

伝 熱

目 次

支部活動報告

関西発信の最近の話題	中部主敬 (京都大学工学研究科)	1
高温ガスタービンにおける伝熱技術の進歩	武石賢一郎 (三菱重工業株)	2
300kW級セラミックガスタービン CGT302 の研究開発	巽哲男 (川崎重工業株)	13
SPring-8概要とビームラインの熱関連問題	望月哲朗・大石真也 ((財)高輝度光科学研究センター)	23

追悼

坪内為雄先生の逝去を悼みて	相原利雄 (東北大学名誉教授)	33
坪内為雄先生を思い浮かべて	増田英俊 (東北大学名誉教授)	35
坪内先生の思い出 (第2回国際伝熱会議)	宇佐見久雄 (名誉会員)	37

連載

インタビュー「Joint Research グループリーダーに聞く」連載開始にあたって	川口靖夫 (工業技術院、機械技術研究所)	39
1. 神戸大学応用化学科, 薄井洋基教授	聞き手: 川口靖夫 (機技研)	40
2. 岡山大学大学院自然科学研究科, 稲葉英男教授	聞き手: 川口靖夫 (機技研)	43

第36回日本伝熱シンポジウム

『伝熱シンポジウム「気になる研究」沸騰関連』についてのコメント	永井二郎 (福井大学)	46
---------------------------------	-------------	----

ワンポイント伝熱

多孔質体内熱流動において誤解を招くドグマ	中山顕 (静岡大学)	47
----------------------	------------	----

セミナー報告

キッズエネルギーシンポジウム '99 顛末記「エネルギーって何だろう」	小澤守 (関西大学工学部)	49
-------------------------------------	---------------	----

行事カレンダー		53
---------	--	----

お知らせ

第37回日本伝熱シンポジウム

第37回日本伝熱シンポジウムのご案内	54
提出書類及びお願いなど	55
関西支部主催見学ツアーのお知らせ	55
第37回日本伝熱シンポジウム宿泊・交通のご案内	56
第37回日本伝熱シンポジウム宿泊・航空券申込書	58
伝熱シンポジウム講演論文の書き方	59
JICSTデータベース用講演論文集抄録提出のお願い	60
第37回日本伝熱シンポジウム会場・ホテル案内図	61
日本伝熱学会研究会「マイクロマシンと熱流体」第3回会合のお知らせ	62
シンポジウムCO ₂ 排出削減のための技術革新	63
同志社大学工学部機械系学科教員公募	64
「伝熱」会告の書き方	65
事務局からの連絡	66
日本伝熱学会、入会申込み、変更届用紙	67
日本伝熱学会、賛助会員入会申込み、変更届用紙	68

インターネット情報サービス

<http://htsj.mes.titech.ac.jp/htsj.html>

最新の会告・行事の予定等を提供

htsj-info@mes.titech.ac.jp

最新の情報を電子メールで受け取りたい方のための電子メールアドレスの登録受付

htsj@mes.titech.ac.jp

事務局への連絡の電子メールによる受付

Journal of The Heat Transfer Society of Japan
Vol.39, No.154 January, 2000

CONTENTS

<Reports on the Branch Activities>

Recent Topics Dispatched from Kansai-Branch Kazuyoshi NAKABE (Kyoto University).....	1
Progress of Heat Transfer in High Temperature Gas Turbines Ken ichiro TAKEISHI (Mitsubishi Heavy Industries Ltd.)	2
R & D of 300kW class Ceramic Gas turbine CGT302 Tetsuo TATSUMI (Kawasaki Heavy Industries Ltd.).....	13
Overview of the SPring-8 and thermal problems of the beamline Tetsuro MOTIDUKI, Masaya OISHI (Japan Synchrotron Radiation Research Institute).....	23

<Memorial Tribute>

A tribute to the memory of the late Professor Tameo Tsubouchi Toshio AIHARA (Professor Emeritus of Tohoku University).....	33
In Memory of Professor Tameo Tsubouchi Hidetoshi MASUDA (Professor Emeritus of Tohoku University).....	35
Memories of Prof. TSUBOUCHI at the 1961-62 International Heat Transfer Conference, Boulder, Colorado Hisao USAMI (Honorary member).....	37

<New Serial: Joint Research>

Preface to "Interviewing a group leader of joint research" Yasuo KAWAGUCHI (Mechanical Engineering Laboratory, AIST MITI).....	39
Interviewing a group leader of joint research, 1. Prof. Hiromoto USUI of Kobe University Interviewer: Yasuo KAWAGUCHI (MEL).....	40
Interviewing a group leader of joint research, 2. Prof. Hideo INABA of Okayama University Interviewer: Yasuo KAWAGUCHI (MEL).....	43

<The 36th National Heat Transfer Symposium of Japan>

Comments on "Stimulating Studies in 36 th National Heat Transfer Symposium, Boiling" Niroh NAGAI (Fukui University).....	46
--	----

< One Point of Heat Transfer>

Misleading Dogmas Associated with Heat and Fluid Flow in Porous Media Akira NAKAYAMA (Shizuoka University).....	47
--	----

<Reports on the Seminar>

Energy Symposium for Kids '99 -What is "Energy" ?-

Mamoru OZAWA (Kansai University).....49

<Calendar>53

<Announcements>54

関西発信の最近の話題

Recent Topics Dispatched from Kansai-Branch

中部主敬 (京都大学工学研究科)

Kazuyoshi NAKABE (Kyoto University)

2000年代開幕の年,明けましておめでとうございます.21世紀への助走となる今年の初頭として,次世代を担う熱エネルギー変換機関の一つと考えられるガスタービン機関にスポットを当てることにしました.1824年,Nicolas Leonard Sadi Carnotが論文「火の動力およびこの動力を発生させるに適した機関についての考察」において示したカルノーサイクルの熱効率の制限を免れないものの,熱機関は1900年代に急激な進展を遂げました.その中でも航空機用,大型産業用,非常発電用と幅広い分野で利用されているガスタービンは,低公害化,高効率化,燃料多様化に対応できる熱機関として注目されています.そこで,まず産業用大型ガスタービンについて,とくにそのタービン動静翼の冷却技術を中心に,開発当初の状況から実用化技術の進展,さらには最新研究開発の状況に至るまでを,武石賢一郎氏(三菱重工業(株))に分かり易く解説していただきました.一方,小型ガスタービンはこれまでガスエンジン,ディーゼルエンジンに比して低熱効率であるがため,非常用発電機駆動等に限定使用されてきましたが,昨年,ニューサンシャイン計画(当初はムーンライト計画)のプロジェクトの一環として300kW級ガスタービンが開発目標値を上回る42.1%(322kW)の画期的な熱効率を達成し,このクラスでもガスタービンが広く利用される可能性を開きました.この研究開発に直接携わってこられた巽哲男氏(川崎重工業(株))にプロジェクトの詳細,とくにセラミック部材を用いた,無冷却燃焼器,タービン翼,コイル状・波板状パネ等の要素技術や,開発途上で遭遇された問題点とその解決策などをご披露願いました.開発目標達成のキーポイントについては,プロジェクト発足以前から最終年度までの13年間,国立研究機関としての立場からずっと関わってこられた筒井康賢氏(工業技術院機械技術研究所)が,「(もちろ

ん)エンジンメーカ,セラミックメーカの開発への努力,それを支えたニューサンシャイン計画推進本部,NEDO燃料貯蔵技術開発室などの力のすべてが結集したことによるが,その中でも,各関連メーカの敬服すべき執念とも言うべき努力とともに,(1)セラミック部品の成形技術の向上,(2)セラミック部品をガスタービン部品として使いこなす技術の向上にあった」と述べておられます.さらなる小型化に関する研究の一つとして,大型ガスタービンをベースロード用に特化させ,分散型エネルギー機器として超小型ガスタービン+燃料電池のハイブリッドシステムを充てる「戦略型」基礎研究も鈴木健二郎先生(京都大学)を中心に始っています.

後半部では昨年9月初めに開催された,関西伝熱セミナー'99「21世紀へ挑戦する伝熱技術」における話題提供の一つ,大型放射光施設SPring-8の熱関連問題を望月哲朗氏・大石真也氏((財)高輝度光科学研究センター)に纏めていただきました.

地球に「優しい」エネルギー技術という方針の下,各方面で省エネルギー化・高効率化推進に努力が傾注されていますが,ユーザーが熱エネルギー,電気エネルギーを利用する際にはモラルに類する概念(インターネット利用時のネチケットをまねてエネケット?)も今後必要になってくるかもしれません.広辞苑で「優しい」を引くと,動詞「瘦す」の形容詞形,「身も瘠せるように感じる」が原義とあり,周囲や相手に気をつかって控え目である,つつましい,情け深い,と続いています.この意味からも真に「優しい」という日本語を実行することは決して「易しい」ことではないでしょう.しかし,環境に気を使う時には自分自身が多少瘦せることを厭わないという考え方は,「地球再生計画」に向けて,21世紀のキーになるのではないのでしょうか?

高温ガスタービンにおける伝熱技術の進歩

Progress of Heat Transfer in High Temperature Gas Turbines

武石 賢一郎 (三菱重工業株)

Ken ichiro TAKEISHI (Mitsubishi Heavy Industries Ltd.)

1. まえがき

世界的な地球環境問題を解決する有力な方法の一つとして、また省エネルギー問題の観点からも大型のコンバインドプラントが現在脚光を浴びている。このコンバインドプラントはLNG焚大型ガスタービンと蒸気タービンとを組合せた構成から成り立っていて、従来の火力発電プラントよりも20%程度高い熱効率が達成されている。コンバインドサイクルの更なる効率向上を目指してトッピングサイクルに用いられるガスタービンは、一層の高性能化が要求されている。ガスタービンのサイクル効率を改善する方法の中では、タービン入口温度(Tit)を上昇させる方法が最も有効な方法である[1]。このためにガスタービンメーカー各社では高温ガスタービンの開発が積極的に行われている。現在、最新の産業用ガスタービンのTitは1500に達している。この高温ガスタービンを用いたコンバインドサイクルの総合熱効率は、低位発熱量基準(LHV)で58%以上を達成している[2]。

高温ガスタービンにおいては、高温ガスに接する高温の部材、中でもタービン第1段静動翼の信頼性確保が重要な問題である。この問題は冷却技術、耐熱材料技術、コーティング技術、加工技術等の進歩によって解決されて来ているがとりわけ冷却技術の進歩に負う所が大きい。本解説においては、この分野に関係の薄い方にも全容がわかるように高温ガスタービンを紹介する中で、特にタービン翼の冷却技術を中心に伝熱技術の進歩と今後の発展を展望する。

2. ガスタービンの高温化とタービン翼冷却構造の変遷

歴史を振り返ってみると、タービン翼の冷却技術は1935年ドイツで初めて行なわれた空気冷却翼(空冷翼)と水冷却翼の研究まで遡ることが出来る。

タービン入口温度2000R(838)のJunkers Jumo 004ジェットエンジンがそれで低合金耐熱鋼製のタービン翼に図1に示す冷却構造を採用していた[3]。またドイツでは水冷却のタービン翼の研究も活発に実施され、Schmidt教授は図2に示す水冷却タービン翼を用いたタービン入口温度2700R(1227)のタービンの運転に成功している[3]。しかし本格的な空気冷却方式のタービン翼が航空用エンジンで実用化されるのは1960年代に入ってからである。

1960年以降空冷タービン技術の進歩とともに、航空用ガスタービンのタービン入口温度は飛躍的に上昇した。航空用ガスタービンのタービン入口温度の上昇傾向と、産業用ガスタービンのそれを合せて図

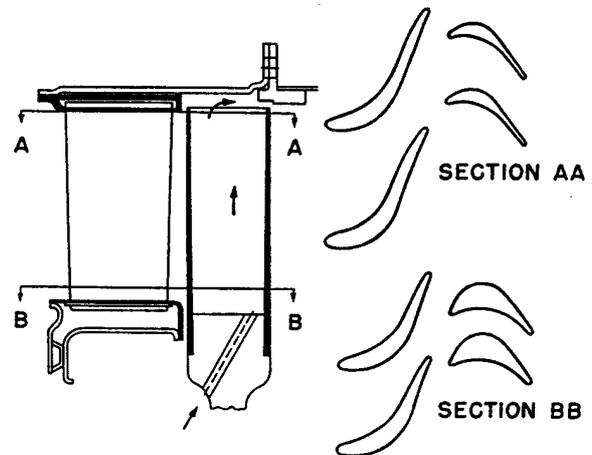


図1 Jumo 004のタービン動静翼

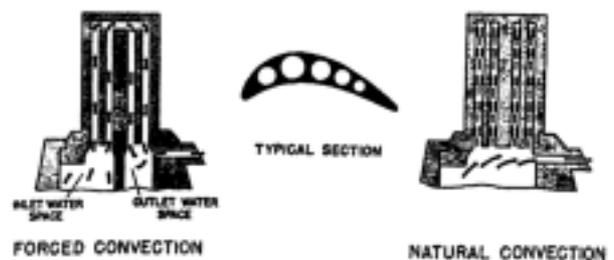


図2 水冷却タービン動翼

3に示す[4]。図3より明らかなごとく産業用ガスタービンのタービン入口温度は約25 /年の割合で上昇している。このタービン入口温度の上昇を支える技術として、材料の進歩による寄与が約10 /年であるのに対して、冷却技術の進歩によるものは約15 /年であり、冷却技術の進歩に負う所が大である。図3中の最新の産業用ガスタービンであるM501G形のタービン入口温度は1500 に達している。M501G形ガスタービンの断面図を図4に示す[5]。

現在のタービン翼に用いられる超耐熱合金の許容

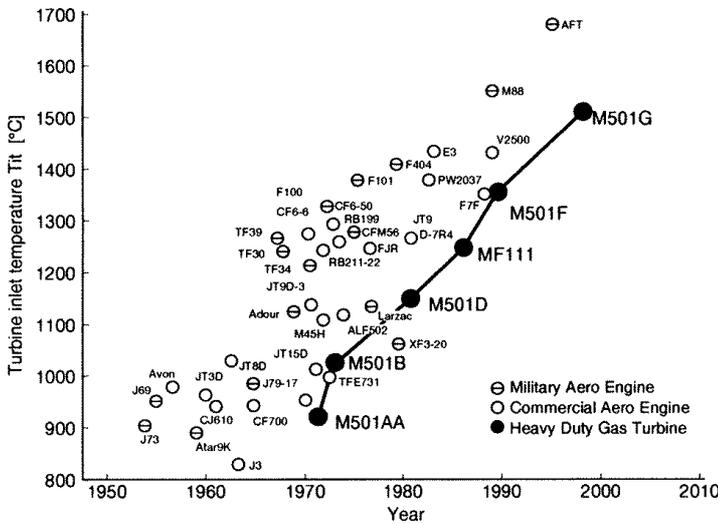


図3 産業用ガスタービンの高温化の推移

メタル温度レベル、耐酸化限界よりタービン翼のメタル温度は約900 に保つ必要がある。よってタービン入口温度の上昇に伴って冷却空気量は増加する傾向にあるが、冷却空気量の増加はガスタービンの熱効率の低下をまねくこととなる。タービン入口温度の上昇とタービン翼の冷却に必要な冷却空気量の関係および冷却空気量の増加によって低下するコンバインドサイクル効率の関係を図5に示す[6] 図5

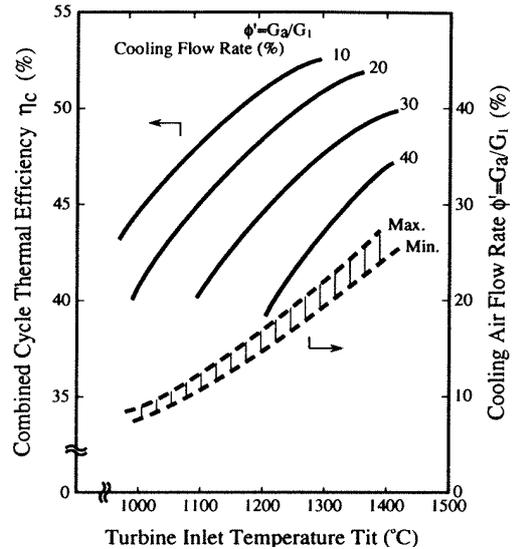


図5 タービン入口温度と必要冷却空気量およびコンバインドサイクル効率の関係

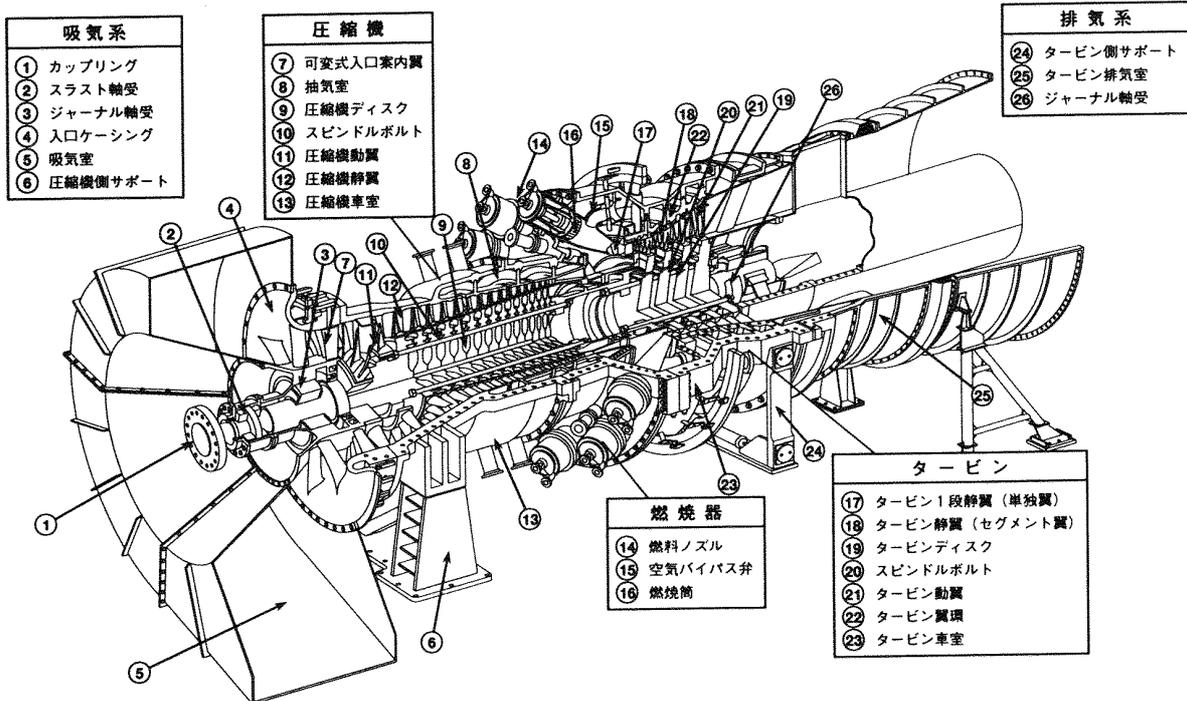


図4 M501G ガスタービン断面図

より、タービン入口温度の上昇による熱効率の改善は、冷却空気量の増加により相殺されることがわかる。よってガスタービンの高温化による性能改善を確保するためには、タービン入口温度の上昇に伴ってタービン翼の冷却にはより高性能な冷却方式を採用する必要がある。

図6に産業用ガスタービンのM501/M701シリーズに採用している第1段静翼及び第1段動翼の冷却

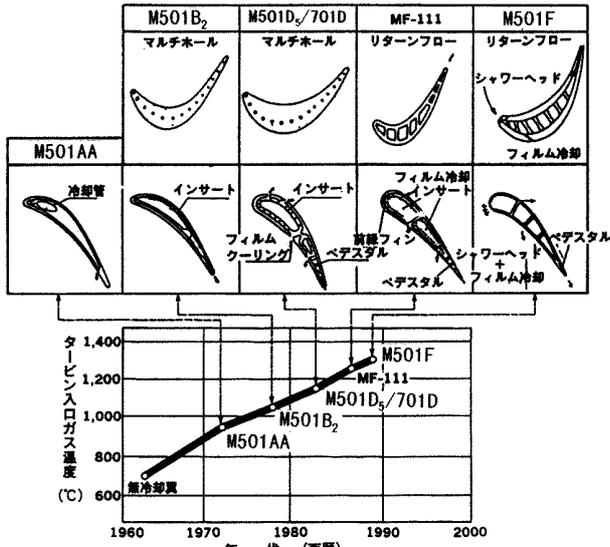


図6 産業用ガスタービン動静翼冷却構造の変遷

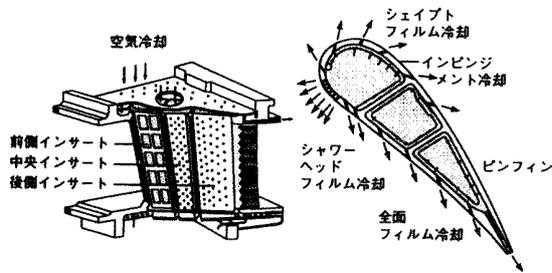


図7 Gシリーズガスタービン1段静翼冷却構造

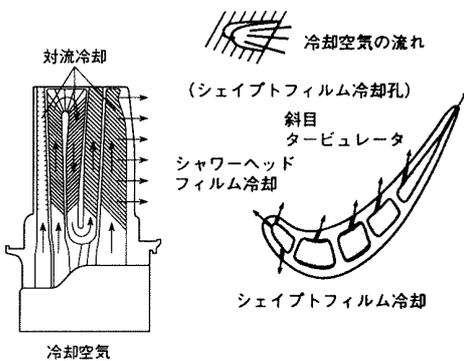


図8 Gシリーズガスタービン1段動翼冷却構造

構造の変遷を示す[7]. 高温化に対処してより高性能な冷却方式が採用されてきた状況が理解いただけよう。また図7、図8に、最新の1500級M501G形ガスタービンの第1段静動翼の冷却構造を示す[8]. M501G形ガスタービンの第1段静翼では、翼外面の静圧分布に応じてフィルム冷却空気量を精度良く制御できるように3個のインサートが採用されており、さらにフィルム冷却には、シェイプフィルム冷却孔が用いられている。また第1段動翼では、翼内面の伝熱を促進する斜目タービュレンスプロモータを冷却流路に取り付けたサーペントイン流路と、シェイプフィルム冷却が採用されている。

3. 伝熱技術の役割

最新のガスタービンに採用されている第1段静翼、第1段動翼ともに、熱応力を低減するために図7、図8に構造例を示したごとく、薄肉構造を採用している。第1段静翼の翼面の冷却構造を単純化して図9に示す[9].

図9において、実際のタービン翼では、翼壁のメタル温度は分布するが一定であると仮定すると、翼壁を通過する熱エネルギーの収支より次式が成立する。

$$q = \alpha_g (T_{aw} - T_{w1}) = \frac{l}{\lambda} (T_{w1} - T_{w2}) = \alpha_c (T_{w2} - T_c) \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここで $T_{aw} = T_g - \eta_f (T_g - T_c)$

l : 翼壁厚さ, T_{aw} : 断熱壁温度, T_c : 冷却空気温度, T_g : 主流ガス温度, T_{w1} , T_{w2} : ガス側および冷却側メタル温度, α_c : 冷却側熱伝達率, α_g : ガス側熱伝達率, λ : 翼の熱伝導率, η_f : フィルム冷却効率

$$q = K(T_{aw} - T_c) \quad \dots \dots \dots (2)$$

ここで $\frac{1}{K} = \frac{1}{\alpha} + \frac{l}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_c}$

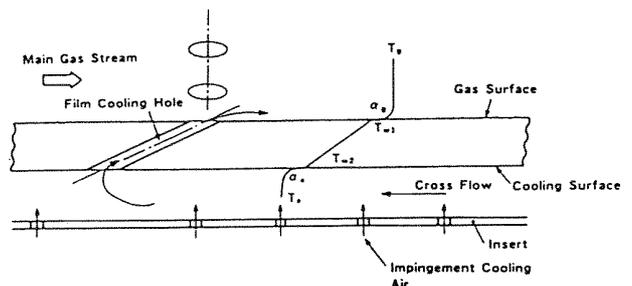


図9 モデル化した静翼の冷却構造

式(2),式(1)よりタービン壁の温度 T_{w1} が求まる。タービン翼の冷却設計では T_{w1} をタービン翼の材料許容の温度に抑え、かつ $T = T_{w1} - T_{w2}$ を小さくして熱応力を低減する必要がある。この冷却設計がうまくいかない場合、冷却不足で焼損を生じたりすることとなる。一方過冷却では性能を低下させる原因となる。煎じ詰めれば翼外面の熱伝達率 q_g , フィルム冷却空気温度 T_{aw} (または主流ガス温度 T_g)を如何に精度良く予測出来るか, またフィルム冷却効率 η_f , 冷却側の熱伝達率 q_c 等を如何に高い効率を達成するかが伝熱技術に要求されている課題と考えてよい。

3.1 翼外面熱伝達率

平均径断面におけるタービン翼外面の熱伝達率の分布の例を, 図10に示す[10]。翼外面の熱伝達率の分布は主流と翼形状に依存した複雑な分布を示す。翼前縁のよどみ点の熱伝達率は主流乱れの影響を強く受ける。Kestin等は, 流れに直交して置かれた円柱まわりの淀み点の熱伝達率としてSchmidtの実験式[11]式(3)を, 主流乱れの関数で補正する式(4)を与えている[12]。図10に示す翼外面の熱伝達率分布への影響因子としては表面曲率, 主流加速度, 主流乱れ, 流入角, 非定常流, 表面粗さ等があり, 個々の因子についての非常に多数の実験的研究がなされてきた[13-15など]。また, 最近では解析的研究が増加している[16など]。

$$Nu_D = 1.14 \left[1 + \left(\frac{\theta}{90} \right)^3 \right] Re_D^{0.5} Pr^{0.4} \dots\dots\dots (3)$$

$$Nu_D' = C \cdot Nu_D$$

$$C = 0.945 + 3.48 \left[\frac{\tau_\infty \sqrt{Re}}{100} \right] - 3.99 \left[\frac{\tau_\infty \sqrt{Re}}{100} \right]^2 \quad (4)$$

タービン第1段動翼および第2段静翼以降の翼外

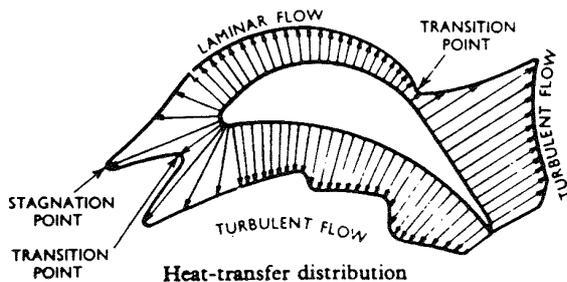


図10 翼まわりの熱伝達率分布の例

面の熱伝達率においては以上に述べた主流が定常の流れによって生じる定常熱伝達に加えて, 図11に示すごとく非定常流の影響を受ける[17]。ガスタービンの高温化に伴って翼面熱伝達率をより精度良く推定する必要が生じているために, 非定常流の翼面熱伝達に関する研究が盛んに実施されている[18-20など]。

以上は二次元の翼断面における熱伝達の問題であるが, 現実のタービンの流れは図12にその流れの概念を示す[21]非常に複雑な3次元の流れである。タービン静翼では端壁面と端壁面近傍の翼面の伝熱は図12に示される複雑な渦の影響を受ける。高温化とともに端壁面の冷却の重要性が増し多くの実験的, 解析的研究がなされている。文献[22]参照。

タービン動翼においては, 翼先端面の熱伝達率が

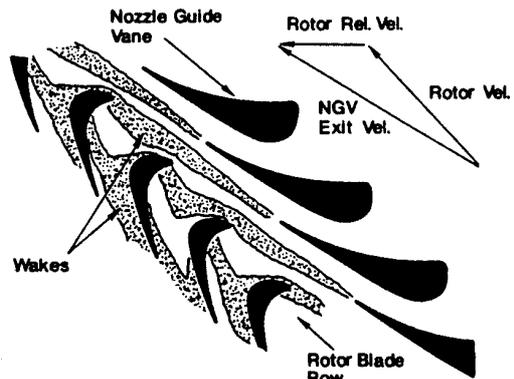


図11 非定常流の影響

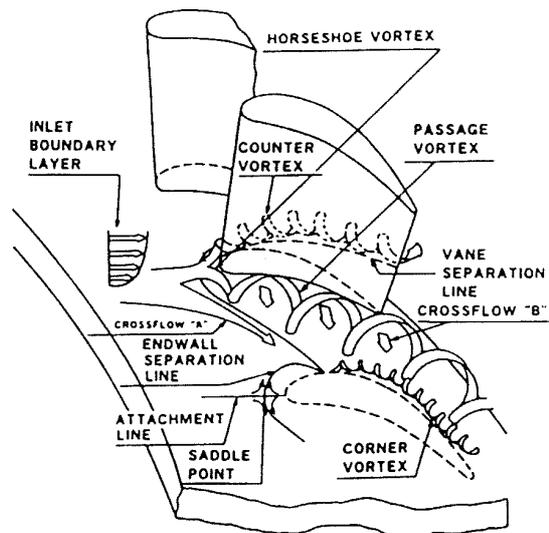


図12 端壁面上の流れの概念図

重要となるが、この部分の熱伝達は動翼の回転と翼の腹側と背側の圧力差によって生じる主流ガスのリークと端壁流れの影響し合った複雑な流れに依存している [23]。

3.2 フィルム冷却技術

図7, 図8に示したごとく, 最新のガスタービンに用いられるタービン動静翼には, 冷却空気を翼面にあけられた穴から吹き出し, この吹き出した空気が高温ガスと翼壁の間に冷却膜を形成し遮熱する冷却方式, いわゆるフィルム冷却が採用されている。フィルム冷却はその目的から考えて冷却空気と主流を出来るだけ混合させず, 翼面上の長い距離にわ

たってその効果が得られる形状・配置が求められて来たが, 従来は実験的に現象の把握と最適化がなされてきた。図13に示すごとく, フィルム冷却の性能に影響するパラメータはフィルム冷却孔の幾何学的形状, フィルム空気の物性, 吹き出し量, 翼面上の位置, 主流の状態等々と非常に多くあるため, 翼面にフィルム冷却を適用する場合実に多くのパラメータとして考慮する必要がある。これらのフィルム冷却に関する一連の研究については文献 [24, 25] にまとめられている。最近ではフィルム冷却効率の向上を目指した多くの研究が報告されている。古くはGoldstein等 [26] が提案したアイデアであるが, 最近のフィルム冷却孔の加工技術の進歩に伴って航空用, 産業用のタービンに採用されている。Takeishi等 [27] は, 図13に示すフィルム冷却孔の形状を用いることによってフィルム冷却効率を約2倍に出来ることを明らかにした。図14に従来の円孔列から吹き出した場合と, 図13に示すシェイプトフィルム冷却孔のフィルムジェットの間隔分布を示す。図14より円孔からの吹き出しの場合, フィルムジェットは主流に貫通し, 主流がフィルム空気と壁の間に流入しフィルム冷却効率を下げているのに対して, シェイプトフィルム孔の場合フィルム冷却空気が壁に密着し, かつ横方向に広がり, 高いフィルム冷却効率を達成していることがわかる。同様の実験的研究でフィルム冷却の高性能化を目指した研究が多数報告されている [28-30 など]。最近では, フィルム冷却効率の向上に数値解析が適用される例が増加して来ている [31, 32 など]。

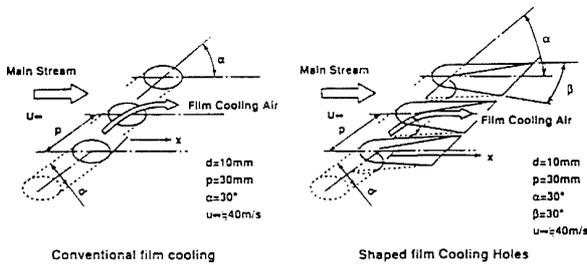


図13 従来のフィルム冷却孔とシェイプトフィルム孔の形状比較

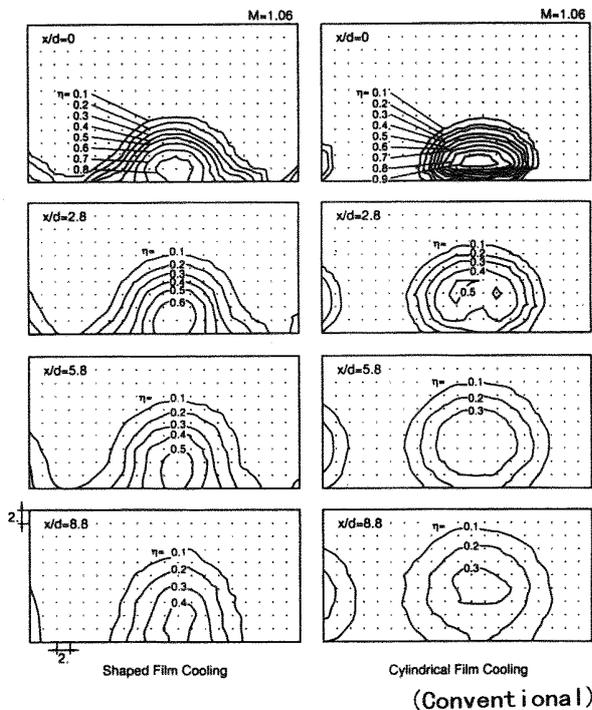


図14 フィルム冷却孔下流のフィルムジェットの空間温度分布

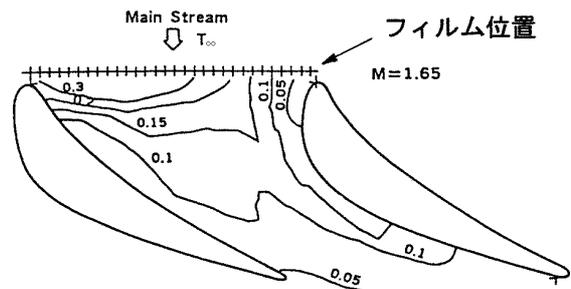


図15 端壁面上のフィルム冷却効率分布

であり、端壁面の翼前縁付近でフィルム冷却を行っても、翼腹側から背側に向かう二次流れと通過渦の影響で翼背側に吹き寄せられることが図15より明らかである[21]。翼面と端壁面の熱伝達率とフィルム冷却については文献[33]にまとめられている。

さらに、タービン動翼面上のフィルム冷却には、動翼の回転効果と静翼のウェークの影響を受ける。Dring等[24]は、大型の低速回転タービンを用いて、タービン動翼面上のフィルム冷却効率を測定した。その計測例を図16に示す。またTakeishi等[35]は、実機と相似な条件で運転された空気タービン試験でフィルム冷却効率を炭酸ガスをトレーサとした熱物質伝達アナロジーを用いて測定した。これらの結果、

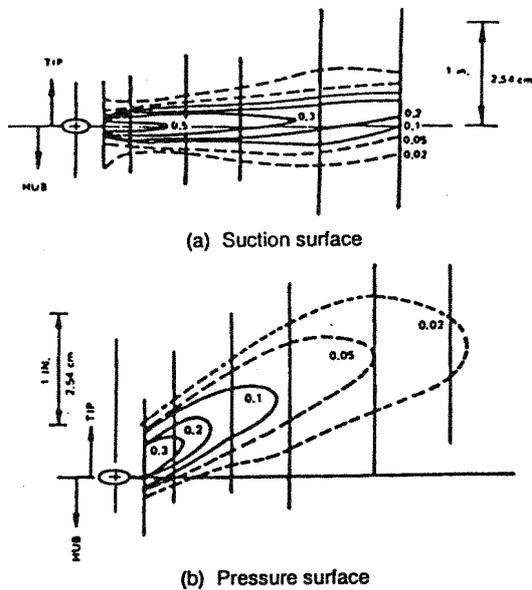


図16 低速回転タービン試験におけるタービン動翼面上のフィルム冷却効率分布

翼の背側は、平板のフィルム冷却に近い値であるが、腹側は静止翼列のフィルム冷却効率よりも減衰が激しいことが明らかになった。

3.3 インピンジメント冷却

インピンジメント冷却は、冷却空気をノズルから噴流で吹き出して、冷却面に空気を衝突させることによって冷却する手法である。衝突噴流のよどみ点熱伝達率が非常に高いことを利用して、図7に示した静翼の背腹部の内面の冷却に用いられるとともに、翼前縁の内面冷却にも用いられている。

翼前縁を内面から冷却する場合、凹面の衝突噴流による熱伝達率特性を調べる必要があるが、Chupp

等[36]は、図17に示す単純形状を基にした伝熱実験を実施し、よどみ点の熱伝達率、 $0 \sim 90^\circ$ 間の平均熱伝達率におよぼす形状パラメータの効果を明らかにした。

また、Kercher等[37]は、タービン翼の背腹部に用いられている多孔のノズルからの衝突噴流による各列の熱伝達率特性を図18に示す形状を基とした平均熱伝達率が測定できる伝熱模型により調べた。特に上流側の冷却空気が下流側の衝突噴流に横風として作用し、衝突面における熱伝達率を低下させる効果を明らかにした。これら内面冷却の熱伝達率評価式については、文献[38]にまとまっているので参照されたい。

タービン動翼にインピンジメント冷却を用いる場合、インサートの振動の問題があるために用いられる例は少なかったが、最近では、精密鋳造でノズルと翼を一体で製作する方法で翼前縁を衝突噴流で内面から冷却するタービン動翼が使用されている。回転している場での前縁を衝突噴流で冷却する場合の伝熱特性が調べられている[39]。これらの実験結果によれば、衝突噴流のよどみ点熱伝達率は回転の効果によって20～25%低下するという事実が明らかになっている。

図9にタービン静翼の壁面構造を模式的に描いているが、最近では内部のインサートと外面の壁を一体で精密鋳造で製作する方法が開発されていて、

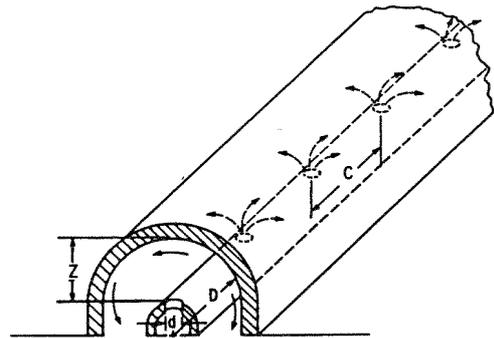


図17 前縁の衝突噴流冷却の模式図

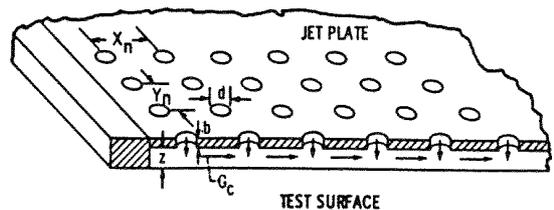


図18 平板面の衝突噴流冷却の模式図

タービン翼はCASTCOOLの名称で呼ばれている[40]。このような一体型の精密鋳造法で製作される衝突噴流とフィルム冷却孔の組み合わせた詳細な伝熱特性が実験的に調べられている[41]。図19に示した精密鋳造製の冷却特性が、インピンジメント冷却孔の配置を模擬した伝熱模型を用いて調べられている。詳細な衝突面における熱伝達率の分布を図20に示す。局所のメタル温度推定あるいは、メタル温

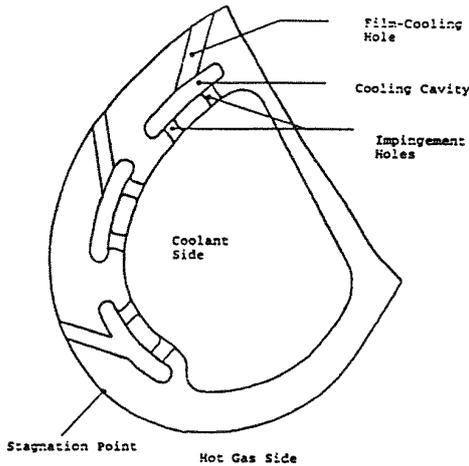


図19 精密鋳造製の冷却構造

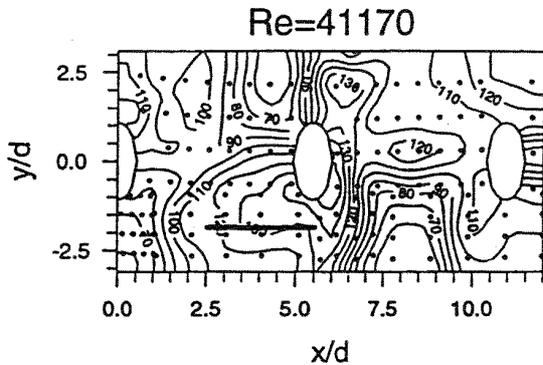


図20 衝突面における詳細な局所熱伝達率分布

度の均一化に必要な一つの伝熱研究の動向と考えられる。

3.4 タービュレンスプロモータによる冷却

図8に最新の産業用M501G型ガスタービンの第1段動翼の冷却構造を示した。翼の内面の通路には精密鋳造技術で製作された小さなリブが取り付けられていて、内面からの冷却を強化している。このリブの伝熱的な役割を模式的に図21に示す。図21に示すごとく高さeのリブはピッチPで規則的に並べられている。高さeは、有効伝熱面積を増加させて

伝熱量を増す目的ではなくて、リブ上面ではく離れた流れが、再付着する部分で非常に熱伝達率が高くなることを利用している。リブを持つ構造はタービュレンスプロモータ(又はタービュレータ)と呼ばれている。タービュレンスプロモータの伝熱促進のメカニズムから90°リブでは再付着が関与することから、高さe、ピッチPのパラメータが影響することが予想される。P/e=10付近で熱伝達率が最大になることが実験的に明らかになっている。さらに熱伝達率を増加させる方法として、図21中に示した傾斜リブあるいはV型リブが有効である。これらは、主流全体に旋回流を与えたり、強い剪断流を発生させて、伝熱促進をはかるものである。

図22にKawaike等[42]によって実験的に調べられた種々形状のタービュレンスプロモータ付き流路の伝熱特性を示す。一般的に滑らかな管に比べて熱伝達率は、90°リブ付き管で約2倍に増加し、傾斜リブ付き管は90°リブ付き管よりもさらに20~30%増加する。V型スタガードリブは傾斜リブ付き管よりさらに高い熱伝達率を得ることが出来るが圧力損失係数もほぼ熱伝達率の増加割合の二乗に比例し

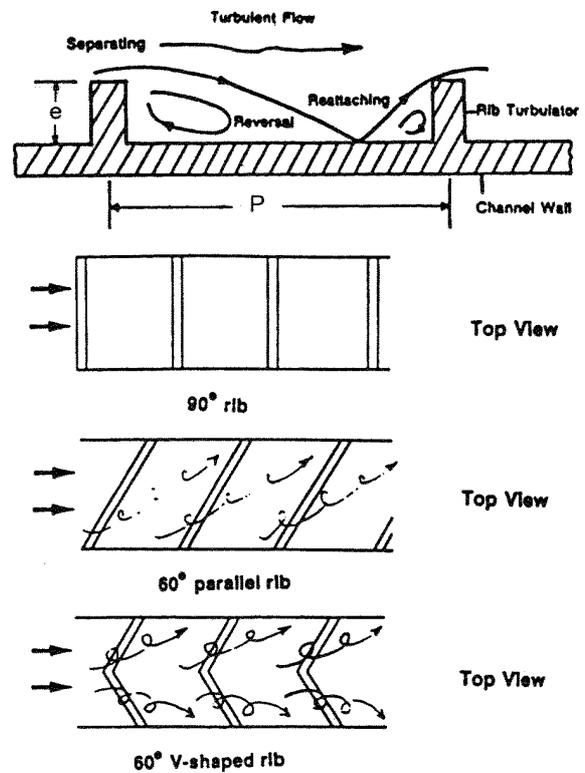


図21 タービュレンスプロモータ

て増加する。圧力損失の増加を押さえて熱伝達率の高いタービュレンスプロモータの開発が重要であるが、タービュレンスプロモータの伝熱メカニズムに踏み込んだ研究が必要である。その一例として、スリット付き傾斜リブの可視化実験から推定した流れの構造模式図を図23に示す[43]。図23に示すようにスリット付き傾斜リブでは、リブのエッジより発生した縦渦が伝熱促進に寄与していると考えられている。

今までに述べたタービュレンスプロモータの伝熱特性は静止系での話しである。実機のタービン動翼は回転しているために、流体には遠心力、コリオリス力が作用し、これによって生じる二次流れが生じるため、この流れがタービュレンスプロモータ付き流路の熱伝達特性に影響を与える。近年、実機条件のリブ付きサーペインティン流路の伝熱特性の研究

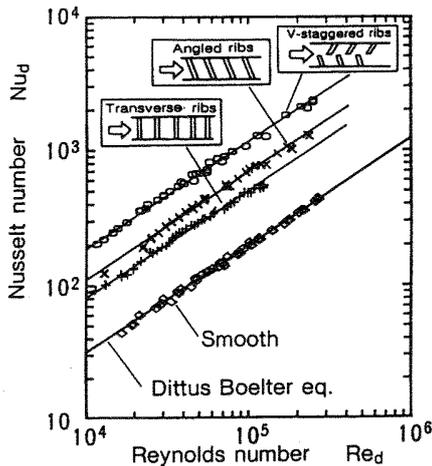


図22 種々のタービュレンスプロモータ付き流路の伝熱特性

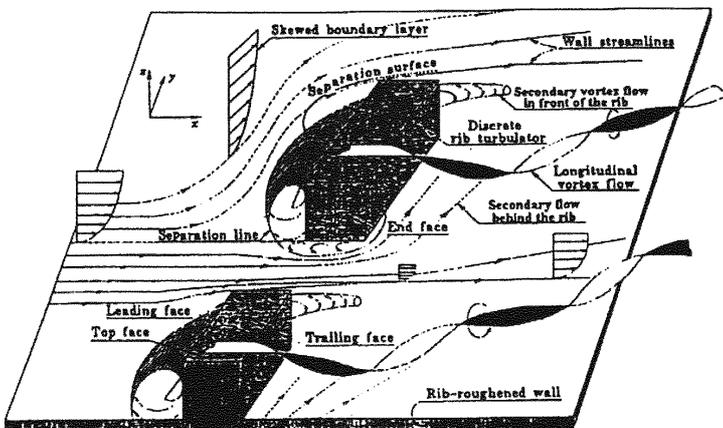


図23 スリット付き傾斜リブの壁近傍の流れの構造模式図

が盛んに行われている[44]。実機のタービン翼では図24に示すごとく、リブ付き面と回転軸とがかならずしも平行でない場合がある。Parsons等は、図24に

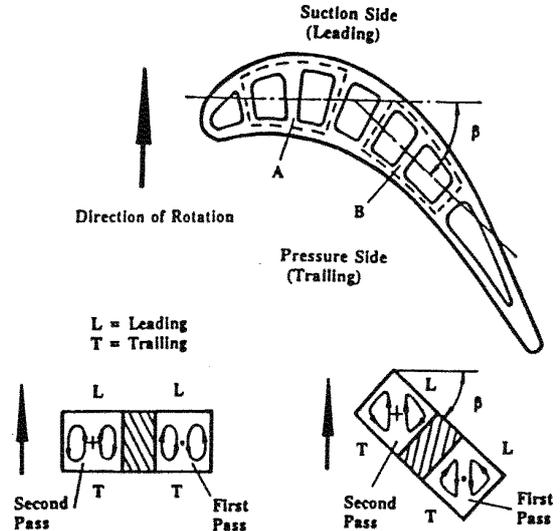


図24 タービン動翼の回転により生じる二次流れの状況

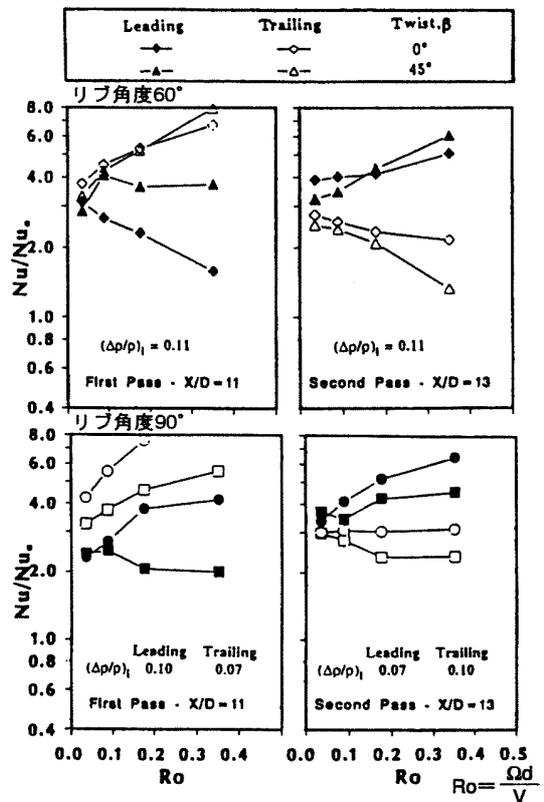


図25 リブ付き流路の伝熱特性(対滑らかな発達した管のヌセルト数比)リブ角度60°(上)とリブ角度90°(下)の場合

示したリブ付きサーペントイン流路の伝熱特性に着目し、実験的研究を実施し、図25に示す結果を得ている[45]。ローテーション数 R_0 の増加に伴って、熱伝達率への二次流れの効果が顕著に表れている。また、回転軸との角度の効果もリブの傾斜角によって異なることがわかる。

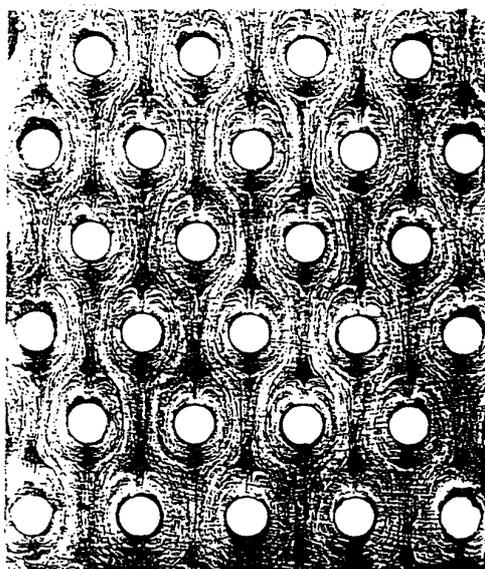
3.5 ピンフィンによる冷却

図7、図8に示すごとく、タービン翼の後縁にはピンフィン冷却が採用されている。タービン静翼では、後縁部分にはインサートを用いたインピンジメ

ント冷却を用いることが出来ず、また動翼では十分な半径方向の流路面積が確保出来ない部分であるためにピンフィンが採用されている。タービンの後縁に採用する低アスペクト比のピンフィンでは、流路にピンフィンを用いることによって、かえって伝熱面積が減少することがあるが、ピンフィン前面の高いよどみ点熱伝達率を利用出来る、あるいは円柱の後縁から生じる渦が次列のピンフィン回りの伝熱促進を行なうなどの効果によって高い熱伝達率を達成することが出来る。

一般に千鳥配列は正方配列に比べて熱伝達率が高い。千鳥配列におけるピンフィン流路の流れを可視化した写真を図26に示す[46]。図26より千鳥配列において、ピン後流によって生じた乱れがピンの回りに一様に分布していることから千鳥配置が高い熱伝達率を達成していることがわかる。

ピンフィンの伝熱特性を調べた多くの実験的研究があるが、Armstrong等[47]は、過去の多くの実験結果をまとめ、熱伝達率、圧力損失の評価式を整理している。局所(列数ごと)熱伝達率に関してMetzger等の実験結果を図27に示す[48]。図27に示すごとく、第1、2列のピンフィン列に関しては、乱流強度が低いために平均値よりも低い熱伝達率を示している。ピンフィン冷却の伝熱特性の向上に関しては、傾斜ピン、楕円等の非円柱ピンフィンなどが研究されている。Metzger等[49]は、ピンフィンの高さの15%のリブを、両側の壁面に付けることによって熱伝達率を35%増加させる結果を得ている。ピンフィンとリブを組み合わせ伝熱を促進して熱伝達特性をさらに向上させる工夫がなされている。



Fluid flow pattern for a staggered array

図26 ピンフィンの流れの可視化

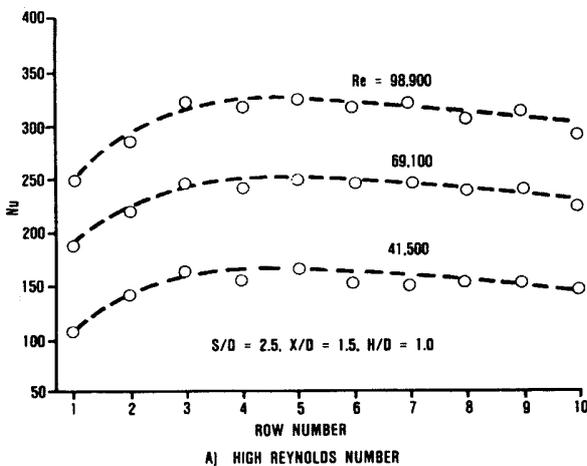


図27 ピンフィンの列ごとの伝熱特性

4. 新しい冷却技術

コンバインドプラントの特徴を生かした冷却方式として、排ガスボイラで生成した蒸気を用いてタービン翼、燃焼器壁等を冷却する方法が次世代の産業用ガスタービンとして脚光を浴びている[50]。このような蒸気冷却タービン翼としては圧力損失の少ない、熱応力を低減した冷却構造を開発する必要がある[51]。さらに、冷媒として冷却能力に秀れた水を用いた水冷却翼の研究も1700級のガスタービンを目指して再び研究される情勢にあるが、水冷却タービン翼は、1970年代石炭ガス化ガスタービンのプロジェクトとしてデポジットの付着しない、かつ熱応力に耐えるタービン翼を目指して進められたが、静

翼では、翼材に採用した銅合金材の内部流路のエロージョン問題から、一方動翼では振動問題で実用化しなかった経緯がある。水冷却ガスタービンの技術動向については、文献 [52] にまとめられている。

最近タービン動翼内で蒸発させて冷却する新しいコンセプトが Kerrebrock 等 [53] によって提案されている。その冷却システムを図 28 に示す。これは一種のヒートパイプである。Yoshida 等 [54] はヒートパイプを高圧タービンのタービン翼の冷却に用いて、バイパスファンの空気でヒートパイプの蒸気を凝縮させる図 29 のシステムを提案している。また、

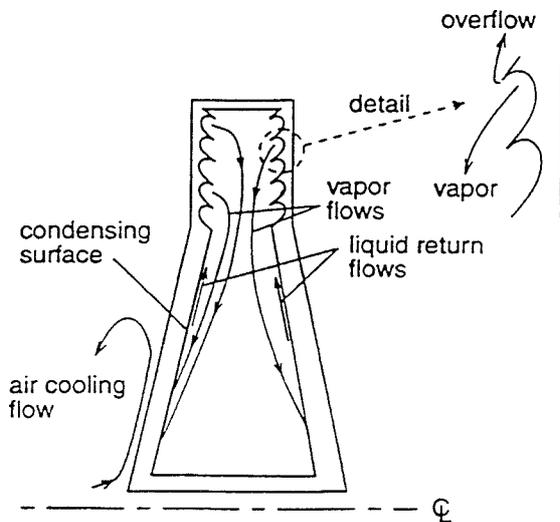


図 28 蒸発冷却でタービン翼を冷却するシステムの概念

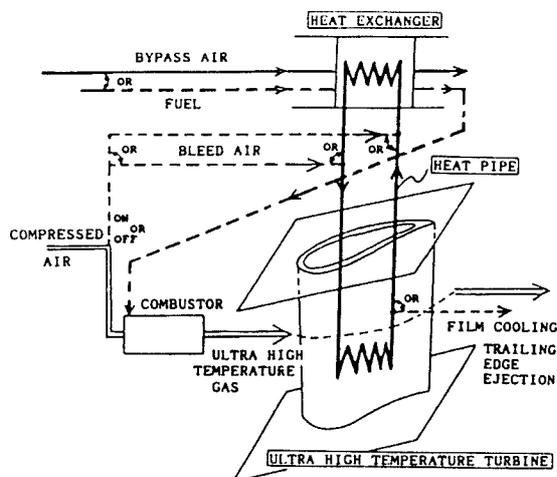


図 29 高圧タービン翼をヒートパイプで冷却する概念図

吉川等はミスト冷却をタービン翼冷却に用いる基礎研究を行っている。以上に述べた圧縮空気以外の冷媒を用いた冷却手法、あるいはヒートパイプ利用等は新しい概念であるが、タービン翼等の冷却すべき部材の伝熱技術はもちろんのこと、冷却システムとして最適化をはかっていく必要がある。

一方タービン翼の加工法の進歩により精密鋳造で製作されるよりも複雑な流路を形成できる方法が開

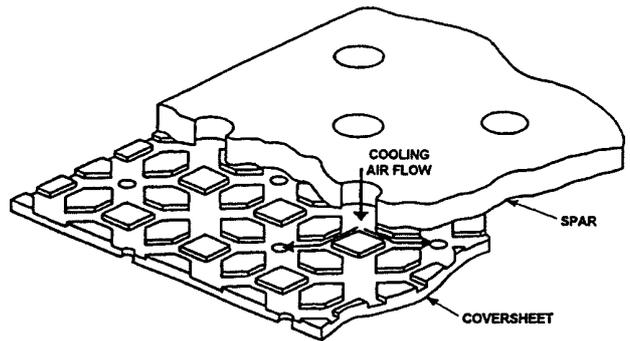


図 30 積層壁冷却構造

発されている。そのひとつに前述したCASTCOOLがある。積層状に拡散接合された図 30 に示す構造でタービン翼あるいは燃焼器の壁を冷却するものである [55]。我が国においても吉田等の積層タービン翼の先駆的研究がある [56]。マイクロチャンネルの伝熱研究の成果がこの分野でも必要になる時代がくると予想される。

5. あとがき

産業用および航空用ガスタービンのタービン翼に採用されているタービン翼の冷却技術を中心に、開発当初の研究から現在実用化されている技術、さらに最新の研究開発状況を紹介した。現在までの、ガスタービンの高温化への冷却技術の寄与は、非常に大きいものであった。今後は、本解説のインピンジメント冷却のところで紹介したように、ガスタービンの高性能化のために、より詳細な熱伝達率の把握とマイクロ伝熱を含む局所の熱伝達率の把握と制御に向かうであろう。これらを達成する手法としては、従来からの実験的手法に加えて、伝熱流動の数値解析的手法の役割が増加すると考えられる。本解説がこれからガスタービンに関連した伝熱の問題を研究しようとする方々にとって少しでも役に立てば著者の望外の幸せである。

参考文献

- [1] Wilson, D.G., The MIT Press, 1984.
- [2] Aoki, S. et. al., ASME Power Gen. 98 Conference 1998.
- [3] Silverstein, A., J. of the Aeronautical Sciences, 16, pp.197-222, 1949.
- [4] 日本ガスタービン学会調査研究委員会成果報告書 1997.
- [5] 塚越, 秋田, 西田, 日本ガスタービン学会誌, 25, pp.2-7, 1998.
- [6] 福江, 日本ガスタービン学会セミナー, 第11回資料, pp.3.1 - 3.9, 1983.
- [7] Amagasa, S. et. al., J. of Eng. for Gas Turbine and Power, Vol.116, pp.597-604, 1994.
- [8] 岩崎, JSME第73期通常総会講演会資料集(V), pp.452 - 454, 1996.
- [9] 青木, JSME P-SC214, pp.6-10, 1995.
- [10] Wilson, D.G., et. al., Proc. Inst. Mech. Engrs, 168, pp.861-876, 1954.
- [11] Schmidt, E., et. al., Forschung, 12, pp.65, 1941.
- [12] Kestin, J. et. al., J. of Heat Transfer, 93, pp.321-327, 1971.
- [13] Mayle, R.E., et. al., J. of Heat Transfer, 101, pp.521-525, 1979.
- [14] Brown, A. et. al., J. of Eng. for Power, 100, pp.159-168, 1978.
- [15] Hippensteele, S. A., et. al, NASA TM 87355, 1987.
- [16] Biswas, D., et. al., ASME Paper 93-GT-73, 1973.
- [17] Scrivener, C.T., 日本ガスタービン学会誌18-70, pp. 11-16, 1990.
- [18] Abhari, R.S., et. al., ASME Paper 91-GT-268, 1991.
- [19] Rao, K. V. et. al. AIAA, J. of Propulsion and Power, 10, pp.312-317, 1994.
- [20] Blair, M.F., et. al., ASME Paper 88-GT-5, 1988.
- [21] Takeishi, K., et. al. J. of Turbomachinery, 112, pp.488-496, 1990.
- [22] 武石, 伝熱, 38, pp.10-19, 1999.
- [23] Farokhi, S., AIAA, J. of Propulsion and Power, Vol.4, No.5, pp.452-457, 1988.
- [24] Goldstein, R.J., Advanced in Heat Transfer, Vol.7, Academic Press, pp.321-379, 1971.
- [25] 武石, 日本ガスタービン学会誌, 20-80, pp.18-25, 1993.
- [26] Goldstein, R.J., et. al., Int. J. Heat Mass Transfer, Vol.17, pp.595-607, 1974.
- [27] Takeishi, K., Int. Symposium on Heat Transfer in Turbomachinery, Athens, Greece 1992.
- [28] Gritsch, M., et. al., J. of Turbomachinery 120, pp.549-556, 1998.
- [29] Makki, Y.H., et. al., AIAA Paper, AIAA-86-1326, 1986.
- [30] Thole, K.A., et. al., J. of Turbomachinery, 120, pp. 327-336 1998.
- [31] Walters, D. K., et. al., J. of Turbomachinery 119, pp. 777-785, 1997.
- [32] Hyams D.G., et. al., ASME paper 96-GT-187, 1996.
- [33] Simoneau, R.J., et. al., Int. J. Heat and Fluid Flow, Vol.14, pp. 106-128, 1993.
- [34] Dring, R.P., et. al., J. of Eng. for Power, Vol.102, pp. 81-87, 1998.
- [35] Takeishi, K., et. al., J. of Turbomachinery, Vol.114, pp.824-834, 1992.
- [36] Chupp, R.E., et. al., J. of Aircraft Vol.6, pp. 203-208, 1969.
- [37] Kercher, D.M., et. al., J. of Eng. For Power, Vol.92, pp. 73-82, 1970.
- [38] Yeh, F.C. et. al., NASA Paper TP-2232, 1984.
- [39] Persons, J. E., ASME paper 96-GT-387, 1996.
- [40] Broomfield, R.W., et. al., ASME Paper 97-GT-117, 1997.
- [41] Gillespie, D.R.H., et. al., ASME Paper 96-GT-200, 1996.
- [42] Kawaike, K., et. al., 95-YOKOHAMA-IGTC-36, Vol.2, pp.247-256, 1995.
- [43] Hu, Z., et. al., ASME Paper 96-GT-313, 1996.
- [44] Wagner, J.H., et. al., J. of Turbomachinery, Vol.114, pp.847-857, 1992.
- [45] Parsons, J.A., et. al., Int. J. of Heat and Mass Transfer, Vol.38, No.7, pp.1151-1159, 1995.
- [46] Sparrow, E.M. et. al., Int. J. of heat and mass transfer, Vol.25, pp.449-456, 1982.
- [47] Armstrong, J. et. al., J. of Turbomachinery, Vol.94, pp.94-103, 1988.
- [48] Metzger, D.E., et. al., ASME Paper 86-GT-132, 1986.
- [49] Metzger, D. E., et. al., Proceedings of ASME-JSME Thermal Engineering Joint Conference, Vol.1, pp.429-436, 1983.
- [50] Corman, J.C., 95-Yokohama-IGTC-143, 1995.
- [51] 福田他, JSME, 第5回動力・エネルギー技術シンポジウム'96講演論文集, pp. 28-33, 1996.
- [52] 深田他, 電力中央研究所報告 282027, 1982.
- [53] Kerrebrock, J.L., et. al., ASME Paper 98-GT-177, 1998.
- [54] Yoshida, T., et. al., Proceedings, 11th ISABE, pp.749-

300kW級セラミックガスタービンCGT302の開発研究

R&D of 300 kW class Ceramic Gas Turbine CGT302

巽 哲男 (川崎重工業株)

Tetsuo Tatsumi (Kawasaki Heavy Industries Ltd.)

1. 概要

現在、我々人類が日常活動を営んでいくためには相当量のエネルギー消費が必要で、中でも内燃機関用に消費されるエネルギーは、輸送機器用、機械駆動用、発電用などその利用範囲が広範にわたるため、環境への影響が大きい。ガスタービンは、航空機用ジェットエンジンや発電用、機械駆動用等に広く用いられている内燃機関である。その一角を占める産業用小型ガスタービンは、小型軽量、低公害、低振動、低騒音等、優れた特性を持っているが、現在のところその用途は非常用発電機駆動等の限定された分野に限られている。その主な理由は、ガスタービンの熱効率が特に小型機において低いためである。

本技術開発は低公害原動機として優れた特性を持つガスタービンに対し、中小型エンジンの高効率化、低公害化および燃料多様化を促進することを目的に、ムーンライト計画（現ニューサンシャイン計画）の一環として昭和63年度から開始された。この研究開発の中で、川崎重工業(株)は京セラ(株)、住友精密工業(株)と共に300kW級「コージェネレーション用再生式2軸セラミックガスタービン」(略称、CGT302)の研究開発を担当した。

本プロジェクトの開発目標は非常に高く、解決すべき種々の問題に遭遇したが一歩ずつ乗り越えて、最終年度に当たる平成10年度末に42.1%の熱効率や極めて良好なNOx排出特性等、画期的な成果をあげ、当初の目標を達成することが出来た。同時に、セラミック部材の信頼性・実用性検証のため1,200時間の長時間運転も実施した。

本稿では、CGT302の開発についてガスタービンエンジンを主体に紹介する。

2. なぜセラミックスを使うのか？

内燃機関は一般にそのサイクル最高温度を高くするほど高い熱効率が得られるが、特にガスタービンにおいては主に耐熱材料の進歩や冷却技術の改良によって高いタービン入口温度を実現することで熱効

率の向上が図られてきた。

航空機用および事業用大型ガスタービンにおいては、タービン翼に洗練された冷却構造を採用することで翼の温度を下げ、耐熱材料の本来の使用限界温度を超える高いタービン入口温度を実現し、熱効率の向上が図られている。一方、小型ガスタービンではその寸法の小ささ故に、冷却翼の製作が困難なため、その熱効率は比較的低いレベルに留まっている。また、タービン翼をはじめとする高温部品の冷却用空気はタービン入口温度上昇に寄与する一方で損失の要因ともなり、さらには燃焼用空気が減少して排気ガス中のNOx増大につながるため、その使用割合には限界がある。

セラミックガスタービンは、耐熱性に優れたセラミックスを高温部材に適用することで高いタービン入口温度を無冷却で実現し、さらに冷却空気に起因する損失をも低減して、小型ガスタービンの熱効率を画期的に改善しようとするものである。

3. 研究開発目標

開発目標を表1に示す。目標とする熱効率42%は、ガスエンジンあるいはディーゼルエンジンのそれにも匹敵する非常に意欲的な値である。

表1 開発目標

	開発目標
熱効率	42 %
タービン入口温度	1350
出力	300 kW 級
排気ガス特性	法令基準値以下

4. 研究開発体制

研究開発体制を図1に示す。川崎重工業、京セラ、住友精密工業は、それぞれガスタービンの設計・試作・運転、耐熱セラミック部材、熱交換器を担当した。

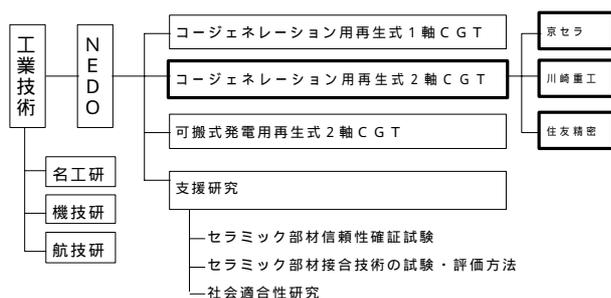


図 1 研究開発体制

5. 研究開発スケジュール

研究開発スケジュールを表 2 に示す。

表 2 C G T 開発スケジュール

	S63	H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7	H8	H9	H10
耐熱セラミック部材の研究開発				耐熱セラミック部材および部品化技術の研究							
要素技術の研究開発			要素技術の研究および要素機器の試作研究								
設計試作運転研究						中	中				
1. 基本設計		基本設計				間	間				
2. 第1次設計試作運転研究		基本型GT(900)				評	評				
3. 第2次設計試作運転研究 (中間評価)			基本型CGT(1200)			価	価				
4. 第3次設計試作運転研究								パイロットCGT(1350)			

開発は、以下に示す段階を踏んで進められた。

- 基本設計：(Ceramic GT)
- 第1次試作：基本型GT (900 金属GT) (基本設計のセラミック部品を金属部品に置き換え)
- 第2次試作：基本型CGT (1200 CGT) (高温金属部品をセラミックに置き換え。当時部品化が可能であった材料を使用)
- 第3次試作：パイロットCGT (1350 CGT) (高性能セラミック材料の適用)

これら各段階のエンジンの基本設計は同一で、目標最高温度に応じて高温部に使用する材料が異なるのみであり、基本型GTと基本型CGTはパイロットCGTの部分負荷運転状態に相当する。なお、使用したセラミック材料はいずれも窒化ケイ素 Si₃N₄ である。

6. ガスタービンサイクル諸元の検討

ガスタービンは一般にタービン入口温度(TIT)が高いほど熱効率が高くなるが、単にタービン入口温度を高くするのみでは排気として放出されるエネルギーも増加し、期待されたほどの効果は得られない。この対策として圧力比の増大や排気の再生等が考えられるが、本機では小型ガスタービン用に適した再生サイクルを採用した。また、本機は出力タービン

が圧縮機駆動タービンと分離された2軸フリータービン式を採用している。2軸フリータービン式ガスタービンは、1軸式ガスタービンに比べて部分負荷状態における熱効率の低下が少ない特長を有している。

熱効率に影響する因子としては、TIT の他にも圧縮機やタービンなどの各要素効率、サイクル圧力比、再生熱交換器の温度効率等がある。設計の第一段階として、目標の熱効率を達成するために必要なこれらの因子の組合せを注意深く検討した。検討結果の一例を図 2 に示す。

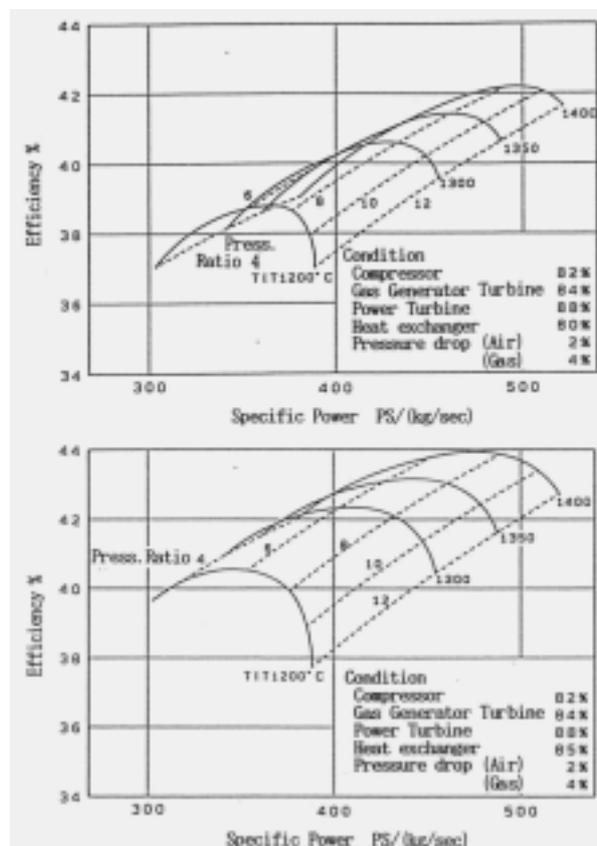


図 2 サイクル諸元の検討例

TIT と熱交換器温度効率の組合せによって、熱効率を最高にする最適圧力比が変わることが判る。一方、金属製熱交換器を使用する場合は、その入口ガス温度に制約があるが、これは主に TIT と圧力比の組合せで決まる。また、TIT は使用するセラミック材料の耐熱性や高温強度を考慮して決める必要がある。これらの検討の結果、TIT を 1350、圧力比を 8、熱交換器温度効率を 82% に決定した。圧力比が従来の自動車用CGT等に採用されて来たものよりも高いため、排気ガス温度が低くなり金属製熱交換

器を用いることができた。

各要素毎に設定した目標効率を、圧縮機、ガスジェネレータータービン、パワータービンに対し、それぞれ 82%、84%、88% である。

7. 候補セラミック材料とその特徴

窒化ケイ素に代表されるセラミックスの基本的な特性と、ガスタービンへの適用に当たって設計上留意すべき事項をまとめると表 3 のようになる。これらの特徴を勘案して、最適な設計仕様を定めることが必要となる。

表 3 セラミックスの基本的特性と設計上の留意事項

	基本的特性	設計上の留意事項
長	・高温での強度劣化が少ない ・耐酸化性に優れる	・高温部品に適する ・冷却の必要が無い
	・高温での比強度が大きい	・高速回転体に適する
所	・耐摩耗性に優れる	・高温高速ガス中の部品(ノズルブレード等)に適する
	・膨張係数が小さい	・隙間の変化が少ないのでタービン等のチップクリアランスを狭くする事が出来る。
短	・もろい	・応力集中や衝撃荷重を避ける設計が必要
	・強度のばらつきが大きい ・高強度材は開発途上であり設計データが少ない	・設計基準が定めにくい ・設計、加工、検査に特別な配慮が必要
	・金属との熱膨張率の差が大きい上に変形能が小さい	・接合、締結、組立に特別な工夫が必要

8. 基本設計方針

CGT302 の設計に当たっては、「セラミックス適用開発課題を最小限にして、セラミックスを上手く使いこなすことに傾注する」ことを基本方針とし、これに沿って、以下の選択を行った。

- ・ガスタービンの基本構造に実績のある形式を採用する。
- ・熱交換器には、自動車用等で採用されて来たセラミック製回転蓄熱式ではなく、金属製プレートフィン型を採用する。
- ・ガスタービンをモジュール構造とし、改良のため頻繁な分解組立が予想される運転試験の能率確保を図る。

9. CGT302 の構造

CGT302 は 単段遠心式圧縮機、単筒型燃焼器、単段軸流式ガスジェネレーターおよびパワータービン、金属製プレートフィン型熱交換器等で構成される。構造を図 3 に示す。

本機では、燃焼器をはじめとするすべての高温部材をセラミック化している。セラミック適用部品を図 4 に示す。

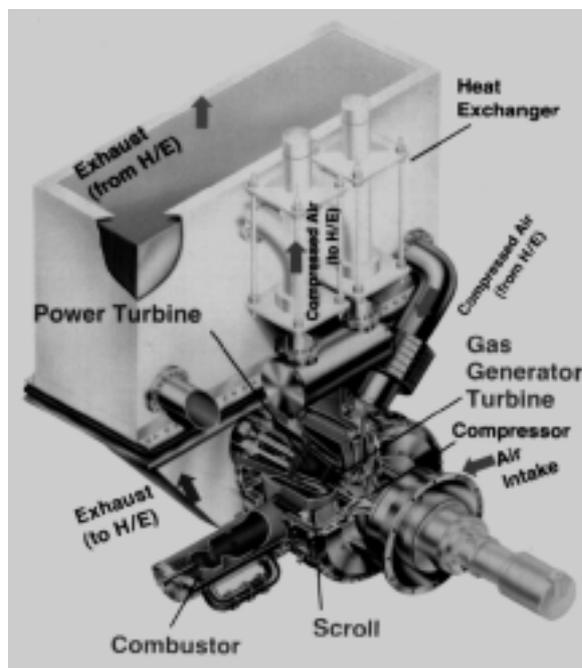


図 3 CGT302 の構造

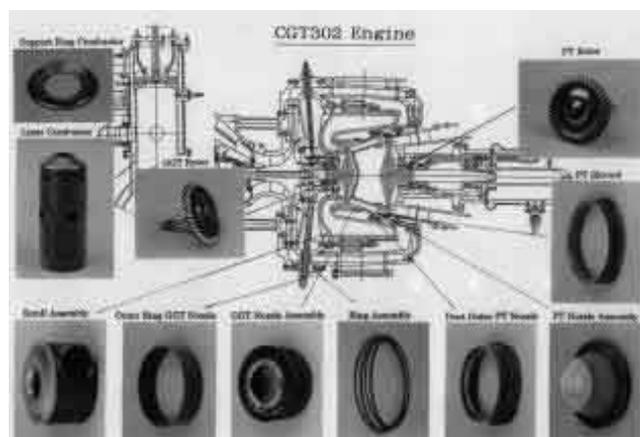


図 4 セラミック適用部品

10. 設計上の特徴

CGT302 の設計上の主な特徴は以下の通りである。

- ・実績のある基本構造と先進的なセラミックス利用技術の採用
- ・ブレードとディスクが一体型の (B L I S K) タービンの採用
- ・金属製熱交換器
- ・断熱三重構造

11. 先進的セラミックス利用技術

窒化ケイ素に代表されるセラミック材料は、金属に比較して非常に脆いこと、熱膨張係数が典型的な耐熱合金の 1/4 程度と非常に小さいこと等の特徴を持っている。これらの特徴を勘案して、以下に示すセラミックスに適した利用技術を開発した。

- 複合締結部材（モノリシックセラミックスと繊維強化セラミックスの複合構造部材）
- 相互独立支持構造
- 弾性支持構造

複合締結部材

タービンノズルは、ノズルベーンとシュラウド内筒および外筒からなる大型複雑形状部品である。この部品は高温部品の中でも最も高い温度にさらされ、また温度不均一による熱応力も高くなることが予想される。このため、従来からセグメント形式（単翼を配列組立する方式）が採用されて来た。この方法は、製造が容易になる長所がある反面、取り付け部分の応力集中や翼間のガス漏れ等を生じるおそれがある。これらの問題点の解決策として複合締結部材を開発した。このコンセプトを図 5 に示す。

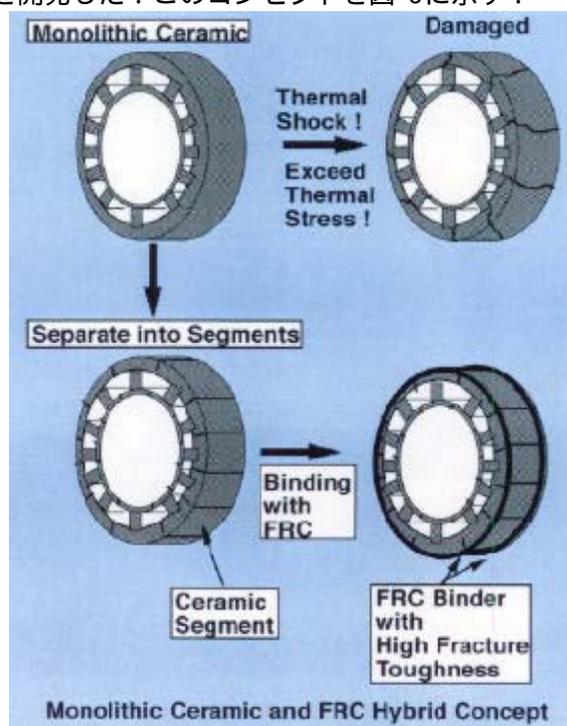


図 5 複合締結部材のコンセプト
製造工程は以下の通りである。

- (1) セグメントにセラミックファイバーを巻き付ける

- (2) 繊維間に有機ポリマーを含浸させる
- (3) 有機ポリマーを炭化ケイ素に転化する
- (4) 上記(2) - (3)の工程を繰返しマトリックスの緻密度を上げる
- (5) 外表面に炭化ケイ素の CVD 膜を作り、ほつれ止めとする。

かくして、ガス通路を耐熱・耐摩耗性に優れたモノリシックセラミックスで形成し、外周を靱性に富んだ繊維強化セラミックスで束ねた複合締結部材が構成される。

この技術を適用する事によって、セグメント間の漏れが無く、またタービンチップクリアランスを最小にするに十分なセンタリング精度を有する、一体構造のガスジェネレータおよびパワータービンノズルを製作することが出来た。適用例としてガスジェネレータタービンノズルを図 6 に示す。



図 6 複合締結部材の例

(ガスジェネレータタービンノズル)

相互独立支持構造および弾性支持構造

金属製部品とセラミック部品の熱膨張差や、金属製外殻構造物の非対称変形などに起因するセラミック部品の支持機能喪失あるいは干渉による過大荷重等を避けるため、相互独立支持構造および弾性支持構造を採用した。従来の CGT では、セラミック部品を順次積み上げて行く組立方法が取られたが、この方法では前述した過大荷重が生じる可能性が高い。

このため、セラミック部品を互いに独立して保持しかつ部品間に適切な隙間を確保して、部品相互間に発生しがちな干渉による過大荷重を回避する相互独立支持構造を採用した。これによって、セラミック部品は支持構造が非対称な変形をしても互いに干渉することなく自由に変位することが出来る。

一方、セラミック部品間に設けた隙間はガスまたは空気の漏れを防ぐためにシールする必要があり、部位に応じてコイル形式あるいは波板形式のセラミック製パネを用いてシールする構造とした。これらの形式のセラミックパネは、セラミック部品を弾力的に保持し、金属部品との熱膨張差による保持力喪失を回避する目的にも使われている。図 7 にこの構造を示す。

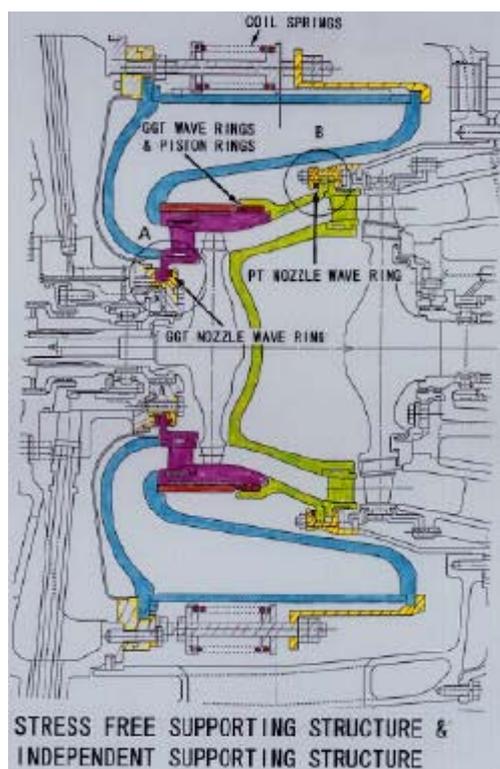


図 7 相互独立・弾性支持構造

B L I S K タービンホイール

セラミックスをタービンロータに適用するに際して、ディスクとブレードを一体で成形する B L I S K 型と、ブレードのみセラミックスとしディスクは金属とした植込み型が考えられる。これらにはそれぞれ得失があり、条件に応じて最適な方式を選ぶ必要がある。

B L I S K 型は製造技術上大型化が困難であるが、耐熱性、耐酸化性、コスト等で優れているため、比較的小径のガスジェネレータータービン (G G T) に採用した。一方、パワータービン (P T) は寸法が大きく、開発当初は B L I S K 型での製造の目処が立っていなかった。このため植込み型で設計したが、プロジェクト終盤になってこのサイズのものも製作が可能になってきたため、一体型への変更を行った。試作した G G T ロータおよび P T ロータの外観を図

8 に示す。この P T ロータの外径は 192mm で、世界最大級の寸法である。



図 8 G G T ロータ, P T ロータの外観

タービンチップクリアランスはタービン効率に大きく影響し、小さいほど高い効率を得られる。またこの影響はタービンが小型になるほど大きくなる。ブリスク型はセラミックスの熱膨張係数が小さく、運転温度の変動に伴う部品の寸法変化が小さいので、植え込み型あるいは従来の金属製タービンよりもチップクリアランスを小さくすることができ、更に翼間の漏れも防げる事とも相まってタービン効率向上に寄与している。

タービンスクロール

タービンスクロールは本ガスタービンの中で最も大きいセラミック部品であり、焼成時の変形等部品製造上の問題と同時に、タービンノズルと同様に温度分布の不均一による熱応力や取付による外部荷重を考慮した設計とする事が必要である。

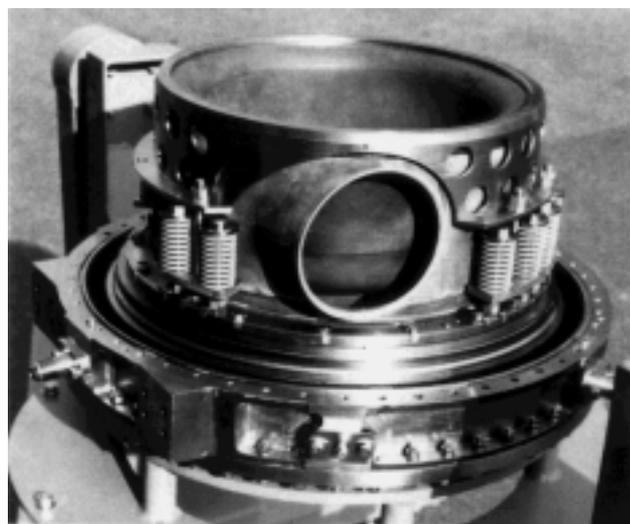


図 9 タービンスクロール

本部品は3つの子部品で構成され、全体がセラミック製コイルスプリングで弾性支持されている。この様子を図9に示す。

燃焼器

燃焼器は比較的単純な形状の部品であるが、燃焼火炎に直にさらされるため非常に大きな温度勾配が付く可能性がある。また、単筒型燃焼器を採用したことにより必然的にケーシングが非対称構造となるため、非対称変形や熱膨張差を回避する工夫が必要となる。このため、燃焼器本体はセラミック製単筒一体型とし、セラミック製スプリングで弾性支持する構造を採用した。燃焼器の構造を図10に示す。

セラミック製燃焼器ライナーは、壁面冷却を必要としないため所定の平均タービン入口温度を得るに必要な燃焼器内最高温度が低くなり、予混合希薄燃焼方式の採用と相まって、優れた低NOx特性が期待できる。

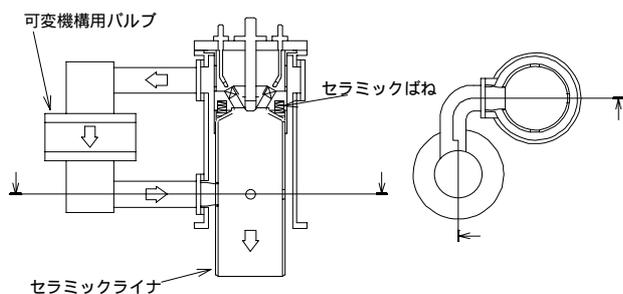


図 10 燃焼器の構造

熱交換器

本機では、高いTITを有効に利用して最大の熱効率を得るため、再生熱交換器を採用している。

熱交換器の選定に当たっては検討すべき2つの重要な因子がある。一つはその形式であり、今ひとつはその材料である。形式としては、回転蓄熱式と伝熱式が、また使用材料としては、セラミックスと耐熱合金が考えられる。これらの選定によってガスタービンの性能、信頼性、大きさ等が大きく影響を受けるため、基本設計仕様と照らし合わせて最適な組み合わせを注意深く選ぶ必要がある。

本機は用途がコージェネレーション用であり、その大きさや重量にあまり制約がないことから、回転蓄熱式に想定される漏れ(キャリアオーバー)や高温摺動シール等の問題の少ない伝熱式を採用した。また、セラミック材料を伝熱式熱交換器に適用するには、製造技術、熱応力回避技術、シール技術等克服すべき課題が多いため、材料として耐熱合金を選

定した。

一方、伝熱式は寸法上の制約から回転蓄熱式に比べて温度効率を高く取れないため、同じタービン入口温度条件では最高熱効率を得られる圧力比が高くなる。このため、排気ガス温度が従来のセラミックガスタービンよりも低くなり、金属材料の使用が可能となった。

金属製プレートフィン型熱交換器の採用はCGT302の安定運転に大きく寄与した。

断熱三重構造

断熱三重構造の模式図を図11に示す。内側のガス通路から外側に向かって、作動流体の温度が順次下がっていくようにして、大気への放熱損失を低減している。

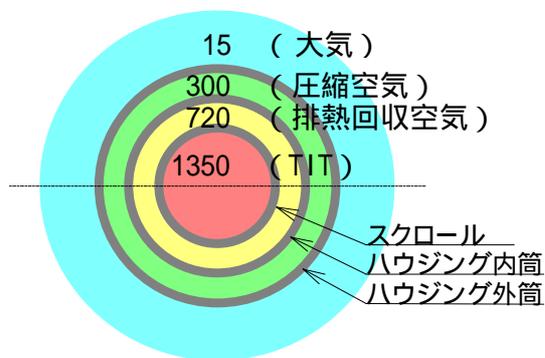


図 11 断熱三重構造

12. 第1次設計試作運転研究(基本型GT, 900)

基本設計を基に、セラミック部材を金属製に置き換えて基本型GTを設計・試作した。1990年にモータリング試験、着火試験等基本的な試験から開始して、基本型CGTのテストベッドとして必要な基本的機能・性能を発揮できるよう必要な改良を行った。

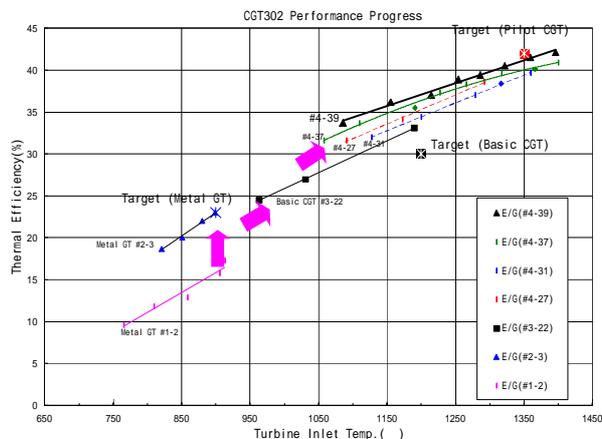


図 12 基本型GT, 基本型CGT
パイロットCGTの性能計測結果の代表例

この結果、運転開始当初の性能は TIT =913 , 17.3% , 42kW であったが、圧縮機の改良、タービンとのマッチング改善、断熱の強化などにより、部分負荷の不利な条件ではあるが TIT=899 , 23% , 59kW を記録し、当初の計画値を達成した。性能改良の状況を後の試験結果と合わせて図 12 (Metal GT として表示) に示す。この試験を通じて、基本設計の妥当性と C G T の性能ポテンシャルの高さが確認できた。

13. 第 2 次設計試作運転研究 (基本型 C G T , 1,200)

1991 年には、基本型 G T の金属製高温部品を順次セラミックに置き換え、複合締結体、弾性支持、相互独立支持などの開発成果を適用した 1200 級基本型 C G T の設計を行った。使用したセラミック材料は SN252 である。セラミック部品を実機に組み込む前に、回転体はホットスピントで、静止部品は 1200 ~ 150 間の繰り返し熱衝撃試験を 100 サイクル実施し、その材料としての信頼性と支持構造の妥当性を確認した。熱衝撃試験の際の温度記録の一例を図 13 に示す。

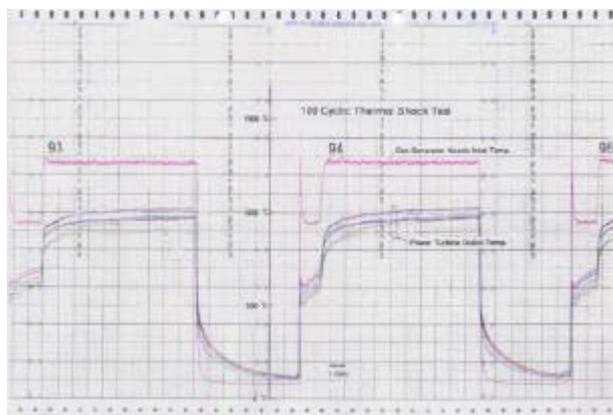


図 13 熱衝撃試験の温度記録

1992 年より基本型 C G T の運転試験を精力的に繰り返した。試験手順としては、基本型 G T をベースに、段階的に金属部品をセラミックに置き換えていく方法をとった。図 14 にそのステップを示す。

1993 年から 1994 年にかけての一連の運転試験の過程で、様々な問題に遭遇した。これらはほとんどがセラミック部品以外の問題であったが、試験進行の障害になった。これらの問題とその解決策を表 4 に示す。逐次これらの対策を行った結果、1995 年に基本型 C G T の定格条件である 1200 での 40 時間の運転と、TIT=1190 で 33% の熱効率、出力

164kW を達成し、中間目標の 30% , 140kW をクリアした。

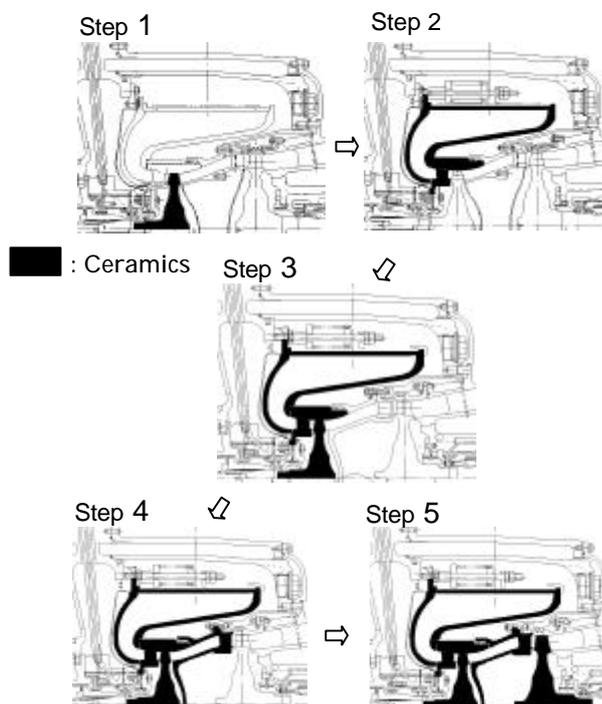


図 14 セラミック部品組込ステップ

この熱効率は従来型ガスタービンでは 100MW 級に匹敵するものである。なお、この時点ではパワータービンは全金属製一体型 (B L I S K) ロータを使用した。

表 4 経験した問題点と解決策

問題点	原因	解決策
潤滑油の漏れ	・シール空気のバランス不良	シール方法の変更
起動途中の過大振動	・バランス不良	タービンロータ軸の剛性向上およびバランス修正要領の変更
セラミックタービンの金属軸からの抜け出し	・接合部温度上昇	冷却強化と接合部形状変更 (2 段接合の採用および焼きばめとろう付け接合の併用)
軸受の焼き付き	・運転中の温度上昇により軸受隙間過小となる	実機運転による最適隙間探索
補機歯車の損傷	強度不足	歯車材質および表面処理の変更
FOD (Foreign Object Damage : 異物衝突による翼の損傷) によるタービンプレードの欠けなど	・異物の存在 (完全な清掃困難) ・セラミックスの低靱性、強度不足	タービン周速を下げる

1994 年から 1995 年にかけて、上述した基本型 C G T までの研究開発成果に対して中間評価を受け、次ステップであるパイロット C G T の開発へ進むことが決定された。

14. 第 3 次設計試作運転研究 (パイロット C G T , 1,350)

幸いにも基本型 C G T がほぼ計画通りに機能したため、ほとんど基本構造を変えることなくパイロット C G T へと移行することが出来た。基本型 C G T との差異は、パワータービンを金属製ディスクとセラミックブレードのハイブリッド構造および全金属製 B L I S K 型からセラミック一体型 B L I S K 構造に変更した事とタービンの周速を下げた事を除いては、使用したセラミック材料の違いのみと言っても良い。

セラミック材料は基本型 C G T 用の SN252 から SN281 (ガスジェネレータータービン用) および SN282 (その他のすべての部品) に変更した。

パイロット C G T への進行に当たって、それまでの試験で経験した FOD (Foreign Object Damage : 異物衝突による翼の損傷) への対策として、タービンの周速を下げることにした。その理由は、基本型 C G T の運転経験から、タービンの周速が 500m/sec を超える辺りから FOD の発生頻度が増える傾向がある事が判ったためである。このため、当初の定格周速 570m/sec から、20 時間の運転実績のあった 480m/sec にまでタービンの周速を下げることにし、ガスジェネレーターの定格回転数を当初計画の 76,000rpm から 64,000rpm に変更した。これに合わせて圧縮機的设计変更を行った。同時に、パワータービンの定格回転数も 57,000rpm から 47,800rpm に変更した。図 15 に FOD の一例を示す。



図 15 FOD により先端が欠損したガスジェネレータータービン翼

パイロット C G T の運転試験は、基本型 C G T で実績のある 1200 から、まず 50 だけ運転温度を上げ、安定した運転が行えることを確認した後に性能を計測し、さらに 50 温度を上げていく方法をとった。この手順を繰り返しながら最終目標の 1350 における性能試験を目指したが、各段階で、ガスジェネレータータービンの金属軸との接合部の温度上昇 (タービンが軸から抜ける) および運転中の軸受隙間の変化 (焼き付き、スキッピング損傷等) に悩まされた。これらの問題は、接合部冷却や軸受隙間を、実機試験で試行錯誤により最適化することで解決した。この他にも、タービンロータの内在欠陥によるバースト損傷なども経験したが、その都度試行錯誤を繰り返して対策し、1350 で 30 時間の運転時間を達成した。

一方、上述のように所定温度での安定運転確認を優先的検証課題としつつも、並行して性能更新のための改良も行った。基本型 C G T の運転試験の結果、圧縮機作動点が効率の低い領域 (チョーク側) にあり、本来の効率を発揮できていない (マッチング不良) という問題が明らかになった。このため、圧縮機の作動点に影響するタービンノズルの開口面積を調査したところ、設計値よりも大きく、またそのばらつきも大きいことが判った。この対策として、ノズルの加工精度を向上すると同時に開口面積を正確に計測し、圧縮機の流量を既存のノズルに合わせて最適化することで性能向上を図った。この結果、熱効率は 1292 において 38.6%、出力は 254kW (#4-27) に達した。

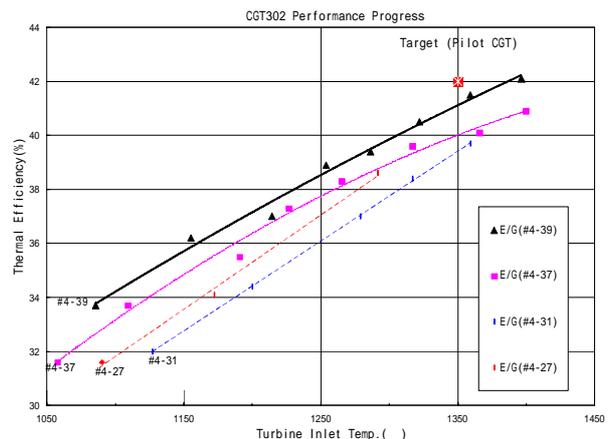


図 16 パイロット C G T の性能改良の例

この性能から 1350 の性能を予測すると、40% を越える効率が期待できたが、圧縮機のサージング等の問題でなかなか効率を更新する事ができなかった。

た．開口面積の異なるノズルを数種類準備して定格点でのマッチングの最適化を図り，さらに伝熱面積を増やした熱交換器，チップクリアランスを最小にするためのアプレイダブルパワータービンシュラウド，翼厚さを薄くしたパワータービンロータなどを組み込んだ最終の試験において，目標の熱効率 42% ，出力 300kW を上回る 42.1% ，322kW を修正 TIT=1396 にて達成した．パイロットCGTの性能計測データの代表例を図 16 に示す．また，現在までの性能更新の経過を図 17 に示す．

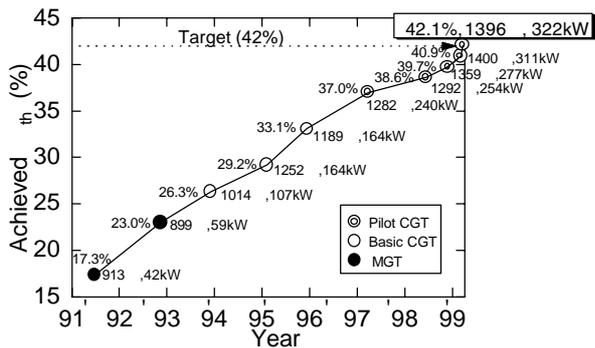


図 17 性能更新の経過

CGT302 が達成した熱効率を既存の従来型ガスタービンと比較して図 18 に示す．出力が 100 から 1000 倍の最大級のガスタービンにも匹敵する熱効率が達成されていることが判る．

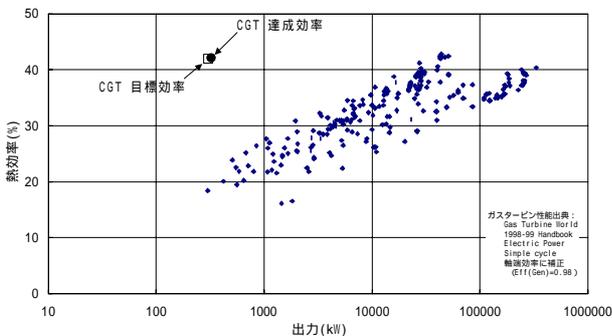


図 18 既存ガスタービンと GT302 の熱効率比較

また，排気ガス特性についてもパイロットCGTを用いて実機試験を行い，1350 にて目標の70ppm (O₂=16%) 以下を十分に満足する 31.7ppm の成果を得た．この値は要素試験で得られた 9ppm よりも高い結果となったが，原因は実機の燃焼器流入部の流れが要素試験機に比べて不均一であるためと思われる，これを改善することでさらなる低減が可能と予想される．実機試験結果を図 19 に示す．

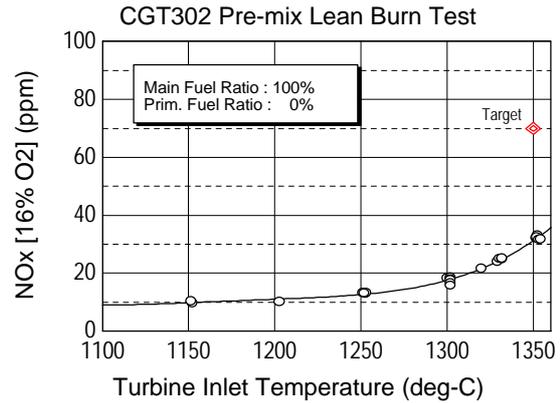


図 19 パイロットCGTの実機 NOx 排出特性
基本型CGT，パイロットCGTの，性能試験における累積運転時間を図 20 に示す．

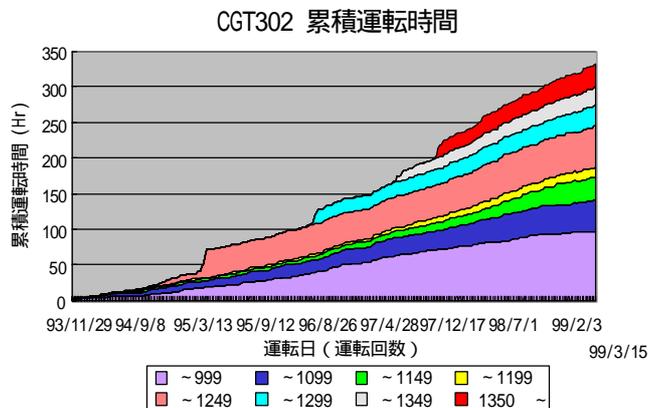


図 20 基本型CGT，パイロットCGTの累積運転時間（性能試験）

15. パイロットCGTによる 1200 耐久性・信頼性試験

目的

上述のように，本開発の当初の目標であるセラミックスによる小型ガスタービンの熱効率改善の可能性が実証できた．しかしこの開発で採用したセラミック材料は最も新しい材料であり，その特性，特にガスタービンの雰囲気中での長時間信頼性の検証は充分でない．このため，テストピースによる長時間クリーブ試験等のデータ蓄積が行われているが，その試験雰囲気を実際のガスタービンの使用条件に正確に合わせることは困難である．

また 現在の 1350 級パイロットCGT用セラミック材料は，実用化時点の要求寿命や信頼性を考慮すると実用タービン入口温度として 1200 級が想定される．

本試験は、上記の実状に鑑み、実用化時のタービン入口温度として妥当と考えられる 1200 で 1000 時間程度の長時間運転を行い、ガスタービン実機中でセラミックコンポーネントが安定して機能しうることを実証して、セラミックガスタービンの実用化を促進することを目的とした。

試験概要

本試験は以下のスケジュールで実施した。

平成 9 年度：試験装置の設計・製作，試験

平成 10 年度：運転試験

試験はタービン入口温度 1200 における定常連続運転を基本とし、ウイークリースタートストップ（WSS，約 110 時間連続運転の繰返し）とした。ただし試験開始当初は、機能確認のためまずデイリースタートストップ（DSS，約 10 時間連続運転の繰返し）で運転し、安定性を確認した上で WSS に移行する方法をとった。

運転試験においては、燃焼器出口に設置した白金製熱電対によってタービン入り口温度を実測し、これを 1200 に保つようにした。

試験装置は、エンジン周辺機器類の基本的構成は性能試験用運転装置と同一であるが、屋外設置のためパッケージ型とした。隣接する工場建屋の中に操作卓を設け、運転・監視操作を行う構造である。試験装置の外観、運転中のガスタービンおよび操作卓を図 21 に示す。



図 21 長時間運転試験装置

運転実績

1200 での運転実績は以下の通りである。

1 回目：592 時間，GGT ロータの損傷によりほぼ全損

2 回目：519 時間，同上，ただし燃焼器サポートリングは継続使用

3 回目：782 時間，同上，ただし燃焼器と同サポートリングは継続使用

4 回目：218 時間，燃焼器は 1000 時間，予定時間到達のため試験終了

その他：7 時間，調整・点検運転等

・1200 での累積運転時間 2117 時間 57 分

・総累計運転時間 2146 時間 10 分

・同一組立エンジンでの最長は 782 時間

・セラミックの同一部品最長運転時間は燃焼器の 1000 時間，

・熱交換器は全試験期間同一品で 2118 時間

第 1 回から第 3 回目はガスジェネレータタービンの損傷により同一組立部品で目標の 1000 時間に到達出来なかったが、これが解決されれば他の部品は問題なく運転できるものと考えられる。

ガスジェネレータタービンの損傷原因として以下の項目が可能性として推定されるが、この内のいずれであるかは特定出来ていない。

タービンブレードの、起動/停止途中あるいは定常運転中の共振

FOD（異物衝突）

セラミック材料自体の強度低下

16. おわりに

本研究の開発目標は非常に高いものであったが、幸いにして研究期間内ぎりぎり目標を達成することが出来た。委託元の新エネルギー・産業技術総合開発機構をはじめ、工業技術院、国立研究所、各大学の関係各位の 11 年間にわたるご指導、ご協力に厚く御礼申し上げます。また、今回の成果はセラミック部材、熱交換器、ガスタービンシステムそれぞれの開発がうまくかみ合って得られたものであり、セラミック部材と熱交換器に対する当方の設計要求に応え、あえて未踏の領域に踏み込んで開発・改良を進めて来られた、京セラおよび住友精密工業の皆様に厚く御礼申し上げます。

SPring-8 概要とビームラインの熱関連問題

Overview of the SPring-8 and thermal problems of the beamline

望月哲朗・大石真也 ((財)高輝度光科学研究センター)

Tetsuro MOTIDUKI, Masaya OISHI (Japan Synchrotron Radiation Research Institute)

1. はじめに [1, 2]

放射光は、物質の分析、反応、解析などのための画期的な手段として 材料科学・地球科学・生命科学・医療等の幅広い分野の研究への活用が期待されている。

大型放射光施設 SPring-8 (Super Photon ring-8 GeV) は世界最高性能の放射光を発生することができる大型の基礎研究施設であり、日本国内はもとより世界中の研究者にも広く開かれた共同利用施設として科学技術庁が企画し、日本原子力研究所と理化学研究所が共同で建設し、財団法人高輝度光科学研究センター (Japan Synchrotron Radiation Research Institute, JASRI) が運営を行っている第 3 世代高輝度 X 線光源である。1991 年から建設を始め、1997 年 3 月に運転に成功、同年 10 月から供用が開始されている。図 1 に SPring-8 施設配置を示す。

大型放射光施設 SPring-8 は放射光を発生させる加速器と放射光を実験ステーションに導くビームラインより構成される。本稿では、放射光、利用研究、加速器の概要と、ビームラインの熱関連問題について述べる。

2. 放射光とは [1, 3]

放射光とは、ほぼ光速で直進する電子が、その進行方向を磁石などによって変えられた際に発生する電磁波のことを示す。放射光は赤外線から X 線までの広い波長領域の電磁波を含んでおり、従来の光源に比べ極めて明るく、また、細く絞られ、拡がりにくい (指向性のよい) 性質を持っている。

電子の進行方向を変えるために用いる磁石のタイプとしては、電子をリング状の加速器に閉じこめるために必要な偏向電磁石と、特定の形に組み合わせた磁石 (ウィグラー、アンジュレータの 2 種があり、これらは電子の進路に挿入して用いられるため、挿入光源とも呼ばれる) があり、それぞれ特徴ある放射光が得られる。図 4 に放射光の波長と輝度を示す。偏向電磁石：赤外線から X 線までの連続した波長の光 (白色光) が得られる。(図 2)

ウィグラー：電子を大きく複数回蛇行させることにより、より明るく波長の短い白色光が得られる。

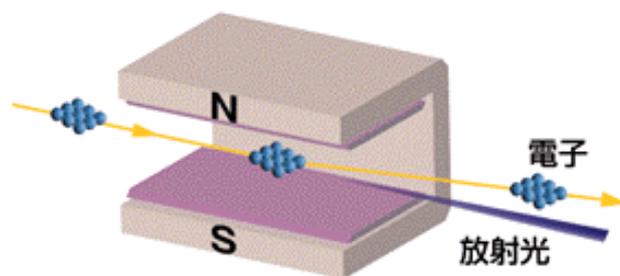


図 2. 偏向電磁石より発生する放射光概念 [1]

アンジュレータ：電子を周期的に小さく蛇行させ、蛇行の都度発生する放射光を干渉させることにより、極めて明るい特定の波長の光が得られる。(図 3)

放射光を発生させるためには、電子ビームを発生させ光速近くまで加速するための加速器 (入射系加速器) と、その電子ビームを円形の軌道に留めておくための加速器 (蓄積リング) が必要である。大型



図 1. SPring-8 施設配置 [1]

放射光施設とは、電子ビームのエネルギーがおよそ60億電子ボルト(6GeV)以上の加速器を有する施設を指す。

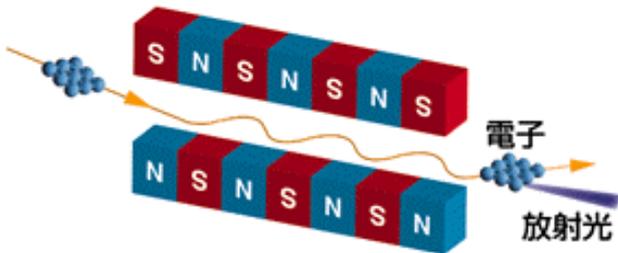


図3. アンジュレータより発生する放射光概念 [1]

第3世代と呼ばれる放射光施設は、専用の加速器にアンジュレータ主体の挿入光源を多数設置できるように設計された施設のことで、大型のものは世界にESRF, APS, SPring-8の3つがある。

ESRF: European Synchrotron Radiation Facility

APS: Advanced Photon Source (USA)

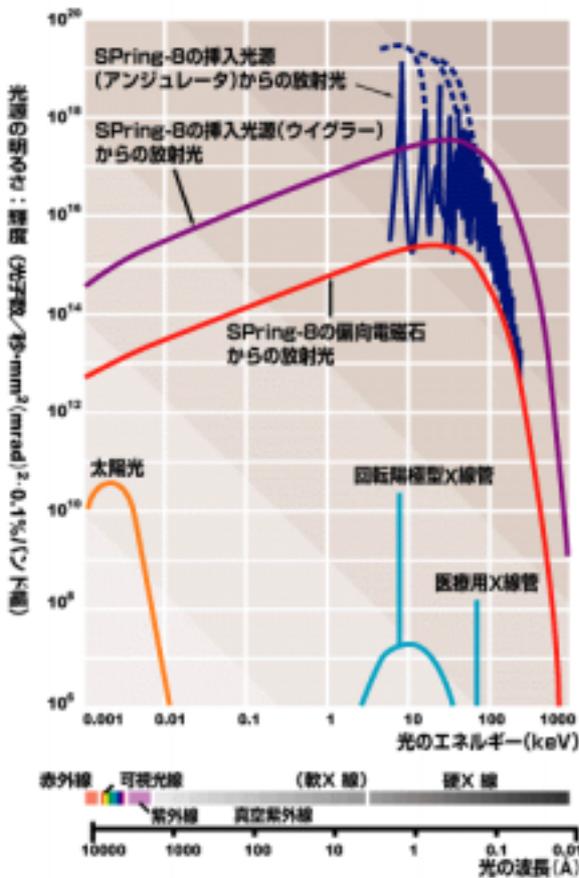


図4.SPring-8の放射光の波長と輝度 [1]

3. 利用研究 [1, 3-5]

SPring-8の放射光を利用した研究は大きく物質科学, 地球科学, 医学, 生命科学に区別される。

物質科学では蛍光X線分光や光電子分光, X線回折, 弾性・非弾性散乱, XAFS, X線CVD等を用いて構造解析, 化学反応, 物理変化過程の研究, 新物質・新材料の創製などの研究が行われている。

地球科学分野では, 高温高压下でのX線回折実験により, 高压地球科学の研究, 超臨界流体の構造研究などが行われている。

医学, 生命科学分野では, X線回折, 小角散乱実験等により, 蛋白質結晶構造解析や核酸集合体等の生体超分子の構造解析を行っており, また, 今後, 基礎医学研究として血管造影, CT, イメージングの研究が行われる予定である。図5に放射光利用の概念を示す。

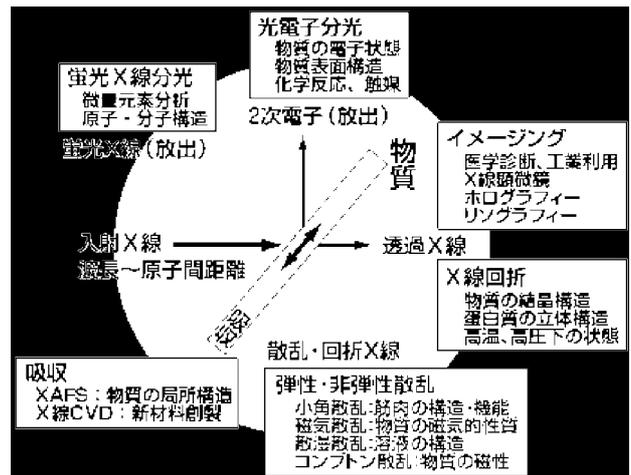


図5. 放射光利用概念図 [1]

4. 加速器概要 [6, 7]

大型放射光施設SPring-8の加速器は電子銃で発生させた電子を1GeVまで加速する線形加速器, 電子を1GeVから8GeVまで加速するシンクロトロン, 8GeVの電子を蓄積し放射光を供給する蓄積リングから構成される。本章では主に蓄積リングについて説明をする。(図6参照)

4.1. 線形加速器

線形加速器は引き出し電圧180kVの電子銃で電子を発生させ, 定在波型加速管のバンチャーで高周波加速位相に捕獲し, 進行波型加速管で2856MHzの高周波の波に乗せ1GeVのエネルギーまで加速する。

加速管の途中に e^-/e^+ 変換ターゲットがあり陽電子の発生・加速も可能であるが、現在は使われていない。全長140mの直線型加速器である。図7に線形加速器の写真を示す。図手前より奥に向かって電子は進む。図中央のパイプが加速管である。

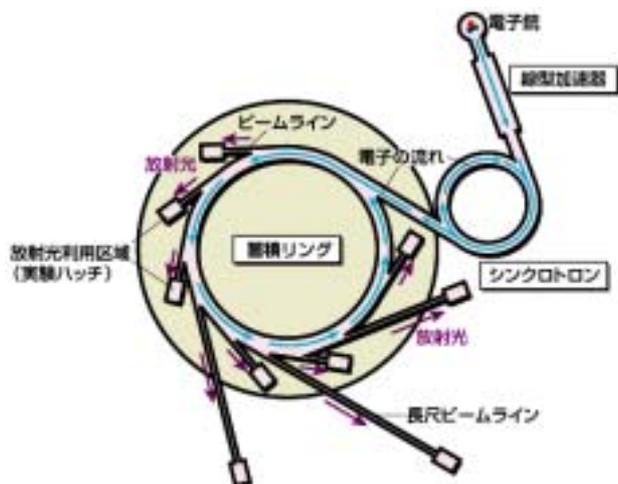


図 6. 加速器構成概念図 [1]



図 7. 線形加速器

4.2. シンクロトロン

シンクロトロンは線形加速器で加速された電子または陽電子を8GeVまで加速し、蓄積リングに送り込む。繰り返し1Hzで線形加速器からの入射、加速、蓄積リングへの出射を行う。基本的な構成は後述の蓄積リングと類似である。

4.3. 蓄積リング

蓄積リングは電子軌道を決める電磁石、電子にエネルギーを補給する高周波加速空洞、電子を空気の散乱から保護する真空チェンバーおよび真空中に排気する真空排気系、電子ビームを診断するモニター系、放射光発生用の挿入光源からなる。蓄積リングはChasman-Greenと呼ばれる電磁石配列構造をもつ単位セル(図13参照)48個で構成され、周長1436mで

ある。電子ビーム蓄積エネルギーは8GeV、最大電流100mAである。

(1) 電磁石

1セルあたり電磁石は、電子を曲げ円形軌道を作る偏向電磁石(図8参照)2台、電子を収束・発散させる四極電磁石10台、色収差(収束・発散力の運動量依存性)の補正を行う六極電磁石7台、軌道の補正を行う補正電磁石からなる。偏向電磁石でローレンツ力により電子の軌道を曲げるとき放射光が発生する。



図 8. 偏向電磁石と真空チェンバー

(2) 高周波加速空洞 [10]

電子は偏向電磁石、挿入光源を通過する際に放射光を発生しエネルギーを失う。このエネルギー補給を高周波加速空洞に高周波を投入することにより行っている。図9に高周波加速空洞を示す。無酸素銅製の空洞が8連で1ユニット、蓄積リング全体に4ユニット配置されている。508.58MHzの高周波を1ユニットに対し1台または2台のクライストロン(1台あたりの最大出力約1.2MW)で供給している。



図 9. 高周波加速空洞

(3) モニター系

モニターとしては、電子ビーム位置を計測するボタン電極型のビーム位置モニター、蓄積電流値を計測する電流モニター、電子ビームのペータトロン振動数(チューン)と呼ばれる量を測定をするチュー

ンモニター ,入射部でのビーム位置とプロファイル
を観測するスクリーンモニター等がある .

(4)挿入光源 [16]

挿入光源は主としてアンジュレータが設置されて
いる . SPring-8 標準型真空封止 X 線アンジュレータ
(図 10 参照) は NdFe 系永久磁石を周期長 32mm で長
さ 1.5m のユニットに組み , ユニット 3 台を合わせて
合計 4.5m の磁石列として真空チェンバー内に収納し
ている . 磁石間のギャップは 8mm から 50mm 可変で
あり , 最大磁場はギャップ 10mm で約 0.78T である .
電子ビーム 100mA 時 , アンジュレータから放射され
るパワーは約 11kW , パワー密度は 470kW/mrad² に達
する .



図 10.SPring-8 標準型真空封止 X 線アンジュレータ

(5)真空 [7-9]

加速器は電子の大気による散乱を防ぐために真空
チェンバーの中に電子を通す . 現在 , 真空チェン
バーの内部は電子ビームが無い状態で 10⁻⁹Pa 台 , 電
子ビーム蓄積中でも 10⁻⁷Pa 台の圧力の超高真空に保
たれている .

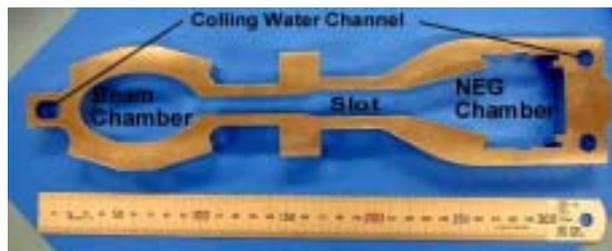


図 11. 直線部真空チェンバー押出断面

蓄積リングの真空チェンバーはリング全周のうち
約 95% が真空性能の良いアルミニウム合金(A6063-
T5) 製である . 断面を図 11 に示す .

放射光が照射され温度上昇が著しく熱応力の大き
な部位には熱疲労強度の高い , 銅にアルミナを含有
した GlidCop AL-15 を用いた .

超高真空の排気にはスパッタイオンポンプ(SIP)
と NEG (非蒸発型ゲッター) を用いている . NEG は
70% Zr-24.6% V-5.4% Fe の合金 (SAES Getters 製
St707) で H₂ や CO など吸着する溜め込み型ゲッ
ターポンプである . (図 12 参照)



図 12. 分布型 NEG ポンプを挿入

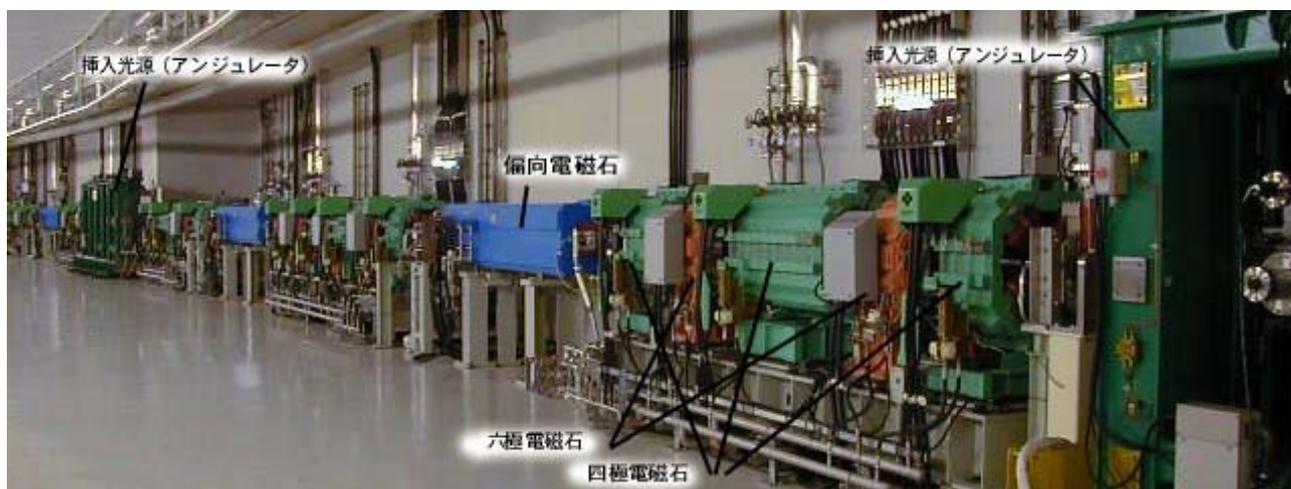


図 13. 標準的セルの構成 (挿入光源から挿入光源が 1 セルで , 約 30m である .)

5. ビームラインと熱関連問題

放射光施設に於ける熱関連問題の一つは冷却であり、放射光を利用するための機器が放射光を受けて発熱するが、この熱負荷から機器を保護するために冷却が必要となる。もう一つは温度制御であり、指向性の高いビームを取り扱うことから、温度変動による機器の支持台の伸縮を抑えるため、あるいは、精密な実験を行う上で試料温度を一定に保つために必要である。ここでは、主に冷却の問題について述べる。

放射光の光源としては、偏向電磁石と挿入光源があり、挿入光源からの放射光は、偏向電磁石からの放射に対して $10^2 \sim 10^4$ 輝度が高い。挿入光源からの放射パワーは、偏向電磁石の100倍ほど大きく、パワー密度では1000倍も大きい。SPring-8は強力な放射光を発生するように建設された大型放射光施設であり、光源の半数を占める挿入光源からの放射光は、強力で指向性が高い。標準型とされている真空封止型アンジュレータ挿入光源からは、全放射パワーとして12kW、パワー密度としては500kW/mrad²もの強力な光が放射され、光源から20mの距離で1250W/mm²、40mでも約300W/mm²ものパワー密度になる。この様に強力な放射光を、利用者が安全で効率的に利用するために設けられた設備を、放射光ビームラインと称している。

SPring-8では、その機能からビームラインを2つに分けて区別している。蓄積リングの超高真空と直結して、蓄積リングを収納する遮蔽壁内部に設置されるのが基幹チャンネル、遮蔽壁外側でベリリウム窓により超高真空と切り離されて、実験ホール内に設置されるのが輸送チャンネルである。基幹チャンネルには放射光パワーを直接受けても、構造的に破損しないことが必要とされる機器が並び、輸送チャンネルに設置される機器は、熱負荷量は数百W以下と相対的には小さいが、放射光を反射、集光或いは分光するなどの機能を持つ、光学機器が列んでいる。従って、それぞれの熱に対する対策は異なってくるが、ここでは、主としてSPring-8における基幹チャンネルの熱負荷機器としてアブソーバの冷却と、輸送チャンネルにおける分光結晶の冷却について述べる。

5.1. 基幹チャンネル

(1)基幹チャンネルの構成

SPring-8の標準型アンジュレータ挿入光源ビームラインの基幹チャンネルは、図14の構成となっている[11]。放射光による熱負荷が問題となる機器には、上流から、前置マスク、固定マスク、アブソーバ、前置スリット、グラファイトフィルタ、XYスリットとベリリウム窓である。マスクは下流への放射光の広がりを制限し、放射光分布のすその部分を遮断すると共に、万一放射光の光軸が変化した場合にも、下流側の配管或いは冷却していない機器への、放射光の入射を防いでいる。アブソーバはタングステン合金のビームシャッターと連動して、輸送チャンネルで作業する利用者を、放射光による被爆から守るものであり、ビームシャッターが熱により破損する事を防いでいる。この様に、アブソーバは放射光からの放射パワーを受けることになり、熱負荷条件の最も厳しい機器である[12]。XYスリットの開口は可変であり、放射光を1mm角程度に絞り込み、輸送チャンネルに余分な放射光を入れないようにする[13]。前置スリットは放射光の周辺部分を遮り、XYスリットへの放射光による熱負荷を、軽減する目的で設置される[14]。ベリリウム窓は3以下波長の放射光は通過させるが、機械的に基幹チャンネルと輸送チャンネルの真空を分けている。ベリリウム窓で真空を分けることにより、実験の必要に応じ輸送チャンネルの真空を破ることが可能となる。グラファイトフィルタはベリリウム窓の前方に置いて放射光の長波長成分を吸収する事で、ベリリウム窓の放射光による発熱を軽減させる。

(2)放射光による発熱

光源からの放射パワーとパワー密度は、蓄積リングの運転エネルギー、蓄積電流と光源である偏向電磁石或いは挿入光源のパラメータにより変わり、これを計算するプログラムが開発されている[15, 16]。放射光が物質に照射された場合の発熱は、表面だけではなく物質中に進入して熱に変わる。ベリリウム或いはグラファイトのように、原子番号の小さく密度の小さな物質ほど、放射光は内部まで進入する。銅、鉛、タングステンなどは、ほぼ入射面近傍で吸収されて熱に変わる。シリコンなどはこの中間にある。図15は放射光による物質内での発熱を、OEHLコード[17]により計算した結果である。

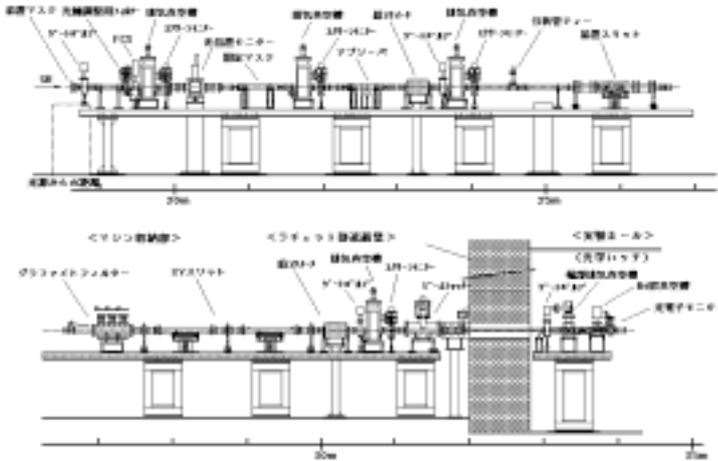


図 14. 標準型真空封止アンジュレータ用基幹チャンネル機器の配置 (BL35XU) [11]

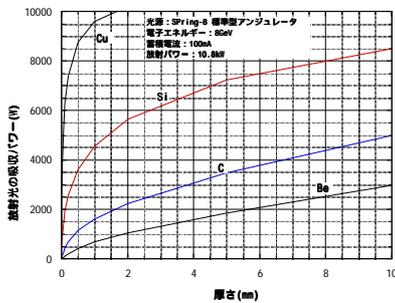


図 15. 物質内での放射光の吸収

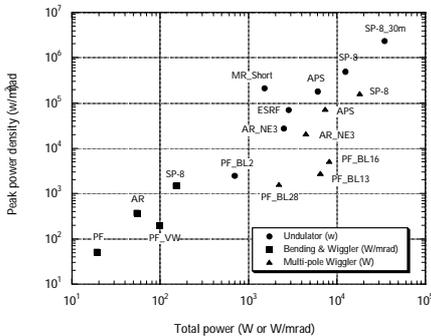


図 16. 放射光光源の全放射パワーとピークパワー密度

(3) 基幹チャンネル機器の冷却

図16に各放射光施設の光源からの、全放射パワーとピークパワー密度を示した。放射光利用が開始されてからしばらくは、光源は偏向電磁石であり、熱負荷といってもそれほど大きなものではなく、純銅のブロックに冷却水の銅配管をロウ付けした、マスク、アブソーバ或いはXYスリットが使われていた。その後、挿入光源が開発された事により放射パワーが大きくなり、特にパワー密度は100倍以上となり、

それなりの熱設計が必要となった。フォトンファクトリーのBL16に設置されたマルチポールウイグラーは放射パワーで8.4kW、ピークパワー密度では5.4kW/mrad²であった[18, 19]。さらに、フォトンファクトリーのARのビームラインNE3用に、真空封止型のアンジュレータ挿入光源が開発[20]されたが、そのピークパワー密度は27kW/mrad²であり、本格的な熱負荷対策が必要であった。

これと前後してSPring-8、APS及びESRFと大型放射光施設が計画され、建設が開始された。その放射パワーは数kW～数十kW、ピークパワー密度は数百kW/mrad²以上と想定され、熱解析を取り入れて開発が始められた[21-27]。SPring-8は、これらの大型放射光施設の中でも最も大型で、熱負荷も厳しいことから、計画当初から熱対策についての検討が進められていた[28, 29]。これらの検討では、機器の材料物性と機器表面での熱負荷及び冷却流路での熱伝達をパラメータとして、有限要素法を用いた温度分布と熱応力のシミュレーション計算、冷却流路の熱伝達促進についての試験と検討が行われた。以下に、現在SPring-8の挿入光源ビームラインで採用されている、アブソーバを例に採り設計の方針と今後の問題について触れる。

(4) アブソーバ

標準型アンジュレータビームライン用のアブソーバを図17に示す[12]。アブソーバは光源から約22mの距離にあり、光源から放射される12kWのパワーを吸収する。光軸に直交する面に於ける放射光は、パワー密度がピーク値の1/2となる広がりをもつ。光の大きさと仮定すれば、幅5.7mm、高さ1.8mmであり、最大熱流束は約1000W/mm²となる。この光に対して受光面を0.84°に傾斜させて受ける方法で、最大熱流束を15W/mm²にまで下げている。このようにすると、放射光の受光面上の幅は67倍に増加して380mmとなる。これに放射光分布の広がりの裾と、光軸の移動及び設置した場合の誤差を考慮すると、約2倍の受光面長さが必要となる。これを真空中に入れて冷却水を供給し、上下に駆動することはかなり大がかりで、製作も難しくなる。

そこで、この受光面を中央で折り返したV字型として長さを短くし、さらに受光面の下部に開口を設けて、真空チャンバーとアブソーバを一体化したアブソーバを製作した。放射光ビームのON-Offは、アブソーバ全体を上下に駆動して行う。

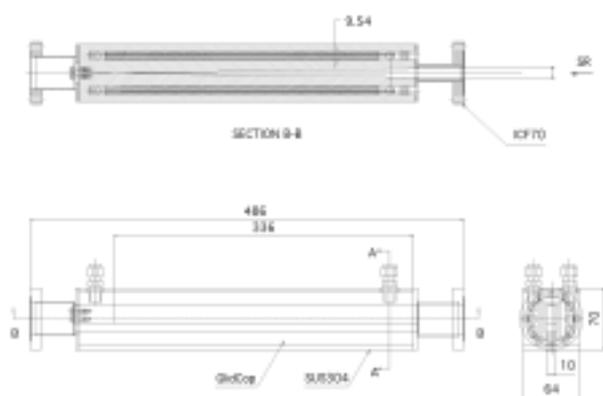


図 17. ワイヤメッシュ流路アブソーバ

このようにすることで、全長が650mmで外寸が幅70mm、高さ75mmとコンパクトなものとなっている。有限要素法による温度分布の計算結果では、最高温度が150程度で、この時の冷却水路の熱伝達率は $0.02\text{W}/\text{mm}^2$ 、冷却水温度は40、材料はGlidCop (AL15LOX)である。すべての放射パワーが受光面表面で熱に変わるとした条件で計算した。最高温度はそれほど高温では無いが、熱応力を計算するとミーゼスの相当応力で約200MPaとなる。圧縮応力ではあるが応力が大きいので、純銅と比較して熱伝導率が殆ど変わらずに、強度の大きなGlidCopを使用している。冷却水路はAPSで開発した、ワイヤメッシュを水路内に口付けしたものであり³⁰⁾、冷却面温度は最高でも100以下と沸騰の起こらない条件になっている。このワイヤメッシュ水路は熱伝達率は大きいですが、圧力損失が大きくなることと、加工が難しいという問題があった。そこでワイヤメッシュを入れずに熱伝達率を大きくするために、流速を大きくした直管流路を採用したアブソーバも、製作し設置している¹²⁾。現在では、長い水路の加工が容易で、流速をそれほど大きくしなくとも熱伝達率を大きくできる、ワイヤコイルを流路内に挿入した冷却流路を採用している³¹⁾。

1999年の春から蓄積リングは蓄積電流を100mAに上げて運転をしているが、アブソーバは順調に作動している。

(5) 今後の課題

2000年夏に設置される長尺アンジュレータの仕様では、放射パワーが33kW、ピークパワー密度では $1900\text{kW}/\text{mrad}^2$ となっている。この基幹チャンネル

は、通常のビームラインよりも長いことから、マスクを4つに分けて、それぞれが分担して熱負荷を受けることで、一台あたりの熱負荷を軽減させる方式を採用している。最終段のマスク出口寸法は1.5mm角である。この下流に設置されるアブソーバでの熱負荷は、全熱負荷量としては3kW以下となり、光源までの距離が41mと離れているため熱流束も $1100\text{W}/\text{mm}^2$ で標準型のアブソーバが使用できる。XYスリットも標準型が使用出来る。

この様に長い基幹チャンネルを持ち、マスクを4段とする事が出来るビームラインは特殊であり、通常の基幹チャンネルはこれより短いため、4段マスク方式の適用は難しい。そこで、この様な大出力の挿入光源を設置する基幹チャンネルには、異なった対策を採ることが必要となる。現在検討している対策としては、複合材の使用がある。複合材としては、基幹チャンネルの前置スリットに用いられている、受光部をベリリウム材として、冷却流路を設けた銅ブロックと接合したものである。ベリリウムを受光部とすることで、放射光による発熱はベリリウム材での内部発熱となり、局所的な最高温度を低下させることが出来る。実用化での問題は、ベリリウムのヤング率が大きいことによる、銅ブロックとの接合部に発生する熱応力が、大きくなることと、接合方法と接合部の強度が明確になっていない事がある。また、高温となる部分が広くなることから、真空に対するガス脱離の影響についての検討も必要になる。

5.2. 輸送チャンネル

輸送チャンネルにおいて特徴的な、冷却を必要とする機器は、ミラーと分光結晶及び回折格子である。分光結晶はほぼ4keV(3)以上のエネルギーの、光を分光するために使われ、Si結晶が最も普通に使われている。目的によってはGe、ダイヤモンド、InSb、YB66等の結晶やパイロティックグラファイトも用いられる。回折格子はより小さいエネルギー(波長の長い)の光を分光する場合に用いられ、クオーツ、SiCの表面に溝を付けたものである。ミラーは放射光の角度を変えたり集光する場合に用いられ、クオーツ、SiCの表面にAu、Pt等をコーティングする。

分光結晶はSPring-8の挿入光源ビームラインの輸送チャンネルの最上流に置かれ、熱負荷が最も厳しく、基幹チャンネルのXYスリットで整形され、ベ

リリウム窓を通過した放射光ビームを直接受ける。この分光結晶の熱負荷による変形は、分光したX線の性状を直接左右するため、光学的性能が劣化しないように、冷却する事が要求される。SPring-8などの大型放射光施設の計画が始まると共に、様々な検討・研究・開発が集中的に行われてきている。ここでは、分光結晶の冷却について述べる。

(1)分光結晶の熱対策

結晶の熱対策としては、冷却方法の改善、熱負荷の低減、更には変形の補正等の方法が検討され研究・開発が行われている。結晶が熱変形を受けてその分光特性が劣化する機構としては、図18に示すように結晶全体の曲がり(bending)と、放射光の照射部の部分的な膨らみ(bump)及び、結晶格子面間隔の広がりがあると言われている[32]。これらの変形は、ともに結晶内部の熱膨張の不均一により生ずるもので、結晶内の温度が不均一であることによる。この結晶格子面の変形を、有限要素法による熱変形計算により求め、この格子変形を基に、回折されるX線への影響を計算するシミュレーションが行われているが、基本的には熱変形を低減する冷却法を、開発することが必要である。

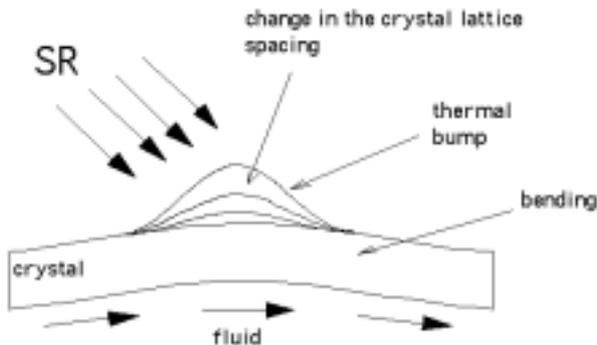


図 18. 結晶の変形

これまでも様々な冷却方法が提案され、試験されている。これを整理したものを表-1に示す。

大きく分けて、冷却方法の改善と、熱負荷の低減、熱変形の低減に分けることが出来るが、様々な工夫がなされている。この中で、SPring-8の挿入光源で採用している冷却方法は、ピンポスト付きの伝熱面を持つ水冷Si結晶と、液体窒素冷却のSi結晶である。図19にピンポスト結晶を示す[33]。ピンポストを設けることで、計算上は冷却面で0.1W/mm²の熱伝達率が得られる。また、結晶での回折は結晶格子面に対して起こるので、結晶表面を格子面に対して斜めに加工することで、放射光の入射角度を結晶表面

表-1. 分光器結晶の冷却方法

改善方法	手段	実施例	効果		
冷却方法の改善	熱伝達の促進	熱伝達率	液体Ga 衝突噴流	熱伝達面温度差の低減	
		拡大伝熱面	平板フィン 樹枝状フィン 海綿状表面		
	熱伝達率の大きな結晶	材質	突起付き伝熱面	ピンポスト	結晶内温度差の低減
			低温に於ける熱伝導率向上	液体窒素冷却Si	
薄い結晶		冷却流路を結晶面直下に設ける		結晶内温度差の低減	
熱負荷の低減	フィルタの使用	ハイパスフィルタ	グラファイト	結晶内及び、熱伝達面温度差の低減	
		ロウパスフィルタ	アブソーバ 前置ミラー		
		表面熱負荷密度の低減	結晶面を格子面に対して傾ける		非対称結晶 傾斜結晶
		全熱負荷の低減	放射光の分布の裾を遮る		XYスリット
	放射光の吸収量の低減		薄い結晶	シリコン薄膜	
			放射光の吸収係数の小さな材質	ダイヤモンド ベリリウム	
熱変形の低減	低線膨張係数の材質	線膨張係数の小さな状態を利用する	ダイヤモンド 液体窒素冷却Si	温度分布による熱変形の低減	
		変形の補正	機械曲げ	ニューマチック アクチエータ ピエゾ素子	熱変形した結晶表面の矯正
		結晶反射面への気体による加圧	結晶上面の圧力室		

に対して1°程度にまで小さくしている。このようにして表面での熱流束を下げている。この組み合わせにより結晶内部の温度分布を小さくして、熱変形を抑えるようにしている。この冷却方法の問題点は、結晶反射面のすぐ裏側まで加工することである。微少な歪みがあっても分光性能に影響するために、加工時の歪みが残る事は極力避けなければならない。この加工方法については、現在も開発が続けられている。また、表面熱流束が3~4W/mm²以上では熱変形による分光特性の劣化が顕著となる。

液体窒素冷却のSi結晶の例を図20に示す。窒素冷却が利用される理由は、図21に示すように、液体窒素温度付近におけるSi結晶の、熱物性が優れていることによる。液体窒素温度では、熱伝導率は常温より一桁良くなり、しかも線膨張係数は数分の1になる。従って、常温の場合と比較して同じ熱負荷であれば、熱変形を数十分の1まで小さく出来ることになる。

図20はSPring-8のBL47XUで使用されているものであり、反射面が50mm角で厚さが35mmのブロックで、なるべく結晶の加工量を減らし、反射面に影響する加工は避けている。冷却は銅ブロックをインジウムシートを介して、左右から挟み込み、銅ブ

ロックに流路を設けて液体窒素を流す, 間接冷却方式である. 液体窒素冷却方式の問題点は, 液体窒素の取り扱いに注意が必要であることと, 循環装置が大がかりになり高価な点である. また, 液体窒素冷却では限界熱流束が小さくなり, 沸騰の発生を避けることは困難である. 沸騰により流体振動が発生し, それにより結晶が振動すると, 分光性能が悪化してしまう. BL47XUの間接冷却では, 熱負荷量で200W, 表面熱負荷密度で40W/mm²程度までは性能の劣化もなく使用できているが, 400Wで, 90W/mm²になると冷却流路での沸騰も激しくなることもあり, かなり分光性能が悪化している. 今後は, 沸騰を出来るだけ避けるために, 結晶と銅ブロックを大きくして, 冷却流路表面での熱流束を小さくしたものを製作し試験すると共に, 銅ブロックと結晶との接触熱抵抗を無くすことの出来る, 直接冷却結晶についても試験する予定である.

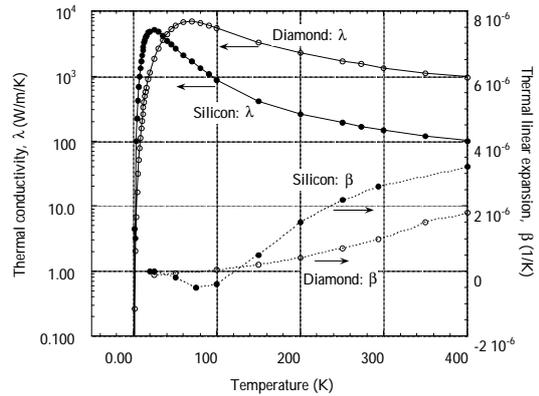


図 21. 高純度シリコン及びダイヤモンドの熱伝導率と線膨張係数

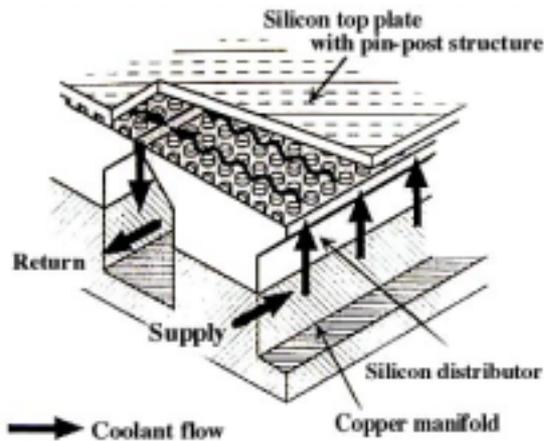


図 19. 直接水冷却ピンポスト結晶 [33]

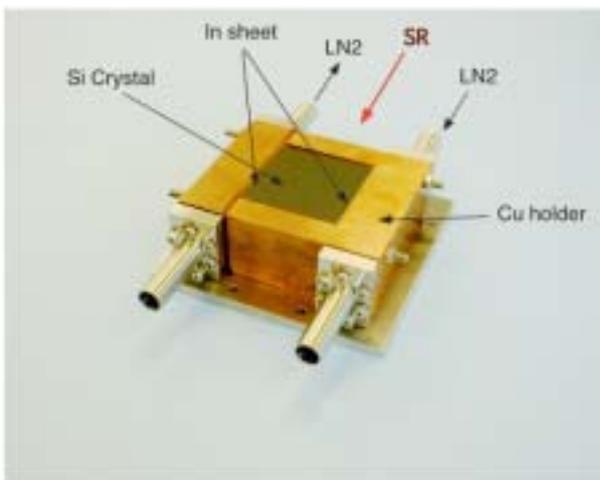


図 20. 液体窒素間接冷却シリコン結晶

6. まとめ

SPring-8 の概要と SPring-8 ビームラインに於ける熱問題と題して, 現状を簡単に纏めてみました.

放射光利用者の, もっと強い光がほしいという要望に応じて, 続々と強力な光源が実用化されてきています. この強力な光を十分に利用するためには, 伝熱工学に追うところが多いが, それだけで対処出来るものではありません. 関連分野の助けを借りて初めて対処出来るものと思います.

問題点の説明が十分では無かったかもしれませんが, 何らかの参考になり, 更には放射光の熱問題に興味を持って頂ければ幸いです.

前半の概要は著者らは SPring-8 の今までの成果を纏めたにすぎず, ここに関係諸氏に感謝します.

参考資料

- [1] 高輝度光科学研究センター: SPring-8, 1999.7 または, <http://www.spring8.or.jp/>
- [2] 上坪宏道: 放射光 11,93 (1998).
- [3] 日本物理学会編: シンクロトロン放射 (培風館 1986), 大柳宏之編: シンクロトロン放射光の基礎 (丸善 1996) 等
- [4] 菊田惺志: 放射光 9,379 (1996).
- [5] 大野英雄: 放射光 9,393 (1996).
- [6] 熊谷教孝: 放射光 9,385 (1996).
- [7] 渡邊剛、原徹、大熊春夫: 真空 40,861 (1997).
- [8] Suck Hee Be: 圧力技術 33,67 (1995).

- [9] Suck Hee Be : SPring-8 Annual Report 1994,25.
- [10] Masahiro HARA: SPring-8 Annual Report 1994,22.
- [11] 後藤俊治他 , SPring-8 利用者情報 , Vol.4, No.4, 7-15 (1999).
- [12] Mochizuki, T., et.al., J Synchrotron Rad., Vol.5, No.4, 1187-1241, (1998).
- [13] Ohura, M., et. al., J Synchrotron Rad., Vol.5, No.3, 606-608, (1998).
- [14] Takahashi, S., et. al., J Synchrotron Rad., Vol.5, No.3, 581-583, (1998).
- [15] Kitmura, H., Synchrotron Radiation Calculation Program for PC, *spectra*.
- [16] 北村英男編 ,Insertin Device Handbook '96, SPring-8.
- [17] Tong, X., M., et. al., J. Appl. Phys., Vol.78, NO.4, (1992) 2288-2297. 或いは Tong, X., M., 他 , 放射光 , Vol.5, No.3 (1992) 217 等 .
- [18] Shioya. T., et. al., Rev. Sci. Instrum., Vol.60, No.7(1989)1855-1858.
- [19] Koide, T., et. al., Rev. Sci. Instrum., Vol.60, No.7(1989)1877-1880.
- [20] Yamamoto, S., et. al., Rev. Sci. Instrum., Vol.63, No.1(1992)400-403.
- [21] Chen, Q., H., et. al., Rev. Sci. Instrum., Vol.63, No.1(1992)451-454.
- [22] DiGennaro, R. and T. Swain, Nucl. Instrum. & Methods, A291(1990)313-318.
- [23] Chang, J., et. al., Rev. Sci. Instrum., Vol.66, No.2(1995)1648-1650.
- [24] Nian, H., L., T., et. al., Rev. Sci. Instrum., Vol.66, No.2(1995)1735-1737.
- [25] Ruan, Y. and M. Meron, Rev. Sci. Instrum., Vol.66, No.2(1995)1768-1770.
- [26] Shu, D., et. al., Rev. Sci. Instrum., Vol.66, No.2(1995)1789-1791.
- [27] Shu, D., et. al., Rev. Sci. Instrum., Vol.66, No.2(1995)1792-1794.
- [28] 栄久晴他 , 放射光学会第 7 回年会 , (1994) 30.
- [29] 櫻井吉晴他 , 放射光学会第 7 回年会 (1994) 31.
- [30] Kuzay, T., M., Rev. Sci. Instrum., Vol.63, No.1(1992)468-472.
- [31] Takiya, T., et., al., will be published in SPring-8 Annual Report 1998.
- [32] Smither, R.K., Nucl. Instrum. and Methods, A291(1990)286-299.
- [33] Kuroda, M., et. al., J Synchrotron Rad., Vol.5, No.4, 1211-1214, (1998).

坪内為雄先生の逝去を悼みて

A tribute to the memory of the late Professor Tameo Tsubouchi

相原 利雄 (東北大学名誉教授)

Toshio AIHARA (Professor Emeritus of Tohoku University)

東北大学名誉教授 坪内為雄先生は、激動の明治・大正・昭和・平成の四代を生き抜かれ、1999年12月4日未明、心不全のため仙台の御自宅において93歳で召天されました。

先生は1906年(明治39年)、霊峰富士の雪解けが湧水となって街中を流れる静岡県三島市でお生まれになりました。そして旧制第一高等学校を経て、1932年(昭和7年)東北帝国大学工学部機械工学科を卒業され、同大学助手として工学部に勤務、1936年同助教授、1945年同教授に昇任され、1946年から定年退官の1969年まで高速力学研究所(現在の流体科学研究所)において機関器具研究部門を担当され、37年の長きにわたり東北大学に在職されました。

この間、同大学工学部教授、同大学院工学研究科指導教官も併任され、学術の研究と教育に多大の功績を上げられ、幾多の人材を世に送り出されました。更に1965年よりご退官までの4カ年にわたり、高速力学研究所長を併任され、同時に同大学評議員として、研究所ならびに東北大学の運営に行政手腕を発揮され、多大の貢献を果たされました。

1969年、東北大学を定年ご退官と同時に名誉教授の称号を授与され、続いて東北学院大学教授として13年の長きにわたり、教育と私学の振興発展に貢献されました。

この間、先生は第8期日本伝熱学会の会長(1969年)、並びに第47期日本機械学会の副会長(1969年)、同理事、評議員、東北支部長等の要職を歴任され、我が国の学術向上に尽力されました。

坪内先生の学術研究上の業績は、伝熱工学、内燃機関学、弾性学等の広範多岐にわたり、第二次大戦中はガスタービンやジェットエンジンの理論的研究を行い、当時未開発であったジェットエンジンの実用化に貢献されました。特に伝熱工学の分野においては、本邦における伝熱研究の先駆者として、極細

線、微粒子、円柱およびフィン付き管などの伝熱特性を明らかにされました。

それらのうち、極細線および微粒子の自然対流による熱伝達の研究は特に著名であり、昭和34年度日本機械学会賞を受賞されました。更に、物体形状によらぬ統一的な代表長さを定義し、自然・強制共存対流の熱伝達率について、各種流体に適用可能な広範な統一的実験式を導出された事は、よく知られています。1976年3月5日、先生の満70歳の古稀を記念して発刊された「坪内為雄名誉教授の学術上の業績」[東北大学高速力学研究所報告、42巻、380号、(1978)、村井 等、相原利雄、増田英俊]には、先生の研究業績の大半が集録されています。

これら学術研究と教育上の功績に対し、1976年には勲二等瑞宝章が授与され、1971年には日本機械学会の名誉員に推挙されました。一方、坪内先生は教壇の外にあっても、スポーツ、フォークダンス等の普及発展に多大の寄与を果たされ、体育功労者としても文部大臣、並びに宮城県よりそれぞれ表彰を受けておられます。

私が坪内為雄先生に初めてお目にかかったのは、1962年に東京で開催された日本機械学会の秋期講演大会であります。この時、先生は私の論文講演の指名討論を御担当下さり、それが御縁で、後年、先生が所長をしておられた東北大学高速力学研究所の助教授に採用して頂きました。

当時、先生は多数のご要職の合間を縫って、Gröber, Erk, Grigull の名著 *Wärmeübertragung* を加藤清雄先生と邦訳し、「熱伝達の基礎」として朝倉書店より出版されました。1966年、私が東北大学に赴任して2ヵ月後、仙台で初めて日本伝熱シンポジウムが開催されました。これが、日本伝熱研究会および日本伝熱学会の歴史を通じて、全講演発表を一室に会して行った最後のシンポジウムになりましたが、

先生は準備委員長として手腕を発揮され、成功に導かれました。

更に、定年退官まで数年を遺す慌ただしい中で、泉 亮太郎、一色尚次、宇佐見久雄、故大谷茂盛、故岡田克人、金丸 清、坪内為雄、西山賢次、峯 守正の諸先生、および私による共著書「熱交換器」を朝倉書店より編纂出版され（1968年）、好評を拍しました。

私が先生の膝下で研究教育に励んだのは真に短い期間でしたが、先生は多忙な時間を割いて、親しく実験手法、執筆・編集や学会運営のコツを教えて下さり、書物からは得られぬ貴重なものを学ぶ事が出来ました。明治生まれの先生は、非常に誇り高い反面、周りの者の面倒もよく見られました。退官される際は、坪内研究室の助手や技官、学生について、将来身が立つ様に各々の転出先を世話され、また秘書の仲人もされました。

また先生は折にふれ、青年時代からの苦労話や研究所長としての苦衷を洩らして下さいました。先生は、旧制第一高等学校在学中の1923年（大正12年）に東京の日本メソジスト牛込教会で洗礼を受けられ、以後、亡くなられる迄の77年間の長きにわたり、敬虔なクリスチャンであられました。一見厳めしい風貌にも拘わらず、温厚な気性であられたのは、深い信仰によるものと思われまふ。

しかし葬儀の折、先生が生前、賛美歌267番を愛唱された事を伺い、またその歌詞「……あくま世にみちて よし脅すとも、神のまことこそ わがうちにあれ。陰府の長よ ほえ猛りて せまりくるとも、主のさばきは 汝がうえにあり……」を知り、先生の受けられた御苦労が並々ならぬものであった事を悟り、胸が痛くなりました。私自身、今日まで幾多の苦難に遭遇しましたが、何とか乗り越えてこれたのは「最後は真理が勝つ」と言う坪内先生の教えがあったからだと感謝しています。

告別式は、12月7日に日本キリスト教団仙台五橋教会で、多くの会葬者に見守られつつしめやかに執り行われました。司式の小林嘉成牧師は、式辞の途中、熱いものが込み上げ、しばしば声を詰らせておられました。流れる様に進む葬儀を見なれて来た私には初めての経験です。この時、先生の信仰がいかに深く、永いものであったか伺い知りました。

夕刻、特に近しい方々と坪内家の「偲ぶ会」にお招き頂き、その席上、先生を最後まで自宅看護されたヘルパーさんと看護婦さんの話を伺い、更に感動を深めました。

坪内先生が先に触れた御苦労を乗り越え、学者として卓越した業績を上げる事ができたのは、常に笑みを絶やさぬ、優しく聡明な奥様のお蔭だと、私はかたく信じています。既に御高齢で、脚も耳もご不自由な奥様が献身的に先生を看護される姿が、看護婦さんやヘルパーさんの心を打った事は申す迄ありません。しかし真に慈愛に満ちた看護と奉仕の気持を彼女達から引き出したのは、ほかならぬ坪内先生御自身なのだ、彼女達は頬を濡らしながら語っていました。

先生は病に倒れられてから亡くなられる迄、実に7年もの間、床に臥したまま栄養の摂取も排泄も管を通して行い、意志の伝達もままたらぬ状態であったと伺いました。このような長く苦痛に満ちた状態にあっても、先生はそれを神の求められた事としてそのまま受け入れ、苦しみを外に洩らされなかったそうです。看護婦さんやヘルパーさんの言葉を借りれば、そのお姿は「人はこうして天に召されるのだ」と教えられて居る様で、彼女達は深く感動し、心の底から看護と奉仕をしたいと言う気持ちになったそうです。

この話を伺い、人は死に臨んで真の姿を見せ、師は最後まで教えを垂れて下さったと、深い感動に浸りました。先生のご逝去は、私どもにとって大きな悲しみではありますが、御自宅で最後まで優しい奥様の看護を受けられ、93歳の天寿を全うされた事を伺い、長年の病苦に堪えられた先生の不屈の精神と信仰、幸せな晩年に、深い敬意と安堵を覚えております。

翻って、いまや国立大学改革の嵐の中、高邁な識見と明敏な判断力、優れた指導力を備えられた坪内為雄先生を失った事は、真に痛惜の極みであります。しかし、後に続く方々は、先生の教訓を生かし、必ずや改革の実を挙げられる事と信じます。また坪内先生の門下生も、それぞれ社会にあって重要な役割を果し、先生の教えを実践して居ります。

坪内為雄先生、どうぞ、安らかに瞑目なさって下さい。

坪内為雄先生を思い浮かべて

In Memory of Professor Tameo Tsubouchi

増田 英俊 (東北大学名誉教授)

Hidetoshi MASUDA (Professor Emeritus of Tohoku University)

坪内為雄先生が平成 11 年 12 月 4 日、93 才の天寿を全うされ永い眠りに就かれた。7 年もの長い間病床に伏されていたので常に案じてはいたのだったが。

坪内先生が昭和 44 年に東北大学を定年で退官されるまでの 9 年半、私が師事していたときのことを振り返って、ここに先生のお人柄を思い浮かべてみたい。

私がある事情があって東北大学高速力学研究所(現流体科学研究所)に入所し、坪内先生の下で働くことになったのは、いまから約 40 年前の昭和 34 年 10 月のことであった。それまで私は世界一周航路に就いていた大型商船のエンジニアをしていた。エンジンの出力がどうの、また熱効率とか性能がどうのということに終始してきた。ところが研究所に入って状況が一変した。境界層とかヌセルト数、プラントル数といったキーワードがポンポンと頭に飛び込んできた。坪内先生が勉強しなさいと最初に持ってこられた論文が「極細線および微粒子からの自然対流による熱伝達」と「微粒子の強制対流による熱伝達(いずれも日本機械学会論文集に掲載されて間もない論文)、その他 2, 3 編であったと覚えている。すぐには内容が理解できなかつたけれども、読むほどになんてすばらしい論文なんだろうと驚嘆せざるをえなかつた。微粒子試片の実物を見れば錠剤のじんたんに似た形、いやもっと小さな粒(サーミスタ半導体)状のものであり、それを使っての近似球もしくは近似回転楕円体からの対流熱伝達の研究である。サーミスタの通電加熱だからヒータ内蔵は不必要であり、またそれ自体が高感度抵抗温度計を兼ねていること、近似球としてのサーミスタ微粒子だから一般の粒を代表していると言えること等々、試片だけ取り上げてアイディアの良さに感嘆させられた。しかし、それはほんの序の口、論文とはこういうふうに切り込んで、このようにまとめ上げるものとし

て実例を示されたような、独創性に満ちあふれた論文であった。上記の 2 論文のうち、前者(佐藤千之助茨城大学名誉教授と永倉喜一郎岩手大学名誉教授との共著)は発表の翌年昭和 35 年 4 月に第 2 回日本機械学会賞に輝いた論文である。以後、この 2 論文を珠玉の名品と仰ぎ、論文を作るとき、書くときの手本とした。

先生は研究室ではわりに口数の少ないお方であった。テーマをポツンとおっしゃられることが多く、それをどう料理するか、どこから手を付けていったらよいのかなどは一切指示されないことが多かった。坪内先生に仕えて初めて研究といえる仕事に携わったが、研究のやり方について、論文や本を渡されることはままあったが、言葉で教えてもらうことは極めてまれであった。したがって、初めのうちはなぜだろうと疑問に思うことが多かった。しかしそのうち、「研究とは自分で考えて切り開いていくもの」と暗に教えて下さっていることがよく分かるようになった。

坪内先生は私が申すまでもなく、本学会の前身である日本伝熱研究会の設立のために中心となって活動されたメンバーの一人であった。しかし、さかのぼって若かりし頃の先生に目を向けてみると、すでに昭和の初期に伝熱研究の日本におけるパイオニアの役を果たしておられたお方であった。先に述べた細線と微粒子の熱伝達の研究の先をもう少しやっごらんと言われたので、関連文献を探していくうちに、間もなくたどり着いたのが先生の白金細線を使用した自由対流と強制対流による熱伝達の 2 論文であった。いずれもある別な目的で取り組まれた研究ではあるが、それぞれを昭和 10 年の日本機械学会誌と昭和 15 年の応用物理に発表されていた。先生の大学(東北帝国大学)のご卒業が昭和 7 年であるから、いかに若い頃から当時とすれば特殊といえる伝

熱研究に関心を持たれていたかが伺えよう。その当時の伝熱という専門分野の研究者は日本では数えるほどしかいなかったのではと想像されるので、さらにまた、高性能の電子計測機器の出回り始めた昭和30年代に、改めて同じ種類のデータを取り直してみても、ほとんど変わりのない精度の良さに舌を巻かざるをえなかった。

昭和41年5月、第3回日本伝熱シンポジウムが坪内先生を準備委員長として仙台で開催された。発表論文52編、1室3日間というスケジュールで、それこそ熱のこもった真剣な討論が繰り広げられた。先生は当時は高速力学研究所長の身で多忙な毎日を送られていた。にもかかわらず会の準備と運営のため全力を尽くされ、終了時には多くの参加者達から絶賛ともいえる好評を博した。このときほど、先生の“伝熱”にかけるひたむきな情熱をひしひしと感じたことはなかった。その後もたゆまず日本伝熱研究会の発展に尽くされ、昭和44年度第8期の会長に就任された。なお、先生は昭和40年4月に上記のように研究所長になられたが、以後ご退官まで、こんな面もお持ちだったのかと思われるような八面六臂のご活躍をなされた。

先生の告別式は12月7日、仙台駅から徒歩で10分ほどの位置にある仙台五橋教会（メソジスト教会）でおごそかに行われた。会葬には礼拝堂の外のロビーさえいっぱいになるほど大勢の人々が来られ先生に別れを告げた。式辞を述べられた牧師さんのお話しが特に印象に残った。お話しによると、先生は旧制一高時代にすでに受洗された、昭和3年の春仙

台の地に来られるとすぐ当教会を訪れ、幹事を引き受けるが間もなく代表者となって牧師を補佐し教会のために献身的に尽くされた、奥様とは教会で知り合われ結ばれた、とのことである。このことから先生のお人柄の一端が伺えた。

先生はわれわれが研究結果をまとめて報告にいつでも、それで良いとか未だ足りないとかはほとんど言われなかった。結果はどうだったかと聞かれることも余りなかった。ただ、われわれの言うことをよく聞いて下さった。研究していることについて、言葉には出されなくともよく見守っていて下さった。一言で言うと優しい寛容なお方であった。研究室は少人数で定年退官されるときでも5、6人だったが、いつでも、誰に対しても優しく言葉を返してくれたので先生を慕う気持ちは皆同じだったと思う。退官されてから脳動脈硬化で病床に就かれるまで、相原利雄教授(当時)とよくお宅を訪ねた。そのとき、いつも「心配なことがあったらなんでも話していきなさい」と優しくおっしゃられたのが、いまでも頭から離れない。また奥様と一緒にられるその時は常に幸福そうだった。

当時のことを思い出そうとすると余りにも多くのことが頭をよぎって止まるところを知らない。上述はその一片に過ぎない。書き尽くせぬ慈愛にあふれたお方だった。晩年に奥様とご家族の手厚い看護を受けられて、いま先生は天国で微笑んでおられるかも知れない。奥様をはじめご遺族の方々に幸あれと心からお祈りする。

坪内先生の思い出（第2回国際伝熱会議）

(Memories of Prof. TSUBOUCHI at the 1961-62 International
Heat Transfer Conference, Boulder, Colorado)

宇佐見 久雄（名誉会員）

Hisao USAMI (Honorary member)

昨年12月4日、大学卒業後の昭和26年から29年までの3年間東北大学高速力学研究所で助手としてご指導を頂いた坪内為雄先生が93歳の天寿を全うされご逝去になった。先生には助手としてご指導頂いただけではなく私ども夫婦の仲人でもあり残念でならない。葬儀の行われた仙台市の五橋教会は、先生の教会でもあり46年前に坪内先生のお世話で私どもの結婚式を行った思い出の教会でもある。

私は先生に3年間御指導を頂いた後、敗戦後禁止されていた航空の仕事が再開出来るということで宇都宮の富士重工航空機工場へ入社した。幸い、日本で最初のジェット機であるT-1の設計に携わり、しかもこれも日本で最初の空調及び与圧システムの設計を担当し、この仕事の熱計算にご指導頂いた熱伝達の実験と経験を十分に活用する事が出来た。初飛行も無事に終わり1段落した昭和36年(1961年)に、先生のご指導を得てその後の空調関係の開発の検討をするという理由でコロラド大学で開かれた国際伝熱会議に参加する事に会社の許可が得られ、図々しくも通訳を兼ねてお供をさせて頂くことになった。

この会議に出発したのは8月25日で、伝熱会議終了後アメリカ各地の大学、企業を訪れ、合間に観光もして帰国したのは坪内先生が10月3日、私は1日遅れて10月4日という約40日間のアメリカ旅行であった。

デンバーには8月27日の日曜日に到着し、ロッキー山麓のボールダー市(Boulder)にあるコロラド大学の寮に入った。会議は8月28日から9月1日迄で、日本からの参加者は、西脇仁一、橘藤雄、坪内為雄、水科篤郎、森康夫の諸先生という歴代の伝熱研究会の会長を勤められた方々で、その他ミネソタ大学で研究をされていた北大の石黒亮二先生がご夫妻でおいでになり、東芝の福井資夫さん、運研におられた三輪さん等で私などは一番若輩であった。この会議については、森先生が翌年の機械学会誌に

報告されている。

会議の進行は、関連のある論文を集めて一人のリポーターが纏めて報告する形式で、翌年にはロンドンで引き続き討論会(Discussions)が行われ、内容は「Proceedings of the 1961-62 International Heat Transfer Conference」及び「Discussions International Development in Heat Transfer」としてASMEから発行されている。

坪内先生の論文は、私の後に助手を勤められ茨城大学に移られた佐藤千之助さんとの共著で、セミナーを用いて実験的に求めた自然及び強制対流共存場での微粒子の熱伝達「Heat Transfer of Particles in the domain where Natural and Forced Convection co-exist」であった。リポーターの発表は大学の大講堂で行われた。

会議の合間にはパーティーや有名な観光地のエステス・パークへのバス旅行などもあり、会議に参加したアメリカ人達が、夜遅くまでパーティーで話し込んでいても次の日に学内のカフェテリアでの朝食に元気に出て来るエネルギーには感心したものである。

この間に東大へ交換教授で来ておられたミネソタ大学(University of Minnesota)のハートネット教授(J. P. Hartnett)、伝熱会議の事務局を担当されていたI.I.T.(Illinois Institute of Technology)のケジオス教授(E. P. Kezios)、それに今でも時々日本においてになるペンシルバニア(Carl V. S. Patterson Professor Emeritus)大学名誉教授で当時ミシガン大学(The University of Michigan)のチャーチル教授(S. W. Churchill)及びコンパクト熱交換器で有名なスタンフォード大学(Stanford University)のロンドン教授(A. L. London)を会議終了後訪問し研究室をご案内して頂いた。

40年前のボールダーは静かなこじんまりとした大学町で、町の片隅に蒸気機関車のある小さな公園が

あり、どこを歩いてもゴミを捨てるのが恥ずかしいくらい清潔な町であった。会議の合間に我々日本人グループで町を散歩したり、食事をしたりアメリカの田舎町を楽しむ事が出来た。考えてみれば1961年はアイゼンハウアー政権の最後の年で、次のケネディー大統領になる直前で、ベトナム戦争前の古き良きアメリカの最後の時代であったのかもしれない。とにかく何処へ行っても町は綺麗で、車をロックしないで駐車しておいても心配のない時代であった。

大学の訪問で記憶に残っているのは、シカゴでI.I.T.のケジオス教授のご自宅に招待して頂いた時に、坪内先生が教授の小さなお坊ちゃんをお膝に抱かれて喜んでおられた事である。またミネソタ大学ではハートネット教授の案内で珍しい食事をしようと言う事でピザを初めて食べたことも印象的であった。

昭和36年と言うと戦後16年は経っていたがまだ海外へ出かけるというのは特別扱いで、1ドルは360円、国際線もプロペラ機からジェットに代わって間も無い頃で、アメリカの国内線はまだ殆どがプロペラ機であった。渡航費用も極力切り詰める必要があり、先生のご推薦で仙台のYMCAの会員となって、ミネアポリスではYMCAに2泊したり、伝熱会議の間は大学の寮に入り、デトロイトではミシガン大学訪問の間、私の友人宅にホーム・ステイをしたり、ボストンとニューヨークでは先生のお知り合いの方のご紹介で出来るだけ安いホテルを選び費用の節約に努力したりしたものである。もっともこの為にニューヨークではデトロイトのキャプテラー工場を日帰りで訪問してホテルへ帰って見たら泥棒に入られて荷物が全部こじ開けられていたというような珍しい経験までしてしまった。被害は先生のトランジスター・ラジオを盗まれただけで済んだがこれは最大のショックであった。

仙台では昭和30年頃までは、アメリカの進駐軍も多くいたし、東北学院、宮城学院のようなミッション・スクールもあったので、アメリカへ行く事はそれ程違和感を感じていない状態であったが、先生も私も海外旅行は初めてで、羽田では皆様のお見送りを受けた。その中には当時機械学会の「熱及び熱力学部門委員会」の委員長をしておられた甲藤先生がおられたのが写真に写っている。

アメリカでの最初の都市はサン・フランシスコであったが、今と違ってノン・ストップで直行は出来ず、ホノルルで給油が必要であった。更に満席の時は、ホノルルの前にウェーク島でもう一度給油が必要で、私共の日航のDC-8ジェット旅客機もウェーク島に着陸して給油を受けた。全く僅かな米軍施設以外何も無い島で戦争中に沈没した日本の輸送船の残骸が島の周りに見えていた。ホノルルで通関のチェックを受け一応私の英語が通じたので一安心であった。

8月25日午前9時の離陸であったが、ホノルル経由でも同じ25日の早朝にサン・フランシスコに到着した。仙台で東北学院の先生をしていたジム・メルカートさんがカルフォルニア大学のパークレーのキャンパスに住んでいたのがキャンパスの中を案内してもらった。仙台で結婚した奥様が「ここ(キャンパスの中)は戸締りをしなくても安全でよいところですよ。」とおっしゃっていたが、僅か10年と経たないうちにベトナム反戦の騒ぎで同じキャンパスが荒れ果ててしまったとは当時は想像も出来なかったことである。

先生は熱心なクリスチャンで会議の前後に先生のお知り合いのデンバーにおられた牧師さんに空港からコロラド大学までの移動を始め、近郊のご案内まで頂き大変お世話になったことが記憶に残っている。また先生はご趣味も豊富で、特にテニスを楽しまれ、毎日のように研究室からテニスコートへお出かけになっていたお姿が今でも目に浮かぶのである。アメリカでは教会関係の他に先生のテニス仲間に大変お世話になった。ニューヨークでは東北大の金属材料研究所においてになった女性にホテルの世話から市内の案内までして頂き、ボストンのM.I.T.では、当時金属材料研究所の助教授で、後に豊田中央研究所の所長になられた先生のテニス仲間の小松さんに、M.I.T.の原子炉やその他の研究室を案内して頂いた。

研究室では日常ご指導を頂いてはいたが、私にとっては40日近くご一緒に過ごすことが出来たのは今から考えると大変幸せな時であった。お役に立ったかどうかは今ももう何うすべも無くなってしまったが、先生のお後の海外の学会への御出張の準備になったのではないかと思っている。

インタビュー「Joint Research グループリーダーに聞く」 連載開始にあたって

Preface to “Interviewing a group leader of joint research”

川口靖夫（工業技術院、機械技術研究所）

Yasuo KAWAGUCHI (Mechanical Engineering Laboratory, AIST MITI)

1. はじめに

省エネルギーや新規産業創設といった、社会への貢献度の高い研究開発が求められる昨今、大学・企業という組織の枠を越えた共同研究への期待が高まっています。理工系大学ではこれまで蓄積した基礎研究の展開先を求め、同時に研究に要する費用を外部に仰ごうとする動きがあります。これは社会と対話し、成果が社会に活かされることを指向する工学の自然な姿ということができるでしょう。

企業では秘密を要する基幹部分以外の研究開発をアウトソーシングすることによって、研究開発の効率化を進めようとする流れがあります。一方長引く不況下で、先端技術をコアとしたベンチャー的企業の出現が望まれています。革新的な発想は異文化を背景としたメンバーの真剣な討論や共同作業によって生まれるものではないでしょうか。

これまでも大学・企業にこうした動機があり、一定の成果は挙がっていましたが、最近共同研究をサポートする予算制度が整備され、大学、企業、国との新しい連携が急速に進もうとしています。

伝熱学会会員の研究はエネルギー問題や新規産業創出に貢献する熱プロセスに深く関係しており、先に述べた流れに率先して共同研究にとりくんでいらっしゃる方がいます。一方ではアイデアをまとめ、これから共同研究を計画される会員の方もいるものと思います。そこで、「Joint Researchグループリーダーに聞く」と題したこの連載では、共同研究されたご経験のあるグループの代表者に、研究の概要、提案のこつ、新たな連携に伴うメリット等についてお考えになるか、といったお話をさせていただきます。

通産省では新エネルギー・産業技術総合開発機構（以下NEDOと略）提案公募事業が平成7年度から開始され、別表のように500件近くの研究テーマが採択されています。この連載では最初にこの制度を取りあげ、毎号2名程度のリーダーにお会いすること

にしました。どのリーダーも快くインタビューに応じてくださり、それぞれ個性のある、幅広いお話を伺うことができました。

2. NEDO 提案公募事業について

この事業は将来の産業技術シーズの創造を目的として、大学、国立研究所、企業等が連携して行う独創的な研究開発テーマを広く公募することにより、新規産業の創出、経済フロンティアの拡大、エネルギーの安定供給の確保等を促進することを狙いとした制度です。主に、産業科学技術、エネルギー・環境技術、中小企業創造基盤技術の3分野を対象としています。応募の要件、開発費と期間、テーマ選定方式、研究成果等はホームページ <http://www.nedo.go.jp> または新規産業創造型提案公募室 03-5952-0071 へ。

11年度の実績では、11年2月1日に公募開始、3月8日締め切り、「産業科学技術分野」と「エネルギー・環境技術分野」の2分野に249件と131件の提案が寄せられ、それぞれ18件、20件が採択されました。

「エネルギー・環境技術分野」の採択プロジェクト20件のうち、研究代表者所属機関は大学13件、国立研1件、企業6件となっており、また連携する共同企業体としては企業20社を含め36機関が参加して、幅広い協力関係が形作られていることを伺わせます。

年度	採択数
7年度	216件
8年度	69件
9年度	45件
10年度	129件
11年度	38件

提案公募型研究採択実績

Joint Research グループリーダーに聞く

1. 神戸大学応用化学科、薄井洋基教授

*Interviewing a group leader of joint research,
1. Prof. Hiromoto USUI of Kobe University*

聞き手：川口靖夫（機技研）

Interviewer: Yasuo KAWAGUCHI (MEL)

研究課題：界面活性剤による抵抗低減技術を利用した地域冷暖房システムの最適設計
制度：NEDO 新規産業創造型提案公募事業，エネルギー・環境技術分野
期間：H10年～11年度
共同相手先：大阪ガス（株），（株）大林組，ライオン（株）

まず，ご研究の概要について伺います。

水溶性ポリマーを水に少量添加すると，高いレイノルズ数まで流れを層流的な状態に保つことができ，トムズ効果として知られています。ポリマーは耐久性の点で問題があるので，最近15年ほどは界面活性剤を使った研究が主流になっています。私たちは図1のように棒状ミセルを含む陽イオン性界面活性剤を地域冷暖房の循環水に添加し，管内で乱流抑制現象を起こさせてポンプ動力を削減し，省エネルギーを行うという応用をめざしています。図2は管内流れの流量と圧力との関係を示したもので，通常の水なら乱流になってしまう範囲で大きな抵抗低減効果が得られます。今回のジョイント研究はNEDOのサポートを受け，こうしたケースでの化学物質から配管網までを含む設計最適化を目標に，3社との共同で進めているものです。

この研究の発端はどういうものだったのでしょうか。約4半世紀前，私が京大化学工学科，水科先生のもとで博士論文に取り組んでいたところに遡ります。当時粘弾性液体の中ではホットフィルム出力がおかしくなることが知られていて，非ニュートン流体の流れでの特殊現象を調べていたのですが，そうこうするうち管内の抵抗低減メカニズムと熱移動現象に関心が移ってきました。博士課程の途中でテーマを変えるのは大変だったのですが，当時珍しかったLDVを自作したり，光学窓を工夫して実験し，渦拡散係数に対するモデルを提案することができました。

それがよく引用される Mizushima and Usui, *Physics of Fluids* 20-10 (1976) S100-108 の論文になったわけですね。その後の展開は。80年代に米国のベンチャー企業がアラスカの原油パイプラインにポリマーを添加して，出荷量増強に成功したことが伝えられました。様々な応用が検討され，界面活性剤の利用にも研究者の関心が向くようになりました。地域暖房への応用を目指したドイツ政府のプロジェクトが始まったのもこの頃のことです。地域暖房用界面活性剤はダウ・ケミカルやヘキストによって製品化されました。84年にはドイツ，EssenでのIUTAMシンポジウム，89年にはスイス，Davosで国際抵抗低減シンポジウムが開かれました。私の研究室でも基礎研究を続けていましたので（文献[1]から[3]），こうした動きについていくことができました。

さてジョイント研究のコツについて伺います。会社へのアプローチはどのように。

この件の発端は，並行して進めていた石炭スラリー用添加剤の開発について，日本触媒，ライオン，花王といった各社の研究者と面識を持ったことから始まります。学会発表をしたあとで会社の研究者が質問に来ることがありますね。向こうには抱えている問題があるはずなので，私は相手からもそれを教えてもらうことにしています。そうしていると徐々に仲良くなり，協力関係ができてきます。

なるほど，協力して問題解決にあたろうという姿勢が鍵になるわけですね。今回のジョイント研究の分担とそれぞれの目標は。ライオンは最適な分子，大阪ガスは熱供給システム全体の設計，大林組はこの液体に使う熱交換器を担当し，それぞれ[4]から[6]のような成果を得ました。最後の発表は円管内面に粗さをつけて，界面活性剤水溶液の伝熱促進を試みたものです。

Drag Reduction Effectiveness : 30% Reduction

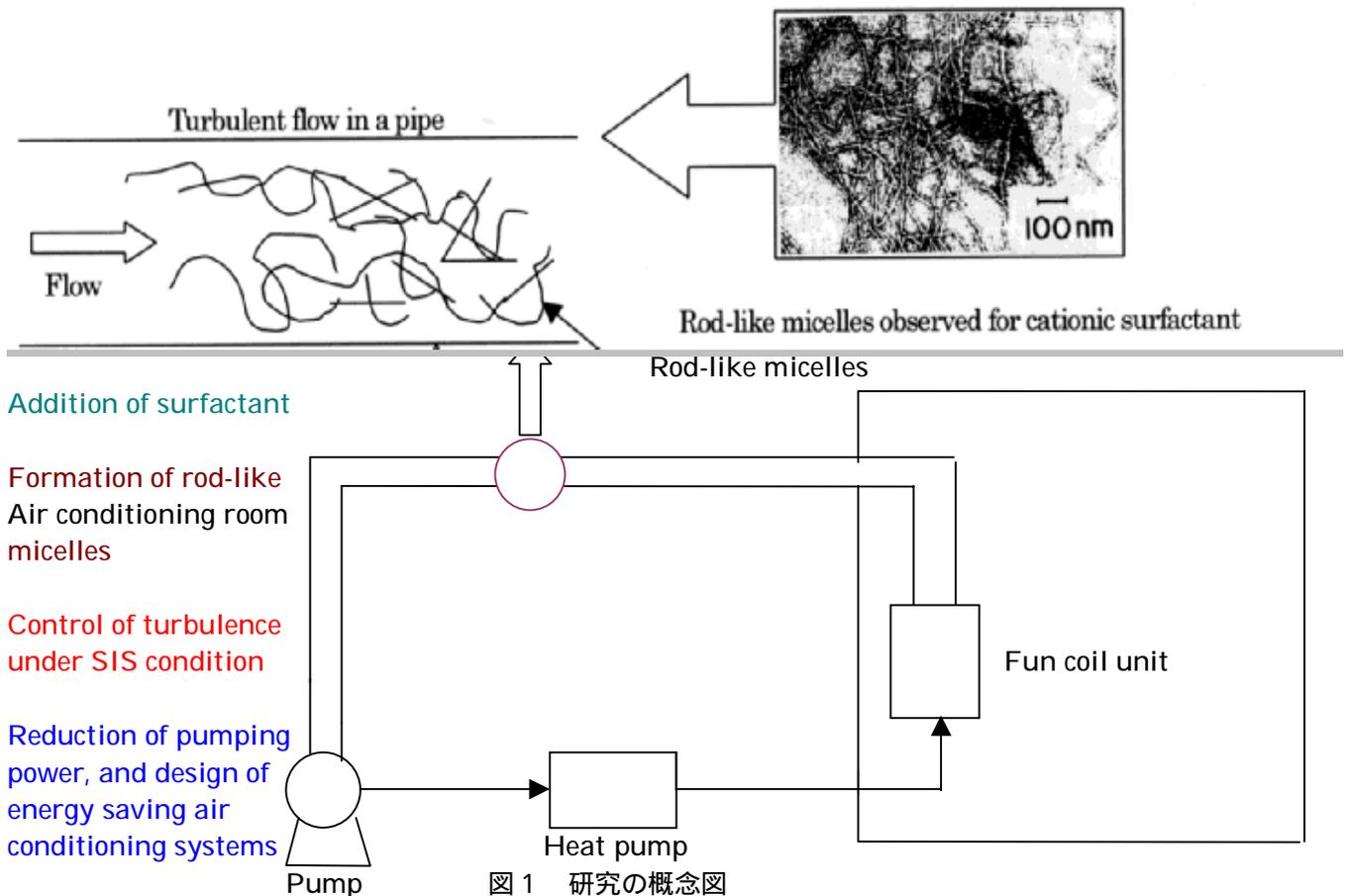


図1 研究の概念図

- 先ほどのお話では、界面活性剤は製品化までされているそうですね。これを越えるものを無数の候補から探すにはどういう方法でやるのでしょうか。確かに、あまりにも範囲を広げすぎると結論がまとまらないことになります。そこで今回は4級アンモニウム塩の系統に限定し、この中では何が良いかという答えを2年弱という短い期間で出そうとしています。この物質ではエソカードO-12というものが良いことが前からわかっており、清水建設でも使い初めていますが、伝熱性能も考慮するとまた違った結果がでてきそうです。私の研究室では別途アミン系の界面活性剤も検討していて、環境性の点からはこちらも有望と思います。

この技術が応用されるときは、実はすでに応用は始まっています。私が山口大学に居た時期に、先行してビルの程度の大きさでは実証をしていました。その成果から現地でベンチャー企業が起り、抵抗低減用界面活性剤はすでに国内

30ヶ所程度のビルに使用されています。これらは小規模なものですが、私の方ではスケールアップ法についても検討していましたので、地域暖房の設計にも対応できる自信はありました。大阪では万博を契機に建設された地域暖房システムが千里ニュータウンで稼働しています。これが日本初のシステムですが老朽化しており、建て替えの時期にきています。今回開発した技術が新システムに採用されると嬉しいですね。

NEDO、大学、企業と異なる組織のジョイントとなりましたが、困ったことなどは。格別ありませんでした。大学に対しては受託研究という形になるので予算の使い勝手が悪いわけでもありません。報告書や会計監査資料のまとめも慣れたことですから。企業も経験のあるところは困らなかったようですが、研究期間を私の方で短く設定したために、備品の扱いでとまどったところもあるようです。

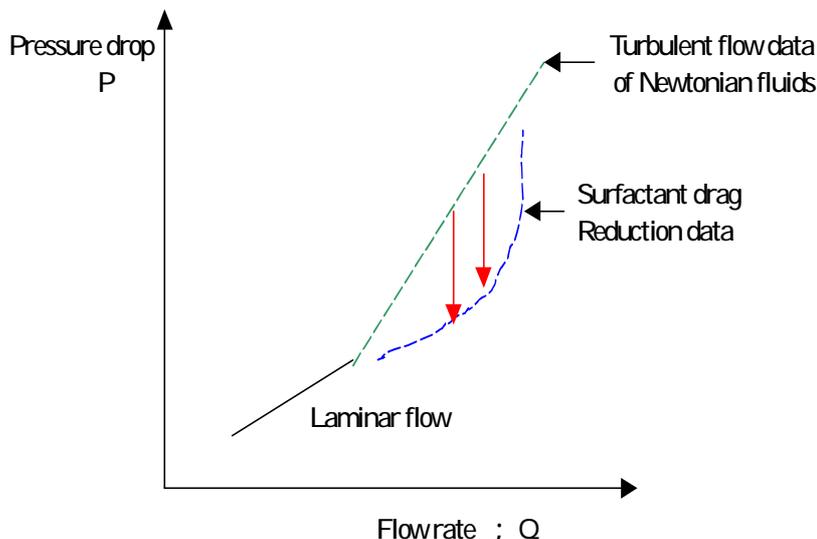


図2 圧力損失と流量の関係 ニュートン流体と抵抗低減をともなう界面活性剤溶液との比較

大学当局のサポートやプロジェクト評価はどうなっているのでしょうか。

大学側ではプロジェクトを立て、ジョイント研究に対応することになりますが、神戸大学はプロジェクト研究支援に積極的です。その一例はオープンラボの仕組みにも見られます。新築の建物を使い始める場合、重点的なプロジェクトを持っているチームが優先権を持ちます。また種々の要因でスペースを再調整する場合にも、やはりプロジェクトのあるなしが考慮されます。一方では大学独自でプロジェクトを評価する仕組みもあり、5年毎の見直しで打ち切りが決まることもあり得ます。

最後にひとつ伺います。NEDOへ研究提案し、競争を勝ち抜いてこれが採択されたわけですが、成功の秘訣は。

ひとつには、これまでの積み上げがあり、目立つ国際会議には発表をしていたことがあります。一步でもいいから他のグループの先をいっている必要があります。次に研究の効果を具体的に示すことが大事です。私たちも、地球環境に及ぼす影響を説明する必要がありました。そこで界面活性剤を添加してどれだけポンプ動力が削減できるか、実際どれだけ電

力代が削減できるかを計算していきました。現在国内で150ヶ所の地域冷暖房システムが稼働していますが、省エネ効果は全体でどれだけかについて詳しい数字をつみかさねて相手を説得する努力をしました。

大変参考になるお話をありがとうございました。
(99年10月4日)

参考文献

- [1] Usui, H. and Miura, K., Proc. PPS Int. Conf. on Rheology and Polymer Processing, Seoul, (1990) 76.
- [2] 薄井洋基ら, 化学工学論文集, 21 (1995) 248
- [3] Usui, H., Itoh, T. and Saeki, T., Rheol. Acta, 37 (1998) 122.
- [4] Yamauchi M., et al., Proc. 1999 AIChE Annual Meeting, Paper No.128-d (1999).
- [5] Onojima, H., et al., Proc. 1999 AIChE Annual Meeting, Paper No.127-u (1999).
- [6] Kishimoto, A., et al., Proc. 1999 AIChE Annual Meeting, Paper No.127-m (1999).

Joint Research グループリーダーに聞く

2. 岡山大学大学院自然科学研究科，稲葉英男教授

Interviewing a group leader of joint research,
2. Prof. Hideo INABA of Okayama University

聞き手：川口靖夫（機技研）

Interviewer: Yasuo KAWAGUCHI (MEL)

研究課題：脱フロンに向けての次世代環境調和型
有機繊維系吸着剤の開発に関する研究
制度：NEDO 提案公募型・重点分野研究開発，新
材料技術分野
期間：H7年～9年度
共同相手先：日本エクスラン工業（株）

有機繊維系吸着剤とは何でしょう。その特徴は、
アクリル繊維の一部を図1のように改質し、水蒸気
吸着サイト（COONa）をつけたものです（図2）。
紙おむつの中身は、軽くて大量の水を吸い取りますが、
そのさらに発展した物質を想像して下さい。従来シリカゲルやゼオライトといった無機系の材料が
吸着剤として使われていました。新しい材料はこれ
ら無機系材料より水蒸気をよく吸着し、しかも低温
での性能が良く、耐久性や加工性にも優れています。

何に使えるのですか。

水蒸気を吸う材料なので、部屋の調湿、デシカント
クーリング、また吸着に伴う吸熱・発熱を利用して
吸着式冷凍機などに使えます。家庭空調排熱を利用
した高温冷房用減湿器、家庭や自動車の排熱を利用
するデシカントクーリング、コジェネ排熱利用吸着
式冷凍機、化学プロセスの減湿、腐食防止用減湿器
といった様々な製品に活かされると夢を描いています。

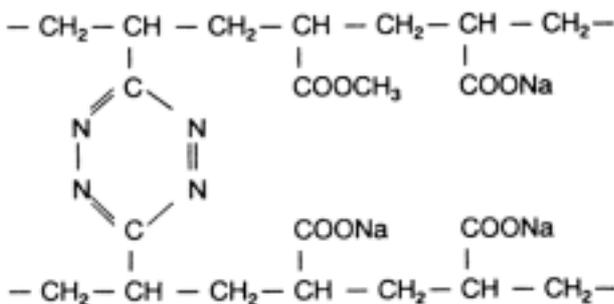


図1 有機繊維系吸着剤の化学構造

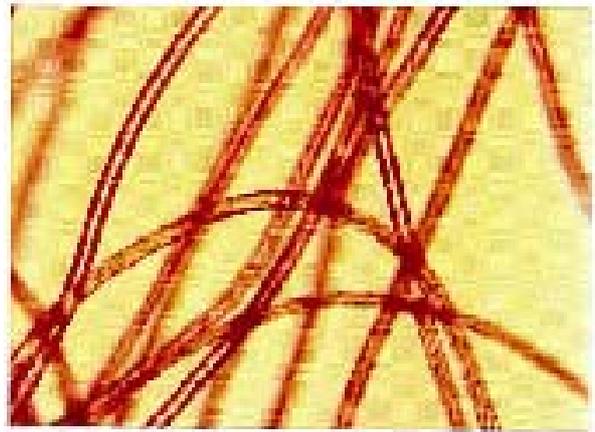


図2 有機繊維系吸着剤の外観

夏の閉めきった部屋はむっとしますね。体感温度を
下げたいのですが、人は温度が低いばかりではなく、
湿度が低くても涼しく感じるものです。今までクー
ラーと言えばフロンを使った圧縮式のものを思い浮
かべていましたが、温度レベルの低い低品位の熱を
利用し、空調にマッチした冷熱を発生させる機器は
エネルギーの有効利用や脱フロン化の観点から魅力
的です。

マーケットはありそうですか。

米国エネルギー省では、2010年までに全米の空調需
要の35%をデシカントクーリングで賄おうという目
標があります。日本での現在の普及は0なので、今
後急速な伸びが期待できます。その背景となるのは
低質エネルギーの利用を進めることによる省エネル
ギー、脱フロン、自然冷媒利用による環境問題対応
といった大きな流れです。低質のエネルギーを利用
して空調を行うといった技術は、日本が率先して開
発すべきで、私が通産省の「エコエネルギー都市」プ
ロジェクトなどに期待しているのもそうした理由で
す。

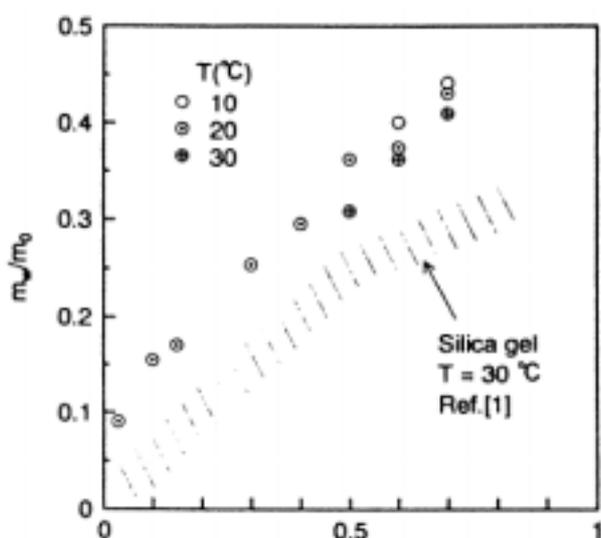


図3 吸着等温線

ありがとうございます。この研究のブレークスルーはどんなところにありましたか。

まず材料開発が挙げられます。繊維に着ける吸着サイトとなる物質の特定、架橋点の設定が鍵でしたが、材料の完成度はかなり高いものになりました。図3は吸着等温線を示したもので、低温でもシリカゲルより優れた特性をもつことがわかります。さらに熱交換方式などシステム化技術があります。研究期間中に一応の完成を見ましたが [1], [2], さらに吸着剤を粉末化し、流動層で伝熱を行わせる形式の機器を現在開発中です。

「共同研究の提案のこつ」を伺いたいのですが、基礎となるアイデアには新たな発想が含まれていて、産業界も興味を示す内容であることが重要です。「従来の技術の改良」ではダメ、基礎的現象の解明や新材料の開発、新たな利用システムの構築につながる良いアイデアである必要があります。また共同研究をする意義を考えると、企業単独では実行しづらく、適切な分担ができる研究内容であれば説明しやすくなります。

提案書をまとめる段階では、材料そのものの新しさ、従来にない利用システムが構築できることをアピールしました。また専門家の評価に耐えるには、材料の基礎データの測定法、性能の算出法、利用システムに新たな提案があることに力点を置いて説明しました。

この共同研究を始めて、気づいたことは？

大学がシーズ、企業がマーケット情報などニーズを持っていて、これらを融合するといったスタイルの共同研究がよくあります。このケースではそれが逆で、企業が「紙おむつ」の材料開発で培った優れた技術を持っていて、材料を試作しており、その使い方を模索していました。私の方で熱システムへの応用を考え、共同研究につなげていきました。企業から学んだことは、材料メーカーの開発手法やその展開法ですね。企業の開発スピードの速いことは驚きで、結果の見極め方も参考になりました。大学へのメリットは、企業人との交流が学生の教育に役だったこと。企業の持っている設備が使えたこともメリットでした。

共同研究のやり方について、今後の課題は。

この制度ではやや研究期間が短いと感じました。研究の途上で新たな発見があり、力点の置き方が変わってくることはよくあることですが、今回の制度ではそれがある程度許容されたようで、その点には満足しています。企業との共同開発にまつわる一般的な問題ですが、アイデアを出した人の権利をいかに守るか、つまり特許の帰属は重要なポイントです。大学では今まできちんとした特許政策がありませんでしたが、研究室と企業との間に立って特許管理をする組織が必要であると痛感しており、大学でも討議を進めているところです。

先生はかなり応用に重きをおいた研究をなさっています。これからの大学の使命はどうなっていくでしょう。

技術が社会に役立つことは重要です。しかしあまりに即物的なものばかりに傾くのも良くないと思います。「10年後、20年後になるかもしれないが、最終的には役に立つ」位のところが適当でしょうか。一方で学術論文には「わからないものが、これでわかるようになった」という発見が重要で、それをする人もいなくてはなりません。純粋に学問を目指す先生をも擁していることが大学の強みであると思います。国立大学の独立法人化が取りざたされていますが、応用・基礎どちらの方針をとるにせよ、特徴ある研究をやっている大学が生き残る時代になるでしょう。

省エネルギー技術はともすると成熟と見なされがちですが、

「エネルギー関係で良い開発課題がない」という発言は良く聞くことで、関係者には閉塞感が強いように見受けられます。例えば家庭用クーラーはエネルギーを大量に消費していますが、従来の製品はすでに価格競争の段階に入っていて、そのままの形式では大きな性能向上を期待できません。ニクロム線式の電気炊飯器が、電磁誘導によるIH式に変わりましたが、そうした根本的な変化がエネルギー機器にも出てこないものでしょうか。考えればいくらかでも良いアイデアは出てくる、と私は思います。

良いアイデアを得るためにどのようなことを心がけていらっしゃるでしょうか。

まず「何をやるべきか」、「ではどういう方法をとったら良いのか」という問題意識を持ち続けるべきです。あまり狭いところに入ってあがいていても仕方

ないので、広く見渡す必要があります。企業の人とコンタクトして話をするのは重要です。大学では現象解明に重きを置きがちですが、企業の場合、技術開発の結果は商品として世の中に出なければなりませんので、また違った視点から問題を見ることができます。私の場合は、詰めた討論をしたあと、頭の「たが」がはずれた状態で雑談をしているときに、良い解決法が浮かんでくることがあります。

重要なヒントを、ありがとうございました。

(99年12月17日)

参考文献

- [1] 稲葉英男ら, 機論, B編 65-639 (1999) 3777.
- [2] INABA, H., Thermal Science and Engineering 6-1(1998) 11.

『伝熱シンポジウム「気になる研究」沸騰関連』 についてのコメント

Comments on

“Stimulating Studies in 36th National Heat Transfer Symposium, Boiling”

永井 二郎 (福井大学)

Niroh NAGAI (Fukui University)

1. はじめに

本誌編集部会委員のある先生から、「標記の内容で執筆しませんか？」と依頼を受けまして、このように記事を書くことになりました。本誌が、インターネット上のチャットのように、より気軽により活発に伝熱界の意見交流の場となることも期待して、以下に思いつくままコメントを述べます。

2. 「気になる研究」の内容

「伝熱」1999年7月号P.19に、九州大学の吉田先生が、伝熱シンポの沸騰関連で“気になった”研究発表についてコメントされています。その中で、工学院大学の竹先生「膜沸騰蒸気膜崩壊条件」に関する研究発表について重点的に意見を述べられています。詳細は、このコメントと竹先生の講演論文を参照して頂くとして、その竹先生のコメントの要旨を私なりにまとめると、

- (1) この研究で測定されている“接触角”は、厳密に言えば、固気液の表面エネルギー等から定まる接触角とは違うかもしれないが、
- (2) 何らかの物理量で蒸気膜崩壊条件を整理され得るのならば、実用的に(工学的に)大変有用な成果であり、また、そのような研究スタンスは工学者として重要ではないか。

ということになりました。そこで、上記(1)、(2)の2点に対して、私の考えを述べたいと思います。

3. 沸騰における濡れ性評価

伝熱シンポでは、竹先生の“接触角”について、測定の精度や手法に対する疑問と“接触角”という名称に対する疑問が出されていたと記憶しています。膜沸騰蒸気膜の上方から衝突噴流を流したときの固気液界面先端と過熱面のなす角度を測定されている訳ですので、この“接触角”は前進接触角と呼んで問題無いと思います。

ただ私は(全く説得力が無いのですが)沸騰面の濡れ性評価指標として接触角を用いることに、何か

し不安や怪しさを感じています。例えば、接触角とMHF点温度との間にきれいな相関関係があったとしても、どのような現象がMHF点で起きていて、接触角はどのような現象とからんでいるのでしょうか？ 既存核の活性化(沸騰核生成)やCHFと接触角との関係についても、具体的にどのような現象がからんでいるのでしょうか？ 接触角という指標は、何かその場しのぎのような気がしてなりません。

では、他に何かすばらしい指標があるのかと聞かれると答えに詰まるのですが、例えば、東大の庄司先生は、“機論,58-550(1992), pp.1853-1859.”に熱力学的意味のはっきりした2つのパラメータを提案されています。ご参照下さい。

4. 工学者としての研究スタンス

ある何らかの工学上の問題、例えば「蒸気膜崩壊条件を知りたい」ときに、物理的な意味がはっきりしているパラメータのみを用い、緻密なモデルが構築されれば、それは文句の付け所が無いように思われます。しかし、それがもし非常に難解なものであったり、他の人が応用しようとしてもどうしていいのか分からないものであると、実際には役に立たないこととなります。それで良いのか？ という話についてですが、私は、緻密な研究の方向と、(曖昧さは多少あっても)すぐに使えそうな形で成果を示す研究と、両方のアプローチが大切だと考えます。この2つのアプローチは、ある場合は一致するでしょうし、ある場合は(致し方なく)別々の研究となると感じます。

こんなことは、私のような若造が言っても重みがありませんが、ある企業の方から「機械学会論文集の論文は、ほとんど役に立たない。だから読まない。」と言われて少なからずショックを受けて以来、研究に対するスタンスについて少しずつ考えてきた結果の意見です。ご批判・ご叱責は、本誌「伝熱」へ投稿されるか、直接下記のアドレスへお願い致します。

(nagai@mech.fukui-u.ac.jp)

- 伝熱の常識と非常識 -

多孔質体内熱流動において誤解を招くドグマ

Misleading Dogmas Associated with Heat and Fluid Flow in Porous Media

中山 顕 (静岡大学)

Akira NAKAYAMA (Shizuoka University)

1 はじめに

私が未熟なために勝手に常識(あるいは非常識)と思い込んでいることが多々あるであろうから、このシリーズ「伝熱の常識と非常識」の執筆は極めて難しい。そこで、私が多孔質体内の熱流動を勉強する中で、諸先輩から教えられたり、文献(Lage(1998), Kaviany(1995))から学んだりして気づくに至った、「浅学ゆえに誤って理解していたドグマ」の幾つかについて述べることで、執筆に代えたい。

2 Darcy 則は Darcy の提案か?

パリで教育を受けた Darcy は故郷の Dijon に帰って町の水供給ラインに関する研究(1856)をまとめ公表した。650 ページに及ぶ膨大な報告書の内容は、水の浄化法や水の管理法から政治的・法的観点からの市への提言までに及ぶ。注目する Darcy 則の起源は、本文ではなく、報告書の付録に発見できる(ただし、現在知られている形とは別の形で)。

$$-\frac{dp}{dx} = \frac{1}{k}u$$

ここで u は体積流量を多孔質充填流路の断面で除した見かけの速度、いわゆるダルシー速度である。

種々、圧力勾配(鉛直流路の長さ)を変え、ダルシー速度(流量)を測った結果、コンダクタンス k が一定となることを見いだしている。ただし、流体の粘度 μ が陽に表現されていないことから知れるように、粘度の効果については全く触れられていない。10 数年前の Poiseuille の業績は、パリで教育を受けた Darcy にとっては身近だったろうし、細管流と透過流との関連から、 $k = K/\mu$ (K は透過率)に至らなかったのは不思議な気さえる。粘度の効果(今日の Darcy 則の形)については、少し後になってから、Hazen (1893) により議論されることになる。

3 Forchheimer 項は Forchheimer の提案か?

レイノルズ数がある程度高くなると多孔質構造体の形状抵抗が効いてくるため、粘性の効果のみを考慮する Darcy 則からずれてくる。この効果を速度の二乗項(すなわち Forchheimer 項)で表現する修正 Darcy 則が広く用いられている。

$$-\frac{dp}{dx} = \frac{\mu}{K}u + b\rho u^2$$

実はこの修正則は Forchheimer ではなく、Dupuit(1863)により提案されたものである。この修正則のよりどころとして、頻繁に引用される論文がある。この論文中で、Forchheimer (1901) は修正則が彼自身のオリジナルとは言っていない。彼の関心は、以前自分が公表した実測データの正当性にあったわけで、Darcy 則よりも上記の修正則に従うことを論文では強調している。なぜか、この修正則が Dupuit によるものであることが論文中で記されなかった。よくある(しかしあってはならない)引用の不徹底であるが、このことが、二乗項が、(Dupuit 項あるいは Dupuit-Forchheimer 項とではなく)Forchheimer 項と呼ばれるに至ったゆえんのようなのである。

Dupuit の名は Dupuit-Forchheimer の関係(ダルシー平均が実質平均と気孔率 ε の積で与えられる関係)として歴史に残ってはいるが、彼の最大の業績が修正則の二乗項に在ることを知る人は少ない。

4 Brinkman 項は意味があるか?

境界壁からの粘性が構造体の尺度以上に及ぶとして、その効果を Brinkman 項で表現する次の修正則をよく見かける。

$$-\nabla p = \frac{\mu}{K}u - \tilde{\mu}\nabla^2 u$$

見かけの粘度については種々の議論があるが、高気孔率下では $\tilde{\mu} \approx \mu/\varepsilon$ に近いと考えられている。透過

率 K が無限大の時Navier-Stokesの式に帰着することから、数値計算のプログラミング上も都合がよい。これが、この修正則を最近よく見かける理由の一つと考えられる。(また、 $K = 0$ で固体内、 $K \rightarrow \infty$ で流体を表現しうることから、固定格子を用いた融解・凝固の解析にも積極的に用いられている。)しかし、果たして多孔質体内流の解析においてBrinkman項は本当に意味があるのだろうか？

上記の修正則にスケール・アナリシスを施すと、粘性境界層厚さが次の関係にあることが分かる。

$$\delta \sim \sqrt{\frac{K\bar{\mu}}{\mu}} \sim \sqrt{\frac{K}{\varepsilon}} \sim \frac{\varepsilon}{\sqrt{150(1-\varepsilon)}} d$$

概算の意味から、最後の表現には直径 d の粒子から成る多孔質体を考えてみた。粒子が詰まった状態 ($\varepsilon = 0.4$) で $\delta \sim 0.05d$ 程度であるから、粒子充填流路内での境界層厚さは構造体の尺度の1割にも満たないことになる。さらに $\varepsilon \approx 0.93$ で $\delta \sim d$ と概算できるから、粘性の効果が構造体の尺度を飛び越えて及ぶことがあるとすれば、極めて高气孔率の人工多孔質体の場合に限られることが分かる。ダルシー速度に代表される空間平均値が、構造体尺度より十分大きいRepresentative Elementary Volume (R.E.V.)の下で定義されていることからして、R.E.V. より狭い範囲での巨視的粘性効果の議論は自己矛盾に陥る。

5 流れ方向の熱拡散は無視しうるか？

巨視的には一様な多孔質体内の流れにおいても、微視的には構造体の存在により速度場が大きくゆがめられている。この微視的“ゆがみ”に起因する熱混合を“熱分散”と呼ぶ。多孔質体内熱流動における“見かけの熱伝導率”は、分子熱拡散によるものと熱分散によるものとの相乗効果として現れる。少し流れが速くなると熱分散が支配的となることから、熱分散(または物質分散)の把握は多孔質体内熱(および物質)移動現象の解明において最も重要な鍵を握ると見られている。

実は熱分散の流れ方向成分が卓越するため、見かけの熱伝導率の流れ方向成分が(垂直成分に比して)極端に大きくなる傾向にある。あのYagiら(1960)でさえ、この事実を示す実験データを3年間も公表するのをためらったいきさつがある。多孔質体内のスカラー輸送においては、流れ方向の拡散も無視しえない場合があることを忘れてはならない。

6 おわりに(乱流は難しく、多孔質は簡単か?)

多孔質体内の熱流動現象に魅せられてしばらくになるが、このテーマに取り組むようになったいきさつには少なからぬ打算があった。博士論文の研究の一部として、非円管路内の第二種二次流れを扱うはめになった。勢いにまかせ、当時まだ完全にはチューンナップされてなかった代数応力モデルを用い、乱流計算を繰り返し試してみた。そんな中で、文献をあさればあさるほど、“乱流は難しい”と言う脅迫観念から逃げられなくなっていった。母校に戻り、“乱流が関与しない熱流動場で工学的研究の対象となりうるもの”という、極めて狭い(粘性支配の)視野に立って、いくつかのテーマに絞ってみた。そんなテーマの中に、“多孔質体内の熱流動”があった。細部の実測が難しく解析的アプローチが最も映えそうなテーマであったことも魅力的だった。私の恩師、静岡大学名誉教授児山先生に「数値計算ばかりじゃ続かないぞ」といわれ、物色しつつも“多孔質”に行き着くまで、それ程時間を要しなかったのは、そんな打算があったからである。

しかし、実際に“多孔質体内の熱流動”を勉強してみると、時間(あるいはアンサンブル)平均が局所空間平均に置き換わっただけで、理論的取り扱いも乱流のそれと同様に難しいことに気づく。多孔質体内の熱流動の議論では避けて通れない“熱分散”などというレイノルズ応力、乱流熱流束まがいの項にも出っくわすことになる。人工多孔質体内での熱および物質移動や合金の相変化過程との関連で多孔質体内の“乱流”そのものが注目されつつあることに気づくに至っては、当初の“打算”が“多孔質は難しい”という確信に変わる。このように、外から見ると“常識”的に思えることも、内から見ると“非常識”も甚だしいことが往々にしてある。

文献

- Darcy, H.P.G., 1856, Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon, Victor Dalmont, Paris.
 Dupuit, A.J.E.J., 1863, Victor Dalmont, Paris.
 Hazen, A., 1893, Massa. State 24th Ann.Rep., 541.
 Kaviany, M., 1995, Principles of Heat Transfer in Porous Media, Springer-Verlag, New York.
 Lage, J.L., 1998, Transport Phenomena in Porous Media, Ingham, D.B. and I. Pop, eds., pp. 1-30.
 Yagi et al., 1960, AIChEJ. 6, 543-546.
 Forchheimer, P.H., 1901, Z. Dtsch. Ing. 45, 1782-1788.

キッズエネルギーシンポジウム '99 顛末記

「エネルギーって何だろう」

*Energy Symposium for Kids '99**-What is "Energy" ?-*

小澤 守 (関西大学工学部)

Mamoru OZAWA (Kansai University)

1. 経緯

日本伝熱学会企画部会が中心となって主として東京地区において行われてきたキッズエネルギーシンポジウムが、1999年度は8月27日、大阪大学コンベンションホールにおいて開催された。企画担当は大阪大学大学院工学研究科の片岡勲教授で、その実施結果報告は既に伝熱誌に記載されている通りである。著者は当日は単なる講師として参加しただけであるが、その準備から実施にわたっての諸々の作業を、片岡教授を中心とした大阪大学グループが一手に引き受け、200人余りの子供達と親達を集め、見事に実施されたことに敬意を表する次第である。著者は昨年度まで2年間に亘って伝熱学会関西支部の常任幹事であり、且つまた今回の企画を当時支部企画委員長であった片岡教授に押し付けた張本人でもあった。関西支部にはすでに3年くらい前からキッズエネルギーシンポジウムを関西で開催できないかという打診があり、当時は無理だという回答をしていたが、いずれは関西でも一度は引き受けなくてはなるまいというのが、支部運営委員会の全体的な雰囲気であった。そこで1998年夏に大阪ガス科学館の全面的な協力の元、支部の行事としてキッズエネルギーシンポジウムを開催した。そのときの子供に対するお話として著者が行ったのが、今回この記事で紹介する「エネルギーって何だろう」である。支部の中で今回のようなシンポジウムを開催するに当たり、いったいどのような企画をし、どのようにして子供に参加を呼びかけるか、まったく見当もつかない状態で、企画部会からの提案を引き受けるのに躊躇していたからである。大阪ガス科学館はこのような企画を何度となく経験しておられ、子供たちを集めるノウハウも、また子供達を如何にして楽しませるかというノウハウもお持ちであった。したがって関西支部としてはまず無難なところで練習して経験を積み、その後、企画部会提案を実施しようということ

で意見がまとまり、当時の企画委員長であった片岡教授、支部幹事で現理事の久角氏、支部常任幹事の著者が大阪ガス科学館にお願いに行き、具体的な企画をまとめた。支部運営委員会で、誰が子供達に話をするかについて議論したとき、だれも手をあげてくれず、一様に著者の方を向いて「あなたがやったら」というような雰囲気になり、あきらめて自らエネルギーの話をする事を承諾した。以上が過去の経緯である。

1999年度のキッズエネルギーシンポジウムは文部省科学研究費補助金によって行われたものであり、昨年の申請時期には片岡教授および著者は前述のごとく支部役員で、練習を積んだ(?)兩名が企画とお話をそれぞれ担当することになった。他に2件の講演と子供が興味を持ちそうなおもしろい実験も行われた。

「エネルギーって何だろう」という話をするに当たって、子供達に何を説明し、何をわかってもらえたらいいのか考えたとき、原子力やボイラだといったって、おそらく子供達には実感がないかもしれない。そこで「熱力学の第2法則」といえば大げさだが、エネルギー変換には必ず外界への影響が存在する。逆にいえばそれなくしてはエネルギー変換はありえないことを少しでもわかってほしいと考えたのである。以下の話は著者が行ったお話の主要部で、著者の意図が子供達に伝わったかどうかはわからない。諸兄のご批判を頂ければ幸いである。

2. エネルギーって何だろう

さあ、皆さん、こんにちは。今日はたくさん集まって頂いてどうもありがとうございます。今からエネルギーについて皆さんと考えてみたいと思います。私は同じ吹田市にありますが関西大学から来ました小澤といいます。宜しくお願いします。

さて(近くの子供の顔を見て)エネルギーという言葉

葉を聞いたことありますか。

はい。石炭、石油、電気！

そうですね。それ以外にも皆さんのうちではガスも使っていますね。ガスは見えませんが、どんなものか知っていますね？では石油は？石油そのものは見たことないかも知れないけど、ガソリンスタンドで燃料として自動車に入れますね。あれも石油の一部ですね。じゃ、石炭は？石炭見たことある人はいますか？お母さん方で石炭見たことあるかたおられますか？いませんねー。

私が子供のころはストーブで燃やしていましたし、蒸気機関車も走っていましたから、何度も見たものですけど。それじゃ、いくつか石炭を用意したので見てください(とって袋に詰めた石炭を回覧する)。



こういうものを燃やして私達の役に立つ仕事をするのを難しい言葉で「エネルギー変換」といいます。今日はエネルギー変換についてしばらくお話をしたいと思います。



エネルギーのことはちょっと横においておいて、私達の身体ではどうなっているかな。私達は赤ちゃんのとき、こうやってミルクを飲んでましたね。そして人間は赤ちゃんから子供にして大人へと成長していきますね。人間の場合には食べ物から栄養分を取り込んで、自分の身体を作ると同時に、いろいろ



な活動をしていますね。ではそのことをもう少し詳しく見てみましょうか。



これはお母さんが市場やスーパーマーケットで買い物しているところです。食べ物から栄養を取るにはまず買ってくるなどして手に入れる必要があります。



買ってきたものはそのまま食べられるものもありますが、大抵は調理しますね。調理しておいしい食べ物に加工します。そして最初に言ったように食べて身体を作るもとにしたり、運動や勉強をします。でもそれだけで終わりでしょうか。いえ違います。



そう、必ずトイレに行っていないものを捨てますね。もしトイレに行かなければ便秘になって最後には病気になってしまいますね。このように食べ物の場合には原料を手に入れて、加工し、食べて必要なものを使って大きくなったり活動したりしますが、最後には不要なものを捨てなければなりません。私達が使っている石油やいま皆さんに見てもらっている石炭についても同じなんです。



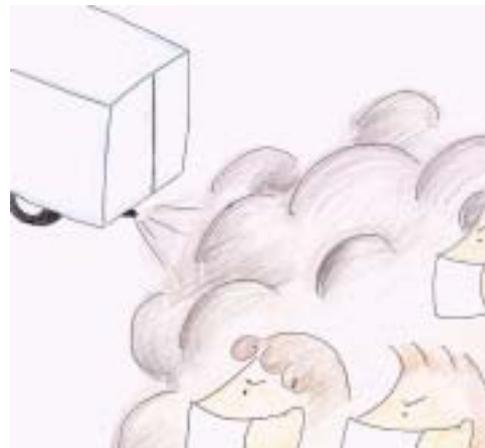
でも自動車は走るだけではないんですね。そう。自動車は排気ガスを出しながら走るんですね。こんな自動車がこのようにたくさん走り回りますとどうなるでしょう。



皆さんのうちに自動車があればわかることですが、まずガソリンスタンドで燃料であるガソリンを買います。でもこれはもう加工したもので、その前に日本では石油を海外から買ってきます。それを加工して自動車に使えるガソリンなどを取り出します。そのガソリンを燃やして自動車は走るんですね。私の後で香月先生がエンジンの動くのを見せてくれますよ。



空気が汚れて息がしにくくなりますし、大気汚染が起こりますね。でもこの排気ガスを出さないで走ることにはできないんです。電気自動車というのがありますが、確かに自動車からは排気ガスが出ませんが、その代わり発電所で排気ガスが出てきます。このよ



うにしてみると自動車も私達が食事をするのも同じだと思いませんか。だから排気ガスを出さずに済ますことができないなら、できるだけ大気汚染など大

きな問題を起こさないように、きれいに使わなければなりません。そうしないと私達の大切な地球の環境を守ることができません。

今日はエネルギーを使うのは私達が食べ物を食べ、成長したり活動したりするのと同じだ、そしていらぬものを排出するのが避けられないんだということを知っていただければ、私の役目は終わりです。皆さん、どうもありがとうございます。今日はあとで面白いお話や遊びが沢山用意してあります。十分に楽しんでください。

3. 顛末

今まで2回のお話を作り上げるに当たって、大阪ガスと関西電力から多くの資料をいただき、子供達への説明の資料にさせていただきました。石炭も含めて、ご協力頂いた関係各位に感謝する。ここで示した以外の図や写真については、紙面の都合もありすべて割愛した。ここでは昨年来、著者が用いていたオリジナルの絵のみを示し、したがって著者の話した内容も割愛したものになっている。今回も前回もそうであるが、子供達に話をするとき、目線をできるだけ子供に合わせた。今回は子供達が広いホールにひかれたカーペットの上に座って

いたので、こちらもしゃがんだり、低い台に座ったりして、目線の高さを合わせて話すようにした。今回は子供達が椅子に座っていたためちょっと勝手が違ったが、子供の反応を見ながら、ときには近くに座っている子供に答えさせるなど、著者の思いつくいろいろな工夫をしたつもりである。いろいろ配慮をしても空回りだったかも知れないが、ただ持ってきた石炭はなかなかの人気で、「ほしい人は持って帰ってもいいよ」というと瞬く間になくなってしまったのはうれしかった。子供達、特に高学年の理科離れなどよく言われるが、少なくとも今回集まった子供達は好奇心だけは失っていなかったようで、ほっとした次第である。家に持って帰った石炭の運命は知るよしもないが、「そんな汚いもの捨ててしまいなさい」といわれていないことを期待するのみである。子供達が持って帰ったのはいまや貴重な国内炭である。最後にここに示した図はすべてもと著者の研究室に学生として在籍し、現在エンジニアの卵として仕事に打ち込んでいる篠木ナリさんの作品である。彼女の協力なくしては今回のお話はできなかった。記して謝意を表す。

行事カレンダー

行事カレンダー

本会主催行事

開催日	行事名(開催地,開催国)	申込締切	原稿締切	問合せ先	掲載号
2000年					
5月 29日(月)~ 31日(水)	第37回日本伝熱シンポジウム (神戸,神戸国際会議場)	'00.1.21.	'00.3.10.	第37回日本伝熱シンポジウム準備委員会 委員長 藤井 照重 神戸大学 工学部 機械工学科 657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町 1-1 Tel:078-803-6112, Fax:078-803-6122 fujii@mech.kobe-u.ac.jp	
2001年					
5月 23日(水)~ 25日(金)	第38回日本伝熱シンポジウム (大宮,ソニックシティー)	未定	未定	第38回日本伝熱シンポジウム準備委員会 委員長 望月貞成 東京農工大学工学部機械システム工学科	

本会共催,協賛行事

開催日	行事名(開催地,開催国)	申込締切	原稿締切	問合せ先	掲載号
2000年					
1月 28日(金)	金属学会シンポジウム「白金族金属・合金の現状と将来」 (日本私立学校振興・共済事業団)			〒980-0845 仙台市青葉区荒巻字青葉 (社)日本金属学会 Tel:022-223-3685, Fax:022-223-6312	
2月 3日(水)~ 4日(木)	6 th Symposium "Microjoining and Assembly Technology in Electronics"(Mate2000) (パシフィコ横浜)	'99.9/1	'99.11/19	<論文>大阪大学接合科学研究所 高橋康夫 Tel:06-6879-8658, Fax:06-6879-8689 E-mail:taka@jwri.osaka-u.ac.jp <事務局>(社)高温学会 Mate 2000 事務局 Tel:06-6879-8698, Fax:06-6878-3110 E-mail:mate@jwri.osaka-u.ac.jp	
2月 8日(火)	日本混相流学会 第2回混相流レクチャーシリーズ 「混相流計測の測定原理と測定法のフンポイント (あまりお金のかからない測定技術)」 (大阪市立大学文化交流センター)	'00.1/28 (定員100名)		神戸大学 竹中信幸 Tel:078-803-6118, Fax:078-803-6122 E-mail:takenaka@mech.kobe-u.ac.jp 大阪市立大学 脇本辰郎 Tel:06-6605-2965, Fax:06-6605-2769 E-mail:wakimoto@mech.eng.osaka-cu.ac.jp http://www.iiijnet.or.jp/JSMF/	
3月 3日(金)	計算流体力学講習会 「LESのフロンティア-熱・流体解析の最強ツールを求めて-」 (東京大学 生産技術研究所 第1会議室)	先着60名		名古屋工業大学 長野清尚 Tel:052-735-5325, Fax:052-735-5359 E-mail:nagano@heat.mech.nitech.ac.jp http://heat.mech.nitech.ac.jp/les_lecture.html	
3月 13日(月)	可視化情報学会講習会 「技術論文のためのPFDの作り方」 (東海大学代々木校舎)	先着60名		〒319-1106 茨城県那珂郡東海村白方2-22 東京大学原子力工学研究施設 岡本孝司 Tel:029-287-8411, Fax:029-287-8488 E-mail:okamoto@tokai.t.u-tokyo.ac.jp http://www.vsj.or.jp/seminar/pdf.html	
3月 23日(木)~ 30日(木)	The 8 th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery (ISROMAC-8) (ハワイ,ホノルル)	Abstract '99.7/1	'99.12/20	Prof. J.C.Han Dept. of Mechanical Engineering, Texas A&M University Tel: (409)845-3738, Fax: (409)862-2418 E-mail:jchan@mengr.tamu.edu	
4月 7日(金)~ 8日(土)	日本機械学会熱工学部門講習会 「乱流輸送現象のモデリングとシミュレーションの新展開」	先着70名		〒432-8561 浜松市城北3-5-1 静岡大学工学部 機械工学科 中山顕 Tel:053-478-1049, Fax:053-478-1046 E-mail:tmanaka@ipc.shizuoka.ac.jp	
5月 24日(水)	CO ₂ の排出削減のための技術革新 (学術会議大講堂)			慶應義塾大学理工学部機械工学科 上松公彦 Tel:045-563-1141(内3112) Fax:045-563-5943 E-mail:uematsu@mech.keio.ac.jp	
5月 24日(水)~ 26日(金)	第5回 日本計算工学会講演会	アブストラクト '00.1/28	'00.4/7	〒102-8646 東京都千代田区平河町2-7-4 砂防会館別館 (株)アイシーエス企画 気付 日本計算工学会 事務局 Tel:03-3263-6014, Fax:03-3263-7077 E-mail:jscses@ics-inc.co.jp http://www.kajima.co.jp/jscses/wwwjscses/jscses.htm	
7月 17日(月)~ 19日(水)	第28回可視化情報シンポジウム (工学院大学講堂(新宿校舎))	'00.3/3	'00.5/12	(社)可視化情報学会事務局 Tel:03-5993-5020, Fax:03-5993-5026 http://www.vsj.or.jp/symp2k	

第 37 回日本伝熱シンポジウムのご案内

- ・開 催 日 平成 12 年 5 月 29 日 (月) ~ 31 日 (水)
- ・講 演 会 場 神戸国際会議場 (神戸市中央区港島中町 6-9-1, TEL : (078)302-5200)
(交通手段) 三宮駅 (JR 東海道線、阪急神戸線、阪神本線、神戸市営地下鉄) よりポートライナー「市民広場前」下車徒歩 3 分
- ・ホームページ http://www.mech.kobe-u.ac.jp/ht_sympo
(ミラーサイト) (http://htsj.mes.titech.ac.jp/~ht_sympo/)
- ・事前申込締切 平成 12 年 4 月 14 日 (金)
- ・シンポジウム参加費 一般 (事前申込 : 8,000 円 , 会場申込 : 9,000 円)
学生 (事前申込 : 4,000 円 , 会場申込 : 4,500 円)
(いずれも論文集代は含みません。日本伝熱学会会員、非会員共)
- ・講演論文集 (3 分冊 1 セット)
 - 1) シンポジウム参加者 (会場受付にてお受け取り下さい)
日本伝熱学会会員 : 無料
非会員 : 8,000 円
 - 2) シンポジウム不参加者 (シンポジウム後日に郵送)
日本伝熱学会会員 : 無料
非会員 : 9,000 円 (送料込み)
 - 3) 追加注文
会場受け取り : 8,000 円
シンポジウム後日郵送 : 9,000 円 (送料込み)
- ・懇 親 会 開催日 : 平成 12 年 5 月 30 日 (水) 18:00 ~ 20:00
会 場 : 神戸ポートピアホテル
(〒650-0046 神戸市中央区港島中町 6-10-1、Tel : (078)302-1111)
参加費 : 一般 (事前申込 : 7,000 円 , 会場申込 : 8,000 円)
(事前申込 , 会場申込共に夫婦同伴者 1 名無料)
学生 (事前申込 : 4,000 円 , 会場申込 : 5,000 円)
- ・参加申込方法 本号に挟込の郵便振替払込取扱票をご使用になり、通信欄に「氏名 (ふりがな) , 伝熱学会会員・非会員の別、勤務先または学校名、懇親会参加・不参加の別及び同伴者の有無、講演論文集、論文集送料、払込合計金額」をご記入の上、その合計金額をご送金下さい。参加者証などは当日受付にてお渡し致します。なお、原則として領収書の発行は省略し、郵便振替払込票兼受領書をもって代えさせていただきます。

参加費払込先	口座番号 : 0 0 9 0 0 - 0 - 1 4 6 9 8 0 口座名称 : 第 3 7 回日本伝熱シンポジウム準備委員会
--------	---

- ・お問い合わせ先 第 37 回日本伝熱シンポジウム準備委員会
浅野 等 (神戸大学工学部機械工学科)
FAX : (078)803-6122
E-mail : ht_sympo@mech.kobe-u.ac.jp
- ・宿泊、航空券 宿泊、航空券の予約に関しては「日本旅行」が一括してお世話します。本号綴込の「ご案内」もしくは前述のホームページをご覧の上お申し込み下さい。

第37回日本伝熱シンポジウム研究発表申込者の方へ
(提出書類及びお願いなど)

研究発表を申し込まれた方は、下記の要領に従って書類を郵送でご提出下さい。
FAXやE-mailでは受け付けませんのでご注意下さい。

1. 講演論文原稿 (A4, 2ページ) 1部
次ページの原稿見本と書き方をご参照下さい。
論文原稿は原則として返却致しません。返却を希望する場合、宛先を記入した返信用封筒(切手不要)を同封してください。論文集印刷終了後、返送致します。
別刷りは配布致しません。
2. 講演論文原稿のコピー 3部
1. の正原稿に加えてそのコピーを3部お送り下さい。
3. JICSTデータベース用抄録 1部
本シンポジウムの発表論文の和文アブストラクトは、全てJICSTデータベースに収録されます。原稿提出時に、2ページ後の論文抄録用紙にご記入の上、上の書類と一緒に郵送下さい。
なお、シンポジウムホームページ (http://www.mech.kobe-u.ac.jp/ht_sympo) に記入用テンプレート (Microsoft WORD 95) を準備しておりますのでご利用下さい。

論文原稿締切 平成12年3月10日(金) 必着
(間に合わない場合、論文集に掲載できない場合があります)

書類送付先	〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1 神戸大学工学部機械工学科内 第37回日本伝熱シンポジウム準備委員会・論文集担当 竹中 信幸
-------	--

関西支部主催見学ツアーのお知らせ

日本伝熱学会関西支部では、第37回日本伝熱シンポジウムが神戸で開催されることを機に、下記のようなエネルギー関連の見学ツアーを企画しております。具体的内容が決まり次第、伝熱シンポジウムホームページ (http://www.mech.kobe-u.ac.jp/ht_sympo/) に掲載いたしますので、ご参照いただければ幸いです。また、詳細は会誌「伝熱」(平成12年3月号) に詳細をお知らせする予定です。多数のご参加をお待ち申し上げます。

日 時： 平成12年6月1日(木)
予定見学先： 三菱重工業(株) 高砂製作所 — 高温ガスタービンの開発・製作部門
大阪ガス(株) 姫路製造所 — LNG基地
関西電力(株) 姫路第一発電所 — コンバインドサイクル発電システム

お問い合わせ先： 京都大学大学院工学研究科機械工学専攻 吉田 英生
TEL : (075)753-5255, E-mail : yoshida@mech.kyoto-u.ac.jp

第 37 回日本伝熱シンポジウム宿泊・交通のご案内

この度、「第 37 回日本伝熱シンポジウム」に関する宿泊・航空券の申込受付を(株)日本旅行神戸支店にてお取扱わせて頂くことになりました。ご参加される皆様にご満足いただけるような十分な配慮をもってお手伝いさせていただきます。つきましては、下記の案内をご覧いただき、別紙申込用紙に必要事項をご記入の上、日本旅行神戸支店まで FAX して下さい。

尚、日本旅行ホームページ上から E-mail でのお申込みもできますので是非ご利用下さい。

(ホームページ：<http://www.nta.co.jp/kikaku/dennetsu/index.html>)

宿泊のご案内 神戸市内、各ホテルの予約を学会料金にて承ります。

* () 内は朝食なし料金です。朝食不要の場合、申込用紙に×印を記入して下さい。

記号	ホテル名	宿泊料金・1泊朝食税込		アクセス (PL=ポートライナー)
		シングル	ツイン	
A	神戸ポートピアホテル	12,600 円 (A-S) (11,550 円)	11,500 円 (A-S) (10,500 円)	会場まで徒歩 1 分
B	神戸東急イン サンルートソプラ神戸	10,500 円 (B-S) (9,450 円)	9,450 円 (B-S) (8,400 円)	三宮駅から徒歩 3 分 PL 貿易センタービル前駅から徒歩 2 分
C	神戸三宮ユニオンホテル	8,200 円 (C-S) (7,400 円)	設定なし	PL 貿易センタービル前駅から徒歩 5 分
D	マークスホテル神戸 ヴィアマーレ神戸	8,000 円 (D-S) (7,700 円)	7,800 円 (D-S) (7,500 円)	PL 貿易センタービル前駅から徒歩 3 分 三宮駅から徒歩 7 分
E	新神戸サンホテル	7,670 円 (E-S) (7,140 円)	6,300 円 (E-S) (5,780 円)	三宮駅から徒歩 7 分

ご希望のホテルが満室の場合は、他のホテルに振り替えさせて頂く場合がございますので、第 2 希望ホテルも必ずご記入下さい。

ツインルームご利用の方は、申込書に同室の方のお名前もご記入下さい。

他のホテルをご希望の方は、備考欄にホテル名をご記入下さい。予約お取りします。

航空券のご案内 各航空会社設定の各種航空券を承ります。

搭乗日・便名又は出発時間・区間を申込用紙にご記入下さい。また下記をご参照の上、ご希望の購入運賃、種別もお知らせ下さい。

購入運賃種別	予約期間	割引率	変更	取消手数料	対象座席
普通	2ヶ月前～便出発前まで	無	可	通常	全座席
早期事前購入	2ヶ月前～2週間前まで	約 15～50%	不可	購入額の 50～25%	限定
特定便割引	2ヶ月前～前日まで	約 15～50%	不可	通常	限定

早期事前購入・特定便割引は予約席に限りがございますので、あらかじめご了承ください。

申込み方法

別紙申込書に必要事項をご記入の上、FAX にて下記日本旅行神戸支店 E & C チームまでお送り下さい。

お申込先	(株)日本旅行神戸支店 E & C チーム 〒650 - 0037 神戸市中央区明石町 48 神戸ダイヤモンドビル 6 階 TEL : (078)391-4651 FAX : (078)391-4622 担当 : 青野・足立・尾上
------	--

申込締切：平成 12 年 4 月 26 日 (金) 必着

申込締切後、14 日以内に予約確認書 (バウチャー券) と請求書を代表者宛へ送付させていただきます。
 尚、手配事務費・郵便通信料として 1 件当たり 525 円 (消費税込) を合わせてご請求させていただきます。

宿泊代金の支払方法：請求書が到着次第、銀行振込又はクレジットカード決済にてお支払い下さい。

お振込先	銀行名：東京三菱銀行 神戸支店 口座番号：普通預金口座 0288937 口座名称：(株)日本旅行 神戸支店
------	---

お支払い期限：平成 12 年 5 月 15 日 (月)

予約変更取消について

予約の変更取消につきましても、FAX にてご連絡下さい。お電話での変更取消はお受けできません。

取消料金は下記の通りです。

搭乗日・宿泊日の前日から起算して、取消お申出日が・	宿泊取消料 (宿泊代金の ~ %)	航空券
21 日前以降 14 日前まで	無料	航空会社で定められた額を申し受けます。詳細は、弊社又は航空会社へお問い合わせ下さい。
13 日前以降 8 日前まで	30 %	
7 日前以降 3 日前まで	50 %	
当 日	100 %	
当日以降・便出発後	100 %	

第 37 回日本伝熱シンポジウム 宿泊・航空券申込書

日本旅行神戸支店 E & C チーム 宛

(FAX 078 391 4622 / TEL 078 391 4651)

平成 年 月 日

所属 (大学名・会社名)	(詳しくご記入下さい)		
申込代表者名 (フリガナ)			
所属先住所 (請求書送付先)	〒		
送付先変更の場合は 右欄にご記入下さい。	〒		
所属先 TEL	()		
所属先 FAX	()		
緊急連絡先 (自宅・携帯)	()		
返金時の振込口座名	銀行	支店 (普・当)	
	口座 No .	口座名義人	

【宿泊申込】

NO	フリガナ 氏 名	性 別	宿 泊 日 (5 月)				申込記号	朝食	同室者名	備 考 欄
			28	29	30	31				
例	三井 知 日旅 太郎	男					A - S			
1								朝食不要の場合のみ ×印を記入して下さい。		
2										
3										

申込書が足りない場合は、コピーしてご利用ください。

【航空券申込】

搭乗日	区 間	便名 (出発時間)	購入運賃種別
/		:	
/		:	
/		:	

【その他ご希望欄】

【お支払方法】 (該当番号を で囲って必要事項をご記入下さい。)

- 1 . 銀行振込 (上記返金口座へ) 2 . クレジットカード (下記へ)

利用カード会社 (該当カードを で囲って下さい)	有効期限	引落しカード番号
JCB VISA ーカード 日本信販 DCカード AMEX 利カード シカカード	年 月 日	
	ご署名	

講演番号

伝熱シンポジウム講演論文の書き方 (表題・14ポイント)

↑横25mm × 縦10mm開ける (副題・12ポイント, 無い場合は1行あける)

事務局で記入

Instruction for preparing a paper (英文の表題・12ポイント) 上側 20mm 余白

(英文の副題・12ポイント, 無い場合はつめる)

(1行あける)

伝正 *神戸 太郎 (六甲大) 混正 兵庫 花子 (鶴甲大)
機学 灘 次郎 (港島工業) (12ポイント, 発表者には*をつける)

(1行あける)

Taro KOBE¹, Hanako HYOGO² and Jiro NADA³ (10ポイント)

¹Dept. of Mech. Eng., Rokko Univ., 1-1 Rokkodai, Nada, Kobe 657-8501 (10ポイント)

²Dept. of Thermal Eng., Tsurukabuto Univ., 1-1 Tsurukabuto, Nada, Kobe 657-8501

³Minatojima Ind. Co. Ltd., 6-2-1 Minatojima-nakamachi, Chuo, Kobe, 650-1234

(複数の所属の時は上付きの数字で区別する)

(1行あける)

(5文字あける) This paper describes (英文アブストラクト・10ポイント, 100語程度).....

(1行あける)

Key Words: Forced Convection, (10ポイント, 3~5個程度)

(1行あける)

1. 緒言(ボールド) 論文原稿は以下に示す執筆要項に従って作成下さい。

2. 原稿用紙 A4判2枚に,ワープロ等を用いて作成して下さい。上下のマージン各20mm,左右のマージン各15mmを必ずとって下さい。

3. 表題 日本語の主題は14ポイント,副題は12ポイント程度の文字,英語の主題・副題は12ポイント程度の文字をご使用下さい。左上隅には講演番号を記入するための空欄(25mm×10mm)を設けて下さい。講演番号は準備委員会で記入致します。

4. 会員資格・著者名・所属 会員資格・氏名・所属(略記)を申込書と同一順序で日本語(12ポイント)でお書き下さい。連名者がある場合には,講演者の前に*印をつけて下さい。次いで,1行あけて英文(10ポイント)でもお書き下さい。所属機関の所在地も例に倣ってご記入下さい。所属機関が複数の場合には上付き数字で区別して下さい。

5. 英文アブストラクト・キーワード 100語程度の英文アブストラクト,および3~5個程度の英文キーワードをお書き下さい(10ポイント)。

6. 本文 本文は1ページ目をこのスタイルで,2段組み,片側1行26文字程度,9ポイントで作成下さい。2ページ目も,2段組み,片側1行26文字程度,9ポイント,片側60行程度を目安として作成下さい。以上の数字は一応の目安ですが,上下・左右のマージン(上下各20mm,左右各15mm)は必ず設けて下さい。

7. 図表 図表中の記号及びキャプションは英語でお書き下さい。写真や図表を貼り付ける場合には,裏に薄く図番と著者名をご記入の上,しっかりと貼って下さい。印刷は全て白黒です。

8. 文献 文献を引用する場合には,本文中の引用箇所の右上に小括弧を付けた番号⁽¹⁾で表し,本文の末尾に下記のようにまとめて文献を列記して下さい。

9. その他 右上隅の余白部分に,講演者名とページ(神戸・1/2),及び研究発表申込時にメールなどでご連絡した申込番号を,薄く鉛筆でご記入下さい。

論文原稿の送付先は下記の通りです。締め切りを厳守して郵送下さい(平成12年3月10日(金)必着)。

原稿送付先:

〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1
神戸大学工学部機械工学科内
第37回日本伝熱シンポジウム準備委員会
論文集担当 竹中 信幸

正原稿に加えて,論文原稿のコピー3部とJICSTデータベース用抄録を郵送でご提出下さい。FAX及びE-mailによる原稿提出は受け付けません。

文献の記載例

(1) 神戸・他2名,機論(B),65-634(1999),123.



左側 15mm 余白, 右側も 15mm 余白
段間隔 10mm
下側 20mm 余白

図表のキャプションの例
Fig. 1 Schematic diagram of

日本伝熱学会研究会「マイクロマシンと熱流体」第3回会合のお知らせ
(電気学会 マイクロマシン研究会会合との同日開催)

標記会合を下記の通り開催致します。本研究会(主査:笠木伸英(東大),副主査:藤田博之(東大),顧問:下山勲(東大),幹事:村田章(農工大))はマイクロマシンに関連した熱流体を広く対象とし、意見交換、勉強会、見学会などを行っております。第3回会合は電気学会マイクロマシン研究会(委員長:佐藤一雄(名大))との同日開催とし、本研究会委員以外の方の参加も歓迎致します。整理の都合上、参加ご希望の方は下記問い合わせ先までご連絡下さい。

○日時:平成12年 2月28日(月) 午前10:30~午後5:30

○場所:立命館大学工学部びわこ草津キャンパス コアステーション2階 大会議室

JR京都駅からJR西日本琵琶湖線(東海道線)にて20分、南草津駅下車。

東口より近江鉄道バス「立命館大学行き」または「立命館大学經由飛島グリーンヒル行き」にて「立命館大学」下車、徒歩1分。

URL: <http://www.ritsumei.ac.jp/cinfo/map/index.htm>をご覧ください。

○参加費:無料(但し論文集は有料)

○プログラム

午前10:35~11:55 電気学会マイクロマシン研究会講演

- ・マイクロトライボロジーを考慮した構造の最適化/平澤拓, 小寺秀俊, 島進(京都大学)
- ・Analysis of Structure & Material Properties Effects on a Thermal Type Fingerprint Sensor / J.-S. Han, 門脇匡志, 佐藤一雄, 武田光宏(名古屋大学)
- ・Linear Piezoelectric Stepper Positioner Based on the Inch Worm Principle / P. Cusin, 澤井拓彦(立命館大学), 八木隆行(キャノン), 小西聡(立命館大学)
- ・電氣的, 機械的, 光学的デバイスのアセンブリを目指したマイクロコネクタの製作と評価/ 大島聡, 三田信, A. Tixier, J. Gouy, 藤田博之(東京大学)

午後1:00~2:20 電気学会マイクロマシン研究会講演

(並行して, 伝熱学会側見学会:マイクロマシン関連設備, 研究室, SRセンター)

- ・価電子バンドに基づくp型Siのピエゾ抵抗効果の解析/鳥山寿之, 杉山進(立命館大学)
- ・3D Microstructure of Metallic and Composite Parts by Selective Laser Sintering/Micro-Cladding Process / Y.P. Kathuria (レーザックス)
- ・センサ用薄膜内部応力のアニール効果のラマン分光法による検討/ 山本秀俊, 村上健介, 川上 司, 鳥山寿之, 杉山進(立命館大学)
- ・Siマイクロマシニング技術による微小領域計測用ツインプローブの試作/ 角嶋邦之, 三田信, 橋口原, 藤田博之(東京大学)

午後2:40~5:30 伝熱学会研究会「マイクロマシンと熱流体」講演

- ・微小流体システムとDNA分子操作 / 鷺津正夫(京都大学)
- ・マイクロマシニング技術のマイクロ流路加工への応用 / 田畑修(立命館大学)
- ・表面張力とマイクロマシン / 吉田英生(京都大学)
- ・光熱アクチュエータのレーザ駆動と蠕動型マイクロポンプへの応用 / 成瀬好廣(アイソ・コスモス研究所)

○問い合わせ先: ☎ 184-8588 東京都小金井市中町2-24-16

東京農工大学 大学院 生物システム応用科学研究科 村田 章

TEL 042-388-7089 (直通) FAX 042-385-7204 (学科共通)

E-mail murata@mmlab.mech.tuat.ac.jp

URL <http://www.mmlab.mech.tuat.ac.jp/micromachine>

シンポジウム

CO₂ 排出削減のための技術革新

日時： 2000年5月24日（水）1:00～5:00

会場： 日本学術会議講堂
（東京都港区六本木7-22-34 地下鉄千代田線「乃木坂」駅5番出口すぐ）

主催： 日本学術会議エネルギー・資源工学研究連絡委員会

共催： 日本機械学会熱工学部門，日本燃焼学会，日本熱物性学会，日本伝熱学会，船用機関学会，自動車技術会

総合司会： 塩冶震太郎博士（石川島播磨重工業）

講師および講演題目：

- 1:00～1:45 平田 賢 教授（芝浦工業大学）
CO₂ 排出削減のためのエネルギーシステム技術の展望
- 1:45～2:30 新岡 嵩 教授（東北大学）
高温空気燃焼技術活用によるCO₂ 排出削減
- 2:30～3:15 岡崎 健 教授（東京工業大学）
CO₂ 回収石炭燃焼とNO_x, SO_x の同時低減
- （15分休憩）
- 3:30～4:15 飛原英治 教授（東京大学）
冷凍空調機器における温暖化ガスの排出削減技術
- 4:15～5:00 池上 詢 教授（福井工業大学）
自動車の高性能化ならびに代替燃料化

参加料： 無料

参加申込： 不要

資料： 当日資料を用意し，希望者に2,000円（実費）で配布いたします。

問合せ先： 上松 公彦 慶應義塾大学理工学部機械工学科

E-mail: uematsu@mech.keio.ac.jp

同志社大学工学部機械系学科教員公募

募集人員： 助教授または講師 1名

専門分野： 熱工学と流体工学の複合領域

教育分野： 熱力学，流体力学，伝熱工学，流体工学，物理など

応募資格： 博士の学位を有する方，または取得見込みのある方

着任時の年齢 45歳以下

新分野を開拓する意欲のある方，私立大学教育に理解と熱意のある方

着任時期： 2000年10月1日

提出書類： 履歴書（写真貼付，研究活動状況記載）

研究業績リスト（論文，著書，国際学会等論文に分類する）

主要論文別刷り5編程度（コピー可）

研究と教育に関する抱負（A4版各1枚程度）

推薦書1通または照会を求めうる方の氏名・所属・連絡先

応募締切： 2000年2月29日

書類送付先：

〒610-0321 京都府京田辺市多々羅都谷1-3 同志社大学 工学部

機械系学科 教務主任宛

（注）封筒に「機械系教員応募」と朱書きし，簡易書留で送付のこと

問い合わせ先：

機械系学科教務主任 片山 傅生

Tel.(0774)65-6403

または Tel.(0774)65-6495 学科事務室

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。

【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	8,000円 但し、 70才以上は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。

- 「伝熱」「THERMAL SCIENCE AND ENGINEERING」を郵送します。
(本年度発行予定：5, 7, 9, 11, 1, 3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
- 「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事務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、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方へ】

長期間、会費を滞納されている会員の方々には、至急納入をお願いします。特に、平成10年度以降の会費未納の方には「伝熱」「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)

- 入会届、変更届、退会届の受付
- 会費納入の受付、会費徴収等
- 会員、非会員からの問い合わせに対する応対、連絡等
- 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」「THERMAL SCIENCE AND ENGINEERING」発送、その他刊行物の発送
- 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10時～午後5時)

(注意)

- 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欄やファックス等の書面にてお願いします。
- 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。

〒113-8656 文京区本郷 7-3-1

東京大学大学院工学系研究科 機械工学専攻 庄司 正弘

TEL: 03-5841-6406 FAX: 03-5800-6987

E-MAIL: sho.ji@photon.t.u-tokyo.ac.jp

編集部からのお願い

「グループリーダーに聞く」では、会員の皆様の批評や新しい情報を求めています。
「次はこんな切り口でインタビューしたら..」
「先生は、こんな共同研究をやっている。お話を聞きにいったらどうか..」
「私はこうやって外部資金を獲得した..」
「共同研究の苦労話もあるのだが、ちょっと聞いてくれ..」
など.

編集部部长 菱田公一 hishida@sd.keio.ac.jp または
担当委員 川口靖夫 kawaguchi.y@mel.go.jp まで.

第38期編集出版部会委員

副会長	吉田 駿	九州大学
部部长	菱田公一	慶應義塾大学
委員	水上紘一	愛媛大学
	小林睦夫	新潟大学
	平田雄志	大阪大学
	渡邊澁雄	中部電力株式会社
	横堀誠一	株式会社東芝
	山田雅彦	北海道大学大学院
	小原拓	東北大学
	小熊正人	石川島播磨重工業(株)
	川口靖夫	機械技術研究所
	佐藤勲	東京工業大学
	泰岡顕治	慶應義塾大学
	花村克悟	岐阜大学
	瀧本 昭	金沢大学
	中部主敬	京都大学大学院
	吉田敬介	九州大学大学院
TSE	小竹 進	東洋大学

平成12年1月31日

第38期編集出版部部长 菱田公一

編集出版事務局：〒223-8522 横浜市港北区日吉3-14-1
慶應義塾大学工学部システムデザイン工学科
菱田公一
TEL: 045-563-1141 (内3130)
FAX: 045-563-2778
e-mail: hishida@sd.keio.ac.jp

複写される方に

本誌に掲載された著作物を複写したい方は、日本複写権センターと包括複写許諾契約を締結されている企業の従業員以外は、著作権者から複写権等の委託を受けている次の団体から許諾を受けて下さい。なお、著作物の転載・翻訳のような複写以外許諾は、直接本会へご連絡下さい。

〒107-0052 東京都港区赤坂 9-6-41 乃木坂ビル 3F
学術著作権協会 (TEL/FAX: 03-3475-5618)

アメリカ合衆国における複写については、次に連絡して下さい。

Copyright Clearance Center, Inc.(CCC)
222 Rosewood Drive, Danvers, MA 01923 USA
Phone : (978) 750-8400 FAX : (978)750-4744

Notice about photocopying

In order to photocopy any work from this publication, you or your organization must obtain permission from the following organization which has been delegated for copyright for clearance by the copyright owner of this publication.

Except in the USA

The Copyright Council of the Academic Societies (CCAS)
41-6 Akasaka 9-chome, Minato-ku, Tokyo 107-0052 Japan
TEL/FAX : 81-3-3475-5618

In the USA

Copyright Clearance Center, Inc. (CCC)
222 Rosewood Drive, Danvers, MA 01923 USA
Phone : (978) 750-8400 FAX : (978)750-4744

伝 熱

ISSN 1344-8692

(Journal of The Heat Transfer Society of Japan)

Vol. 39, No.154

2000年1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