

平成22年 5月31日現在

研究種目：若手研究 (B)  
 研究期間：2008～2009  
 課題番号：20760359  
 研究課題名 (和文) 懸濁物質の非球形性を考慮した沿岸域リモートセンシングアルゴリズムの開発  
 研究課題名 (英文) Development of remote sensing algorithm for coastal waters taking into account non-sphericity of suspended solids  
 研究代表者  
 小林 拓 (KOBAYASHI HIROSHI)  
 山梨大学・大学院医学工学総合研究部・助教  
 研究者番号：20313786

研究成果の概要 (和文)：水中の懸濁物質の非球形性を考慮することで懸濁した沿岸域に適した植物プランクトンや懸濁物質濃度を衛星データから導出する水中アルゴリズムの開発を行うことを目的とし、タイ王国バンパコン川河口周辺海域において、無機粒子やその凝集体の粒径分布および非球形性の測定、および、海面反射率の測定を実施した。アルゴリズム開発の基礎データとして重要な非球形粒子の性状や新しい測定法により近紫外域や近赤外域を含めた海面射出輝度が得られた。

研究成果の概要 (英文)：Size distribution and non-sphericity of mineral particle and its aggregate and surface reflectance were measured around Bangpakong river estuary in Thailand to develop in-water algorithm for satellite remote sensing deriving chlorophyll-a and suspended solids concentrations taking into account non-sphericity of suspended materials. Nature of non-spherical particle and surface reflectance including near-UV and near-IR by new measurement method were obtained. These are important data for basic information to develop the algorithm.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,600,000	780,000	3,380,000
2009年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：環境工学

科研費の分科・細目：土木工学・土木環境システム

キーワード：衛星リモートセンシング, 懸濁物質, 非球形, 粒径分布, カバー付放射輝度計

## 1. 研究開始当初の背景

急速な経済発展を遂げているアジア各国において、その経済成長に伴う人口の増加や土地利用の変化、ダム建設などにより、沿岸域へ流出する栄養塩や土砂量の変動に伴

う海洋環境の悪化が予想され、海洋環境の継続的な監視が求められている。海洋環境の指標として植物プランクトン濃度や懸濁物質は重要な項目であり、これらの空間的・時間的変動を捉える方法として衛星リモートセ

ンシングが期待されている。海洋環境を対象とした地球観測衛星およびセンサは、ADEOS/OCTS、SeaStar/SeaWiFS、Terra/Aqua/MODIS、ADOES-II/GLI などがあり、日本は地球観測衛星 GCOM-C の打上げを予定している。搭載されるセンサ (SGLI) は、沿岸域を主な観測対象の一つとしている。衛星データを解析する際に、海面反射率から海洋中の各懸濁物質濃度を算出する水中アルゴリズムが用いられる。沿岸域は様々な懸濁物質が高濃度で存在し、また、その濃度範囲も広い光学的に非常に複雑である。そこで、懸濁物質や溶存物質、水分子の吸収や散乱といった光学特性を基に、放射伝達を理論的に扱う水中光学モデルにより各懸濁物質濃度と海面射出輝度とを関連づける方法が用いられている (小林ら, 1996; Tanaka et al., 2004)。沿岸域は、河川から流入した土砂粒子などの無機粒子、またそれらと有機性のデトライタスとの凝集体が粒子相を支配している。無機粒子は散乱性が強く、沿岸域の放射過程に大きく寄与している。凝集体をはじめ無機粒子の形状は球形ではなく、非球形であることが指摘されている (Bower and Binding, 2006)。球形と非球形とでは後方散乱特性が大きく異なる。そのため、非球形粒子の散乱特性を正確に推定し、沿岸域の水中光学モデルの改良を行い、これを活用した沿岸域用水中アルゴリズムの開発が求められている。

## 2. 研究の目的

最終的には沿岸域用水中アルゴリズムの開発を目的とし、以下の2つの研究を実施した。

### (1) 懸濁物質の非球形性を考慮した光学特性

沿岸域の無機粒子やその凝集体による散乱位相関数や体積散乱係数を明らかにする。これらの値は、非球形粒子の散乱理論により、算出する。散乱理論として、T-matrix 法 (Mishchenko et al., 1996)、Discrete Dipole Approximation (DDA) 法 (Draine, 1988)、Ray-tracing 法 (Macke et al., 1996)、Finite-Difference Time-Domain (FDTD) 法 (Yang and Liou, 2000) などがある。いずれの方法でも粒子の粒径分布、そして形状に関する幾何学的なモデルが必要となる。そこでこれらのパラメータを現場で採水した試料を用いて実測し決定する。

### (2) 懸濁海域での海面反射率の測定

水中光学モデルの開発には、様々な物質の光学特性とともにモデルを評価するために現場での放射観測が必須である。海表面での天空光の反射を避け、海中から大気へ射出される放射輝度を直接測定するため、カバーをつけた放射計により測定する。この際、カバーの大きさを複数用意しそれぞれ測定する

ことで、放射計の影の影響を理論的に取り除くことが可能である (Aas and Korsbø, 1997)。そこで大きさが異なる複数のカバーを取り付けた放射計を用い、沿岸域での紫外域から近赤外域にわたる海面反射率を正確に測定する。

## 3. 研究の方法

観測は 2009 年 12 月にタイ王国のタイ湾北部に位置するバンパコン川河口周辺海域において実施した (図 1)。放射に関連する観測を実施するとともに採水した試水を用いて、水質項目や個々の物質の光学特性を測定した。

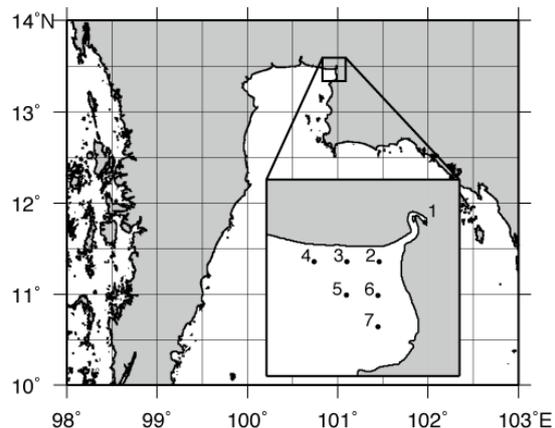


図 1 タイ王国バンパコン川河口周辺海域における測定点。

### (1) 水質項目

#### ① クロロフィル-a 濃度

試水を GF/F フィルターでろ過した後、フィルターを DMF 溶液に浸し、冷蔵保管した。蛍光光度計によりクロロフィル-a 濃度を測定した。

#### ② SS

予め秤量したポアサイズ  $0.4\mu\text{m}$  のヌクレポアフィルターと GF/F フィルターにより試水をろ過し、超純水で脱塩後、乾燥させ保管した。再び秤量し、SS 濃度を求めた。

### (2) 各物質の光学特性

#### ① 植物プランクトンおよび非生物粒子の吸収係数

試水を GF/F フィルターによりろ過し、液体窒素中で保管した。積分球を取り付けた分光光度計を用いて、吸光度を測定した後、メタノールおよび温水を用いて光合成色素を漂白し再び吸光度を測定した。漂白前後の吸光度の差から、植物プランクトンの吸収係数を、漂白後の吸光度から非生物粒子の吸収係数を算出した。

#### ② 有色溶存有機物 (CDOM) の吸収係数

試水をポアサイズ  $0.2\mu\text{m}$  のメンブレンフィルターでろ過した濾液を冷蔵して保管した。ポアサイズ  $0.2\mu\text{m}$  のヌクレポアフィルターで

2 回ろ過した後、10cm の円筒石英セルを用いて、吸光度を測定し、吸収係数を算出した。

(3) 懸濁物質の粒径分布および形状

試水をシャーレに入れ静置した後、CCD カメラを取り付けた倒立顕微鏡により、沈殿した懸濁物質の画像を取得した。対物レンズは40 倍を使用した。取得した画像は、ソフトウェア上で、連続して撮影された画像の差の絶対値を算出し、膨張処理と収縮処理をした後、2 値化し粒子の面積とヘイウッド円形因子を算出した。粒子の面積から円等価径を算出した。ヘイウッド円形因子とは、周辺長を面積が等しい円の円周で割った値であり、正円の場合、1 となる。

(4) 海面反射率の測定

本研究で扱う海面反射率とは、海面から射出された放射輝度（海面射出輝度）を海面直上での下向き放射照度で割った値である。海面射出輝度は大きさの異なるカバーを取り付けた 2 本の放射計で測定した（図 2）。影の影響を補正した輝度は次式で表される。

$$L_w^{corrected} = L_w^{small} \exp(-kar_{small}), \quad (1)$$

$$ka = \ln(L_w^{small} / L_w^{large}) / (r_{large} - r_{small}), \quad (2)$$

ここで  $L_w$  は測定された海面射出輝度、 $r$  は影の半径、上付の  $small$  と  $large$  はカバーの大きさを表し、 $a$  は全吸収係数、 $k = 2/\tan(\theta_w)$  の  $\theta_w$  は水中での太陽天頂角である。カバーの大きさは、それぞれ  $r_{large} = 0.104$  m と  $r_{small} = 0.027$  m である。

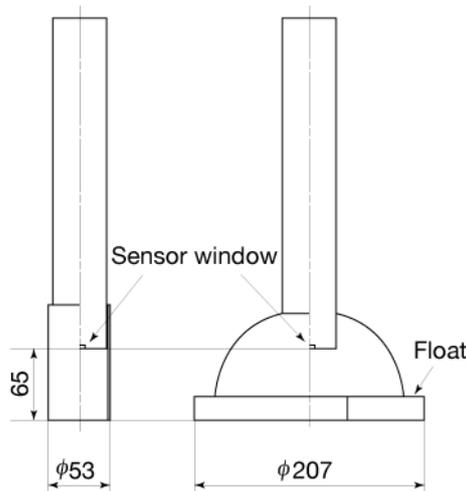


図 2 カバー付放射輝度計の概念図

4. 研究成果

各観測点における各測定結果を表 1 に示す。Stn. 1 はバンパコン川の下流部でクロロフィル-a 濃度が他の地点より 4~10 倍以上高かった。透明度は全地点で 1m 以下であった。

表 1 各観測点におけるクロロフィル-a 濃度、SS 濃度、440nm における CDOM の吸収係数、透明度の測定結果

Stn. No.	Chl-a (mg/m <sup>3</sup> )	SS (mg/L)	a <sub>CDOM</sub> (440) (/m)	Secchi depth (m)
1	39.8	8.7	0.46	0.45
2	6.2	7.9	0.56	0.45
3	9.1	6.6	0.31	0.50
4	3.9	4.3	0.29	0.97
5	4.9	4.0	0.31	0.97
6	3.5	4.9	0.40	0.65
7	5.1	5.5	0.28	0.60

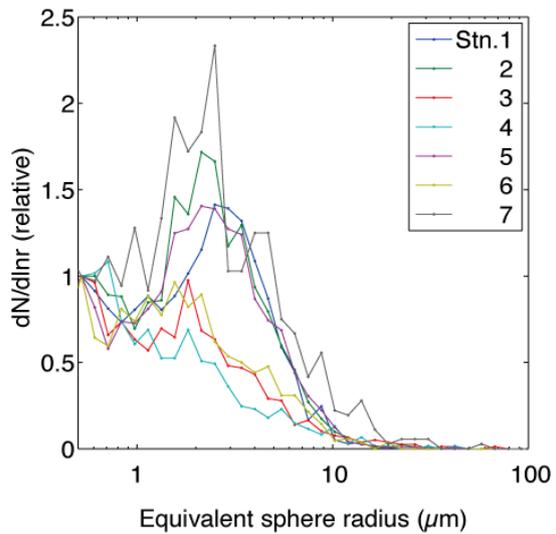
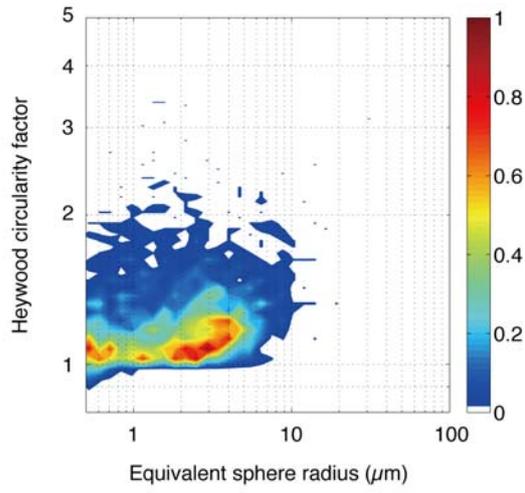


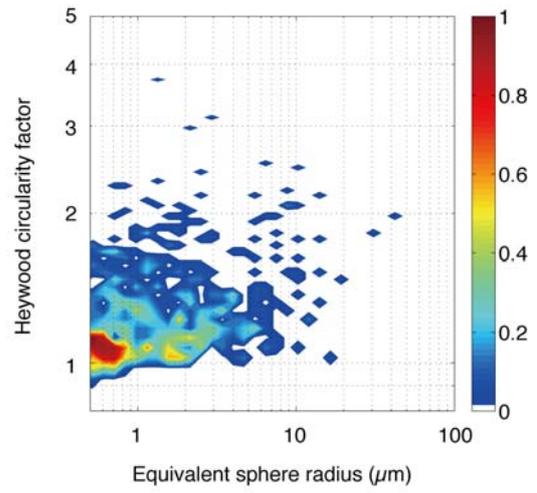
図 3 0.5μm の値で正規化した各観測点での懸濁物質の粒径分布

図 3 に各観測点での懸濁物質の粒径分布を示す。Stn.1 では 3 μm 付近に、Stn.2 では 2 μm 付近に、Stn.5 では 2~3 μm 付近に、Stn.7 では 1~2 μm 付近にモードがみられた。また Stn.3, 4, 6 では前出の観測点と比較し値は低いながら 2 μm 付近にモードがみられた。それぞれの観測点は同じ河口付近に存在するが、粒径分布は明らかに異なっていることがわかった。粒子による散乱係数は粒径分布に依存して変化することがわかっており、同じ質量の懸濁物質であったとしても散乱特性が異なることを意味している。今後、これらの粒径分布の違いによる散乱特性の変化を定量的に見積もることで水中アルゴリズムへの影響を評価する予定である。

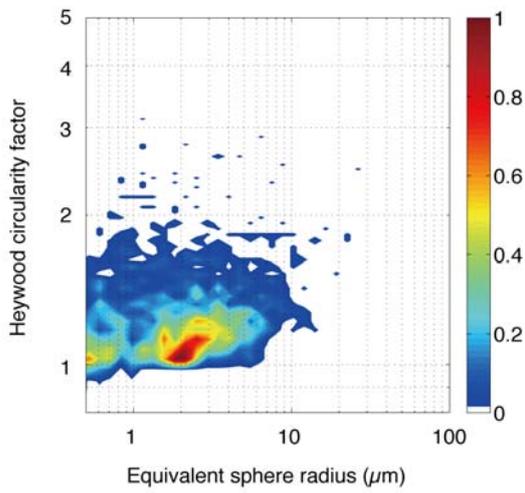
図 4 に各観測点での懸濁物質の円相当半径とヘイウッド円形因子との散布図を示す。各観測点とも大まかには以下に述べる似た傾向を示した。1 μm の粒子はほぼ円形因子は 1 付近に集中しており、球形粒子が卓越していることがわかった。図 3 でモードがみられた 2~4 μm の粒子の円形因子は、1~1.5 付近に分布しており、相対的に非球形粒子の存在割合が高くなっていた。10 μm 以上の粒子になると円形因子は 2 前後もしくはそれ以上の値であり、ほとんど非球形粒子から校正され



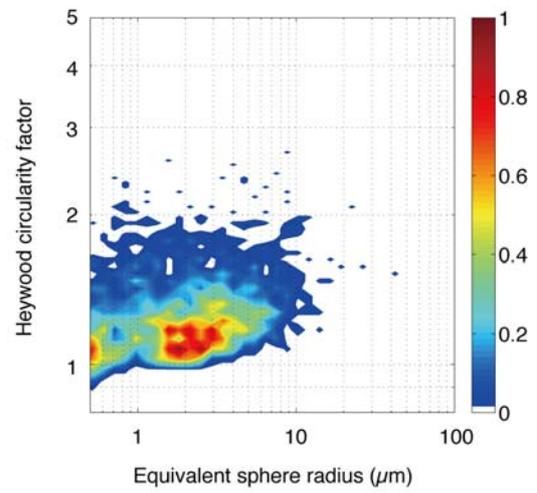
(a) Stn. 1



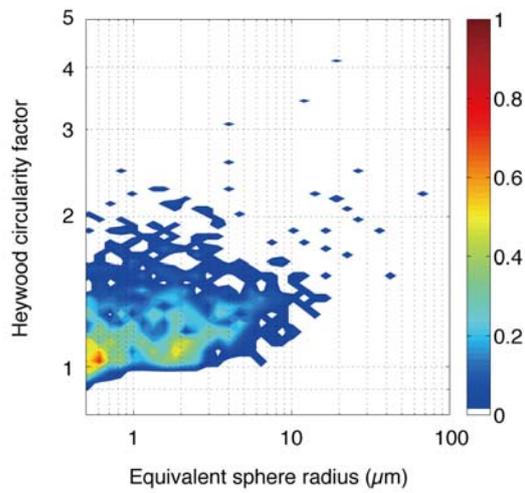
(d) Stn. 4



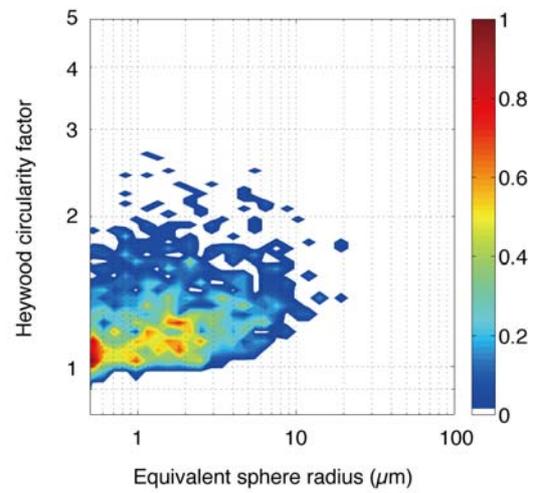
(b) Stn. 2



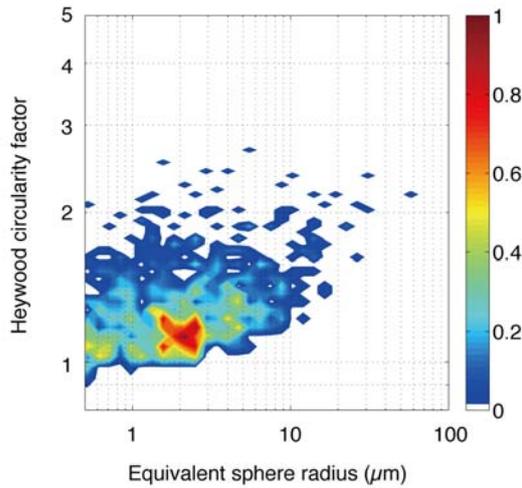
(e) Stn. 5



(c) Stn. 3



(f) Stn. 6



(g) Stn. 7

図4 各観測点での懸濁物質の円相当半径とヘイウッド円形因子との散布図。値は最大値を1として正規化している。

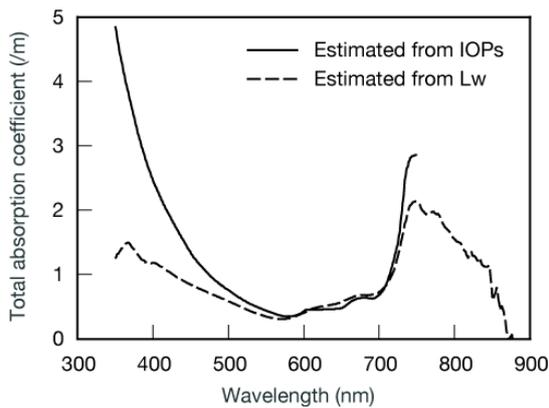


図5 放射観測から求めた全吸収係数および各物質の光学特性から算出した全吸収係数。

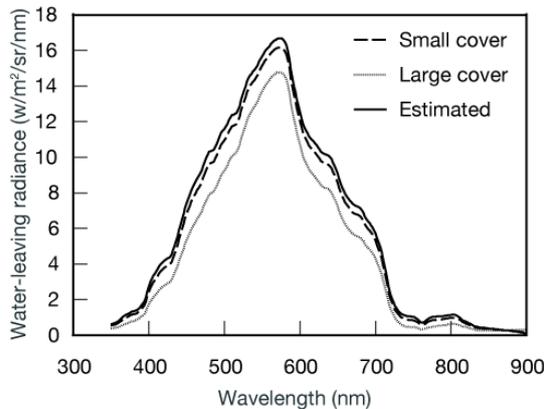


図6 カバー付放射計で測定された海面射出輝度および推定された真の海面射出輝度

ていることがわかった。非球形粒子の散乱理論は、その非球形の形状を数学的に既知である形状に近似して用いることが多く、本研究の結果は、懸濁物質の粒径によって異なる形状モデルを使用しなければならないことを示唆している。今後より多くのデータを蓄積し、粒径ごとに適切な形状モデルを決定する必要がある。

カバーが小さい放射計によって測定された海面射出輝度の方がカバーが大きい放射計によって測定された値より大きくなった(図5)。これは予期された結果であり、これらの値をより(2)式を用いて全吸収係数を算出した。また、採水した試水から求めた植物プランクトン、非生物粒子、CDOM、そして水の吸収係数を足し合わせて求めた全吸収係数とともに図6に示す。これらの値は500 nmより長波長領域ではよく一致した。しかし短波長領域では波長が短くなるにつれ、ずれが大きくなった。このずれは水分子による散乱の影響だと考えられる。真の海面射出輝度を(1)式により算出し、海面直上での下向き放射照度で割ることでリモートセンシング反射率を算出した(図7)。これまで測定誤差が大きかった近紫外や近赤外の波長域でノイズの少ないスペクトルを得ることができた。今後、SGLIのアルゴリズム開発やその評価に重要なリモートセンシング反射率を近紫外や近赤外域を含め、導出することが可能となった。

得られたリモートセンシング反射率を用いて標準的な水中アルゴリズムであるOC4v4を用いてクロロフィル-a濃度を推定した結果を図8に示す。1:1のラインに非常に近い結果となったが、クロロフィル-a濃度の実測値が高くなるにつれ、1:1のラインからのずれが大きくなった。今後、水中光学モデルの改良を進め、高濃度域でも精度よく推定可能な水中アルゴリズムの改良を行う予定である。

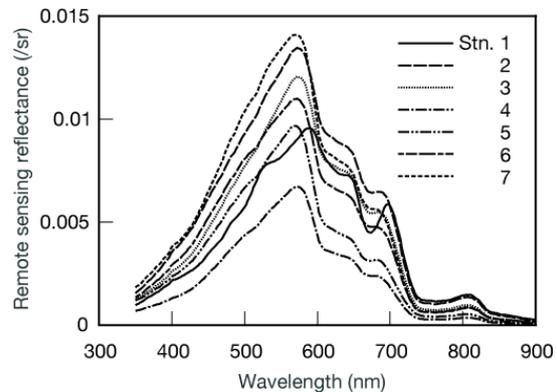


図7 各観測点でのリモートセンシング反射率

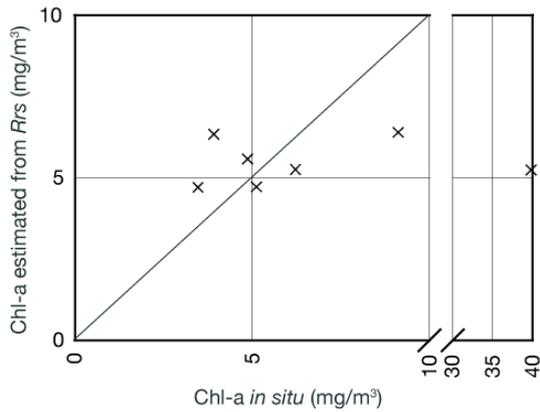


図8 実測したクロロフィル-a 濃度とリモートセンシング反射率から水中アルゴリズムを基に推定したクロロフィル-a 濃度との散布図

## 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 H. Kobayashi, M. Toratani, S. Matsumura  
 その他3名、Optical properties of inorganic  
 suspended solids and their influence on  
 ocean colour remote sensing in highly turbid  
 coastal waters、International Journal of  
 Remote Sensing、査読有、2010、印刷中

[学会発表] (計1件)

- ① H. Kobayashi、Water-leaving radiance  
 measured with covered radiometers、The  
 6th Japan-Korea Workshop on Ocean Color  
 Remote Sensing、2009年12月10日、  
 Ansan、韓国

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

小林 拓 (KOBAYASHI HIROSHI)

山梨大学・大学院医学工学総合研究部・助  
 教

研究者番号：20313786

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし