

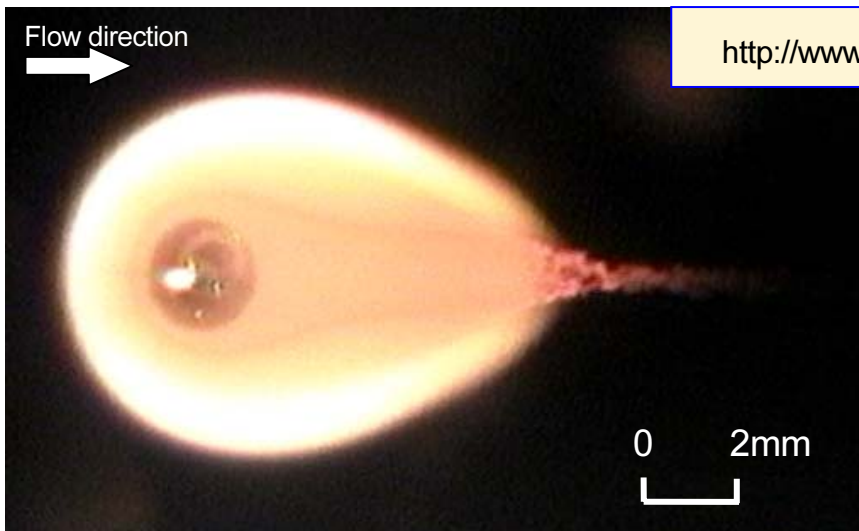
伝 熱

Journal of the Heat Transfer Society of Japan

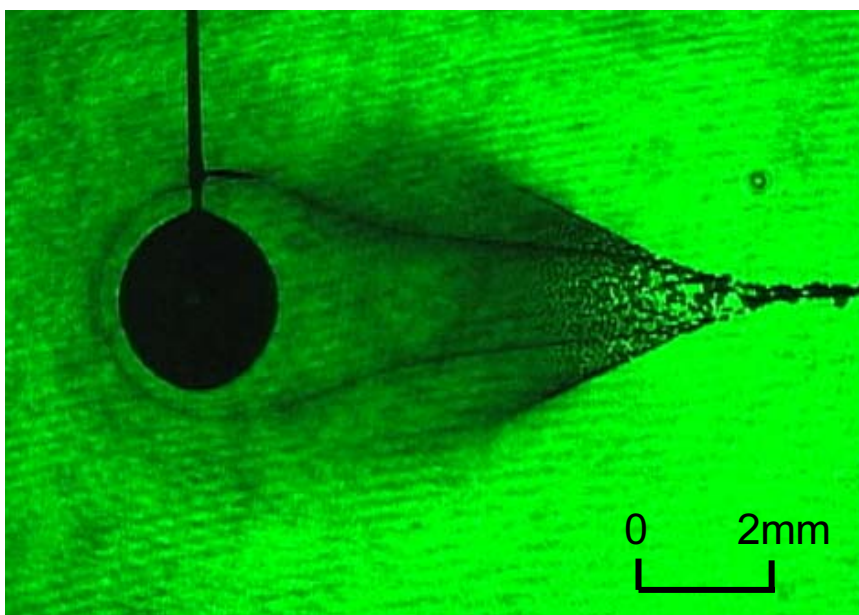
ISSN 1344-8692 Vol. 48, No. 203
2009. 4

HSTJ

◆特集：水素の物性および材料◆



周囲空気流速2.6cm/sの中に置かれた燃料液滴火炎の直接写真（流れは左から右、写真は、液滴直径が2.3mmの瞬間を捉えたもの。燃料：n-ノナデカン、周囲酸素濃度35%）



直接火炎と同時に撮影した火炎内部のすす生成構造（532nm レーザ光を背景光として撮影、懸垂線として125 μ mの石英ファイバーを使用）

微小重力場を利用した小さなスリップ速度のある燃料液滴周りの火炎とすす生成構造の観察

Soot formation in a droplet combustion exposed to a low external flow velocity under microgravity

藤田 修 (北海道大学) Osamu FUJITA (Hokkaido University)

ofujita@eng.hokudai.ac.jp

噴霧燃焼の液滴粒子は直径が数十 μ mと小さく、燃料液滴は周囲流れとほぼ連動して移動するが、実際には粒子と周囲流の間にわずかなスリップ速度が存在している。一方、単一液滴を用い実験的に液滴燃焼に対するスリップ速度の影響を調べようとしても、液滴周りに強い自然対流が発生し、任意のスリップ速度を与えること自体不可能である。そこで、微小重力場を利用することで自然対流の影響を排除し、極めて小さなスリップ流速（2.6cm/s）の中で液滴燃焼を観察した。微小重力場の火炎は通常球形になるが、わずかなスリップ速度を与えると、火炎は流れの下流方向へ伸びた形状となる。さらに、背景光撮影により火炎内部のすすを可視化したところ、写真のように液滴近傍にすす濃度の高い殻状の領域が現れ、これが下流へ伸びている様子が見出された。これは、静止雰囲気下の液滴火炎に現れる Soot Shell の下流側が、スリップ速度の影響で破れた構造であると考えられる。また、この Shell の外側に広く分布するすすの影が下流に進むほど、Shell 近傍に集まってくる様子がわかるが、これは火炎と Shell の間の温度勾配による熱泳動効果ですが Shell 方向に輸送された結果と解釈している。

本写真は、当時北大大学院生の井上順昭君（現三菱重工）と協力し取得したものです。ここに謝意を表します。

伝 熱

目 次

〈特集：水素の物性および材料〉

水素の異性体と熱物性	高田保之, 迫田直也 (九州大学)	1
HYDROGENIUS プロジェクトにおける水素脆化研究：水素脆化は脆性破壊か延性破壊か	松岡三郎 (九州大学)	7
水素の貯蔵輸送と水素貯蔵材料	秋葉悦男 (産業技術総合研究所)	20
水素は危ないか	三石洋之 ((財) 日本自動車研究所)	26
能動的な炭素循環エネルギーシステムの可能性検討	加藤之貴 (東京工業大学)	34
高圧・高温条件下の水素の熱物性計測	藤井丕夫 (産総研) 高田保之 (九州大学) 新里寛英 (産総研)	40

〈プロジェクトQ〉

大学キャンパスの水素ステーション	杉村丈一, 岡田伸廣, 伊藤衡平 (九州大学)	48
放熱性鋼板「コーベホーネツ®」の開発	高橋和雄 (神戸製鋼)	54
きく8号搭載展開型ラジエータの軌道上運用と1年目の動作特性	川崎春夫, 矢部高宏, 岡本篤, 金森康郎 (宇宙航空研究開発機構) 石川博章, 野村武秀 (三菱電機) 斎藤康之 (三菱電機エンジニアリング)	58

〈特別寄稿〉

耐熱光ファイバ	村上泰 (信州大学)	63
---------	------------	----

〈巻頭グラビア：heat-page〉

微小重力場を利用した小さなスリップ速度のある燃料液滴周りの火炎とすす生成構造の観察	藤田 修 (北海道大学)	表紙裏
---	--------------	-----

〈行事カレンダー〉

〈お知らせ〉

第14回国際伝熱会議：IHTC-14 論文募集のお知らせ (会告)	68
第46回日本伝熱シンポジウム開催直前のご案内	69
事務局からの連絡	89
編集出版部会ノート	94

CONTENTS

<Special Issue>

Hydrogen Isomers and Its Thermophysical Properties Yasuyuki TAKATA, Naoya SAKODA (Kyushu University)	1
Research of Hydrogen Embrittlement in HYDROGENIUS Project Saburo MATSUOKA (Kyushu University)	7
Hydrogen Storage and Transportation: Hydrogen Storage Materials Etsuo AKIBA (AIST)	20
Safety Research on Hydrogen Fueled Vehicle Hiroyuki MITSUISHI (Japan Automobile Research Institute)	26
Feasibility Study of Active Carbon Recycle Energy System Yukitaka KATO (Tokyo Institute of Technology)	34
Measurements of Thermophysical Properties of Hydrogen at High Pressure and High Temperature Motoo FUJII(AIST) Yasuyuki TAKATA(Kyushu University), Kan-ei SINZATO (AIST)	40

<Project Q>

Hydrogen Refueling Station in University Campus Joichi SUGIMURA, Nobuhiro OKADA, Kohei ITO (Kyushu University)	48
Development of “KOBEBONRTSU” Heat Releasing Steel Sheet Kazuo Takahashi (Kobe Steel Ltd.)	54
The First Annual Characteristics Test of Deployable Radiator (DPR) of Kiku-VIII on Geo Stationary Orbit Haruo KAWASAKI, Takahiro YABE, Atsushi OKAMOTO, Yasuro KANAMORI(JAXA), Hiroaki ISHIKAWA, Takehide NOMURA(MELCO), Yasuyuki SAITO (MEE)	58

<Contribution>

Heat-resistant Glass Optical Fiber Yasushi MURAKAMI (Shinshu University)	63
---	----

<Opening-page Gravure: heat-page>

Soot formation in a droplet combustion exposed to a low external flow velocity under microgravity Osamu FUJITA (Hokkaido University)	Opening Page
---	--------------

<Calendar>	67
------------------	----

<Announcements>	68
-----------------------	----

水素の異性体と熱物性

Hydrogen Isomers and Its Thermophysical Properties

高田保之, 迫田直也 (九州大学)

Yasuyuki TAKATA and Naoya SAKODA (Kyushu University)

e-mail: takata@mech.kyushu-u.ac.jp, sakoda@mech.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

水素はクリーンな二次エネルギーとして将来が期待されている物質であり、近年、開発や普及が活発となった固体高分子形燃料電池(PEFC)の燃料として使用され、脚光を浴びている。PEFC を搭載した燃料電池車(FCV)の水素容器には、現在 35MPa の高圧水素が充填されているが、一回の充填でガソリン車並みの走行距離を得るために、一部 70MPa での充填も始まっている。ところが、このような超高圧域の水素の熱物性値の実測値は非常に不足しているのが実情である。

水素は窒素や酸素と同じ 2 原子分子であるが、その振る舞いはそれ程単純ではない。我々が通常水素と呼んでいる物質は、オルソ水素(ortho-hydrogen, o-H₂)とパラ水素(para-hydrogen, p-H₂)という 2 つの異性体(isomer)の混合物であり、これを我々はノーマル水素(normal hydrogen, n-H₂)と呼んでいる。この異性体が Bonhoeffer と Harteck により発見されたのは 1929 年のことであり、今年はその発見から 80 年が経過したことになる。実用的にはノーマル水素とパラ水素の熱物性が重要なのであるが、比熱や熱伝導率などいくつかの熱物性は両者で異なる値を持つ。1935 年の Farkas の著書[1]には、パラ水素や重水素を含む水素の物性が詳しくまとめられており、水素に関する最初の物性値集と言ってもよいであろう。

1948 年に Woolley ら[2]がかなり広範囲の温度、圧力領域に適用できる状態方程式を開発している。この状態方程式は現在でも一部使われており、著者の一人が所属するグループで開発している流体の熱物性値プログラム・パッケージ PROPATH にも組み込まれている。

その後、ロケット燃料としての水素の物性値の必要性から、1970 年代に McCarty らによって詳細な水素の物性値データ集が続々と編纂[3,4,5]された。McCarty のデータ集には、高圧、高温域の物

性値が掲載されているが、後述するように、実測データは乏しく、低圧、低温域のデータからの外挿値が使われている。

2007 年に, Leachman[6], GERG[7]の状態方程式が開発されているが、高温、高圧域の実測データはやはり存在せず、状態方程式の範囲を拡張して使用しているのが現状である。FCV の水素容器の高圧化に伴って、100MPa までの実測データを整備し、高圧域まで精度が保障された状態方程式の開発が望まれている。このような状況で、水素の熱物性についての知見を整理しておくことは非常に重要である。本稿では、水素の異性体、熱力学性質および輸送性質の現状を紹介する。

2. 水素の異性体

2.1 オルソ, パラ, ノーマル, 平衡水素

水素は 2 原子分子であるが、核スピンの向きの違いにより、オルソとパラの 2 つの異性体が存在する。通常の水素ガス、すなわちノーマル水素は、オルソ 75%、パラ 25%の混合物である。オルソとパラの構成比は温度に依存し、水素中のパラ成分の量は、次式で与えられる[1]。

$$\left. \begin{aligned} \text{p-H}_2 \text{成分} &= \frac{\beta}{1+\beta} \\ \beta &= \frac{[\text{p-H}_2]}{[\text{o-H}_2]} = \frac{\sum_{j=\text{even}} (2j+1)e^{-j(j+1)B/kT}}{\sum_{j=\text{odd}} 3(2j+1)e^{-j(j+1)B/kT}} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ここで、 $B/k=84.837$ である。式(1)を温度に対してプロットしたのが図 1 である。式(1)は、その温度に対するオルソ・パラの平衡状態の構成比を与える。この組成の水素を平衡水素(equilibrium hydrogen, e-H₂)と呼ぶ。図 1 から、低温になるにつれてパラ水素の比率が増加し、液体水素はほとんどパラ水素で構成されることがわかる。

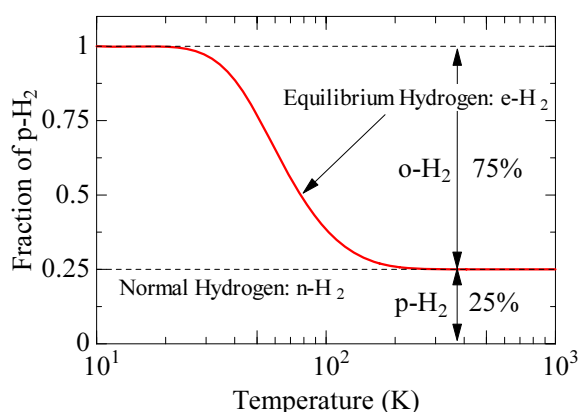


Figure 1: Equilibrium composition of para- and ortho-hydrogen as a function of temperature

2.2 オルソ・パラ変換

オルソとパラの間の変換には2つの特筆すべき性質がある。一つは、変換速度が極めて遅いということである。ノーマル水素を冷却して液化しても液化水素のオルソ・パラ構成比はノーマル水素のままである。時間が経つにつれて、徐々にオルソからパラへの変換が進むが、半分のオルソ水素がパラ水素に変換するのに1年以上かかると言われている。したがって、液化プラントなどでは磁性触媒を用いて、変換を加速させてパラ水素を製造する。

もう1つの特徴は、オルソからパラに変換する際に熱の発生を伴うということである。発熱量は温度に依存し、300K付近では、ノーマル水素単位質量あたりの変換熱は 27kJ/kg 程度と小さいが、標準沸点(20.4K)における変換熱は 523kJ/kg であり、この値は蒸発潜熱 448.3kJ/kg よりも大きい。液化されたノーマル水素の中のオルソ水素がパラ水素に変換する際の発熱により、自己蒸発が生じる。Larsen[8]はオルソ・パラ変換の際のオルソ水素の濃度を次式で与えている。

$$\left. \begin{aligned} dx/dt &= -cx^2 \\ x &= 1/[1/x_0 + ct] \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

ここで、 $c=12.65 \times 10^{-3} \text{hr}^{-1}$ であり、 x_0 は初期状態のオルソ水素の濃度である。液体水素の質量を $m(\text{kg})$ 、蒸発潜熱と変換熱をそれぞれ、 Δh_{evap} 、 Δh_{conv} とすると、容器が断熱状態で周囲からの侵入熱はないとすると

$$-\Delta h_{\text{conv}} m(dx/dt) = -\Delta h_{\text{evap}} (dm/dt) \quad (3)$$

の関係があるので、容器内に残存する液体水素の質量割合は次式で計算できる。

$$\ln\left(\frac{m}{m_0}\right) = \left(\frac{\Delta h_{\text{conv}}}{\Delta h_{\text{evap}}}\right) \cdot \left[\frac{1}{1/x_0 + ct} - x_0\right] \quad (4)$$

式(4)で、充填時の初期のオルソ水素の割合を 0.1 ~ 0.75 まで変化させて、断熱容器内の残存する液体水素の割合を求めてみると図2のようになる。液体水素の初期組成がノーマル水素($x_0=0.75$)の場合は、変換熱による自己蒸発で液体の割合が約42%まで減少してしまうことがわかる。

このように、オルソ・パラ変換については、長期に渡る観測が必要なので、参考になる文献が少ない。また、水素中のオルソ・パラ構成比を測定するには、NMR やラマン分光を用いる方法があるが、一番簡便なのは、パラ水素とノーマル水素の熱伝導率の違いを利用した測定法であり、液化水素プラントなどで採用されている[9]。

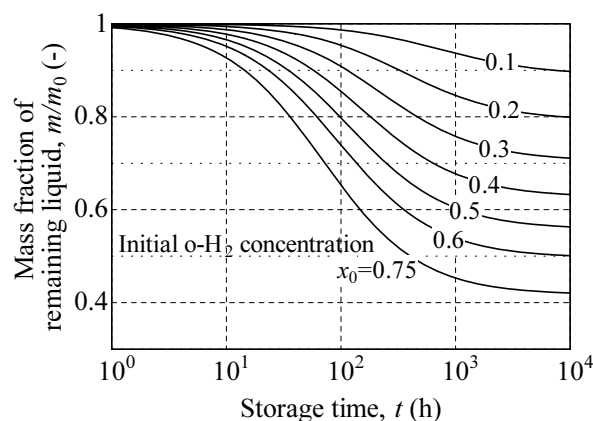


Figure 2: Mass fraction of remaining liquid in adiabatic container

3. 水素の熱力学性質

3.1 PVT と状態方程式

水素の臨界点は、臨界温度 33K、臨界圧力 1.3MPa と非常に低温、低圧で PVT の状態曲面は図3のようになっている。PVT の関係は、ノーマル水素とパラ水素でほとんど変わらない。図3から明らかのように、水素の密度は非常に小さく、例えば 60°C で 100MPa まで圧縮しても $22.9 \text{mol/dm}^3 (= 46.2 \text{kg/m}^3)$ 程度にしかならない。理想気体に近いと考えられる水素だが、理想気体の状態方程式； $P = \rho RT$ で密度を計算すると、

36.1mol/dm³であって、58%も異なることから、理想気体での代用は困難で、やはり正確な物性値が必要不可欠である。

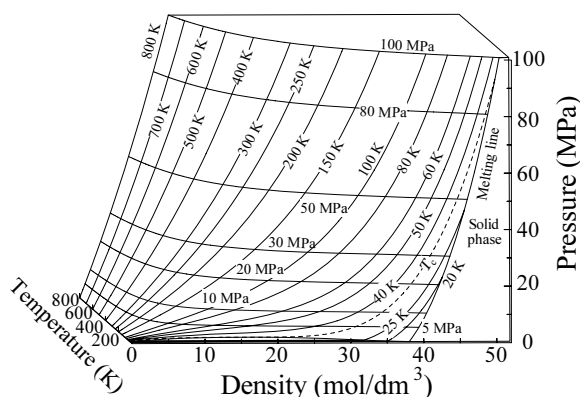


Figure 3: PVT surface of hydrogen calculated from the equation of state of normal hydrogen by Leachman [6]

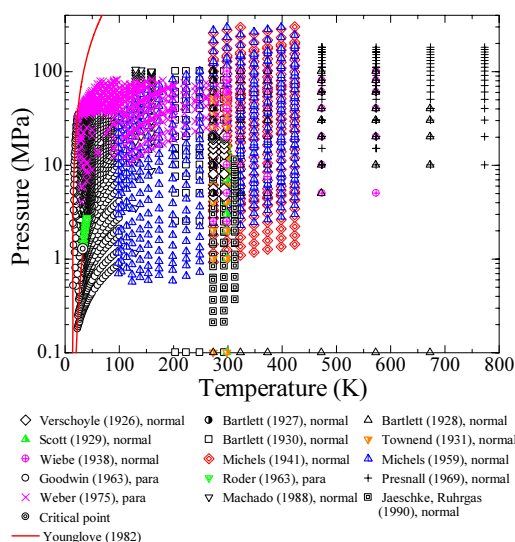


Figure 4: Distribution of PVT for hydrogen

熱力学性質において最も基本的な物性であり、状態方程式作成の基礎データとなる PVT は 1963 年の Goodwin ら[10]による温度範囲 15K から 100K、圧力範囲 35MPa までの液相域を含む広範囲の測定により明らかになってきたと言える。それ以降、1970 年代を中心に NBS(現 NIST)と NASA によって、液相域を中心に多くの PVT 測定が行われた。1980 年代に入ると、体系的な測定は全く行われなくなったが、近年再び水素物性に注目が集まっている。2007 年には Jacobsen ら[11]が過去の熱力学

性質の実測値情報をまとめている。図 4 に PVT の実測値分布を示す。423K までは van der Waals 研究所の Michels ら[12,13]が測定値を報告しているが、それ以上の温度ではほとんど測定が行われていないのが現状である。

Younglove[14]は 1982 年にパラ水素に対し、温度範囲 14K(三重点温度)から 400K、圧力範囲 121MPa までの領域で適用可能な、式(5)で表わされる Modified Benedict-Webb-Rubin (MBWR)型の状態方程式を作成した。この状態方程式は、25 年以上の長きにわたり広く使用されている。

2007 年にはドイツのガス会社を中心とするグループである GERG[7]がノーマル水素に対し、式(6)から式(8)に示すような Helmholtz 自由エネルギーの形で記述される状態方程式を、温度範囲 14K から 700K、圧力 300MPa までの領域に対して作成した。また、NIST-アイダホ大学のグループの Leachman[6]は、オルソ水素、パラ水素、ノーマル水素の 3 つの水素に対して、14K から 1000K、2000MPa までの広範囲にわたる状態方程式を GERG と同様な Helmholtz 関数型で作成した(式(9)から式(11))。実測値の再現性から判断すると、現状では Leachman の状態方程式を用いることが望ましい。しかしこれらの状態方程式は既存の実測値を用いて作成されており、実測値に対する再現性は Younglove の状態方程式と比較して向上しているが、高温、高圧域は外挿の状態で、なお新たな高精度の実測値の報告が切望されている。

Younglove の状態方程式

$$\begin{aligned}
 P = & \rho RT + \rho^2(N_1 T + N_2 T^{1/2} + N_3 + N_4 / T + N_5 / T^2) \\
 & + \rho^3(N_6 T + N_7 + N_8 / T + N_9 / T^2) \\
 & + \rho^4(N_{10} T + N_{11} + N_{12} / T) + \rho^5(N_{13}) \\
 & + \rho^6(N_{14} / T + N_{15} / T^2) + \rho^7(N_{16} / T) \\
 & + \rho^8(N_{17} / T + N_{18} / T^2) + \rho^9(N_{19} / T^2) \\
 & + \rho^3(N_{20} / T^2 + N_{21} / T^3) \exp(\gamma \rho^2) \\
 & + \rho^5(N_{22} / T^2 + N_{23} / T^4) \exp(\gamma \rho^2) \\
 & + \rho^7(N_{24} / T^2 + N_{25} / T^3) \exp(\gamma \rho^2) \\
 & + \rho^9(N_{26} / T^2 + N_{27} / T^4) \exp(\gamma \rho^2) \\
 & + \rho^{11}(N_{28} / T^2 + N_{29} / T^3) \exp(\gamma \rho^2) \\
 & + \rho^{13}(N_{30} / T^2 + N_{31} / T^3 + N_{32} / T^4) \exp(\gamma \rho^2)
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

N_i, γ : 物質固有の定数

GERG の状態方程式

$$a(\rho, T) / RT = \alpha^0(\delta, \tau) + \alpha^1(\delta, \tau)
 \tag{6}$$

$$\alpha^0(\delta, \tau) = \frac{R^*}{R} [c^u + c^l \tau + c_0 \ln(\tau) + \sum_{k=1,3} m_k \ln[\sinh(\theta_k \tau)] - \sum_{k=2,4} m_k \ln[\cosh(\theta_k \tau)] + \ln(\delta)] \quad (7)$$

$$\alpha^r(\delta, \tau) = \sum_{i=1}^5 n_i \delta^i \tau^i + \sum_{i=6}^{14} n_i \delta^i \tau^i \exp(-\delta^i) \quad (8)$$

- a : Helmholtz 自由エネルギー
- α : 無次元化された Helmholtz 自由エネルギー
- 上付き 0 : 理想気体項
- 上付き r : 剰余項
- R^* : 旧ガス定数 (= 8.314510)
- R : 現在のガス定数 (= 8.314472)
- $\delta = \rho / \rho_c, \tau = T_c / T$
- ρ_c : 臨界密度
- T_c : 臨界温度
- $c^l, c^u, c_0, m_k, \theta_k, n_i, d_i, t_i, p_i$: 物質固有の係数

Leachman の状態方程式

$$a(\rho, T) / RT = \alpha^0(\delta, \tau) + \alpha^r(\delta, \tau) \quad (9)$$

$$\frac{C_p^0}{R} = n_0 + \sum_k v_k \left(\frac{u_k}{T} \right)^2 \frac{\exp(u_k / T)}{[\exp(u_k / T) - 1]^2} \quad (10)$$

$$\alpha^r(\delta, \tau) = \sum_{i=1}^7 n_i \delta^i \tau^i + \sum_{i=8}^9 n_i \delta^i \tau^i \exp(-\delta^i) + \sum_{i=10}^{14} n_i \delta^i \tau^i \exp[-\varphi_i (\delta - D_i) - \beta_i (\tau - \gamma_i)] \quad (11)$$

- C_p^0 : 理想気体の定圧比熱
- $n_0, v_k, u_k, n_i, d_i, t_i, p_i, \varphi_i, D_i, \beta_i, \gamma_i$: 物質固有の係数
- α^0 は熱力学関係式より C_p^0 から導出

3.2 誘導状態量

比熱や音速、エンタルピー、エントロピー、ジュール・トムソン係数といった誘導状態量は、状態方程式から熱力学関係式を用いて計算することができる。水素の誘導状態量に関する実測値はほとんどなく、実測値の報告が待たれるところであるが、物性値の使用に際しては、PVT とは異なり、オルソ水素とパラ水素の違いを認識し、両者の物性値を使い分けることが重要である。

図 5 は Leachman の状態方程式から計算したオルソ水素、パラ水素、ノーマル水素の理想気体状態における定圧比熱である。400K ではノーマル水素とパラ水素では 0.5% しか変わらず、それ以上の温度ではさらに差は小さく、収束するような挙動になっているが、150K ではノーマル水素は 25J/mol·K なのに対し、パラ水素は 33J/mol·K であるので、パラ水素の方が 32% も大きい。オルソ水素とパラ水素の比熱は、統計力学で理論的に計算することが可能であり、著名な統計力学のテキスト[15]で演習問題にも取り上げられている。このようなオルソ水素とパラ水素の物性における違いは、比熱をはじめとする熱量的性質に大きく現れ

る。

オルソ水素とパラ水素で物性値が異なる誘導状態量の例として、図 6 に Leachman の状態方程式から計算した音速の状態曲面を示す。図 6 はパラ水素の状態曲面であるが、50MPa と 100MPa の等圧線にのみオルソ水素とノーマル水素の等圧線も示している。音速を状態方程式から導出する場合には、比熱同様に理想気体の定圧比熱を必要とするため、150K 付近でノーマル水素とパラ水素の物性値が異なり注意が必要である。

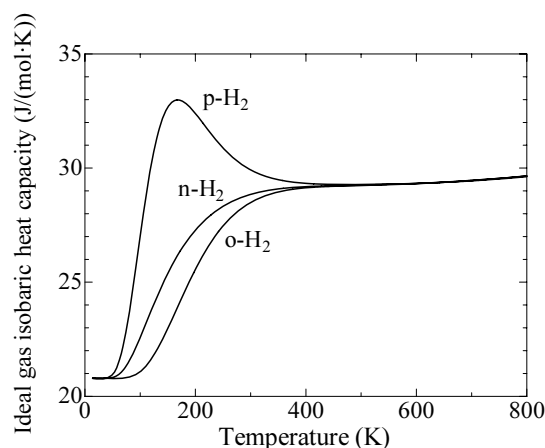


Figure 5: Ideal gas isobaric heat capacity of ortho-, para-, and normal hydrogen

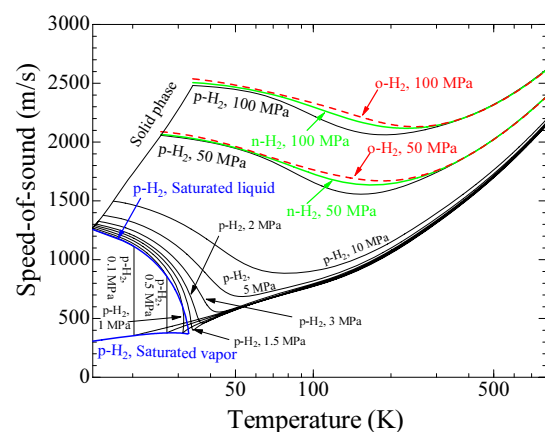


Figure 6: Speed-of-sound of ortho-, para-, and normal hydrogen

4. 輸送性質

粘性係数や熱伝導率といった輸送性質も水素エネルギーの利用において必要不可欠である。水素の輸送性質の実測値は Leachman ら[16]によってまとめられている。図 7, 8 に粘性係数と熱伝導率

の実測値分布を示す。粘性係数や熱伝導率においても、400K以上の温度領域において実測値が不足しており、熱力学性質同様に実測値の報告が切望されている現状にある。

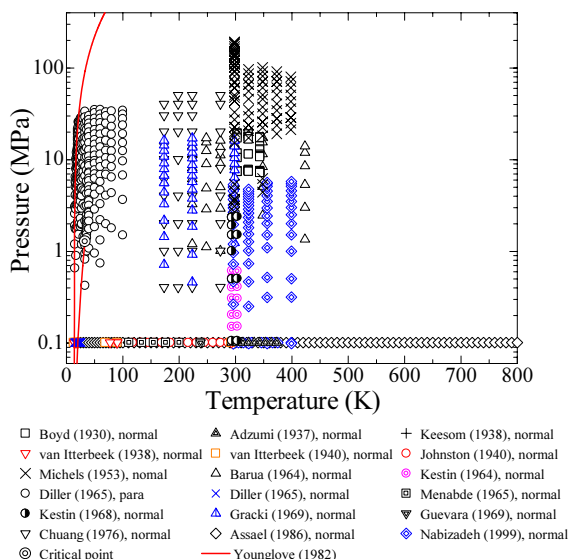


Figure 7: Distribution of viscosity for hydrogen

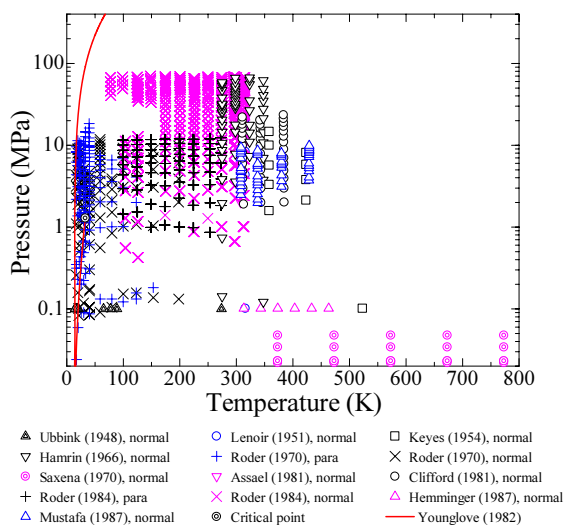


Figure 8: Distribution of thermal conductivity for hydrogen

Diller[17]は1965年に14Kから100K、35MPaの領域においてパラ水素の粘性係数を測定し、式(12)、(13)で表される粘性係数の式を作成した。

$$\eta = \eta_0(T) + \eta_E(\rho, T) \quad (12)$$

$$\eta_E(\rho, T) = A \exp(B/T) \quad (13)$$

- η : 粘性係数
- η_0 : 希薄気体の粘性係数
- η_E : 剰余項
- A, B : 密度の関数

熱伝導率については、Roder[18]が1984年に78Kから310K、70MPaまでの領域で、ノーマル水素とパラ水素の測定を行い、式(14)から式(16)に示す式を作成した。

$$\lambda = \lambda_0(T) + \lambda_{\text{excess}}(\rho, T) + \Delta\lambda_{\text{critical}}(\rho, T) \quad (14)$$

$$\lambda_{\text{excess}}(\rho, T) = \alpha\rho + \delta[\exp(\beta\rho\gamma) - 1] \quad (15)$$

$$\Delta\lambda_{\text{critical}}(\rho, T) = A \exp(-x^2) \quad (16)$$

- λ : 熱伝導率
- λ_0 : 希薄気体の熱伝導率
- λ_{excess} : 剰余項
- $\Delta\lambda_{\text{critical}}$: 臨界点近傍を表すための項
- δ, A : 温度の関数
- X : 密度の関数
- α, β, γ : 定数

しかし、粘性係数、熱伝導率ともに、常温以上の温度領域では、関連すべき実測値が存在しないために、分子間力および運動論に基づいたChapman-Enskogの理論式が物性値計算に用いられる。Chapman-Enskogの理論式の精度は10%から15%程度であると推定される。

また、熱伝導率の場合にはオルソ水素とパラ水素で物性が異なるため注意が必要である。図9は希薄気体におけるノーマル水素とパラ水素の熱伝導率である。150Kでノーマル水素は1.0mW/(cm·K)であるのに対し、パラ水素は1.3mW/(cm·K)であるため、こちらも30%の違いがある。

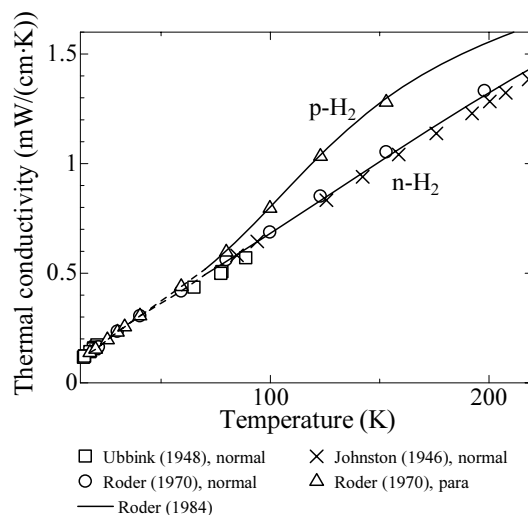


Figure 9: Thermal conductivity of dilute para- and normal hydrogen

5. まとめ

近年、プラグイン・ハイブリッド車(PHEV)の技術開発が目覚ましく、FCVは不要になり、水素の

時代は来ないのではないかという見方が一部にある。筆者は、PHEV は街中を走り回る車として普及し、長距離仕様の車はやはり FCV になり、やはり水素の時代がくるのではないかと期待している。本稿では、水素の異性体、オルソとパラおよびそれらの熱物性値の現状について紹介し、高圧域の水素の熱物性値の実測データの不足を指摘した。水素の物性値は水素の時代の基盤となる重要な情報であり、その意味でも広範囲の物性値を整備しておくことは極めて重要であると考えている。

参考文献

- [1] Farkas, A., Orthohydrogen, Parahydrogen and Heavy Hydrogen, Cambridge University Press, 1935
- [2] Woolley, H.W., et al., Compilation of Thermal Properties of Hydrogen in Its Various Isotopic and Ortho-Para Modifications, NBS Research Paper RP1932, Vol.41, 1948
- [3] McCarty, R.D. and Weber, L.A., Thermophysical Properties of Parahydrogen from Freezing Liquid Line to 5000 R for Pressures to 10,000 Psia, NBS Technical Note 617, 1972
- [4] McCarty, R.D., Hydrogen Technological Survey-Thermophysical Properties, NASA SP-3089, 1975
- [5] McCarty, R.D., et al., Selected Properties of Hydrogen (Engineering Design Data), NBS Monograph 168, 1981
- [6] Leachman, J., Fundamental Equations of State for Parahydrogen, Normal Hydrogen, and Orthohydrogen, Master's Thesis, University of Idaho, 2007
- [7] Kunz, O., et al., The GERG-2004 Wide-Range Equation of State for Natural Gases and Other Mixtures, GERG Technical Monograph 15, 2007
- [8] Larsen, A.H., et al., The Rate of Evaporation of Liquid Hydrogen Due to the Ortho-Para Hydrogen Conversion, The Review of Scientific Instruments, Vol.19, No.4, pp.266-269, 1948
- [9] 天堀洋一, 他 4 名, オルソ・パラ水素分析計の試作, ヤナコニュース, Vol.14, No.4, pp.1-5, 1985
- [10] Goodwin, R.D., et al., Pressure-Density-Temperature Relations of Fluid Para Hydrogen From 15 to 100 °K at Pressures to 350 Atmospheres, Journal of Research of the National Bureau of Standards-A. Physical and Chemistry Vol.67A, No.2, pp.173-192, 1963
- [11] Jacobsen, R.T., et al., Current Status of Thermodynamic Properties of Hydrogen, International Journal of Thermophysics, Vol.28, No.3, pp.758-772, 2007
- [12] Michels, A. and Goudekot, M., Compressibilities of Hydrogen Between 0°C and 150°C up to 3000 Atmospheres, Physica, Vol.8, pp.347-352, 1941
- [13] Michels, A., et al., Compressibility Isotherms of Hydrogen and Deuterium at Temperatures Between -175°C and +150°C (at Densities up to 960 Amagat), Physica, Vol.25, pp.25-42, 1959
- [14] Younglove, B. A., Thermophysical Properties of Fluids. I. Argon, Ethylene, Parahydrogen, Nitrogen, Nitrogen Trifluoride, and Oxygen, Journal of Physical and Chemical Reference Data, Vol.11, Supplement No.1, 1982
- [15] 久保亮五編, 熱学・統計力学, 裳華房, pp.319-321, 1961
- [16] Leachman, J.W., Current Status of Transport Properties of Hydrogen, International Journal of Thermophysics, Vol.28, No.3, pp.773-795, 2007
- [17] Diller, D. E., Measurements of the Viscosity of Parahydrogen, Journal of Chemical Physics, Vol.42, No.6, pp.2089-2100, 1965
- [18] Roder, H. M., Thermal Conductivity of Hydrogen for Temperatures Between 78 and 310 K with Pressures to 70 MPa, International Journal of Thermophysics, Vol.5, No.4, pp.323-350, 1984

HYDROGENIUS プロジェクトにおける水素脆化研究： 水素脆化は脆性破壊か延性破壊か

Research of Hydrogen Embrittlement in HYDROGENIUS Project

松岡三郎 (九州大学)

Saburo MATSUOKA (Kyushu University)

e-mail: smatuoka@mech.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

地球環境問題を解決する有力な手段の一つとして、燃料電池自動車 FCV などの水素エネルギーシステム、水素ステーションなどの水素エネルギーインフラの研究開発が進められている。日本では、2002 年から JHFC プロジェクト（水素・燃料電池実証プロジェクト）が行われている[1]。35 MPa 水素タンクを搭載した FCV を公道で走らせ、35 MPa 水素ステーションで FCV に水素を供給し、これらの実用化に向けた性能評価や課題抽出を行っている。2008 年からは 70 MPa FCV と 70 MPa 水素ステーションによる 70 MPa 実証試験が開始された。同様な 70 MPa 実証試験は欧米でも行われている。JHFC プロジェクトとは別に、産業技術総合研究所において、「水素・燃料電池研究は基礎に立ち戻るべき」として、三つの取り組みが開始された。2005 年に、固体高分子型燃料電池の抜本的な低コスト化と耐久性・信頼性の向上を目的に、固体高分子型燃料電池先端基盤研究センター（FC-Cubic）が設立された。2006 年に、「水素脆化」の基本メカニズム解明と使用材料の実用的な安全指針の確立を目的に、水素材料先端科学研究センター（HYDROGENIUS）が設立された。2007 年には、水素貯蔵材料の革新的な性能向上を目的に、水素貯蔵材料先端基盤研究事業が開始された。

本解説では、水素脆化の基本メカニズムの解明を念頭に置いて、HYDROGENIUS の成果の一端を侵入水素量、引張強度、疲労き裂進展に分けて紹介する。

2. 侵入水素量

水素エネルギーシステム・インフラに使用される構造材料は水素に曝されるため、水素脆化が重要な課題となっている。水素脆化あるいは遅れ破壊は古くから研究されているが、いまだに解決されていない。水素脆化あるいは遅れ破壊に関する

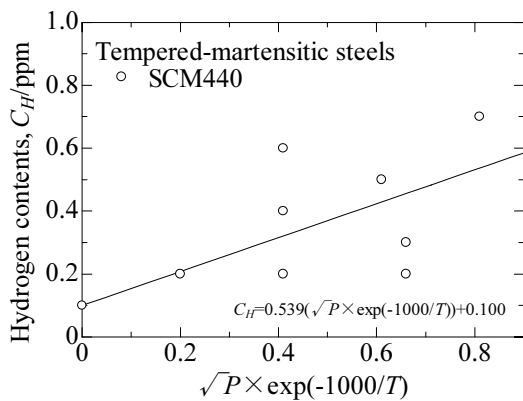
著書[2]や解説[2-5]は多くある。これらの中には多くの水素脆化モデルが紹介されているが、最近では、水素脆化メカニズムは主として格子脆化説と局所変形助長説で説明されている[4, 6-8]。格子脆化説は、水素の侵入により原子間結合力が低下し、脆性破壊が起きやすくなると考える説である[4, 6]。局所変形助長説は、水素が塑性変形を容易にし、局所的な変形が生じるため、結果としてマクロ的には小さい変形で破壊すると考える説である[4, 7, 8]。しかし、どちらの説が正しいかについては、現在でも決着がついていない。このような原因の一端は、水素が元素の中で最も軽く、小さいため、いままで材料中の水素量が測定できなかったこと、材料中の水素の存在位置が観察できなかったことによる。最近、昇温脱離分析の進歩により材料中の水素量が測定できるようになった。

図 1 は、材料中の侵入水素量について、新エネルギー・産業技術総合開発機構 NEDO の報告書[9]に記載されている数値データをジーベルツ則にしたがって図示したものである[10]。この報告書には、35MPa の圧力を中心とした高压水素ガス中において、オーステナイト系ステンレス鋼 SUS304, SUS304L, SUS316, SUS316L, SUS316LN, SUS310S, SUS630, アルミニウム合金 6061-T6, 銅合金 C771, 低合金鋼 SCM440 の引張特性、疲労特性、水素侵入特性を調べた結果が記載されている。図 1(a)には低合金鋼 SCM440, 図 1(b)にはオーステナイト系ステンレス鋼 SUS304L, SUS316, SUS316L の結果を示す。文献[9]に記載されている水素ガス曝露条件としては、圧力が 11.3~45 MPa, 温度が 358 と 473 K, 時間が 240 と 1000 h である。試験片は直径 4 mm の丸棒であるが、直径 2 と 3 mm の丸棒も一部使用している。

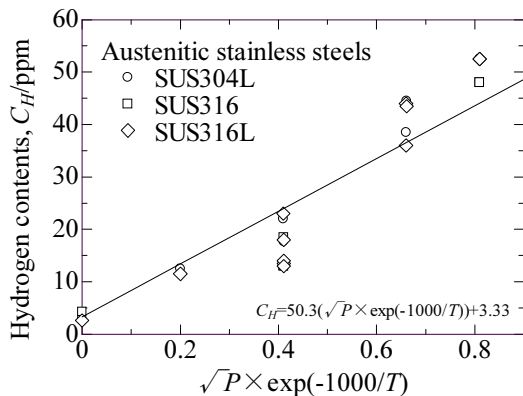
熱平衡状態にあるときの固溶水素量 C_H は、次式のジーベルツ則で表される。

$$C_H = \sqrt{P/P^0} \exp[-(\Delta H_s/R) + (\Delta S/R)] \quad (1)$$

ここで、 P は水素ガス圧力、 P^0 は0.1 MPa(1気圧)、 ΔH_s は溶解熱、 ΔS は溶解のエントロピーである。式(1)のような関係(アレニウスプロット)を調べる場合、多くの研究では、 $\sqrt{P} \exp(-1000/T)$ を使用する。そこで、図1では横軸に $\sqrt{P} \exp(-1000/T)$ を採用した。低合金鋼 SCM440 とオーステナイト系ステンレス鋼 SUS304L, SUS316, SUS316L における C_H と $\sqrt{P} \exp(-1000/T)$ の関係はどちらも直線となっている。 $\sqrt{P} \exp(-1000/T)$ の同じ値に対しては、侵入する水素量は、低合金鋼よりオーステナイト系ステンレス鋼のほうが1桁以上多い。 $\sqrt{P} \exp(-1000/T)$ のパラメータの採用は熱平衡状態を前提としている。上述の曝露温度と曝露時間、試験片直径から判断して、オーステナイト系ステンレス鋼と比べて水素拡散係数が3~4桁大きい SCM440 鋼は、熱平衡状態にある。一方、水素拡



(a) 低合金鋼 SCM440



(b) オーステナイト系ステンレス鋼

図1 侵入水素量とジベルパラメーターの関係

散係数が低いオーステナイト系ステンレス鋼は熱平衡状態にあるかどうかは不明であるが、熱平衡状態に達していないと考えると、図1(b)よりさらに多くの水素が侵入する。

HYDROGENIUS では、最高水素圧力が 100MPa で最高温度が 300 °C と 120 °C の 2 台の高圧水素ガス曝露容器、四重極質量分析方式 (TDS) とガスクロマトグラフィー方式 (TDA) の 2 台の昇温脱離分析装置を整備し、高圧水素ガス中で侵入する水素量を測定している。図2は新たに開発した材料中の水素測定法の結果である[11]。板厚 h を変えた直径 7mm の円盤を高圧水素ガスに曝露し、水素量を測定する。図2には、縦軸に水素量 C_H 、横軸に板厚の逆数 $1/h$ をとり、SUS316L について示している。 $1/h$ が小さい、すなわち h が厚いときには、材料内部まで水素が侵入しないので、 C_H は小さい。 $1/h$ が大きくなり、材料表面から内部まで水素がほぼ均一に侵入すると、 C_H は飽和する。図2の勾配部分から水素拡散係数、飽和値から水素固溶度が求まる。現在は、オーステナイト系ステンレス鋼、低合金鋼、炭素鋼の固溶水素量と水素拡散速度の水素ガス圧力と温度に対する依存性(アレニウスプロット、図1参照)を系統的に集積している。すなわち、固溶水素量と水素拡散速度のデータベースを構築している。

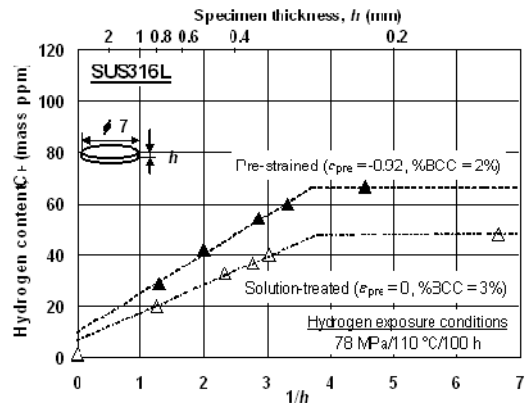


図2 侵入水素量と試料板厚の関係

3. 引張強度

3.1 NASA データベース

NASA の Safety Standard of Hydrogen and Hydrogen Systems[12]には、69MPa 水素ガス中で求めた種々の材料の引張特性が二つの表 (Table A5.8 と A5.9) にまとめられている。Table A5.8 におい

では、水素ガス中とヘリウムガス中の切欠き試験片の引張強度と平滑試験片の絞りを判断基準とし、材料が極端に脆化する”Extremely embrittled”, 脆化する”Severely embrittled”, 少し脆化する”Slightly embrittled”, 脆化しない”Negligibly embrittled”の分類を行っている.”Negligibly embrittled”グループには、水素ガス中で切欠き試験片の引張強度と平滑試験片の絞りがどちらも低下しない材料を分類している。

図3と4は、文献[13-15]に載っている数値データを用いて作図したもの[10]である。文献[13-15]はNASAのTables A5.8とA5.9のもとになった文献である。図3には、平滑試験片で得られた引張強度を示す。縦軸にはヘリウムガス中の引張強度に対する水素ガス中の引張強度の比 $\sigma_{B,H}/\sigma_{B,He}$ 、横軸にはヘリウムガス中の引張強度 $\sigma_{B,He}$ を採用している。以後、 $\sigma_{B,H}/\sigma_{B,He}$ を相対引張強度と呼ぶ。図4は、ヘリウムガス中の絞りに対する水素

ガス中の絞りの比 ϕ_H/ϕ_{He} について、図3の引張強度の場合と同じようにしてまとめている。以後、 ϕ_H/ϕ_{He} を相対絞りと呼ぶ。文献[13-15]に記載されている引張試験条件としては、水素とヘリウムのガス圧力と温度はそれぞれ69 MPaと22°Cである。ひずみ速度は、平滑試験片の場合には、弾性変形域で0.002/minute ($3.3 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$)、塑性変形域で0.04/minute ($6.7 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$)である。

図3に示すように、平滑試験片の場合、ヘリウムガス中の引張強度が1200 MPaまでは、相対引張強度 $\sigma_{B,H}/\sigma_{B,He}$ は水素と材料の影響を受けない。すなわち、 $\sigma_{B,H}/\sigma_{B,He} = 1$ である。ヘリウムガス中の引張強度が1200 MPaを越えると、相対引張強度は水素の影響を受け、低下する。一方、図4に示すように、絞りに及ぼす水素の影響は引張強度の場合と異なる。オーステナイト系ステンレス鋼、アルミニウム合金、銅合金の相対絞り ϕ_H/ϕ_{He} は水素の影響を受けず、 $\phi_H/\phi_{He} = 1$ である。一方、炭素鋼、低合金鋼、チタン合金、ニッケル合金の相対絞りは水素の影響を受け、 $\phi_H/\phi_{He} < 1$ となる。そして、相対絞りは、ヘリウムガス中の引張強度が増加するにしたがって低下する。図3で相対引張強度、図4で相対絞りが共に低下しないオーステナイト系ステンレス鋼、アルミニウム合金、銅合金は、NASAのTable A5.8では、”Negligibly embrittled”グループに属する。

上述のNASAの高圧水素ガス中引張試験は69MPa、22°Cで行われている[13-15]。水素ガス中における試験片装着から試験開始までの保持時間はほぼゼロである。保持時間をほぼゼロにしたことについては、オーステナイト系ステンレス鋼SUS310、炭素鋼A-302 Gr. C、チタン合金Ti-6Al-4Vの焼鈍材と時効材を用いて、保持時間をほぼ0、1、8、24 hとした引張試験を行い、保持時間は引張強度と絞りに影響を及ぼさなかったとしている[13-15]。しかし、22°Cで保持時間がゼロであるときには、試験片表面と内部の水素量が異なる。特に、水素拡散速度が遅いオーステナイト系ステンレス鋼では、22°Cのもとで24時間でも水素は試験片表面から数 μm までしか侵入していない。このように試験片中の水素分布が均一でないもとは、引張特性に及ぼす水素の影響がバルク特性として評価できるかどうかは不明である。そこで、HYDROGENIUSUでは、試験片中の水素分布がほ

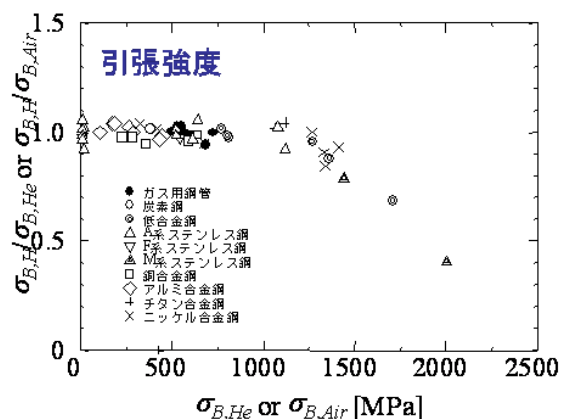


図3 相対引張強度とヘリウム中または大気中引張強度の関係

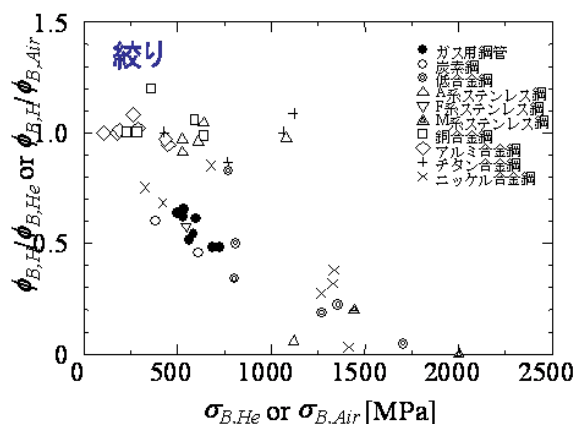


図4 相対絞りとヘリウム中または大気中引張強度の関係

ば均一なる条件のもとで、試験片に予め水素をチャージする方法（高圧水素ガス曝露、浸漬水素チャージ、電解水素チャージ）を採用した。特に、オーステナイト系ステンレス鋼では、水素拡散係数を大きくするため、水素ガス曝露温度を 300°C 付近に設定している。そして、水素チャージ後、室温大気中で引張試験を行っている。引張試験と平行し、侵入水素量を水素量測定用試験片を作成して TDS または TDA を用いて測定している。また、引張破壊したすべての試験片の水素量も測定している。

3.2 水素ステーション蓄圧器用低合金鋼 SCM435

図 5 に水素ステーション蓄圧器で使用されている低合金鋼 SCM435（引張強度 $\sigma_B = 927$ MPa、焼き戻しマルテンサイト組織）の侵入水素量を TDA で測定した結果を示す[10]。水素量測定用丸棒（直径 5mm、長さ 50mm）は、実際の蓄圧器（外径 315

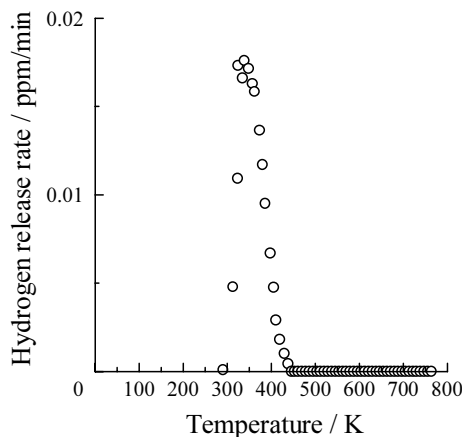


図 5 SCM435 鋼の水素放出温度プロファイル

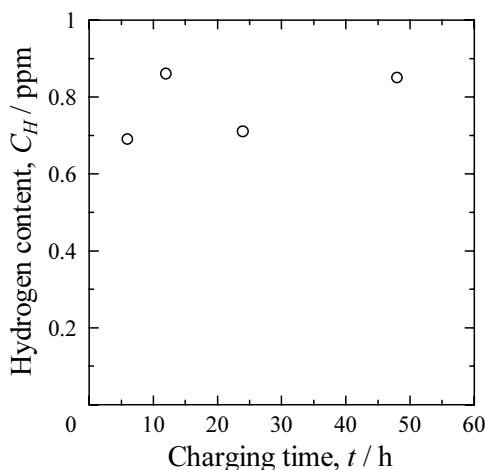


図 6 SCM435 鋼の侵入水素量と水素チャージ時間の関係

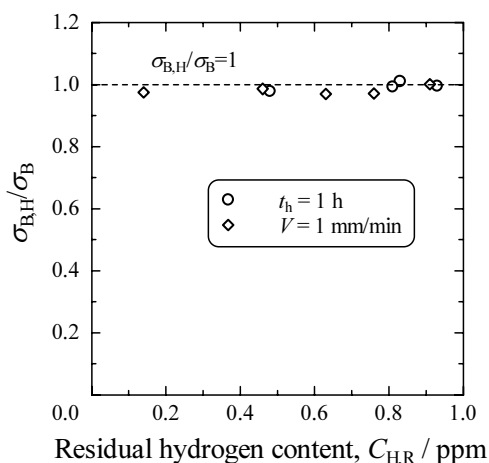
mm、厚さ 35 mm の円筒）から切り出した。水素量測定用丸棒は、40 °C に保持した 20 mass% チオシアン酸アンモニウム水溶液（ NH_4SCN 水溶液）に浸漬し、水素をチャージした。浸漬時間は 6, 12, 24, 48 h である。

図 5 に示すように、丸棒をチオシアン酸アンモニウム水溶液に 48 時間浸漬したときに得られた水素放出温度プロファイルを示す。水素放出は、温度が測定開始の室温 (298 K (25°C)) から上昇するとともに多くなり、ほぼ 350 K (77°C) でピークを迎えたのち、ほぼ 450 K (177°C) で終了している。Takai と Watanuki[16]によると、この温度範囲で放出される水素は拡散性水素であり、水素脆化を引き起こす。図 5 のプロファイルの下側の面積をチオシアン酸アンモニウム水溶液浸漬で鋼中に侵入した拡散性水素量とした。

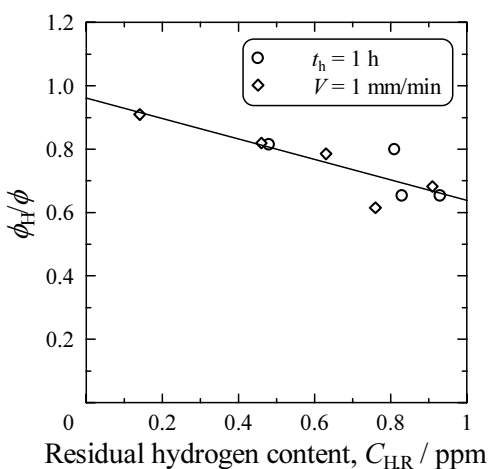
図 6 に、侵入した拡散性水素量 C_H とチオシアン酸アンモニウム水溶液浸漬時間 t の関係を示す[10]。侵入水素量は、多少ばらついているが、12 時間浸漬でほぼ飽和しているように見える。侵入水素量が飽和することは、直径 5 mm の丸棒を 12 時間以上浸漬すると、水素量は丸棒表面と中心で同じになり、ほぼ均一分布になることを意味している。そこで、直径 5 mm の 14A 号丸棒引張試験片は 48 時間浸漬したのち、大気中で引張試験した。引張試験片中の水素量を変えるため、48 時間浸漬した試験片を大気中に 1 時間から 300 時間放置した。引張試験後のすべての試験片に残留していた水素量 $C_{H,R}$ は TDA で測定した。

図 7 には、SCM435 鋼の相対引張強度 $\sigma_{B,H}/\sigma_B$ と相対絞り ϕ_H/ϕ を残留水素量 $C_{H,R}$ に対して示す[10]。 $C_{H,R}$ は 0.14~0.93 ppm の間で変化しているが、 $\sigma_{B,H}/\sigma_B = 1.0$ で一定である。したがって、引張強度が 930 MPa である SCM435 鋼においては、0.14~0.93 ppm の拡散性水素量は引張強度に影響を与えない。一方、相対絞りは、最小の $C_{H,R} = 0.14$ ppm でも $\phi_H/\phi = 1$ とならず、さらに $C_{H,R}$ が増えるにしたがって直線的に低下している。したがって、引張強度 930 MPa の SCM435 鋼の絞りは、0.14~0.93 ppm の拡散性水素量によって低下する。

図 8 に、SCM435 鋼の未チャージ材と水素チャージ材の引張破壊破面の SEM 像を示す[10]。未チャージ材と水素チャージ材はともにカップアンドコーン破壊している。すなわち、破壊した試験片



(a) 相対引張強度

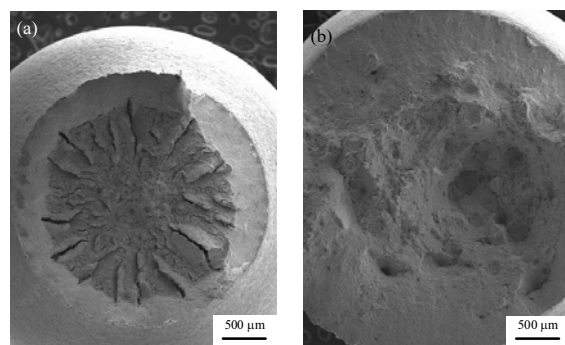


(b) 相対絞り

図 7 SCM435 鋼の相対強度または相対絞りと残留拡散性水素の関係

の中央部には試験片軸に対して全体的にほぼ 90° をなす面からなる垂直応力破壊域が形成され、周辺部には試験片軸に対してほぼ 45° のせん断応力破壊域が形成されている。図 8 で最も特徴的なことは、水素チャージ材と未チャージ材の垂直応力破壊域はほぼ同じ広さであるが、水素チャージ材のせん断応力破壊域のほうが未チャージ材より広いことである。図 9 に、未チャージ材と水素チャージ材の垂直応力破壊域に形成されていたディンプルを示す。未チャージ材と水素チャージ材、垂直応力破壊域とせん断応力破壊域に関係なく、破面は直径約 1 μm の小さなディンプルで覆われていた。

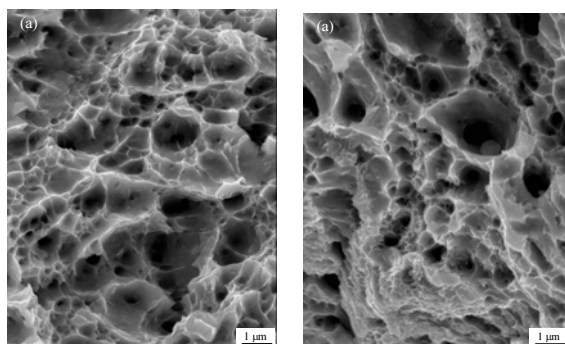
図 10 に、図 7(b)の絞りと図 8 と 9 の SEM 像をもとに作成した引張破壊した未チャージ材と水



(a) 未チャージ材 $C_{HR} = 0$ ppm (b) 水素チャージ材 $C_{HR} = 0.73$ ppm

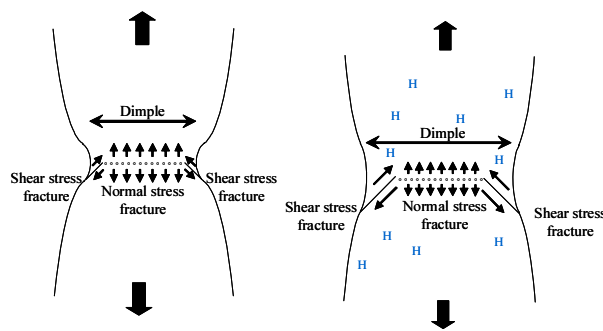
図 8 SCM435 鋼の引張破面。

クロスヘッド速度 $V = 1$ mm/min.



(a) 未チャージ材 $C_{HR} = 0$ ppm (b) 水素チャージ材 $C_{HR} = 0.73$ ppm

図 9 SCM435 鋼の引張破面垂直応力破壊域のディンプル。クロスヘッド速度 $V = 1$ mm/min.



(a) 未チャージ材 (b) 水素チャージ材

図 10 SCM435 鋼の引張破面縦断面の模式図。

素チャージ材の縦割り断面の模式図をそれぞれ示す。未チャージ材と水素チャージ材はともにカップアンドコーン破壊し、垂直応力破壊域とせん断応力破壊域にはともに小さなディンプルが形成される。しかし、垂直応力破壊域は未チャージ材と水素チャージ材で同じ広さであるが、せん断応力

破壊域は水素チャージ材のほうが広い。このことは、水素はせん断破壊域の形成に影響することを示唆している。せん断応力破壊域が広がるためには、試験片がくびれる過程において、せん断応力によるすべり変形が水素により助長され、せん断応力破壊が起こりやすくなることが必要となる。したがって、水素を前もってチャージしたSCM435 鋼の室温大気中引張試験において、水素で絞りが低下する現象すなわち水素脆化は格子性仮説でなく、局所変形助長説で説明できる。換言すると、水素脆化は格子脆化による脆性破壊でなく、局所変形助長によるマイクロ延性破壊である。

3.3 水素パイプライン用炭素鋼 SGP

図 11 から図 15 に水素パイプライン候補材料の配管用炭素鋼鋼管 SGP (0.078C-0.01Si-0.34Mn-0.017P-0.009S mass%, $\sigma_B = 416$ MPa) で得られた水素分析結果と引張試験結果を示す[17]。上述のSCM435 鋼の場合と同様に、水素チャージは 40°C に保持した 20 mass% NH_4SCN 水溶液に試験片を 48 時間浸漬して行った。ただし、SGP 鋼では鋼中の水素量を増やすため、試験片に予ひずみを与えた。水素量は昇温脱離分析装置 TDS で測定した。

図 11 は SGP 鋼における引張試験後の試験片中の残留拡散性水素量と予ひずみの関係である。拡散性水素量は、昇温水素放出プロファイルで室温から 300°C までの水素量とした。残留水素量は予ひずみが大きくなるほど多くなる。この現象は、予ひずみによって増加した転位が水素をトラップするために起こる。

図 12 に相対絞り ϕ_H/ϕ_0 と残留拡散性水素量 $C_{H,R}$ の関係を示す。水素は引張強度には影響を及ぼさないが、絞りを低下させる。

SCM435 鋼と SGP 鋼を比べると、組織は SCM435 鋼で焼き戻しマルテンサイト、SGP 鋼でフェライト・パーライトである。引張強度は SGP 鋼のほうが低く、約 1/2 である。SCM435 鋼では、焼き戻し状態で水素トラップサイトになる転位と炭化物が多く存在するので、焼き戻しのままで水素量は約 0.9 ppm である (図 6)。この水素量で ϕ_H/ϕ_0 は約 0.7 となっている (図 7(b))。一方、SGP 鋼においては、熱間圧延 (焼鈍) のままでは転位が少ないので、予ひずみを与え、転位を増やし、水素量を多くしている。20%の予ひずみで水素量は約 1 ppm になり (図 11)、この水素量で ϕ_H/ϕ_0

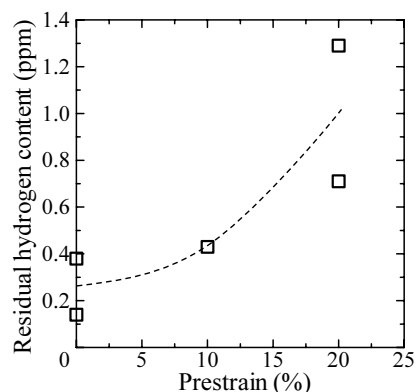


図 11 SGP 鋼の残留水素量と予ひずみの関係

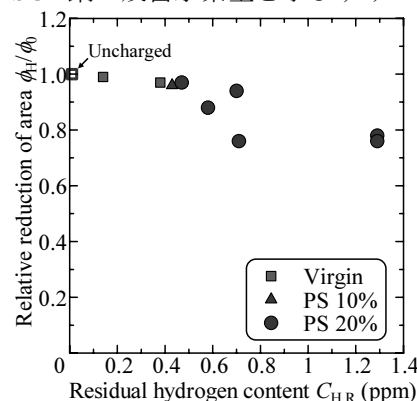
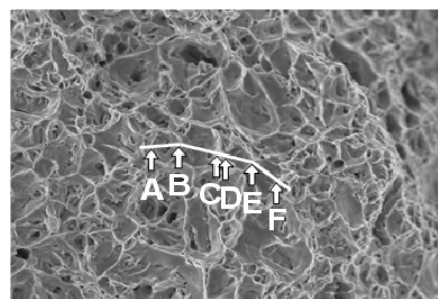
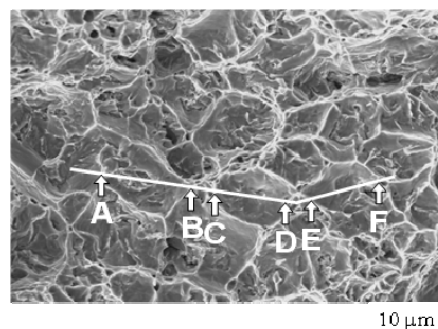


図 12 SGP 鋼の相対絞り ϕ_H/ϕ_0 と残留水素量の関係

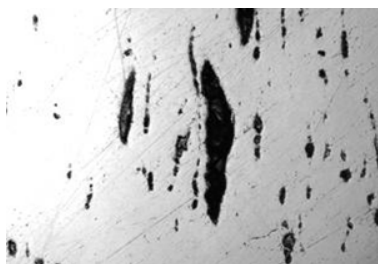


(a) 未チャージ材。 $C_{H,R} = 0.01$ ppm

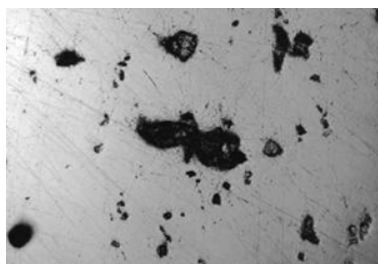


(b) 水素チャージ材 $C_{H,R} = 0.71$ ppm.

図 13 SGP 鋼の引張破面垂直応力破壊域のディンプル



(a) 未チャージ材. $C_{H,R} = 0.01$ ppm



(b) 水素チャージ材 $C_{H,R} = 0.71$ ppm.

図 14 SGP 鋼の引張破面縦断面のボイド

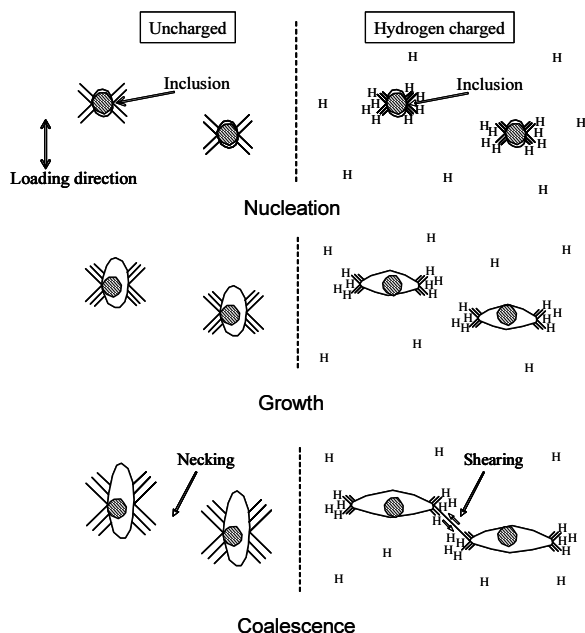


図 15 SGP 鋼のボイド成長の模式図

は約 0.8 となっている (図 12). このような水素侵入特性や相対絞りに加え、引張破面のディンプルにも SCM435 鋼と SGP 鋼で違いがある。

SGP 鋼の未チャージ材と水素チャージ材の引張破壊もカップアンドコーン破壊であった。図 13 に SGP 鋼の垂直応力破壊域でのディンプルをします。SCM435 鋼では、直径約 $1 \mu\text{m}$ の小さなデ

ィンプルが形成されていたが (図 9), SGP 鋼では、直径約 $10 \mu\text{m}$ の大きなディンプルが介在物を起点として形成されている (図 13). さらに、SGP 鋼のディンプル直径は未チャージ材より水素チャージ材で大きくなっている。この原因を調べるため、引張破壊試験片の縦断面を観察した。

図 14 に SGP 鋼の引張破壊試験片縦断面で観察されたボイドを示す。引張荷重軸方向は上下方向である。未チャージ材では、荷重軸方向に伸張した通常のボイドが形成されている。一方、水素チャージ材では、驚くべき現象が観察された。ボイドは荷重軸に垂直な方向に成長していた。

図 15 にはボイドの発生、成長、合体を模式的に示す。左欄の未チャージ材では、ボイドは介在物を起点として発生する。引張ひずみが大きくなるにつれて、ボイドは荷重軸方向に成長する。最終的にボイド間のネッキングでボイドは合体する。一方、水素チャージ材のボイドの発生、成長、合体を考える上でのキーポイントは、水素が応力集中部へ集中すること、集中した水素が局所すべりを助長することである。図 15 の右欄に示すように、介在物周辺の応力集中部に拡散してきた水素は局所すべり変形を助長し、ボイド発生を早める。実際、引張破壊試験片縦断面で単位面積当たりのボイド個数と真ひずみの関係を調べ、水素はボイド発生を早めることを確認している [17]. 次に、ボイド先端に集中した水素はボイド先端での局所すべり変形を助長し、ボイドは荷重軸に垂直方向に成長する。さらに、水素はボイド間のせん断変形 (すべり) を助長し、合体を容易にする。その結果、絞りは水素チャージ材で悪化する (図 12).

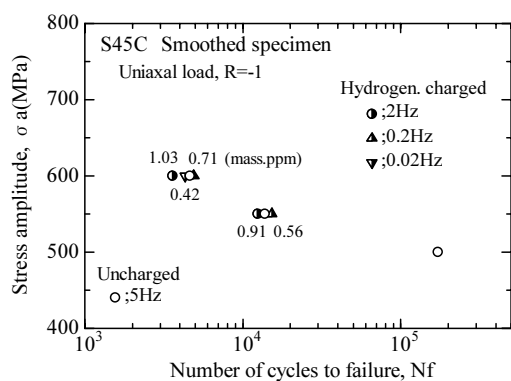
以上で述べたように、低合金鋼 SCM435 と炭素鋼 SGP において、絞りが低下する現象すなわち水素脆化は格子脆化説でなく、局所変形助長説で説明できる。換言すると、水素脆化は格子脆化による脆性破壊でなく、局所変形助長によるマイクロ延性破壊であると結論できる。もう一つの水素パイプライン候補材料である配管用炭素鋼鋼管 STPG370 [18] と水素エネルギーシステム・インフラで多く使用されているオーステナイト系ステンレス鋼 SUS316L [19] においても、同様な結論が得られている。しかし、絞りを低下させる要因は、STPG370 鋼ではパーライト割れ、SUS316L ではボイドシートであった。

4. 疲労き裂進展メカニズム

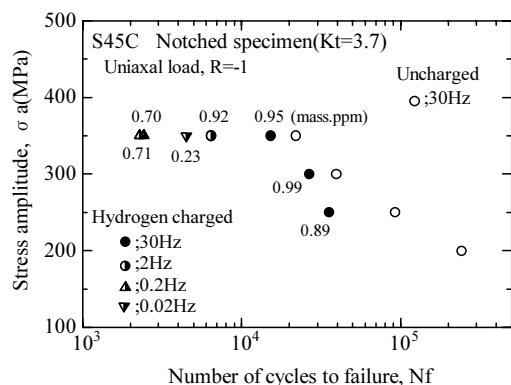
4.1 疲労き裂発生と疲労き裂進展

破壊事故の 80%は疲労破壊に関係すると言われている。したがって、水素エネルギーシステム・インフラの安全性・信頼性を確保するためには、疲労に及ぼす水素の影響を明らかにしなければならない。しかしながら、水素環境下の疲労研究は少ない[20-32].

図 16 は炭素鋼 S45C の 550℃焼き戻し材の平滑試験片と切欠き試験片で得た S-N 特性である[32]. 応力比 $R = \sigma_{\max}/\sigma_{\min}$ は-1 である. 水素チャージは、40℃に保った 20mass%チオシアン酸アンモニウム水溶液中に 48 時間浸漬して行った. 飽和水素量は約 1.2 ppm であった. 平滑試験片では (図 16(a)), 水素チャージ材の疲労寿命は、試験速度に関係なく、未チャージ材の結果とほぼ一致し、水素の影響は見られていない. 一方、切欠き材では (図 16(b)), 未チャージ材と比較して水素チャージ材の疲労寿命は、試験速度 f が 30Hz から 0.2Hz と遅くなるほど、短くなり、最大 1 桁程



(a) 丸棒平滑試験片



(b) 丸棒切り欠き試験片 (Kt=3.7)

図 16 550℃焼き戻した炭素鋼 S45C の未チャージ材と水素チャージ材の S-N 特性 (R = -1)

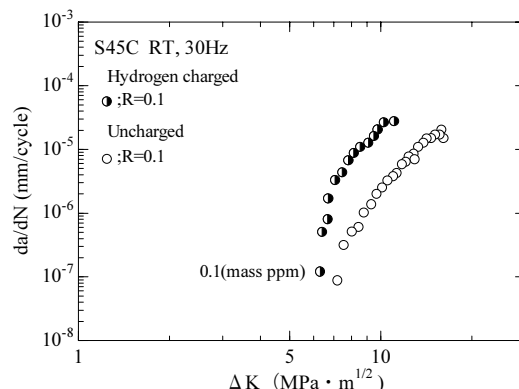


図 17 550℃焼き戻した炭素鋼 S45C の疲労き裂進展特性 (R = -1).

度の低下で飽和している. 切欠き試験片では、平滑試験片に比べてき裂発生寿命が短くなるため、水素による疲労寿命低下はき裂進展寿命の差に関連していることになる.

図 17 は同じ S45C 鋼焼き戻し材の R = -1 での疲労き裂進展速度 da/dN と応力拡大係数範囲 ΔK の関係である[32]. 未チャージ材に比べ、水素チャージ材のき裂進展速度は加速している. したがって、水素エネルギーシステム・インフラの安全性を確保するためには、まず水素による疲労き裂進展加速メカニズム解明が必要である.

4.2 水素パイプライン用炭素鋼 SGP

図 18 に 10%予ひずみを与えた STPG 鋼の疲労き裂試験 (R = 0) で得られたき裂先端のすべりをレプリカ法で観察した結果を示す[31]. 水素チャージは 20mass%チオシアン酸アンモニウム水溶液浸漬で行った. 図 10 において、水素チャージ材のボイドの発生、成長、合体を考える上でのキーポイントは、水素が応力集中部へ集中すること、集中した水素が局所すべりを助長することであると述べた. 図 18 に示すように、未チャージ材においては疲労き裂周辺の広い範囲ですべりが観察されるが、水素チャージ材においては試験周波数 0.01Hz ですべりがほとんど観察されない. すなわち、疲労き裂先端において水素よりすべりが局在化していることがわかる.

図 19 に SGP の疲労破面のストライエーションを示す. 未チャージ材では、典型的な延性ストライエーションが形成されている. 一方、水素チャージ材では、ストライエーションは平坦で、境界が不鮮明である. さらに、ストライエーション

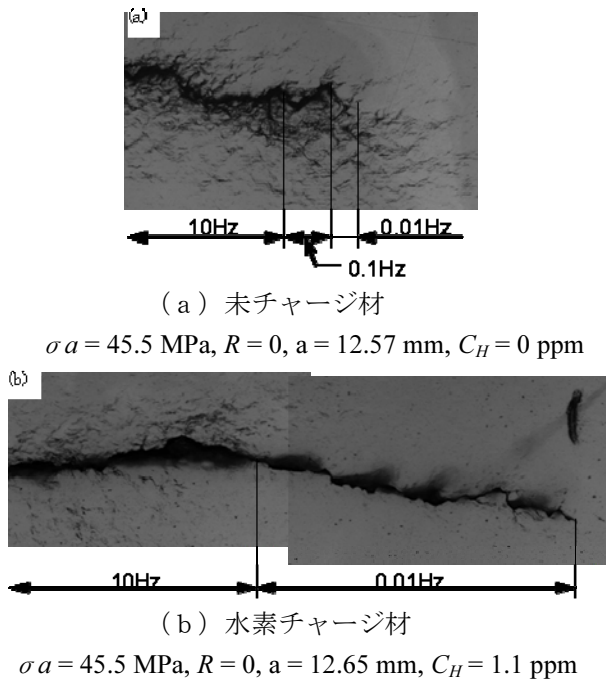
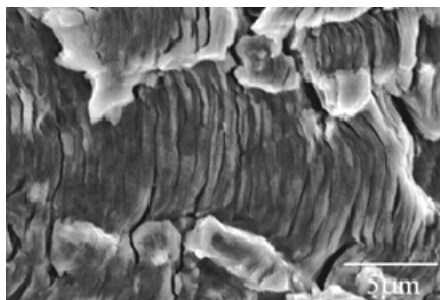
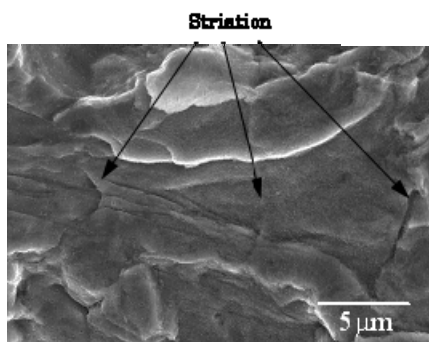


図 18 SGP 鋼の疲労き裂周辺のすべり.



(a) 未チャージ材

$\Delta K = 87 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}, R = 0, f = 0.1 \text{ Hz}, C_H = 0 \text{ ppm}$



(b) 水素チャージ材

$\Delta K = 85 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}, R = 0, f = 0.001 \text{ Hz}, C_H = 0.98 \text{ ppm}$

図 19 SGP 鋼のストライエーション

幅は未チャージ材に比べて水素チャージ材で約 10 倍広い。

図 20 に SGP 鋼における基準化された疲労き

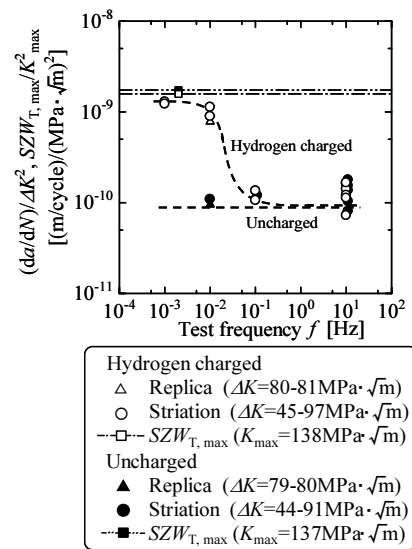


図 20 SGP の基準化された疲労き裂進展速度と試験周波数の関係

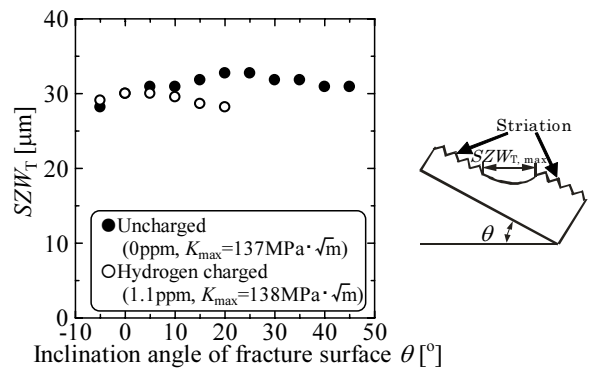


図 21 SGP 鋼のストレッチゾーン幅と破面傾斜角の関係

裂進展速度と試験周波数の関係を示す。き裂進展速度 da/dN にはレプリカ法で求めた速度とストライエーション幅の両方が含まれている。未チャージ材では、基準されたき裂進展速度は試験周波数に依存せず、一定である。未チャージ材に比べ、水素チャージ材ではき裂進展速度は $f \leq 10^{-3} \text{ Hz}$ で加速し、約 10 倍で飽和している。このことは、水素による疲労き裂進展の加速には上限値が存在することを意味している。

水素による疲労き裂進展加速メカニズムを調べるため、疲労き裂進展試験後に 1.5 倍の過大荷重を負荷してストレッチゾーンを形成する試験を行い、ストレッチゾーン形成試験後に破面を少しずつ傾けてき裂先端のストレッチゾーンを観察した。図 21 にストレッチゾーン幅 SZW_T と破面の傾け

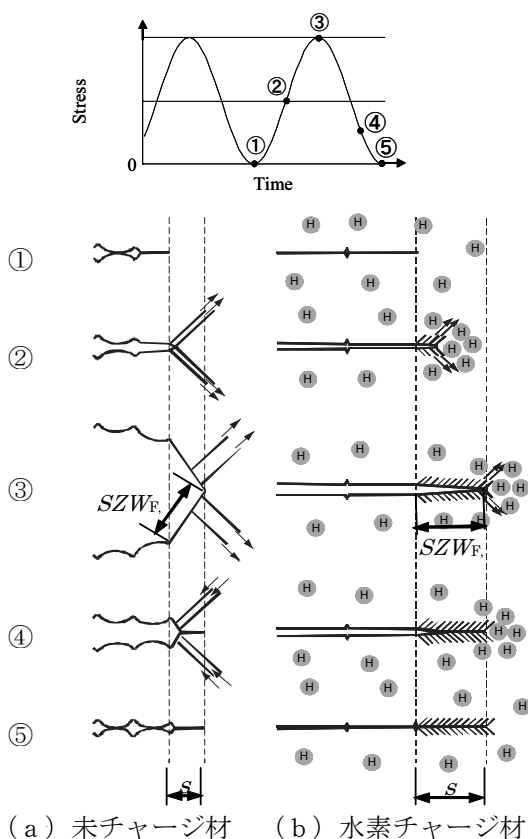


図 22 疲労き裂進展モデル

角度 θ の関係を示す。傾け角度が 0° のとき、破面を真上から観察していることになる。未チャージ材のストレッチゾーン幅は傾け角度 25° で最大になるのに対し、水素チャージ材のストレッチゾーン幅は 0° で最大になっている。このことは、未チャージではき裂先端は開口しているのに対し、水素チャージ材のき裂先端は開口せず、鋭いままであることを示している。

図 22 に、き裂先端のすべり、ストライエーション、ストレッチゾーンの観察結果をもとに作成した疲労き裂進展の模式図を示す。図(a)の未チャージ材では、今までに提案されているモデル[33]に示されているように、応力負荷過程でき裂先端は開口し、最大応力のときの $SZWF$ が形成される。除荷過程においては逆すべりが起こり、き裂は開口していき、最終的にストライエーションが形成される。その結果、ストライエーション幅 s は $SZWF$ よりも小さくなる。一方、図(b)の水素チャージ材では、き裂先端で集中した水素によってすべりが局在化するため、負荷過程においてもき裂先端は大きく開口せず、き裂は継続的に前に進展

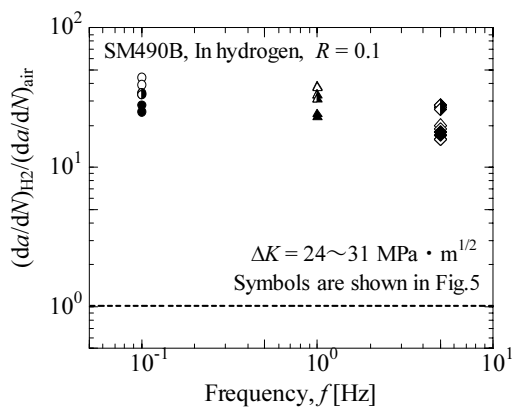
する。最大応力においてもき裂は開口していないので、除荷過程で逆すべり量はほとんどおこらない。この結果、ストライエーション幅 s はストレッチゾーン幅 $SZWF$ とほぼ等しくなり、水素によって疲労き裂進展は約 10 倍加速する(図 20)と考えられる。我々は、このような水素による疲労き裂進展挙動を水素助長疲労き裂進展継続前進機構 (Hydrogen Enhanced Successive Fatigue Crack Growth, HESFCG) と名付けている[31]。HESFCG 機構は、引張破壊の場合と同様に、水素脆化が格子脆化による脆性破壊でなく、すべりの局在化によるマイクロ延性破壊であることを示している。

中村ら[43]は種々の材料でストライエーション幅とストレッチゾーン幅の関係を調べ、材料によらずストレッチゾーン幅はストライエーション幅の約 10 倍になると報告している。この値は水素による疲労き裂進展加速の上限値(図 20 で da/dN は未チャージ材に比べて水素チャージ材で約 10 倍)と一致している。すなわち、水素による疲労き裂進展加速の上限値はストレッチゾーン幅と一致する。水素による疲労き裂進展加速に上限値が存在することは、強度設計上極めて重要である。また、このことは水素雰囲気曝露される機械・構造物でのいわゆる水素脆化に対して安全な疲労強度設計指針を確立する根拠となりうる。

水素ステーション蓄圧器用低合金鋼 SCM435 でも、水素によって疲労き裂先端ですべりが局在化し、水素による疲労き裂進展加速に上限値が存在する[29]。オーステナイト系ステンレス鋼 SUS304, SUS316, SUS316L でも、水素によって疲労き裂先端ですべりが局在化し、水素によって疲労き裂進展速度は加速する[27,30]。オーステナイト系ステンレス鋼の水素による疲労き裂進展加速では、き裂先端での加工誘起マルテンサイト変態が重要な役割を果たす[27,30]。

4.3 内部水素と外部水素

今まで述べた引張試験と疲労試験は、試験片を 20 mass % チオシアン酸アンモニウム水溶液に浸漬したりして、水素を試験片に予めチャージして行った。予めチャージされ、特性に影響を与える水素を内部水素と呼ぶ。一方、水素ステーション蓄圧器や水素パイプラインは直接水素ガスに曝されるので、水素ガスから材料中に水素が侵入する。部品や部材の使用中に水素ガスのような周囲の環境から材料中に侵入し、特性に影響を与える水素を外部水



In hydrogen at room temperature

Frequency [Hz]	Pressure [MPa]		
	0.1	0.4	0.7
0.1	●	○	○
1	▲	▲	△
5	◆	◆	◇

In air at room temperature
+: R = 0.1, f = 5 Hz

図 23 SM490B 鋼の水素ガス中の疲労き裂進展加速と試験周波数の関係

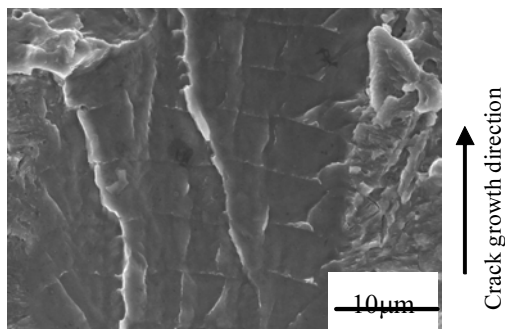
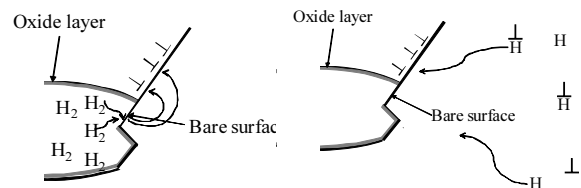


図 24 SM490B 鋼の水素ガス中のストライエーション. $f = 0.1 \text{ Hz}$, $\Delta K = 32 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$.

素と呼ぶ。

図 23 に、水素ガス中で得た溶接構造用炭素鋼 SM49B の疲労き裂進展速度 $(da/dN)_{H_2} / (da/dN)_{air}$ を試験周波数 f に対して示す[35]。 $(da/dN)_{H_2}$ は水素ガス中のき裂進展速度、 $(da/dN)_{air}$ は大気中のき裂進展速度である。水素ガス圧力 $p = 0.1, 0.4, 0.7 \text{ MPa}$ (絶対圧)、 $\Delta K = 24 \sim 31 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ の結果が含まれている。SM490B の組織はフェライト・パーライト、引張強度は 530 MPa である。SGP 鋼の組織はフェライト・パーライト、引張強度は 416 MPa である。したがって、SM490 と SGP は同等の炭素鋼と見なすことができる。

図 23 に示すように、水素ガス中で得られた SM490B の疲労き裂進展速度は $f = 5 \text{ Hz}$ では少し低い、 $f = 0.1$ と 1 Hz ではほぼ等しい。すなわち、外部水素による疲労き裂進展加速の上限値は $f \leq 1$



(a) 外部水素 (b) 内部水素

図 25 疲労き裂先端での外部水素と内部水素の拡散モデル

Hz で得られ、大気中のき裂進展速度に比べ、約 30 倍である。図 20 に示すように、水素チャージすなわち内部水素で得られた SGP の結果では、上限値は $f \leq 0.01 \text{ Hz}$ で達成され、約 10~30 倍である。したがって、炭素鋼の場合、内部水素と外部水素による疲労き裂進展加速の上限値は等しいが、上限値が達成される試験周波数は大きく異なり、外部水素のほうが 100 倍も速いと言える。

図 24 は 0.7 MPa 水素ガス中、 $f = 0.1 \text{ Hz}$ で得られた SM490B 鋼のストライエーションである。ストライエーションは平坦で、その境界は不鮮明であり、図 19 の SGP の水素チャージ材のストライエーションとほとんど同じ特徴を有している。言い換えると、水素による疲労き裂進展加速が上限値に達している場合、ストライエーションの特徴は外部水素と内部水素で同じである。

図 25 には、疲労き裂先端における外部水素と内部水素の拡散モデルを示す。図(a)に示すように、水素ガス中においては、常にき裂先端のすべり帯の近傍に水素ガスが存在し、次々と誕生する新生面を通じて水素が材料内部に侵入し、水素によるすべりの活性化(局所変形助長)が起こるものと考えられる。これに対して、図(b)に示すように、材料中の転位や格子間に予め存在している内部水素は応力誘起拡散によってき裂先端の塑性域に集まってくる。 $10^{-2} \text{ Hz} < f < 1 \text{ Hz}$ においては、材料中に存在する水素はき裂先端のすべり帯に到着するのに時間がかかるため、水素がき裂先端のすべり帯に到着する前に、疲労き裂が進展してしまうと考えることができる。これらは SM490B 鋼と SGP 鋼の異なる炭素鋼で得られた結果であるので、さらに確認の必要があるが、このような水素の拡散メカニズムの相違によって、内部水素による加速の上限値が得られる試験周波数は 10^{-2} Hz 程度であり、外部水素では 1 Hz 程度であることはほぼ間違いのないと考える。

5. おわりに

水素は、ボイドを荷重軸に対して垂直方向に成

長させたり、疲労き裂進展を約 10 倍加速せたりする。このような挙動を説明するキーポイントは二つあり、一つは水素がボイド縁やき裂先端に集中すること、もう一つは集中した水素がボイド縁やき裂先端でのすべりを局在化することである。このような考えは、格子脆化説（脆性破壊）でなく、局所変形助長説（延性破壊）と一致する考えである。

HYDROGENIUS では、得られた基礎研究成果を実用化研究に活かす取り組みも行っている。表 1 にその取り組みをまとめているが、実証試験に用いられた蓄圧器や車載タンクなどの健全性評価を JHFC や民間企業の研究者と一緒にやっている。二件の蓄圧器に関する調査報告書がすでに公開されている[36,37]。霞ヶ関ステーション蓄圧器の調査報告書は Web 上に公開されている[36]。これらの報告書は、HYDROGENIUS で得られた最新の研究成果の活用方法並びに製造、開発、品質保証に役立つ情報を含めている。

表 1 HYDROGENIUS における健全性評価

項目	数量
蓄圧器	5*
車載用水素タンク	3
水素ローリー・コンテナ等	3
ステンレス製パイプ	3
ステンレス製フレキパイプ	3**

* : 霞ヶ関、鶴見、大黒、70MPa蓄圧器(新設)、民間(昭和50年製)

** : 愛地球博を含む

燃料電池自動車の部品(パイプ、バルブ、ライナーなど)には、水素脆化に対して優れた特性を示すオーステナイト系ステンレス鋼 SUS316L とアルミ合金 6061-T6 の使用が認められている[38]。しかし、燃料電自動車などの水素エネルギーシステムや水素エネルギーインフラの実用化に向けては、SUS316L は高コストであるため、炭素鋼のような低コスト材料の使用の可能性が期待されている。本解説で紹介した炭素鋼 SGP や SM490B の研究成果は、このような期待に対して貢献できる成果であると考えている。

参考文献

[1] JHFC ホームページ (<http://www.jhfc.jp/>)

- [2] 松山晋作, 遅れ破壊, (1989), 日刊工業新聞
- [3] M. Nagumo, *Materia Japan* 33 (1994) 914-921.
- [4] F. Terasaki and N. Takano, *Materia Japan* 33 (1994) 922-931.
- [5] T. Kushida and T. Kudo, *Materia Japan* 33 (1994) 932-939.
- [6] A.R.Troiano, *Transactions of the ASM* 52(1960) 54-81.
- [7] C.D.Beachem, *Metallurgical Transactions* 3 (1972) 437-451.
- [8] H. K. Birnbaum and P. Sofronis, *Mater. Sci. Eng.* A176(1994) p.191
- [9] 水素安全利用等基盤技術開発 水素に関する共通基盤技術開発 水素用材料基礎物性の研究(平成 16 年度成果報告書), 新エネルギー・産業技術総合開発機構, 代表委託先 (財) 金属系材料開発機構
- [10] 松岡三郎, 本間紳浩, 田中裕也, 福島良博, 村上敬宜, 900MPa 級低合金鋼 SCM435 の引張特性に及ぼす水素の影響, *日本金属学会誌*, 70-12 (2006) 1002-1011
- [11] 峯 洋二, 檜崎千尋, 金崎俊彦, 松岡三郎, 村上敬宜, 高圧水素ガス雰囲気曝露したオーステナイト系ステンレス鋼の疲労き裂進展挙動と水素侵入特性, *鉄と鋼*, 93-3 (2007) 247-256
- [12] Safety Standard for Hydrogen and Hydrogen Systems, NASA NSS 1740.16
- [13] W. T. Candler and R. J. Walter: *Hydrogen Embrittlement Testing*, ed. L. Raymond, ASTM STP543 (1974) pp.198-220
- [14] R. J. Walter and W. T. Chandler: *Effect of High-Pressure Hydrogen on Metals*, The 1968 Materials Engineering Exposition & Congress, American Society for Metals, 1968
- [15] W. T. Chandler and R. J. Walter: *Hydrogen-Environment Embrittlement of Metals and its Control*, Proceedings of the Hydrogen Miami Energy Conference, ed. T. H. Veziroglu, Plenum Press, New York, 1975, pp.1057-1078)
- [16] K. Takai and Ryu Watanuki: *ISIJ International*, 43(2003), pp.520-526
- [17] 松尾 尚, 本間紳浩, 松岡三郎, 村上敬宜, 0.1 MPa 水素ガスパイプライン用炭素鋼 SGP

- (0.078C-0.012Si-0.45Mn, mass%)の引張特性に及ぼす水素の影響, 日本機械学会論文集 A, 74-744 (2008) 1164-1173
- [18] 西口廣志, 福島良博, 松岡三郎, 村上敬宜, 1MPa 水素ガスパイプライン用炭素鋼 STPG370 (0.19C-0.21Si-0.56Mn, mass%)の引張特性に及ぼす水素の影響, 日本機械学会論文集 A, 74-743 (2008) 1016-1025
- [19] 松尾尚, 山辺純一郎, 松岡三郎, 村上敬宜, オーステナイト系ステンレス鋼 SUS316L の引張特性に及ぼす水素と予ひずみの影響, 日本機械学会九州支部講演論文集, No.098-1 (2009) 1-2.
- [20] P.Smith et al., *Metal Science*, **13** (1979-7) 429-435
- [21] S. Suresh, C.F. Zamiski and R.O. Ritchie, *Metallurgical Transaction*, **12A** (1981) 1435-1443
- [22] 吉岡純夫, 出水通之助, 熊沢道夫, 水素雰囲気中の疲労き裂進展挙動, 材料, 32-355 (昭和 58) 435-440
- [23] 福山誠司, 横山清志, 荒木道郎, SNCM439 鋼の室温高圧水素環境下における疲労き裂進展, 材料, 34-331 (昭和 60 年) 709-714
- [24] 福山誠司, 横山清志, 荒木道郎, SUS304 鋼の室温高圧水素環境下における破壊じん性と疲労き裂進展, 材料, 36-404 (昭和 62 年) 506-512
- [25] 福山誠司, 横山清志, 荒木道郎, 小鎌幸雄, 青木 宏, 山田良雄, Ni 基合金の室温高圧水素環境下における疲労き裂進展, 材料, 38-428 (平成元年) 539-545
- [26] 福山誠司, 韓 剛, 何 建宏, 横川清志, 炭素鋼のき裂進展に及ぼす高圧水素環境の影響, 材料, 46-6 (1997) 607-612
- [27] Kanazaki, T., Narazaki, C., Mine, Y., Matsuoka, S. and Murakami, Y., Effect of Hydrogen on Fatigue Crack Growth and Martensitic Transformation of Stainless Steels, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, **72**-723 (2006) 1717-1724.
- [28] Uyama, H., Mine, Y. and Murakami, Y., Effects of Test Frequency on Fatigue Behaviour in a Tempered Martensitic Steel with Hydrogen Charge, *Journal of the Society of Materials Science, Japan*, **55**-8 (2006) 726-731.
- [29] Tanaka, H., Homma, N., Matsuoka, S. and Murakami, Y., Effect of Hydrogen and Frequency on Low-Cycle Fatigue Behaviour of SCM435 Steel for Storage Cylinder of Hydrogen Station, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, **73**-726 (2007) 1358-1365
- [30] Murakami, Y., Kanazaki, T., Mine, Y. and Matsuoka, S., Hydrogen Embrittlement Mechanism in Fatigue of Austenitic Stainless Steels, to be published in *Metallurgical and Materials Transaction, A*, **19A** (2008) 1327-1339
- [31] Matsuoka, S., Tsutsumi, N and Murakami, Y., Effect of Hydrogen on Fatigue Crack Growth and Stretch Zone of 0.08 mass% Low Carbon Steel Pipe, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, **74**-748 (2008) 1528-1537
- [32] E. Takeuchi, M. Hayakawa, N. Nagashima and S. Matsuoka, *CAMP-ISIJ*, Vol.21(2008) 1398
- [33] Bichler, C. H. and Pippan, R., Direct observation of the formation of striations, *Engineering Against Fatigue*, (1999), 211-218.
- [34] Nakamura, H., Kobayashi, H. and Nakazawa, H., Estimation of Stretch Zone Width by J Integral and Application into Elastic-plastic Fracture Toughness Test (Japanese) , *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, **45** (1979) 336-345.
- [35] 吉川倫夫, 堤 紀子, 松岡三郎, 村上敬宜, 水素ガス中におけるフェライト・パーライト鋼
- [36] 霞ヶ関水素ステーション蓄圧器調査報告書, 産業技術総合研究所, 九州大学, 石油産業活性化センター, (平成 20 年 11 月)
- [37] 水素輸送用 20MPa 大型長尺蓄圧器 (昭和 50 年製造) 調査報告書, 産業技術総合研究所, 九州大学, 新エネルギー・産業技術総合開発機構, (平成 21 年 2 月)
- [38] (財)日本自動車研究所, JARI S 001(2005)

謝辞

本解説で使用されている HYDROGENIUS の成果の一部は NEDO 技術開発機構の水素材料先端科学基礎研究事業の一環として行ったものである。

水素の貯蔵輸送と水素貯蔵材料

Hydrogen Storage and Transportation: Hydrogen Storage Materials

秋葉 悦男 (産業技術総合研究所)

Etsuo AKIBA (AIST)

e-mail: etsuo-akiba@ni.aist.go.jp

1. はじめに

水素は様々なエネルギー資源，すなわち一次エネルギーから製造することができるため，エネルギー媒体（二次エネルギー）として注目を集めている．また，化石燃料から再生可能エネルギーの活用へと一次エネルギーが変化していく中で，エネルギーを有効に利用するために再生可能エネルギーから多くの場合生み出される電力と電気分解装置および燃料電池のような既存の技術で効率良く相互に変換できる水素は，エネルギーシステムを成立させる上で大変に魅力的である．

しかしながら，水素は常温では気体であるため，既存の液体燃料と比べて体積エネルギー効率は格段に低い．例えば，自動車燃料として最もポピュラーなガソリンと比べると，標準状態（室温，一気圧）の水素は三千分の一の体積エネルギー密度しか有しない．そのため，化石燃料と同等の体積エネルギー密度を確保することが可能な水素自動車への水素搭載技術の確立が求められている．

具体的な動きとしては，2008年7月に燃料電池実用化推進協議会から公表された，国内外の主要な自動車メーカーや国内のエネルギー企業がまとめた燃料電池自動車と水素ステーションの普及へのシナリオでは，2015年に水素ステーションをやや先行して事業化し，それに遅れて燃料電池自動車の本格的生産が開始されるとしている[1]．また，2008年12月には産業競争力懇談会（COCN）がより詳細な2015年以降のシナリオを提言している[2]．

ここでは，このような環境のもと，燃料電池自動車と水素ステーションの事業化のターゲットとされる2015年およびそれ以降の数年～十年の間に実現可能性が高いとされる水素搭載技術を紹介すると共に，次世代の水素搭載法として注目される水素貯蔵材料について紹介する．

2. 水素貯蔵技術

2.1 水素の物性と輸送貯蔵の目標値

水素の物性値の内，輸送・貯蔵に関係の深いものを表1に示した．水素のもつ燃焼熱は 1m^3 当たり約12MJであり，前述のようにガソリンと比較して三千分の一しかない．その一方で，気体の水素の密度は約 0.084kg/m^3 であるから，水素1kg当たり発熱量は142MJに達し，ガソリンの三倍近い．気体状の燃料である天然ガス，液体状の燃料であるガソリンとの体積および重量エネルギー密度との比較を表2に示した．自動車ではそのサイズに制限があり，可能な限り多くの空間を乗員の居住と貨物の収容に使う必要があることから，重量密度よりも水素を少ない体積でコンパクトに搭載することがより一層，重要とされている．

表1 水素の物性値

分子量	2.016
沸点	-252.8°C
融点	-259.1°C
比重（空気を1として）	0.0695
臨界圧力	12.759 atm
臨界温度	-259.9°C
沸点における液体水素の密度 気体	70.8kg/m^3
気体の密度（20°C, 1 atm）	0.083764kg/m^3
熱伝導度（20°C, 1 atm）	$1.897\text{m W/cm}\cdot\text{K}$
蒸発熱	445.59 kJ/kg
燃焼熱（HHV）	141.86 MJ/kg
空気中の拡散係数	$0.634\text{cm}^2/\text{s}$

表2 体積および重量当たりの燃焼熱（HHV）

	MJ/m^3	MJ/kg
水素ガス	11.9	142
天然ガス	39	54.5
液化水素	10,070	142
ガソリン	34,600	49

現在、燃料電池自動車の燃費は1kg（約12m³）の水素当たり約100km程度である[3]。したがって、ガソリン車並の航続距離500kmを実現するために5kg（約60m³）の水素を可能な限りコンパクト、軽量かつ安全に安価に搭載する技術の実現が水素社会実現に必要不可欠とされる。ガソリン車との比較で100Lおよび100kgの体格および重量が現時点での車載用水素タンクの目標値とされている。すなわち、体積および重量水素密度で、0.05 kg/Lおよび5質量%が水素搭載システムとしての目標となる。体積としては、標準状態（1気圧、室温）で60m³（60 kL）の水素を六百分の一に相当する100 Lにまで縮小することが求められている。

表3には実際に自動車に搭載され、その可能性が実証された圧縮ガス、液化水素および水素貯蔵材料のエネルギー密度などを示した。

表3 水素貯蔵輸送媒体中の水素密度

	体積密度 (g/L)	重量密度 (質量%)
水素ガス (300K, 1 atm)	0.09	100
水素ガス 350 MPa	24	100
液化水素 (20 K)	71	100
水素吸蔵合金 LaNi ₅ H ₆	105	1.4

2.2 圧縮ガスおよび液化水素による水素輸送貯蔵

表4に水素の圧縮因子を示した。一般に実在気体の圧力、温度および容積には式のような関係がある。

$$z = pV/RT \quad (1)$$

圧力を p 、絶対温度を T 、気体1 molの体積を V 、気体常数を R で表す。式中の z は圧縮因子（圧縮係数ともいう）である。

表4 水素の圧縮因子

圧力/MPa	0.1013	10	35	70
圧縮因子	1	1.065	1.236	1.489

圧縮因子は実在気体の理想気体からの偏差をあらわすもので、理想気体では $z=1$ である。気体の圧力を高めると、容器内に存在する気体分子の体積が占める分だけ、それ以上注入される気体が占めることのできる内容積が減少する。その一方で、

気体分子間に親和力が働いて引きつけあうと、気体は親和力が無い場合に比べてより多くの量、容器に充填できることになる。このように、容器内に充填された気体が排除する体積と気体分子間の親和力のバランスで理想気体からのずれを説明することができる。一般にある圧力以上では、圧縮率は気体の圧力に比例する場合が多い。

現在、燃料電池自動車には多くの場合35 MPaあるいは少数であるが70 MPaに圧縮された水素が搭載されている。500km走行を担保するために現在、必要であるとされる5 kgの水素を水素自動車に搭載するためには、圧縮因子を考慮に入れるとタンク内容積212 L（圧力35 MPa）あるいは127 L（圧力70 MPa）が必要とされる。このような圧力に耐えかつ軽量の容器には高価な炭素繊維が用いられており、その価格とリサイクル性に大きな課題があるとされる。

液化水素を用いることで表3にあるように水素ガスの約800分の1にまで体積を減少させることが可能である。しかし、水素の沸点は-253℃であるため、そこまで温度を下げ液化させるために水素自身の持つ燃焼熱の3分の1が消費されると言われている。また、一旦、液化水素が製造されたならば、今度は容器壁からの熱侵入による液化水素の気化（ボイルオフ）が無視できない。内容量80 L（5kgの水素相当）程度の車載タンクでは、ボイルオフは数%/日と車載用として実用化をためらうほどの高い数値であるとされている。大型化することでボイルオフは低減するので、液体水素は大規模に水素を貯蔵する用途に適している。

3. 水素貯蔵材料による水素輸送・貯蔵

3.1 水素貯蔵材料とは

水素を大量に蓄えることができる水素貯蔵材料と言われる物質がある。表3にあるように水素貯蔵材料の体積水素エネルギー密度は、圧縮ガスおよび液化水素をしのぐ。しかし、原理上、金属あるいは合金、無機物、有機物等に水素を貯蔵するため、純粋な水素を用いる圧縮水素や液化水素の場合に比べ重量の観点からは相当に不利である。

水素貯蔵材料の要点は、水素が様々な元素と化学的に結合する事を貯蔵に利用しているため、純粋な水素の場合より水素原子間の距離がより近くなることにある。しかし、一旦、材料と水素が結

合すると、その結合を切って水素を放出させるためには何らかのエネルギーが必要である。燃料電池自動車の場合、搭載している燃料電池からの排熱で水素を放出させることを想定している。

3.2 水素吸蔵合金に求められる条件

$M + H_2 = MH_2$ という水素化反応を考える。M は水素貯蔵材料の一つである水素吸蔵合金であり、MH は水素化された水素吸蔵合金である。この反応の平衡定数（固体の活量を 1 と仮定すると水素平衡圧力になる）はエンタルピー変化(ΔH°)とエントロピー変化(ΔS°)、気体定数(R)および温度(T)によって(2)式のように表される。

$$\ln PH_2 = \Delta H^\circ / RT - \Delta S^\circ / R \quad (2)$$

ΔS° は気体の H_2 が失ったエントロピー (131 J/mol·deg-1 at 298K, 1 atm) なので貯蔵材料によらず定数とおける。従って、水素平衡圧力と水素化のエンタルピー変化の間には次の関係がある。

$$\ln PH_2 = \Delta H^\circ / RT + C \quad (3)$$

車上に固定したタンクに水素ステーション（水素スタンド）で水素を充填し、車上に搭載された水素は燃料電池の作動温度である約 80℃あるいはそれ以下の温度で数気圧の水素放出平衡圧力で放出させるためには、(3)式の関係を用いると水素化のエンタルピー変化は -25~-35 kJ/mol H_2 の範囲にあることが望まれる。（ここでは、水素化のエンタルピー変化を用い、負の場合に水素化が放熱、水素の放出時に吸熱であることとする。）

3.3 水素吸蔵合金の歴史と現状

水素吸蔵合金または最近では合金系水素貯蔵材料と呼ばれる材料は水素貯蔵材料の中では最も早く 1967 年にその概念が示され[4]、1970 年に室温で水素を可逆的に吸蔵放出する $LaNi_5$ が報告されて[5]、研究と開発が一挙に加速された。代表的な合金の水素吸蔵量と水素の放出圧力（解離圧力）を表 5 に示した。体積水素エネルギー密度に関しては、水素吸蔵合金のほとんどが 70~100kg/ m^3 の範囲にある。水素吸蔵合金が液体水素の 1~1.5 倍の体積密変で水素を吸蔵することはコンパクトな水素貯蔵実現には極めて有用である。

水素吸蔵合金が水素を吸蔵放出する機構を図 1 に示した。合金を形成する金属格子の隙間（格子間位置）に水素が侵入して水素化物が生成する。そのため、侵入型水素化物と呼ばれることもある。一般に金属原子の原子半径は 0.125~0.200nm 程

表 5 代表的な水素吸蔵合金の水素吸蔵量

合金	最大水素吸蔵量		有効水素吸蔵量		平衡水素圧力
	H/M	質量%	H/M	質量%	MPa (K)
$LaNi_5$	1.0	1.4	0.8	1.1	0.37 (313)
Mg_2Ni	1.33	3.6	1.1	3.1	1.15 (633)
$TiMn_{1.5}$	1.0	1.9	0.7	1.3	0.7 (293)
$TiMnV$	1.5	2.9	1.1	2.1	0.15 (373)

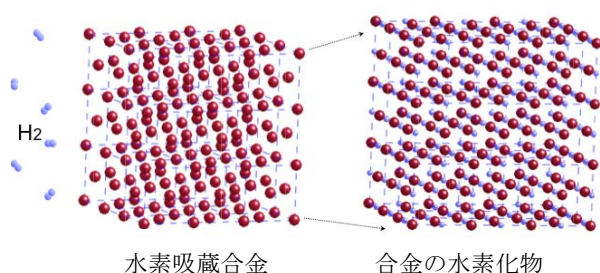


図 1 水素吸蔵合金の水素吸蔵放出機構（水素を吸蔵すると体積が 20~30%膨張する）

度である。一方、金属格子中の水素の原子半径は 0.035~0.040nm であり、金属原子間が形成する格子間隙間に水素が十分に侵入可能であることがわかる。実際は、水素化する事による格子全体の安定化と水素が入って金属格子が膨張することによる不安定化がバランスするところで水素化物が生成する。水素化による格子体積の膨張は水素吸蔵合金にもよるが 15~30%の範囲にある。

合金とは二種類以上の金属を混合したものであり、固溶体、共晶、金属間化合物およびそれらの混合物として存在する。表 5 の $LaNi_5$ は金属による化合物である金属間化合物で、狭い組成幅でのみ存在する。AB2 型の水素吸蔵合金はラーベス相と呼ばれる金属間化合物で、組成幅を有するため $TiMn_{1.5}$ のように化学量論組成から外れた組成でも安定に存在する。AB2 型合金は AB5 型の最低作動温度が-25℃程度であるのに比較してより低いので、冷凍機や低温作動型の水素貯蔵タンクに用いられる。水素吸蔵合金として知られている水素吸蔵合金の多くは複数の金属原子が最密充填しているものである。

射場らは、Ti-V-Mn 系、Ti-V-Cr 系、Ti-V-Cr-Mn 系などの固溶体合金中で、体心立方 (BCC) 構造をもち、その中にナノオーダー変調構造を有するものが従来の合金特に金属間化合物水素吸蔵合金に比べて水素吸蔵量が遥かに多いことを見出した[6]。著者らはこの種の合金を「ラーベス相関連の水素吸蔵合金」と命名している[6]。従来、BCC 構造の合金は水素化挙動が実用には向かないとされていたが、ラーベス相が出現する領域に極近い組成の BCC 合金が従来にない高い水素吸蔵量を室温で示すことを発見したためにこのように命名した。

2004 年、トヨタ自動車は圧縮水素 (35MPa) と Ti 系ラーベス相水素吸蔵合金を組み合わせ、高い体積密度を持つと同時に水素吸蔵合金タンクの欠点であった低温始動性および水素充填速度が高圧ポンプ並みの水素タンク (ハイブリッドタンク) を発表した[7]。発表時に使われていたラーベス相合金の水素貯蔵量は 1.9 質量%であったが、最近では、上述のラーベス相関連 BCC 構造合金で 2.5 質量%の水素貯蔵量を持つものを利用してシステムとして 2.2 質量%の水素貯蔵量が達成されている[8]。図 2 には、ハイブリッドタンクの模式図を示した[7]。

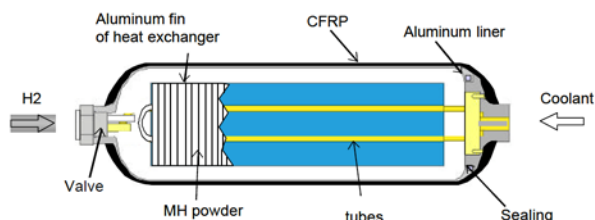


図 2 ハイブリッドタンクの概要[7]

35MPa の圧力に耐える車上搭載用軽量容器には、高品質の炭素繊維が強度部材として必要不可欠である。そのため、価格が極めて高くなることとリサイクルが困難との難しい課題がでていた。そのため、トヨタ自動車では炭素繊維を必要としない 15~20MPa の圧力領域でハイブリッドタンクを構成して試験した。水素吸蔵合金は金属製のシェルアンドチューブタイプの熱交換器の内部に充填された。金属製にしたことと水素圧力を低圧化したことによる重量増加は構造が簡単になったことによる重量軽減とキャンセルされ、35MPa タイプ

のものと同等の体積および重量水素密度が達成された[9]。このように、ハイブリッドタンクは圧縮ガスと比較して、水素をコンパクトにかつより低い圧力で車上に搭載することが可能な技術である。現時点では、多くの水素貯蔵材料の中で、燃料電池自動車の普及初期に活用可能な材料はハイブリッドタンクに用いられる水素吸蔵合金しかないと考えられる。

3.4. 非金属系の水素貯蔵材料

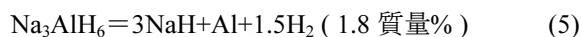
金属を水素貯蔵材料とすると、重量水素密度に一定の限界があることから、より軽量の元素を用いた材料開発が盛んである。その一因に米国政府が設定した水素貯蔵材料の数値目標が水素貯蔵材料 (金属系材料) では達成できないような値に設定されていたことがある。

非金属系材料については Edwards らによる優れた総説があるのでそれを参照頂きたい[10]。

非金属系材料の中でも、一般に無機系材料と呼ばれている水素貯蔵材料は、元素と水素が主に共有結合によって結合した化合物で、その可逆的な分解・生成反応を利用して水素を吸蔵放出させる材料である。無機系材料は一般にアルカリ・アルカリ土類金属が電子供与体として典型元素へ電子を供与して水素との結合を含む多原子イオンを形成しているものが現状では大半である。

アラネイト (Alamate) は、四水素化アルミニウムイオン (AlH_4^-) を含む化合物の総称である。

LiAlH_4 は 10.6 質量%、 NaAlH_4 は 7.5 質量%の水素を含む。これらのアラネイトは有機合成反応の水素化試薬として数十年以上の歴史をもつが、可逆的な水素貯蔵材料としては注目されなかった。しかし、1997 年、Bogdanovic ら[11]は、エーテル中で NaAlH_4 に触媒として Ti を添加することによって、著しく反応速度が改善されることを示した。 NaAlH_4 は以下に示す 2 段の反応によって水素を吸蔵放出する。



上記の反応 (4) (5)において水素平衡圧力が 0.1MPa になる温度はそれぞれ 30°C および 100°C である。水素の放出量は全体で 5.6 質量%である。それまで開発されてきた水素貯蔵合金に比べて高い重量水素エネルギー密度を有していることから多くの注目を集めた。

有機化学の分野でより広範に使用されている LiAlH_4 は、極めて分解しやすいため（水素化物の生成エンタルピー変化が正）可逆的な水素貯蔵輸送用材料としては適さない。Ti 触媒の反応機構については Ti^{3+} イオンが Na^+ サイトに置換して空孔を生成し、反応特に拡散を加速するとの考え方 [12] と、 NaAlH_4 と TiCl_3 との反応によって $\text{Ti}(\text{Al})$ 合金が生成し、その触媒効果が発現しているとの考え方 [13] が有力視されているが、未だ解明されているとは言いがたい。

2002 年 Chen [14] らは水素貯蔵材料として Li_3N （窒化リチウム）が $200\sim 400^\circ\text{C}$ で 10.4 質量%の水素を可逆的に吸蔵・放出することを実験的に示し有望な材料であることを報告した。

Li_3N の水素化・脱水素化反応を次式に示した。



Chen らは水素平衡圧力が 0.1MPa を示す温度はおよそ 285°C と推定した。反応式 (6) の反応では水素化エンタルピー変化は -148kJ/molH_2 と報告されるので右辺から左辺への反応には 400°C 以上の高温にする必要があることが分かる。従って、式 (7) の利用が可逆的な水素貯蔵には望ましい。市川らはアラネイトと同様に Ti 系の触媒がこの系にも有効で、式 (7) の反応が 150°C においても進行することを明らかにした [15]。

Leng らは反応温度を下げるために Li サイトを Mg で置換した反応を提案した [16]。

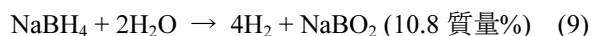


この反応は最初に $\text{Mg}(\text{NH}_2)_2$ と LiH を水素中で 2 時間ボールミリング装置によって機械的混合処理することが必要である。生成物を熱分解すると、 120°C を開始温度に水素が約 7 質量% 放出された。放出後の生成物は Li_2NH と Mg_3N_2 であった。また、右辺から左辺への再生反応を 200°C において 10MPa の水素圧力下で行い、水素が約 6.5 質量% 吸蔵されたことから反応の可逆性を確認した。この反応の水素化エンタルピー変化は -34kJ/molH_2 との報告もあり [17]、有望な系とされている。

アミド・イミド系における課題は反応速度が遅いという点であるが、アラネイトで有効な Ti 触媒が必ずしも Mg を含む系で有効ではなかった。また、反応の途中にアンモニアが生成するも課題とされている。固体高分子型燃料電池が受入可能な

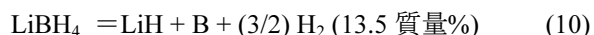
不純物としてのアンモニアは $0.1\sim 0.3\text{ppm}$ 程度のため、アミド系材料から放出された水素をそのまま固体高分子型燃料電池に導入できるか否かについては今後の検討が必要である。

水素密度の高い無機系水素化物として、ボロハイドライド系水素貯蔵材料がある。ボロハイドライド系材料は、四水素化ホウ素錯イオン (BH_4^-) を含む無機化合物である。 NaBH_4 は 7.4 質量%の水素貯蔵量を有する。アラネイトやイミド・アミド系材料が水分と激しく反応するに比較してボロハイドライド系水素貯蔵材料はアルカリ水溶液中で安定なため、取扱いはるかに容易である。 NaBH_4 の水溶液は適切な触媒の存在下、下記の加水分解反応により水素を生成する。



この場合の放出水素量は、ボロハイドライドばかりではなく加水分解に用いた水からの寄与がある。それを含めて放出水素量は 10.8 質量%に達する。この反応の最大の課題は水素放出反応後の生成物 NaBO_2 を NaBH_4 への「再生」させることにある。エネルギー媒体としてボロハイドライドを利用するのであれば、全体としてのエネルギー効率に関する検討が必要であろう。

LiBH_4 はボロハイドライドの中でも最も高い水素貯蔵量 (18.2 質量%) を有している。 LiBH_4 は、 110°C 、 280°C および 480°C において、吸熱反応を伴って水素を放出することが報告されている [18]。しかし、 110°C および 280°C では LiBH_4 の結晶構造の変化および融解に伴う水素放出であり、 480°C で初めて分解反応による水素放出が見られた。



LiBH_4 は、これからも分かるように安定な水素化物であり、例え可逆性があっても固体高分子型燃料電池と組み合わせて利用することは困難に見える。

アルミニウムの水素化物である AlH_3 (アレイン) が最近、注目を集めている [19]。この物質の水素化エンタルピー変化は -7.6kJ/molH_2 である。すなわち、熱力学的には室温で分解して水素とアルミニウムを生じるはずであるが、実際には 100°C 以上に加熱の必要がある。また、重量水素エネルギー密度は 10.1 質量%であり、有望な材料である。車上における水素発生に関しては上記のような理由で好ましいが、再び AlH_3 を「再生」する

プロセスに関しては今後解決すべき課題が多い。

アンモニア・ボレイン (NH_3BH_3) の反応には二通りあって、「乾式」と呼ぶべき水素ガスとの反応および水が加わる「加水分解反応」である。いずれの場合も容易に水素が発生することが特徴である。車上で水素を取り出す目的には適しているが、元のアンモニア・ボレイン水素化合物の「再生」を効率良く行うことが最大の課題である。

このほかにも、表面積が大きく吸着現象を利用する高比表面積材料や有機ハイドライドなどが水素貯蔵材料として研究が進められている[20]。

4. 水素貯蔵材料の熱伝導率

水素吸蔵合金が最初に水素を吸蔵する際に、水素化による 20~30%の体積膨張によって、100 ミクロン程度に粒径のそろった微粉体となる。微粉体は 100nm 程度の結晶子から形成されている。結晶子は水素の吸蔵放出を繰り返しても、サイズに変化がないことが、回折実験から分かっている。すなわち、結晶子は水素吸蔵放出に伴う格子の膨張収縮を受け入れ、それ以上小さくなることは無い。また、微粉体としてのサイズは合金に水素を吸蔵させて数回は減少するが、それ以降はほぼ一定であることが知られている。

表 6 水素貯蔵材料の熱伝導率

水素貯蔵材料	熱伝導率 (W/(m · K))
Mg ₂ NiHx [21]	0.65
LaNi ₅ [22]	0.2~0.8
LaNi ₅ Hx [22]	0.1~0.75
NaAlH ₄ [23]	0.46~0.75

表 6 には、水素吸蔵合金を含む水素貯蔵材料の熱伝導率を示した。上記のように、微粉体であることから、水素吸蔵合金は、水素化前は金属であるにもかかわらずセラミックスと同等の熱伝導率しか持たないことは興味深い。

5. まとめ

水素貯蔵材料は水素を高い体積密度で貯蔵輸送可能な材料として注目されている。しかし、水素重量密度には課題があり、その解決を目指した研

究が盛んである。今後は、材料のみならずそれを有効に活用するためのシステム技術の確立が不可欠である。米国では水素貯蔵材料のエンジニアリングのための COE が昨年、新たに設立されことはそれを物語っていると言えよう。

参考文献

- [1] <http://www.fccj.jp/pdf/20080704sks1j.pdf>
- [2] <http://cocn.jp/common/pdf/fcv.pdf>
- [3] http://www.jhfc.jp/data/seminor/fy2007/pdf/h19_3.pdf
- [4] Reilly, J. J., Wiswall, Jr. R. H., *Inorg. Chem.*, 6, (1967) 2220.
- [5] Vucht, V., et al., *Philips Res.*, 25, (1970) 133.
- [6] Akiba, E., Iba, H., *Intermetallics*, 6, (1998) 461.
- [7] 森大五郎他, *日本金属学会誌*, 69, (2005)308.
- [8] 森大五郎他, *日本機械学会論文集 (B 編)*, 73, (2007) 1236.
- [9] Mori, D. et al., *Abstract of International Symposium on Metal-Hydrogen Systems, Iceland, 2008.*
- [10] Grochala, W., Edwards, P. P., *Chem. Rev.*, 104, (2004) 1283.
- [11] Bogdanovic, B., et al., *J. Alloy Comp.*, 253 – 254, (1997) 1.
- [12] Sun, D., et al., *J. Alloys Comp.*, 337, (2002) L8.
- [13] Bogdanovic, B., et al., *J. Alloys Comp.*, 350, (2003) 246.
- [14] Chen, P., et al., *Nature*, 420, (2002) 302.
- [15] Ichikawa, T., et al., *J. Alloys Comp.*, 365, (2004) 271.
- [16] Leng, H., et al., *J. Phys. Chem., B.*, 108, (2004) 8763.
- [17] W. Luo, *J. Alloys Comp.*, 381, (2004) 284.
- [18] Fedneva, E. M., *J. Inorg. Chem.*, 9, (1964) 826.
- [19] Sandorock, G., et al., *Appl. Phys. A80*, (2005) 687.
- [20] 水素エネルギー読本, オーム社 (2007).
- [21] Suissa, E. et al., *J. Less-Common Met.*, 104, (1985) 369.
- [22] Tarasevich, V. L. ‘Protessy Perenosa Tepla I Massy Veshchestva Kapollyarnikh-Poristyxh Telyakh’, (1982) 64.
- [23] Dedrick, D. E., *J. Alloys Comp.*, 389, (2005) 299.

水素は危ないか

Safety Research on Hydrogen Fueled Vehicle

三石 洋之 ((財) 日本自動車研究所)

Hiroyuki MITSUISHI (Japan Automobile Research Institute)

e-mail: hmituisi@jari.or.jp

1. はじめに

地球規模で年々深刻化する温暖化対策として、炭酸ガス (CO₂) 排出低減に向けた取り組みが各方面で盛んに進められている。自動車についても例外ではなく、化石燃料を使用する現行の内燃機関自動車に対して、炭酸ガスを排出せず、クリーンなエネルギーの利用が可能な車両の開発が進められている。そのクリーンなエネルギー源として、再生可能な水素の利用を自動車分野でも実現すべく、技術開発が産学官共同で積極的に進められている。その技術開発の成果である水素・燃料電池自動車の実証走行試験は既に公道を使用して行なわれており^[1]、また、水素・燃料電池自動車の型式取得に必要な規制に関しても、2005年3月には道路運送車両法ならびに高圧ガス保安法といった関連法規の整備が完了している。

現在は、より利便性の高い水素・燃料電池自動車の開発に向けて、例えば航続距離の伸長やコストの面などから、普及に適した車両開発の取り組みが進められている。また、同時に前述の関連法規に関しても、安全性とコストがより普及に適したものとなるように、規制のさらなる合理化に向けた取り組みが行なわれている。

このような各方面の取り組みに対して、(財)日本自動車研究所(以下、JARIという)では2000年から新エネルギー・産業技術総合開発機構(以下、NEDOという)からの委託を受けて、水素・燃料電池自動車の普及に向けた各種基礎データの収集を行い、基準策定や合理化作業に取り組んできている。

以下では、NEDOからの委託事業として、これまでJARIが行ってきた水素・燃料電池自動車の安全性に関する研究活動の成果の一部を述べるとともに、「水素は危ないか」といった観点についても整理する。

2. 水素の性質

水素については、義務教育の過程で水の電気分解とそれにより発生した水素への着火実験により、爆発性の高い可燃性ガスであることが教育されており、小さいころから誰もが危険なガスであると認識している。さらに水素への着火が直接の事故原因でないことが近年になって報告されているものの、未だに飛行船ヒンデンブルグ号の爆発事故も水素によるものとして一般には認識されており、水素が非常に危険性の高いガスという印象をさらに決定的なものにしている。

そのような環境の中で、日常生活に身近な存在である自動車に水素を搭載するためには、水素を安全に搭載する技術開発の他に、前述の一般認識についても「水素は安全か?危険か?」という観点から事実をきちんと確認し、水素が利用可能な燃料であること、つまり水素の社会受容性も高めていく必要がある。

以下に水素ガスの一般的な性質^[2]を示す。

空気中の爆発範囲：4.0~75.0[%]

空気中の爆ごう範囲：18.3~59.0[%]

最小発火エネルギー：0.02[mJ]

空気中の火炎温度：2318K

水素の可燃範囲はガソリンや天然ガスなど、これまでの自動車用燃料と比べて広く、燃焼速度が速くて爆ごうを起こしやすく、分子サイズが小さくて漏れやすく、静電気などのわずかなエネルギーで着火し、さらには水素の炎は温度が高くて炎色が透明なことから、高温の炎が形成されても見えないため非常に危険、などといったことが一般には考えられているようである。

JARIでは、自動車用燃料としての水素の利用を推進するにあたり、自動車への搭載量を想定した水素貯蔵量の範囲内で、実際に水素がどの程度危険なのか、漏れ出した水素はどのように拡散するのか、着火性は一般に言われるように静電気でも

直ちに大火災になってしまうのかなど、水素の性質について調査するとともに、自動車への安全な水素搭載技術や使用方法の開発に向けたデータ収集を行ってきた。

次章では、水素・燃料電池自動車の安全性評価を目的として開発した水素・燃料電池自動車安全性評価試験施設^[3]（以下、Hy-SEF という）について述べるとともに、まずは水素ガスの特性に関する調査結果について示す。

3. 水素ガスの安全性

3.1 水素・燃料電池自動車安全性評価試験施設

JARI は NEDO からの委託を受けて 2000 年から進めてきた自動車用固体高分子形燃料電池システム普及基盤整備事業の中で、水素の安全性を調査するために、2003 年に水素・燃料電池自動車安全性評価試験施設を完成させた（図 1 参照）。それまで JARI は海外の試験機関を利用して試験データの収集を進めてきたが、Hy-SEF の完成により、安全でクリーン且つ再現性の高い試験データの収集が国内で実施できるようになった。



図 1 Hy-SEF 全景

Hy-SEF は、自動車用圧縮水素容器を搭載した水素・燃料電池自動車の車両火災試験が、水素容器が破裂するような事象が発生した場合でも安全に実施できる屋内型の耐爆火災試験設備を最大の特徴に、その周囲に世界最高性能を有する設備群として、100MPa 級の高压水素が使用可能な水素充てん試験設備、液化水素充てん設備、さらには高压容器の安全性評価試験用として一般的に行われている液体の圧力を使用した破裂・疲労試験設備から成る。

以下では、Hy-SEF の試験・解析技術を利用して行った研究活動の中から、まずは、水素ガスの

拡散性、着火性について述べる。

3.2 水素ガスの拡散性および着火性

水素は可燃範囲が広く、着火エネルギーが小さいことから、水素漏えい時には着火・爆発といった非常に危険な状態となることが想定される。そこで、1000[mm]四方の空間の下部から 10[L/min]の流量で水素ガスを上方に向けて流入させた際の水素拡散シミュレーションを行い、水素の拡散性および濃度分布について調査したので、その結果を図 2 に示す。

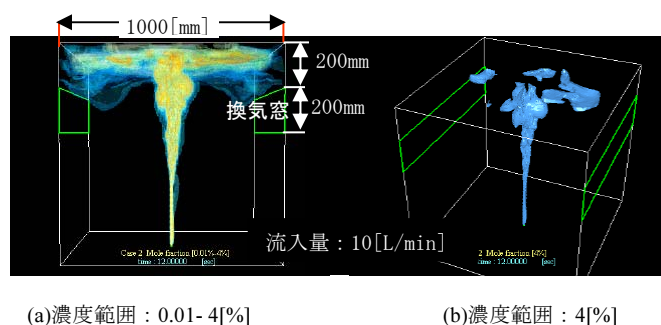


図 2 水素ガスの拡散性

空間内に流入した水素ガスは、(a)に示すようにまっすぐ上方へ上り、天井部で水平方向に拡散している。可燃下限値である濃度 4[%]の領域を抜き出すと、(b)に示すようにその領域は水素流入部から上方に向けた一部の空間に限定されており、空間内で水素は均一混合状態に無く、到達した水素は直ちに水平方向に拡散して濃度が低下している。

次に、水素拡散シミュレーションの結果を検証するために実施した水素漏えい引火試験結果を図 3 に示す。

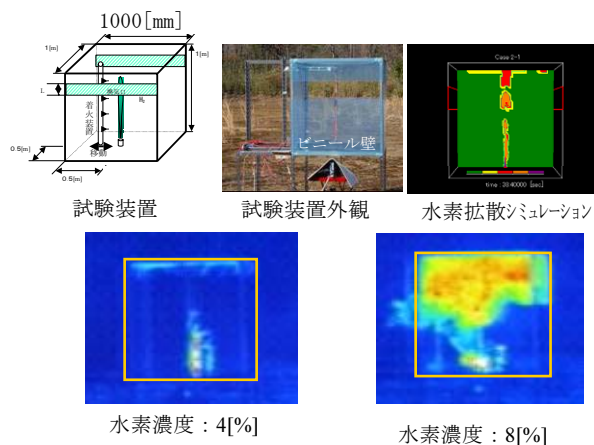


図 3 水素漏えい引火試験

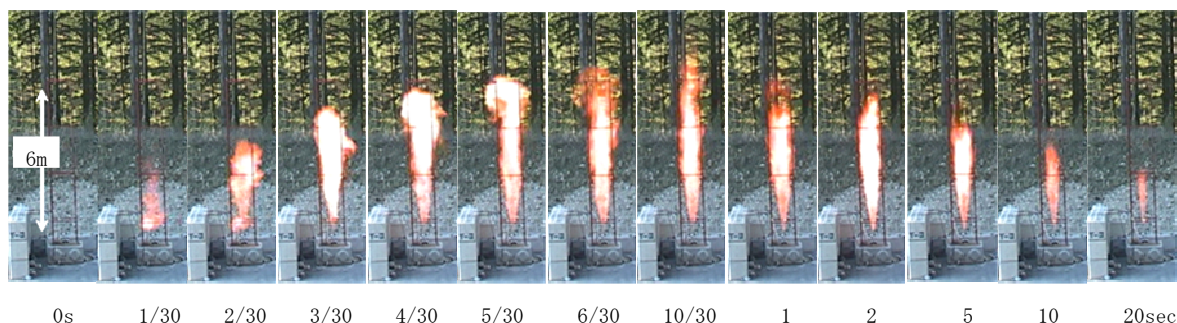


図4 容器安全弁からの放出水素火炎（上方向への放出）

検証試験は、水素拡散シミュレーションでモデル化した一辺 1000[mm]の立方体で側面をビニール板で覆った箱型の試験装置内で行った。試験条件は、試験装置の底面中央部から 10[L/min]の流量で試験装置内に流入させ、平均濃度が 4[%]になる 40[L] の水素を流入させるケースと、平均濃度が 8[%]になる 80[L]の水素を流入させるケースとした。着火は、規定量の水素を試験装置内に流入させた着後に水素を遮断し、試験装置の上面中央部に取り付けた点火装置の電気火花による方法で行った。その結果として、水素拡散シミュレーションと同一条件となる 40[L]の水素を流入させるケースでは、赤外線熱画像装置（サーモグラフ）の映像から、水素拡散シミュレーションが示す可燃領域に着火が観察された。しかしながら、強度の低い壁面のビニール板には着火による損傷はみられなかった。

一方、平均濃度が 8[%]になる 80[L]の水素を流入させるケースでは、火炎の領域は 40[L]のケースより広くなり、さらにビニール板が破損し、火炎が試験装置の外部に達した。

以上をまとめると、今回の試験条件の範囲内では、水素拡散シミュレーションによる解析の有効性が確認でき、閉鎖された空間内に水素が漏れ出した場合でも、水素は速やかに拡散し濃度が低下すること、漏洩した水素の濃度は均一ではなく、水素漏洩部から上方に向けて高濃度領域が存在する濃度分布があり、高濃度の部分に着火の可能性があること、しかし、平均濃度 4[%]相当分の水素に火がついても、「水素に火がつくと、大爆発になる」といった状態には無いことなどがわかった。

次に、水素火炎について調査した結果^[4]を図 4 に示す。水素は無臭で、さらに漏れ出した水素に

火がついても火炎は透明で目視で確認できないとされ、水素漏洩と着火をどのように確認するかが水素の利用拡大に向けた安全上の課題の一つとなる。

水素漏洩の検知手段として付臭剤による方法の研究が進められているが、燃料電池に悪影響を与えず乗員が危険を察知できるような不快な臭気をもった付臭剤は現在のところと見出せていないため、水素漏えいについては水素センサーにより検知する方法を基準では規定している。

火炎については、車両の水素貯蔵システムの安全弁作動による水素放出時が最大規模となり、着火による周囲影響は最大となる。

車両への水素搭載方法としては、圧縮水素容器、液化水素容器、水素貯蔵合金容器などの方法が検討され、圧縮水素容器については、既に基準が整備されている。自動車用圧縮水素容器には、110°C程度で作動する溶栓式（温度作動式）の安全弁が装備されており、車両火災事故の際にも容器が破裂することなく水素が外部に放出される構造になっている。一方で安全弁の作動により水素は火災現場に放出され、着火することになるが、水素火炎が見えないとなると、周辺にいる歩行者や消防隊による消火活動時などに火傷などの被害を拡大させる可能性がある。

そこで、水素を充てんした 35MPa 自動車用圧縮水素容器の安全弁を作動させ、放出した水素に火をつけて火炎の状態を観察した結果を図 4 に示す。水素火炎は肉眼で観察できており、長さ 10[m]程度の炎が安全弁作動時から 2 秒程度持続するが、すぐに炎は短くなっている。なお、赤外線熱画像装置で火炎の領域を確認したところ、肉眼で確認できた領域と同じであった。

以上の結果から、例えば水素を燃料とするロケットエンジンの炎は透明で見えないが、自動車用燃料を想定した場合に限っては、自動車用圧縮水素容器の安全弁が作動し、放出した水素が着火した場合でも、水素火炎は肉眼で確認でき、目視による避難領域の確保が可能であることがわかった。

前述の水素の大量漏洩に対して、微小漏洩時の着火状況に関する調査結果を次に述べる。水素・燃料電池自動車は、水素ステーションで現行車両と同様に水素補給を受ける。水素は、水素ステーションのディスペンサーに取り付けられた充てんノズルと車両のレセクタプルが接続され配管を経由して水素貯蔵タンクに充てんされる。また、走行中は、水素貯蔵タンクから主止弁、減圧弁、配管類を経由して燃料電池（スタック）に水素は供給される。水素貯蔵タンクの安全性は、水素を自動車で安全に利用するために重要であるが、レセクタプル、減圧弁、継ぎ手類からの微小な水素漏えいに対する安全性についても調査する必要がある。以下では、レセクタプルの逆止弁などから1時間当たり250[cc]程度の水素漏えいが発生した場合を想定し、着火源が漏えい個所の近傍にあって、漏えいした水素が着火した場合の炎の持続状況などに関する調査結果を述べる^[5]。

試験は、口径0.16[mm]のノズルから250[cc/h]の流量で水素を放出し、電気火花や小規模の火炎で放出水素を着火させる方法で行い、炎の持続状況について調査した。

その結果、図5に示すように、漏えい水素に着火源を接触させても、着火しないか、着火してもすぐに消滅することがわかった。

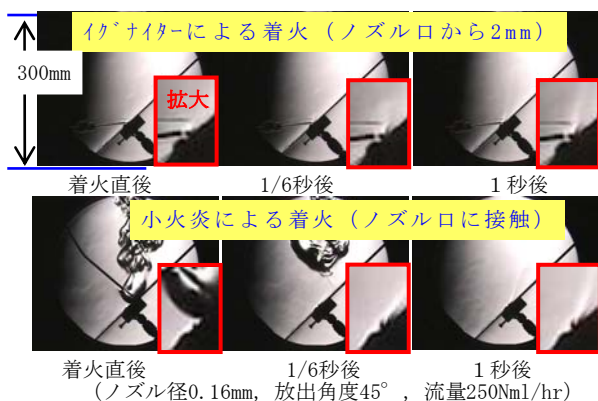
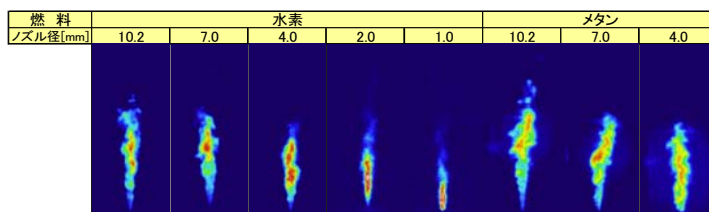


図5 水素着火試験（シュリーレン画像）

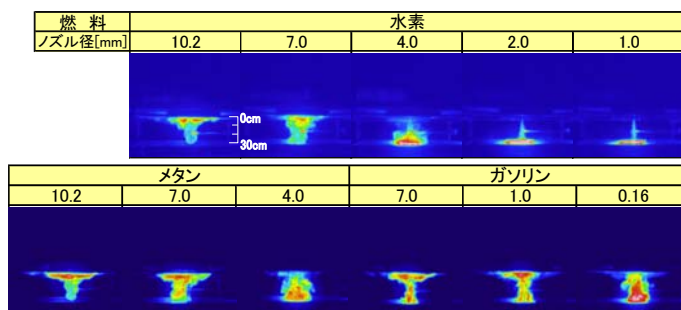
本試験では、ノズルの材質に比熱の異なる材料として、鉄やプラスチックなどについても比較を行っており、その結果として、水素の微小漏えいについては、水素漏えい部に着火源を近づけても、漏えい部のノズル等の吸熱により水素が着火した場合においても自然消滅することが確認でき、微小漏えいに対する危険性は高くないことがわかった。

これまでは水素火炎について述べてきたが、次に、現行の自動車の燃料であるガソリンや天然ガス（メタン）に対して、水素火炎の危険性を調査した結果の一部を述べる。

現行のガソリン車では、衝突試験の際の燃料漏れの許容量が30[g/min]以下であることが求められている。これに対して、天然ガス自動車でも燃料漏れ量が30[g/min]のガソリンと等価発熱量の40[NL/min]以下となるように求められており、水素についても同様の考え方から131[NL/min]以下の漏れ量になることが衝突試験法で規定されている。そこで、路上事故の際に漏えいした水素について、他の燃料と比べて退避距離を大きくするような必要があるのかを調べるために、前述の漏えい量でガソリン、メタン、水素それぞれの火炎の大きさを調査し、比較した結果を図6に示す^[6]。



(a) 上方への放出火炎比較（水素，メタン）



(b) 下方への放出火炎

図6 等価発熱量における火炎規模の比較

等価発熱量のメタンと水素の上向きの放出火炎を比較すると、図 6(a)に示すように、同一ノズル径からメタンと水素を放出して着火させた際の火炎の長さはほぼ同一になっている。また、図 6(b)に示すように、液体燃料であるガソリンとも比較するため、メタン、水素、ガソリンを下方へ放出させた場合の火炎の大きさも、水素が特に大きくなるといったことはなく、水素を燃料とする自動車はガソリン車や天然ガス車と同様に扱えることがわかった。

次に、車両を使用した水素漏洩・着火試験の一部について述べる。

4. 水素・燃料電池自動車の安全性

4.1 水素漏えいに対する安全性

水素・燃料電池自動車には衝突試験の際に水素漏れ許容量が規定されている。ここでは水素が車両の水素貯蔵システムから漏れ出し、車両の一部に滞留して着火した際の周辺への被害などに関する調査結果^[7]について述べる。

水素漏洩・着火試験は、図 7 に示すセダン型 (FR 車：前部エンジン・後輪駆動) の現行ガソリン車を供試車両として、車体下部のホイールベース中央部から水素を一定流量 (5, 20, 50, 100, 131 NL/min) で 10 分間放出し、エンジンルーム内の水素の分布状況を調査するとともに、エンジンフード中央下 100[mm]の位置に取り付けた点火装置により、水素に着火させる方法で行った。

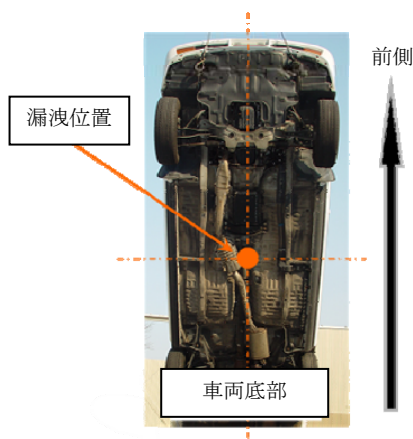


図 7 車両下部の水素漏洩位置

主な計測項目としては、車両側については、エンジンルーム内の水素濃度および圧力とし (図 8 参照)、周辺への影響を調査するため、車両周辺に

音圧計、衝撃圧力計、熱流束計を設置して計測した (図 9 参照)。また、着火の状況を観察するため、赤外線熱画像装置による撮影も行い、車両周辺の火炎の状態についても観察した。



図 8 車両の計測状況

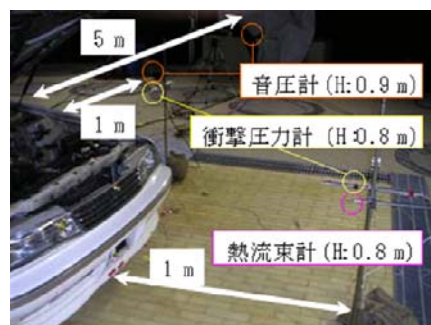
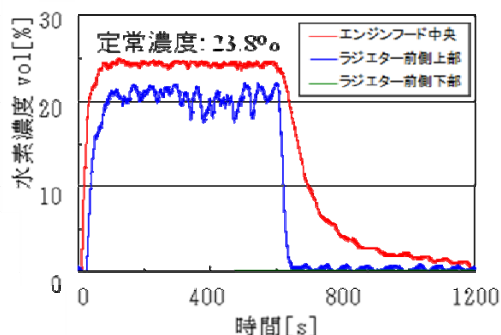


図 9 車両周辺の計測状況

水素漏洩量 131[NL/min]におけるエンジンルーム内の水素濃度の計測結果を図 10 に示す。



(水素漏洩量：131NL/min×10min)

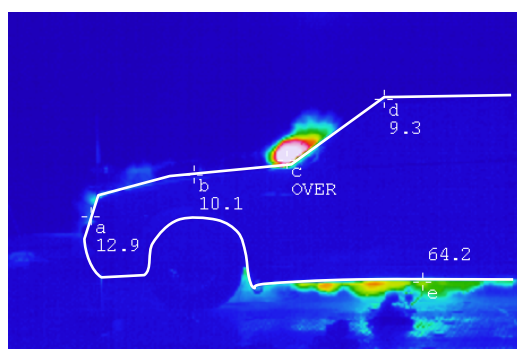
図 10 エンジンルーム内の水素濃度

水素濃度については、試験開始約 100 秒後までは増加傾向にあるが、それ以降、水素放出を停止する 600 秒までは定常濃度になっている。水素濃度分布については、エンジンルーム上部に相当する点火装置近傍のエンジンフード中央が高くなっ

ている。一方、エンジンルーム下部に相当するラジエーター下部の水素濃度は非常に低くなっており、漏れ出した水素が上方に滞留しやすい水素拡散シミュレーションの結果と一致している。

エンジンフード中央部の水素濃度 23.8[%]は、空気中の爆ごう範囲に入っており、着火させた場合には車両を破壊するような状態となることが予想される。そこで、600 秒後に水素放出を停止させるのと同時に、電気火花により水素に着火させた際の、赤外線熱画像装置による観察結果を図 11 に示す。

赤外線熱画像装置による映像には、フロントガラス近傍と車両下部に水素着火による高温領域が撮影されている。しかしながら、水素漏えい量 131[NL/min]以下の領域では、水素着火による影響として、例えば爆風圧によりエンジンフードが変形する、あるいは吹き飛ばされるといった現象は生じなかった。



(水素漏洩量：131NL/min)

図 11 着火試験状況（赤外線熱画像）

水素漏洩量 131[NL/min]における周辺への影響については、熱流束計の計測結果から、輻射熱については太陽から受ける熱量の 1 割以下、衝撃圧力は殆ど検知されず、音圧についても 120[dB]程度であり鼓膜が損傷するようなレベルにはなかった。

以上の結果から、衝突試験で規定する水素漏れ許容量 131[NL/min]が車両の周辺に対しても充分安全なレベルにあることが確認できた。

4.2 車両火災試験

衝突事故などにより水素・燃料電池自動車が火災を起こした際には、燃料タンクである自動車用圧縮水素容器の破裂を防止するために、容器に取り付けられた安全弁が約 110℃になると作動し、

容器が破裂することなく、容器内に残っている水素が車外に放出される構造になっている。その際、水素は火災中に放出されることになることから着火することになる。一般に水素ガスの燃焼温度は非常に高温であり、鋼板も溶解させると言われ、高温の燃焼ガスにより周辺への被害を拡大させるものと想像されがちであることから、実際に車両火災試験を行い、現行のガソリン車や天然ガス自動車と 35MPa 自動車用圧縮水素容器をトランクに 2 本搭載した水素自動車の火災試験^[8]の最大火災規模（図 12 参照）や熱流束（図 13 参照）による比較を行った。



(a) ガソリン車



(b) 水素自動車（水素放出方向：上向き）



(c) 水素自動車（水素放出方向：下向き）

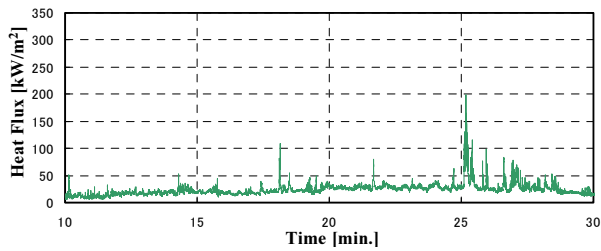


(d) 天然ガス自動車（ガス放出方向：下向き）

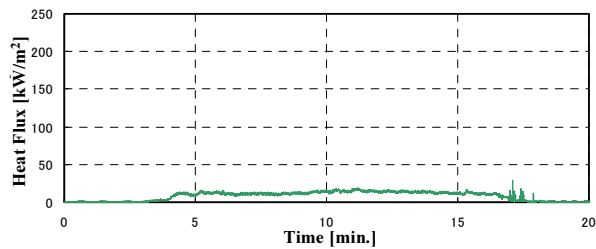
図 12 最大火災の比較

ガソリン車の場合、ガソリンタンクから気化するなどして漏れ出したガソリンが可燃雰囲気になることで着火・燃焼を長時間にわたって繰り返しながら同規模の火災の状態ですべての燃焼が進む。一方、ガス燃料の水素および天然ガス自動車の場

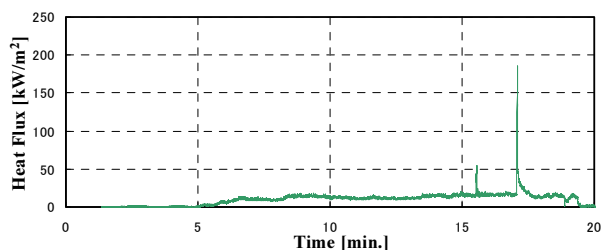
合、容器（燃料タンク）に取り付けられた安全弁が作動温度（約 110℃）に達した段階で容器内のガスが外部に放出されるため、安全弁作動時の火炎が最大規模となる。水素自動車の火炎規模（c）と天然ガス自動車の火炎規模（d）を比較すると、水素の燃焼速度が速いため、水素自動車の火炎規模は天然ガス自動車より小さくなっている。次に周辺への影響を熱流束により比較する。



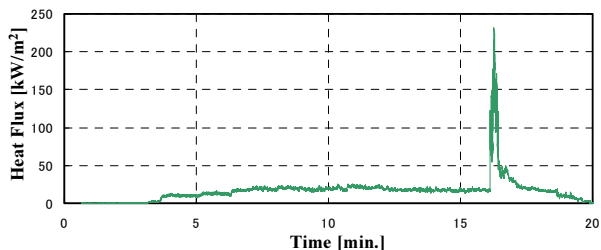
(a) ガソリン車



(b) 水素自動車（水素放出方向：上向き）



(c) 水素自動車（水素放出方向：下向き）



(d) 天然ガス自動車（ガス放出方向：下向き）

図 13 熱流束の比較

ガソリン車の熱流束は、燃料タンクから漏れ出したガソリンへの着火が長時間にわたって繰り返

され、断続的に高い状態が発生している。一方水素自動車は、(b) に示す上方放出の場合、約 17 分経過後の安全弁作動時に熱流束の上昇がみられる。(c) の下方放出では、安全弁作動時に熱流束計が火炎の中に入ってしまう一瞬高い熱流束を示すが、天然ガス自動車よりは低い値となっている。このことから、熱流束による火災時の水素自動車の周辺被害予測としては、現行のガソリン車や天然ガス自動車と大きく変わらないと考えている。

ただし、水素の燃焼により生じる高温水蒸気の周囲への影響については、今のところ知見を有していない。

4.3 自動車用圧縮水素容器の安全性

国内の自動車用圧縮水素容器としては、金属ライナーを CFRP（炭素繊維強化プラスチック）で強化した VH3 容器（海外では Type-3）、プラスチックライナーを CFRP で強化した VH4 容器（海外では Type-4）の 2 種類が使用できる。これらの容器には、圧縮水素自動車燃料装置用容器の技術基準（JARI S001）により、破裂強度、耐久性、過酷温度環境下での耐久性など、多くの安全性に関する評価項目がある。一方で、前述の 2 種類の容器は一般的には複合容器とも呼ばれ、そのルーツは軍用に開発された超軽量容器に端を発するようである。したがって、海外の複合容器の規格にはガンファイヤ試験と呼ばれる極めて高い貫通力がある徹甲弾（図 14 参照）を使用して容器を打ち抜く貫通試験が採用されてきた。以下ではガンファイヤ試験の結果の一部を紹介する。



図 14 ガンファイヤ試験で使用する徹甲弾

海外でのガンファイヤ試験は、図 15 のように射撃手によるライフル銃を使用した射撃により実施されている。射撃手は水素を充てんした容器から 100[m]程度離れた場所より、容器に対して斜め 45° の水平方向から容器を直接射撃する。



図 15 射撃手



図 16 貫通直後の状況

ガンファイヤ試験では、弾丸が容器を貫通し、容器が破裂することなく内部の水素が放出されることを要求している（図 16 参照）。一方、放出された水素のふるまいとしては、高速で放出される水素が帯電し、着火・爆発といったことが想像されがちであるが、実際には、図 16 に示す圧力 35[MPa]、内容積 65[L]のプラスチックライナーの VH4 容器であっても、水素が放出される際に帯電して着火するといった現象はみられず、十数秒で内部のガスを全て放出する結果となった。

5. おわりに

本報告では、NEDO から委託を受けて 2000 年から JARI が実施してきた水素そのものの性質や水素・燃料電池自動車の安全性評価試験の一部を紹介した。

水素の安全性・危険性については、これまでの研究活動により自動車用燃料としての水素量に限定した場合、以下のように考えている。

1. 水素は空気中で速やかに拡散し可燃下限界以下に希釈される。
2. 車載容器の安全弁からの放出水素火炎は見

える。

3. 希薄な水素（濃度 10%程度以下）はこれまで言われてきたほど危険ではなく、天然ガスなど他の可燃性ガスと同程度の危険性といえる。

水素・燃料電池自動車が普及するためには、適正な安全性を確保しつつコスト削減と利便性の向上をはかる必要がある。今後は水素・燃料電池自動車用として、より適正な安全性を見極めるために、さらに過酷な状況下での試験データの取得が必要になっており、そのための活動を現在も進めている。

参考文献

- [1] 岩瀬孝邦, 燃料電池自動車実証研究の意義と活動, 自動車研究第 30 巻 第 7 号, 2008.7
- [2] 水素保安技術ハンドブック 高圧ガス保安に関する情報紹介 No.94, 高圧ガス保安協会, 1984 年 12 月
- [3] Shogo Watanabe et al., The New Facility for Hydrogen and Fuel Cell Vehicle Safety Evaluation, 2005 ICHS Proceeding
- [4] Yosuke Tamura et al., The Fire Tests with High-Pressure Hydrogen Gas Cylinders for Evaluating the Safety of Fuel-cell Vehicles, 2004 SAE Word Congress Proceeding (2004-01-1013)
- [5] Masashi Takahashi et al., Investigation of the Allowable Flow Rate of Hydrogen Leakage on Receptacle, 2008 SAE Word Congress Proceeding
- [6] Masashi Takahashi et al., Investigation of the Allowable Amount of Hydrogen Leakage upon Collision, 2005 SAE World Congress Proceeding (2005-01-1885)
- [7] Yasumasa Maeda et al., Test of Vehicle Ignition Due to Hydrogen Gas Leakage, Jinji Suzuki, Yohsuke Tamura, Shogo Watanabe, and Masaru Takabayashi, Kenji Sato, Fire Safety Evaluation of a Vehicle Equipped with Hydrogen Fuel Cylinders: Comparison with Gasoline and CNG Vehicles, 2006 SAE World Congress Proceeding(2006-01-0129)

能動的な炭素循環エネルギーシステムの可能性検討

Feasibility Study of Active Carbon Recycle Energy System

加藤 之貴 (東京工業大学)

Yukitaka KATO (Tokyo Institute of Technology)

e-mail: yukitaka@nr.titech.ac.jp

1. はじめに

一次エネルギーの多くを海外に頼るわが国にとってエネルギーの供給安全保障は産業・経済発展のために重要である。原油・資源価格の高騰による経済混乱は時代に依らず、わが国の大きな課題である。本稿では炭素供給の観点からエネルギー供給安全保障の確立にむけてシステム提案をする。

産業のみならず人類の生活において炭素は燃料源、材料素材として最も普遍的で重要なエネルギー媒体である。持続的な社会の形成のためには炭素の安定供給が必須である。わが国で利用する化石一次エネルギーはほぼ全量輸入に依存しており、その熱量は全エネルギーの82% (18.9×10^{18} J) に相当する[1]。石油製品として利用されるのは化石エネルギーの17% (3.3×10^{18} J) であり、残りは燃料として熱源に利用されている。一方で京都議定書が2005年に発効し、わが国はその遵守に義務を負い、いよいよ抜本的な二酸化炭素(CO₂)排出削減が必要となっている。製造産業、サービス産業にとってCO₂排出削減は炭素利用の制限に直結し、産業活動の停滞を招く大きな課題である。よってCO₂の排出削減と炭素供給安全保障の両立というジレンマが産業発展の重要な課題になっている。

そこで筆者は炭素を循環利用するエネルギーシステムを検討した。既に自然の植物界においてカーボンニュートラルとして炭素循環系が存在するが、ここでは能動的な炭素循環エネルギーシステム(Active Carbon Neutral Energy System, ACRES)を提案した。ACRESは二酸化炭素を炭化水素に再生し、再利用するものである。このシステムが成立することで炭素が系内を循環再利用され、系外へのCO₂排出無くエネルギー供給が可能となり、上記のジレンマを解決することが期待できる。本稿ではエンタルピー収支の観点からACRESの成立可能性を述べる。

2. ACRESの提案

2.1 既存エネルギーシステムとACRES

ACRESの位置付けを示すために、まず従来のエネルギー変換システムを図1に示す。図1(a)は、従来の発電で用いられてきた蒸気機関である。この系では水の気液相変化を利用している。入力エネルギーで水蒸気を生成させ、蒸気から水に戻る際の凝縮潜熱を仕事として取り出し、需要側で利用する。これに対する近年の新しい取り組みである、水素エネルギーシステムを図1(b)に示す。水を入力エネルギーによって、水素、酸素に分解し、水素が水に戻る際の反応から仕事を取り出している。水素システムの蒸気システムに対する利点は、生成二次エネルギー(水素)を長期間損失無く貯蔵できること、そして単位量あたりのエネルギー密度が高く、コンパクト、高密度なエネルギーシステムを形成が可能である。しかしながら、水素システムの実用を考えると、水素単体貯蔵では過大な圧縮仕事を要すること、水素爆発リスクがあること、さらに水素からの電気エネルギー取出しには燃料電池のような複雑、高価な水素変換技術を要するなどの課題がある。水素システム研究開発ではこれまでに大きな成果が生まれているが、社会普及のための技術的検討は今も必要である。

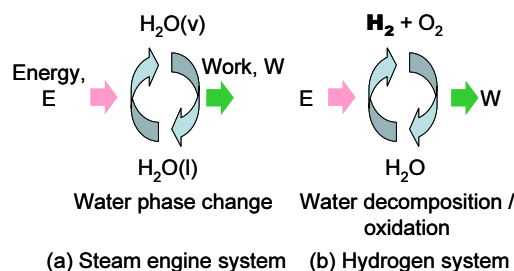


図1 在来の水/水蒸気と水/水素エネルギーシステム

筆者が提案する ACRES を図 2 に示す。CO₂ が基底状態で、必要に応じて水を共に用いる。入力エネルギーによってアルコールを含む炭化水素を生成させる。近年の触媒技術を用いることで、生成歩留まりに制限があるが、水素を混合して種々の炭化水素の作成が可能である[2]。得られた炭化水素が CO₂ と水に戻る際のエネルギー出力を利用できる。同時に炭化水素は化学材料素材として利用が可能である。このシステムは貯蔵、輸送が容易であること。炭化水素類は熱源、電力源になるとともに材料素材になりえる。炭化水素類は従来の産業インフラで良く利用されており、実用性、利用親和性が非常に高いことが利点になる。よって、もしこのシステムがエネルギー的に、反応動力学的に成立するのであれば、普及が容易な一般性のあるエネルギーシステムになると期待できる。炭素循環エネルギーシステムは植物界でカーボンニュートラルシステムとして実現している。バイオマスを用いた炭素循環エネルギーシステムがカーボンニュートラルであり、理想的である。しかしわが国の所要エネルギーに対し、バイオマスは量的に少なく、国の主要エネルギーシステムへの発展は困難を伴う。そこで、ここでは能動的に炭素を循環させる炭素循環エネルギーシステム、すなわち ACRES を提案し、エネルギー的な観点から成立性を検討した。

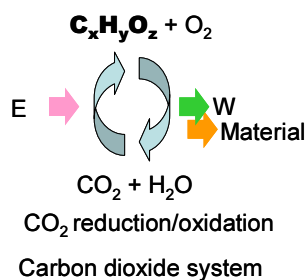


図 2 ACRES の基礎概念の構成

2.2 ACRES の構成

ACRES のシステム構成を図 3 に示す。システムは三つのプロセスからなる。すなわち炭化水素利用過程、CO₂ 回収・分離過程、炭化水素再生過程である。炭化水素は利用過程においては熱源、材料素材の双方として利用ができる。エネルギー消費後の炭素は CO₂ になる。CO₂ 回収・分離過程に

おいて、CO₂ 回収には吸収、収着（物理吸着、化学反応を含む複合吸収現象）の利用がある。回収した CO₂ は吸収媒体から分離する過程が必要となる。物質分離には熱の入力を要する。この過程で CO₂ の高濃度化が行われる。回収された CO₂ は炭化水素再生過程において炭化水素に再生される。再生過程は吸熱反応であり、熱入力を要する。このシステムでは CO₂ 回収・分離エネルギー (E_S) と、炭化水素再生エネルギー (E_R) の総和は利用側で得られる仕事・熱 (E_U) に対して必ず大きくなる (入力エネルギー(E_S+E_R) > 出力エネルギー(E_U))。よって、このシステムはエネルギー消費システムである。システムの有効性の評価にはエネルギー収支の検討が必要である。

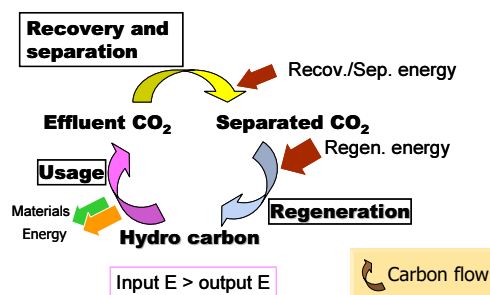


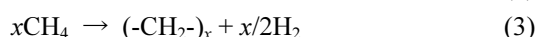
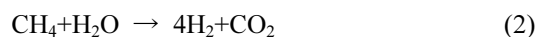
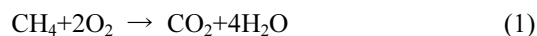
図 3 ACRES の三つの要素過程

3. ACRES のエンタルピー評価

ACRES の成立性を評価するため、具体的な炭化水素材料についてエンタルピー収支を検討した。

3.1 メタン系 ACRES

基本的な炭化水素としてメタンについて先ず検討した。図 4 にメタンを対象とした ACRES の構成を示す。利用過程において酸化により燃焼熱エネルギー(式(1))を生成し、水蒸気改質反応で水素(式(2))が製造できる。さらに重合により高分子材料に変換(式(3))できる。



CO₂ 回収・分離過程には活性炭、ゼオライトなどによる物理吸着、酸化カルシウムなどによる化学吸着(式(4))が有効である。酸化カルシウムは 500～800℃の高温域で CO₂ の吸収が可能であるので、

炭化水素の利用反応場で顕熱損失無く CO₂の除去が可能である。化学平衡的にも CO₂がより増大する方向への反応が促進されるため、正反応の反応速度、炭化水素消費量の促進効果も期待できる [3].



メタン再生過程には、水の電気分解による水素生成反応と、水素による CO₂メタネーションの 2 段階反応 (式(5), (6)) が有効である。

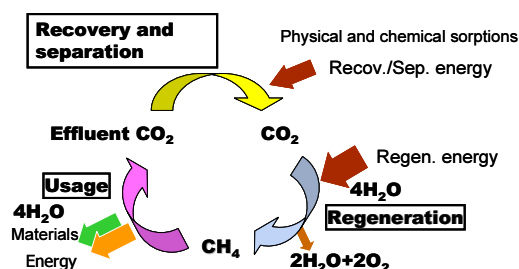
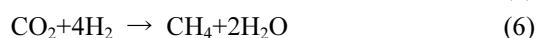


図4 メタン系 ACRES の構成

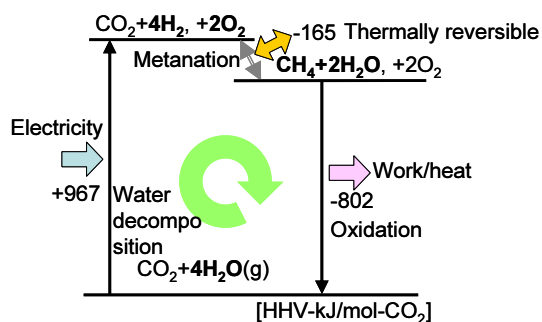


図5 メタン系 ACRES のエンタルピー収支

メタン系 ACRES のエンタルピー収支を図5に示す。炭素 1 mol あたりの再生、利用時の所要エンタルピー (高位発熱量基準, HHV) を示した。回収・分離操作の仕事は所要エネルギー量が他の過程に比べて比較的小さく、または低温排熱の利用が可能である。この操作のエネルギー量の評価は不確定要素が多いので今後の検討課題とし、ここでは省略している。また、炭化水素再生には水素の利用を基準に評価した。メタン再生に必要で

ある 4mol の水素製造には電力または熱化学的な水の分解が利用でき、967 kJ/mol-CH₄が必要である。メタン化は発熱反応であり、165 kJ/mol-CH₄が放出される。得られたメタンから 802 kJ/mol-CH₄の熱量が得られる。ここで循環システムでの投入エネルギー (水素製造エネルギー) と得られる炭化水素の熱エネルギーの比を循環率 [-] と定義する。

$$\text{循環率} = \frac{\text{再生炭化水素の生成熱}}{\text{所要水素の生成熱}} \quad (7)$$

メタン系の循環率は 82.9% であり、水素からのメタン製造においてエンタルピー損失がある。しかし圧縮貯蔵の場合、水素の貯蔵圧力に対して、メタンは 1/3 以下の圧力で同等の熱エネルギーを貯蔵できる。よってメタンは水素に対して圧縮仕事を軽減できる。循環エネルギー媒体の効率比較は、用い方と補機を含めた総合的なエネルギー評価も必要であり、今後検討を要する。

CO₂/メタンの反応温度に対する反応平衡関係を図6に示す (Aspen plus ver. 11 での UNIFAC 推算法による)。ここでは式(5)(6)の当量反応組成、全圧 100 kPa での値を求めた。CO₂/メタンは 500°C 前後で熱的に可逆であるので、メタン水蒸気改質・水素製造でのこの温度域の熱回収、またメタン生成時の発熱エンタルピーを別の反応プロセスにカスケード利用することで、エンタルピー損失を小さくすることが可能である。

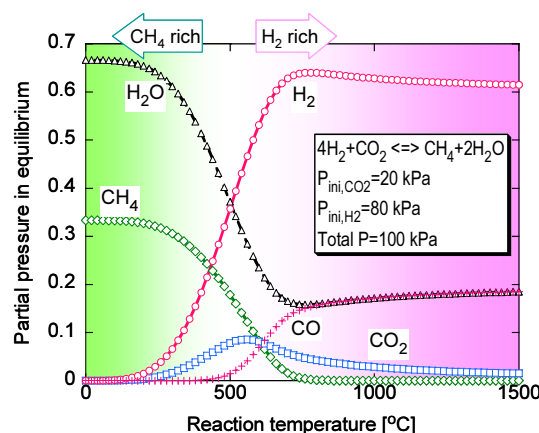


図6 CO₂/メタンの反応平衡関係

循環率を HHV 基準でメタン、一酸化炭素(CO), アルコール類の炭化水素に関して求めた。循環率は大きい順に、

$$\text{CO}(104\%) > \text{メタノール}(93\%) > \text{エタノール}(88\%) > \text{メタン}(83\%) \quad (8)$$

であった。循環率が大きいほどエンタルピー収支が高く、水素が持つエネルギーを無駄なく転換貯蔵できることを意味する。メタノール、エタノールは液体燃料として輸送、貯蔵が容易であり、移動体燃料に利用できることが大きな利点である。そして一酸化炭素は最も循環率が高く(104%)、水素に比べて高密度のエネルギーキャリアであるといえる。また、CO 利用は産業プロセスで一般的に普及しており、汎用性が高いエネルギー媒体である。そこで、以下では CO 系の ACRES の可能性を検討した。

3.2 一酸化炭素系 ACRES

循環率の比較的高い CO について、メタン系と同じ検討を行う。CO の炭素循環エネルギーシステムを図 7 に示す。CO は利用過程において酸化による燃焼エネルギー(式(9)), 水蒸気転換反応で水素を生成(式(10))する。さらに水素、酸素などの重合により高分子材料に変換(式(11))できる。



再生には固体酸化燃料電池技術を用いた電気分解法が可能である[4]。



または、水の分解と生成水素による CO₂ 還元 の 2 段階反応 (式(13), (14)) が有効である。



この二段階反応についての CO 系炭素循環システムのエンタルピー収支を図 8 に示す。水素生成

後、CO 生成にはさらに熱入力が必要であり、CO は相対的に高密度なエネルギー媒体であるといえる。産業プロセスにおいて重用されている所以である。

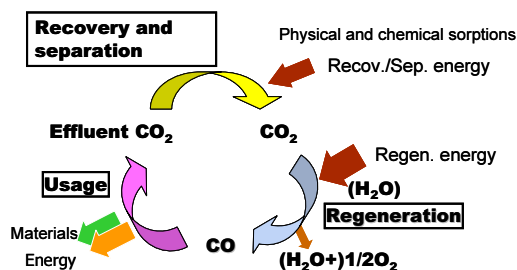


図 7 一酸化炭素 ACRES の構成

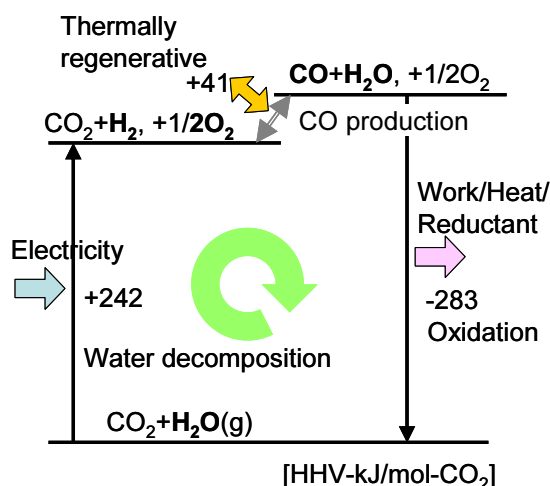


図 8 一酸化炭素系 ACRES のエンタルピー収支

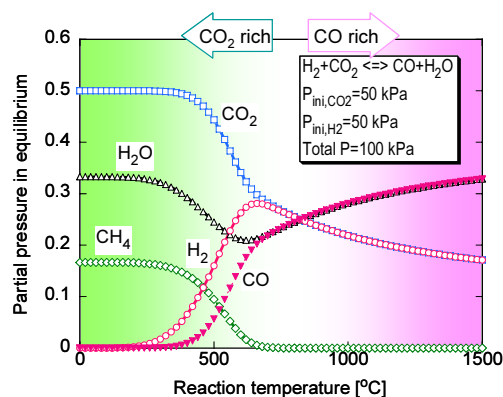


図 9 CO₂/CO の反応平衡関係

式(13)(14)の当量反応組成、全圧 100 kPa での反応温度に対する反応平衡関係を図 9 に示す。

CO₂/CO 反応は 700°C前後で可逆である。よって、図 8 での CO 生成のためには 700°C以上の熱入力が必要であることがわかる。CO 系 ACRES は CO 生成時には水素からのエンタルピーを全量利用できる。また、高温プロセスによる余剰排熱がある場合には CO 生成反応に活用でき、プロセスの省エネルギー化が図れる。CO は水素に比べて高エネルギー密度で、また高反応活性な反応媒体として、既存産業において水素に対して相対的に良く利用されており、既存産業プロセスへの応用が容易である。これらの長所から CO が ACRES の炭化水素循環媒体の第一候補と考えられる。

4. ACRES の意義

ACRES は当初述べたようにエネルギー消費システムである。ACRES の価値は炭素を循環利用し、外部に CO₂を排出しないエネルギー変換システムとして価値がある。ACRES の作動には CO₂を排出しない非化石系一次エネルギー源が必須である。前章までの検討で、一酸化炭素循環サイクルが最もエネルギー密度が高く、産業有用性が最も高い。700°C以上の高温熱を必要とすることから、高温ガス炉 (High Temperature Gas Reactor, HTGR) 型の原子炉が一次エネルギー供給方法として有用である。わが国では茨城県大洗に高温工学試験研究炉 (High Temperature engineering Test Reactor, HTTR) があり、世界最高の 950°Cの原子炉出口温度を定常的に出力することができる[5]。この炉は循環媒体にヘリウムガスを利用しており、炉システム構成が簡易で、事故時の原子炉停止が容易な利点があり、100 MW 出力程度の分散利用向け小型炉としての用途に適している。原子力エネルギーは他の非化石燃料系エネルギー源に対して社会需要に量的に応えることができ、かつ出力の安定した供給が可能な点に利がある。CO 系 ACRES では式(14)の過程で HTGR からの高温一次エネルギーを利用できる。ここでは高温熱を化学変化で直接利用できるため、機械変換に対して高効率な熱利用が期待できる。ACRES は HTGR の新たな熱利用手法にもなりえる。

ACRES は一次エネルギー消費システムであるので、一次エネルギーを ACRES に通すこと無く直接需要側で利用の方がエネルギー利用効率は基本的に高まる。よって、ACRES は変換した炭素

媒体が一次エネルギー源に対して、エネルギー需要側に利点がある場合に価値を持つ。とくに CO は既存のプロセス産業に対して親和性が高いので、製鉄、化学プラント、高温プロセスにおいて CO 系 ACRES の活用の場が潜在すると考えられる。今後、利用先の開発と操作の最適化が必要である。

5. まとめ

ACRES の成立性をエンタルピー収支の観点から検討した。成立には需要側に適応した循環炭化水素媒体の選択と、一次エネルギー源の選択が重要である。本稿では循環率の評価から循環炭化水素媒体として CO、エネルギー源として量的な十分さから原子力を用いた原子力利用型 CO 系 ACRES を第一候補として提案する。

一方で ACRES の開発には、引き続き循環炭化水素媒体の検討が必要である。メタンは既存の反応操作技術で比較的容易に対応が可能な扱いやすい循環媒体である。メタノール、エタノールは液体のため移動体利用の可能性もある。また、上述の CO はエネルギー、物質双方の生産へ水素に比べて高エネルギー密度、高反応活性で対応可能であり産業利用むきである。要素技術として二酸化炭素回収技術、炭化水素再生技術の開発が必要である。原子力が利用されるとすれば、燃料効率の高い革新的原子力技術も必要である。同時に原子力利用システムの価値の理解普及が必要である。ACRES 普及にむけては主に炭化水素利用産業分野において応用先開発を検討する必要がある。

本提案はわが国の CO₂排出削減と炭素供給安全保障の両立の観点から案出されたエネルギーシステムである。今後、工業・経済の安定した発展を担保する合理的なエネルギーシステムがいよいよ望まれる。本提案がそのシステム選択の一候補となれば幸いである。

参考文献

- [1] 経済産業省 資源エネルギー庁, 【第 201-1-3】我が国のエネルギーバランス・フロー概要 (2004 年度), エネルギー白書 2006 年版, 経済産業省 (2006)
- [2] Kusama, H. et al., CO₂ hydrogenation to ethanol over promoted Rh/SiO₂ catalysts, *Catalysis Today*, **28** (1996) 261.

- [3] Kato, et. Al., Study on a Regenerative Fuel Reformer for a Zero-Emission Vehicle System, *J. Chem. Eng. Japan*, **36** (2003) pp. 860.
- [4] Jensen, S et al., Hydrogen and synthetic fuel production from renewable energy sources, *Int. J. Hydrogen Energy*, **32**(2007), 3253.
- [5] Fujikawa, S. et Al., Achievement of Reactor-Outlet Coolant Temperature of 950°C in HTTR, *J. Nucl. Sci. Technol.*, **41**(2004), 1245.
-

高圧・高温条件下の水素の熱物性計測 *Measurements of Thermophysical Properties of Hydrogen at High Pressure and High Temperature*

藤井 丕夫 (産総研) 高田 保之 (九州大学) 新里 寛英 (産総研)
Motoo FUJII(AIST) Yasuyuki TAKATA(Kyushu University) Kan-ei SINZATO (AIST)
e-mail: fujii-motoo@aist.go.jp

1. はじめに

来るべき水素エネルギー社会を構築するための基盤技術の確立に向けた研究の推進を目的とした NEDO 事業、「水素先端科学基礎研究事業」“Fundamental Research Project on Advanced Hydrogen Science”の一環として、2006年7月に「水素材料先端科学研究センター (HYDROGENIUS)」が九州大学の伊都キャンパスに設立された。この研究センターでは、水素のコンパクトな輸送や貯蔵手段を実現するために、水素の基礎科学において未解決の問題、すなわち、金属の水素による脆化、水素雰囲気中のトライボロジー、高温・高圧下の水素の熱物性などに関する基礎的な研究を行っている。主要な研究テーマの一つである熱物性計測を担う物性チームには、水素の PVT (圧力, 容積, 温度の関係) データ, 比熱および音速などの熱力学的性質, 粘度や熱伝導率などの輸送的性質, さらに水素の水への溶解度や高圧水素中の高沸点ガスの露点等の物性値を, 100MPa, 500°C までの圧力, 温度範囲で測定することが課せられている[1]。これらの測定は HYDROGENIUS 付属の実験棟で行われ, 特に高圧域 (1MPa 以上) での計測は特殊仕様の高圧実験室内で行われている。

これまでに熱物性値の測定に用いる 100MPa までの高圧対応の装置がいくつか完成し, 着実にデータの取得が行われている。本稿ではこれらの測定の内, PVT データ, 粘度, 溶解度および熱伝導率について, それぞれ測定原理, 測定法および装置の概要を紹介するとともに測定結果の若干例を示す。

2. PVT 関係の測定

2.1 既存の測定値

水素の熱力学性質に関する測定値は十分とは云えず, 新しい実測値の集積が必要とされている。PVT データについては, Michels [2,3]らのグループによる 98 K~423 K, 300 MPa の領域における先駆的な測定値がある。また, 1970 年代には米国のスペースシャトル開発に関連して, 三重点温度である 14 K~300 K, 100 MPa までの領域におけ

る体系的な測定がなされている[4, 5]。しかし, 423 K 以上の温度域における測定値は殆どない。一方, これまで水素の熱物性計算に広く用いられている Younglove [6]の状態方程式は, 適用範囲が 14 K~400 K, 121 MPa までに限定されている。この範囲を超えた高温, 高圧の物性値は補外によって計算されている。2007年に Leachman [7]によって 14 K~1000 K, 2000 MPa まで適用可とする状態方程式が提案されているが, これも上述の実測値, すなわち, 大部分が 30 年以上も前の測定でしかも純度が 99.8%と低い水素に対する実測値に基づいたものである。本研究では最終的に常温~500 °C, 100 MPa までの PVT 測定を行う。

2.2 測定原理—バーネット法—

本測定の温度圧力範囲では水素は超臨界状態にあり, 100 MPa の高圧域でも 25 °C で 24.5 mol dm⁻³ (= 49.4 kg m⁻³) 程度と密度は小さい。そこで PVT の測定には, 低密度域で有効で, 試料の充填質量や容器の体積を正確に測定する必要がない利点をもつバーネット法を採用する。

バーネット法による測定手順を Fig. 1 に示す。バーネット法では試料容器(A), 膨張容器(B)の大小 2 個の容器を用いる。試料容器に充填した水素

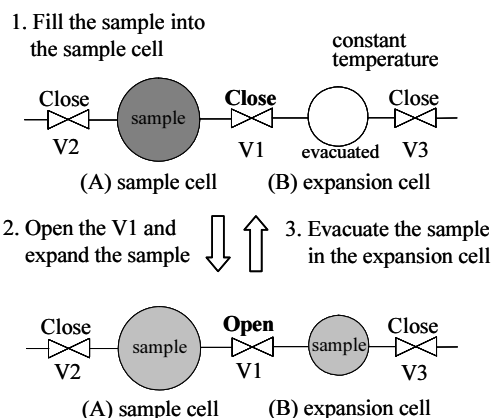


Figure 1 Procedures of the Burnett method.

を膨張容器に等温膨張させ、平衡圧力を測定する。この操作を系内の水素が理想気体と見なせる程度に圧力が低下するまで繰り返すことによって、各膨張時における圧縮係数 Z ならびに密度 ρ が以下の手順で算出される。

容積 V_A の試料容器に質量 m の試料が温度 T 、圧力 P_{i-1} で充填されているとき、実在気体の状態式は圧縮係数 Z_{i-1} を用いて、次式で表わされる。

$$P_{i-1}V_A = Z_{i-1}mRT \quad (1)$$

ここで R はガス定数、下付きの i は膨張回数を表す。この試料を容積 V_B の膨張容器に等温膨張させると、状態式は次式で記述される。

$$P_i(V_A + V_B) = Z_imRT \quad (2)$$

Eq. (2) を Eq. (1) で割ると次式が得られる。

$$\frac{P_i(V_A + V_B)}{P_{i-1}V_A} = \frac{Z_i}{Z_{i-1}} \quad (3)$$

ここで、 $(V_A + V_B)/V_A = N$ とおいて (N は装置定数) 、

$$\frac{P_i}{P_{i-1}} N = \frac{Z_i}{Z_{i-1}} \quad (4)$$

試料容器から膨張容器への等温膨張を無限回行ったとすると、理想気体状態となり、 $Z=1$ とみなせ、膨張前後の圧力比から N が決定できる。

$$N = \lim_{i \rightarrow \infty} \frac{Z_i}{Z_{i-1}} \frac{P_{i-1}}{P_i} = \lim_{i \rightarrow \infty} \frac{P_{i-1}}{P_i} \quad (5)$$

一方、Eq. (4) において、 $i = 1 \sim n$ まで両辺を掛け合わせると、

$$\frac{P_n}{P_0} N^n = \frac{Z_n}{Z_0} \quad (6)$$

となる。 $\lim_{n \rightarrow \infty} Z_n = 1$ とすると、次式から初期圧縮係数 Z_0 が求まる。

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{P_n}{P_0} N^n \right) = \frac{1}{Z_0} \quad (7)$$

Z_0 が求まると、 Z_n は Eq. (6) より

$$Z_n = Z_0 \left(\frac{P_n}{P_0} N^n \right) \quad (8)$$

として、全ての膨張過程における圧縮係数を求めることができる。したがって、密度 ρ は次式で算出される。

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{P}{ZRT} \quad (9)$$

2.3 測定装置

本測定では、まず常温から 250 °C までの温度制御ができる液体恒温槽および 1 MPa 未満の低圧域の測定が可能な装置を製作し、測定法の妥当性を確認したのち、100 MPa までの高圧仕様のパーネット法 PVT 装置を製作した。測定システムの概要を Fig. 2 に示す。圧力容器、配管およびバルブはすべて高圧仕様となっている。本装置は実験棟の高圧水素実験専用の実験室に設置されている。高圧実験室には 100 MPa の高圧水素を製造するコンプレッサーがあり、高圧水素はアキュムレータ (容量 100MPa, 1.0 l) に蓄えられる。装置への高圧ガスの供給をはじめ、バルブ操作等はエアークチュエータによってすべて遠隔操作で行われる。PVT 測定装置における試料容器(A)および膨張容器(B)の内容積はそれぞれ、250 cc および 100 cc である。圧力測定には高精度の水晶発振式圧力センサを用い、その不確かさは 0.01 % である。温度は標準白金抵抗測温体と精密級交流ブリッジを用いて ITS-90 国際温度目盛に準拠した測定を行っている。

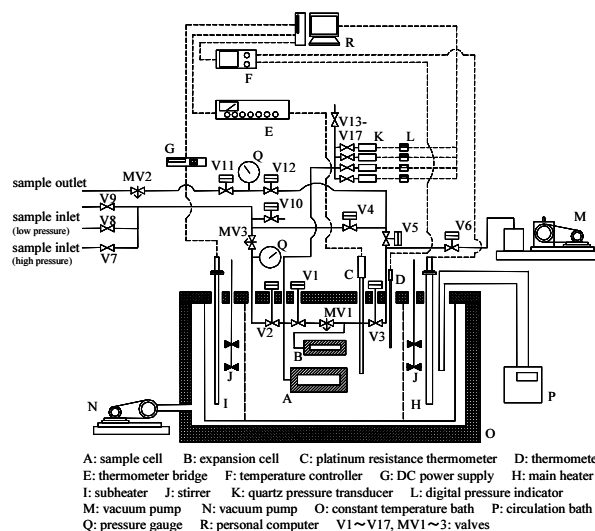


Figure 2 Outline of PVT measurement system.

2.4 測定例

測定手順の確認や装置の健全性を調べるために、まずヘリウムおよび窒素ガスを用いた予備的測定を行い、続いて水素の測定を行った。水素については現在も測定データを蓄積しつつあるが、これまで温度 160 °C で圧力 96.7MPa までの測定がな

れ、最高温度 200°C では 50MPa までのデータが得られている。密度の測定値を既存の測定値および Younglove [6] の状態方程式による値と比べた結果を Fig. 3 に示す。120 °C の場合、本測定値と状態式の値の偏差は 60 MPa で最大となり約 0.7% 測定値が小さい。

PVT 測定については 500 °C までの温度制御が可

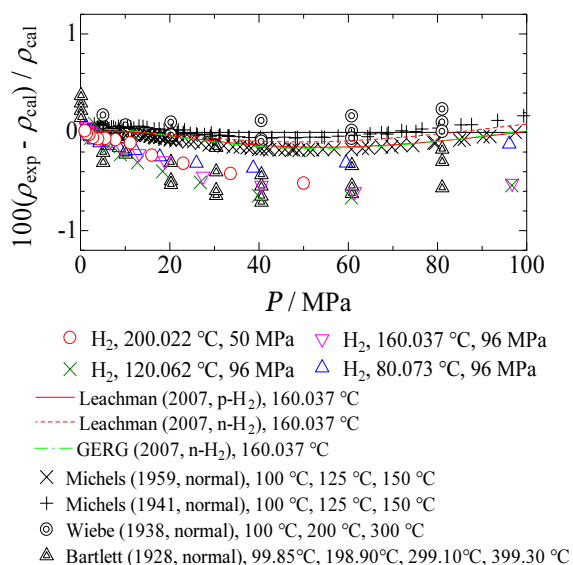


Figure 3 Comparison of measured densities with existing EOS and data.

能な固体恒温槽を開発し、高温域では定容積法による測定を行う予定である。

3. 粘度の測定

3.1 測定原理

粘度の測定は細管法を用いて行う。これは細管内の流体の流れが Poiseuille Flow で近似できることを利用した測定法である。細管内の流れが理想的な Poiseuille Flow である場合、流体の粘度 μ_p は次式で求められる[8]

$$\mu_p = \frac{\pi r^4 \Delta P}{8QL} \quad (10)$$

ここで、 r は細管半径、 ΔP は細管における圧力降下、 Q は細管を流れる気体の体積流量、 L は細管の長さである。実際の流れは理想的なものとは異なり、運動量補正や入口近傍の流動発達域の補正が必要で、粘度は次式で算出される。

$$\mu = \frac{\pi r^4 \Delta P}{8Q(L+nr)} - \frac{m\rho Q}{8\pi(L+nr)} \quad (11)$$

ここで、 m は運動量、 n は発達域の補正係数で、理論的な考察により、それぞれ 1.12 および 0.57 とすればよいとされている[9,10]。しかし、本測定では標準試料を用いて粘度測定を行い、これらの値を一種の装置定数として決定している。さらに、細管に接続する配管における種々の圧力損失を補正する必要もあり、圧力降下および体積流量の測定値にこれらの補正を行って粘度を算出した。

3.2 測定装置

細管法による粘度測定システムの概略を Fig.4 に示す。細管はガスの流入部と出口部に仕切られた、内径 9mm、肉厚 25mm の円筒状高压容器内に設置されている。このような構造にすることで、細管自体の耐圧性は不必要で、石英ガラス細管を使用できる。細管は長さ 501.6mm、内径 0.462mm、肉厚約 0.25mm で、これらの値はカセットメータおよび水銀充填法で測定した。

高压ガスはコンプレッサー出口にあるアキュムレータから供給され、細管を経て流量計で質量流量あるいは体積流量が測定された後排出される。細管出入り口の圧力差は差圧計または絶対圧計で測定される。差圧計の耐圧が 8MPa 以下であるので、現在までのところ 8MPa までの水素の粘度が測定されている。

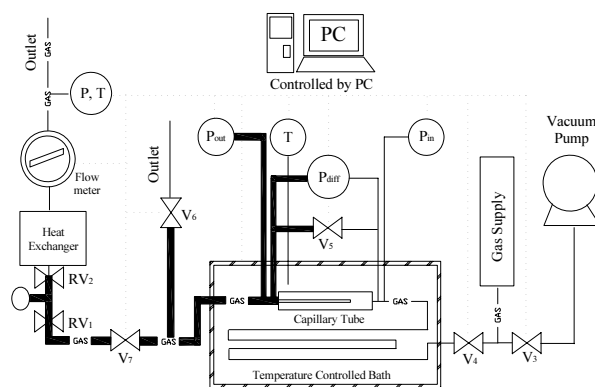


Figure 4 Outline of viscosity measurement system.

3.3 測定例

まず、窒素ガスを用いた測定によって装置の健全性を確かめ、装置定数を決定した。水素の測定において、高压ガスアキュムレータの容量が小さく、定常流による測定が困難なことが判明した。

流量測定を体積型から質量流量測定型に変更し、圧力変化が緩やかであるとして、準定常状態での測定を試みた。Fig.5に8MPa以下、200℃までの水素の粘度測定結果の例を示す。測定は入り口圧力が8MPaから徐々に低下する状況でなされている。本測定値はNISTの値に近いが、圧力依存性については不自然な傾向を示している。このことは準定常状態では精度の良い測定はできないことを意味している。

粘度測定の精度を高めるためには、測定装置の改造が必要で、アキュムレータ直後に圧力調整弁

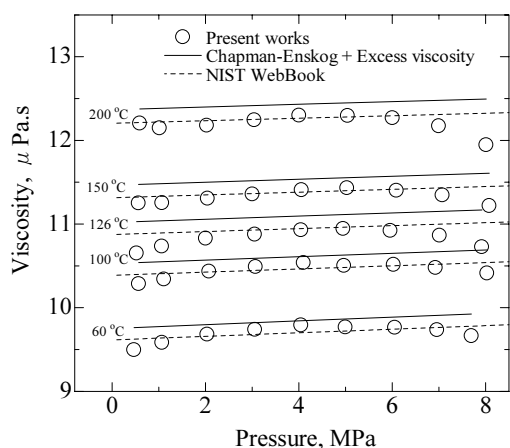


Figure 5 Measured viscosity of hydrogen.

をつけること、高圧に耐える差圧計を開発すること、精度の高い流量測定を可能にすることなど解決すべき多くの課題が残されている。

4. 水素ガスの溶解度の測定

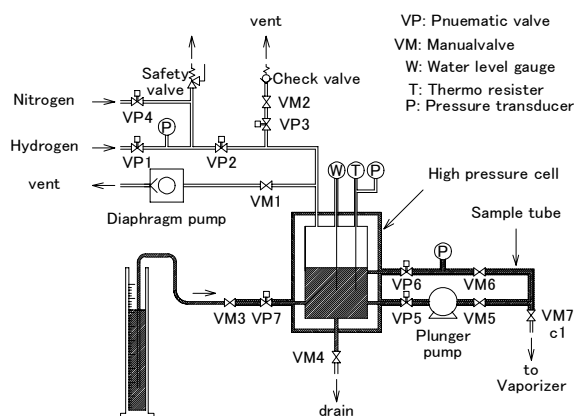
水素エネルギー利用における各要素技術における安全性、機能性、耐久性を評価する上で水素ガスの種々の物質に対する溶解度は非常に重要な物性値である。ここでは高圧水素の水に対する溶解度の測定例を示す。

4.1 測定原理および装置

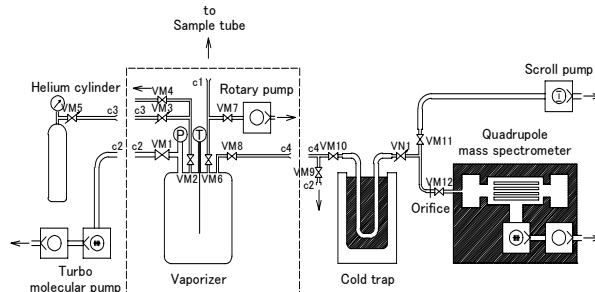
水に対する水素の溶解度 ϕ は、溶解水素のモル分率で定義され、次式で表わされる

$$\phi = n_{H_2} / (n_{H_2} + n_{H_2O}) \quad (12)$$

溶解度の測定は、温度、圧力が設定された高压密閉セル内に対象となる純水および水素ガスを封入し、水を循環させて水素-水の気液平衡状態に達



(a) Apparatus for gas-liquid equilibrium at high pressures.



(b) Sample inlet and pre-treatment for mass Spectrometry.

Figure 6 Schematics of solubility measurement System.

したときの水をサンプル液として採取する。次に液中の水素のモル分率を四重極質量分析計を用いて測定する。その際、サンプル液は重量を測定された後、質量分析計に導かれる前に気化器で気化され、さらにガス中の水分はコールドトラップで除去される。Fig.6 (a), (b)にこのような手順を実現する測定装置の概略を示す。図(a)は高圧下での気液平衡を達成する系で、(b)はサンプル液の成分を分析する系である。

質量分析計が示す成分信号の絶対強度は種々の要因によって影響を受ける。したがって、本測定ではヘリウム He を参照ガスとして用い、水素の強度を He の強度に相対的な値として測定する。

4.2 純水への水素溶解度の測定例

Fig. 7 に温度 25℃における溶解度の圧力依存性を示す。溶解度は圧力が高くなるにつれて、低圧領域で成立するヘンリーの法則から偏倚し、相対的に小さくなる。そして、この温度域では既存

の測定結果[11,12]とかなり良く一致する結果が得られている。

溶解度に関しては、今後、水以外の種々の物質に対する測定を計画しており、固体内のプロトン

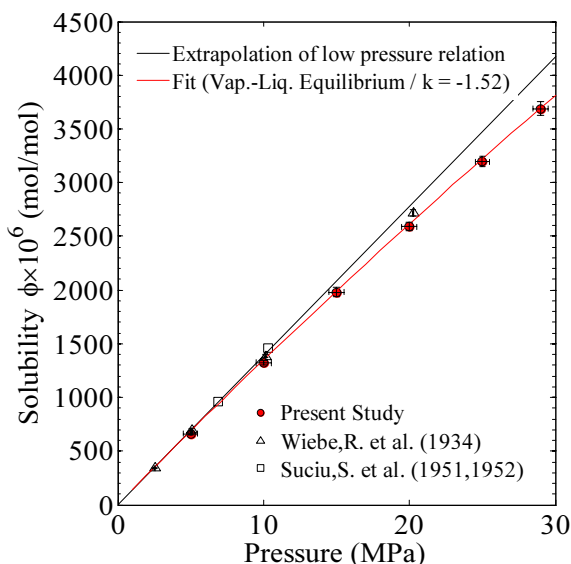


Figure 7 Hydrogen solubility in water with varying pressure at 25°C.

濃度を計測できるように改造を終えた NMR 装置を用いて、高分子材料すなわち、ゴム材料や高分子電解質への水素溶解度を測定する予定である。

5. 熱伝導率の測定

水素の熱伝導率の測定値はその大部分が低温領域に限られていて測定年代も古い[13,14]. 最近では 1987 年に 10MPa, 150°C までの測定例[15]が報告されているものの、高温・高圧域における熱伝導率は Enskog 理論によって低温・低圧域の値から推算される値が用いられている。本研究では、高温・高圧域で水素の熱伝導率を高精度で測定し、温度、圧力への依存性を明らかにする。

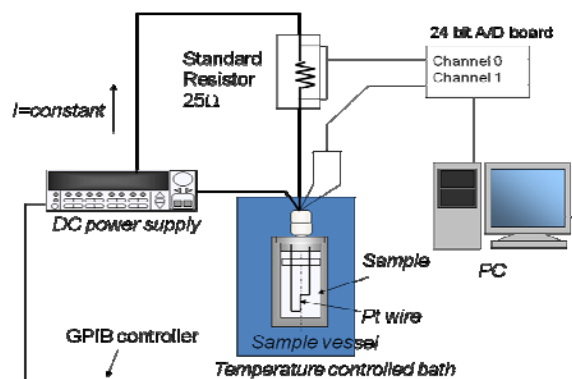
5.1 測定方法

測定法としては、流体の熱伝導率を精度良く測定でき、多くの測定例がある非定常細線加熱法と原理的には同じであるが、少量の試料に適用できる非定常短細線加熱法[16]を用いる。この方法は、通常の細線長さ(アスペクト比 $l/d > 10^4$)を極端に短く ($l/d \sim 10^3$)したもので、細線端部の影響をできるだけ厳密に考慮するため、高精度の数値解析結果に基づいて熱伝導率および熱拡散率を算出するもの

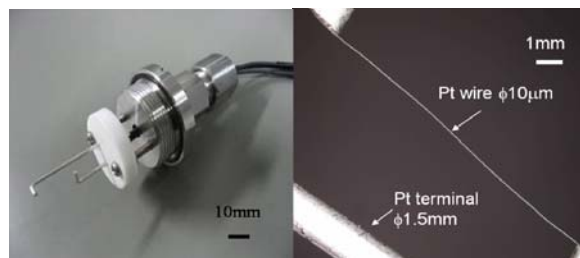
である。非定常短細線加熱法は小さい試料容器が使用でき、プローブのコーティングが容易になるため導電性流体や腐食性流体へ適用できるという特徴をもつ。しかし、水素は他の流体とは大きく異なり、熱伝導率が空気に比べ 1 桁ほど大きく、熱拡散率は金属並みに大きい。そのため、非定常短細線加熱法を水素ガスに適用する際には特別な準備が必要になる。まず、数値解析における境界条件の妥当性の検討が必要であり、さらに妥当な境界条件に適合する試料容器の容量やプローブ寸法を数値解析結果に基づいて適切に決定することが重要となる。これらの事項を詳細に検討するための新しい数値解析法が開発されている[17,18].

5.2 測定装置

Fig.8(a) に熱伝導率測定システムの概要を示す。装置は短細線プローブが挿入された試料容器 (ステンレス製耐圧容器, 内径 30mm, 深さ 40mm), 直流電源, 2Ch. 24bit AD ボードおよび標準抵抗器から成る。試料容器はシリコンオイルの恒温槽内に浸漬される。測定のシーケンスや信号の授受はすべて PC により自動的に制御される。Fig.8(b) は短細線プローブの写真である。短細線は直径 $10\mu\text{m}$, 長さ約 15mm の白金線で、直径 1.5mm の白金リー



(a) Outline of measuring system.



(b) Photos of short hot wire probe.

Figure 8 Apparatus of thermal conductivity Measurement.

ド端子に溶着されている。写真からわかるように、短細線には若干のたわみがあり、またリード端子への溶着ポイントも明確ではない。これらの影響を除去するため、標準物質（熱伝導率が既知のトルエンやヘリウムガス）を用いた測定を行い、短細線の有効長さおよび直径を校正する。校正された長さおよび直径は測定値に比べてそれぞれ約5%、0.5%程度異なる。

5.2 熱伝導率の算出法

恒温槽の温度を設定し、白金の短細線プローブの抵抗値が変動することなく一定値となった後、すなわち容器内試料温度が定常に達したことを確認した後、直流電源からステップ状の一定電流を細線プローブに供給し加熱する。このときの電流・電圧の過渡応答を高速 A/D ボードにより測定する。これから求まる抵抗値から白金細線の非定常温度応答が算出される。なお、電流値は加熱開始 1 秒後における細線の温度上昇が 2K 以下となるように設定し、自然対流発生の影響が表れない 1s 以内の測定データを用いる。

熱伝導率および熱拡散率はカーブフィッティングの手法を用いて算出する。A/D ボードのデータサンプリングレートは 50000/秒である。各サンプリングにおける細線温度の測定値を $T_{exp,i}$ とし、数値解から求められるそれぞれの測定点に対応する時間における細線の体積平均温度を T_i とする。プローブの寸法等が既知であるとする、 T_i は試料の熱伝導率 λ および熱拡散率 α のみの関数となり $T_i(\lambda, \alpha)$ で表される。 $T_{exp,i}$ と $T_i(\lambda, \alpha)$ とが一致するようにカーブフィッティングを行う。式(13)に示すように、パラメータ λ および α を変化させた計算により、 $T_{exp,i}$ と $T_i(\lambda, \alpha)$ の残差の 2 乗和 S を最小とするような値として熱伝導率と熱拡散率が求められる。

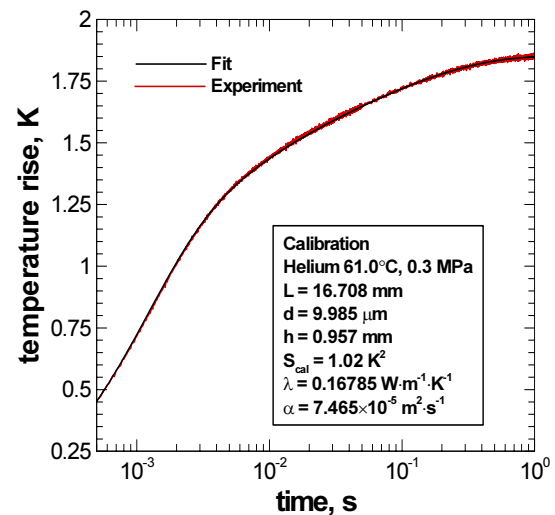
$$S = \sum_{i=1}^{N_{exp}} (T_{exp,i} - T_i(\lambda, \alpha))^2 \rightarrow \text{Min} \quad (13)$$

高い測定精度を得るためには短細線プローブの有効直径と長さを標準試料を用いて精密に校正する必要がある。この校正においてもカーブフィッティング手法を適用する。標準物質としてヘリウムガスを使用し、熱伝導率および熱拡散率が既知とすると、式(13)のパラメータを λ, α から l, d に置き換えることができ、このフィッティングから l およ

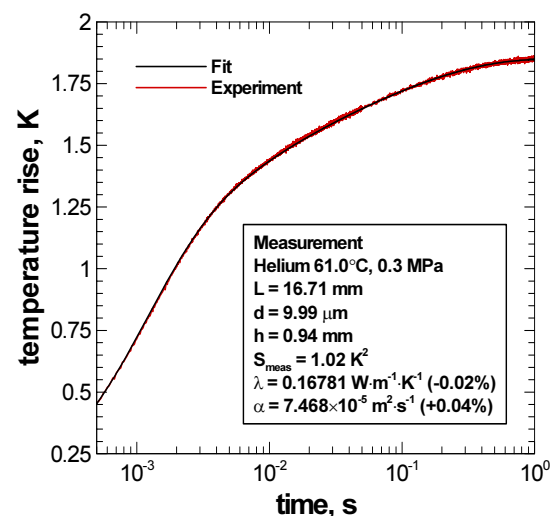
び d の校正値が得られる。すなわち、

$$S = \sum_{i=1}^{N_{exp}} (T_{exp,i} - T_i(l, d))^2 \rightarrow \text{Min} \quad (14)$$

Fig. 9 にヘリウムの物性値が既知として細線プローブの寸法を校正するためのカーブフィッティング(a)とその結果を用いたカーブフィッティングでヘリウムの熱伝導率と熱拡散率を算出した結果(b)を示す。それぞれのフィッティングプロセスが非常に良い精度で達成されていることがわかる。一旦、細線の有効直径と長さが求まると、試料流体の温度上昇の測定値に図(b)のフィッティングを行うことにより、熱伝導率および熱拡散率が同時に算出される。



(a) Calibration



(b) Check using calibrated effective geometry

Figure 9 Calibrated fit and back check for helium.

5.3 熱伝導率および熱拡散率の測定例

上述の方法で決定されたプローブの寸法を用いて、水素の熱伝導率および熱拡散率の測定を行った。0.3MPaの低圧域で、温度20~100°Cの範囲での測定結果をFig. 10に示す。図にはRoder[19]およびAssaelら[20]の測定値をそれぞれ実線および破線で記入してある。なお、熱拡散率における実線はRoderの熱伝導率をLeachmannの状態式から計算される ρC_p で除した値である。本測定値はこれら既存の測定結果と熱伝導率は±1%程度、熱拡散率は±5%程度の偏差で一致している。精度のよい測定が困難とされている熱拡散率についても再現性の良い測定値が得られていることから、測定法およびカーブフィッティングの手法が非常に有効であることが確認できた。

常温での平衡水素であるノーマル水素はオルソ、パラの2つの異性体の混合物である。熱伝導率および熱拡散率については、パラ水素および平衡水素を対象に、1MPa以下、80K~360Kの範囲での測定を計画している。さらに100MPa、500°Cの高温・高圧領域の測定は、現在試料容器および高温恒温槽などの装置を製作中で、測定システムが完成次第開始する予定である。

6. おわりに

本稿ではHYDROGENIUSの物性チームで行われている高圧・高温域での水素の熱物性計測について、測定装置や測定結果の一部を紹介した。ここで記した測定のほかに、物性チームでは高圧水素中の高沸点ガスの露点計測(佐賀大)、水素の音速測定(長崎大)新しく測定されたデータを加えた水素熱物性データベースの構築(長崎大)など水素物性に関する網羅的な研究が行われている。研究は計画に従って遂行されているが、予定どおりに進まないことが少なくない。物性値の測定項目は目新しいものではなく、当初は測定方法もある程度確立された方法を用いることができると考えていた。しかし、500°C程度の高温はともかく100MPaの高圧条件での測定でしかも対象が水素ガスであるということは、測定の開始に至るまでの準備段階でさえ非常に困難を伴うものであることを痛感した。高圧ガス保安法による規制をクリアするための耐圧容器や周辺装置の設計製作、電気ヒータを備えた高温恒温槽さらにセンサや電子

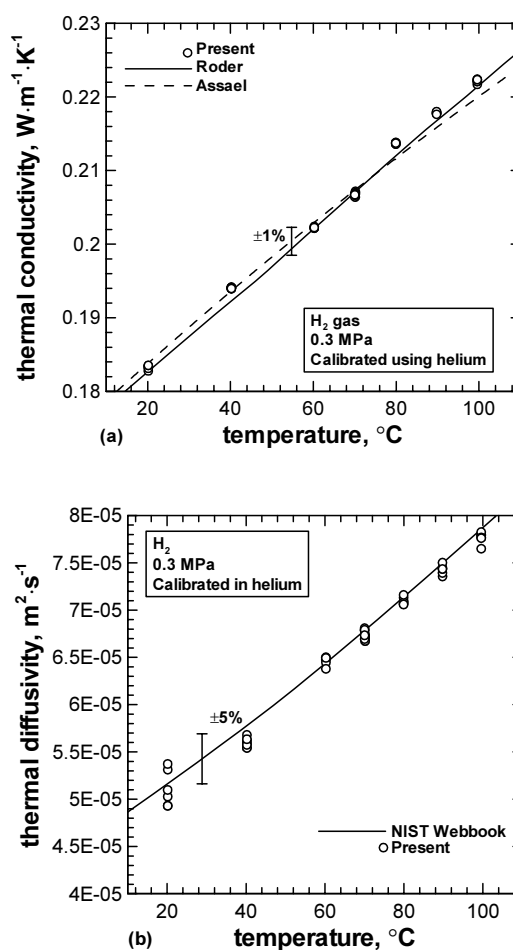


Figure 10 Thermal conductivity and thermal diffusivity of hydrogen for 0.3MPa.

機器の防爆対策の徹底など、予想以上に困難な課題が山積していた。プロジェクト開始早々から装置の設計・製作、納入に非常な苦勞を強いられた。足かけ3年を経てやっと本稿で紹介した物性の計測が軌道に乗りかけた状況にある。それにしても、100MPa、500°Cの高圧・高温条件下の水素の熱物性計測に関わることは筆者らにとって千載一遇のチャンスが与えられたということで、種々の困難を克服しつつ、最終目標である水素物性の国際標準とも見なされるデータベースの完成に向けて努力する心づもりである。

本稿で示した各測定値は物性チームの構成員全員の努力によってこれまでに収集されたデータの一部であり、詳細な不確かさ解析結果を伴う測定値とは云えない。データベースの完成のためにはさらに系統的な測定を積み重ねると同時に不確か

さ解析によりデータを吟味する必要がある。

最後に、本研究の機会を提供頂いた NEDO プロジェクトの「水素先端科学基礎研究事業」関係各位に深甚の謝意を表す。

参考文献

- [1] M. Fujii, Y. Takata and K. Shinzato, Proc. 27th Jpn. Symp. Thermophys. Prop., Kyoto(2006) Z114.
- [2] A. Michels and M. Goudeket, Physica, 8 (1941) 347.
- [3] A. Michels, W. De Graaff, T. Wassenaar, J.M.H. Levelt and P. Louwse, Physica, 25 (1959) 25.
- [4] R. D. Goodwin, D. E. Diller, H. M. Roder and L. A. Weber, J. Res. Natl. Bur. Stand., Sect., A 67 (1963) 173.
- [5] L. A. Weber, NASA-SP-3088 (1975).
- [6] B. A. Younglove, J. Phys. Chem. Ref. Data, 11 (1982) 1.
- [7] J. Leachman, *Fundamental Equations of State for Parahydrogen, Normal Hydrogen, and Ortho-hydrogen*, Master's Thesis, University of Idaho (2007).
- [8] J. Kestin, M. Sokolov, and W. Wakeham, Appl. Sci. Res. 27 (1973) 241.
- [9] J. Boussinesq, Compt. Rend. 110(1890)1160.
- [10] M. M. Couette, Ann. Chim. et Phys. (Serie 6) 21, (1890) 433.
- [11] Weibe, R., Gaddy, V.L. and Conrad Heins, Jr., Ind. Eng. Chem., 24-7 (1932) 823.
- [12] Suci, S. Ph.D. Thesis, Purdue University 1951 & Zoss, L.M. Ph.D. Thesis, Purdue University 1952
- [13] H. M. Roder, D. E. Diller, J. Chemical Physics, 52-11 (1970) 5928.
- [14] M. J. Assael and W. A. Wakeham, J. Chem. Soc., Faraday Trans. I 77(1981) 697.
- [15] M. Mustafa, M. Ross, R. D. Trengove, W. A. Wakeham and M. Zalaf, Physica, 141A(1987) 233.
- [16] M. Fujii, X. Zhang, N. Imaishi, S. Fujiwara, T. Sakamoto, Int. J. Thermophys. 18 (1997) 327.
- [17] P. L. Woodfield, J. Fukai, M. Fujii, Y. Takata, K. Shinzato, Int. J. Thermophys. 29 (2008) 1278.
- [18] P. L. Woodfield, J. Fukai, M. Fujii, Y. Takata and K. Shinzato, Int. J. Thermophys. 29(2008) 1299.
- [19] H. M. Roder, Int. J. Thermophys. 5(1984) 323.
- [20] M. J. Assael, S. Mixafendi and W. A. Wakeham, J. Phys. Chem. Ref. Data 15, 1315 (1986).

大学キャンパスの水素ステーション *Hydrogen Refueling Station in University Campus*

杉村 丈一, 岡田 伸廣, 伊藤 衡平 (九州大学)
Joichi SUGIMURA, Nobuhiro OKADA, Kohei ITO (Kyushu University)
e-mail: sugi@mech.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

地球環境, エネルギー問題の深刻化を背景に, 多様なエネルギー源から製造できる水素エネルギーへの期待が高まっています. 燃料電池自動車の開発と並行して, 水素ステーションの実証試験や, 関連機器の開発が国内外で進められています.

九州大学では, 伊都新キャンパスにおいて, 水素エネルギー関連の研究教育を多角的に展開しています. この大きな動きの発端は, 2003 年度に採択された文部科学省の 21 世紀 COE プログラム「水素利用機械システムの統合技術」です. 同プログラムの 5 年間の実施期間の間に, 工学研究院の機械系部門を中心として, 大学院教育と基礎研究はもちろんのこと, 水素利用技術研究センターの設置, 各種実証試験, 人材育成, 産業技術総合研究所の水素材料先端科学研究センターの設置など, 水素にかかわる研究教育拠点の構築をめざした活動を続けて参りました[1].

これと時を同じくして, 九州大学のキャンパス移転が 2005 年 9 月から始まりました. 箱崎地区と六本松地区の部局が, 十数年の移転計画に従って移動する壮大な計画で, 工学系はその先陣を切って 2007 年 3 月までに移転をほぼ完了しました.



図 1 九州大学水素ステーション[3]

伊都新キャンパスは, 福岡市の西の端, 糸島半島の丘陵地帯に位置し, 275 ヘクタールにおよぶ広大な敷地を有しています. その地の利を活かして, 水素関連の各種研究を幅広く展開すべく, 上述のセンターの研究棟建設や, 水素ステーション, 定置用燃料電池実証試験設備などの導入を行い, 大学では「水素キャンパス」と位置づけています. そのなかで, 実証試験設備として最初に導入計画を進めたのが水素ステーションでした (図 1).

水素ステーションは, 2004 年 7 月に地域新生コンソーシアム研究開発事業として九州産業経済局からの委託を受けて計画が始まり, 2005 年 1 月に伊都新キャンパスにおいて建設工事開始, 同 11 月に竣工, 高圧ガス製造完成検査に合格し, 同 12 月末までの予定で設備の試運転を行っておりました. 12 月 7 日に発生した事故のため, 実証試験は中断せざるを得ませんでした. この事故によって多くの課題と教訓を得ました.

本稿では, 水素ステーションの導入から, 事故とその原因調査, 及び新たな課題の研究に携わってきた立場から, その経緯をご紹介するとともに, 大学キャンパスでの研究開発に内在する問題点についても少し触れたいと思います.

2. 水素ステーションのプロジェクト

2.1 HHEG

水素はさまざまな方法で製造できますが, CO₂ フリーの再生可能なエネルギーの観点からは, 水電解法がひとつの理想形と考えられます. 一方, 燃料電池自動車の燃料としての水素は, 圧縮水素の形態とするのが最も効率的と考えられており, 従来技術ではダイヤフラム式や往復式のコンプレッサーが利用されています. しかし, これらの耐久性の問題や圧縮するためにエネルギーを必要とする点から, より効率のよい高圧水素製造技術の出現が求められてきました.

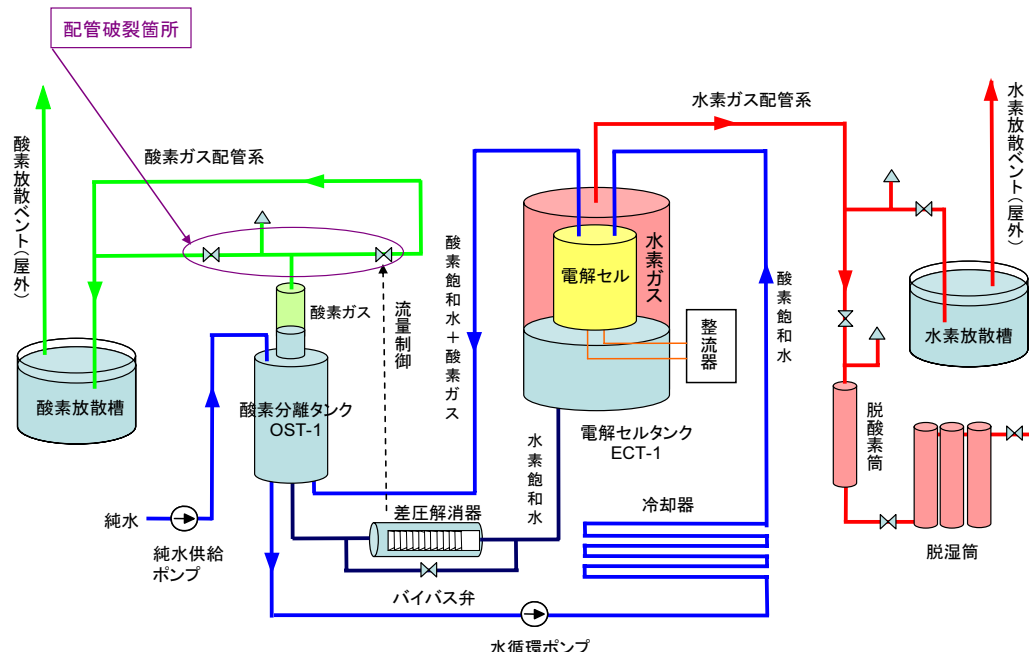


図2 HHEGの概要 [5]

(赤：水素ガス配管，緑：酸素ガス配管，青：水循環配管，紺：差圧検出用配管)

三菱商事では、コンプレッサーを使用せずに固体高分子膜を用いた水の電気分解により高压水素を発生するHHEG（高圧縮水素エネルギー発生装置）を、世界にさきがけて開発しました[2]。HHEGの試作機は35MPaで2.5Nm³/hの水素製造を達成しました。

HHEGのしくみは次のとおりです。固体高分子膜を用いた電解セルに水と電気を供給すると水の電気分解によって水素ガスと酸素ガスが発生します。これを図2のように閉じたタンク（図中、電解セルタンク）内で行うと、ガスの圧力は上昇していきます。必要な圧力40MPa（約400気圧）に達したところで、水素ガスを外部に取り出してやれば、コンプレッサーを使わずに高压の水素ガスを得ることができます。一方、発生した酸素ガスは水に運ばれ、もうひとつのタンク「酸素分離タンク」を通して大気に放出されます。電解セルの膜は水素側と酸素側の圧力差が大きくなると壊れてしまうため、常に二つのタンクの圧力差を差圧解消センサでとらえ、取り出す水素と酸素の量を調整しながら圧力バランスをとる点がHHEGの特長です。

2.2 研究開発プロジェクト

HHEGを用いた水素ステーションの長期安全運転を保証するためには、構成機器の高压水素ガス

環境での性能や、高压力下での水電解特性についての技術的な裏付けが必要不可欠です。また、実際の使用を想定した実証試験を行い、製造効率や耐久性、安全性を確認する必要があります。さらに、自然エネルギー活用の観点から、風力などの変動するエネルギー源と水素製造装置とのマッチングに関して技術的な検討が必要です。そこで、九州大学、九州電力、三菱商事、キューキ、及び財団法人福岡県産業・科学技術進行財団でチームを組み、「コンプレッサーレスの高压水電解水素ステーションの開発」の共同研究プロジェクトが立ち上がりました。

このプロジェクトでは、HHEGの高压・大型化（圧力40MPa、水素製造能力30Nm³/h）を図り、実証データを取得するとともに、電気分解や材料強度、風力発電などの研究者により電解特性、材料強度・耐久性、安全性等の評価解析と、風力等の自然エネルギーの利用可能性を探求することになりました。また、研究開発としての意義だけでなく、九州初の水素ステーションとして、地域の技術・人材育成の拠点、新たな価値観創造と社会受容性向上の拠点として重要な役割を担うものと期待されました。

水素ステーションのような実証システムの導入は、大学における通常の研究設備導入に比べては

るかに多くの作業を要しました。企業の技術陣との研究面・技術面の打合せは言うまでもなく、研究遂行と設備導入のための経理や知的財産などの折衝、設計・建設にかかわる検討や法的な対応、資格をもったスタッフによる運用体制の確立など、多岐にわたる作業を並行して行う必要がありました。また関係者だけでなく、大勢の事務職員、技術職員の協力を仰ぐこととなりました。期間中、チームを組んだ企業・財団の方々と連日奔走したことを思い出します。多くの人々と多くの機関の協力をいただき、竣工、そして試運転開始にこぎつけましたが、プロジェクトは平成 17 年 12 月 7 日に思わぬ事態に陥ることになりました。

2.3 研究成果

研究プロジェクトの研究面について簡単に紹介します。以下のとおり、さまざまな技術的観点からの検討を行いました[3]。

①HHEG の研究開発：HHEG の運転性能評価、熱流動特性評価、電気化学特性評価、トライボロジー特性評価を行いました。運転性能評価においては、まず HHEG 実証機の研究計測システムを構築し、昇圧運転試験・水素供給運転試験・降圧運転試験を実施して、装置各部位での圧力、純水量、温度、水素ガス発生量、電力等のデータを取得し、実証機が基本的な能力 (40MPa, 30Nm³/h) を有すること確認しました。電気化学特性評価においては、小型のモデルセルを使用して、加圧によるナフィオン膜の伝導度、エネルギー効率などへの影響について知見を得ました。熱流動特性評価においては、水電解に関わる熱流動問題の理論解析として、水電解セル熱流動解析プログラムを開発し、セル内の水素、酸素、水、蒸気の流量や温度分布を模擬することができました。トライボロジー特性評価においては、流量調節弁で使用される摺動材料ステライトの水素中での摩擦摩耗についての知見を得ました。

②HHEG・自然エネルギーのマッチングに関する研究開発：風力発電設備単体評価と HHEG 電力変動評価を行いました。風力発電設備単体評価においては、2 種類の風レンズマイクロ風車を開発し、それぞれの発電性能試験を風洞、ならびに野外で行いました。電力変動評価においては、HHEG 実証機の運転時に収集されたデータを用いて、水素製造のモデリングを実施するとともに、風力発電

設備で得られたデータから風レンズ風車の発電量の短期変動と長期変動を算出し、風力発電と HHEG のマッチングの可能性を検討しました。

③水素ステーション・システムに関する研究開発：水素ステーションの材料強度・耐久性評価、効率評価、事業性評価、安全性評価を実施しました。材料強度・耐久性評価においては、水素ステーションで使用される鉄鋼材料の疲労強度特性を明らかにし、蓄圧器、及び金属ベローズの強度評価を行いました。効率評価においては、水素発生量や設備消費電力を計測し水素ステーションのプラント効率を試算しました。事業性評価においては、高圧水電解水素ステーションについて、環境特性と経済性の面から事業性を検討しました。安全性評価においては、運転者教育に着目し、運転マニュアルの検討と運転シミュレータの作成を行いました。

3. 事故と事故調査

3.1 事故の発生

図 3 に水素ステーション実証試験設備の大まかな構成を平面図で示します。HHEG が据え付けられた部屋は高圧ガスを製造するため隔壁で囲まれ、その西側と北側に周辺機器が設置されています。HHEG が発生した水素ガスは蓄圧器に蓄えられます。ディスペンサーは蓄圧器に貯蔵した水素ガスを燃料電池自動車に充填する設備です。HHEG は全自動で動く装置であり、運転中は HHEG 室は立ち入り禁止としていました。

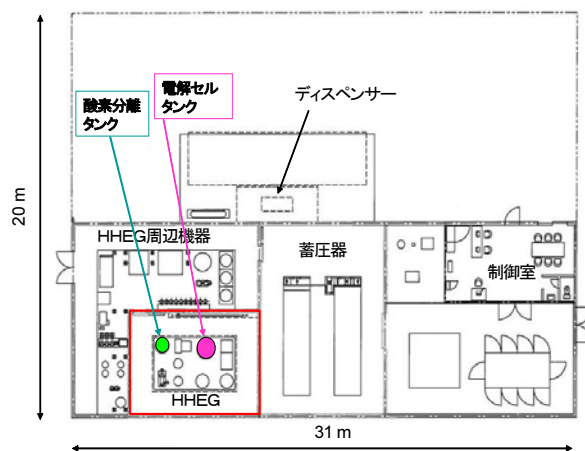


図 3 水素ステーションの配置 [5]



図4 事故直後の水素ステーション（南側より撮影）：白煙と黒煙がみえる [4]

2005年11月14日に高圧ガス製造施設の完成検査合格証を受けた後、翌15日から製造メーカーによるHHEGの試運転が開始しました。試運転では、各機器の作動を確認しながら徐々に水素圧力を上げ、40MPaの水素の発生が確認できました。そして、12月7日、HHEGから蓄圧器への水素供給テストを行っている最中、午後1時22分に突然事故が発生しました。

大きな爆発音とともに、酸素分離タンク出口側の酸素放出ラインの配管が破裂し、圧力計などの機器が破壊しHHEG室内に飛散するとともに、破損箇所とガス放散ベントからガスと水が噴出しました（図1, 4, 5, 6参照）。この水と若干数のガラス小片がステーション外部10m以内の範囲にも飛散し、水には腐食性の物質が含まれていたため、水の飛沫によって周辺の駐車車両5台の窓ガラスないしボンネットに微小腐食痕を生じました。幸い、周辺に歩行者がいなかったため人的被害はありませんでした[4]。

学内にいたプロジェクト関係者、事務職員、また通報により消防署、警察署、報道関係の方々がすぐさま駆けつけ、学生や職員なども周囲に集まり、現場は騒然となりました。試運転の関係者は何が起こったのか直ちには把握できませんでした。関係者は落胆する余裕すらなく、その日の晩から原因究明を開始しました。

3.2 事故原因の調査

未来のエネルギーとして期待されている水素エネルギーの研究において、事故を起こした責任を大学は重く受けとめ、事故の原因を究明すると



図5 酸素配管の事故前（上）と事故後（下）の状況 [4]



図6 HHEG室内に飛散した圧力計（中央）と配管（右上） [4]

もに、事故の再発防止に向けて万全な対策を講じるべく、学内に「事故調査委員会」及び外部の中立的立場から事故原因究明に係わる作業・内容を評価する組織として「外部評価委員会」を設置の上、調査に取り組みました。事故調査委員会は、

大学から材料強度、熱流体工学、燃焼、燃料電池、電気化学、安全工学、材料科学などの専門家と、関係企業の技術者、爆発安全研究の専門家に加わっていただきました。調査は一年余りにわたって続けられ、福岡県工業保安課をはじめ関連省庁に調査結果を報告するとともに、報道機関や地域住民説明会、学内会議を通じて調査内容を公表しました。最終的な調査結果は2007年3月30日付「九州大学水素ステーション事故調査報告書（第3報）」にとりまとめました[5]。

事故原因調査は主に以下の技術的調査項目について行いました。

- (1) HHEG 記録データ、監視ビデオ記録の分析
- (2) 配管、機器、残留物の調査と化学分析
- (3) 材料強度に関する検討
- (4) 熱流体関係の検討
- (5) 電解セルの調査

3.3 事故過程の概要

上記の分析を総合して、事故の過程は概ね次のように推定されました。以下は報告書[5]からの抜粋です。

(1) 事故は、13時22分36秒頃から電解セルの異常により高温高圧が発生して安全弁が作動した過程（第一段階）と、これに伴って発生した高温高圧と物質移動（配管を通じた水、ガス、異物の移動）によって最終的に13時23分18秒に酸素側配管で燃焼と破裂が起こった過程（第二段階）に分けて整理できる。

(2) 電解セルタンク内において、電解セルはほぼ全焼し、電極のチタンの大半は反応した（図7）。



図7 電解セルの破損状態 [5]

この反応開始の引き金となった直接的原因は、セル内のある一部における、40MPaの高圧下におけるチタン電極の発熱反応と、酸素と水素の混合気の発熱反応のいずれかであった可能性が高い。チタン電極の反応は、高圧酸素、フッ素、水との反応の可能性が考えられ、酸素と水素の混合気が生じた原因は、陽極側と陰極側の間の数十kPa程度の差圧によって、陽極側の循環水中に存在した酸素気泡がMEAないしはシール部のなんらかの欠陥を通して陰極側に漏洩したことが最も可能性が高い。MEAのピンホールを通して陰極側に移動した場合、酸素を生じる陽極がMEAの下側に配置されていることにより漏洩を助長したとも考えられる。

(3) 電解セルの一部で異常反応が開始した後、圧力の異常が検知され電流が停止されたが、電解を停止した後も反応は続いた。

(4) 電解セルの異常反応によって、高温、高圧が発生し、水素配管、酸素配管において安全弁が作動した。これにより圧力は一旦降下したが、電解セルの反応が続いたため再び系全体の圧力が上昇した。一方、電解セル異常が生じた直後から、反応生成物と電解セルの破壊で生じた破片、及び水素が循環水に運ばれ酸素分離タンクに達し、さらに安全弁に至る酸素配管にまで到達した。これらが酸素雰囲気中で燃焼することにより局所的な過大圧力を発生し、さらには圧力波が、先端が閉じた配管内に伝わり急激な圧縮を生じて局所的な過大圧力を発生し、酸素配管の延性破壊をもたらした。

(5) HHEGは電解セル内の差圧を一定範囲内に制御する機能をもつが、急激な圧力上昇を避けられなかったことにも今回の配管の破壊の原因の一端があった。循環水配管には圧力の解放機構がなく、水素ガスと酸素ガス配管の安全弁は圧力が降下したため一旦閉止したと推定され、その後も引き続き電解セルの異常反応が継続したために、再度圧力上昇が起った。

(6) 配管破裂によって、循環水とともに電解セルの反応生成物が配管外に噴出した。電解セルで生じた生成物には、固体としてはチタンの化合物と炭化物、液体には腐食性のあるフッ化水素酸、スルホン酸イオンなどと、鉄などの高压容器の構成元素が含まれていた。

(7) 試運転を開始してから前日まで、及び事故当日に電解セルの異常反応が発生する直前まで、HHEG の異常現象は認められなかった。

以上の調査から、事故の過程は明らかにされましたが、電解セル異常反応の発生原因を完全に特定するには至らず、異常につながる可能性のあるいくつかの項目についての課題が浮き彫りになりました。MEA やシール材料など材料に関連する事柄や、気液流れなど、いずれも 40MPa の高圧下という条件における物質の振る舞いの理解のうえにたって究明されるべきものですが、そのための文献情報が現時点で存在しません。そのため九州大学では、高圧下での電解セル構成部材の反応、電解セル内の流動、高圧下での水素の基礎物性などについて、基礎研究に取り組んでいます。

3.4 管理運営の課題

技術的な調査に加えて、管理運営に関する調査を行いました。これは、その根底にある安全管理上の問題を明らかにすることで、再発防止と、キャンパス全体の事故防止体制の一層の向上に資するためです。

まず、しばしば指摘されるように、新技術の開発においては関係者間の十分な情報共有がなされていないことが事故につながるものが挙げられます。また、未知の世界にいどむ新規技術開発においては危険はつきものとは言え、十分な安全検証を行い、段階を踏んで実設備とすべきであったことが指摘されました。

設備の管理運営は企業主導で実施されていましたが、当事者である大学によるリスクアセスメント、安全管理体制、災害時の対応などが不足していました。特に、大学の安全管理体制は民間企業に比べて必ずしも十分とは言えず、大学の特殊性

を考慮にいれて体制を構築していく必要があることが明らかになりました。このような、安全に対する取組みについての教訓は、その後の伊都キャンパスにおける安全管理体制構築と実践の引き金となりました。

4. おわりに

技術的観点から、HHEG の早期復旧は断念することになりました。しかし、キャンパスの水素ステーションの設備を有効に活かして将来につなげるべく、現在、新規課題を設定し安全な運転をめざした再開計画が進められています。以上述べた大学キャンパスでの経験が、未来のエネルギー技術の発展のために少しでも役立つことを願っています。

参考文献

- [1] 21世紀COEプログラム 水素利用機械システムの統合技術 最終成果報告書, 九州大学 (2008).
- [2] 水の電気分解のみで高圧の水素を発生 三菱商事が電解装置を開発, 日経ものづくり, 2004.6, 日経 BP 社 (2004) 83.
- [3] 平成 17 年度地域新生コンソーシアム研究開発事業「コンプレッサーレスの高圧水電解水素ステーションの開発」成果報告書, 委託者:九州経済産業局 (2006).
- [4] 杉村丈一, 事故の概要—第 2 版— (平成 17 年 12 月 26 日), 九州大学ホームページ(2005).
- [5] 九州大学水素ステーション事故調査委員会, 事故調査報告書(第 3 報)2007 年 3 月 30 日, (2007). (要約版は九州大学ホームページに掲載)

放熱性鋼板「コーベホーネツ®」の開発 Development of "KOBHONETSU" Heat Releasing Steel Sheet

高橋 和雄 (神戸製鋼)
Kazuo Takahashi (Kobe Steel Ltd.)

1. はじめに

近年、データストレージデバイス、ディスプレイ等の電子機器や、家電製品の高性能化に伴って、IC や半導体などの発熱量が大きくなる傾向にあり、ひいてはこれらの電子・電気機器に用いられる精密部品の耐熱性、寿命が問題になりつつある。この発熱量の増加に対応するために、ファンによる強制排熱、装置そのものに穴をあけ内部の熱を自然放散するなどの対策が実施されているが、加工費の増加、気密性や電磁波シールド性の不足などの問題が生じている。

このような熱問題への対策として、電子機器や家電製品の筐体に用いられている薄鋼板に表面処理をほどこすことにより、筐体内部の熱を効率的に放散させる「コーベホーネツ®」(以後 放熱性鋼板と言う。)を開発した。

2. 放熱性鋼板の考え方

熱が伝わるメカニズムには熱伝導、対流伝熱、熱放射の3つがあることが知られている。放熱性鋼板はこのうち熱放射による放熱を促進するために開発された。図1に示した簡易モデルに基づいて、放熱性鋼板の効果の概要を説明する^[1]。熱放射で伝わる熱量を、図1のように半円筒状で、内側から発熱体、筐体材料、外部空間の順番で配置されているモデルを用いて考える。

発熱体の放熱面を①、筐体材料の内面を②、外面を③、外部空間面を④とする。また、それぞれの面の面積を A_1, A_2, A_3, A_4 、表面温度を T_1, T_2, T_3, T_4 、放射率を $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_4$ とする。熱伝導と対流による伝熱を無視すると、発熱体から筐体への放射熱 Q_{12} は、

$$Q_{12} = \frac{A_1 \sigma (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{A_1}{A_2} \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)} \quad (1)$$

となる。また、筐体から外部空間への放射熱 Q_{34} は、

$$Q_{34} = \frac{A_3 \sigma (T_3^4 - T_4^4)}{\frac{1}{\varepsilon_3} + \frac{A_3}{A_4} \left(\frac{1}{\varepsilon_4} - 1 \right)} \quad (2)$$

と表わすことができる。ここで σ はステファンボルツマン定数である。式(1), (2)より、熱放射で伝わる熱量を大きくするためには、筐体面の放射率を大きくすればよいことがわかる。

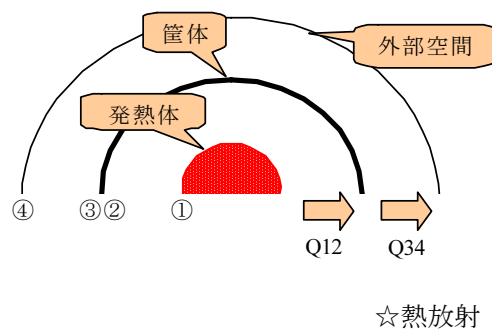


図1 筐体の熱放射モデル

式(2)を用いて、筐体から外部空間への放射熱 Q_{34} を見積もる。計算を簡単にするために外部空間が非常に十分に大きい、すなわち $A_4 = \infty$ とすると、単位面積当たりの放熱量 Q_{34}/A_3 は、

$$Q_{34}/A_3 = \varepsilon_3 \sigma (T_3^4 - T_4^4) \quad (3)$$

となる。この式から筐体温度と外部空間の温度に変化がなければ、放熱量は放射率に比例する、すなわち筐体材料の放射率が高くなると放熱量が増加することがわかる。ところが、表 1 に示すように筐体材料として使われる金属材料の放射率^[1]は一般に小さい値である。また、電子機器の筐体によく使われている亜鉛めっき鋼板の放射率も小さい。これらのことから筐体材料による熱放射は機器内部の放熱に活用されていないことが推定される。

表 1 各種金属材料の放射率

材料	放射率
軟鋼	0.05
ステンレス	0.10
アルミニウム	0.03
銅	0.03
亜鉛めっき鋼板* (耐指紋処理)	0.12

*波長範囲 4.5～15.4 μm の平均値

筐体材料の放射率の違いによる放熱量の変化を見積もるために、 $T_3 = 323 \text{ K}$ (50 $^{\circ}\text{C}$)、 $T_4 = 300 \text{ K}$ (23 $^{\circ}\text{C}$) を仮定し、放射率が 0.12 と 0.8 の筐体材料を用いた場合の伝熱量を、式(3)を用いて計算した。前者の場合は 19 W/m^2 、後者の場合は 126 W/m^2 となった。このことから、筐体に電気亜鉛めっき鋼板が使われている電子機器において、筐体材料が放射率 0.8 程度の材料に置き換えることで、放熱量を大きく増加させることが期待できる。放熱性鋼板は、このような考えに基づき、高い放射率を鋼板に持たせることで熱放射による放熱量を増やすことに着目した鋼板である。

3. 放熱性鋼板の構造と工夫点

図 2 に放射率を高める処理をほどこした放熱性鋼板の構造を示す。まず、鋼板の表面に亜鉛めっきをほどこし、必要な耐食性を持たせている。さらに、亜鉛めっきと放熱性皮膜との接着性を持たせるための下地処理をほどこし、最表面に放熱性の皮膜を処理している。また、放熱性皮膜は鋼板の表裏両面に処理されているのが好ましい。これは、式(1)および(2)における ϵ_2 、 ϵ_3 の両方を大きくすることに相当し、内部の熱を効率よく吸収して、外部に放出できるようになる。放熱性鋼板では、

このような表面処理により、表裏両面の放射率を 0.86 としている。

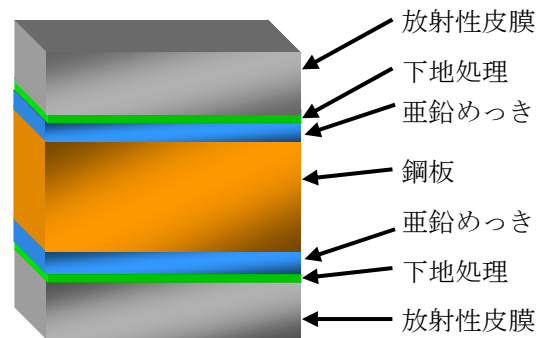


図 2 放熱性鋼板の断面構造

放熱性皮膜には、熱放射に寄与する物質とその物質を固定する材料等の添加剤が必要であり、独自に物質の選定を行っている。また、電子機器や家電製品の筐体として問題となる製品加工時の剥がれやクラックを防止するために、表面処理技術によって加工性を高める工夫を行っている。

4. 放熱特性の評価とその工夫

機器筐体の放熱性を向上させることにより、機器内部空間の温度を低下させ記憶媒体や熱に弱い部品を保護すること、あるいは IC などの発熱体自体の温度上昇を抑えることによる安定動作や部品保護が期待される。開発した放熱性鋼板は、前例のない鋼板であるだけに、各種の電子機器の熱対策要求に応じるために、放熱性鋼板に様々な熱発生状況、熱源の配置において放熱性向上の効果を実証していかなければならなかった。これまで様々な実証試験を行い放熱性向上の効果を確認してきた。ここでは、これまでに行ってきた実証試験の事例を示す。

まず、機器内部空間の温度が、筐体材料の放熱性を向上させることによりどの程度低下させることができるかを評価した結果について紹介する。

図 3 に評価装置の概略図を示す。熱源には、長さ 130 mm、幅 100 mm の熱板を 120 $^{\circ}\text{C}$ の一定温度になるようにコントロールしたものをを用いた。側面の壁は断熱材にして、評価する筐体材料サンプルを上蓋となるように置いている。熱源から、高さ 100 mm のところの温度を、 T_1 として、この温度で材料の放熱性の効果を評価した^[2]。

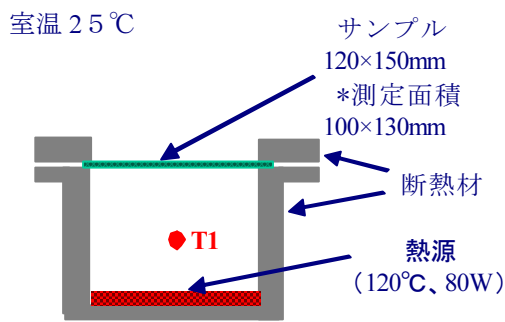


図3 放熱性評価装置概略図

なお、 T_1 の温度を測るセンサーは、熱源からの熱輻射に直接曝されないようにした。評価した筐体材料は、1) 放熱性鋼板「コーベホーネツ®」(放射率：0.86)，2) アルミ板 (放射率：0.03)，3) 耐指紋性亜鉛めっき鋼板 (放射率：0.12) である。板厚はすべて 0.6 mm である。なお、板厚の影響を調べるために、放熱性鋼板のみ、厚さが 1.2 mm のものも評価した。

図4に、熱源のヒーターをオンにしてからの時間を横軸にとり、縦軸には装置内部中央の温度 T_1 をとった結果を示す。放熱性鋼板 (厚さ 0.6 mm) を用いることにより、アルミや耐指紋性亜鉛めっき鋼板に比べて、約 5 °C 内部温度が低くなることを示された。厚さ 1.2 mm の放熱性鋼板では、立ち上がりの初期は、熱容量が大きいのでわずかに温度が低くなっているが、時間の経過とともに、内部温度は 0.6 mm 厚の放熱性鋼板に等しくなった。放熱性が表面によって決まる特性であることを示す一つのデータともなっており、筐体剛性などの他の必要性能から板厚を選ぶことが可能であることを示している。熱源温度を 100 °C あるいは 140 °C としても、電気亜鉛めっき鋼板にくらべて内部温度が下がることも示された (表2)。試験は 25 °C に保った室内でおこなわれており、熱源温度が高くなり、機器内部温度と室温との差が大きくなるほど、放熱性鋼板による温度降下は大きくなっている。

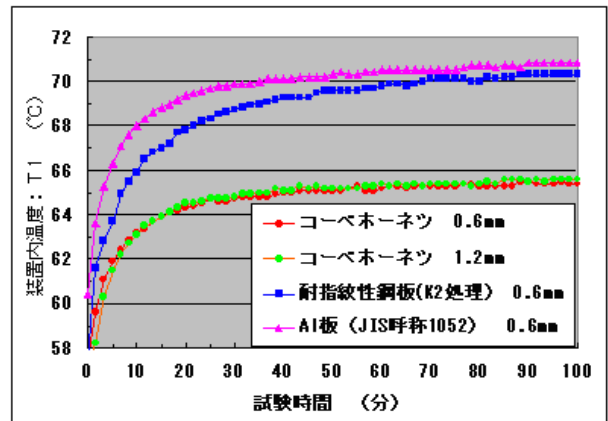


図4 放熱性評価結果

表2 内部熱源温度が異なる場合の放熱性鋼板による温度

サンプル	100 °C		120 °C		140 °C	
	装置内温度	ΔT	装置内温度	ΔT	装置内温度	ΔT
放熱性鋼板	56.3	-3.8	65.4	-4.9	74.6	-6.3
電気亜鉛めっき鋼板	60.1	—	70.3	—	80.9	—

一方、近年の、電子機器の高い発熱により、鋼板の放熱板としての性能要求も多い。



写真1 放熱性鋼板の放熱板としての性能確認

そこで、写真1の様な放熱板としての使用を想定した実験モデルを製作して亜鉛めっき鋼板と放

熱性鋼板の性能比較を行っている^[1]。ここでは入力熱量を 9.2 W で一定としている。この評価では、発熱体からの熱は熱伝導によって鋼板に到達し、鋼板表面から熱放射及び対流によって放射されている。試験の結果、放熱性鋼板の表面温度は、亜鉛めっき鋼板と比較して 14 °C 低下することが確認されており、筐体に直接装着された発熱部品の温度低下への活用も可能であることが示された。

それ以外の事例において、放熱性鋼板の特性を引き出す技術的検討を進めており、放熱性鋼板の様々な放熱対策への適用を実証してきている。このように、放熱性鋼板を開発した後で、電子機器等の適用先への放熱性効果の実証とその条件の抽出に工夫と検討を行っており、その活動は現在も継続中である。

5. 応用上の諸特性

放熱性鋼板を電子機器等の筐体として適用するにあたっては種々の特性が必要となる。すなわち、高い放熱性に加えて、(1)導電性を有しアースがとれること、(2)加工性に優れ、保護フィルムなしで曲げ・絞り・張出し加工等が可能であること、(3)環境負荷を考慮した材料組成であること、(4)意匠性を有すること、などが求められる場合が多く、このような実用特性を有するような表面皮膜設計がなされていることが重要となる。図 5 に、放熱性鋼板の応用特性および加工例を示す。電子機器筐体として十分な性能を有しているといえる。

耐食性 (5%白錆発生)	S S T 120 hr 以上
導電性 (4 針法)	0.01~0.1 mΩ
加工性 (板厚 0.6 t)	0.5 R 90° 曲げ可能

図 5 応用特性と加工例

6. まとめ

放熱性鋼板はその高い熱放射性能により、電気・電子機器の内部発生熱を効率よく放散させることが可能である。耐食性、加工性、導電性等を持たせているので幅広い電子・電気機器に利用することができる。また、意匠性にも配慮して外装部品への応用も可能となっており、さらに環境負荷の低減を考慮したクロムフリー対応の鋼板としている。

これまでに放熱性鋼板が採用された例、あるいは現在採用が検討されているものに、DVD 機器のトップカバーや中板、カーナビのヘッドユニットの筐体、プラズマディスプレイのバックパネル、液晶のバックパネルなどがある。実機においても、従来使われてきた亜鉛めっき鋼板などに比べて 5 °C 前後の温度低下があることが認められており、ファンレス化が実現されたケースもある。

放熱性鋼板「コーベホーネツ®」を用いることにより、電子機器内の温度を下げるができるため、冷却ファンモーターの容量ダウンや冷却ファンレス、あるいは放熱フィンなどの省略等のコストダウンにも貢献でき、ひいては高速化、高機能化、小型化、あるいは省電力、低騒音等のニーズに対応できると期待している。

参考文献

- [1] 日本機械学会編,伝熱工学資料(改訂第4版),丸善(1986)
- [2] 平野康雄ほか,表面技術, Vol.54, No.5 (2003), p.20
- [3] 平野康雄ほか,R&D 神戸製鋼技報, Vol.55, No.2 (2005), p.42-p.45

きく 8 号搭載展開型ラジエータの軌道上運用と 1 年目の動作特性

*The First Annual Characteristics Test of Deployable Radiator (DPR)
of Kiku-VIII on Geo Stationary Orbit*

川崎春夫, 矢部高宏, 岡本篤, 金森康郎 (宇宙航空研究開発機構)

石川博章, 野村武秀 (三菱電機), 斎藤康之 (三菱電機エンジニアリング)

Haruo KAWASAKI, Takahiro YABE, Atsushi OKAMOTO and Yasuhiro KANAMORI(JAXA)

Hiroaki ISHIKAWA, Takehide NOMURA(MELCO), Yasuyuki SAITO (MEE)

e-mail: Kawasaki.haruo@jaxa.jp

1. はじめに

展開型ラジエータ (DPR) [1-5] は, 次世代人工衛星において, さらなる高密度高発熱化が予想され, 有効な放熱面を確保する手段として期待されている。

多くの人工衛星は, エネルギー源として, 地上から持っていく推進薬などを除くと, 太陽エネルギーであり, 太陽電池で電気エネルギーに変換して使用している。ここで得られた電気エネルギーを, 通信機器, 観測機器, 人工衛星の制御や保温などに用いる。また, これら電子機器が動作することにより発生する不要な熱は, 宇宙空間に放出する。

私たちの身の周りで使用する電子機器も発熱するが, 不要な熱は空气中に放出することができる。同様に人工衛星も外部に放熱をしなくてはならないが, 周囲環境が, 真空であるため, 対流による放熱は期待できない。このため人工衛星から宇宙空間に放熱するには, 輻射伝熱でラジエータから放熱するしかない。

また, 衛星内部も真空であるため, 排熱も対流などによる排熱が行えない。このため, 日本の現在の人工衛星は発熱機器からラジエータまで, 伝導やヒートパイプなどで熱輸送を行っている。人工衛星のヒートパイプを用いた熱輸送は, 日本国内では ETS-III で基礎的な実験が行われ, ETS-V で実用化され, 現在はほとんどの衛星で使用されている。現在は, 三次元的にヒートパイプを連結した衛星もあり進化しつづけている。

ここで, ラジエータの話に戻すが, ラジエータの放熱先の深宇宙の温度は約 4 K の低温であるため, 温度差が大きく放熱は容易かと誤解されやすい。地球周回する人工衛星の場合, 図 1 に示すように太陽光の影響を大きく受け, 低軌道になるとさらに地球からの赤外放射などの影響を受ける。これらの影響を小さくするようにラジエータ設計

をしなくてはならない。

ヒートパイプを使用した人工衛星の場合, 排熱できる面は, 人工衛星本体側面のラジエータ面のみだけである。かつ有効なラジエータ面は, 極力太陽光のあたらない面である。このためラジエータ面を設置できる面積は, 人工衛星のサイズの制約を受ける。また, この人工衛星のサイズは, 図 2 に示すロケットのフェアリングの大きさにも制約を受けるため, ラジエータの面積も制約を受ける。

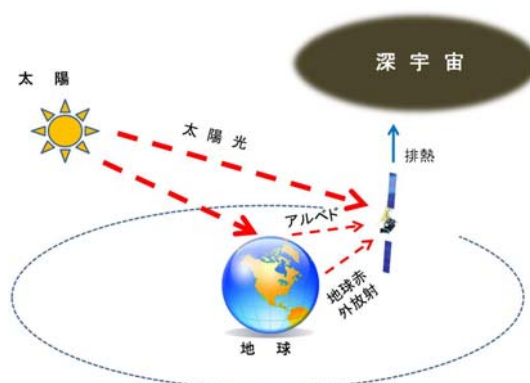
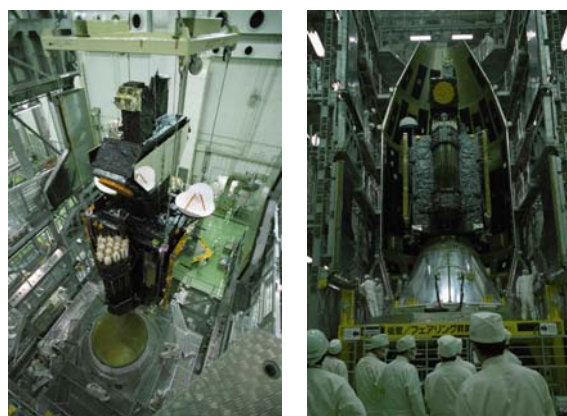


図 1 宇宙での人工衛星の環境と排熱



(a) 搭載状況

(b) フェアリング内部

図 2 人工衛星のロケット搭載状況

現在、衛星の開発は、高密度化の流れで進んでいる。衛星のサイズは変わらなくとも、衛星の発電量・排熱量が増加している。このような背景から、本体のみでは制約を受けるラジエータ面積を増やすことができる展開型ラジエータの開発が求められてきた。

ここで展開型のラジエータとした場合、どのように発熱部からラジエータ面に熱を輸送するかが、問題になる。展開させるためには、可動部が存在するため、冷媒の通る配管も可動できる構造でなくてはならない。このためには、ある程度の長さのあるフレキシブルチューブなどを用いて、可動できるようにすることが必要となる。通常のヒートパイプの場合、リジッドな棒状容器が用いられるため、展開型ラジエータの熱輸送に使用することは困難である。

一方、ループヒートパイプは、熱輸送距離を長くとれるため、展開ラジエータへの熱輸送に使用するには適している。その中でも 図3 に示すリザーバ内蔵タイプのループヒートパイプは、リザーバ外出タイプと比較して、起動しやすいなどの利点がある。

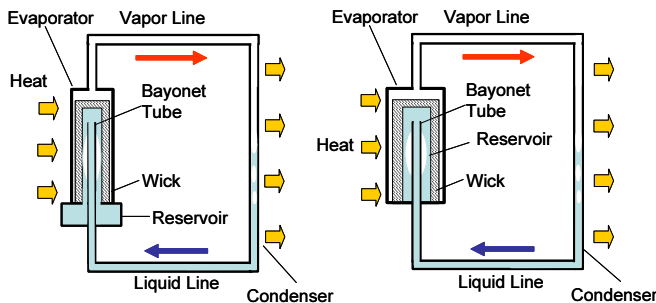


図3 ループヒートパイプ
(リザーバ外出タイプと内蔵タイプ)

表題の展開型ラジエータ (DPR) は図4 に示すように、2006年12月に打ち上げられた“きく8号(ETS-VIII)”に搭載されたリザーバ内蔵型ループヒートパイプを組み込んだ宇宙実証用の実験機器である。これまでに2007年からの定常運用開始から毎年、春夏秋冬の年4回の実験を行ってきた。

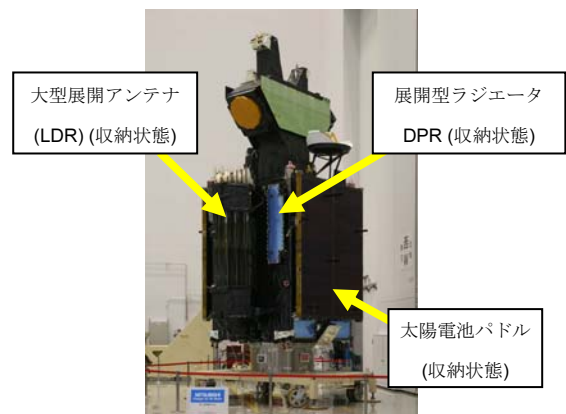
以下に、この展開ラジエータに用いられているループヒートパイプと静止衛星軌道上での実験について述べる。

2. 展開ラジエータとループヒートパイプ

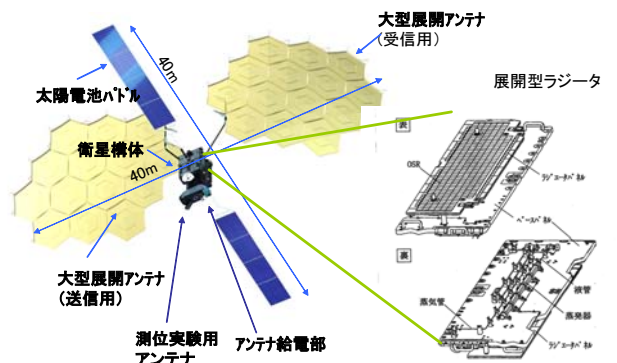
DPR はループヒートパイプ (LHP)、ベースパネル、ラジエータパネル、ラジエータ保持展開機構、センサ、ヒータなどから構成されている。ベースパネルは図5に示すように衛星西面の衛星構体に取り付けられている。



図4 きく8号のロケット搭載と打ち上げ



(a) 搭載位置



(b) きく8号と DPR

図5 展開型ラジエータ (DPR)と衛星搭載位置

ラジエータパネルは、ロケット搭載時には、ラジエータが閉じられた状態で搭載されているが、展開後は北面を指向するように取り付けられている。きく8号は静止軌道のため展開後は図6に示すように衛星本体とラジエータ位置、太陽の位置関係を示すことができる。春秋分期には、太陽光がラジエータの真横から入射する。このため、この時期は、太陽光がラジエータに入射する量が最も低くなる。また、夏至期は、太陽光が最もラジエータ面に入射する時期で、ラジエータ温度が高くなる。一方、冬至は、多層断熱材 (MLI) が取り付けられたラジエータ裏面から、太陽光が入射するため、夏至ほど温度が上昇しないが、春秋分期よりもラジエータ温度は高くなる。

一日の変化は、午前中は衛星本体 (構体) の影に隠れるため、温度は低くなる傾向があるが、一方、午後は温度が高くなる傾向がある。

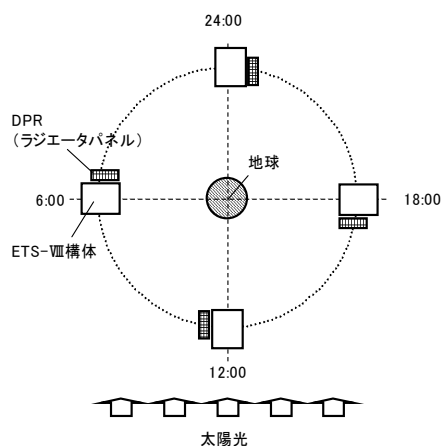


図6 軌道上でのラジエータ位置関係

次に、DPR に仕込まれているループヒートパイプについて簡単に説明をする。

LHP は、図3に示すように蒸発器、蒸気管、凝縮器、液管から構成されている。蒸発器はベースパネルに取り付けられており、実験用ヒータ (0W-400W) で加熱できるようにしてある。また、蒸発器は、多層断熱材などでベースパネルおよび衛星構体から断熱している。

凝縮器は、長さ約 1.8m、幅約 0.5m のハニカムパネルに埋め込まれている。このハニカムパネルは、アルミニウム製のハニカムコアに、表皮に

高熱伝導ピッチ系炭素繊維強化プラスチック (CFRP) [6] が使用されている。衛星に用いられるヒートパイプ埋め込み型のラジエータパネルの多くは、アルミニウム表皮を用いるが、軽量、薄型化のために DPR のラジエータパネル表皮に CFRP を使用している。

ラジエータ表側の CFRP 外表面には、太陽光からの入射光の影響を抑え、放熱能力を維持するために OSR (Optical Solar Reflector) が貼り付けられている。

蒸発器と凝縮器は、それぞれ 3 m の管で結ばれており、1 つのループを形成している。なお管の一部は、ラジエータパネルを展開させるために、フレキシブル構造となっている。

蒸発器は、既に報告[2]されているように、気孔径 1 μm の SUS 製孔質材でできた一体型のウイックが組み込まれている。リザーバは、ウイックの中心部の空間を占めている。

使用冷媒は、宇宙用のヒートパイプの冷媒としても多く使用されているアンモニアを用いた。

3. 軌道上実験計画と動作実験

長期の実験スケジュールは、大きく分けて3つのフェイズから成っている。打ち上げから定常運用までのチェックアウトフェイズ、その後の 2007 年 4 月の定常運用開始から 1 年目の動作実験フェイズ、そして定常運用 2 年目からの長期運用実験フェイズである。ここでは寿命評価に関する実験などを行う。

本稿では動作実験フェイズについて述べる。動作実験では外部熱入力の季節変動を考慮し、春夏秋冬の 4 回とその直後の 1 ヶ月間動作させる実験を行った。

春秋分期、夏至冬至期に行われる実験は、以下に示す特性実験と一ヶ月連続実験から成り立っている。

(1) 特性実験

- ①ラジエータパネル排熱特性実験: ラジエータパネル実験ヒータに一定の熱入力を行い、ラジエータパネルの温度変化および温度分布を計測する実験。
- ②負荷変動実験: 蒸発器の熱負荷を変化させて、熱輸送量変化などの特性確認する実験。

- ③最大熱輸送実験：最大熱輸送量（300W）でのオン／オフ連続実験.
- ④起動特性実験：蒸発器に 50W 以上の所定の熱を加え，起動特性を計測する実験.
- ⑤蒸発器部分加熱実験：蒸発器のヒータ加熱位置を変更し，動作特性を計測する実験.

(2) 1ヶ月連続実験：1ヶ月間連続して蒸発器に300Wの一定熱入力を行い，性能変化を観察する実験.

4. 動作特性実験結果

動作実験の代表データとして春分，夏至，秋分における 300W 起動特性の結果を図 8 に示す。蒸発器の熱負荷が無い初期状態(0W)では，蒸発器と凝縮器の温度は大きく離れているが，熱負荷が加わると内部の冷媒が循環し，蒸発器と凝縮器温度がほぼ等しくなる。熱負荷を加えて 4 時間程度で平衡状態に達している。また図 8 で示されたとおり，外部熱環境が同じである春分，秋分期の起動特性の結果は，同一であり，平衡温度も等しく，半年間で性能の変化は見られていない。夏至期の結果は，ラジエータ面に太陽光が入射するため，起動前後で蒸発器およびラジエータの温度が高くなっていることがわかる。

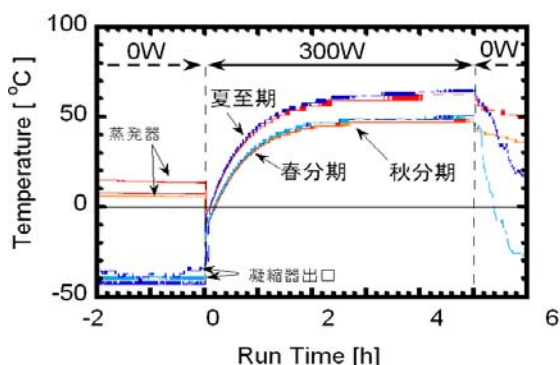


図 8 春分，夏至，秋分期の 300W 投入時の起動特性

熱負荷 300W を加えた秋分期の一ヶ月連続実験の中で，ある 1 日の蒸発器および凝縮器出口部の温度変化を図 9 に示した。また図 9 には同時に，熱負荷が無い状態 (0W) での温度変化も示した。熱負荷 300W の場合，時刻 0 時から 11 時まで蒸発

器および凝縮器温度は 50°C 程度と安定している。11 時を経過すると 18 時から 19 時の間をピークに温度が上昇する。これは，DPR が取り付けられている人工衛星からの反射光などの影響と考えることができる。ここで熱負荷が無い状態でも，凝縮器の温度変化を見ると，18 時から 19 時の間をピークに温度が高くなっていることが分かる。このことから午後計測結果は反射光の影響を受けていることを示している。

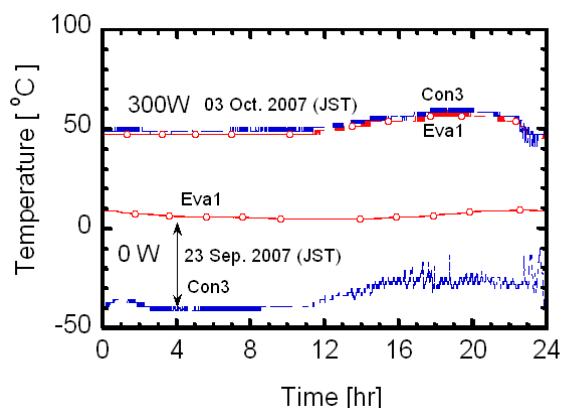


図 9 秋分期の 1 日の温度変化 (0 W) と 300W 投入時の温度変化

また，熱負荷の有無にかかわらず，0 時前後で，凝縮器温度が下がっているのは，人工衛星が地球の影（食）となるためである。これら図 9 に示す結果より熱負荷がある場合は，外部環境温度が変化すると，蒸発器温度も変化するが，熱負荷が無い場合は，蒸発器は外部環境温度に左右されにくいことを示している。

運用 1 年目の秋分期一ヶ月連続実験中の 744 時間の蒸発器および凝縮器の温度変化を図 10 に示した。温度が 24 時間周期で振動しているのは，前述の図 9 の説明で述べた 1 日の外部環境の変化によって引き起こされるものである。また時間の経過によって温度の振れ幅が変化するが，これは食期間の変化によるものである。このような温度変化はあるが，特別な操作を加えることなく DPR は 300 W の排熱が可能であることを確認できた。また夏至期，冬至期も温度レベルは異なるが，ほぼ同様な安定した動きであることがわかった。

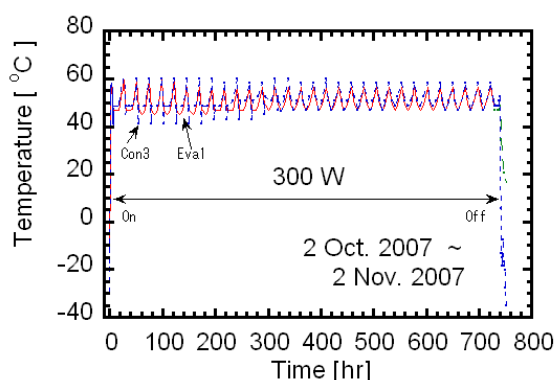


図 10 秋分期一ヶ月連続実験における温度変化 (Eva1:蒸発器温度, Con3: 蒸発器出口温度)

5. まとめと今後

打ち上げから約 2 年間の実験を行い、以下の結果を得た。

- ① リザーバ内蔵型ループヒートパイプの軌道上 400 日以上安定運転を確認できた。ループヒートパイプを含む二相流体ループは、これまで本 DPR を含め軌道上実験は国内では数少ない。この中で、軌道上の実証期間が長く、実用化に近づくことができた。
- ② 実験 1 年目に定格負荷 300 W での一ヶ月連続実験を 3 回を行い、DPR で採用している内蔵型ループヒートパイプの長時間の動作安定性を実証することができた。
- ③ 打ち上げから約 2 年間での DPR の性能劣化はほとんど見られなかった。今後も、性能変化

を観察するために軌道上データを取得し、評価を行う。

参考文献

- [1] 川崎春夫, 野田浩幸, 矢部高宏, 石川博章, 野村武秀, 斎藤康之, “ETS-VIII 搭載展開型ラジエータの軌道上熱特性”, 第 51 回宇宙科学技術連合講演会, 2JC13 (2007).
- [2] 石川博章, 大串哲郎, 野村武秀, 野田浩幸, 川崎春夫, 矢部高宏, 金森康郎, “きく 8 号展開型ラジエータの軌道上熱特性”, 第 45 回日本伝熱シンポジウム講演論文集, (2008-5).
- [3] 大串哲郎, 矢尾彰, Jason Xu, 増本博光, 川路正裕, 宇宙用フレキシブルループ形ヒートパイプの研究, 日本機械学会論文集 B 編, 66 (2000), 1488-1493.
- [4] 野田浩幸, “ETS-VIII 展開ラジエータの開発概要”, 日本航空宇宙学会誌, Vol55 (No636), (2007), 16-19.
- [5] 野田浩幸, 川崎春夫, 矢部高宏, 岡本篤ほか, “技術試験衛星 VIII 型搭載展開ラジエータの開発 (開発状況)”, 第 49 回宇宙科学技術連合講演会, 3C01 (2005), 1176-1181.
- [6] Tsuyoshi.Ozaki, Akira Yao, Yoshiyuki Ohkawa, Hiromi Seko, Akio Tsujihata, Hiroyuki Noda, “Graphite Faceskin Deployable Radiator Panels For ETS-VIII Structures”, 51th Int. Astronautical.

耐熱光ファイバ

Heat-resistant Glass Optical Fiber

村上 泰 (信州大学)

Yasushi MURAKAMI (Shinshu University)

e-mail: yasmura@shinshu-u.ac.jp

1. はじめに

文部科学省では、知的クラスターを創成し、地域経済の活性化を図ることを目的として、平成14年度から「知的クラスター創成事業」を実施しています。長野・上田地域でも、長野県テクノ財団のイニシアティブの下で、信州大学が有する独自の技術シーズと地域内外の企業の実用化ニーズを融合して技術革新を起こし、新産業を創出しようとする試みが始まりました。第Ⅰ期5年間の後、平成19年度からは第Ⅱ期として、長野全域に展開しています。

耐熱光ファイバは、知的クラスター創成事業の中で開発されました。知的クラスター創成事業に参画していた地域の企業と話を交わす中で、光ファイバを取り扱っていることを知り思いついたものであり、最初から意図して産学連携が図られたものではありません。

耐熱光ファイバの被覆材に用いたシリカマイクロ多孔膜は、有機ELの周辺部材である低屈折膜として開発されたものであり、耐熱に有望な材料だとは意識していませんでした。細孔が存在していればガラスに発生しやすいクラックが抑えられるのではという仮説で始めたのです。シリカという材質を生かすために耐熱という観点で研究をした結果、シリカマイクロ多孔膜は、細孔が小さい方が高温で安定である点と、多孔体であるので材料を接合する際に生じる熱膨張の差が緩和される点の両面で優れていることが明らかになりました。

耐熱光ファイバを開発した以降、光ファイバの被覆材として用いることができるのであれば、導線の被覆材としても用いることができると考えました。導線の被覆材には耐熱だけでなく絶縁が求められるため、厚膜であることが不可欠です。ゾルゲル法で作製するシリカマイクロ多孔膜は薄膜としては優れているものの、分子から組み上げるので厚膜にまではなりにくく絶縁材には向かなか

ったのです。厚膜にするためには、薄膜材料をつなぎ材として粒子と組み合わせることが有効です。粒子にはセラミックスを用いるのが一般的です。セラミックスは絶縁性を有するとともに、赤外線や遠赤外線を放射することで遠隔地に放熱できるという利点もっています。アルミナのように熱伝導性のよいものもあります。厚膜にするためにセラミック粒子を加えることで、放熱という要素も加わることになりました。

本稿では、耐熱という観点で耐熱光ファイバの被覆材として用いたシリカマイクロ孔膜を紹介するとともに、セラミック粒子を加えた厚膜化に関する展望について紹介します。

2. 耐熱光ファイバ

2.1 光ファイバ被覆材

光ファイバはブロードバンドサービスの提供に適した伝送媒体として用いられています。光ファイバは、伝送損失を下げる必要があるため、最大の透明度が得られるように高純度の石英ガラスが用いられています。他の物体等と接触して傷がついた場合には、光ファイバの機械的な力に対する耐性が著しく劣化します。このため、通常は光ファイバの周囲に適当な厚さの被覆を施し、光ファイバを保護しています。

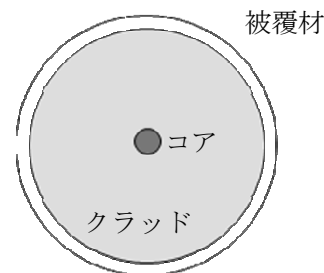


図1 光ファイバの構造

被覆材にはポリマーが用いられており、比較的耐熱性があるポリアミド樹脂を用いたものでも300℃までしか耐えられません。さらに耐熱性が高いものには、金を被覆したものがあり、600℃までは耐えられます。

光ファイバそのものは1000℃までの耐熱性を有しています。光が通るコアには、まわりよりも屈折率を高める必要があり、ゲルマニウムを添加しています。ゲルマニウムの拡散を考えても、800℃までは耐えられます。したがって、被覆材の耐熱性が高まれば、光ファイバの耐熱性が高まることとなります。

光ファイバは、温度、圧力、歪等を光で検出するセンサに利用されます。高温炉、熱処理装置、石油プラント施設、トンネル火災防止、原子炉関係、発電所、ジェットエンジン等、高温環境下における用途は数多く考えられ、耐熱光ファイバが有効に機能すると期待できます。

2.2 シリカマイクロ多孔膜

我々は、ゾルゲル法によるシリカマイクロ多孔体の合成について研究していました[1]。マイクロ多孔体とは、細孔径が2 nm以下のマイクロ孔のみからなる多孔体を意味します。Si(OCH₃)₄を原料に用いた場合、H₂Oの量が極少量の場合にシリカマイクロ多孔体ができることを見出したのです。ところがH₂Oの量が極少量ではSi(OCH₃)₄がすべて反応するのに必要なH₂Oの量に届かず、得られるシリカの収率が低いという致命的な欠点がありました。さらに多孔体は粒子として得られたため膜化できませんでした。

この問題を解決したのは、ヒドロキシアセトンという触媒です。ヒドロキシアセトンを触媒とすることで、H₂Oの量が十分に多くてもシリカマイクロ多孔体を得られるようになりました。さらに、ゾルとして得られるようになり膜化も可能になりました[2]。この膜は、超親水性を示すことを見出しています[3]

シリカマイクロ多孔膜ができるようになったときに、耐熱光ファイバの課題に出会ったのです。2 nm以下のマイクロ細孔を無数に内包したシリカマイクロ多孔膜が割れを防止できるという仮説のもとに、光ファイバ表面へのコーティングを試みました。狙い通りシリカマイクロ多孔膜には割れ防止の

効果がありました。シリカマイクロ多孔膜は材質が光ファイバと同じであるので、材質的な耐熱性には問題がありません。リサイクル性が高いというメリットもあります。問題は細孔の安定性です。幸いにも細孔は細孔径が小さいほど安定であることがわかりました。シリカマイクロ多孔膜を被覆材に用いることによって、光ファイバの耐熱性を最大限に引き出せる耐熱光ファイバが得られました[4]。

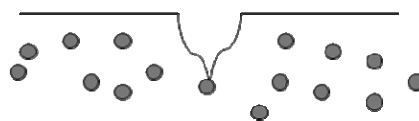


図2 ミクロ細孔によって亀裂の進行を抑制

2.3 耐熱光ファイバの実用化への道

耐熱光ファイバの実用化を目指して苦勞したのは、ばらつきを抑えることでした。

当初、シリカマイクロ多孔膜の細孔径にはばらつきがありました。ばらつきを少なくするためには、シリカマイクロ多孔膜の前駆体を合成する化学反応をできるだけ均一にする必要があります。かくはんに時間をかけるなどの工夫をすることで解決しました。

光ファイバとシリカマイクロ多孔膜の密着性にもばらつきがありました。このばらつきは、シリカマイクロ多孔膜の前駆体を光ファイバに塗布、焼成する工程に問題があります。ガラス板にシリカマイクロ多孔膜を塗布しホットプレートで加熱したところ、密着強度は高いことがわかりました。塗布溶媒が蒸発する際に熱を奪うため、電気炉が短いと光ファイバが加熱される前に電気炉を通過してしまうようでした。電気炉を長くすれば、シリカマイクロ多孔膜と光ファイバの間に強い結合が形成されると予想されました。

ところが、光ファイバの線引き装置というのは大型であり、簡単に装置を改良することができません。線引き工程の後に、塗布、焼成工程を連続しておく必要があるため、電気炉は線引き装置の下の限られた場所に置かなければなりません。長い電気炉を置くことができず、加熱時間を十分にとることができませんでした。強度は最も

弱い部分が評価の対象になります。塗布溶液に添加剤を加えるという次善の策で乗り切りましたが、最後まで強度が問題になりました。

材料のポテンシャルを引き出すためには、プロセスが重要であると痛感しました。プロセスは大規模になれば投資が必要であり、投資のためには大規模な需要が確保されなければなりません。ところが、プロセスが材料のポテンシャルを十分に引き出していないと需要が広がらないのです。実用化段階に高めるのは一筋縄ではいかないと感じました。

2.4 耐熱絶縁材料への展開

情報機器の高集積化、自動車の電気駆動化にともない、熱のマネジメントが重要になっています。高出力の場合、発熱量も大きくなるため、耐熱絶縁材料が必要とされます。

耐熱光ファイバに用いたシリカマイクロ多孔膜を耐熱絶縁材料として展開するには、いくつかの問題がありました。

シリカマイクロ多孔膜が数百 nm 程度の膜厚であるのに対して、絶縁材料は数 μm 以上の膜厚が必要とされます。このため、シリカマイクロ多孔膜のみで厚膜とすることは困難です。シリカマイクロ多孔膜の中に粒子を混合することで、厚膜とすることができます。異なる材料を接合する場合に熱膨張率が異なり歪を生じます。シリカマイクロ多孔膜は細孔を多く含むため、この歪を緩和する効果を発揮します。一方、粒子は絶縁性を考慮するとセラミックス粒子を用いることになります。セラミックスの種類を選択することで、膜の性質を変えることができます。

たとえば、セラミックスは、金属-酸素結合があるため、この結合エネルギーに対応した赤外線

の吸収や放出が行われます。この作用が有効に機能するセラミックス粒子を選択すれば、膜に混合したセラミックス粒子から赤外線を放出することで遠隔地に放熱することが可能になり、熱放射絶縁膜となります。一方、熱伝導性の高いセラミックス粒子を選択すれば、膜の熱伝導性が高まり、熱伝導絶縁膜となります。

もうひとつの問題は、シリカマイクロ多孔膜は表面に OH 基が存在するために親水性であり、細孔内に水が吸着されやすいということです。水が吸着すると著しく絶縁性が損なわれます。膜を疎水化する必要があります。

現在、セラミックス粒子の混合による厚膜化と膜の疎水化の課題を解決し、耐熱絶縁材料への展開を図っています[5]。

参考文献

- [1] Murakami, Y. et al., Microporous silica particles prepared by the salt-catalytic sol-gel process with extremely low content of water, *J. Sol-Gel Sci. Tech.*, **29** (1999) 19.
- [2] 村上 泰, 他, 二酸化ケイ素薄膜とその製造方法, 特開 2004-292190.
- [3] Simizu, W. et al., Superhydrophilic microporous silica coatings on polymer substrate, *J. Ceram. Soc. Jpn.*, **115** (1999) 712.
- [4] 皆瀬十三夫, 他, 耐熱光ファイバおよびその製造方法, 特開 2006-47933.
- [5] 「プレス加工コイルと新規絶縁材料を用いた大電流インダクタ開発」, 平成 19 年度地域新生コンソーシアム研究開発事業, 経済産業省; 平成 20 年度地域イノベーション創出研究開発事業, 経済産業省.

行事カレンダー

本会主催行事

開催日		行事名	申込締切	原稿締切	問合せ先	掲載号
2008年						
6月	2(火) ～4(木)	第46回日本伝熱シンポジウム (開催場所: 国立京都国際会館)	2009.1.19	2009.3.16	Email: info@nhts2009.me.kyoto-u.ac.jp http://nhts2009.me.kyoto-u.ac.jp/index.html	10月号 1月号

本会共催, 協賛, 後援行事

開催日		行事名	申込締切	原稿締切	問合せ先	掲載号
2009年						
5月	12(火) ～14(木)	第14回計算工学講演会 (開催場所: 東京大学生産技術研究所)	2009.1.30	2009.4.3	計算工学講演会事務局 〒101-8449 東京都千代田区神田錦町3-24 住友商事神保町ビル(株)ICS コンベンション デザイン気付 TEL 03-3219-3541 FAX 03-3292-1811 Email: jsces@ics-inc.co.jp	
5月	13(水) ～14(木)	講習会 可視化フロンティア「流体の画像計測 (PIV/LIF)の基礎と応用」 (開催場所: 東京工業大学大岡山キャンパス)	2009.5.6		可視化情報学会事務局 〒114-0034 東京都北区上十条 3-29-20 ア ルポオル上十条 103 TEL: 03-5993-5020 Email: info@vsj.or.jp http://www.visualization.jp/	
6月	5(金)	日本混相流学会 混相流レクチャーシリーズ「マイクロ・ ナノバブルと特性とその応用」 (開催場所: 大阪私立大学文化交流センター)	2009.5.22		レクチャーシリーズ運営委員会事務局 TEL & FAX: 06-6879-7316 lecture-ser@mech.eng.osaka-u.ac.jp	
6月	9(火) ～11(木)	第58回理論応用力学講演会 (開催地: 東京都港区)	2009.3.5	2009.4.16	社団法人土木学会 (担当: 増永・竹田) 〒160-0004 東京都新宿区四谷一丁目外濠 公園内 TEL: 03-3355-3559 FAX: 03-5379-0125 http://www.jsce.or.jp/committee/anc/nctam/nctam.html	
7月	29(水) ～30(木)	講習会「熱設計を支援する熱流体計測技術」 (開催場所: 東京工業大学大岡山キャンパス)	2009.7.19		(社)日本機械学会 〒160-0016 新宿区信濃町35 信濃町煉瓦 館5階 http://www.jsme.or.jp/kousyu2.htm	
8月	2(日) ～5(水)	7th Annual International Energy Conversion Engineering Conference (IECEC2009) (開催地: Denver, CO, USA)	2008.12.7	2009.5.19	丸山 直樹 〒514-8507 三重県津市栗真町屋町1577 三重大学大学院工学研究科機械工学専攻 TEL & FAX: 059-231-9386 Email: naoki@mach.mie-u.ac.jp Web: http://www.aiaa.org/content.cfm?pageid =230&lumeetingid=1894&viewcon=overview	
8月	7(金) ～9(日)	日本混相流学会年会講演会 2009 第28回混相流シンポジウム (開催場所: 熊本大学)	2009.3.30	2009.6.5	河原顕磨 呂 熊本大学大学院自然科学研究科先端機械 システム講座 日本混相流学会年会講演 会 2009 実行委員会事務局 〒860-8555 熊本市黒髪 2-39-1 TEL/FAX 096-342-3753 Email: akimaro@mech.kumamoto-u.ac.jp Web: http://www.mech.kumamoto-u.ac.jp /jsmf2009/index.php	
9月 10月	27(日) ～ 2(金)	第13回原子炉熱流動国際会議 (NURETH13) (開催地: 金沢市)	2008.10.31	2009.1.31	NURETH-13 現地組織委員会委員長 村瀬道雄 (株)原子力安全システム研究所 技術シス テム研究所 TEL: 0770-37-9110 Email: murase@inss.co.jp Web: http://www.nureth13.org/	
10月	7(水) ～9(金)	15th International Workshop on Thermal Investigations of ICs and Systems (開催地: Leuven, Belgium)	2009.4.30	2009.8.29	http://cmp.imag.fr/conferences/thermic/ther minic2009	
11月	16(月) ～19(木)	The 7th Pacific Symposium on Flow Visualization and Image Processing (PSFVIP-7) (開催地: Kaohsiung, Taiwan, ROC)	2008.10.31	2009.4.15	Dr. Tai, C.H., National Pingtung Univ. of Science and Technology (Taiwan, ROC) Email: chtai@mail.npust.edu.tw Web: http://www.tuat.ac.jp/%7Eptctf/	
11月	16(月) ～20(金)	International Conference on Power Engineering-09, Kobe (ICOPE-09) (開催地: 神戸市)	2008.12.31	2009.3.31	Ryosuke Matsumoto Kansai University Email: matumoto@kansai-u.ac.jp	

The 14th International Heat Transfer Conference
(第 14 回国際伝熱会議 : IHTC-14)
論文募集のお知らせ

第 14 回国際伝熱会議 (IHTC-14) が, 2010 年 8 月 7-13 日に米国ワシントン DC で開催されます. IHTC-14 では, 従来の伝熱現象の基礎, 伝熱応用技術に加えて, ナノ材料, バイオ, MEMS 等のマイクロシステム, 情報機器やエネルギー変換機器, 航空宇宙, 環境などの発展のめざましい分野における熱流動現象の発表が期待されています. 関連各位の積極的なご参加をお願いいたします.

なお, 論文投稿のスケジュールは以下の通りです.

- ・ アブストラクト申し込み締め切り : 2009 年 8 月 28 日
- ・ アブストラクト採択通知 : 2009 年 10 月 2 日
- ・ 査読用フルペーパー提出締め切り : 2009 年 12 月 31 日
- ・ 査読結果通知 : 2010 年 3 月 26 日
- ・ コピーライト移譲用紙提出締め切り : 2010 年 3 月 31 日
- ・ フルペーパー最終原稿提出締め切り : 2010 年 4 月 30 日

論文投稿の詳細等につきましては, 以下のホームページをご覧ください.
<http://www.asmeconferences.org/IHTC14/>

第 46 回日本伝熱シンポジウム開催直前のご案内

第 46 回日本伝熱シンポジウム実行委員会
委員長 牧野俊郎
事務局長 中部主敬

【開催日】 平成 21 年 6 月 2 日（火）～ 6 月 4 日（木）

（6 月 2 日の受付開始時刻は 8:50 を予定しています。また、毎日の第 1 セッション開始時刻は異なっていますので、ご注意ください。）

【会場】 国立京都国際会館 (<http://www.icckyo.or.jp/>)

行き方 JR 京都駅から地下鉄烏丸（からすま）線で 20 分、国際会館駅下車、徒歩 5 分。

<http://www.icckyo.or.jp/jp/access/access.html>

所在地 〒606-0001 京都市左京区宝ヶ池（Phone: 075-705-1234 / Fax: 075-705-1100）

【ホームページ URL】 <http://nhsts2009.me.kyoto-u.ac.jp/>

【特別講演】 6 月 3 日（水）、15:10～16:10、D 室にて

門内 輝行 教授（京都大学） 「歴史都市・京都の景観・環境の創生」

【総会】 6 月 3 日（水）、16:20～17:40、D 室にて

【シンポジウムの形式】

- ・ 講演形式として、
 - a) 一般セッション（口頭発表）
 - b) オーガナイズドセッション（口頭発表）
 - c) 学生・若手研究者を対象とする優秀プレゼンテーション賞セッションを設けます。
- ・ 1 講演あたりの講演時間は、一般セッションについては 15 分（発表 10 分、個別討論 5 分）とし、各セッションの最後に総合討論の時間（5 分×セッション内の講演件数）を設けます。オーガナイズドセッションについては、オーガナイザーの指示に従って下さい。オーガナイザーの連絡先等はホームページをご参照下さい。
- ・ 優秀プレゼンテーション賞セッションについては、本号掲載のお知らせ「優秀プレゼンテーション賞について」をご参照下さい。
- ・ シンポジウムのタイムテーブル及びプログラムについては本号の“お知らせ（別添）”をご覧ください。

【参加費等】

- ・ シンポジウム参加費
 - 一般（14,000 円）
 - 学生（6,000 円）
- ・ 講演論文集
日本伝熱学会会員：無料（電子版は、事前に J-Stage 上で公開します。参加者には当日に冊子体・

CD-ROMを配布します。不参加者のうちの希望者には、CD-ROMを事後に配布しますので、開催後1ヵ月以内に、日本伝熱学会宛てにご氏名・送付先を明記の上、メールにてお申し込み下さい。）

非 会 員：8,000円（冊子体）。会場受付にて日本伝熱学会への入会を申し込まれる場合には、無料とします。

【懇親会】

- ・ 開催日：平成21年6月3日（水）、18:00～20:00
- ・ 会場：国立京都国際会館（宴会場「さくら」）
- ・ 懇親会費：
一般（10,000円。配偶者無料）
学生（5,000円）

【参加費等の振込み方法】

- ・ 事前参加申込は4月13日で締め切りました。しかし、それ以降でも5月29日までは、上記の参加費等の扱いで登録可能です。この場合、当日に受付でお渡しすべきものを予め準備しておく等の作業をいたします。もちろん、例年のように、シンポジウム当日の参加申込もできます。
- ・ ステップ1：まず、ホームページから参加登録を行って下さい。折り返し、参加登録ID番号（4桁の数、例：1234）と金額が記載された電子メールをお送りします。
- ・ ステップ2：つぎに、下記の銀行口座に、電子メールに指定の金額を振込んで下さい。その際、必ず、氏名の前に参加登録ID番号を付けて下さい。

振込先：みずほ銀行（銀行コードは 0001）
出町（でまち）支店（店番号は 587）
普通預金口座
口座番号 1112829
口座名 第46回日本伝熱シンポジウム実行委員会

（ATM機によっては途中までしか表示されないかも知れませんが大丈夫です。）

ATM機での振込人の指定例：「1234 テ」ンネツタロウ」

注意1：銀行振込みをもって「参加登録完了」とします。ホームページからの登録だけでは「完了」ではありません。5月29日までに、銀行振込みまでの手続きを行って下さい。

注意2：経理処理の都合上、複数の登録者の分をまとめて振込むことはご遠慮下さい。お手数ですが、必ず1件ずつ「参加登録ID番号と氏名」を指定してお振込み下さい。

注意3：今回のシンポジウムでは銀行口座のみを開設していますので、従来、学会誌に挟み込んでいた「郵便振替用紙」はありません。

【講演論文集（電子版）】

- ・ 講演論文集（電子版）については、日本伝熱学会会員（2009年度会員）の方々に対し、ホームページにリンクされたJ-Stageのサイトを通じて公開します。公開日は2009年5月26日（火）を予定しています。特許に関わる公知日もこの日になります。
- ・ 電子版は、ホームページのトップページ（日本伝熱学会のホームページからもリンクが張られています。この場合には、日本伝熱シンポジウム）→講演プログラム→講演論文集（電子版）、と辿っていただき、J-Stageの当該ページに入り、以下の購読者コードとパスワードを用いてログインの上、ダウンロードすることができます。なお、このサイト上での講演論文公開は、従来から行ってきました日本伝熱学会会員への郵送による講演論文集CD-ROM事前配布に代わるものです。

- ・ J-Stage : 購読者コード [] パスワード : []
- ・ シンポジウムで座長をご担当下さる先生方には、この電子版をもって当日のセッションの参考資料として下さい。

【講演論文の公開日】

- ・ 講演論文は、会員を対象に、シンポジウム開催日の1週間程前からJ-Stage上で公開します。
- ・ したがって、特許に関わる公知日は、シンポジウム開催日よりも早くなりますのでご注意ください。

【交通と宿泊】

- ・ 京都は世界からの旅行者が常時、多数、訪れる国際文化都市です。そのため、ホテルの予約は容易ではありません。いますぐにも手配されることを強くお勧めします。シンポジウム実行委員会でも250室程度の部屋を確保しております。ホームページをお訪ね下さい。

【ご注意】

- ・ 口頭発表用として実行委員会が準備する機器は、液晶プロジェクターのみとします。パーソナルコンピュータは各自ご持参下さい。
- ・ 参加費・懇親会費は参加取消の場合にもお返ししません。
- ・ 変更事項等については、随時ホームページ上に掲載しますので、ホームページをご参照下さい。
- ・ その他、ご不明な点がありましたら、実行委員会にE-mailまたはFaxでお問い合わせ下さい。

【お問い合わせ先】

第46回日本伝熱シンポジウム実行委員会
京都大学 大学院工学研究科 機械理工学専攻内
E-mail: info@nhts2009.me.kyoto-u.ac.jp
Fax: 075-753-5209

優秀プレゼンテーション賞（第46回日本伝熱シンポジウム）について

日本伝熱学会 学生会委員会
委員長 堀部明彦

第46回日本伝熱シンポジウムでは、下記の要領で、学生・若手研究者を対象に優秀プレゼンテーション賞セッションを設けます。企業・大学・研究機関等の多数の皆様にご参加いただきたくお願いいたします。

日 時：平成21年6月2日（火） 9:50～16:20（予定）
（準備～撤去）の時間帯については本号の“お知らせ（別添）”のタイムテーブルをご覧ください。

講演形式：発表者1人あたり3分のショートプレゼンテーション（SP）とポスタープレゼンテーション（PP）を行っていただく予定です。各セッションは、以下の形式を予定しております。

○ショートプレゼンテーション（SP）

- ・1人あたりの発表時間は3分です。スケジュールがタイトなため、発表時間は厳守ですので注意して下さい。なお、ショートプレゼンでは質疑応答の時間は設けません。
- ・発表資料はPDFファイル（動画不可、上限3MB/人）を事前提出いただきます。学生会委員会側でノートパソコンを用意し、その中にファイルをコピーして発表時に使用する予定です。なお、PDFファイルのページ送りは学生会委員が担当する予定です。

○ポスタープレゼンテーション（PP）

- ・ポスターパネルの大きさは縦2100mm×横900mmの縦長です。

対象：企業・大学・研究所等の技術者・研究者で、平成21年3月31日現在で28歳以下の者、または、講演申込当日に学生である者（ただし、社会人大学院生を除く）。

応募資格：講演時（＝審査時）に、日本伝熱学会の会員（正員・学生員）、または、入会申込中であること（厳守）。シンポジウム当日の入会も可能です。

審査・選考方法：複数名の審査員による評価に基づいて選考し、授賞者を決定します。

表彰：表彰はシンポジウム第2日の日本伝熱学会総会で行います。

<最新情報はシンポジウムのホームページに公開します>

(別添)

第46回日本伝熱シンポジウム【京都】

6月2日(火):1日目

B1室	B2室	C1室	C2室	D室	F室	G室	I室	J室
B1-11 沸騰1 9:30-10:50	B2-11 融解・凝固1 9:30-10:50	C1-11 ふく射物性1 9:30-10:50	C2-11 噴流 9:30-10:50	ポスター準備 9:20-9:50	F-11 優秀プレゼンテーション賞:ショートプレゼン1 9:50-10:50	G-11 優秀プレゼンテーション賞:ショートプレゼン2 9:50-10:50	I-11 分子動力学1 9:30-10:50	J-11 自然対流・複合対流1 9:30-10:30
B1-12 沸騰2 11:00-12:20	B2-12 融解・凝固2 11:00-12:00	C1-12 ふく射物性2 11:00-12:20	C2-12 乱流1 11:00-12:20	優秀プレゼンテーション賞:ポスターセッション1 11:00-12:20	F-12 電場・電荷移動下での伝熱 11:00-12:20	G-12 物質移動 11:00-12:20	I-12 分子動力学2 11:00-12:00	J-12 自然対流・複合対流2 11:00-12:00
				ポスター入替 12:20-13:50				
B1-13 沸騰3 13:50-15:30	B2-13 反応・燃焼1 13:50-15:30	C1-13 強制対流1 13:50-15:30	C2-13 乱流2 13:50-15:30	優秀プレゼンテーション賞:ポスターセッション2 15:00-16:20	F-13 優秀プレゼンテーション賞:ショートプレゼン3 13:50-14:50	G-13 優秀プレゼンテーション賞:ショートプレゼン4 13:50-14:50	I-13 分子動力学3 13:50-15:30	J-13 自然対流・複合対流3 13:50-15:30
B1-14 沸騰4 15:40-17:20	B2-14 反応・燃焼2 15:40-17:20	C1-14 強制対流2 15:40-17:20	C2-14 ヒートポンプ・空調 15:40-17:20	ポスター撤去 16:20-17:20	F-14 生産・加工プロセス 15:40-17:20	G-14 蓄熱・蓄冷 15:40-17:20	I-14 分子動力学4 15:40-16:40	J-14 自然対流・複合対流4 15:40-17:20

6月3日(水):2日目

B1室	B2室	C1室	C2室	D室	F室	G室	I室	J室
B1-21 沸騰5 9:00-10:20	B2-21 OS: 水素エネルギー技術1 9:00-10:20	C1-21 強制対流3 9:00-10:00	C2-21 OS: エネルギー変換システム1 9:00-10:20	D-21 マイクロ伝熱1 9:00-10:20	F-21 熱物性1 9:00-10:20	G-21 ふく射伝熱1 9:00-10:00	I-21 多孔質体の伝熱1 9:00-10:00	J-21 自然エネルギー1 9:00-10:20
B1-22 二相流1 10:30-12:10	B2-22 OS: 水素エネルギー技術2 10:30-12:10	C1-22 強制対流4 10:30-11:50	C2-22 OS: エネルギー変換システム2 10:30-12:10	D-22 マイクロ伝熱2 10:30-12:10	F-22 熱物性2 10:30-12:10	G-22 ふく射伝熱2 10:30-12:10	I-22 多孔質体の伝熱2 10:30-12:10	J-22 自然エネルギー2 10:30-12:10
B1-23 二相流2 13:40-15:00	B2-23 OS: 水素エネルギー技術3 13:40-15:00	C1-23 熱機器・熱交換器1 13:40-15:00	C2-23 OS: エネルギー変換システム3 13:40-15:00	D-23 マイクロ伝熱3 13:40-15:00	F-23 熱物性3 13:40-15:00	G-23 ふく射伝熱3 13:40-15:00	I-23 多孔質体の伝熱3 13:40-15:00	
特別講演(D室) 京都大学 門内 輝行 教授「歴史都市・京都の景観・環境の創生」 15:10-16:10								
総会(D室) 16:20-17:40								
懇親会(さくら) 18:00-20:00								

6月4日(木):3日目

B1室	B2室	C1室	C2室	D室	F室	G室	I室	J室
B1-31 二相流3 9:40-11:00	B2-31 OS: 水素エネルギー技術4 9:40-11:00	C1-31 熱機器・熱交換器2 9:40-11:00	C2-31 電子機器の冷却1 9:40-11:00	D-31 マイクロ伝熱4 9:40-11:00	F-31 OS: 非線形熱流体现象と伝熱1 9:40-11:00	G-31 ヒートパイプ1 9:40-11:00	I-31 バイオ伝熱1 9:40-11:00	J-31 計測技術1 9:40-11:00
B1-32 凝縮伝熱 11:10-12:10	B2-32 OS: 水素エネルギー技術5 11:10-12:10	C1-32 熱機器・熱交換器3 11:10-12:10	C2-32 電子機器の冷却2 11:10-12:10	D-32 マイクロ伝熱5 11:10-12:10	F-32 OS: 非線形熱流体现象と伝熱2 11:10-12:10	G-32 ヒートパイプ2 11:10-12:10	I-32 バイオ伝熱2 11:10-12:10	J-32 計測技術2 11:10-12:10
B1-33 蒸発伝熱 13:30-14:30	B2-33 OS: 水素エネルギー技術6 13:30-14:50	C1-33 熱機器・熱交換器4 13:30-14:50	C2-33 電子機器の冷却3 13:30-14:50	D-33 二相流の数値解析 13:30-14:50	F-33 特殊環境下での対流 13:30-14:50	G-33 ヒートパイプ3 13:30-14:50	I-33 バイオ伝熱3 13:30-14:30	J-33 計測技術3 13:30-14:50

第46回日本伝熱シンポジウムプログラム

(以下のプログラムは 4/6 時点での暫定版です。最新版はホームページでご覧下さい。)

—— 第 1 日 6月2日(火) ——

< B1室 >

B1-11 9:30-10:50 沸騰1

B1-111 膜沸騰蒸気膜崩壊過程に及ぼすナノ粒子懸濁の影響

*新井 崇洋(電中研), 古谷 正裕

B1-112 高温過熱面の濡れ開始機構に関する研究

大竹 浩靖(工学院大), *小林 真悟, 小泉 安郎(信州大), 永嶋 望(工学院大)

B1-113 有限垂直円柱まわりの膜沸騰熱伝達(第1報:半球状の凸底面の場合)

*山田 たかし(長崎大), 豊田 香, 茂地 徹, 桃木 悟, 山口 朝彦, 金丸 邦康

B1-114 有限垂直円柱まわりの膜沸騰熱伝達(第2報:底面形状の影響)

*桃木 悟(長崎大), 豊田 香, 山田 たかし, 茂地 徹, 山口 朝彦, 金丸 邦康

B1-12 11:00-12:20 沸騰2

B1-121 微小流路および水平平板狭間隙内沸騰熱伝達に関する研究

小泉 安郎(信州大), 大竹 浩靖(工学院大), *押川 隆昌

B1-122 MEMS加工技術を用いて作製した微細構造付き伝熱面の沸騰特性

*佐藤 隆登(工学院大), 小泉 安郎(信州大), 大竹 浩靖(工学院大)

B1-123 短い垂直円管内水の強制対流サブクール沸騰熱伝達

*畑 幸一(京都大), 増崎 貴(核融合研)

B1-124 ミニ・マイクロチャンネルにおける気泡微細化沸騰

*野村 知志(東京理大), 鈴木 康一, 洪 定約

B1-13 13:50-15:30 沸騰3

B1-131 水のサブクールプール沸騰における気泡の挙動

*原村 嘉彦(神奈川大), 瀧本 直輝

B1-132 プタノール水溶液の限界熱流束に関する研究

*西口 昇太郎(神奈川大), 梅津 孝允, 久野 健太, 宮本 竜矢, 庄司 正弘

B1-133 水平細線のプール飽和沸騰限界熱流束の線径依存性

*山本 千博(神奈川大), 田中 淳平, 尾形 誠, 安藤 充洋, 高山 智明, 庄司 正弘

B1-134 加熱極細線の水のサブクール沸騰と系圧力の影響(続報)

*庄司 正弘(神奈川大), 柴田 宗孝, 門間 允誉,

- 高山 基嗣, 畑山 慶輔
- B1-135 核沸騰熱伝達機構解明のための微小重力実験
*小谷 優介(九州大), 河南 治(兵庫県大), 坂田 淑乃, 浅田 有香, 永安 忠, 新本 康久, 大田 治彦, 佐藤 洋一(JAXA), オレグ カボフ(ブリュッセル自由大), クッカーズ パトリック, セルゲイ チコフ
- B1-14 15:40-17:20 沸騰4**
- B1-141 2成分混合水溶液の沸騰における伝熱面近傍の気液構造
*坂下 弘人(北海道大), 小野 綾子
- B1-142 Pool Boiling Heat Transfer Characteristic of Binary Refrigerant Mixture R11-R113
*Yanhua Diao (Beijing Univ. Tech.), Yaohua Zhao
- B1-143 飽和プール沸騰系における二成分混合液の核沸騰熱伝達に関する研究
*後藤 泰裕(茨城大), 神永 文人, 松村 邦仁
- B1-144 二成分混合媒体のプール核沸騰における伝熱劣化と伝熱促進に関する研究
*芳井 晋作(九州大), 酒井 崇, 月成 勇起, 梶本 和利, 新本 康久, 大田 治彦
- B1-145 二成分系水溶液の沸騰に伴う三相界線近傍に発現するマランゴニ流の解明
*降旗 健司(デンソー), 鴨志田 隼司(芝浦工大), 庄司 正弘(神奈川大), 川口 靖夫(東京理大)
- < B2室 >**
- B2-11 9:30-10:50 融解・凝固1**
- B2-111 直接接触熱交換における潜熱蓄熱量の超音波印加による影響
森田 慎一(米子高専), *金田 彰朗, 早水 庸隆
- B2-112 氷の融解を利用したプロパンハイドレートの生成促進に関する研究(氷-プロパン界面におけるハイドレートの生成挙動)
*浅岡 龍徳(青山学院大), 岡田 昌志, 小野 正嗣
- B2-113 クラスレート水和物生成に及ぼす界面活性剤の効果(メタン+エタン+プロパン混合ガスからの水和物生成について)
桑原 唯(慶應大), *安東 直毅, 森 康彦
- B2-114 疎水性冷却液が滲出する多孔質面上への水噴霧によるメタン水和物生成
*藤田 真也(慶應大), 花田 純一郎, 森 康彦
- B2-12 11:00-12:00 融解・凝固2**
- B2-121 2成分系水溶液中における回転水平氷円柱の融解
*小松 喜美(秋田大), 菅原 征洋, 久保 淳司, 藤田 忠
- B2-122 二次元Phase Field Methodを用いた水の一方方向凝固に関する数値解析
*立田 健人(京都工繊大), 櫻井 亮 (富士通), 萩原 良道(京都工繊大)
- B2-123 水溶液凍結時の冷却壁面上に形成される氷結晶と結晶方向変化現象
*堀 高誌(中央大), 寺岡 喜和, 松本 浩二, 神崎 裕也(ヤマハ発動機)
- B2-13 13:50-15:30 反応・燃焼1**
- B2-131 多炎孔バーナの空気加給有無による加熱効率への影響
森田 慎一(米子高専), *鷹野 将大, 早水 庸隆
- B2-132 壁温を制御した超薄型石英チャンネルにおける振動火炎に関する研究
*范 勇(東京大), 鈴木 雄二, 笠木 伸英
- B2-133 温度分布制御型マイクロフローリアクタによるn-ヘプタン/空気混合気の燃焼
*山本 晃(東北大), 押部 洋, 中村 寿, 長谷川 進, 手塚 卓也, 丸田 薫
- B2-134 高温高圧水中のメタノール酸化反応における反応熱の圧力依存性
*辻本 剛(広島大), 松村 幸彦
- B2-135 水中プラズマによる気泡発生様式と熱収支
*向笠 忍(愛媛大), 前原 常弘, 野村 信福, 豊田 洋通, 服部 吉晃, 三宅 宏幸
- B2-14 15:40-17:20 反応・燃焼2**
- B2-141 大規模渦構造の操作による旋回同軸噴流混合の能動制御
*齋木 悠(東京大), 鈴木 雄二, 笠木 伸英
- B2-142 DNSによるHCCIエンジン内乱流燃焼機構の解明
福本 浩章(東京工大), *瀬尾 健彦, 店橋 護, 宮内 敏雄
- B2-143 旋回流を伴う希薄予混合火炎のカオス特性
*新木本 寛之(立命館大), 後藤田 浩, 宮野 尚哉
- B2-144 波長変調分光法を用いた燃焼制御用半導体レーザ吸収分光センサー
*志村 祐康(東京工大), 瀬尾 健彦, 店橋 護, 宮内 敏雄
- B2-145 ピロール型窒素からのFuel NO生成機構における反応動力学的検討
*桑原 卓也(九州大), 山本 剛, 深井 潤
- < C1室 >**
- C1-11 9:30-10:50 ふく射物性1**
- C1-111 日射反射塗料の反射率測定とその評価
*平澤 良男(富山大), 三浦 裕人, 清水 孝文
- C1-112 金属被膜シリコンマイクロキャビティのふく射スペクトルに対する表面粗さの影響
*切替 大善(東京大), 鈴木 雄二, 笠木 伸英
- C1-113 高温セラミックスの放射率直接測定
*熊野 智之(神戸市高専)
- C1-114 室温の表面の半球放射率測定器の開発
若林 英信(京都大), 佐藤 啓太, *千田 尚之, 牧野 俊郎
- C1-12 11:00-12:20 ふく射物性2**
- C1-121 Comparison of Spectral Radiative Properties of Different Titanium Dioxide Powders in Absorbing Host Medium

- *Mehdi Baneshi (Tohoku Univ.), Shigenao Maruyama, Atsuki Komiya
- C1-122 5節点有限要素を用いた電磁波動解析による薄膜系により放射される熱ふく射
山田 純(芝浦工大), *永井 竜二
- C1-123 高温環境下におけるNiとPdの熱ふく射スペクトル現象
*若林 英信(京都大), 佐藤 啓太, 牧野 俊郎
- C1-124 石炭チャー複合粒子群の輻射特性
*高坂 文哉(名古屋大), 小林 信介, 羽多野 重信, 田邊 靖博, 板谷 義紀
- C1-13 13:50-15:30 強制対流1**
- C1-131 ミリスケール流路に発達する温度境界層の温度測定(二つの壁面を加熱する場合)
*中川 栄一(同志社大), 成田 雄大, 稲岡 恭二, 千田 衛
- C1-132 屈曲型切欠きフィン付設流路内の熱流動特性
*巽 和也(京都大), 松崎 慎太郎, 村田 達哉, 中部 主敬
- C1-133 内側壁面が回転する環状曲面拡大流路内流れにおける流路形状の影響
*池谷 拓巳(東京農工大), 村田 章, 齋藤 博史, 岩本 薫
- C1-134 ダクト内バックステップ流れの流動構造と熱伝達特性
*巢山 頌文(同志社大), 西井 吉伸, 稲岡 恭二, 千田 衛
- C1-135 超臨界圧水を用いた単一模擬燃料棒ヒータ周りの熱伝達実験
*関 洋治(原子力機構), 江里 幸一郎, 鈴木 哲, 榎枝 幹男, 大楽 正幸
- C1-14 15:40-17:20 強制対流2**
- C1-141 ガスタービン翼フィルム冷却における冷却気相ミスト添加に関する基礎研究
*鶴田 和孝(工学院大), 大竹 浩靖, 小泉 安郎(信州大)
- C1-142 傾斜ピンフィンを用いた流路の熱伝達特性
*始田 祐輔(大阪大), 武石 賢一郎, 小田 豊, 三宅 慶明(三菱重工)
- C1-143 過渡応答法を用いたティアドロップ形状ディンプル面の乱流熱伝達率計測
*西田 怜美(東京農工大), 村田 章, 齋藤 博史, 岩本 薫
- C1-144 三角錐型渦発生体によるピンフィン冷却通路の伝熱促進
*森崎 哲郎(日立製作所), 堀内 康広, 田川 久人
- C1-145 対称翼前縁の翼端部に生じる馬蹄渦による乱流熱伝達のLES
*小田 豊(大阪大), 武石 賢一郎, 羽田 哲, 怒田 成勲
- < C2室 >**
- C2-11 9:30-10:50 噴流**
- C2-111 クロスフローが多孔衝突噴流伝熱に及ぼす影響に関する研究
*前田 秀剛(大阪大), 武石 賢一郎, 小田 豊, 吉田 直樹
- C2-112 シェイプトフィルム冷却孔の混合現象に関する研究
羽田 哲(大阪大), *森 翔平, 武石 賢一郎, 小宮山 正治, 小田 豊
- C2-113 オリフィス噴流の衝突熱伝達に関する制御
*金森 梓(三菱重工), 檜和田 宗彦(岐阜大), 三松 順治, 親川 兼勇(琉球大)
- C2-114 密度成層流体中を鉛直移動する球の後流ジェット
*岡村 徹(京都大), 緒方 正広, 花崎 秀史
- C2-12 11:00-12:20 乱流1**
- C2-121 MHDチャンネル乱流場における高プラントル数熱伝達特性
*山本 義暢(京都大), 功刀 資彰
- C2-122 加熱された2次元丘の熱輸送に及ぼす上流の乱流境界層の影響
*保浦 知也(名古屋工大), 草野 文彦, 田川 正人, 長野 靖尚
- C2-123 リブ付き透過性壁面流れのPIV計測
*富永 聡(大阪府大), 松村 康弘, 金田 昌之, 須賀 一彦
- C2-124 超音速ノズル壁面温度予測方法の検討
*亀谷 雄樹(IHI), 今井 良二, 石川 康弘, 森 初男
- C2-13 13:50-15:30 乱流2**
- C2-131 乱流噴流火炎における局所火炎要素のダイナミクス
*山脇 孝明(東京工大), 瀬尾 健彦, 店橋 護, 宮内 敏雄
- C2-132 遷移レイノルズ数域の平行平板間流れにおける乱流熱伝達のDNS(第3報:ポアズイユ流とクエット流における乱流縞の比較)
*塚原 隆裕(東京理大), 川口 靖夫, 河村 洋(諏訪東京理大)
- C2-133 温度成層乱流境界層における濃度拡散場のDNS
*服部 博文(名古屋工大), 山崎 聖, 田川 正人, 長野 靖尚
- C2-134 低・中プラントル数の平行平板間乱流熱伝達のDNSデータベースを用いた乱流プラントル数の解析
*阿部 浩幸(JAXA)
- C2-135 矩形溝部を有するチャンネル流の数値解析
*大島 裕史(北海道大), 黒田 明慈
- C2-14 15:40-17:20 ヒートポンプ・空調**
- C2-141 ハイブリッドデシカント空調用デシカントの吸脱着特性
*北村 弘通(東京工大), 佐藤 勲, 斉藤 卓志, 川口 達也, 柏木 孝夫
- C2-142 有機系収着剤ローターへの処理空気二重通風における除湿特性
*高木 貞男(岡山大), 堀部 明彦, 稲葉 英男(津山高専), 春木 直人(岡山大)
- C2-143 有機系収着剤を塗布した熱交換器の強制対流下における収着挙動
堀部 明彦(岡山大), 稲葉 英男(津山高専), 春木 直人(岡山大), *菅 大輔

- C2-144 R-290の水平細管内沸騰熱伝達に対する潤滑油の影響
*斎藤 静雄(東京大), 田中 千歳, 党 超鋌, 飛原 英治
- C2-145 フィンカラー形状が接触熱抵抗に及ぼす影響
*松尾 叔美(佐賀大), 椿 耕太郎, 宮良 明男
- F-1113 冷媒流れに基づくヒートポンプサイクルのシミュレーションとその応用
*宮本 年男(名古屋大), 大内田 聡(IHI), 長谷川 達也(名古屋大)
- F-1114 気泡駆動型循環式ヒートパイプ(BACH)の作動原理検討
岩本 晃和(福井大), *浅野 真臣, 永井 二郎, 大西 東洋司(若狭湾エネルギー研究センター), 新宮 秀夫

< D室 >

11:00-12:20 優秀プレゼンテーション賞:ポスターセッション1

15:00-16:20 優秀プレゼンテーション賞:ポスターセッション2

< F室 >

F-111 9:50-10:50 優秀プレゼンテーション賞:ショートプレゼンテーション1

- F-1101 タービン翼前縁形状が端壁面上の熱伝達に及ぼす影響
*瀬口 淳一(大阪大), 羽田 哲, 武石 賢一郎, 怒田 成勲
- F-1102 蠕動運動型ポンプの熱流動特性に関する数値解析(第3報)
*黒木 遼(京都大), 巽 和也, 中部 主敬
- F-1103 再層流化過程にあるボアズイユ乱流の非対称性とエネルギー輸送
*福留 功二(名古屋工大), 飯田 雄章, 長野 靖尚
- F-1104 フラクタル格子乱流による高Sc数スカラー混合
*鈴木 博貴(名古屋大), 長田 孝二, 酒井 康彦, 鶴 飼 涼太, 久保 貴
- F-1105 単一/複数リブ付チャンネル乱流熱伝達の空間発展型DNS
*三浦 貴広(新潟大), 松原 幸治, 櫻井 篤
- F-1106 等温度差チャンネル流における進行波状吹出し・吸込みを用いた摩擦抵抗低減と伝熱促進の同時制御
*東 孝祐(慶應大), 守 裕也, 深湯 康二, 小尾 晋之介
- F-1107 高温水溶液塊の二重拡散自然対流に関する数値解析
*佐々木 一仕(山形大), 赤松 正人
- F-1108 3-ブロック型加熱源より生じるサーマルブルームの挙動(加熱源寸法の影響)
*岩間 聖司(山梨大), 一宮 浩市
- F-1109 流動層内フィン付伝熱管に関する研究(フィンピッチの影響)
*薦田 弦(関西大), 本田 亮佑, 梅川 尚嗣, 小澤 守
- F-1110 ノズル出口に発生するCO₂二相流斜め衝撃波に関する研究
中川 勝文(豊橋技科大), *茅野 浩之, 原田 敦史
- F-1111 温度制御可能な自励振動型ヒートパイプの実験的研究
*岩田 直子(JAXA), 小川 博之, 宮崎 芳郎(福井工大)
- F-1112 Modeling of Bubble Generation and Growth in Self-Oscillating Heat Pipe
*Raffles Senjaya (Tokyo Inst. Tech.), Kentaro Mushiga, Tomiaki Kouduma, Yuji Suzuki, Takayoshi Inoue

F-112 11:00-12:20 電場・電荷移動下での伝熱

- F-121 マイクロ波加熱における表面構造の効果
青木 和夫(長岡技科大), 赤堀 匡俊, *谷口 慎弥
- F-122 マイクロ波加熱における内部構造の効果
*青木 和夫(長岡技科大), 赤堀 匡俊, *谷口 慎弥
- F-123 TiO₂粒子充填層内でのコロナ電極を用いた大気圧放電によるオゾン生成の特性
*石丸 和博(岐阜高専), 臼井 貴哉
- F-124 電気移動度の違いを利用したナノ粒子のサイズ選別
*川原 鉄平(九州大), 平 憲作, 友田 正裕, 高田 保之, 河野 正道

F-113 13:50-14:50 優秀プレゼンテーション賞:ショートプレゼンテーション3

- F-1301 マイクロチューブにおけるガス流の流動特性
*吉田 泰浩(東京理大), 洪 定杓, 浅古 豊(首都大), 鈴木 康一(東京理大)
- F-1302 向流型ガス-ガスマイクロチャンネル熱交換器の伝熱特性に及ぼす隔壁厚さの影響
*小山 幸平(首都大), 洪 定杓(東京理大), 浅古 豊(首都大)
- F-1303 微細構造表面におけるマイクロ液滴の濡れ特性
*安藤 隆治(九州工大), 吉田 真一朗, 長山 暁子, 鶴田 隆治
- F-1304 白金系金属含有カーボンナノチューブの合成
*伊藤 恭平(広島大), 井上 修平, 松村 幸彦
- F-1305 大気圧プラズマによるダメージフリープラズマCVD:垂直配向単層カーボンナノチューブ合成メカニズム
*唐津 拓也(東京工大), 岡崎 健, 野崎 智洋
- F-1306 流路形状に特徴づけられた交流非一様電界中の流体および浮遊粒子の挙動
*伏見 光明(慶應大), 古市 朋子, 嘉副 裕, 佐藤 洋平
- F-1307 リブロン表面光散乱法を用いたマイクロミキシング混合液体の表面物性センシングに関する研究(観測波長可変装置の開発とエタノール水溶液への応用)
神津 崇(慶應大), *西村 悠, 宮本 哲郎(日立製作所), 三宅 亮(広島大), 長坂 雄次(慶應大)
- F-1308 炭素ナノ粒子の壁面衝突挙動に関する分子動力学的研究
*戸嶋 隆夫(大阪大), 芝原 正彦, 中村 摩理子
- F-1309 ナノ多孔体内流れのMDシミュレーション(MDとLBMの比較検討)
*竹中 奨(大阪府大), 須賀 一彦, 金城 友之(豊田中研), 兵頭 志明

- F-1310 単層カーボンナノチューブにおけるフォノン散乱条件の統合
*井上 仁人(九州大), 伊藤 洋平, 高橋 厚史
- F-1311 マイクロ波-ポリオール法により合成した銀ナノ粒子を含むSelf-rewetting流体の非線形表面張力特性の制御
*鈴木 智裕(宇都宮大), 佐藤 正秀, 瓜田 侑己, 阿部 宜之(産総研), 飯村 兼一(宇都宮大), デ・パロマ ロベルト(ナポリ大), チェチャーレ アンセルモ, サヴィーノ ラファエロ, 大田 治彦(九州大), 新本 康久, 深萱 正人(SHOKi), 古澤 毅(宇都宮大), 鈴木 昇
- F-1312 電子線を用いたカーボンのナノスケールエッチング
*廣谷 潤(九州大), 生田 竜也, 高橋 厚史, 永山 邦仁
- F-14 15:40-17:20 生産・加工プロセス**
- F-141 高真空アルコール触媒CVD法を用いた単層カーボンナノチューブの低温合成
*岡部 寛人(東京大), 山本 洋平, 井ノ上 泰輝, エイナルソ エリック, 渡辺 誠, 丸山 茂夫
- F-142 ソルボサーマル法によるバルク単結晶育成時の三次元伝熱解析
*増田 善雄(産総研), 鈴木 明, 三川 豊(三菱化学), 鏡谷 勇二(東北大), 石黒 徹, 横山 千昭, 塚田 隆夫
- F-143 レーザーマイクロ溝加工にアブレーションメカニズムが及ぼす影響
*乙藤 拓人(九州大), 川内 進司, 高田 保之, 河野 正道
- F-144 発熱変動ある平板の温度変化を最小にする熱制御技術の検討(モデル予測制御法)
*平澤 茂樹(神戸大), 伊藤 心也
- F-145 流動触媒によるカーボンナノ物質の燃焼合成
*奥山 正明(山形大), 富村 寿夫(九州大), 稲富 康利(九電工)
- < G 室 >**
- G-11 9:50-10:50 優秀プレゼンテーション賞:ショートプレゼンテーション2**
- G-1101 ふく射機性能性表面の放射シミュレーション
*平島 大輔(東京工大), 花村 克悟
- G-1102 マイクロ球自己組織化構造の熱ふく射特性評価
*脇田 健太郎(九州工大), 宮崎 康次, 塚本 寛
- G-1103 水蒸気吸着体による光の単色反射率・吸収率および透過率の測定
濱本 芳徳(九州大), 森 英夫, 赤井 隆文, *福田 達宏
- G-1104 W/O型エマルジョン液滴の加熱過程における昇温速度が油中水滴の凝集に及ぼす影響
*鈴木 芳行(東北大), 原田 拓自, 渡部 弘達, 松下 洋介, 青木 秀之, 三浦 隆利
- G-1105 マルチバーナー上に形成されるメタン・空気予混合火炎の挙動とゆらぎ
*丸山 俊典(長岡技科大), 門脇 敏
- G-1106 予混合水素酸素炎中において高温材料から発生する化学種の計測
*松浦 寛之(名古屋大), 児玉 憲治, 北川 邦行
- G-1107 微粉炭燃焼シミュレーションによるメタンリバーニング技術の効率化
*柚木 啓太(九州大), 山本 剛, 深井 潤
- G-1108 ケミカル調湿システムに用いるロータリーキルン反応器の物質移動特性
*白井 浩一(広島大), 松村 幸彦, 北原 博幸(トータルシステム研究所)
- G-1109 湿式除湿機の除湿/再生器における物質移動特性
*張 莉(東京大), 党 超鋌, 飛原 英治
- G-1110 ループ型熱音響エンジンの高効率化と車両搭載に向けた研究(排ガスからの熱エネルギー回収システムの構築)
納富 信(早稲田大), 勝田 正文, 鈴木 啓史, *平澤 顕, 柳 寿宜, 松平 範光(カルソニックカンセイ), 平瀬 貴之
- G-1111 ループ管方式熱音響冷却システムの実用化に向けた研究(熱音響現象におけるスタックの温度勾配と音波発生との関係)
*小宮 慎太郎(同志社大), 坂本 眞一(滋賀県大), 塚本 大地(同志社大), 渡辺 好章
- G-1112 低圧水素ガスの熱伝導率測定
*諸江 将吾(九州大), ウッドフィールド ピーター(産総研), 木村 浩一(九州大), 深井 潤, 新里 寛英(産総研), 河野 正道(九州大), 藤井 丕夫(産総研), 高田 保之(九州大)
- G-1113 人体熱収支に基づく温熱環境評価
*島崎 康弘(大阪府大), 吉田 篤正, 鈴木 良太, 木下 進一
- G-12 11:00-12:20 物質移動**
- G-121 含水条件下における微細多孔体内の酸素拡散係数測定法
*岩崎 大剛(横浜国大), 宇高 義郎, 田崎 豊(日産自動車)
- G-122 ソーレー強制レイリー散乱法によるポリマー電解質膜内の物質拡散係数測定法の開発(ダイヤモンド窓セルによる測定)
田中 遼平(慶應大), *堀田 純平, 長坂 雄次
- G-123 固体高分子電解質膜内における水の拡散輸送特性の解析
勝田 正文(早稲田大), 山川 裕志, *渡邊 和也, 杉原 悠太, 青谷 幸一郎(日産自動車), 久保 則夫
- G-124 PEFCカソード触媒層構造の発電特性に及ぼす影響(アイオノマー含有率と輸送特性との関係解明)
*松田 秀俊(東京工大), 大間 敦史(東京工大, 日産), 伏信 一慶(東京工大), 岡崎 健
- G-13 13:50-14:50 優秀プレゼンテーション賞:ショートプレゼンテーション4**
- G-1301 生体組織を用いたペルチェクライオプローブによる高精度凍結手術の研究
*武田 洋樹(東北大), 相場 節也, 小宮 敦樹, 圓山 重直

- G-1302 微細流路と相変化マイクロカプセルを利用した電子機器冷却に関する基礎研究
橋本 武裕(富山県大), 松本 光司, 中川 慎二, 石塚 勝
- G-1303 エリスリトール使用型潜熱蓄熱輸送システム
*能村 貴宏(北海道大), 開澤 昭英, 釜野 博臣(栗本鐵工所), 河合 篤, 定塚 徹治(三機工業), 千田 武志, 沖中 憲之(北海道大), 秋山 友宏
- G-1304 生成・分解モデルに基づくCO₂ハイドレート膜厚変化挙動の予測
*松元 佑樹(筑波大), 金子 暁子, 阿部 豊, 山根 健次(海上技術安全研究所)
- G-1305 MEMSセンサによる核沸騰熱伝達機構の研究(温度制御性の改良と熱流評価手法の検討)
*矢吹 智英(明治大), 中別府 修
- G-1306 単一細管内の強制流動沸騰熱伝達に及ぼす質量速度の影響
*馬場 宗明(九州大), 稲田 幸博, 澤田 健一郎, 井上 浩一, 大田 治彦
- G-1307 ハニカム状多孔質体のセル幅が飽和プール沸騰限界熱流束に与える影響
森 昌司(横浜国大), *沈 ロージェ, 福田 直也, 奥山 邦人
- G-1308 プラスチックを用いた減圧沸騰多重効用淡水化装置の開発
岡田 泰之(慶應大), *森川 和己, 佐藤 春樹, 玉井 俊洋(積水化学工業), 大杉 高志
- G-1309 研削加工時における水ミスト冷却が被加工物へ及ぼす効果に関する研究(水ミスト特性の影響について)
磯部 佳成(山口県産業技術センター), *弓立 一哉(山口大), 加藤 泰生
- G-1310 含水多孔質を利用した過熱水蒸気の生成過程
森 昌司, *岸 倫人(横浜国大), 田中 美香子, 奥山 邦人
- G-1311 固体高分子形燃料電池の氷点下起動影響と凍結現象
*齋藤 正亮(北海道大), 田部 豊, 菊田 和重, 近久 武美
- G-1312 酸素添加および温度の効果による燃料電池の一酸化炭素被毒抑制
*荒井 隼人(名古屋大), 森田 成昭, 宮田 康史, 北川 邦行
- G-1313 軟X線によるPEFC内液水分布の可視化
*笹部 崇(東京工大), 津島 将司, 平井 秀一郎, 南勝利(東研), 矢田 慶治
- G-14 15:40-17:20 蓄熱・蓄冷**
- G-141 Feasibility Study of Heat Pipe Ice Storage System Using Natural Energy for Large-Sized Data Center Cooling System
*Gerald Cabusao (Fujikura), Masataka Mochizuki, Koichi Mashiko, Tetsuya Kobayashi
- G-142 細管内におけるアイスラリーの流動および熱伝達特性
*小路 遼太(信州大), 熊野 寛之, 平田 哲夫, 白川 道人, 萩原 陽介
- G-143 再生医療用恒温輸送容器の開発(第3報, 小型輸送容器の試作と性能評価)
*藤居 達郎(日立製作所), 関谷 禎夫, 楠本 寛, 井沼 俊明(日立物流)
- G-144 球カプセル内相変化物質への潜熱蓄熱促進
小泉 博義(電気通信大), *松田 和也, 金 云海, 相馬 久美子
- G-145 過冷却蓄熱利用床暖房パネルの動作特性
*平野 聡(産総研), 柴崎 則雄(アルス), 工藤 和明(ダテックス)
- < I室 >**
- I-11 9:30-10:50 分子動力学1**
- I-111 固液接触挙動に及ぼす壁面電荷の影響に関する分子動力学解析
*小川 和也(大阪大), 山口 康隆, 黒田 孝二(大日本印刷), 中島 但, 大野 浩平, 藤村 秀夫
- I-112 マグネタイト-水界面における溶出分子の物質輸送特性
*菊川 豪太(東北大), 加藤 惇平, 小原 拓
- I-113 せん断流中における脂質二重膜の運動量伝搬特性
*中野 雄大(東北大), 菊川 豪太, 小原 拓
- I-114 壁面ナノ構造物間隔が固液界面熱抵抗へ与える影響
*竹内 清(大阪大), 芝原 正彦
- I-12 11:00-12:00 分子動力学2**
- I-121 電磁波との相互作用から見た水の比熱
*田中 修(三木再生エネルギー開発研究所)
- I-122 カーボンナノチューブへの金属蒸着の分子動力学
*松尾 哲平(東京大), 塩見 淳一郎, 丸山 茂夫
- I-123 斜め蒸着によるウイスカ生成の分子機構
*奥村 俊明(京都大), 松本 充弘
- I-13 13:50-15:30 分子動力学3**
- I-131 微小液滴の固体壁面への衝突シミュレーション
*田浦 剛(京都大), 松本 充弘
- I-132 Isotropic Periodic Sum法およびWolf法を用いたMDシミュレーション
*高橋 和義(慶應大), 成見 哲, 泰岡 顕治
- I-133 各種加熱パルスにおける伝搬の熱エネルギー伝達特性
*薛 敏超(富山大), プロトキヒナ タチアナ
- I-134 水/メタン気液界面の分子動力学シミュレーション
*坂牧 隆司(慶應大), 成見 哲, 大村 亮, 泰岡 顕治
- I-135 ナノスプラッシュ
*穴見 真実子(京都大), 松本 充弘
- I-14 15:40-16:40 分子動力学4**
- I-141 分子動力学法による白金表面上の水素解離現象
*徳増 崇(東北大), 伊藤 大吾
- I-142 NiクラスターとO₂の表面相互作用(力とエネルギー特性)
*プロトキヒナ タチアナ(富山大)

- I-143 密度汎関数法によるPt触媒表面付近における酸素分子結合状態の研究
*山田 健太郎(東京工大), 伏信 一慶, 岡崎 健
- < J室 >**
- J-11 9:30-10:30 自然対流・複合対流1**
- J-111 2枚の垂直加熱平板上端間に設置された水平上向き加熱平板まわりの自然対流の流動と伝熱
*木村 文義(兵庫県大), 井上 俊, 北村 健三(豊橋技科大)
- J-112 中和反応における熱・物質輸送に及ぼす酸解離の影響
*田之上 健一郎(山口大), 吉富 雅明, 田村 豊佳, 西村 龍夫, アレキサンドル モレガ(ブカレスト工大)
- J-113 平板列挿入による自然対流層流熱伝達の促進とその数値解析
*梶田 欣(名古屋市工研), 辻 俊博(名古屋工大), 松野 匡輔
- J-12 11:00-12:00 自然対流・複合対流2**
- J-121 加熱回転場における共存対流熱伝達に関する研究
*織江 潤一(岩手大), 小野寺 高之(三菱電機), 廣瀬 宏一(岩手大)
- J-122 横風を受ける火炎後流に発生する竜巻状の渦の発生形態
*篠原 雅彦(消防研究センター), 松島 早苗
- J-123 振動立方体内の熱対流に及ぼす振幅効果の数値的研究
*藤田 識司(同志社大), 中村 憲通, 舟木 治郎, 谷川 博哉(舞鶴高専), 平田 勝哉(同志社大)
- J-13 13:50-15:30 自然対流・複合対流3**
- J-131 鉛直平板上の自然・共存対流乱流境界層の直接数値解析
*アベディン モハマド ジョイナル(名古屋工大), 辻 俊博, 齊木 康人, 服部 康男(電中研)
- J-132 ふく射を伴う浮力乱流の直接シミュレーション
*高桑 賢二(新潟大), 櫻井 篤, 松原 幸治, 圓山 重直(東北大)
- J-133 側壁非対称加熱される水平正方形流路内の三次元複合対流に及ぼすプラントル数の影響
*鳥山 孝司(山梨大), 一宮 浩市
- J-134 一様な鉛直下降気流中に設置された水平上向き加熱平板まわりの共存対流の流動と伝熱
北村 健三(豊橋技科大), *大畑 亮祐, 光石 暁彦
- J-135 一様な鉛直下降水流中に設置された水平上向き加熱平板まわりの共存対流の流動と伝熱
*北村 健三(豊橋技科大), 井尻 順章, 光石 暁彦
- J-14 15:40-17:20 自然対流・複合対流4**
- J-141 密閉空間内の自然対流に及ぼす内部物体の大きさと配置の影響
*北 享幸(富山県大), 西出 知樹, 舟渡 裕一
- J-142 水平二重円管内の揺動する浮カブルームの速度・温度同時計測
*田中 裕司(同志社大), 石田 堯庸, 千田 衛, 稲岡 恭二
- J-143 鉛直二平板間密度成層内自然対流熱伝達に及ぼす初期温度の影響(伝熱面間距離の影響を含めた詳細な検討)
姫野 修廣(信州大), *杉本 太郎, 水嶋 康夫
- J-144 不凝縮性ガスを含む液体タンク内圧力変化の評価
亀谷 雄樹(IHI), *今井 良二
- J-145 安定成層内の気体混合過程に関する研究
*武田 哲明(山梨大)

————— 第2日 6月3日(水) —————

- < B1室 >**
- B1-21 9:00-10:20 沸騰5**
- B1-211 溶射皮膜を有する狭隘流路内沸騰熱伝達に及ぼす流路姿勢の影響
*富田 亮平(神戸大), 繁原 領太, 浅野 等, 杉本 勝美, 竹中 信幸
- B1-212 極細クライオプローブ開発のための沸騰伝熱基礎実験
*岡島 淳之介(東北大), 円山 重直, 小宮 敦樹
- B1-213 ミニチャンネル内沸騰現象における薄液膜厚さの測定
*張 耀華(横浜国大), 柏原 雄貴, 宇高 義郎
- B1-214 ミニチャンネル内沸騰現象における薄液膜形成機構と特性
張 耀華(横浜国大), *上赤 匠, 宇高 義郎
- B1-22 10:30-12:10 二相流1**
- B1-221 運動量と熱輸送を考慮した二次元二相流膨張波の解析
*原田 敦史(豊橋技科大), 中川 勝文, 茅野 浩之
- B1-222 気泡を含んだチャンネル内上昇乱流の熱流動特性に関する直接数値シミュレーション
*田中 満(京都工繊大), 松井 則政, 宮嶋 陽, 萩原 良道
- B1-223 微細気泡を含む鉛直チャンネル内層流共存対流の流動および熱伝達特性
*遠藤 弘樹(京都工繊大), 木村 克也, 北川 石英, 萩原 良道
- B1-224 出力・流量減少事象における BWR 炉内流動過渡応答

*古谷 正裕(電中研), 原 貴(東京電力), 溝上 伸也
 B1-225 超音波流速分布計を用いた流水中単一大気泡前方の流れ場の計測
 *南川 久人(滋賀県大), 石田 智己, 安田 孝宏

B1-23 13:40-15:00 二相流2

B1-231 高出口乾き度条件におけるマイクロ管内強制流動沸騰
 *福田 健太郎(東京大), 鹿園 直毅, 新山 泰徳(デンソー), 八束 真一

B1-232 垂直矩形細管内上昇流の沸騰熱伝達と圧力損失
 *宮田 一司(九州大), 榎木 光治, 森 英夫, 濱本 芳徳

B1-233 非線形溶液の局所加熱時の微細管内流動沸騰現象
 *金子 高広(芝浦工大), 小野 直樹, 西口 昇太郎(神奈川大), 庄司 正弘

B1-234 マイクロ管内スラグ流の液膜厚さに及ぼす加速度の影響
 *韓 榮培(東京大), 鹿園 直樹

< B2室 >

B2-21 9:00-10:20 OS: 水素エネルギー技術1

B2-211 水素吸蔵放出にともなう水素吸蔵合金層の膨張・収縮率の測定
 濱本 芳徳(九州大), 森 英夫, 江藤 淳朗, *三谷 賢史, 金矢 侑己

B2-212 気液二相流が水電解セルに与える影響
 古賀 賢(九州大), 佐々木 一成, *伊藤 衡平

B2-213 固体高分子型燃料電池ガス拡散層内細孔有効半径分布に及ぼすセパレータ・リブの効果
 *中川 博史(北海道大), 工藤 一彦, 黒田 明慈, 白石 遼太郎

B2-214 PEFC 単セル内温度・物質・電流密度分布に及ぼすガス供給方法の影響評価
 *森本 淳志(三重大), 西村 顕, 澁谷 健一, 廣田 真史, 中村 義弘(東邦ガス), 小島 正嗣, 成田 雅彦

B2-22 10:30-12:10 OS: 水素エネルギー技術2

B2-221 核ラベリング計測による PEFC 電解質膜内水分輸送解析
 *藤井 義喜(東京工大), 津島 将司, 平井 秀一郎

B2-222 PEFC 内水蒸気・液体水透過に対するガス拡散層の内部構造の影響
 *宮本 淳一(産総研), 大平 淳平, 渡部 那美, 横山 浩司, 山本 義明

B2-223 固体高分子型燃料電池内の水分挙動に及ぼすセパレータリブの影響
 *谷川 洋文(九州工大), 宮崎 裕樹, 鶴田 隆治

B2-224 親水性切り欠き断面繊維の水分蒸散特性モデル化(固体高分子型燃料電池親水性ガス拡散層の水排

出特性)
 工藤 一彦(北海道大), 黒田 明慈, 鈴木 隼人, *柴谷 章仁

B2-225 感水試験紙による PEFC アノード側水分状態の可視化計測
 *横井 陽馬(京都工繊大), 西田 耕介, 津島 将司(東京工大), 平井 秀一郎

B2-23 13:40-15:00 OS: 水素エネルギー技術3

B2-231 レーザ誘起蛍光を用いた燃料電池内ガス流動の計測
 *鈴木 崇弘(東京工大), 津島 将司, 平井 秀一郎

B2-232 ラマン分光による PEFC 電解質膜内水の動的挙動解析
 *伊藤 礼(東京工大), 田淵 雄一郎, 津島 将司, 平井秀一郎

B2-233 近赤外吸収分光法に基づく PEFC カソード側電極内の水分量測定
 *石伊 志行(京都工繊大), 西田 耕介, 津島 将司(東京工大), 平井 秀一郎

B2-234 NMR センサーによる燃料電池の発電電流と PEM 内含水量の空間分布と時間変化の計測
 *横内 康夫(慶應大), 小川 邦康, 拝師 智之(MRTechnology), 伊藤 衡平(九州大)

< C1室 >

C1-21 9:00-10:00 強制対流3

C1-211 自動車用触媒コンバータの気流デフレクタ性能におよぼす脈動流の影響
 *大田 匡哉(同志社大), 田中 慎也, 谷川 博哉(舞鶴高専), 舟木 治郎(同志社大), 平田 勝哉

C1-212 壁面からのポリマー溶液滲出による乱流摩擦抵抗低減の実験的研究(壁面摩擦係数とポリマー濃度分布の測定)
 *小野瀬 泰幸(東京理大), 本澤 政明, 杉田 奨, 岩本 薫(東京農工大), 安藤 裕友(海技研), 千田 哲也, 川口 靖夫(東京理大)

C1-213 曲管部における冷房用潜熱マイクロカプセルスラリーの熱伝達に関する研究
 堀部 明彦(岡山大), 春木 直人, *藤原 裕一

C1-22 10:30-11:50 強制対流4

C1-221 曲がりチャンネル乱流熱伝達の制御に関する基礎的研究
 *内田 高志(新潟大), 松原 幸治, 三浦 貴広, 櫻井 篤

C1-222 デルタ翼列による T 形合流管内の乱流混合促進
 毛利 江里(名古屋大), 藤永 紘基, 宮越 智也(三重大), *廣田 真史, 浅野 秀夫(デンソー)

C1-223 ナノ構造伝熱面の伝熱特性に関する研究
 *江里 幸一郎(原子力機構), 谷川 尚, 榎枝 幹男

C1-224 風向きが変化する横風を受ける高温噴流の温度場推定(ステレオ画像による風向きの抽出と温度推定

- 法の改善)
*中谷 恵三(慶應大), 手塚 英昭, 森 治嗣(東京電力), 菱田 公一(慶應大)
- C1-23 13:40-15:00 熱機器・熱交換器1**
- C1-231 多目的最適技術を用いたピンフィンヒートシンク的设计
*堀内 敬介(日立製作所), 西原 淳夫, 杉村 和之
- C1-232 熱音響自励振動の数値シミュレーション
*小清水 孝夫(北九州高専), 笠尾 大作, 久保田 裕巳(九州大), 高田 保之, 伊藤 猛宏(東亜大)
- C1-233 ワイヤ型JTマイクロ冷凍機の研究
*河野 正道(九州大), 田辺 厚, 鍛本 将志, 久保田 裕巳, 高田 保之
- C1-234 矩形断面を持つマイクログループ内の蒸発における熱物質輸送特性
*渡辺 裕己(東京大), 白樫 了, 西尾 茂文
- < C2室 >**
- C2-21 9:00-10:20 OS: エネルギー変換システム1**
- C2-211 直接内部改質を行う中低温作動平板型 SOFC の数値解析
山本 康弘(京都大), *岩井 裕, 齋藤 元浩, 吉田 英生
- C2-212 SOFC 電極性能と反応領域に対する特性長さの影響
*紺野 昭生(京都大), 岩井 裕, 齋藤 元浩, 吉田 英生
- C2-213 Pt(111)表面における酸素還元反応経路と過酸化水素の生成挙動
*大間 敦史(東京工大, 日産), 市屋 卓(東京工大), 伏信 一慶, 岡崎 健
- C2-214 燃料電池の分光計測 [12] ラマン分光法によるその場温度計測
*森田 成昭(名古屋大), 野田 和孝, 宮田 康史(名古屋市工研), 北川 邦行(名古屋大)
- C2-22 10:30-12:10 OS: エネルギー変換システム2**
- C2-221 進化的アルゴリズムによるソーラーコンセントレータの最適設計
*山田 昇(長岡技科大), 小川 敬久, 西川 太朗
- C2-222 太陽エネルギー高効率利用のための熱電変換システムの検討
*高濱 遼平(宮城大), 矢野 歳和, 鈴木 一行(JAST), 木皿 且人(JAXA), 久保 則文(ジーイーエス), 石川 東一郎(JAST), 新野 正之
- C2-223 プレート式熱交換器内部熱流動に及ぼすプレート形状の影響
*鳥居 修一(熊本大), 泉 啓太, 小糸 康志, 富村 寿夫
- C2-224 ループ管方式熱音響冷却システムの実用化に向けた研究(振動流場において熱交換器の形状が冷却能力および管内音場に与える影響)
- *大石 雄(同志社大), 坂本 眞一(滋賀県大), 北谷 裕次(同志社大), 渡辺 好章
- C2-225 超臨界 CO₂ を作動媒体とするガスタービンの原理検証実験計画**
*宇多村 元昭(東京工大)
- C2-23 13:40-15:00 OS: エネルギー変換システム3**
- C2-231 ソノケミストリ効果によるバイオディーゼル燃料(BDF)の高効率合成および応用
朱 寧(静岡理工科大), *越前 友紀, 土屋 高志, 張 威縉(南台科技大), 蔣 勇(中国科技大)
- C2-232 水エマルジョン燃料のボイラへの利用に関する研究
*チルムグ(東京工大), 吉川 邦夫, 竹下 昌徳(クリーンメカニカル), 藤原 浩一
- C2-233 多孔質 Ni 触媒を用いたセルロースの熱分解に関する一考察
*佐藤 翔(東京工大), 青木 一晃, 花村 克悟
- C2-234 過熱水蒸気を用いた高含水廃棄物再燃料化システムの最適運転手法の提案
*丸山 直樹(三重大), 田中 大輔, 玉田 充, 清水 俊紀(アード), 廣田 真史(三重大)
- < D室 >**
- D-21 9:00-10:20 マイクロ伝熱1**
- D-211 垂直配向単層カーボンナノチューブ膜の熱伝導特性について
*石川 桂(東京大), 田中 三郎(九州工大), 宮崎 康次, 塩見 淳一郎(東京大), 丸山 茂夫
- D-212 p型ビスマステルライドを用いたナノ多孔体薄膜の熱伝導率計測
*田中 三郎(九州工大), 宮崎 康次, 塚本 寛
- D-213 長距離バリスティック熱伝導をもたらす新材料(1. ナノセンサを用いた熱伝導率計測)
*高橋 厚史(九州大), 生田 竜也, 伊藤 洋平, 張興(清華大), 藤井 丕夫(産総研)
- D-214 長距離バリスティック熱伝導をもたらす新材料(2. 非平衡分子動力学法による熱輸送解析)
*伊藤 洋平(九州大), 井上 仁人, 高橋 厚史
- D-22 10:30-12:10 マイクロ伝熱2**
- D-221 カーボンナノチューブ内部における単層カーボンナノチューブの生成
*伊豆 好史(東京大), 塩見 淳一郎, 丸山 茂夫
- D-222 固体熱伝導解析のためのDSMC法の開発
岡野 真弥(京都大), 栗田 祐介, *松本 充弘
- D-223 マイクロレンチ内部のSBA-15膜の1次元配向
*巽 直也(東京大), 大宮司 啓文, 片岡 祥(産総研), 遠藤 明
- D-224 垂直配向単層カーボンナノチューブ膜の色素増感型太陽電池電極への応用
大川 潤(東京大), *エリック エイナルソン, 塩見 淳一郎, 丸山 茂夫
- D-225 カーボンナノチューブにおける一次元励起子濃度

- 上限の存在(非線形蛍光励起分光と理論モデル)
*村上 陽一(東京大, ライス大), 河野 淳一郎(ライス大)
- D-23 13:40-15:00 マイクロ伝熱3**
- D-231 二溶液混合場における壁面ゼータ電位および電気浸透流速の同時計測
田中 雄太(慶應大), 宮川 修, 嘉副 裕, 佐藤 洋平
- D-232 Experimental Investigation of Microchannel Fluid Flow
Ying Wang (Beijing Univ. Tech.), Yanhua Diao, *Yaohua Zhao
- D-233 マイクロチューブを流れるガス流の熱伝達特性
*山本 貴晴(東京理大), 洪 定杓, 浅古 豊(首都大), 鈴木 康一(東京理大)
- D-234 固体基板上を拡がる液滴コンタクトライン前方での先行薄膜形成過程
*上野 一郎(東京理大), 廣瀬 寛二, 木崎 裕介
- < F室 >**
- F-21 9:00-10:20 熱物性1**
- F-211 薄板材料の誘導加熱実験
*松島 栄次(大阪工大), 八重嶋 省吾
- F-212 偏光近接場を用いた高感度ナノスケール温度測定手法の開発(第一報 測定原理の検証および従来法との感度比較)
笠掛 利彰(慶應大), *保坂 俊輔, 田口 良広, 斎木 敏治, 長坂 雄次
- F-213 スタンプ型接触センサによる固体の熱輸送性質の測定に関する解析
*大和田 知希(九州大), 吉田 哲郎, 内田 悟, 高松 洋
- F-214 ボイドスラブの有効熱伝導率の推算式について
*富村 寿夫(熊本大), 小糸 康志, 鳥居 修一, 柳謙一(九州大), 山崎 賢治(ダイサン), 峠元 幹也
- F-22 10:30-12:10 熱物性2**
- F-221 MEMS を用いた複合熱分析法の研究
*杉本 拓也(明治大), 宮川 幸弘, 中別府 修
- F-222 マイクロビームセンサによる極微量流体サンプルの熱伝導率測定法(理論解析による検討)
*田中 利幸(九州大), 稲田 教介, 内田 悟, 高橋厚史, 藤井 丕夫(産総研), 高松 洋(九州大)
- F-223 熱伝導異方性を有する各種金属繊維材料の熱伝導率測定
*春木 直人(岡山大), 稲葉 英男(津山高専), 堀部 明彦(岡山大), 川本 裕太
- F-224 Comparison of Calculation Methods for the Transient Short-Hot-Wire Thermal Conductivity Measurement Problem
*Peter Lloyd Woodfield (AIST), Shogo Moroe (Kyushu Univ.), Jun Fukai, Motoo Fujii (AIST), Yasuyuki Takata (Kyushu Univ.), Kanei Shinzato (AIST)
- F-225 過渡レンズ効果における光・物質・温度場の相互作用の基礎研究
*ドアンホン ドク(東京工大), 千々岩 宗弘, 山崎公晴, 伏信 一慶, 岡崎 健
- F-23 13:40-15:00 熱物性3**
- F-231 レーザー誘起誘電泳動を用いた新しい光学的小型拡散センサーの研究(第一報:測定原理の妥当性の検証及び相互拡散現象の観察)
蛭井 明(慶應大), *猪谷 恒一, 田口 良広, 長坂 雄次
- F-232 廃食用油バイオディーゼル燃料および粗グリセリンの密度の温度依存性
須知 成光(秋田県大), *加藤 慎也, 日向野 三雄
- F-233 混合プラスチック充填層の昇温過程における減容速度の成分濃度依存性
*吉田 篤史(山口大), 田之上 健一郎, 西村 龍夫, 山崎 慶, 川中 隆司, 横田 守久(宇部興産)
- F-234 低温高圧域における露点測定と露点推算法
*石田 賢治(佐賀大), 門出 政則, 柴村 孝基, 石原 大寛
- < G室 >**
- G-21 9:00-10:00 ふく射伝熱1**
- G-211 温度・濃度の乱流変動が炉内放射伝熱に及ぼす影響の基礎的検討
*小西 健也(京都工繊大), 岡本 達幸
- G-212 ウォーターカーテンハウスによる放射伝熱制御
*伊吹 竜太(宮城大), 岩崎 泰永(宮城農園研)
- G-213 高温条件下における大規模なシェルアンドチューブ型熱交換器の3次元数値解析
*半田 雅人(日立), 山本 研二, 下郡 嘉大(パブ日立)
- G-22 10:30-12:10 ふく射伝熱2**
- G-221 エバネッセント波による熱光起電力発電の高密度化に関する研究
*浅野 雅夫(東京工大), 谷口 祐司, 増原 鉄平, 花村克悟
- G-222 コンポジット面で覆われた太陽熱木材乾燥ハウスの性能解析と実証試験
馬場 弘(元北見工大), *金山 公夫, 古賀信也(九州大), 菅原 智美(マルショウ技研)
- G-223 コンポジット面で覆われた不透明ハウスへの太陽光の入射及び集熱解析
*金山 公夫(元北見工大), 馬場 弘, 古賀 信也(九大), 菅原 智美(マルショウ技研)
- G-224 放射冷却
* Ahmad Jalilvand (Fujikura), Masataka Mochizuki, Aliakbar Akbarzadeh (RMIT Univ.), Raneep Singh
- G-225 冬の浴室の壁の温度分布とその壁と体表面との間のふく射伝熱

- *牧野 俊郎(京都大)
- G-23 13:40-15:00 ふく射伝熱3**
- G-231 屋根融雪において内部構造が融雪に及ぼす影響
安原 薫(山形大), *柳田 康一, 川津 佑太, 横山 孝男, 阿部 修(防災科研)
- G-232 凝縮媒体境界面を含んだ閉空間におけるふく射-対流複合伝熱数値解析
大嶋 健太郎(横浜国大), *酒井 清吾, 円山 重直(東北大)
- G-233 強い多重散乱効果を伴う粒子群中のふく射伝熱問題への計算電磁気学からのアプローチ
*岡本 達幸(京都工繊大), 名塩 博史
- G-234 複合2重サイクル境界条件をもつ Stokes 第2問題
*越後 亮三
- < I室 >**
- I-21 9:00-10:00 多孔質体の伝熱1**
- I-211 多孔質内における気泡トラップメカニズムと安定性
*細川 貴寛(徳島大), 末包 哲也
- I-212 マイクロフォーカスX線CTによる水飽和砂岩に注入された非混和流体の可視化解析
*片岡 亮人(東京工大), 植村 豪, 津島 将司, 平井 秀一郎
- I-213 保水性ブロックの熱・水分輸送量屋外実測評価に関する研究
*木下 進一(大阪府大), 奥野 直樹, 竹腰 健一, 吉田篤正
- I-22 10:30-12:10 多孔質体の伝熱2**
- I-221 X線ラジオグラフィによる空孔径分布を付加した微細多孔体内の液水可視化解析
田崎 豊(日産自), 青木 敦, 宮田 智生, 宇高 義郎(横浜国大), 岩崎 大剛, *近藤 俊介, 青木 康祐
- I-222 LESによる多孔質内乱流の数値解析
*江原 真司(東北大), 横峯 健彦(九州大), 清水 昭比古
- I-223 二重構造多孔質体の透過率
*佐野 吉彦(静岡大), 桑原 不二郎, 野口 康太, 中山 顕
- I-224 コア部に多孔材を有する管路内強制対流の数値解析(第1報:解析的検討)
*Chen Yang(静岡大), Wei Liu(HUST), 中山 顕(静岡大)
- I-225 ブリンクマン・フォルクハイマー方程式を用いた格子ボルツマン法による異方性多孔質体内自然対流解析
*瀬田 剛(富山大)
- I-23 13:40-15:00 多孔質体の伝熱3**
- I-231 多孔質角柱まわりの熱流動特性
*柿本 益志(静岡大), 岩口 泰輔, 和泉 勸, 増岡 隆士(北九州市大)
- I-232 球充填管を用いた高プラントル数流体の伝熱促進法に関する研究
*清水 克矢(東北大), 結城 和久, 橋爪 秀利, 相良 明男(NIFS)
- I-233 連結および非連結多孔材の界面熱伝達
*桑原 不二郎(静岡大), 佐野 吉彦, Liu Jianjun(武漢工学院), 中山 顕(静岡大)
- I-234 膨潤を伴う粒子充填層の透水と電気浸透
*赤堀 匡俊(長岡技科大), 青木 和夫, 向井 勇作
- < J室 >**
- J-21 9:00-10:20 自然エネルギー1**
- J-211 数値シミュレーションによる各種舗装体の融雪能力検討
*山口 正敏(JGD), 横山 孝男(山形大), 沼澤 喜一(JGD), 堀野 義人, 安彦 宏人, 安原 薫(山形大)
- J-212 地下水を含む大地熱利用によるヒートパイプ屋根融雪
*横山 孝男(山形大), 菊地 将光(舟形エコ), 戸津 広司(山形大), 大下 真史, 八重樫 健太, 安原 薫
色素増感太陽電池における電解質添加物の効果に関する研究
*田浦 秀俊(東京大), 大宮 啓文
- J-214 長期蓄熱のためのソーラーシステムの稼働特性
*馬場 弘(元北見工大), 金山 公夫
- J-22 10:30-12:10 自然エネルギー2**
- J-221 地中熱・太陽熱を用いた融雪システムの開発
*山端 信也(福井大), 平濱 泰徳, 永井 二郎, 宮本 重信(福井県), 山崎 三知朗
- J-222 大地の浄化効果を兼ねた穴開き暗渠管による雪氷冷熱採取と除湿
横山 孝男(山形大), *芹澤 尚宜, 井山 浩一, 安原 薫, 杉澤 隆宏(山形農大)
- J-223 雪氷冷熱と自然換気を利用した空調システム
横山 孝男(山形大), *鈴木 伸幸, 日下 隆文, 奥山 博康(清水建設), 宮崎 健(山陽精機), 安原 薫(山形大)
- J-224 雪山冷房システムにおける融雪水の有効利用
横山 孝男(山形大), *中村 亮, 阿部 大佑, 安原 薫, 佐藤 重光(尾花沢)
- J-225 海洋バイオマス利用によるCO₂吸収と新エネルギー開発に関する研究
*瀬名波 出(琉球大), 行本 正雄(中部大), 平岡 雅規(高知大)
- 15:10-16:10 < D室 > 特別講演
「歴史都市・京都の景観・環境の創生」
京都大学 門内 輝行 教授**
- 16:20-17:40 < D室 > 総会**
- 18:00-20:00 < さくら > 懇親会**

— 第3日 6月4日(木) —

< B1室 >

- B1-31 9:40-11:00 二相流3**
- B1-311 分岐管を用いた固液二相流の分配特性(粒子の流れと分離)
奥井 隆宗(福井大), *田上 隆二, 新田 高士, 太田 淳一
- B1-312 浮遊する液滴の界面振動に関する研究
*鈴木 宏幸(東日本トランスポート), 上野 義史(スズキ), 二宮 尚(宇都宮大)
- B1-313 電解質水溶液表面での気泡の寿命測定
*川島 達生(京都大), 田中 康太郎, 松本 充弘
- B1-314 2次元矩形容器内における固体微粒子群の離散粒子法による熱流動解析
*山口 朝彦(長崎大), 金丸 邦康
- B1-32 11:10-12:10 凝縮伝熱**
- B1-321 ガスクーラにおける超臨界圧二酸化炭素冷却熱伝達への潤滑油種の影響
星加 啓太郎(東京大), *党 超鋌, 飛原 英治
- B1-322 微細構造面の凝縮熱伝達に関する研究
大竹 浩靖(工学院大), 小泉 安郎(信州大), *三宅 聡一郎(工学院大)
- B1-323 マランゴニ滴状凝縮における伝熱面温度勾配下の表面張力差液体移動機構
*陳 志豪(横浜国大), 宇高 義郎
- B1-33 13:30-14:30 蒸発伝熱**
- B1-331 高温面に衝突する微小液滴における表面性状の影響
*日高 澄具(九州大), 石原 寛也, 田頭 圭祐, 河野 正道, 高田 保之
- B1-332 スプレー液滴を用いた高温面の非定常冷却伝熱
*光武 雄一(佐賀大), 門出 政則, 篠原 翼, 佐藤 徳朗
- B1-333 表面がノコギリ刃状の高温面上に滴下された液滴の挙動
*高島 武雄(小山高専)
- *坪田 晶博(東京工大), 田渕 雄一郎, 津島 将司, 平井秀一郎
- B2-313 PEFC 被毒に及ぼす空气中混入不純物濃度と加湿条件の影響**
*金子 佳亮(東京工大), 津島 将司, 平井 秀一郎
- B2-314 固体高分子形燃料電池における白金高効率利用のための3相界面モデル解析**
*田部 豊(北海道大), 高松 宏行, 近久 武美
- B2-32 11:10-12:10 OS: 水素エネルギー技術5**
- B2-321 遠隔操作機能を兼ね備えた高圧 PVT 測定装置の開発および水素の PVT 測定
*迫田 直也(九州大), 進藤 健太, 新里 寛英(産総研), 河野 正道(九州大), 高田 保之, 藤井 丕夫(産総研)
- B2-322 多孔質体を用いた液体メタノールからの水素のパッシブ生成
奥山 邦人(横浜国大), 森 昌司, *田中 美香子
- B2-323 細管法による高圧水素ガスの粘性係数の測定
Elin Yusibani (AIST, Kyushu Univ.), Peter Llyod Woodfield (AIST), Kan'ei Shinzato, Masamichi Kohno (Kyushu Univ.), Yasuyuki Takata, Fujii Motoo (AIST)
- B2-33 13:30-14:50 OS: 水素エネルギー技術6**
- B2-331 多孔体セパレータを有する固体高分子形燃料電池の性能および内部現象解析
*森岡 怜史(北海道大), 田部 豊, 菊田 和重, 近久 武美, 小境 正也(日立製作所)
- B2-332 固体高分子電解質膜の透湿過程における濃度拡散と物質伝達
*津島 将司(東京工大), 鶴本 真介, 瀧田 晋平, 平井 秀一郎, 田渕 雄一郎, 久保 則夫(日産自動車), 青谷 幸一郎
- B2-333 高分子形燃料電池の多孔質内の物質移動モデリング
*大島 伸行(北海道大), 劉 娟芳, シヤハ リタン クマ, 栗原 央流
- B2-334 PEFC カソード触媒層における物質移動・過電圧分布の3次元 LBM シミュレーション
瀧田 晋平(東京工大), 津島 将司, *平井 秀一郎

< B2室 >

- B2-31 9:40-11:00 OS: 水素エネルギー技術4**
- B2-311 膜電極接合体界面の輸送抵抗が PEFC 非定常発電特性に及ぼす影響
*眞鍋 壮(横浜国大), 上村 有輝, 大洞 健治, 荒木 拓人, 恩田 和夫(豊橋技科大)
- B2-312 原子間力顕微鏡による加湿条件下 PEFC 電解質膜表面ナノクラスター構造解析

< C1室 >

- C1-31 9:40-11:00 熱機器・熱交換器2**
- C1-311 冷凍機用フラットチューブ熱交換器の着霜を伴う伝熱特性(フィンチューブ熱交換器との性能比較)
*大西 元(金沢大), 御堂 翔太, 多田 幸生, 瀧本 昭
- C1-312 着霜現象に及ぼす冷却面表面のぬれ性の影響
*井上 翔(玉川大), 大久保 英敏

- C1-313 狭隘円管群内温度・速度場の同時計測
*根岸 知広(慶應大), 山田 直人, 菱田 公一
- C1-314 Effect of Number of Tube Rows on Heat Transfer Enhancement and Flow Field with Different Vortex Generator Geometries in Fin-and-tube Heat Exchangers
*Mohammad Mustafa Akbari (Tokyo Univ. A&T), Akira Murata, Kaoru Iwamoto, Hiroshi Saito
- C1-32 11:10-12:10 熱機器・熱交換器3**
- C1-321 湿度操作による空気清浄の研究(浮遊微粒子の粒径分布変化)
*小野田 渚(明治大), 中別府 修
- C1-322 湿度操作による空気清浄の研究(第2報:除湿に伴う微粒子除去効果の解析)
*中別府 修(明治大), 小野田 渚
- C1-323 シャワークリーニングによる環境汚染物質除去に関する実験的研究(悪臭成分に対する水蒸気添加の効果)
姫野 修廣(信州大), *山本 祐二郎, 寺谷 茂
- C1-33 13:30-14:50 熱機器・熱交換器4**
- C1-331 冷媒流路を有する平板フィンで構成された熱交換器の伝熱特性
藤野 宏和(ダイキン), 金 鉉永, *吉岡 俊, 中田 春男
- C1-332 熱交換器一体型遠心ファンの局所熱伝達特性と内部流れ
*川口 清司(富山大), 竹田 知弘
- C1-333 模擬スタックを用いた小型 SOFC の熱制御実験
*上口 聡(京都大), 岩井 裕, 齋藤 元浩, 吉田 英生, 小谷 和史(大日本印刷), 芳片 邦聡
- C1-334 超小型過熱蒸気発生器の開発
*飯尾 剛範(関西大), 松本 亮介, 小澤 守, 竹森利和(大阪ガス), 久角 喜徳, 毛笠 明志
- < C2室 >**
- C2-31 9:40-11:00 電子機器の冷却1**
- C2-311 ブロック型電解コンデンサの熱解析モデル評価用ベンチマーク実験
*小泉 雄大(コーセル), 石塚 勝(富山大), 中川 慎二
- C2-312 熱・電気連成解析における緩和時間が発熱に与える影響
*畠山 友行(東京工大), 伏信 一慶, 岡崎 健, 石塚勝(富山大)
- C2-313 低接触圧領域における接触熱コンダクタンスに及ぼす接触圧力と接触界面空隙厚さの影響
*大串 哲朗(広島国際大)
- C2-314 電子機器向け熱コネクタの設計手法の検討
*林 知生(日立機械研)
- C2-32 11:10-12:10 電子機器の冷却2**
- C2-321 HFE を用いた強制流動沸騰による熱輸送
*林 篤史(山形大), 鹿野 一郎, 高橋 一郎
- C2-322 垂直チャンネルモデル内の自然空冷に対するチャンネル壁面間距離の最適値
*西野 泰史(富山大), 石塚 勝, 中川 慎二
- C2-323 相変化材を用いた過渡冷却技術の開発(熱回路網法による熱解析)
*高栗 貞一(富山大), 石塚 勝, 中川 慎二, 高木寛二(オムロン)
- C2-33 13:30-14:50 電子機器の冷却3**
- C2-331 熱設計用空冷ファンの性能予測モデル(筐体および流入口寸法の影響のモデル化と評価)
*福江 高志(富山大), 小泉 雄大(コーセル), 石塚 勝(富山大), 中川 慎二
- C2-332 データセンタ省エネのためのサーバ先進冷却システムの開発
*阿部 宜之(産総研), 深萱 正人(SOHKi), 北川隆(河村電産), 大田 治彦(九州大), 新本 康久, 佐藤 正秀(宇都宮大), 飯村 兼一
- C2-333 ベーパーチャンバー熱設計への Excel 機能の適用
*小糸 康志(熊本大), 富村 寿夫, 志岐 有太, 望月正孝(フジクラ), 鳥居 修一(熊本大)
- C2-334 障害物設置による空冷ファンの性能低下
*中村 元(防衛大)
- < D室 >**
- D-31 9:40-11:00 マイクロ伝熱4**
- D-311 マイクロバブルを利用した中空ポリ乳酸マイクロカプセルの製造
*高田 真吾(東京大), 大宮司 啓文, 竹村 文男(産総研)
- D-312 単一透明伝熱微細管におけるFC-72を用いた強制対流沸騰熱伝達
*河南 治(兵庫県大), 黄 士哲, 川上 和成, 本田逸郎, 川島 陽介, 大田 治彦(九州大)
- D-313 光誘起マランゴニ対流を利用したマイクロチャンネル内気泡の操作
竹内 洋之(東京理大), *元祐 昌廣, 本阿弥 眞治
- D-314 単一空気マイクロバブルの水中への溶解時の温度変化
*石原 勲(関西大), 東 秀昭
- D-32 11:10-12:10 マイクロ伝熱5**
- D-321 垂直配向単層カーボンナノチューブ膜と金属面との接合
*渡辺 誠(東京大), 石川 桂, 大川 潤, 塩見 淳一郎, 丸山 茂夫
- D-322 カーボンナノチューブと周囲材料の界面における熱輸送特性
*塩見 淳一郎(東京大), Fredrik Carlborg (KTH), 丸山茂夫(東京大)

- D-323 微細構造はっ水面内における濡れに関する研究
長谷川 雅人(金沢大), *京谷 佳明, 斎田 裕規
- D-33 13:30-14:50 二相流の数値解析**
- D-331 二相系格子ボルツマン法による核沸騰過程の数値シミュレーション
*田中 義人(信州大), 吉野 正人, 平田 哲夫
- D-332 サブクール・プール沸騰における沸騰・凝縮モデルの構築
*小瀬 裕男(京都大), 河原 全作, 功刀 資彰
- D-333 格子ボルツマン法による濡れ性の異なるパターン基板上での液膜分裂挙動の数値解析
*両角 仁夫(高知工大), 松岡 晃
- D-334 CIP-LSMによる固体壁に衝突する液滴の数値解析
*坂 健太郎(北海道大), 黒田 明慈
- < F 室 >**
- F-31 9:40-11:00 OS: 非線形熱流体现象と伝熱1**
- F-311 液体金属の熱対流パターンに対する磁場の影響
*柳澤 孝寿(海洋機構), 山岸 保子, 浜野 洋三, 田坂 裕司(北海道大), 矢野 可南子, 武田 靖
- F-312 磁場の影響を受けたローレンツ方程式の分岐解
*竹内 亮太(立命館大), 宮野 尚哉, 後藤田 浩
- F-313 内部発熱対流におけるパターン形成と速度場の変化
*田坂 裕司(北海道大), 高橋 潤平, 村井 祐一, 武田 靖, 柳澤 孝寿(海洋機構)
- F-314 層流領域における熱組成ブルームの挙動について
*熊谷 一郎(北海道大), Davaille Anne(パリ地球物理学研究所), 栗田 敬(東京大)
- F-32 11:10-12:10 OS: 非線形熱流体现象と伝熱2**
- F-321 環状セルにおけるマランゴニ対流の可視化実験
*益子 岳史(静岡大), 伊東 俊充
- F-322 温度差マランゴニ効果による自由液膜内非線形対流場とその遷移過程
*渡辺 俊貴(東京理大), 上野 一郎
- F-323 強制対流バルク液層に衝突する液体ジェットの動的挙動
*岡 直人(東京理大), 上野 一郎
- F-33 13:30-14:50 特殊環境下での対流**
- F-331 熔融金属における液柱マランゴニ対流遷移現象
*松本 聡(宇宙機構), 石塚 博弥, 依田 眞一, 依田 英里香(AES), 今石 宣之(九州大)
- F-332 導電性ハーフゾーン液柱の振動マランゴニ対流に及ぼす外部磁場の影響
榎本 拓郎(首都大), *田川 俊夫
- F-333 非定常磁化力対流($Pr > 1$)における温度境界層の考察
Bednarz Tomasz (James Cook Univ.), *Kaneda Masayuki (Osaka Pref. Univ.), Lin Wenxian (James Cook Univ.), Dranga Octavian (Edith Cowan Univ.)
- F-334 外部印加磁場による基板上高分子溶液滴内部の流動制御
*松島 佑介(大阪府大), 金田 昌之, 須賀 一彦
- < G 室 >**
- G-31 9:40-11:00 ヒートパイプ1**
- G-311 単円管内自励振動流による熱輸送特性
*大宮 諒(千葉大), 蓮池 浩長, 田中 学
- G-312 ループヒートパイプの熱特性における作動流体封入量の影響
*小野川 英(名古屋大), 長野 方星, 福吉 芙由子(JAXA), 小川 博之, 永井 大樹(東北大)
- G-313 銀ナノ粒子を含む作動液を用いた平板型マイクロヒートパイプの伝熱特性
勝田 正文(早稲田大), 池田 匡視(古河電工), 吉川 和喜(早稲田大), *森本 裕久
- G-314 自励振動ヒートパイプの研究
*宮崎 芳郎(福井工大), 前田 真克(JAXA), 矢部 高宏
- G-32 11:10-12:10 ヒートパイプ2**
- G-321 熱電変換モジュールを用いたループヒートパイプ動作特性のアクティブ制御
*福吉 芙由子(JAXA), 長野 方星(名古屋大), 小川 博之(JAXA), 永井 大樹(東北大)
- G-322 可変コンダクタンスヒートパイプ(VCHP)安定化技術の開発(第1報:気液分離構造の評価)
*永安 哲也(三菱電機), 一法師 茂俊, 杉本 勝美(神戸大), 浅野 等, 村川 英樹, 竹中 信幸
- G-323 可変コンダクタンスヒートパイプ(VCHP)安定化技術の開発(第2報:中性子ラジオグラフィによる内部流体挙動の可視化)
*杉本 勝美(神戸大), 浅野 等, 村川 英樹, 竹中 信幸, 永安 哲也(三菱電機), 一法師 茂俊
- G-33 13:30-14:50 ヒートパイプ3**
- G-331 きく8号搭載展開型ラジエータの軌道上熱特性
*石川 博章(三菱電機), 野村 武秀, 斎藤 康之(三菱電機エンジニアリング), 川崎 春夫(JAXA), 矢部 高宏, 岡本 篤, 金森 康郎
- G-332 Visualization of a Parallel-Tube Heat Transport Device by Using a High-Speed Camera
*Phan Thanh-Long (Tokyo Univ. A&T), Murata Akira, Mochizuki Sadanari, Iwamoto Kaoru, Saito Hiroshi
- G-333 小型ループヒートパイプの重力効果による熱輸送特性評価
*永井 大樹(東北大), 長野 方星(名古屋大), 福吉 芙由子(JAXA/ISAS), 小川 博之
- G-334 ミニループヒートパイプの伝熱能力
田中 清志(機械振興協会), 勝田 正文(早稲田大), 大内 優, 斎藤 圭祐, *海老原 健介

< I室 >

I-31 9:40-11:00 バイオ伝熱1

I-311 配向単層細胞の凍結保存において凍結方向が生存率に与える影響

*岩間 輝(北里大), 雨森 彩, 松井 俊樹, 氏平 政伸

I-312 非定常温熱ストレスによる細胞損傷・死滅の予測(反応速度論的数学モデルの適用)

石黒 博(九州工大), *野澤 正和(東北大)

I-313 温熱ストレスによる細胞損傷・死滅の反応速度論的定式化に基づく数学モデルとその特性

*石黒 博(九州工大), 野澤 正和(東北大)

I-314 Hep G2 細胞の壁面付着特性の測定

*高野 清(東京大), Provin Christophe, 酒井 康行, 藤井 輝夫, 白樫 了

I-32 11:10-12:10 バイオ伝熱2

I-321 非ニュートン粘性を有するチャネル乱流の直接シミュレーション

*矢澤 秀明(新潟大), 中田 裕希, 松原 幸治, 鳴海 敬倫, 櫻井 篤, 新田 勇

I-322 超音波音場に置かれた生物試料の冷却過程の数値シミュレーション

*多田 幸生(金沢大), 瀧本 昭, 黒川 誠(旭硝子), 大西 元(金沢大)

I-323 レーザー治療のための生体光伝播・熱伝導連成シミュレーション

*櫻井 篤(新潟大), 新田 勇, 圓山 重直(東北大), 小笠原 直也, 岡島 淳之介, 松原 幸治(新潟大)

I-33 13:30-14:30 バイオ伝熱3

I-331 マイクロ波常温乾燥機構の研究

*河野 賢治(九州工大), 森本 竜広, 谷川 洋文, 鶴田 隆治

I-332 人体の産熱を考慮した湯たんぼの暖房効果

*藤井 雅雄(近畿大)

I-333 孤立した植物の熱輸送特性に関する実験的研究

*新居 宏亮(大阪府大), 片岡 由美, 吉田 篤正, 木下 進一

< J室 >

J-31 9:40-11:00 計測技術1

J-311 近赤外光を用いた非接触型微量流量計の研究

*浜崎 英司(電通大), 山下 健作, 大川 晋平, 白石和(東京計装), 落合 洋, 山田 幸生(電通大)

J-312 赤外線サーモグラフィによるガソリンエンジンからの排気ガス流動測定

*奥西 良輔(同志社大), 舟木 次郎, 平田 勝哉

J-313 感温発光ポリマを用いた回転物体表面の非接触温度計測

*坂村 芳孝(富山県大), 眞木 裕教, 飯島 由美(JAXA)

J-314 水の近赤外吸収特性を利用した微量水溶液の温度イメージング(測定精度と試料厚さの関係)

角田 直人(九州大), 尾崎 敦之, 福原 悠子, 近藤 克哉(鳥取大), 有本 英伸(産総研), *山田 幸生(電通大)

J-32 11:10-12:10 計測技術2

J-321 レーザ干渉画像法による噴霧流中の液滴位置検出の精度向上

*重田 雄基(慶應大), 堀江 修一, 一柳 満久, 菱田 公一

J-322 屈折率マッチング法を用いた複雑流路内における非混和性二液体の可視化手法開発

*植村 豪(東京工大), 中盛 知, 津島 将司, 平井 秀一郎

J-323 多重散乱がフラウンホーファー回折法による光学粒度分布計測に及ぼす影響の計算電磁気学による検討

*浦田 裕介(京都工繊大), 岡本 達幸, 齋藤 大介

J-33 13:30-14:50 計測技術3

J-331 遠赤外線ヒータの分光放射特性の簡易評価方法

小笠原 永久(防衛大), 木村 嘉孝(木村技術事務所)

J-332 誘電分光測定による生体物質内の結合水の測定

*白樫 了(東京大), 市倉 優太(東京農工大), 阪根 亮太(芝浦工大), 山田 純

J-333 Fan-beam 投影データに基づく超音波CTによる温度場の計測

*朱 寧(静岡理工大)

J-334 NMR センサーを用いた高分子電解質膜中でのメタノール浸透性と拡散係数の評価

*小川 邦康(慶應大), 拝師 智之(MRTechnology), 伊藤 衡平(九州大)



編集出版部会からのお知らせ —各種行事・広告などの掲載について—



インターネットの普及により情報発信・交換能力の比類ない進展がもたらされました。一方、ハードコピーとしての学会誌には、アーカイブ的な価値のある内容を手にとって熟読できる点や、一連のページを眺めて全貌が容易に理解できる点など、いくら電子媒体が発達してもかなわない長所があるのではないかと思います。ただし、学会誌の印刷・発送には多額の経費も伴いますので、当部会ではこのほど、密度のより高い誌面、すなわちハードコピーとしてぜひとも残すべき内容を厳選し、インターネット（HP：ホームページ、ML：メーリングリスト）で扱う情報との棲み分けをした編集方針を検討いたしました。

この結果、これまで会告ページで取り扱ってきた各種行事・広告などの掲載につき、以下のような方針で対応させていただきたく、ご理解とご協力をお願いする次第です。

対 象	対 応	具体的な手続き (電子メールでの連絡を前提としています。)
本会（支部）主催による行事	無条件で詳細を、会誌とHPに掲載、MLでも配信	申込者は、総務部会長・編集出版部会長・広報委員会委員長・総務担当副会長補佐評議員に記事を同時送信してください。
関係学会や本会会員が関係する組織による国内外の会議・シンポジウム・セミナー	条件付き掲載 会誌：1件当たり4分の1ページ程度で掲載（無料） HP：行事カレンダーに掲載しリンク形成（無料）	申込者は、まず内容を説明する資料を総務部会長に送信してください。審議の結果、掲載可となった場合には総務部会長より申込者にその旨通知しますので、申込者は記事を編集出版部会長（会誌担当）と広報委員会委員長（HP担当）に送信してください。
大学や公的研究機関の人事公募（伝熱に関係のある分野に限る）	会誌：掲載せず HP：条件付き掲載（無料） ML：条件付き配信（無料）	申込者は、公募内容を総務部会長に送信してください。審議の結果、掲載可となった場合には総務部会長より申込者にその旨通知しますので、申込者は記事を広報委員会委員長（HP担当）・総務担当副会長補佐評議員（ML担当）に送信してください。
一般広告 求人広告	会誌：条件付き掲載（有料） HP：条件付き掲載（バナー広告のみ、有料）	申込者は、編集出版部会長（会誌担当）または広報委員会委員長（HPバナー広告担当）に広告内容を送信してください。掲載可となった場合には編集出版部会長または広報委員会委員長より申込者にその旨通知しますので、申込者は原稿を編集出版部会長または広報委員会委員長に送信してください。掲載料支払い手続きについては事務局からご連絡いたします。バナー広告の取り扱いについては http://www.htsj.or.jp/banner.pdf をご参照下さい。

【連絡先】

- ・総務部会長：原村 嘉彦（神奈川大学）：haramy01@kanagawa-u.ac.jp
- ・編集出版部会長：近久武美（北海道大学）：takemi@eng.hokudai.ac.jp
- ・広報委員会委員長：佐藤洋平（慶應義塾大学）：yohei@sd.keio.ac.jp
- ・総務担当副会長補佐評議員：小川邦康（慶應義塾大学）：ogawa@mech.keio.ac.jp
- ・事務局：倉水裕子：office@htsj.or.jp

【注意】

- ・原稿はWordファイルまたはtextファイルをお願いします。
- ・HPはメンテナンスの都合上、掲載は申込月の翌月、また削除も希望掲載期限の翌月程度の時間遅れがあることをご了承願います。
- ・MLでは、原則としてテキスト文の送信となります。pdf等の添付ファイルで送信を希望される場合はご相談ください。

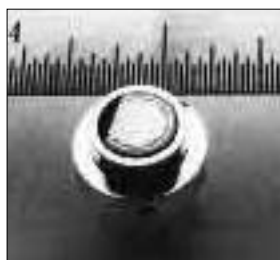
47・48期新入会員（2008.12.18～2009.4.13）正10名・学生22名・賛助2社

資	氏名	所属	資	氏名	所属
学	石神 徹	神戸大学	学	吉田 泰浩	東京理科大学
正	樋口 真司	J F E 技研株式会社	学	杉本 太郎	信州大学
正	馬場 弘		学	黒木 遼	京都大学
正	加藤 和憲	山形県立産業技術短期大学校庄内校	学	岸 倫人	横浜国立大学
正	田中 勝之	いわき明星大学	学	西村 悠	慶應義塾大学
正	今野 武志	(独) 物質・材料研究機構	正	村川 英樹	神戸大学
学	沈 宰暎	東京工業大学	正	深井 尋史	東京工業大学
学	能村 貴宏	北海道大学	正	池田 匡視	古河電気工業 (株)
学	唐津 拓也	東京工業大学	学	諸江 将吾	九州大学
学	鈴木 芳行	東北大学	学	江目 宏樹	東北大学
学	松元 佑樹	筑波大学	学	沈 璐木	横浜国立大学
学	笹部 崇	東京工業大学	学	三浦 貴宏	新潟大学
学	高坂 文哉	名古屋大学	学	小野田 渚	明治大学
学	宮本 年男	名古屋大学	正	峯村 明憲	(株) デンソー
学	北村 弘通	東京工業大学	正	長野 方星	名古屋大学
学	矢吹 智英	明治大学	賛	(株) ファンクショナル・フルイッド	
学	橋本 武裕	富山県立大学	賛	(株) ソフトウェアクレイドル	

熱流束センサー

熱流束センサーは、熱エネルギーの移動密度 (W/cm^2) に比例した直流電圧を出力します。弊社の製品は米国バージニア工科大学が開発した新しい技術をVatell社で商品化したもので、大変手軽に高速・高精度で熱流量の測定をすることができます。特に応答速度の早いこと、センサーからの出力レベルが高いことが特徴で、熱流束マイクロセンサー (HFM) では、応答速度最高6マイクロ秒を達成しています。

熱流束マイクロセンサー



特徴

- 最高速の応答 (約 6μ 秒)
- 850°Cまで外部冷却不要
- 低雑音 / 高感度
- 熱流束と温度を測定
- 伝導、対流、輻射に等感度

使用例

- エンジン内壁の熱伝達状態観察
- ロケットエンジンのトラバース実験
- タービンブレード熱風洞試験
- 自動車用エアバッグ安全性試験
- ジェットエンジンバックファイヤー試験

ガードン型円形フォイルセンサー



センサー本体の構造は、薄膜フォイル・ディスクの中心と周囲の温度差を測定する、差動型熱電対をとっています。フォイル・ディスクはコンスタンタンで作られており、銅製の円柱形ヒートシンクに取り付けられています。水冷式は取付け場所の自由度が高く長時間の測定が可能です。

使用例

- 焼却炉・溶鉱炉の熱量測定
- 火災実験の際の輻射熱ゲージ
- バーナーなど熱源の校正用基準器
- 着火性・燃焼性試験 (ISO5657, 5658, 5660)
- 米国連邦航空局のファイヤー・スモークテスト

シート状熱流束センサー



センサーは銅とニッケルのサーモパイルから構成されており、測定対象物に貼付けて使います。センサーは厚さが0.2mmと薄いので、柔軟性に富んでおり、直径1インチの円筒形に湾曲させる事が出来ますので、パイプなどに貼り付けてお使いになるには最適です。

使用例

- 電気・電子機器内の発熱・放熱状態測定
- 熱交換器の効率測定
- パイプの放熱状況測定

熱流束センサー 校正サービス

熱流束センサーの校正作業をお引き受けいたします。校正証明書は米国基準局NISTにトレーサブルです。校正設備の物理的な制約で、お引き受けできない場合もあります。ご相談ください。

センサテクノ株式会社

〒106-0031 東京都港区西麻布3-24-17 霞ビル4F
TEL: 03-5785-2424 FAX: 03-5785-2323

URL

www.senstech.jp

E-mail

senstech@td6.so-net.ne.jp

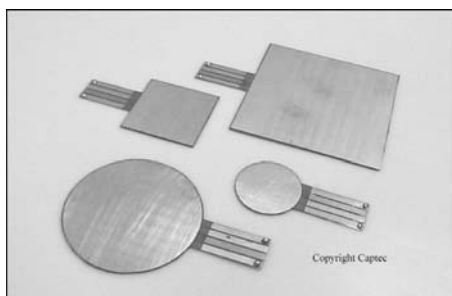
テクノオフィスは、独自の高度技術を持つ海外メーカーの

熱流計／熱流束センサーをご紹介します。

CAPTEC 社 (フランス)

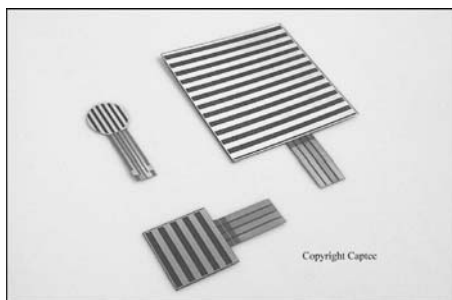
CAPTEC 社は、独自の高度技術により、低熱抵抗で高感度な熱流束センサーを開発・製造致しております。環境温度が変化しても感度は常に一定で、熱流束値に比例した電圧を高精度に出力します。輻射センサーは、輻射熱のみを計測する画期的なセンサーです。特注形状も承っております。

熱流束センサー



サイズ: 5×5～300×300 [mm] (厚み: 0.4 [mm])
 熱抵抗値: 0.00015 [°C/(W/m²)]
 熱伝導率: 2.7 [W/mK]
 温度範囲: -200～200 [°C]
 応答速度: 約 200 [ms]
 柔軟性: フレキシブルー直径 30 [mm] に彎曲
 リジッドー平面用
 オプション: 温度計測用 T 型熱電対内蔵
 特注品: 最高温度 350 [°C]または 380 [°C], 防水加工

輻射センサー



サイズ: 5×5～50×50 [mm]
 厚み: 0.25 [mm]
 温度範囲: -200～250 [°C]
 応答速度: 約 50 [ms]
 柔軟性: 直径 30 [mm] に彎曲
 オプション: 温度計測用 T 型熱電対内蔵
 特注品: 最高温度 350 [°C]または 380 [°C]
 波長領域: 広帯域(可視+赤外)／標準(赤外)

【アプリケーション】

◇伝熱一般 ◇温熱環境 ◇サーマルマネキン ◇食品／調理ー焼成オーブン ◇コンクリート・地中埋設

○当社では、CAPTEC 製品に最適なデータロガーも取扱っております。お気軽にお問い合わせ下さい。

有限会社 テクノオフィス (CAPTEC 社日本総代理店)

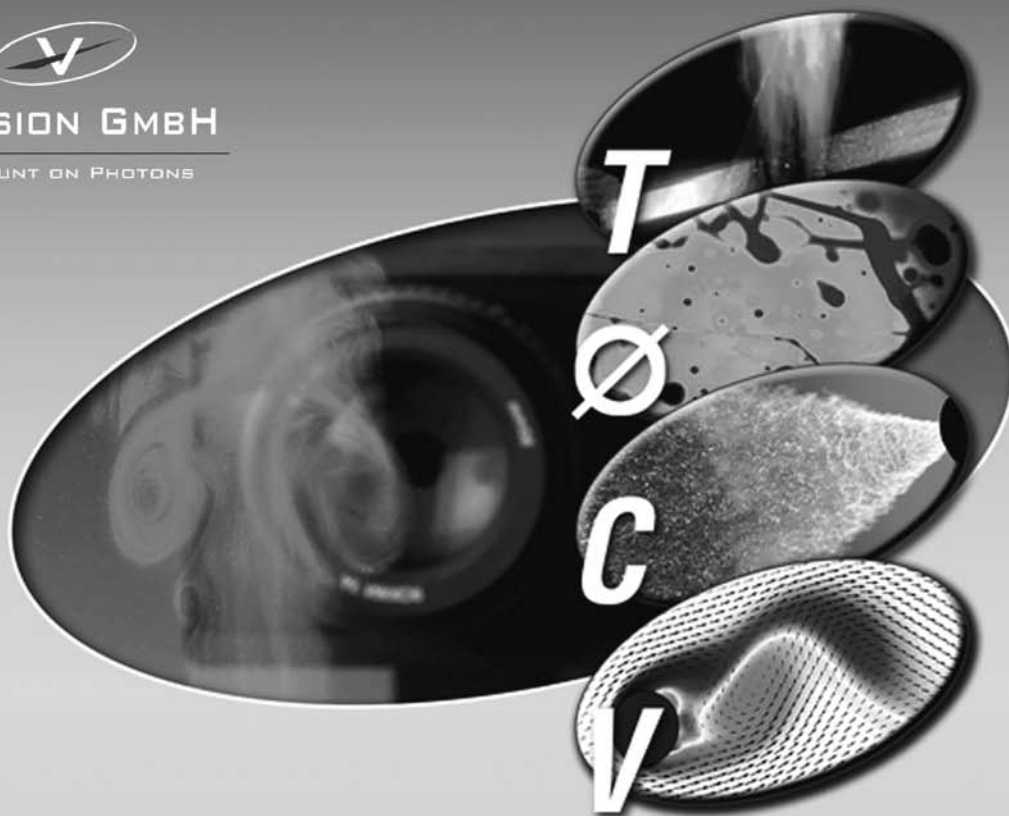
URL: <http://www.techno-office.com/>

本社: 〒225-0011 神奈川県横浜市青葉区あざみ野 3-20-8-B

TEL. 045 (901) 9861 FAX. 045 (901) 9522

LaVision社レーザーイメージング製品の 日本総代理店になりました

PIV、LIF、Raman、Rayleigh、LII、等の技術を組み合わせた複合計測システムを構築し、種々のアプリケーションでのソリューションを提供します。



Laser Imaging Solution

アプリケーション	Laser Imaging Techniques						計測システム
	Mie	LIF	PIV	Raman	Rayleigh	LII	
流れ 流体力学	流れ構造 パターンション	流れの可視化 ミキシング	流れ場	組成 温度	気体濃度 気体温度		FlowMaster FluidMaster
噴霧	液滴 パターンション	液体(燃料)質量 液体/蒸気	流れ場	液体/蒸気 温度			SprayMaster SizingMaster
	プレーナー液滴サイズ計測		質量流束				
燃焼 エンジン	粒子 液滴	ラジカル、燃料 化学プロセス	流れ場	ガス組成 温度	気体濃度 気体温度	すす	FlameMaster EngineMaster
プラズマ	粒子 生成	種 反応画像	流れ場				PlasmaMaster
材料試験 表面変形	高度画像相関						StrainMaster
	2次元&3次元の変形、歪み場、応力						
上記全ての アプリケーション	(超)高速イメージング						High-Speed Master System
	過渡現象、時-空間相関の時系列過程						

本広告の製品仕様は改善のため予告無く変更する場合があります



KANOMAX

日本カノマックス株式会社
流体計測ディヴィジョン

お問い合わせは、カスタマーサービス窓口へ

Email fluids@kanomax.co.jp

TEL. (03)6825-9090 FAX. (03)5371-7680

URL <http://www.kanomax.co.jp/fgroup.html>



最先端のデジタルテクノロジー
Computer to Plate
創業45年の信頼と実績

学会誌、論文集、季刊誌、機関誌、各種出版物、
一般印刷物などの原稿執筆依頼から校閲校正、
事務処理・印刷・発送まで一貫して承ります。
外部発注にかかわる経費節減と品質向上をお約束します。

エコ用紙、大豆インク、そして廃材廃液を出さない、環境に配慮した最新のシステムで質と価格にこだわり印刷します。

弊社、株式会社大 應は昭和39年創設以来、主に土木学会、国公立大学、日本学術振興会、シンクタンク研究機関、経済産業省・国土交通省・関連協会団体、自治体、コンサルタンツより商業印刷物など主に学会誌、協会誌、記念誌、パンフレット、ポスターなどのデザイン編集制作・印刷を専門に45年の実績とデジタル総合技術を持って営業展開しております。

弊社では編集技術を駆使し各種データからのカラー印刷システムにて、**工期の短縮・高品質・低価格のカラー印刷を実現し、一層のコスト削減**にむけてサービスを展開しております。

グラフィックデザイナーと印刷オペレータが直接言葉を交わせる環境が大切です。制作部門と印刷を併設する私達は魅力的な発色にこだわっています。その他、**高速デジタルオンデマンド印刷**で素早く安価に提供しております。是非一度お試しくださいようお願い申し上げます。

営業種目

学会誌・学会論文集・季刊誌・機関誌・広報誌・記念誌・社史・自分史・技術報・社報、各種会社案内 他、パンフレット、リーフレット・ポスター・パワーポイント制作、地域環境総合計画書等のデザイン制作・アンケート調査集計及び報告書作成、海外資料：各種英文パンフ、アニュアルレポート・ブローチャー、デザイン制作・CD-ROM編集制作・ビデオ編集制作・カレンダー・ダイアリー・情報処理電子業務全般・イラスト・撮影・テープ起編集・インタビュー取材・リライト・校正校閲・パネル加工制作・各種ファイル加工、名刺・ハガキ・挨拶状、各種封筒・梱包発送

Computer to Plateカラー総合技術印刷
情報処理・編集加工・Web制作



株式会社 大 應

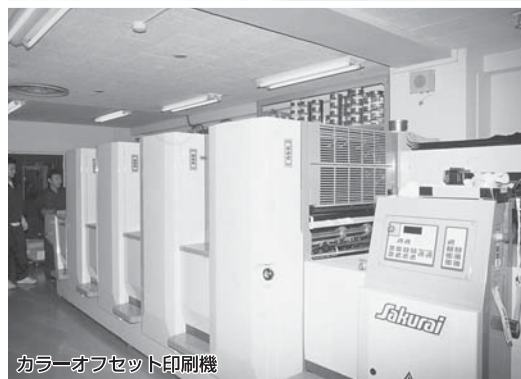
〒101-0047 東京都千代田区内神田1-7-5

Tel 03(3292)1488 Fax 03(3292)1485

E-mail : p.hatsushiba@dai-oh.co.jp http://www.dai-oh.co.jp



デザイン制作



カラーオフセット印刷機



自動製本丁合機

編集出版部会ノート Note from the Editorial Board

編集出版部会長としての2年間の任期も後わずかとなり、これまで何とか無事に会誌を発行できたことに安堵しております。これも、ご執筆者の方々は勿論ですが、部会委員のご努力ならびにご協力によるところが極めて大きく、この場を借りて感謝申し上げます。6月の理事会で次期部会長と引継ぎ、7月号の出版を完了したところで私の任務を終了する予定です。前例によりますと、次号の部会ノートは次期部会長が書くことになっておりますので、この場をお借りし、ご挨拶させていただきます。博識で会誌編集部会長に最適任の吉田前部会長から引継ぎ、必ずしも充実した会誌に仕上げられなかったのではないかと不安を感じますが、読者の皆様にはよろしくご容赦頂ければ幸甚です。紙質を維持し、カラーページを予算の許す範囲内で取り入れましたので、比較的上質の会誌にすることができたものと思っております。昨年、法人規定の変更や事務所移転などがあり、今後の伝熱学会の運営は必ずしも容易ではないことと思っておりますが、引き続きご支援賜りますようお願いいたします。

さて、会員の皆様におかれましては、研究の随想や苦労話、あるいは研究成果の主要部分をまとめた物など、論文集では書けないような記事を「特別寄稿」としてご執筆頂き、ご自身の記録としてもご利用頂ければ誠に幸いです。特に、定年退職前後の会員にはこうした記事をご執筆頂ければ、会員も大喜びです。ご自身による投稿は勿論、身近に該当する方がおられましたら、ご連絡頂ければ誠にありがたいと思います。会員間の気軽な意見交換の場として、**Heart Transfer** といった欄も用意しておりますので、お気軽に種々のご意見や記事投稿を頂ければ幸いです。

では、今後とも伝熱学会をよろしく願います。

近久武美 (北海道大学)

Takemi Chikahisa (Hokkaido University)

e-mail: takemi@eng.hokudai.ac.jp

副会長 瀧本 昭 (金沢大) 部会長 近久武美 (北海道大学)

委員

(理事) 姫野修廣 (信州大学)

橋本律男 (広島大学)

千田 衛 (同志社大)

藤岡恵子 ((株) ファンクショナル・フルイット)

(評議員) 大黒崇弘 (日立国際電気)

角口勝彦 (産業総合研究所)

鹿園直毅 (東京大学)

中別府 修 (明治大学)

吉田篤正 (大阪府立大学)

長谷川達也 (名古屋大学)

花村克悟 (東工大)

一法師茂俊 (三菱電機)

福谷和久 (神戸製鋼)

久角喜徳 (大阪ガス)

TSE チーフエディター 門出政則 (佐賀大学)

編集幹事 岩本 薫 (東京農工大学) 石田賢治 (佐賀大学)

編集出版事務局:

北海道大学大学院工学研究科エネルギー環境システム専攻 近久武美

〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目

Tel: 011-706-6785 Fax: 011-706-7889, takemi@eng.hokudai.ac.jp