

平成 22 年 3 月 31 日現在

研究種目：若手研究 (B)
 研究期間：2008～2009
 課題番号：20760333
 研究課題名 (和文) 沿岸域で直接測定した乱流特性量による懸濁物質の凝集・崩壊現象のパラメタリゼーション
 研究課題名 (英文) Parameterization for turbulence induced flocculation of SPM based on directly-measured turbulent energy dissipation rate in coastal region
 研究代表者
 齋田 倫範 (SAITA TOMONORI)
 九州大学・大学院工学研究院・学術研究員
 研究者番号：80432863

研究成果の概要 (和文)：本研究では、懸濁物質の凝集を乱流エネルギー散逸率 (以下、散逸率) で表現する Winterwerp (2002) の凝集モデルを有明海に適用することを目的として、散逸率と懸濁物質フロック径の関係を評価するための現地観測を行った。その結果、散逸率には潮汐周期の変動が認められたが、フロック径は $10\sim 15\mu\text{m}$ 程度で時間的に大きく変化することはなかった。Winterwerp のモデルによる推定値と観測値とを比較した結果、モデル係数を修正する必要があるものの、モデルによって現地海域のフロック径を概ね再現できることが確認された。

研究成果の概要 (英文)：In this study, a field observation on a relation between turbulent kinetic energy dissipation rates ε and floc size was carried out in Ariake Bay by using a microstructure profiler and a waterproof microscope. As a result of the observation, ε at flood and ebb tide were higher than that at slack tide. On the other hand, the observed floc diameters were around $10\sim 15\mu\text{m}$ and had not changed drastically for a tidal period. In addition, floc diameters estimated by the model proposed by Winterwerp (2002) roughly corresponded to the observed values.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2009 年度	1,300,000	390,000	1,690,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：水工水理学

科研費の分科・細目：土木工学・水工学

キーワード：懸濁物質輸送，フロキュレーション，フロック径，沈降速度，乱流構造，乱流エネルギー散逸率，潮流，有明海

1. 研究開始当初の背景

沿岸域における乱れ構造は水環境に大きな影響を与えると考えられる。例えば、乱れは懸濁物質の凝集やフロックの崩壊を引き起こすため、乱流特性量を用いたフロックの凝集促進や崩壊現象の定式化が Winterwerp(2006)によって行なわれている。また、近年では浅海域における植物プランクトンの分布や増殖に対する乱れ構造の役割が議論されている(例えば, Serra *et al.*,2003)。このように乱流微細構造が沿岸域における種々の環境要因に対して大きな影響を及ぼしていることは認識されているが、その計測の困難さから知見が不足している。近年、水環境の悪化が顕著である有明海においても、懸濁物質の動態変化に伴う透明度の上昇等の問題と潮流流速の減少に起因する鉛直混合力の低下との関連性が議論されている。これらのことから、有明海の透明度上昇に代表されるような沿岸域の懸濁物質にまつわる諸現象と海域の乱れ構造の把握は、海域の水質や生態系を保全する上で非常に重要と考えられる。有明海における底質の挙動に関する研究例〔例えば、山西ら(2005)など〕は多いが、現象の非定常性が強く、現象が複雑であるために底質の沈降、巻上げ、ならびに移流といった現象を完全に解明するには至っていない。また、懸濁物質の輸送に関する数値シミュレーションも数多く行われており、有明海における事例としては Nakagawa(2003)がある。しかし、現時点でのシミュレーション精度は高くはなく、懸濁物質の輸送に関連する種々のプロセスのモデリングについてはさらなる研究が必要である。特に、将来的な計算機の性能の向上によって高解像度での数値シミュレーションが可能となった場合には、これまでの懸濁物質輸送数値シミュレーションで十分に考慮されていなかった微細な現象を再現するための定式化とモデル係数の決定が必要となる。

2. 研究の目的

海洋において鉛直方向の乱流拡散は様々な現象に影響しており、その実測やパラメタリゼーションが盛んに行われてきた。特に、沿岸海洋における乱れ構造は、密度躍層の消長や浮遊懸濁物質の凝集を支配する非常に重要な物理過程である。本研究で対象とする有明海でも、底質の細粒化や透明度の上昇といった乱れ構造の変化に伴う懸濁物質の動態変化に起因する水環境の悪化が指摘されている。その原因究明および改

善策の提案のために、有明海の懸濁物質輸送をより高精度に再現可能な数値モデルを確立する必要がある。懸濁物フロックの凝集・崩壊や Trajectory biasing 等の影響を評価する際には時空間的な乱れの変動特性に関する実測データの取得が重要となる。これまでの乱れの直接計測は海洋を中心として行なわれてきたが、前述のような“乱れ構造が沿岸域の環境に大きな影響を及ぼしている”という認識から、近年では沿岸域でも積極的に実施されるようになってきた。しかし、未だに観測や解析の方法論が議論されており(Roget *et al.*,2006)、更なる知見の蓄積が必要といえる。特に、乱流シアセンサーの測定原理による制約から、海底や海表面の近傍における乱流エネルギー散逸率の算出は行われていない。さらに、密度躍層が発達している場合には、躍層通過時にプロファイラの加減速が生じるため、沿岸域における正確な乱流エネルギー散逸率の算出が困難である。その一方で、波浪や海底摩擦による乱れの生成が沿岸域の鉛直混合に与える影響を考える際には、境界近傍の乱れ構造を知ることが不可欠である。

そこで本研究では、境界近傍ならびに密度躍層付近の情報を補完する一手法として、高感度のサーミスタによって取得される温度シアのデータから乱流エネルギー散逸率を算出することを試み、乱流シアデータから算出された乱流エネルギー散逸率と比較することによってその有用性を検討した。また、水中顕微鏡によって測定された懸濁物質のフロック径と Winterwerp(2002)によって乱流エネルギー散逸率および懸濁物質濃度から推定されるフロック径とを比較して両者の関係性を評価した。さらに、乱流によるフロックの凝集・崩壊モデルのパラメータを再評価するとともに、有明粘土に対するモデル係数を決定した。

3. 研究の方法

(1)観測概要

観測は2008年12月3日(中潮)に Fig.1 に示す測点 B (32°56'58"N, 130°14'58"E) において一潮汐間にわたって行った。観測当日の大浦における潮位変動および観測時間帯を Fig.2 に示す。フロック径の測定には水中顕微鏡(アレック電子社製 Image Particle Counter)を用い、海底から 1m, 4m, 8m, 12m の位置において 60 分毎に連続写真撮影を行った。撮影スピードは毎秒 10 枚であり、一回の測定で 500 枚撮影した。乱流エネルギー散逸率の測定には、微細構造プロファ

イラ (アレック電子社製 TurboMAP9 : 以下 TurboMAP) を用い、先端側に錘を取り付けた TurboMAP を海底に向かって 0.5m/s で降下させる方法で観測時間中に 300 回の測定を行った。さらに、多項目水質計による 60 分毎の塩分、水温、濁度の測定、超音波ドップラー流速計を用いた流速・流向測定、ならびに懸濁物質濃度の測定のための採水、採泥も併せて実施した。

温度センサーによる乱流エネルギー散逸率の推定にあたっては、過去に有明海で取得された夏季の観測データを用いて検討を行った。用いた観測データは、2007 年 8 月 24 日 (中潮期) に Fig.1 に示す有明と長洲を結んだ直線上の点 A (32°51'56"N, 130°21'27"E) で取得されたものである。このデータについては、密度躍層近傍の乱れ構造を捉えるために、錘を取り付けた TurboMAP を海底まで沈めた後に錘を切り離して海面に向かって 0.5m/s で自由浮上させる方法で取得されている。

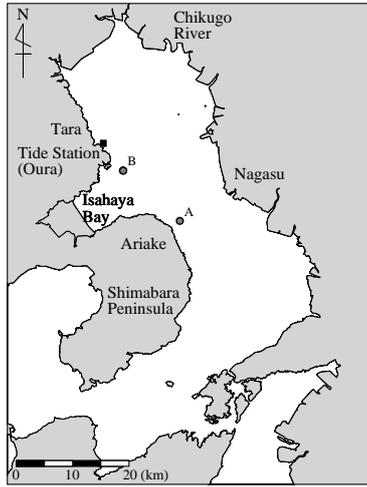


Fig.1 有明海の概略図と観測地点

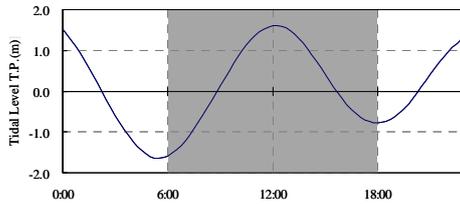


Fig.2 大浦の潮位と観測時間帯

(2) 乱流エネルギー散逸率の算出

① 乱流シアによる算出

齋田ら(2009)と同様の方法を用いて乱流シアデータから乱流エネルギー散逸率 ε_{SH} の算出を行った。TurboMAP によってサンプリング周波数 512Hz で測定された乱れ速度 u' の鉛直シアをフーリエ変換して得られるパワースペクトル $\phi(k)$ から、等方性を仮定して導かれる以下の式(1)を用いて層厚 1m 毎

に乱流エネルギー散逸率 ε を算出した。

$$\varepsilon_{SH} = \frac{15}{2} \nu \overline{\left(\frac{du'}{dz}\right)^2} = \frac{15}{2} \nu \int_{k_1}^{k_2} \phi(k) dk \quad (1)$$

ここで、 ν は動粘性係数であり、TurboMAP によって測定された塩分、水温の値を用いて層毎に算定した。本研究では、乱流シアのスペクトルを算出する際の層厚を 1m に設定したため k_1 は 1cpm とした。さらに、式(2)から求まる Kolmogoroff スケールの波数 k_s と k_2 との比較を行いながら k_2 を変化させて計算を繰り返し、 k_2 と k_s とが等しくなった時点での ε_{SH} を結果として用いた。

$$k_s = \left(\frac{\varepsilon_{SH}}{\nu^3}\right)^{1/4} \quad (2)$$

機器の振動によって生じるノイズの波数 (波数 300cpm 付近) よりも k_2 が高波数側にある場合には、Nasmyth スペクトル (Nasmyth, 1970) を積分した。なお、シアセンサーの計測条件として TurboMAP の浮上速度が一定である必要があるため、浮上速度が一定と見なせる表層側約 7 割の範囲のデータのみを使用して解析を行った。

② 温度シアによる算出

サンプリング周波数 512Hz で測定された温度シアデータ dT/dz から温度シアの理論スペクトルである Batchelor スペクトルを用いて乱流エネルギー散逸率 ε_T を算出した。式(3)~(6) に Roget (2006) による Batchelor スペクトルの関数を示す。

$$E_{\frac{dT}{dz}}(k) = \frac{\chi_0 q^{1/2}}{D \kappa_B} y^2 \left\{ \frac{\exp(-y^2)}{y} - \sqrt{\pi} (1 - \text{erf}(y)) \right\} \quad (3)$$

$$\text{erf}(y) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^y \exp(-x^2) dx \quad (4)$$

$$y = 2\pi k \kappa_T^{1/2} \nu^{1/4} q^{1/2} \varepsilon^{1/4} \quad (5)$$

$$\kappa_B = (\varepsilon_T / \nu D^2)^{1/4} \quad (6)$$

y は無次元化された波数、 κ_B は Batchelor スケールに対応する波数、 κ_T は熱伝導率である。 χ_0 は温度シアのパワースペクトル ϕ_T を積分して以下の式(7)から得られる。

$$\chi_0 = 6D \overline{\left(\frac{\partial T'}{\partial z}\right)^2} = 6D \int_{k_1}^{k_2} \phi_T(k) dk \quad (7)$$

$$D = \kappa_T / \rho c_p \quad (8)$$

D は熱拡散率であり、各層の海水密度 ρ 、比熱容量 c_p および熱伝導率 κ_T から求められる。 k_3 は測定回によって異なるが、スペクトルが十分減衰していると思われる 3000cpm 程度とした。

温度シアから乱流エネルギー散逸率 ε_T を算出する際には、まず測定された温度シアから層厚 1m ごとにパワースペクトルを求めた。そのスペクトルに式(1)に示した Batchelor スペクトルを最小二乗法によりフィッティングさせて最適な ε_T を決定した。 χ_0 の値は $\phi_T(k)$ を積分して得られる値を用いた。なお、式(3)、(5)中の q については、2.2~5.2程度であることが Oakey (1982)によって示されている。本研究では、 q の値を2.0~5.0として層ごとに最適な値を用いた。

(3) 浮遊懸濁物フロック径の評価

乱流エネルギー散逸率と懸濁物質濃度を Winterwerp (2002)のモデルに入力して見積もったフロック径と水中顕微鏡によって撮影されたフロックの実測値との比較を行った。なお、水中顕微鏡によって得られた画像データから画像解析によって求めたフロック径(中央粒径)をフロック径の実測値とした。また、用いた Winterwerp のモデル式は式(9)、(10)である。

$$\frac{\Delta N}{\Delta t} = k_B(D - D_p)^p D^{2q} N \left(\frac{\varepsilon}{\nu}\right)^{\frac{q+1}{2}} - k'_A(1-\phi)D^3 N^2 \left(\frac{\varepsilon}{\nu}\right)^{0.5} \quad (9)$$

$$\phi = \frac{c}{\rho_s} \left(\frac{D}{D_p}\right)^{3-n_f} = f_s N D^3 \quad (10)$$

ここで、 N はフロックの数密度、 ϕ は懸濁物質の体積濃度、 D はフロック径、 D_p はフロックを構成する粒子径、 ν は動粘性係数、 ρ_s は土粒子密度、 c はSS濃度、 f_s は形状係数、 n_f はフロックのフラクタル次元である。また、 p, q, k_A, k_B は凝集とフロックの崩壊に関するパラメータである。

本研究では移流、拡散、巻き上げ・堆積を考慮せず、フロキュレーション関数のみに注目してフロックの凝集と崩壊の程度を見積もった。フロキュレーション関数は崩壊を表す式(9)の右辺第一項と凝集を表す第二項のからなる。なお、与えられた乱流エネルギー散逸率と懸濁物質濃度に対してこれら二つの項が等しくなる場合のフロック径を平衡フロック径と呼ぶ。

モデルによるフロック径の算定には、微細構造プロファイラによって測定された乱流エネルギー散逸率と懸濁物質濃度を用い、 $\Delta t=600s$ として時々刻々のフロック径を計算した。初期のフロック径には実測値を用いた。懸濁物質濃度は、点Bで採取した泥で作成した試料濁水を用いて検定することで、多項目水質計の濁度値から換算して求めた。その際、懸濁物質濃度については60分毎のデータをスプライン補間によって内

挿して計算に用いた。海底上12mの層は表層付近に位置し、シアセンサーの計測条件を満たさないため、乱流シアから乱流エネルギー散逸率を算出することができない。

Fig.3に示す乱流シア、温度シアそれぞれから算出した乱流エネルギー散逸率の相関より、乱流シアによるデータが得られている範囲においては、それぞれの乱流エネルギー散逸率がほぼ同程度の値となっていることが分かる。そこで、海底上12mについては温度シアから算出した乱流エネルギー散逸率を用いた。

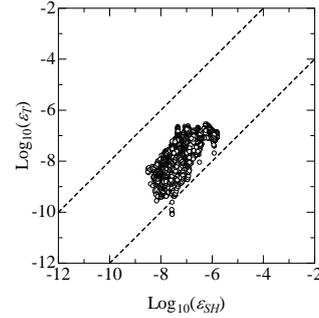


Fig.3 乱流シア、温度シアそれぞれから算出した乱流エネルギー散逸率の相関

4. 研究成果

(1) 結果および考察

Fig.4に乱流シア、温度シア、 ε_{SH} 、 ε_T および σ_T の鉛直分布を示す。 σ_T の鉛直分布より、いずれの時間帯にも水深5~10mに密度躍層が発達しているのが分かる。密度躍層付近における ε_T の値は、他の層と比べて小さくなっており、浮力による乱れの抑制がとらえられていると考えられる。一方、 ε_{SH} の値には密度躍層付近での変化がほとんどみられない。これは、TurboMAPの加減速の影響により、シアセンサーでは密度躍層近傍の乱れを正確に評価できていないためと考えられる。これらより、密度躍層が発達している海域においては温度シアを用いた乱流エネルギー散逸率の測定が有用であることが示された。また、乱流エネルギー散逸率は上げ潮時と下げ潮時に大きな値を示し、憩流時には比較的小きな値を示した。底層では一潮汐間にわたって他の層に比べ1オーダー程度大きな値を示していた。

次に、実測されたフロック径と Winterwerp のモデルによって見積もったフロック径の比較を行った。Fig.5にモデルで推定されたフロック径と実測値のフロック径の時間変化を示す。海底上1m、4m、12mのすべてにおいて、実測フロック径は10~15 μm 程度であり、一潮汐間で大きく変化することはなかった。山本ら(2008)による有明海湾奥の粒径の観測では100 μm 前後のフロック径が観測されているが、その値よりも本研究で得られた観測値は小さかった。これは、観測

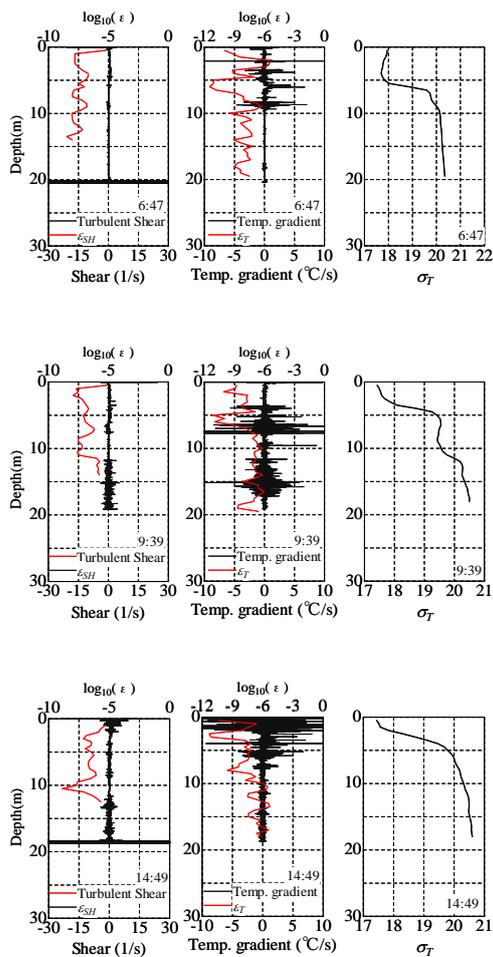


Fig.4 2007年8月24日の観測における乱流シア, 温度シア, ϵ_{SH} , ϵ_T , σ_T の分布の例

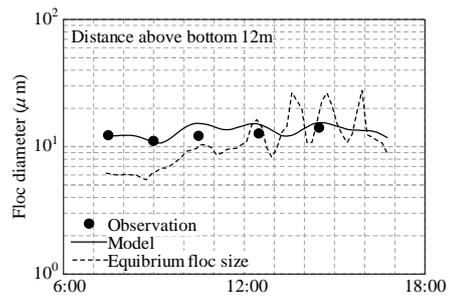
中の懸濁物質濃度が低かったためにフロック径に大きな変動は見られなかったものと考えられる. モデルから推定されたフロック径と実測値を比較すると, モデルパラメーターとして **Table 1** に示す値を用いることによって, いずれの水深においても概ね同程度のフロック径の値をとった.

Table 1 本研究で使用したモデル係数

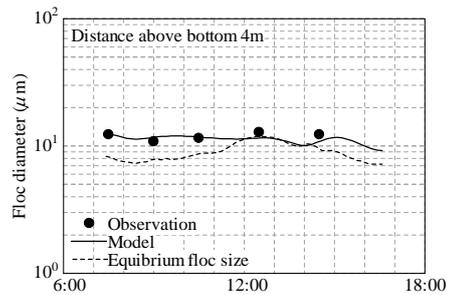
モデル係数	Present study	Winterwerp (2001)
D_p (μm)	3	4
ρ_s (kg/m^3)	2650	2600
f_s	$\pi/6$	$\pi/6$
n_f	2.1	2.0
p	0.9	1.0
q	0.5	0.5
k_A'	0.27	0.31
k_B ($\text{s}^{1/2}/\text{m}^2$)	1.8×10^4	1.4×10^4

(2) まとめ

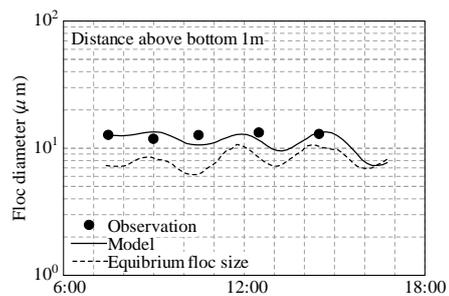
本研究により, これまで乱流シアからは



(a) 海底面上 12m



(b) 海底面上 4m



(c) 海底面上 1m

Fig.5 フロック径の時間変化

推定が困難であった境界層近傍や密度躍層付近の乱流エネルギー散逸率を温度シアデータから算出し, その有用性を確認することができた. また, その手法を利用することで, 密度躍層付近における混合の抑制を定量的に示すことができた. さらに Winterwerp のモデルを用いて, 実測された乱流エネルギー散逸率と懸濁物質濃度からフロック径を概ね表現できることが確認された.

参考文献

- 1) Winterwerp J. C., A. J. Manning, C. Martens, T. de Mulder, J. Vanlede(2006): A heuristic formula for turbulence-induced flocculation of cohesive sediment, Estuarine, Coastal and Shelf Science, Vol.68, pp.195-207.
- 2) Serra T., T. Granata, J. Colomer, A. Stips, F. Møhlenberg, X. Casamitjana(2003): The role of advection and turbulent mixing in the

vertical distribution of phytoplankton, Estuarine, Coastal and Shelf Science, Vol.56, pp.53-62.

- 3) 山西博幸, 荒木宏之, 古賀康之, 日村健一, 大石京子 (2005): 自動昇降型水質測定装置を用いた有明海湾奥部の干潟における懸濁物質輸送と水質変動に関する現地調査, 環境工学研究論文集, Vol.42, pp.297-304.
- 4) Bilgili A., M. R. Swift, D. R. Lynch, J. T. C. Ip (2003): Modeling bed-load transport of coarse sediments in the Great Bay Estuary, New Hampshire, Estuarine, Coastal and Shelf Science, Vol.58, 937-950.
- 5) Nakagawa Y. (2003): Modeling of fine sediment transport in Ariake Bay, Japan, Proceedings of 7th International Conference on Nearshore and Estuarine Cohesive Sediment Transport Process, pp.150-151.
- 6) 河西澄, 塩崎遼平 (2005): 乱流境界層における個体粒子の沈降速度, 海岸工学論文集, 第 52 巻, pp371-375.
- 7) Nielsen. P (1993): Turbulence effects on the settling of suspended particles, Journal of Sedimentary Petrology, Vol.63, No.5, pp.835-838.
- 8) Roget E., I. Lozovatsky, X. Sanchez, M. Figueroa (2006): Microstructure measurements in natural waters: Methodology and applications, Progress in oceanography, Vol.70, 126-148.
- 9) Winterwerp J. C. (2002): On the flocculation and settling velocity of estuarine mud, Continental Shelf Research, Vol.22, pp.1339-1360.

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 0 件)

[学会発表] (計 4 件)

- ① 志岐慎介, 密度成層場における乱流エネルギー散逸率の現地観測, 平成 21 年度土木学会西部支部研究発表会, 2010 年 3 月 6 日, 崇城大学池田キャンパス.
- ② 田井明, 有明海における夏季小潮期の乱流エネルギー散逸率の時空間変動, 平成 21 年度土木学会西部支部研究発表会, 2010 年 3 月 6 日, 崇城大学池田キャンパス.
- ③ 志岐慎介, 有明海における一潮汐間の乱

流エネルギー散逸率の変動, 平成 20 年度土木学会西部支部研究発表会, 2009 年 3 月 7 日, 九州大学伊都キャンパス.

- ④ 紺野晶裕, 有明海におけるフロク径と乱流エネルギー散逸率の同時観測, 平成 20 年度土木学会西部支部研究発表会, 2009 年 3 月 7 日, 九州大学伊都キャンパス.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

○取得状況 (計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年月日:
国内外の別:

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

齋田 倫範 (SAITA TOMONORI)

九州大学・大学院工学研究院・学術研究員

研究者番号: 80432863

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

()

研究者番号: