

評価の詳細

研究開発課題名（研究機関名）：

液体金属熱流動評価のための高速度3次元直接計測技術開発

(国立大学法人東京大学)

研究開発の実施者

機関名：国立大学法人東京大学

代表者氏名：岡本孝司

機関名：独立行政法人日本原子力研究開発機構

代表者氏名：呉田昌俊

研究期間及び予算額：平成18年度～平成21年度（4年計画） 240,446千円

研究開発予算

平成 18年度	137,612千円
平成 19年度	79,232千円
平成 20年度	13,643千円
平成 21年度(延長年度)	9,959千円

項目	内容
1. 目的・目標	<p>○研究開発目標</p> <p>本事業では、液体金属冷却型高速増殖炉の炉心熱流動評価手法の信頼性向上と上部構造部における高サイクル疲労評価のための水流動高時間分解3次元計測技術を開発するとともに、これを応用した液体金属流動高時間分解3次元計測技術を開発し、水および液体金属の多次元温度-速度相関熱流動データベースの構築を目指す事を目的とする。</p> <p>○全体計画</p> <p>(1) 水流動高時間分解3次元計測技術開発</p> <p>18年度は、燐光寿命を用いた高精度な温度計測手法（燐光寿命温度計測法）を開発する。19年度は、開発した手法を粒子画像流速計測法(PIV: Particle Image Velocimetry)と組み合わせ、3次元温度速度相関計測システムを開発する。また、3次元温度速度相関計測システムをDNCT(Dynamic Neutron Computer Tomography)解析システム開発に適用するための検討を行う。20年度は水流動データベース構築準備を行う。</p> <p>(2) 液体金属流動高時間分解3次元計測技術の開発</p> <p>18年度は、中性子解析で最適化したDNCTシステム（中性子制御系、試験体位置制御系、撮像系から構成される装置）を開発し、DNCT解析システムの開発に着手する。19年度は、開発したDNCTシステムと技術実証用試験体を組み合わせて研究用原子炉JRR-4の中性子照射室で炉内試験を実施し、解析システムの総合性能を評価する。さらに、試験体にトレーサ粒子入りの液体金属（低融点はんだ）を流すための熱流動試験装置（液体金属流動装置）の設計・製作を行う。また、炉内試験前に安全確保を目的とした炉外試験を実施する。20年度は、DNCT解析システムを完成するため、データ圧縮解凍処理および高並列高速解析アルゴリズムの研究開発および実装を行う。また、データの精度を向上させるため研究用原子炉JRR-3を用いて要素技術改良試験を実施する。さらに、DNCTシステムと液体金属流動装置をJRR-4の中性子照射室内で統合して、液体金属流動データベースの構築を目指した炉内試験を行う。DNCT技術を用いて得られたデータをDNCT解析システムを用いて処理し3次元温度速度同時計測データベースの構築準備を行う。なお、平成20～21年度のJRR-4の運転停</p>

	<p>止に伴い、研究開発（プロジェクト）期間を1年延長し、4年間とした。従って、JRR-4の中性子照射室での液体金属流動炉内試験は平成21年度の復旧後の実施に変更した。</p>
<p>2. 研究成果</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 成果 ・ 副次的な成果 ・ 論文、特許等 	<p>【研究開発項目（1）水流動高速度3次元直接計測技術開発】 [得られた成果]</p> <p>水流動高速度3次元直接計測技術開発では、臨港寿命を用いた高精度な温度計測手法を開発し、この手法を粒子画像流速測定法（PIV）と組み合わせることで2次元温度速度相関計測システムを開発するとともに、液体金属流動高速度3次元直接計測技術開発に応用するための開発を進めた。具体的な成果を下記にまとめる。</p> <p>① 燐光寿命温度計測手法開発</p> <p>水流動高速度3次元直接計測技術開発に必要な、燐光寿命に基づく温度分布計測システムを開発した。さらに、多次元化を進めるとともに、炉内構造を模擬したテストセクションを製作し、燐光寿命計測法について評価を行った。高精度な温度分布計測手法である燐光寿命計測を行うため、寿命が温度依存性をもつ染料の寿命特性を詳細に評価し、感度の高い染料の選定を行った。具体的には、ユーロピウム錯体の EuTTA を候補染料として選定した。EuTTA の場合、2枚の画像から算出可能な燐光寿命が$-7\%/^{\circ}\text{C}$であり、レーザー誘起蛍光法の約7倍の感度をもつことを明らかにした。このユーロピウム錯体を用い、パルスレーザーとカメラを組み合わせることで、燐光寿命温度分布計測システムを構築した。具体的には、レーザー発振とカメラの露光タイミングを調整して、寿命を計測するシステムを開発した。炉内構造を模擬したテストセクションを屈折率が水と等しいメックスフロンを用いて製作し、燐光寿命計測法について評価を行った。さらに、カメラを3台用いて多次元化をすすめた。</p> <p>② 3次元温度速度相関計測システム開発</p> <p>初年度には、システムの開発準備を行い、両システムを同期して動かすためのシステムを設計した。さらに、温度速度相関計測システムをDNCT解析システム開発に適用するため、アルゴリズムを予備調査した。平成19年度には、まず、平成18年度に開発した燐光寿命温度計測システムと、ダイナミックPIV(Particle Image Velocimetry)システムを組み合わせることで、2次元温度速度相関計測システムを開発した。さらに3次元温度速度相関計測システムに展開した。具体的にはレーザーシートスキャンニングシステムを構築・活用して、多断面速度分布計測と温度計測を同時に行い、温度と速度の同時計測を実施した。</p> <p>平成18年度に試作した炉内構造模擬テストセクションに改良を加え、強制循環ポンプ、流量計、燃料棒を模擬した7本のヒーターを装備し、ヒーターはそれぞれ独立した出力コントロールが可能であるものを作成した。また、炉内構造模擬テストセクション内での流れを測定するためには、より高性能でPIVにも適した感温粒子となりうる粒子を模索し、この粒子とEuTTAとを合成する必要があるため、新しいトレーサー粒子の評価を行った。更に、より広い温度条件でも温度速度同時計測が可能となるよう、複数の新しい燐光剤の燐光寿命温度特性を評価した。計測アルゴリズムでは高速度カメラを最大限に活用した手法を考案し、高精度に寿命減衰率を測定し、速度と温度の同時計測を実施した。</p> <p>3次元温度速度相関計測システムをDNCT解析システム開発に適用するための検討を行った。具体的には、本システムのような幾何光学に基づく3</p>

次元再構築法を、DNCT で用いられている CT 手法に基づく再構築法に適用する可能性について評価を行った。

③ 水流動データベース構築準備

平成 19 年度には流動データベースの構築を目指した検討に向けて、実験装置検討、パラメータ検討などの予備調査を行った。また、平成 20 年度には浮力と慣性力の比であるリチャードソン数および粘性力と慣性力の比であるレイノルズ数を液体金属実験とあわせ、レイノルズ数約 6000、リチャードソン数約 0.05 の条件で実験を行った。開発してきた温度速度相関計測システムにおける温度測定のための校正実験を行うとともに、本実験を行い、「液体金属流動データベース構築準備」のリファレンスとなるよう、各条件での平均速度分布・温度分布をまとめた。

④ まとめ

燐光寿命を用いた高精度な温度計測手法を開発し、粒子画像流速計測法と組み合わせて 3 次元温度速度相関計測システムを世界で初めて開発した。液体金属流動と将来的に比較検討が可能となるレイノルズ数約 6000、リチャードソン数約 0.05 をはじめとする、広範囲な温度速度条件において、温度速度を共通の画像から算出可能な複合計測技術は、2010 年現在においても本事業で開発した計測システムのみである。

⑤ 波及的成果

開発した温度速度相関計測システムは感温粒子(TSParticles)の組成を変更すれば、気体流れなど作動流体を選ばずに適用可能である。そのため、本田技術研究所や独立行政法人産業技術総合研究所における高効率ガスエンジン開発に応用されつつある。ガス成分に関わらず、また、蒸気であっても適用可能な温度分布計測法は世界でも本技術のみである。また、生体等の分野でも注目されるマイクロスケール流れの温度速度同時計測についても適用可能であり、国際共同研究に発展しつつある。これら国際共同研究や環境負荷低減のための産業への還元が進めば、社会への大きな波及効果となる。

【研究開発項目（2）液体金属流動高速度 3 次元直接計測技術開発】

[得られた成果]

本事業では、ダイナミック中性子トモグラフィ (DNCT) と命名した新計測技術を用いて液体金属流動の速度・温度同時高速度 3 次元計測データを取得することを目指すことを目的とする。DNCT 技術は物質内部を観察する技術である中性子ラジオグラフィ (NR) を基盤技術とした技術である。NR 技術を用いると液体金属は透明度の高い像として、トレーサは不透過な像として記録される。DNCT 技術は、NR 技術を 3 次元立体視技術に発展させた中性子トモグラフィと、高速度で動体を観察する高速度撮像中性子ラジオグラフィを融合・発展させた技術であり、独自の速度計測アルゴリズムと温度計測アルゴリズムを開発することで速度・温度同時 3 次元計測を目指す。このため、DNCT のハードウェアシステムを初年度に、解析システムを 3 年間で開発する。これらのシステムを用いて DNCT 技術を実証する。併せて液体金属流を作り出す液体金属流動装置の設計および製作を行い、最終年度には開発した全装置を JRR-4 中性子照射室内で組み合わせて、液体金属流動データベース構築準備のための炉内試験を実施する。以下に、研究開発項目毎に得られた成果をまとめて記す。

① DNCT システム開発

DNCT システム開発においては、中性子モンテカルロ解析コード MCNP を用いて DNCT システムを設計・製作し、炉外試験後 JRR-4 で炉内基礎試験を実施し、DNCT システムの基礎的特性を評価した。炉内基礎試験の結果、開発した DNCT システムにより 6 本の中性子ビームを生成し、6 面分の中性子ラジオグラフィ映像を同時に高速度で記録する DNCT の基本原理が確認できた。

② DNCT 解析システム開発

DNCT 解析システム開発においては、最初に中性子解析の可視化・分析システムを開発した。DNCT システムの設計シミュレーションには、開発した中性子解析の可視化・分析システムを用いた。次に速度解析の前処理として必要である瞬時の 3 次元 CT 値分布解析を行うデータ処理システムを構築し、個々の解析機能が正常に機能し、瞬時の 3 次元 CT 値分布が解析できることを確認した。3 次元速度計測法としてバネモデル粒子追跡法を、また液体金属温度を CT 値分布から計算する方法を開発し DNCT 解析システムに組み込んだ。また、DNCT データ処理システムが出力する速度ベクトル、流線、温度または CT 値分布の 3 次元データを合成して可視化し、3 次元分布を動的に表示する専用ビューアを開発した。テスト解析の結果、液体金属流動データの解析に必要な計算時間およびデータ容量が極めて大きくなることが確認された。このため、極めて大容量となる DNCT データを圧縮し必要時に解凍処理するためのアルゴリズムを研究し、階層化圧縮データを生成する機能を開発し、DNCT 解析システムに組み込んだ。また、高並列高速解析アルゴリズムの研究を行い、CT 演算を高速化するアルゴリズム、中央演算素子 (CPU) を例えば 128 個並列処理することで高速化するアルゴリズム、そして画像処理用素子 (GPU) を例えば 3 個使い 720 並列で処理する高速アルゴリズムを研究開発し、DNCT 解析システムに実装した。GPU を 3 個用いて CT 演算を行うデスクトップサイズの解析システムが、128 個の高性能 CPU を搭載するスーパーコンピュータを超える計算速度を発揮できる事を検証し、実用的に使える DNCT 解析システムとして完成した。

③ DNCT 技術実証

DNCT に最適な試験条件を検討し、総合性能を評価するため JRR-4 から入射する中性子のエネルギー分布を重水タンクで変更した炉内試験や改良コンバータ試験など DNCT 技術実証試験を JRR-4 で実施した。その結果、重水で入射中性子のエネルギーを減速させることで中性子ラジオグラフィ像のコントラストが改善され 250 フレーム/秒でも 125 フレーム/秒と同程度のデータ品質を得られることが分かった。回転体試験体と DNCT 解析システムを用いて、トレーサ粒子の 3 次元速度分布をバネモデル粒子追跡法により計測できる見通しを得た。液体金属入試験体の炉内試験と JRR-3 での炉内要素技術開発試験により、温度計測に関しては計測誤差が大きくなる等の課題が残り、速度計測に関しては計画通り技術の最適化ができた。

④ 液体金属流動装置設計・製作

JRR-4 の中性子照射室内に試験時に設置して DNCT システムを用いて液体金属流を測定するための可搬型液体金属循環ループを設計し、製作した。液体金属は融点が 95 度の低融点はんだであり、本装置内を平均温度が 200 度で循環できることを炉外試験で確認した。本炉外試験では、ループ内への液体金属の注入・定格運転・ダンプタンクへの回収時に安全上の問題が生じず、設計した温度分布と流動特性で運転ができることを確認した。

⑤ 液体金属流動データベース構築準備

JRR-4 の中性子照射室での液体金属流動炉内試験は、原子炉の反射体要素に不具合が確認され平成 20 年度の運転が停止されたため、その実施を平成 21 年度の復旧後に実施することに変更した。要素技術開発試験として、中性子の強度を光の強度に変換する中性子ラジオグラフィコンバータの改良試験と CT 演算時に立体的なぼけを補正する新機能の確認を目的とした 7 本バンドル試験体データの取得試験を JRR-3 の中性子ラジオグラフィ装置を用いて実施した。本試験により、コンバータの輝度を 1 割程度向上でき、また、画像のぼけを補正する方法によりトレーサ粒子の認識精度が向上できることを検証した。平成 21 年度に JRR-4 が運転再開されたため、炉外試験で安全性等を確認後、炉内試験を JRR-4 の中性子照射室で実施した。液体金属流動装置と DNCT システムを組み合わせ、液体金属を金属製発熱試験体内に流し、DNCT 技術で 6 投影データを同時かつ 1/125 秒毎に約 6000 タイムステップ分記録し、DNCT 解析システムを用いてデータ解析を行い、液体金属流動データベースの構築準備を完了した。

⑥ まとめ

金属動体の 3 次元の速度分布を計測できる技術として DNCT システムおよび解析システムを開発し、世界で初めて技術実証に成功し、中性子による立体的な動体計測技術として体系化した。現在、金属動体の立体的な動体計測が実現できた技術は本事業で開発した DNCT 技術のみである。

⑦ 波及的成果

高速度撮像に向けた中性子ラジオグラフィ用コンバータを開発でき、開発技術は日産自動車（株）による低燃費エンジン開発など産業利用や大型施設共用法で整備されている大強度陽子加速器施設 J-PARC での元素識別型中性子イメージング新技术に应用され、今後は製品化を検討中である。開発した高速 CT アルゴリズムや補正技術、画像処理用素子 GPU を複数個用いた高速 CT 演算技術など本事業で開発された DNCT 解析システム内の革新的要素技術のほぼ全てが、J-PARC に平成 23 年度以降建設提案がなされている“物質情報 3 次元可視化装置（世界共用装置）”の基盤技術として採用される予定であり、社会へ大きな成果還元となる。

【事業全体】を通して

高速増殖炉などの液体金属流を直接計測するための手法として、世界初の DNCT 技術を開発し、JRR-4 の中性子ビームを利用して、その実証を行うことができた。合わせて、液体金属流動検証用としての水流動を直接計測するための手法として、こちらも世界初の TSParticle を開発実証し、温度分布と速度分布を同時計測する手法を実用化した。いずれの手法も、学会発表などを通じて、世界的にも高く認められている。

大変残念ながら、JRR-4 が平成 19 年 12 月～平成 22 年 2 月までの長期にわたり停止するという状況に見舞われた。これは、4 年間（当初 3 年間）のプロジェクト期間の半分を超えている。このため、プロジェクトを 1 年延長したにも関わらず JRR-4 を用いた実験が、当初予定よりも遅れるとともに、回数も減ってしまった。成果としては十分な成果を上げることができているが、より発展的な成果を上げられる機会が失われてしまったことが残念であった。

【論文、特許等】

1. M. Kureta, H. Kumada, E. Kume, S. Someya and K. Okamoto, “Dynamic neutron computer tomography technique for velocity measurement in

	<p>liquid metal flow - Fundamental PTV experiment -", Journal of Physics: Conference Series, 147, 012087, (2009).</p> <p>2. M. Kureta, H. Kumada, E. Kume, S. Someya and K. Okamoto, "Data processing methods for dynamic neutron tomography velocimetry", Proceedings of 3rd International Workshop on Process Tomography, No. 64, (2009).</p> <p>3. 呉田昌俊、熊田博明、久米悦雄、染矢 聡、岡本孝司、" ダイナミック中性子トモグラフィ技術の開発 - 4次元速度計測基礎試験 -"、第45回日本伝熱シンポジウム講演論文集、A232、(2008).</p> <p>4. 呉田昌俊、熊田博明、久米悦雄、染矢 聡、岡本孝司、"液体金属熱流動評価のためのダイナミック中性子トモグラフィ技術の開発 (2) 速度計測"、日本原子力学会 2008 年秋の大会、E26、(2008).</p> <p>5. (日本原子力学会熱流動部会優秀講演賞受賞) 染矢聡、岡本孝司、飯田将雄、呉田昌俊、久米悦雄、熊田博明、"TSPによる温度速度同時計測法の開発に関する研究"、日本原子力学会 2007 年秋の大会 Paper No. K49, 北九州, 2007/9/27-29 (2007)</p> <p>6. 染矢聡、岡本孝司、" TSParticle と寿命法によるオイル中の温度場計測"、第35回可視化情報シンポジウム Paper No. A-104(P04-015), 2007年7月24-25日(7/24), 東京(2007)</p> <p>7. 倉健太郎、染矢聡、岡本孝司、" 405nm CW光源を用いた燐光による温度計測"、第35回可視化情報シンポジウム Paper No. A-103(P04-014), 2007年7月24-25日(7/24), 東京(2007)</p> <p>8. 染矢聡、飯田将雄、岡本孝司、" 流体中の温度計測のための temperature sensitive particle 開発"、日本機械学会熱工学コンファレンス 2007Paper No. C111, 京都, 2007/11/23-24 (2007)</p> <p>9. 倉健太郎、染矢聡、岡本孝司、" ポルフィリン系燐光剤を用いた温度計測"、日本機械学会熱工学コンファレンス 2007Paper No. C112, 京都, 2007/11/23-24 (2007)</p> <p>10. (基調講演) 染矢聡、岡本孝司、" 蛍光・燐光を用いた熱流動場の可視化"、第45回日本伝熱シンポジウム Paper No. A231, 2008年5月21-23日(5/22), つくば(2008)</p> <p>11. 染矢聡、倉健太郎、李艶榮、岡本孝司、" 感温粒子を用いた温度速度分布同時計測"、Trans. JSME B, Vol. 75, No. 758, pp. 1975-1982 (2009. 10)</p> <p>12. 染矢聡、" 温度と流れの可視化計測"、自動車技術, Vol. 63(5), pp. 61-66, 2009. 5</p> <p>13. Daisuke Ochi, Satoshi Someya, Koji Okamoto, " The Velocity and Temperature Measurement of a Water Flow in the Wire-Wrapped 7-Rods Bundle System in FBR", Paper No. ICONE17-75593, The 17th International Conference on Nuclear Engineering, July 12-16, 2009, Brussels, Belgium</p> <p>14. 上記に関連して: アメリカ機械学会 ICONE17 Student Best Paper Award, 越智大輔 染矢聡 岡本孝司, 2009</p> <p>15. 同じく, (社)日本機械学会 動力エネルギーシステム部門 優秀講演表彰, 越智大輔, 2009</p> <p>16. Daisuke Ochi, Satoshi Someya and Koji Okamoto, " The velocity and temperature measurement of a water flow in the wire-wrapped 7 rods bundle", 13th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-13), Paper No. N13P1343, September 27-October 2, 2009, Kanazawa City, Ishikawa Prefecture, JAPAN</p> <p>17. Satoshi Someya, Daisuke Ochi, YanRong Li, Kaoru Tominaga, Keiko</p>
--	---

	Ishii and Koji Okamoto,” Combined Two-Dimensional Velocity and Temperature Measurements using a High-speed Camera and Luminescent Particles” , Applied Physics B, Vol.99, No.1, pp.325-332, 2010.3
<p>3. 事後評価</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 研究開発の進捗 ・ 研究開発の成果 ・ ブレイクスルー 	<p>【研究開発の進捗】</p> <p>透明あるいは希薄流体の熱流動を動的に三次元可視化する新技術の開発・実証については、当初計画通りの成果が得られており、高く評価できる。一方、本来の目標である液体金属熱流動可視化技術については、JRR-4の運転停止に伴って、液体金属中での速度・温度同時3次元計測に至らなかったものの、優れたDNCT解析システムを開発したことは評価できる。</p> <p>【研究開発の成果】</p> <p>液体金属冷却高速増殖炉の炉内熱流動評価技術検証のためのデータベースの構築を目指すことを目的とした研究開発を行い、非常に汎用性の高い測定技術が開発され、水流動、液体金属流動共に期待した成果が得られている。本成果は、原子力以外の分野への展開につながり、社会への大きな波及効果が期待できる。</p> <p>【ブレイクスルー】</p> <p>水流動場で、燐光寿命を用いた温度計測手法と粒子画像流速計測法とを組み合わせた3次元温度速度相関計測システムは、従来に無い優れた革新的な計測手法であると評価できる。また、液体金属流動場で、液体金属の密度の温度依存性ならびに中性子透過性の密度依存性に注目し、中性子CTによる温度場計測の可能性に着目してその要素技術開発とシステム化に成功したことは、可視化が不可能な液体金属中での3次元温度速度相関計測の可能性を示した点において極めて優れた革新的な成果であると評価できる。</p>
4. その他	