

令和元年5月28日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06109

研究課題名（和文）低コヒーレンス干渉法の開発と管内相変化伝熱における薄液膜挙動の解明への適用

研究課題名（英文）Development of partial coherence interferometry and its application to elucidation of thin liquid film behavior in pipe phase change heat transfer

研究代表者

党 超鋌（Dang, Chaobin）

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・准教授

研究者番号：30401227

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,700,000円

研究成果の概要（和文）：表面張力作用が大きい微細流路の気液二相流，相変化特性に支配する薄液膜の挙動の新たな非接触直接計測手法として，低コヒーレンスレーザー干渉法を提案し，そのメカニズムの検証と薄液膜計測への適用性を確認した．提案手法は，実際の半導体レーザーの位相の不連続性を利用し，薄膜を透過した後の干渉縞の強度と光路長差との関係を特定する．その関係を用いて，液膜の空間分布のみならず，液膜の絶対厚みの情報も取り出すことが可能である．また，高速カメラを用いて計測することで，高時間，空間解像度での液膜挙動の非接触計測が可能になることを確認した．

研究成果の学術的意義や社会的意義

細管における伝熱特性は，管内における冷媒の流動様式変化と壁面付近形成する液膜厚さおよびその乱れに密接な関係がある．その液膜の挙動の高時間，空間解像度での把握は極めて重要である．従来のレーザー共焦点変形計法は高精度，高時間的な解像度の計測が可能だが，空間的な分布をとらえることができない．レーザー干渉法を用いた液膜の空間分布を精度良く検出手法が知られているが，液膜の絶対値の情報が直接得られないため，別の手法を併用するか，過熱領域から推算する必要がある．本提案手法は，簡易な半導体レーザーを用いて，高時間，空間解像度での液膜挙動の非接触計測が可能であるため，広い範囲での適用は期待される．

研究成果の概要（英文）：Partial coherence laser interferometry is proposed as a new non-contact direct measurement method of the behavior of thin liquid film that governs the phase change characteristics of gas-liquid two-phase flow and phase change characteristics. Verification of the mechanism and the applicability to thin liquid film measurement was confirmed. The proposed method uses the phase discontinuity of the actual semiconductor laser to identify the relationship between the intensity of the interference fringes after passing through the thin film and the optical path length difference. Using this relationship, it is possible to extract not only the spatial distribution of the liquid film but also information on the absolute thickness of the liquid film. In addition, it was confirmed that non-contact measurement of liquid film behavior in high time and spatial resolution becomes possible by measurement using a high-speed camera.

研究分野：熱工学

キーワード：低コヒーレンス干渉法 薄液膜挙動 レーザー干渉法

1. 研究開始当初の背景

エネルギー・素材価格の高騰や、地球温暖化に代表される環境問題などへの意識の高まりに伴い、小型、高効率な熱エネルギー機器のニーズが非常に強くなっている。その中、ヒートポンプ用冷媒の環境問題により、伝熱機器の高性能化と充填量削減のために熱交換器の細管化、扁平管化が検討されている。

細管における伝熱特性は、管内における冷媒の流動様式変化と壁面付近形成する液膜厚さおよびその乱れに密接な関係がある。本研究室は、水力直径が 1mm 前後の微細矩形管を用いた可視化と伝熱計測を行い、表面張力の効果が比較的に強くなり、スラグ流になりやすいことと、角部での液滞留により、壁面の中央部に薄液膜が形成することにより高い熱伝達性能が示すことの知見を得ている。また膜が薄くなる効果で核沸騰が抑制され、液膜の蒸発が支配的な伝熱メカニズムになることが分かった^[1]。また、宮田らも微細流路において液膜厚さの把握が液膜蒸発性能予測に重要であることを提唱しているが、薄液膜の厚みは伝熱性能測定から逆算したため誤差が大きい^[2]。さらに、数値計算及び理論モデルによる薄液膜挙動の研究報告があるが、液膜の直接計測データが少ないため、沸騰・凝縮伝熱の実験計測結果を用いて数値計算及び理論モデルの検証を用いているのが現状である。

微細流路内の液膜厚みの直接計測は Han ら^[3]および申請者^[4]が行ったレーザー共焦点変形計による断熱流動薄液膜の直接計測、および Fang ら^[5]がマイケルソン干渉計を用いた凝縮膜の計測しか存在しない。申請者は、Han らと同様な手法を用いて、円管及び矩形管において、様々な形状、作動流体物性(密度、表面張力、粘性)における液膜の高速計測とモデリングに成功し、この手法の凝縮及び蒸発過程での適用有効性も示した。レーザー共焦点変形計を用いた計測は、液膜の時間変化特性をとらえることが可能だが、特に非円型管における液膜の空間分布を計測するために、センサーを連続的に動かして空間的にスキャンする必要があり、計測が困難になる。その一方、マイケルソン干渉計を代表とするレーザー干渉法を用いた液膜の空間分布を精度良く検出手法が知られているが、液膜の絶対値の情報が直接得られないため、別の手法を併用するか、過熱領域から推算する必要がある^[6]。

- (1) 田中千歳, 党超鋌, 飛原英治, 矩形細管流路内流動沸騰の伝熱機構, 2013 年度日本冷凍空調学会年次大会, 東京, 日本, 9月, 2013
- (2) 宮田一司, 森英夫, 濱本芳徳, 微細管内流沸騰熱伝達の整理式, 日本冷凍空調学会論文集, 28 (2), 137-148(2011)
- (3) Han, Y., Shikazono, N., Measurement of the liquid film thickness in micro tube slug flow, Int. J. Heat Fluid Flow, 30, 842-853 (2009)
- (4) 吉永 祐貴, 党超鋌, 飛原英治, "水平微細流路における気液二相流の流動様式とスラグ流における液膜厚さ", 日本冷凍空調学会論文集 31 (4), 383-396 (2014)
- (5) Fang, C., David M., Wang F., Goodson K., Influence of film thickness and cross-sectional geometry on hydrophilic microchannel condensation, Int. J. Multiphase Flow, 36, 608-619 (2010)

2. 研究の目的

次世代空調機用高性能熱交換器の伝熱管として期待されている扁平多穴管を主たる対象として、表面張力作用が大きい微細流路の相変化(凝縮・蒸発)伝熱性能に支配する薄液膜の挙動の非接触直接計測手法の開発を行う。特に低コヒーレンスレーザー干渉法により伝熱面における二次元的な薄液膜厚と分布を同時に計測する手法を開発し、伝熱管の形状、表面特性および動作条件における凝縮・沸騰伝熱時の薄液膜の特性を把握し、伝熱実験計測および数値解析に必要な液膜挙動情報を提供する。

3. 研究の方法

3.1 低コヒーレンス干渉法の提案

薄液膜の絶対値と空間分布及び時間変化を同時に計測できる革新的な手法として、本研究は低コヒーレンスレーザー干渉法を用いた液膜計測手法を提案する(図1)。低コヒーレンス干渉法は、一般的に干渉性の低い LED 光源を用いて微細な構造や形状を計測する手法として開発され、眼底検査など生体組織の断層画像を得る光コヒーレンストモグラフィーとして実用化されている。マイケルソン干渉計を代表とするレーザー干渉法では、レーザー光はコヒーレンス長が十分長く、干渉計から得られる干渉縞の強度は変化しないとしているが、図2に示す通り、実際の半導体レーザーは一定のコヒーレンス長で位相の不連続性が生じる。この位相の不連続性のあるレーザー光は、ビームスプリッターで測定光と

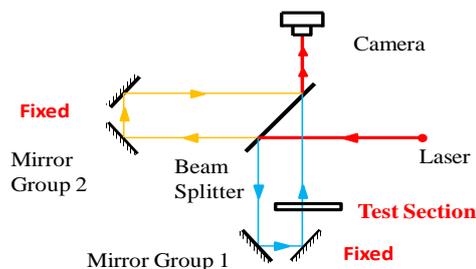


図1 低コヒーレンス干渉法のイメージ図

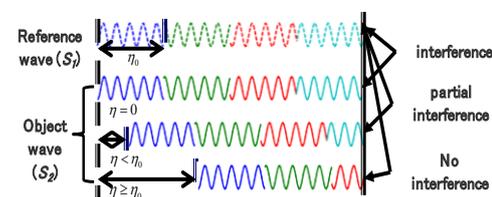


図2 位相不連続レーザー光の干渉模式図

参照光に分けて、再びビームスプリッターの後で干渉縞が形成する時、その光程差による位相のずれは部分干渉領域に入ると干渉縞の強度と位相差（行程差）の間に図3に示すように $I_p = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cdot \gamma \cos(2\pi\eta/\lambda)$ の関係が得られる。ここで I_1, I_2 はそれぞれ測定光と参照光の強度、 γ は測定光と参照光との相関の度合いを示すパラメータ、 η は光程差を光速度で割った時間的ずれである。従って、低コヒーレンスレーザー干渉法を用いて得られる干渉縞は、液膜の空間分布のみならず、液膜の絶対厚みの情報も取り出すことが可能である。また、高速カメラを用いて計測することで、高時間、空間解像度での液膜挙動の非接触計測が可能になる。

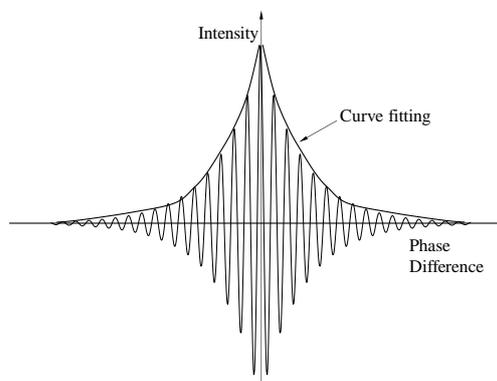


図3 干渉縞輝度と光路長差の関係

3.2 低コヒーレンス干渉法のキャリブレーションと計測

低コヒーレンス干渉法を適用する時、まず干渉縞の輝度と参照光及び測定光の光路長差との関係を特定する（キャリブレーション）。そのため、図4に示すように、測定光の光路のミラーをマイクロステージに固定させ、ミラーを $10\sim 50\mu\text{m}$ ずつ移動したときの干渉縞の様子を図5に示す。観察領域の干渉縞の最大輝度と最小輝度の差を光路長差との関係を記録する。ここで計算の都合で、観察領域の標準偏差の情報を matlab で解析して使用した。

図5(b)には干渉縞の強度と光路長との関係を示す。可動（測定光路の）ミラー位置によって、干渉縞の強度はまず大きくなり、最大値に到達した後、減少に転じることが分かる。また、図5(b)のA、Bの領域に示すように、使用するレーザーのコヒーレンス長は、おおよそ 1mm である。

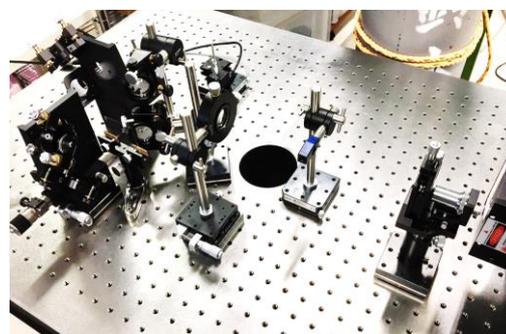
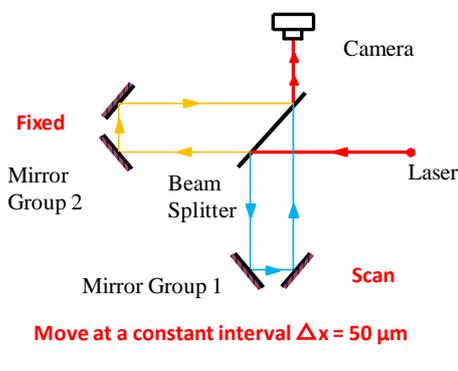
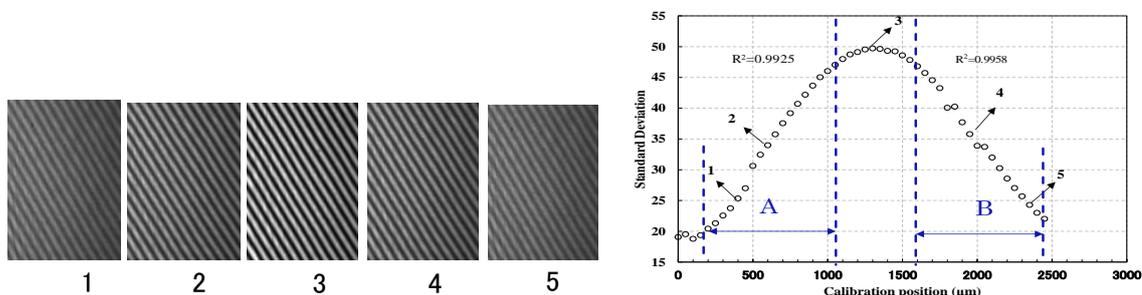


図4 キャリブレーション用測定光路



(a) ミラーの位置を変化した時の干渉縞の写真

(b) 干渉縞の強度とミラー位置との関係

図5 干渉縞輝度と光路長差の関係特定

よりコヒーレンス長の短いレーザーを用いると、もっと薄い液膜の計測が可能である。図6には青色半導体レーザー（波長 445nm 、出力強度 1mW ）の干渉縞の強度と光路長との関係を示す。図5の結果と同様、干渉縞の強度はミラーの位置（光路長）によってまず増大してから減少した。また、レーザーのコヒーレンス長は約 $60\mu\text{m}$ であることが分かる。

測定光路に設置したミラーの位置と干渉縞強度との関係を特定した後、ミラーを元の位置に戻して、実際の測定対象を測定光路に設置して、得られた干渉縞の強度を解析すれ

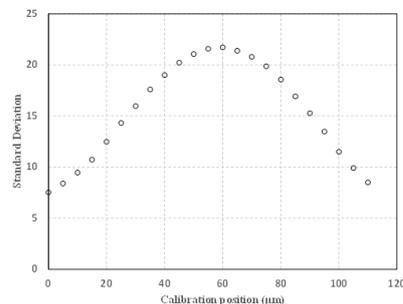


図6 青色半導体レーザーの干渉縞輝度と光路長差の関係

ば、測定対象の厚みが分かる。ただし、測定可能な対象物は、透明でかつ屈折率既知の均質体である必要がある。

4. 研究成果

4.1 矩形流路内液膜の計測

図5に示した干渉縞の輝度と光路長差の関係を用いて、矩形管内の液膜の計測を試みた。まず、厚み $150\mu\text{m}$ のカバーガラス板を提案した低コヒーレンス干渉法で計測し、 $148.8\sim 150\mu\text{m}$ の結果が得られた。計測誤差は1%以内であった。提案した低コヒーレンス干渉法の計測手法が確立したと考えられる。

ただし、図7に示した壁厚が $55\mu\text{m}$ の矩形を用いて、2回の計測でそれぞれ 63.1 と 47.4 の結果が得られた。計測誤差は $\pm 15\%$ 前後があった。これは、壁面は完全に平坦ではないため、光が壁面を通過時の屈折が発生する影響だと推測している。更なる計測手法の改善が必要である。

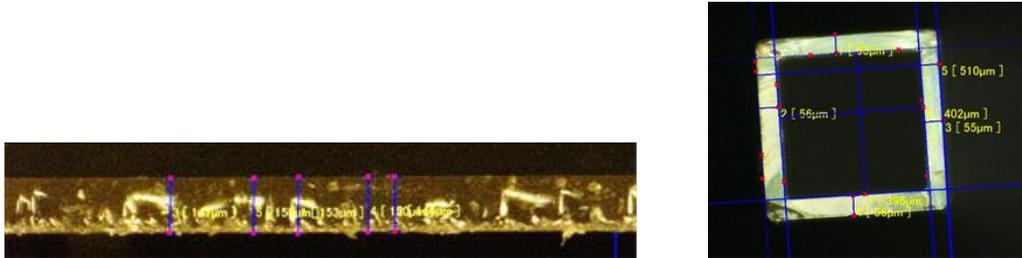


図7 計測対象 (左：カバーガラス, 右：矩形管)

表1 ガラス板 (壁) の厚さ計測結果

計測対象	低コヒーレンス干渉法 (μm)	マイクروسコープ (μm)	測定誤差 (%)
カバーガラス	148.8	150	-0.78
	150.0		0.02
矩形管	63.1	55	-14.8
	47.4		13.9

4.2 噴流衝突シートの液膜計測

液体の微粒化を促進する手法として、液膜を用いる方法が広く知られています。液体噴流を壁面に衝突させる手法、あるいは液体噴流同士を衝突させる手法を用いることで、薄い液膜を容易に形成できる。このため、微粒化特性の改善が期待され、幅広く研究が行われてきました。この噴流衝突でできた薄液膜に本提案手法を適用してみた。図8には計測手法と計測用装置を示す。エタノール液を2つのオリフィス通して噴射衝突の様子を2つの高速カメラで撮影し、図8(c)に示すように、噴流衝突により、一次シート、二次シートおよび液滴の形成が観察される。

噴流衝突で形成した一次シートを低コヒーレンス干渉法を用いて計測すると、図9に示すような干渉縞が観察される。さらに噴流速度によって干渉縞の様子が変化することがわかる。局所の輝度を用いて液膜の厚みを解析すると、噴流衝突で形成した1次シートは噴流速度の増加により大きくなるが、その厚みは、噴流速度の影響を受けず、おおよそ $13\mu\text{m}$ から $17\mu\text{m}$ 付近になることが分かった。その結果、従来研究結果と同様なので、提案手法を用いて薄液膜の空間、時間分布の同時計測が有効であることを示した。

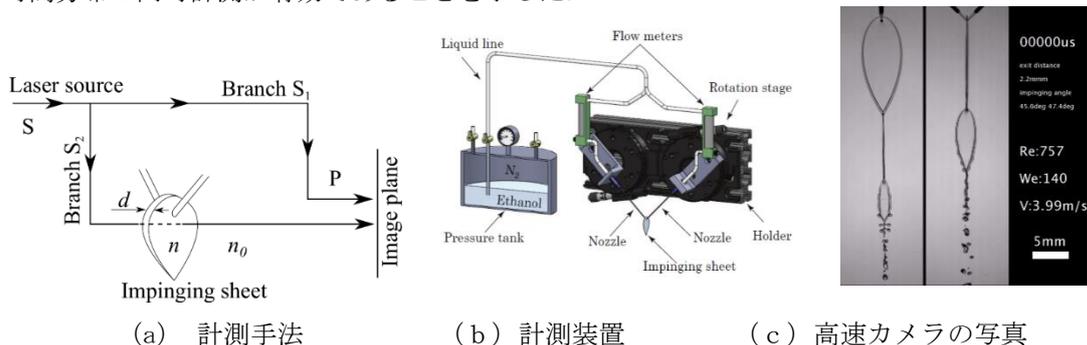


図8 噴流衝突シートの噴流衝突液膜の計測

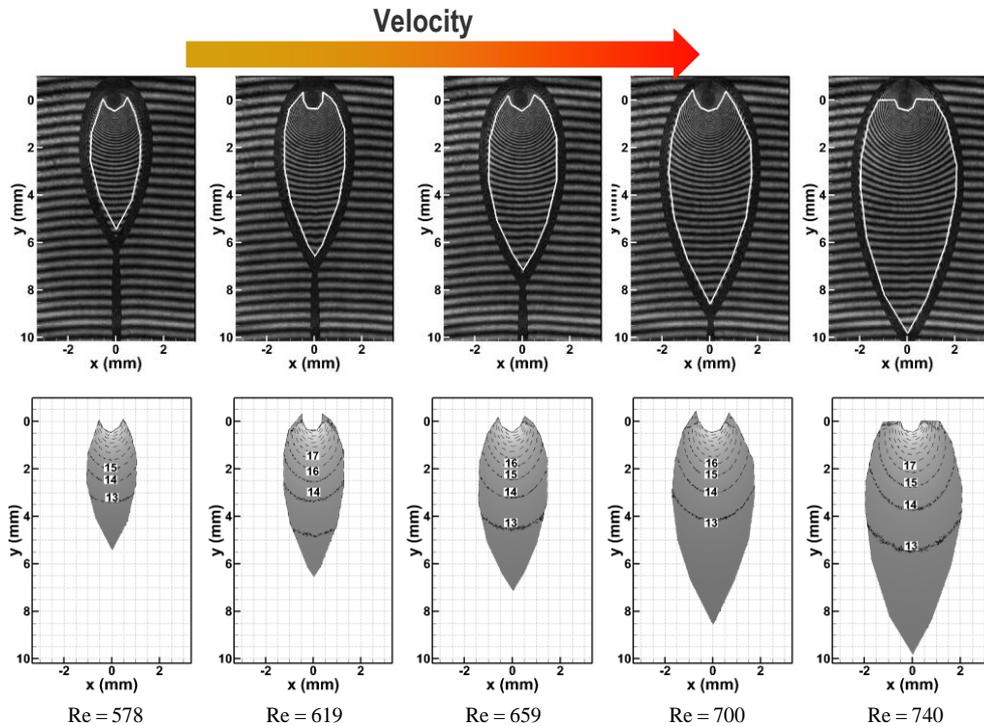


図9 噴流衝突シートの液膜の厚み解析

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 2 件)

- (1) Juan Shi, Gonghang Zheng, Zhenqian Chen, Chaobin Dang, Experimental study of flow condensation heat transfer in tubes partially filled with hydrophobic annular metal foam, International Journal of Heat and Mass Transfer, 136, 1265-1272 (2019) (査読あり)
- (2) Jingren Xu, Chaobin Dang, Eiji Hihara, "Influence of Wettability on Slug Flow in Micro Channels", 日本冷凍空調学会論文集, Vol. 35(4) (2018) (査読あり)

[学会発表] (計 8 件)

- (1) 洪思慧, 党超鋌, 飛原英治, 放射拡張流路熱交換器における流動沸騰安定性解析, 2018年度日本冷凍空調学会年次大会, 日本大学, 日本, 9月, 2018.
- (2) Chaobin Dang, Hanru Yu, Yuki Yoshinaga, Jinren Xu, Eiji Hihara, Effect of wettability on characteristics of slug flow inside microchannels, International Heat Transfer Conference, Aug. 2018, Beijing, China.
- (3) Chaobin Dang, Hanru Yu, Jinren Xu, Yuki Yoshinaga, Eiji Hihara, Experimental and numerical investigations on slug flow characteristics inside microchannels, 3th Thermal and Fluids Engineering Conference, 2018 March 4-7, Fort Lauderdale, FL, USA.
- (4) 俞涵如, 李兆玉, 党超鋌, 飛原英治, 微細流路内の気液二相スラグ流の流動特性に関する研究, 第54回日本伝熱シンポジウム, さいたま, 日本, 5月, 2017.
- (5) Chaobin Dang, Hanru Yu, Weixiao Shang, Jun Chen, Eiji Hihara, Measurement of Liquid Film Thickness Using a Partial Coherent Interferometry, 1st Asian Conference on Thermal Sciences 2017, March 26-30, 2017, Jeju, Korea.
- (6) Chaobin Dang, Yuki Yoshinaga, Hanru Yu, Eiji Hihara, Experimental Study of Influence of Wettability on Liquid Film Behavior of Slug Flow in Small Circular Tube, 1st Asian Conference on Thermal Sciences 2017, March 26-30, 2017, Jeju, Korea.
- (7) Chaobin Dang, Yuki Yoshinaga, Eiji Hihara, Measurement of thin liquid film thickness of two-phase flow inside mini/micro channels by using laser focus displacement meter, 8th International Symposium on Multiphase Flow, Heat Mass Transfer and Energy Conversion, December 16-19, 2016. Chengdu, China. (Invited)
- (8) Hanru Yu, Yu Zhu, Chaobin Dang, Eiji Hihara, A study on the flow stabilization of the microchannel evaporator under the influence of gravity, 第50回空気調和・冷凍

連合講演会，東京，日本，4月、2016.

〔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：
国内外の別：

○取得状況（計 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.hee.k.u-tokyo.ac.jp/dang.html>

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号（8桁）：

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：吉永 祐貴， 兪 涵如

ローマ字氏名： Yosinaga yuki, Yu Hanru

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。