

# 日本海盆北東部における日本海固有水の溶存酸素量の近年の顕著な減少 Recent remarkable decrease of dissolved oxygen of the Japan Sea Proper Water in the northeastern Japan Basin

\*中野 俊也<sup>1,2</sup>、田中 秀和<sup>1</sup>、北川 隆洋<sup>1</sup>、永井 直樹<sup>1</sup>、北村 佳照<sup>1</sup>

\*Toshiya Nakano<sup>1,2</sup>, Hidekazu Tanaka<sup>1</sup>, Takahiro Kitagawa<sup>1</sup>, Naoki Nagai<sup>1</sup>, Yoshiteru Kitamura<sup>1</sup>

1. 気象庁、2. 気象研究所

1. Japan Meteorological Agency, 2. Meteorological Research Institute

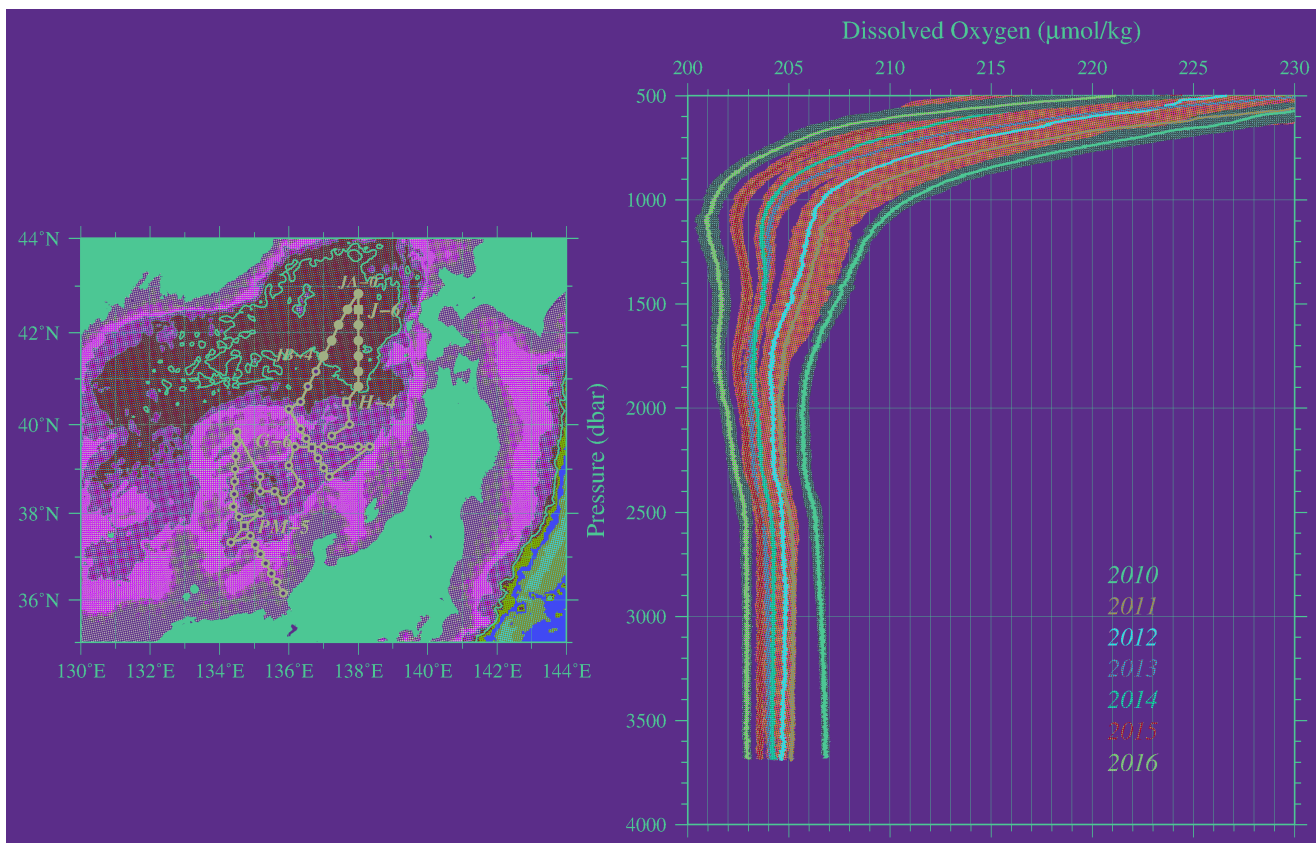
日本海は、閉鎖性の高い縁辺海で、300m以深は、日本海固有水と言われるポテンシャル水温（水温）0~1℃、塩分34.1の均一な海水が占めている（Uda, 1934）。1950年代以降の観測データの解析から、日本海固有水の昇温と溶存酸素量（DO）の減少が起こっていることが報告されている（例えば Gamo et al., 1986 ; Minami et al., 1999）。気象庁では、日本海盆から大和海盆にかけての4測点の深さ2000mにおける水温とDOを日本海固有水の長期変化の指標とし、1990年代以降、水温は昇温（0.02℃/10年）、DOは減少（7~9 μmol/kg/10年）していることを示している。この変化の原因は、日本海固有水の形成域（日本海西部の大陸に近い海域）において、冬季の気温が著しく低い（海面冷却が強い）年の頻度が減っていることで、深層に達する沈み込みが起こりにくくなり、新しい日本海固有水が形成されにくい状況が続いている可能性が示唆されている。

本研究では、気象庁による2010年~2016年の日本海の高精度観測データから、この期間におけるポテンシャル水温とDOの時間変化を、日本海盆北東部の水深3500m以上の測点のデータから調べた。水温とDOの鉛直分布から2500m以深の底層水、その上層1000mまでの深層水、さらに1000m深から主水温躍層にかけての上部固有水の3つの水塊に分けられる。2500m以深の底層水は、水温とDOが最も一様で、約0.01℃昇温し、DOは約3.7 μmol/kg減少（AOUは3.6 μmol/kg増加）していた。この上層の深層水では、上層に向かって水温は上昇するのに対して、DOは2000m深付近に極小層が存在し、その上層に向かってDOは増えていく。上部固有水の1000m~500mにかけてのDOは、約10~18 μmol/kg減少（AOUは約10~18 μmol/kg増加）していた。この減少速度は、深層水上部の平均的な減少速度に比べ非常に大きい。その結果、2013年以降、上部固有水と深層水の境界の約1000m深付近にDO極小層がみられるようになった。上部固有水の水温は、これに対して深層水と底層水とほぼ同程度の約0.01℃の昇温だった。大和海盆では、昇温とDO減少は進んでいるものの、深層水に顕著なDO極小層はみられない。

二つのDO極小層構造を含む複雑なDOの構造についてのいくつかのメカニズム、（1）海面水温の昇温による溶存酸素の溶解度の低下、（2）日本海固有水形成量の減少とそれに伴う循環の弱化、（3）低酸素、高栄養塩水の流入増加、（4）生物活動による溶存酸素量の消費の増加、について議論する。

キーワード：日本海盆北東部、日本海固有水、溶存酸素量の減少

Keywords: northeastern region of Japan Basin, Japan Sea Proper Water, decreasing of dissolved oxygen



## 2016年の日本海東部日本海盆、大和海盆、対馬海盆における溶存酸素濃度の鉛直分布

### Vertical profile of dissolved oxygen in the eastern Japan Basin, Yamato Basin, and Tsushima Basin of the Japan Sea in 2016

\*熊本 雄一郎<sup>1</sup>、荒巻 能史<sup>2</sup>

\*Yuichiro Kumamoto<sup>1</sup>, Takafumi Aramaki<sup>2</sup>

1. 国立研究開発法人海洋研究開発機構、2. 国立研究開発法人国立環境研究所

1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 2. National Institute for Environmental Studies

日本海は閉鎖性の強い縁辺海であるが、独自の深層循環系を有するためその深層水中溶存酸素濃度は隣接する北太平洋のそれよりも高濃度であることが知られている。Gamo (1999) は過去の観測データを取りまとめ、過去約50年間に東部日本海盆および大和海盆の深度2000m以深の底層水中溶存酸素濃度が約 $0.8 \mu\text{mol/kg/年}$ の割合で減少し続けていることを明らかにした。この長期的な酸素濃度の減少は、ロシア沿海州沖を含む北部日本海沿岸域における温暖化に起因する日本海深層循環の弱化がその原因として推察されている。Kumamoto et al.(2008)は、それらの溶存酸素濃度の時系列データに一時的な濃度上昇期があることに着目し、そのメカニズムについて以下のような仮説を提案した：「日本海底層水中の溶存酸素は、厳冬期にのみ西部日本海盆における新たな底層水形成によって供給される。溶存酸素に富む新底層水は反時計回りの深層循環に沿って、数年程度遅れて大和海盆および東部日本海盆に移動する。新たな酸素供給が無い期間は、溶存酸素は有機物の分解によって消費され減少する」。またその仮説を元に、日本海底層水の形成が完全に停止した場合、今後日本海底層水中の溶存酸素濃度は、約 $2 \mu\text{mol/kg/年}$ の割合で減少する可能性を示唆した(熊本, 2010)。これは現在の底層水中溶存酸素濃度約 $200 \mu\text{mol/kg}$ が約100年でゼロになってしまうことを意味する。我々は2016年に、東部日本海盆、大和海盆、対馬海盆において表面から海底直上までの溶存酸素濃度の鉛直分布を観測し、底層水における溶存酸素濃度の過去数年間の経時変化を検討したので報告する。海洋観測は、北海道大学おしよ丸第26次航海レグ3(2016年7月)、大韓民国KIOSTイヨド号航海(2016年9月)、および長崎大学長崎丸第447次航海(2016年10月)において実施された。海水試料はニスキン採水器を用いて各深度層で採水し、改良ウィングラーを用いて船上で溶存酸素濃度を測定した。同一採水器から採取した複数試料の分析結果から、溶存酸素分析の不確かさは約 $0.2 \mu\text{mol/kg}$ と見積もられた。2016年に得られた各海盆における溶存酸素濃度を、2010年に我々が得た観測データと比較した。その結果、2010年から2016年の約6年間に、底層水中溶存酸素濃度は三海盆を平均して約 $5 \mu\text{mol/kg}$ 低下したことが確認された。この減少量を年平均減少速度に換算すると約 $0.8 \mu\text{mol/kg/年}$ となるが、この値は過去50年間の平均減少速度とよく一致する。熊本(2010)によると、新たな底層水形成による溶存酸素の供給が無ければ、過去6年間に底層水中溶存酸素濃度は $10 \mu\text{mol/kg}$ 以上減少することになる。したがって、この観測結果は新たな底層水形成によってこの期間に溶存酸素が底層水に付加された可能性を暗示するが、東部日本海盆における1年毎の観測結果によると2010年から2016年の間、日本海底層水の溶存酸素濃度は単調に低下したことがわかっている(気象庁, 2016)。この矛盾を説明する可能性としては、表層からの深層に運ばれる沈降粒子束の減少、日本海底深層水の循環速度の上昇などが考えられるが確かではない。我々の研究グループは、2016年～2018年の3ヵ年計画で上記の生物生産量、底層循環速度の計測も含めた総合的な海洋観測を日本海で実施する予定であるので、さらに議論を深めたい。この本研究は、環境省環境研究総合推進費、A-1002「日本海深層の無酸素化に関するメカニズム解明と将来予測」(平成22～24年度)および2-1604「温暖化に対して脆弱な日本海循環システム変化がもたらす海洋環境への影響の検出」(平成28～30年度)の助成を受けた。

キーワード：日本海底層水、溶存酸素濃度、地球温暖化

Keywords: Japan Sea Bottom Water, dissolved oxygen, global warming



# 溶存クロロフルオロカーボン類が示す日本海熱塩循環の急激な弱化的証拠 Chlorofluorocarbons indicating the sudden weakening of the thermohaline circulation in the Japan Sea

\*荒巻 能史<sup>1</sup>、田中 伸一<sup>1</sup>

\*Takafumi Aramaki<sup>1</sup>, Shinichi S Tanaka<sup>1</sup>

1. 国立研究開発法人国立環境研究所

1. National Institute for Environmental Studies

日本海では、北西部海域において冬季にアジア大陸から吹きつける冷たい季節風によって冷却され密度を増した表層水が海底付近まで沈み込む、独自の熱塩循環を有することが知られている。その結果、日本海深層は西部北太平洋の同深度に比べて低温で溶存酸素に富んだ海水で満たされている。しかしながら、継続的なモニタリングによると、1960年代以降、同水塊の水温は徐々に上昇し、逆に溶存酸素濃度は減少傾向にあることが示されている。これは、近年の地球温暖化によって冬季の冷却が弱まり、結果として熱塩循環が停滞しているものと考えられているが、その定量的な議論は十分ではない。そこで本研究では、水塊年齢トレーサーとして有効な溶存クロロフルオロカーボン類（CFCs、ここではCFC-11, CFC-12およびCFC-113を対象とする）を空間的に密に測定して熱塩循環の弱化的規模を評価した。CFCsの生産は1930年代に開始され、1960年代以降に急激に大気中濃度が増加した。海洋へは大気海洋間のガス交換によって取り込まれ、海水中では加水分解されない。熱塩循環が存在する日本海においては、冬季に表層水が深層へと輸送されると、高いCFCs濃度を持つ表層水との混合によって深層海水中のCFCs濃度が絶えず書き換えられる。したがって、現在の深層海水中のCFCs濃度は1930年代以降の日本海の熱塩循環の情報を記録していることになる。本研究では、北海道大学おしよ丸第229次航海（2011年6～7月）およびJAMSTEC淡青丸KT-12-26航海（2012年10月）により日本海盆および大和海盆にてCTD/RMS観測を実施し、海水中のCFC-11、CFC-12およびCFC-113を高感度かつ高精度で分析した。CFCs鉛直分布は、水深100mから500mの間に濃度の極大があり深さとともに低減傾向を示し、すべての海域で水深およそ2200m以深ではほぼ一定の濃度となった。そこで本研究では、深層海水のうち水深2200m以深の海水を底層水と定義した。底層水では大和海盆のCFC-12が日本海盆よりも最大で1.8倍高い一方で、CFC-11は1.6倍、CFC-113が1.2倍とそれぞれ異なっていた。さらに、CFC-12/CFC-11比から算出された深層水と底層水の見かけ上の海水形成年代は海域に因らず1960年代を示した。もし熱塩循環が毎年冬季に同じ規模で起こっているならば、大気中のCFCs濃度の時間変動を考慮すると海水形成年代はより新しい値を示すべきであり、この計算結果は1960年代以降については表層水の深層への沈み込みがほとんど起こらなかったことを示唆するものである。一方、CFC-12/CFC-113比では1980年代を示した。CFC-113は1960年代はじめに大気中ではじめて濃度が確認され1970年代から濃度上昇していることから、1970年代以降にも表層水の深層への沈み込みが起こっていたことを示すものである。この矛盾は、各CFCsの大気濃度がそれぞれ異なる時間変化を示すことや、1970年代以降に熱塩循環の規模が変化したこと起因すると考えられる。そこで、熱塩循環によって日本海盆と大和海盆の深層水および底層水に毎年冬季に表層水が取り込まれるものと仮定したボックスモデルを構築して、1975年以前とそれ以降の深層水および底層水に表層水が取り込まれた割合（表層水の深層水への寄与率）を算出した。1975年を境界としたのは、同モデルにおいて1970年代に深層水中のCFC-113が有意な濃度に達したからである。その結果、深層水および底層水における1975年以降の寄与率はそれ以前の21-30%および15-41%に減少していた。つまり、最近およそ40年は日本海の熱塩循環がそれ以前の半分以下にまで弱化したことになる。さらに、この寄与率を海域ごとに比較すると、大和海盆が日本海盆よりも低下の規模が大きかった。これらの結果から、熱塩循環の急激な弱化的によって深層循環の流路や規模も変化した可能性が考えられる。なお、この本研究は環境省環境研究総合推進費A-1002「日本海深層の無酸素化に関するメカニズム解明と将来予測」（平成22～24年度）および2-1604「温暖化に対して脆弱な日本海循環システム変化がもたらす海洋環境への影響の検出」（平成28～30年度）の助成を受けたものである。

キーワード：日本海、クロロフルオロカーボン類、熱塩循環、地球温暖化

Keywords: Japan Sea, Chlorofluorocarbons, Thermohaline circulation, Global warming

## Ocean acidification detected in coastal water around Japan

\*Miho Ishizu<sup>1</sup>, Yasumasa Miyazawa<sup>1</sup>, Tomohiko Tsunoda<sup>2</sup>, Tsuneo Ono<sup>3</sup>

1. Japan Agency for Marine-Earth Science Technology, 2. The Ocean Policy Research Institute, 3. Japan Fisheries Research Education Agency

Ocean acidification causes significant damages on marine ecosystems in polar regions and coral reefs etc., together with global warming. Japan Ministry of Environment has conducted measurements of hydrogen ion concentration, pH in about 2100 fixed stations covering the whole of coastal area in Japan since 1987, in the monitoring program to monitor quality of water pollution. In this study, by using these data, situations of ocean acidification in coastal waters in Japan were examined, which have been difficult to understand in detail so far.

Apparent 368 acidification and 18 alkalization trends were detected. Among them, 78 acidification and 13 alkalization trends were statistically significant. Progressing speed of ocean acidification in coastal waters is averagely at -0.0015 pH/yr, which is comparable to the estimates at the other fixed monitoring stations in open ocean, such as JMA 137E line, BATS and HOT program stations. Some industrial port sites including Ishinomaki in Miyagi, Tomakomai in Hokkaido and Tokyo Bay in Tokyo prefectures show 10 times as fast progressing speed as the average. We would clarify the mechanisms of the differences among local regions, and possible influences on marine ecosystems, in future study.

Our talk will also provide a tendency of ocean acidification/alkalization in each prefecture, and a diagnostic estimation of aragonite saturation rate ( $\Omega_{AR}$ ) to see an influence on crustacean in present.

Keywords: Ocean acidification , pH , Coastal water in Japan

## 海洋酸性化がウバガイ稚貝の成長と石灰化に及ぼす影響

### Effects of ocean acidification on growth and calcification in juvenile Japanese surf clam *Pseudocardium sachalinense*

\*林 正裕<sup>1</sup>、西田 梢<sup>2</sup>、諏訪 僚太<sup>3</sup>、岸田 智穂<sup>1</sup>、渡邊 裕介<sup>1</sup>、箕輪 康<sup>1</sup>、鈴木 淳<sup>4</sup>、野尻 幸宏<sup>5</sup>

\*Masahiro Hayashi<sup>1</sup>, Kozue Nishida<sup>2</sup>, Ryota Suwa<sup>3</sup>, Chiho Kishida<sup>1</sup>, Yusuke Watanabe<sup>1</sup>, Yasushi Minowa<sup>1</sup>, Atsushi Suzuki<sup>4</sup>, Yukihiro Nojiri<sup>5</sup>

1. 公益財団法人海洋生物環境研究所、2. 独立行政法人国立高等専門学校機構 茨城工業高等専門学校、3. 沖縄科学技術大学院大学、4. 国立研究開発法人産業技術総合研究所、5. 国立大学法人 弘前大学

1. Marine Ecology Research Institute, 2. NIT, Ibaraki College, 3. OIST Graduate University, 4. Geological Survey of Japan, AIST, 5. Hirosaki University

Many previous studies have reported that ocean acidification could give negative influences on marine calcifiers. However, the influences of ocean acidification on edible marine species, especially on cold-water species, are poorly understood. Juvenile Japanese surf clam was exposed to five levels of pCO<sub>2</sub> (400, 600, 800, 1,000, and 1,200 μatm) during 20 weeks and these effects on its growth and stable isotope compositions of shell were examined. The clam is important in local fisheries and inhabits on the upper subtidal sandy bottom in northern Japan.

We found non-significant effects of elevated CO<sub>2</sub> on weight (whole body, shell, and soft tissue), shell length, shell width, and shell height during experiments. Meanwhile, shell thickness at a region that grew during experiments thinned in a pCO<sub>2</sub>-dependent manner. These results suggest that effect of ocean acidification on juvenile Japanese surf clam was not the shell dissolution but the inhibition of shell formation.

We studied the contribution of acidified seawater on shell calcification by stable carbon isotope composition (δ<sup>13</sup>C). The δ<sup>13</sup>C of the shells collected from the external margin of the outer shell layer showed significant positive correlations with pH (R = 0.56, p < 0.05). The regression slope of the relationship between shell δ<sup>13</sup>C and pH was roughly the same as that between δ<sup>13</sup>C of dissolved inorganic carbon (DIC) of seawater and pH, and calcification of the experimental specimens might be strongly affected by acidified seawater. Thus, by measuring δ<sup>13</sup>C of molluscan shell and DIC of seawater, it might be possible to estimate the contribution of acidified seawater to calcification.

The concentration of carbonate ion which is necessary for calcification decreased with increasing pCO<sub>2</sub>. Because of the influx of acidified seawater into the extrapallial fluid, the decrease in carbonate ion in the extrapallial fluid might induce a thinner shell formation. Therefore, in acidified seawater, Japanese surf clam might have a poor pH regulation of the extrapallial fluid.

キーワード：海洋酸性化、成長影響、石灰化、炭素安定同位体、ウバガイ

Keywords: ocean acidification, growth effect, calcification, stable carbon isotope, Japanese surf clam



## 海洋酸性化が日本の地域社会に及ぼす影響

### Anticipated impacts of ocean acidification on local societies in Japan

\*藤井 賢彦<sup>1</sup>

\*Masahiko Fujii<sup>1</sup>

1. 北海道大学大学院地球環境科学研究院  
1. Faculty of Environmental Earth Science

Ocean acidification is anticipated to affect marine ecosystem services and human activities such as fisheries, aquaculture, tourism and recreation. However, extent of the impacts is expected to differ spatially. Thus ocean acidification may widen regional gaps of economic conditions and pose a social security threat in future by damaging specific local industries. Things might be further complicated because suitable habitats for the calcifiers, such as corals, scallops, oysters, pearls and shrimps, are projected to become sandwiched between migrating northern and southern limits regulated by ocean warming and acidification, respectively. Considering such backgrounds, this study aims to call for stakeholders' attention to the possible impacts of ocean acidification on local societies in Japan by sharing fundamental scientific knowledge through everyone's common interests: economic values.

Change in economic values of Japanese coral reefs was calculated by the product of changes in the area and health condition of coral reefs. The area was assumed to be regulated by annual maximum and minimum water temperature and minimum saturation state of aragonite ( $\Omega_{arg}$ ) (Yara et al., 2012; 2016). The health condition was assumed to be deteriorated by 15% per  $\Omega_{arg}$  (Chan and Connolly, 2013; van Hooijdonk et al., 2004). The change in economic values of Japanese fisheries and aquaculture was assumed to decrease by 10 through 40% per one pH unit of the water (Wootton et al., 2008).

Currently, calcifiers account for one-fifth of total fish catch in Japan (Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries, 2015). The annual economic values of tourism and fisheries profited by calcifiers in Japan were estimated to be 14,107 and 779-2,399 million USD, respectively (Cesar et al., 2003; Ministry of Environment, 2010).

The economic values of Japanese coral reefs were projected to increase by mid-century because of expansion of coral reefs in response to ocean warming (Figure 1). However, the economic value will decrease dramatically in the latter half of the century, due to possible extinction of coral reefs caused coral bleaching and ocean acidification. As a result, the total loss of economic values of Japanese coral reefs in this century was estimated to be 22-67 billion USD for tourism and 5-6 billion USD for fisheries by the end of the century.

Likewise, the total economic loss of Japanese fisheries by ocean acidification was estimated to be 15-37 billion USD by the end of the century. However, the impacts of ocean acidification are considered to be spatially different. For example, it is more concerned that the impacts on local industries are relatively prominent in such prefectures as Hiroshima, Okayama, Hokkaido, Fukui and Aichi where calcifiers currently account for the local fish catch by more than 30%.

It is obvious that global mitigation of ocean acidification such as reducing CO<sub>2</sub> emissions is essential to alleviate the impacts of ocean acidification. On the other hand, adaptive strategies would also be needed for aquaculture of calcifiers, which are very important for the local industries. Such strategies will only be

achieved after consensus building among various stakeholders including citizens, policy makers and both natural and social scientists.

キーワード：海洋酸性化、地域社会、緩和策、適応策

Keywords: Ocean acidification, Local society, Mitigation, Adaptation