

平成21年5月20日現在

研究種目：若手研究(B)  
 研究期間：2006～2008  
 課題番号：18760376  
 研究課題名（和文） 海流による沿岸域への水環境影響評価システムの構築に関する研究  
 研究課題名（英文） Study on establishment of the system of water environmental impact assessment of ocean current on an estuary  
 研究代表者  
 駒井 克昭 (KOMAI KATSUAKI)  
 広島大学・大学院工学研究科・助教  
 研究者番号：90314731

研究成果の概要：海流による沿岸域への水環境影響評価システムの構築について数値解析と海洋観測データの解析，ならびに模型実験を踏まえて総合的に検討した．本モデルの適用の対象としたのは我が国有数沿岸域である瀬戸内海の流れ場に及ぼす黒潮の影響評価である．まず，1982～1999年を3期に分けて瀬戸内海の海洋観測結果を3期に分類するとともに，実測の密度分布および気圧配置の季節変動を考慮した平面二次元モデルによって瀬戸内海全域の流れ場を解析し，通過流量の強さと流向の変化は下層の低塩分水塊の滞留域の変化によく一致することを示した．次に，運動量保存則に基づいた考察から，黒潮流軸の位置とそれに沿った流速等の水理量を三角級数で近似する数値モデルを構築した．瀬戸内海の通過流量は  $10^{10}\text{m}^3/\text{month}$  のオーダーで期毎に異なり，黒潮流路の蛇行・直進による影響は季節変動量の約3～4割に相当することが推定された．海洋動態実験においても海流の接岸と開口部からの流入傾向は一致しており，海流の流路変化に伴う開口部境界域での流れ特性の違いを反映させることがモデルの高精度化につながることを示された．

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	2,900,000	0	2,900,000
2007年度	500,000	0	500,000
2008年度	500,000	150,000	650,000
総計	3,900,000	150,000	4,050,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・水工水理学

キーワード：黒潮，瀬戸内海，数値解析

## 1. 研究開始当初の背景

近年，地球規模の気候変動に伴い，異常気象の変動幅の増大，台風の発生個数の変化や勢力の増大等が予測されている．日本沿岸では平均潮位の上昇が観測され，異常潮位も頻発しており，①外洋における黒潮の日本沿岸への離岸（蛇行）・接岸（非蛇行），②海水密度の経年変化，③陸棚波，④地盤沈下などが原因と考えられている．しかし，これらの現

象は外洋と沿岸域の流れ場の相互作用により生じており，広域的・総合的な海洋観測の難しさや様々な気象・海象要因が複雑に作用することなどにより解明されていない．特に，海流の変動に伴う異常潮位や沿岸の流れ場の変化は時間的・空間的スケールが大きく，海岸防災や沿岸域の水環境管理にとって重大な現象の一つであるが，現状の港湾や海岸保全施設の整備においてそれらの影響は定量的に考慮されておらず，必要となる機能を

十分に果たせる既設の施設管理や将来の施設計画を進めるには、外洋変動を含めた沿岸域の水災害予測や水環境変動の手法を確立する必要がある。

## 2. 研究の目的

近年、沿岸域の水質や水産資源の変動と地球規模の大気・海洋変動の関係性が明らかにされてきている。外洋と沿岸域の流れの相互作用とそのメカニズムの解明とその影響評価システムの構築のため、本研究では外洋に面した内湾域の流動・水質場を実験・解析する技術を提案し、内湾域の水管理技術の学問的基礎を確立することを目的とする。具体的には海流（黒潮）の蛇行と非蛇行を表すことが可能な日本南方海域の流れの数値シミュレーションモデルを構築し、海洋観測結果および水理模型実験の結果を用いて妥当性、適応性、および高精度化の方法について検討する。

## 3. 研究の方法

まず、我が国有数の沿岸域である瀬戸内海における海洋観測結果に基づいて、外洋の海流変化に伴う水環境の変化について考察を行う。次に海洋～沿岸域の流動が解析可能な3次元数値モデルをベースに、蛇行流れを強制的に作る流向制御モデルと計算格子形状に依存しない差分スキームを導入し、海洋観測データが充実している瀬戸内海と黒潮を含む日本南方海域において、主に沿岸域開口部の流れ場に及ぼす影響について解析する。さらに、循環式回転水槽と流向制御装置を用いて地形モデルを入れた水理実験と地球の自転効果も考慮した実験を行い、画像解析技術も駆使して流れ場全体のデータを取得し、海流と沿岸域開口部周辺の流れ場の関係について実験データを詳細に収集し、観測・解析結果との対応により検討する。以上より、解析モデルによる流れ場の再現性と実海域に適用する際の高精度化に向けた改善策について検討する。

## 4. 研究成果

### (1) 瀬戸内海の長期変動特性

国土交通省中国地方整備局では1982年から継続的に年4期（2, 5, 8, 10月）において瀬戸内海総合水質調査を行っている。調査地点は、8×8km間隔で配置されており、82年度は伊予灘以東の195点、83～88年度は200点、89～99年度は142点である。測定項目は水温、塩分、D<sub>0</sub>、pH、濁度、透明度、色相の他、海域毎の主な点では窒素、リン等の栄養塩濃度も測定されている。測定水深は上

層が海面下2m、下層が海底上2m（40m以深では測定可能水深）である。図-1は本調査による期間[1]、[2]、および[3]の5月期平均の下層塩分分布を示している。5月期は黒潮系暖水塊が九州南岸～四国～紀伊半島沖に接近し始める時期に対応している。なお、測定点の疎らな備讃瀬戸～伊予灘の一部は瀬戸内海沿岸各県の水産試験場が毎月測定している水質データを用いている。期間[1]には約33psuの低塩分水塊が備讃瀬戸～大阪湾周辺に滞留しているが、期間[2]には河川流量の増大に伴って播磨灘では32psu、燧灘中央海域においても33psuに塩分低下しており、さらに期間[3]には河川流量が再び減少したにもかかわらず燧灘中央部は低塩分化したままである。

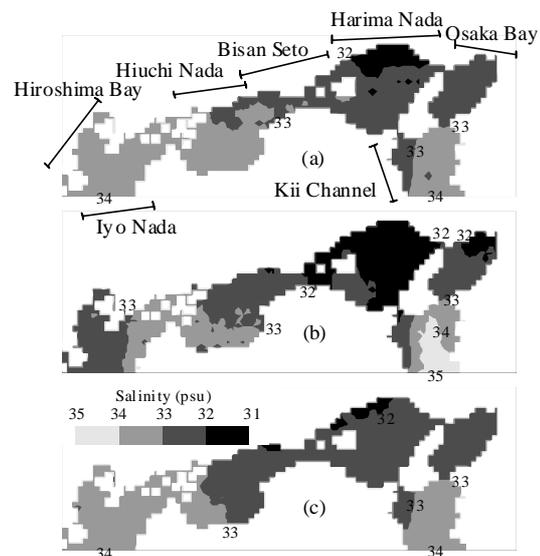


図-1 (a) 期間[1]、(b) 期間[2]、および(c) 期間[3]の伊予灘～紀伊水道における5月期平均の下層塩分分布。

### (2) 瀬戸内海における通過流量の季節変動とその経年変化の推定

観測結果に基づき、各期における流れ場の再現を試みる。ここでは、瀬戸内海スケールの水理現象に着目し、期間[1]～[3]における平均された実測の開口部水位と実測の密度・気圧分布の季節変動を計算条件とした流れ場の数値解析を行う。なお、計算条件に用いる実測密度分布データには黒潮の蛇行・直進の影響が含まれている。そして、瀬戸内海の通過流量の季節変動を期別に推定し、実測された水質場の経年変動と比較する。

季節的な気圧配置の変化は海面での圧力境界条件として作用しており、水頭に換算して-1cm/hPaの力学的な影響を及ぼしている。また、紀伊水道と豊後水道を通じた外海水流入、沿岸からの河川水流入、湾・灘間の海水交換、海面熱収支等から瀬戸内海の海水密度分布は決まるため、順圧成分のみ考慮しても

圧力場の決定機構は複雑であり、海水密度分布を計算によって再現することは難しい。一方、実測の密度・気圧場を解析に考慮することができれば、流れ場の再現精度は高まると予想される。そこで、順圧成分として前述の瀬戸内海総合水質調査による年4期別平均の実測密度と気象庁による月別平均の実測海面気圧をデータ同化することで考慮した平面2次元解析を行う。基礎式は長波方程式と連続式であり、差分法により離散化することで流れ場を解く。

図-2 は計算された期毎の豊後水道と紀伊水道における月平均通過流量の季節変化を示している。流向は瀬戸内海に流入する方向を正として表している。この結果から、流向は期間[1]と期間[2]と[3]で大別できる。すなわち、期間[1]では通年で豊後水道から紀伊水道に向かう流れが生じており、期間[2]と[3]では年平均の流れは豊後水道から紀伊水道に向かっているが、4~7月で流れが逆に向かっている。通過流量の年較差は最大で約  $0.8 \times 10^{11} \text{m}^3/\text{month}$  である。図-1 の下層塩分分布では期間[1]に備讃瀬戸周辺に滞留していた低塩分水塊が期間[2]と[3]には隠岐中央部まで移動し、播磨灘から紀伊水道の東海域が高塩分化しており、期間[2]と[3]の解析結果で4~7月に紀伊水道からの流入傾向が強まることに良く一致している。したがって、90年代後半に黒潮が紀伊水道側に接岸したことが一因となって紀伊水道から豊後水道に向かう流れが強まったことが推測される。

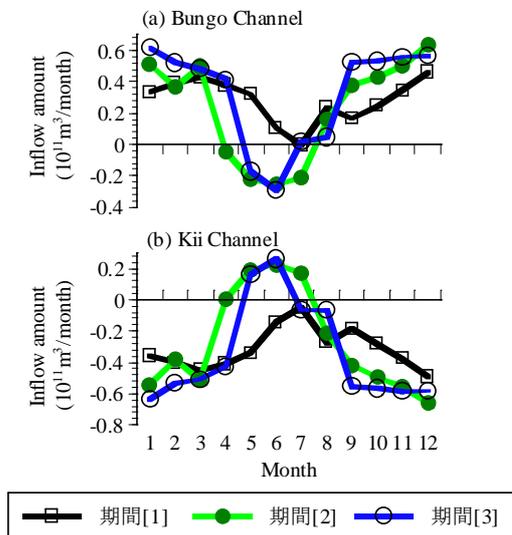


図-2 豊後水道および紀伊水道における計算通過流量の季節変化

### (3) 模型実験による内海開口部の水理現象の把握

瀬戸内海を含む日本南方海域の縮尺地形模型と循環型回転水槽 ( $\phi 1.0\text{m}$ , 水深  $30\text{cm}$ ) を用いて内海開口部における水理現象の把握を試みた。

地形は NGDC (National Geophysical Data Center) で公開されているグリッドデータをもとに作成した。実験条件は黒潮の流れを基準に Froude/Rossby の相似則により決定された。黒潮流路は接岸と離岸の場合を再現し、東西境界から流入する平均流量  $Q$  は  $11.5 \text{L}/\text{min}$ 、水槽の回転周期  $\Omega$  は  $1.04 \times 10^{-2} \text{rad}/\text{s}$  とした。実験ではアルミ粉を水面に散布し、市販のデジタルビデオカメラで撮影した動画を画像解析ソフト (ディテクト社製) で平均流速場を求めた。図-3 は紀伊水道開口部における表面流速の時系列データを示している。紀伊水道開口部では接岸時に流入、離岸時に流出する傾向が観察され、数値解析による流れ場の変化の傾向と一致する結果が得られた。

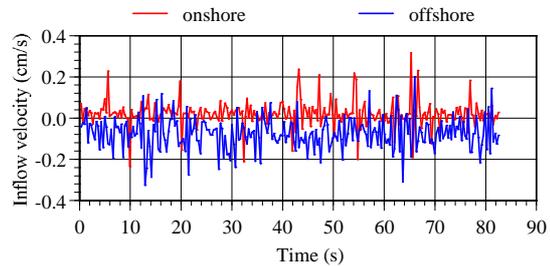


図-3 開口部での流入流速 (模型実験)

### (4) 黒潮をモデル化した流れ場の数値解析法

前述した黒潮流軸の位置とそれに沿った水理量のモデル化の方針を踏まえ、それらを与条件とする流れ場の解析法を以下に示す。流れ場は回転座標系の運動方程式 (1) および連続式 (2) を解くことで求める。

$$\frac{Dq}{Dt} + f\mathbf{k} \times \mathbf{q} = -g\mathbf{k} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \frac{\partial}{\partial x} \left( A_H \frac{\partial \mathbf{q}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( A_H \frac{\partial \mathbf{q}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( A_V \frac{\partial \mathbf{q}}{\partial z} \right) \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{q} = 0 \quad (2)$$

ここに、座標軸は東向きを  $x$ 、北向きを  $y$ 、鉛直上向きを  $z$  とし、原点は平均海面、 $A_H$ 、 $A_V$  : 水平成分および鉛直成分の渦動粘性係数である。コリオリパラメータ  $f$  は式 (3) のようにベータ平面近似し、惑星ベータ効果を考慮する。

$$f = 2\Omega \sin \phi_0 + \left( \frac{2\Omega}{R} \cos \phi_0 \right) y \quad (3)$$

ここに、 $\Omega$  : 地球の自転角速度、 $\phi_0$  : 基準の緯度 ( $y=0$ )、 $R$  : 地球の半径である。鉛直方向の運動は静水圧近似する。移流項は 1 次精度風上差分、粘性項は 2 次精度中心差分、圧力項は 2 次精度中心差分を用いて直交スタガード格子上で離散化する。海面での大気圧は一定として近似し、水面には運動学的境界

条件が与えられる。運動方程式中の水平渦動粘性係数  $A_H$  はスマゴリンスキーモデル、鉛直渦動粘性係数  $A_V$  はリチャードソン数の成層化関数を用いて表す。

$$A_H = (C_s \Delta)^2 (\mathbf{S} \cdot \mathbf{S})^{1/2} \quad (4)$$

$$\mathbf{S} \cdot \mathbf{S} = \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \quad (5)$$

$$A_V = A_0 (1 + a R_i)^\alpha \quad (6)$$

$$A_0 = \kappa |u_*| z \left( 1 - \frac{z}{D} \right) \quad (7)$$

$$u_* = \sqrt{C_f} u_b \quad (8)$$

ここに、 $C_s$ : 定数 (=0.2),  $\Delta = ((\Delta x)^2 + (\Delta y)^2)^{1/2}$ ,  $\mathbf{S}$ : ひずみ速度テンソル,  $a$ : 定数 (=10),  $\alpha$ : 定数 (=1/2),  $\kappa$ : カルマン定数 (=0.41),  $u_*$ : 摩擦速度ベクトル,  $C_f$ : 底面摩擦係数 (=0.0026),  $u_b$ : 底面流速ベクトルである。水温・塩分は移流拡散方程式により計算する。

$$\frac{DC}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x} \left( K_H \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_H \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_V \frac{\partial C}{\partial z} \right) \quad (9)$$

ここに、 $C$ : 水温または塩分濃度,  $K_H$ ,  $K_V$ : 水平および鉛直渦拡散係数 (それぞれ  $A_H$ ,  $A_V$  に等しいと仮定) である。運動方程式中の海水密度は水温・塩分を用いて国際海水状態方程式から求められる。

黒潮流軸の位置は期毎の実測の平均流軸位置から最小2乗法により  $x$  を変数とする三角級数として近似関数を求め、解析領域の南側境界位置とする。ここでは、蛇行・直進の形に良く適合する式(10)の形でモデル化する。

$$y_k = y_0 + y_1 \cos \frac{\pi x}{L} + y_2 \cos \frac{2\pi x}{L} \quad (10)$$

ここに、 $y_k$ : 黒潮流軸位置,  $L$ : 計算領域の東西境界間の距離,  $y_0$ ,  $y_1$ ,  $y_2$ : 定数である。黒潮流軸に沿った流速および水位は期間別の実測データから最小2乗法により  $x$  を変数とする三角級数の形で近似関数が求められ、黒潮流軸に沿って与えられる。

さらに、黒潮によるせん断応力、移流をモデル化する。ここでは、計算格子と無関係に黒潮に沿った水理量を与えるため隣接格子点までの距離  $\Delta n$  を考慮した差分を適用する。黒潮の流れに沿うせん断応力  $\tau_s$  は、黒潮と周囲の流速差に比例する形でモデル化する。

$$\tau_s = A_H \frac{q_k - q}{\Delta n} \quad (11)$$

ここに、 $q_k$ : 流軸の流速ベクトルである。水平渦動粘性係数  $A_H$  の算出にも隣接格子点までの距離を考慮した差分を適用する。移流項についても同様に隣接格子点までの距離を考慮してモデル化する。

$$(\mathbf{q} \cdot \nabla) \mathbf{q}_i = q_i \frac{q_{i+1} - q_k}{\Delta x + \Delta n} - \frac{|q_i| \Delta x}{2 \Delta x} \left( \frac{q_{i+1} - q_i}{\Delta x} - \frac{q_i - q_k}{\Delta n} \right) \quad (12)$$

ここに、 $i$ : メッシュ番号である。水温・塩分の移流・拡散方程式においても同様のモデル化を行う。

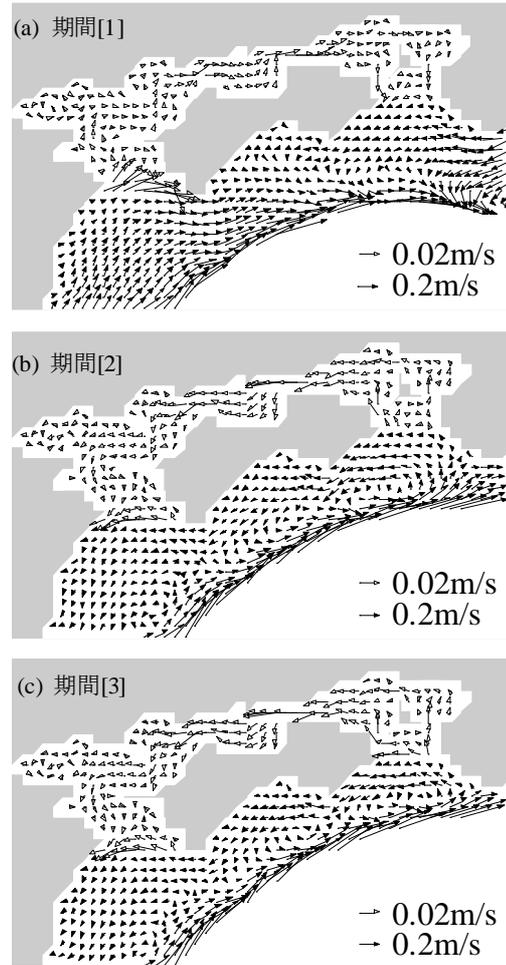


図-4 計算による水深平均流速ベクトル (瀬戸内海内はスケールを10倍している=白抜きベクトル)

#### (5) 解析結果

図-4 は計算された期間[1]~[3]の水深平均流速ベクトルを示している。なお、流速が小さい瀬戸内海内ではベクトルのスケールを10倍して示している(白抜きベクトル)。期間[1]では豊後水道を北上し、紀伊水道を南下する流れが生じており、期間[2]と[3]ではその逆の流れが生じている。備讃瀬戸では

期間[1]で東向き、期間[2]と[3]で逆向きの約 0.2m/s の強流が現れており、図-1 で示された期別の低塩分水塊の滞留域の移動傾向にも一致する。

図-5 は計算された期毎の豊後水道と紀伊水道における通過する流量を示している。本解析結果では期間[1]に豊後水道から流入し、期間[2]と[3]に紀伊水道から流入する傾向が現れる。豊後水道での通過流量は  $1.8 \times 10^{10} \text{m}^3/\text{month}$ 、 $-2.2 \times 10^{10} \text{m}^3/\text{month}$ 、 $-2.4 \times 10^{10} \text{m}^3/\text{month}$  であり、 $10^{10} \text{m}^3/\text{month}$  のオーダーで期毎に異なる。

これは図-2 に示された通過流量の季節変動（変動幅が最大約  $8.0 \times 10^{10} \text{m}^3/\text{month}$ ）と比べて小さいが、季節変動量の 3~4 割に相当する。年平均通過流量の期毎の違いは瀬戸内海内の平面二次元解析の結果（図-5）に比べて 4 倍以上大きく、黒潮の流れをモデル化して平均的に与えたことで期毎の流向の違いが顕著に現れている。あるいは、黒潮の蛇行・直進によって決まる流れが実際には瀬戸内海の中の潮汐や密度場、気圧配置で生じる流れによって相殺されることも考えられ、黒潮をモデル化することで求められた通過流量を瀬戸内海規模の解析の境界条件に反映させることで流れ場の再現精度が向上する可能性がある。

#### (6) 結論

瀬戸内海における実測海面気圧・密度分布を圧力項に考慮した平面二次元モデルを用いて解析した結果、平均的には豊後水道から紀伊水道への流れが卓越するが、黒潮流路が紀伊水道に接岸する直進期には、4~7 月頃に紀伊水道側からの流入が強まることが明らかになった。黒潮流軸の位置とそれに沿った水量を境界条件とする流れ場の解析モデルを構築し、黒潮~瀬戸内海を含む西日本南方海域に適用した。計算結果は TOPEX/Poseidon による開口部水位の変化特性を良く表し、解析結果の妥当性が示された。期毎の通過流量を推定した結果、 $10^{10} \text{m}^3/\text{month}$  のオーダーで異なっており、80~90 年代における低塩分水塊の滞留域の移動傾向と一致した。平均的な黒潮の蛇行・直進が瀬戸内海の通過流量に及ぼす影響は季節変動量の約 3~4 割に相当すると推定された。海洋動態実験による結果においても接岸流路において紀伊水道側からの流入傾向が認められた。黒潮の蛇行・直進によって決まる流れが実際には瀬戸内海の中の潮汐や密度場、気圧配置で生じる流れによって相殺されることも考えられ、黒潮をモデル化することで求められた通過流量を瀬戸内海規模の解析の境界条件に反映させることで再現精度が向上する可能性がある。

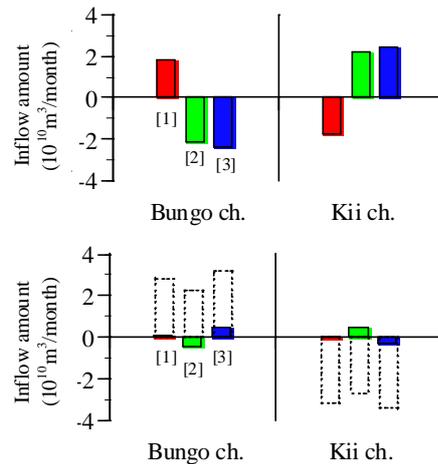


図-5 3 期間別の豊後水道・紀伊水道における年平均通過流量（上：黒潮をモデル化した解析結果，下：平面二次元解析の解析結果）

#### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計 3 件）

- 1) 駒井克昭, 日比野忠史, 大釜達夫: 黒潮の蛇行・直進が瀬戸内海の流れに及ぼす影響, 土木学会論文集, 査読有, Vol. 64, pp. 165-179, 2008
- 2) 駒井克昭, 金キョンへ, 池原貴一, 日比野忠史: 瀬戸内海における通過流の経年変動, 海岸工学論文集, 査読有, 第 55 巻, pp. 406-410, 2008
- 3) Kiichi Ikehara, Katsuaki Komai, Kyung-hoi Kim and Tadashi Hibino: Interannual variation of flow-field in a semi-closed sea with two entrances facing an ocean current, Proceedings of International Conference on Civil and Environmental Engineering, 査読無, CDROM, 2008

〔学会発表〕（計 2 件）

- 1) 池原貴一, 日比野忠史, 駒井克昭, 金キョンへ: 瀬戸内海における流れ場と水位の長期的な変動特性の把握, 第 60 回土木学会中国支部研究発表会, 2008/5/31, 広島大学
- 2) Katsuaki Komai, Tadashi Hibino, Yasushi Matsunaga: Influence of the Kuroshio stream path variation on current fields in the Seto Inland Sea, pp. 244-247, Proceedings of the 14th PAMS/JECSS Workshop, 2007/5/25, 広島大学

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

駒井 克昭 (KOMAI KATSUAKI)  
 広島大学・大学院工学研究科・助教  
 研究者番号: 90314731

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者