

平成21年 4月27日現在

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2005～2008

課題番号：17206083

研究課題名(和文) PIV計測による超流動乱流特性の解明

研究課題名(英文) Clarification of superfluid turbulent flow phenomena by use of PIV

研究代表者

村上 正秀 (MURAKAMI MASAhide)

筑波大学・大学院システム情報工学研究科・教授

研究者番号：40111588

研究成果の概要：

まず、PIV法の超流動ヘリウムへの応用法の改善を行った。中立安定トレーサ粒子の発生は水素-重水素固体微粒子を使うことで成功させ、低温域での応用も可能とした。超流動乱流熱カウンター流ジェットへ応用して、粒子が量子化渦糸にトラップされることを明らかにした。これを認識した上で、時間平均速度に関して、空間減衰則・流速の空間分布を明らかにし、また乱流変動速度成分についても確率分布を求める等、定量的研究を行なった。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2005年度	18,000,000	5,400,000	23,400,000
2006年度	9,500,000	2,850,000	12,350,000
2007年度	5,800,000	1,740,000	7,540,000
2008年度	4,400,000	1,320,000	5,720,000
年度			
総計	37,700,000	11,310,000	49,010,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・航空宇宙工学

キーワード：流体、可視化、航空宇宙工学、超流動、乱流

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 超流動乱流研究においては、全く理論先行状態であった。通常流体における一様等方性乱流理論に対応するレベルの理論が Vinen や Tsubota によって提出されていたが、その実験的検証あるいは実験的研究はなかった。それは、超流体の速度の直接計測手法がなかったからである。我々は、つとに LDV 応用を試したが十分な成功を見るには至らなかった。

(2) 速度の直接計測手法としての PIV 法の超流動ヘリウムへの応用は、筑波大学と米国

の国立高磁場研究所において着手されていたが、まだ応用の開発段階であった。超流動ヘリウム中で中立安定なトレーサ粒子の発生法、PIV 法による流速値は何を表すのか - 常流体成分速度であるはずだが量子化渦の影響がありそうである - 等といった問題が主たる関心事であった。

(3) 超流動乱流状態下での伝熱現象に関しては、経験則である Gorter-Mellink 則がほぼ確立された状態にあり、現状で理論・実験の両面で利用できる状態となっていた。こ

れは温度変動の計測によってもたらされ、応用上も熱抵抗に関わるもので、流速に関与するものではない。

## 2. 研究の目的

(1) PIV用のトレーサ粒子の最適な発生法  
超流動ヘリウム中で中立安定となるPIV法用のトレーサ粒子の最適発生法を探る。我々グループで可視化用やLDV用として追求されてきた水素-重水素固体微粒子に加え、中空ガラスビーズ、高分子固体微粒子等について検討する。ポイントは、超流動ヘリウム中で中立安定密度性、粒子サイズ=1~10 $\mu$ mオーダー、適切な数密度である。この中では、水素-重水素固体が性質的に最も望ましく、我々の利用経験も豊富である。ただし発生には技術的難しさを伴い、安定した利用には多くのノウハウの蓄積を要する。中空ガラスビーズでは、広い密度分布の内、中立安定となる一部だけを利用する（他は浮揚するか沈降する）。過去には静電気や残留湿度による団粒化が問題となった。高分子微粒子は、粒径が極めて小さく望ましいが、密度は1000 kg/m<sup>3</sup>程度とHe IIに比べて大き過ぎ、He II中では絶えざる沈降速度が問題となるであろう。

### (2) PIV法の応用方式の確立

極低温密閉容器（クライオスタット）内における超流動実験に適したPIV/PTV法の選択と、応用方式の確立を図る。中心的応用課題は超流動熱カウンター流ジェットである。クライオスタット内に設置されるインサート部に加え、PIV用光学系の構成も最適化する。光学系は、連続光レーザーと高速ビデオの組み合わせと、パルスレーザーとPIV専用カメラの組み合わせが考えられる。時間分解能と空間分解能間でトレードオフして決められる。

### (3) 超流動熱カウンター流ジェットにおける平均流特性

平均流特性からは超流動乱流の特性を探る。ジェットの空間減衰、ジェットの速度プロファイル等について、粘性流体の十分に発達した乱流ジェット流動特性との比較を行う。

### (4) 超流動熱カウンター流ジェットにおける乱流変動成分の解析

乱流変動成分を対象として、超流動乱流の特性を探る。具体的には、ジェットの乱流変動成分の確率分布、乱流変動成分の時間減衰等について、粘性流体の十分に発達した乱流ジェットとの比較を行う。

### (5) 量子化渦糸-トレーサ粒子間干渉

超流動乱流状態においてPIV法により計測された流速は、常流動流速を示すとされるが、その大きさは常に理論値を下回っていた。同

じことは、過去のLDVによる計測においても経験していた。その要因としては、トレーサの常流動成分への追従性の不十分さ、トレーサ粒子-量子化渦干渉、等が考えられている。PIV計測データの正しい解釈と更なる発展のためには、その真相を探る必要がある。

### (6) PIV法による超流動乱流の実験的研究の方向性と限界に関する検討

超流動乱流研究においては、流速の直接計測が絶対的に必要である。しかし、PIVの出力データは単純に常流動流速を表すとは言えない。乱流計測の究極においては、粘性流体のエネルギー散逸領域におけるKolmogorovスケールに対応したスケールまでの空間分解能を持つ計測手法が必要である。その観点から、超流動乱流計測におけるPIV法の可能性と限界、等について展望する。

### (7) その他の超流動現象課題への応用 超流動流体のキャビテーション流れ等について、PIV法を応用した研究を実施

## 3. 研究の方法

### (1) 実験装置・手段の確立

①He II中で中立安定な粒子の発生法の確立。  
可視化実験やLDV応用における経験に加え、実際に粒子を発生させて判断する。PIVにおける必要固体微粒子は、可視化用よりも小さく、しかし撮影に十分な散乱強度が得られる様にLDV用よりもやや大きく、すべきであろう。

②超流動応用では、PIVとPTV法には一長一短がある。ここではジェット流れ場全域と言う広域データを必要とするので、PIVが適している。

③流れ場として、熱カウンター流ジェットを選択する。検証の目的で、ベローズポンプジェット装置も制作する。低温環境へのPIV応用の先行研究としてスラッシュ室素流れへの応用も試みる。PIV法の超流動流体への応用可能性を探るため、キャビテーション流への応用も試みる。

### (2) 超流動熱カウンター流ジェットへの応用

#### ①平均流特性の計測

#### ②乱流変動成分の計測

(3) 量子化渦-トレーサ粒子干渉を探る実験の一環として、超流動ヘリウムのベローズポンプジェットへのPIV応用を試みる。ここでは、ジェット中の超流動・常流動両成分は大域的に一緒に流れ、量子化渦の影響も小さいと考えられる。

(4) 超流動熱カウンター流ジェット以外の課題への応用:超流動キャビテーション流へ応用し、PIV結果を他の計測結果(可視化、温度・圧力変動計測、初生確率)との比較も行う。

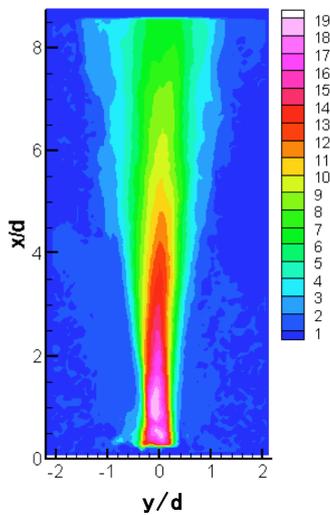
#### 4. 研究成果

(1) 超流動ヘリウム中で中立安定となるトレーサ粒子の発生法:

- ①水素-重水素固体微粒子が最適である。
- ②実験空間(He II 中)での生成法に関するノウハウを確立した:ヘリウムガスによる加圧(4 atm程度)と混合気の He II 自由界面上へのパルスの噴射。この方式は、海外の他のグループとは異なっている(メリーランド大=固体水素、国立高磁場研究所=固体高分子微粒子)が、原理上我々の選択が最も優れている。

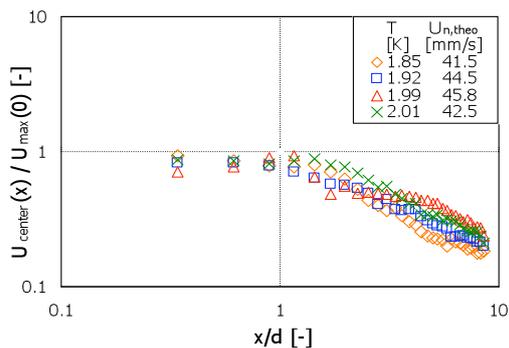
(2) 超流動熱カウンター流ジェットへの応用

- ① PIV 計測の Snapshot 結果: 低粒子密度領域(ノズル出口領域や下流域)でデータの欠落が起こり、平均化操作の必要性が認識された。
- ②条件付きアンサンブル平均:①と同条件( $T = 2.0 \text{ K}$ ,  $U_{n,theo} = 25.6 \text{ mm/s} (= q / \rho sT)$ )の 799 データによる条件付き平均化操作を行うことにより、Snapshot データの持つ問題点を解決できた。



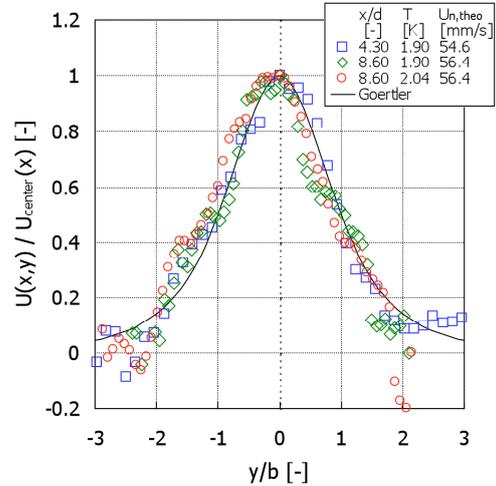
③空間減衰:

ジェット軸上の平均化流速をノズル出口の最大値で割った値を、出口からの距離  $x$  (ノズル内径  $d$  で無次元化) に対してプロットすることにより



空間減衰を調べた。ジェット上流域ではほとんど減衰を示さず、やや下流域から  $x^{-1}$  減衰が始まる。この性質は、粘性流体の十分に発達した乱流ジェットの流動特性に一致する。ただし、超流動熱カウンター流ジェットでは、 $x^{-1}$  減衰の開始点( $x/d \approx 3$ )は粘性流体のとき( $x/d \approx 6$ )よりも上流側となる点で異なる。

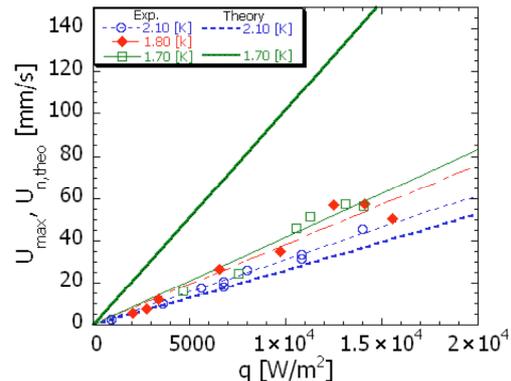
④速度プロファイル:



比較的大きな流速値の場合につき、下流域の速度プロファイルのいくつかを重ね描きした。横軸はスパン方向距離  $y$  を速度プロファイル半値幅  $b$  で無次元化した。実線は、粘性流体の十分に発達した乱流ジェットに対する経験則、Goertler プロファイルであり、PIV 計測値と良く一致する。一方、ジェットノズル出口近くでは、かなりトップハット形に近いプロファイルをとっていることが分かった。Goertler プロファイルは、粘性流の場合には一般にかなり下流域( $x/d \geq 6$ )で成立しているが、超流動熱カウンター流ジェットの場合には、それよりもかなり上流域( $x/d \geq 4$ )で成立することが分かった。

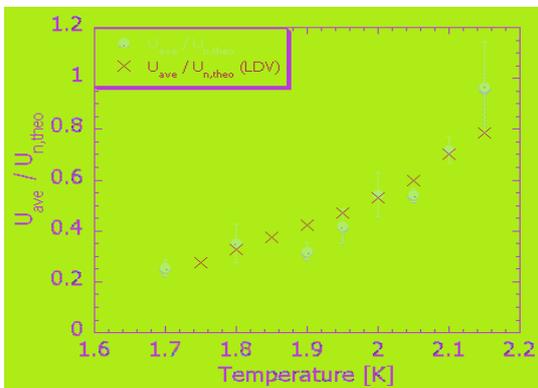
⑤加熱量  $q$  依存性:

計測された流速の断面中最大値(中心軸上値)

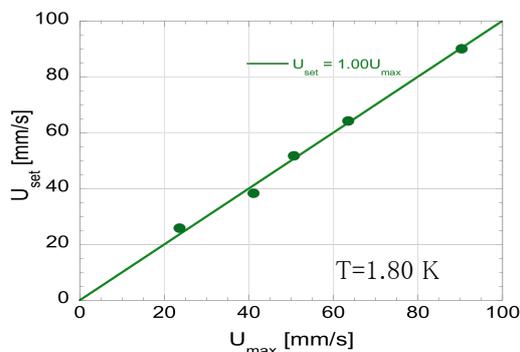


$U_{\max}$  と理論値 ( $U_{n,theo} = q/\rho sT$ ) の加熱量  $q$  依存性が調べられた。理論値が  $q$  に比例するのは明白であるが、 $U_{\max}$  もやはり  $q$  に比例することが示された。比  $U_{\max}/q$  は、ほとんどの温度で1を下回ったが、 $\lambda$  温度 (2.178 K) 近傍 (2.10 K) では1を上回っていた。これは、 $U_{\max}$  は速度分布の最大値であることによるので、本来はこの比較は、断面平均値に対してなされるべきであることが示された。

⑥ PIV 計測値と理論値との比較：流速値の断面平均値  $U_{ave}$  と理論値 ( $U_{n,theo} = q/\rho sT$ ) を比較して、結果を温度に対してプロットした。併せて、やはりトレーサ粒子を用いた計測法であるLDV計測結果 (×印) も示した。結果は、PIV計測値とLDV計測値とは極めて良く一致した。また、 $U_{ave}/U_{n,theo}$  は、強い温度依存性を持ち、 $\lambda$  温度近傍での値1から、温度の低下と共に急速に小さくなるのが分かった。この結果は、粒子の常流動成分への追従性の不完全さ、あるいは粒子と量子化渦の干渉、に求められる。



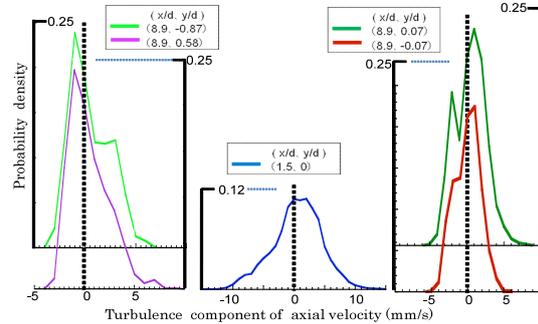
⑦ ベローズポンプジェットのPIV計測：



ベローズポンプジェットの中心軸上流速  $U_{\max}$  とベローズ収縮速度から導出した流速値が比較された。ここでは断面平均値  $U_{ave}$  ではなく断面最

大値  $U_{\max}$  を採用したが、ノズル出口近傍の速度プロファイルがトップハット形に近いことで正当化される。結果は、両方の値が温度に依らず完全に一致し、上記⑥で推察したトレーサ粒子の常流動成分への追従性の不完全さは否定される。

⑧ 乱流変動速度の確率分布 (暫定結果)：



$x$ -方向速度成分において、PIVによる計測値  $U_{PIV}(t,x,y)$  から時間平均値  $U(x,y)$  を差し引いて定義される乱流変動速度

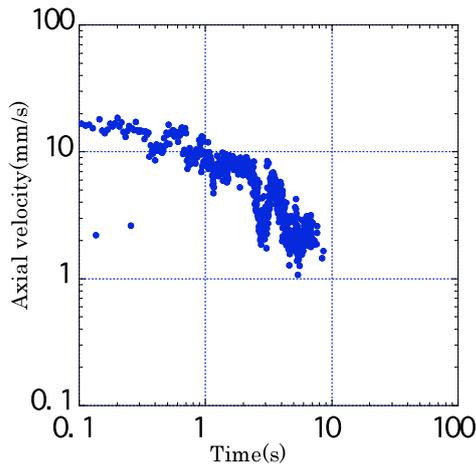
$$u(t,x,y) = U_{PIV}(t,x,y) - U(x,y)$$

について、いくつかの位置で確率分布を調べた。サンプル数が800程度と、十分な統計的結果を導くにはまだ1桁程小さいが、得られた結果を示した。ノズル出口中心位置 ( $x/d=1.5, y/d=0.0$ ) での結果には、まだ若干の偏りが見られる。下流域の剪断層内側位置 ( $x/d=8.9, y/d=-0.87, 0.58$ ) では、明らかな正方向歪みが認められる。この性質は、粘性流体の十分に発達した乱流ジェットのものとは一致する。一方下流域の中心軸から僅か離れた位置 ( $x/d=8.9, y/d=\pm 0.07$ ) では、粘性流体の乱流ジェットでは弱い負方向歪みが見られるが、本計測では明確には確認されない。結論的には、PIV計測値に対しても、その乱流変動成分について統計的議論が出来る様になったと言える。またこの程度の時空間分解能レベルにおいては、超流動乱流における乱流変動速度の挙動は、粘性流体の乱流ジェットのそれとは強い類似性が観測された。従って超流動乱流における乱流挙動の解明には、この方面の解析をさらに進めるべきことが確認された。

⑨ ヒータスイッチオフ後の時間減衰

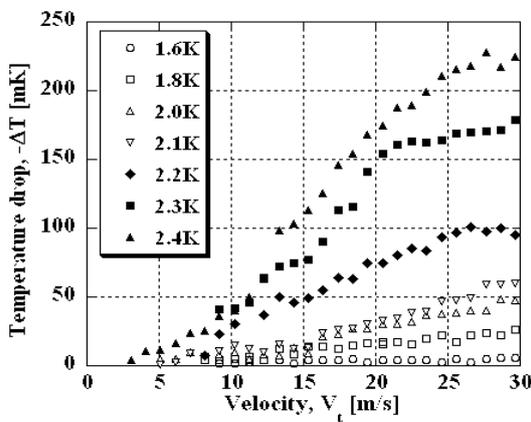
平均流の流速成分を除いた乱流変動速度の時間減衰を見るため、ヒータスイッチオフ後の速度の時間減衰を両対数にてプロットした。減衰の初期 (3秒以前) と後期で減衰則に違いがありそ

うである。引き続き、更なる長時間の記録を得るべく実験を進めるべきことが示唆された。



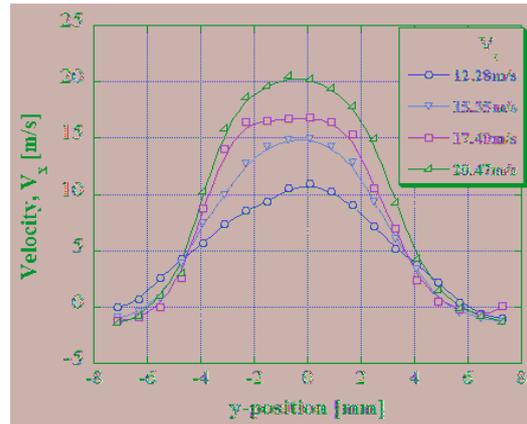
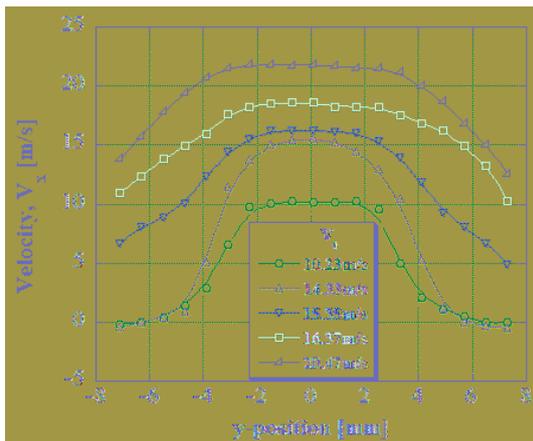
(3) 超流動キャビテーション流への PIV の応用

①キャビテーション誘起性の温度降下測定:



He II 中では、He I 程ではないが大きな温度降下(初期温度の 5%を超える)が起こり、しかも温度依存性を持つことも明らかとなった。

②PIV 計測による気泡流領域の発達の計測:



キャビテーション気泡をレーサとして PIV 法を適用した。結果は気泡流の速度の空間分布を示したものである。He II の場合、気泡流領域の発達と空間的広がりにおいて相当に大きいことが示された。

③液体ヘリウムにおける熱力学効果:

熱力学効果の尺度として、熱力学効果パラメタ  $\Sigma$  がしばしば使われる。He II の場合には熱伝導率  $\kappa_l$  は物理熱伝導率ではなく、超熱伝導率を使うべきことが分かった。結果によると、He I は  $\Sigma$  値が大きい典型的低温流体であり、熱力学効果が顕著に表れることになる。実際にも実験的に確認された。一方 He II では  $\Sigma$  値から、熱力学効果はほとんど現れない、と予測される。しかしこれは、①の実験事実と合致しない。実際には、超熱伝導性による気泡群成長の急速かつ大規模性により有限な温度降下と有意な温度依存性が表れることが分かった。それでも、気泡成長速度が決して無限大に大きいわけではなく、早い有限に留まるのは、量子化渦による超流動崩壊の影響であろうと考えられる。

(4) 低温装置とすることでスラッシュ室素管内流れへの応用がなされた。

(5)PIV の第2音波流速場の直接計測への応用(展望)

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 9 件)

① M. Murakami, et al.: Application of particle image velocimetry for measuring He II thermal counterflow jets. Cryogenics, 49 (2009), Web 上発表済み (印刷中)。(査読有)。

② S. Takada, M. Murakami, et al.: Visualization Study of the Interface between Superheated Two-Dimensional Narrow Channel by Using the

Shadowgraph Method. Cryogenics, 49 (2009),  
Web上発表済み (印刷中) . (査読有)

③ M. Murakami, et al.: PIV measurement study of fully developed superfluid turbulent thermal counterflow jet. Journal of Physics, Conference series 150, 2009, pp. 032069-032071. (査読有)

④ M. Maeda, M. Murakami et al.: PIV measurement of slush nitrogen flow in pipe, part II. Adv. Cryo. Engineering, 53A (2008) pp.51-58. (査読有)

⑤ M. Murakami et al.: PIV Measurement result of Superfluid He II Thermal Counterflow Jet.. Adv. Cryo. Engineering, 53A (2008) pp.183-1190 (査読有)

⑥ 村上正秀 他: He II 熱カウンター流ジェット計測への PIV の応用. 低温工学、43-3 (2008) pp. 88-93. (査読有)

⑦ 高田卓、村上正秀 他: シャドウグラフ法による狭小な平行平板間内に現れる<sup>s</sup>He I-<sup>s</sup>He I 界面の可視化. 低温工学、43-3 (2008) pp. 94-99. (査読有)

⑧ K. Harada, M. Murakami et al.: PIV measurements for flow pattern and void fraction in cavitating flows of He II and He I. Cryogenics, Vol. 46-9. (2006). pp. 648-657. (査読有)

⑨ K. Harada and M. Murakami: PIV analysis of cavitation flow characteristics of He II. Adv. Cryo. Engineering, 51A/B(2006) pp.1677-1684. (査読有)

[学会発表] (計10件)

① 村上正秀 他: 超流動ヘリウムキャビテーション流れにおける熱流体力学特性. 第14回キャビテーションに関するシンポジウム. 2009年 3月20日, 仙台市

② M. Murakami et al.: Measurement of superfluid thermal counterflow jet using PIV. アメリカ物理学会 流体力学分科会. 2008年11月23日. 米国 Texas, San Antonio

③ M. Murakami et al.: Measurement of Turbulent He II Thermal Counterflow Jet by use of PIV. National Science Foundation, Workshop on Visualization of Thermo-Fluid Dynamics at Low Temperatures. 2008年11月20日. 米国 Texas, San Antonio

④ 高田卓 他:  $\lambda$ 点圧力を超える超流動中での膜沸騰遷移の様相と熱伝達の関係. 低温工学秋期講演会 2008年11月12日、高知市

⑤ M. Murakami et al.: Superfluid turbulent

flow characteristics of thermal counterflow jet measured by PIV. 22nd International Cryogenic Engineering Conference. 2008年7月21日. 韓国、Seoul

⑥ T. Takakoshi et al.: Application of PIV Technique to Measurement of Cavitating Flows of He I and He II. 21st International Cryogenic Engineering Conference, July 18, 2006, Prague.

⑦ 原田浩平 他: 液体ヘリウム中のキャビテーション流れの圧力損失の特性. 低温工学春期講演会 2007年 5月16日 仙台市

⑧ 原田浩平 他: 液体ヘリウム中のキャビテーション流れの温度降下測定. 低温工学秋期講演会 2006年 11月21日 千葉市

⑨ 高田卓 他: 狭小2次元流路中の発熱による He II 相転移現象の可視化. 低温工学秋期講演会. 2006年 11月21日 千葉市

⑩ 原田浩平 他: 液体ヘリウム中の初生および発達段階におけるキャビテーション流れの特性. 低温工学秋期講演会 2005年 11月21日 熊本市

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

村上 正秀 (MURAKAMI MASAHIDE)  
筑波大学・大学院システム情報工学研究科・教授

研究者番号: 40111588

### (2) 研究分担者 (2005年度-2007年度)

連携研究者 (2008年度)

中納 暁洋 (NAKANOU AKIHIRO)

(独)産業技術総合研究所・エネルギー技術研究部門・主任研究員

研究者番号: 50344114