

令和 2 年 5 月 20 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06178

研究課題名(和文) 可変迎角フィン付き伝熱管による混相流の流動制御と熱輸送の最適化

研究課題名(英文) Flow control and optimization of heat transfer in mixed-phase flow around heated tubes with variable attack-angle fins

研究代表者

山田 雅彦 (Yamada, Masahiko)

北海道大学・工学研究院・准教授

研究者番号：70230480

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)：本研究は、氷スラリーを冷熱媒体として利用する際に、その氷の潜熱を有効に採取することで冷却効率を向上することを目的としている。スラリー中の氷粒子と伝熱面の接触を促進する目的で、水平加熱管に取り付けた矩形フィンの流れに対する迎角を様々に設定し、実験と粒子法による数値シミュレーションを行った。氷スラリー流の流速条件やフィン迎角の設定を様々に変えて氷粒子の融解伝熱量を測定・計算し、加熱管の配置などの効果も検討した。数値シミュレーションにより個々の氷の粒子の軌跡と融解伝熱量を検討し、管配置が千鳥配列の場合において、フィンによる攪拌効果が大きく、加熱面と氷粒子の直接接触に対する寄与も大きいことを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

氷スラリー中の氷粒子が加熱面近傍で融解する過程を解明することによって、氷粒子の融解潜熱は必ずしも加熱面への直接接触により有効に伝達されるものではなく、液相を介して伝達される方が有効である場合があることを示すと同時に、解析に粒子法を採用することにより様々な形状の流路、加熱面への解析の展開を容易にした。氷スラリーは氷蓄冷システムばかりではなく、鮮魚や野菜などの生鮮食品の冷却保存に有効に利用され、また、高温物体の急速冷却など今後も幅広い応用が展開されると考えられ、工業・産業のみならず我々の生活に深く関与することから、本研究の成果は様々な方面で有効に利用されると期待できる。

研究成果の概要(英文)：Present study aims to improve cooling efficiency by effectively collecting the latent heat of the ice when using ice slurry as a cold medium. The melting heat transfer of ice particles was measured and calculated, and the effects of the arrangement of heating tubes were also examined. Numerical simulations examined the trajectory of individual ice particles and the heat of melting, and showed that in the case of a staggered array, the stirring effect of fins was large, and the contribution to direct contact between the heating surface and ice particles was also large.

研究分野：伝熱工学

キーワード：混相流 固液相変化 融解伝熱 流動制御 熱交換器 数値解析 粒子法

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

地球温暖化の対策の一つとして、温室効果ガス排出量削減のために電力需要の平準化が試みられてきた。電力需要は季節や一日の時間帯で大きく変動し、冷房による電力消費によって夏季の日中に最も電力需要が高い。夏季の昼間における電力需要を低く抑えるための方法に、氷蓄冷熱システムを用いたピークシフトがある。氷蓄冷熱システムは、電力需要が低い夜間に冷凍機などで氷を生成し、その氷の冷熱(潜熱)を昼間の冷房運転に利用することで夏季昼間の電力需要のピークシフトを行うものである。

氷蓄冷熱システムでは、貯氷槽内の冷却管周囲に氷を生成するスタティック型と、液相中に微細な氷粒子が混合した流動性を有するシャーベット状の氷を生成するダイナミック型がある。この微細な氷粒子と液相が混合した流動体を氷スラリーといい、蓄冷媒体が流動性を有することから、蓄冷媒体の管路輸送や、流動による伝熱促進が可能であり、氷が熱交換器表面に固着しないことから、氷が熱抵抗になることが無いなどの利点を有している。氷スラリーからの直接採冷熱を行うためにはその流動特性および熱伝達特性を把握する必要がある、これまでに様々な研究が行われてきた。

例えば、底部に加熱面を有する水平矩形流路内の氷スラリー流の速度分布および氷スラリー流内の氷粒子の数密度分布に関する研究<sup>(1)</sup>によって、加熱部前後で氷スラリー流全体における氷充填率がほとんど変化しておらず、氷の融解潜熱が有効に使われていないことが報告されている。氷粒子が融解しなかった原因の一つに、密度差による浮力を受けた氷粒子が底面(加熱面)から離れ氷粒子が加熱面と接触しなかったことが考えられる。木幡ら<sup>(2)</sup>は、図1に示すように、水平加熱円管にフィンを設置し、その角度を適宜設定することで氷粒子の融解の促進を図ることを提案しその熱伝達特性を実験的に検討している。

このような熱交換器では、氷スラリーの流速や氷粒子密度などの条件によってフィンの最適角度の組み合わせがあると考えられ、フィン角度の最適な条件を検討するためには非常に多くの実験を行う必要がある。しかし、実験で全ての条件を調べることは時間とコストがかかるために容易ではない。また、実験では氷粒子が半透明であることから氷粒子の挙動を観察することが難しく、伝熱面付近での氷粒子の挙動が詳細に解明できないという欠点がある。

そこで、数値解析を援用することで、氷粒子の挙動を詳細に解明することができ、かつ、多くの条件を調べるための時間とコストが抑えられることから数値解析が有効であると考えられる。

Yanbo ら<sup>(3)</sup>は、水平円管内の氷スラリー流の解析を行っており、流速、氷充填率、平均熱伝達率の関係を調べているが、Yanbo らの解析では浮力に関する効果を加味していない。さらに、これまでの氷スラリーの数値解析では流れ場をオイラー的に解析し、液相と固相の体積割合を用いて氷の分布を求めていることから、一つ一つの氷粒子の運動および融解を記述するには不適切である。

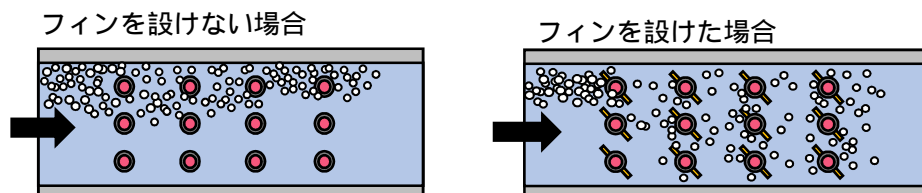


図1 フィン付き加熱管による氷粒子の攪拌の効果

氷スラリー内の氷の潜熱を有効に利用し、冷却効率を上げるためには、氷スラリー内の氷粒子を伝熱面に直接接触させる必要があると考えられる。そのための手段として、前述のフィン付き加熱円管の他にも、矩形水平流路における分岐噴流方式など様々な手法が提案されているが、いずれの方法においても、加熱面近傍における個々の氷粒子の流動および融解状態を詳細に検討することが求められる。

### 2. 研究の目的

本研究では、氷スラリー流内のフィン付き円管周りにおいて伝熱面近傍の氷粒子の運動とそれに伴う氷粒子の融解挙動の変化を詳細に検討するため、フィン付き加熱円管周りの氷スラリーの流動特性ならびに熱輸送特性に関して実験および数値シミュレーションにより検討することを目的としている。数値シミュレーションにおいては、粒子法の一つである MPS 法を用いて熱流体解析を行ない、フィン付き加熱円管のフィン迎角や加熱円管の配置が氷粒子の流動・融解特性に及ぼす影響を明らかにするとともにことなる流入条件に対する最適なフィン角度の配置を見出すことを目的としている。

### 3. 研究の方法

図2に実験装置の系統図を示す。実験装置は主に試験部、氷スラリー生成・貯蔵部、冷却用ブライン循環系の3つからなる。試験部はアクリル板によって製作された水平矩形流路であり、流路長1280mm、幅80mm、高さ200mm、入口から480mmまでを導入部として、高さ80mmから200mmまでに直線的に断面積が拡大されるようにした。導入部を通過後、300mmの位置から流れ方向に50mm間隔、流れと垂直方向に50mm間隔で加熱管9本碁盤目状に配置した。試験部の流入・流出

部には、T型熱電対および圧力タップをそれぞれ一組ずつ取り付け、氷スラリーの温度および試験部前後の圧力差を測定した。本実験で使用する加熱管では、銅管の内部にヒーターを挿入し、ヒーターに所定の電圧・電流を加えることにより加熱面を等熱流束条件とした。図3に加熱管の概観および構造を示す。外径20mm、長さ80mmの銅管に、長さ10mm、幅78mm、厚さ1mmの銅板フィンをはんだで固定している。伝熱面の温度測定のため加熱管には45°間隔に8ヶ所T型熱電対(300 $\mu$ m)を取り付けた。

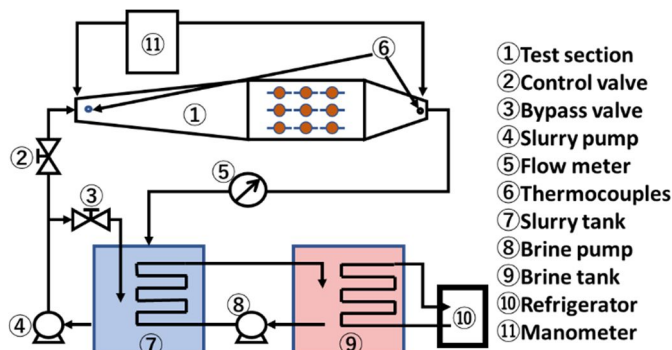


図2 実験装置系統図



図3 加熱管外観

加熱管の平均熱伝達率  $h_m$  は式(2.3)に示すように加熱面熱流束  $q$  を氷スラリー入口温度  $T_i$  と加熱管平均温度  $T_m$  の差で除して定義した。

$$h_m = q / (T_m - T_i)$$

単相流の熱伝達率  $h_l$  に対するスラリー流の熱伝達率  $h_s$  の割合を熱伝達率比として次式で定義した。

$$\eta = h_s / h_l$$

本研究で用いた解析モデルを図4に示す。本解析モデルは平行平板間の氷スラリー流内にフィン付き加熱円管が設置されている場合の二次元流路を想定し、フィン付き加熱円管を正方格子状に9つ配置したモデルと千鳥格子状に8つ配置したモデルを用意した。また、フィン付き加熱円管のモデルを図5に示す。フィン付き加熱円管はフィンを二枚設置した円管のモデルとフィンを一枚設置した円管のモデルを用意した。

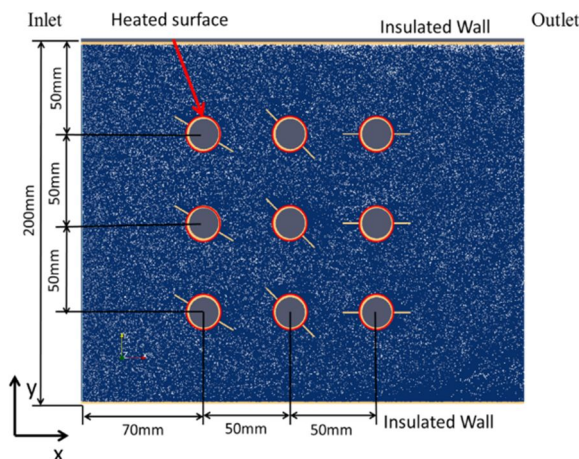


図4 解析モデル

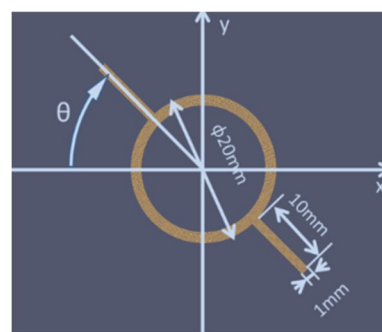


図5 加熱管およびフィンモデル

本解析では、越塚ら<sup>(4)</sup>による MPS 法を用い、その際に混相流を簡易に記述できるように、本解析では氷スラリー流に二流体モデルを適用した。二流体モデルでは固相と液相を相互作用する二種類の流体として記述する。本解析の流れ場である平行平板間の流れは、奥行き方向に対して流体の流れ及び温度場の変化がないと考え、解析対象を二次元流れとした。また、流れ場を非圧縮性流れとし、液相の密度は位置によらず一定であるとした。液相における支配方程式には以下の連続の式、ナビエ・ストークスの式、エネルギー方程式を適用した。

$$\frac{dp_l}{dt} = 0, \quad \frac{d\bar{u}_l}{dt} = -\frac{1}{\rho_l} \nabla P + \nu_l \nabla^2 \bar{u}_l + \frac{1}{\rho_l} \bar{F}_{ls}, \quad \rho_l C_{p,l} \frac{dT}{dt} = k_l \nabla^2 T_l + Q_{ls}$$

ここで、 $F_{ls,i} = \mu_l \nabla^2 u_{j,i}$  ( $i = x, y, j = l, ice$ ) は氷と液相の相互作用を表し、 $\mu_l$  は



液相の粘性係数である．また，氷粒子における動粘性係数は  $\mu_l / \rho_{ice}$  と近似した．氷と液相間の移動した熱量は以下の式で算出した．

$$Q_{ls} = k_{ice} \nabla^2 T$$

同様に，氷粒子における支配方程式は，

$$\frac{d\rho_{ice}}{dt} = 0, \quad \frac{d\vec{u}_{ice}}{dt} = -\frac{1}{\rho_{ice}} \nabla P + \nu_{ice} \nabla^2 \vec{u}_{ice} + \vec{F}_b - \frac{1}{\rho_{ice}} \vec{F}_{ls}, \quad Q = \int \lambda_{ice} \nabla^2 T V_{ice} dt - \int Q_{ls} V_{ice} dt$$

浮力は  $F_b = g(\rho_l - \rho_{ice}) / \rho_{ice}$  とした．ここで  $g$  は重力加速度である．

本解析における境界条件は，入口境界では速度条件を流速 0.1m/s の一様流速とし，圧力条件は圧力勾配をゼロとした．出口境界では速度条件を自由流出条件とし，圧力条件は圧力をゼロかつ圧力勾配をゼロとした．流路壁面及び円管表面では滑りなし条件とし，圧力勾配をゼロとした．

#### 4. 研究成果

図 6 にフィンの迎角条件の違いによる平均熱伝達率の変化を示す．図中の Array1 は図 7 に示すすべての管の迎角が  $0^\circ$ ，Array2 は Column1 のみ迎角が  $30^\circ$  で他の管は迎角が  $0^\circ$ ，Array3 は Column1 のみ迎角が  $-30^\circ$  で他の管は迎角が  $0^\circ$ ，Array4 はすべての管の迎角が  $30^\circ$  の場合をそれぞれ示している．図 6 より，フィンを取り付けた加熱管ではどの条件においてもベア管より高い熱伝達率を示していることがわかる．

図 8 にベア管・フィン管それぞれの平均熱伝達率比を示す．図より，迎角条件 Array1，Array2 は流速の増加に従って熱伝達率比が小さくなっていくことがわかる．一方，Array4 では，流速の増加に伴って熱伝達率比が増加している．これは，流速が小さい場合には下方向に誘導された氷粒子が再び上方向に偏ってしまう一方，流速が大きい場合には下方向に誘導された氷粒子が勢いを持ったまま後方の加熱管の下側に到達するためと考えられる．これらのことから，氷スラリーの流速に対して最適なフィンの迎角を設定することで熱伝達率比を高く保つことが出来ると考えられる．

図 9 に，氷スラリーの流速と圧力損失の関係を示す．図より，流速の増加に伴う圧力損失の変化については今回行った 4 通りの配置条件においてはフィンの迎角によらずほぼ同じ値をとっていることがわかる．これはフィン迎角条件を，流れに対する投影面積の変わらない  $-30^\circ \sim 30^\circ$  の範囲で設定しているためであると考えられ，このような迎角の範囲では圧力損失ほぼ一定に抑えつつ，常に効率よく氷スラリーの潜熱利用効率を高くできることが予想される．

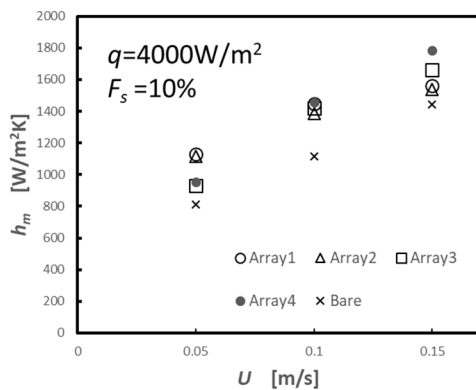


図 6 平均熱伝達率

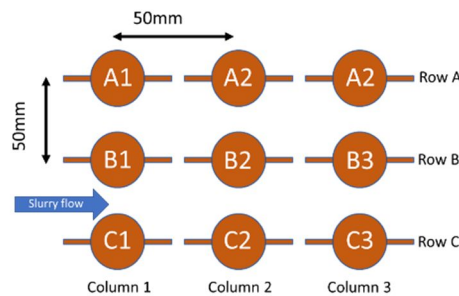


図 7 加熱管配置図

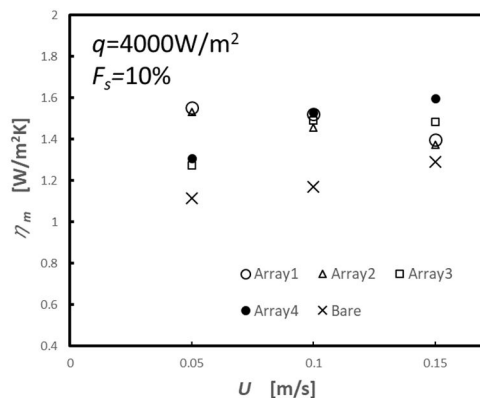


図 8 平均熱伝達率比

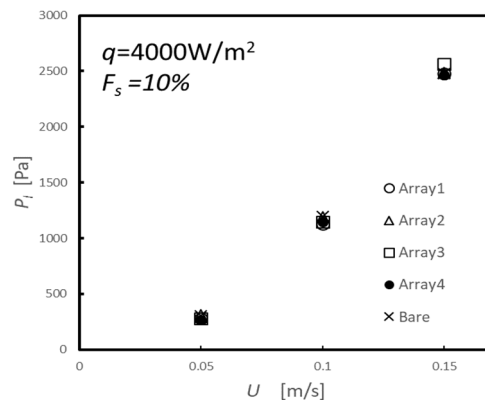


図 9 圧力損失

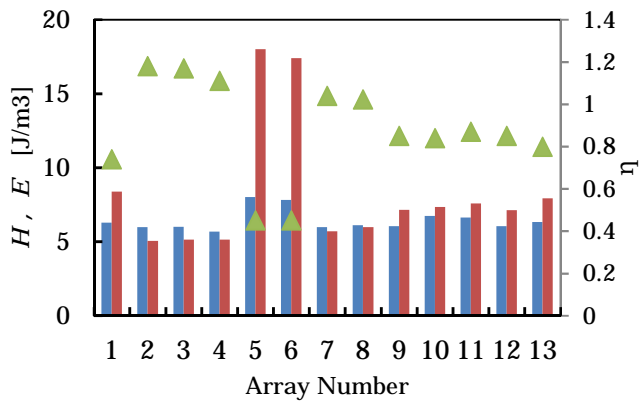


図 10 伝熱量，圧力損失，エネルギー効率

Array Number	Wings	1 <sup>st</sup> row	2 <sup>nd</sup> row	3 <sup>rd</sup> row
1	2	Bare	Bare	Bare
2	2	0	0	0
3	2	-30	0	0
4	2	30	0	0
5	2	-60	0	0
6	2	60	0	0
7	2	-30	-30	0
8	2	-30	30	0
9	2	-30	-30	-30
10	2	-30	-30	30
11	2	30	45	0
12	1	0	0	0
13	1	30	30	30

図 10 に，加熱円管から単位時間に放出された熱量  $W$  [J/s] を単位時間に入口から流入するスラリーの体積流量  $Q$  [m<sup>3</sup>/s] で除した値  $H$  [J/m<sup>3</sup>] と，圧力損失  $E$  [J/m<sup>3</sup>] を比較して系のエネルギー効率を示す．Array5 と 6 において  $H$  がフィン無し円管の条件 (Array1) より大きくなっているが，一方でそれ以外の配置条件ではフィン無し円管の条件に対してほとんど差がなかった．また，Array5, 6 を除いた配置条件ではフィン無し円管の条件に対して圧力損失が小さくなった．フィンの迎角が  $0 \sim \pm 45^\circ$  に設定されている配置条件ではフィン無し円管の場合より効率が高くなった．Array5 および 6 で圧力損失が大きくなった原因は，フィンがスラリー流の流れをせき止めるためと考えられる．その他のフィン付き加熱円管の配置条件では，フィンが円管後流の渦を抑制したために損失が小さくなったものと考えられる．

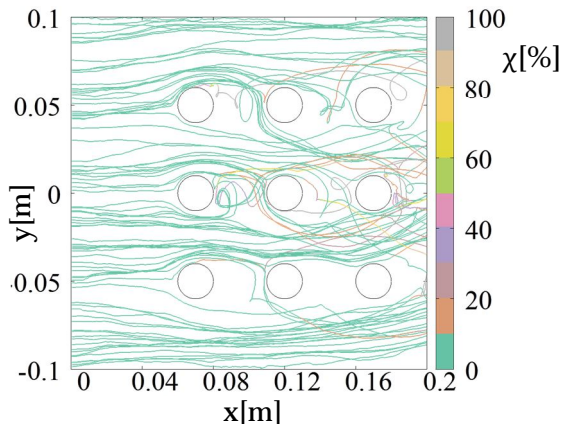


図 11 氷粒子軌跡および融解量

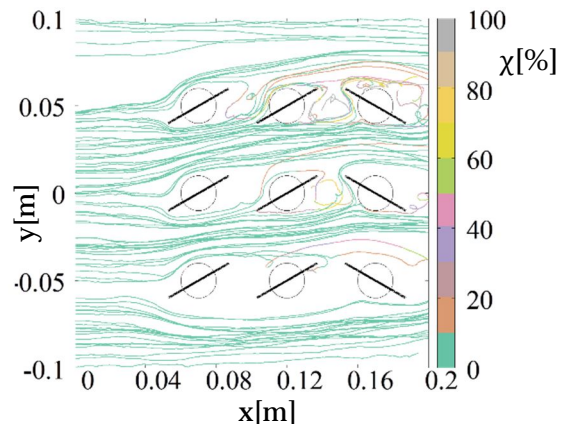


図 12 氷粒子軌跡および融解量

図 11 および図 12 に Array1 および Array10 における氷粒子の軌跡とその氷粒子の融解率を示す．ここで示す氷粒子の融解率  $\chi$  は氷粒子が流入時に有する潜熱量に対して氷粒子の融解に利用された潜熱量の割合として定義し，氷が融解していない状態を 0% として完全に融解した状態を 100% とした．図より，流入した氷粒子の大半が円管に接近することなく後流に流れていることが分かる．管群部に流入した粒子の大半が円管に接近せず流れてしまう原因は，管群内の出口方向への流れが速く，その流れに多くの氷粒子が押し流されてしまっているからだと考えられる．フィン無し円管の条件は他のフィン付き円管の条件に対して管群内での氷粒子の上下の運動が生じていた．一方でフィン付き円管の条件ではフィンなし円管に対して氷粒子の上下方向の運動が少なかった．一方，図 12 に示す Array10 では，フィンによって円管に沿って流れていない氷粒子が存在する．Array10 では，フィンの影響によって氷粒子と直接接触する円管表面の領域がフィンなし円管の条件よりも少なくなっている，これもフィン付き円管の条件で氷粒子の接触融解が小さくなることの原因と考えられる．

< 引用文献 >

- (1) 川南，福迫，山田，水平加熱平板間を流れるスラッシュアイス流動挙動及び熱伝達，日機論 B 編，66-643，2000，240-247．(2) 木幡，可変迎角矩形フィンを有する複合機能熱交換器による氷スラリー流の流動制御と熱伝達率，2012，北海道大学大学院工学院修士論文．(3) Y.Li, S.Wang, J. Wang, T.Zhang, CFD Study of Ice Slurry Heat Transfer Characteristics In a Straight Horizontal Tube, Procedia Engineering, 146, 2016, 504-512. Engineering Vol.60 (2013), pp.72-78．(4) 越塚，粒子法，丸善株式会社，2005．

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 岡田拓磨, 山田雅彦, 戸谷剛, 黒田明慈, 佐々木優斗
2. 発表標題 フィン付き加熱円管周りの氷スラリー流の流動制御および相変化伝熱
3. 学会等名 日本機械学会 2019年度年次大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----