

人間の目に美しい鏡面に見える液体ナトリウムが紫外線の目には透明？

— 圧縮性液体金属混相流の動力学解明と電磁場による制御 —

平成25年新聞報道発表・ウェブジャーナルアクセスランキング1位記事の現況

大阪大学大学院工学研究科

環境・エネルギー工学専攻 教授 福田 武司

1. はじめに

朝起きて顔を洗うときに毎日見る鏡は暮らしに欠かせないものだが、鏡に入った光が直接そのまま反射して人間の目に飛び込むと思っておられる方が多いのではないだろうか？ 学生の多くはそのように理解しているようだ。これは間違いであって、入射する光の波長に相当する振動数で向きが変わる電場が鏡の表面に存在する無数の電子を振動させる（加速する）のである。正確には物質表面で入射光の電場と逆方向の電場を電子がつくることによって物質表面における電場をキャンセルしているのである。神様が世の中の乱れや不均衡を嫌うからである。ファインマンの教科書に記載されているように、電子（荷電粒子）が加速されると電磁波を発生する。その電子が輻射する電磁波が我々の目に入るのである。要するに我々は2次的な光を見ている訳である。

座標系に依らず光の速度が一定（アインシュタインの特殊相対論）なので光の波長が短くなると振動数が大きくなり、より高い振動数で電子が動かされる。しかしながら、実際に電子が動く速さにも限度がある。どんどん波長が短くなると、即ち電場が振動する速さが増大すると電子の動きが追従しなくなる。電子が「僕もうついて行けない」状態になるのである。この時の波長がプラズマ端と呼ばれるものであり、対応する振動数がプラズマ周波数である。そして、電子が追従できなくなると物質表面で電場がキャンセルされなくなり、光が物質内部に透過し始める。光のエネルギーは物質内部で熱に変換される（プラズモンを作る）が、吸収されなかった成分は物質を通り抜ける。極端な例はエックス線であり、エネルギーが高い、即ち電場の振動数が大きい（エネルギーは振動数とプランク定数の積で表される）ことから人体をも通り抜ける。

次に問題になるのは、どの程度の光エネルギーが熱に変換されるかと云うことである。高分子化合物の集合体である人体でもエネルギーの高いエックス線は透過する。逆にエネルギーが低い（波長が長い）光は複雑な構造物を透過しない。複雑な構造を持たないものに注目しよう。先ず分子は除外するとして、原子の中で思い及ぶのがアルカ

リ金属である。第一族アルカリ金属は最外殻に電子が1つしかなく外部からやってくる光との相互作用が少ない。

アルカリ金属の代表格であるリチウムのプラズマ端は155nm、ナトリウムでは210nm、カリウムでは315nmである。実際、ナトリウムを対象として密度汎関数法（量子力学）を用いた第一原理計算を行うと波長が100-200nmである（軟X線に近い）真空紫外の領域では電子の状態密度が極めて低く、高周波電場との相互作用が少ない（消衰係数が低く抑制される）ことから、波長の低減とともにナトリウムのL殻の吸収端である50nmに向けて透過率が単調に増大すると予想した（光源の制約により、反射率が顕著に低減するプラズマ端波長216nm以下の真空紫外域では報告例なし）。

相対論（1905年・1915年）や量子力学（1926年）など、物理学が大きく飛躍した20世紀前半、いきおい分光が盛んになった。とびとびの（量子的な）エネルギー準位間の遷移に対応する光の整然としたスペクトルが観測できたからである。米国ジョン・ホプキンス大学のウッドは、あらゆる物質の分光特性を調べてやろうとの意気込みで、試験管の底に蒸着したナトリウムとカリウムの薄膜を対象とした分光測定を行い、真空紫外光が高い透過率を示すことを発見した。1918年のことである。当時は、その理由が分からなかったが、15年後となる1933年に英国ブリストル大学のZenerがWoodの実験結果を説明する「アルカリ金属の驚くべき光学物性」と題する論文をNature誌に発表した。この結果は、キッテルの固体物理学の教科書に取り上げられ、ファインマンの教科書にも引用されている。その後、真空紫外域の光源や検出器に係わる技術開発が進展した1960年代にキッテルやサザーランド（米国オークリッジ国立研究所）が関連する論文を発表している。しかしながら、透明な金属とは云え、数100nmの薄膜を対象とした実験結果であり、応用面で画期的な展開が望めないことから分光学の分野では1967年以降50年間注目されることは無かった。

一方、導電性の高効率熱伝達媒質である液体金属は、従来より直接発電や原子力（高速増殖炉）の分野で重要な

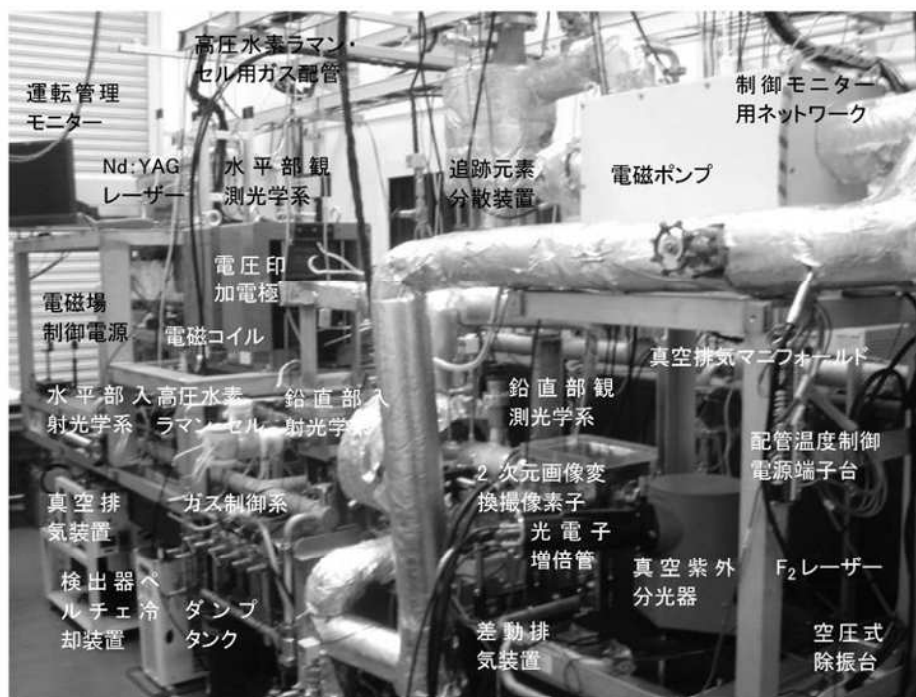


写真1. 液体ナトリウム流動場試験装置（吹田地区A13棟）の概要と構成機器

機能材料として注目されている。当研究室では、この人間の目には美しい鏡面に見える液体ナトリウムが真空紫外の目には半透明であることを利用し、(1) 液体ナトリウムに溶存する不活性ガスの気泡を気液界面における屈折率の差異で可視化するとともに、(2) 真空紫外光を効率的に散乱する追跡元素を添加して、輝度の2次元分布を高速カメラで観測することにより、液体ナトリウム内部における流れ場の高精度計測を目指している。原子炉内部に気泡が存在すると中性子の減速特性に起因して出力が変動することになる。また、気泡の分裂・合体の過程や渦の構造形成に係わる動力学的な挙動を実験的に調べて圧縮性流体におけるエネルギーの散逸過程を明らかにすることの意義は計り知れない。液体ナトリウム内部における流速分布計測は過去に例がなく、流体体積率に注目した混相流の解析や大規模渦模擬計算の結果と比較検討を行うことによって、従来の理論模型を検証できる。さらに(3) 液体ナトリウムが導電性の作動流体であることを鑑みて、電磁力による速度場や内部渦の構造制御に踏み込んだ基礎研究を展開すれば、原子力を含む幅広い分野における技術開発に資する学術基盤の構築することができる。

2011年に起きた東日本大震災の後に至っても、原子力発電はベース電源として電力供給の中核を担うと位置付けられており、格段に高い安全性が国民から要求されている。また、毎年4兆円近くにのぼる化石燃料の輸入を何年も継続する訳には行かないので、将来のエネルギー戦略上、高速増殖炉の開発は必須の要件であり、「常陽」の新規制基準適用性に係わる設置許可の再審査が進行中で

ある。廃炉となった「もんじゅ」で1995年に起きた2次冷却系ナトリウム漏洩事故や2004年の美浜発電所3号機2次系配管破損事故は、ともに冷却材の流動にともなう機械的振動と浸食による構造材の疲労・減肉が原因である。運用管理面の問題は兎も角、これは原子炉の安全工学基盤が盤石でなく、流れの動力学に係わる基礎研究のさらなる充実が必要とされる証左である。一方、経済性の向上を目指して高速増殖炉の小型高出力化や構成機器の機能統合に関する検討が近年重点的に進められているが、構造の複雑化と冷却材流速の増大に伴う流れ場の複雑化が同時に危惧されている。現在の状況を鑑みると、今だからこそ基礎基盤に軸足を置いた地道な原子力（高速炉）研究の取り組みを重点的に進めるべきであると考えられる。

2. 液体ナトリウム流動場試験装置

当研究室では、液体ナトリウムが真空紫外光に対して半透明になることを利用した試験装置を新規に開発して吹田地区の原子力系A13原子動力実験棟に設置した（平成18-20年度文部科学省受託事業）。その外観を写真1に示す。A13棟は数100 kgを越える大量のアルカリ金属（第3類危険物）を取り扱うことができる大阪大学唯一の施設である。本研究の主要目的は、透過厚さ0.1m以上の実証規模で、液体ナトリウム内部に溶存する気泡の可視化と渦構造の微細観測、ならびに電磁場の印加による実時間帰還制御に耐える高精度速度場計測である。過去に超音波やX線、中性子を用いた試みが報告されているが、いずれも成果が得られていない。以下に、当該試験装置を用いて得ら

れたこれまでの成果と現況ならびに今後の展望について述べる。

全長15mに及ぶ液体ナトリウム循環駆動装置は、水平流動試験系と鉛直流動試験系に手で切り替えが可能であり、各々真空紫外用観測窓が設置されている。速度場の評価に際しては、近年の技術開発の進展が特に目覚ましいPIV（粒子画像速度計測）法を採用しており、真空紫外光を散乱する50ミクロン程度の直径を持つ（アルカリ金属以外の）微粒子を追跡元素として液体ナトリウム中に分散し、輝点の2次元像を画像変換撮像素子（高速カメラ）で観測する。写真1の右上に見えるのが、電磁ポンプと追跡元素分散装置である。電磁ポンプは回転摺動部のない環状流路型リニア誘導式で20L/sの駆動能力を持ち、最大駆動速度は1.5m/sである。また、追跡元素分散装置に関しては追跡元素となる微粒子が液体ナトリウム中に偏って分布しないよう、混合気の希薄燃焼を狙った自動車用エンジンの設計を真似て渦を作る構造にした。光源となる波長157nmのラムダ・フィジック社製LPF-220型フッ素（分子エキシマ）レーザーと波長1064nmのスペクトラ・フィジックス社製LAB-150型Nd：YAGレーザーは各々写真1の右奥と左側上部に配置されており、前者は高圧水素ラマン・セル（レーザー光と高圧ガスの非線形相互作用に基づく波長変換装置で短波長側の反ストークス成分を利用する）、後者はCLBO（非線形光学結晶）を経由して6倍倍成分（波長177.3nm）生成の後に液体ナトリウムに入射している。ナトリウム内部を透過した真空紫外光は、光学フィルターまたは分光器で波長選別の後、光電子増倍管（浜松フォトリクス製R972型）またはアンドールテクノロジー社製ICCDカメラ（DH734i-18F-05）に導かれる。鉛直流動試験系と水平流動試験系はともに大規模な渦計算の結果に基づいて構造設計を行っている。また、鉛直流動試験系には予熱機構を備えた希ガスの導入機構を設けており、溶存気体の分裂合体機構が観測可能である。一方、水平流動試験系には液体ナトリウムの流路にカルマン渦形成機構と最大0.8Tの磁場を発生する2台の電磁コイル（写真1左側の構造物）、並びに磁場と直交する4組の離散高圧電極を配置しており、電磁場による液体金属渦の動特性と制御性を調べる機能がある。

液体ナトリウムの充填は、中央部下側のガス制御部で高純度アルゴンガスを用いた差圧を設定することによって行う。ダンプタンクは架台下部に設置してあり、ナトリウムの総容量は50Lである。

写真2に開発した観測窓を通して125℃で充填中の液体ナトリウムを見た様子を示す。波長157nmの真空紫外光に対する液体ナトリウムの消衰係数は $(4.1 \pm 1.5) \times 10^{-8}$ （分光透過率が最大94%）であり、0.1mを越える厚みを持つ液体ナトリウムが半透明になることを2010年に実証した。

試験で用いたフッ素レーザーの出力30mJと検出器の感度（量子効率12%）から予測される最大実証規模は（0.18-0.20）mである。この数値は、密度反汎関数法を用いて評価した第一原理計算の結果より3-4桁低い。写真3に300℃の液体ナトリウムに浸漬したステンレス製金網を補助光源として用意したマクファーソン社製634型重水素ランプ（スペクトル中心波長：122nm）で照射し、ICCDカメラで観測した2次元画像を示す。ここで得られた結果は、平成22年に中国で開催された国際会議で報告した後、原子力機構関西光科学研究所（レーザー励起プラズマ光源を利用）とレーザー共同研究所（敦賀）における検証作業の後、平成25年11月に新聞発表を行った。また、オプトエレクトロニクスのウェブジャーナルでアクセスランキングが1位となった。さらに、高速増殖炉もんじゅで平成22年に起きた炉内中継装置の落下事故を受けて液体ナトリウム中の可視化装置を原子力機構と連携して考案し、特許査定（特願2011-045494）を得た。しかしながら、真空紫外光のナトリウム分光透過率は、表面の酸化に顕著な影響を受ける（酸化ナトリウムの層が形成されると透過率が10-25%に低減する）。波長変換の効率が極めて低いことから光源の更なる増強を目指しExcitech社のアルゴン分子を電子ビームで励起する方式のE-Lux装置（中心波長126nm）を導入して試験を継続している。また、実用化を促進するにはストレーナー（濾過器）やコールド・トラップ（不純物フィルター）の他、ベーパー・トラップ等、不純物を除くとともに酸化ナトリウムの生成を効果的に抑制する複数の手段を同時に講じることが必要となる。



写真2. 液体ナトリウム充填の様子と試作開発した観測窓



写真3. 液体ナトリウムに浸漬したステンレス金網の透視画像

コップの中にある泡を同じように気液界面における屈折率の差異で液体ナトリウムに溶存する不活性ガスの気泡を可視化できる。速度場計測に比べて気液界面の計測は比較的容易であり、透過光強度の2次元画像を数値処理することによって境界部分を定義することが出来ることから見通しを得る段階に達している。冷却材中の気泡は、炉心反応度や冷却性能に影響を与える他、沸騰核の生成やキャビテーション、流動不安定性を誘起する可能性がある。従って気泡の動力学解明は原子炉の安全工学の観点からも重要な研究課題である。本研究は、実証規模で気泡

を含む液体金属の流れを可視化出来るのか？電磁場で制御可能なのか？と云う工学的な課題に答えるだけでなく、経験的なモデルに依存しない形で圧縮性流体内部における気泡の分裂と合体の過程を理解する上で極めて重要である。しかしながら、行く手には次の段階である3次元計測や流れ場における界面の物理機構などの難問が待ち構えている。

速度場の計測制御に関しては、渦の構造形成に係わる動力学的な挙動に基づくフーリエ空間におけるエネルギー散逸過程の解明など、極めて顕著な学術的インパクトが期待される。定常磁場の下における液体金属流れの圧力低下は大阪大学の宮崎(1986)やKim(2008)らによって確認されているが、ハルトマン流(磁場が作用した流れ)の詳細な解析には至っていない。電磁場下における液体金属の挙動は、高速増殖炉のみならず、核融合炉(ブランケット工学やダイバータ技術)やMHD(電磁流体力学)発電等でも重要な研究対象であり、直交する電磁場の印加による流れ場の応答特性に関する研究は、国内外の当該分野における今後の展開に大きく寄与する。本研究では、実証試験に先立って液体ナトリウム流動場における効率的な乱流制御の手法を確立することを目的として(a)平行平板間流れにおける磁場印加に関する基礎的な影響評価を実施するとともに(b)2次元有限要素法を用いた感度解析と(c)大規模渦模擬計算を行って乱流制御に関する定量的な評価を実施した(電磁場の解析にはベクトル有限体積法を用いて流体内部における磁場の反復計算を不要とした)。その結果、磁場印加領域の拡大とともに明確な2次流れによる旋回成分が生成して速度の変動が小さくなることやハルトマン数(磁場の効果を表わす無次元量)が増加すると摩擦速度が低下し層流化が起きることが分かった。また、ハルトマン数が5となる約0.5Tの磁場強度で乱流強度に十分に影響を及ぼすことが明らかとなった。感度解析に関しては、印可磁場を空間変調することによって流動場の変動強度が小さくなることを示唆する結果を得ている。この結果に基づいて液体ナトリウム流動場試験装置では磁場印加領域を分割する構造を採用している。大規模渦模擬計算を行った結果を図1に示す。カルマン渦の制御性に関しては、外部磁場を印加することによって下流側で渦度分布が変化し、乱流エネルギーが減少することが分かった。しかしながら、レイノルズ数が大きい(液体ナトリウムの流速が大きい)場合には磁場印加領域の構造依存性を明確に観測出来なかった。これは、

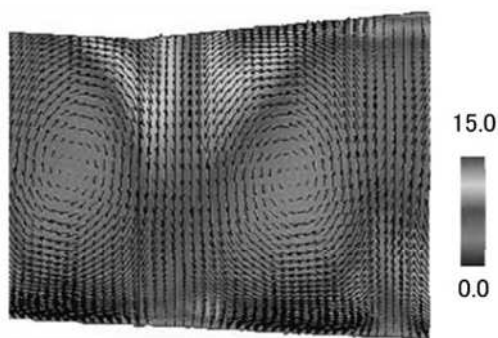


図1. 磁場印加領域中心断面での平均2次速度分布 (ハルトマン数5)

磁場の効果よりも主流による拡散の寄与の方が大きいためである。ナトリウムの流速を電磁ポンプ定格の半分以下(0.5m/s)程度にして実験を行う必要があると考えられる。その他、印加磁場のパルス変調(2Hz)で渦度の分布に影響が見えていることは計算結果のフーリエスペクトルと整合しており、これが有効な制御制御手法の一つになり得ることを示している。

予備的な試験では粒径50ミクロンのシリコン粒子や炭素粉末を追跡元素として125℃の液体ナトリウム中に分散し、フッ素レーザーの基本波長157nmで励起して散乱光(誘導放出蛍光)の2次元計測を試みたが、明瞭な速度場計測に至らなかった。また、前述のように波長変換の効率が極めて低いことから波長121nmのライマンアルファ光やスペクトル強度の大きな電子ビーム励起光源を組み合わせた施策が有効になると思われる。また、試験温度依存性や追跡元素の粒径の寄与に関する知見を蓄積する必要がある。

流動場試験装置は、速度場の構造計測や電磁場に対する応答特性試験の結果を基に流れの場を実時間フィードバック制御する革新的な機能を有している。PIV(速度場計測画像)をから渦度や乱流エネルギーの分布を計算し、電磁場強度や電磁ポンプ駆動電圧をアクチュエーターとしてPID(比例積分微分)制御する(PXI規格のモジュールを用いて汎用のGPIB・TCP/IP・RS-232C対応機器等を駆動する)設計であり、線形制御特性と可制御域を把握したうえで、実用性と制御アルゴリズムの高度化技術開発の指針を検討する計画である。

(原子力 昭和56年卒 58年前期)