

## TODAY



## 超電導関連技術に関する 国際標準化

一般社団法人 日本電線工業会  
常務理事 中島 英史

みなさん、超電導技術というと、どんなものをイメージされるでしょうか？超電導（超伝導）とは特定の金属化合物や酸化物結晶などの物質を非常に低い温度へ冷却したときに電気抵抗が急激にゼロになる現象とされています。電気抵抗がゼロになるということは、発熱しないで電流が多く流せるということです。電流が流れると磁場が発生するので大きな磁場を得ることが出来ます。これを応用したものが医療機関で使われているMRI（核磁気共鳴画像法）検査、そして実証段階でこれから実用化されるリニア新幹線といったものになります。

実は超電導関連技術に関する国際標準化は、IEC（International Electrotechnical Commission、国際電気標準会議）で取り扱われ、TC90（第90番目の Technical Committee、専門委員会、1987年設置）で審議されています。各専門委員会には幹事国（欧米の国が多い）が割り当てられていて、日本はTC90の幹事国となっており、超電導の国際標準化の構築に対する国際的な責任を担っています。

TC90の国内審議団体は現在私の職場である（一社）日本電線工業会が行っています。以前は1988年に超伝導の実用化のために設立された（財）国際超電導産業技術研究センターが国内審議団体を務めていましたが、2016年6月に解散することとなり、引き継ぐこととなりました。

現在、国際TC90ではWG1からWG14までの国際WG(Working Group 作業グ、グループ)を組織し、国内においてはIEC/TC90超電導委員会の国内技術委員会の下に国際WGに対応する国内WGを組織し活動しています。

以下は設置されているWGの内容です。

- WG1 超電導関連用語
- WG2 Nb-Ti 線臨界電流試験方法
- WG3 酸化物超電導線臨界電流試験方法
- WG4 超電導線残留抵抗比試験方法
- WG5 超電導線機械的特性試験方法
- WG6 超電導線銅比試験方法
- WG7 Nb3Sn 線臨界電流試験方法
- WG8 電気的特性測定方法
- WG9 交流損失試験方法
- WG10 バルク体補足磁束密度試験方法
- WG11 臨界温度試験方法
- WG12 電流リード
- WG13 実用超電導線
- WG14 超電導センサ

現在までに発行されているIEC/TCの国際標準書類は25件で、新たに開発される材料や新規の機器開発に適用するため、毎年改訂作業や新たな国際標準の制定に向けて取り組んでいます。

一方、IEC/TC90超電導委員会の国内技術委員会の下には、IEC国際標準に対応するJIS (Japanese Industrial Standards、日本産業規格)の原案を審議するために、JIS原案作成委員会及び対応するJISのWGを組織し活動しています。現在までに発行されている超電導関連のJISは14件です。

こうした作業を通じて定義されるのは物理的な試験方法や電気的な測定方法など技術の実用化を進める上で欠くべからざる技術基盤で地道な作業が続けられています。電線業界を中心に取り組みを続けていますが、政府や公益財団法人JKAのご支援、さらに労力を惜しまず努力していただいている各委員の皆様の日頃からの努力により超電導の国際標準化が推進されています。

関係者の皆様には感謝申し上げますとともに、金属材料系の研究を行っている方々に感心を持っていただき、何らかの形で応援いただければと思います。筆を執った次第です。

# 燐光粒子を用いた熱流動の見える化

## 国立研究開発法人 産業技術総合研究所 省エネルギー研究部門 総括研究主幹 染矢 聡

### 1. はじめに

一次エネルギーの多くが未利用熱・排熱として捨てられている状況において、2050年の大幅なCO<sub>2</sub>削減目標達成にむけて、熱制御技術のハイレベルな革新が求められています。システム全体の最適化は日本の強みであるものの、短期間での高効率な開発のため、強力な開発支援ツールが重要となっています。その一つは数値流体力学（CFD）であり、今やシステムデザインに不可欠となっています。しかし、ミクロからマクロまでシステム全体を直接数値計算（DNS）で解析することは効率的ではなく、また、理想的なコンピューターの世界ではトラブル要因の解明は必ずしも行えないため、実験による検証や現象解明が必要なシーンも少なくありません。ここで有用な定量的、直感的な計測技術が流れの可視化です。

流れの可視化は以下のような特徴を持つため、例えば粒子画像流速測定法（Particle Image Velocimetry, 以下PIV）は速度分布計測法として広く普及しています。

- 1) 俯瞰的かつ定量的な測定により直感的理解を促進
- 2) ミクロからマクロまで空間分解能を任意に設定可能
- 3) 比較的高い時間分解能 (12kHz@10<sup>6</sup>pixel<sup>2</sup>)

PIVでは粒子像や煙のような濃淡画像を解析することが多いですが、衛星写真で雲や流水の解析をしてその動きを予測したり、交差点の人波やモビリティの移動を分析するなどの用途に活用する例もあります。

一方、測定対象が表面に限られますがサーモグラフィによる温度分布の見える化も広く普及しています。サーモグラフィで高精度な温度計測を実現するには高度なスキルを要しますが、定性的な評価が目的の場合は利便性の高い優れた機器です。例えば、移動する人や物体の表面温度を時々刻々と撮影し、その移動量を分析すれば、温度と移動速度の分布を同時に認識することが可能です。

本稿でご紹介する燐光粒子法は、表面温度だけではなく、様々な気体・液体など流体の温度と速度の分布を見える化する技術です。酸・アルカリ、油や炭化水素等の液体、空気、蒸気や排ガス等の気体の温度分布を測る技術は未だ確立されていません。燐光粒子法は様々な感温性粒子をトレーサーとして、これを実現する技術です。

### 2. 温度計測の原理

紫外線などで励起された燐光物質は、吸収したエネルギーを熱や光として放出します。励起後、数ナノ秒以下で消える蛍光と異なり、燐光は10<sup>-6</sup>~10<sup>1</sup>秒ほどの寿命でゆっくり減衰します。燐光物質は蓄光性玩具・LED・ディスプレイなど身近に溢れており、有機系金属錯体やポルフィリン、無機燐光体等の感温性燐光物質も多く知られています。これらを用いて極低温から千数百度以上の高温までの様々な条件で温度を計測できます。燐光体は直径数μmの粒子として市販されているため直接トレーサー粒子として利用できます。シリカや高分子樹脂のマイクロ粒子に有機系燐光物質をドーピングするなどして感温性粒子を作成することも可能です。

図1は主な感温性燐光粒子を示しています。比較的広

い領域で液体流れを測る場合に適する中実のポリマービーズ、微細流路内の液体流れに適用可能でほぼ沈殿しない中空マイクロカプセル、気流計測用の中空多孔質シリカ、高温用の燐光体などがあります。いずれも極めて簡単に量産でき、作成から数年経ても大きな劣化をしません。微粒子ですので粉塵の取扱い同様の注意が必要ですが、マンガンを含む一部の燐光体以外は有害性を持ちません。粒子の大きさが時間応答性や乱流などへの追従性に影響するため速度・熱への追従性を理解して適切な粒子を選択する必要がありますが、様々な流れに適用可能です。これらの燐光粒子は多くの場合、355nm(YAG第三高調波)、266nm(YAG第四高調波)、351nm(XeF)などの紫外線レーザーで励起されますが、405nmや527~532nm(YLF, YAG第二高調波)の可視光源で励起できるものもあります。燐光体粒子の場合はLEDや各種ディスプレイ用途の開発が盛んに行われていますが、外国企業等一部ではセンサ用の高付加価値な燐光体粒子の開発・販売例もできており、トレーサー用途に適した工夫がされています。

図2に感温性燐光物質を用いた温度測定の方法を簡単に

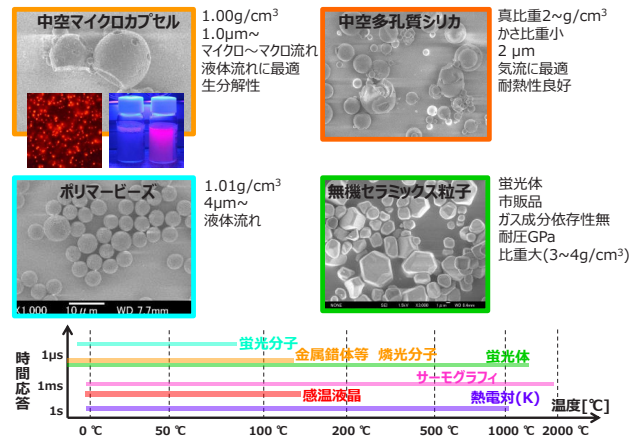


図1 様々な感温粒子

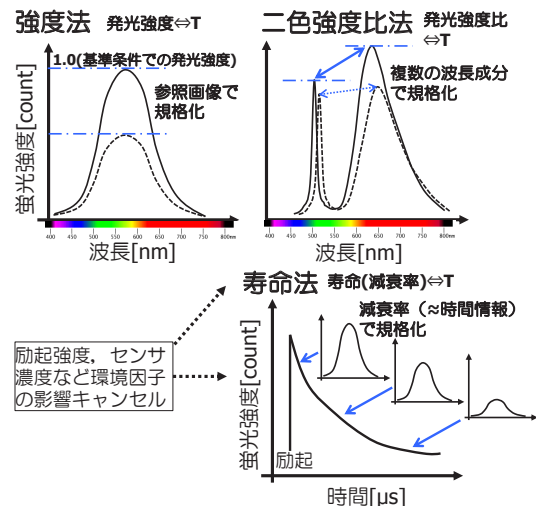


図2 温度計測法のコンセプト

まとめました。最もシンプルな強度法は、流体ではなく固体表面の温度分布測定に多用される方法です。温度条件が既知で様な条件で燐光画像を取得し、これを参照画像（基準）として、温度が未知な条件における画像の輝度と参照画像の輝度を比べて温度を評価します。流体の温度速度の時間平均分布の評価にも便利です。全ての波長帯の光を利用するため、明るい画像を得やすいなどのメリットがあります。

二色強度比法では、2つの波長帯の燐光を用い、各波長帯の燐光強度比から温度を求めます。この方法は絶対的な明るさではなくスペクトル形状の変化から温度を求め参照画像を必要としません。例えば、流体中に入れたトレーサ粒子の数密度が場所ごとに異なっても、励起光の強度に空間的なムラや時間的な揺らぎがあっても、原理的にはこれらの影響を受けない計測が可能です。そのため非定常な計測や流体計測に適しています。燐光の発光寿命（燐光強度の減衰率）が温度に依存する特性に基づく寿命法は、燐光強度の減衰プロセスを2枚以上の画像として捉え、減衰率から温度を評価します。この方法も原理的には励起光強度の時空間的な変動、燐光分子の濃度の非一様性などの影響を受けません。そのため、二色強度比法同様に非定常計測や流体計測に適しています。

### 3. 寿命法に基づく温度速度計測法

図3は寿命法ベースの温度速度可視化法の測定概念を示しています。粒子の燐光を高速度カメラで撮影して複数枚の画像を取得し、例えば $8 \times 8$  [pixel<sup>2</sup>] ほどの微小領域内の平均燐光強度の時間変化率から温度を評価します。

1回の励起の後に複数枚取得した燐光画像のうち、適切な時間間隔の2枚以上の画像を用いてPIV速度解析を行います。流れが遅い場合は、連続した減衰中の画像ではなく、次の励起の直後の粒子画像を用いて速度を解析することもあります。図3に示す複数の画像に渡る燐光強度の減衰率から温度が得られます。この方法は燐光の寿命に対して粒子像の移動量が著しく大きい場合や、寿命より短い時間内に温度が大きく変化する場合等には適用が難しいですが、比較的遅い流れを対象にする場合は、シンプルな光学系と1台のカメラでデータを取得できるなどのメリットがあります。

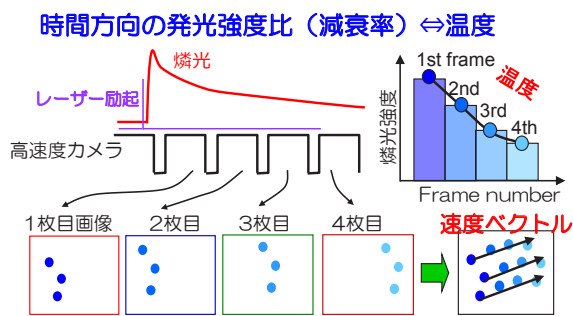


図3 寿命法に基づく温度速度計測法の測定概念

この方法で熱流動の可視化を行う際のイメージと計測結果の例を図4に示しました。加熱平板に沿って上昇する気流の温度と速度を可視化した例です。燐光粒子を巻き込んだ室温の空気が60~70°Cに加熱された平板に沿って流れる様子を、10Hzの紫外線レーザーで励起し、カメラ1台でこれを撮影しました。図4右側は測定結果の例で、壁面近傍で下流ほど温度が高くなっていることがわかります。熱電対で測定した温度との差は最大でも0.4°Cで、速度境界層・温度境界層の厚さも可視化計測から得られました。測定した速度を、一般的なPIV法による計測結果、CFDと比較した結果、境界層の外側ではそれぞれよく一致する結

果となりました。可視化から得られた温度をCFDと比較したところ、こちらも良い一致を示しました。定性的・俯瞰的な理解の促進だけではなく、定量的な計測が可能です。

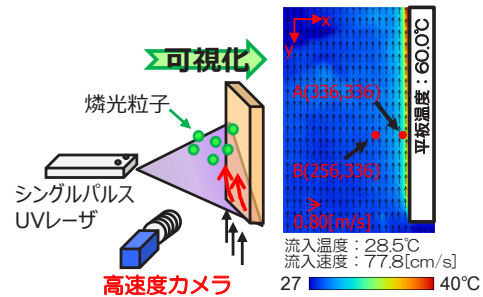


図4 加熱平板周りの気流の温度速度計測例

### 4. 二色強度比法による温度速度計測法

数百度以上の高温条件では露光時間中に積算される赤熱により、例えば図3の4枚目の画像で画像のS/N比が低下する課題が生じます。また、一般的に高温条件では燐光強度と寿命が低下します。そのため、寿命法に基づく可視化法は高温条件での適用に必ずしも向いていません。また、寿命法による画像計測には数マイクロ秒以上の露光時間が必要なため、粒子像の移動が極めて速い条件での利用にも制約が生じます。

このような場合には二色強度比法によって温度と速度を可視化できます。この方法の測定概念は図5に示すとおりで、ある瞬間における異なる波長帯での燐光強度(図2参照)を個別の画像として取得し、燐光強度の比を基に温度を評価します。速度計測のため、僅かな時間後にもう一度粒子を励起して画像を撮影し、1~2枚目の画像間での粒子移動量から速度を求めます。この方法で熱流動の可視化を行う際のイメージを図6(左)に示しました。異なる波長帯の画像を取得するために、2台のカメラを用いたり、イメージダブラーと呼ばれる像分割光学系を接続したカメラで1枚の画像中に実質的に2画像を収めます。光源はダブルパルス紫外線レーザーを用います。寿命法に比べて短い露光時間での計測が可能のため、赤熱の影響を受けにくく、また、急激な温度速度の変化を伴う流れの計測へも適用可能です。但し、この方法の場合はトレーサとして利用可能な物質が寿命法の場合に比べて限定的です。図6右側は溶

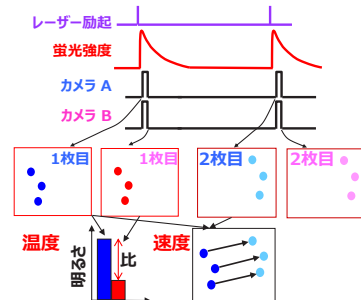


図5 二色強度比法による温度速度計測法の測定概念

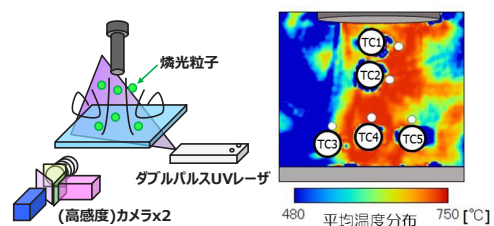


図6 二色強度比法による温度速度計測のイメージ

接補助用の小型のトーチから噴出する加熱空気の温度分布を計測した例です。トーチ出口での温度は約 850°C で 5 本の薄膜熱電対 (TC1~TC5) で測定した温度は 500~750°C です。トーチなど周辺構造物からの赤熱が強く測定が難しい条件ですが、温度分布の可視化に成功しています。

## 5. 計測事例

紙面の都合上、詳細な説明は困難ですが、これまでの測定例の一部を以下にご紹介します。図 7 はエコカイロの相変化時の相変化物質 (PCM) の温度速度分布を測定した例です。パラフィンや水和物系の PCM は固体の時の熱伝導率が悪く、吸発熱の制御が容易ではありません。この例では相変化時の非定常な温度と流動を測定し、凝固が進んで対流がなくなった後に急速に PCM の温度が上昇する様子を捉えることができました。図 7 右はまだ対流が可能な状態で、針状に成長した結晶の際間に液相が侵入することによって温度上昇が抑制され、凝固が進行した発熱部近傍以外での温度がまだあまり高くなっていない瞬間における温度速度の可視化結果です。

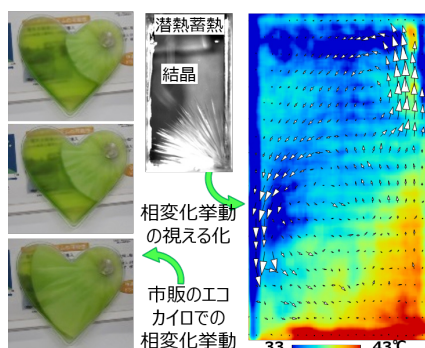


図 7 エコカイロの相変化時の流れの様子

図 8 は流体ではありませんが、自動車エンジンのピストントップの表面温度が、エンジン始動後徐々に上昇する様子、着火の度に火炎が衝突する位置が変化しながら、徐々に温度が上昇する様子を可視化しています。ピストントップの素材が可視化用のガラスであり、また、冷却手段が限られるため、実機エンジンより全体的に高温になりますが、非定常な温度分布を詳細に捉えることが可能です。可動部の温度を測定す

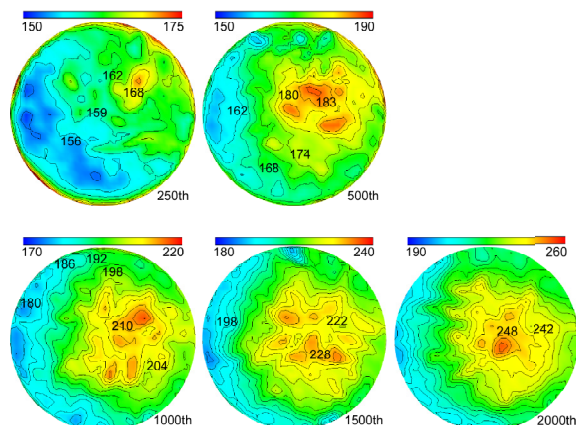


図 8 始動後 250~2000 回転目におけるエンジンピストン表面温度分布

ることは接触式の温度計では容易ではありませんが、可視化計測では可動部でも測定することが可能です。

図 9 は同様の手法で温度ではなく、燃料電池のガス拡散層表面における酸素濃度分布を可視化した例です。流路の圧損分布を事前に評価し、酸素分圧と全圧から酸素濃度を求めています。燃料の水素と空気の供給比によってセルに非一様な反応度分布が形成されています。セル全体の発電状況から流路入口 (グラフ横軸 Flow length=0) と出口 (Flow length=1) での濃度がわかり、反応度分布が一樣であれば酸素濃度は直線的に変化します。燃料電池出力が高く、供給燃料と酸素の量の比が 2 より小さい条件では、ガス供給口近傍で特に反応が進んでいることがわかります。

他にも熱交換器の評価などいくつかの例を WEB<sup>[1]</sup> で紹介していますので、こちらもご覧頂けると幸いです。

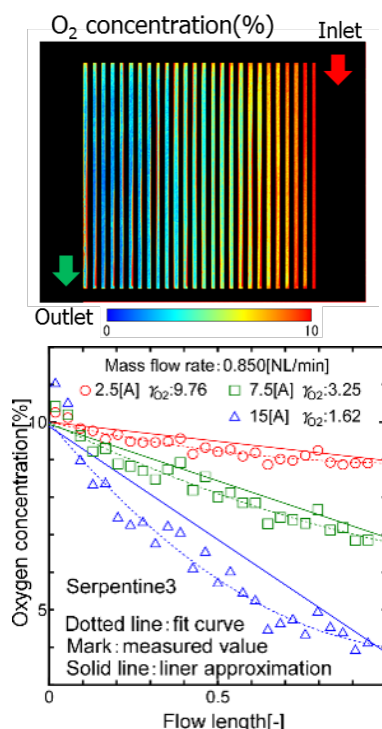


図 9 発電中の固体高分子形燃料電池内の酸素濃度分布

## 6. おわりに

本稿で紹介した温度と速度の同時計測技術は、様々な作動流体、温度範囲で利用できるため、多様な分野を対象として近年適用例が増えています。製品そのものの開発と異なり、個々の評価技術を個別の事業者や専門を異にする研究者が開発することは難しい面もあるため、なるべく早期に計測ソフトウェアの提供等を行いたいと考えています。共通基盤的なツールとして、効率的な機器設計や、省エネ性能の追求のため、これらの計測技術を有効に活用して頂きたいと考えています。著者の所属する省エネルギー研究部門<sup>[1]</sup>では CFD 技術の開発も行っており、実測と CFD を適切に融合して省エネルギー技術開発を支援しています。

## 参考情報

[1] iECO WEB: <https://unit.aist.go.jp/ieco/>

The Japan Research and Development Center for Metals  
JRCM NEWS / 第 407 号

内容に関するご意見、ご質問は JRCM 総務企画部までお寄せください。  
本書の内容を無断で複写・複製・転載することを禁じます。

発行 2020 年 9 月 1 日  
発行人 小紫 正樹  
発行所 一般財団法人 金属系材料研究開発センター  
〒105-0003 東京都港区西新橋一丁目 5 番 11 号 第 11 東洋海事ビル 6 階  
TEL (03)3592-1282 (代) / FAX (03)3592-1285  
ホームページ URL <http://www.jrcm.or.jp/>  
E-mail [jrcm@oak.ocn.ne.jp](mailto:jrcm@oak.ocn.ne.jp)