

ISSN 0910-7851

伝熱研究

Journal of The Heat Transfer Society of Japan

1995^{July}
Vol. 34 No. 134

〈小特集：地球温暖化対策—二酸化炭素の隔離技術の現状と展望〉

社団法人 日 本 伝 熱 学 会
The Heat Transfer Society of Japan

日本伝熱学会第34期 (平成7年度) 役員

会 長 副 会 長 理 事 (編集出版) 東 北 中国四国 北陸信越 (企 画) 九 州 (総 務) 北 海 道 監 事 評 議 員	(編集出版) (企 画) (総 務) 山 田 悦 郎 (秋 田 大) 稲 葉 英 男 (岡 山 大) 青 木 和 夫 (長岡技大) 松 木 健 次 (シャープ) 尾 添 紘 之 (九 大) 金 子 邦 彦 (東 大) 杉 山 憲 一 郎 (北 大) 前 田 昌 信 (慶 大) 鈴 木 立 之 (富山県立大) 平 澤 良 男 (富 山 大) 功 刀 資 彰 (原 研) 一 宮 浩 市 (山 梨 大) 丸 山 茂 夫 (東 大) 長 坂 雄 次 (慶 大) 縄 田 豊 (八代高専) 田 中 宏 史 (福岡工大) 山 田 明 (三菱重工) 三 田 地 紘 史 (豊橋技科大) 廣 田 真 史 (名 大) 小 林 健 一 (東 工 大) 早 坂 洋 史 (北 大) 山 岸 英 明 (釧路高専) 高 橋 一 郎 (山 形 大) 稲 室 隆 二 (京 大) 竹 中 信 幸 (神 戸 大) 片 岡 勲 (京 大) 鈴 木 豊 彦 (鳥 取 大) 加 藤 泰 生 (山 口 大) 数 土 幸 夫 (原 研) 東 之 弘 (いわき明星大) 中 島 利 誠 (お茶水女大) 田 辺 新 一 (お茶水女大) David Copeland (東 工 大)	相 原 利 雄 (東 北 大) 林 勇 二 郎 (金 沢 大) 鳥 越 邦 和 (ダイキン) 斎 藤 彬 夫 (東 工 大) 部 会 長 増 岡 隆 士 (九 工 大) 東 海 熊 田 雅 弥 (岐 阜 大) 伊 藤 正 昭 (日 立) 部 会 長 笠 木 伸 英 (東 大) 前 川 博 (新 潟 大) 関 西 荻 野 文 丸 (京 大) 柳 謙 一 (三菱重工) 水 野 彰 (豊橋技科大) 河 村 洋 (東 理 大) 部 会 長 関 東 塩 治 震 太 郎 (石川播磨重) 日 向 滋 (信 州 大) 石 黒 博 (筑 波 大) 森 岡 幹 雄 (石川播磨重) 神 永 文 人 (茨 城 大) 西 野 耕 一 (横 浜 国 大) 師 岡 慎 一 (東 芝) 中 山 昭 男 (九 州 産 大) 森 英 夫 (九 大) 長 野 靖 尚 (名 工 大) 大 原 敏 夫 (日 本 電 装) 大 河 誠 司 (東 工 大) 三 松 順 治 (岐 阜 大) 戸 倉 郁 夫 (室 蘭 工 大) 原 利 次 (日 本 工 大) 泉 正 明 (岩 手 大) 小 澤 守 (関 西 大) 増 田 雅 昭 (シャープ) 橋 本 律 男 (三菱重工) 奥 山 喜 久 夫 (広 島 大) 森 康 彦 (慶 大) 飛 原 英 治 (東 大) 小 原 拓 (東 北 大) 中 谷 元 (三菱電機) 新 井 紀 男 (名 大) 川 西 康 平 (三菱重工)
--	---	---

「Thermal Science and Engineering」

チーフエディター

小 竹 進 (東 大)

伝 熱 研 究 目 次

会長就任にあたって	相原利雄 (東北大学流体科学研究所)	1
会長の任を終えて	中山 恒 (東京工業大学工学部)	2
CURRENT RESEARCHES ON HEAT TRANSFER IN CHINA		
	Bu-Xuan Wang And Zeng-Yuan Guo (Tsinghua University)	3
A Survey of Thermal Engineering Research Activity in Korea		
	Jae Min HYUN (Korea Advanced Institute of Science & Technology)	11

〈第32回日本伝熱シンポジウム〉

第32回日本伝熱シンポジウムを終えて	準備委員長 宮本政英 (山口大学工学部)	19
第32回日本伝熱シンポジウムを終えて	準備委員 加藤泰生 (山口大学)	20
企画部会特別セッション「中国と韓国の伝熱研究の現況」について		
	森 康彦 (慶応義塾大学理工学部)	21

〈小特集：地球温暖化対策 — 二酸化炭素の隔離技術の現状と展望〉

小特集にあたって	第33期編集委員会	23
発電プラントからの二酸化炭素回収・隔離技術の評価	赤井 誠 (機械技術研究所)	24
CO ₂ 海洋貯留の動的挙動の実験と分子動力学解析		
	平井秀一郎・岡崎 健・土方邦夫 (東京工業大学)	30
高圧水中における二酸化炭素の溶解挙動	綾 威雄 (船舶技研)	38
海水中における二酸化炭素の拡散と深海条件下の挙動	西尾匡弘 (機械技術研究所)	46
CO ₂ ハイドレートの構造と生成・解離メカニズム	内田 努 (北海道工業技術研究所)	52
地球科学から見た二酸化炭素隔離技術	大隅多加志 (電中研)	58

〈学会活動報告〉

社団法人日本伝熱学会第33期 (平成6年度) 総会議事録		65
阪神大震災義援金ご協力に対する御礼	中山 恒 (第33期会長)	67
阪神大震災義援金に対する御礼	神戸大学、神戸商船大学伝熱関連研究室一同	67
阪神大震災義援金ご協力者名簿		68
北陸信越研究グループ報告	青木和夫	69

〈お知らせ〉

公開講演会「私たちの生活と熱」開催のお知らせのご案内		70
日本伝熱学会東海支部設立総会及び記念講演会のご案内		71
日本伝熱学会関西支部主催「講演討論会」のご案内		71

日本伝熱学会関西支部主催「'95 伝熱セミナー」のご案内	72
中四国伝熱研究会企画「中四国伝熱セミナー・岡山」のご案内	73
Turbulent Heat Transfer, An International Conference	75
第16回日本熱物性シンポジウム開催案内	76
第33回燃焼シンポジウムご案内	76
第9回数値流体力学シンポジウム講演募集	77
第19回人間-生活環境系シンポジウムご案内	77
トピックス記事情報ご提供のお願い	78
「伝熱研究」原稿の書き方	79
編集委員会だより	80
事務局からの連絡	81
日本伝熱学会正会員・学生会員入会申込・変更届用紙	83
日本伝熱学会賛助会員新規入会申込届け用紙	83

Journal of The Heat Transfer Society of Japan

Vol.34, No.134, July, 1995

CONTENTS

New President's Address

Toshio Aihara (Tohoku University)..... 1

Acknowledgement to All of the Members

Akira Nakayama (Tokyo Institute of Technology)..... 2

Current Researches in Heat Transfer in China

Bu-Xuan Wang and Zeng-Yuan Guo (Tsinghua University)..... 3

A Survey of Thermal Engineering Research Activity in Korea

Jae Min Hyun (Korea Advanced Institute of Science & Technology).....11

〈The 32nd National Heat Transfer Symposium of Japan〉

Chairman's Report of the 32nd National Heat Transfer Symposium of Japan

Masahide Miyamoto (Yamaguchi University).....19

As a Secretary of the 32nd National Heat Transfer Symposium of Japan

Yasuo Katoh (Yamaguchi University).....20

Special Session "Current Status on Heat Transfer Study in China and Korea"

Yasuhiko Mori (Keio University).....21

〈Special Issue : Measures for Global Climate Warming-Technology of CO₂ Isolation〉

Preface to Special Issue

Editorial Board23

Evaluation of CO₂ Uptake and Isolation in the Power Plant

Makoto Akai (Mechanical Engineering Laboratory, MITI).....24

Experiment on Dynamics of CO₂ Accumulation in the Ocean and Molecular Dynamical Analysis

Shuichiro Hirai, Ken Okazaki and Kunio Hijikata (Tokyo Institute of Technology)30

Behavior of CO₂ Dissolution in the High Pressure Water

Takeo Aya (Ship Research Institute).....38

CO₂ Diffusion in the Sea Water and Its Behavior in the Deep Sea

Kunihiro Nishio (Mechanical Engineering Laboratory, MITI).....46

Structure of CO₂ Hydrate and Its Production and Dissociation Mechanism

Tsutomu Uchida (Hokkaido Industrial Technology Laboratory)52

CO ₂ Isolation Technology from the View Point of Global Science Takashi Ohsumi (Central Research Institute of Electrical Power Industry).....	58
⟨Reports on the Society Activities⟩	65
⟨Announcements⟩	70

会長就任にあたって

相原 利雄 (東北大学流体科学研究所)

山口市の第32回日本伝熱シンポジウムの会場で開かれた日本伝熱学会総会において、第34期の会長に推挙頂きました。輝かしい足跡を残す大先生が育てこられた日本伝熱研究会。そのよき伝統を受け継ぐ本学会の会長にご指名頂き、身に余る光栄と責任を痛感しております。

幸いに昨年9月、本学会は社団法人として認可されました。法人化を果たした事は真に喜ばしい限りであります。同時に、社会的責任も生じた事を自覚しなければなりません。法人化に伴う問題点としては、i) 他学会との競合、ii) 運営労力・経費の負担増、iii) 自由な雰囲気消失など、学会移行問題検討WG(第28期、小竹 進主査)の答申で指摘されておりますが、定款等諸規則に従って学会運営を行う際には、実務上、予期せぬ問題が多数生じるものと思われまふ。本学会は既に公的に認可された組織でありますから、有志組織時代に許された便法が社会的に認められない事は言うまでもありません。しかし、規則一点ばりでは、伝熱研究会時代の自由なよき雰囲気が失われ、その活動が硬直化するおそれがあり、許される範囲で柔軟に対応して参りたいと思ひます。

既に歴代会長によって、国際活動の活発化など、多数の提言がなされ、特別委員会も設置されていますが、今後なお本学会が対応すべき問題として、1) 社会における本学会の位置づけ、2) 会員構成の改善、3) 知的財産の社会への還元と学術情報公開の多様化、4) 健全財政の維持、などが挙げられます。1) については、他学会との共存共栄をはかりつつ、社会的に本会の評価を高め、主要基盤学会の一つとして成長して行く必要があります。それには、本学会の提出する研究成果が、短期的にも長期的にも社会の要請に応え、学術の進展に呼応したものでなければなりません。新分野の開拓・学際分野の創生・応用分野の新展開のためには、「他花受粉」すなわち異なる学術分野との交流が不可欠であります。幸い、本会員の活動基盤は多数の学会に跨がっており、学術の他花受粉には好適の環境にあります。

しかしその会員構成には、i) 機械学会会員が大多数

を占め、ii) 官学の会員が70%、企業会員は30%であり、iii) 年齢構成のピークが40才代後半にあるなど、なお改善すべきものが残されている様に思ひます。特に、若手研究者の増員は必須課題であり、学生・院生諸君に伝熱・熱科学研究の楽しさを具体的に紹介すると共に、かつて半導体研究に若人が寝食を忘れた様に、感動を呼ぶ研究対象の抽出と雰囲気作りが必要です。同時に、企業で実務に腐心されている技術者・研究者にとって、本学会の活動が魅力あるものでなければなりません。成長を続ける学問分野では、概して新しい提言に寛容であります。また、より幅広い顕彰の方法にも、工夫を凝らす必要がありましよう。

課題の3) についても、マルチメディアの導入を含め、できることから実現して行きたいと思ひます。既に、電子メールによる会員ネットワークシステム化については、前田昌信先生(慶大)を委員長として検討を始めました。本会の基幹事業である伝熱シンポジウムには、毎回、多数の論文が提出され、ご同慶の至りではありますが、講演会場数の増大や十分な討論時間の確保、会期日数、国際化の問題など、将来に向けて検討を続けるべきものが多々あります。更に、会員サービスの質の向上をはかりつつ、健全財政を維持するためには、会員にできる努力で(会費の期限内納入、諸連絡・回答などの期日内実施など)運営の負担増を極力回避すると共に、賛助会員の増大にご協力をお願いしなければなりません。

以上のうち、あるものは今期中に着手・解決できるかも知れませんが、その多くは、長期にわたる根気よい努力の積重ねが必要です。今期は、副会長に林勇二郎(金沢大学)・斎藤彬夫(東京工大)の両先生とダイキン工業研究所の鳥越邦和所長のベテランを迎え、理事・監事・評議員のご協力を得つつ、法人学会としての基礎を固め、将来の発展に備えたいと思ひます。先達の先生方はじめ、会員諸賢のご助言、ご支援をお願いする次第です。

相原 利雄：東北大学流体科学研究所 (〒980-77 仙台市青葉区片平2-1-1, Tel (022) 217-5242, Fax (022) 217-5242)

会長の任を終えて

中山 恒 (東京工業大学工学部)

昨年度は伝熱学会が社団法人として認められ、これを記念する特別講演会など行事の開催、学会の将来を考える特別委員会の発足、さらに名誉会員など諸制度の整備に、多くの会員の皆様のご協力を得ました。なかでも、事務局の仕事、支部活動、各種委員会活動を担当された先生方には多大のご尽力を頂きました。日常が益々多忙になる時代にあつて学会活動への貢献は時間と労力のうえで、大きな負担であることは明かです。それにも拘らず、多くの先生方から積極的なお力添えを頂き、おかげで本学会の新しい門出を順調に進めることができました。本紙上を借りて厚く御礼申し上げます。

さて、昨年度は法人化の年と言うこともあって、伝熱研究の将来がさまざまな場であらためて議論されたことと思います。なかでも法人化記念放談会で披露された若手研究者の方々の展望は興味深いものでした(伝熱研究 1995.1月号)。放談会の内容は今日の伝熱研究の多面性と多様性を反映していると思われました。即ち、理学的アプローチと工学的アプローチの混在、エネルギー、環境、からマイクロエレクトロニクスに及ぶ広い応用範囲などが言及されていました。今日のように技術の多様化と複合化が進むなかで、伝熱研究の大きなベクトルが見えにくくなるのは当然かも知れません。混沌のなかから新しい潮流が生ずるのを期待しています。新しい発展を促すためには、伝熱学会と言う組織がますます若くなることが重要です。伝熱学会は法人化によって完成した外面を備えるようになりましたが、中身はきわめて若い状態にあると私は思っています。即ち私達は異なるアプローチ、異なる思考様態、多様な研究テーマの発表にきわめて寛容であり、また本学会には大先輩の先生方から大学院生までの年齢層を暖かく包む雰囲気があります。なにより大事に思えるのは議論がしやすい雰囲気があることです。これには伝熱シンポジウムが大きな役割を担っており、とくに伝熱シンポジウムの懇親会と二次会が盛んであるかぎり伝熱研究の将来に不安はありません。あらゆる問題を持ち寄って多様と混沌の時代を楽しもうではありませんか。

これに関連して思いを至したいのは、わが国の伝熱研究者が諸外国の人達に比べ大きな自由度を享受していることです。流行のテーマに飛び付かないと職をも失いかねないような際どい環境はわが国にはありません。論文の量産が研究スタッフを支えるのに不可欠、と言うようなプレッシャーもありません。こうしたドライブはぬるま湯的環境を排する良い効果をもたらす一方、研究者が多くなり資金獲得競争が激しくなると弊害のほうが大きくなります。業績を測る物差しのなかで、印刷論文数が余りにも大きな比重を占めるようになった。このため、論文発行業が大学教授と学生を相手にした産業になってしまった。論文集の種類と印刷される論文の数の急激な増加は、伝熱研究の発展を必ずしも反映しているとは言えません。査読を通りやすい性格の論文ばかりが目につくようになり、実用性を備えた面白い論文を見出だすのが難しくなった。こうした危機的潮流に、わが国の伝熱研究が歯止めをかける役割を果たせないものでしょうか。私達が享受している自由度を活用して、現実的問題に挑戦した優れた研究をいま以上に世界に向けて発信する必要があります。

昨年度は阪神大震災により自然の力にあらためて思いを馳せた年でもありました。本会の会員のなかで、仕事の中断または遅れを余儀無くされた方は多数に上りました。これらの方々への励ましの意を表すべく伝熱シンポ会場で募金を行いましたところ、多くの方からご厚志を頂きました。ここに厚く御礼申し上げます。また、副会長を勤めて頂いた坂本雄二郎氏が病に倒れられたことも残念なニュースでした。一日も早いご快復をお祈りしています。

この一年、私自身はたいした勤めができなまま時日が経ってしまいました。伝熱研究と伝熱学会に関して普段以上に考える機会を与えて頂いたことは何よりと思っています。以上、ごあいさつと日ごろの感想を記させて頂きました。

中山 恒:東京工業大学工学部機械知能システム学科 (〒152 目黒区大岡山2-12-1, Tel (03) 5734-2531 Fax (03) 3729-0587)

CURRENT RESEARCHES ON HEAT TRANSFER IN CHINA

Bu-Xuan Wang And Zeng-Yuan Guo
Tsinghua University, Beijing 100084, China

INTRODUCTION

In China, Scientific researches are usually subdivided into three different administrative levels, that is, basic research, technological research and development research. It is well-known, China still belongs to the developing countries. The state input, which emphasize on the applied researches, is not high. Since the promulgation of National Long- and Mid-Term S&T Development Outline and the formulation of the S&T Progressive Law of People's Republic of China, the new mechanism of combination of S&T with economy has been fostering. The focus of S&T activities gears to the construction of national economy. The key of S&T system's reform is to implement the policy of "holding firm to one end (basic research) and leaving free the rest (R&D to market regulation)". "Holding firm to one end" denote mainly rely on the government financial input to support only a few key research institutes and those in high learning institutions to conduct basic research, state public benefit research, long-term research and high-technological research. It is aimed to increase the state's input to basic research from current 7 percent to 10 percent of the total allocation for S&T. "Leaving free the rest" means to conduct R&D activities, which are closely related with economic construction and demanded by the need of the market. R&D achievements disseminate and open a way of self development, depending on market mechanism operation.

Numerous accomplishments and success in many technologies have resulted from the understanding and basic application of heat and mass transfer, and advances in heat transfer have been used to improve the products of most industrial endeavors. Furthermore, heat transfer is pervasive throughout the existing and emerging technologies including energy, heat exchangers, manufacturing, material processing, aerospace, bioengineering and, microelectronics and information technology etc. Consequently, heat transfer research covers actually all the three different levels: basic research, application-oriented basic research and applied research. However, unlike many other disciplines, there is no single industry or technology that serves as a flagship for the heat transfer. This may explain perhaps why it is difficult for the heat transfer researches to get funding from industry in China.

RESEARCH ACTIVITIES ON HEAT TRANSFER

The research activities in the field of heat transfer in China are quite widespread and profound. There were more than 200 papers submitted each year to the annual nation-wide heat transfer conference sponsored by the Division on Heat and Mass Transfer of the Chinese Society of Engineering Thermophysics (CSETP) since 1980. The National Conferences on Engineering Thermophysics in Colleges and Universities were held regularly every three years since 1983. The 1st Nationwide Thermophysical Property Conference was held in Dalian in October 1984. A nation-wide special symposium on thermal hydraulics and nuclear reactor safety was held in Xiamen in April 1984. Moreover, there were also a few papers on heat transfer presented at various symposiums held by the Chinese Mechanical Engineering Society (CMES), the Chinese Society of Chemical Engineering and Technology (CSCHET), the Chinese Society of Aeronautics and Astronautics (CSAA), the Chinese Metals Society (CMS), the China Society of Measurements (CSM), the Chinese Solar Energy Society (CSES), etc. Such a large number of papers were written in Chinese without exception, and only a few of them were accepted for publication in journals. They therefore are seldom known to the foreign heat transfer communities. However, papers presented at the International Symposiums on Heat Transfer, which were held in Tsinghua University in 1985, 1988 and 1992, will benefit the interaction between Chinese and foreign heat transfer communities. Of course, there are many international conferences with related or special topics had been taken place in China since 1985.

RESEARCHES ON HEAT TRANSFER IN CHINA

It is quite difficult/impossible to make a comprehensive report on all of latest researches on heat and mass transfer in China, especially in such a short description. The authors are devoted themselves to give a brief introduction to some aspects at the 1990's as follows.

A. Heat Conduction

A new method on infrared thermovision examination was proposed based on mathematical models of conduction-convection and conduction-radiation to measure the contact thermal resistance in composite materials. Experiments show that the contact thermal resistance can be up to 25% of the total heat transfer resistance of Ti-Al composite finned tubes with hot water flow inside and exposed to air [A1]. A new technique was reported for measuring thermal conductivity of composite plate by infrared thermovision [A2]. Analytical results on dynamic thermal stress in a semi-infinite object under impact heating were obtained based on the hyperbolic conduction equation. The impact thermal stresses are confined in a thin surface layer and experience twice sudden changes [A3]. A finite speed propagation model in spherical system expressed in a hyperbolic conduction equation was used to predict the transient process of heat conduction in IC chips. Analytical and numerical results show that, compared with the diffusion model, we have the higher peak temperature and thermal stress, greater temperature difference between components and strong thermal noises, which are significant to the reliability of IC chips [A4]. The thermal wave phenomena have been introduced to the analysis of thermal breakdown in semiconductor devices and some relationships between the failure power, failure time and defect dimension were given for specific time domains [A5]. The hyperbolic conduction equation was used to predict the temperature history of bio-specium in the ultra-rapid cooling process [A6]. Non-quasi-steady heat conduction resulting from a moving line heat source was analyzed by use of heat source method. The difference in results of non-quasi-steady from quasi-steady analysis are found to be obvious for Fourier number smaller than 20 [A7].

B. Natural and Mixed Convection

A method was proposed to research the natural convection heat transfer from a non-isothermal vertical plate by infrared thermovision [B1, B2]. Influences of the slot width were reported on the natural convection, including flow patterns and heat transfer, between a horizontal cylindrical envelope and an internal concentric slotted hollow cylinder [B3, B4]. The effects of variable thermo-physical properties on laminar free convection of gas and liquid were reexamined [B5, B6, B7]. The systematic study of variable property effects on vertical channel natural convection in air indicated that the mass flow rate and heat transfer in vertical parallel plates will experience a non-monotonic variation with increasing wall temperature or wall heat flux, which can lead to the sharp rise in wall temperature up to its damage [B8]. Experimental studies were reported on turbulent natural convection, including natural convection from a horizontal cylinder in high Rayleigh numbers, tempera-

ture field characteristics and local heat transfer coefficients of natural convection in an enclosure [B9, B10]. It was found through numerical study of laminar natural convection on a vertical heated plate for water containing metallic corrosion products that there are strong influences of variable properties at super-critical pressure on natural convection heat and mass transfer [B11]. Heat transfer by free convection in air from small horizontal heated surfaces facing upward has been experimentally studied. The random instability of the flow and heat transfer was observed and discussed [B12]. Using the numerical and differential interferometric methods, the natural convection combined with radiation on a non-isothermal vertical flat plate were investigated. The fraction of radiation heat transfer will increase with increasing Gr as Gr ranging from 2.5×10^7 to 5.0×10^8 [B13].

C. Forced Convection Without Phase Change

Thermally induced effects on fluid flow have been systematically studied, including thermal drag, thermal displacement, thermal drive, and thermal instability. Based on these phenomena it can be expected to develop some new technique of thermal control [C1]. Experiments on the forced convection heat transfer of air in microchannels were conducted. Results show that Nu decreases with the decrease of Re for the air force flow in microchannels with diameter of 0.2-1.1mm [C2]. Experiments on forced convection heat transfer for liquid methanol flowing through microchannels were also reported in detail [C3]. The laminar flow transits to turbulent one at $Re=700$, and heat transfer enhanced greatly. Experimental studies on heat/mass transfer and pressure drop characteristics were performed and discussed for arrays of non-uniform plate length [C4]. Heat transfer and friction characteristics of a square channel with square/triangular ribs were presented and the effects of the rib resistance was discussed [C5]. The temperature field of fluid flow and heat transfer around the heating solid spheres in tandem have been measured by laser holographic interferometer together with infrared scanning technique. The heat transfer characteristics for heating solid spheres affected by various parameters were attained [C6, C7]. The aerodynamic heating was predicted and an enhanced cooling method for the inlet casing central cylinder and its front cone was suggested [C8]. Experimental study on an air-jet impingement on a heated rotating cylinder wall was conducted and its heat transfer correlation was obtained [C9]. Correlations of heat transfer and pressure drop have been proposed for the air flow across chevron and louver finned-tube banks based on experiments in a wind tunnel [C10].

D. Two-Phase Flow and Heat Transfer With Phase Change

Experiments were conducted to investigate the flow boiling of sub-cooled liquid in microchannels with cross-section of 0.6×0.7 mm, machined on the stainless plate of 2 mm thick. Results indicated that the heat transfer was intensified greatly due to the occurrence of boiling under smaller wall surface superheat than that for normal size channel, yet no any visible bubbles exist within the microchannels, and blustered bubbles is form of a jet just at the exit of microchannel [D1]. Two hypothetical concepts--"evaporating space "and "fictitious boiling" have been proposed [D2], and new efforts are devoted to them. Experimental study of heat transfer characteristics in the evaporator of a two-phase closed thermosyphon was performed. The correlations were suggested for predicting the boiling heat transfer coefficients for the liquid pool, and the liquid film respectively [D3]. Heat Transfer for laminar forced convection film boiling on a horizontal cylinder has been investigated experimentally and analytically, and the corresponding correlation was given [D4]. The mechanism of the bundle effect of a horizontal tube bundle in nucleate pool boiling was investigated theoretically and experimentally. It was shown that the liquid film, impinging and vapor covering effect caused by rising bubbles in the bundle, are responsible for the boiling enhancement in the tube bundle [D5]. Researches on rewetting and advances in flow boiling along hot surfaces were summarized [D6]. A physical model of interfacial heat transfer was developed for flow film boiling at high velocity. Analytical results revealed the heat transfer limit for auto-model flow film boiling and thermodynamic non-equilibrium in the transfer process for non-auto model for flow film boiling [D7]. A new correlation for flow boiling heat transfer of refrigerants in horizontal tube was developed, which is in better agreement with the data than the other existing correlations [D8]. High pressure steam-water two-phase flow instability in a vertical upward helically-coiled tubes ranging from 3-10 MPa were studied experimentally. The oscillation curves of two-phase flow and the effects of various parameter on flow instability were obtained [D9]. Mechanism of heat transfer in dropwise condensation and various surface materials for dropwise condensation have been investigated and reported [D10]. Bifurcation theory has been used to predict the non-linear dynamic instability of two-phase flow in natural circulation loop for the purpose of safety analysis of nuclear reactor [D11]. Experimental study was conducted on the void fraction of air-water two-phase flow in the shell-side of a segmental baffled horizontal shell-and-tube heat exchanger model. It was found that the average void fraction was lower than that predicted by a homogenous flow model [D12]. The concept of thermal clogging developed from the single-phase flow was extended into gas-liquid two-phase flow systems

under heating. An approximate analytical relation between the acceleration pressure drop and the dimensionless Heating number was derived [D13]. Experimental and analytical results were reported on heat transfer for melting in an enclosure at constant rate with emphasis on the effect of wall conduction on melting [D14]. An experimental investigation was performed on the local heat and mass transfer for drying the moist particles in the circulating fluidized bed, including the effect of air superficial velocity, solid circulating rate and initial moisture content on heat and mass transfer [D15]. A cylinder instrumented with a fast responding thin film thermocouple probe was developed for the measurement of instantaneous local heat transfer coefficients around a horizontal tube immersed in a high temperature fluidized bed [D16].

E. Thermal Radiation

An one-dimensional radiation intensity equation in semi-transparent medium was introduced with one side semi-transparent and the other opaque. Inserting the radiation intensities calculated from known temperature field plus some measurement errors in inverse radiation model may lead to the estimation of the temperature field by use of the chained method [E1]. A transmission method combined with the simplified Mie theory has been introduced to predict the complex refractive indices of small particles [E2]. A new kind of blackbody radiation source with simple construction and easy operation was developed. Analytical and experimental results showed that it is possible to construct a blackbody radiation source with total and spectral emissivities greater than 0.99 [E3]. A series of cross-shaped radiative elements was proposed for the combined augmentation and interaction of radiation and convection in a high temperature airpreheater [E4]. Two dimensional transient turbulent free convection-surface radiation interaction was studied numerically in a open square cavity with a heated back wall and insulated top and bottom walls. Results indicated that the radiation can significantly affects the convection flow and heat transfer at the later evolution stage [E5].

F. Mathematical Simulation and Modeling

The rationality of the additional source term method (ASTM) has been proved and its application have been extended to determin the efficiency of slotted fin [F1]. Simplification and discretization in numerical simulation of fluid flow and heat transfer for injection molding process were discussed and some suggestions were presented for improving the calculation accuracy and raising the computation rate [F2]. A mathematical model with the through-flow calculation for studying the effect of injected cooling air on turbine performance was presented. The effects of three types of cooling on

the aerodynamic performance of an air-cooled gas turbine were analyzed and compared [F3]. Numerical studies were reported on the fluid flow and heat transfer in a commercial finned tube using the turbulent model from Patankar. The results in both pressure drop and heat transfer coincided well with the existing experimental data [F4]. Numerical analysis of the natural convective problem in trapezoidal enclosure was conducted by using the upwind finite element scheme with non-symmetric weighting function. Special techniques, including the underrelaxation, the floating of the vorticity boundary condition and the alternation of the mesh grids in computation proved to be effective [F5]. A distributed parameter model was introduced to mathematically simulate and model for geothermal reservoir in China, which is a liquid-dominated one with a two-phase zone on the top, the influence of two different reinjection schemes have been taken into account, including the subsequent temperature decline due to reinjection [F6]. Method was reported for mathematical simulation of the temperature field in solidified heavy steel ingots so as to predict the possible defects due to shrinkage cavity and porosity [F7].

G. Heat and Mass Transfer in Porous Medium

A near wall function was suggested for forced convective heat transfer in a vertical annulus filled with porous media and checked through experimental data correlation [G1]. The enthalpy form of energy equation with a proposed transfer scheme was used for numerical study of freezing and moisture migration around a circular cylinder buried in unsaturated porous media. The results show that the moisture migration has an evident effect on the freezing process [G2]. Natural convection around a horizontal, isothermal cylinder in an infinite, fluid saturated porous medium was modeled analytically using the Darcy/non-Darcy flow model. The two-dimensional flow and temperature fields were determined for modified Rayleigh numbers ranging from 0.1 to 10. Local and average Nusselt numbers were given as functions of the modified Rayleigh numbers [G3, G4]. The conjugate diffusion model has been extended to the period of decreasing drying rate for predicting the heat and mass transfer, and it is available to determine the onset of the dry region by analysis of process [G5]. Experimental study was conducted on pool boiling on porous surfaces with micro-grooves and some special features of heat and mass transfer were revealed [G6]. Analytical and experimental results were reported on phase change in a rectangular enclosure filled with the saturated

porous medium and heated with uniform heat flux from the vertical side. It showed that the liquid side Stephan number has a profound effect on the heat transfer [G7]. A evaporator model of a porous wall/ micro-thermosyphon was used for analyzing two-phase flow and boiling heat transfer within powder porous layers at pressures above atmosphere. Based on experimental data a correlation was established to predict the performance of boiling heat transfer [G8]. The minimum gradients assumption was adopted to describe quantitatively the hysteretic behavior of capillary liquid flowing and heat transfer in unsaturated porous medium. This method can be applied to more complicated situations, such as the cases of variable volume/shape of solid matrix with the temperature and moisture [G9]. Thermal characteristics and the conductivity of flat screen porous media were studied experimentally by using a transient model of combined conduction and radiation with optically thick approximation. As compared with the steady state method it has advantages of simple measurement device, reduced measurement time and high accuracy [G10]. The experimental and analytical investigations have been conducted to understand the heat flux limit and critical heat flux of boiling heat transfer in a porous bed. Two correlations for calculating these two heat fluxes were proposed [G11]. The natural convection in a porous enclosure was investigated due to the combined driving forces resulted from the horizontal temperature and concentration gradients. With the penalty finite element method, the flow and heat/mass characteristics were analyzed in detail for various cases [G12].

H. Heat Transfer Enhancement and Heat Exchangers

A physicomathematical model with distributed heat sink was given for the turbulent convective heat transfer of air-water mist flow along a dry isothermal flat plate. As the result of an approximate solution of the integral equations, a practical semi-empirical dimensionless relation was established for predicting the heat transfer enhancing factor [H1]. Experimental study was performed on heat/mass transfer and pressure drop in a triangular-rib-roughened rectangular channel [H2]. Experimental results of heat transfer and flow resistance in some triangular and rectangular ducts with air and butyl alcohol as working medium were presented and compared with results from four roughened passages with ribs or rib-grooves on the wall [H3]. Measurements of heat transfer coefficients in a blade midchord convergent cooling passage were performed for walls

with a single film cooling hole, multiple holes and combination of ribs with holes. Thermochromic liquid crystals were used as high resolution surface temperature indicators to provide detailed local heat transfer coefficient and enhancement factor [H4]. Experiments on the flow resistance and heat transfer of the forced upward flow in an internal three-dimensional spin-fin tube at moderate pressures were reported with water as working fluid at Reynolds numbers ranging from 4×10^4 to 2×10^6 and at pressures ranging from 33×10^5 Pa to 41×10^5 Pa. The correlations for the flow resistance and heat transfer were established and compared with that from other typical enhanced tubes [H5]. The heat transfer rate of a single liquid droplet of water, ethanol and F-113 impinging on a hot solid surface has been investigated experimentally. The effects of impinging velocity, wall temperature and impinging angle on the heat transfer rate were examined. By use of convolution principle, the transient surface heat flux was calculated from the measured surface temperature [H6]. An experimental investigation on average and local heat/mass transfer characteristics of a jet impinging on a screen-line rectangular cavity was conducted by means of naphthalene sublimation technique. The response of Sherwood number on bottom surface to the jet exit Reynolds number was examined [H7]. Single-phase liquid jet impingement was studied experimentally for simulated microelectronic chips and its recovery factors were obtained [H8]. An experimental study has been carried out for the forced convection heat transfer in non-Newtonian fluid in a small scale square duct at low Reynolds numbers. When the apparent Reynolds number $Re > 11.5$, the non-Newtonian fluid starts to enhance the convection heat transfer depending on the Reynolds number, while friction factors of fluid are almost unaffected by the viscoelasticity [H9]. Flow patterns and their transitions on the shell-side of a segmentally baffled horizontal heat exchanger were studied experimentally. A dimensionless correlation was obtained for predicting flow regime transitions of air-water mixture flow in shell-and-tube exchangers [H10]. Experimental results on air side heat transfer and friction factor were reported for plate fin-and-tube heat exchangers in a wide range of Reynolds numbers. The results showed that the enhancement of heat transfer of slotted plain fin may be as high as 70%-80% compared to the plain plate fin [H11]. A concept of temperature difference field in heat exchangers was developed and a uniformity factor of temperature difference field was defined to measure the degree of uniformity. It was found that the more uniform the temperature difference field, the higher the heat exchanger effectiveness at the given number of heat transfer units and thermal capacity rate ratio [H12]. Based on the uniformity principle of temperature difference field a more vivid nonuniformity factor was recommended and applied to the analysis of multipressure condenser's performance. The optimum distribution of heat exchanger surface over the pressure

zone for multipressure condensers was determined [H13].

I. Biological and Cryogenic Heat Transfer

The analytical studies of bioheat transfer was briefly reviewed and an analytical solution on the one-dimensional steady state temperature field of biotissue in vivo for second boundary condition was presented. The predicted results have been checked by experiments [I1]. The basic equation for biomedical heat transfer was analyzed. Based upon the porous medium model a corresponding equation has been proposed [I2]. It provides a hopeful prospect for determining the thermophysical properties of bio-tissue in vivo and a new technique for measuring the thermophysical properties and blood flow velocity of tissue in vivo has been developed [I3]. Analytical and experimental investigation were conducted for the prediction of critical cooling rate, which is significant for the citrification of cryoprotective solutions [I4]. The transient temperature field around a cryoprobe was investigated by applying the enthalpy model to solve the nonlinear bioequation and then the shape, growth rate and ultimate size of the cryolesion can be determined, which provide the fundamental information for cryosurgery [I5]. The boil cooling process of micro-samples quenched into saturated liquid nitrogen was studied on the experimental set-up equipped with a high speed data acquisition system. Four distinct regions of boiling curve measured by quenching method was discussed [I6].

J. Measurement Techniques

The surface temperatures of semiconductor devices were measured by means of micro-thermal video system and their body temperatures were obtained by numerical calculations. It was seen that the thermal contact resistance plays an important role in chip temperature rise [J1]. An image processing technique was developed for measuring the luminous-flame temperature distribution [J2]. A special pipe line, in which an upward inclined pipe was connected with a steeply downward pipe by an elbow, was used to produce slug or plug flow in the upward pipe and break up the film flow at the elbow. The slug flow velocity and the time fraction were measured by two bubbly flow void fraction sensors mounted on the upward pipe near the elbow [J3]. A periodic heat flow method for measuring diffusivity was developed using a laser beam as a periodic heat source. Diffusivities of stainless, molybdenum and copper films with the thickness ranging from 30-100 μ m were measured. Some effects such as heat loss and edge effect were discussed [J4]. Experiments were conducted for test method of thermal property of thin materials. Some improvements were made in setting the measuring point, reduced pendant thermal resistance and the determi-

nation of the thickness in order to raise the accuracy of measurements [J5]. An adiabatic calorimeter based on quasi-steady method for measuring the true specific heat of underground oil rocks in the range of 300-55K has been designed and constructed. The special features of this apparatus are fast measuring, easy replacement of sample, high accuracy of measurement and having a result indicator [J6]

BIBLIOGRAPHY

Abbreviations: JETP---J. Engineering Thermophysics (in Chinese, with English abstract); TPST---Transport Phenomena and Heat Transfer Science and Technology 1992, (in English) edited by Wang, B. X.

[A1] Zhao, X. L., et al, Infrared Thermovision Examination of Contact Thermal Resistances in Composite Materials, 1992, TPST, pp. 137-142.

[A2] Lin, Z. Z., Wang, B. X. and Fan H. W., A Method for Measuring Thermal Conductivity of Composite Plate by Infrared Thermovision, in Thermal Conductivity 22, edited by T. W. Tong, Technomic Pub. Co., Lancaster, 1994

[A3] Jiang, R. Q and Liu, S.L., Theoretical Analysis of Heating Semi-Infinite Object with Impact Thermal Stress, 1993, JETP, vol. 14, No.4, pp. 429-433

[A4] Guo, Z. Y. and Xu, Y. S., Non-Fourier Heat Conduction in IC Chips, 1992, Proceedings of 3rd Intersociety Conference on Thermal Phenomena in Electronic Systems, Austin, Texas, pp. 271-275

[A5] Xu, Y. S., and Guo, Z. Y., Analysis of Thermal Breakdown in Semiconductor Devices, 1993, JETP, vol. 14, No.3, pp. 298-302

[A6] Chen, D., Ren, H. S., Hua, T. C., The Hyperbolic Heat Conduction Equation for Verification of Bio-Specium in the Ultra-Rapid Cooling Process, 1993 Cryo-Letters, V. 14, pp. 97-102.

[A7] Zhang, H. J., Non-Quasi-Steady Analysis of Heat Conduction from a Moving Heat Source, 1991, JETP, vol. 12, No.3, pp. 294-299

[B1] Lin, Z. Z., Wang, B. X. and Xu, J. Y., A Method for Researching Natural Convection from a Non-isothermal Vertical Plate by Infrared Thermovision, 1991, Int. J. Heat Mass Transfer, vol.34, No.11, pp. 2813-2818

[B2] Lin, Z. Z., Lu, G. M. and Wang, B. X., Prediction of Air Temperature Field for the Natural Convection Along a Vertical Plate with Discrete Heat Sources, 1992, TPST, pp. 182-185

[B3] Yang, M., and Tao, W. Q., A Numerical Study of Natural Convection Heat Transfer in a Cylindrical Envelope with Internal Concentric Slotted Hollow Cylinder, 1991, Numerical Heat Transfer, vol.22, Part A, pp. 289-305

[B4] Zhang, H. L., Wu, Q. J., Tao, W. Q., Experimental Study of Natural Convection Heat Transfer between Cylindrical Envelope and an Internal Concentric Heated Octagonal Cylinder with and without Slots, 1991, ASME, J. Heat Transfer, vol. 113, pp.116-121

[B5] Shang D. Y. and Wang B. X., Effect of Variable Thermophysical Properties on Laminar Free Convection of

Gas, 1990, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 33, No. 7, pp. 1387-1396

[B6] Shang D. Y. and Wang B. X., Effect of Variable Thermophysical Properties on Laminar Free Convection of Polyatomic Gas, 1991, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 34, No. 3, pp. 749-756

[B7] Shang D. Y., Wang, B. X. and Quan, Y., Study on Liquid Laminar Free Convection with Consideration of Variable Thermophysical Properties, 1993, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 36, No. 14, pp. 3411-3420

[B8] Guo, Z. Y., and Wu, X. B., Thermal Drag and Critical Heat Flux for Natural Convection of Air in Vertical Parallel Plates, 1993, ASME, J. Heat Transfer, vol. 115, pp. 124-129

[B9] Yang, S. M. and Zhang, Z. Z., An Experimental Study of Natural Convection Heat Transfer from a Horizontal Cylinder in High Rayleigh Number Laminar and Turbulent Regions, 1994, Proc. 10th Inter. Heat Transfer Conf., Brighton, vol.7, pp. 185-189.

[B10] Yang, S. M. and Hu, H. S., Experimental Study of the Natural Convection Turbulent Characteristics of Temperature Fields and Heat Transfer in an Enclosure, 1992, JETP, vol.13, No. 2, pp. 171-175

[B11] Jiang, P. X., Ren, Z. P., Wang, B. X., Natural Convection Heat and Mass Transfer of Water at Super-Critical Pressure with Internal Mass Sources, 1994, JETP, vol. 15, No. 1, pp. 62-67

[B12] Wang, Q. J. and Zhang, S. X., Free Convection Heat Transfer from Upward-Facing Small Horizontal Surfaces, 1991, JETP, vol. 12, No. 4, pp. 423-427

[B13] Ren, Z. P. et al, Natural Convection Combined with Radiation on a Non-Isothermal Vertical Flat Plate, 1991, JETP, vol. 12, No. 2, pp. 175-180

[C1] Guo, Z. Y., Thermally Induced Effects on Fluid Flow, 1994, Annual Review of Heat Transfer, CRC Press, vol.V, pp. 207-276

[C2] Xin, M. D. et al, Convective Heat Transfer of Air in Micro-Rectangular Channels, 1995, JETP, vol. 16, No.1, pp. 86-90

[C3] Peng, X. F. and Wang, B. X., Forced Convection for Liquid Methanol Flowing through Microchannels, 1993, J. Thermal Science, Vol. 2, No. 3

[C4] Tao, W. Q. et al, An Experimental Study on Heat/Mass Transfer and Pressure Drop Characteristics for Arrays of Non-Uniform Plate Length Positioned Obliquely to the Flow Direction, 1993, ASME J. Heat Transfer, vol. 115, pp. 568-575

[C5] Lin, C. M., Jin, Y. Y., Chen, Z. Q., Heat/Mass Transfer and Pressure Drop in a Triangular-Rib-Roughened Rectangular Channel, 1994, Int. J. Heat Mass Transfer, vol.15, pp. 486-494

[C6] Wang, B. X. and Liu, T., Experimental Study of Heat Transfer around Heating Spheres in Tandem, 1992, JETP, vol.12, No. 2, pp. 175-180

[C7] Wang, B. X. and Liu, T., Research on Hydrodynamics and Heat Transfer for Fluid Flow around Heating Spheres, in Tandem, 1992, Int. J. Heat Mass Transfer Vol. 35, No. 2, pp. 307-317

[C8] Gu, W. Z. et al, Study of Cooling for Hypersonic

- Inlet, 1994, JETP, vol. 15, No. 2, pp. 173-178
- [C9] Zhang, X. M. et al, A Study for Heat Transfer Relationship of Air Jet Impinging on a Horizontal Rotating Cylinder, 1990, JETP, vol. 11, No. 2, pp. 178-181
- [C10] Luo, D. A. and Gong, M. Q., Heat Transfer, Pressure Drop and Flow Visualization in the Flow cross Chevron and Louver Finned-Tube Banks, 1990, JETP, vol. 11, No. 1, pp. 69-71
- [D1] Peng, X. F. and Wang, B. X., Experimental Investigation on Flow Boiling in Microchannels, 1993, JETP, vol. 14, No. 3, pp. 281-286
- [D2] Peng, X. F., and Wang, B. X., Evaporating Space and Fictitious Boiling for Internal Evaporation of Liquid, 1994, Science Foundation in China, Vol. 2, No. 2, pp. 55-59
- [D3] He, J. L., Ma, T. Z., Zhang, Z. F., Heat Transfer Characteristics in the Evaporator Section of a Two-Phase Closed Thermosyphon, 1992, Proc. of the 8th Int. Heat Pipe Conf., Beijing.
- [D4] Cheng, S. M., Heat Transfer in Laminar Forced Convection Film Boiling on a Horizontal Cylinder, 1990, Chinese J. Engineering Thermophysics, vol. 1, No. 3
- [D5] Shi, M. H. et al, The Bundle Effect of a Horizontal Tube Bundle in Nucleate Pool Boiling Heat Transfer, 1993, JETP vol. 14, No. 2, pp. 181-186
- [D6] Wang, B. X. and Peng, X. F., Rewetting and Flow Boiling Along Hot Surfaces, 1994, Science in China (Series A), Vol. 37, No. 2, pp. 237-246
- [D7] Peng, X. F. and Wang, B. X., Heat Transfer Limit and Non-Equilibrium of Sub-Cooled Turbulent Flow Film Boiling with High Velocity, 1992, JETP, vol. 13, No. 2, pp. 189-194
- [D8] Chen, J. B., Cai, Z. H., Li, M. L., A New Correlation for Flow Boiling Heat Transfer in Horizontal Tubes, 1992, TPST, pp. 374-378
- [D9] Zhou, Y. L., Chen, T. K., Chen, X. J., The Experimental Study of High Pressure Steam-Water two-Phase Flow Instability in Helical-Coiled Tubes, 1992, JETP, vol. 13, No. 1, pp. 57-61
- [D10] Lin, J. F., Surface Materials with Dropwise Condensation Made by Ion-Implantation Technology, 1991, Int. J. Heat Mass Transfer, vol. 34, No. 11, pp. 2833-2835
- [D11] Xu, X. B., Xu, J. J., Yang, S. M., Bifurcation Theory Analysis of Non-Linear Dynamic Instability for Fluid Heated in Natural Circulation Loop, 1994, Proc. of the Inter. Symp. on Heat and Mass Transfer, Kyoto, pp. 61-66
- [D12] Wang, Q. J and Yang, Y. X., Gas-Liquid Two-Phase Flow Characteristics in Horizontal Crossflow across a Tube Bundle, 1994, JETP, No. 1, pp. 62-67
- [D13] Guo, Z. Y. and Lu, D. M., Thermal Mechanism in Gas-Liquid Two-Phase Flow Systems under Heating, 1992, Int. Comm. Heat Mass Transfer, vol. 19, pp. 327-338
- [D14] Zhang, Y. W. and Chen, Z. Q., Effect of Wall Conduction on Melting in an Enclosure Heated at Constant Rate, 1994, Int. J. Heat Mass Transfer, vol. 37, pp. 340-347
- [D15] Feng, L. and Shi, M. H., Local Heat and Mass Transfer between Gas and Solid in CFB, 1994, JETP, vol. 15, No. 4, pp. 419-424
- [D16] Li, H. S. and Qian, R. Z., Local Heat Transfer Coefficients around a Horizontal Tube in a High Temperature Fluidized Bed, 1992, TPST, pp. 319-321
- [E1] Tan, H. P. and Yu, Q. Z., The Inverse Problem of Radiation Transfer Equation and Numerical Simulation in Semi-Transparent Medium, 1995, JETP, vol. 16, No. 1, pp. 75-80
- [E2] Yu, Q. Z., et al, A Transmission Method to Determine Complex Refractive Indices of Small Particles 1993, Chinese J. of Infrared and Millimeter Waves, vol. 12, No. 5, pp. 389-396
- [E3] Yao, C. C., Ge, X. S., Cheng, S. X., The Research on a New Kind Blackbody Radiation Source, 1991, JETP, vol. 12, pp. 164-168
- [E4] Zhong, Z. Y. and Yu, J., Comprehensive Augmentation Heat Transfer of Both Radiation and Convection with Cross-Shaped Radiative Elements, 1991, JETP, vol. 12, No. 3, pp. 289-293
- [E5] Lin, C. X. and Xin, M. D., Transient Combined Turbulent Free Convection and Radiation in an Open Cavity, 1992, JETP, pp. 569-573
- [F1] Tao, W. Q., and Luo, S. S., Numerical Method for Calculation of Slotted Fin Efficiency in Dry Condition, 1994, Numerical Heat Transfer, Part A, vol. 26, No. 3, pp. 351-362
- [F2] Zhang, Z., Improvement of Numerical Simulation of Heat Transfer and Fluid Flow in Injection Molding Process, 1992, TPST, pp. 860-865
- [F3] Yang, H., Wang, Z. Q. and Feng, G. T., A Study on the Mathematical Model and the Algorithm of the Cooling Air Mixing in Gas Turbines, 1992, TPST, pp. 848-853
- [F4] Zhang, Z. and Zhang, S. P., Numerical Analysis of Fluid Flow and Heat Transfer in a Thick Finned Tube, 1994, JETP, vol. 15, No. 4, pp. 430-434
- [F5] Chen, S. N. and Liang, X. F., Finite Element Analysis of Natural Convective Heat Transfer in Non-Conventional Enclosure, 1990, JETP, vol. 11, No. 4, pp. 426-428
- [F6] Wang, B. X. and Hu, B. G., Heat and Mass Transfer in Geothermal Reservoir and Response to Production, 1994, JEPT, Vol. 15, NO.3, pp. 292-297
- [F7] Liu, Z., Zhao, Y. et al., Mathematical Modeling of Temperature Field for Solidification of Heavy Steel Ingot and Prediction of Shrinkage Cavity and Porosity Defects, 1993, J. Iron and Steel Researches (in Chinese), vol.5, No.1, pp. 23-32
- [G1] Wang, B. X. and Du, J. H., Forced Convective Heat Transfer in a Vertical Annulus Filled with Porous Media, 1993, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 36, No.17, pp. 4207-4214
- [G2] Bian, W. and Wang, B. X., Freezing and Moisture Migration Around a Cylinder buried in Unsaturation Porous Medium, 1992, TPST, pp. 604-609
- [G3] Christopher, D. M. and Wang, B. X., Natural Convection around a Horizontal Cylinder in a Fluid-Saturated Porous Medium Using Fourier Series, 1994, JETP, vol. 15, No. 4, pp. 414-419
- [G4] Christopher, D. M. and Wang, B. X., Non-Darcy

- Natural Convection Around a Horizontal Cylinder Buried Near the Surface of a Fluid-Saturated Porous Medium, 1993, *Int. J. Heat Mass Transfer* Vol. 36, No.15, pp. 3663-3670
- [G5] Yang, S. M. and Wei, Q., A Study of Heat and Mass Transfer to the Period of Decreasing Drying Rate on Convective Drying in Porous Medium, 1994, *JETP*, vol. 15, No. 1, pp. 68-72
- [G6] Lin, Z. P. and Ma, T. Z., Pool Boiling on Porous Surfaces with Micro-grooves, 1994, *Proc. of 10th Int. Heat Transfer Conf.*, Brighton.
- [G7] Dong, Y. B., Ding, Y., Cheng, S. M., Phase Change Heated from Side with Uniform Heat Flux in an Enclosed Porous Medium 1992, *TPST*, pp. 627-632
- [G8] Zhang, H. J. and Jiang, A., Boiling Two-Phase Flow and Heat Transfer within Thin Powder Porous Layer at Super-Atmospheric Pressures, 1994, *JETP*, vol.15, No. 4, pp. 317-321
- [G9] Yu, W. P., Wang, B. X., Shi, M. H., Heat and Mass Transfer for Unsaturated Capillary Flow in Wet Porous Media, 1994, *JETP*, vol. 15, No. 2, pp. 190-194
- [G10] Yang, Q. S., Xu, Z. X., Wang, J., Analysis of Transient Combined Heat Conduction and Radiation Model of Porous Media Insulation, 1992, *TPST*, pp. 663-668
- [G11] Shi, M. H. and Jiang, L. L., The Limiting Heat Flux and Critical Heat Flux of Boiling Heat Flux in Porous Bed, 1990, *JETP*, vol. 11, No. 3, pp. 315-318
- [G12] Chen, B. M. and Fang, Z. H., Double Diffusive Natural Convection in a Porous Enclosure, 1992, *TPST*, pp. 615-620
- [H1] Wang, B. X. and Wang, S. Y., The Turbulent Convective Heat Transfer for Air-Water Mist Flow Along a Dry Isothermal Flat Plate, 1990, *JETP*, Vol. 11, No. 4, pp. 408-412
- [H2] Lin, C. M., Jin, Y. Y., Chen, Z. Q., Heat/Mass Transfer and Pressure Drop in a Triangular Rib-Roughened Rectangular Channel, 1994, *Int. J. Heat and Fluid Flow*, vol. 15, pp. 486-484
- [H3] Zhang, Y. M., Gu, W. Z., Han, J. C., Augmented Heat Transfer in Triangular Ducts with Full and Partial Ribbed Walls, 1994, *AIAA, J. Thermophysics and Heat Transfer*, vol.8, No. 3,
- [H4] Shen, J. R., Heat Transfer Enhancement in a Convergent Passage Using Film Cooling Holes and Combination of Ribs and Holes, 1992, *JETP*, vol. 13, No. 2, pp. 186-190
- [H5] Zhang, H. J. et al, Upward Flow and Heat Transfer in an Internal Three-Dimensional Spine-Fin-Tube at Moderate Pressures, 1993, *JETP*, vol. 14, No. 4, pp. 402-406
- [H6] Shi, M. H and Yu, J., Dynamic Behavior and Heat Transfer of a Liquid Droplet Impinging on a Solid Surface, 1993, *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 6, No. 2, pp. 202-208
- [H7] Li, W. P. and Tao, W. Q., An Experimental Investigation on Heat/Mass Transfer on a Jet Impinging on a Rectangular Cavity, 1992, *TPST*, pp. 904-908
- [H8] Sun, H., Ma, C. F., Nakayama, W., Local Characteristics of Convective Heat Transfer from Simulated Microelectronic Chips to Impinging Submerged Water Jets, 1993, *ASME J. Electronic Packaging* , vol. 115, pp. 71-77
- [H9] Lin, C. X. and Ko, S. Y., Heat Transfer Enhancement in Non-Newtonian Fluid in a Square Duct., 1994, *JETP*, vol. 15, No. 3, pp. 298-303
- [H10] Wang, Q. J. et al, Two-Phase Flow Patterns and Their Transitions on the Shell-side of a Segmentally Baffled Heat Exchangers, 1992, *TPST*, pp. 930-935
- [H11] Xin, R. C. et al, Heat Transfer and Pressure Drop Measurement on Four Types of Plate Fin-and-Tube Heat Exchangers, 1992, *TPST*, pp. 942-947
- [H12] Guo, Z. Y. et al, The Effects of Uniformity of Temperature Difference Field on Thermal Performance of Heat Exchangers, *Proc. of 10th Int. Heat Transfer Conf.*, Brighton, pp. 381-386
- [H13] Yang, S. R. et al, Analysis of Multipressure Condensers by Uniformity Principle of Temperature Difference Field ,1993, *JETP*, vol. 14, No. 3, pp. 312-316
- [I1] Wang, B. X. and Wang, Y. M., Analytical and Experimental Study of One-Dimensional Steady State Temperature Field in Cartesian Coordinating System of Biotissue in Vivo, 1995, *JETP*, vol, 16, No. 1, pp. 65-69
- [I2] Wang, B. X. and Wang, Y. M., Study on the Basic Equation of Biomedical Heat Transfer, 1992, *TPST*, pp. 773-778
- [I3] Wang, B. X. and Wang, Y. M., Technique for Measuring the Thermal Conductivity and Diffusivity of Biotissue in Vivo, in *Thermal Conductivity 22*, ed. by, T. W. Tong, Technomic Pub. Co., Lancaster, 1994
- [I4] Ren, H. S. and Hua, T. C., The Crystallization Kinetics and the Critical Cooling Rate for Vitrification of Cryoprotective Solutions, 1990, *Cryogenics*, vol. 30, pp. 536-540
- [I5] Jiang, X. H. et al, Investigation on the Temperature Field around a Cryoprobe via Enthalpy Model, 1993, *JETP*, vol. 14, No. 3, pp. 288-292
- [I6] Yu, G. X. and Lin, P. W., Experimental Research on the Cooling Process of Micro-Samples Quenched into Saturated Liquid Nitrogen, 1992, *TPST*, pp. 784-789
- [J1] Zhu, D. Z. et al, Thermal Measurement and Analysis of Small Scale Object, 1995, *JETP*, vol. 16, No. 1, pp. 96-100
- [J2] Wang, B. X., Li, T. D. and Wu, Z. S., The Image Processing Technique Used for Luminous-flame Temperature Distribution Measurement 1990, *Chinese J. Engg. Thermophysics*, Vol. 2, No. 2, pp. 243-247
- [J3] Luo, R., Yang, X. Y., Wang, Z., A New Method for Measurement of Gas-Liquid Flow Volumetric Rates, 1992, *TPST*, pp. 1042-1047
- [J4] Gu, Y. Q. et al, Thermal Diffusivity Measurements of Thin Films by Means of Periodic Heat Flow Method , 1993, *JETP*, vol. 14, No. 2, pp. 188-192
- [J5] Yao, Y. Y., Experiments for Test Method of Thermal Property of Thin Materials, *JETP*, vol. 13, No. 1, pp. 76-80
- [J6] Chen, Z. S. et al, An Adiabatic Calorimeter Based on Quasi-steady State Method in the Range of 300-500K, 1990, *JETP* vol. 11, No. 3, pp. 310-314

A Survey of Thermal Engineering Research Activity in Korea

Jae Min HYUN

Dept. of Mechanical Engineering
Korea Advanced Institute of Science & Technology,
Taejon 305-701, SOUTH KOREA

1. Introduction

Making a survey of the present status of thermal engineering research in a country is certainly no easy task. More than anything else, it is not altogether clear to what extent and on what basis such a scanning should be conducted. Thermal engineering, as we are well aware, encompasses broad spectra, covering the fundamental scientific aspects as well as the application-oriented disciplines of highly practical endeavors. When one is about to assemble pertinent information, one realizes that a status report of this type can never be completely objective. Faced with a simple demand that some kind of survey, although imperfect, should be produced, it has been decided that arbitrary criteria could be established to proceed with the project.

In an effort to portray the outlines of current status of thermal engineering research in Korea, data have been compiled from three major engineering journals in Korea, i.e., the transactions of Korean Society of Mechanical Engineers, the Journal of Air Conditioning and Refrigeration Engineers of Korea, and the Journal of Korean Institute of Chemical Engineers. A list has been made of the titles and authors' affiliations of the research articles in the above three publications. These are printed in the Korean language, although the majority of the references cited are in foreign languages. In order to emphasize the present state of affairs, the articles of the past three years (1992-95) have been

targeted for this list.

I have to be quick to point out that the list thus obtained represents only a partial coverage of the current research activities of Korea. It is stressed that significant portions of the research output now find their appearance in non-Korean (international) journals and proceedings. Such research papers are therefore excluded from the present survey. Also, there is a trend in recent years in Korea that thermal engineering research projects are multi-disciplinary and large-sized. The results of such long-term, huge undertakings are oftentimes summarized in the form of project reports, rather than published in the open literature. Consequently, the present survey does not touch upon these recent overgrown-sized thermal engineering research projects.

One important, but difficult, question in a survey is how the quality of an individual research work can be assessed. It will be desirable if we could sift through these research articles and evaluate the merit and scope of contribution of each paper. However, in view of the fact that quality appraisal of individual papers is impracticable, only a superficial statistical sorting job has been done in the present survey. Despite all these shortcomings, it is hoped that a rudimentary outline can be drawn of the depths and widths of the present research activities in the realm of thermal engineering in Korea. It is added that I am apologetic to those researchers whose contributions might have accidentally been missed

in this survey.

Before proceeding further, a declaration is made that the present survey does not necessarily reflect the views of any organizations or institutions. It is simply a task performed by my own personal initiatives, and it does not bear official recognitions of any groups or establishments.

2. Research organizations and specializations

There could be several ways to illustrate the findings of the survey. One main motivation of the survey is to provide baseline information for future interactions and cooperations between thermal engineers in this part of the globe. In line with this spirit, the findings are arranged in a format which would describe the nature of the research and the individual research organizations concerned. The names of the researchers are omitted in light of the space limitations.

KAIST(韓國科學技術院) (大田)

Combustion (Radiative & conductive transfer, boiling, incinerator design, combustion technologies, mass transfer)
Turbulent heat transfer, turbo-machinery
Multi-phase (liquid spray) transfer
Heat engine (heat pump)
Convective heat & mass transfer
Energy technologies (radiation, thermal convection)

Seoul National University (Seoul)

Combustion (flame diffusion, turbulence)
Heat engine (diesel engine)
Convective transfer (stability, natural convection, porous mass transfer, two-fluid convection, Mixed convection, low-

temperature natural convection, laminar heat transfer, convection in an enclosure)

Energy (co-generation, gas turbine, combustion, optics)

KIST (韓國科學技術研究院) (Seoul)

Combustion (combustion of used tires, delayed ignition)

Turbulent heat transfer

Heat engine (stirling cycle)

convective heat transfer (porous media, pipe flow)

KIMM (韓國機械研究院) (大田)

Combustion (droplet vaporization, ignition)

Heat engine (gasoline engine)

Heat transfer (jet impingement, image processing)

ADD (國防科學研究所) (大田)

Combustion (propulsion systems, solid propellant)

Heat engine (heat exchanger, internal combustion engine)

Convective heat transfer (radiation)

産業科學技術研究所 (Seoul)

Combustion (furnace technologies)

韓國Energy技術研究所 (大田)

Combustion (coal-burning)

Multi-phase (steam technologies, desalination)

Energy (evaporation, capillary, porous media)

Environment (large-scale environmental chamber, individualized air conditioning)

Convection (thermo-electric conversion)

韓國動力資源研究所 (大田)

Combustion (municipal incinerator, heat exchanger)

Turbo machinery (blade cooling)

韓國Gas公社研究所

Combustion (optics application)

韓國原子力安全技術院

Multi-phase (stability)

韓國電力

Multi-phase (steam technology, desalination)

Convection (natural convection, internal heat generation)

生產技術研究院

Multi-phase (performance evaluation of air-conditioner, refrigerator)

Convection (cooling systems)

西江大學校 (Seoul)

Combustion (fluidized bed)

Energy (refrigeration cycle)

高麗大學校 (Seoul)

Combustion (gas diffusion flame, coal-burning)

Heat engine (gasoline engine)

慶熙大學校 (Seoul)

Combustion (mixing technology, ignition)

Multi-phase (counter-current flow)

仁荷大學校 (仁川)

Combustion (coal-burning, mixture burning)

Turbulent heat transfer

Convection (porous media)

成均館大學校 (Seoul)

Combustion (lean-burning, flame promoter)

Multi-phase (evaporation)

Convection (natural convection, stability theory)

Energy (energy-saving construction, solar energy)

漢陽大學校 (Seoul)

Turbo machinery (blade cooling, convection)

Convection (convection in enclosure, heat & mass transfer in evaporation, spray)

Combustion (pulsating heat transfer, blade

cooling)

Turbulent heat transfer (film cooling, blade)

崇實大學校 (Seoul)

Combustion (Schlieren technique)

國民大學校 (Seoul)

Turbulent heat transfer (natural convection, internal heat generation)

韓國航空大學校 (Seoul)

Heat engine (heat exchanger, propulsion)

延世大學校 (Seoul)

Convection (heat exchanger, fluidized bed, porous medium)

Material processing (CZ crystal growth)

Heat engine (heat exchanger, internal combustion engine)

建國大學校 (Seoul)

Heat engine (diesel engine, combustion)

中央大學校 (Seoul)

Heat engine

Combustion

陸軍士官學校 (Seoul)

Convection (plume, heat transport)

Energy (heat pump, dryer)

東國大學校 (Seoul)

Radiative heat transfer

Heat transfer enhancement

弘益大學校 (Seoul)

Multi-phase (film boiling, interface)

嶺南大學校 (大邱)

Combustion (temperature measurement)

Heat engine (engine cycle, thermodynamics)

Convection (numerical technical techniques, natural convection)

釜山大學校 (釜山)

Combustion (gas turbine, burner, fluidized bed, coal-burning)

Turbulent heat transfer

Heat engine (heat exchanger, LDV, gasoline

engine, diesel spray)
東亞大學校 (釜山)
 Combustion (liquid drop evaporation)
 Convection (fin, natural convection)
浦項工科大学校 (浦項)
 Combustion (furnace technology)
 Experimental techniques (jet impingement,
 image processing)
韓國海洋大學校 (釜山)
 Heat engine (MHD, plasma)
 Heat exchanger
慶尙大學校 (慶南)
 Heat engine (VM heat pump, regenerator,
 insulation techniques)
昌原大學校 (慶南)
 Diesel engine, Combustion
錦烏工科大学校 (慶北)
 Thermal power (thermohydraulic)
 Heat transfer (mixed natural convection,
 radiative transfer)
釜山水産大學校 (釜山)
 Heating & Refrigeration
慶北大學校 (大邱)
 Convection (low-temperature natural
 convection)
安東大學校 (慶北)
 Low-temperature natural convection
慶北産業大學校 (慶北)
 Convection (plume)
全北大學校 (全州)
 Mixed convection
順天大學校 (全南)
 Forced convection
群山水産專門大學 (全北)
 Combustion (laser applications)
朝鮮大學校 (全南)
 Multi-phase (counter - current flow)
 Combustion (laser applications)

木浦大學校 (全南)
 Combustion (laminar flame)
江原大學校 (江原)
 Combustion (Coal-burning)
 Fin heat transfer
忠南大學校 (大田)
 Combustion (Coal-burning)
 Turbulent heat transfer
 Diesel engine
 Solar energy
忠北大學校 (忠北)
 Turbulent heat transfer
 Convection heat transfer
 Thermal storage
忠清專門大學 (忠南)
 Heating (Ondol heating)
大宇自動車
 Electronic ignition
 Combustion promoter
現代重工業
 Natural convection
現代自動車
 Radiative heat transfer
 Combustion promoter
 Schliren photography
三星電子
 Thermal imaging
三星綜合技術院
 Solid propellant combustion
金星社
 Turbulent heat transfer
起亞自動車
 Diesel engine combustion
汎洋冷房工業
 Large - size refrigerator
 Cooling fan
京仁機械
 Cooling tower

Seyoung 空調

Apartment heating

大宇 Carrier

Refrigerant

慶原世紀

Absorption - type , heat pump

金星電線

Absorption - type

3. An overview

As is apparent in the above list, there seem to be several technical subjects under intense study, i.e., various aspects of combustion-related topics, multi-phase heat and mass transfers, practically-oriented heat engines, and air-conditioning and refrigerations. One may say that these are rather conventional technical issues, and the so-called leading-edge technological innovations do not appear to be numerous. A historical summary may be in order.

Substantive research and development activities in thermal engineering in Korea began in early 1970's. This coincides with the period of rapid industrialization, particularly in petrochemical and high-tech heavy industries, in Korea. Also, around this time universities started serious endeavors in post-graduate education in engineering and technology. In this sense, the history of meaningful R&D in thermal engineering covers the past 25 years or so. However, it is important to note that the pace of R&D expansion, in quantity as well as in quality, has been remarkable, and it is further accelerated in recent years.

Another noticeable factor for such a fast-growth research environment is the trained manpower. As indicated earlier, the bulk of R&D workers in Korea tends to be young, the median

profile being probably around 40 years old. A large number of college graduates proceed to post-graduate-level engineering educational institutions, in and out of Korea. The percentage of high-level R&D personnel in Korea is believed to be quite high in comparison to other industrialized nations.

Another thrust is in the direction of globalization. The initial impetus of research efforts in Korea in early 1970's was carried out mostly by those Korean students who were returning to Korea after having undergone post-graduate trainings in the United States. It was therefore natural that the methodologies and materials of research have been influenced by the teachings and orientations of the U.S. universities. Also, out of a desire to become more "international", emphasis was placed on interactions and cooperations with the international research communities. Let's take an example of KAIST. From its inception more than twenty years ago, KAIST has had a firm and unquestioned policy on the acceptance of a Ph. D. dissertation. The requirement is that, in order to present a qualified Ph. D. thesis, parts or the whole content of a Ph. D. thesis should have been published (or accepted) in an internationally-recognized professional archive journal. One may argue the merit of such a policy, however, this academic regulation has helped uphold the scholastic tradition of KAIST and gain a footing in the international science & technological theaters.

In summary, R&D in thermal engineering in Korea is still in a developmental stage. However, it is stimulating that the major work force is relatively young and motivated. There also is a growing tendency to diversify the international contacts, apart from the once-dominant liaison with the U.S. institutions.

Finally, in an effort to depict the cross-section of the most current thermal engineering research, the titles of the papers presented at the 1995 Spring Meeting of the Korean Society of Mechanical Engineers are shown below.

1. Transient natural convection cooling in a vertical open top cavity with discrete heat sources.
(慶北大學校)
2. Three-dimensional natural convection cooling of the electronic device with vents.
(漢陽大學校)
3. Natural convection cooling of discrete heat sources located symmetrically in a vertical open top cavity.
(慶北大學校)
4. Weakly nonlinear horizontal layer in a buoyant driven cavity flows.
(電子部品綜合技術研究所)
5. The study on fluid flow and heat transfer around the circular cylinder located on a flat plate in crossflow.
(釜山大學校)
6. A program to predict the performance of condenser coil used in air-conditioner.
(浦項工科大學校)
7. Modeling of the combined mode heat transfer in 3-D furnaces with laminar anisotropic scattering media.
(中央大學校)
8. Heat transfer from a round jet impinging on convex hemispherical surface.
(仁濟大學校)
9. A numerical study on heat and mass transfer in a vertical tube absorber cooled by air.
(生産技術研究院, 漢陽大學校)
10. Development of a P.C. software for design of shell and tube heat exchanger.
(嶺南大學校)
11. Effect of gap width on conjugate heat transfer in cylindrical annulus for an insulated tube.
(東亞大學校)
12. Transient heat transfer in thin films.
(嶺南大學校)
13. A study on the radiative heat transfer of compressible turbulent flow in a backward facing step.
(KAIST)
14. Light scattering and absorption by a radially inhomogeneous sphere.
(弘益大學校)
15. Cusp magnetic field applied Czochralski method analysis simulating radiative heat transfer.
(浦項工科大學校)
16. Analysis of equation of transfer using finite volume method and its application.
(KAIST)
17. Analysis of particle deposition in the flow past a circular cylinder including the effect of radiative heat transfer.
(Seoul大學校)
18. Heat transfer and pressure drop with the turbulence promoter in a vertical PCB channel.
(萬都機械, 漢陽大學校, KIST)
19. A study on the heat transfer characteristics of closed two-phase thermosyphon with small tilt angle.
(成均館大學校)
20. A experimental study for the effect of an electric field on boiling heat transfer of R113+wt4% Ethanol.
(中央大學校)
21. Prediction of R-22 condensation heat transfer

- coefficient inside horizontal tube in annular flow regime.
(嶺南大學校, 安東專門大學)
22. A study on condensation heat transfer enhancement of low-finned tubes.
(仁川大學校, 大宇自動車, 錦烏工科大学校)
23. The analysis of flow and transient heat transfer for 2-cylinders with heat generation.
(現代自動車, 高麗大學校)
24. Numerical analysis on the fluid flow and heat transfer around two tandem cylinders in the presence of an oscillating flow.
(釜山大學校, 韓國重工業)
25. A numerical study of jet impingement for turbine blade cooling.
(大宇自動車, 中央大學校)
26. Study for a secondary air affecting fluid flow in a solid waste incinerator.
(公州大學校)
27. A study on turbulent flow and heat transfer in the roughened concentric annuli with uniform wall heat flux.
(慶尙大學校, 釜山大學校)
28. A numerical study on the effect of turbulence models on the cold flow patterns in an entrained flow gasifier.
(韓電技術研究院, 韓國ENERGY技術研究所)
29. Particle-imaging thermometry and velocimetry (PITV); simultaneous spatial temperature and velocity measurement of a vertical buoyant jet.
(海洋大學校)
30. A study on the natural convection flow measurements using multiple exposure particle image analysis.
(大宇重工業, 國民大學校)
31. A study on tomographical transformation of liquid spray structure for 2 hole nozzle by multiangular scanning.
(Seoul大學校)
32. An experimental study of heat transfer and particle deposition during the outside vapor deposition process.
(Seoul大學校)
33. Evolution of the particle size distribution during the flame synthesis of the fine particles.
(Seoul大學校, 延世大學校)
34. Analysis of solute redistribution during solidification of a binary metal alloy by the integral approximation.
(崇實大學校)
35. Erosion characteristics of in-bed tubes in fluidized bed cold mode reactor.
(韓國ENERGY技術研究所, 忠南大學校)
36. Analysis of combined thermocapillary flow with rotation in a cylindrical liquid column.
(韓國電力技術(株), 高麗大學校)
37. Three dimensional analysis of in-cylinder flow and combustion in a direct injection diesel engine.
(浦項工科大学校)
38. Discussions on the combustion response function of solid propellants.
(國防科學研究所)
39. Flame structure and NOx emission characteristics of natural gas.
(Turbo 動力機械研究 Center, Seoul大學校)
40. A study on the stabilization characteristics of the diffusion flame with the auxiliary fuel injection.
(韓國原子力研究所, 全北大學校)
41. Numerical study of swirling turbulent reacting flows.
(漢陽大學校, 韓國機械研究院)
42. Design and testing of an annular combustor for aircraft turbo-fan engine.
(韓國航空宇宙研究所)

43. The exhaust gas liquefaction system of the closed cycle heat engine operating in underwater.
(蔚山大學校, Seoul大學校)
44. A new approach of exergoeconomic analysis of thermal systems.
(中央大學校, 曉星重工業)
45. A study on the design of high-temperature superconductor current leads.
(全南大學校)
46. A study on the characteristics of radical luminous intensity and flame structure of turbulent diffusion flame.
(釜山東義工業專門大學, 釜山大學校)
47. Characteristics of lean burn by multi spark capacitor discharge ignitor for engine.
(仁德專門大學, 起亞自動車, 成均館大學校)
48. A study on the characteristics of mixtures and flame scale.
(釜山大學校)
49. An one-zone heat release analysis of 6 cylinder compression-ignition engine.
(延世大學校)
50. Effects of discharge energy characteristics of high frequency ignition system(HIS) and flow on the ignitability.
(東亞大學校)
51. A study on the combustion characteristics of methane/hydrogen-air mixtures.
(江原大學校, 九州工業大學)
52. A study on the development of high efficiency type heat pump.
(釜山水產大學校, KIMM)
53. The performance analysis of the refrigeration system using alternative refrigerant HFC-131a.
(嶺南大學校)
54. Evaporative heat transfer of refrigerants inside a tube heated by a fluid.
(Seoul大學校)
55. A study of receiver dryer for automotive air-conditioning system.
(大宇電子, 自動車部品研究院, 慶熙大學校)
56. Effect of design factors on frost formation of fin-tube heat exchanger.
(漢陽大學校)
57. A study on the heat recovery from boiler exhaust gas with combined system of direct contact heat exchanger & heat pumps.
(韓國ENERGY技術研究所, 忠北大學校)
58. Droplets behavior characteristics in sprays/spray flames of non-swirling and swirling air blast nozzle using phase/Doppler technique.
(釜山大學校)

第32回日本伝熱シンポジウムを終えて

準備委員長 宮本 政英（山口大学工学部）

本シンポジウムは、講演発表件数 432 件、参加登録者数 941 人（一般 606、学生 335）と近年最大の規模となり盛会裏に無事終了致しました。ご参加いただきました皆様を始め、ご支援ご協力を頂きました各位に心から御礼を申し上げます。日本伝熱学会最大の年中行事であります本シンポジウムを、山口県内において開催するに当たりましては、適切な会場を探すこと、少ない関係者によって準備委員会を構成しなければならないことなど多くの難題を抱えて出発をいたしました。

講演会場の決定には、準備委員会を置いた山口大学工学部から遠く準備をするには不便でありましたが、周辺の雰囲気も良く参加者に最も喜んで貰えそうであることから山口市内とし、費用の点から公共施設である教育会館と社会福祉会館を使うことにしました。会場が二つの建物に分かれ参加者には多少のご不便をお掛けしましたが、開催期間中二日目の午後には小雨を見た程度で天候に恵まれ、新緑の季節でもあり緑に包まれた会場はシンポジウムにふさわしく大変好評のようでありました。

準備委員会は伝熱学会員も少ない一地方大学が中心にならなければならず、しかも学校行事の最も多い時期にシンポジウムの仕事が集中することもあって実際に動ける方が少ないため、出来るだけ例年通りの仕様とし仕事量を減らし、簡素なシンポジウムにすることを当初から考えておりました。しかし、実際には執筆要領等仕様の変更、前日のプレシンポ・伝熱レクチャーコースや、一般講演の他にオーガナイズドセッション、外国人による特別セッション、更に特別講演会やカルチャープログラムが実施され、例年以上に盛り沢山な内容になりました。講演室も当初予定の7室では足りず8室になりました。これだけの豊富な内容のシンポジウムを成功裏に開催できましたのは、準備委員会スタッフの献身的な努力

とチームワークによるところも大であります。プレシンポと特別セッションを企画運営された日本伝熱学会企画部会、オーガナイズドセッションを担当された伝熱学会各研究会の先生方のご努力の賜であります。

準備委員会の構成は、企画・プログラムを加藤先生、会場・運営を栗間先生、懇親会・旅行を西村先生、総務・会計を和泉先生と宮本が担当し、これら山口大学の関係者にご活躍いただきました。開催日当日には山口大学のみでなく県内の宇部高専、水産大学の先生方にもご支援をお願いしました。日頃伝熱学会と無縁な方にも仕事をお願いしましたが、補助する者のほとんど居ない状態で各準備委員には相当に過酷な仕事をこなしていただきました。

論文集の総重量は約 5 トン、この内の約 2.3 トンを会場に運びました。物量と処理すべきデータ量の多さは大変なものでしたが、学生さん達を動員する人海作戦によってこれらをこなすことができました。真面目に良く手伝ってくれた学生さん達にはあらためて感謝をしております。シンポジウム全般について手作りし簡素を旨とし費用を切り詰める努力をしましたが、例年のシンポジウムよりアルバイト料等、謝金が多少多めになる点は、やむを得ないと思っております。

シンポジウムが山口県内で開催されるのを機会に、県内の企業に伝熱学会への関心を持って貰うことを意図して 50~60 社に特別に御参加の案内をし、数社からあわせて十数人程度の御参加をいただきました。地元企業からは必ずしも予期した通りの参加者数ではありませんでしたが、今は不況の時期でもあり今後の努力が必要であると思っております。

最後に、本シンポジウムを成功に導いていただいた多くの関係各位にあらためて御礼を申し上げ報告を終わらせて頂きます。

第32回日本伝熱シンポジウムを終えて

準備委員 加藤泰生（山口大学）

のっけから私ごとですが、第32回日本伝熱シンポジウム・山口が終わって早一ヶ月が経ち、やっと気力、体力とも復調の兆しが現れてきたという感じであろうか。考えてみればおおよそ二年の準備期間、そのうち1年間はほとんど雑務、2月～5月は特に気の抜けない時期だっただけに無理からぬと自分自身納得させている。準備委員の一員としてシンポジウムに携わって如何に伝熱シンポの大変さ、大切さ、裏方の苦勞の大きさ等が身にしみて解ったとともに、今まで、一人の参加者でただ漫然と参加しているだけの自分の考え方も反省させるほどの経験をさせていただいたと思う。

前置きが長くなりましたが、伝熱シンポジウム1準備委員として、思うことなど述べさせて頂いて責任を果たしたいと思う。ご存じのように、平成六年度は伝熱研究会から学会への移行期に当たり、この時期、本シンポジウムの準備がなされたため、早い時期においては、まだ通常講演以外は、目玉を一つ、特別講演か何かで良からうなどとの意見が聞かれた。学会の理事会でもその原案は承認されたと理解していた。しかしそこは学会となった秋以降、雲行きが怪しくなった。というか、やはり学会となったからには、旧来のスタイルを取りつつも新しい試みをいくつか行なおうと学会企画部会で提案され、準備委員会への打診という形で山口へと持ち込まれた。新しいことへ挑戦する事にはいささかの躊躇もないが、この時、場所と時間と人手（アルバイト）がどうなるものが問題となった。特別講演を始めオーガナイズドセッション(4件)、企画部会のプレシンポレクチャー・韓中の伝熱研究の現況、カルチャープログラムなどなど。結果的には、成否は別にして全て実施されたことは、今思えば驚異である。ましてやオーガナイズドセッションを含め432件(札幌401件)の通常講演をこなしながらである。プログラ

ム企画も大変ではあったが、会場の確保から始まる一連の作業は、準備委員長の宮本先生始め会場責任者の栗間先生に負うところ大ではなかったかと思う。企画部会の2件とは裏腹に、オーガナイズドセッション4件は、思った通りの苦勞があった。プログラム企画上、オーガナイズドセッションの体裁をシンポの通常講演の体裁に如何にマッチングさせるかがあったし、また座長、講演者が学会員でない場合があったため、企画後、直接問い合わせが後を絶たなかったし(約束ではオーガナイザーが全て行う手筈だったのだが・・・)、また当日の受け付けでは、オーガナイザーとの2重払いで参加登録料・論文集代の返却など煩わしい事務作業があった。オーガナイズドセッション内での特別・依頼講演は今後の問題ではないかとも思う。

伝熱シンポでの企画プログラムその他を直接担当して思うことは、毎年のことであるこの伝熱シンポでの事務作業の効率化、省力化のために、学会本部主導で伝熱シンポ開催のマニュアル化を図ってはどうか、更にはデータベース、プログラム、著者索引の自動作成等のソフトを供給してはどうかとも思った。各支部を持ち回りで回る現行方式では、8年に1度煩わされるわけだが、それとて、経験無ければ(地方大学が幹事校であればなおさらのこと)戸惑うし決まり切った作業も1からではないだろうか。山口の場合幸いにも過去の経験校に依頼しての資料収集でほんの一部は煩わしさを免れたがまだ多くの作業が残った。現場幹事校の実状もあるので一律にはできないであろうが、学会の主要イベントであるからには、責任の一翼を学会も負うべきと考える。最後に、総合受付で、多くの方に励ましのお声をかけて頂きました。準備委員みんなの献身的苦勞へのいたわりであったものと解釈し有り難くお受けしました。多謝。なお末筆ながら次回新潟の成功を祈ります。

企画部会特別セッション「中国と韓国の伝熱研究の現況」について

森 康彦（慶応義塾大学理工学部）

去る5月に山口市で開催された第32回日本伝熱シンポジウムにおいて表記のような特別セッションが試行され、中国 Tsinghua University（清華大学）の Zeng-Yuan Guo（過 増元）教授と韓国 Korea Advanced Institute of Science and Technology（韓国科学技術院）の Jae Min Hyun（玄 在民）教授による講演が行われた。また、このときの講演に沿ったレビューペーパーを両先生にご執筆いただき、それらは「伝熱研究」本号に掲載されている。これらの経緯について、特別セッションの企画・準備に関わった立場から会員の皆様にご説明申し上げると共に、その過程で直接・間接にご協力いただいた多くの方々にこの場を借りて御礼申し上げることとしたい。

発端は、日本伝熱学会の第32期企画部会において、アジア地域の研究者あるいは研究組織との交流を中・長期的に図っていくことが提案されたことにある（らしい）。続く33期企画部会の中で、伝熱シンポジウムにおいて“特別セッション”を設け、アジアのいずれかの国から来られている研究者にその国の伝熱研究や伝熱研究者の状況等についてお話しいただくという可能性などを具体的に検討するよう、庄司正弘部会長（東京大学）から私にご下命があった。そこで昨年7月に「国際交流（アジア地域主体）に関するアンケート調査」なる書面を全国70名ほどの会員の方々にお送りし、上記の件を含め国際交流についてご意見をお寄せいただくと共に、アジア諸国の中で自国の研究の状況をお話しいただくのにふさわしい方をご推挙下さるようお願いした。多くの貴重なご意見や情報をいただくことができたが、近隣にありながら欧米諸国にくらべてその様子が把握しにくかったアジア地域との交流の進展を考えていく

ことの意義については異論は見られず、大方のご賛同がいただけたものと考えている。このアンケート結果を基に、庄司部会長ほか若干の関係者のご相談させていただき、今回は中国と韓国から Guo, Hyun 両先生をお招きすることにした。

アジア地域の30数ヶ国の中では、中国と韓国はわが国の熱・流体系研究者にとって最も“なじみ”のある国々であろう。北京の Tsinghua University を会場として開催されたいくつかの国際シンポジウムに参加された方々も少なくないであろうし、日・韓の機械学会の合同会議には毎回両国から多くの研究者が参加しておられる。これらの集会を通し、それぞれの国の研究の進展の様子を垣間見ることにはできたように思われる。しかし、国全体としてどのような研究機関があり、どのような研究プロジェクトが進められているのか、さらに、それらの研究はどのように支援されているのか、というような点にまで及ぶ包括的な話を聞く機会はいまだになかったのではなかろうか。

ご多忙の中、上記のような観点から講演をしていただくと共にそれをペーパーにもまとめていただくという大変面倒な仕事を快くお引き受けいただいた Guo, Hyun 両先生には感謝の他はない。Guo 先生は今回の講演の資料作りのため、中国全土に散在する研究機関にアンケート調査をされたとうかがっている。両先生とも欧米での研究・教育経験が豊富であり、Hyun 先生はさらに日本の複数の研究者との共同研究を行ってきておられるという経緯もあって、それぞれご自身の国の状況を欧米や日本の状況とも対比しつつ客観的に観ることができるという点でも得難い講演者であったと考える。

特別セッションの会場では、シンポジウム前に

両先生からいただいたレビューペーパーの draft を資料として配布させていただいた。これらの資料配布を前提に、両先生ともむしろ資料から離れ、研究費に関する話や各プロジェクトの物理的説明なども含めて自在に講演を組み立てておられた。講演内容の構成、明確な英語を含め聴衆を引き付ける "語り口" など、presentation 自体にも日本の研究者には参考になる点が少なくなかったように思うが、同セッションに出席されておられた皆様はどう感じられたであろうか。

上記のように、本号の次頁以降に掲載のレビューペーパーは当日の講演とは別に、中国と韓国の最新の状況を客観的に伝えるための資料として作成されたものと見ていただくとよい。間違いなく、両国の伝熱ないしは熱工学研究に関し現在入手し得る最良の資料であろう。Guo, Hyun 両先生にはシンポジウム終了後、ご帰国前後の慌ただ

しい中で camera-ready の最終原稿をご提出いただいた。講演の依頼から最終原稿提出まで、終始私どもの注文に素早く正確に応じていただいた両先生には重ねて御礼申し上げたい。

なお言うまでもなく、今回の特別セッションの試行は、宮本政英先生、加藤泰生先生を始めとする伝熱シンポジウム準備委員会の方々のご理解があって可能となったものであり、プログラム編成や会場の割り振りに際し一方ならぬご配慮をいただいた。また、33期編集出版部会長の芹沢昭示先生には Guo, Hyun 両先生の原稿がシンポジウム直後の本号に掲載されるようご配慮いただいた。合わせて御礼申し上げる次第です。

最後に、今回の試みがアジア地域諸国との交流促進の一つの足掛かりとなるようにとの期待を申し添え、この拙文の結びとしたい。

小特集にあたって

第33期編集委員会

地球環境問題として、オゾン層の破壊、酸性雨の影響、熱帯森の減少、砂漠化等と共に、CO₂、メタン、或は各種フロン等の温室効果ガスによる地球温暖化が一般の関心を集めるに至っている。

ここでCO₂が特に重視されるのは、大気中濃度の増加の主原因が、世界のエネルギー供給量の90%近くを賄い現代文明を支えている化石燃料の消費の加速的増大にあり、その排出抑制には、人間活動に対する制約を含めた極めて大きな困難が予測されるためである。言い換えれば、CO₂問題はエネルギー問題そのものとみなすことができるのである。

一方、CO₂対策を考える場合、対象となる規模を見過ごしてはならない。CO₂排出量については、様々の統計値が示されているが、世界では年間200億トン強、我が国では9億トン強というのが現状である。これを他の統計値と比較すると、100%の排出対策を講じるとすれば、日本全国を走り回っているダンプの積載重量に匹敵する分量を対象とすることになるのである。

これらを踏まえた時、CO₂対策技術は、

- ①ネットでCO₂削減効果がある
- ②所要の時期までに実施できる
- ③温暖化を鎮静し得る期間に亘って有効である
- ④排出量に対し有意な規模で寄与できる
- ⑤コスト及びエネルギー損失が許容できる
- ⑥社会的に受容される（副次的悪影響の抑制）

といった要件を満たす必要があるが、これまでに提案され、或は研究開発が実施されている課題の中には、単に温暖化問題というキャッチフレーズに便乗した、対策としては意味がないと判断せざるを得ないものも多く見られる。また、これがエネルギー問題であることから熱力学の法則に照らして考えれば、真にCO₂対策として意味がある技術は、極めて限られる。

この問題に対するエネルギー技術からのアプローチとしては、高効率化を含むいわゆる省エネルギー技術や原子力・再生可能エネルギー技術に代表されるカーボンフリーエネルギー技術の開発と導入が挙げられる。他方、発展途上国を中心とする化石燃料消費の増大や、温暖化が進行するとされる数十年の期間内での新技術の導入限界等を考慮すると、その間にも放出され続けるCO₂を安定な形で所要の期間に亘って固定・隔離する技術の開発も緊急の課題であると考えられ、火力発電所等においてCO₂を分離・回収し、地中或は海中に隔離するといった考え方に沿った研究開発が盛んに行われている。

中でも、大量のCO₂を長期間に亘って大気から隔離出来る可能性のある海洋処理技術の開発は、ミクロからマクロスケールに及ぶ流れ・伝熱・化学反応及び生態系を考慮すべき複雑な現象の解明を必要とする課題であることから、本学会員の間でも関心が高まり、幾つかの関連機関において研究が推進されている。

この小特集は、以上の観点から企画されたものであり、地球科学的観点からCO₂隔離技術の位置付けを明らかにすることから始め、技術的・経済的側面からフィージビリティを論じると共に、関連する物理・化学的過程を解明するために種々の機関で行われている研究状況を紹介することとした。我が国の研究は、この分野において世界をリードしており、その意味ではここで紹介した内容は、まさに世界的にも最先端の研究成果とみなすことができる。とはいえ、CO₂の海洋隔離については未だ研究開発課題が山積しており、本小特集が、学会員の皆様の興味を喚起できれば幸いです。

おわりに、極めて御多忙中にも拘らず、快く原稿をお寄せ頂いた著者の方々に、改めて感謝の意を表す次第であります。

発電プラントからの二酸化炭素回収・隔離技術の評価

赤井 誠 (機械技術研究所)

1. はじめに

火力発電プラントからのCO₂回収と地中や海中への処理技術は、大量処理に伴う環境影響等に不確実性があるものの、将来のCO₂削減対策として成立する可能性があると考えられている。本稿では、筆者等が新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託の下に、CO₂の回収・処理を含む発電システムのエネルギー収支、経済性、CO₂削減効果などの見直しを検討してきた結果を紹介し、火力発電所におけるCO₂回収・処理技術のフィージビリティについて論じる。

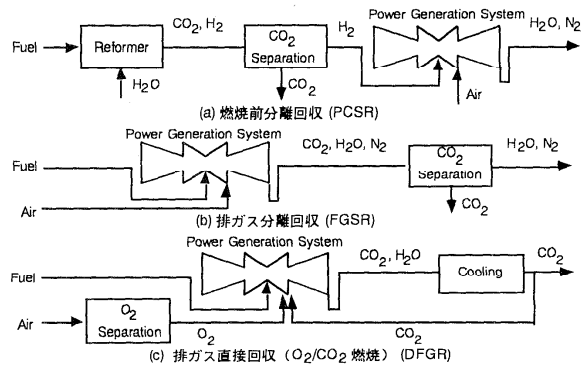


図1 CO₂分離回収技術

2. 火力発電プラントからのCO₂の分離回収技術

化石燃料プラントで発生するCO₂の分離回収の考え方を図1に示す。図中(a)の燃焼前分離回収方式では、供給される燃料は水添改質とシフト反応により水素とCO₂に転換され、CO₂を分離後、水素が燃料として使用される。この方式は、天然ガス等の低炭素燃料の場合、燃焼排ガスに比べてCO₂濃度が高い段階で分離操作ができるため、理論的には排ガスからの分離よりも有利であると考えられている¹⁾。排ガス分離回収方式では、窒素が主成分となっている燃焼排ガスからCO₂が分離されることになる。(c)は、O₂を酸化剤として使い、CO₂の直接回収を可能とする方式で、排ガス中

のCO₂の一部はリサイクルされ、燃焼温度の上昇を防ぐための希釈剤及び熱媒体として利用される。

CO₂の分離技術には、吸収法、吸着法、膜分離法等があり、多くは既に実績を有しているが、これらの火力発電所への適用性は、①処理規模、②処理(反応)速度、③所要動力、④回収CO₂の処理の容易さ、⑤コスト、⑥耐久性、などの要件に沿って検討する必要がある。特に、出力1000MWeの石炭火力発電所のCO₂排出量が2万トン/日程度となることを考えれば、処理規模・速度の要件は重要である。主要なCO₂分離・回収プロセスの特徴と火力発電所への適用可能性について検討した例²⁾を表1に示す。

表1 CO₂分離・回収法の比較

プロセス	湿式吸収法		乾式吸着法		膜法	深冷法
	化学吸収法	物理吸収法	PSA法	TSA法		
原理	化学反応	物理吸収	吸着	吸着	透過(溶解拡散)	液化・精留
駆動力	化学反応(温度差)	分圧差(濃度差)	分圧差(濃度差)	温度差	分圧差(濃度差)	相変化
長所	<ul style="list-style-type: none"> 低分圧ガス向き 炭化水素への親和力が低い 大容量向き 	<ul style="list-style-type: none"> 高分圧ガス向き 広適用範囲 腐蝕、浸食が少ない 再生用熱源が不要 	<ul style="list-style-type: none"> 高純度精製が可能 装置が比較的簡易 適用範囲が広い 	<ul style="list-style-type: none"> 高純度精製が可能 適用範囲が広い 	<ul style="list-style-type: none"> 簡便 安価 小容量向き 	<ul style="list-style-type: none"> 高純度、大容量に適
短所	<ul style="list-style-type: none"> 吸収液が高価 腐蝕、浸食 適用範囲が限定 熱源が必要 	<ul style="list-style-type: none"> 吸収液が高価 重炭化水素の親和力が強い 	<ul style="list-style-type: none"> 再生ガスが必要 水分の親和性が強い 	<ul style="list-style-type: none"> 吸着剤が多く、装置が大型化 20%/y以上の吸着剤メイクアップを要す 再生用熱源が必要 	<ul style="list-style-type: none"> 低純度 運転費高 大容量に不適 油脂分含有ガスに弱い 	<ul style="list-style-type: none"> 装置が複雑 建設費が高い 運転費が高い

3. CO₂ 分離回収システムの評価³⁾

分析対象として、2010年頃に新設が想定される火力発電プラントを選定し、CO₂非回収のベースケースの送電端出力を600MWeとし、これにCO₂回収技術を附加した場合には、燃料使用量をベースケースと同一とし、CO₂回収による動力ロスを送電端出力の低下として算入した。また、回収CO₂は、処理のために液化するものと想定した。

表2に示した発電プラントとCO₂分離技術の11の組合せに対する分析結果を、CO₂回収・液化に伴う送電端効率の低下、CO₂回収率、所要動力、相対的発電コストの形で図2にまとめる。CO₂回収システムを附加した場合の送電端効率の相対的低下率は9~27%、発電コストの上昇率は20~50%との結果を得た。想定した個々のシステムに対する結果は以下の様になる。

LNG複合発電：前記の様に熱力学的には高い効率が予想される燃焼前回収方式ではあるが、改質温度として800~900℃を要しエクセルギー的に有利なシステム構成が困難であり、改質反応の転化率の技術・経済的限界のため改質ガス中に8%強のCH₄が含まれる（原料ガス中の全C原子の約26%がCH₄として残存）ため、効率低下が大きくCO₂回収率も最も低い。O₂/CO₂燃焼の場合、NGは石炭に比べH₂の割合が高く燃焼に必要なO₂量が多くなり、CO₂回収量当りのO₂製造動力が相対的に大きく総合効率は低下する。排ガス分離では、低濃度CO₂を効率的に分離できるアルカノールアミン法が利用でき効率は高くなる。この場合、CO₂回収に要するエネルギーの殆どは吸収液の再生熱であるが、所要温度は130~160℃であり、プラントの低質排熱を有効に利用できるシステムが構成できる。

表2 分析対象とした発電システムとCO₂分離回収技術

発電プラント	方式	ベースケース		排ガス中不純物			CO ₂ 分離回収方式 (プロセス)
		効率 (%)	コスト (¥/kWh)	SOx (ppm)	NOx (ppm)	ダスト (mg/Nm ³)	
LNG複合サイクル (LNGC/C)	1,350℃級ガスタービン	46.5	9.9	0	10	0	PCSR (化学吸収) FGSR (化学吸収) DFGR (O ₂ /CO ₂ 燃焼)
微粉炭焚き (PCF)	超々臨界圧(USC) 316 kg/cm ² , 593/593/593℃	40.9	9.2	50	45	10	FGSR (化学吸収) DFGR (O ₂ /CO ₂ 燃焼)
酸素吹き石炭ガス化複合発電 (O ₂ -IGCC)	1,350℃級ガスタービン	43.0	10.3	20	20	2	PCSR (物理吸収) FGSR (化学吸収) DFGR (O ₂ /CO ₂ 燃焼)
空気吹き石炭ガス化複合発電 (Air-IGCC)	1,350℃級ガスタービン	43.0	10.3	20	20	2	PCSR (物理吸着)
メタノール改質発電 (RMF)	1,350℃級ガスタービン	44.8	10.0	0	20	0	PCSR (化学吸収) FGSR (化学吸収)

註) 化学吸収法により排ガスからCO₂を回収する場合は、吸収液の劣化防止のため、SOx除去レベルを10ppm以下とした。

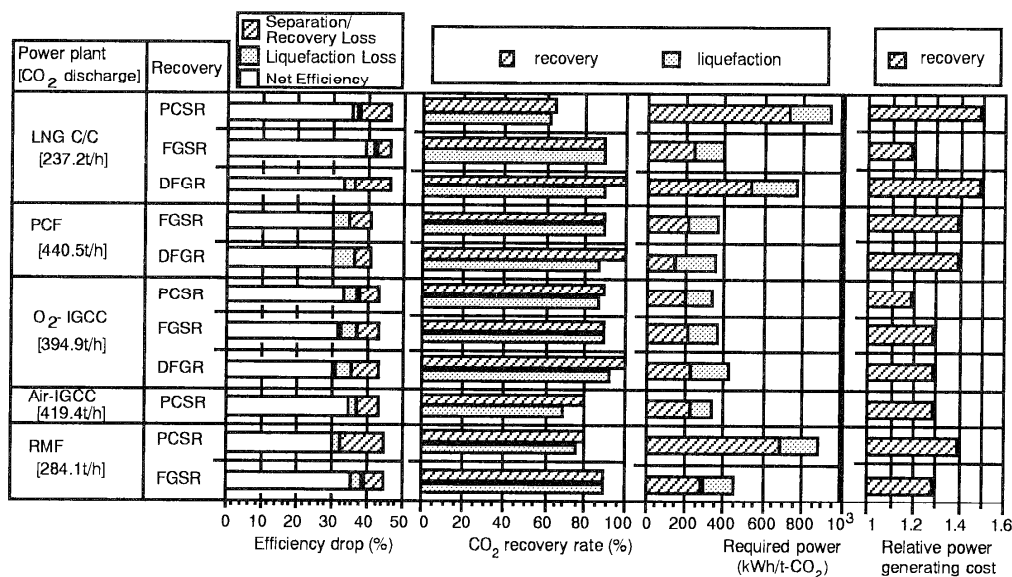


図2 CO₂回収・液化システムの分析結果

微粉炭焼き発電： O_2/CO_2 燃焼が、排ガス分離よりも若干効率が良くなる。効率低下の原因は、前者では酸素製造、後者では吸収液の再生のためのタービン抽気であるが、後者では吸収液の劣化を防ぐための高次脱硫用動力が必要となることも一因である。 O_2/CO_2 燃焼では回収動力率が全てのシステム中で最も低く、 CO_2 回収が最も効率良く行えることを示している。また、 CO_2 分離装置が不要であり、構成技術の殆どがほぼ実用化段階にあることなどを考えると、微粉炭焼きプラントからの O_2/CO_2 燃焼による CO_2 回収は、有望な技術とみなすことができよう。

酸素吹き石炭ガス化複合発電： 燃焼前分離の効率が他よりも若干高いが、明確な相違はない。この場合の効率低下は、タービンの中圧蒸気の抽気を石炭ガス化生成ガス中のCOのシフト反応に利用するための出力低下に起因する。排ガス分離では吸収液の再生に大量の蒸気を要するためにエネルギー損失を伴う。 O_2/CO_2 燃焼の場合には、高純度（99.5%）酸素製造に伴うロスが大きいが、 CO_2 回収率が100%となることにより、回収動力率では、他の方式との差は小さくなる。

空気吹き石炭ガス化複合発電： 物理吸着法（PSA）による燃焼前分離のみを分析したが、効率低下は上と同程度で、殆どが吸着 CO_2 の脱着のための真空ポンプを主とする補機動力に起因する。PSA法は、大型化の困難さが指摘されてはいるものの、この様な高压ガスを処理するプロセスでは、吸着・脱着に必要な圧力差を確保し易く、真空ポンプの動力が低減できる長所が

あり、また、他に比べて高压の CO_2 が得られ、液化する場合には総合効率を高められる可能性もある。しかし、シフト反応の転化率の限界のため、 CO_2 回収率が低くなるというマイナス面を考慮する必要もある。

メタノール改質発電： 燃焼排ガスからの化学吸収法（アルカノールアミン法）による分離が最も効率的である。有利と予想される燃焼前分離方式における発電効率の大幅な低下は、改質ガスからの CO_2 分離回収のためのガスの冷却過程での熱の回収・利用が十分に行えないことに起因する。一方、排ガス分離では、LNG複合発電の場合と同様、低質排熱が有効に利用されるシステム構成が可能となっている。メタノール発電システムについては、今後の導入が見込まれることもあり、複合サイクル化による総合効率の向上を始めとして、さらに検討が必要であると思われる。

4. CO_2 回収・処理トータルシステムの評価

ここでは、各種火力発電プラントに対し上述の CO_2 回収技術と海洋処理・地中処理技術を組合せたトータルシステムの分析結果について論じる。発電- CO_2 回収システムとしては、上で効率や経済性の点から有利とされた6種を選定した。表3に分析対象を示すが、LNG複合発電の場合は、LNG冷熱を回収 CO_2 の液化動力として利用するケースについても分析した。

表中の輸送距離は、①日本では沖合100km程度に深度3000m以上の海域が多く存在する、②ガス田・油田の多くは沿岸（発電所/液化 CO_2 受入基地が立地）か

表3 分析対象とした CO_2 回収・処理トータルシステム

CO_2 回収型発電システム		CO_2 輸送・処理システム					
発電プラント	分離・回収技術	分類	処理方式	回収 CO_2 前処理	CO_2 輸送	輸送距離 (km)	注入深度 (m)
LNG複合発電	排ガス分離・回収 (化学吸収)	海中処理	深層海水注入	—	気体 CO_2 パイプライン輸送 (発電所→処理地点)	100	3,000
	同上 (LNG冷熱利用)		洋上基地からの深層海水注入	液化・貯蔵	液化 CO_2 船輸送 (発電所→処理地点)	500	
微粉炭焼き発電	排ガス分離・回収 (化学吸収)		洋上基地でのハイドレート化・海底還元	液化・貯蔵	液化 CO_2 船輸送 (発電所→処理地点)	100	3,000
	排ガス直接回収 (O_2/CO_2 燃焼)		—	—	気体 CO_2 パイプライン輸送 (発電所→処理地点)	500	
酸素吹きIGCC	燃焼前分離・回収 (物理吸収)	地中処理 FOR利用	地中、油田注入	—	気体 CO_2 パイプライン輸送 (発電所→処理地点)	100	2,000
空気吹きIGCC	燃焼前分離・回収 (物理吸着)		受入基地からの地中、油田注入	液化・貯蔵	液化 CO_2 船輸送 (発電所→受入基地)	500	
			—	—	液化 CO_2 パイプライン輸送 (受入基地→処理地点)	12,000	
メタノール改質発電	排ガス分離・回収 (化学吸収)	—	—	—	液化 CO_2 パイプライン輸送 (受入基地→処理地点)	100	—

ら100km程度の距離内に存在する、③東南アジア（日本から約5000km）、中東（日本から約12000km）も地中処理・EORの候補地となり得る、等の点を考慮して定めた。また注入深度は、①液体CO₂の比重が海水より大となる深度、及び②ガス田・油田の平均的深度を考慮して定めた。

CO₂を処理するには、複数の発電プラントからの回収CO₂を集積し一括輸送する可能性が高いと考えられるため、処理容量は、600MWeの微粉炭火力ほぼ3基分に相当する3万トン/日規模とした。また、発電所サイトと受入基地での液化CO₂の貯蔵容量は回収量5日分相当とした。

以上の様な前提の下に、トータルシステムのプロセスフローや、CO₂発生量、回収量、純度、圧力、回収・液化・輸送・処理動力及びコストやプラントレイアウトなどを検討・評価した。トータルシステムの性能評価に用いた指標を図3に示す。図の式中で、Y1,Y2は

各々オンサイト及びオフサイトの設備費と運用費の合計、 η_p, η_2 は輸送及び処理プロセスの効率、またC0はベースケースのCO₂排出量を表す。

一例として、微粉炭火力発電所に排ガス分離回収設備（化学吸収）を附加したCO₂回収・処理トータルシステムについての所要動力の計算結果を図4に示す。パイプラインによる直接注入システムでは、処理プロセスの所要動力は輸送プロセスの動力に含めてある。総ての場合において、回収プロセスの所要動力が他のプロセスの動力に比べて大となっている。また、洋上基地でハイドレートを製造して海洋に注入するシステムでは、液化とハイドレート製造という2つのプロセスに大きな処理動力を要するため、輸送距離が同じ場合には他の方式と比較してエネルギー的に不利となる。この図に示した、各プロセス毎の所要エネルギーの割合は、他の発電-CO₂回収システムについても同様な傾向を示す。

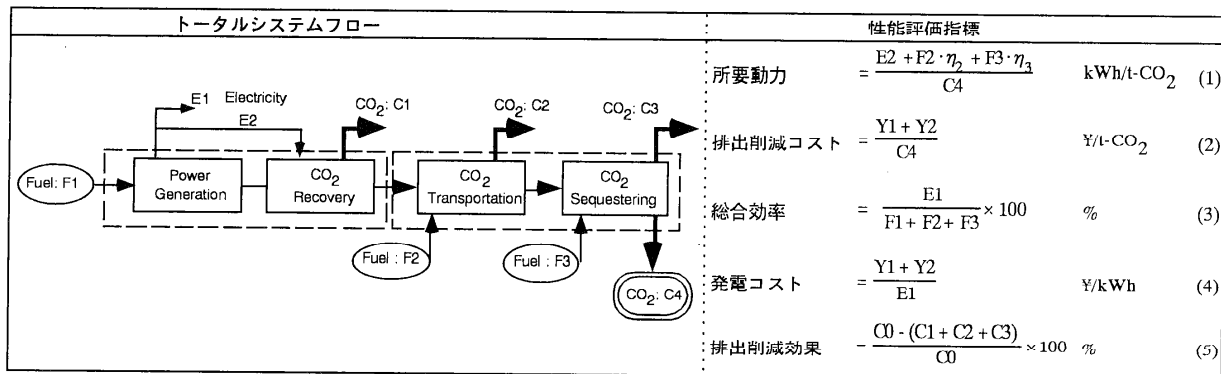


図3 CO₂回収・処理トータルシステムの性能評価指標

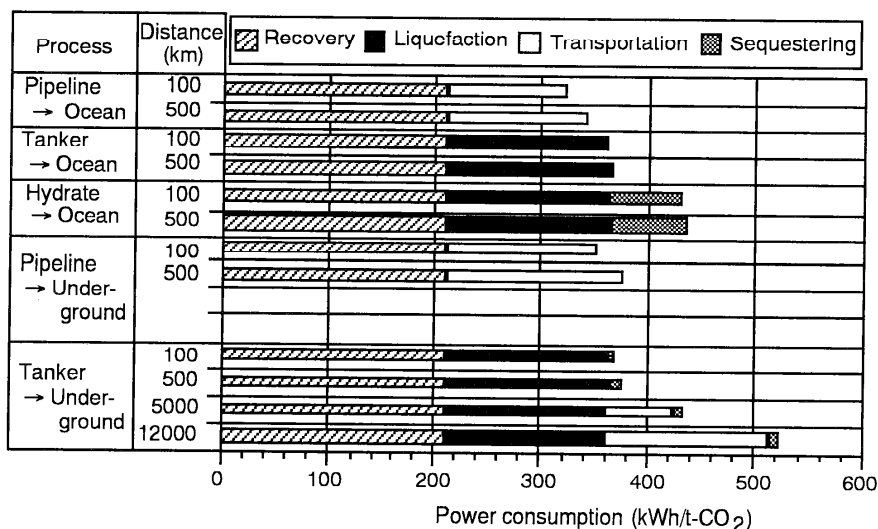


図4 CO₂回収・処理トータルシステムの所要動力（微粉炭火力-排ガス分離）

表4 CO₂回収・処理トータルシステムの分析結果まとめ

発電プラント /CO ₂ 回収方式	輸送距離 /処理方式	所要動力 (kWh/t-CO ₂)		排出抑制コスト (10 ³ ¥/t-CO ₂)		総合効率 (%)		発電コスト (対ベースケース)		排出抑制効果 (%)	
		100 (km)	500 (km)	100 (km)	500 (km)	100 (km)	500 (km)	100 (km)	500 (km)	100 (km)	500 (km)
LNG複合発電 /排ガス分離・回収 (化学吸収)	パイプライン→海中	355	374	7.1	10.4	40.5	40.2	1.30	1.44	88.5	88.4
	船輸送→海中	393	398	8.6	8.7	39.9	39.8	1.37	1.37	87.6	87.4
	ハイドレート→海中	463	469	10.6	10.7	38.6	38.5	1.45	1.46	82.7	82.4
	パイプライン→地中	384	409	6.8	7.9	40.0	39.5	1.29	1.34	88.1	87.9
	船輸送→地中	403	408	8.5	8.6	39.7	39.6	1.36	1.37	87.0	86.7
同上(LNG冷熱利用)	パイプライン→海中	355	374	7.1	10.4	40.5	40.2	1.30	1.44	88.5	88.4
	船輸送→海中	343	348	7.8	8.0	40.7	40.6	1.33	1.34	87.9	87.6
	ハイドレート→海中	413	419	9.9	1.0	39.4	39.3	1.42	1.43	83.0	82.8
	パイプライン→地中	384	409	6.8	7.9	40.0	39.5	1.29	1.34	88.1	87.9
	船輸送→地中	353	358	7.7	7.9	40.5	40.4	1.33	1.34	87.3	87.0
微粉炭焼き発電 /排ガス分離・回収 (化学吸収)	パイプライン→海中	324	343	6.4	9.6	31.5	31.0	1.64	1.98	87.0	86.8
	船輸送→海中	362	367	7.5	7.7	30.5	30.4	1.75	1.77	85.8	85.5
	ハイドレート→海中	432	437	9.5	9.7	28.8	28.7	1.96	1.98	80.1	79.7
	パイプライン→地中	353	378	6.0	7.1	30.7	29.9	1.62	1.75	86.3	86.0
	船輸送→地中	371	376	7.4	7.6	30.2	30.1	1.74	1.76	85.1	84.7
微粉炭焼き発電 /排ガス直接回収 (O ₂ /CO ₂ 燃焼)	パイプライン→海中	286	307	6.3	10.1	31.7	31.0	1.70	2.13	100.0	100.0
	船輸送→海中	388	393	7.8	8.0	30.1	30.0	1.83	1.84	81.7	81.4
	ハイドレート→海中	458	463	9.8	10.0	28.5	28.4	2.03	2.05	76.1	75.8
	パイプライン→地中	319	347	5.9	7.1	30.6	29.7	1.66	1.84	99.5	99.5
	船輸送→地中	397	402	7.7	7.9	29.8	29.7	1.82	1.83	81.0	80.7
酸素吹きIGCC /燃焼前分離・回収 (物理吸収)	パイプライン→海中	300	319	5.3	8.6	34.3	33.8	1.44	1.72	87.5	87.2
	船輸送→海中	358	363	6.7	6.8	32.7	32.6	1.54	1.55	85.9	85.6
	ハイドレート→海中	428	433	8.7	8.9	30.9	30.8	1.71	1.73	80.2	79.9
	パイプライン→地中	324	349	4.9	6.1	33.6	32.9	1.41	1.51	86.9	86.6
	船輸送→地中	368	373	6.6	6.7	32.4	32.3	1.53	1.55	85.2	84.9
空気吹きIGCC /燃焼前分離・回収 (物理吸着)	パイプライン→海中	278	298	6.7	10.3	35.6	35.1	1.41	1.63	75.9	75.5
	船輸送→海中	376	381	8.5	8.6	33.4	33.3	1.64	1.65	71.2	70.9
	ハイドレート→海中	446	451	10.5	10.6	31.8	31.7	1.79	1.80	66.4	66.2
	パイプライン→地中	311	339	6.3	7.6	34.7	34.0	1.40	1.49	75.0	74.5
	船輸送→地中	385	390	8.4	8.5	33.1	33.0	1.63	1.64	70.6	70.4
メタノール改質発電 /排ガス分離・回収 (化学吸収)	パイプライン→海中	408	427	7.6	10.9	36.6	36.2	1.41	1.59	87.8	87.6
	船輸送→海中	447	452	9.0	9.1	35.9	35.8	1.48	1.49	86.8	86.5
	ハイドレート→海中	517	522	11.0	11.1	34.6	34.5	1.59	1.60	81.5	81.2
	パイプライン→地中	437	462	7.3	8.4	36.0	35.5	1.39	1.46	87.3	87.1
	船輸送→地中	456	461	8.9	9.0	35.7	35.6	1.48	1.49	86.1	85.8

処理方式：船輸送→地中

発電プラント/CO ₂ 回収方式	輸送距離		100 (km)	500 (km)	100 (km)	500 (km)	100 (km)	500 (km)	100 (km)	500 (km)
	5000 (km)	12000 (km)								
LNG複合発電/排ガス分離・回収	465	555	10.0	13.6	38.8	37.7	1.42	1.58	83.8	79.2
同上(LNG冷熱利用)	415	505	9.3	12.9	39.7	38.5	1.39	1.55	84.1	79.6
微粉炭焼き発電/排ガス分離・回収	434	524	9.0	12.5	29.1	27.8	1.90	2.27	81.3	76.1
微粉炭焼き発電/排ガス直接回収	460	549	9.3	12.8	28.8	27.5	1.98	2.34	77.3	72.1
酸素吹きIGCC/燃焼前分離・回収	430	520	8.1	11.7	31.2	29.8	1.67	1.97	81.5	76.3
空気吹きIGCC/燃焼前分離・回収	448	537	9.9	13.5	32.1	30.7	1.75	2.01	67.5	63.1
メタノール改質発電/排ガス分離・回収	519	608	10.4	14.0	34.8	33.7	1.56	1.76	82.7	77.8

ベースケース 効率(%) : LNG C/C=46.5; PCF=40.9; O₂-IGCC=43.0; Air-IGCC=43.0; RMF=44.8
 発電コスト(¥/kWh) : LNG C/C=9.9; PCF=9.2; O₂-IGCC=10.3; Air-IGCC=10.3; RMF=10.0

各種の発電・CO₂回収方式、処理方式、輸送距離などのパラメータの組合せ(計84種類)に対してトータルシステムの分析を行った結果を、前記の性能指標を用いて表4に示す。

以上の結果をまとめると、ここで分析対象とした火力発電プラントに対し、CO₂の回収・処理システムを附加することにより、相対的な総合発電効率は12.5~32.8%(絶対値では、8.8%~13.4%)低下し、発電コストは1.3~2.3倍に上昇することが判る。また、CO₂排出削減コストは4.9~14.0千円/t-CO₂(18千円~51.3千円/tC)と評価された。その他の特徴的な結果をまとめると次のようになる：

- 1) 発電所単位の効率低下、コスト上昇はCO₂負荷の少ないLNG複合発電及びメタノール改質発電が小さい。
- 2) CO₂回収・処理量当たりの所要動力、コストは、発生CO₂濃度が高く、効率的にCO₂を回収できる石炭火力が有利である。即ち、絶対値で一定量のCO₂を回収・処理する場合は、石炭火力の方がトータルの所要エネルギーが少なくコストも安くなる傾向にある。LNG火力の場合、回収CO₂の液化に冷熱を利用すれば、回収処理動力が9~12%程度、またコストは5~8%程度低減され、石炭火力のレベルに近づくことが期待される。
- 3) 輸送・処理システム毎に見ると、今回検討した輸送距離範囲では「パイプライン輸送-地中注入」方式が最も低コストで所要エネルギーも少ない。特に、輸送距離が短い場合(100km)に所要エネルギー、コストの面で有利となるため、地中、油田が近距離にある場合は、本ケースが有望となる可能性がある。

「パイプライン輸送-深層海水注入」方式も所要エネルギーが少ないが、パイプラインが特殊仕様で高価なため、距離が長いと(例えば500km以上)、輸送コストが高くなる欠点がある。

「船輸送-ハイドレート化・海底還元」方式は、海水のpH変化等の環境影響を抑制する効果を期待できるとされているが、今回検討した輸送処理・システムの中では所要エネルギーが最も大きく、コストも高くなる。

「船輸送-洋上基地-深層注入」、「船輸送-受入基地-地中注入」方式は、所要エネルギー、コストのいずれも、今回評価した全システムの中で中間的ランクに位置付けられる。

5. おわりに

現在稼働中の火力発電所の所内率は、LNG火力で2~3%、石炭火力の場合7~8%(脱硫・脱硝が約40%を占める)である。また、環境対策コストに関して見れば、石炭火力のSO_x、NO_x、ばいじん対策費用は発電コストの約20~22%である。この様な現状と比較すると、本稿で示したケーススタディの結果を見る限り、現状技術に基づいた発電プラントからのCO₂回収/海中・地中処分技術は、大幅なCO₂排出規制或いは炭素税の導入といった経済的インセンティブが働かない限り困難であろう。

従って、実用化に向けては、トータルシステムの省エネルギー化、低コスト化が最も重要な課題となる。但し、CO₂固定コストで人為的な微生物による固定法などと比較した場合、或いは発電コストで太陽光発電などの再生可能エネルギー利用技術との比較で見れば、将来のCO₂削減対策として工業的に成立する可能性はある。また、地球温暖化が深刻な現実となった場合は、有力な技術的選択肢のひとつであり、そのための備えという意味でも関連する研究開発は積極的に推進すべきであろうと考えられる。

文献

- 1) 山下 巖：「CO₂対策技術の現状と課題」, 機械の研究, 44, 5 (1992) 521
- 2) 加賀城俊正：「地球温暖化の防止技術」, 季報エネルギー総合工学, 14, 3 (1991) 2
- 3) T.Kagajo, et al. : "Process Evaluation of CO₂ Recovery from Thermal Power Plant", Proc. JSME-ASME International Conference on Power Engineering-93 (ICOPE-93) , (1993) 493
- 3) M.Akai, et al. : "System Evaluation of CO₂ Recovery and Sequestering Process for Thermal Power Plant", Proc. Int. Symp. on CO₂ Fixation and Efficient Utilization of Energy, (1993) 73

CO₂海洋貯留の動的挙動の実験と分子動力学解析

平井秀一郎, 岡崎 健, 土方邦夫 (東京工業大学)

1. はじめに CO₂による地球温暖化対策の一つとして, 火力発電所等の大量発生源からCO₂を回収・液化し, 海洋中に隔離することで大気中のCO₂濃度の増加を抑制する方法が考えられている⁽¹⁾⁽²⁾. これらの方法は, 海洋の中層に積極的に溶解させる方法と3000m以深で液体CO₂の密度が水よりも大きくなることを利用して海洋底に貯留する方法に大別されるが, いずれの場合も液体CO₂が海洋中の高圧条件下(10℃未満44気圧以上)で水と反応し, 水と液体CO₂の界面にCO₂クラスレート・ハイドレート(以後, CO₂クラスレートと略記)といわれる水和物が生成され, CO₂クラスレートがCO₂を海洋中層に溶解させる場合には溶解を抑制する方へ, CO₂を海洋底に貯留する場合にはCO₂の海洋への拡散を抑制し安定に貯留する方へ寄与すると考えられている. したがって, CO₂の海洋貯留法の有効性について検討するためには, 海洋貯留で観測される流動場においてクラスレートの形成・溶解等の物理化学的挙動を含めたCO₂の動的挙動を明らかにし, 高圧水との界面にCO₂クラスレートを伴う液体CO₂の物質輸送現象を明確にすることが肝要となる. 本稿は, 東京工業大学炭素循環素材研究センターで推進してきたCO₂海洋貯留に関する基礎的な研究について述べる. これらの研究は, クラスレートを伴う液体CO₂の動的挙動に関する実験的な研究と, CO₂クラスレートの構造安定性について分子動力学計算により解析を行った研究である. 前者は, (1)液体CO₂のノズルからの噴出・貯留挙動, (2)核生成に起因するクラスレートの成長・伝播挙動, (3)CO₂の溶解・拡散挙動についてのレーザ診断計測法ならびに(4)流動場におけるCO₂液泡の溶解挙動であり, 後者はCO₂クラスレートの構造安定性についての分子論的な視点からみた解析である.

2. 液体CO₂の動的挙動の実験的研究

2.1 CO₂の噴出貯留挙動⁽³⁾ 図1に示される実験装置は, 最大使用圧力が深度5000m相当(500気圧)までのCO₂挙動について観察および計測を行う装置である⁽⁴⁾. 一様な流速場を得るためのしほり部とその下流側に50mmx50mmの断面を有するテストセクション部より構成され, テストセクション部には直径44mmの窓が最大8つ取り付けられるようになっている. 窓は必要に応じてノズル, 攪拌機等に置き換えることが可能である. この装置は, 種々の実験を行うことが可能のように設計製作されている.

深海相当超高压水中下において, 液体CO₂の噴出および貯留挙動を調べるための実験装置概念図を図2に示す. 上下2つの窓(可視部直径44mm)に2台のCCDビデオカメラを設置し, 上側の窓より液体CO₂のノズルからの噴出挙動を, 下側の窓よりcellの底部に溜まっていく液体CO₂の挙動を観測・撮影した. 図3(a)および図3(b)-(d)に, それぞれクラスレートが生成しない温度・圧力条件および生成する温度・圧力条件で, 液体CO₂をノズルから噴出した

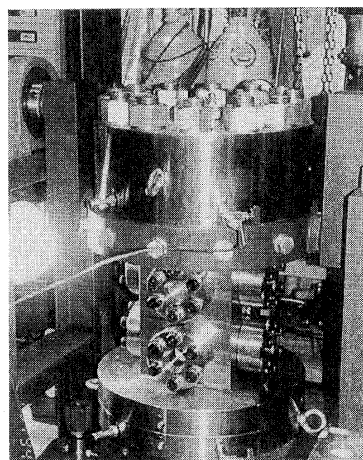


図1 実験装置本体

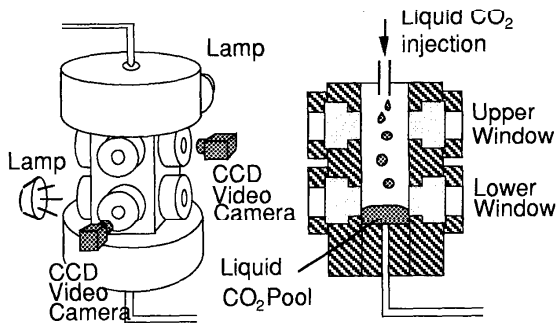


図2 CO₂噴出・貯留挙動実験装置

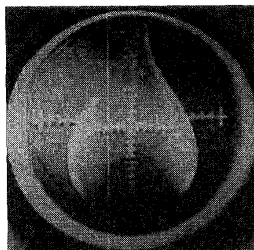
直後の液体CO₂の噴出挙動を示す。クラスレートが生成しない図3(a)ではCO₂液泡は界面張力により球形を示しているのに対して、クラスレートが生成する図3(b)-(d)では非球形の形状となり、非球形の度合いが流量の増加に伴い顕著になることが観察される。これは、噴出速度の増加がクラスレートが生成される領域を増大させていることにより生じていると考えられる。図4にcellの底部に溜まっていく液体CO₂の挙動を示す。図4(a),(b)はクラスレートの生成しない圧力・温度条件、図4(c),(d)はクラスレートが生成する条件での貯留形態である。図4(a),(b)では、

沈降してきたクラスレートを伴わないCO₂液泡が着底するとバウンドし、その後液泡同士が合体して最終的に1つの大きな液泡になるのが観察された。図4(c),(d)のクラスレートが生成する条件では、図4(a),(b)の場合とは異なり、液泡同士が合体して単一の大きな液泡を形成するのは観察されなかった。図4(d)は、流量 $Q=100\text{cc/min.}$ で液体CO₂を注入した場合を示しているが、 $Q=10\text{cc/min.}$ の図4(c)と比較して、クラスレートを伴うCO₂液泡径が小さくなっていることが観察される。

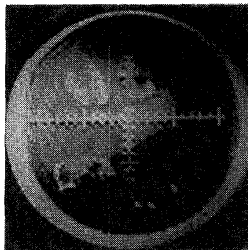
海洋底で形成されるCO₂のプールの側壁を想定すると図2に示されるCO₂Poolの側壁に相当するものがない。この影響を排除した実験を行うために図5に示されるように左右方向が平坦な場所にCO₂を噴出した場合のCO₂の噴出貯留形態を調べた。図6.(a)-(c)に流量 Q が 100ml/min の場合を、図6.(d)に流量 Q が 10ml/min の場合を示す。いずれの流量の場合も、直径 1mm のノズルより噴出されたCO₂は鉛直方向に積み上がる形態をとることが観察される。CO₂の深海底貯留は、当初、海底の凹地にCO₂のPoolが形成され、海水との界面にクラスレート層がある形態をと



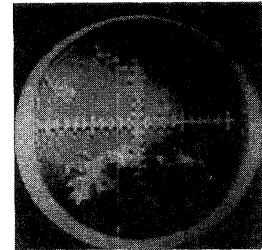
(a) $Q=100\text{ml/min}$
($400\text{atm. } 17^\circ\text{C}$)



(b) $Q=10\text{ml/min}$
($400\text{atm. } 8^\circ\text{C}$)



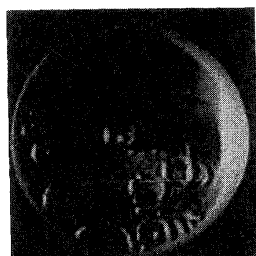
(c) $Q=50\text{ml/min}$
($400\text{atm. } 8^\circ\text{C}$)



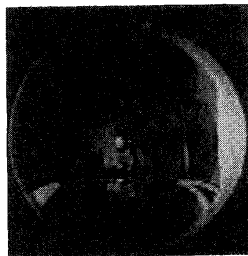
(d) $Q=100\text{ml/min}$
($400\text{atm. } 8^\circ\text{C}$)

図3(a)クラスレート生成のないCO₂ Jetの挙動

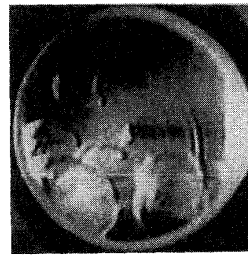
図3(b)-(d)クラスレート生成のある場合のCO₂ jetの挙動



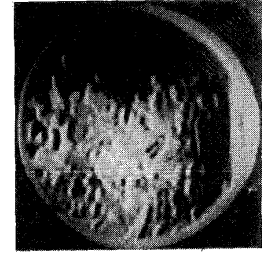
(a) $Q=50\text{ml/min}$
($500\text{atm. } 13^\circ\text{C}$)



(b) $Q=50\text{ml/min}$
($500\text{atm. } 13^\circ\text{C}$)



(c) $Q=10\text{ml/min}$
($450\text{atm. } 3^\circ\text{C}$)



(d) $Q=100\text{ml/min}$
($400\text{atm. } 3^\circ\text{C}$)

図4(a)(b)クラスレート生成のないCO₂ Poolの挙動

図4(c)(d)クラスレート生成のあるCO₂ Poolの挙動

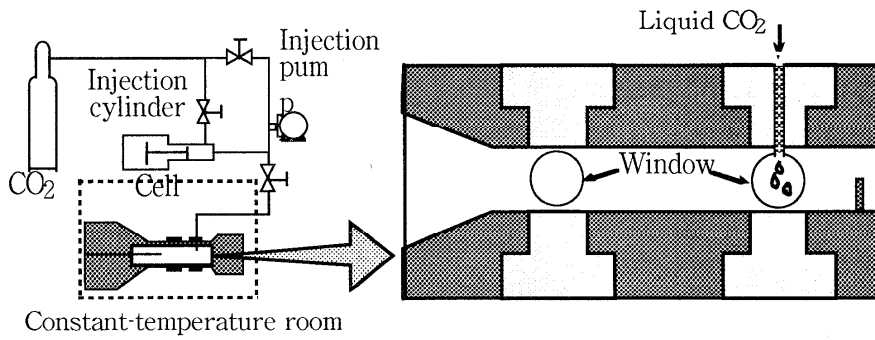


図5 CO₂噴出・貯留挙動実験装置（横型）

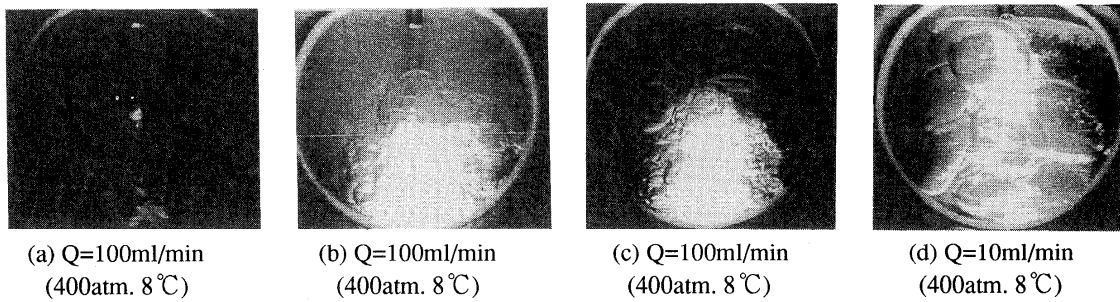


図6. CO₂の噴出貯留挙動

ると考えられていたが、少なくともCO₂の噴出位置がPool表面より離れた上部にある限り、CO₂Poolは図6に示されるような形態をとると考えられる。

2.2 CO₂クラスレートの成長・伝播挙動 図7に核生成により生じるCO₂クラスレートの成長・伝播挙動について示す。図7(a)には液体CO₂のPoolが示さ

れており、クラスレートが生成しうる温度圧力条件にもかかわらず、液体CO₂と水の界面にクラスレートは生成していない。図7(b)に示されるようにノズルから噴出したクラスレートを伴うCO₂液泡が沈降してきて、底部の液体CO₂Poolに接触すると（図7(c)）、接した点から液体CO₂Pool表面をクラス

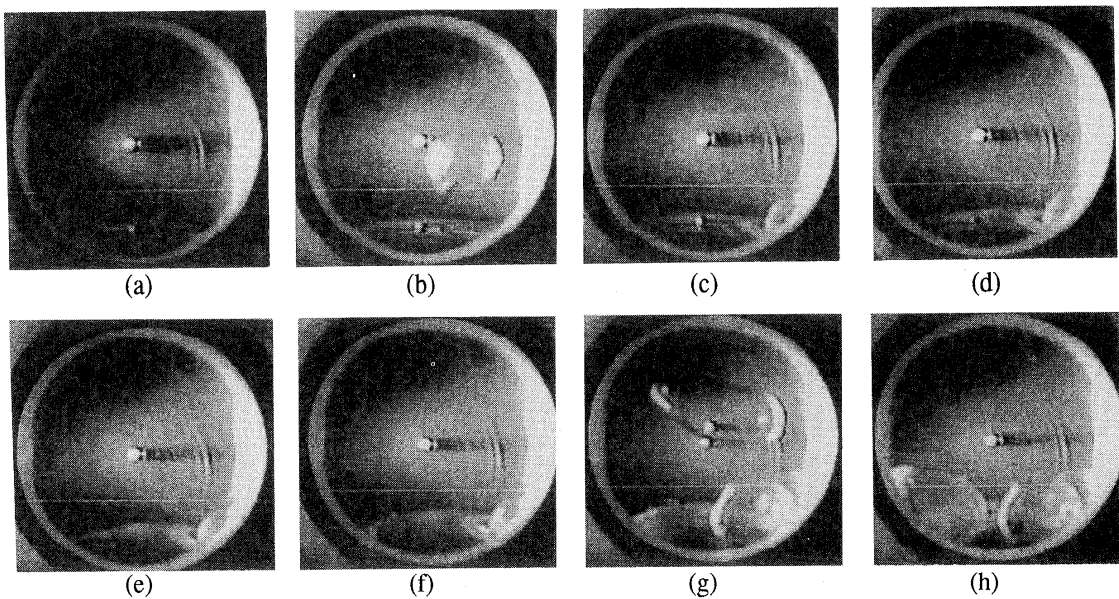


図7 CO₂ クラスレートの成長・伝播挙動(450atm, 3°C)

レート膜が成長・伝播していく様子が観察された(図7(c)-(f)). 図7(g),(h)は、その後沈降してきたクラスレートを伴わないCO₂液泡がクラスレート膜で覆われたCO₂Poolに接触すると、CO₂液泡周囲がクラスレート膜で覆われた様子を示している。クラスレートを伴うCO₂液泡が液体CO₂Poolに接触した瞬間にクラスレート膜がPool表面に成長し始めることから、クラスレートの核の形成は、すなわちこれはクラスレートの核が沈降してきたCO₂クラスレートを伴うCO₂液泡により供給されたものであるが、周囲へのクラスレート生成反応を促進し、その結果クラスレートの成長・伝播が生じると考えられる。

2.3. CO₂溶解拡散挙動のレーザ診断技術 CO₂の海洋底貯留は、海洋底でのCO₂Poolからどの程度のタイムスケールでCO₂が海洋中に拡散するか、さらに海洋中に拡散したCO₂はH₂Oと反応し、どの程度海水のpHの低下(酸性化)を誘起するか、これらのこと見積もることが本手法の有効性を判断する上で重要となる。図8はその診断手法として、レーザ計測技術を用いた実験装置を示したものである。Nd-Yagレーザの3倍高調波(355nm)の光をシリンドリカルレンズを用いてシート状にしたレーザ光を前述の高圧実験装置内に入射し、水に微量のキニーネを混入させることによりCO₂の溶解に伴うpHの変化をキニーネからのレーザ誘起蛍光強度としてCCDカメラにより検出することができる。すなわち、キニーネは、pHが低下するとレーザ誘起蛍光強度が増加する特性を有しており、この性質を用いることによりpHの瞬時2次元計測を行うことができる。図7に示してあるのは、高圧容器内に設置したCO₂Pool上に流れがあるときのpHの低下した領域がCO₂Pool後縁より流出していく様子をとらえたものである。レーザ計測法によりCO₂の溶解・拡散挙動を計測することができるが示されている。このような非接触2次元イメージ計測は、特にこのようなプローブ等の挿入が困難な高圧容器内の診断技術として用いるのに有効であると考えられる。

2.4 CO₂液泡の溶解・拡散挙動⁽⁵⁾ CO₂の海洋の中層域で積極的に溶解させる場合、1000m程度の深さに放出されたクラスレートを表面に伴うCO₂液泡

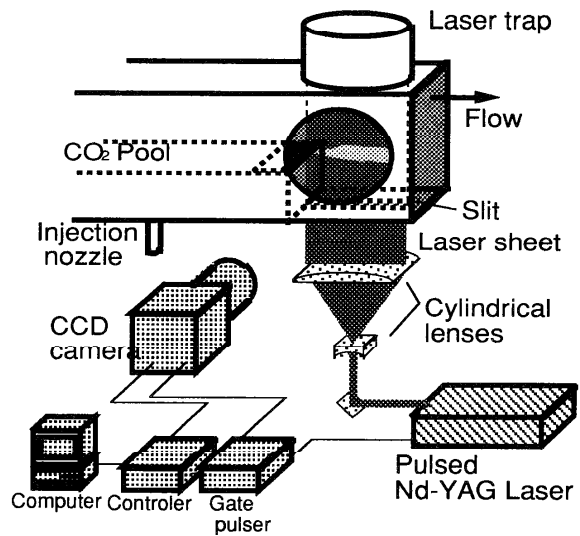


図8 CO₂溶解拡散挙動のレーザ計測システム

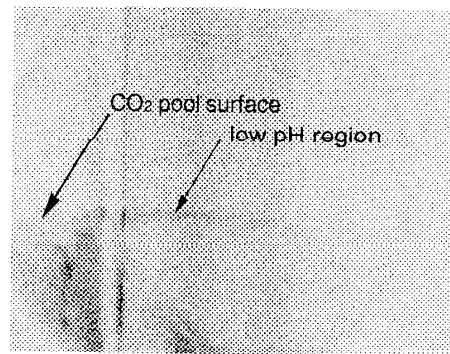


図9 レーザ画像計測例

は、浮力により上昇しながら溶解が進行する。このように水(海水)と液体CO₂の界面にクラスレートがあるときの液体CO₂の水への溶解拡散現象について、その圧力・温度・流速の依存性、クラスレートの有無の影響について明らかにするために、CO₂液泡の溶解拡散挙動を基礎的に調べた。図10に示すように、液体CO₂を実験セル内のノズルよりCO₂液泡として注入し、固定装置により流路内中央に固定した。CO₂液泡を囲む4方向から、2つの窓(直径44mm)、ノズル、CO₂液泡固定装置を設置した。窓よりCO₂液泡が溶解し、液泡径が減少する様子をビデオカメラにより撮影し、タイムラプスビデオにより記録を行った。

図11にCO₂液泡径が1cm、圧力39.2MPa(400気圧)、流速u=3.3cm/sの場合についての溶解速度の温

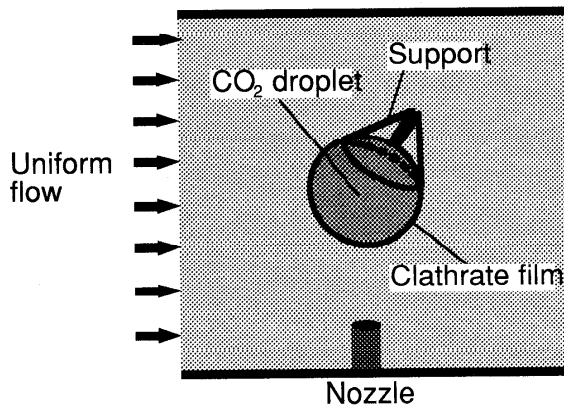


図10 CO₂液泡溶解挙動実験

度依存性を示す。溶解速度 kC_0 の k は物質伝達率、 C_0 は液泡表面濃度で、ここでは溶解速度 $k(C_0 - C_\infty)$ の無限遠濃度 $C_\infty = 0$ の場合について考察している。図中に示されている計算値は、物質伝達率 k を経験式より求め、表面濃度 C_0 を飽和濃度として算出したものである。クラスレートのないとき ($T=286\text{K}$) 計算値は実験値をよく予測できている。クラスレートのある場合 ($T=276\text{K}, 278\text{K}, 281\text{K}$) の実験値は、同じ温度条件のクラスレートのないときの計算値より溶解速度が小さくなり、クラスレート膜が溶解に対して抵抗層として作用しているのがわかる。また、その程度は、温度が低いほど大きく、これはクラスレートの結晶構造に対して温度変化が影響していることが原因の1つと考えられる。図12に溶解速度 kC_0 の流速ならびに圧力の依存性について示す。なお、温度条件はクラスレートのある場合 ($T=276\text{K}$ (3°C)) とない場合 ($T=286\text{K}$ (13°C)) の2通りについて示してある。クラスレートのある場合もない場合も溶解速度は流速の0.5乗に比例して増大することがわかる。さらにクラスレートのある場合もない場合も圧力の高い方が溶解速度が大きくなる。

海洋中層域にクラスレートを伴うCO₂液泡を放出すると、浮力により液泡は上昇しながら溶解が進行する。この過程について数値予測を行う。海の深さを z 、上昇速度を u 、液泡径を d とすると、次式を解析することにより挙動を予測することができる。

$$d \frac{d}{dz} = - \frac{2kC_0}{(u \rho_{\text{CO}_2})} - \frac{d \rho_{\text{CO}_2}}{dz} \cdot \frac{d}{(3 \rho_{\text{CO}_2})}$$

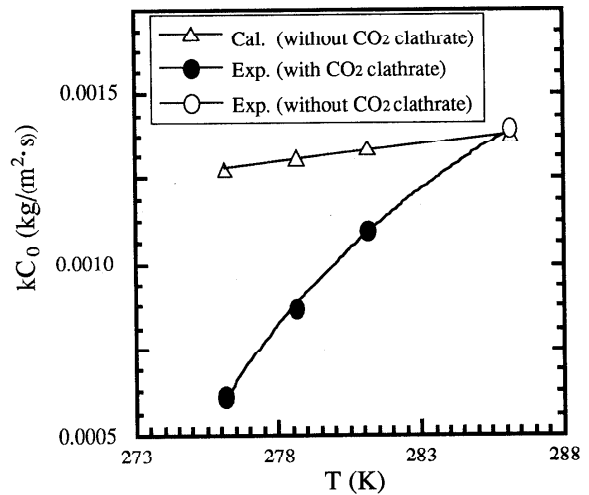


図11 CO₂液泡溶解速度に及ぼす温度とクラスレートの影響

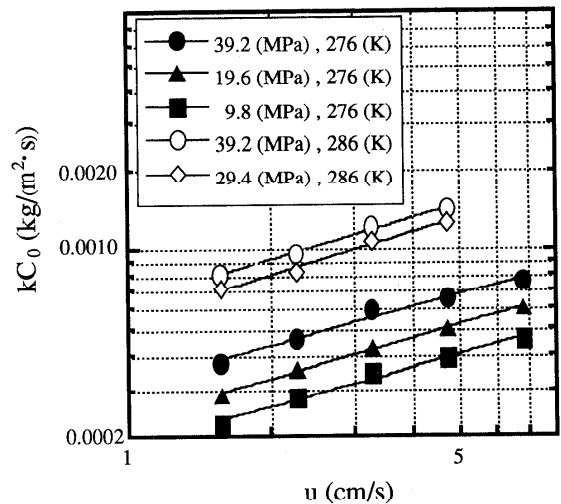


図12 CO₂液泡溶解速度に及ぼす速度と圧力の影響

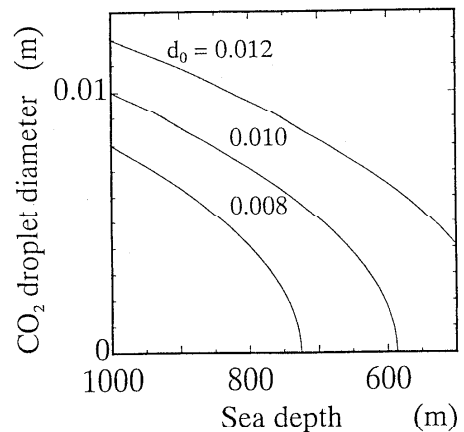


図13 CO₂液泡溶解挙動に及ぼす液泡放出径の影響

実験値からの溶解速度を上式に用いて1000mの位置にCO₂液泡を放出したときの溶解挙動を図13に示す。この図より放出径が1.0cmの場合は約400m上昇する間に溶解が終了するが、放出径が1.2cmになると深度が500mでも溶解が終了せず、放出液泡径が溶解挙動の重要なパラメータになっていることがわかる。

3. CO₂クラスレートの分子動力学解析⁽⁶⁾

2節で、CO₂クラスレート・ハイドレートを高圧水との界面に伴う液体CO₂の噴出、貯留、溶解拡散挙動ならびにCO₂クラスレートの成長・伝播挙動について述べたが、このようなマクロな視点から見た特徴的な挙動に関する実験的な研究とともに、CO₂クラスレート・ハイドレートをミクロな視点から見た研究も行っている。クラスレートは、分子が水分子により包接された結晶固体であり、一般に包接された分子はゲスト分子、水分子はホスト分子と呼ばれている。クラスレートはその結晶構造によりType I、Type IIの2種類に分けられ、CO₂クラスレートはType Iに属する。Type Iクラスレートは平均半径4.3 Åの14面体からなる大ケージと呼ばれる構造と、3.9 Åの正12面体からなる小ケージと呼ばれる構造を持ち、ゲスト分子はこれらのケージ(かご)の中に包接されている。しかし、CO₂は分子径が5.1 Åのため、大ケージ内のみ包接されている。このような特異な構造をもつCO₂クラスレートの構造とその安定性の関係を基礎的に明確にすることは、CO₂の深海底貯留ならびにCO₂中層溶解において、CO₂クラスレートがCO₂の海水への抵抗層として作用するため、重要であると考えられる。分子動力学法は、このような解析に用いるのに最も有用なtoolであると考えられ、以下、CO₂クラスレートの構造安定性について分子動力学解析をおこなった結果について述べる。

本研究で用いた分子動力学法は、水分子を記述するために2体相互作用と3体相互作用を組み合わせたモデルを採用し、全ての原子の運動の自由度を考慮している。計算で用いられている2体ポテンシャルはCoulomb力項、近接反発力項、van der Waalsの引力項、Morse関数で表される共有結合力項からな

り、次式で表される。

$$U_{ij}(r_{ij}) = z_i z_j e^2 / r_{ij} + f_0 (b_j + b_i) \exp\{(a_i + a_j - r_{ij}) / (b_i + b_j)\} - c_i c_j / r_{ij}^6 + f_0 D_{ij} \{\exp(-2\beta_{ij}(r_{ij} - r_{ij}^*)) - 2\exp(-\beta_{ij}(r_{ij} - r_{ij}^*))\}$$

時間進行法としてVerlet法を用い、時間刻みは0.4 fsとした。温度は250K、圧力は10MPaとし、それぞれ原子の速度とセルの稜のスケージングによって制御した。計算領域は単位格子である一辺12.0 Åの立方体セルに周期境界条件を課した。初期座標は中性子線回折により得られたType Iクラスレートの酸素原子およびゲスト分子の座標にIce-ruleを満たすように水素原子を配置した。

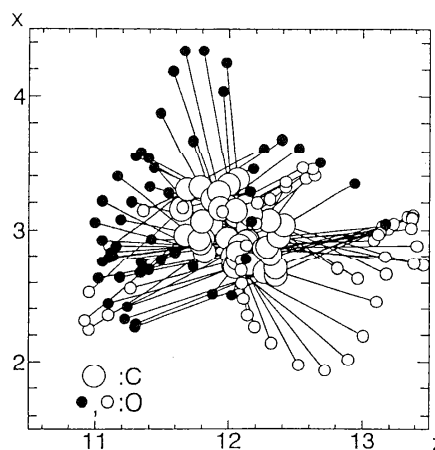


図14.クラスレート大ケージ内CO₂分子の運動の軌跡

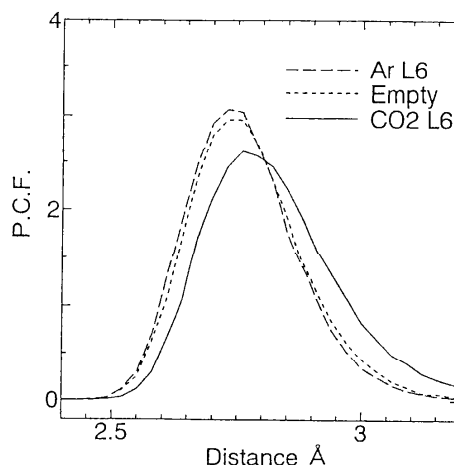


図15.クラスレートを構成する水分子の酸素原子間のpair correlation function (CO₂クラスレート, Arクラスレート, 空のクラスレート)

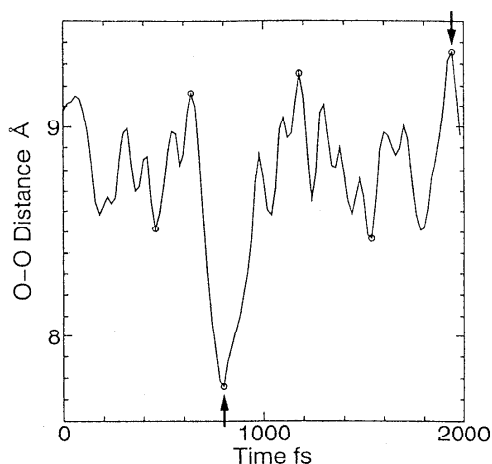
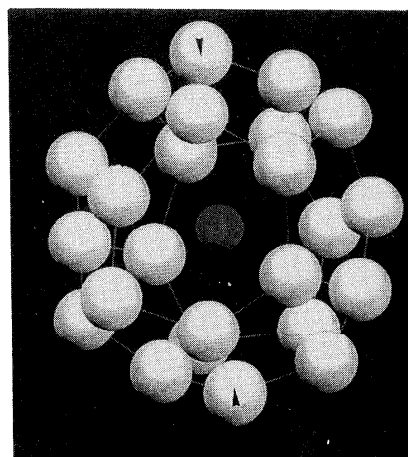


図16. 大ケージの対角に位置する水分子の酸素原子対 (図17. の矢印で表された原子) 間の距離の時間変化

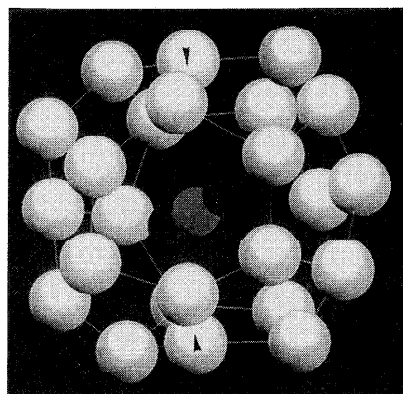
図14. は大ケージ中のCO₂分子の運動の軌跡である。CO₂の炭素原子の運動はケージ中心付近に限定され、酸素原子がその周囲を回転している様子が分かる。

クラスレートの安定性を調べるためにケージの頂点を構成する水分子の酸素原子同士の間二体相関関数 (P.C.F.) に注目する (図15)。破線で与えられているAr L6はCO₂の代わりにアルゴンを全ての大ケージの中に入れたクラスレートである。P.C.F.のピークはAr L6, Empty, CO₂ クラスレートの順に値が大きく、構造がこの順に安定であると言える。このことから、大ケージにアルゴンが入った場合は構造が安定化するのに対し、CO₂が入った場合は逆にクラスレートを不安定化させていることがわかる。このようにクラスレートはゲスト種やゲストの有無により安定性が著しく異なる。この機構を詳しく考察する。

図16. は大ケージの対角に位置する水分子の酸素原子対 (図17. の矢印で表された原子) 間の距離の時間変化を表している。O-O間の距離は7.8Å~9.4Å (それぞれ図16. の↑, ↓) で変化している。このO-O間の距離の最大、最小時での大ケージとゲストのCO₂の様子を表したものがそれぞれ、図17. (a), (b)である。O-O間の距離が最大時にはCO₂はO-Oに平行な姿勢になっているのに対し、最小時には垂



(a) 最大時



(b) 最小時

図17. O-O間の距離が最大・最小時の大ケージとCO₂分子

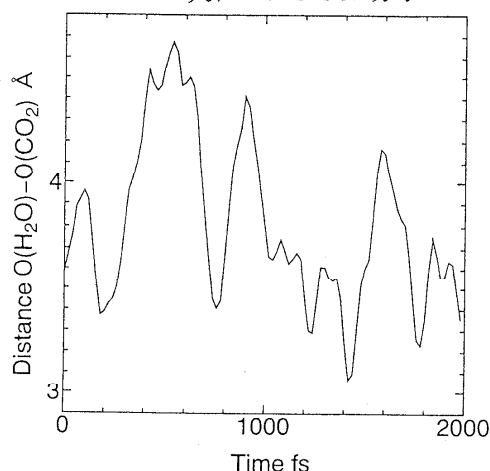


図18 CO₂の酸素原子と最近接のケージを構成する水分子の酸素原子の間の距離の時間変化

直になっていることがわかる。このことからケージの伸縮とゲストのCO₂の運動の間に強い相関があることがうかがえる。

図18は、CO₂の酸素原子と最近接のケージを構成する水分子の酸素原子の間の距離の時間変化を表している。値は3Å~5Åの間で変化している。この距離でのH₂Oの酸素原子とCO₂の酸素原子の間のポテンシャル分布を表したものが図19である。この3Å~5Åの距離ではCoulomb力項が支配的であることが言える。すなわちケージを構成するH₂O分子の酸素原子と包接されているCO₂分子内の酸素原子の間で作用するクーロン力がケージを歪ませ、CO₂クラスレートを不安定化させていると考えられる。

4.最後に CO₂による地球温暖化問題は、IPCC（気候変動に関する政府間パネル）から、個々の研究機関で進められている具体的なCO₂削減に関する研究まで、緊急かつ重要な課題として幅広い観点から検討が進められている。本稿は、東京工業大学の炭素循環素材研究センターで行ってきているマクロとミクロの双方からのアプローチを紹介した。CO₂問題は、基礎的なアカデミックな点からも解明されていない興味深い現象を多々あると思われる。今後ともCO₂を安定に貯留するための制御指針も含めて、さらなる研究の進展が望まれている。

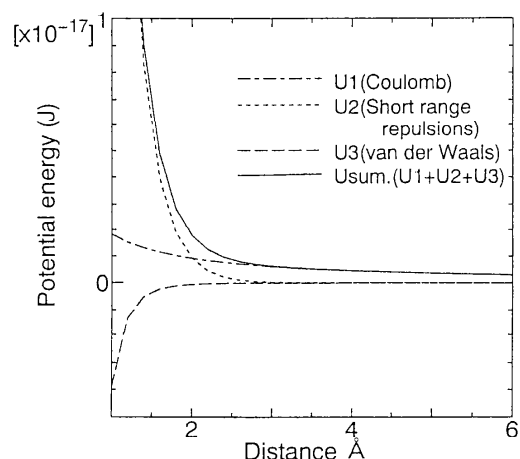


図19. H₂Oの酸素原子とCO₂の酸素原子の間のポテンシャル分布

参考文献

- (1)C.Marchetti,Climate Change, Vol.1. ,(1977) 59.
- (2)M. Steinberg et al., Brookhaven National Laboratory Report, OE/CH/00016 (1984)
- (3)S.Hirai et al, ICCDR-2 (submitted to Energy Convers. Mgmt.)
- (4)S.Hirai et al, Proc. CO₂ Fixation.& Efficient Utilization of Energy, (1993) 343.
- (5)平井ほか, 第32回日本伝熱シンポジウム講演論文集,Vol.1.,(1995) 179.
- (6)S.Hirai et al, Thermal Science and Engineering,Vol.3.. (to be published.)

高压水中における二酸化炭素の溶解挙動

綾 威雄（船舶技研）

1. 緒言

わが国に輸入される原油は、一日当たり20万トン級タンカーで数隻分であり、このほとんどは燃やされ、排ガスとして大気に排出されているが、分子量との関係から、燃焼後のCO₂重量は原油の3倍を若干超えるため、仮に、全てを回収し液化すると、同型タンカー10隻分近くにもなる。しかも、これ程の量が世界の4.7%(1988年)⁽¹⁾を占めるに過ぎないのである。勿論、人為起源CO₂の全てを大気から隔離しなければならないということではないが、地球温暖化傾向を緩和する目的で隔離する場合、処理すべき量がいかに膨大とならざるを得ないかが分かる。

一方、海洋の分子数は大気の約430倍もあることから、大量のCO₂隔離に適した場所の一つと考えられるようになった。CO₂を海洋で隔離する方法として、溶解法と貯留法が考えられている。前者は、海洋の分子数の大きさにものを言わせ、均一に溶解させた後のCO₂濃度の増加は極く僅かであることを狙いとした方法であるが、溶解過程で、どうしても高濃度領域が現れ、それによる海洋環境への影響が明らかにされなければならない。また、後者は、回収CO₂をできるだけ一定個所に留めておこうとする考えから生まれたものであるが、深度として、CO₂がCO₂溶解海水より重くなる3500m以深が要求され、前者よりコスト高となる可能性があるとともに、貯留CO₂の安定度や溶解後の挙動について不明な点が多い。

以上の状況を踏まえ、船舶技術研究所では、二つのCO₂海洋隔離法の実現性検討に必要な基礎資料を得るための実験を行ってきた。ここでは、これまでに得た結果の内、上記課題に関する部分について報告する。

2. 実験方法

実験装置は、深度700m(7MPa)対応と3000m(30MPa)対応の二つある。Fig. 1は、予備装置に当たる700m

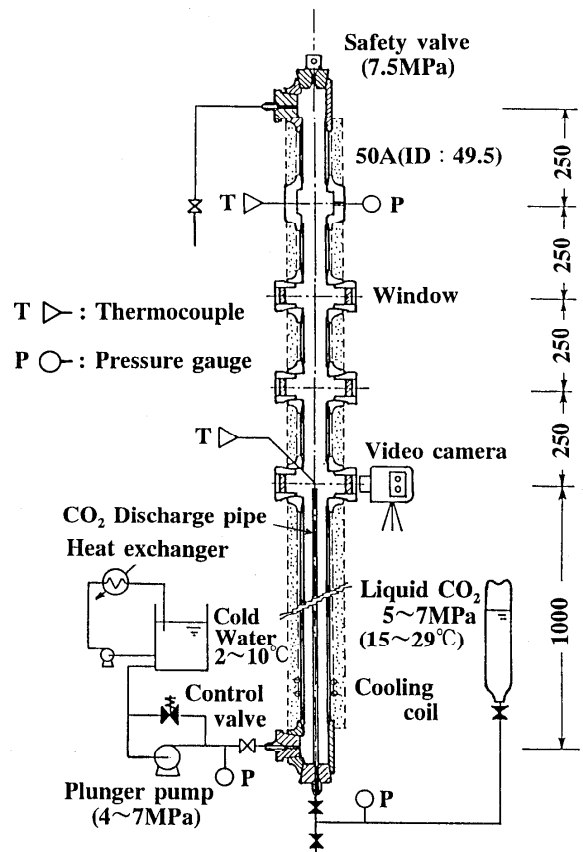


Fig. 1 7 MPa Test Facility for CO₂ Dissolution Method in Sub-Deep Ocean.

対応の装置の概略を示しており、飽和圧を利用したCO₂自己注入方式を採用している点の特徴であり、主に、溶解法に関する実験に使用した。温度制御は、鉛直管に巻き付けられた冷却管により行ったが、精度は±1 K程度である。

Fig. 2は、ループ形状をした3000m対応の装置を示しており、均質化と深海流を念頭に置いた循環が可能という特徴があり、主に、深海貯留法に関する実験に使用している。深海条件下では、CO₂はクラスレート・ハイドレート(以降、単にクラスレートと呼ぶ)とな

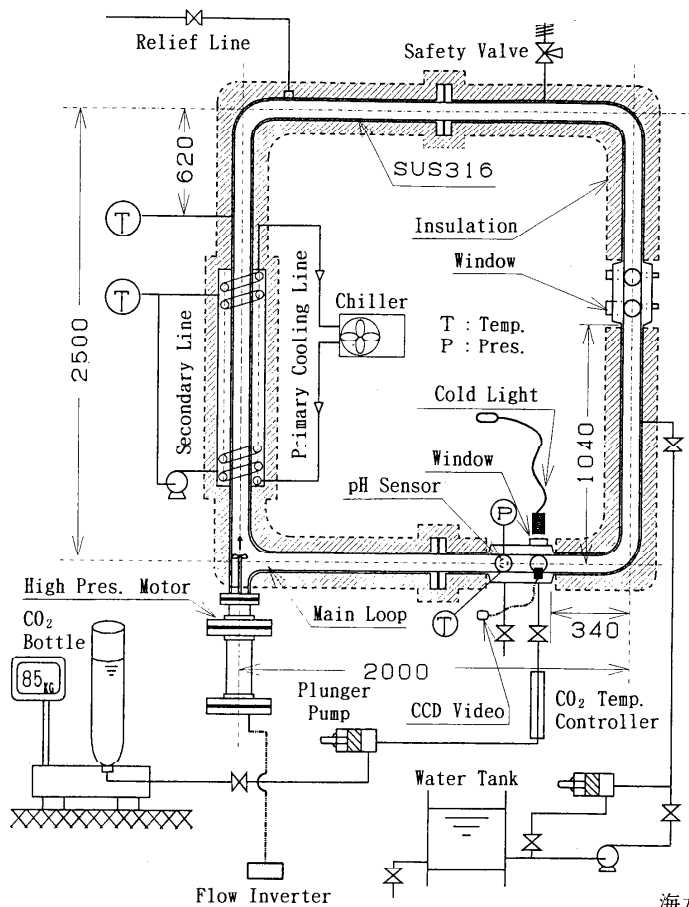


Fig. 2 30MPa Test Facility for CO₂ Storage in Ocean Floor.

るが、その性質は温度に敏感であるため、ファジー制御を取り入れ、±0.2Kの温度制御を実現させた。

高圧低温水中におけるCO₂の溶解挙動についての研究は従来ほとんど行われていないことから、観察が重要と考え、いずれの装置にもできるだけ多くの窓を設けた。そして、冷光源を使ったビデオ観察を通して、高圧水中に置かれた単一CO₂液泡の直径変化を詳しく調べた。

3. 溶解法に関連したCO₂溶解挙動

3.1 溶解法の適用深度

Fig. 3は、代表的な海洋の鉛直温度分布⁽²⁾に深度を圧力と見立てた場合のCO₂状態図を重ね合わせたものである。液体CO₂が水中でクラスレート化する限界温度(成平衡温度)は、清水中では10℃であるが、

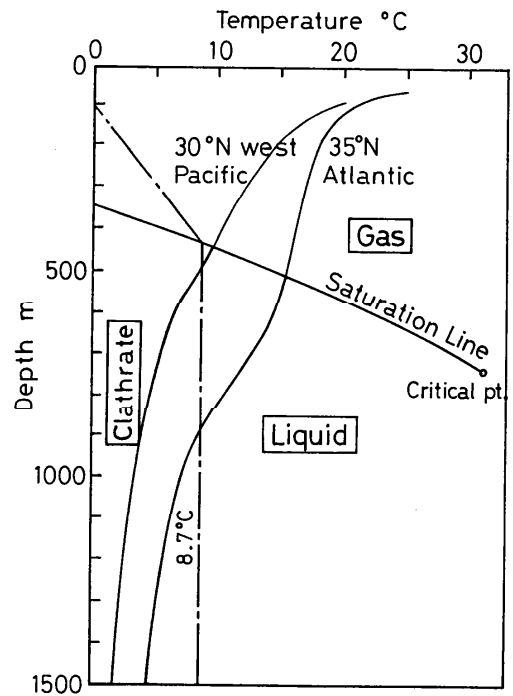


Fig. 3 CO₂ State and Typical Temperature Distribution in the Ocean.

海水の場合は、塩類の存在のため、8.7℃となる。

溶解法は、液体溶解法と気体溶解法とに細分できる。Fig. 3から、気体溶解法は、飽和線より上方の450~500m以浅に適用可能であることが分かる。液体溶解法の適用深度は、CO₂がクラスレート化しないという条件を付加すれば、わが国近海の西太平洋では500~400mと狭いが、北大西洋では900~500mと相当広い。しかし、後述するように、僅かのサブクールでは容易にクラスレート化しないことや、クラスレート自身も溶解することなどから、西太平洋においても深度1000m程度までは、事実上液体溶解法が適用できる。

気体溶解法は、処理深度が浅く、液体溶解法より経済性に優れているようにも見えるが、密度の低い気体を扱わざるを得ず、大量処理に適しているかどうか不明である。

3.2 CO₂液泡の上昇速度

液体溶解法を念頭に置き、Fig. 1の装置を使って、単一CO₂液泡の上昇速度を調べた。

Fig. 4⁽³⁾は、5 MPa、6℃の海水中における液泡径と上昇速度（25cm離れた2つの観察窓通過所要時間から算出）との関係を示している。実線① $[v_{\infty}=2r^2g(\rho_f-\rho_{CO_2})/9\mu_f]$ と点線② $[v_{\infty}=r^2g(\rho_f-\rho_{CO_2})/3\mu_f \text{ for } \mu_{CO_2} \ll \mu_f]$ はそれぞれ剛体球と液体球の終端速度の理論値⁽⁴⁾を表す。実験条件下でのCO₂と海水との相対密度差 $[(\rho_f-\rho_{CO_2})/\rho_f]$ は0.1程度であることから、CO₂単一液泡の上昇速度(○印の実験データ)は剛体球に近いことが分かる。その理由として、温度・圧力条件から、液泡がクラスレート膜で被われていたことが考えられる。また、Fig. 4には、参考のため、大気圧下の水中における空気泡の上昇速度も記載されている。

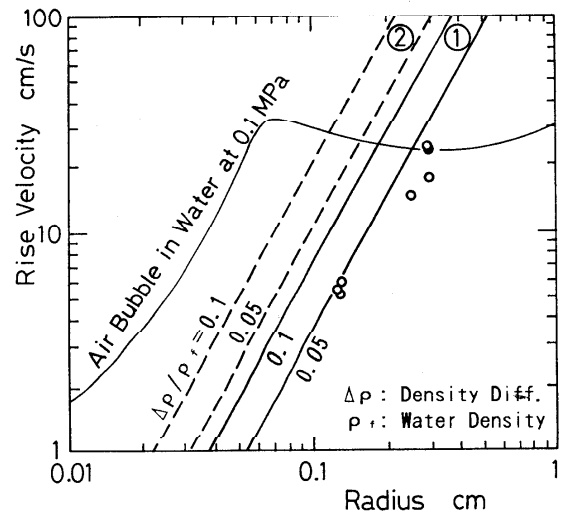


Fig. 4 Rising Velocity of a CO₂ Droplet.

3.3 上昇流中の単一CO₂液泡の溶解速度

上昇流中の単一CO₂液泡の溶解速度を求めるため、Fig. 4の液泡上昇速度にほぼ見合う下降流中の棒に止まらせた単一液泡の溶解過程をビデオ観察した。Fig. 5⁽³⁾は、観察記録を基に、圧力 5.5 MPa、温度10~11℃におけるCO₂液泡径と経過時間との関係をプロットしたものであるが、液泡径は時間とともにほぼ直線的に減少している。

ここで、CO₂液泡が溶解消滅する過程を考える。上昇中のCO₂液泡回りの海水中のCO₂濃度は溶解能力（飽和濃度）よりはるかに小さく、溶解したCO₂は速やかに液泡から遠ざかる。そのため、液泡単位表面積当たりの溶解速度は一定と仮定できる。すると、液泡質量 m と表面積 S との間には、次式が成り立つ。

$$dm/dt = -\kappa S \quad (1)$$

$m = (4\pi/3)r^3\rho_{CO_2}$ と $S = (4\pi/3)r^2$ を代入し積分すると、

$$r = r_0 - \kappa t \quad (2)$$

が得られる。この式は、液泡径が時間の経過とともに直線的に減少することを意味しているが、先に示したFig. 5の実験データの傾向と概ね一致している。このことから、「液泡単位表面積当たりの溶解速度は一定」との仮定はほぼ妥当であると言える。

液泡径の減少速度(Fig. 5の勾配)から、 $\kappa \approx 5 \times 10^{-6}$

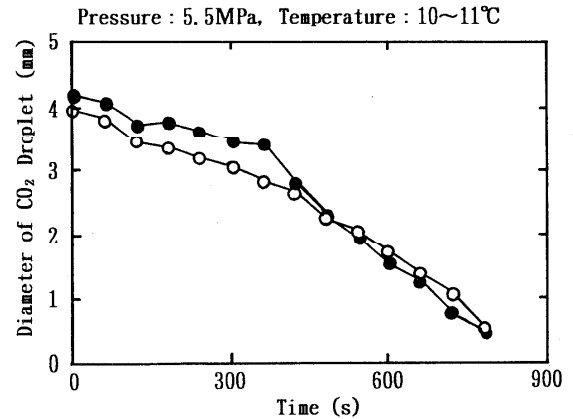


Fig. 5 Diameter Change of a Rising CO₂ Droplet.

m/s が得られる。

3.4 放出液泡径

液泡上昇速度のデータと一致する v_{∞} (Fig. 4の①)を使って、液泡が溶解消滅するまでに上昇する距離 h (m)を求めると、

$$h = \int v_{\infty} dt = g(\rho_f - \rho_{CO_2}) r_0^3 / 9\mu_f \kappa \quad (3)$$

となる。式(3)に物性値を代入することにより、液泡が100m上昇して溶解消滅する液泡径として $2r_0 = 3.7\text{mm}$ という値が得られる(ただ、Fig. 4のデータはクラスレート膜で被われている液泡に対するものであると考えられ、クラスレート膜で被われていない場合の液泡

上昇速度は、①より40%程度小さい②に近づく可能性がある)。

h と m (液泡質量)はともに r_0^3 に比例することから、一つの液泡が単位距離上昇する間の溶解量は直径によらず一定となる。つまり、 CO_2 の密度が一定で、液泡径が時間とともに直線的に減少し、その上昇速度が r^2 に比例するならば、 CO_2 液泡は鉛直方向に均質に溶解しながら消滅することになり、 CO_2 の海洋隔離の立場からは望ましい性質であると言える。

3.5 CO_2 注入洋上基地

Fig. 6は、液体溶解法を適用した CO_2 注入基地の想像例である。地球温暖化抑制策としての立場からは、少なくとも100万kWクラスの火力発電所からの CO_2 を一カ所のサイトで処理する必要があると考えられる。100万kWの火力発電所から排出される CO_2 量は350kg/s程度であるが、このような大量の CO_2 を3~4mmの液泡として放出すると、毎秒1千万個以上もの液泡となる。このような大量の液泡が上昇する際には、気泡運動に伴う上昇ブルームの発生が予想される。一方、 CO_2 溶解海水は回りの水より重く沈降しようとするが、上昇ブルームとの関わりが不明である。さらに、液泡間の相互作用も不明である。このように、本実験結果は CO_2 の液体溶解処理の実現性を否定するものではないが、処理施設を具体的に設計するためには上述のような基礎的な部分を明らかにする必要がある。

4. 深海貯留法に関連した CO_2 溶解挙動⁽⁵⁾

(CO_2 クラスレートの溶解特性)

4.1 清水中の溶解速度

CO_2 クラスレートは、生成領域にあっても、生成されないことが多い。これまでの実験から、高速で注入するとクラスレートが生成されやすことが確認されている⁽⁶⁾。この他、回りの水がそれまでに CO_2 クラスレートを生成したことがあるかどうか重要な鍵を握っている。つまり、過去にクラスレートを生成したことのある水(海水)は、現在クラスレートが存在していなくとも、新たに CO_2 を注入するだけで、容易にクラスレート膜が形成される。このようなクラスレートに対する処女性は、クラスレートが結晶性の物質であ

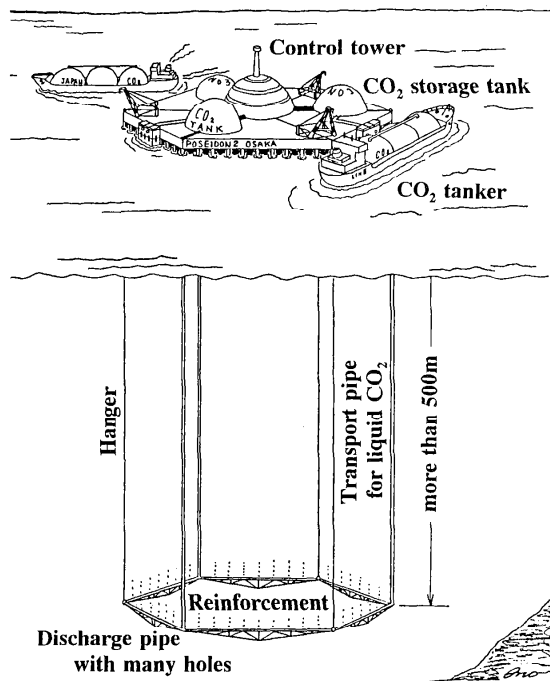


Fig. 6 Example of a Marine CO_2 Discharge Base for Dissolution Method.

るためであるが、クラスレート生成をコントロールする上で極めて重要な性質である。

Fig. 7とFig. 8は、流れのある清水中に置かれた単一 CO_2 液泡の溶解過程の映像例で、それぞれ、クラスレート膜で被われた場合と被われていない場合を示している。これらの図から、クラスレート膜の存在は、内部の液体 CO_2 の溶解を抑制するものの、防止する程ではないことが一目瞭然である。この事実は、「結晶体の CO_2 クラスレートが CO_2 の完全固定化に結びつくのではないか」との当初の期待を完全に裏切るものであるという意味において極めて重要である。溶解過程において、クラスレート膜が常にピンと張った状態であることなどから、クラスレート膜自身も水中に溶解することが判明した。

Fig. 9は、 CO_2 液泡径と経過時間との関係をプロットしたものであるが、いずれの場合も、上昇中液泡(Fig. 5)と同様、液泡径は時間とともに直線的に減少していることが分かる。これは、単位界面積当たりの溶解速度は液泡径に依存しないことを意味しており、 CO_2 海洋処理法を評価する上で重要な意味を持つ。

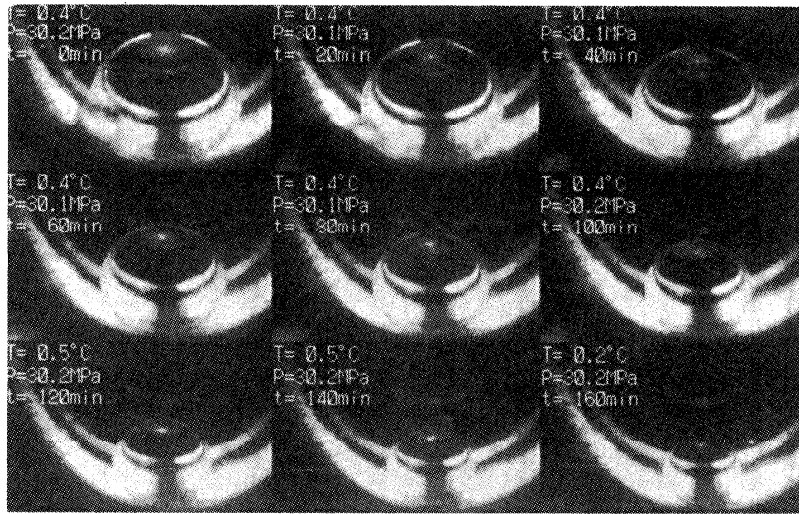


Fig. 7 Dissolution Process of a CO₂ Droplet with Hydrate Film (Time Interval:20 min., Initial Diameter : about 8 mm).

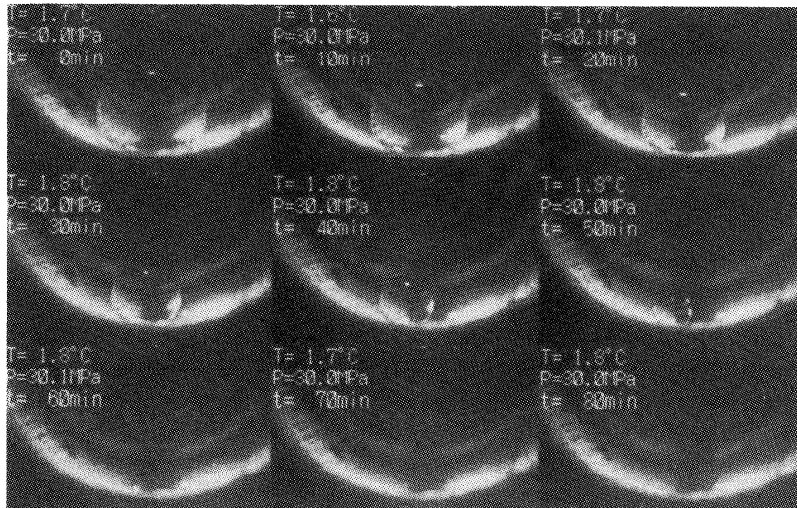


Fig. 8 Dissolution Process of a CO₂ Droplet without Hydrate Film (Time Interval:20 min., Initial Diameter : about 6 mm).

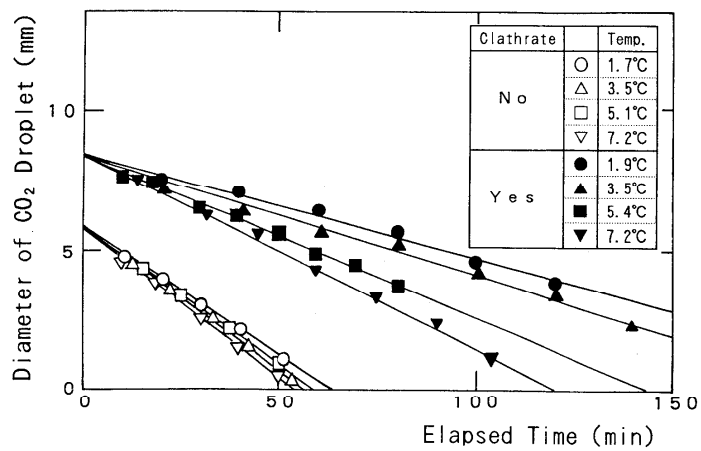


Fig. 9 Diameter Change of a Stationary CO₂ Droplet at 30 MPa.

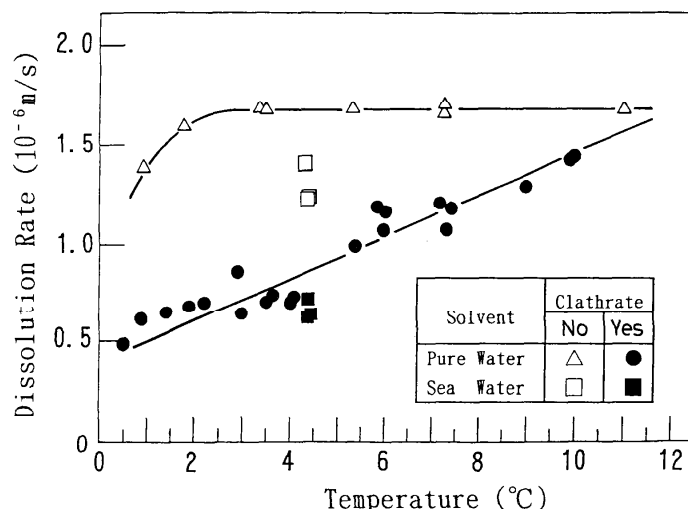


Fig.10 Effect of Temperature on the Dissolution Rate.

Fig. 9 には、クラスレート膜が存在する場合の CO_2 溶解速度は水温の影響も受けることも示されている。そこで、溶解速度 (Fig. 9 の勾配) を水温との関係で示したのが Fig.10 である。この図から、クラスレート膜がない場合の溶解速度は氷点に近くなるまではほぼ一定であるのに対して、クラスレート膜が存在する場合は、30MPa における液体 CO_2 - クラスレート - 水間の平衡温度である 12°C (7) からのサブクールに比例して溶解速度の減少が見られ、 2°C 付近では、クラスレート膜は溶解速度を約 $1/3$ 程度に減少させることが分かる。

なお、Fig. 10 に示される溶解速度は、先に求めた上昇液泡の場合の数分の一と小さい。この事実は、液泡回りの流れが溶解速度に大きな影響を与えることを示唆している。

4.2 高濃度 CO_2 溶解水中への溶解速度

液体 CO_2 の回りの水 (海水) がすでに CO_2 を溶解している場合の CO_2 液泡の溶解速度は低下することが予測される。そこで、その低下の程度を明らかにするため、 CO_2 濃度を $0 \sim 7$ 重量% に変化させ、 CO_2 液泡の溶解速度を調べた。Fig. 11 は、高濃度 CO_2 溶解水中の CO_2 液泡の溶解過程例であるが、時間間隔は Fig. 7 の 6 倍である 2 時間にもかかわらず、ほとんど溶解していないことが分かる。

次に、 CO_2 溶解濃度の影響を評価しよう。 CO_2 を溶解させようとする駆動力は飽和濃度と実際の濃度との差であろうと考えられるため、溶解速度 κ が次式で表されると仮定する。

$$\kappa = A(C_0 - C)^n \quad (4)$$

ここで、 $A(\text{m/s})$ は比例定数。

また、クラスレートの非生成域 (10°C 以上) については CO_2 水溶液の飽和濃度のデータ (8) は存在するが、クラスレート生成域については、全く公表データがない。濃度依存性実験を行った 8°C 付近では、7% 以上に CO_2 を溶解させることは困難であった (9) ことから、本実験のデータを $C_0 = 0.07$ として整理した。Fig. 12 は、以上の考えの基に、 CO_2 液泡の溶解データを水中 CO_2 濃度との関係としてまとめたものである。クラスレート膜のあるデータにフィットする実験式は、式 (4) において、 $A = 0.01 \text{m/s}$, $C_0 = 0.07$, $n = 3.5$ とした場合である。クラスレート膜がない場合も、溶解 CO_2 濃度の影響は大きいですが、3% 以上ではどうしてもクラスレートが生成されるため、それ以上の濃度に対するデータはない。

5. 新 CO_2 深海貯留法への適用

CO_2 の深海貯留は、代表的な CO_2 の海洋処理法であり、できるだけ一定個所に CO_2 を留めておく方法

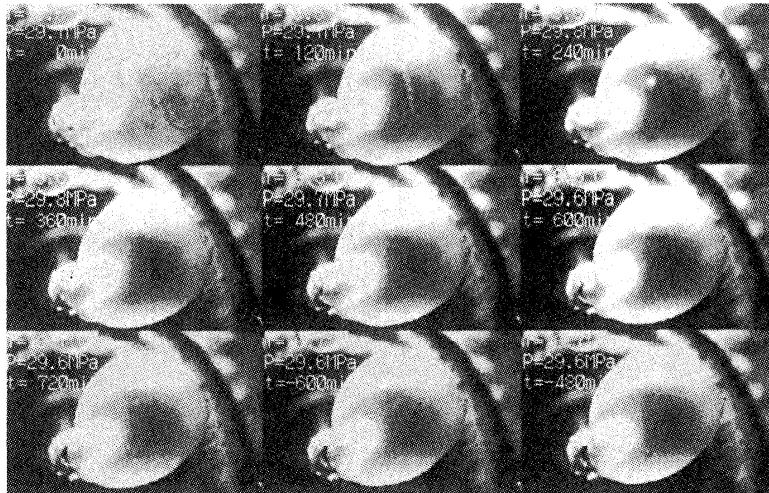


Fig. 11 Dissolution Process of a CO₂ Droplet in Highly CO₂-Dissolved Water (Time Interval:120 min.).

であって、実現されれば、海洋環境への影響が避けられない溶解法⁽¹⁰⁾とは異なり、海洋環境への影響が少ないという利点がある。しかし、CO₂ クラスレート自身が溶解するという事実を受けて、その実現性が危惧された。しかしながら、その後、CO₂ クラスレートの溶解性を前提にした新CO₂ 深海貯留法が提案されるに至った^{(9) (11)}。

Fig. 13は、その新CO₂ 深海貯留法を概念的に示したものである。深海底の窪地の途中までCO₂ を貯めると、湖のような液体CO₂ と海水との界面にはクラスレート膜が形成され、さらにその上方には、CO₂ を溶解した密度成層が形成される。この密度成層は、下方ほど高濃度となるが、CO₂ 溶解海水の密度は濃度に比例して増加するため、それ自身安定になろうとする性質がある。

一方、Fig. 12から、飽和濃度近くでは、クラスレート膜で被われたCO₂ 液泡はほとんど溶解しないことが明らかである。これらの事実から、もし、密度成層を乱す深海流及びCO₂ 溶解熱やクラスレート生成熱に対して密度成層が安定であれば、下方の液体CO₂ からの溶解速度は密度成層を通過する分子拡散程度に抑制することが可能となり、事実上、CO₂ の溶解を防止することができる。

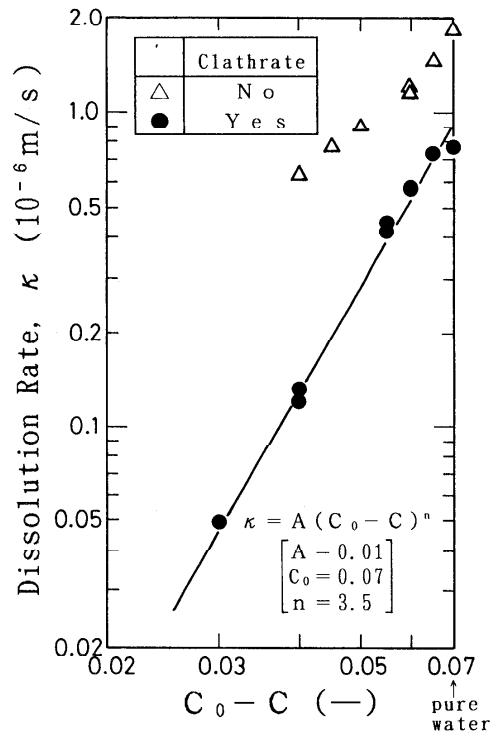


Fig. 12 Effect of CO₂ Concentration on the Dissolution Rate.

6. まとめ

CO₂海洋隔離法の実現性検討に必要なCO₂とそのクラスレートの高圧水中における溶解挙動を、溶解法

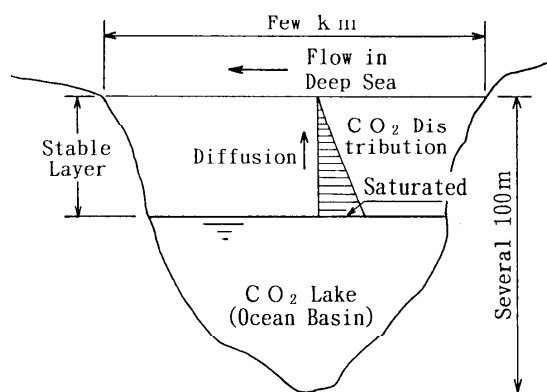


Fig. 13 New Concept of CO_2 Storage in the Ocean Floor.

と深海貯留法について実験的に調べた。

溶解法に関わる単一 CO_2 液泡の上昇速度と溶解速度の検討から、上昇速度と溶解速度とも液泡径の2乗に比例するため、海洋への溶解量は液泡径によらず一定であること、及び100m上昇する間に溶解が完了する液泡径は3.7mm程度であることが判明した。

しかし、実際に液体溶解法が適用される場合には、極めて大量の CO_2 が放出されるため、大液泡群に誘起される上昇ブルームや CO_2 溶解海水の沈降挙動などが CO_2 液泡の溶解過程に影響を与えるものと考えられる。今後、これらの影響を明らかにし、他の方法と比較しつつ液体溶解法の実現性を検討する必要がある。

また、深海貯留法に関わる溶解実験から、クラスレート生成域にあってもクラスレート膜が生成されない場合のあること、クラスレート膜が生成されている場合の溶解速度の減少は、クラスレート生成平衡温度からのリブケール度に比例すること、 CO_2 溶解濃度の増加とともに、溶解速度は急激に減少し、飽和濃度近くではほとんど溶解しないことなどが判明した。

CO_2 クラスレート自身が溶解するという事実は、 CO_2 深海貯留の実現を危うくするものであった。しかし、「高濃度 CO_2 溶解水中へのクラスレートの溶解

はほとんど無視できる」という新事実は、 CO_2 クラスレートの溶解性を前提とした CO_2 深海貯留法の実現を期待させるものである。

文献

- (1)例えば、平成3年版環境白書。
- (2)西山勝暢、太平洋と大西洋、海と安全(1987-9)、p. 9-11.
- (3)綾威雄 他、水中を上昇する単一 CO_2 液泡の溶解速度、混相流シンポジウム'94(第13回)(1994-7)、p. 211-214.
- (4)G.B. Wallis, "One-dimensional Two-phase Flow," McGraw Hill (1969), p. 248-250.
- (5)綾威雄 他、 CO_2 クラスレートの生成と溶解特性、機会学会 第4回動力エネルギー技術シンポジウム(1994-12)、p. 231-236.
- (6)綾威雄 他、二酸化炭素の深海投棄に関する研究(その2. クラスレート膜を通しての二酸化炭素溶出速度)、機会学会第2回環境工学総合シンポジウム(1992)、p. 265-269.
- (7)Wadslcy, M.W., Thermodynamics of Multi Phase Equilibria in the CO_2 -Seawater System, 2nd Int. Workshop on Interaction between CO_2 and Ocean, Tsukuba, Japan(1993), p. 88-110.
- (8)例えば、Perry, R.H., et al., Perry's Chemical Engineers' Handbook, 6th Edition, McGraw Hill (1984), p. 3-101.
- (9)綾威雄、高圧水中における CO_2 クラスレートの生成と溶解性、 CO_2 クラスレート研究会講演発表記録、北海道大学(1993-1)、p. 14-21.
- (10)綾威雄、 CO_2 深海貯留の可能性と技術的課題、太陽エネルギー 19-5(1993)、p. 19-25.
- (11)Shindo Y. et al., New Concept of Deep Sea CO_2 Sequestration, Int. Symposium on CO_2 Fixation and Efficient Utilization of Energy, Tokyo (1993), p. 307-314.

海水中における二酸化炭素の拡散と深海条件下の挙動

西尾 匡弘（機械技術研究所）

1. 緒言

産業革命以来の人類による化石資源消費の増大に伴う大気中のCO₂濃度の増加は、地球の温暖化を促進するだけでなく、海面上昇や異常気象を引き起こす原因になるとも言われている。しかし、現在のエネルギー需要を賄うためには化石資源に頼らざるをえないのが実情であり、非化石資源によるエネルギーへの転換が効率的に行われない限り直接的なCO₂排出抑制策が必要になるものと考えられる。現在様々なCO₂の大気への排出抑制策が検討されつつあるが、全世界で排出される化石資源由来のCO₂は年間200億トン以上にもおよぶため、その膨大な量への対応策として、大量排出源から回収されるCO₂を1) 海洋の中深層に分散・吸収させる方法、2) 深海底に貯留・隔離する方法あるいは3) 地層、地下帯水層や廃油井への埋め戻しによるCO₂隔離等が有力な候補と考えられている。筆者等は、分離回収されたCO₂を、海洋の中深層へ直接投入し分散・溶解・希釈させる海洋吸収固定法が最も有効なCO₂対策になりうるものとして捉えている。^{1,2)} いうのも、海洋が現状においても大気中に存在するCO₂の数十倍の量を溶解している大きなリザーバーでありかつ、混合がほとんど行われていない未飽和の深層水が持つCO₂吸収能力は、可採埋蔵量の化石資源消費量にも匹敵すると推算されるからである。²⁾ しかしながら、人工的に海洋へCO₂を投入した場合、溶解に伴う局所的なpH低下による海洋生物や周辺環境への影響が懸念される。したがって、海洋中におけるCO₂の移動現象を定量的に検証するためにも、CO₂の溶解・拡散や高压海水中での液体CO₂の挙動などを検討する必要がある。本稿は、機械技術研究所で行っている、海水中のCO₂拡散係数の検討、海洋中の条件を模擬した高压容器内における液体CO₂の挙動の実験的検討、さらに海水中へのCO₂溶解に伴う物性値の検証などについて述べる。

2. 水および海水中のCO₂拡散係数

海水中へのCO₂の溶解拡散挙動を考える場合、輸送物性として拡散係数の値を知ることも重要な事である。大気圧下での水中のCO₂拡散係数については従来から液柱法^{3,4)}、ダイヤフム法⁵⁾など各種手法によるデータが数多く報告されておりHimmelblau⁶⁾によるレビューもある。しかし、高压下でのCO₂拡散係数に関する報告は富田、長島⁷⁾によるもの他には見当たらず、彼らの測定値の傾向もこれまでの各種理論式では説明出来ていない。今後の検討が待たれている。一方、電解質水溶液中の拡散係数^{8,9)}についても幾つか報告があるが、多種の金属イオンを含む海水中におけるCO₂拡散係数に関するデータも見当たらない。ここでは、従来からのデータを元にした相関式と実験的検討の一部を紹介する。

2.1 CO₂拡散係数の相関式

海水は塩類濃度0.55mol/l程度の比較的高濃度の電解質水溶液として取り扱う必要がある。電解質水溶液の場合、溶解しているイオン種によって粘度が増加または減少し、拡散係数の値もその粘度変化に対応して変化することが知られている。^{4, 8, 9)} た例えば、純水および電解質溶液に適用できるCO₂の拡散係数相関式として船造、西尾¹⁰⁾による以下の式がある。

$$D_w/T = 1.013 \times 10^{-14} \eta^{-0.9222} \quad (1)$$

この式は電解質溶液中のCO₂拡散係数を平均絶対誤差3.9%で表現でき、現状で最も相関精度の高い式の一つである。海水中におけるCO₂拡散係数を直接求めた実験や相関式に関する報告は見当たらないが、粘度によって整理された電解質溶液内の拡散係数の推算式が適用できるとすれば、純水より粘度の高い海水中のCO₂拡散係数は純水中の拡散係数の値に比べ小さくなることが予測される。

2.2 海水中のCO₂ 拡散係数の実験的検討¹¹⁾

液面下部にCO₂-海水界面を構成する吸収実験法¹¹⁾を用いて、溶液中のCO₂ 濃度の経時変化を測定して求めた拡散係数について述べる。本手法は、通常の気液界面が液面の上部に構成されるCO₂ 吸収実験では、CO₂ を吸収して密度上昇した海水がブルーム状に沈降してしまうため、静的な挙動を観測できないことから考案した方法である。実験装置の概要をFig.1 に示す。

実験は、分光器用角型ガラス・セルに所定量のpH指示薬を添加した人工海水を満ち、開口部をステンレス製金網(200mesh)で覆って試料の脱落を防止した後、耐圧ガラス容器内に倒置して設置することにより液面下部に気液界面を構成し、CO₂ガスは下方から上方に向けて吸収・拡散される。なお、セル内部のpH変化は分光光度計によって連続的に測定し、pH値は二波長比色法により求めた。実験条件は1気圧の純CO₂ 雰囲気中で温度20°C一定として、海水中の初期CO₂ 濃度を変えることにより、拡散係数のCO₂ 初期濃度依存性も検討した。なお、拡散係数の計算にあたっては、一次元拡散を仮定し、発熱や密度変化については無視しうるとした。

Fig.2 に実験から求めた拡散係数とあわせて文献値としてHimmelblau⁶⁾ のおよび恩田ら⁴⁾ のデータを示した。CO₂初期濃度を変化させた実験から求めた海水中におけるCO₂ の拡散係数は、飽和濃度の20%程度までと濃度範囲は狭いものの濃度上昇に伴って減少する傾向が確認された。これは、恩田らによる純水中でのCO₂ 拡散係数が飽和濃度の約6割程度までの濃度域で一次関数的に減少するという傾向と一致している。これらから、一般的な電解質の場合と同様にCO₂ 溶解に伴って海水の粘度が上昇するものと考えられる。

ここで、粘度に着目した相関式である(1)式を用いて海水中のCO₂ 拡散係数を推算する。20°Cにおける純水の粘度1.0mPa・s、海水の粘度1.2mPa・sから、純水中における希薄状態でのCO₂ 拡散係数が $1.73 \times 10^{-9} \text{m}^2/\text{s}$ 、海水中のCO₂拡散係数は $1.47 \times 10^{-9} \text{m}^2/\text{s}$ と推算される。実験から求めた海水中の低CO₂ 濃度域での拡散係数値は $1.12 \times 10^{-9} \text{m}^2/\text{s}$ であることから、粘度と拡散係数の相関式は海水に対しても適用できる可能性が示された。なお、Horne and Johnson¹⁷⁾の報告よれば、海水の比

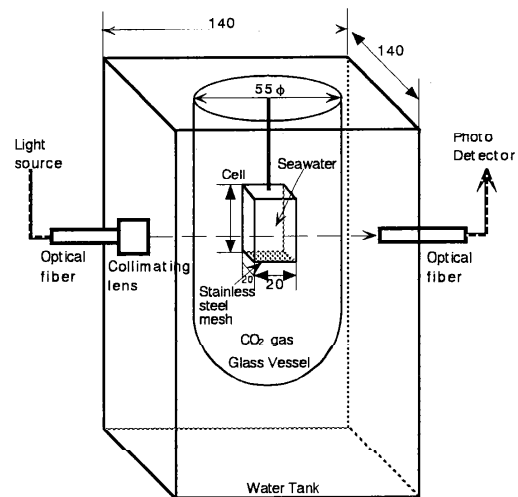


Fig.1 CO₂吸収実験装置概要

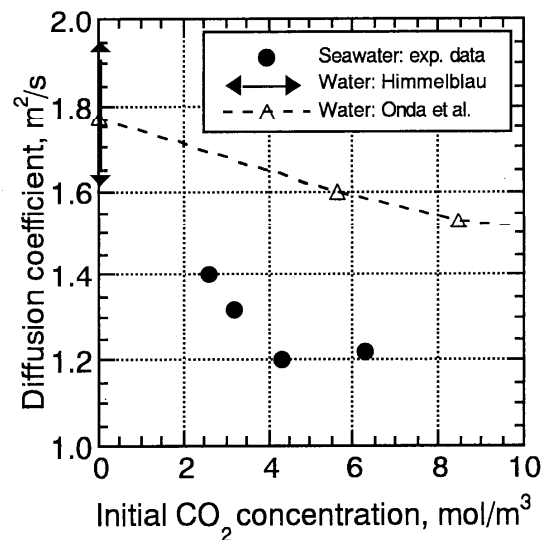


Fig.2 海水中CO₂拡散係数の初期濃度依存性

粘度は圧力および温度条件によって複雑な挙動を示すとされている。したがって、粘度との相関の高い拡散係数についても、諸条件によって単純な挙動を示すかどうかは不明であり、より詳細な検討が必要である。さらに、直接海洋中へCO₂ を投入する場合の拡散挙動を把握するためにも、より高いCO₂ 濃度域かつ高圧力でのCO₂ の拡散係数を検討する必要があると考えられる。

3. 深層海水条件下の液体CO₂ 挙動^{12,13)}

Fig.3に概要を示した可視窓付高圧実験装置による

深層海水条件下における液体CO₂挙動の観測実験について述べる。高压セルはステンレス製で、CO₂と水の密度が逆転する約300kg/cm²（深度3,000m相当）を中心に実験できるよう耐圧力550kg/cm²（深度5,500m相当）で設計されており、容器内部は内径100mmφ、高さ300mmの円筒状、容積2.35 lである。観測用可視化窓は、直径12mmφの開口部を持つガラス窓を容器底部からそれぞれ6mm, 18mm, 30mmの高さに対向して3組6ヶ所および容器上部に採光窓を1ヶ所設けている。なお、容器内側にテーパーを設けることによって内部視野拡大を図っている。容器底部に設けた銅板は恒温水を循環出来る構造としており、加熱・冷却実験を行うことが可能である。圧力は水をポンプで昇圧した後、背圧弁により設定する。液体CO₂の送り込みは1/8 inch SUSチューブを介して高压ポンプを用いた。CO₂挙動の観測は、窓から超小型CCDカメラによって行い、併せてビデオ録画も行った。

3.1 液体CO₂ 注入時の挙動

深層海水条件では、圧力および温度がCO₂包接化合物（CO₂ clathrate hydrate：以下ハイドレートと略記する）を生成しうる条件であることが知られており、液体CO₂-海水界面に膜状のハイドレートが生成される等の様子は各種報告されている。^{14, 15, 16)}ハイドレート

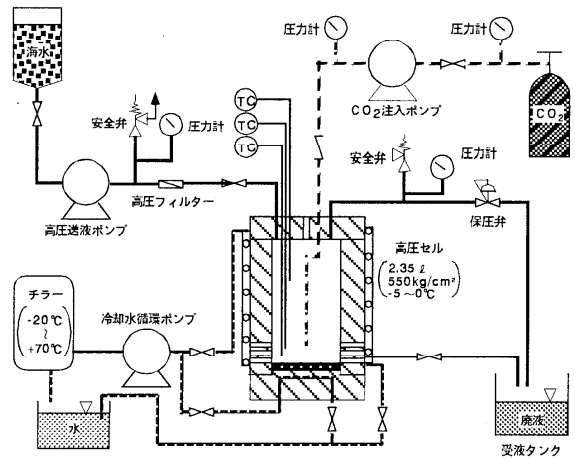


Fig. 3a 深海模擬実験装置概要

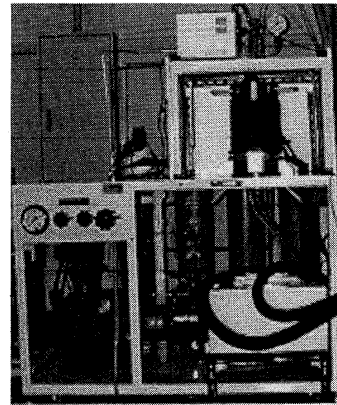


Fig. 3b 深海模擬実験装置全景

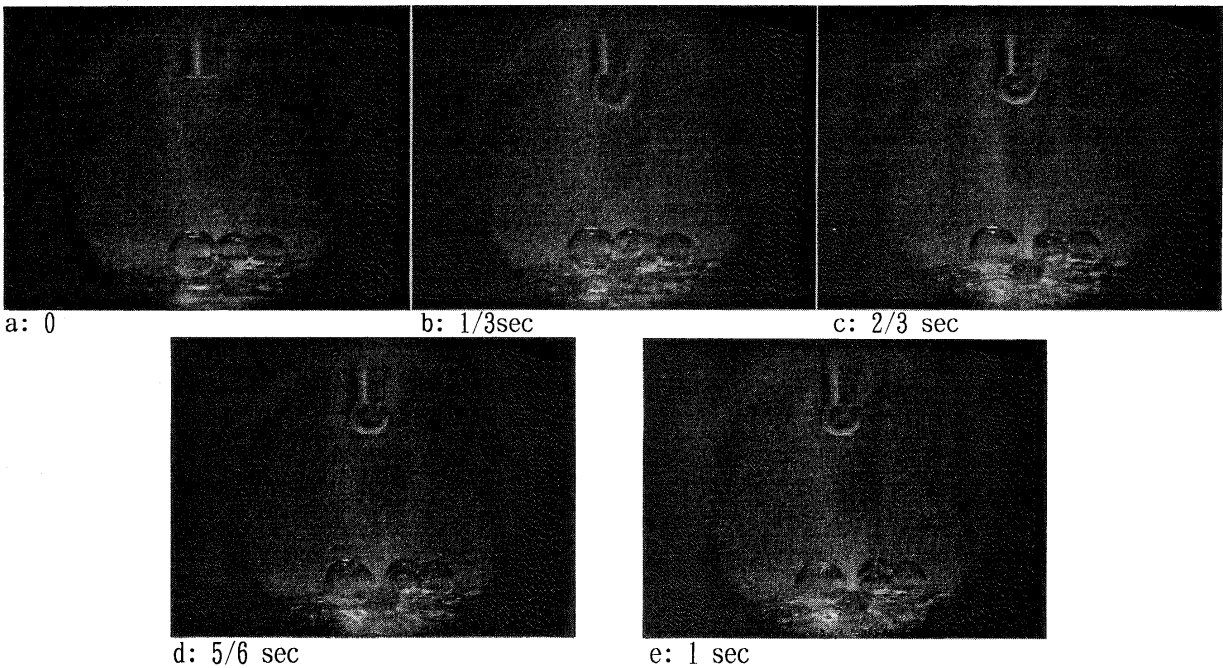


Fig. 4 ハイドレート膜生成過程 (48MPa, 281K)

膜が生成を伴うことは、溶解吸収法を実行する上での障害要因となる可能性を秘めており、検討の必要がある。本装置においても、容器底部に向けて液体CO₂を注入した場合に液体CO₂-海水界面にハイドレートの生成の様子が観測されている。

Fig. 4a-4d には、容器底部に溜めた液体CO₂上にCO₂液滴を滴下する実験の一例を示した。実験条件は45MPa, 280Kであり、ハイドレート生成条件を十分に満たしている。Fig. 4aで、底部に溜まっているCO₂に落下したCO₂液滴が接触し、CO₂液滴と貯留CO₂の接触部位から上に向かってハイドレートが成長する様子が観測されている。ハイドレート膜は一秒程度で数mmの液滴を覆い尽くす。その際に、一旦皺状の膜で覆われるが、続けて滑らかな表面が成長していく過程が見られた。また、滴下した液体CO₂の表面はハイドレートで包まれた液滴が積み上がりいわゆる葡萄状になった。

人工海水中に45MPa, 281Kの深海条件に液体CO₂を吹き込んだ場合の様子について、一例をFig. 5に示す。液体CO₂を100ml/minの速度で直径約3mmのノズルから噴出した場合、容器底部に衝突することによる微粒化も手伝って、液滴の粒子系は数mmから10mmと小さなものになっているが、液滴そのものはハイドレート膜に覆われており、液滴粒子が合一しないで積み重なるように溜まっているのが分かる。

一連の注入実験では、純水中よりも人工海水中のほうがハイドレート生成が容易に観測できる傾向にあったが平衡データとは逆行する結果であり、結晶成長の機構も含めて検討が必要である。また、CO₂溶解によって周辺海水の密度が上昇し、一旦沈降したCO₂液滴が再上昇するなどの事例も観測されていることから溶解に伴う物性値を検討する必要があることが分かった。

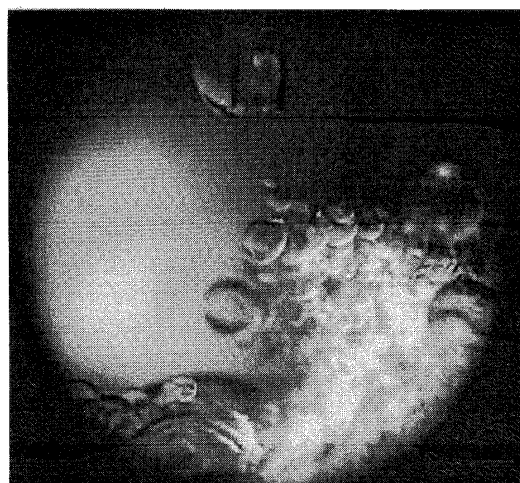


Fig.5 液体CO₂吹き込み例(45MPa, 280K, 100ml/min)

3.2 貯留液体CO₂の冷却・加熱実験

CO₂の深海底貯留の場合の海底からの熱輸送を想定して、高压容器底部にCO₂液溜りを構成し底部銅盤を冷却・加熱する実験により、液体CO₂-海水界面のハイドレートの生成・解離挙動を観察した。

まず、ハイドレート生成挙動として、Fig. 5a-d に高压容器内底部に貯留したCO₂液滴（直径約30mm）を冷却した場合について示す。溶液は人工海水を用い、初期条件の温度条件をハイドレート非生成領域（285K, 45MPa）として冷却を開始した。(Fig. 5a) 冷却盤付近温度282.4Kとなったところで液滴下部からハイドレート膜の成長が確認され、(Fig. 5b, 5c) 3分程度でほぼ全球を覆い尽くした。なお、同様の実験を周辺温度284Kから行った場合、ハイドレート膜が全球を覆い尽くすのに数秒しか要せず、温度に対する依存性が大きいことが示された。

次に底板の加熱を試みた。加熱実験は、ハイドレー

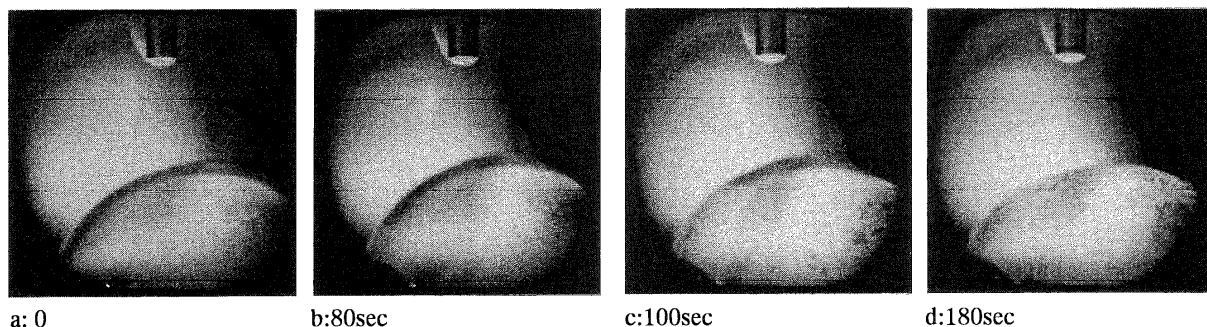


Fig. 5 CO₂液滴冷却過程（人工海水, 45MPa, 285K → 283.4K）

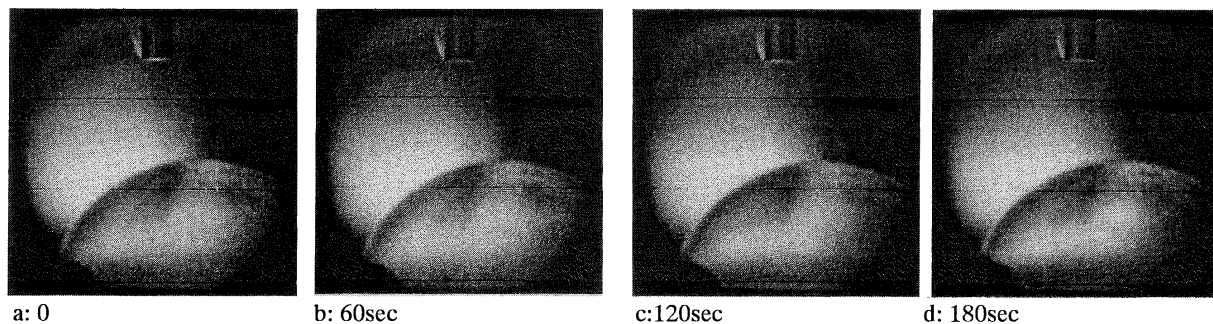


Fig. 7 CO₂ 液滴加熱過程 (人工海水, 45MPa, 283K → 285K)

ト解離・崩壊過程を確認する事が目的であるが、深海底からの熱供給を模擬した実験と捉える事ができ、実際の海底で起りうる状況と考えられるものである。冷却実験と同様溶液には海水を用いて初期条件をハイドレート生成領域 (280K, 45MPa) で表面がハイドレートで覆いつくされている状況から加熱を開始した。(Fig. 7a) 加熱盤付近温度が285K付近で液滴内部に対流が観測されるようになると、液滴の表面で、もや状のゆらぎが観測され (Fig. 7b)、やがてCO₂ ハイドレート膜が解離・崩壊した。(Fig. 7c, 7d) 水中における同様の実験では、ハイドレート膜の崩壊・解離過程において液滴表面を分裂したハイドレート膜が滑り落ちるなどの様子が観測されたが、海水中では霧上に消失する過程が支配的であった。これらの挙動の差異として、海水中に含まれる金属イオンによる影響等で純水中に比べてハイドレート膜が十分に成長していないのではないかと考えられる。すなわち海水中でのハイドレート膜成長速度や膜厚を検討する必要がある。また、ハイドレート生成時の塩分排斥 (濃縮) による影響も無視できないものと考えられる。

以上のような、温度変化によるハイドレートの生成・解離挙動は海水中において純水中とは異なる挙動を示すことが多々あり今後とも詳細に検討する必要がある。特に、金属イオンによる化学的挙動は海洋中の流れ場や密度・温度成層等の物理的挙動とともに定量的な検討を進める上で今後の大きな課題であるといえる。

4. CO₂ 溶解に伴う物性値検証の必要性

先にも示したように、海水中にCO₂ が溶解することによって、海水の物性値は大きく影響を受けることが明らかになってきた。特に、海水中のCO₂ の拡散は溶

液の粘度によって相関出来る可能性があるものの、粘度が温度・圧力およびCO₂ の濃度によっても大きく影響を受けることや、CO₂ が溶解することにより海水の密度が著しく上昇すること、さらにはこれらの事象を考える場合に塩分濃度やイオンの平衡関係も複雑に絡み合ってくる事から考えても、これまで主として平衡関係や相図などをもとに行われてきた定性的な挙動の推測が必ずしも正しくないという可能性を示唆している。

本研究室では、新たに深海7,000m(70MPa)に相当する高圧・低温条件下での物性値として、密度および粘度をFig. 8に示す装置で計測に着手したところである。パラメータには、温度、圧力はもとより既存のデータではほとんど見当たらないCO₂濃度による各種物

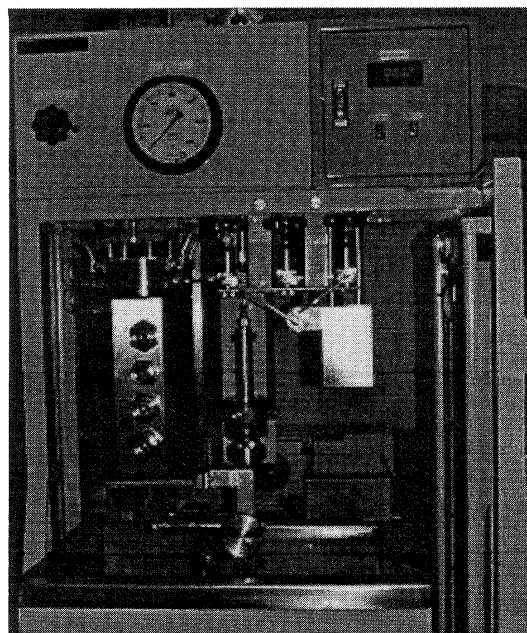


Fig. 8 溶液粘度および密度測定装置外観 (70MPa)

性の依存性を検証し、実際にCO₂の海洋投入に関するであろう各種物性を実験的に明らかにするとともに、CO₂の海洋固定の技術的可能性を検討する予定である。

5. おわりに

地球温暖化対策として有望な手段の一つである海洋利用によるCO₂固定法には非常に大きな期待が寄せられている。しかしながら、その手法の性質として緊急避難的に行われるべきものであって本質的な解決策ではないことを忘れるわけにはいかない。また、本格的にこれらの手法が取り入れられるためにはまだまだ解明しなければならない問題も山積しており、ここで一部紹介した物理化学的な事象はもとより、最終的には生物影響も含めた形で厳しい評価を受けた後、慎重に実行されるべき対策であることも言うまでもない。今後一層の多角的な研究を促進することにより、海洋を利用したCO₂隔離・固定の可能性が明らかになるものと考えている。

[参考文献]

- (1) 赤井, 化学工学 Vol. 55, No. 9(1991), 706-709.
- (2) 西尾 他, 第8回エネルギーシステム経済・コンファレンス講演論文集 (1992), 379-382
- (3) 恩田 他, 化学工学 Vol. 24, No. 12(1960), 918-925.
- (4) 恩田 他, 化学工学 Vol. 34, No. 6(1970), 603-607.
- (5) Keller, K. H. et al., J. Phys. Chem., Vol. 75, No. 3 (1971), 379-387.
- (6) Himmelblau, D. M., Chemical Reviews, Vol. 64 (1964), 527-550.
- (7) 富田・長島: 第14回熱物性シンポジウム講演要旨集, (1994) 315
- (8) Ratcliff, G. A. et al., Trans. Instn Chem. Engrs., Vol. 41, (1963), 315-319.
- (9) 恩田 他, 化学工学 Vol. 36, No. 8(1972), 903-907.
- (10) 船造・西尾, 化学工学論文集 Vol. 59, No. 4
- (11) Nishio, M. et al.: Proc. of The Int. Symp. on CO₂ Fixation & Efficient Utilization of Energy, Tokyo, Japan (1993), 361-366
- (12) 西尾 他, 環境技術研究総合推進会議第3回研究発表会資料:地球温暖化委員会 (1995) 地-21
- (13) 西尾 他, 化学工学会第60年会研究発表要旨集 (1995) D326
- (14) Aya, I. et al.: Proc. of The Int. Symp. on CO₂ Fixation & Efficient Utilization of Energy, Tokyo, Japan (1993). 351-360
- (15) 平井 他, 第31回伝熱シンポジウム講演論文集, G151 (1994) 158
- (16) 内田 他, 化学工学シンポジウムシリーズ, Vol. 38 (1993) 125.
- (17) Horne, R. A. and Johnson, D. S.: J. Geophys. Res. Vol. 71 (1966) 5275
- (18) Bidwell, J. P. and Spotte, S.: Artificial Seawaters Formulas and Methods, Jones and Bartlett, 246-247

CO₂ハイドレートの構造と生成・解離メカニズム

内田 努 (北海道工業技術研究所)

1. はじめに

大気中に放出されるCO₂の量をコントロールして、地球温暖化を防ごうという研究が各地で行われている。いろいろな対策技術がある中、日本では海洋貯留法の検討が盛んに行われている。工場の排煙などから回収した膨大な量のCO₂を、海洋のCO₂吸収力を利用して、大気から隔離しようというものである。日本は四方を海で囲まれているので、海へ運ぶことが容易なのである。CO₂の海洋貯留技術研究を活気づけたもう一つの要因は、深海探査船「しんかい2000」による海底からの天然液体CO₂湧出現象の発見が挙げられる[22]。深海底ではCO₂を貯蔵することができる、ということを示す発見であった。

CO₂を3700m以深の深海底に注入するとCO₂は海水より重い液体になり、海洋の凹地に溜まり、長期間大気から隔離・貯蔵することができる[19]。しかしCO₂の溶解により、海水が酸性化する心配がある。注入したCO₂が容易に海水に溶けないようにするための、CO₂溜まりに蓋をする役目をする物質として注目されているのが、CO₂ハイドレートである。CO₂ハイドレートは、H₂OとCO₂とが化合してできる、氷に似た固体で、CO₂の透過率は小さいといわれている。つまりCO₂ハイドレートの蓋の効果を調べるためには、CO₂ハイドレートの生成・解離機構、および生成されたCO₂ハイドレートの物性を知らなければならない。一方、環境へのインパクトと経済性を考慮して、CO₂を1000m深程度の中層海水中に放流し、積極的に溶解させる方法も考案されている。CO₂注入深度が数百m以深の場合は、注入したCO₂流体の周囲にCO₂ハイドレートが形成されるため、今度はCO₂の溶解を妨げる働きをする。この方法ではCO₂ハイドレートは障害物である。この現象をシミュレートするためには、CO₂ハイドレートの生成・解離速度の知見が必要となる。このように、CO₂の海洋貯留法を検討する上で、CO₂ハイドレ

ートの物性と、生成・解離メカニズムを理解することは必要不可欠である。

本稿は、現在までのCO₂ハイドレートの構造・物性や、生成・解離のメカニズムに関する研究を概説し、CO₂の海洋貯留法に関連する最近のCO₂ハイドレートに関するいくつかの研究を紹介する。

2. CO₂ハイドレートの構造と物性

「CO₂ハイドレート」とは、CO₂分子が水分子の作った籠状構造の中に取り込まれた構造を持つ、包接水和物(クラスレート)の一種である。正式にはCO₂包接水和物(CO₂クラスレート・ハイドレート)であるが、CO₂クラスレート、またはCO₂ハイドレートなどと呼ばれることが多い。

CO₂が十分に多いCO₂、H₂O混合系の相図を図1

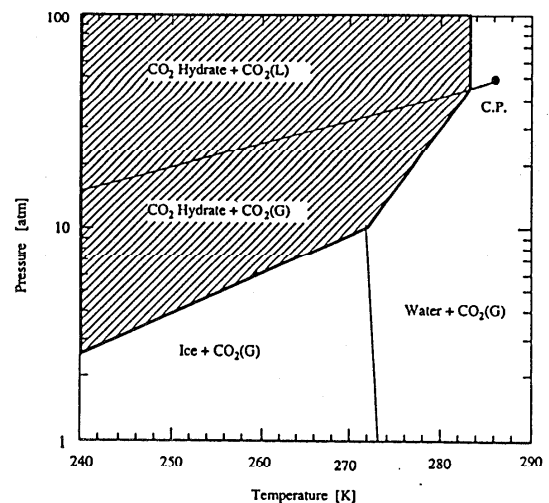


図1: CO₂、H₂O混合系の相図

に示す[29]。太線で示した線が、CO₂ハイドレート、CO₂、H₂Oの三相共存曲線で、この線より低温、あるいは高压条件下でCO₂ハイドレートは安定に存在する(図中斜線部)。例えば、0℃では約12気圧以上でCO₂ハイドレートが生成可能とな

る。CO₂と海水との系では、純水系より若干生成されにくくなる[4, 29]。つまりこの図では、三相共存曲線が、より低温、高圧側にシフトする。実際の海洋では、約450m以深にCO₂を注入すると、海水と反応してCO₂ハイドレートが生成されることがわかる[10]。

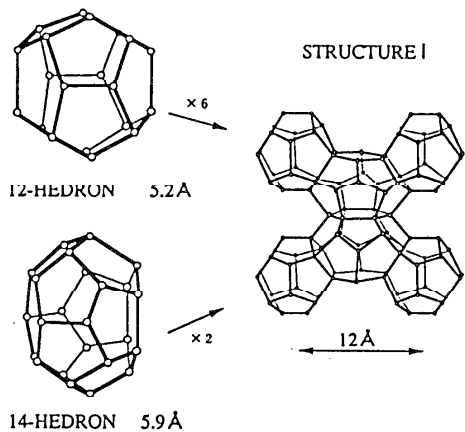


図2：I型クラスレートハイドレートの結晶構造

X線回折による結晶構造の研究は、1950年代に行われた[29]。図2に示すような12面体（小ケージ）6個と、14面体（大ケージ）2個からなる単位胞を持つ立方晶系の結晶である。この各ケージにそれぞれCO₂分子が1つ包接される。従って、

単位胞中には最大8個のCO₂分子が含まれ得る。この時、分子のモル比は8CO₂・46H₂Oとなる。つまりCO₂1分子に対し、5.75個のH₂O分子が水和することができる。CO₂・nH₂Oと表わしたとき、nを水和数という。

水和数は、CO₂ハイドレート中のCO₂濃度を表わす重要なパラメータであるが、実測された例は少ない。内田らは、高圧セル内にCO₂ハイドレートを生成させ、ラマン分光法でCO₂ハイドレートの水和数をその場測定する方法を報告している[27, 30]。彼等は光学測定用の窓をもつ高圧実験装置を用いて、その中に挿入された冷却棒の上にCO₂ハイドレートを生成させ、成長過程の目視観察と、ラマン分光とを同時に行った。図3にはCO₂ハイドレートの成長過程を観察した写真を示す。このとき、a)容器温度282.2K、冷却棒温度268.9K、圧力4.56MPaとし、容器温度を278.9Kに下げた時刻からの変化の様子を観察した。rは冷却棒、WはCO₂を溶解させたH₂O、Hは冷却棒上に生成したCO₂ハイドレートとWとの境界を示す。容器温度と冷却棒温度とを調節することによって、CO₂ハイドレートの成長速度をコントロールし、b)ラマン分光測定可能な透明な結晶を作ることに成功した。この時、界面には幾何学的な結晶面が観察された。c)約14時間後には、容器内いっぱいにCO₂ハイドレートが成長した。

この実験で生成させたCO₂ハイドレートの部

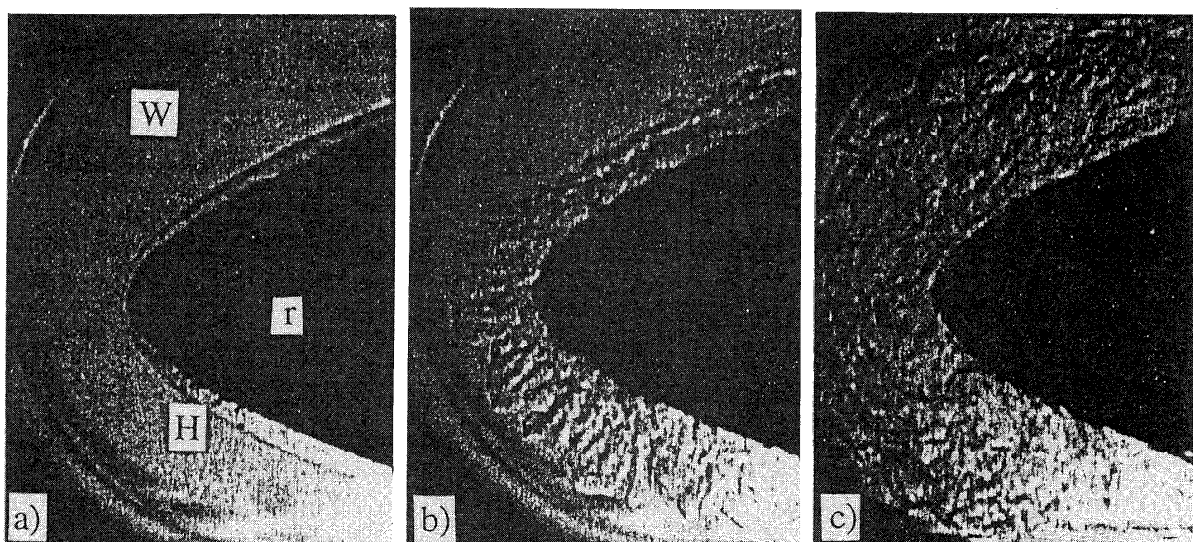


図3：CO₂ハイドレートの成長過程

a)成長前 b)1時間後 c)14時間後。W：CO₂水溶液、r：冷却棒、H：CO₂ハイドレート

1 mm

分のラマンスペクトル（実線）と、CO₂ハイドレートが生成していない水溶液の部分のスペクトル（破線）とを重ねて図4に示した。CO₂分子の対称伸縮振動モードに対応するのは1250~1450cm⁻¹に見られる2つのピークであり、その他のピークはH₂O分子の振動モードに帰属される。この図から、CO₂ハイドレート中にはCO₂が高濃度に含まれていることがわかる。彼等は、このCO₂とH₂Oとのスペクトル強度比から、CO₂ハイドレートの水和数を求めた。それによると、圧力4.56MPaでn=7.68、3.93MPaでn=7.24の値を報告している。

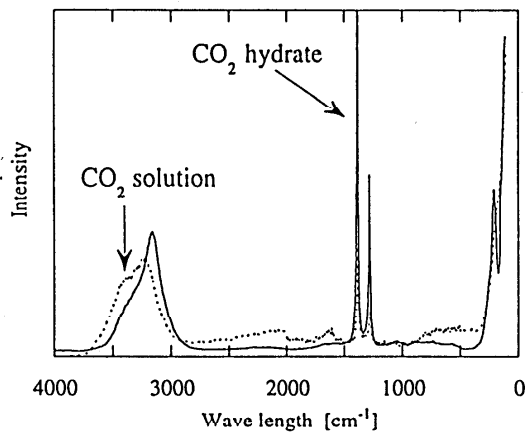


図4：CO₂ハイドレート（実線）とCO₂水溶液（破線）のラマンスペクトル

これまでのCO₂ハイドレートの水和数に関する研究から、熱力学的モデルではn=9.34と計算されており[14]、NaCl溶液中でのCO₂ハイドレートの水和数の実験値は、n=7.30±0.13と求められている[4]。このように実験者による値の違いも報告されており、これらの値の違いが何に依存しているのかは現在のところ明らかではないが、今後結晶学的な検討も加えて、より詳細に議論する必要がある。

水合数がわかれば、結晶構造からハイドレートの密度を計算することができる。このとき、結晶構造の熱膨張率を考慮しなければならない。CO₂ハイドレートについてはその実測値は見当たらないが、同じ型構造を持つEthylene oxideハイドレートについて、粉末X線回折法により、格子定数a [Å]の温度T [K]依存性が測定されている[26]。20~260Kの温度範囲において、格子定数a [Å]は、

$$a = 11.835 + 2.27173 \times 10^{-5} T + 2.2415 \times 10^{-6} T^2 \quad (i)$$

で表わされる。線膨張率は、II型構造のハイドレートでもほぼ同じ温度依存性を持ち、氷Ih（六方晶系）のものよりやや大きい。

ここで、CO₂ハイドレートの熱的性質にも少し触れておこう。CO₂ハイドレートの生成は発熱反応、解離は吸熱反応である。CO₂ハイドレートの生成および解離反応に伴う総括エンタルピー変化 ΔH は、ハイドレートを含む三相共存曲線の圧力の温度変化(dp/dT)を実測し、Clapyron式を適用して求めることができる。

$$dp/dT = \Delta H / (T \Delta v) \quad (ii)$$

ここで Δv は、モル体積変化を表わす。総括エンタルピーは、CO₂がH₂O中に溶解するときの項(dissol.)と、溶液中での真の反応の項(react.)とに分離できる。Chen [4] は、271.67~283.15Kにおいて各エンタルピー項の温度依存性を調べた。その結果、温度による変動はあるものの、この温度範囲における ΔH_{over} は、約59.9kJ mol⁻¹であったとした。このとき、 $\Delta H_{react.}$ は約56.7kJ mol⁻¹であった。一方Ohgaki et al.[17] は、純水および人工海水に対して、CO₂ハイドレートの反応エンタルピー変化を測定した。彼等の測定によると、 ΔH_{over} は273.15Kで約77kJ mol⁻¹であり、温度の上昇とともに減少することがわかる。両者の値に多少の違いがあるものの、この熱量は、氷の融解熱の10倍以上に相当し、かなり大きな反応熱であるといえる。このように、実験者によって値が若干ばらつくが、CO₂ハイドレートの反応のエンタルピー変化の実測値は、非常に少ないのが現状であり、今後の研究が待たれる。

最後に、クラスレートハイドレートの熱伝導度であるが、CO₂ハイドレートに関して実測はされていない。CO₂ハイドレートと同じ型構造を持つXeハイドレートの熱伝導度測定値を挙げておく。Xeハイドレートの熱伝導度は、235、245、255Kで測定されている[7]。この温度範囲では、熱伝導度は温度に依存せず約0.36 W m⁻¹ K⁻¹であった。しかしクラスレートハイドレートの熱伝導度は、比較的高温では結晶構造やゲスト分子にはあまり依存しないことが知られている。Handa & Cook [7] の表から推測すると、273.2K程度のCO₂ハイド

レートの熱伝導率は、約 $0.5\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$ であると予想される。

3. CO₂ハイドレートの生成・解離メカニズム

CO₂の海洋貯留法を検討する際、数百メートル以深にCO₂を注入する場合は、CO₂ハイドレートの生成現象をとまなう。深海底貯留法ではCO₂ハイドレートの生成を、CO₂の海水中への溶解を抑制する物質として積極的に利用することが検討されている[2, 6, 21]。しかし中層海水中へのCO₂の放流・溶解法では、CO₂流体の界面にCO₂ハイドレートが生成されると、CO₂の海水中への溶解が疎外され、CO₂が溶解する前に浮上してしまうという問題を生じさせる厄介者となる[9, 15, 16]。そこでこれらの問題を解決するためには、「どんなCO₂ハイドレートが、どんな条件下で、どれほどの速さで、どのくらい生成され、それがどれほど安定なのか。またCO₂ハイドレートを通じて、CO₂がどのように移動するのか」といったことを明らかにする必要がある。それにはCO₂ハイドレートの生成および解離のメカニズムを解明する必要がある。この章では、CO₂ハイドレートの生成・解離機構に関する実験的研究と、モデルを仮定したシミュレーション研究とについて紹介する。

3-1. 実験的研究

CO₂を深海に注入した時におきる現象は、沖縄トラフ海底で発見された高CO₂濃度流体の湧出現象で実際に観察された[22]。流体が海水に接触した瞬間に、薄膜状のCO₂ハイドレートが生成され、液泡間の合着を妨げ、おどろの房状になった。そこでこの現象をより詳細に観測するため、観察窓付高圧セル内に、水または海水を入れ、高圧条件下でCO₂を注入する実験が、様々な研究グループによって行われた[1, 2, 8, 11, 13, 16, 18, 20, 21]。ここでCO₂流体の注入方法（注入ノズルの形状や注入速度）により注入されたCO₂流体の形状が様々なに変化する、という事実が共通の結果として得られた。これはCO₂流体の界面にCO₂ハイドレートが瞬時に形成されることに起因しており、その生成速度と物性とが、CO₂の注入方法を大きく左右することを示した。

より詳細にCO₂ハイドレートとCO₂液泡との関係を調べるために、高圧水中に液体CO₂泡を1

個作り、その液泡径の時間変化を観測する研究が始められた[3]。その結果、CO₂液泡界面にCO₂ハイドレートが生成されると、生成されない条件に比べ液泡径収縮速度が小さくなることがわかった。しかしCO₂ハイドレート膜が形成されようとされなかりょうにかかわらず、液泡径は時間とともに収縮して行き、期待されたほどの抑制効果は得られないということも指摘された。その後似たような実験が行われ[23]、CO₂ハイドレートの十分な抑制効果も報告されている。これらの観測結果から、CO₂はハイドレート膜を介しても水中に溶解する事が確認され、その溶解速度はCO₂ハイドレートの生成・解離速度によって決まることが示唆された。

CO₂ハイドレートの生成・解離速度の研究は、その重要性が認識されてはいるがまだ十分行われているとは言えない。1980年代後半に行われた実験的研究からは、生成速度が与えられた温度・圧力におけるフガシティと平衡状態のときの差 Δf の一次に比例すること、またH₂OとCO₂との界面積に比例すること[5]などが報告されている。佐治ら[21]はこれらの結果を用いて実験式を立て、反応速度の攪拌速度依存性を求めている。またOhgaki et al.[17]は、生成開始から与えられた温度における平衡圧力までの圧力変動から見かけの反応速度を求めた。内田ら[28]は、反応界面を明確にするため氷と気体CO₂との見かけの反応速度を求めている。しかし、どの実験結果も十分に解釈し切れてはおらず、今後の詳しい研究が待たれる。

3-2. シミュレーション研究

Shindo et al. [24]は、彼等の実験結果を元に、CO₂液泡の収縮モデルを提唱し、CO₂ハイドレート膜生成のシミュレーションを行った。彼等の考えた高圧水中でのCO₂液泡上に生成するCO₂ハイドレートの生成メカニズムは、次のようなものである。(1) CO₂-H₂O界面で、H₂Oが液体CO₂中に溶解する。(2) H₂O分子が液体CO₂中を拡散する。(3) H₂O分子とCO₂分子とが反応、CO₂ハイドレートが生成される。(4) CO₂ハイドレートが生成されることによって、H₂Oの液体CO₂中へのさらなる溶解を妨げる。

そこで、反応速度定数、液体CO₂中のH₂O分子拡散係数、および液体CO₂中のH₂O溶解度をパラメータとして、シミュレーションを行った。その

結果、CO₂液泡上では瞬時にCO₂ハイドレートが形成され、その厚さは非常に薄い、という観測結果をシミュレートすることができた。この結果から、CO₂ハイドレートの生成が、液体CO₂のH₂O中への溶解を抑制しており、同時にH₂Oの液体CO₂中への拡散も抑制し、CO₂液泡の収縮速度を低下させ、CO₂ハイドレートの膜厚も増加しない、と解釈した。つまり、CO₂ハイドレートの生成されたCO₂液泡が収縮して行くのは、CO₂ハイドレートがH₂O側からクラスター状に解離して行くからで、CO₂ハイドレート厚が減少すれば、H₂Oの拡散が容易になりハイドレートの再生が行われると考えた。一方Teng et al.[25]は、CO₂ハイドレートの生成は液体CO₂側ではなく、H₂O側でおきていると考え、CO₂ハイドレート膜中を拡散する分子もH₂O分子ではなくCO₂分子であると仮定した。彼等のモデルによっても、適当なパラメータを選ぶことにより、観測結果を良く表わすことがわかった。CO₂液泡の収縮は、CO₂ハイドレート中の分子の拡散によるものではなく、CO₂ハイドレートの生成・解離によると考えた改良モデルも提出されている[12]。

こうしたシミュレーション結果は、一見実験結果を良く再現しているようにも見える。しかし、仮定を違えてもパラメータ操作で同様な結果を得ることからもわかるように、モデルの一番重要な物性値が未だ実験的に決まっていないのが現状である。また界面に生成されるCO₂ハイドレート膜も、最もCO₂分子が充填された単結晶構造(水和数n=5.75)を仮定している。この膜の構造が違っていけば、CO₂ハイドレート相を通じた分子の移動を考察する際に、非常に大きな違いを導くことになる。さらに、生成・解離の際の熱収支についても実験値は乏しく、従ってモデルにおける検討例も少ないのが現状である。

4. おわりに

CO₂の海洋貯留法を検討する際に、CO₂ハイドレートの研究は必ずしも本流の研究ではないと指摘される[18]。しかし、CO₂ハイドレートの存在する系でのCO₂輸送メカニズムを考察することは、CO₂の海洋貯留法を検討するための必要条件である。そのためには必要な実測値をまず求め、さらにモデル計算で検討する必要がある、と筆者

は考えている。

ところが、CO₂ハイドレートを実験的に研究するためには、低温・高圧条件下における解析が必要である。従って、既存の実験方法ではなかなか値が得られないのが現状である。従って、現象を説明するためのモデル化は必要であるが、現時点で海洋貯留を考えたシミュレーション結果を議論するには、CO₂ハイドレートに関する知識があまりに少ないと感じる。反応速度に関する実験的研究でも述べたように、その現象は複雑で、メカニズムを解明するまでにはまだ至っていない。

物性研究や、生成・解離メカニズムを解明することを目標にしている者として、実験的研究の遅れは痛感するが、今後研究者同士の情報交流を通じて、より効果的な研究を大局的に進めていく必要がある。CO₂の海洋貯留という考えは、地球の環境を変えうる大規模な計画だけに、それに携わる研究者自信も、慎重に現象を追うべきではないだろうか。

参考文献：

- [1] T. Austvik & K.P. Loken (1992) Energy Convers. Mgmt., 33, 659.
- [2] 綾威雄(1993) Journal of JSES, 19, 19.
- [3] 綾威雄、山根健次、山田信夫(1993)日本機械学会論文集, 59, 208.
- [4] H-S. Chen (1972) Res. Develop. Prog. Report No. 830. Office of Saline Water, U.S. dept. of Interior, Washington, D.C., 1.
- [5] P. Englezos, N. Kalogerakis, P.D. Dholabhai & P.R. Bishoni (1987) Chem. Eng. Sci., 42, 2647.
- [6] Y. Fujioka, M. Ozaki, Y. Shindo Y. Yanagisawa, T. Hakuta & H. Komiyama (1993) CO₂対策技術と基礎研究、化学工学シンポジウムシリーズ38、154.
- [7] Y.P. Handa & J.G. Cook (1987) J. Phys. Chem., 91, 6327.
- [8] 平井秀一郎、岡崎健、荒木紀雄、吉本康二、土方邦夫(1994)第31回日本伝熱シンポジウム講演論文集, 400.
- [9] G.D. Holder, A.V. Cugini & R.P. Warzinski (1995) Environ. Sci. Technol., 29, 276.
- [10] M. Honda, J. Hashimoto, J. Naka & H. Hotta (1995) Direct Ocean Disposal of Carbon Dioxide (eds.

- by N. Handa & T. Ohsumi) Terrapub. Tokyo, 35.
- [11] H. Kimuro, F. Yamaguchi, K. Ohtsubo, T. Kusayanagi & M. Morishita (1993) *Energy Convers. Mgmt.*, 34, 1089.
- [12] P.C. Lund, Y. Shindo, Y. Fujioka & H. Komiyama (1994) *Int. J. Chem. Kinetics*, 26, 289.
- [13] S.M. Masutani, C.M. Kinoshita, G.C. Nihous, T. Ho & L.A. Vega (1993) *Energy Convers. Mgmt.*, 34, 865.
- [14] V. Mckoy and O. Sinanogle (1963) *J. Chem. Phys.*, 38, 2946.
- [15] 仲敷憲和 (1993) CO₂クラスレート研究会講演発表記録、4.
- [16] 西尾匡弘、赤井誠、山田幸生(1995) 環境技術研究総合推進会議第3回研究発表会資料、地-21.
- [17] K. Ohgaki, Y. Makihara & K. Takano (1993) *J. Chem. Eng. Japan*, 26, 559.
- [18] T. Ohsumi (1995) *Marine Tech. Soc. J.*, 25, 61.
- [19] 大隈多加志、仲敷憲和、下島公紀、平間賢一 (1993) 電力中央研究所研究報告, U92062.
- [20] 尾崎雅彦、村上信明、藤岡祐一、谷井忠明、川田裕 (1992) 三菱重工技報, 29, 310.
- [21] 佐治明、堺松成、野田英智、谷井忠明、川田裕、北村光、鎌田敏弘 (1993) 化学工学論文集, 19, 745.
- [22] H. Sakai, T. Gamo, E-S. Kim, M. Tsutsumi, T. Tanaka, J. Ishibashi, H. Wakita, M. Yamamoto & T. Oomori (1990) *Science*, 248, 1093.
- [23] Y. Shindo, Y. Fujioka, M. Ozaki, K. Takeuchi & H. Komiyama (1993a) *Proc. Int. Symp. on CO₂ Fixation & Efficient Utilization of Energy, RCCRU of Tokyo Inst. Tec.*, 307.
- [24] Y. Shindo, P.C. Lund, Y. Fujioka & H. Komiyama (1993b) *Int. J. Chem. Kinetics*, 25, 777.
- [25] H. Teng, C.M. Kinoshita & S.M. Masutani (1995) *Chem. Eng. Sci.*, 50, 559.
- [26] J.S. Tse (1987) *J. Phys. (Paris)*, 48, C1-543.
- [27] 内田努、河端淳一、加藤康明、前晋爾、本堂武夫(1993) CO₂対策技術と基礎研究、化学工学シンポジウムシリーズ 38、125.
- [28] 内田努、高木哲史、河端淳一、成田英夫、本堂武夫、前晋爾(1994) 海洋の資源と環境国際シンポジウム講演予稿集, 224.
- [29] T. Uchida, T. Hondoh, S. Mae & J. Kawabata (1995a) *Direct Ocean Disposal of Carbon Dioxide* (eds. by N. Handa & T. Ohsumi) Terrapub. Tokyo, 45.
- [30] T. Uchida, A. Takagi, J. Kawabata, S. Mae & T. Hondoh (1995b) *Energy Convers. Mgmt.*, 36, in press.

地球科学から見た二酸化炭素隔離技術

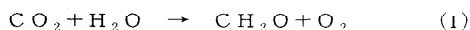
大隅 多加志 (電中研)

1. 化石燃料と地球の大気組成

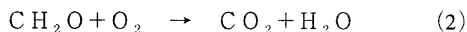
化石燃料が鉱物エネルギー資源という言葉と同義であるとすれば、ウラン鉱石も「化石燃料」として分類が可能である。しかし一般的には、ウラン鉱石を化石燃料とは考えない。なぜなら、本来の意味での燃料とは地球大気（すなわち遊離の酸素気体を含有する雰囲気）のもとで酸素燃焼の化学反応をおこす物質のことであり、ウランのように核分裂エネルギー利用する資源を、言葉の厳密な意味で「燃料」とは呼べないのである。

一方、「化石」という用語は地質時代の生物活動の直接的証拠を意味し、石油・石炭・天然ガスなどの炭化水素系の鉱物エネルギー資源だけを「化石燃料」と呼び慣わしていることには、当然に地球科学的な裏づけがある。すなわち、これらのエネルギー資源のもとになった有機物は生物体起源であり、これまで地球上に存在した生物は、ほとんどが太陽エネルギーを駆動力とする光合成作用で無機物（二酸化炭素と水）から造られた有機物によって直接あるいは間接に構成されている。太陽エネルギーに依存しない生態系から化石燃料の起源有機物が供給されたケースは考えにくい。

ところで、光合成の反応は、



と表され、遊離の酸素を大気中に供給する。生物が死ぬと、



の逆反応（有機物の酸化反応）がおこる。(1)と(2)の反応はバランスがとれており、地質学的な意味で比較的短いタイムスケールでは、大気中の酸素濃度は安定している。実際には、化石燃料の使用に伴って、大気中の二酸化炭素の濃度は増加しているため、これに見合った形で、大気中の酸素濃度もわずかながら減少している。ハワイのマウナロア山頂付近で二酸化炭素の連続観測をはじめたことで有名なキーリング博士の息子ラルフ・キーリングが、最近大気中の酸素濃度の

精密観測に成功し、このことを明確に示した。

では、遊離の酸素は、地球大気成分としてはじめから存在していたのだろうか。火星や金星の大気組成さえ観測で明らかにされている現在では、地球の初生大気中には酸素は無かったと考えられている。つまり、地質時代を通じて、数千万年以上のタイムスケールで、徐々に「(1)の反応 > (2)の反応」という事態がおこり、その結果として現在の地球大気中に遊離酸素が存在しているのだと説明されている。有機物の地下への埋没によって、(1)の反応の結果できた有機物のうち一部が(2)の反応を免れ、その結果として大気中に酸素が存在しているわけである。地下へと埋没した有機物のさらに一部は集積作用を経て化石燃料になった。

現在、人類が化石燃料を地上に蘇らせて利用することは、ゆっくりと蓄積されてきた、「(1)の反応 > (2)の反応」の結果としての「地下の化石燃料」を大気中の遊離酸素と再結合させることで、間接的に過去に地表に降り注いだ太陽エネルギーを取り出していることに相当する。その際に必要な、有機物も、そして遊離酸素も、過去の地球環境からの贈り物なのである。まさに「化石燃料は太陽エネルギーの缶詰」なのであるが、缶詰を利用するための大気中の酸素も、過去の太陽エネルギーが供給したものなのである。

2. 二酸化炭素の排出削減

化石燃料の利用で、いまもっとも問題になっていることは、それが二酸化炭素の大気への放出によって、地球上の大気組成に影響を与えている事実である。その結果として起こるであろうとされている気候変動の規模が、取り返しのつかないものになる可能性が高いと科学者たちは警告を発している。この警告に答えて1992年に締結された気候変動枠組み条約（いわゆる「温暖化防止条約」）が対象としている温室効果気体とは、大気中に増加しつつある二酸化炭素（ CO_2 ）。

メタン (CH₄)、一酸化二窒素 (N₂O) などである。それぞれの気体の現時点での大気中増加率から、これらが赤外線吸収を通じて、どれほど気候変動へ寄与しているかが算出されている。CO₂は奇与率で全体の半分を占めており、「温暖化防止対策＝CO₂排出削減」という枠組みでの国際的議論が今後とも強化されようとしている。

わが国は条約の締結国会議の開催地として名乗りを挙げており、西暦2000年以降の目標や措置を盛り込んだ議定書の取りまとめなど、国際的にも積極的な役割を果たそうとしている。

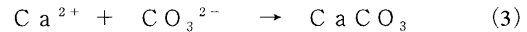
化石燃料の使用を、ある程度以上に制限することが現実的でないと考えるのであるなら、技術対策の一つとして集中発生源でCO₂を回収し、これを大気以外の地中や海洋へと処分しようとする技術構想を真剣な検討の対象とすることは重要である。

回収には技術的な困難が少ない。むしろ、それだけのコストをかける価値があるのかが議論される。化石燃料利用過程でのCO₂の回収技術とその処分の技術が化石エネルギー資源の無駄遣いであることには違いない。そして無駄であることの大部分は回収に伴う原理的な制約なのである。結局のところ、気候変動防止のためにCO₂を大幅に削減する必要が、ますます明確になってきた場合にのみ、コストを覚悟して、もしくは、非再生エネルギー資源の枯渇を早める行為であることを承知の上で、緊急避難的に採用せざるを得ない技術であるとして、とりあえずの議論の枠組みが、CO₂の回収・処分技術については設定されている。

3. 大気中の二酸化炭素濃度を決定している長期的要因

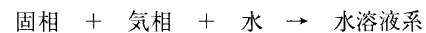
大気中の二酸化炭素濃度を決定している要因として、本稿のはじめに述べた有機物の生成過程というのは、実は、長期間にわたる要因としては第一義的なものではない。現在の地球に存在している石灰岩などの炭酸塩岩は膨大な量であり、これらはすべて元をただせば大気中にあったものと考えられているからである。その量は、二酸化炭素気体として大気中に放出した場合数十気圧にのぼると見積られる。しかし、気体の二酸化炭素 (CO₂) が直接にCaCO₃に代表される炭酸塩固体になるわけではない。固体の析出は水溶液中で起こる。すなわち、カルシウム陽イオン (Ca²⁺) と

炭酸イオン (CO₃²⁻) とが水溶液中で出会って、以下に示す反応の結果として固相への二酸化炭素の隔離が進行してゆく。

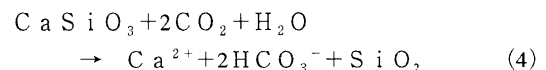


水溶液として、これらのイオンが供給されるには、迂回のルートを通らないといけない。

大気から供給される炭酸イオンは、はじめは、大部分が炭酸水素イオンの形で溶けたものである。この過程で相手の陽イオンが供給されてはじめて水溶液系に大量に溶けこむことが可能となる。陽イオンは大気からは供給されないので、

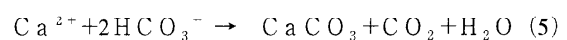


という形が、イオン供給のルートなのである。ここで固相は、固体地球であり陽イオンの供給源すなわちケイ酸塩岩である。この3相の反応が効果的に進むのは、3相共存の場であることに注目したい。それは、海水に覆われてしまっていないで、気相中の二酸化炭素 (CO₂) が供給されやすい大陸上である。そこでは雨が降ることで水が供給され3相共存の場としての地下水系が形成される。そこを主な反応の場として、代表的には



で表される反応が進行する。地球上には大陸と海洋にあたる凹凸があるため、風化と呼ばれるこの過程で、もたらされたCa²⁺イオンとHCO₃⁻イオンとは結局、河川水を媒体として海洋に供給される。

実は、反応式 (4) の過程 (水溶液相への二酸化炭素固定) は、ある意味では、大気からの二酸化炭素を吸収し過ぎることのできる系であり、二酸化炭素の長期固定を実現するには、半分の量の二酸化炭素を大気へ戻す必要がある。代表的に海洋でおこる炭酸塩生成の反応は、トータルとしては化学量論に従い、

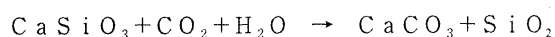


となっているはずである。カルシウム1モルに対して大気から2モルの二酸化炭素を隔離(反応(4))したうちの1モルを、この過程で大気に戻し、結果としてはカルシウム1モルに対して二酸化炭素1モルを長期的な固定作用として実現する反応のトータルとしてのモル比を表しているのがこの(5)式である。

長いタイムスケールで見れば、途中の水溶液系は反応の場を提供する役割を果たすだけであり、

大陸のケイ酸塩+大気中の二酸化炭素 → 海底の炭酸塩

の形で、大気中から二酸化炭素が除去されたことになる。反応式であらわせば、(4)+(5)であり



がケイ酸塩から炭酸塩への転換で大気中の二酸化炭素濃度を低減させてゆく正味の反応を示している。

4. 地中処分の優位性

化石燃料の利用は、大気中の酸素資源を消費しているだけでなく、温室効果の昂進という重大な副作用を伴っている。遊離の酸素を消費することは、燃料の宿命であり、エネルギーを取り出す過程そのものであるから避けられない。また化石燃料の埋蔵量の全量を利用し尽くしたとしても、大気中の酸素濃度はたかだか0.3%程度しか減少しないと見積られる。そこで、せめて二酸化炭素の大気への放出をしない化石燃料の利用形態はないのだろうか。化石燃料利用に伴って二酸化炭素の回収を実行した場合に、発生する地球科学上の大きな課題は、その処分先の探求である。

石炭と比較して、流体の化石燃料である石油や天然ガスは採掘・輸送・貯蔵などの利用しやすい形態であるため、「流体革命」と呼ばれる過程が、近年の著しいエネルギー消費の増大をもたらしたことは良く知られている。流体である石油や天然ガスが、大気へと逸散せずに、なぜ集積して資源として利用可能なのかに思いをいたすと、二酸化炭素地中処分策の合理的な理由が明確になる。これらの化石燃料資源は、移動と集積の過程を経て流体が大気へと漏洩しにくい構造内に貯留されているため、資源として利用できるわけ

ある。二酸化炭素を大気に出さないとするならば、このような地中の構造を利用することが理にかなっている。二酸化炭素は地中の温度圧力条件のもとで、水より密度が若干小さい超臨界状態をとる。これは石油や天然ガスが貯留されていた地下の間隙に二酸化炭素を押し込めて処分することが可能であることを意味している。

二酸化炭素を地下に坑井を通じて圧入する技術自体は、すでに存在している。二酸化炭素地下圧入は石油の増産の目的で実施されており、また、大気環境の保護を目的として二酸化炭素を地中投入する地中処分の事例も目前に迫っている。ノルウェーの石油会社STATOIL社は、北海での天然ガス開発プロジェクトの一環として海底下へのCO₂地中処分を1996年10月から開始すると発表している¹⁾。

二酸化炭素地中処分が海洋への注入に比較して優位にあるもうひとつ別の理由も存在する。前項で、ケイ酸塩から炭酸塩への転換という、大気中の二酸化炭素濃度を低減させてゆく正味の反応を説明したが、そこで、全体の反応が開始されるのはCO₂とケイ酸塩岩との反応であることを示した。地中処分は、人為的にこの反応の場を創り出すことであり、化石燃料の利用で増加しつつある二酸化炭素をもう一度、固体地球に固定させるサイクルに戻すことを意味している。

実は、人為的にCO₂とケイ酸塩岩との反応を加速させなくとも、地球は大気中の二酸化炭素濃度が上昇しすぎないように、おのずから二酸化炭素濃度を引き下げるメカニズムをビルトインしている。例えば、火山活動の昂進によって大気中に二酸化炭素濃度が増大した場合には、温室効果による気温の上昇が、風化速度を増大させ、二酸化炭素の吸収を促進させるという負のフィードバック機構が働いていると考えられている。人間活動の急激な増大という、地質現象のタイムスケールより著しく短期の現象への対応として、この自然の復元力を期待することはできない。せめて地中処分で、二酸化炭素の固体地球へ還流過程を人為的に加速することは理にかなっている。

5. 海洋への処分

ハワイ島マウナロアでの40年になるろうとする二酸化炭素の連続観測ではっきりしたことは、化石燃料の

燃焼分や森林伐採から期待される大気中の二酸化炭素増加に比べて観測結果は、これを下回るという事実である。その差の分の二酸化炭素の半分ほどを海洋が吸っていることは、間違いのない事実である。海洋が吸収している分だけ、気象学者が心配する気候変動は遅れてやってくる。しかし、海洋が大気と気体成分を数年というタイムスケールでやり取りするのは平均深度3800mの海洋の表面のごく一部100m内外の部分だけである。なぜ、海洋がもっと素早く二酸化炭素を吸ってくれないのだろうか？という疑問に答える形で、回収二酸化炭素の海洋処分の構想が浮上してきた。それは、もう20年も前のことである。

わかしたての風呂のように、海洋は表面だけが温かく中深層は冷たく、上下の成層がきつく混ざりかたが弱いため二酸化炭素吸収能力が発揮されない、という理解にたつと、海洋全体の混合をコントロールするのではなく、回収された二酸化炭素を集中的に海洋深層の運搬し、そこで吸収させるというアイデアが、生まれてくるのも当然のことである。

CO₂海洋処分の構想の代表的なものとして深海底貯留方式と海洋中層希釈拡散方式（第1図）とがある²⁾。数百年～数千年のタイムスケールでは、CO₂について大気と海洋とは一体のものと考えてよい。人間活動によって急速に大気へ放出されつつあるCO₂も、わずかつつ海洋に吸収されており、放出が止んだのちには、最終的に何らかの割合で大気と海洋間に再分配され、

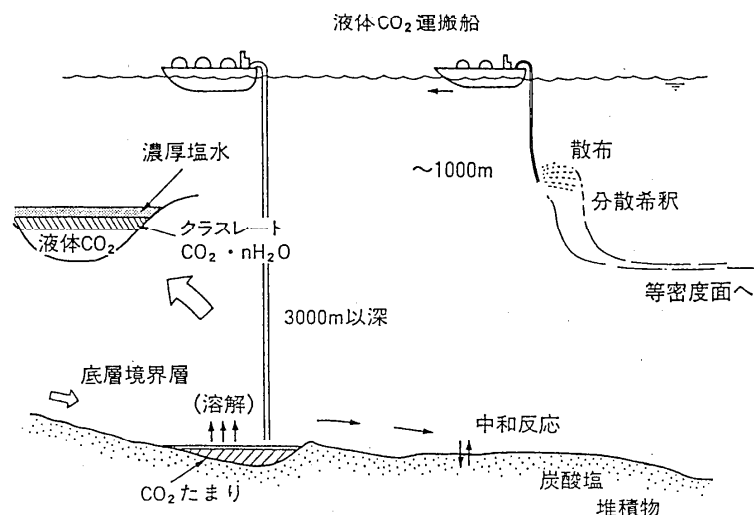
動的な定常状態に達するものと考えられている。現状での人為起源のCO₂の大気中への放出速度が、海洋のCO₂吸収速度を上回っていることが問題なのである。

この二つの処分方式の特徴的な差は、1000年程度のタイムスケールを超えた隔離をめざしているかどうかにある。筆者は、深海底貯留方式では数千年のタイムスケール以上の長期間の隔離を実現できる可能性を追求して、前項の地中処分に限りなく近い海洋処分の構想をつくりあげることが重要であると考えている。

6. 中層への溶解拡散希釈

海洋の中深層（例えば水深1000m～2000m）へ回収CO₂を投入し希釈拡散をはかるという構想は、大気海洋間で現在ゆっくりと起こっている人為起源のCO₂の大気から海洋への移動の自然過程を促進する技術と捉えることが可能である。アムステルダムで開催された第1回CO₂除去国際会議（1992年3月）以来、国際的な議論の対象としては、この方式による海洋処分技術がもっぱら取り上げられてきた。

海底へ敷設したパイプラインから放流するにせよ³⁾、放流船から曳航される放流管から散布するにせよ⁴⁾、一度十分に海水へ希釈されてしまったCO₂の挙動は、海洋学的な知見に基づいて論じられる問題であり、海洋物理学の分野で用いられるいくつかの海洋流動計算モデルの適用が試みられている。この方式が社会的な



第1図 深海底貯留方式（左）と海洋中層への希釈拡散方式（右）の技術システムの例

受容にいたるためには、最終的には、海洋での炭素循環モデル（化学過程・生物過程をとりこんだモデル）を適用してその有効性が示される必要がある。

海洋中における炭素循環のモデルは、将来大気中のCO₂濃度や気温が上昇したときに、海洋がどのようにふるまうのか、また気候変動とどのように関係するのかを予測するための道具として開発が要請されている。この同じ道具を用いて、CO₂海洋処分という緊急避難対策を実施した場合と、そうしなかった場合との大気海洋環境にもたらされるそれぞれの帰結が比較できる。回収CO₂の大洋中層への溶解拡散希釈方策が取られることになるとしたらば、海洋中炭素循環モデルによる予測結果に基づいてその合理性が社会に説明されることが前提であろう。

7. 大気海洋からの隔離を追求する深海底貯留

1000年内外のタイムスケールでCO₂を互いにやり取りしている大気海洋圏とは流体であり、大気・海洋間でのCO₂の分配比率を支配しているメカニズムについて現状では、将来の気候変動を予測する目的に照らしても、十分に理解されているわけではない。とりあえずCO₂について大気と海洋とが一体のものと考えることとして、これらから人為起源のCO₂を効果的に切り離すという意味で「隔離」という用語を用いるとすれば、CO₂深海底貯留方策は、むしろ地中処分に類似した性格の隔離構想であると考えられる。

第2図に示す代表的な深海底隔離の概念⁵⁾では、深海の窪みに溜められた液体CO₂の上層にCO₂溶解海水による密度安定層が形成されることを期待しており、数千年におよぶ隔離も不可能ではないと試算されている⁶⁾。

しかしCO₂を深海底に放出した場合に、溶解拡散が抑制され局在化・貯留が達成される条件の詳細について研究者の間で十分な意見の一致があるわけではない。人類が工学的に制御することのできない規模での深海底での流動現象（深海底境界層内の擾乱がもたらすCO₂溜への外乱）について海洋学の知見は乏しい。また、貯留の場自体の長期的安定性の問題は、深海の底層水流動の変動や、地震や火山活動に伴われる地殻変動などの現象との関連で論議されなければならないが、このような問題は地中処分の場合と共通の性格を有し

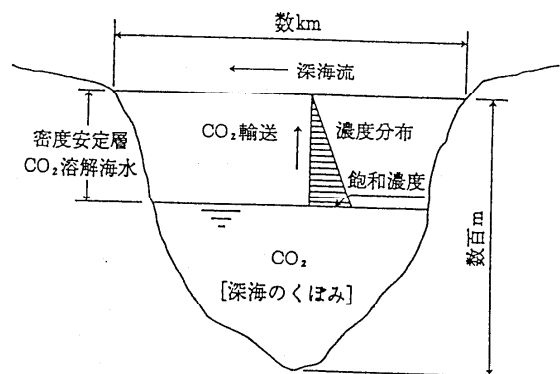
ている。

これまで研究例では、液体CO₂と海水の境界面での比較的短期的な過程のみに焦点が絞られ過ぎてきたと筆者は考えている⁷⁾。局在化・貯留を目指すという観点からは、海底にCO₂を持ち込むことで生起する現象を網羅的に検討する必要がある。長期的に生起する現象も含めた検討を進めておくことで、将来、深海での流動現象の実態の把握が進展したときに、説得力の大きなCO₂の局在化・貯留のシナリオが構築可能となると考えられる。

海底に大量のCO₂貯留されることに伴って起こり得る現象のうち、現時点で十分に検討がおこなわれていない現象の例を以下に挙げてみる。

- 1) CO₂クラスレート生成・分解・残留水への塩分の排除の過程の速度論および反応熱
- 2) 各相の密度差や表面張力など界面過程に起因する擾乱
- 3) 深海底の多孔質堆積物（粒状媒体）へ液体CO₂やCO₂溶解海水が浸透し反応する可能性

さて、深海底貯留構想のアイデアは、1989年以来もつぱら、わが国で検討されてきたものであり⁸⁾、その本質的な特徴は、繰り返しになるが大気海洋間でのCO₂の通常の交換過程の時定数を大きく超えるほどの隔離も可能となる点にある。欧米の研究者の間にも、深海底貯留方式の潜在的可能性に注目する動きがあり、わが国としては深海底貯留方式の実現可能性についての検討を精力的に進めるべきである。



第2図 濃度境界層を利用したCO₂深海底貯留法

8. まとめ

地球温暖化問題は、現代冷戦以後の世界の象徴的な問題であり、その解決策の模索は多面的に追究されるべきである。2000年以降のCO₂削減のための方策として、発展途上国との共同実施やライフスタイルの変革などとは別のアプローチとして、技術を中心とした対応の模索が、先進国としてのわが国の課題でありつづけることは間違いない。技術を中心とした対応の一つの選択肢である「緊急避難的対策」(“Regret Policy”の代表)、すなわちCO₂回収処分技術を準備しておく要請は今後も存在しつづけるし、既にわが国は、そのうち海洋処分に関しては国際的にもコミットメントが大きい。

エネルギー生産部門からのCO₂回収(燃焼前)と地中処分という組み合わせ(北海での天然ガス開発に伴う沖合帯水層へのCO₂地中処分)がノルウェーにおいて商業規模で開始されるのが96年10月に迫っているため、国際的に研究は加速されると思われる。

しかし、地中処分においても陸地の帯水層への処分は、輸送問題を含めて、欧州では反発が予想されるため、沖合海底下での実施が今後とも模索されるであろう。また、日本の天然ガス市場をにらんで提案されているエクソン社のナツナガス田の開発は沖合海底下へのCO₂地中処分が前提となっている。沖合海底下地中処分の概念は、限りなく深海底への貯留(隔離)処分に近似しているため、こうした地中処分の実例が温暖化防止策として評価されるようであれば、海洋処分技術も地中処分の控えの技術から脱皮した位置づけを獲得することも予想される。

さて、「大気環境を守るために海洋環境に人為干渉を及ぼすこと=CO₂海洋処分」の是非を最終的に評価する際に有用な道具は、温暖化時に海洋が(炭素循環を含めて)どう振る舞うのを予想する海洋の炭素循環

モデルである。このようなモデルの最終的な信頼性が担保されることは結局のところ困難であるので、CO₂を溶解して放流するという中層放流の構想は極めて限定的な規模でしか実施されない公算が強い。その意味で深海底貯留は、うまく設計されれば地中処分と同様の効果を持つので海洋処分の本命となる可能性もある。一方では、出番が来ない「可能性」の研究にとどまり続けるというシナリオも想定され、これは緊急避難的対策技術としての宿命でもある。

以上を踏まえると、現時点でわが国での研究中層放流方式ないし、深海底貯留方式のどちらかに絞り込むことは、時期尚早であると考えられる。

参考文献

- 1) 第2回CO₂除去国際会議(1994年10月)京都での発表
- 2) 大隅多加志ほか: 二酸化炭素の深海底処分技術(その1) - 構想の提示と環境影響評価手法の検討 - 電力中央研究所研究報告(U92062)
- 3) Haugan, P.M. and Drange, H.: *Nature*, 357(1992), 318-320.
- 4) Nakashiki, N. and Ohsumi, T. and Katano, N.: *Direct Ocean Disposal of Carbon Dioxide*, (Handa, N. and Ohsumi, T. eds.) Terrapub, Tokyo, pp. 183-194 (1995).
- 5) 綾 威雄: 太陽エネルギー19(5), 19-25(1993)
- 6) 大隅多加志: 化学工学シンポジウムシリーズ38, 「CO₂対策技術と基礎研究」 pp. 119-124, 化学工学会(1993)
- 7) Ohsumi, T.: *Marine Technology Society Journal* Vol.29(1995) No. 3, in press.
- 8) 大隅多加志: 科学 63, 17-21 (1993)

社団法人日本伝熱学会第33期(平成6年度)総会議事録

1. 日 時 平成7年 5月25日(木) 13時00分～13時45分
2. 場 所 山口市大手町2番18号山口県教育会館1F講演会場
3. 正会員数 1, 233名
4. 出席者 673名(うち委任状出席500名)。これは定足数(正会員数の十分の一)を上回り、総会は成立した。

5. 議事経過
議長に中山恒氏を選出し、次の議案について逐次審議した。

第1号議案 第33期事業報告の件

議長より、社団法人日本伝熱学会第33期(平成6年度)総会議案(以下、総会議案と呼ぶ)の第1号議案第32期事業報告について諮り、満場一致でこれを可決した。

第2号議案 第33期会務報告の件

議長より、総会議案の第2号議案第32期会務報告について諮り、満場一致でこれを可決した。

第3号議案 定款の改定の件

議長より、総会議案の第3号議案定款の改定について次の様に諮り、満場一致でこれを可決した。

改訂前 第2条、「この法人は、事務所を、東京都文京区本郷5丁目25番18号に置く。」

改訂後 第2条、「この法人は、事務所を、東京都文京区湯島2丁目16番16号に置く。」

第4号議案 平成6年度収支決算の件

議長より、総会議案の第4号議案平成6年度収支決算について諮り、満場一致でこれを可決した。

第5号議案 平成7年度事業計画および収支予算案の件

議長より、総会議案の第5号議案平成7年度事業計画および収支予算案について諮り、満場一致でこれを可決した。

第6号議案 日本伝熱学会賞の授賞の件

議長より、総会議案の第6号議案日本伝熱学会学術賞・技術賞・奨励賞授賞について選考経過についての報告がなされた。本年度の日本伝熱学会賞は、次のとおりに受賞された。

日本伝熱学会学術賞 ・代表研究者 菱田公一氏(慶応義塾大学)

共同研究者 前田昌信氏・柳原潤氏(慶応義塾大学)

・代表研究者 飯田嘉宏氏(横浜国立大学)

共同研究者 奥山邦人氏・遠藤哲也氏(横浜国立大学)

日本伝熱学会技術賞 ・代表研究者 矢野歳和氏(石川島播磨重工業)

共同研究者 越智正雄氏(石川島播磨重工業)

・代表研究者 神坂光男氏(三菱重工業)

共同研究者 河村友槌氏(三菱重工業)・岩淵牧男氏(富山大学)・

高橋恭郎氏(広島電機大学)

日本伝熱学会奨励賞 ・鹿園直毅氏(日立製作所)

・伏信一慶氏(東京工業大学)

・松本壮平氏(通産省工業技術院機械技術研究所)

・武谷健吾氏(日本製鋼所)

第7号議案 名誉会員の顕彰の件

議長より、総会議案の第7号議案に基づいて名誉会員の推薦があり、満場一致でこれを可決し、顕彰が行われた。

第8号議案 第34期役員選出の件

議長より、総会議案の第8号議案第34期役員選出に基づいて以下のとおりに次期役員の提案がなされ、満場一致でこれを可決した。

理事（会長）	相原 利雄	（新任，1年）	理事（副会長）	林 勇二郎	（1年）
理事（副会長）	鳥越 邦和	（1年）	理事（副会長）	斉藤 彬夫	（1年，再任予定）
理事	前川 博	（1年）	理事	伊藤 正昭	（留任）
理事	稲葉 英男	（留任）	理事	河村 洋	（留任）
理事	杉山憲一郎	（留任）		増岡 隆士	（留任）
理事	水野 彰	（留任）		柳 謙一	（留任）
理事	山田 悦郎	（留任）		青木 和大	（2年）
理事	荻野 文丸	（2年）		尾添 紘之	（2年）
理事	笠木 伸英	（2年）		金子 邦彦	（2年）
理事	熊田 雅弥	（2年）		松木 健次	（2年）
監事	前田 昌信	（留任）		塩冶震太郎	（2年）

第9号議案 議事録署名人選任の件

議長より、本日の議事の経過を議事録にまとめるに当たり、議事録署名人2名を選任いただきたい旨を諮り、協議の結果林勇二郎氏、土方邦夫氏の2名を選任した。

阪神大震災義援金ご協力に対する御礼

さる1月17日に発生した阪神大震災において、神戸地区の伝熱関連研究室にも多くの被害が発生いたしました。本学会理事会において、義援金を募り被害を受けた伝熱研究室の復興の一助にして頂いたらとの発議があり、多くの方の賛同を頂きました。そこで、第32回日本伝熱シンポジウムの会場におきまして、一口1000円とし、皆様のご協力をお願いいたしました。

その結果、99名179口の協力を頂きました。贈呈先は関西地区の検討結果に従い、神戸大学と神戸商船大学の伝熱関連研究室とさせて頂き、ご協力者のお名前とともに、義捐金を贈呈いたしました。ここに謹んでご協力の御礼を申し上げます。

社団法人日本伝熱学会
第33期会長 中山 恒

阪神大震災義援金に対するお礼

平成7年1月17日午前5時46分、直下型地震が神戸地区を襲いました。計り知れない被害を被りました。この阪神大震災に際しまして、多くの伝熱学会会員各位より、心暖まる励ましのお言葉を電話で、お手紙で、そして、久しぶりにお会いした折にいただきました。どれほど勇気づけられ、かんばろうと思ったか知れませんが、心から御礼を申し上げます。

さらに、この度は義援金を募っていただき、そのご好意に、ただただ感謝いたしております。ありがとうございました。有効に使わせていただきます。

震災後早や5ヶ月近くになろうとしていますが、ようやく、建物の建て替えの計画並びに補修が始まり、建物の周りにはやぐらが組み立てられ、各所のき裂部に接着剤の注入などが行われています。実験室では、配管類が曲がり、試験部の取り替え、各種計測機器の再調整、破棄などに追われています。運動場には、廃棄物が山と積まれています。ただ、全壊、半壊の状態の家屋・建屋を毎日のようにみているので、それに比べれば、被害は少ないと思われます。学生も教官もずいぶん立ち直ってきております。授業も行われております。実験も開始いたしました。全国的に地震の激動期に入ったとも言われ、その真偽の程は存じませんが、これ以上の被害が余震や大雨などで出ないように願っています。

本義援金を発議され、ご尽力いただきました方々、並びにご協力をいただきました会員各位に重ねて御礼申し上げます。今後とも暖かくお見守り下さいますようお願い申し上げます。

神戸大学・神戸商船大学
伝熱関連研究室一同

阪神大震災義援金ご協力者名簿

青木 和夫	長岡技術科学大学	2	秋野 詔夫	日本原子力研究所	1
荒井 清志	慶應義塾大学 理工学部	1	飯田 嘉宏	横浜国立大学 工学部	3
池上 康之	佐賀大学 理工学部	1	石黒 博	筑波大学	1
石田 健二	慶應義塾大学 理工学部	1	石塚 勝	東芝 研究開発センター	1
石丸 和博	岐阜高専	1	一色 尚次	日本大学 工学部	3
稲田 茂昭	群馬大学 工学部	1	井上 晃	東京工業大学 原子炉研	2
井村 英昭	熊本大学 工学部	2	海野 紘治	豊田工業大学 工学部	1
逢坂 昭治	徳島大学 工学部	2	大河 誠司	東京工業大学 工学部	2
大田 治彦	九州大学	2	岡崎 健	東京工業大学	1
岡田 昌志	青山学院大学理工学部	4	小川 邦康	東京工業大学理工学専攻	1
小田 鶴介	東亜大学 工学部	1	小泉 安郎	工学院大学 工学部	1
小林 敬幸	名古屋大学	1	加藤 征三	三重大学 工学部	2
鴨志田隼司	芝浦工業大学 工学部	2	河合 信幸	N T S	1
河島 弘毅	慶應義塾大学 理工学部	1	河村 洋	東京理科大学 理工学部	5
菊地 義弘	広島大学 工学部	1	吉川 進三	同志社大学 工学部	2
儀間 悟	琉球大学 工学部	1	工藤 一彦	北海道大学 工学部	2
熊谷 哲	東北大学 工学部	1	熊田 雅弥	岐阜大学 工学部	1
栗間 諄二	山口大学 工学部	1	黒崎 晏夫	東京工業大学 工学部	2
黒田 明慈	北海道大学工学部	1	高 雷	福岡大学 工学部	1
古田 基	東京工業大学 工学部	1	斎藤 彬夫	東京工業大学 工学部	5
斉藤 卓志	東京工業大学 工学部	1	榊原 潤	慶應義塾大学 理工学部	1
坂口 勝次	福山大学 工学部	2	佐藤 勲	東京工業大学 工学部	1
佐古 光雄	広島大学工学部第一類	2	玄 在 民	KAIST	1
清水 英男	宇部工業高等専門学校	1	庄司 正弘	東京大学 工学部	2
杉山憲一郎	北海道大学 工学部	2	鈴木 雄二	東京大学 工学部	1
鈴木 祐二	東京工業大学 工学部	1	須田不二夫	東海大学 教養学部	1
関根 郁平	苫小牧工業高等専門学校	1	瀬名波 出	琉球大学 工学部	1
滝本 昭	金沢大学 工学部	1	高野 剛	新潟大学 工学部	1
田中 宏史	福岡工業大学	1	鶴野 省三	防衛大学校	5
鳥居 薫	横浜国立大学 工学部	2	宮下 徹	工学院大学	1
中別府 修	東京工業大学 工学部	1	中山 顕	静岡大学 工学部	2
中山 恒	東京工業大学 工学部	10	長崎 孝夫	東京工業大学大学院	1
長野 靖尚	名古屋工業人学 工学部	1	波江 貞弘	運輸省船舶技術研究所	5
成合 英樹	筑波大学 構造工学系	2	二階 勲	鹿島技術研究所	2
西尾 茂文	東京大学 生産技術研究所	1	西野 耕一	横浜国立大学 工学部	2
西村 龍夫	山口大学 工学部	1	花村 克悟	岐阜大学 工学部	1
林 勇二郎	金沢大学 工学部	5	播木 道春	住友金属工業(株)	2
菱田 公一	慶應義塾大学理工学部	1	土方 邦夫	東京工業大学 工学部	5
日向野三雄	東北大学 流体科学研究所	2	平井秀一郎	東京工業大学	1
半澤 茂樹	(株)日立製作所	1	平澤 良男	富山大学 工学部	1
深野 徹	九州大学 工学部	1	福迫尚一郎	北海道大学 工学部	10
伏信 一慶	東京工業大学 工学部	1	布施木 徹	(株)流体コンサルタント	2
藤岡 恵子	大阪大学基礎工学部	1	藤田 秀臣	名古屋大学 工学研究科	2
松村 邦仁	筑波大学 構造工学系	1	松本 浩二	宮崎大学 工学部	1
水上 紘一	愛媛大学 工学部	3	三松 順治	岐阜大学 工学部	1
宮本 政英	山口大学 工学部	1	森 康夫	東京工業大学名誉教授	5
森 康彦	慶應義塾大学 理工学部	1	矢部 彰	通産省工技院機械技研	1
山口 一喜	慶應義塾大学 理工学部	1	山田 悦郎	秋田大学 鉱山学部	2
山田 純	東京工業大学 工学部	1	吉川 邦夫	東京工業大学 総合理工	1
吉田 英生	東京工業大学 工学部	1			

合計 99名 179口 (179,000円)

北陸信越研究グループ活動報告

平成7年度春季講演会

標記講演会が緑鮮やかな妙高高原で開催され、特別講演1件およびトピックス講演7件が行なわれた。参加者数は、企業2名、大学・高専32名、学生18名の計52名であった。

日時 平成7年5月12日(金)

会場 赤倉ホテル

特別講演

演題 「熱力学第二法則とその応用」

講師 信州大学工学部 玉木 恕乎 教授

グループ講演

- (1)円形断面の密閉容器内における自然対流熱伝達
木村照夫(福井大), 竹内正紀, 永井二郎,
平野 誠*(福井大院)
- (2)スタッドフィン付き縦型伝熱面周りの水の融解に関する解析的研究
平澤良男(富山大), 竹越栄俊,
陳 東*(富山大院)
- (3)光ファイバによる矩形セル内水溶液の凍結・解凍過程における局所濃度分布の測定
日向 滋(信大織), 姫野修廣, 桜井正幸,
佐藤康典*(信大織院)
- (4)衝撃波の反射現象の基礎的研究
飯吉裕樹*(富山県大院),
坂村芳孝(富山県大), 鈴木立之
- (5)ヒトの温冷感覚におよぼす気流乱れの影響
小森谷嵩*(新潟大院), 品田美幸樹,
佐野浩一(コロナ), 諸我勝巳,
前川 博(新潟大), 小林睦夫, 高野 剛
- (6)異粒子クラスターの熱膨張に関する分子動力学的研究
市村 悟*(富山大院), 岩城敏博(富山大)
- (7)急冷凝固過程における熱応力の分子動力学的研究
岩城敏博*(富山大)

特別講演:

熱力学第二法則に関し、古典的な孤立系でのエントロピー増大による熱的死への一方向的な理解から、1965年以降の非平衡統計力学の展開による秩序化、散逸構造への複雑な系の進化に対する理解について詳細に解説された。さらに、熱力学第二法則の応用としていくつかの例が示された。特に、東北電力東新潟発電所のガスタービン複合機関を例にとり、実際の運転時におけるガス側および蒸気側の有効エネルギー評価が示され、このような評価の必要性が強調された。工学教育の立場からの熱力学第二法則の捉え方、および第二法則的評価からみた発電プラントの将来について質疑応答があった。

グループ講演:

講演(1)では、円形断面を有す密閉容器内で、円の半分が等温に加熱、残り半分が等温に冷却された場合の熱伝達実験が行われ、両者の境界線の傾きによる循環流の強弱およびよどみ域の形成などの流れ状態と熱伝達が関係づけられ、傾斜角と平均熱伝達率の推定式が提示された。実験での温度制御および境界温度の精度について質疑応答があった。

講演(2)では、潜熱蓄熱に対する伝熱促進を目的として、正方形断面を有する多数のスタッドフィン周りの氷の融解過程が3次元的に解析され、自然対流をとまなうフィンの有効性が示された。実験結果との対応および凝固過程と融解過程におけるフィンの有効性の比較について質疑応答があった。

講演(3)では、二成分溶液の凍結において生じるマッシュ領域の解明を目的として、光ファイバーを用いた濃度センサーにより凍結および解凍時の溶液内濃度分布が測定された。均一濃度場でのセンサー校正と濃度勾配下での測定値との対応などについて質疑応答があった。

講演(4)では、衝撃波の反射現象の基礎として、凹凸表面への斜め衝撃波の反射実験が行われ、マッハ反射による三重点の軌跡から反射に及ぼす凹凸表面およびウエッジ角の影響について報告された。溝深さに基づく整理に対し、深い溝による複雑反射の影響について質疑応答があった。

講演(5)では、空気調和を対象として、気流の乱れが人間に及ぼす温冷感覚についての被験者実験結果が報告された。同一流速でも乱れを含む気流のほうが伝熱量が増大するため人間は温度差を大きく感じることを示され、同時に、人間は伝熱量の変化から気流の速度変化も合わせて知覚していることが示された。サンプルの老若男女による相違などについて質疑応答があった。

講演(6)では、2種類の粒子から構成される2次元クラスター粒子の運動を分子動力学法により解析し、粒子の配列が熱膨張率に及ぼす影響および温度に対するミクロな応力変化の関係について報告された。計算に用いた2種類のポテンシャルの差と実際の物質との対応および外側表面の取り扱いについて質疑応答があった。

講演(7)では、分子動力学法により凝固過程をシミュレーションし、原子・分子レベルからみた格子欠陥および熱応力の発生について報告された。計算における冷却速度の現実性および格子欠陥・熱応力に対するマクロ(連続体としての取り扱い)とミクロの対応について質疑応答があった。

(北陸信越研究グループ担当理事 青木和夫)

公開講演会
—私たちの生活と熱—
開催のお知らせのご案内

日本伝熱学会第34期企画部会
日本伝熱学会関東支部

下記のような一般（青少年，主婦，社会人）向け公開講演会を企画しております。学会としては初めての公開企画でもあり，会員の皆様にはご家族ご同伴の上，多数ご参加下さいますようご案内申し上げます。

講演会テーマ： 「私たちの生活と熱—着るとき，住むとき，食るとき—」

- 講師：**（1）「衣服と熱」
中島利誠 お茶の水女子大学生生活科学部教授
- （2）「料理と熱」
渋谷祥子 横浜国立大学教育学部教授
- （3）「くらしとエネルギー」
平田 賢 芝浦工業大学システム工学部教授

日時： 平成7年10月14日（土）午後2時～5時
会場： 文京シビックホール（東京都文京区春日1-16-21）
主催： 日本伝熱学会
後援： 日本学術会議熱工学連絡委員会，伝熱学会関東支部，他
主旨： 熱科学に関する知識の普及と啓蒙，青少年の理科離れに対する草の根活動，民政エネルギーの望ましい使用に関する家庭人への啓蒙などを目的として開催する。

問い合わせ先： 笠木伸英 東京大学工学部教授，伝熱学会理事・企画部会長
〒113 東京都文京区本郷7-3-1
TEL：03（3812）2111，内6417

河村 洋 東京理科大学教授，伝熱学会理事・総務部会長
〒278 千葉県野田市山崎2641
TEL：0471（24）1501，内3909

日本伝熱学会東海支部設立総会及び記念講演会 御 案 内

表題の総会及び講演会を下記のように開催します。ご出席賜りますよう御案内申し上げます。

- (1) 開催日 平成7年9月18日(月)
- (2) 会 場 名古屋大学シンポジオン
(名古屋市千種区不老町 名古屋大学構内: Tel 052-789-3059)
- (3) 総会・記念講演会式次第
 - 14:00~14:30 日本伝熱学会東海支部設立総会
 - 14:30~15:30 記念講演 架谷 昌信先生
講演題目 「化学熱を利用する熱技術」
 - 15:30~16:30 記念講演 藤掛 賢司先生
講演題目 「乗員の温熱生理からのエアコン開発」

引き続き、記念パーティー(17:00~19:00)を同会場のレストラン「ユニバーサルクラブ」(Tel: 052-782-6755)で開催します。

尚、本支部の発足は、8月5日の理事会で正式に承認される予定です。

問い合わせ先: 岐阜大学工学部機械工学科 熊田雅弥
Tel: 058-293-2530, Fax: 058-230-1892

<日本伝熱学会関西支部主催>

講演討論会のご案内

関西支部では、若手技術者、研究者による講演を中心とした討論会を下記要領にて開催いたします。多数ご参加くださいますようご案内申し上げます。

- 日 時 : 平成7年9月29日(金) 13:00~17:00
- 場 所 : 神戸大学、瀧川記念学术交流会館
兵庫県神戸市灘区六甲台町1-1 (078-881-1302)
[阪急電車「六甲」、JR西日本「六甲道」駅から
市バス36系統で「神大、文・理・農学部前」下車]
- 参加費 : 無 料
- 懇親会 : 講演討論会終了後、懇親会を予定しております。是非ご参加ください。
(17:00~ 会費: お一人様 1500円)
- 参加申込: 氏名、勤務先、連絡先(TEL No. または FAX No.) と懇親会の出欠をご記入の上、9月1日(金)までにFAXにて下記にお申し込みください。
川崎重工業(株)明石技術研究所 熱・流体研究部
井上健司 (FAX 078-921-1639, TEL 078-921-1634)

’ 95伝熱セミナー

日本伝熱学会関西支部では、標記セミナーを、下記のように計画致しました。
ふるってご参加下さいますよう、ご案内申し上げます。

開催日：平成7年8月25日（金）－8月26日（土），1泊2日。

場所：関西地区大学セミナーハウス。〒651-15 神戸市北区道場町生野字ロクゴ818の2。

TEL：078-985-4391。FAX：078-985-7219。

交通：車利用の場合：中国自動車道西宮北インターからR176を北へ約5分（約4km）。

交通機関利用の場合：JR宝塚線「三田駅」下車，神戸電鉄有馬温泉行きバスに乘車，「平田バス停」下車，東へ徒歩約15分。または「三田駅」よりタクシー約15分。

送迎バス利用の場合：JR宝塚線「道場駅」に，10：45，11：15に，ハウスの迎えのバス（28人乗り）あり。希望者は，その旨，当方に御連絡下さい。

参加費：一般：16,000円，学生：8,000円。（宿泊，食事（2食），懇親会費を含む。）

定員：70名。（申込み先着順により，満員になり次第，締切ります。）

申込み：郵送先：B5版用紙に，『’95伝熱セミナー参加申込み』と記し，①氏名，②資格（一般・学生），③所属，④連絡先（住所，電話，ファックス）を，ご記入のうえ，下記まで，郵送かファックスして下さい。

〒657 神戸市灘区六甲台 神戸大学工学部機械工学科 関西伝熱セミナー実行委員会委員長 中島 健。
FAX：078-845-2736，TEL：078-803-1103。

振込先：参加費を，下記の郵便振替口座に，振り込んで下さい。（尚，締切り後の返金はご容赦願います。）

口座名義：関西伝熱セミナー実行委員会，口座番号：01120-0-63880。

申込み締切日：8月11日（金）。

テーマ名：「生活・環境と伝熱」

【1日目】

受付開始（11：30）

開会（12：00－12：10）

《セッション1》『伝熱流体利用機器の現状と要素技術』（12：10－14：10）

- | | | |
|-----|------------------------|--------------|
| 1-1 | ボイラ燃焼室の相似則 | 西川栄一（神戸商船大学） |
| 1-2 | 空気液化分離装置における熱交換器の現状と課題 | 坂上誠一（日本酸素㈱） |
| 1-3 | 住宅空調の今後と伝熱 | 瀬下 裕（三菱電機㈱） |

《セッション2》『人間の生活に及ぼす温熱環境の影響』（14：20－15：40）

- | | | |
|-----|---------------------|-------------|
| 2-1 | 熱環境の快適性評価のための人体熱モデル | 竹森利和（大阪ガス㈱） |
| 2-2 | 空調空間における人間の温熱快適性評価 | 児玉 久（松下電産㈱） |

《セッション3》『ミクロスケールの伝熱現象を探る』（15：50－17：50）

- | | | |
|-----|----------------------------|------------|
| 3-1 | ミクロスケールで見た気体分子と固体表面との伝熱現象 | 加藤征三（三重大学） |
| 3-2 | 分子動力学法による相界面現象のシミュレーション | 丸山茂夫（東京大学） |
| 3-3 | 分子熱流体における実験手法について－その開発と応用－ | 井上剛良（九州大学） |

夕食（18：00－19：30）

《セッション4》『21世紀へ向けての伝熱研究』（19：40－21：00）

- | | | |
|-----|-----------------------------|----------------|
| 4-1 | 新しい伝熱・流動研究への道を求める方法について思うこと | 赤川浩爾（神戸大学名誉教授） |
| 4-2 | 将来の伝熱に関する研究開発の課題選定についての私見 | 藤江邦男（新明和工業㈱） |

懇親会（21：00－）

【2日目】

朝食（8：00－9：00）

《セッション5》『計測法を極める』（9：00－12：00）

- | | | |
|-----|---------------------------------|--------------|
| 5-1 | 光学的精密温度計測に関する検討 | 平野 光（大阪ガス㈱） |
| 5-2 | 画像処理による速度場計測 | 西野耕一（横浜国立大学） |
| 5-3 | 感温液晶懸濁法による自然対流の可視化と温度場，速度場の同時計測 | 小澤 守（関西大学） |
| 5-4 | ガスタービン燃焼器への伝熱可視化技術の適用例 | 石田克彦（川崎重工㈱） |

閉会（12：00－12：05）

中四国伝熱セミナー・岡山

中四国伝熱研究会では、標記のセミナー（一泊二日）を下記のように計画致しました。奮ってご参加下さいますようお願い申し上げます。

1. 日 時 平成7年9月1日（金）～2日（土）
2. 場 所 (1) 講 演 岡山大学自然科学研究科内 大会議室（2階）
岡山市津島中3丁目1 TEL 086-252-1111(代)
交通：JR岡山駅よりバス15分，タクシー10分
岡山大学構内工学部斜め向かい（7階建ての建物）
(2) 懇親会 つしま苑
岡山市津島新野1丁目1-22 TEL 086-252-1331
(3) 宿 泊 岡山県青年館
岡山市津島東1丁目4-1 TEL 086-254-7722
3. 参加費 会員および一般：11,000円 学生：6,000円
(宿泊，食事，懇親会費を含みます。)
4. 定 員 70名
5. 申し込み 綴じ込みの申し込み用紙（下記）に必要事項をご記入の上，下記宛先まで郵送又はFAXして下さい。複数で申し込まれる場合には，申し込み用紙をコピーし，一人一枚ずつご使用下さい。なお，参加費は当日講演会会場にて申し受けます。

締 切 日：平成7年8月21日（月）

郵 送 先：〒700 岡山市津島中3丁目1-1

岡山大学工学部機械工学科伝熱研究室内

中四国伝熱セミナー・岡山 準備委員会 稲葉 英男

TEL 086-251-8046 FAX 086-255-9669

----- 切り取り -----

岡山大学工学部機械工学科 稲葉英男 行 (FAX 086-255-9669)

中四国伝熱セミナー・岡山 参加申し込み用紙

フリガナ
御 氏 名 :

御所属(大学研究室):

役 職 (学 年) :

御 所 属 住 所:〒

TEL

FAX



ENGINEERING FOUNDATION

345 EAST 47TH STREET, NEW YORK, NY 10017
TELEPHONE: (212) 705-7836 — FAX: (212) 705-7441

TURBULENT HEAT TRANSFER

An International Conference

10 - 15 March 1996

Bahia Resort Hotel & Conference Center
San Diego, California

Conference Co-Chairs:

R.M.C. So, USA Phone: 1-602-965-4119 Fax: 602-965-1384
J.A.C. Humphrey, USA Phone: 1-520-621-2236 Fax: 1-520-621-8191
N. Kasagi, Japan Phone: 81-3-3812-2111 Fax: 81-3-5800-6999
B.E. Launder, UK Phone: 44-161-200-3701 Fax: 44-161-200-3723

Organizing Committee

R.A. Antonia, Australia; G. Bergeles, Greece; G. Binder, France; J.K. Eaton, USA; T.B. Gatski, USA; K. Hanjalić, The Netherlands; T.V. Jones, UK; D. Laurance, France; T. Nagano, Japan; M.J. Owen, UK; W. Rodi, Germany; S. Sarkar, USA; A.M. Savill, UK; R.L. Simpson, USA; C.G. Speziale, USA; K. Suzuki, Japan; S. Tavoularis, Canada; R. Viskanta, USA.

Submission of Abstracts

Contributed papers are invited on original work in the above general areas. Extended abstracts no more than four pages long, including figures should be submitted directly to Dr. R.M.C. So, Conference Chair, Mechanical and Aerospace Engineering, Arizona State University, Tempe, AZ 85287-6106, USA (Phone: 1-602-965-4119; Fax: 1-602-965-1384; E-mail: so@asuvox.oas.asu.edu). Instructions on abstract format are on the reverse side of the application/information form. (Please complete this form and return it to the Engineering Foundation.)

The deadlines are:

Extended Abstracts	September 1, 1995
Notification of Acceptance	November 1, 1995
Papers Due	January 15, 1996

Conference Overview

The conference is structured to have two technical sessions each day. Each session will include invited and contributed papers along with a panel discussion conducted by the Co-chairs of the session. Thus, suggested topics and schedule for these sessions are:

Day 1	I:	Momentum Transport Modelling
	II:	Scalar Transport Modelling
Day 2	III:	Heat Transfer in Homogeneous Flows
	IV:	Heat Transfer in Near-wall Flows
Day 3	V:	Heat Transfer in Complex Flows
	VI:	Turbulent Natural Convection
Day 4	VII:	Heat Transfer in Transitional Flows
	VIII:	Heat Transfer in Separated and Impinging Flows
Day 5	IX:	New Experimental Techniques

Pre-registration form 及び Abstract format については東京大学笠木伸英あてご請求下さい。

第16回日本熱物性シンポジウム開催案内

第16回実行委員長 舛岡弘勝 (広島大学工学部)

第16回日本熱物性シンポジウムを下記の次第で開催致します。お気軽にお誘い合わせの上、多数ご参加下さるようお願い申し上げます。

今回のシンポジウムでは通常のセッションのほか、特別セッションとして、(a)蓄熱・蓄冷材料の熱物性、(b)相平衡の測定と推算を企画しています。参加申込要領は「熱物性」7月号に掲載予定ですが、参加希望の方は郵便振替用紙通信欄に①氏名(ふりがな)、②勤務先(または学校名)、③所属学協会名、④会員資格、⑤送金の内訳(参加費、論文集、懇親会)を記入の上送金するか、実行委員会までFAXあるいは葉書で参加申込要領、振替用紙をご請求ください。

記

開催期間：平成7年11月7日(火)～9日(木)

会場：広島県情報プラザ

(〒730 広島市中区千田町三丁目7-47)

JR広島駅から①宇品行路面電車広電本社前電停下車(約30分)、徒歩7分

参加費：熱物性学会会員及び共催・協賛学協会会員
5,000円、学生2,500円、非会員6,000円

講演論文集：日本熱物性学会会員3,000円
その他6,000円

懇親会：日時11月8日(水)

一般7,000円、学生5,000円

(上記の代金の予約外はすべて1,000円加算)

予約参加申込締切：平成7年10月9日(月)

問い合わせ及び参加申込先

〒739 東広島市鏡山1-4-1

広島大学工学部化学工学科化工熱力学研究室気付

TEL 0824-24-7721 (直通)

FAX 0824-22-7191

E-mail ysato@ue.ipc.hiroshima-u.ac.jp

郵便振替口座：01320-4-27352

第16回日本熱物性シンポジウム実行委員会

第33回燃焼シンポジウム

主催	日本燃焼学会
共催	日本学術会議熱工学研究連絡委員会、日本伝熱学会 ほか
開催日	平成7年11月23日(木)～25日(土)
会場	東京都立科学技術大学 科学技術交流施設(日野市)
講演申込締切日	平成7年 7月14日(金)
講演原稿提出締切日	平成7年 9月14日(木)
参加申込締切日	平成7年10月20日(金)

講演申込み方法や原稿の提出先、シンポジウム参加申込み方法等の詳細については、下記シンポジウム事務局へお問い合わせ下さい。

第33回燃焼シンポジウム事務局

〒191 日野市旭ヶ丘6-6

東京都立科学技術大学航空宇宙システム工学科内

電話：0425-83-5111 ext.3506(湯浅)/3514(後藤)

FAX：0425-83-5119

第9回数值流体力学シンポジウム講演募集

主催：(社)日本数值流体力学会

後援・協賛：化学工学会、可視化情報学会、自動車技術会、ターボ機械協会、土木学会、日本応用数学会、日本ガスタービン学会、日本機械学会、日本気象学会、日本計算工学会、日本原子力学会、日本建築学会、日本航空宇宙学会、日本混相流学会、日本造船学会、日本伝熱学会、日本燃焼学会、日本流体力学会(50音順、依頼中を含む)

開催日：平成7年12月20日(水)～22日(金)
会場：中央大学理工学部 春日キャンパス
(東京都文京区春日1-13-27)

講演募集テーマ：数值流体力学に関する下記のテーマ

- ・高速流、高レイノルズ数流れ
- ・乱流輸送現象、乱流遷移
- ・圧縮性乱流、衝撃波
- ・環境、気象、混相流、自由表面
- ・先端技術、実用問題への応用
- ・反応流、プラズマ流、分子流れ、燃焼

- ・直接シミュレーション、LES
- ・レイノルズ平均乱流モデル
- ・FEM、BEM、渦法
- ・並列処理、格子形成法
- ・サイエンティフィック・ビジュアラリゼーション
- ・その他

講演申込み締切 平成7年9月29日

講演原稿提出締切 平成7年11月1日

※申込みは配布書式をお使い下さい。

※講演発表の採否は実行委員会に一任願います。

論文発表方法

- ・4ないし5会場のパラレルセッション方式
- ・特別講演3件、特別企画1件、普通講演200件を予定
- ・普通講演の発表時間は一件あたり討論を含めて20分

申込み・問合せ先

東京大学工学部機械工学科 笠木 伸英

〒113 東京都文京区本郷7-3-1

電話 03-3812-2111 内6417 FAX 03 5800 6999

e-mail: kasagi@thtlab.t.u-tokyo.ac.jp

第19回 人間-生活環境系シンポジウム

期日：平成7年11月30日(木)～12月1日(金)

場所：京都市リサーチパーク

発表申込締切日：平成7年7月10日、参加費：13,000円

連絡先：〒606 京都市左京区下鴨半木町1, 京都府立大学生生活科学部
住居学科, 第19回人間-生活環境系シンポジウム実行委員会
TEL075(781)3131(214), FAX075(712)1629

会誌「伝熱研究」の価格について

会員外への頒布価格は、各号とも
送料を含み 1,680 円です。

事務局へお申し込み下さい。

トピックス記事情報ご提供のお願い

「伝熱研究」編集委員会

「伝熱研究」編集委員会では、今期より本誌紙上に「トピックス欄」を設け、伝熱研究者あるいは技術者として見逃すことのできない伝熱各分野の新技术や周辺技術に関する情報、あるいは大学や企業の研究室における研究内容等を紹介することを計画致しております。会員各位におかれましては下記要項をご一読の上、ふるって記事をお寄せ下さいませようお願い申し上げます。また、お近くにトピックス記事としてふさわしい話題等がございましたら、是非編集委員会宛てお知らせ下さい。

I. 「トピックス欄」記事要領

1. 記事の内容

(1) 伝熱研究者、技術者として見逃す事のできない新技术や周辺技術に関する国内外の情報、
例えば、

- a. 企業などにおいて開発・設計した新技术・新製品の紹介（とくに技術面での独創性や有効性についての紹介を中心とし、単なる製品の宣伝でないこと。）
- b. 内外の伝熱関連雑誌の紹介、新刊専門書（特色のあるもの）の紹介、論評。
- c. 伝熱に関連した各種プロジェクトの紹介など。
- (2) 大学や企業の研究室紹介、例えば、
- d. 研究テーマや研究内容の紹介など。

2. 記事の体裁

本誌添付「伝熱研究原稿の書き方」に基づき、1ページ以内。（執筆にあたっては、読者の理解を深めるために極力、図、写真、または表を入れて下さい。）

3. 記事の責任

記事はすべて署名記事とし、内容に関する責任は著者にあるものとする。

II. 記事提供にあたって

1. トピックス記事の直接投稿：上記の執筆要項に従って作成された原稿は、掲載を希望される号（1月、4月、7月、10月）の担当編集委員または編集委員長へ直接送付下さい。（各号担当編集委員および編集担当委員長名は、「伝熱研究」'94年7月号p.101をご参照下さい。なお、掲載を希望される号（月）の2ヶ月前を投稿の目安として下さい。）

2. トピックス記事の推薦：トピックス記事として適当と思われるものがありましたら、i) テーマ名 ii) 執筆者名、iii) 勤務先、住所および iv) 原稿の概要をB5用紙に明記の上、掲載を希望される号の担当編集委員または編集委員長まで手紙またはファックスでお寄せ下さい。（この場合、記事のご推薦から掲載まで少なくとも3ヶ月をお見積もり下さい。）

3. 原稿の採否は編集委員会にご一任下さい。なお推薦記事につきましては、編集委員会で検討の上委員会より直接執筆依頼をいたします。

以上

編集委員会だより

巡り合わせとしか言い様がないようにも思うが、昨年度および今年度の「伝熱研究」誌の編集委員を担当する機会に恵まれた。非才を自認しつつも他の委員の援助を受け一つの号の編集にも携わり、それを発行することも出来た。たまたま、33期の編集委員長の芹澤教授からこの記事を書くように依頼を受け、文章の下手さを考えると、任ではないと感じたが、あまり遠慮をしてもこの編集業務が進行しないと考え、書いてみることにした次第である。私の乏しい経験を基にしてこの会誌のこれまでと今後の行き方についての感想等を主として述べたい。上述のように、経験不足からの勘違い、見当外れの見方等が点在する可能性があるが、それに対してのご指摘や反論が寄せられれば非常に幸と考えている。なぜならば、これによって、会員各位が雑誌の末尾に位置する編集委員からの一種のメッセージをも読んで下さっていると言う証明にもなるし、さらにこの機関誌の向上を願っているということも委員や会員に伝わると考えるからである。

この「伝熱研究」誌の最近（ここ2～3年か）の編集方針は編集委員長の下に数名の委員を置き、原則としてその委員の2名が組になって内容の企画を立案する。それが委員会承認（この企画はほとんど承認されていると思う）された後に、企画に沿った記事の執筆依頼・校閲・編集がなされ、それを委員長が最終的に纏め、後ろに付けられる論文誌（TSE）と合わせ出来上がるという経過をとる。この方針は、私が2期経験した、季刊ではあるが委員会の開催の都度半年以上先の号の企画を委員全体で考える「熱物性」誌の方針と比較すると相当の相違がある。どちらが多少なのかは更に幾つかの学術誌の編集方法を聞かなければ断定は出来ないが、多分、本誌の方法の方が少ないように推定している。言うまでもなく、一般に、ある方法は長短合せ持つが、本誌の場合の長所を上げると以下のようになると思われる。

（1）企画から編集までほとんどが担当者に任されるので、小回りも利き、自分の得意な分野の特集を組めやりのがある。

（2）委員の選択を適切にすれば、ある期間に亘って伝熱に関する広い分野の最新情報を知ることが出来る。

等であろう。

一方、この方式の欠点あるいは注意すべき点として、（1）編集委員長に手渡す前のほとんどの仕事が委員に掛かるので、準備期間も含め時間的にも相当の負担になる。

（2）記事内容が担当委員の関連分野に集中しがちになるので、掲載記事は深さはあるが、限定された内容になりがちである。また、解説・レビュー等の記事等のみになりやすい。

等が上げられる。以上の長所・短所を合わせ考えて、33期委員長が「編集だより」にも書かれていたように、現在、色々な意見を集め、本誌をもっと会員に親しめるものにしようという模索が行われようとしている段階である。

ここで、あえて私の個人的な経験上の感想を言えば、本誌の特徴ある編集方針は、学問の幅が狭い私にとって大きなよき体験になったと言える。まず、第一に企画の段階で多くの人々からご意見を伺い、また、それに沿った記事をお願いするに当たっても、色々な人々と直接あるいは手紙・電話などでお願いする事によって自分自身の幅が広がると思われたからである。この意味では、私の編集委員としての経験は、ほとんど私自身のためにあったように感じている。この意味も含めて、ある伝熱研究記事についての企画を持ち、それを生かして雑誌を作って見たいという会員（出来るだけ若い人）の編集委員の公募方式も新機軸の一つとして取り上げてよいのではと考えている。

以上を纏めると、本誌のこれまでの方針は、それなりの理由やバックグラウンドがあり、特徴があると思われるのでそれを生かしたい。しかし、本体がほとんど特集のみの記事の幅の狭さを講座、会員の広場、維持会員の仕事紹介等の連載（これがルーチン化すれば担当委員はこの分量の企画は比較的楽になる）を新設することで別の面を出せるようにと個人的に考えている。少なくとも、あまり大きくない学会誌の編集委員と寄稿者は1種のボランティアであると考えているが、これを行う価値は十分過ぎるほどあるし、前述のように、自薦の委員希望者や持込み原稿があってほしいと願っている。また、最後に自分達の企画号に心よく原稿をお送り下さった各位に改めて敬意と謝意を表す次第であります。 （文責 山田悦郎）

事務局からの連絡

1. 学会案内と入会手続きについて

【目的】

本会は、伝熱に関する学理技術の進展と知識の普及、会員相互及び国際的な交流を図ることを目的としています。

【会計年度】

会計年度は、毎年4月1日に始まり翌年3月31日までです。(但し、「伝熱研究」の巻と表紙の色は1月号から10月号までの一年間同じです)

【会員の種別と会費】

会員種別	資格	会費(年額)
正会員	伝熱に関する学識経験を有する者で、本会の目的に賛同して入会した個人	8,000円
賛助会員	本会の目的に賛同し、本会の事業を援助する法人またはその事業所、あるいは個人	1口 30,000円
学生会員	高専、短大、大学の学部および大学院に在学中の学生で、本会の目的に賛同して入会した個人	4,000円
名誉会員	本会に特に功労のあった者で、総会において推薦された者	0円
推薦会員	本会の発展に寄与することが期待できる者で、当該年度の総会において推薦された者	0円

【会員の特典】

会員は本会の活動に参加でき、次の特典があります。

1. 「伝熱研究, THERMAL SCIENCE AND ENGINEERING」を郵送します。

(本年度発行予定: 4月号, 7月号, 10月号, 1月号)

- ・正会員、学生会員、名誉会員、推薦会員に1冊送付
- ・賛助会員に口数分の冊数送付

2. 「日本伝熱シンポジウム講演論文集」を無料でさしあげます。

- ・正・学生・名誉・推薦の各会員に1部、賛助会員に口数分の部数(但し、伝熱シンポジウム開催の前年度の3月25日までに前年度分までの会費を納入した会員に限る)

【入会手続き】

正会員または学生会員への入会の際は、入会申込用紙にご記入の上、事務局宛にファックスまたは郵送で送り、郵便振替にて当該年度会費をお支払い下さい。賛助会員への入会の際は、入会申込用紙にご記入の上、事務局宛にファックスまたは郵送でお送り下さい。必要があれば本会の内容、会則、入会手続き等についてご説明します。賛助会員への申込みは何口でも可能です。

(注意)

- ・申込用紙には氏名を明瞭に記入し、難読文字にはJISコードのご指示をお願いします。
- ・会費納入時の郵便振替用紙には、会員名(必要に応じてフリガナを付す)を必ず記入して下さい。会社名のみ記載の場合、入金の取扱いができず、会費未納のままとなります。
- ・学生会員への入会申込においては、指導教官による在学証明(署名・捺印)が必要です。

2. 会員の方々へ

【会員増加と賛助会員口数増加のお願い】

個人会員と賛助会員の増加が検討されています。会員の皆様におかれましても、できる限り周囲の関連の方々や団体に入会をお誘い下さるようお願いいたします。また、賛助会員への入会申込み受付におきまして、A(3口)、B(2口)、C(1口)と分けております。現賛助会員におかれましても、できる限り口数の増加をお願いします。

【会費納入について】

会費は当該年度内に納入してください。請求書はお申し出のない限り特に発行しません。会費納入状況は事務局にお問い合わせ下さい。会費納入には折込みの郵便振替用紙をご利用下さい。その他の送金方法で手数料が必要な場合には、送金額から減額します。フリガナ名の検索によって入金の手続き処理を行っておりますので会社名のみで会員名の記載がない場合には未納扱いになります。

【変更届について】

（勤務先、住所、通信先等の変更）

勤務先、住所、通信先等に変更が生じた場合には、巻末の「変更届用紙」にて速やかに事務局へお知らせ下さい。通信先の変更届がない場合には、郵送物が会員に確実に届かず、あるいは宛名不明により以降の郵送が継続できなくなります。また、再発送が可能な場合にもその費用をご負担頂くことになります。

（賛助会員の代表者変更）

賛助会員の場合には、必要に応じて代表者を変更できます。

（学生会員から正会員への変更）

学生会員が社会人になられた場合には、会費が変わりますので正会員(正会員)への変更届を速やかにご提出下さい。このことにつきましては、指導教官の方々からもご指導をお願いします。

（変更届提出上の注意）

会員データを変更する際の誤りを防ぐため、変更届は必ず書面にて会員自身もしくは代理と認められる方がご提出下さるようお願いいたします。

【退会届について】

退会を希望される方は、退会日付けを記した書面にて退会届(郵便振替用紙に記載可)を提出し、未納会費を納入して下さい。会員登録を抹消します。

【会費を長期滞納されている会員の方へ】

長期間、会費を滞納されている会員の方々は、至急納入をお願いします。特に、平成6年度以降の会費未納の方には「伝熱研究・THERMAL SCIENCE AND ENGINEERING」の送付を停止しており、近く退会処分が理事会で決定されます。

3. 事務局について

次の業務を下記の事務局で行っております。

事務局
(業務内容)
i) 入会届、変更届、退会届の受付
ii) 会費納入の受付、会費徴収等
iii) 会員、非会員からの問い合わせに対する対応、連絡等
iv) 伝熱シンポジウム終了後の「講演論文集」の注文受付、新入会員への「伝熱研究・THERMAL SCIENCE AND ENGINEERING」発送、その他刊行物の発送
v) その他必要な業務
(所在地)
〒113 東京都文京区湯島2-16-16
社団法人日本伝熱学会
TEL,FAX: 03-5689-3401
(土日、祝祭日を除く、午前9時～午後5時)

(注意)

1. 事務局への連絡、お問い合わせには、電話によらずできるだけ郵便振替用紙の通信覧やファックス等の書面にてお願いします。
2. 学会事務の統括と上記以外の事務は、下記にて行なっております。

〒152 東京都目黒区大岡山2-12-1 東京工業大学 工学部 機械科学科 齋藤彬夫 TEL:03-5734-2167, 3308 FAX:03-5734-2167, 2893
--

日本伝熱学会正会員・学生会員入会申込み・変更届用紙

- (右の該当に○を記入) 1. 正会員・学生会員入会申込書
 2. 変更届 (書面による届出のみ受付)
 ・楷書体で明瞭に記入
 ・氏名にふりがなを付す
 ・通信文は余白に記入
 ・申込み時に郵便振替にて会費納入

0	申込年月日	H			年				月			日			
1	会員資格	正・学													
2	氏名														
3	ふりがな														
4	生年月日	M	.	T	.	S			年			月			日
5	名称														
6	〒														
7	勤務先														
8	所在地														
9	学校														
10	TEL														
11	FAX														
12	〒														
13	自宅住所														
14	TEL														
15	TEL														
16	通信先**	勤務先・自宅													
17	学位														
18	最終出身校														
19	卒業年次	T・S・H													
20	専門分野	← (下記の専門分野の番号)													
21	学生会員の場合：指導教官名***	印													

- 専門分野
 1 自然対流 2 強制対流 3 熱伝導 4 凝縮 5 沸騰・蒸発 6 混相流
 7 物質移動 8 反応・燃焼 9 放射 10 熱物性 11 熱交換器 12 流動層
 13 蓄熱 14 冷媒・空調 15 内燃機関 16 冷凍・空調 17 蒸気機関 18 原子力
 19 太陽熱 20 環境 21 その他 ()
- 例：電子機器の冷却、生体伝熱、分子動力学等

- *) 学生会員入会申込者は学校名、学部、学科、研究室名、学年 (M2, D3など) を記す。
 **) 郵送物発送先として通信先を必ず記入する。
 ***) 学生会員入会申込者は、指導教官の署名・捺印を受ける。

日本伝熱学会 賛助会員新規入会申込み届用紙

0	申込年月日	H			年				月			日
1	会員資格	賛助会員										
2	代表者氏名											
3	ふりがな											
4	名称 (所属)											
5	代 表 者	〒										
6	〒											
7	所在地											
8	勤務先											
9	TEL											
10	FAX											
11	口数	共通・専用										

※ご記入に際しての注意
 日本伝熱学会からの郵送物は代表者にお送りしておりますので、代表者の所属に変更がありましたら、書面にて事務局宛ご連絡下さるようお願いいたします。

日本伝熱学会入会のご案内

- 本学会の会計年度は毎年4月1日から翌年3月末日までです。
 - 賛助会員の会費は1口30,000円/年で、申し込みは何口でも結構です。申し込み口数により、次のように分けております。
 A (3口)、B (2口)、C (1口)
 - 会員になりたく「伝熱研究」をお申し込み口数1口につき1部お送りします。「日本伝熱シンポジウム講演文集」等をお申し込み口数1口につき1部無料で差しあげます。
 この伝熱研究は通常、年4回 (4、7、10、1月号) 発行しております。
 但し、日本伝熱シンポジウム講演文集につきましては、前年度の会費を年度末までに完納された会員に限り当該年度のもを無料で差しあげます。
 尚、年度途中でご入会の方には残部の都合でお送りできない場合がありますので、あらかじめご承知おき下さい。
 - 本学会では、事務作業簡素化のために会費の領収書の発行は郵便振替や銀行振込の控えをあてております。簡単な書式の領収書をご用意できますが、それ以外の場合には貴社ご指定の書式をご送付下さいますようお願いいたします。
 申込書送付先：〒113 東京都文京区湯島2-16-16
 社団法人日本伝熱学会事務局 TEL. FAX. 03-5689-3401
- 会費の払込先：
 (1) 郵便振替の場合—郵便振替口座 00160-4-14749 社団法人日本伝熱学会
 (2) 銀行振込の場合—第一勧業銀行 大岡山支店 普通預金口座 145-1517941 社団法人日本伝熱学会
 (3) 現金書留の場合—上記の事務局宛に御送金下さい。

複写をされる方に

本誌に掲載された著作物を複写したい方は、著作権者から複写権の委託を受けている次の団体から許諾を受けて下さい。

学協会著作権協議会内日本複写権センター支部
〒107 東京都港区赤坂 9-6-42-704
Phone 03-3475-4621/5618
Fax 03-3403-1738

Notice about photocopying

In the U.S.A., authorization to photocopy items for internal or personal use, or the internal or personal use of specific clients, is granted by [copyright owner's name], provided that designated fees are paid directly to Copyright Clearance Center. For those organizations that have been granted a photocopy license by CCC a separate system of payment has been arranged.

Copyright Clearance Center 27, Congress St.
Salem, MA 01970
Phone (508)744-3350
Fax (508)741-2318

平成7年度の「伝熱研究」の出版には、平成7年度科学研究費補助金「研究成果公開促進費」の補助を受けています。

伝 熱 研 究

ISSN 0910-7851

(Journal of The Heat Transfer Society of Japan)

Vol.34, No.134

1995年7月発行

発行所 **社団法人 日 本 伝 熱 学 会**

〒113 東京都文京区湯島2-16-16

電話 03(5689)3401

Fax. 03(5689)3401

郵便振替 00160-4-14749

Published by

The Heat Transfer Society of Japan
16-16, Yushima 2-chome, Bunkyo-ku,
Tokyo-113, Japan
Phone, Fax: +81-3-5689-3401

伝熱研究 Vol.34, No.134

会長就任にあたって	相原利雄 (東北大学流体科学研究所)	1
会長の任を終えて	中山 恒 (東京工業大学工学部)	2
CURRENT RESEARCHES ON HEAT TRANSFER IN CHINA		
	Bu-Xan Wang And Zeng-Yuan Guo (Tsinghua University)	3
A Survey of Thermal Engineering Research Activity in Korea		
	Jae Min HYUN (Korea Advanced Institute of Science & Technology)	11
〈第32回日本伝熱シンポジウム〉		
第32回日本伝熱シンポジウムを終えて	準備委員長 宮本政英 (山口大学工学部)	19
第32回日本伝熱シンポジウムを終えて	準備委員 加藤泰生 (山口大学)	20
企画部会特別セッション「中国と韓国の伝熱研究の現況」について	森 康彦 (慶応義塾大学理工学部)	21
〈小特集：地球温暖化対策—二酸化炭素の隔離技術の現状と展望〉		
小特集にあたって	第33期編集委員会	23
発電プラントからの二酸化炭素回収・隔離技術の評価	赤井 誠 (機械技術研究所)	24
CO ₂ 海洋貯留の動的挙動の実験と分子動力学解析	平井秀一郎・岡崎 健・土方邦夫 (東京工業大学)	30
高圧水中における二酸化炭素の溶解挙動	綾 威雄 (船舶技研)	38
海水中における二酸化炭素の拡散と深海条件下の挙動	西尾匡弘 (機械技術研究所)	46
CO ₂ ハイドレートの構造と生成・解離メカニズム	内田 努 (北海道工業技術研究所)	52
地球科学から見た二酸化炭素隔離技術	大隅多加志 (電中研)	58