

## 北海道における沿岸水温環境とホタテガイ漁獲量の時空間変動解析

柴野良太<sup>1†</sup>・藤井賢彦<sup>1</sup>・山中康裕<sup>1</sup>・山野博哉<sup>2</sup>・高尾信太郎<sup>1</sup>Spatial and temporal dynamics of coastal sea surface temperature and catches of Japanese scallop *Mizuhopecten yessoensis* in HokkaidoRyota SHIBANO<sup>1†</sup>, Masahiko FUJII<sup>1</sup>, Yasuhiro YAMANAKA<sup>1</sup>, Hiroya YAMANO<sup>2</sup> and Shintaro TAKAO<sup>1</sup>

地球温暖化などの気候変動は、海洋生態系に大きな影響を与えることが知られており、沿岸生物など生息範囲が狭い生物種に対して特に深刻な影響があることが指摘されている。ホタテガイ *Mizuhopecten yessoensis* は北海道など一部沿岸域にのみ生息する、日本の主要水産資源のひとつである。我々は実測の沿岸表層水温及び北海道ホタテガイ漁獲データより北海道のホタテガイに対する夏期表層水温依存性について評価するとともに、複数の気候モデル及びCO<sub>2</sub>排出シナリオの表層水温データを用いてホタテガイ生息適水温帯を考慮した簡易指標を作成し温暖化後の養殖適域について評価した。その結果、中程度の排出シナリオ（RCP4.5シナリオ）を想定した評価より、日本海及び噴火湾周辺のホタテ養殖業に大きな影響がある可能性が示唆された。本研究は、海洋生態系に対する簡易的な評価手法と沿岸環境観測に対する重要性を示したものである。

Climate change such as global warming affects marine ecosystems and fishery resources. The impacts to the species living in coastal regions are considered to become more serious due to a narrow range of inhabitation. Japanese scallop *Mizuhopecten yessoensis* is an important species for Japanese fishery resources as it only lives in coastal regions, especially in Hokkaido. We estimated the dependency of the Japanese scallop on the sea surface temperature dependency (SST) in summer using the foreshore SST and Japanese scallop catch in Hokkaido observations. We also looked at the possible impact of global warming on Japanese scallop using a simplified index for suitable habitats for Japanese scallops and SST obtained by climate models in scenarios with varied CO<sub>2</sub> emission. Japanese scallops and relevant industries are projected to be at risk from SST rising in the future around the Sea of Japan and Funka Bay in Hokkaido based on a scenario with intermediate CO<sub>2</sub> emission (RCP 4.5 scenario). We propose a simple estimation method applicable to many situations and the importance of observed data in coastal regions.

**Key words:** Japanese scallops, global warming, temperature, observation, future projection, Hokkaido

## はじめに

近年地球温暖化に伴う海洋への影響が懸念されており、気候変動に関する政府間パネル（IPCC）第5次報告書（AR5）（IPCC, 2013）においても、海水温の上昇とそれに伴う海洋生態系への影響について警告されている。これらの問題は、日本をはじめ水産資源が重要視されている国家におい

ては緊急の課題となっている。

桑原ほか（2006）では、いくつかの水産生物について適水温帯を考慮し、温暖化に伴う水温上昇による生息域の変化について評価している。ここでは、養殖魚種や沿岸生態系など生息範囲が狭い生物種について深刻な影響があることが指摘されている。

ホタテガイ *Mizuhopecten yessoensis* は、日本の主要水産資源のひとつであるとともに北海道・東北の一部の狭い範囲で増養殖生産の大部分が行われている沿岸生物である。現在のホタテガイ増養殖業は、天然採苗により採集・育成を行った稚貝を用いての地まき漁業（水深20–60 mの領域に稚貝を放流・増殖生産を行う）と養殖漁業（海表から稚貝をロープによって垂下・養殖生産を行う）によって行われている（水島・鳥澤, 2003）。主流な漁法は地域によっ

2014年5月21日受付, 2014年10月6日受理

<sup>1</sup> 北海道大学大学院地球環境科学研究院

Faculty of Environmental Earth Science, Hokkaido University, N10W5, Sapporo, Hokkaido 060-0810, Japan

<sup>2</sup> 国立環境研究所 生物・生態系環境研究センター

Center for Environmental Biology and Ecosystem Studies, National Institute for Environmental Studies, 16-2 Onogawa, Tsukuba, Ibaraki 305-8506, Japan

† rshibano@ees.hokudai.ac.jp

て異なっており、北海道オホーツク海沿岸部・太平洋沿岸部などでは地まき漁業が、北海道噴火湾・日本海沿岸部・サロマ湖及び東北地方の一部などでは養殖漁業が盛んに行われている。天然採苗や垂下養殖技術の発展に伴い、1980年代から急激に漁獲量の増加が見られ、1990年代には年間約40万トンの漁獲が得られている。しかし漁獲量が増加するにつれて、大規模なへい死（1977–1979年に噴火湾、1980–1982年にサロマ湖で発生）や貝毒の発生などといった環境による増養殖業への影響が問題となってきている。特にへい死は年間漁獲量に深刻な影響を与える場合もあり、その要因については過度に密集させての成育や夏期水温が生息限界温度（23°C）を超える環境などが指摘されている（日本水産学会、1980; 水島・鳥澤、2003）。ホタテガイ成育に適した水温帯は、桑原ほか（2006）にて成貝：-3–23°C、稚貝：6–20°Cと報告されており、北海道日本海側沿岸部など一部海域では、成貝の適水温帯を上回っている年もしばしばみられる。高水温下でのホタテガイへの影響の一例として、関野・須川（1992）では23°C以上の水温環境下において稚貝の貝殻成長速度が著しく減少すると報告している。温暖化に伴う海水温の上昇、特に夏期水温の上昇はこの閾値を超える頻度・範囲の増加が予想され、ホタテガイの生息分布に大きな影響を与えることが考えられる。現在のホタテガイ増養殖は沿岸数kmの狭い範囲において許容限界に近い密度で行われており、水温上昇による影響評価は将来のホタテガイ漁業を考える上で不可欠なものである。

このような沿岸生態系への影響評価のために、これまで好適水温帯を始めとした定量的評価のための指標や環境変数に対する依存性の数式化が観測や室内実験の結果によって検討されている（e.g., 屋良ほか、2009）。また将来予測される漁獲量を評価するため、観測などより得られた依存関数を用いて数値モデルを用いた解析が近年進められるようになった（e.g., Okunishi et al., 2012）。数値モデルにはそれぞれ異なる固有誤差が存在し、影響評価に用いる指標を設定・評価するためには複数の数値モデル結果を用いて解析を行うことが望まれる。しかし、沿岸の海表面水温（SST）の将来予測について、複数モデルでの比較やCO<sub>2</sub>排出シナリオ（代表的濃度経路、Representative Concentration Pathways; RCP, シナリオ）による差異について定量的に評価した例は少なく、そのため沿岸の水産資源に対する温暖化による影響評価も十分には行われていなかった。

本研究では、将来のホタテガイ生育適域の分布を調べることを目的として、ホタテガイの生息適水温域に注目し過去30年間の観測データ（年間漁獲量及びSST）と複数の数値モデルによるSSTのシミュレーション結果を用いた定量的な解析を行った。ホタテガイに対する温暖化による影響の予測には、海洋酸性化による影響（Ries et al., 2009）など複合的な要因を考慮することが望ましいが、本研究で

は水温変動による応答のみを抽出してより深く議論することを目的とした。これは、生息適域に関する知見や観測実績が最も蓄積されているのが水温に関する解析であるためである。

## 材料と方法

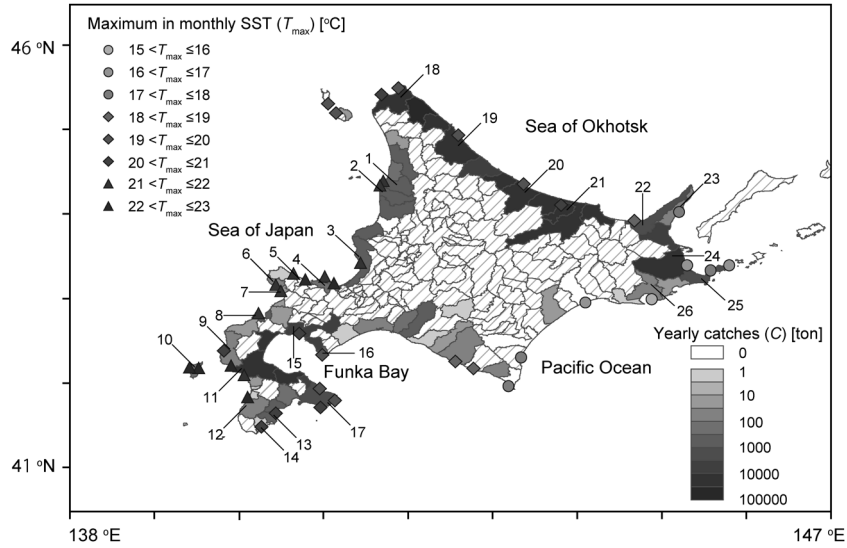
本研究では、“過去の観測データからホタテガイ漁獲量の夏期SST変動に対する依存性の解析”と、“観測データから得たSST依存性に関する考察と数値モデルデータを用いた将来のホタテガイの分布推定”のステップに分けて解析を行った。前者については、1980–2009年の北海道におけるホタテガイの年間漁獲量と沿岸の月平均SSTの時空間変動を解析し、後者については、ホタテガイの将来分布を予測・評価するため、第5期結合モデル相互比較実験（CMIP5; Taylor et al., 2012）によってまとめられた複数の数値モデルによる1900–2099年の月平均SSTを用いた解析を行った。SSTの解析については、桑原ほか（2006）をはじめとした過去の研究から、ホタテガイに対する水温の影響は夏期（7–9月）に大きいため、夏期の最大月平均SSTを最暖月水温（ $T_{max}$ ）と定義、抽出しホタテガイの適水温帯を考慮して議論を行うこととした。さらにホタテガイに対する水温環境指標として、不適水温の発生頻度（ $F$ ）を作成、解析を行った。 $F$ は、 $T_{max}$ がホタテガイの適水温帯以上（ $T_{max} \geq 23^\circ\text{C}$ ）を示した年代（10年間）別の年数として定義した。またCMIP5によってまとめられたSSTデータは全球スケールでの予測を想定したものであるため、沿岸観測値として補正を行う必要がある。そこで北海道内各地の前浜観測データを用いて、沿岸環境値として補正を行った。

## ホタテガイ漁獲量

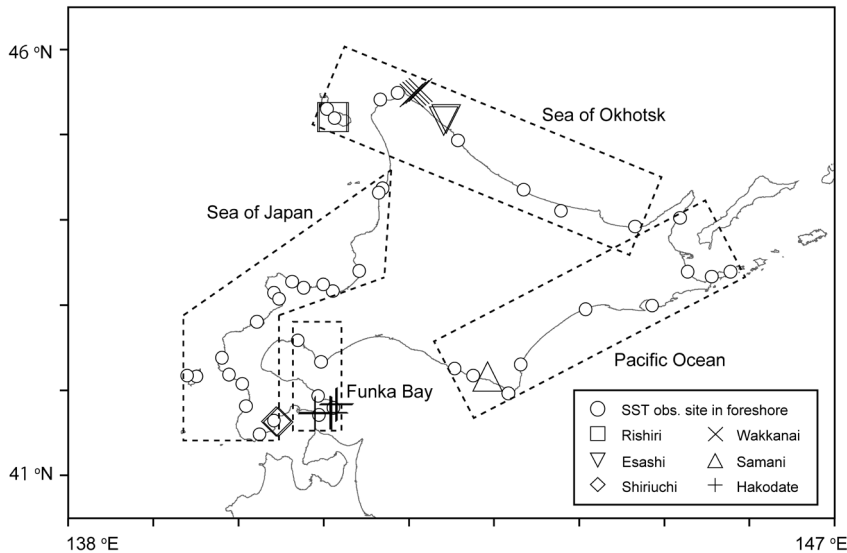
ホタテガイを含む北海道水産業の漁業実績は、北海道水産現勢（北海道水産林務部、1980–2009）にまとめられている。本研究では、市町村別に $T_{max}$ との関連性を調べるため資料中の表「市町村別・魚種別生産高」に示されたホタテガイの年間漁獲量（ $C$ ）をとりまとめた（Fig. 1）。解析期間は、垂下養殖漁業が広く行われるようになった1980年代からとした。また漁獲量は市町村によって大きく異なっており、時間変化に焦点を当てて解析するためには地域差を考慮した正規化を行う必要があった。そこで本研究では平均漁獲量のみではなく、各市町村の漁獲量を80年代と比較した増減比（ $C/C_{1980-1989}$ ）として計算し議論に用いた。

## 前浜観測SST・沿岸観測SST

本研究では、ホタテガイ漁獲量との比較検証、及び数値モデルで推定されたSSTの補正のために長期観測された前浜観測SST：北海道沿岸漁場海況観測取りまとめ（北海道栽培漁業振興公社、1980–1999, 2000–2009）を使用した。資料中にまとめられている値は、各地から北海道栽培漁業振興公社に届けられた、前浜・岸壁SSTの日データを旬別



**Figure 1.** Annual catch of Japanese scallop ( $C$ ) and maximum monthly SST ( $T_{max}$ ) averaged for 20 years from 1980 to 2009. The scale of  $C$  is logarithmic. The shaded regions show municipalities with no records. The number of municipalities is corresponding to that in Figure 4.

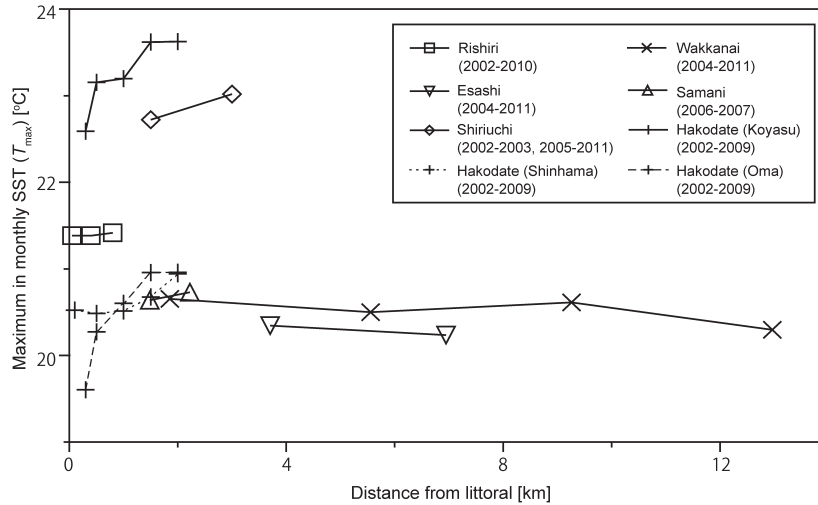


**Figure 2.** Foreshore observational sites used to correct projected SST in CMIP5 from 1980 to 2009 and longshore observational sites of SST used to assess the environment in oceanic regions for cultivating Japanese scallop from 2002 to 2011. The observational sites in foreshore and in longshore are described in open circles and various marks, respectively, as shown in legends. The domains in broken lines show four categorized oceanic regions (Sea of Japan, Funka Bay, Sea of Okhotsk and Pacific) in Table 2.

データとして平均化したものである。本研究では、日データから直接月平均SSTとしてまとめ、1986–2005年に観測記録のある道内42測点のSSTについての解析を行った (Fig. 1, Fig. 2).

ホタテガイの増養殖は実際には前浜・岸壁より数km離れた沿岸領域内で行われている場合が多く、沿岸領域内と前浜の環境データの間には存在する差異について検証する必要がある。そこで道内各地の沿岸領水温などの観測値が

取りまとめられている、沿岸観測SST；沿岸環境調査データ（北海道立総合研究機構水産研究本部中央水産試験場・北海道水産林務部によるデータ、未公開データ）を使用し、距岸に対する水温の変化を取りまとめ、前浜観測値がホタテガイへの影響評価に適用可能か否かの検証に使用した (Fig. 2, Fig. 3)。観測値はおおむね月3回の船舶観測によるもので、この値を用いて前浜観測SSTと同じく月平均SSTとしてまとめた。検証に利用する測点データは、陸からの



**Figure 3.** Relationship between maximum monthly SST ( $T_{\max}$ ) estimated from the observed longshore SST and the distance from the littoral. The observational data with multiple points obtained by the same cruise are extracted from all longshore SST data to focus on the change in the distance from the littoral. The regions and periods for extracted data are described in the graph legend. The observational sites are shown in Figure 2.

**Table 1.** List of climate models used in this study, the horizontal resolution, and ocean model.

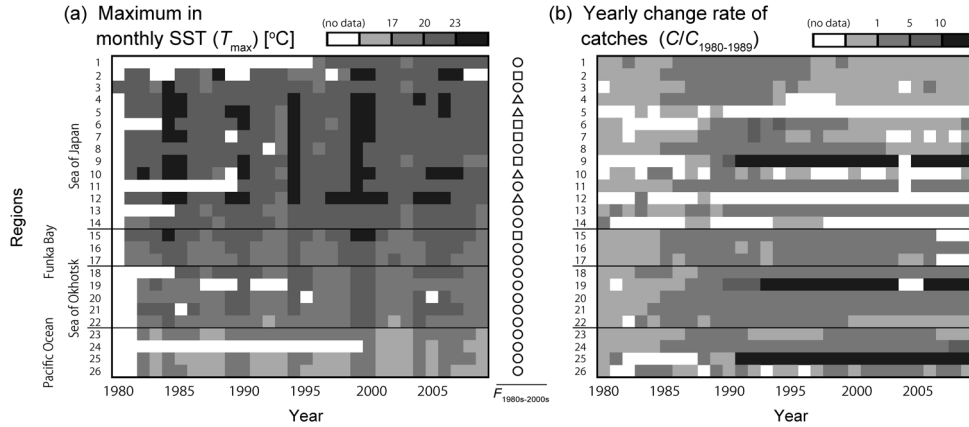
No.	Model	Country	Horizontal resolution (lat×lon) [degree]	The ocean model
1	BCC-CSM1-1	China	0.33–1×1	MOM4_L40
2	BCC-CSM1-1 (m)	China	0.33–1×1	MOM4_L40
3	CCSM4	USA	0.27–0.54×1.125	POP2.0
4	CESM1-CAM5	USA	0.27–0.53×1.125	POP2.0
5	CSIRO-Mk3.6.0	Australia	0.9375×1.875	MOM2.2
6	FIO-ESM	China	0.27–0.53×1.125	POP2.0
7	GFDL-CM3	USA	0.33–1×1	MOM4p1
8	GFDL-ESM2G	USA	0.375–1×1	GOLD
9	GFDL-ESM2M	USA	0.33–1×1	MOM4p1
10	GISS-E2-H	USA	2×2.5	Hycom
11	GISS-E2-R	USA	2×2.5	Russell
12	HadGEM2-ES	UK	0.34–1×1	HadGOM2.0
13	IPSL-CM5A-LR	France	0.5–2×2	NEMO v2.3
14	MIROC5	Japan	0.5–1.378×1.406	COCO v4.5
15	MRI-CGCM3	Japan	0.5×1	MRI.COM3
16	NorESM1-M	Norway	0.27–0.54×1.125	MICOM
17	NorESM1-ME	Norway	0.27–0.54×1.125	MICOM

最短距離（距岸）に対する変化を抽出するため、観測を複数点で行っているデータのみを抜粋し解析を行った（抜粋した測点分布は Fig. 2 に示した）。

#### CMIP5 モデル推定 SST

本研究では CMIP5 で提供される気候モデルの内、RCP シナリオ 2.6, 4.5, 6.0, 8.5（産業革命以前と比較して放射強制力が 21 世紀末までにそれぞれ 2.6, 4.5, 6.0, 8.5  $\text{W m}^{-2}$  上昇; Moss et al., 2010）について出力された 17 モデルを選別し 1900–2099 年までの解析を行った (Table 1)。モデル

データはそれぞれ空間解像度が異なるが、本解析にあたっては、空間解像度について  $k$  近傍法を用いて全モデル  $1^\circ \times 1^\circ$  格子データに統一した。また各気候モデルにはそれぞれ異なるバイアスが存在する。そこで Yara et al. (2011, 2014) のバイアス補正手法を参考に、観測値を用いたデータ補正を行った。データの補正はホタテガイの影響評価を行う沿岸環境値として補正する場合は前述の前浜観測 SST を使用し、補正議論のために外洋環境値として補正する場合は、Yara et al. (2011) で補正に使用された衛星観測 SST (NOAA



**Figure 4.** (a) Maximum monthly SST ( $T_{\max}$ ) and (b) annual change rate of Japanese scallop catches from the 1980s ( $C/C_{1980-1989}$ ) in 26 municipalities from 1980 to 2009. Numbers in regions are municipal communities shown in Figure 1. The municipalities with observations between 1986–2005 are extracted from all SST and catch data described in Figure 1. The municipalities are categorized by averaged occurrence frequency of unpreferred SST from the 1980s to 2000s ( $\bar{F}_{1980s-2000s}$ ) for  $\bar{F}_{1980s-2000s} \geq 2.0$  (in open circles),  $1.0 \leq \bar{F}_{1980s-2000s} < 2.0$  (in open squares), and  $\bar{F}_{1980s-2000s} < 1.0$  (in open triangles), respectively.

OISST; Reynolds et al., 2007) を使用した。1900–2009年の各モデルデータに対するバイアス補正は、以下のような手順で行った。まず各RCPシナリオに基づいた各モデルの将来予測シミュレーションで得られた月平均SST ( $SST_{\text{predict}}$ ) と過去再現実験で得られた月平均SST気候値 ( $SST_{\text{past}}$ ) (1986–2005年の20年平均値) の偏差を算出した。次にそのSST偏差を、(前浜観測または衛星観測による) 観測で得られた月平均SST気候値 ( $SST_{\text{obs}}$ ) (1986–2005年の20年平均値) に加え、バイアス補正SST ( $SST_{\text{corr}}$ ) とした。ある経度 ( $lon$ ), 緯度 ( $lat$ ), 月 ( $t$ ), モデル ( $m$ ), RCPシナリオ ( $s$ ) における  $SST_{\text{corr}}$  を数式として表すと以下のよう表現できる。

$$SST_{\text{corr}}(lon, lat, t, m, s) = \underbrace{SST_{\text{obs}}(lon, lat, t)}_{\text{気候値}} + \underbrace{\{SST_{\text{predict}}(lon, lat, t, m, s) - SST_{\text{past}}(lon, lat, t, m)\}}_{\text{偏差}} \quad (1)$$

なお、前浜観測を用いた補正については、最近傍格子点データを抜粋して同一地点と仮定、バイアス補正を行っている。以降、各数値モデル・各RCPシナリオに対する解析は、このバイアス補正SSTを用いて解析を行った。

## 結果

### 沿岸観測SSTを用いた距岸に対するSSTの検証

沿岸観測SSTからの解析データの選別では、距岸に対する変化に注目するため、同一観測領域内において複数測点を同時期に観測を行っているデータのみを抽出した (Fig. 3)。得られた8測点についての (ホタテガイ成育領域となる) 沿岸数kmまでの  $T_{\max}$  を見ると、函館市周辺などで最大

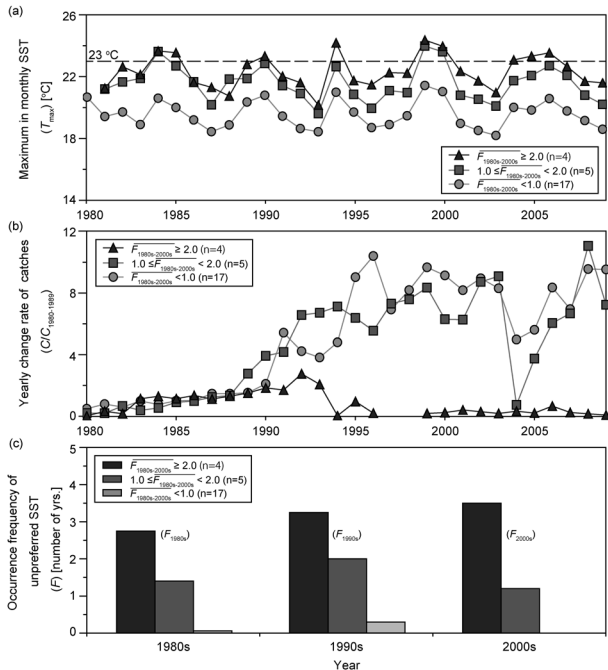
1.3°Cの変化が現れているものの、多くの領域では距岸に対する変動は0.5°C以下となっていることがわかる。 $T_{\max}$  の年々変動の振幅はこれに対して2–4°C程度 (Fig. 4a, Fig. 5a) であることから、前浜観測SSTを沿岸環境値として適用した場合においても環境値としての誤差は小さい。

### ホタテガイ漁獲量・前浜観測SSTの時空間変動

ホタテガイ漁業は北海道各地で行われているが、市町村毎の年間漁獲量には大きなばらつきがある (Fig. 1)。特に高い漁獲を得ている地域は、地まき漁業ではオホーツク海沿岸部 (ただしサロマ湖では垂下養殖も盛んに行われている)、垂下養殖漁業では噴火湾周辺の市町村で、最も大きな生産が行われている地域では毎年数万トンのホタテガイが増養殖されている。経年変動を見ると、全体としては1980年代–1990年代後半にかけてホタテガイの漁獲量は増加傾向にあり、いくつかの大規模な増養殖を行っている市町村では約10年間の間に1980年代比で10倍以上漁獲量を増加させてきた (Fig. 4b)。しかし1990年代後半以降は多くの自治体で横ばいに推移しつつあり、いくつかの市町村で漁獲量が著しく減少している。

道内の前浜観測SSTについて見ると、領域によって平均  $T_{\max}$  に大きな差異があることがわかる (Fig. 1, Fig. 4a)。太平洋沿岸部など北海道南東部のSSTは夏期でも17°C程度までしか上がらない一方で、日本海沿岸部など北海道西部のSSTは夏期にホタテガイの生息適水温帯上限である23°Cを上回る年もしばしば見られており、特に1984年、1994年、1999年には広い範囲で不適水温が現れている。養殖漁業が盛んに行われている噴火湾に最も近い観測点では1980–2009年の期間平均として  $T_{\max}$  は20.9°C、10年に1年の頻度で不適水温が現れていた (Fig. 1, Fig. 4a: No. 15)。

漁獲量の減少が見られた地域と不適水温が頻繁に現れて



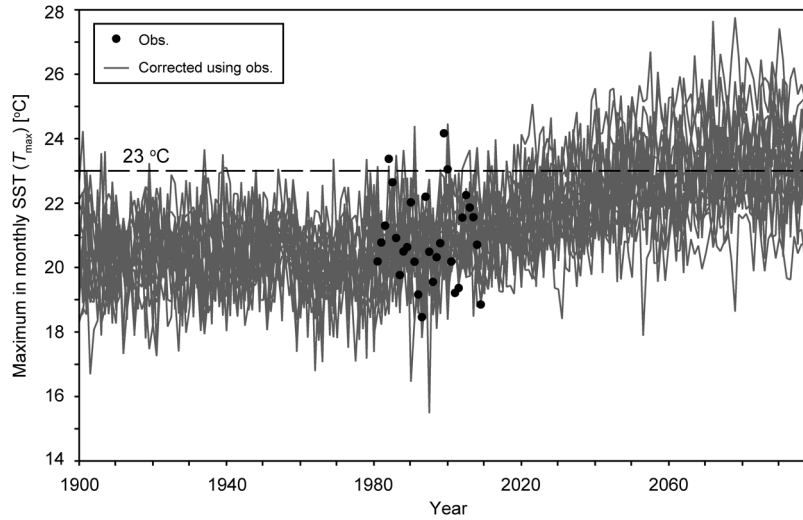
**Figure 5.** (a) Maximum monthly SST ( $T_{max}$ ), (b) annual change rate of Japanese scallop catches from the 1980s ( $C/C_{1980-1989}$ ), and (c) occurrence frequency of unpreferred SST in a decade ( $F$ ), categorized with averaged  $F$  from the 1980s to 2000s ( $\overline{F}_{1980s-2000s}$ ). The values shown in (a) through (c) are averaged in the municipalities with  $\overline{F}_{1980s-2000s}$  levels, respectively. The categorized municipalities are described in Figure 4. The  $n$  in graph legends show the number of municipalities matching with  $\overline{F}_{1980s-2000s}$  levels, respectively. The broken line in (b) shows the upper limit of preferred temperature for Japanese scallop (23°C). No data of  $\overline{F}_{1980s-2000s} \geq 2.0$  and  $1.0 \leq \overline{F}_{1980s-2000s} < 2.0$  in 1980 in (a) and  $\overline{F}_{1980s-2000s} \geq 2.0$  in 1997 and 1998 in (b) exist in any municipalities.

いた地域はおおむね一致しており、90年代後半以降漁獲量が減少傾向にある市町村の70%以上で不適水温が同一期間中に複数年観測されている。垂下養殖漁業を頻繁に行っている日本海・噴火湾に注目した場合においても、不適水温が頻繁に現れる日本海側とそうではない噴火湾周辺海域とではその漁獲量推移に明確な差が現れる。これらのことから、不適水温の発生頻度と漁獲量の増減には強い関連があること、その差が現在の地域特性によるところが大きいと推定される。不適水温の発生頻度 ( $F$ ;  $T_{max} \geq 23^\circ\text{C}$  を示す年代別 (10年間) の年数) が高い地域と低い地域ではどのような違いがあるのかを示すため、Fig. 4で解析した26市町村について、1980年代から2000年代までの3つの年代の平均  $F(\overline{F}_{1980s-2000s} = (F_{1980s} + F_{1990s} + F_{2000s})/3)$  の強弱に従って市町村毎に3レベル ( $\overline{F}_{1980s-2000s} \geq 2.0$ ,  $1.0 \leq \overline{F}_{1980s-2000s} < 2.0$ ,  $\overline{F}_{1980s-2000s} < 1.0$ ) に分類し、各市町村の漁獲量を80年代と比較した増減比 ( $C/C_{1980-1989}$ ),  $T_{max}$ ,  $F$  を算出し解析を行った (Fig. 4, Fig. 5)。すなわち、ホタテガイ

にとっての水温環境の善し悪しに伴う漁獲量増減などの時間変化を地域別に評価した。その結果、不適水温が比較的頻繁に現れる ( $\overline{F}_{1980s-2000s} \geq 2.0$ ) 地域において  $C/C_{1980-1989}$  の減少がみられた (Fig. 5b)。北海道のほぼすべての市町村では、漁業技術の発達に伴って1990年代までは緩やかな増加が見られていたが、1990年代以降は水温環境によって漁獲量増減比に差異が現れている。 $\overline{F}_{1980s-2000s}$  が低い市町村では新規参入の自治体の増加などもあり漁獲量が大きく増加する一方で、 $\overline{F}_{1980s-2000s}$  が高い市町村の多くでは、1990年代以降の漁獲量が著しく減少、あるいはホタテガイ漁業が取り止めとなっていることがわかった。この減少はおおむね1994年前後から始まっているが、この時期の  $T_{max}$  は多くの市町村で不適水温を示していた。ホタテガイの成育期間が垂下漁業で1.5–2年、地撒き漁業で4年程度であること (水島・鳥澤, 2003) を考慮すると、不適水温の発生は複数年の漁獲量に影響を与える可能性がある。これは1990年代以降の  $\overline{F}_{1980s-2000s} \geq 2.0$  を示す地域のように数年毎に不適水温が訪れる環境下では収穫されるホタテガイの多くが環境リスクを負っていることを示唆する。これらの地域の各年代  $F$  を見ると、この領域については平均3.0前後となっており、年代毎に若干ながら上昇していることがわかる (Fig. 5c)。これらのことから  $F$  の上昇、すなわちホタテガイにとっての水温環境の悪化がみられる領域ではホタテガイ漁獲量が増加しにくい、あるいは減少傾向にあることが確認できた。成育不適水温下においては、ホタテ養殖業に対して斃死リスクの増加 (日本水産学会, 1980) や貝殻成長速度の低下 (関野・須川, 1992) などが指摘されており、成育不適水温が頻繁に現れる領域では漁獲努力量に対する効率低下を招くことが懸念される。

#### CMIP5モデル推定 SST を用いた将来予測

ホタテ漁獲量と前浜観測 SST を用いた解析では、不適水温が10年中2–3年よりも高い頻度で現れる領域において、特に漁獲量の減少傾向は強く現れる結果が得られた (Fig. 5)。そこで、ここでは  $F > 3.0$  となるような水温環境になった場合にホタテ漁業に対する水温環境リスクが高まると仮定し、モデル推定 SST を用いた環境リスク評価を行った。環境リスクが高い海域は温暖化に伴って広がることが懸念されるため、沿岸環境値として補正した気候モデルデータを用いて、中程度の  $\text{CO}_2$  排出シナリオである RCP4.5 シナリオを想定した2099年までの昇温についての解析を行った (Fig. 6)。前浜観測 SST を用いて各モデル推定 SST を補正することによって、ホタテ養殖域内の水温環境を1900–2099年まで評価することができる。Fig. 6で示した噴火湾に最も近い観測点では、1900年代、1990年代、2040年代、2090年代の各モデルの  $T_{max}$  はそれぞれ、19.2–21.9°C, 19.6–21.2°C, 21.5–24.3°C, 20.6–25.7°C となった。各モデルの推定  $T_{max}$  はモデルによって最大5°Cの振れ幅があるが、噴火湾湾奥での RCP4.5 シナリオを想定した1990年代–



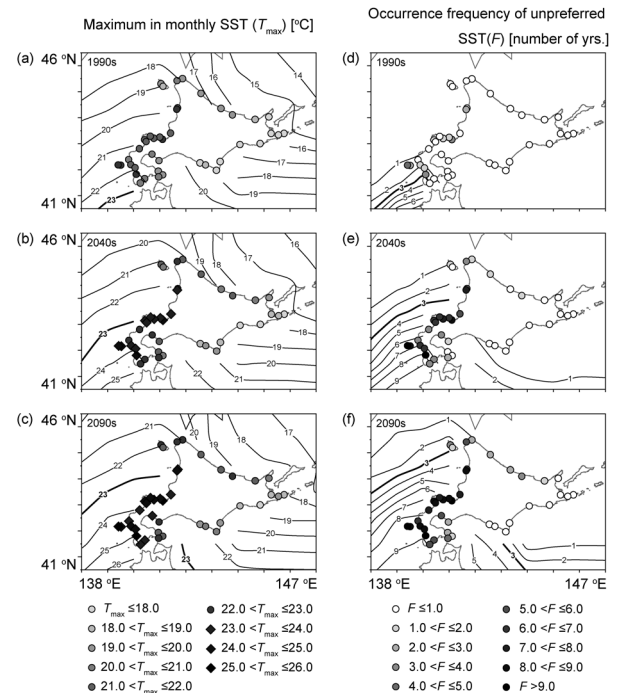
**Figure 6.** The observed foreshore maximum monthly SST ( $T_{\max}$ ) from 1980 to 2009 and the projected  $T_{\max}$ , of which biases were corrected by using foreshore SST from 1900 to 2099 under the RCP 4.5 scenario, when applied to the nearest points to Funka Bay. The projected  $T_{\max}$  obtained by all 17 climate models described in Table 1 is also shown.

2090年代までの $T_{\max}$ 上昇幅 ( $\Delta T_{\max}$ ) は平均で約2.7°Cと推定された。これに従って不適水温も頻繁に現れるようになっており、観測SSTから確認できた $F$ は10年中1年であったが、2030年代以降は漁獲量への環境リスクが高い10年中3年を上回る頻度が現れ、2090年代には10年中7年に至る推定結果が得られた。

### 考察

#### ホタテガイ漁業に対する環境リスク評価

北海道全域について、前述の噴火湾周辺の測点 (Fig. 6) と同様に沿岸水温環境の将来予測とホタテガイに対する環境リスクの評価を行ったところ、海域・地域によって将来の環境リスクは大きく異なる可能性が示された (Fig. 7)。前述の通り、北海道では緯度による変化とは別に東側と西側で水温環境に大きな違いがあることが前浜観測SSTからもわかっているが、将来予測においてもその傾向は維持される。RCP4.5シナリオを想定した時の $\Delta T_{\max}$ は北海道全域でおおむね2–3°Cだったが、北海道南部など太平洋に面した領域の1990年代の $T_{\max}$ は16–18°Cと低いため、2090年代でも18–20°C程度となった。一方で、北海道西部など日本海に面した領域では、1990年代でも21–23°Cに至っており、2090年代の $T_{\max}$ は23–25°Cまで上昇する。ホタテガイにとっての成育環境、すなわち $F$ から見た場合にはその傾向は更に顕著となっており、1990年代には北海道南東部など一部の領域に限定的だった高環境リスク ( $F > 3.0$ ) 領域は2090年代には日本海沿岸部、噴火湾内、オホーツク海沿岸部の一部にまで拡大する可能性があることを示した。これらの傾向は外洋域にも現れており、特に日本海側沿岸部では2040年代から環境リスクの高い領域が拡大す



**Figure 7.** Maximum monthly SST ( $T_{\max}$ ) ((a)–(c)) and occurrence frequency of unpreferred SST ( $F$ ) ((d)–(f)). The simulated results are obtained by averaging model outputs from 17 climate models under the RCP 4.5 scenario. Diamonds or open circles denote values corrected by using the observed foreshore SSTs. Isothermal lines of  $T_{\max}$  in (a)–(c) and  $F$  in (d)–(f) were obtained by averaging 17 climate model outputs and correcting simulated results by using satellite data.

ることがモデル推定分布から得られた。ホタテガイの養殖密度は既に高い領域も多い（島ほか, 2012）ため、養殖適領域の減少は深刻な問題となることが予想される。

本研究で使用した解析データはSSTのみではあるものの、環境リスクが高いと予測された日本海側沿岸・噴火湾・サロマ湖などの垂下養殖業が行われる地域では、表層付近にてホタテガイ成育を行っており、現実的な水温環境リスクが評価できたとと思われる。その一方で、地まき漁業が行われているオホーツク海沿岸部などでは、沿岸底層にて成育を行っているため、環境リスクを過大に評価している可能性がある。また噴火湾など北海道の一部の領域では集中的に採苗器を用いて天然採苗・中間育成が行われている（島ほか, 2012）。ホタテガイの採苗期間は春-夏にかけて表層付近で行われ、稚貝は成貝よりも環境ストレスに対して脆弱であることが知られる（桑原ほか, 2006）ため、成貝以上に水温環境についても配慮が必要である。北海道ホタテ漁業は地まき漁業・垂下養殖漁業ともに天然採苗に依存した生産形態となっているため、採苗成功率の低下は深刻な問題となり得る。桑原ほか（2006）より、ホタテガイ稚貝の適水温を20°Cまでと想定して成貝によるものと同じ手法で簡易的な解析を行ったところ、現在の前浜観測SSTにおいても多くの地域で環境リスクが現れる結果となり、将来予測では北海道のほぼ全域において不適水温が頻繁に現れる予測となった。ただし採苗は1年のうち限られた期間にのみ行われるため、具体的な解析にはより詳細な水温データが必要となると思われる。

#### RCPシナリオ別の環境リスク評価

前述したRCP4.5シナリオは中程度の炭素排出シナリオであるが、本研究ではこれを4つの排出シナリオについて同様にまとめた（Table 2）。排出シナリオによって北海道の沿岸水温の上昇幅には大きな差があり、低炭素社会シナリオ（RCP2.6）では1.5°C程度であるのに対して、高排出シ

ナリオ（RCP8.5）では5°Cを上回る水温増加がみられている。その結果、RCP8.5シナリオを想定した際の高リスク領域は太平洋沿岸を含む北海道のすべての沿岸部に拡大する可能性が示された。その一方で、RCP2.6シナリオではその領域は日本海側沿岸部にのみとなっており、例えば噴火湾内の2090年代の $F$ は日本海の1990年代の $F$ とほぼ同程度に収まることが推定できた。これはホタテガイ漁業にとっても、人為起源のCO<sub>2</sub>排出削減をはじめとする温暖化緩和策が非常に重要な意義を持つことを示唆するものである。

温暖化に対する対策として上記のような緩和策とは別に、起こりつつある温暖化に対して現場でどう対応するか、という温暖化適応策についても考える必要がある（藤井, 2013）。現場としてコストや労働資源など許容できる範囲は限られるが、対応例として養殖場を $T_{max}$ の低い領域への移動、増養殖を行うホタテガイ種の再検討などがあげられる。ただし、前者については沖合数kmと既に領域が区切られた中では対応が限られ、後者については貝毒など他の環境適応についても考慮する必要があり、培養実験や数値計算などによる慎重な評価が求められる。

本研究ではSSTに焦点を当てて、CMIP5モデルデータをシンプルな手法を用いて補正・解析を行った。解析に用いた補正手法はシンプルであるゆえにさまざまな環境解析に適用可能なものである。例えば前述したような温暖化適応策としてホタテガイ養殖場の適地を調べる際に現在の水温環境データが揃っている場所であれば、将来の環境リスクを定量的に評価することが可能となる。ただし、補正には豊富な環境データから気候値を構築できることが絶対条件となる。本研究は、沿岸の環境及び生態系の将来予測を行ううえでの簡易的な手法を提案するとともに、沿岸環境データの重要性を示唆するものである。ホタテガイ地まき漁業をはじめとする沿岸生態系に対する解析をより詳細に

**Table 2.** Simulated maximum monthly SST ( $T_{max}$ ) and frequency of unpreferred SST ( $F$ ) appearance in RCP scenarios and oceanic regions. Projected values at 2090s under four RCP scenarios (RCP 2.6, 4.5, 6.0 and 8.5) are averaged for models and oceanic regions, respectively. Changes in values between 1990s and 2090s are also shown. Four oceanic regions (Sea of Japan, Funka Bay, Sea of Okhotsk and Pacific Ocean) in this study are defined by domains shown in broken lines in Fig. 2.

Regions	Variables	Historical		RCP2.6			RCP4.5		RCP6.0		RCP8.5	
		1990s	2090s	Change	2090s	Change	2090s	Change	2090s	Change		
Sea of Japan	$T_{max}$ [°C]	21.7	23.2	+1.58	24.3	+2.63	25.0	+3.28	26.9	+5.20		
	$F$ [num. of yrs.]	1.51	5.65	+4.14	7.95	+6.44	8.90	+7.39	9.80	+8.29		
Funka Bay	$T_{max}$ [°C]	19.9	21.4	+1.49	22.4	+2.52	23.0	+3.13	24.9	+5.02		
	$F$ [num. of yrs.]	0.05	1.36	+1.32	3.54	+3.49	4.84	+4.79	8.33	+8.28		
Sea of Okhotsk	$T_{max}$ [°C]	19.4	20.9	+1.50	22.0	+2.59	22.7	+3.27	24.9	+5.49		
	$F$ [num. of yrs.]	0.10	1.12	+1.01	2.82	+2.72	4.29	+4.18	7.76	+7.65		
Pacific Ocean	$T_{max}$ [°C]	17.0	18.3	+1.25	19.3	+2.31	19.9	+2.88	22.0	+5.03		
	$F$ [num. of yrs.]	0.00	0.01	+0.01	0.14	+0.14	0.36	+0.36	3.32	+3.32		



行うためには、今後も継続的に沿岸環境データを集める必要がある。今後の課題として、ホタテガイに対する酸性化による影響などを含めた複合的な影響評価などがあるが、これらの評価についても詳細かつ多彩な観測項目を持った環境データが必要となる。

## 謝 辞

本研究を行うにあたって、ホタテガイの育成環境や北海道環境データに関する知見など貴重な意見を頂いた、地方独立行政法人北海道立総合研究機構水産研究本部中央水産試験場、函館水産試験場、釧路水産試験場、網走水産試験場、稚内水産試験場の研究員の方々に感謝する。本解析中使用した前浜観測 SST は、公益社団法人北海道栽培漁業振興公社調査事業本部より提供頂いた各観測点で測定された日データを取りまとめたものである。また沿岸観測 SST は、北海道立総合研究機構水産研究本部中央水産試験場資源管理部海洋環境グループと北海道水産林務部水産局水産振興課研究普及グループの共同研究（沿岸環境調査）により収集され、現在も継続して蓄積されているデータである。未公表データの使用を快諾していただいた道総研中央水産試験場および北海道水産林務部の方々に感謝する。また、貴重なデータを提供して頂いた各機関の皆様にも深く御礼申し上げる。本研究は文部科学省委託事業気候変動リスク情報創生プログラム「課題対応型の精密な影響評価」のもとで行われた。

## 引用文献

藤井賢彦 (2013) 海洋酸性化の人間社会への影響評価、将来予測および対策。海洋と生物, **207**, 366–371。  
 北海道栽培漁業振興公社 (1980–1999) 養殖漁場海況観測取りまとめ。北海道栽培漁業振興公社, 札幌。  
 北海道栽培漁業振興公社 (2000–2009) 北海道沿岸漁場海況観測取りまとめ。北海道栽培漁業振興公社, 札幌。  
 北海道水産林務部 (1980–2009) 北海道水産現勢。北海道水産林務部, 札幌。  
 IPCC (2013) Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Stocker, T. F., D. Qin, G. K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P. M. Midgley (eds.), Cambridge University Press, Cam-

bridge, United Kingdom and New York, NY, USA.  
 桑原久美・明田定満・小林 聡・竹下 彰・山下 洋・城戸勝利 (2006) 温暖化による我が国水産生物の分布域の変化予測。地球環境, **11**(1), 49–57。  
 水島敏博・鳥澤 雅 (2003) 「新北のさかなたち：漁業生物図鑑」。上田吉幸, 前田圭司, 嶋田 宏, 鷹見達也編, 北海道新聞社, 札幌, 645 pp。  
 Moss, R. H., J. A. Edmonds1, K. A. Hibbard, M. R. Manning, S. K. Rose, D. P. Vuuren, T. R. Carter, S. Emori, M. Kainuma, T. Kram, G. A. Meehl, J. F. B. Mitchell, N. Nakicenovic, K. Riahi, S. J. Smith, R. J. Stouffer, A. M. Thomson, J. P. Weyant and T. J. Wilbanks (2010) The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, **463**, 747–756。  
 日本水産学会編 (1980) 「ホタテガイの増養殖と利用：増養殖の体系化に向けて」。恒星社厚生閣, 東京, 126 pp。  
 Okunishi, T., S. Ito, T. Hashioka, T. T. Sakamoto, N. Yoshie, H. Sumata, Y. Yara, N. Okada and Y. Yamanaka (2012) Impacts of climate change on growth, migration and recruitment success of Japanese sardine (*Sardinops melanostictus*) in the western North Pacific. *Climate Change*, **115**, 485–503。  
 Ries, J. B., A. L. Cohen and D. C. McCorkle (2009) Marine calcifiers exhibit mixed responses to CO<sub>2</sub>-induced ocean acidification. *Geology*, **37**, 1131–1134。  
 Reynolds, R. W., T. M. Smith, C. Liu, D. B. Chelton, K. S. Casey and M. G. Schlax (2007) Daily high-resolution-blended analyses for sea surface temperature. *J. Clim.*, **20**, 5473–5496。  
 関野哲雄・須川人志 (1992) 高水温下におけるホタテガイ稚貝の成長。青森県水産増殖センター事業報告, **21**, 81–84。  
 島 一雄・關 文威・前田昌調・木村伸吾・佐伯宏樹・桜本和美・末永芳美・長野 章・森永 勤・八木信行・山中英明 (2012) 「最新水産ハンドブック」。講談社, 東京。  
 Taylor, K. E., R. J. Stouffer and G. A. Meehl (2012) An Overview of CMIP5 and the experiment design. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **93**, 485–498, doi:10.1175/BAMS-D-11-00094.1。  
 屋良由美子・藤井賢彦・山中康裕・岡田直資・山野博哉・大島和裕 (2009) 地球温暖化に伴う海水温上昇が日本近海の造礁サンゴの分布と健全度に及ぼす影響評価。日本サンゴ礁学会誌, **11**, 131–140。  
 Yara, Y., K. Oshima, M. Fujii, H. Yamano, Y. Yamanaka and N. Okada (2011) Projection and uncertainty of the poleward range expansion of coral habitats in response to sea surface temperature warming: A multiple climate model study. *Galaxea, J. Coral Reef Stud.*, **13**, 11–20。  
 Yara, Y., M. Fujii, H. Yamano and Y. Yamanaka (2014) Projected coral bleaching in response to future sea surface temperature rises and the uncertainties among climate models. *Hydrobiologia*, **733**, 19–29, doi:10.1007/s10750-014-1838-0。