

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 6月11日現在

機関番号：13601

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2009～2012

課題番号：21560260

研究課題名（和文） 可変形状・剛性の機能を有する生物規範型流体内推進ロボットの開発

研究課題名（英文） Development of Bio-inspired Propulsion Robots in Fluid Capable of Variable Shape and Stiffness.

研究代表者

小林 俊一 (KOBAYASHI SHUNICHI)

信州大学・繊維学部・教授

研究者番号：50225512

研究成果の概要（和文）：屈曲型流体内推進機構は、現在多く用いられているスクリュプロペラでの問題点（水中の生物に対する危険性、激しい攪拌による汚泥の巻き上げによる水質汚染）を解決する、環境に配慮した推進機構のひとつである。本研究では水中を遊泳する生物の屈曲運動の動きを規範とした屈曲型推進機構に注目し、形状と剛性が実時間で自由に変化する生物規範型流体内推進機構を備えたロボットを開発、その推進特性を検討した。

研究成果の概要（英文）：A flexion propulsion mechanism in fluid has advantages for resolving problems regarding environmental and safety issues on the use of screw propeller, namely, the disturbance of polluted mud that pollutes the water, the danger to aquatic animals from the high speed rotation and intense churning of the propeller. In this study, we noticed the propulsion mechanism modeled on organisms that swim in water by bending motions. We developed the bio-inspired propulsion robots in fluid capable of variable shape and stiffness, and evaluated the thrust force characteristics of the robots in fluid.

交付決定額

（金額単位：円）

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|-----------|-----------|-----------|
| 2009年度 | 1,800,000 | 540,000 | 2,340,000 |
| 2010年度 | 600,000 | 180,000 | 780,000 |
| 2011年度 | 600,000 | 180,000 | 780,000 |
| 2012年度 | 600,000 | 180,000 | 780,000 |
| 年度 | | | |
| 総計 | 3,600,000 | 1,080,000 | 4,680,000 |

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・知能機械学・機械システム

キーワード：バイオミメティクス、バイオメカニクス、ロボティクス、流体内推進、可変剛性

1. 研究開始当初の背景

屈曲型推進機構は、現在多く用いられているスクリュプロペラでの問題点である、水中の生物に対する危険性・激しい攪拌による汚泥の巻き上げによる水質汚染を解決する、環境に配慮した推進機構のひとつである。研究

代表者らは、水中を遊泳する生物の屈曲運動に注目し、その動きを規範とした屈曲型流体内推進機構について次の研究を行ってきた。

- (1) 精子などの鞭毛運動とゾウリムシなどの繊毛運動：鞭毛内部の微小管の滑り機構を規範とした推進機構の開発 と、繊毛の

有効打と回復打を剛性変化によって再現した推進機構の開発。

- (2) 水ヘビやウナギの屈曲運動：多リンクによる屈曲機構の開発と CPG (Central Pattern Generator) を単純化したモデルを用いた運動の最適化。

一方、魚類の遊泳は、生物学者の Breder により、ウナギ型、アジ型、マグロ型の推進形態の分類がなされている。ウナギ型推進は体全体を屈曲させて進み、流体の慣性力よりも粘性力が支配的な環境の推進に有利である。また、その体表面の粗さを増加することによって、流体による抵抗力の接線方向成分が法線方向成分よりも大きくなり、推進方向が逆転する。例えば、ゴカイのような多毛類には体表面に多数の突起物があり、その泳ぎは波の進行と同じ方向に推進する。アジ型推進は、水の反動力を利用できる形態になっており、ウナギ型よりも高速で推進しやすく、静止からの加速が有利である。また、弾性的な尾びれは推進力や効率の高さに寄与している。なお、筋肉の収縮により、尾びれの見かけの剛性を変化させ、それが変化する環境や行動に対して適応していると考えられている。

以上より、研究代表者は、(1)屈曲形推進機構の機動性・位置制御性を向上させるために体表面の突起を利用すること、(2)広範囲の動作タスクで動作するため、推進機構の剛性を自由に変化することが流体内で移動するロボットに必要なと考え、形状と剛性が実時間で自由に変化できる「生物規範型流体内推進ロボット」を研究開発することに至った。

2. 研究の目的

本研究ではより広い動作タスクに適応するため、形状と剛性が実時間で自由に変化できる「生物規範型流体内推進ロボット」を、次に示すように段階的に開発する。

- (1) 形状変化による推進機構の開発：体表面に突起物がある場合と無い場合が再現できる推進機構を開発する。突起物がある場合は、多毛類の動きを規範とした突起物の能動的な動きで評価し、さらに、より機動性を高めるための突起物の動作制御を確立する。
- (2) 可変剛性による推進機構の開発：屈曲型推進機構のフィンに可変剛性の機能を付加する。剛性の変化による推進力や効率の向上に関して検討する。
- (3) 流体内移動ロボットの性能評価：流体内移動ロボットを完成させる。コンピュータを用いた無線制御を可能とさせ、広範囲な動作タスクに適応できるか評価する。

3. 研究の方法

- (1) 体表面形状変化による推進機構の基礎設計：体表面形状変化が可能な推進機構の設計を、多毛類の動きを考慮し、機動性を向上できる動きを再現することに重点を置いて行う。体表面変化は、体軸に取り付けられたフィンの角度で再現する。
- (2) 体表面形状変化による推進機構の製作と動作評価：基本設計がなされた推進機構を製作する。動作評価項目は、推進速度（静止流体中における移動の動画解析）と推進力（力センサを用いた計測）であり、特に、フィンの角度を制御することにより実現される、推進力と推進方向の変化について評価を行う。
- (3) 可変剛性機能による推進機構の基礎設計：しなやかな可変剛性を実現させるため、弾性板のねじりを用いた可変剛性を考案、その基礎実験を行い、その結果を踏まえた推進機構の基礎設計を行う。
- (4) 可変剛性機能による推進機構の製作と動作評価：基本設計がなされた推進機構を製作する。動作評価項目は、静止流体中における推進力と回流水槽における自航相当速度（推進機構の推進力と抵抗力がバランスしている状態における流速）であり、フィンの挙動と合わせて検討する。さらにフィン周りの流れの可視化を行い、流れ場と合わせた考察を行う。
- (5) 流体内移動ロボットの完成と性能評価：体表面形状変化による推進機構については、無線操作による流体内移動ロボットを作成、様々な動きを体表面につけられたフィンの角度を制御して行う。特に、屈曲運動を変化させずに方向転換、位置制御、複数台の機構による協調運動に関して重点的に評価を行う。また、可変剛性機能による推進機構についても、無線操作による流体内移動ロボットを作成、様々な動作タスクに対する推進に関して、常に最適な剛性にすることによる効果を評価する。

4. 研究成果

(1) 体表面形状変化による推進機構

開発した推進機構の写真を図 1 に、また、推進機構の駆動詳細図を図 2 に示す。流体内中にあるフィンの角度 α が 0° のときは体長に対して平行に、フィン角度 α が 45° のときはフィンが体長に対して 45° 傾いた状態となる。このように推進機構のフィンの角度を変えることによって体表面形状を変化させる。フィン角度によって、推進機構の推進速度ベクトル（図 3）が変わり、屈曲運動を全く変化させなくても、全方向移動を実現させた。この推進機構は今までにない、新しい屈曲型推進機構の運動形態である。また、推進

力についても計測し、推進速度と同様の関係にあることを確認した。なお、推進機構の屈曲のくねりに対する推進特性についても詳細に検討した。

この推進機構を用い、無線で遠隔操作できるようにした2台のロボットを図4に示す。屈曲運動中に自由にフィン角度を制御させることができ、方向転換、位置制御、その場回転（機構の真ん中を回転中心とした回転運動）を可能とさせた。2台のロボットによる協調運動が可能で、さらに、フィン角度を屈曲と同期させて変化させて、より速い横方向移動も可能とさせた。

本研究では水上での移動であったが、水中における推進を可能にさせ、水陸両用での推進や、さらに細やかなフィン角度の制御を実現させていくことが今後の展望となる。

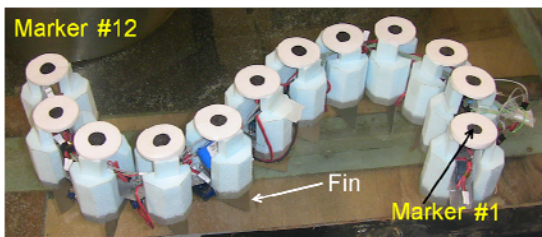


図1 体表面形状変化による推進機構

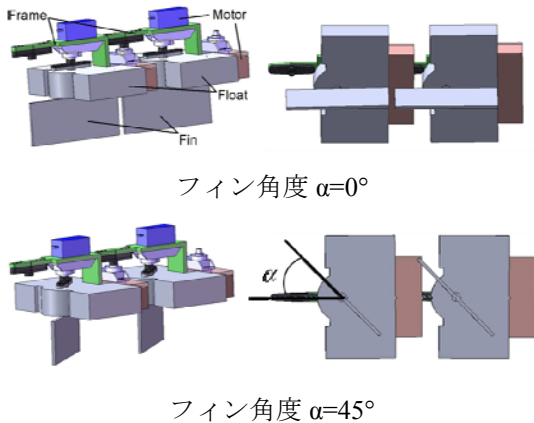


図2 推進機構の駆動詳細図

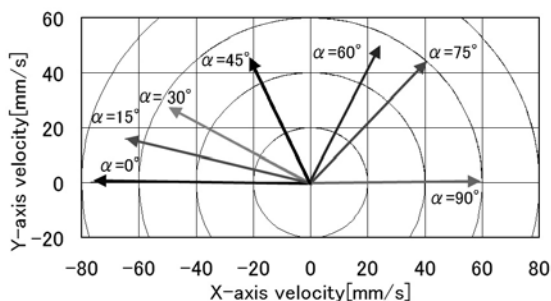


図3 推進機構の推進速度ベクトル
(フィン角度 α によって推進方向が変化)

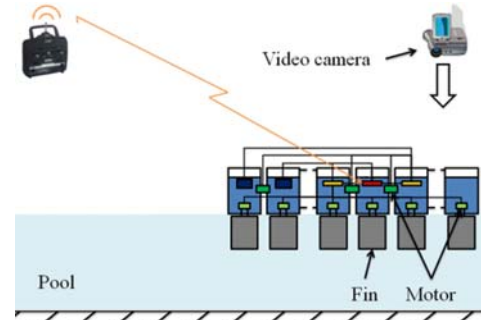
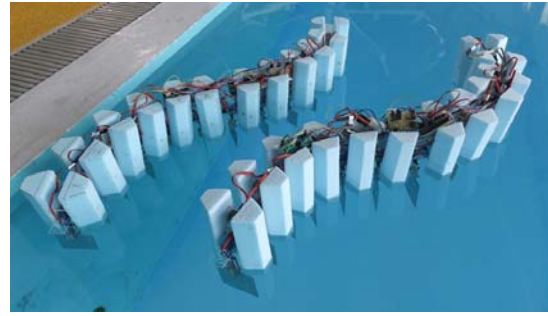


図4 体表面形状変化による推進ロボットの
外観と実験条件

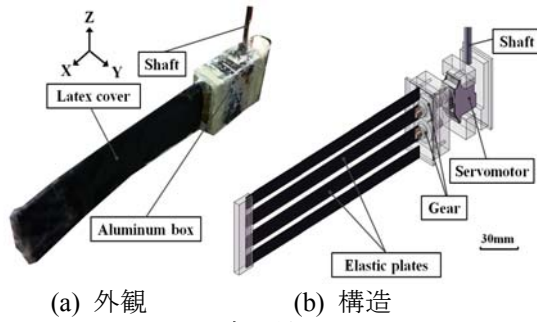
(2) 可変剛性機能による推進機構

可変剛性フィンの構成を図5に、弾性平板のねじりによる可変剛性の原理を図6に示す。フィンは弾性フィンとアルミニウムボックスで構成されている。中央の2枚の弾性平板の根元部はモータの回転軸に接続され、ねじることが可能である。この弾性平板のねじれにより、断面2次モーメント、すなわちフィンの剛性を変化できる。弾性平板の材料はポリプロピレンもしくはSK焼入鋼帯を用いた。なお、推進時に機構の隙間を流体が通り抜けるのを防ぐため、機構全体をラテックスカバーで覆ってある。図7に揺動1周期のフィンの挙動を示す。フィン先端の数字1を揺動位相 $\psi = 0^\circ$ として位相 45° ごとのフィンの形状を揺動1周期分示している。フィンの剛性が最小であるねじり角 ϕ_r が 0° ではフィンが大きく変形したが、剛性の大きいねじり角 ϕ_r が 90° でのフィンの変形は小さく、剛体フィンに近い挙動であることを確認した。図8に揺動1周期の自航相当速度 U とねじり角 ϕ_r の関係について示す。この図に示すように、各揺動条件（揺動周期 T ）毎に U が最大となる最適な剛性が存在した。従って、可変剛性フィンとしての効果は確実にあることを明らかにした。また、フィン周りの流れ場を Particle Image Velocimetry 解析で解析、推進特性との関係も明らかにした。

この推進機構を用い、無線で遠隔操作できるようにしたロボットを図9に示す。全本体が水中にないボートの形態ではあるが、変化する動作タスクに関して常に最適な剛性を実現させることにより、固定剛性よりも高い

推進速度を実現させた。また、フィンの揺動中にねじり角を動的に制御し、積極的に推進を向上させることも可能とさせた。

本研究では水上での移動であったが、水中内移動ロボットにし、一般的な推進機構のスクロプロペラでは推進が困難な、災害時の瓦礫と漁網などがある環境下での推進を可能とする水中推進ロボットとして開発し、さらに、体表面形状変化による推進機構と融合させていくことが今後の展望となる。



(a) 外観 (b) 構造
図 5 可変剛性フィン

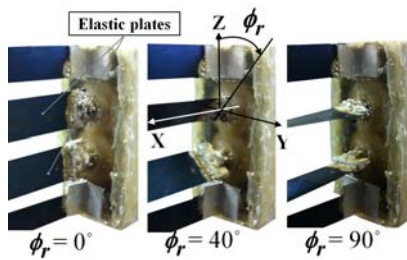


図 6 剛性変化の原理
(ねじり角 ϕ_r によって剛性を変化)

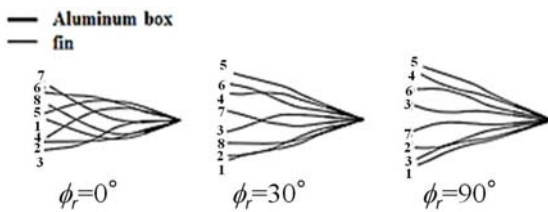


図 7 フィンの挙動

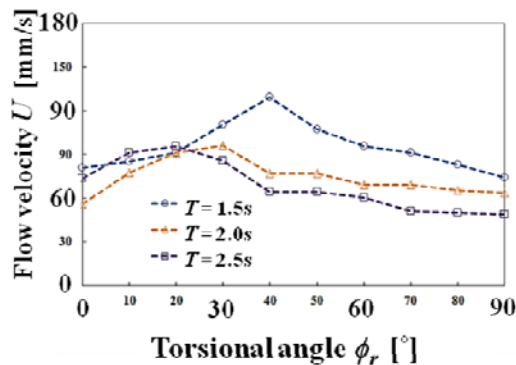


図 8 ねじり角 ϕ_r と自航相当速度 U の関係

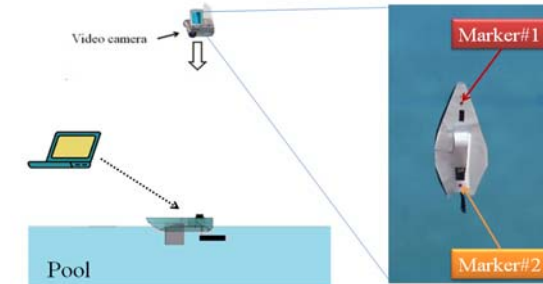
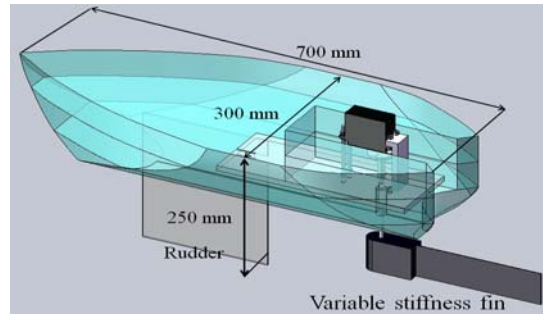


図 9 可変剛性機能による推進ロボットの構成図と実験条件

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 2 件)

- ① Shunichi Kobayashi, Kyota Fujii, Taiga Yamaura, and Hirohisa Morikawa, Bio-Inspired Omnidirectional Multilink Propulsion Mechanism in Fluid, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol. 23, No. 6, pp. 1073-1079, 2011. 査読有
<http://www.fujipress.jp/finder/xslt.php?mode=present&inputfile=ROBOT002300060016.xml&xslparam=ref|jscript>
- ② Masataka Nakabayashi, Hirotake Soyano, Shunichi Kobayashi, Hirohisa Morikawa Bio-inspired Aquatic Propulsion Mechanism Using a Fin with a Variable-Effective-Length Spring - Development of a Propulsion Mechanism using the Swaying and Yawing Movements of a Fin -, Journal of Aero Aqua Bio-mechanisms, Vol. 1, No. 1, pp. 104-110, 2010. 査読有
https://www.jstage.jst.go.jp/article/jabmech/1/1/1_1_104/_article

[学会発表] (計 2 3 件)

- ① 大嶋優, 小林俊一, 全方向移動が可能な生物規範型多リンク型流体内推進機構の推進力特性, 日本機械学会 北陸信越支部

- 第 50 期総会・講演会, 2013. 3. 9, 福井市.
- ② 高橋佳也, 藤原奨平, 小林俊一, 弾性平板のねじりによる可変剛性フィンを用いた生物規範型流体内推進機構の推進特性, 日本機械学会 第 25 回バイオエンジニアリング講演会, 2013. 1. 9, つくば市.
 - ③ Shunichi Kobayashi, Yu Oshima, Thrust Force Characteristics of Bio-inspired Omnidirectional Multilink Propulsion Mechanism in Fluid, International Conference on Intelligent Unmanned Systems 2012, 2012. 10. 23, Singapore.
 - ④ 高橋佳也, 藤原奨平, 小林俊一, 弾性平板のねじりによる可変剛性フィンを用いた流体内推進機構の推進特性—弾性平板の材料と両端のねじりによる影響—, 計測自動制御学会 中部支部シンポジウム 2012, 2012. 9. 25, 長野市.
 - ⑤ 大嶋優, 小林俊一, 全方向移動が可能な多リンク型流体内推進機構の推進力シミュレーション解析, 計測自動制御学会 中部支部シンポジウム 2012, 2012. 9. 25, 長野市.
 - ⑥ Shunichi Kobayashi, Hirotaka Soyano, Keiya Takahashi, Bio-inspired Aquatic Propulsion Mechanism Using Variable Stiffness Fin with Torsional Elastic Rectangular Plates, The Fifth International Symposium on Aero Aqua Bio-Mechanisms (ISABMEC 2012), 2012. 8. 27, Taipei, Taiwan.
 - ⑦ 小林俊一, 征矢野寛剛, 高橋佳也, 魚類の尾ひれを規範としたフィンによる流体内推進機構—弾性平板のねじりによる可変剛性フィンの適用—, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2012, 2012. 5. 28, 浜松市.
 - ⑧ Shunichi Kobayashi, Kyota Fujii, Taiga Yamaura, Hirohisa Morikawa, Swimming of Bio-inspired Omni-Directional Aquatic Multi-link Propulsion Mechanisms, Proceedings of the International Conference on Intelligent Unmanned Systems 2011, MoAmB1-3, 2011. 11. 1, 千葉市.
 - ⑨ 征矢野寛剛, 高橋佳也, 小林俊一, 森川裕久, 回転弾性平板のねじりによる可変剛性フィンを用いた流体内推進機構の推進特性, —SICE 50 周年記念—計測自動制御学会中部支部シンポジウム 2011 講演論文集, PD-03, 2011. 9. 30, 上田市.
 - ⑩ Shunichi Kobayashi, Hirotake Soyano, Masataka Nakabayashi, Hirohisa Morikawa, Propulsion Mechanism in Fluid Using Variable Stiffness Fin with Torsional Rectangular Elastic Plates, Proceedings of the Twenty-first (2011) International Offshore and Polar Engineering Conference, pp.254-528, 2011. 6. 20, Maui, USA, 査読有
 - ⑪ 小林俊一, 藤井京太, 山浦大河, 森川裕久, 屈曲運動生物を規範とした多リンク型流体内推進機構の全方向移動化—フィンの運動を付加した推進—, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2011 講演論文集 (DVD-ROM), 2P1-L12, 2011. 5. 27, 岡山市.
 - ⑫ 山浦大河, 藤井京太, 小林俊一, 森川裕久, 2機の生物規範型多リンク水中ロボットの全方向推進特性, 日本機械学会北陸信越支部第 40 回学生員卒業研究発表講演会, 2011. 3. 4, 上田市.
 - ⑬ 征矢野寛剛, 中林正隆, 小林俊一, 森川裕久, 回転弾性平板のねじりによる可変剛性フィンを用いた流体内推進機構, 日本機械学会第 21 回バイオフロンティア講演会, 2010. 11. 12, 金沢市.
 - ⑭ 藤井京太, 山浦大河, 小林俊一, 森川裕久, 多リンク型流体内全方向推進機構の推進特性, 計測自動制御学会中部支部シンポジウム 2010, 2010. 10. 29, 上田市.
 - ⑮ 小林俊一, 藤井京太, 栗原大, 森川裕久, 屈曲運動生物を規範とした多リンク型流体内推進機構の全方向移動化, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2010, 2010. 6. 16, 旭川市.
 - ⑯ 征矢野寛剛, 中林正隆, 小林俊一, 森川裕久, 回転弾性平板を備えた可変剛性フィンによる流体内推進機構の開発, 日本機械学会北陸信越支部第 47 期総会・講演会, 2010. 3. 10, 新潟市.
 - ⑰ 中林正隆, 征矢野寛剛, 小林俊一, 森川裕久, 可変有効長さバネを備えたフィンによる流体内推進機構の開発 —ヒービング・ピッチング運動における推進力特性とフィン周りの流れ場の検討—, 日本機械学会 第 22 回バイオエンジニアリング講演会, 2010. 1. 10, 岡山市.
 - ⑱ 藤井京太, 栗原大, 小林俊一, 森川裕久, 屈曲運動生物から着想した全方向移動型流体内推進機構, 日本機械学会 第 20 回バイオフロンティア講演会, 2009. 11. 7, 和歌山市.
 - ⑲ 藤井京太, 栗原大, 小林俊一, 森川裕久, 全方向移動が可能な多リンク型流体内推進機構の開発, 計測自動制御学会中部支部シンポジウム 2009, 2009. 10. 30, 長野市.
 - ⑳ Masataka Nakabayashi, Hirotake Soyano, Shunichi Kobayashi, Hirohisa Morikawa, Aquatic Propulsion Mechanism using Fin with Variable-Effective-Length Spring - Thrust Characteristics on Pitching

and Heaving Movement -, The Fourth International Symposium on Aero Aqua Bio-Mechanisms, ISABMEC 2009, 2009. 9. 1, Shanghai, China.

- ⑳ Shunichi Kobayashi, Tomoki Terashima, Kyota Fujii, Hirohisa Morikawa, Influence of Movement and Fin Shape on the Swimming Speed for the Multilink Propulsion Mechanism in Water, The Fourth International Symposium on Aero Aqua Bio- Mechanisms, ISABMEC 2009, 2009. 9. 1, Shanghai, China.
- ㉑ Masataka Nakabayashi, Reiji Kobayashi, Shunichi Kobayashi, Hirohisa Morikawa, Propulsion Mechanism Using Hydrofoil Fin with a Variable-Effective-Length Spring, 2009 International Symposium on Intelligent Unmanned System, ISIUS-04, 2009. 6. 19, Jeju, Korea.
- ㉒ 小林俊一, 寺島智樹, 藤井京太, 森川裕久, 屈曲運動生物を規範とした多リンク型流体内推進機構 -フィン形状による遊泳速度の影響-, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2009, 2009. 5. 25, 福岡市.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小林 俊一 (KOBAYASHI SHUNICHI)
信州大学・繊維学部・教授
研究者番号：50225512