



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	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
Author(s)	屋良, 由美子; 藤井, 賢彦; 山中, 康裕 他
Citation	日本サンゴ礁学会誌, 11(1), 131-140 https://doi.org/10.3755/jcrs.11.131
Issue Date	2009-12
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/56482
Type	journal article
File Information	jcrs11_131.pdf



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

屋良由美子^{1,*}・藤井賢彦¹・山中康裕¹・岡田直資¹・山野博哉²・大島和裕¹

¹北海道大学大学院地球環境科学研究院 〒060-0810 札幌市北区北 10 条西 5 丁目

²国立環境研究所地球環境研究センター 〒305-8506 茨城県つくば市小野川 16-2

要旨 地球温暖化に伴う海水温上昇は、造礁サンゴ（以下、サンゴ）の生息域を高緯度側に移動（北半球においては北上）させる、或いは白化の規模・頻度・強度を増大させることで、将来のサンゴの分布や健全度に多大な影響を及ぼすと考えられる。本研究では、高解像度気候予測シミュレーションで得られた月平均海面水温（SST; Sea Surface Temperature）から見積もられた簡易指標を用いて、日本近海を対象に温暖化に伴う SST 上昇が日本近海の潜在的なサンゴの分布および健全度に及ぼす影響を評価した。その結果、現在は南九州沿岸に存在する主なサンゴ礁の形成北限と新潟・千葉沿岸にある高緯度サンゴの分布北限が、21 世紀末にはそれぞれ北部九州沿岸と青森・岩手沿岸に至る可能性が示された。また、南西諸島ではサンゴの白化や大量死をもたらす深刻な白化を誘発するような高水温が出現する頻度が増え、現在では単発的に報告されているサンゴの白化が、21 世紀半ば以降にはより通常の現象として認識される可能性があることが示唆された。

キーワード サンゴ, 地球温暖化, 海水温上昇, 北上, 白化, 気候予測シミュレーション

はじめに

造礁サンゴはサンゴ礁を形成する（能力がある）サンゴのことであり、石灰質の硬い骨格を持ち、体内に褐虫藻を共生させている。造礁サンゴ（以下、サンゴ）は褐虫藻にすみかと無機栄養塩を提供し、褐虫藻はサンゴに光合成産物を提供している。この共生関係を獲得したことによって、サンゴは貧栄養海域での繁栄に成功した。ところが、高水温、低水温、強光、紫外線といったサンゴにとっての環境ストレスによってこの共生関係が崩れるとサンゴは褐虫藻を失う。この現象が白化と呼ばれるもので、透明なサンゴ組織を通して石灰質の白色の骨格が透けて見えることに由来する。特に夏季の水温が平年よりも高い状態が続くと白化は引き起こされ、長期化すると斃死する (Hoegh-Guldberg 1999)。また、白化の程度は、水温の他に、海域、水深、潮流の速

さや透明度によっても異なる（中村ら 2006）が、実際にはサンゴの白化は様々な環境ストレスの複合事象であると考えられている。

日本近海は世界のサンゴ礁分布の北限域にあたり (Yamano et al. 2001), 南から北へ、サンゴ礁域から高緯度サンゴ群集域への顕著な群集変化が観察される (堀 1980; 環境省・日本サンゴ礁学会 2004; 山野 2008)。地球温暖化の進行は多様な要因を誘発し、結果としてサンゴの分布や健全度に影響を及ぼすことが懸念されるが、特に海水温上昇は、サンゴの分布域を高緯度側へ移動（北半球では北上）させる一方、サンゴの白化の規模・強度・頻度を増大させることが予想される。現に近年、モニタリングの結果から世界的に白化の頻度が急増していることが報告されており、温暖化に伴う海水温上昇との関係が盛んに議論されるようになった（例えば Hoegh-Guldberg 1999; Douglas 2003; Hoegh-Guldberg et al. 2007; IPCC 2007; Baker et al. 2008）。そして、サンゴ礁生態系の保全および周辺の地域社会への影響緩和に向けたガイドラインとなり得るような確度の高い温暖化予測が社会的に求められるようになり、

*連絡著者

E-mail: yara@ees.hokudai.ac.jp

担当編集者: 杉原 薫

スーパーコンピュータを用いた気候予測シミュレーションで得られた海面水温 (SST; Sea Surface Temperature) に基づいて, 将来の温暖化に伴う海水温上昇がサンゴ礁に及ぼす影響を評価する研究がこれまでに幾つか行なわれてきた (Hoegh-Guldberg 1999; Sheppard 2003; Donner et al. 2005, 2007)。

これらの影響評価を踏まえて, IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change, 気候変動に関する政府間パネル) 第4次評価報告書 (AR4, Fourth Assessment Report; IPCC 2007) では, 「2030~2050年には, 世界の多くのサンゴ礁において, 白化が毎年のように発生する」と警鐘している。しかし, これまでの影響評価は海洋モデルの空間解像度が 2.5° ~ 3.75° 程度の中解像度気候モデルによる予測シミュレーションの結果に基づいている (例えば Donner et al. 2005)。このような中解像度気候予測シミュレーションでは, サンゴが生息する沿岸域の平均的な海洋の状態を記述することはできるが, 空間解像度の制約により, 例えば沖縄本島, 或いは日本最大のサンゴ礁である石西礁湖といった, より局所的なサンゴの影響評価には適さない。さらに, サンゴの分布や白化は, 黒潮など日本近海の海流の強さや方向, また局所的な海水温上昇は中規模渦のようなより空間スケールの小さい現象によっても影響を受けると考えられるが, 中解像度気候予測シミュレーションではこれらの海洋物理のプロセスを取り扱うことができない。

本研究では, IPCC AR4 にも貢献し, 現時点では世界で最も空間解像度が高く, また黒潮など日本近海の海流の再現性が高い (Sakamoto et al. 2005) 高解像度気候モデル (MIROC3.2 高解像度版 (hires)) による予測シミュレーションで得られた SST に基づき, 将来の地球温暖化に伴う SST 上昇がサンゴの分布と健全度に及ぼす影響, すなわち (1) 日本近海の高緯度サンゴ群集域 (九州南部~本州近海) のサンゴ生息域の高緯度側への移動 (北上) と (2) サンゴ礁域 (南西諸島近海) におけるサンゴの白化を, 簡易指標を用いて定量的に評価した。本来, サンゴの北上や白化には環境ストレスに対する生物適応, 白化からの回復時間, 他海域からのサンゴ幼生の分散・加入, 藻場など他の生物・生態系との競合や現在は熱帯・亜熱帯域にのみ分布する種の北上といった複合的な影響を考慮する必要があるが, 本研究では手始めに, 気候モデルによる予測シミュレ

ーションで出力される大気・海洋に関する物理変数のうち, SST のみを用いて温暖化時の潜在的な影響評価を行った。

方法

データ

月平均 SST は, 東京大学/国立環境研究所/海洋研究開発機構で開発された高解像度気候モデル MIROC3.2 (hires) (K-1 model developers 2004) のシミュレーションから得られた 1980~2099 年の結果を用いた。1980~1999 年は 20 世紀再現シミュレーションの結果を, 2000~2099 年は IPCC AR4 の SRES-A1B (高成長型社会) シナリオの下に実施された温暖化予測シミュレーションの結果を使用した。このシナリオ下での世界平均地上気温は, 最良見積り値で 21 世紀末に約 2.8°C 上昇すると予測されている (IPCC 2007)。気候モデルにはバイアスが存在するため, 影響評価に使用した 2000 年以降の SST は, 以下のように見積もった。まず, A1B シナリオに基づく気候予測シミュレーションで得られた月平均 SST と 20 世紀再現シミュレーションから得られた月平均 SST 気候値 (1980~1999 年の 20 年間の平均値) との偏差を求めた。次に, その SST 偏差を, 観測の月平均 SST 気候値 (米国海洋大気庁で提供されている SST (NOAA OISST; Reynolds et al. 2007) の 1982~1999 年の 18 年間の平均値) に加え, 2000 年以降の SST とした。このバイアスを除いた SST を使用して以降解析を行った。MIROC3.2 (hires) の海洋モデルの空間解像度は東西約 0.28° × 南北約 0.19° (約 20 km) と, IPCC AR4 に取り上げられた 25 モデルの中では最も空間解像度が高く, 従来の中解像度気候モデルでは表現できなかった沖縄本島や九州南部・北部の地形, 或いはサンゴ幼生の分散・加入に重要な役割を果たす黒潮の離岸など日本近海の海流を現実的に再現できている (Sakamoto et al. 2005)。但し, MIROC3.2 (hires) は気候感度が高く (つまり, 温室効果ガス濃度増加に対する気温上昇の度合いが他の気候モデルに比べて大きい), 気温上昇の大きさを IPCC AR4 の最良見積り値に合わせるため, 温暖化に伴う 21 世紀の SST 上昇幅を 0.75 倍にする補正を施した (Takahashi et al. 2007)。モデルの各空間格子

内のサンゴ礁の有無は、Reefbase の Reef Basemap のサンゴ礁地図 (<http://reefgis.reefbase.org/>) を参照して判別した。

評価指標

サンゴの分布 (北上) 日本近海におけるサンゴの分布北限の評価には、以下の3つの簡易指標を導入した。サンゴ礁形成北限としては最寒月 SST の 18℃ 線 (鹿児島県種子島・馬毛島におけるサンゴ礁地形; 堀 1980; 中井 1990; 菅ほか 2005) で定義した。また、大規模な高緯度サンゴ群集成立北限と高緯度サンゴ分布北限を、それぞれ最寒月 SST の 13℃ 線 (長崎県壱岐における大規模なサンゴ群集とサンゴ礁地形; Yamano et al. 2001) と 10℃ 線 (新潟県佐渡島におけるキクメイシモドキ分布; Honma and Kitami 1978) で定義した。

サンゴの健全度 (白化) サンゴの白化や大量死をもたらす深刻な白化を評価する簡易指標には、Donner et al. (2005) によって提案された Degree Heating Month (DHM; °C month) を導入した。DHM は、NOAA Coral Reef Watch が衛星観測の SST に基づいて週に2回提供している熱ストレスによる白化の危険レベルを示す指標である DHW (Degree Heating Week) を、月平均 SST から評価できるように開発された白化の指標である。1DHM (°C month) とは月平均 SST が最暖月 SST の気候値より 1℃ 高い状態を表し、DHM が 1 (°C month) 以上 2 (°C months) 未満のときに白化、2 (°C months) 以上のときに大量死をもたらす深刻な白化であると診断される (Donner et al. 2005)。一方で、DHW は、4 (°C weeks) 以上 8 (°C weeks) 未満のときに白化、8 (°C weeks) 以上のときに大量死をもたらす深刻な白化であると診断される (詳細は Coral Reef Watch のホームページ <http://coralreefwatch.noaa.gov/satellite/index.html> 参照)。

指標の妥当性の確認するために、DHW が存在する 2001~2008 年について DHW から診断される白化の出現頻度と観測の月平均 SST (NOAA OISST) から見積もった DHM から診断される白化の出現頻度の水平分布について比較すると、DHM の出現頻度は DHW の出現頻度よりも過小評価であった。この2つの指標の違いに関しては検討の余地があるが、先行研究 (Donner et al. 2005, 2007) でも使用

されているように、本研究においても DHM が現在の白化をある程度表現できる妥当な簡易指標であると判断し、温暖化の評価に使用した。

結果

将来の平均的な「気候」状態に焦点を当てたモデルの気候予測という性質上、特定の月や年の「気象」状態を議論するのではなく、ある程度長い期間の平均的気象状態である「気候」状態 (本研究では 10 年間) に対して影響評価を行った。つまり、サンゴの分布の北上に関しては 10 年平均、サンゴの白化に関しては 10 年間に出現する頻度 (確率) として地球温暖化の影響を評価した。

サンゴの分布 (北上)

日本近海のサンゴ礁および高緯度サンゴの分布をカバーできる亜熱帯から温帯にかけての領域 (北緯 21~42 度, 東経 119~143 度) における、2000~2099 年の 10 年毎 (2000~2009 年, 2010~2019 年, 2020~2029 年, 2030~2039 年, 2040~2049 年, 2050~2059 年, 2060~2069 年, 2070~2079 年, 2080~2089 年, 2090~2099 年) の潜在的なサンゴ礁形成北限 (18℃ 線), 高緯度サンゴ群集成立北限 (13℃ 線), および高緯度サンゴ分布北限 (10℃ 線) の各等温線の位置を図 1 に示す。緑線・青線・赤線はそれぞれ、気候予測シミュレーションの結果による 18℃, 13℃, 10℃ 線を示し、細線は各年、太線は 10 年平均の位置を表す。また、観測として NOAA OISST の 9 年 (2000~2008 年) 平均の各等値線を黒太線で示した。SST の経年変動によって、各年の等温線の位置は毎年大きく変動するが、太線で示した 10 年平均で見ると、温暖化による SST 上昇に伴い各等温線が北上していく様子がわかる。気候予測シミュレーションの結果を用いた評価では、21 世紀初頭には南九州沿岸に存在しているサンゴ礁形成北限 (18℃ 線), 島根・茨城沿岸にある高緯度サンゴ群集成立北限 (13℃ 線) と新潟・千葉沿岸にある高緯度サンゴの分布北限 (10℃ 線) が、21 世紀末にはそれぞれ北部九州沿岸, 石川・福島沿岸と青森・岩手沿岸まで北上する可能性が示された。

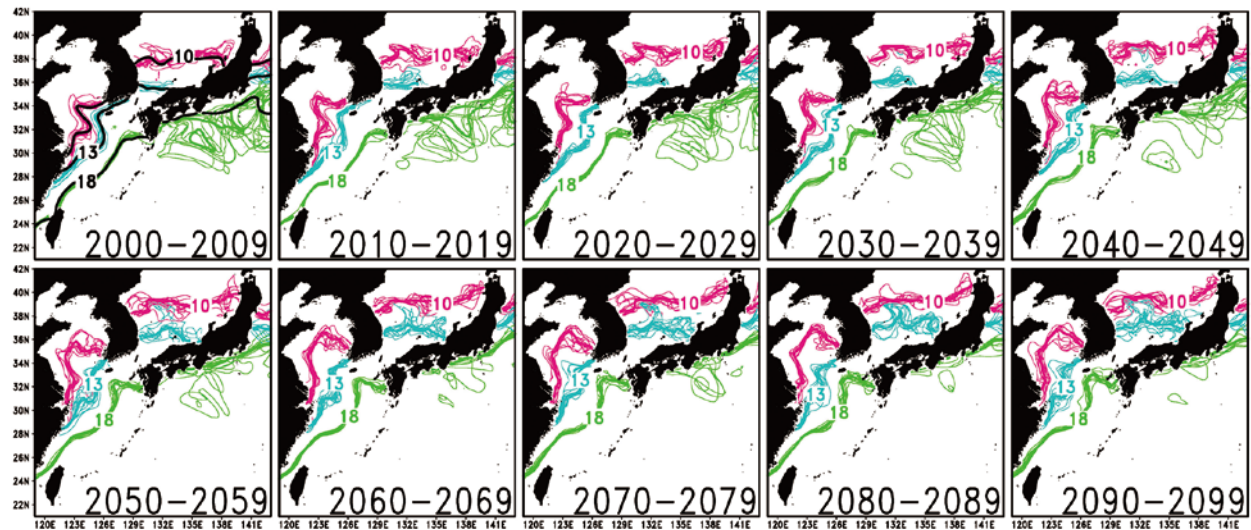


図 1 高解像度気候予測シミュレーションで得られた海面水温 (SST; Sea Surface Temperature) に基づく簡易指標を用いて, 2000~2099 年の 10 年毎の日本近海におけるサンゴ生息域の北限位置。最寒月 SST の 18°C 線 (緑線) はサンゴ礁形成北限, 13°C 線 (青色) は高緯度サンゴ群集成立北限, 10°C 線 (赤線) は高緯度サンゴの分布北限を表す。細線は各年, 太線は 10 年平均の等温線を表す。また, 左上図の黒太線は 2000~2008 年 (9 年間) の観測値 (NOAA OISST) を表す

Fig. 1 Projected northern limit of coral and coral reef distribution in seas close to Japan, obtained by using projected monthly-mean sea surface temperature by a high-resolution climate projection model and three simplified indices which express the northern limit of coral and coral-reef distribution, in 2000 through 2099. The isothermal lines of 18°C (green lines), 13°C (blue lines), 10°C (red lines) in the coldest month represent the northern limit of subtropical coral reefs, high-latitude coral reefs, and high-latitude coral habitat, respectively. Thin and thick lines denote the model results in each year and the 10-year average of each 10 years, respectively. Black thick lines in the left upper panel denote the observed values (NOAA OISST) averaged from 2000 to 2008 (nine years)

サンゴの健全度 (白化)

サンゴ礁が現存する南西諸島近海 (北緯 23~31 度, 東経 122.5~130.5 度) の領域において, 2000~2009 年, 2010~2019 年, 2020~2029 年, 2030~2039 年, 2040~2049 年, 2050~2059 年, 2060~2069 年, 2070~2079 年, 2080~2089 年, 2090~2099 年の 10 年毎に, サンゴの白化 (図 2a) あるいは大量死をもたらす深刻な白化 (図 2b) を引き起こす可能性がある高水温が出現する頻度, すなわち各 10 年間で DHM から診断される白化と大量死をもたらす深刻な白化が起こる確率の水平分布を図 2 に示す。値が 1 であれば毎年, 0.5 であれば 10 年間に 5 年の頻度で, 高水温の熱ストレスによって白化が出現する可能性を示唆している。21 世紀初頭には, 白化を引き起こす可能性のある高水温の出現頻度はほとんど見られないが, 温暖化による SST 上昇によって高水温の出現頻度および強度は徐々に増大していき, 21 世紀半ば以降になると大量死をも

たらす深刻な白化を引き起こす可能性のある高水温が 10 年間に 10 年, つまり, 毎年のように出現するようになることが予測された。この結果から, 将来の地球温暖化によって日本最大のサンゴ礁である石西礁湖を含むこの地域のサンゴ礁は深刻な被害を受ける可能性があるとし唆される。

考察

観測との比較

サンゴの分布 (北上) 図 1 の左上 (2000~2009) に示した 3 つの観測の等値線 (黒太線) と気候予測シミュレーションの結果から評価した各等値線 (18°C: 緑, 13°C: 青, 10°C: 赤) の位置を比較すると, いずれの等値線もバイアスを除去したためほぼ一致している。しかし, 現存するサンゴの分布と比較すると, 特に最寒月 SST の 13°C 線は大規模な高緯度

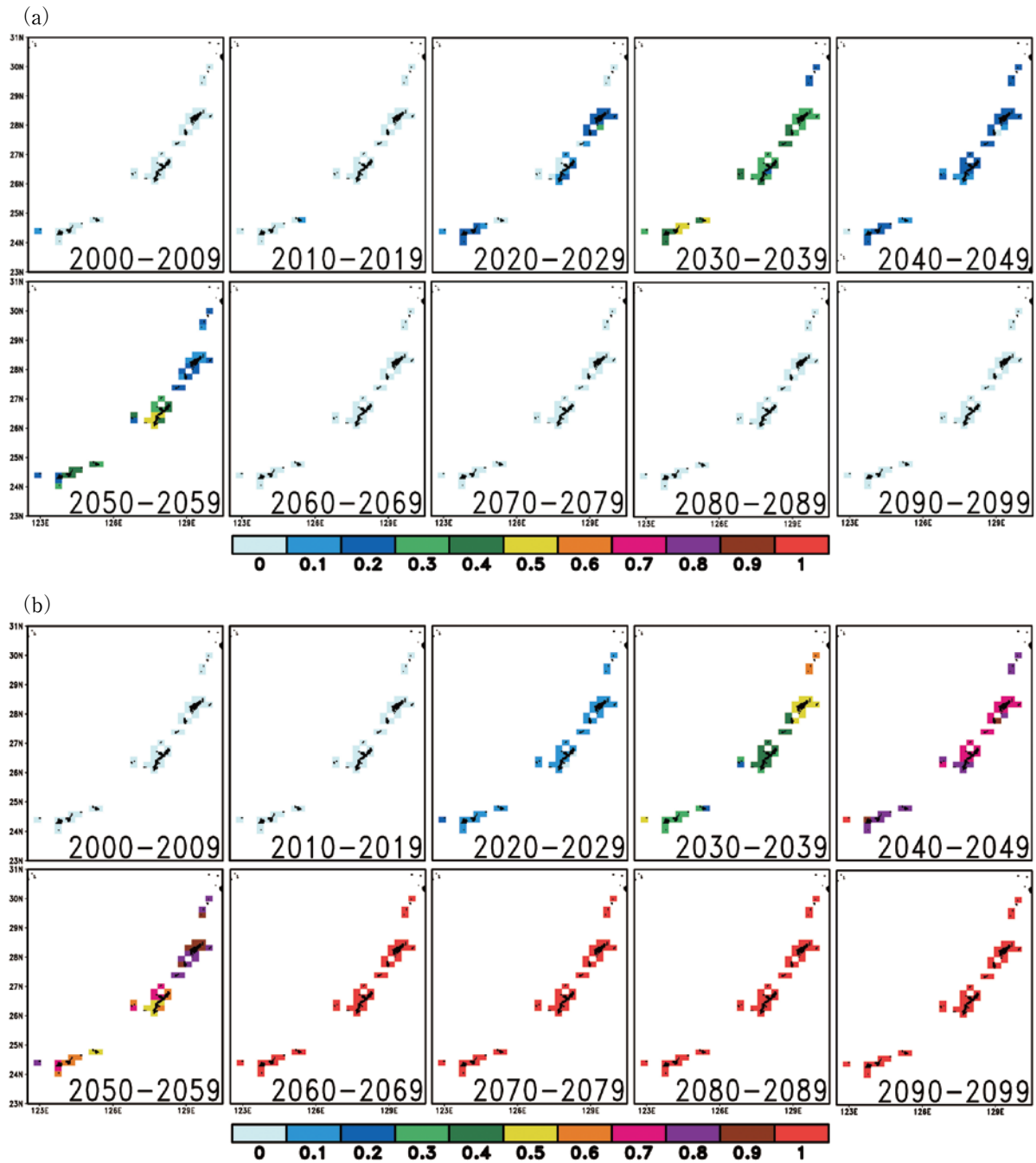


図 2 高解像度気候予測シミュレーションで得られた海面水温 (SST; Sea Surface Temperature) に基づく簡易指標を用いて、2000～2099 年の 10 年毎の南西諸島におけるサンゴの (a) 白化 ($1 \leq \text{DHM} < 2$), あるいは (b) 大量死をもたらす深刻な白化 ($\text{DHM} \geq 2$) を引き起こす可能性のある高水温が出現する確率 (頻度)。色は図の下に示したカラーバーの確率の値を示す。値が 1 であれば毎年、0.5 であれば 10 年間に 5 年の頻度で、このような高水温が出現する可能性があることを示している。サンゴが現在生息している海域のみに色をつけた

Fig. 2 Projected probability (frequency) of high water temperature appearance that potentially induces coral (a) bleaching ($1 \leq \text{DHM} < 2$) and (b) severe bleaching or death ($\text{DHM} \geq 2$) in the Ryukyu Islands, obtained by using projected monthly-mean sea surface temperature by a high-resolution climate projection model and a simplified evaluation metric for stress of corals on the water temperature (Degree Heating Month DHM), in 2000 through 2099. A color scale for the probability (frequency) is shown on bottom of figures. The probability of 1 or 0.5 represents that such high water temperature appears in every year or five times a decade, respectively. The probability is shown only in oceanic regions in which corals exist currently

サンゴ群集成立北限域と言われる熊本県天草近海, 高知県南岸 (竜串近海), 和歌山県南岸 (串本近海) よりも北に位置していることが分かる。両者の相違の原因の1つとして, 最寒月 SST 以外の要因がサンゴの分布に関わっていると考えられる。

サンゴの健全度 (白化) 観測データ (NOAA OISST) の存在する 1982~2008 年について, 観測の月平均 SST (NOAA OISST) から見積もった DHM (以下, 観測 DHM) と MIROC3.2 (hires) の予測シミュレーションによる月平均 SST から見積もった DHM (以下, モデル DHM) のそれぞれから診断される白化の出現確率の水平分布について比較を行った。石西礁湖においてサンゴの白化が出現した年 (1998 年, 2001 年, 2003 年, 2005 年, 2007 年) を中心に, 観測 DHM とモデル DHM によって見積もられる白化の出現確率を比較すると, モデル DHM は過小評価であった。これは MIROC3.2 (hires) における SST の年々変動の振幅が観測より若干小さいためである。

温暖化が進む 2010 年以降には海水温が大きく上昇し, 気候予測シミュレーションの結果から見積もった DHM は水温上昇トレンドの大きさに依存する。これらの点に関しては, 今後 IPCC AR4 に取り上げられた MIROC3.2 (hires) 以外の 22 モデルの予測シミュレーションや A1B 以外の温室効果ガス排出シナリオの結果を用いた解析を行なうことで不確実性を検討していく。

サンゴの分布 (北上) とサンゴの健全度 (白化) の同時評価

以上で紹介したサンゴの北上と白化に関する簡易指標を, 日本近海のサンゴ生息域 (最寒月 SST の 10℃ 線以南) を対象に同時に適用したらどうなるか? 2000~2099 年の 10 年毎の結果を図 3 に示す。結果は, サンゴの北上と白化が同時進行することを示しているが, 実際にこのようなことが起こり得るかどうかは, これまでのモニタリング観測の結果を踏まえて検討する必要がある。

本研究における白化の評価は現在サンゴが生息す

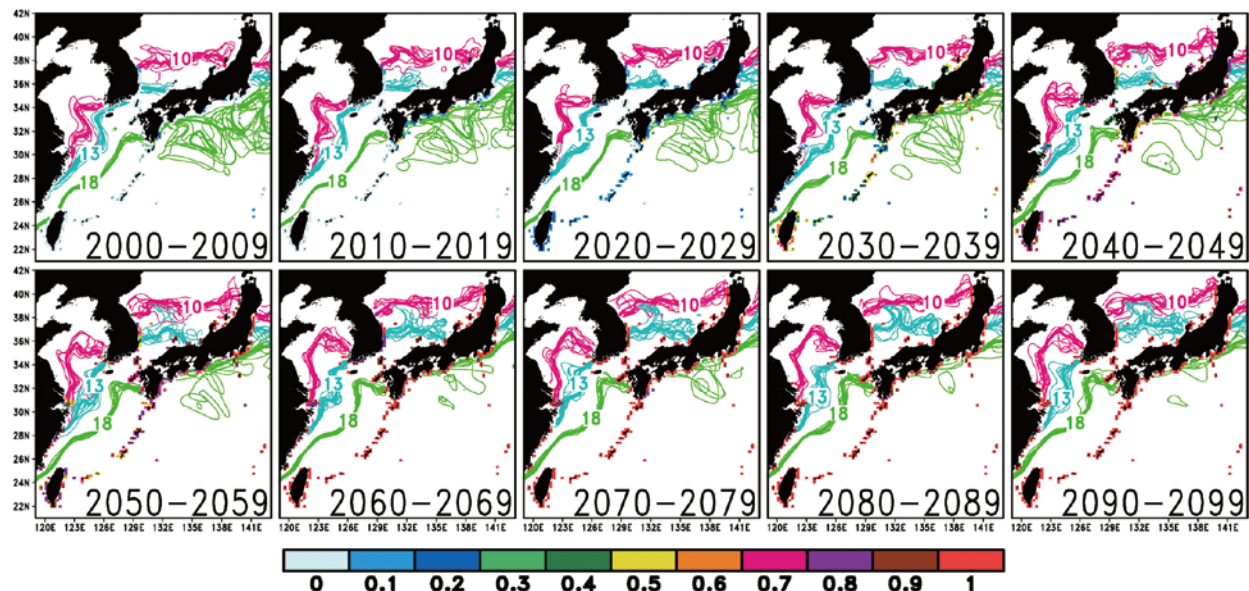


図 3 高解像度気候予測シミュレーションで得られた海面水温 (SST; Sea Surface Temperature) に基づく簡易指標を用いて, 2000~2099 年の 10 年毎の, 日本近海におけるサンゴ生息域 (最寒月 SST の 10℃ 線以南) の北限位置と大量死をもたらす深刻な白化 (DHM $\geq$ 2) を引き起こす可能性のある高水温が出現する確率 (頻度)

Fig. 3 Projected northern limit of coral and coral reef distribution and probability (frequency) of high water temperature appearance that potentially induces severe bleaching or death of corals (DHM $\geq$ 2) in seas close to Japan, obtained by using projected monthly-mean sea surface temperature by a high-resolution climate projection model and simplified indices, in 2000 through 2099. Definition of the simplified indices is the same as in Figs. 1 and 2

る場所での海水温上昇に基づいて行なっているため、現在は熱帯・亜熱帯域のみに分布する種のサンゴが北上してきた場合については評価できていない。また、サンゴは種類によって白化しやすい種、白化しても回復しやすい種、白化後に死亡しやすい種があり (Baird and Marshall 2002; Kayanne et al. 2002)、さらに同種でも白化しやすさには個体差がある。これらの白化感受性の違いはサンゴと共生する褐虫藻の違いによるのではないかと考えられている (日高 2006)。地球温暖化は急速に進行しているため、サンゴや褐虫藻がその変化に対して遺伝子的変化によって適応することは困難であると予想されるが、現存するストレス耐性の高い褐虫藻を新たな共生相手に選ぶことでサンゴが現在よりも高い海水温に対する耐性を持つ可能性も考えられる (Kayanne et al. 2002)。

サンゴの分布を予測する上で考える必要のあるサンゴ幼生の分散・加入に関しては、灘岡・波利井 (2004) が指摘しているように、サンゴ幼生の生物的行動 (遊泳→探索 (定着場所を探す) →定着というプロセス) や定着に好適な環境または基質や競合種 (大型藻類) について検討する余地がある。また、サンゴ幼生が分散・加入したとしても、同時にオニヒトデやサンゴ食巻貝などの分散・加入も予想されるため、食害についても併せて考慮する必要がある。さらに、現在の大規模な高緯度域サンゴ群集の北限域にあたる熊本県天草近海、高知県南岸 (竜串近海)、和歌山県南岸 (串本近海) で見られるように、サンゴと大型海藻は光の当たる岩礁という生息場所をめぐる競争関係にある (野島・岡本 2008) ため、定着後の競争関係の影響を受けることも考えられる。

サンゴ幼生の分散・加入によるサンゴの分布拡大には海流が関わっており、特に太平洋側では黒潮が重要な影響を及ぼすと考えられている。Sakamoto et al. (2005) は、温暖化が進行した 21 世紀後半には日本列島の太平洋を流れる黒潮の流速が最大で現在の 20~30% 程度速くなることを示しており、このことから将来的には黒潮上流域から太平洋側の日本近海へのサンゴ幼生の分散・加入が促進されると考えられる。また彼らの結果によると、黒潮の流路は現在の平均的な位置である銚子沖から日本列島を離れる緯度 (離岸緯度) と大きく変化しない。よって、将来の太平洋側での黒潮によるサンゴの分布北

限は銚子以北には大きく拡がらないと予想される。

以上のことより、海水温のみによる評価でサンゴが生息 (定着) 可能な海洋環境であると判断できたとしても、実際にサンゴが生息できるとは限らず、海水温以外の条件についても検討する必要がある。

おわりに

本研究では、現在のサンゴと SST との関係に当てはめた簡易指標を用いて、高解像度気候モデルの温暖化予測シミュレーションによって得られた月平均 SST から日本近海の潜在的なサンゴの分布および健全度への影響評価を試みた。今回の結果は将来の日本近海におけるサンゴの分布や健全度が大きく変わり得ることを示唆する結果となった。しかし、サンゴへの温暖化影響の評価・予測をより精確に行なうためには、モデルにおける SST の再現性を詳細に調べ、それに基づく適切な指標の設定が必要であると考えられる。

今後はモニタリング研究と連携しつつ、今回注目した海水温以外のサンゴにとってのストレス要因、つまり強光・紫外線・低塩分・富栄養化・土砂流入・海流など (Maina et al. 2008) の影響を加味した新しい評価指標を作成し、評価する必要がある。また、地域的特質である地形・海洋汚染・乱獲、さらには、ストレス要因に対する生物適応、白化からの回復時間、藻場など他の生物・生態系との競合、オニヒトデ・サンゴ食巻貝などによる食害、他海域からのサンゴ幼生の分散・加入や熱帯・亜熱帯域のみに分布する種の北上などについても考慮する必要があるであろう。

謝辞

本研究は、環境省の地球環境研究総合推進費 (S-5) の支援により実施された。高解像度気候予測シミュレーション (MIROC3.2 hires) の出力データは、文部科学省共生プロジェクトよりご提供いただいた。北海道大学の須股浩博士ならびに海洋開発研究機構の坂本天・橋岡豪人両博士には、出力データの取り扱いに関して技術的・学術的両面から有益な指導およびコメントを賜った。東京大学大学院理

学系研究科地球惑星科学専攻の茅根創教授ならびに査読者の方には有益なコメントや指摘をいただいた。ここに記して謝意を表す。

引用文献

- Baird, A.H., Marshall, P.A. (2002) Mortality, growth and reproduction in scleractinian corals following bleaching on the Great Barrier Reef. *Mar Ecol Prog Ser* 237: 133-141
- Baker AC, Glynn PW, Riegl B (2008) Climate change and coral reef bleaching: An ecological assessment of long-term impacts, recovery trends and future outlook. *Estuarine, Coast Shelf Sci* 80: 435-471
- Donner SD, Knutson TR, Oppenheimer M (2007) Model-based assessment of the role of human-induced climate change in the 2005 Caribbean coral bleaching event. *Proc Natl Acad Sci* 104: 5483-5488
- Donner SD, Skirving WJ, Little CM, Oppenheimer M, Hoegh-Guldberg O (2005) Global assessment of coral bleaching and required rates of adaptation under climate change. *Glob Change Biol* 11: 2251-2265
- Douglas AE (2003) Coral bleaching—how and why? *Mar Pollut Bull* 46: 385-392
- 日高道雄 (2006) 褐虫藻の多様性とサンゴのストレス耐性. 琉球大学 21 世紀 COE プログラム編集委員会編 美ら島の自然史 サンゴ礁島嶼系の生物多様性, 東海大学出版会, 神奈川, pp 147-164
- Hoegh-Guldberg O (1999) Climate change, coral bleaching and the future of the world's coral reefs. *Mar Freshw Res* 50: 839-866
- Hoegh-Guldberg O, Mumby PJ, Hooten AJ, Steneck RS, Greenfield P, Gomez E, Harvell CD, Sale PF, Edwards AJ, Caldeira K, Knowlton N, Eakin CM, Iglesias-Prieto R, Muthiga N, Bradbury RH, Dubi A, Hatzioiols ME (2007) Coral reefs under rapid climate change and ocean acidification. *Science* 318: 1737-1742
- Honma Y, Kitami T (1978) Fauna and flora in the waters adjacent to the Sado Marine Biological Station, Niigata University. *Ann Rep Sado Mar Biol Sta, Niigata Univ* 8: 7-81
- 堀 信行 (1980) 日本のサンゴ礁. *科学* 50: 111-122
- IPCC (2007) *Climate Change 2007: Impacts, adaptation and vulnerability*. Parry ML, Canziani OF, Palutikof JP, van der Linden PJ and Hanson CE (eds) Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK
- K-1 model developers (2004) K-1 coupled model (MIROC) description. In: Hasumi H, Emori S (eds) K-1 tech rep 1. Cent Clim Syst Res, Univ Tokyo
- Kayanne H, Harii S, Ide Y, Akimoto F (2002) Recovery of coral populations after the 1998 bleaching on Shiraho Reef, in the southern Ryukyus, NW Pacific. *Mar Ecol Prog Ser* 239: 93-103
- 環境省・日本サンゴ礁学会 (2004) 日本のサンゴ礁. 環境省, 東京, 375 pp
- 菅 浩伸・中島洋典・大橋倫也・濱中 望・岡本健裕・中井達郎・堀 信行 (2005) 薩南諸島・馬毛島における高緯度サンゴ礁の掘削調査. 岡山大学地球科学研究報告 12: 49-58
- Maina J, Venus V, McClanahan TR, Ateweberhan M (2008) Modelling susceptibility of coral reefs to environmental stress using remote sensing data and GIS models. *Ecol Model* 212: 180-199
- 中井達郎 (1990) 北限のサンゴ礁—サンゴ礁とは. サンゴ礁地域研究グループ編 熱い自然—サンゴ礁の環境誌, 古今書院, 東京, pp 57-65
- 中村 崇・山崎征太郎・神木隆行・山崎秀雄 (2006) サンゴ礁のストレス事情—浅瀬のサンゴの我慢比べ—. 琉球大学 21 世紀 COE プログラム編集委員会編 美ら島の自然史 サンゴ礁島嶼系の生物多様性, 東海大学出版会, 神奈川, pp 132-146
- 中野義勝 (2002) 造礁サンゴの環境負荷への生理生態的反応に関わる研究の概観. 中森 亨編 日本におけるサンゴ礁研究 I, 日本サンゴ礁学会, 東京, pp 43-49
- 灘岡和夫・波利井佐紀 (2004) サンゴ幼生の広域分散と海水流動物理過程. *海洋と生物* 26: 232-241
- 野島 哲・岡本峰雄 (2008) 造礁サンゴの北上と白化. *日本水産学会誌* 74: 884-888

- Reynolds RW, Smith TM, Liu C, Chelton DB, Casey KS, Schlax MG (2007) Daily high-resolution-blended analyses for sea surface temperature. *J Clim* 20: 5473–5496
- Sakamoto TT, Hasumi H, Ishii M, Emori S, Suzuki T, Nishimura T, Sumi A (2005) Responses of the Kuroshio and the Kuroshio Extension to global warming in a high-resolution climate model. *Geophys Res Lett* 32: L14617
- Sheppard CRC (2003) Predicted recurrences of mass coral mortality in the Indian Ocean. *Nature* 425: 294–297
- Takahashi K, Honda Y, Emori S (2007) Assessing Mortality Risk from Heat Stress due to Global Warming. *J Risk Res* 10: 339–354
- 山野博哉 (2008) 日本におけるサンゴ礁の分布. 沿岸海洋研究 46: 3–9
- Yamano H, Hori K, Yamauchi M, Yamagawa O, Ohmura A (2001) Highest-latitude coral reef at Iki Island, Japan. *Coral Reefs* 20: 9–12

2009 年 4 月 30 日 受領
2009 年 10 月 6 日 受理

© 日本サンゴ礁学会

Original paper

Projected effects of global warming on coral reefs in seas close to Japan

Yumiko YARA^{1,*}, Masahiko FUJII¹, Yasuhiro YAMANAKA¹, Naosuke OKADA¹,
Hiroya YAMANO², and Kazuhiro OSHIMA¹

¹ Faculty of Environmental Earth Science, Hokkaido University, N10 W5, Kita-ku, Sapporo 060–0810, Japan

² Center for Global Environmental Research, National Institute for Environmental Studies, 16–2 Onogawa,
Tsukuba, Ibaraki 305–8506, Japan

* Corresponding author: Y. Yara
E-mail: yara@ees.hokudai.ac.jp

Communicated by Kaoru Sugihara

Abstract Global warming and associated increases in water temperature is considered to be a crucial factor for future corals, by inducing coral habitat migration toward higher latitudes and intensifying chances for coral bleaching and death. Using projected monthly-mean sea surface temperature in the 21st century, we quantitatively evaluate the potential effects of global warming on corals in seas close to Japan. Our result shows that the temperature-determined northern limit of subtropical coral reefs, which is currently located in the southern Kyushu, is expected to migrate northward, up to the northern Kyushu, and that the northern limit of coral habitat, currently located in Niigata and Chiba Prefectures, is estimated to go up to Aomori and Iwate Prefectures, by the end of the 21st century. In the Ryukyu Islands, on the other hand, both frequency and area of coral bleaching or death are expected to be intensified. Particularly, intermittently experienced high water temperatures which result in bleaching or death of present-day corals, will appear perpetually in the latter half of the 21st century.

Keywords: coral reef, global warming, water temperature rise, migration, bleaching, climate projection

Received: 30 April 2009/Accepted: 6 October 2009

© Japanese Coral Reef Society