

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 6 日現在

機関番号：17102

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26630486

研究課題名(和文) 溶融燃料の粘性および表面張力評価への光散乱法の適用

研究課題名(英文) Application of laser-induced capillary wave method to evaluation of viscosity and surface tension of melted nuclear fuels

研究代表者

有馬 立身(Arima, Tatsumi)

九州大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：60264090

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：核燃料の高温融体の物性は原子炉過酷事故における炉心溶融の解析にとって極めて重要である。本研究ではレーザー誘起表面波(LICW)法を粘性係数および表面張力の測定に適用し、基本的な装置の組み上げ、粘性率既知の液体の室温での測定を行った。LICW法に必要な表面波の波長をアクリル板への干渉縞の焼付およびCCDカメラによる可視化から推定することが可能となった。室温にて、トルエン、純水、粘性標準溶液の表面波の動的挙動を観察し、粘性係数が高くなると表面波の減衰が大きく、逆に低くなると振動が持続しやすくなることを確認した。

研究成果の概要(英文)：Fluid properties of nuclear fuels are of great importance for analyzing the core melt accident in reactors. Here, the laser-induced capillary wave (LICW) method in which two-divided laser beams were forced to interfere on the liquid surface was conducted to evaluate viscosity and surface tension. Considering this capillary wave as a moving diffraction grating, another probe laser was emitted there. The change in intensity of first diffracted light reflects decay and oscillation of the capillary wave.

In this study, the LICW measurement system was prepared, and the capillary wave length that was one of the most important parameters in this method was evaluated by printing on an acrylic plate and by the CCD camera. Toluene, water, and viscosity standard solutions were used in the room-temperature experiment. As a result, we observed that the diffracted light intensity decayed rapidly for high-viscosity liquid and its oscillation tended to last for low-viscosity one.

研究分野：核燃料工学

キーワード：粘性係数 表面張力 溶融燃料 レーザー誘起表面波

1. 研究開始当初の背景

核燃料として使用されるアクチニド酸化物の超高温物性、特に高温融体の物性は、それらの持つ融点が 3000 K 程度であること、それ自身放射体であることからの理由から、実験的な研究は極めて困難である。したがって、過去の研究例も少なく、更には、測定された粘性係数なども、大きな測定誤差を含んでいる[1]。

一方、福島第一原子力発電所事故で発生した核燃料物質を含む燃料デブリ、高燃焼度の商業炉用燃料およびマイナーアクチニドを含む混合酸化物燃料などの超高温における熱物性は、過酷事故における炉心溶融の事象進展解析や原子炉の安全性・健全性を評価する上で必要不可欠なものとなっている。

本研究では、液体物性の中でも表面張力・粘性係数に着目し、それらの測定手法の開発を目的とした。ここで提案する測定手法は、液体の表面に局在する波(リブロン)を回折格子と見なし、そこへプローブレーザー光を照射し、リブロンから散乱されてくる一次回折光の強度の時間変化を解析することで、液体の動的物性を評価するものである。

当初は自然発生的に存在するリブロンに対して測定することを予定していたが、低粘性の液体には有効であるが、測定に長時間を要する(繰り返し測定が必要)、外部からの振動を最大限抑える必要があることなどが判明した[2,3]。

2. 研究の目的

溶融燃料など粘性係数が未知なもの、あるいは粘性係数が高い液体を将来の測定対象にする場合、自然な状態ではリブロンが生じにくくなることが予想されたため、それに替わって、二光束レーザー干渉法により外部から強制的にリブロンを生じさせる手法を採用することとした[4]。この手法は測定システム自体は複雑になるものの、一方で測定時間が極めて短くなる($\sim \mu\text{s}$)ことも期待できるなど、メリットも大きい[4,5]。

本研究では、二光束レーザー干渉法またはレーザー表面誘起表面波法(LiCW法)と呼ばれる手法を適用した測定システムを構築し、粘性係数が既知の溶液を室温にて測定可能にすることを目的とした。

3. 研究の方法

LiCW法を基にした測定システムは主に以下の装置で構成される。

- ✓ 表面波を発生させるための加熱用パルス YAG レーザー
- ✓ 加熱用レーザーを分割および試料へ導くためのビームスプリッターおよびミラーなど
- ✓ プローブ用 He-Ne レーザー
- ✓ プローブ用のレーザー光のノイズを取り除くための空間フィルタ
- ✓ 表面波からの一次回折光を検出するた

めの高感度・高速受光装置およびデータ記録用の高速デジタルオシロスコープ
これらの装置を光学テーブル上に配置した外観図を図 1 に示す。パルス YAG レーザーが適当な幅の干渉縞(リブロン)の波長に相当する)を持つようにビームスプリッターおよびミラーを配置している。その際、光路を調整するために垂直方向にも光学テーブルを設置した。

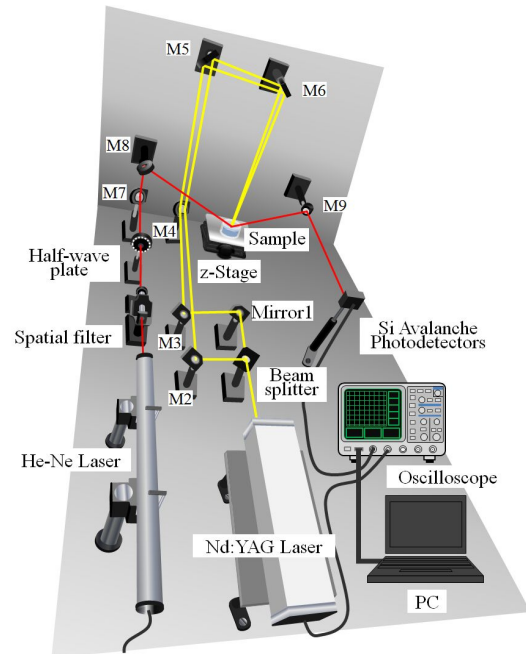


図 1 LiCW 法による液体の動的物性測定装置

測定システムの動作手順は以下の通り。

プローブ He-Ne レーザーを常時照射し、一次回折光の強度が十分になるよう液体表面への入射角および液面の高さを調整する。

パルス YAG レーザーをビームスプリッターで分割し、液体表面上で干渉するようミラーを配置する。

干渉縞の間隔を計測する。

ファンクションジェネレータでバースト信号を発生させ、これをパルス YAG レーザーのスタート信号およびデータ収集のためのトリガー信号として測定を開始する。

LiCW 法ではリブロン)の波長が極めて重要になる。そこでこの工程では、加熱用のパルス YAG レーザーで形成される干渉縞を、黒色アクリル板へ焼付けた後レーザー顕微鏡で観察する方法と干渉縞の強度分布を直接 CCD カメラで測定する方法で計測した。

4. 研究成果

4.1 レーザー二光束干渉法による干渉縞の形成

レーザー顕微鏡を用いてアクリル板の照射部分を観察し、干渉縞が形成されていることを確認した。干渉縞の間隔はおおよそ $66 \mu\text{m}$ であった(図 2 上部)。

CCD カメラにより、その場で干渉縞を観察することを可能にした。照射部分全体において干渉縞が形成されており、その間隔はおよそ $63\mu\text{m}$ であった(図2 下部)。

いずれの観察手法においても二光束干渉法による干渉縞が明確に観察されており、干渉縞の間隔もおよそ一致した。これら結果は本手法の有効性を示すものである。

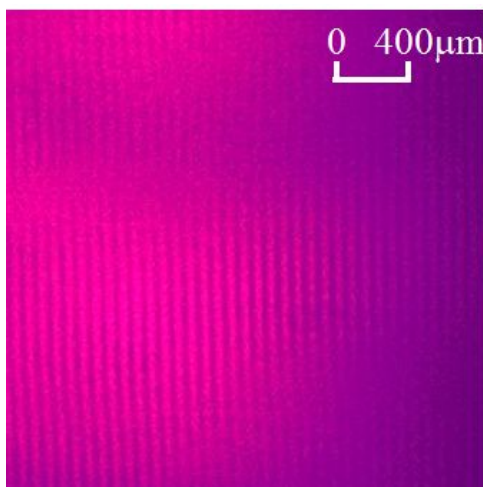
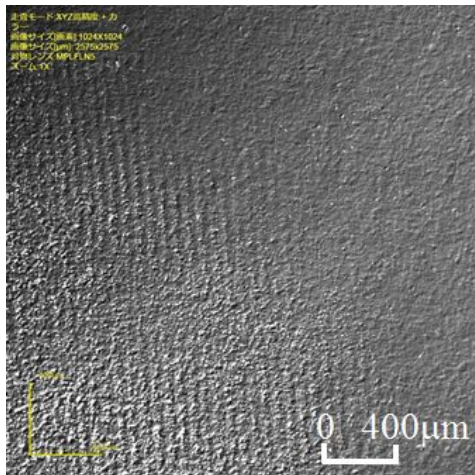


図2 パルス YAG レーザーによる干渉縞(上: アクリル板、下: CCD カメラ)

4.2 表面波の減衰・振動挙動の観察

粘性係数の異なるトルエン、水、標準液(JS5)の室温における測定結果を示す(図3)。横軸は時間、縦軸は一回折光の強度である。これら3つの液体の粘性係数は、 0.552 、 0.889 、 $3.55\text{ mPa}\cdot\text{s}$ と知られている。リップロンの動的挙動は、Navier-Stokes の式、連続の式、熱伝導方程式を連立させて解くことで解析できるとされるが[5]、今後の課題とする。定性的には、粘性係数が高くなるほど、振動の減衰が大きくなっていることが分る。したがって、二光束干渉法によって液体表面に生じた表面波の減衰振動をおおむね検出できているものと判断した。更に、結果の横軸スケールは μs となっており、極めて短い時間の現象を捉えることが可能であることも示されている。粘性係数や表面張力を解析的に

求めることの他に、液体に接触している空気の影響、加熱装置との融合、更には溶融体の測定を今後の解決すべき課題として考えている。

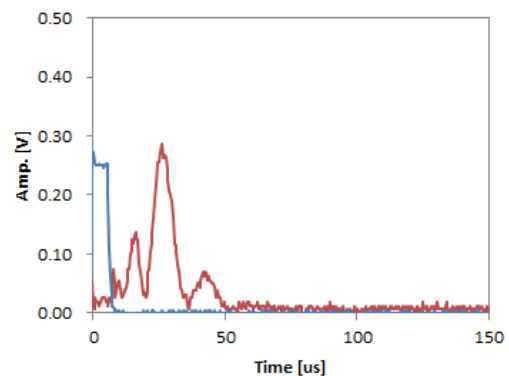
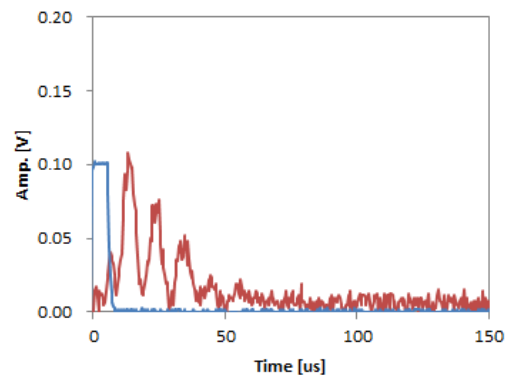
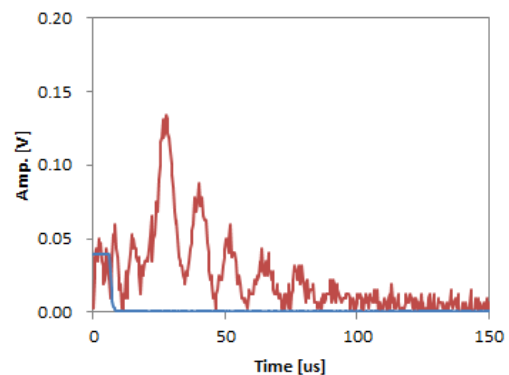


図3 トルエン、水、粘性標準液 JS5 に対する一回折光の減衰・振動挙動(上から下へ)

<引用文献>

- [1] F. Sudreau, G. Cogent, Nucl. Eng. Des. 178 (1997) 269.
- [2] R.B. Dorshow, A. Hajitoo, R.L. Swofford, J. Appl. Phys. 63 (1988) 1265.
- [3] T. Nishio, Y. Nagasaka, Int. J. Thermophys., 16 (1995) 1087.
- [4] K. Yasumoto, N. Hirota, M. Terazima, Phys. Rev. B, 60 (1999) 9100.
- [5] 滝口広樹, 長坂雄次, 日本機械学会論文集 B 編, Vol. 79, No. 800 (2013) 690.

5. 主な発表論文等
(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 0件)

〔学会発表〕(計 0件)

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕
出願状況(計 0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況(計 0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

有馬 立身 (ARIMA, Tatsumi)
九州大学・大学院工学研究院・助教
研究者番号：60264090

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

佐藤 勇 (SATO, Isamu)
独立行政法人日本原子力研究開発機構・その他部局など・研究員
研究者番号：80421783

廣沢 孝志 (HIROSAWA, Takashi)
独立行政法人日本原子力研究開発機構・その他部局など・研究員
研究者番号：10544885