

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 13 日現在

機関番号：13701

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420182

研究課題名(和文) くさび形弾性はりにおける波動の無反射・増幅特性を利用した水中推進機の高効率化

研究課題名(英文) Efficiency improvement on an aquatic propulsion mechanism by using non-reflection and amplification property of waves on a wedge-shaped elastic body

研究代表者

松村 雄一 (MATSUMURA, Yuichi)

岐阜大学・工学部・教授

研究者番号：20315922

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：はじめに、くさび形弾性体の尾ひれでの反射波抑制を行う手法に取り組んだ。くさび形弾性体の尾ひれ部に、一定区間だけ尾ひれと同じ厚みと幅の一樣平板部を設け、先行研究で取り組んできた一樣平板用の反射波制御法を適用した。この結果、くさび形弾性体においても反射波抑制を実現でき、種々の駆動周波数に対する実験で定在波率 2 以下を実現した。

また、この水中推進機を実験船に取り付けた実験でも船の推進を確認できた。この実験船の運動を高速度カメラで撮影した動画を解析して、加速度から推力を計算したところ、先行研究で実現していた一樣平板利用型の進行波型水中推進機に比べて、くさび形弾性体を利用することの優位性を明らかにできた。

研究成果の概要(英文)：Firstly, a control method to realize non-reflection boundary at the caudal fin of a wedge-shaped elastic body was addressed. Based on our previous research, a technique which can suppress reflection waves at the end of a flexible planar plate was applied to a wedge-shaped elastic body by providing a part of flexible planar plate after the caudal fin. Then experimental results showed that a quasi-pure traveling wave, which shows that standing wave ratio is less than two for various driving frequencies, was realized on an aquatic wedge-shaped elastic body by the control method.

Secondly, a wedge-shaped elastic body was loaded on a ship, and the ship was propelled. By analyzing the motion of the ship, thrust force was calculated by using acceleration of the ship. It is, then, cleared by this analysis that an aquatic propulsion mechanism of a wedge-shaped elastic body has advantages in thrust to that of a flexible planar plate.

研究分野：機械力学・計測制御

キーワード：水中推進機

1. 研究開始当初の背景

水棲生物の泳ぎに学び、スクリーブローバよりも優れた水中推進機構を開発しようとする研究が行われている。水棲生物の泳ぎ方は、魚体に進行波を送って推進するものや、尾ひれを振動させて推進するものなど多様である。本研究の水中推進機構では、弾性平板の前端と後端に直動アクチュエータを配置し、前端のアクチュエータで進行波を生成し、後端のアクチュエータで進行波の反射を抑制することで、曲げ進行波を送り、推進する。本機構は従来の進行波形推進機構と比較して、少数のアクチュエータで推進が可能であるという利点を有するが、現状では推進力が小さいという課題が残る。

そこで、推進効率を向上させるために、進行波を生成する弾性体を厚さが一様な平板とするのではなく、厚さが徐々に薄くなるくさび形状とすることの効果を確認することを目指した。くさび形状は先端に近づく程、波動の振幅が増大するので、前進動作をする際には平板と比較して大きな推力が得られると考えた。

2. 研究の目的

(1) くさび形弾性体での純粋進行波の生成を実現する。一様な弾性体用の反射波制御理論に工夫を加えることで、くさび形の弾性体においても尾ひれ部の反射波を抑制する制御理論を整備し、効率に優れた水中推進機を実現する。

(2) くさび形弾性体の最適形状を解明する。くさび形はりにおける波動の無反射・増幅特性を利用しつつ、頭部と尾ひれ部の位相速度の不一致による推進効率の低下を最低限に抑える最適形状を解明する。

(3) PIV 計測により推進性能が向上する理由を明確化する。弾性体周りの流速分布を可視化し、一様な弾性平板と比較してくさび型弾性体では推進効率が高いことを示す。

3. 研究の方法

(1) くさび形の弾性体での純粋進行波生成を実現するために、従来から取り組んできた、一様な弾性平板による水中推進のための反射波制御理論を基礎として、くさび形の弾性体の尾ひれ部における反射波を抑制する。具体的には、尾ひれ部に一定区間だけ尾ひれと同じ断面積の一様な部分を設け、従前の制御理論における無反射インピーダンスの計算式がそのままの形で適用できるように工夫する。

(2) くさび形弾性体の最適形状の解明では、流体-構造連成解析を用いて、弾性体上を波動が伝播中に無反射となるクラスの弾性体による推進力や推進抵抗を数値化し、弾性体の最適形状を解明すると共に、その形状が最適解となる理由を解明する。

(3) PIV 計測により推進性能が向上する理由を明確化するには、流速分布を可視化して、弾性体上の圧力分布の推定や、弾性体後方流れにおける逆渦やジェット流の存在に着目する。

4. 研究成果

弾性体後端での反射波を抑制するために、後端で反射が生じない条件（無反射条件）を導出する。実験では、無反射条件を満足するようにアクチュエータで変位制御を行い、反射波を抑制する。

(1) 制御理論

①有限長はりの無反射条件

Euler-Bernoulli はりの波動解から、図1(a)に示すような有限長はりを伝播する波動のたわみ振幅 $W(x)$ 、たわみ角の振幅 $\Theta(x)$ を求めることができる。はりの前端に、任意のたわみ振幅 $W(0)$ 、たわみ角の振幅 $\Theta(0)$ を与える場合、後端で反射が生じないとすれば、前端での伝播波の一般化変位ベクトル $\mathbf{W}(0)$ は次式で表される。

$$\mathbf{W}(0) = \begin{Bmatrix} W(0) \\ \Theta(0) \end{Bmatrix} \quad (1)$$

また後端で反射が生じない場合の後端 $x=L$ における一般化変位ベクトルは次式で表される。

$$\mathbf{W}(L) = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -jk & -k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{-jkL} & 0 \\ 0 & e^{-kL} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -jk & -k \end{bmatrix}^{-1} \mathbf{W}(0) \quad (2)$$

ここで k は進行波の波数、 L ははりの長さを表す。式(1)、(2)が満たされるとき反射波は抑制されていると考えられ、本論ではそれらを無反射条件と呼ぶ。実験では駆動点（はりの前端）にたわみ振幅 $W(0)$ 、たわみ角 $\Theta(0)$ を与え、後端の変位 $W(L)$ とたわみ角 $\Theta(L)$ を、前端と後端の位置サーボ制御機構で生成する。この駆動法に従えば、反射波が抑制されて純粋進行波が生成できる。

②くさび形弾性体の無反射条件

①で示した無反射条件を、図1(b)に示すようにくさび形弾性体に適用するための手順を説明する。図1(b)のくさび形弾性体は厚さが変化する区間Aと厚さが一様な区間Bで構成されている。

区間Aの前端 $x=0$ に与える伝播波の一般化変位ベクトルは式(1)で表される。また区間Aと区間Bの接点 $x=la$ での一般化変位 $\mathbf{W}(la)$ は次式で表される。

$$\mathbf{W}(la) = \begin{Bmatrix} W(la) \\ \Theta(la) \end{Bmatrix} = \mathbf{T} \mathbf{W}(0) \quad (3)$$

ここで \mathbf{T} は前端 $x=0$ の一般化変位 $\mathbf{W}(0)$ に対する接点 $x=la$ の一般化変位の関係を表す行列で、

本稿では T を実験で同定する。

厚さが一様な区間Bの後端において、反射が生じない条件は、式(2)と同様に、接点 $x=la$ の一般化変位 $W(la)$ に対する後端 $x=L$ の一般化変位ベクトルとして次式で表される。

$$W(L) = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -jk & -k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{-jklb} & 0 \\ 0 & e^{-klb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -jk & -k \end{bmatrix}^{-1} W(la) \quad (4)$$

厚さが変化する区間Aと厚さが一様な区間Bで構成されたくさび形弾性体では、式(1), (3), (4)が無反射条件となる。

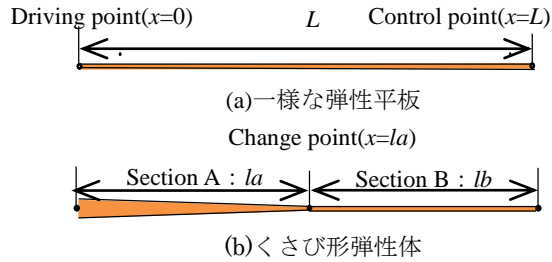


図1 弾性体

(2) 実験

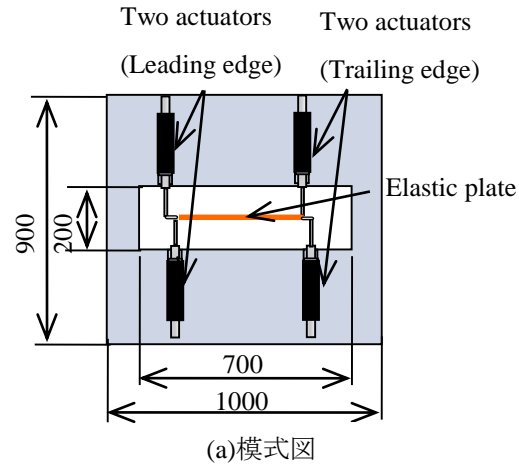
① 実験装置

一様弾性平板とくさび形弾性体それぞれの推進効率を比較するための実験装置を説明する。図2(a)に実験装置の概略、図2(b)に弾性平板と水槽と高速度カメラの位置関係を示す。図2(a)に示すように弾性平板の前端に進行波を生成するための駆動用リニアサーボアクチュエータ2台、後端にも反射波を抑制するために2台配置した。また図2(b)に示すように弾性平板とくさび形弾性体は水面に対して垂直の位置に沈め、高速度カメラを使用して水槽の下から弾性体の挙動を撮影した。

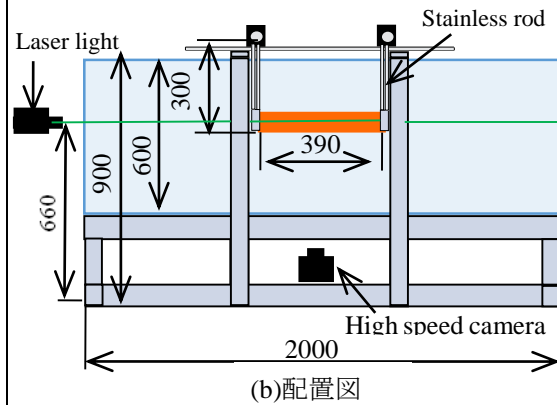
弾性平板は、ばね用りん青銅 C5210 で、長さ $L=390\text{mm}$ 、幅 $b=90\text{mm}$ 、厚さ $t=0.2\text{mm}$ のものを使用した。くさび形はりにはTPU樹脂製で、 $L=390\text{mm}$ 、 $b=100\text{mm}$ 、 $t_{\text{max}}=9\text{mm}$ 、 $t_{\text{min}}=4\text{mm}$ のものを3Dプリンタで成型した。アクチュエータと弾性平板の接続には、直径3mmで長さ300mmのステンレス製の丸棒を使用し、この丸棒の柔軟性により x 方向のたわみにより平板の曲げに伴う長さの縮小を許容している。水槽はアクリル製で、リニアサーボアクチュエータは青山特殊鋼製 STA2506S を利用した。高速度カメラには株式会社ディテクト製 HAS-L1 を使用した。撮影の設定には、120fps、解像度 1280×1024 ピクセルを使用した。

水中推進機が実際に推進力を生み出すかを検証するために構築した実験船について説明する。図3(a), (b)に実験船の概略図を、図3(c)に実験船とプールの位置関係を示す。実験船は、水中推進機を、ウレタン塗布発砲スチロール製の船の上に取り付けたものである。弾性体を2つ取り付けて、それぞれを逆位相で

駆動することで横力をキャンセルする。実験船はプール内で駆動し、その推進性能を検証する。プールにはベストウェイ社製フレームプール ($400 \times 211 \times 81\text{cm}$) を使用した。

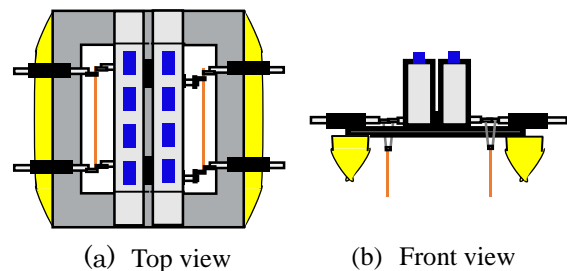


(a) 模式図



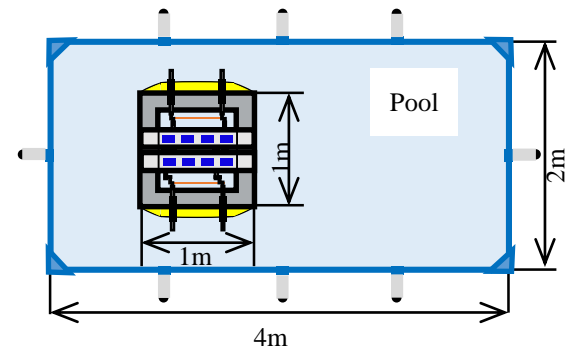
(b) 配置図

図2 実験装置



(a) Top view

(b) Front view



(c) Positional relationship

図3 推進実験船

② 進行波生成制御

制御理論で示した無反射条件を使用し、一様弾性平板とくさび形弾性体における反射波抑制手法の可否を実験により検証する。高速カメラから得られた画像から定在波比を同定して進行波の生成を確認する。一様弾性平板を駆動振幅 20 mm, 駆動周波数 2 Hz で駆動させた際の、弾性平板上の波動の様子を図 4 に示す。それぞれの観測点でほぼ一定の振幅で動いていることから進行波が支配的な状態を実現できていると考えられる。

また、くさび形弾性体を同じ条件で駆動させた際の、弾性平板上の波動の様子を図 5 に示す。最大振幅点が時間経過と共に図の左から右へ移動していることが分かり、進行波が支配的な状態を実現できていると考えられる。また、区間 A において振幅が増大していることがわかる。また、振幅の増大に伴い波動の位相速度が減少する様子がわかる。

次に、駆動周波数 1 Hz から 5 Hz においての一様弾性平板とくさび形弾性体の定在波比を図 6 に示す。一様弾性平板には周波数が高いほど定在波比が悪化する傾向があるが、ほぼ純粋な進行波を生成可能であることが確認できた。

③ 推進実験

実験船が前進動作を行い、加速を行っている際の、水中推進機が生み出す推力について検証する。実験船が静止している状態で進行波型水中推進機を駆動し、前進動作を始めるまでの様子を撮影し、動画解析から加速度を求めた。そして運動方程式 $ma=F$ から推力を計

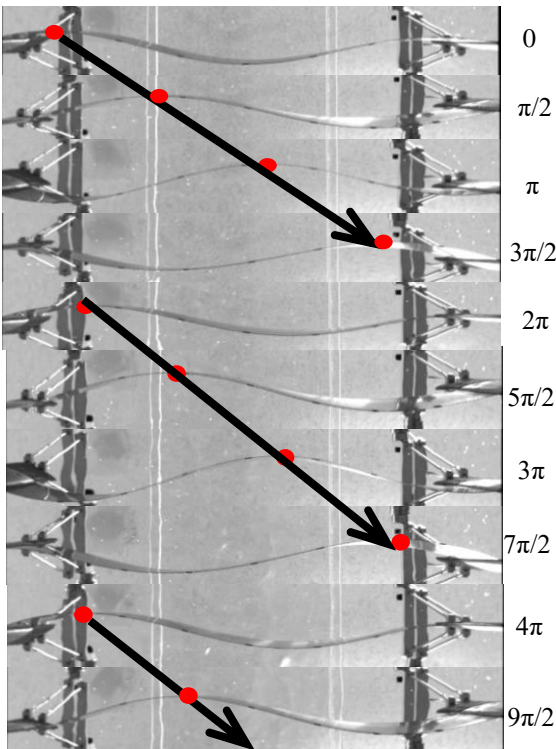


図 4 進行波 (一様弾性平板)

算した。実験船の質量は 42 kg である。一様弾性平板とくさび形弾性体の推力を比較する際に、一様弾性平板の幅方向の長さは 90mm であり、くさび形弾性体は 45mm である。なので、単純に弾性体の高さ方向の長さは推力に比例すると考え、比較の際にはくさび形弾性体で得られた推力を 2 倍とした。水中推進機を駆動振幅 15mm とし、駆動周波数を 2 Hz から 5 Hz まで 1 Hz 刻みで駆動した際に得られた推力を図 6 に示す。この結果から前進性能においてはくさび形弾性体を用いた水中推進機の方が高いことがわかる。

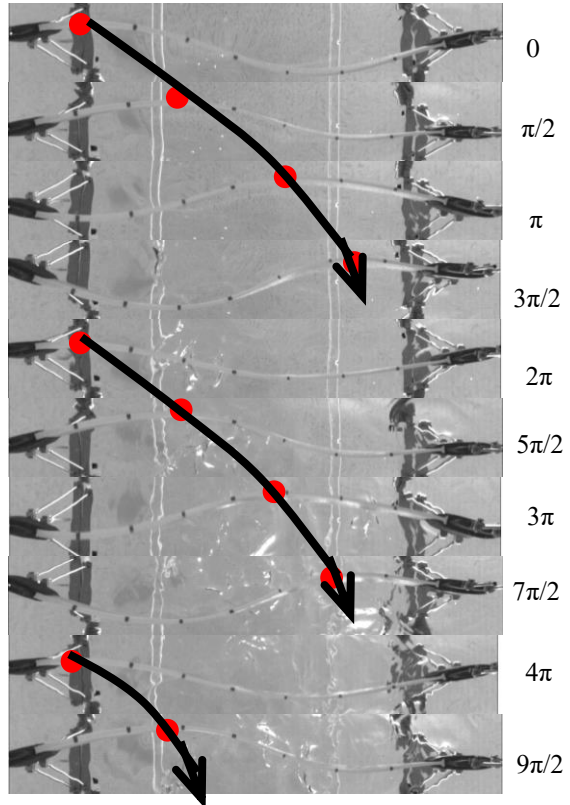


図 5 進行波 (くさび形弾性体)

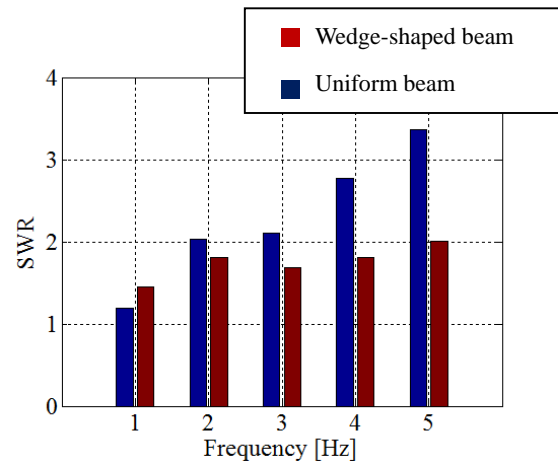


図 6 定在波比

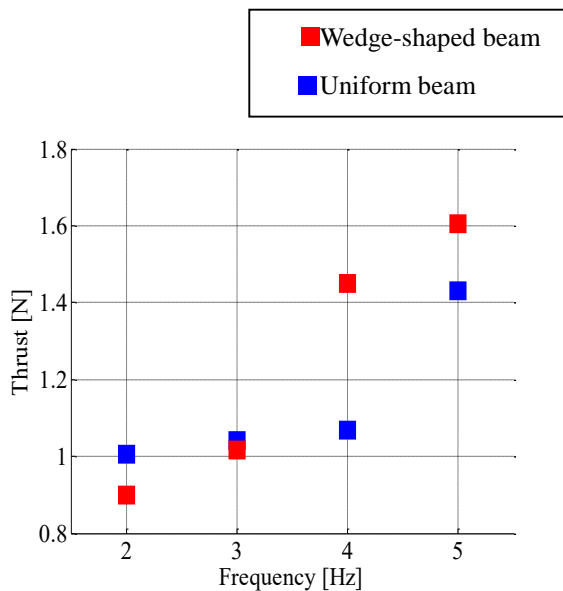
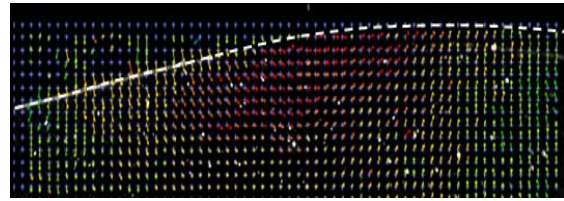


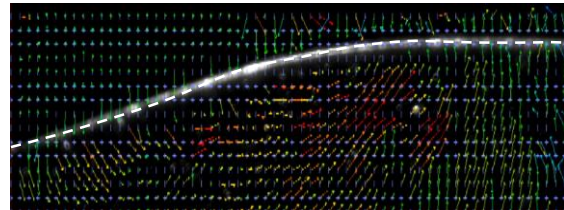
図7 推力の周波数依存性

④ PIV による弾性体周りの流速分布測定法
弾性体周りの流速分布計測を行うために PIV を利用した。推力を直接計測できないため、推力は、弾性平板によって押し出される流体の平均流速に関係があると考え、平均流速を PIV で計測し、弾性平板、くさび形弾性体での平均流速を比較する。図 2 に示したように、弾性平板の中央の xy 平面にレーザー光を横から照射し、流体中に散布したトレーサ粒子を水槽下部に設置した高速度カメラで撮影した。PIV の測定範囲は $300 \times 50 \text{mm}$ とした。撮影後、画像解析で平均流速を求めた。トレーサ粒子は日本カノマックス株式会社製 ORGASOL 0457、高速度カメラは株式会社ディテクト製 HAS-L1、レーザーは株式会社エムスクエア製の 532nm グリーンレーザーを、画像解析には株式会社ディテクト製の Flownizer 2D を用いた。

⑤ PIV による弾性体周りの流速分布
一様弾性平板とくさび形弾性体それぞれに進行波を生成した際の、前端付近と後端付近の x 方向の平均流速を計測した。一様弾性平板では、前端付近 100mm/s 、後端付近 20mm/s であり、くさび形弾性体では、前端付近 120mm/s 、後端付近 120mm/s であった。この結果から、くさび形弾性体に生成された進行波は、振幅増大効果により、後端へ近づいても大きな推力を発生させることが可能だと言える。図 8(a)、図 8(b)それぞれに進行波が生成されている際の、一様弾性平板、くさび形弾性体の周りの流速分布図の一例を示す。くさび形弾性体の後方流速の方が速いことがわかる。



(a)一様弾性平板



(b)くさび形弾性体

図8 PIV 計測による流速分布

(3)まとめ

- ①くさび形弾性体においても、一様平板と同様に反射波制御を実現し、ほぼ純粋な進行波を生成することに成功した。この進行波は、実機の実験で定在波比 2 以下であった。
- ②推進実験においてくさび形弾性体が一様弾性体より推進効率がよいことを示した。PIV 計測においても、くさび形弾性体の後方流速の方が一様弾性平板よりも速いことを確認した。水中推進機構において、前進のみを考えるのであれば、くさび形の利用は有用であると考えられる。

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 1 件)

- ① 松村雄一、古屋耕平、松枝和哉、北山弘樹、堀井宏祐、安田孝宏、弾性平板上の進行波を利用した水中推進機の推力向上のための反射波抑制手法、日本機械学会論文集、査読有、Vol. 81(2015), No. 827, p. 15-00060.

[学会発表] (計 2 件)

- ① 堀井宏祐、流石雅、松村雄一、古屋耕平、水棲生物を模倣した振動板型推進機構の開発—SPH 法による推進シミュレーション、日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2015 in Kyoto, 2015 年 5 月 18 日.
- ② 松枝和也、松村雄一、古屋耕平、堀井宏祐、弾性体上の進行波を利用した水中推進機構の弾性体形状と推進効率の関係、日本機械学会 TOKAI ENGINEERING COMPLEX 2016 (TEC16) 第 65 期講演会、2016 年 3 月 17 日.

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

○取得状況（計 0 件）

〔その他〕

ホームページ等

<http://www1.gifu-u.ac.jp/~dyn/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松村 雄一 (MASTUMURA, Yuichi)

岐阜大学・工学部・教授

研究者番号： 20315922

(2) 研究分担者

古屋 耕平 (FURUYA, Kohei)

岐阜大学・工学部・助手

研究者番号： 40580056