

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12日現在

機関番号：82109

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22540455

研究課題名（和文） 海水の光学的特性が太平洋の十年規模変動に及ぼす影響

研究課題名（英文） Impact of ocean optical properties on the Pacific decadal variation

研究代表者

山中 吾郎（YAMANAKA GORO）

気象庁気象研究所・海洋研究部・第1研究室長

研究者番号：60442745

研究成果の概要（和文）：

入射角の時間変化およびクロロフィル分布依存性を表現できる新しい海洋短波吸収スキームを三つのモデル（海洋大循環モデル・海洋物質循環モデル・大気海洋結合モデル）に導入し、海水の光学的特性が太平洋の十年規模変動に及ぼす影響を評価した。海水の光学的特性の変化に伴う2次的な力学応答の結果、熱帯の大気・海洋の平均的な構造や太平洋十年規模変動の強度に有意なインパクトが見られた。このことは、気候モデリングにおいて海水の光学的特性の注意深い取り扱いが重要であることを示している。

研究成果の概要（英文）：

We implemented a new ocean radiant heating scheme that enables us to take into account the effect of the varying solar angle and the local heating by chlorophyll-a concentration into three models; an ocean general circulation model, an ocean biogeochemical model, and a coupled atmosphere-ocean model, to examine the impact of the ocean optical properties on the Pacific decadal variation. The secondary dynamical response to a change in water optical properties induced a significant impact on the amplitude of the Pacific decadal variation, as well as the mean structure of the tropical atmosphere-ocean. These results indicate that care about the treatment of water optical properties in ocean models is indispensable for climate modeling.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,700,000	0	1,700,000
2011年度	800,000	0	800,000
2012年度	800,000	0	800,000
総計	3,300,000	0	3,300,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・気象・海洋物理・陸水学

キーワード：海洋物理、大気海洋相互作用、物質循環

1. 研究開始当初の背景

(1) 太平洋には十年規模変動と呼ばれる十数年スケールの気候変動が存在し、気温・降水量や水産資源の長期変動と関連していることが知られている。十年規模変動のメカニズムとして最も有力なものの一つは、熱帯と中

緯度の大気海洋相互作用である。このメカニズムでは、海洋表層の子午面循環（亜熱帯セル）が中緯度域と熱帯域とを結びつける重要な役割を担っている。しかしながら、従来の気候モデリングでは中緯度域で沈み込んだシグナルが熱帯域まで到達することが明瞭

に表現されていない。

(2) 従来の海洋モデリングでは、海洋内部の短波吸収は深さとともに指数関数的に減衰する定式化 (Paulson and Simpson, 1977) が用いられてきた。実際には太陽高度は日変化・季節変化するが、この定式化では海洋への入射角を考慮していない。また、海水の光学的特性の扱いについては、海洋の生物生産 (クロロフィル濃度) に起因したパラメータ化が行われてきた。だが、これまでに得られた研究は互いに相反する結果を示している。例えば、Nakamoto et al. (2001) ではクロロフィル濃度をパラメータ化することにより東部太平洋赤道域で低温化する影響を示したのに対し、Murtugudde et al. (2002) では逆に高温化を支持する結果が得られている。熱帯太平洋域の水温変化は亜熱帯セルの強弱に関連していることから、海水の光学的特性が亜熱帯セルに及ぼす影響については確定的な結論が得られていない。

2. 研究の目的

(1) 入射角の時間変化 (Ishizaki and Yamanaka, 2010) とクロロフィル分布依存性を表現できる新しい海洋短波吸収スキーム (新 IY10 スキーム) を海洋大循環モデルに導入し、物理過程を単純化した従来のモデルでは明確な結論が得られなかった、海水の光学的特性が亜熱帯セルに及ぼす影響を高精度で評価する。

(2) 新 IY10 スキームを海洋物質循環モデルに導入することにより、海洋循環の変化が栄養塩等の分布に影響を与え、それが植物プランクトン生産量を介して海水の光学的特性を変えることで循環場にフィードバックを及ぼすという、物理 - 生物間の相互作用をより適切に表現することができる。これによりクロロフィルが熱帯の海面水温に与える影響を明らかにする。

(3) 新 IY10 スキームを大気海洋結合モデルに導入することにより、亜熱帯セルの変化に伴った大気循環場へのフィードバックの影響を評価する。その解析を通じて、十年規模変動のメカニズム解明につながる重要な基礎情報を提供する。

3. 研究の方法

(1) 海水の光学的特性に対する十年規模変動への影響解明を①海洋大循環モデル②海洋物質循環モデル③大気海洋結合モデル、という三つのモデリング手法に分けて進める。新 IY10 スキームの影響を評価するためには、従来のスキームを用いたモデルと結果を比較する必要がある。そこでまずは各モデルを長

期積分することによりモデル内での平衡状態を実現し、コントロールランを作成する。

(2) 気象研海洋大循環モデルおよび気象研海洋物質循環モデルに、①気候値のクロロフィル分布と②海洋物質循環モデルで計算したクロロフィル分布を与え、両者の比較を通じて新 IY10 スキームが亜熱帯セルや物理 - 生物相互作用が熱帯太平洋の海面水温に及ぼす影響を評価する。

(3) 気象研大気海洋結合モデルに新 IY10 スキームを導入し、亜熱帯セルが結合系でどのように変調され、その結果、大気の循環場 (降水量・風系) にどのような変化を生じさせるかを評価する。

4. 研究成果

(1) 気象研海洋大循環モデルをCOREデータ (Large and Yeager, 2009) を外力として約1500年間積分し、準平衡状態を得た。解析の結果、モデルの熱塩循環の挙動や両半球の海水分布の再現性は概ね良好であることを確認した (Tsujino et al., 2011, Hirabara et al., 2012)。従来の大気再解析データを外力とした場合には再現が難しかった、熱帯インド洋の海面水温の長期変動についても再現されていた。さらに、観測で見られる太平洋亜熱帯セル (STC) の数十年規模の変動の特徴である、1960年代から1990年代前半にかけての弱化 (P1)、および1990年半ば以降の強化 (P2) が再現されていた (図1)。また、日本近海をダウンスケーリングしたモデルにおいても、特徴的な海洋構造の長期変動の再現性は良好であった (Tsujino et al., 2013)。

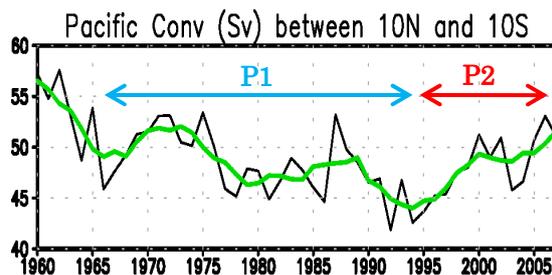


図1：太平洋亜熱帯セル強度 (Sv) の時系列

海洋物質循環モデルについては、海洋大循環モデルの流速・水温・塩分場を用いてオフライン計算により300年程度積分した。長期平均した大気海洋間の二酸化炭素フラックスの分布は、観測で見られる特徴を概ね示していた (Nakano et al., 2011)。

大気海洋結合モデルを、現実的な大気中二酸化炭素濃度を与えて、1851年から2005年まで積分した。熱帯域のENSOの再現性を検討した結果、ENSOの振幅は観測よりやや小さいものの、周期は観測と同程度であった。またモデルのSTCの長期変動は変動の振幅は小さいものの、観測で見られる長期的な弱化傾向や数十年規模の変動などの特徴を再現していることがわかった。

以上のことから、得られたモデル結果は、新 IY10 スキームの影響を評価するためのコントロールランになり得ると結論した。

(2) 観測気候値のクロロフィル分布を与えた新IY10スキームを用いて、気象研海洋大循環モデルを300年程度積分し、STCの強度がどのように変化するかを調べた。その結果、STCの強度は20%以上強化されることがわかった(図2)。新IY10スキームを導入すると、表層で加熱、亜表層で冷却を受け、混合層深度が減少する。これは、エクマン境界層深度が減少したことに相当する。エクマン輸送量そのものの大きさは変わらないため、混合層内を赤道方向に向かう地衡流量が相対的に減少し、エクマン流と地衡流との残差として得られる表層の極向きの流れが強化されるためである。したがって、クロロフィル分布は東部熱帯太平洋域を低温化する影響を与えることが明らかになり、長年の論争に一石を投じることができた。変動場においても、混合層深度の減少に伴い、STCの変動の振幅は強化された(Yamanaka et al., 2012)。

(3) 気象研海洋物質循環モデルで計算された経年変動するクロロフィル分布を用いて、新IY10スキームの影響を評価した。その結果、クロロフィル濃度が高くなるラニーニャ時に海面付近で局所的な短波吸収による加熱を受け、ラニーニャの振幅を弱める結果、エルニーニョ・ラニーニャの振幅に非対称性を生じさせるという効果が認められた(図3)。定量的にはその振幅は小さく、定性的に気候値のクロロフィル分布を与えた場合と同様の振る舞いが見られた。

したがって、熱帯太平洋の短波吸収におけるクロロフィル分布の影響については、平均場、変動場のいずれにおいてもクロロフィル分布域で短波吸収が卓越することによる局所的な加熱(直接効果)よりも二次的な力学的応答による冷却(間接効果)が卓越していることがわかった。

(4) 新IY10スキームを実装した気象研大気海

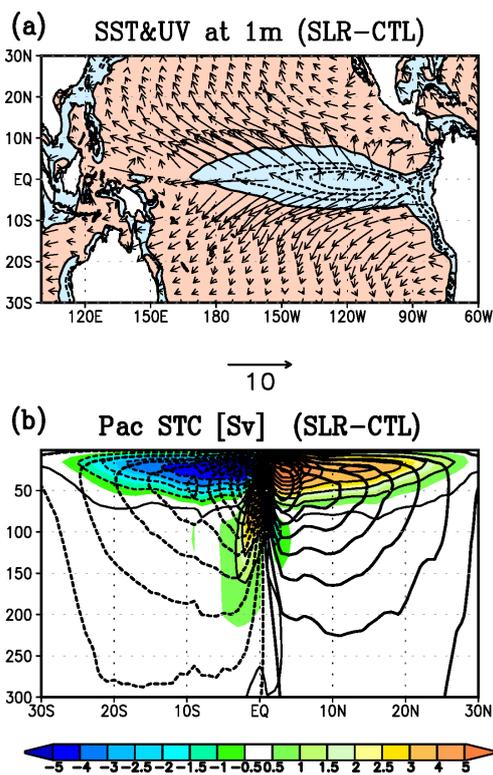


図2：海洋大循環モデルにおける海面水温場(左)と太平洋亜熱帯セル(右)へのインパクト(新IY10スキーム on - off)

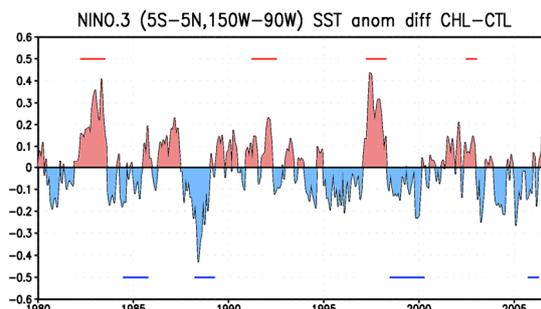


図3：エルニーニョ・ラニーニャの振幅へのインパクト(物理-生物相互作用 on - off)。赤と青の線はそれぞれエルニーニョ、ラニーニャの発生期間。

洋結合モデル(ESM1)を20年程度積分し、通常のスキームと比較して熱帯太平洋の平均場がどのように変化するかを調べた。その結果、STCの強度は10%程度強化されるとともに、太平洋赤道域で海面水温が低下し、中部から東部の混合層深度が減少するという、海洋単体モデルと共通した応答が見られた。

一方、①STCの強化は赤道付近(南北5度)に限定、②海面水温分布に南北非対称性が出現、③西部太平洋赤道域では混合層深度が増大、という海洋単体モデルとは異なる特徴が見られた(図4)。これは、熱帯太平洋の海面水温低下に伴う結合プロセスにより、南太平洋収束帯(SPCZ)が強化され、それに伴って赤道付近で貿易風が強化するとともに、南

緯10度付近で貿易風が弱化したためである。この大気場の南北非対称性に伴う海面熱フラックスの変化が、海面水温分布に南北非対称性を生じさせ、南緯10度付近の貿易風の弱化に関連して海洋表層の極向きエクマン輸送が弱まった結果、エクマン境界層深度の減少に伴う極向き輸送の強化を相殺したと考えられる。

次に、時間変動場への影響を評価したところ、混合層深度の減少に伴って広い海域で海面水温変動の振幅の増大が見られるとともに、STC強度の十年規模変動が変調されることがわかった(図5)。

以上より、熱帯太平洋の短波吸収における

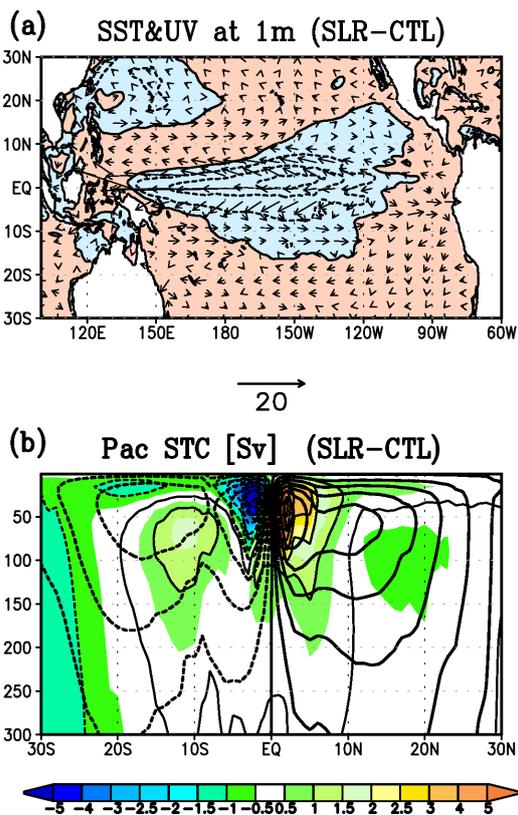


図4：大気海洋結合モデルにおける海面水温場(左)と太平洋亜熱帯セル(右)へのインパクト(新IY10スキーム on-off)

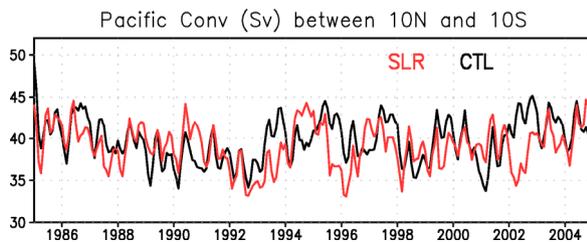


図5：太平洋亜熱帯セルの十年変動へのインパクト(黒：新IY10スキーム off、赤：on)

クロロフィル分布の大気海洋結合系への影響については、平均場、変動場のいずれにおいても有意なインパクトがあることが認められた。このことは、結合モデルを用いた熱帯の長期変動のモデリングにおいて、海水の光学的特性の取り扱いが重要であることを示唆している。

(5)モデルで再現された亜熱帯セルの長期変動を解析し、太平洋の十年規模変動のメカニズムに対する考察を行った。上部密度躍層内の流量変動を調べたところ、内部流と西岸境界流は逆位相で変動しているものの、総流量の変動は内部流の変動で支配されていた。また、STCの総流量の長期変動は概ねエクマン輸送量の変動と対応していることがわかった。これらの結果は、STCの経年変動で支配的なメカニズム(赤道付近の風の変化に伴って生じる水平循環の変化、Lee and Fukumori, 2003)が十年規模の時間スケールにおいても成り立っていることを示唆していた。

次に、1990年代半ば以降に亜熱帯セルが再び強化した原因を考察した。熱帯太平洋と熱帯インド洋の結びつきが強化されると、インド洋ダイポールモード現象の発達やその後の熱帯域インド洋全域の昇温を通じて、エルニーニョ現象の発達には負のフィードバックとしてはたらくことが指摘されている(例えばKug and Kang, 2006; Yamanaka et al., 2009)。それに加えて、最近のインド洋の昇温傾向は、エルニーニョ現象を減衰させる方向にはたらく。実際1990年代半ば以降には、持続期間が1年を超えるエルニーニョ現象は発生していない。このような熱帯太平洋と熱帯インド洋との1990年代半ば以降の結びつきの強化が、エルニーニョ現象の経年的な変動を通じて、STCの長期変動を生じさせている可能性がある。

1990年代半ば以降、熱帯太平洋と熱帯インド洋の結びつきが変化した理由は、必ずしも明らかではないが、一つの可能性としてインドネシア通過流を通じた太平洋とインド洋の結びつきの変化が挙げられる。太平洋のSTCの弱化トレンドに対応して、西部太平洋の海面水位にも減少トレンドが見られる。インドネシア通過流の大きさは、西部太平洋熱帯域と東部インド洋熱帯域との水位差に比例するので、インドネシア通過流にも減少トレンドが認められ、1990年代初めに最小となる。インドネシア通過流が減少すると太平洋からの暖水の流入が減少するので、東部インド洋熱帯域の混合層深度は減少し、1990年代半ば付近で最小となる。東部インド洋熱帯域は、インド洋における大気海洋相互作用にとって重要な海域であり、この海域の混合層深度の低下は大気海洋相互作用が活発になることを意味する(Annamalai et al., 2005)。

一度大気海洋相互作用のスイッチが入ると、正のフィードバックによってその機構が維持されやすくなると考えられる。この太平洋十年規模変動の位相反転に対するインドネシア通過流の定量的な役割については、今後の研究で明らかにする必要がある。

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 7 件)

- ① Ishizaki, H. and G. Yamanaka, Impact of explicit sun altitude in solar radiation on an ocean model simulation, *Ocean Modeling*, 査読有, Vol. 33, 2010, 52-69
doi:10.1016/j.ocemod.2009.12.002
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1463500309002236>
- ② 山中吾郎, 石崎廣, 辻野博之, 平原幹俊, 中野英之, 海洋モデルの太平洋亜熱帯セルの再現性に対する海水の有効光学的特性の影響および太平洋亜熱帯セルの数十年規模変動, 平成 22 年度全国季節予報技術検討会資料 (気象研究所), 査読無
- ③ Tsujino, H., M. Hirabara, H. Nakano, T. Yasuda, T. Motoi, and G. Yamanaka, Simulating present climate of the global ocean-ice system using the Meteorological Research Institute Community Ocean Model (MRI.COM): simulation characteristics and variability in the Pacific sector, *Journal of Oceanography*, 査読有, Vol. 67, 2011, 449-479
doi: 10.1007/s10872-011-0050-3
<http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10872-011-0050-3>
- ④ Nakano, H., H. Tsujino, M. Hirabara, T. Yasuda, T. Motoi and G. Yamanaka, Uptake mechanism of anthropogenic CO₂ in the Kuroshio Extension region in an ocean general circulation model, *Journal of Oceanography*, 査読有, Vol. 67, 2011, 765-783
doi: 10.1007/s10872-011-0075-7
<http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10872-011-0075-7>
- ⑤ Yamanaka, G., H. Ishizaki, H. Tsujino, M. Hirabara and H. Nakano, Impact of solar radiation data and its absorption schemes on ocean model simulations, *Solar Radiation*, 査読有, 2012, 77-98
doi: 10.5772/35639

<http://www.intechopen.com/books/solar-radiation/impact-of-solar-radiation-data-and-its-absorption-schemes-on-ocean-model-simulations>

- ⑥ Hirabara, M., H. Tsujino, H. Nakano, and G. Yamanaka, Formation mechanism of the Weddell Sea Polynya and the impact on the global abyssal ocean, *Journal of Oceanography*, 査読有, Vol. 68, 2012, 771-796
doi: 10.1007/s10872-012-0139-3
<http://link.springer.com/article/10.1007/s10872-012-0139-3>
- ⑦ Tsujino, H., S. Nishikawa, K. Sakamoto, N. Usui, H. Nakano, and G. Yamanaka, Effects of large-scale wind on the Kuroshio path south of Japan in a 60-year historical OGCM simulation, *Climate Dynamics*, 査読有, in press
doi: 10.1007/s10872-011-0075-7
<http://link.springer.com/article/10.1007/s00382-012-1641-4#>

[学会発表] (計 13 件)

- ① 辻野博之, 平原幹俊, 中野英之, 安田珠幾, 本井達夫, 山中吾郎, MRI-ESM 用海洋単体モデルによる現在気候再現実験(1): 実験の概要とパフォーマンス, 2010 年度日本海洋学会秋季大会, 平成 22 年 9 月 8 日, 北海道網走市
- ② 安田珠幾, 末吉雅和, 辻野博之, 平原幹俊, 中野英之, 山中吾郎, MRI-ESM 用海洋単体モデルによる現在気候再現実験(2): 日本沿岸水位の数十年規模変動, 2010 年度日本海洋学会秋季大会, 平成 22 年 9 月 8 日, 北海道網走市
- ③ 中野英之, 辻野博之, 平原幹俊, 安田珠幾, 石井雅男, 緑川貴, 本井達夫, 山中吾郎, MRI-ESM 用海洋単体モデルによる現在気候再現実験(3): 炭素循環モデルにおける黒潮続流域の人為起源 CO₂ 吸収, 2010 年度日本海洋学会秋季大会, 平成 22 年 9 月 8 日, 北海道網走市
- ④ 山中吾郎, 辻野博之, 平原幹俊, 中野英之, 安田珠幾, MRI-ESM 用海洋単体モデルによる現在気候再現実験(4): 太平洋亜熱帯セル (STC) の長期変動, 2010 年度日本海洋学会秋季大会, 平成 22 年 9 月 8 日, 北海道網走市
- ⑤ 平原幹俊, 辻野博之, 中野英之, 山中吾郎, 安田珠幾, MRI-ESM 用海洋単体モデルによる現在気候再現実験(5): 南大洋深層循環の変動, 2010 年度日本海洋学会秋季大会, 平成 22 年 9 月 8 日, 北海道網走市
- ⑥ Tsujino, H., S. Nishikawa, K. Sakamoto, and G. Yamanaka, A long-term hindcast

of the Kuroshio using a high resolution GCM, AGU Fall Meeting 2010, 平成 22 年 12 月 15 日, San Francisco, USA

- ⑦ Yamanaka, G., H. Ishizaki, H. Tsujino, M. Hirabara, and H. Nakano, Impact of effective ocean optical properties on Pacific subtropical cell and its mechanism for interdecadal variability, AGU Fall Meeting 2010, 平成 22 年 12 月 16 日, San Francisco, USA
- ⑧ Yamanaka, G., H. Ishizaki, H. Tsujino, M. Hirabara, and H. Nakano, Interdecadal variability of the Pacific subtropical cell: sensitivities to effective ocean optical properties, 2011 IUGG General Assembly, 平成 23 年 6 月 28 日, Melbourne, Australia
- ⑨ 山中吾郎, 石崎廣, 中野英之, 辻野博之, 平原幹俊, 熱帯太平洋の短波吸収におけるクロロフィル分布の影響, 2011 年度日本海洋学会秋季大会, 平成 23 年 9 月 28 日, 福岡県春日市
- ⑩ Yamanaka, G., H. Ishizaki, H. Nakano, H. Tsujino, and M. Hirabara, Pacific subtropical cell response to effective ocean optical properties, Ocean Sciences Meeting 2012, 平成 24 年 2 月 23 日, Salt Lake City, USA
- ⑪ 山中吾郎, 辻野博之, 石崎廣, 中野英之, 平原幹俊, 大気海洋結合モデルにおける海水の光学的特性の影響 2012 年度日本海洋学会秋季大会, 平成 24 年 9 月 15 日, 静岡県静岡市
- ⑫ Yamanaka, G., H. Tsujino, H. Ishizaki, H. Nakano, and M. Hirabara, Interdecadal variability of the Pacific subtropical cell: an OGCM study, Open Science Symposium on Western Pacific Ocean Circulation and Climate, 平成 24 年 10 月 15 日, 中国, 青島市
- ⑬ Yamanaka, G., H. Ishizaki, H. Nakano, H. Tsujino, and M. Hirabara, Impact of effective ocean optical properties on the Pacific subtropical cell: a CGCM study, AGU Fall Meeting 2012, 平成 24 年 12 月 3 日, San Francisco, USA

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山中 吾郎 (YAMANAKA GORO)
気象研究所・海洋研究部・第 1 研究室長
研究者番号 : 60442745

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

平原 幹俊 (HIRABARA MIKITOSHI)
気象研究所・海洋研究部・主任研究官
研究者番号 : 70354545
辻野 博之 (TSUJINO HIROYUKI)
気象研究所・海洋研究部・主任研究官
研究者番号 : 50343893
中野 英之 (NAKANO HIDEYUKI)
気象研究所・海洋研究部・主任研究官
研究者番号 : 60370334