

令和元年6月13日現在

機関番号：82708

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H02949

研究課題名(和文) 海洋中層における海洋酸性化の生態系影響評価

研究課題名(英文) Evaluation of ocean acidification and its biological affection in North Pacific subsurface waters

研究代表者

小埜 恒夫 (ONO, TSUNEO)

国立研究開発法人水産研究・教育機構・国際水産資源研究所・グループ長

研究者番号：40371786

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,200,000円

研究成果の概要(和文)：1997年に実施された、親潮・黒潮混合水域中層における炭酸系と浮遊性有孔虫 *Globorotalia scitula* の分布調査の再観測を行った。20年スケールの自然変動の影響により、カルサイト飽和深度は1997年の $\sigma_t=27.15$ 等密度面から2016/17年の $\sigma_t=27.3$ 等密度面に深化していたこと、また *G. scitula* の個体数密度極大深度も、カルサイト飽和深度の深化に同期して $\sigma_t=27.1-27.2$ の密度帯から $\sigma_t=27.2-27.3$ の密度帯に変化していたことが判った。またカルサイト飽和深度以深に生息する *G. scitula* の炭酸殻密度は、飽和深度以浅に生息する個体に比べて有意に増加していた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

海洋酸性化の問題は従来、外洋域表層や沿岸部での進行が懸念されていたが、より人目に触れ難い海洋中層でも同様に酸性化は進行していること、またそこに生息する海洋生物も生息域の酸性化環境の変化に敏感に反応していることが明らかとなった。これは海洋表層のみならず、海洋中層の生態系についても酸性化監視が必要なことを端的に示した成果であり、水産学的に重要な底魚類を含めた中層生態系の保全のうえで重要な意義を持つ。

研究成果の概要(英文)：We carried out re-observation of vertical distribution of carbonate species and deep-dwelling foraminifer *Globorotalia scitula* in Oyashio-Kuroshio mixed water region, which had once observed in 1997. 20-year repeat observation revealed that saturation depth of calcite had been shoaled from isopycnals of $\sigma_t=27.15$ in 1997 to that of $\sigma_t=27.3$ in 2016/17. Peak depth of population density of *G. scitula* also had shoaled from density range of $\sigma_t=27.1-27.2$ in 1997 to that of $\sigma_t=27.1-27.2$ in 2016/17. It was also found that density of calcite shell of *G. scitula* individuals that lives in the water below the calcite saturation depth are larger than those of individuals that lives in the water above the calcite saturation depth. These are the world's first information that indicate active adaptation of deep-dwelling organisms to acidification state of surrounding seawater.

研究分野：化学海洋学

キーワード：海洋酸性化 中層生態系 炭酸系 有孔虫

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

海洋中における酸性化の進行状況のモニタリングや、その生物への影響に関する調査研究はこれまでも数多く行われてきているが、これらの研究の殆どは沿岸および外洋域表層とその生態系に関するものであり、海洋中深層に関する調査は殆ど行われてきていない。これは、海洋が大気 CO₂ を吸収するのは海洋表面であるため、水の鉛直循環や混合を通じてしか吸収した CO₂ が輸送されてこない海洋中層では、酸性化の進行はごく遅いと一般的に考えられて来たためである。しかし近年の研究によって、大西洋の中層域でここ 20 年の間に 0.04 もの pH の低下が引き起こされている事が判明した (Rios et al., 2015)。この pH 低下速度は北太平洋の表層海水で観測されている値と全く同じであり、海洋中層では酸性化の進行が遅いという従来の考え方を大きく変える観測結果である。北太平洋においても、定量的ではないが、 $\sigma_{\theta}=27.0$ 以浅の等密度面上で酸性化の兆候が認められる事が過去の解析により明らかになっている (鈴木, 2010)。もともと中層域は無機溶存炭素 (DIC) 濃度が高く、アラゴナイト飽和度 (Ω_{ara}) だけでなくカルサイト飽和度 (Ω_{cal}) も非常に低い状態にあるため、ここで酸性化が進行する場合、 Ω_{cal} が 1 近くまで低下することにより、カルサイト殻を持つ広範な種類の生物にも影響が現れるおそれがある。このため、海洋中層域における酸性化の進行状況について観測を行い、中層生物への海洋酸性化の影響評価を行うことが申請時点における喫緊の課題であった。

2. 研究の目的

(1) カルサイト飽和深度が太平洋でも顕著に浅い海域である事が過去の研究で判明している親潮域において、炭酸系の時系列観測により中層域における酸性化の進行状況を把握する。

(2) カルサイト飽和深度付近に生息している浮遊性有孔虫 *Globorotalia scitula* を対象生物として、中層域における酸性化の進行に応じた分布深度の経年的変化の有無、カルサイト飽和深度の前後における殻厚等の形態学的な変化の有無等から、酸性化がこの生物に与える影響の評価を行う。合わせて、中層性カイアシ類等の各種生物についても鉛直分布やカルサイト飽和深度前後の殻厚の変化等を用いた酸性化の影響評価を実施する。

3. 研究の方法

(1) 研究代表者の小笠は 1997 年に、混合水域中層の炭酸環境調査と、そこに生息している浮遊性有孔虫 *G. scitula* の層別調査を実施し、同種の鉛直分布および深度毎の殻密度、多孔度等の形態学的な計測データを取得している (Itou et al., 2001. 以下 IT01)。この調査の再観測を実施し、20 年間の間に起こった炭酸系物質の鉛直分布の変化と、そこから算出されるアラゴナイト飽和深度およびカルサイト飽和深度の変化を見積もる。また、*G. scitula* の鉛直分布にこれらの飽和深度の変化に対応した経年変化が生じているか否かを調べる。

(2) マイクロ X 線トモグラフィーを用いて *G. scitula* の個体別の殻計測を実施し、カルサイト飽和深度以深と以浅における *G. scitula* 殻の形態学的な差異の有無について調査を行う。合わせて、IT01 と現在との間で、同深度における *G. scitula* 殻の形態学的な特徴に経年的な差が生じているかを調べる。

(3) 海洋中層に生息するカイアシ類の層別採取を行い、カルサイト飽和深度もしくはアラゴナイト飽和深度が分布下限になっている種の有無を調査する。また飽和深度の前後における殻の厚み等の形態学的な変化の有無を調べ、中層性カイアシ類に対する酸性化の影響評価を実施する。

4. 研究成果

(1) 2016 年 7 月と 2017 年 5 月・7 月の計 3 回、混合水域における調査を実施した。水深 100 m から 600 m まで 100m おき、それ以深は 200m おきに層別採水を行い、DIC と全アルカリ度を分析した。また 1/4 m² モックネスネット (目合 64 μ m) を用いて、密度 27.4 σ_{θ} に相当する深度からの傾斜曳きを行いながら、CTD データから算出した 0.1 σ_{θ} ごとの等密度面深度で網を切り換えることにより、7 つの密度層で *G. scitula* の試料採取を行い、各層内の個体数の計測と、殻厚・殻密度等の殻状態の個体別分析を実施した。また同じネット試料から、中層性カイアシ類の検鏡分析を実施し、生息密度分布を種別に求めた。

(2) 3 航海で得られた計 7 点の鉛直採水データから、1997 年の観測点と同じ塩分の鉛直プロファイルをもつ測点を 2 点抽出し、この 2 点と 1997 年の観測点 2 点との間で、DIC、アルカリ度、およびそこから算出される pH、 Ω_{ara} および Ω_{cal} の鉛直プロファイルの比較を行った。アルカリ度には両年代間で鉛直プロファイルの変化は認められなかったが、DIC は $\sigma_{\theta}=27.1$ の等密度面 (水深 600m 付近) より浅い領域で、最大 50 μ mol/kg に達する濃度の上昇が見られた (図 1a,b)。これは海洋表層からの人為起源炭素の流入と、温暖化に伴う鉛直混合の鈍化によって引き起こされた海水年齢の増加の双方が寄与していた。一方、 $\sigma_{\theta}=27.1$ から 27.5 までの密度帯では、DIC 濃度は殆ど変化していないか、あるいはやや減少していた。この密度帯では人為起源炭素の影響よりも天然に存在する 20 年スケールの溶存酸素濃度や DIC 濃度の周期変動の影響の方が未だ強いため、この 20 年スケール変動によって 1990 年代後半の親潮域および混合水域に形成されていた低溶存酸素・高 DIC 水塊のシグナル (Sasano et al., 2018) を 1997 年のデ

一タが拾っていたことが、この密度帯における DIC 減少の原因と考えられる。これらの DIC 変動を受けて、1997 年当時に $\sigma_\theta=26.9$ 等密度面（水深 400m 付近）上にあったアラゴナイトの飽和深度は、2016/17 年には $\sigma_\theta=26.75$ 等密度面（水深 350m 付近）上に浅化していた。一方、1997 年当時に $\sigma_\theta=27.15$ 等密度面（650m 付近）上にあったカルサイトの飽和深度は、2016/17 年には $\sigma_\theta=27.3$ 等密度面（水深 800m 付近）上に深化した（図 1c,d）。

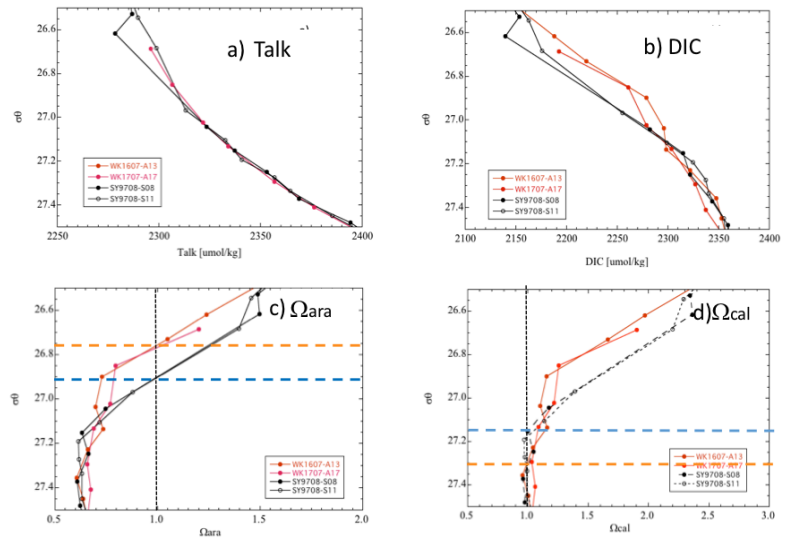


図1 1997年（黒実線）と2016/2017年（赤実線）における、混合水域中の a)アルカリ度、b)DIC、c) Ω_{ara} 、d) Ω_{cal} の鉛直分布の経年変化。縦軸は水深でなく、ポテンシャル密度であることに注意。青点線はアラゴナイト・カルサイトそれぞれの1997年時点における飽和深度、黄点線はそれぞれの2016/17年における飽和深度を示す。

(3) *G. scitula* の鉛直分布は、1997年当時には $\sigma_\theta=27.0-27.1$ の密度帯で個体数密度のピークを示していたが、2016/2017年の観測では $\sigma_\theta=27.2-27.3$ の密度帯に個体数密度ピーク的位置が変化していた（図2）。1997年と2016/2017年では採取された *G. scitula* の平均殻長やそこから推定される平均年齢に違いがあり、また2016/2017年の観測結果からは、*G. scitula* が年齢が進むに従って生息深度を浅くしている様子が捉えられている。このため今回の観測結果には様々な要因が寄与している可能性があるが、観測されたカルサイト飽和深度の経年変化と *G. scitula* の個体数密度ピーク位置の変化が同期していることは、本種がカルサイト飽和深度の経年的な変動に対応して、群集全体としての鉛直分布を変化させている事を示唆する。これは海洋中層の生物が海水の酸性化環境に能動的に適応している事を示唆する、世界初の研究成果である。

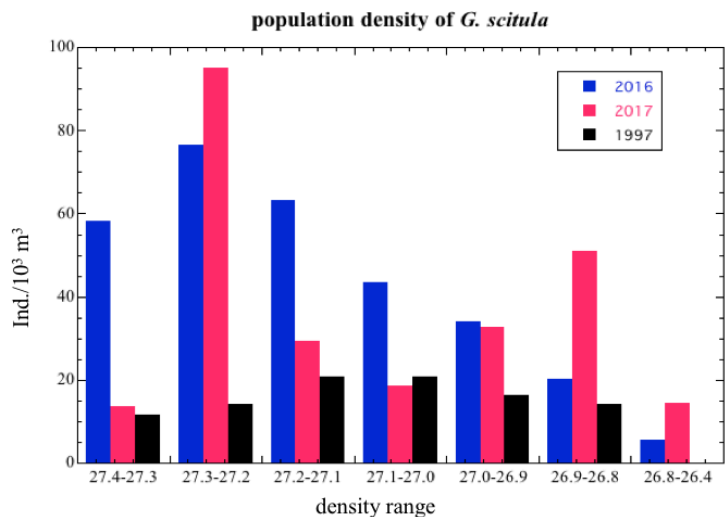


図2 1997年（黒）と2016年（青）、2017年（赤）における、中層浮遊性有孔虫 *G. scitula* の個体数密度の鉛直分布

(4) マイクロ X 線マイクロトモグラフィを用いて、2016/17年の観測で取得した *G. scitula* の全個体の殻形状、殻厚および殻密度の個体別計測を行った。その結果、カルサイト飽和深度以深に生息している *G. scitula* の平均殻密度が、飽和深度以浅の個体に比べて有意に増加している事を発見した（図3）。カルサイト飽和深度以深では、有孔虫の殻は化学的に不安定な状態におかれるため、*G. scitula* は飽和深度以深で能動的に殻密度を増加させることによって、殻の強度ないし機能を保っていると考えられる事ができる。これは本種が分布だけでなく、形態学的な形質を変化させる事でも酸性化環境に能動的に適応していることを示唆する、これも世界初の結果である。

マイクロ X 線マイクロトモグラフィではこの他に、*G. scitula* 殻の平均孔径の計測も行った。この結果、孔径と殻長の間に関連がある事が判った。IT01では *G. scitula* 殻の平均孔径とカルサイト飽和度の間に関連がある事を発見しており、これはカルサイト飽和度が低下するにつれて孔周辺の殻が溶けやすくなるためと解釈されていたが、今回の観測で *G. scitula* が

成長と共に生息水深を浅化させている事が判明しているため、観測された平均孔径とカルサイト飽和度の負相関は、本種の成長に応じた殻長の増加と生息水深の変化を反映した、疑似相関である可能性が高くなった。*G. scitula* の殻長は殻密度とも正の相関を示すため、成長に伴う生息水深の浅化は、深い水深の殻密度を低下させる方向に働く筈であるが、カルサイト飽和深度以深における殻密度の増加傾向はこの過程と逆行しているため、真に本種の酸性化環境に対する能動的な対応と見なすことができる。

このため、*G. scitula* の酸性化環境評価に用いる形態学的な形質としては、IT01 で発見された平均孔径よりも、殻密度の方がより適切であると考えられる。

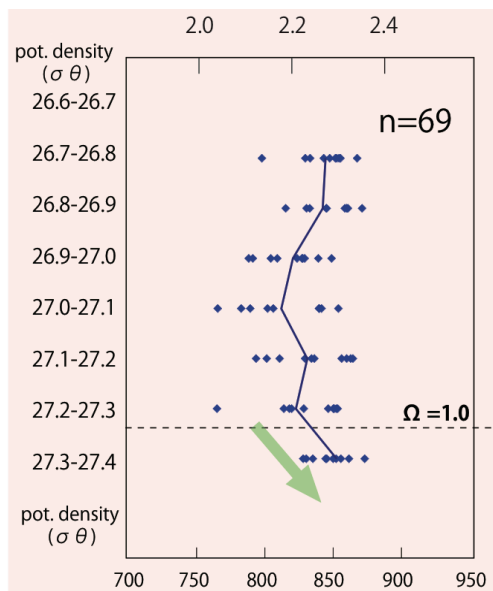


図3 2016/17年に採取された*G. scitula*の殻密度の個体別計測結果。縦軸は採取された密度帯、下横軸がマイクロX線トモグラフィの計測値（CT number）、上横軸がそこから算出された殻密度（ $\mu\text{g}/\mu\text{m}^3$ ）を示す。黒点線はカルサイト飽和深度の存在する密度を示す。

(5) 中層性カイアシ類については、層別の検鏡分析の結果、カルサイト飽和深度の存在する密度帯（ $\sigma_{\theta}=27.2-27.3$ ）およびその直上（ $\sigma_{\theta}=27.1-27.2$ ）に、それぞれ集中して分布しているカイアシ類群集が存在している事が判明した。 $\sigma_{\theta}=27.1-27.2$ に生息する群集は *Scaphocalanus affinis*, *Pleuromamma xiphias*, *Cornucalanus chelifera*, *Gaetanus minutus*, *Neomormonilla minor*, *Atrophia minuta* 等から校正されており、一方 $\sigma_{\theta}=27.2-27.3$ に生息する群集は *Mormonilla phasma*, *Atrophia glacialis*, *Paraeuchaeta* spp., *Discoidae*, *Gaetanus simplex*, 等から構成されていた。現在これらの種について、マイクロX線マイクロトモグラフィを用いたキチン殻密度の測定を試みるとともに、生物学的情報から生息水深を決定している環境要因を考察しているところである。

<引用文献>

- Itou, M., Ono, T., Oba, T., and Noriki, S., 2001. Isotopic composition and morphology of living *Globorotalia scitula*: a new proxy of sub-intermediate ocean carbonate chemistry? *Mar. Micropaleont.* 42, 189-210.
- Rios, A. F., Resplandy, L., Garcia-Ibanez, M. I., et al., 2015. Decadal Acidification in the water masses of the Atlantic Ocean. *PNAS*, 112, 9950-9955.
- Sasano, D., Takatani, Y., Kosugi, N., Nakano, T., Midorikawa, T., and Ishii, M., 2018. Decline and bidecadal oscillations of dissolved oxygen in the Oyashio region and their propagation to the western North Pacific. *Global Biogeochem. Cycles*, 32, 909-931. Doi: 10.1029/2017GB005876
- 鈴木亨, 2010. 海洋炭酸系データの統合に基づく海洋酸性化の実態評価. 環境省環境研究総合推進費 H22 年度終了研究報告書 D-0803-2. 13pp.
http://www.env.go.jp/policy/kenkyu/suishin/kadai/syuryo_report/pdf/D0803-2.pdf

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

木元克典「海洋酸性化と生物影響」 *日本機械学会誌* 121, 1199, 18-21. 2018/10

〔学会発表〕(計 22 件)

- Harada, N., Kimoto, K., Onodera, J., Watanabe, E., Sugie, K., Wakita, M., Fujiki, T., 2016. Potential environmental changes in the western Arctic and the western North Pacific: their impacts on lower trophic level organisms. *PICES Annual Meeting*
- Harada, N., Kimoto, K., Kita, J., Onodera, J., Fujii, M., Wakita, M., Fujiki, T., Takao, S., Ono, T., 2018. Sentinel studies of ocean acidification in pelagic (the western North Pacific and Arctic Ocean) and Japanese coasts. *PICES/ICES 4th International Symposium on the Effects of Climate Change on the World Oceans*. PICES Washington DC, p. 35.
- Ishizu, M., Miyazawa, Y., Tsunoda, T., Ono, T., 2017. Ocean acidification trends in coastal waters in Japan. *PICES 2017, Vladivostok*, p. 30.
- Kimoto, K., 2016. Marine calcareous plankton as the recorder of past and present ocean acidification: How do they respond? *3rd JAMBIO International Symposium*

- Kimoto, K., Kubota, Y., Sasaki, O., Iwashita, T., Nakamura, Y., 2017. High precision X-ray CT morphometry of microfossils for scientific validations. JpGU2017
- Kimoto, K., Ono, T., Okazaki, Y., 2018. Morphology and habitat depth of planktic foraminifer in intermediate waters of western North Pacific: Implications of relationship to carbonate saturation states. PICES/ICES 4th International Symposium on the Effects of Climate Change on the World Oceans. PICES, Washington DC, p. 239.
- Kimoto, K., Shimizu, K., Shima E., Wakita, M., Sasaki, H., Sasaki, O., 2018. High resolution morphometry of shelled pteropods by the X-ray microtomography: a new perspective of ocean acidification study. The 33rd International Symposium on the Okhotsk Sea and Polar Oceans
- Kimoto, K., Shimizu, K., Shima, E., Sasaki, H., Kasai, K., Katakura, S., 2019. Shell morphology /density variations of thecosomatous pteropod *Limacina helicina* recovered from off Mombetsu, Sea of Okhotsk: A result from 2017 to 2018. 34th International Symposium on the Okhotsk Sea & Polar Oceans 2019. 2019/02/19.
- Kimoto, K., Onodera, J., Sugie, K., Harada, N., 2019. Technical development of Micro X-ray Computed Tomography (MXCT) and research activity on ocean acidification in the western Arctic Ocean. ArCS Workshop for Promoting Arctic Collaboration between IARC/UAF and Japan
- Nakano, Y., Fujiki, T., Kimoto, K., Miwa, T., 2017. Diurnal and seasonal variations of pH for a year in the western subarctic North Pacific observed by using a hybrid pH sensor EGU General Assembly
- Ono, T., Kimoto, K., Okazaki, Y., 2018. Temporal variation of the saturation state of carbonate in intermediate waters of western North Pacific. PICES/ICES 4th International Symposium on the Effects of Climate Change on the World Oceans. PICES, Washington DC, p. 233.
- Ono, T., Kimoto, K., Okazaki, Y., 2018. Temporal variation of the saturation state of carbonate in intermediate waters of western North Pacific. PICES 2018. PICES, Yokohama, p. 178.
- Shima E., Kimoto, K., Sasaki, H., 2018. Shell density measurements of thecosomatous pteropods in the Arctic Ocean. The 33rd International Symposium on the Okhotsk Sea and Polar Oceans
- 小椋恒夫, 岡崎雄二, 木元克典, 2017. 混合水域中層における炭酸カルシウム飽和度の経年変動. 2017年度日本海洋学会秋期大会, 仙台, pp. 17F13-04.
- 木元克典 2017. JAMSTEC のマイクロ X 線 CT 装置の紹介と微化石のスキャンノウハウ. 日本古生物学会年会2017 夜間小集会
- 木元克典 2017. 浮遊性有孔虫の生態研究の易しさと難しさ. 日本プランクトン学会秋季大会
- 木元克典 2018. 遠洋域をめざす浮遊性有孔虫: そのあくなきチャレンジ. MRC 微化石研究集会
- 木元克典 2018 X 線マイクロ CT 法による生物骨格の 3 次元計測: 海洋酸性化研究への応用. 海洋生物セミナー (石巻専修大学 理工学部)
- 木元克典, 佐々木理, 岩下智洋 2019. 微化石試料の自動 X 線形態計測. MRC 微化石研究集会
- 木元克典, 小椋恒夫, 岡崎雄二, 2017. 中層の海洋酸性化とそこに生息する浮遊性有孔虫の影響評価. 日本地球惑星科学連合2017年大会, 幕張, pp. AOS25-P02.
- 島瑛里奈, 木元克典, 佐々木洋 2018. 北極海における有殻翼足類の殻密度の計測. MRC微化石研究集会
- 中野善之, 藤木徹一, 脇田昌英, 木元克典 2017. 西部北太平洋時系列観測点K2におけるpHの高頻度連続観測 日本海洋学会2017年度秋季大会

[図書] (計 3 件)

- 小椋恒夫, 岡崎雄二, 木元克典, 2018. 混合水域中層における炭酸カルシウム飽和度の経年変動. 月刊海洋 571, 247-253.
- 木元克典 海洋酸性化と深層循環 講談社ブルーバックス「深海 極限の世界 生命と地球の謎に迫る」P202-215. 2019/5/15
- 芳村毅, 小椋恒夫, 藤井賢彦, 2018. 序文: 海洋酸性化と地球温暖化に対する沿岸・近海域の生態系の応答. 月刊海洋 570, 195-197.

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名: 木元克典
ローマ字氏名: **Kimoto Katsunori**
所属研究機関名: 国立研究開発法人 海洋研究開発機構
部局名: 地球環境観測研究開発センター
職名: 主任技術研究員
研究者番号 (8 桁): 40359162

研究分担者氏名: 岡崎雄二
ローマ字氏名: **Okazaki Yuji**
所属研究機関名: 国立研究開発法人 水産研究教育機構
部局名: 東北区水産研究所

職名：主任研究員
研究者番号（8桁）：90392901

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。