角度から分析することにより、地球の過去の歴史をおおよそ 20 万年にさかのぼり知ることができる。南極の氷は地球環境の記録を閉じ込めた“タイムカプセル”といえる。



南極から明らかにされた産業革命以降の地球環境変動実態。みずほ基礎コアの観測位置と地球規模の気候変動とHIS地点の二酸化炭素濃度の変化

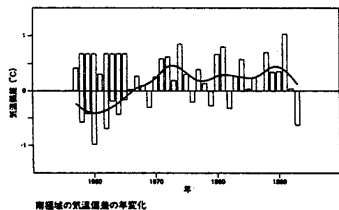
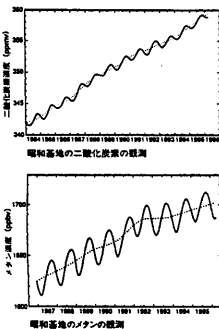
産業革命以前の南極と北極における大気汚染。南極HIS地点と北極グリーンランドSite 2の地点のコアの対比

昭和基地では 1966 年以来、数多くの観測気球を飛ばし、基地上空のオゾン量を測り続け、1980 年代に入ってその量が異常に減少してきたことを見つけ、世界にさきがけ 1982 年にこの事実を報告している。オゾンホールの最初の発見といつていいであろう。その後、この現象が“なぜ南極で最初に起こったのか？”“フロンガスがどのような過程でオゾン層を破壊するのか？”“オゾンホールが拡大し続けていくのは？”これらの原因究明に昭和基地での研究観測が大きく貢献している。

フロンガスがオゾン層を減らす原因であることが明確となり、1987 年モントリオール議定書により、国際的にフロンガスの生産と使用が規制された。このため、大気中のフロンガス量の増加も止まりはじめ、このままだとオゾン層は回復し得るかも知れない。人間の英知の一つのあらわれであろう。しかし、もし、南極観測をしていなかったとしたら、人類がこの現象に気づき、規制を実施するのが 10 年はおくれていたであろう。

3. 地球温暖化

オゾンホールの発生にみられるように、南極や北極など極域は気候や環境変動に敏感に反応する地域である。もし地球が温暖化し、赤道や中低緯度地帯の平均気温が 1 度上がったとすると極域ではその 2~3 倍大きく変化する。温暖化は大気中の温室効果ガス（炭酸ガス、メタンガス、フロンガスなど）の量によってきまり、その濃度が高くなればなるほど温暖化は進む。昭和基地では大気中の温室効果ガス濃度のモニタリングを長年にわたり実施しており、その結果によるとガス濃度は急激に増加している。たとえば、炭酸ガスの年平均増加率は約 0.4% に達し、このままでは約 250 年後には、大気中の炭酸ガス濃度は現在の約 2 倍となる。この温室効果ガス量の増加にともない、南極、特に南極半島地域では顕著な気温の上昇が報告されており、すでに地球の温暖化は始まりつつあると考えられる。



日本の観測隊はアメリカ、ロシア、フランスなどの諸国と競い、南極で最も厳しいオペレーションに取り組んだ。昭和基地から極点方向に約 1000 キロ、標高 3800 メートル、年平均気温零下 60 度という厳寒地に観測基地を作り、2 年がかりで 2500 メートルの穴を明け、氷のタイムカプセルを手に入れた。

この基地はドームふじ観測地点と名付けられ、9 名の隊員により基地が運営され、氷床掘削が進められた。越冬中には、日本の有人観測地点での最低気温零下 79.6 度が記録された。鉄もボキボキ折れるような厳寒のほか、高山病とも闘いながら困難な掘削作業が進められた。このプロジェクトで得られた氷のタイムカプセルを開き、炭酸ガス、メタンガスなどの温室効果ガス、過去の平均気温、火山活動、また植物相の変遷など地球の古環境資料を 35 万年分入手できた。

5. おわりに

いま、南極は人類の未来に大きな意味をもちはじめている。増加を続ける温室効果ガスによる地球の温暖化やオゾン層の破壊などの兆候が先ず最初に現れる場所が南極で、地球規模の環境変動に対して敏感なセンサーの役割を果たしているからである。それ故、南極において、大気圏、水（氷）圏、生物圏などの広い領域でその変動を監視する必要がある。そして、氷のタイムカプセルから知り得る過去の変化とも比較しつつ、地球環境がどのような動きをしようとしているのか、またその変動に対して人類はどのような対応をしなければならぬのかを見極めていかなければならない。

人類はすでに自然のシステムからはみ出してしまうのかも知れない。過去に、はみ出す事で死に絶えた生物はいくつも存在する。地球の温暖化を起こす炭酸ガスの削減、オゾン層を破壊するフロンガスの廃絶は重要な課題である。それも「遅れをとらない」という事が大切である。今後、人類の将来に対して南極や北極が果たす役割は益々大きくなるものだろう。

深海底の温泉

岡山大学固体地球研究センター
千葉 仁

1 海のある惑星：地球

初めて宇宙から地球を見たガガーリンは、「地球は青かった」といったのは有名な話です。青い色をしている理由は本当のところ、まだ十分に説明されていません。しかし、衛星写真を見る限り、海は青い色をしています。太陽系の惑星の中で液体の水をたたえた海を持っているのは、地球ただひとつです。この海は、地球上の生命をはぐくむ源のひとつであり、地球表層の環境を現在のように人類の生息に適するように保つ働きをしています。

この海洋の底に温泉が発見されたのは、約 20 年前のことです。現在では、多くの深海底の温泉（以後、「海底熱水系」と呼ぶことにする）が発見されて研究されていますが、20 年前までは、2000m を越す深海に高温の温泉がたくさん存在することは、まったく知られていませんでした。この講演では、この海底熱水系を紹介し、その不思議さと科学的な重要性を説明した後、海底熱水系が地球表層環境を現在のようにするに果たしてきた役割について考えていきたいと思います。

2 海底熱水系の発見

2.1 1977 年ガラパゴス海嶺

深海底ではじめて温泉が人間の目に触れたのは、1977 年のことでした。場所は、太平洋のガラパゴス海嶺と呼ばれる海底の山脈地帯で、アメリカの潜水艇アルビン号によって発見された。アルビン号のライトに照らし出された暗黒の深海底は、海底熱水系の周辺で突然、それまでの単調な堆積物や玄武岩の海洋底と違って、色鮮やかな風景へと変わった。色鮮やかなもの正体は、それまで知られていなかった海底熱水系に特有な生物群集であった。その後の調査でわかったことが、これらの生物は、海底熱水系に含まれる硫化水素を食べる化学合成細菌を元として、それらをえさにしたり、体内に寄生させたりして生活している太陽の光に依存しない生物群集であった。温泉として海底に噴出している水の温度は、17℃と測定された。潜水艇によって採取された温泉水の化学組成は、海水の化学組成とわずかに相違していた。このわずかな相違は高温の温泉水が多量の海水に薄められた結果であることが分析の結果判明し、高温の温泉水の組成と温度が推定された。その結果、海水に希釈される前の高温の温泉水の温度は、350℃と推定された。これほど高温の温泉の存在を可能にしているのは、水深が深く圧力が高いためである。また、海水と混じる前の高温の温泉水の化学組成は、いくつかの点で、海水とまったく異なっていることも判明した。

2.2 1979 年東太平洋中央海嶺北緯 21 度

ガラパゴス海嶺で発見された低温の温泉の調査結果から、350℃というような高温の温泉の存在が示唆されたので、幾つかの地域で、本当にこのように高温の温泉水があるのかどうかの調査が開始された。やってみると見つかったのは、2 年後の 1979 年、東太平洋中央海嶺と北緯 21 度が交差する海底においてであった。ガラパゴス海嶺で予言されていたように、まさに 350℃を超える高温の温泉水が海底から勢いよく噴出しているのが発見された（図 1）。高温の温泉の周囲には、ガラパゴス海嶺の場合と同じように深海底の熱水噴出口に特有な生物群集が見られた。温泉水の化学組成は、ガラパゴス海嶺の温泉水の分析結果から予言さ

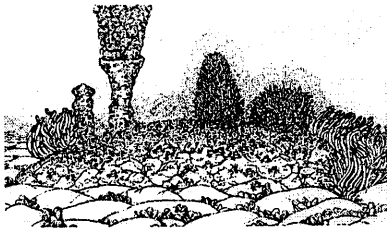


図 1: 深海底の温泉のスケッチ

れたように、海水中で 2 番目に量が多い陽イオンであるマグネシウムイオンが全く存在せず、また、海水中で 2 番目に量が多い陰イオンである硫酸イオンが全く存在しない。海水とはかなり組成の異なるものであった（表 1）。さらに、海底からの高温の温泉の噴出を見た人々を驚かせたのは、温泉が煙突のような熱

表 1: 熱水と海水の組成の比較

| | ガラパゴス | 北緯 21 度 | 通常海水 |
|---|----------|---------|--------|
| Li (μmol/kg) | 690-1140 | 820 | 28 |
| K (mmole/kg) | 19 | 25 | 10 |
| Rb (μmol/kg) | 13-20 | 26 | 1.3 |
| Mg (mmol/kg) | 0 | 0 | 53 |
| Ca (mmol/kg) | 25-40 | 22 | 10 |
| Sr (μmol/kg) | 87 | 90 | 87 |
| Ba (μmol/kg) | 17-43 | 35-95 | 0.15 |
| Mn (μmol/kg) | 360-1140 | 610 | <0.001 |
| Fe (μmol/kg) | | 1800 | <0.001 |
| Si (mmol/kg) | 22 | 22 | 0.16 |
| SO ₄ ²⁻ (mmol/kg) | 0 | 0 | 29 |
| H ₂ S (mmole/kg) | | 6.5 | 0 |

水チムニーと呼ばれるものから黒い煙を吹き上げるようにして海水中に噴出していたことでした。高温の温泉水が冷たい周囲の海水の中に入ることによって冷却され、高濃度で溶け込んでいた重金属と硫化水素が反応して、微細な硫化鉄物の結晶を生成させているのである。この結晶が、黒い煙のように見えて、深海底における高温の温泉の噴出現象は、black smokerと呼ばれるようになった。

3 海底熱水系の調査

3.1 どうやって探すのか

海の中は、50m も潜ると光が届かない暗黒の世界になる。これは、光が水によって吸収されてしまうためである。したがって、海の中で頼りになるのは、水によって吸収されにくい音波である。音波を使えば、海の上に浮かんでいる船から海底までの深さを測ることもできるし、潜水艇と交信することもできる。

それでは、海底熱水系を探するために、まず何をすれば良いのだろうか。地球科学の研究をするときにまず必要となるのは地図である。陸上の場合と違って、海洋底では詳細な地図が存在している場合はほとんど無い。そこで、これという場所に地図を作成できる機械を積んだ船を持って行って、詳細な地図を作ることから研究が始まる。こうして作成した地図をもとにして、海底熱水系が存在しているような場所をまず大雑把に把握する。地図ができたからといって、すぐに潜水艇で潜って調査をするわけにはいかない。まだまだ、潜水艇で調査するには、目標が絞られていない。地形・岩石・地震のデータなどで場所を絞り込むが、最後に行うのは、化学的な指標や海水の濃りを用いた熱水ブルームといわれるものの調査である。海底熱水系から噴出した熱水は、温度が高いため密度が小さく周りの通常の海水よりも軽い。そこで、熱水は周りの海水と混合しつづつも上昇し、周りの海水と密度が同じになったところで横たなびく。これを熱水ブルームと呼び、通常、海水によって一万倍程度に希釈された後に、海底熱水系のある海底から 200m くらい上たなびいている。海底熱水系の熱水は海水と比べて組成が異なっていることは既に述べた。特に、Mn や CH₄ の濃度は、海水の 10 倍以上の高濃度である。したがって、こうした成分を測定してやれば、海底で熱水が噴出している地点を探し出すことができる。海水の濃りも同じような目的に使われる。

こうして、場所の絞り込みが終わったら、やっと深海潜水艇カメラや深海潜水艇を用いた海底熱水系を現実に見つけ出すための調査が始まる。

3.2 現在分かっている分布

現在のところ熱水の噴出が知られており、調査がされている海底熱水系を図 2 に示す。●で示されている

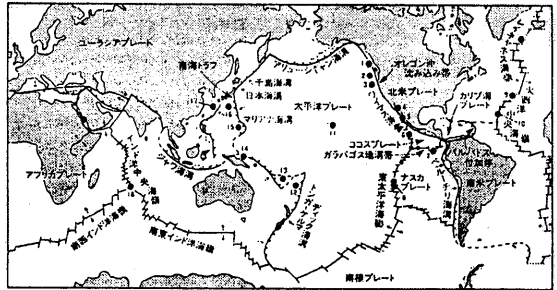


図 2: 深海底の温泉の分布

地点は、実際に海底で熱水が採取されているか、その存在が確認されている地点を示す。これ以外にも、現在熱水の噴出は見られないが、過去において熱水の噴出があったと考えられる証拠を持つ地点は 100 を超える。●印の地点の分布を見ると大西洋やインド洋の真ん中、と北米大陸の海岸近くに沢山あることが分かる。これらの地点は、いずれも中央海嶺あるいは海嶺と呼ばれる海洋底を走っている山脈の上である。地球表層の地球科学的現象を説明するプレートテクトニクスの理論によれば、中央海嶺は地球表層をおおっているプレートの生産される場所である。言い換えると中央海嶺の下にはマグマがあり、それがプレートを生産し、海底熱水系の熱源ともなっている。このために多くの海底熱水系は中央海嶺の上に存在している。インド洋には、中央海嶺上に海底熱水系が少ないように思われるかもしれないが、これは地理的にアメリカやヨーロッパそして日本から遠く、単に調査が行き届いていないためと考えられている。なお、日本近海でも、小笠原の水嶺海山や沖縄トラフなどでも海底熱水系が見つかっている。

4 海底熱水系の科学的な重要性

4.1 地球内部から地球表層への熱と物質の出口

ほとんどの海底熱水系は、既に述べたように中央海嶺と呼ばれるプレートを生産する場に存在している。中央海嶺は、総延長にして 65,000km にもおよび、地球を約一回り半ほどの長さを持っている。プレートを生産するということは、そこで火山活動が起きていることを意味し、地球上の火山活動の 80% が中央海嶺で起きていると推定されている。つまり、中央海嶺自身が地球内部から地球表層への熱の巨大な出口の役割を担っている。中央海嶺付近では、こうして地球表層へ輸送される熱の大部分が海底熱水系によって、水の対流というかたちで行われている。海底に噴出している熱水の化学組成が、海水の組成と大きく異なっていることは、既に述べたとおりである。化学組成が異なっている理由は、図 3 に示すように、海底から

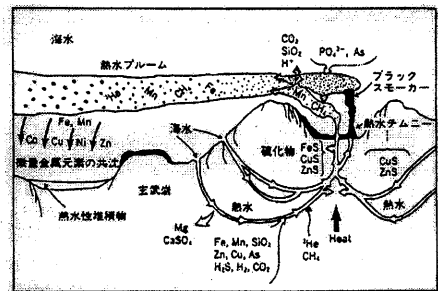


図 3: 海底熱水系の概念図

しみ込んだ海水がマグマの熱によって熱せられて、岩石と反応しその組成を変えているためである。反応する岩石は、中央海嶺で生産される玄武岩という岩石であり、玄武岩と反応した熱水によって地球内部から海嶺へと物質が輸送されている。

4.2 金属鉱床の生成場所

高温の熱水が海底から噴出しているところでは、海底から煙突のように林立した熱水チムニー群が見られる。こうした熱水チムニーは、熱水の噴出口そのものに硫酸塩物や硫化鉱物が生成して成長してきたものである。高温の温泉活動の継続とその盛衰に伴って、熱水チムニーは倒壊したり、再生を繰り返して、熱水の噴出点には、硫化物マウンドと呼ばれる海底上の盛り上がりが生じることがある。大西洋のTAGと呼ばれる海底熱水系では、直径200メートル高さ50メートルにもおよぶ硫化物マウンドが生成している。熱水チムニーや硫化物マウンドを作っている硫化鉱物は、鉄、銅、鉛、亜鉛などの硫化物である。こうした元素は、現在、陸上の鉱山で採掘されて人間生活のために使われている。鉱山には、さまざまなタイプのものがあるが、海底熱水系に伴って生じたと考えられているタイプ（火山性塊状硫化物鉱床）のものもある。こうしたタイプの鉱山から産出される重金属によって、現在、人類が消費している重金属の4分の1がまかなわれている。

海底熱水系は、人間生活にとって必要な重金属鉱床の一つのタイプが、まさに生成している現場であると考えられている。陸上で探掘されているこのタイプの鉱山は、海底から陸上上がり、さらに年月が経過しているため、さまざまな変化を被っている。これに対して、海底熱水系はまさに、重金属鉱床が生成している場であるため、重金属資源がどのように生成するかを目的の当りにして観察することができる場所である。

4.3 知られていなかった生物の宝庫

ガラパゴス海嶺で初めて海底熱水系が発見されたときに、海底熱水系がそれまで知られていなかった生物のオアシスであることがわかった。そうした生物の中で大型で目に付きやすい代表的なものは、チューブワーム（和名：ハオリムシ、細長い管状の生物）、シロウリガイやシンカイヒバリガイなどの貝類、コシヨリエビなどのエビやカニ類である。これらの生物はそれのみで単独で生活しているのではない。彼らの生命を維持する基礎となっているのは、化学合成によってエネルギーを生み出す化学合成細菌である。化学合成細菌は、硫化水素やイオウなどをエネルギー源として無機物から有機物を生産している。シンカイヒバリガイやコシヨリエビなどは、これらの浮遊バクテリアやその塊を食べていると考えられている。それに対して、チューブワームやシロウリガイは、化学合成細菌を体内に共生させている。共生している化学合成細菌が高温の温泉から供給される硫化水素をエネルギーに変えて生産している有機物の分け前をもらって生きているのだ。こうした化学合成細菌をもとにした海底熱水系の生物群集は、海底熱水系が発見されて初めて知られるようになったものである。

4.4 生命誕生の場

海底熱水系は、生命発生の場ではなかったかとも期待されている。生命が発生したのは現在から40億年くらい前と推定されている。生命体は、有機物で構成されている。有機物の中でも生命体の基本となる物質は、アミノ酸である。生命が発生するためには、アミノ酸を作り、それをさまざまな結合させて重合体を作る必要がある。地球ができた当初の陸上の環境は、アミノ酸が安定に存在できる還元環境ではなかったであろう。それでは、海の中はどうだったのだろうか。海底熱水系に似せた環境を実験室の中で作り、その中にメタンと窒素を封入し、300℃を超える温度で加熱する実験が行われた。この結果、メタンから様々なアミノ酸が合成された。さらに、海底熱水系の条件下でアミノ酸が重合して、ペプチドや細胞膜構造が形成されることも実験によって確かめられている。海底熱水系は、生命体の原料物質を作る場所として最適なことがわかる。

さらに、生命誕生の場が、海底熱水系あるいは高温の初期海洋であったと思われる証拠は、超好熱性古細菌と呼ばれる生物の存在である。この生物は、生物の進化的系統樹の根元に近いところに位置し、原始的な生命に近いと考えられている。こうしたグループの中には、115℃という温度まで生育するものが現在知られている。最初に発生した生物は、高温の環境で生まれたことを示唆している。つまり、海底熱水系は生命誕生の場であった可能性がある。最も原始生命に近い生物が現在も生き残っているとすれば、その生き残っている場所は海底熱水系であるかもしれない。

5 海底熱水系の果たした大気海洋系への役割

5.1 地球と海洋の生成

地球は45億年前太陽系が生成したとき、太陽の周りに集まっていたチリから集積して生じたと考えられている。太陽の周りにあったチリは、衝突あつて微惑星と呼ばれるサイズに成長し、それがさらに衝突あつて、だんだんと大きくなり惑星が生じた。この衝突の跡は、地球上ではあまり見えないが、金星や月の表面などに見られるクレーターによって見て取ることができる。地球がだんだん成長するにしたがって、衝突する微惑星の速度は速くなる。そうなるにつれて衝突した微惑星は、衝突のエネルギーによって地球表面で蒸発するようになる。微惑星には、水や二酸化炭素といった気体も含まれており、それが地球表面を覆う大気となったと考えられている。こうした生じた大気は、微惑星が衝突したときに発生する熱を逃がさないような温室効果を発揮するようになる。その後も微惑星の衝突は続き、地球表面はどろどろに溶けマグマ・オーシャンが生じたと考えられている。つまり、地球は生成したとき非常に高温の時代を経験した。周囲に微惑星がなくなり、その衝突が収まってくると、地球は冷却を始める。表面温度が十分下がって、水が凝縮するようになれば、地球に海洋が生じたであろう。その時の大気は、二酸化炭素が50気圧、窒素が1気圧あったと考えられている。

5.2 地球の冷却とプレートテクトニクの始まり

地球が冷却してくるとプレートテクトニクスも始まったと考えられる。プレートは中央海嶺で生産され、海溝でマントルの中に沈みこんでいく。中央海嶺では、当然のことながらこれまで説明してきた海底熱水系が活動をしていたら、表1に見られるように、熱い岩石と反応した海水は、カルシウム濃度が高くなる。大気中で最も多い二酸化炭素は海水中にも溶け込んで炭酸イオンとして存在していた。中央海嶺で放出されるカルシウムイオンと炭酸イオンが出会うと、炭酸カルシウムを作って沈殿するだろう。これによって海水中の炭酸イオン、ひいては、大気中の二酸化炭素濃度が減少しただろう。つまり、海底に沈殿して海洋プレートの上に乗っている炭酸カルシウムの分だけ大気中の二酸化炭素が減少したと考えられる。このときに大気中の二酸化炭素は、10気圧程度まで減少したと推定されている。

5.3 大陸の生成と二酸化炭素の除去

大気中の二酸化炭素を現在のレベル近くまで減少させるためには、大陸の成長が必要であった。大陸の成長については、多くの説があるが、ほとんどのものは、地球の歴史の初期に大陸が成長したとの見解をとっている。大陸ができると、海溝でプレートがマントルにもぐり込む時、プレートの上に乗っている堆積物を大陸側に付加させるという現象が起きる。言いかえると、炭酸カルシウムがマントルへ戻っていかないことになる。もし、マントルに戻っていくと、炭酸カルシウムは高温で分解するため、二酸化炭素となって再び大気中に戻ってきってしまう。大陸が生じたことによって、炭酸カルシウムが分解されない行き場が生じたことになる。さらに、大陸の風化は、カルシウムイオンを海洋に供給する。海底熱水系から供給されたカルシ

ウムイオンと同様に、風化作用で供給されたカルシウムイオンも大気中の二酸化炭素を除去する役割を果たすだろう。このようにして、大気中の二酸化炭素が現在のレベル近くまで低下していったと考えられる。

6 海底熱水系と地球環境

6.1 プレートテクトニクスと地球環境

地球内部から大気中への二酸化炭素の放出は、火山活動によって行われている。プレートの運動が活発になると中央海嶺の火山活動は活発になる。すると中央海嶺の火山を通して地球内部から出てくる二酸化炭素の量は増えるはずである。しかし、海底熱水系により供給されるカルシウムイオンの量も増えて、炭酸カルシウムの沈殿が促されるはずである。プレートの沈み込みによって生ずる日本のような島弧の火山活動も活発になるであろう。しかし、島弧火山活動によって放出される二酸化炭素がもともと海洋プレートの上に乗っていた炭酸カルシウムを主な源とすると考えると全体としてプレート運動の活発化が大気中の二酸化炭素の量を増やすかどうか定かではない。プレート運動の活発化が最も顕著に地球環境に与える影響は、中央海嶺の体積の増加による海面上昇だと考えられている。

6.2 海水からの元素の除去

海底熱水系は、直接・間接に海水中からのいくつかの元素の除去を行っている。表1からわかるように、例えば、海水中に二番目に多い陽イオンであるマグネシウムは、熱水中には含まれていない。これは、海水が高温で岩石と反応する際にマグネシウムが岩石に取られてしまうためである。海底熱水系が発見される以前は、このマグネシウムの除去が知られていなかったため、海水中のマグネシウムの濃度が一定である理由がわからなかった。逆に、カルシウムやカリウムといった元素は、海水が高温で岩石と反応することによって、海水中に供給されている。

マグネシウムのように海水と岩石が反応することによって直接海水中の濃度が変化する元素のほかに、リン、バナジウム、ヒ素などは高温の熱水中に含まれる高濃度の鉄が海水中で沈殿することによって海水中から間接的に除去されている。これらの元素の中で、特に、リンは生物の必須元素である。全世界的に海底熱水系の活動が活発になると、海水中に熱水によって供給される鉄の量が増す。この鉄がリンを一緒に沈殿させると海水中のリンの濃度が低下し、海洋における一次生産（植物プランクトンの生育）が低下すると予想される。一次生産の低下は、それを捕食して生きているほかの生物にも影響を与えることになるだろう。つまり、海洋の生物そのものが影響を被るだろう。こうしたことは地質時代を通して起こったことであろうと想像されている。

6.3 地球環境のフィードバックシステム

海底熱水系を通して、地球環境を見てみると、地球環境に影響を与える現象というものは、思いもかけないところにも存在するものである。今回見てきた過程は、原因と結果が比較的単純に結びつくものである。しかし、地球環境を調節しているシステムは、今回見たような単純なものではなく、一つの原因がある結果を生み出すと、さらにそれが原因となって次の結果に結びつく複雑なシステムである。それぞれの原因と結果が最初の原因に対して正のフィードバックとして働くのか、負のフィードバックとして働くのかを良く理解する必要がある。それを理解することによって、初めて、地球環境の変動を理解できるのである。

オーロラから見た地球環境

国立久留米工業高等専門学校
坂 翁介

1. 歴史の中でのオーロラ

オーロラは北欧やカナダ・アラスカ、あるいは南極でのみ観察できるものではなく、わが国でも見えていました。古文書の中にある、その部分を抜き出してみましょう。

日本書紀 682年9月18日

甲子（きのえねの）日に高麗（こま）の客（まろ）うどに筑紫に饗（あ）えたまう。この夕べの昏時（いぬのとき）に大星（おおなる星）、東より西にわたる。丙寅（ひのえねの）日に、造法令殿の内に大なる紅あり。王甲（みづえねさるの）ひにもありて、形、蓮花（か）んちゆうは：（漢）のごとくして、火の色あり。空に浮かびて北になる。国毎に皆みゆ。あるいはいわく「越海（このうみ：日本海）に入ぬ」といふ。

加賀の国（1730年2月15日）

夜、西北より東北まで横に紅気現す。その色常の火色には非ず。焦色にて初更には薄く夜半には濃く、五更に及んでようやく滅す。金沢よりは能州にあたるが故に大火ありと思ふ。しかれども、東北の隅甚だ長く、かつ紅色の中に星輝けるが故に火災にあらざるを知る。正月4日に能州の百姓を算用場へ召して問之。答えてもうさく「かねて奥州の人に聞え答えてもうさく、なお海を隔てて北にあて見たりといふ。水見海辺の老人いはく、海火事として古来もこれありたる事といふ」

この様に、オーロラについての『いにしへの記録』は日本の古文書の中にもあります。この不思議な現象は、

北の火山から出る炎、ラップ人の打す「たいまつ」-----> ノルウェー
昔し、ずっと南へ下った仲間からの合図 -----> マオリ族
神の怒り -----> スエーデン
神の微笑み -----> カナダインディアン
とも思われてきました。

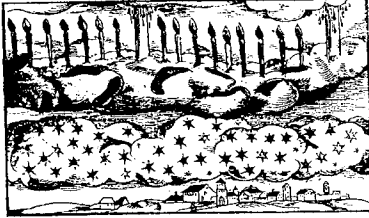
また、アリストテレスはその著（メテオロジカ：気象学）の中で、オーロラは大地と月の間を満たす物質（火、空気、水、土）のうち、より軽いものが高い所に集まり、火により点火された発光現象

と思つたし、天文学者、チコ・ブラーエは、
硫化物の蒸気である
と考えました。

18世紀になっても、観測事実が少なく、依然としてその知識は混乱し、

ガスが太陽光を受けて光っている、
磁気を帯びたガスの噴出、
ある種の電気現象、
と想像されていました。

Sonnenlichtes Wunderzeichen, welches ist gesehen worden
auf Kautenberg in der Steier. 1570. Im Jahr. 1570. Im Jahr. 1570. Im Jahr.



オーロラをろうそくの炎と考えた1570年のボヘミア

その後、18世紀後半に発達した分光学 (Spectroscopy) の結果、発光ガスの存在が確認され、

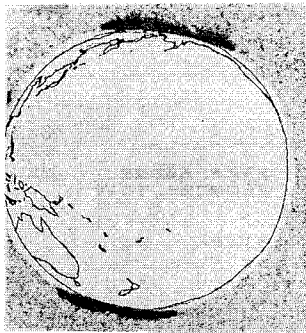
かみなり原因説や、
宇宙線原因説
が考えられる様になりましたが、まだ正しい知識には至っていませんでした。

しかし、1957年—1958年の国際地球観測年 (International Geophysical Year) で、電波による観測などの近代的な観測手法をもとにその知識が飛躍的に増しました。

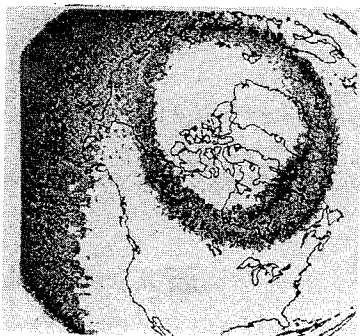
2. 一体何処から、そして何が原因で？

下に、人工衛星 (DE-1) で太平洋の上空から撮影した地球の写真を復元してみました。左下にオーストラリア、左上に日本が見えます。シベリアあるいはタスマン海の上に光っている部分が、丁度王冠の様な形で浮き上がっているのがみえます。これが宇宙からみたオーロラです。

次に、北極上空からみたらどうでしょう。これも、人工衛星の撮像画をもとにして復元してみました。地球が枠内に納まっていますが、円形の輪が、カナダ、アメリカを通過してグリーンランドから北極の北端に回り込んでいるのがわかります。これがオーロラ帯と呼ばれるオーロラの輪です。右半分の白抜きの部分は地球の夜で、左上のオーロラの輪と重なった部分は太陽の光を受けて輝いている昼の地球です。

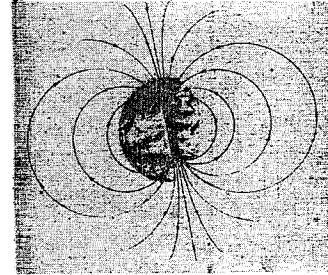


オーロラの冠をかぶった地球



北極上空より観たオーロラの輪

これほどの、最新技術を使ってしらべられているわけですから、大抵の事は理解されています。しかし、ここで原因の細かい事を述べるのは、ふさわしくないかもしれません。かわりに、その基本の所を述べてみます。さて、下に絵を書きましたが、地球は巨大な磁石だと考えます。磁力線と呼ばれる線が、北極と南極の間を結んでいるのがわかります。よくみると、極に近い磁力線ほど地球から遠い所まで伸びているのがわかります。オーロラから伸びる磁力線は地球から、そんなに遠くには達していませんが、またそれ程近くもない距離を通過しています。そこからオーロラの光りがやってくるわけはありませんが、極北の大気でオーロラの光りを発光させる電子が、磁力線に沿ってそこから供給されています。

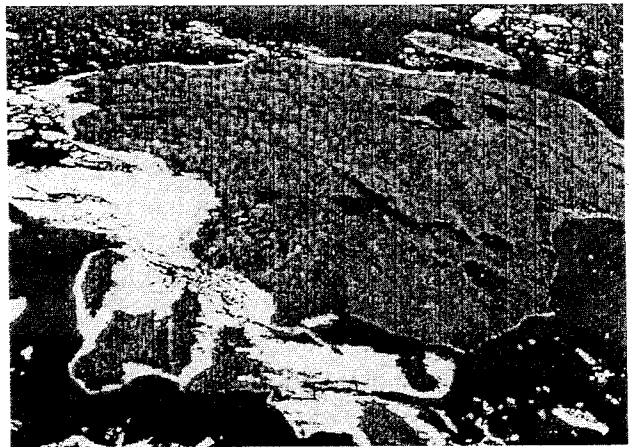


地球は巨大な磁石である

3. オーロラ観測から始まった地球環境の研究

幸い、厚い大気層によって、オーロラを運んでくる高いエネルギーの電子は遮られて、それらが地球大気との衝突の過程で作り出す光 (発光現象) のみが地上まで到達します。しかし、目に見えるこの様なオーロラ現象は神秘的であり、人々の興味を引き付け、さらに1957年から本格的な観測が始まった事は既に紹介いたしました。その近代的観測の中心に南極観測が位置していました。さらに発展した現在、南極が地球環境を調べるための重要な拠点になっている事は周知の事実です。

そこで本講演の後半では、筆者が参加した29次南極地域観測での越冬観測を例にとり、その経験をおりませ、南極観測の一部を紹介したいと思います。29次隊は1987年10月に日本を出発し、1989年3月に帰国しました。その16ヵ月間のうち(1)越冬生活をどうやって楽しんだのか、(2)私の研究テーマとした『野外観測、その電源をどうする?』の2点についてお話しいたします。



空から見た昭和基地のある東オングル島

4. おわりに

今回の第7回科学技術セミナーのテーマは特殊な地域からの視点で観た地球環境についての話であり、深海底の状況を撮影した貴重なビデオや南極の昭和基地付近の様子を撮影したビデオなどの登場により視覚にうったえる興味ある講演であった。出席者は従来同様佐賀県内の企業、大学・高校・中学などの教育機関並びに工業技術センター・農業試験研究センター等公設試験研究機関を中心とした多岐にわたる分野の方々であり、さらに市民の方々を含む100名を越える人数であった。

「極地から観た地球環境」では、地球の温暖化や大気汚染等により極地の受ける影響がいかに大きいか、またこのために極地の環境調査が地球全体の環境変動の鋭敏なセンサーになることを知った。「深海底の温泉」では、海底熱水系において、高温なために岩石とマグネシウムとの反応によりマグネシウム濃度は減少、逆にカルシウムやカリウムは増加するといったような各種元素の増減がある。このような元素濃度の変動がさらに海水中の植物プランクトンをはじめとする生物の生態系にも影響を与えるために地球の環境に与える影響の大きいことを知らされた。「オーロラから観た地球環境」では、神秘的であるオーロラが実は地球の持つ磁力線による高エネルギーの電子による現象であることがわかった。また、「宇宙天気予報」という形で地球レベルでの環境状況が把握されていることも興味あるものであ



写真5 主催者として閉会挨拶をする
久留米高専鳥井

た。以上3件の講演により、普段は目を向けない視点から環境問題を考えられた点で有意義なセミナーであったと思われる。

最後に本セミナーを開催するにあたり、会場その他の設定に御尽力下さった佐賀県地域産業支援センターの皆様方に厚く御礼申し上げます。

一般論文

Hannah Arendts Begriff der Handlung (Teil 3)

Mitsuo HIGASHIJIMA

ハンナ・アーレントの『行為』概念(三)

Handelnd und sprechend offenbaren die Menschen jeweils, wer sie sind, zeigen aktiv die personale Einzigartigkeit ihres Wesens, treten gleichsam auf die Bühne der Welt, auf der sie vorher so nicht sichtbar waren, solange nämlich als ohne ihr eigenes Zutun nur die einmalige Gestalt ihres Körpers und der nicht weniger einmalige Klang der Stimme in Erscheinung traten.

一般文科 東 島 光 雄

平成10年11月20日 受理

一 歴史と「だれであるか」

これまで述べたことは、『ハンナ・アーレントの「行為」概念⁽¹⁾』の最初にあげたアリストテレスの区別によつていた。それを繰り返しておく、「行為」(プラクシス)は、発言をとめない、自由人にふさわしいものである。「製作」は、奴隷の仕事ではないが、自由人にはふさわしくない。「労働」は、自由でない余儀なくされる奴隷の仕事である。そして「発言と行為」は、意図しなくても、自己開示性をもつ。また、それは主体のイニシアティブをもつ、ということである。

今回はここから始まる。人間相互の間で発言し行為するときには、必ずその人の「人となり」が隠しようもなく現れてくる。しかし一体それ(人となり)が何を言うのかはむづかしい。性質などはそれを言い表せない。むしろおおい隠してしまう。性質などは、人間相互の行為のなかで、自分が余りに現れてくることを隠すために、顔につけるマスクのように思われる。人間相互の行為は、曰く言いがたい「だれであるか」(人となり)によつて織りなされている。それを言い表そうとすると、名状しがたい不確かなものとなる。こうした領域は、客観的認識とは縁のないものである。しかし、それこそが人間相互の行為をより豊かなものとしている。客観的に認識される事物のうちで、人間相互の行為はなされる。しかし、客観的認識においては、それを行う人が「だれであるか」は問題にならない。それはある程度無視してよいことである。しかし、人間相互の行為においては、「だれであるか」が決定的に重要である。このことを近世哲学は久しく見逃してきた。テーゼにすれば、「客観主義の立場から言えば、真理はだれの口から述べられても、まったく同じである。しかし同じ真理でも、

だれが言っているかによって、決定的に異なっている領域がある。」となる。どんなに客観的認識を目指しているときでも、その本人の「人となり」が否応もなくにじみでてくる。⁽³⁾これがどうしても打ち消すことの出来ない人間の現実である。

この人間の現実、自分より前にすでに織り成されたものである。人はその中に生まれ、成長してきた。だから発言と行為は、無から始まるのではない。すでに織り成されたものに、発言と行為によって、何らかの新しいものを付け加えるのである。行為は、それが始めにいた目的からは必ずはずれている。しかし、むしろそのことよって、その織物ははるかに豊かな内容をもつことになる。それが伝記をなすのである。合理主義的予断なしに考えると、当初の目的からはずれて達成されるものこそが、人間の豊かな内容をなす。近代人の人間観は製作の側から見られたものである。製作から区別された行為は、目的実現の連関では考えられないものである。そうした行為の連鎖こそが伝記をなす。一人一人の人間が、自分のイニシアティブによって、発言と行為によって、自分が開始した歴史を生き抜くが、しかし、それを自分の立場から計画したり、構成したりすることはできない。

以上のことを歴史に引き戻して考えてみたい。一人一人が現実のイニシアティブをもって開始し、自己を展開した経歴を歴史と呼んでいいと思うが、それは彼自身によっては計画・立案されはしない。誕生と死の間的一生が、歴史として形成されるという事実が根本にあるから、我々は、もつと大きな集団の歴史、人類の歴史も成り立つと考えることが出来る。個人個人の生涯をこえた集団、国家、人類の歴史は、根本において、個人の歴史(伝記)からの派生的なアナロジーにすぎない。その理由は、例えば、人類の歴史は我々個人には、その始まりと終わりは知られていない。始めと終わりが、見紛いようもなくあるからこそ、個人の伝記が成り立つのである。自己開示をとりつけていく主体がない。人類を自己開示をとりつけていく主体と考えるのは、幻想にすぎない。個人の伝記では、その自己開示について責任ある主体が明らかになっている。これに反して、人類の歴史には、その責任がある主体がない。

以上は、随分挑発的な主張と取られるかもしれない。しかし、それほど

変な主張ではないことを次に述べよう。一例として、カント以降に歴史の主体と見なされているものを、考えてみる。⁽⁴⁾それは、例えば、理性、世界精神、階級などである。しかし、これらは何の責任もたぬものである。こうしたアノニムなもの(名のないもの)に、歴史の主体を帰するのは、分からなくはないが、この近代人の考えに距離を取るために、もつと古い例をあげる。プラトンは、人間の行為によって織り成される人間世界の事柄を、「人間に行われた事柄」(事蹟)というように言及したときに、歴史についての理論的な考察は成り立たないし、歴史などは考察に値しないものであると述べている。⁽⁵⁾その理由として、人間たちのあいだで取り交わされている発言や行為は、人形芝居のようなもので、(神の手によって背後から)あやつられているにすぎないからであるという。神々は人間たちをあやつって、退屈しのぎをしているだけである。それを見て神々が哄笑するのを、「ホメロスの哄笑」とよぶ。このプラトンの主張は、近代人の歴史意識に毒されていない(第一点)。けれども同時に、プラトンは公共世界をあやつる背後からの力を設定せざるをえなかった(第二点)。この第二の点が、近代の歴史意識が受け継いだものである。この背後からの力が、さきあげた、理性、世界精神、階級利害、神の見えざる手である。我々が歴史という広々とした領域を思い描くとき、一つのアポリアにおちいる。この人間たちによつてもかくも形成されている歴史は、それにもかかわらず、誰か特定の人間によつて計画され、実行されたものではない。この困惑を乗り越えるために、プラトンはイローニシユに操り人形のモデルを考え、ヘーゲル、マルクスでは世界精神とよばれた。これは、我々の歴史を何か製作とのアナロジーで考える考え方が、しみついてしまっていることを物語っている。

プラトンは人間を操る神の手を考えたが、だからといって、人間の行動を説明できるということにはならない。プラトンは、歴史において責任をとるのは誰かを、少なくとも指し示したかった。それはこの世に現れて来ない神である。ドラマの作者のように、神々は実践的人間を主役にはしないので、操り人形として芝居に打ち興じているだけである。ホメロスの哄笑の立場から言えば、人間の歴史はそう深刻に考え、探究すべきものではない。この考えは、近代の考えからはずれているが、時々顔を出すことがある。ゲイテはエッカーマンとの対話において、世界歴史は「誤謬と暴力の

「ごちゃ混ぜになつたもの」だ、と言つている。ゲーテがこう言つたとき考へたのは、彼の身近かではない政治史を考へている。詩人で思想家たるゲーテは、政治史から身を引いて、それを見下ろしてゐた。では、思想史、精神史、美術史などについてはどうであろうか。ゲーテは同じ態度を取つたであろうか。この点は決めることができない。しかしいづれにしても、先のような言葉は、プラトンと同じ発想より出たものであるのは明らかである。それにしても、思想史、精神史、美術史などの社会の上部構造に注目するにしても、その歴史が変化をもつて物語られうるかぎり、歴史はあくまで政治史である。先のようなものは、政治史からの一つのアナロジーである。ということとは、ただの思想傾向なり、社会一般からなる歴史はどこにも存在しない。歴史というからには、経験的につきとめられうるものが成り立っていないなければならない。実際、ゲーテ、プラトンのように、歴史の主体として個々人の背後に働いている人形使いを考へるといふ立場も、歴史が本来政治史だということの裏書きだといふことになる。ただ一般的な単なる思想史、生産構造の歴史であれば、だれも責任を負わなくてよいのだから、その背後に主体を考へる必要はない。アダム・スミスが「見えざる神の手」を想定したのも、社会経済の歴史が単なる構造的な歴史ではなく、個々人をこそ主役としなければならないことに気づいていたことを示している。歴史について考へる場合、何か超個人的な主体を想定したくなる。しかし、こうした考へ方は、実際に変化していく歴史の中に身を置いている人々の実地の経験にはふさわしくない。そこから身を引いている人たちの知的要求によつて、超個人的主体が生じてくるのである。

一人一人の人間の行為のかみ合いによつて歴史が生じてくる。それをドラマのように解釈することはできない。ドラマは作家によつて構想され、全体を終局へ導く作家を必要とする。作者自身が筋書きのなかに登場してくることはないし、筋書き自身が作者の「人となり」を示すことはない。大抵の古典はそうしたものである。これに反して、実際に起こつた歴史は、何人によつて構想されたり、何人によつて導かれたものでもない。個々人は常にそうした歴史に巻き込まれ、生きてゐるかぎり、そこから抜け出せない。そうした現実の歴史は、作者のない戯曲である。この現実の戯曲という歴史は、その中で生きていた様々な主役たちの「人となり」、それが「だれであるか」をたえず物語りつづける。言い表しがたく、取りちがえ

るすべのない「人となり」を物語りつづける。しかも、いつも、ことが終つてから物語りつづける。ある人が「だれであり、だれであつたか」は、歴史（伝記）を通じてはじめて、うかがい知ることができる。あるいは、歴史（伝記）に書かれたことに自分が登場することによつて知られる。ソクラテスは一行の文も書かなかつたし、一つの作品といふものはない。あつたのは、伝えられた彼の発言と行為である。だから、彼の哲学思想について、我々はほとんど何も知らない。しかしプラトンについてなら、（彼は沢山のソクラテスを主人公にした書物を書いたので）、その哲学思想を知つてゐる。反対に、我々はプラトン、アリストテレスが「だれであつたか」を知らないが、それよりはるかに多くソクラテスが「だれであつたか」を知つてゐる。それは我々がソクラテスの伝記をはるかに多く知つてゐるからである。英雄が存在すれば、彼の身の回りに意味深い歴史が展開され、その歴史が彼が「だれであるか」を打ち明け、明らかにしてくれる。その歴史は彼がなす数々の行為によつて織りなされてゐる。こうした構造は、製作、労働にはないものである。英雄は発言と行為によつてイニシアティブを取らなければならない。このことによつてはじめて、人間は歴史的世界の中にたちいで、それに介入し、その歴史的世界の変動に耐えて、そこに新しい一つの歴史を開始することができる。公的な世界と区別された私的世界のほのぐらさに比べて、公共世界の性格をなすのが、私的領域を踏み越えて、公共の場にて、イニシアティブを取るといふ決断を意味してゐる。この決断は古代人にとっては当然のこととしてなされてゐた。この決断がなければ、発言や行為もないし、そもそも自由というものはない。これがプラトン、アリストテレスが製作、労働から区別した実践ということと言つたときに、念頭に置いていたものである。

二 行為の四つの特徴

行為について四つの点について述べる。

- (1) 行為の二分節——率先と完成——
- (2) いかなる行為も能動的であると同時に受動的である。
- (3) 行為はそのいかなる限界も越えていこうとする。
- (4) だれも自分の行為の意味を十分に見極めることはできない。

(1) 第一に、古典古代においては、行為が次ぐように分節されていた。

① *archein* — 始める、率いる、支配する

② *prattein* — しとげる、実行する、完成する

我々が労働、製作と区別して行為と呼ぼうとしている事柄が二つに分節している。一つは、まず率先して始めるといふこと、二つは、それに駆けつけて、助勢し、完成するということである。つまり、率先—(助勢)—完成。我々が行為、行動というとき、第二の点だけが気づかれて、第一の点は忘れられがちである。この第一の点が前に述べた行為のイニシアティブである。歴史的には第一の点が抜け落ちていって、「支配」に変わっていった。だが、ホメロスの詩に出てくる王は、対等者のなかの筆頭者であつて、支配者ではない。それは率先し、率いるものであつた。行為は、率先して率いる者と、それに駆けつけて助勢する助勢者との切り離すことのできない二つの契機より成り立っている。だが、すべてのものを物的な現象になぞらえてみる我々の近代⁹⁾においては、率先という契機は忘れられ、支配となつてしまふ。そして、率先する主人と、服従する義務のある臣下となつてしまふ。こうして分節してしまえば行為の含む率先とそれに対する助勢という関係はなくなつてしまふ。この二者(主人と服従者)の間には、親密な内面関係はなくなる。率先者は、デジジョン・メーカーとなり、自分の率先すべきことにたいする他の助勢者を信じることができなくなる。そうなれば、かれは本来の行為はできなくなる。以上、第一に行為はこうした関係を含み、その関係は壊れやすいということである。

(2) いかなる行為も能動的であると同時に受動的である。

率先者もその助勢者の中でしか行為できない。いかなる行為も、相手の行為を受けし¹⁰⁾のぶ、受忍を要求する。純粹な能動というものは、人間の行為には存在しない。このことは、人間の行為に実に多くの含みを与えている。人間の率先、行為による出来事を歴史といつてよいと思うが、ある人の歴史的行為によつて受けるインパクトの範囲は限定されていない。そしてインパクトの連鎖反応が次々に他の人の行為なり、受忍なりを引き起こす。この行為と受忍の連鎖反応は限りのないものである。無制限、無限定な歴史を、有限な我々が開始せざるをえない。ここに様々な問題が起こることになる。

古代ギリシアのポリスの人口は少人数なものであつた。そこには、人間の行為が次々に呼び起こす結果が、あまりに無限定になることをコントロールしようという意志が働いていたと思われる。しかしそれは無駄な努力であつた。どんなに小さな人間集団でも、そこで人間によつて織り成られてくる人間の反応は、手の付けられないほど複雑なものになつてくる。規模の大小に関係なく、一つ一つの行為からでてくる連鎖反応は、どこで終わりという限りをもたない。行為は、セルフコントロールが完全には利かないものである。

(3) 行為はそのいかなる限界も越えて行こうとする。

行為はイニシアティブを持つから、何らかの限界を越えていこうとする。行為は何かありきたりのものを常に越えていこうとする。一方、人間の社会は限界という枠に囲まれている。その限界、枠は、法律、国、国境などの限定であると考えてもよい。しかし、いかなる限定、枠も決して安定したものではなく、無条件な枠というものはない。この不安定さは、行為そのものが新しい関係呼び起こすということにある。新しい世代が起こることさえもそうである。法律、国などの制度的枠組みは、人間たちの行為そのものによつて不安定なものである。人間の行為そのものに、枠組みを越えていこうとする力がある。法律、国などはその内部の人間生活、共同生活に対する外からの枠組みであつて、その中では常に、何か新しい関係を開始しようという人間関係が渦巻いている。

行為、事業は本質的に新しい関係を始めることである。行為は本質上節度のないものである。行為者は本来節度をわきまえないものである。だからこそ、古典古代に「節度を守れ」ということが、政治家の徳目になつてきた。以上述べたことが、政治において現れやすいので、おごりが行為者の最大の誘惑としていましめられていたのである。限界(法律、国)は、人間の行為の本来持つている無節度を完全になくしてしまうことはできない。せいぜい、ある程度飼ひ馴らし、困い込むことしかできない。

(4) だれも自分の行為の意味を十分に見極めることはできない。

つまり、その意味があるのかわからないのか不明確だからである。一つの行為から起こる結果は、本質上見通せない。何故なら、その行為から否応なし

に生ずる歴史上の出来事に、その見極めがたさが属しているからである。そして、その見極めがたさが、我々の生活を成り立たせている。我々の生活が、次にどうなるかという緊張感がなければ、生活は自壊する。この見極めがたさに対処する緊張感が、我々の生活に張りを与える。確実な死、生まれたときに宣告された死刑を前にしながら、生きていられるのは、我々がその都度の最終的な意義は分からないながらも、歴史のなかに巻き込まれているという緊張感の故にあると思う。この人の一生と歴史の緊張が、自分の行為の見極めがたさと結びついているというのは、皮肉なことである。生きるということのはずみは、我々の行為、発言の無限定な含み、見極めがたさにある。我々の行為の意義は、歴史の終末において（それがあるとして）はじめて明らかになるだろう。我々は死に至るまで、自分が巻き込まれている歴史の意義を知らずにいる。知らずにいるからこそ、生きることの見極めがたさがある。

この点に労働、製作という活動と、ここでいう行為の区別がはつきりしてくる。物を作る人々は、自分の作るもののモデルを作っていないければならない。製作過程に入る前に、その過程を頭に思い描いていなければならぬ。これに反して、人間の行為は、どのようなものであれ（公的であれ、私的であれ、どのようなものであれ）、完結に至るまでは明瞭に対象化されることのできない。ある行為のプロセスは、その当事者がすべて死んでから、はじめて明瞭に輪郭づけられる。革命が政治的行為だとしても、それもプログラム通りにはいきはしない。それがプログラム通りに行くとは、物を作ることと違うことになってしまう。そのプログラムは後から作る歴史家、エピソードにしか明らかにならないことである。しかし、歴史に巻き込まれて、それを体験し、行為する人々も、歴史についての十分な理解はないにしても、なにがしかの心得は持っている。歴史の証言とか、回想録とか、メモは歴史そのものではなく、歴史家によって資料として検討される。それらもまた、後世になって、歴史における明瞭なものとなつてはじめて、それとして認められる。その行為者自身には、それは遂に悟られずに終わる。その行為のモチーフと、その行為から生ずる歴史的事柄の意義とはいつでも食い違っている。人間の歴史の織りなす事柄の一義的に捉えられる意義は、歴史として記述されるが、行為者自身はその記述をすることはできない。それができるのは、その行為、運動に関わらなかつ

た後世の歴史家である。

行為者、発言者は、その行為、発言によって、人間の織りなす関係の網に捕らわれて、自己を人々の見聞に曝さなければならぬ。しかし、自分の行為を人前に曝さなければならぬ自分自身はだれなのか、自分がだれとして、人前に曝されるかについては、その人は知ることができない。彼だけではなく、彼をみる他の人々もまた彼が一体「だれであるか」を断言的に言い切ることはできない。行為、発言の自己開示性と、その不確かさについては前に触れた。その人が「だれであるか」は、だれにも分からない。しかし、歴史的状況が目指すのは、人間の自己開示にあるのではなく、その都度の状況に対する対応であつて、自己開示はつけたしに過ぎないかもしれないのである。

だからいままで述べたことは、全体として重要視しなくてもいいことかもしれないが、言いたかつたことは、今まで生きた人が「だれであつたか」は、その死後に定まることである、ということと言っているだけなのかもしれない。つまり「だれでも、生きていられるあいだは幸せな人だつたといわれることができる。」人間は労働や製作によつてではなく、発言、行為によつて歴史に登場し、自己をあらわにするが、しかし、そこでは彼が「だれであるか」は、彼自身にも、その相手にも分からない。それが分かるのは終末に到つてである。

注

- (1) 久留米高専紀要第十一卷第二号、第十三卷第二号。
- (2) 例えば、政治の不確かさ。
- (3) 先に述べたことの修正となる。
- (4) カント、ヘーゲル、マルクス。
- (5) 『法律』八〇三、六四四。皮肉な冷笑的な主張。
- (6) シェイクスピアはだれだつたか。平家物語の作者はだれだつたか。
- (7) この語のラテン語 *agere* は *action* の意で、はじめてものを動かすことである。
- (8) この語のラテン語 *gerere* は、いったん始まつたものを担っていくことである。
- (9) プロセスのあるものを大事にする。
- (10) 受難といつてもよい。

平成10年度 編集委員

委員長 谷口 宏 校長
副委員長 川口 武実 教授 (制御情報)
平 濬 国男 教授 (機 械)
委 員 大 淵 豊 教授 (電 気)
中 寫 裕 之 助教授 (工化・応化)
馬 越 幹 男 助教授 (材 料)
中 坊 滋 一 助教授 (数 学)
越 地 尚 宏 助教授 (物理・化学)
坂 元 宏 志 教授 (外 国 語)
東 島 光 雄 助教授 (国語・人文)
木 寺 英 史 助教授 (体 育)

平成11年 3月18日 印刷

平成11年 3月25日 発行

紀 要 第14卷 第2号

〒830-8555 久留米市小森野町1232番地

編集兼
発行者

久留米工業高等専門学校

TEL 0942-35-9300

〒815-0035 福岡市南区向野2丁目13-29

印刷所

秀巧社印刷株式会社

MEMOIRS
OF
KURUME NATIONAL COLLEGE OF TECHNOLOGY

Vol. 14 No. 2
(MARCH 1999)

CONTENTS

| | | | |
|---|-------|---|----|
| A Study of Ice Storage System —Development for Cafeteria Cooling System— | ..... | {Kunio HIRAHAYA Kenichi MATSUMOTO ... Tomohiro YAMASHITA ... Kenji ESAKI | 1 |
| RF to DC Energy Converter Electron Tube for SPS System Application | ..... | {Kinzo SUGIMORI Kuninori OOSAKI... Hiroto UEDA | 7 |
| Soluble Polyimides (3) — Photo-reactive Soluble Polyimides — | ..... | {Yusuke TSUDA Yasaburo SATOU Tetsuro SATOU ... Yoshihide NOGAMI Hiroaki SAKAMOTO | 13 |
| Formation of Al Alloy/Al ₂ O ₃ Composites by the Direct Metal Oxidation Method | ..... | {Koki SHIGEMATSU Jinichiro KUBO ... Mikio UMAKOSHI Hideaki MASUNAGA | 23 |
| Duality Transformation for the Planar Rotator Model on the Two-Dimensional Lattice | ..... | Yoshiaki TANAKA... | 31 |
| “Practical English” viewed by Theories of the Second Language Acquisition—No.1—: Analysis and Evaluation of the English Education Utilizing the Internet | ..... | Masatoshi YONENAGA... | 43 |
| Hannah Arendts Begriff der Handlung (Teil 3) | ..... | Mitsuo HIGASHIJIMA... | 80 |
| On Execution of a Funeral in Sin Buddhist Rites | ..... | Hajime ENDOH... | 47 |
| What is Human Development in KENDO (2) — The Relationship between 'Skills' and 'Mentality' — | ..... | Eishi KIDERA... | 51 |
| Solving the Difference Equations with the Aid of Computer program, “EXCEL”) | ..... | Kinzo SUGIMORI... | 57 |
| Design and Operation of a Computer System for Education | ..... | {Mikio ODA Takao BABA Tatsuko KURIHARA ... Naruto EGASHIRA Kenichi MATSUMOTO Yutaka OBUCHI | 61 |
| The 7th Seminar of Science and Technology The Current Trends in High Technology From the polar region, from the deep sea, a suggestion to the global environment | ..... | {Akiyoshi TORII Hiroyuki NAKASHIMA ... Ohsuke SAKA ... Hidefumi KATOH Kichinosuke KAMATA | 67 |