

全天日射量の経年増加がサンゴ礁温熱環境に 与える影響に関する数値解析

神野 有生¹・田中 陽二²・篠原 隆一郎³

¹正会員 山口大学助教 大学院理工学研究科 (〒755-8611 宇部市常盤台2-16-1)

E-mail:kanno@yamaguchi-u.ac.jp

²正会員 港湾空港技術研究所 海洋情報研究領域 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

E-mail:tanaka-yo@pari.go.jp

³正会員 国立環境研究所 地域環境研究センター (〒305-8506 茨城県つくば市小野川16-2)

E-mail:r-shino@nies.go.jp

地表における全天日射量は、1990年頃より世界各地で増加傾向にある。しかし、この現象の水環境への影響を検証した例はない。そこで本研究では、石垣市川平湾周辺のサンゴ礁水域を例に、全天日射量の増加が水温を上昇させているという仮説を立て、熱収支を詳細に考慮した数値流動モデルを用いて検証した。はじめに、1990年から2010年の全天日射量の観測値に線形トレンドを当てはめた結果、7月の月平均値に関して、この期間で9.9%の増加が検出された。次に数値流動モデルを用いて、全天日射量が1990年レベル・2010年レベルの2ケースについて、7月の平均的な物理環境を計算した。その結果、後者のケースが0.27℃高い湾内平均底層水温を与え、全天日射量の増加が、夏季のサンゴの白化・死滅を助長している可能性が示された。

Key Words : solar radiation, global brightening, coral reef, water temperature, numerical simulation

1. はじめに

地表で観測される全天日射量は、1990年頃より、日本を含む世界各地で顕著な増加傾向にある^{1)~4)}。原因は地域により異なるが、雲とエアロゾルの量や光学特性の変化であると考えられている。太陽光は諸現象を駆動するエネルギー源であるため、全天日射量の増加は様々な局面で、人間や環境に影響を与える。身近な例では、気温の上昇や熱中症リスクの増加、農作物の生育への影響などが挙げられる。水環境分野では、水温場やそれに伴う密度成層の消長、水中の生物活動などが、全天日射量の増加の直接的影響を受けると予想される。しかし全天日射量の増加は、水環境分野では未だ十分認知されておらず、上記のような水環境に対する影響を検証した例は、著者らが知る限りこれまで無い。

そこで本研究では、このような検証の嚆矢となるべく、夏季の高水温によるサンゴの白化が問題となっているサンゴ礁を題材に解析を行った。具体的には、沖縄県石垣市の川平湾周辺海域を例に、全天日射量の増加がサンゴ礁水温を上昇させているという仮説を立て、サンゴ礁の熱収支を詳細に考慮した数値流動モデルを用いて、数値

実験によりこれを検証した。

2. 全天日射量の経年トレンドの解析

川平湾周辺海域に最寄りの石垣島地方気象台で観測された、1990年から2010年までの期間における全天日射量の経年トレンドを解析した。解析は、年平均値の他に、高水温によるサンゴの白化が問題となる夏季の代表として、7月の月平均値について行った。なお、全天日射量データは、気象庁ホームページ(<http://www.jma.go.jp/jma/>)よりダウンロードした。

図-1に、全天日射量の年平均値の経年変化を、図-2に、全天日射量の7月平均値の経年変化を、それぞれ示す。両図とも、縦軸の単位は、1日あたり1m²あたりに降り注ぐ短波放射エネルギー(MJ/m²/day)である。最小二乗法により線形トレンドをあてはめたところ、年平均値に関しては平均0.0781 MJ/m²/day/year、7月平均値に関しては平均0.106 MJ/m²/day/yearの増加傾向が見られた。7月平均値に関して、あてはめた線形トレンドによる1990年の期待値は21.5 MJ/m²/day、2010年の期待値は23.6 MJ/m²/dayとなり、

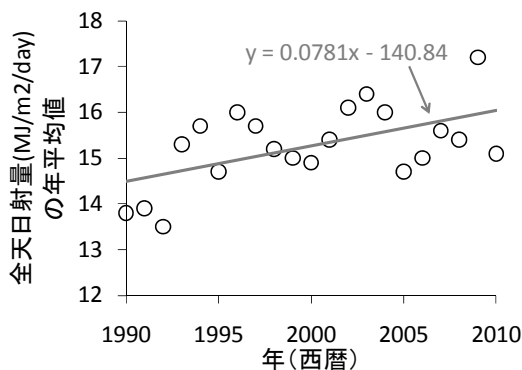


図-1 全日射量の年平均値に関する経年変化

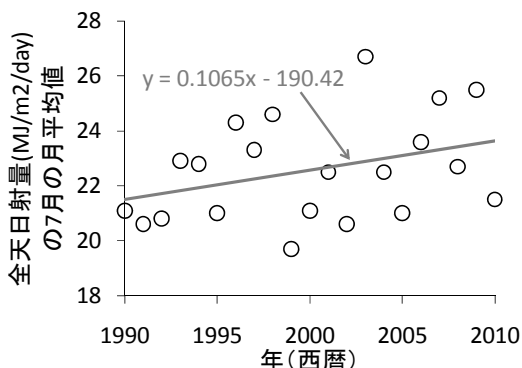


図-2 全日射量の7月の月平均値に関する経年変化

この期間における期待値の平均増加率は9.90%と計算された。

3. サンゴ礁温熱環境に関する数値実験

(1) 数値流動モデルの概要

数値実験には、この海域で水温の再現性が確認されている神野⁹⁾のモデルを用いた。このモデルは、鯉渕⁶⁾の σ 座標系準3次元流動モデルをベースとしており、サンゴ礁特有の水面・底面熱収支モデル、水位変化に伴う干出・冠水を扱う移動境界モデルを実装している。また、波浪推算モデルSWANにより計算されたradiation応力を入力することで、波の影響を考慮している。

(2) 計算条件

図-3に、計算領域の水深分布を、表-1に、主要な計算条件を示す。入力条件（気象・開境界条件）については以下で説明する。また、波浪の計算条件に関しては神野⁹⁾を参照されたい。

気象条件のうち、全日射量に関しては、2.で求めた、1990年における7月平均値の期待値を入力したケース1と、

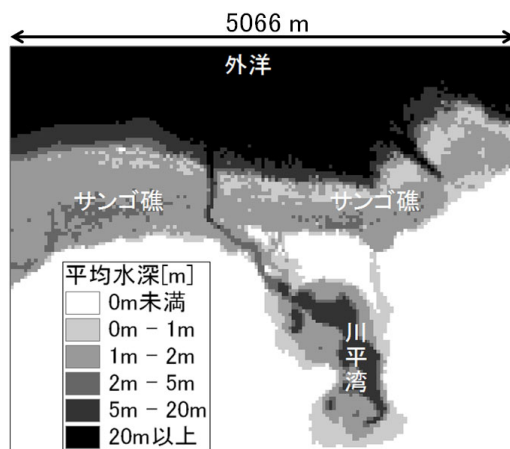


図-3 計算領域の水深分布

表-1 数値流動モデルの主要な計算条件

流動計算	時間刻み幅[s]	6
	xy,σ方向メッシュ数	151, 123, 10
	xy 方向メッシュサイズ[m]	34
	底面摩擦係数	0.0026 (水深 $H \geq 2$) $g \cdot n^2 / H^{1/3}$ ($H < 2$) $n=0.026$
	水平渦動粘性・渦拡散係数	Smagorinsky モデル
	鉛直渦動粘性・渦拡散係数	混合距離モデル
	干出・冠水の閾値[m]	0.10
短波放射計算	海面表面アルベド	0.06
	海面吸収率	0.50
	水中吸収係数[1/m]	0.20
	海底面アルベド	0.25
底面熱収支計算	底面—下層水間熱伝達率 [$W m^{-2} K^{-1}$]	3488
	地中空間解像度[m]	0.20
	地中最大深さ[m]	4
	地中熱拡散係数[m²/s]	5.9×10^{-7}
	地中熱容量[J m³ K⁻¹]	3.0×10^6

2010年における7月平均値の期待値を入力したケース2を設定した。他の気象条件（海面気圧・降水量・気温・蒸気圧・相対湿度・雲量・風向・風速）は石垣島地方気象台における7月の平年値を与えた。

開境界条件として、水温・塩分に関しては、日本海洋データセンター(JODC)の水温・塩分統計による7月の平均値を与えた。開境界の水位に関しては、石垣港におけるM2分潮を与えた。

以上の入力条件は、開境界の水位を除いて時間的に一定である。そのため、十分な時間計算を続けると、水温・塩分・水位・流速が全てM2分潮の周期で変化する状態に至る。本研究では、この定常的な状態を、7月における平均的な状態と定義した。

(3) 計算結果

図-4と図-5に、全日射量が1990年レベルのケース1と2010年レベルのケース2について、満潮時と干潮時における、サンゴが生息する底層の水温分布をそれぞれ示す。

また、ケース2とケース1との底層水温の差の、川平湾内の空間分布を図-6に、頻度分布を図-7に、それぞれ満潮時と干潮時について示す。

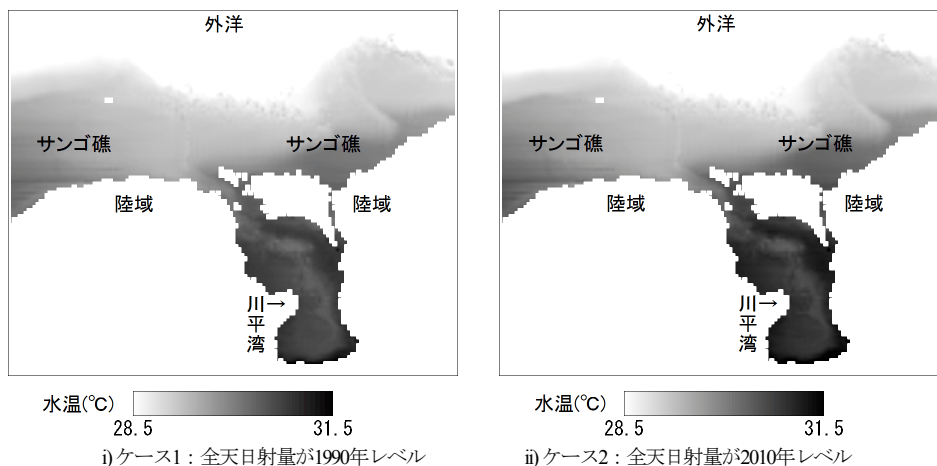


図-4 数値計算により得られた満潮時の底層水温分布

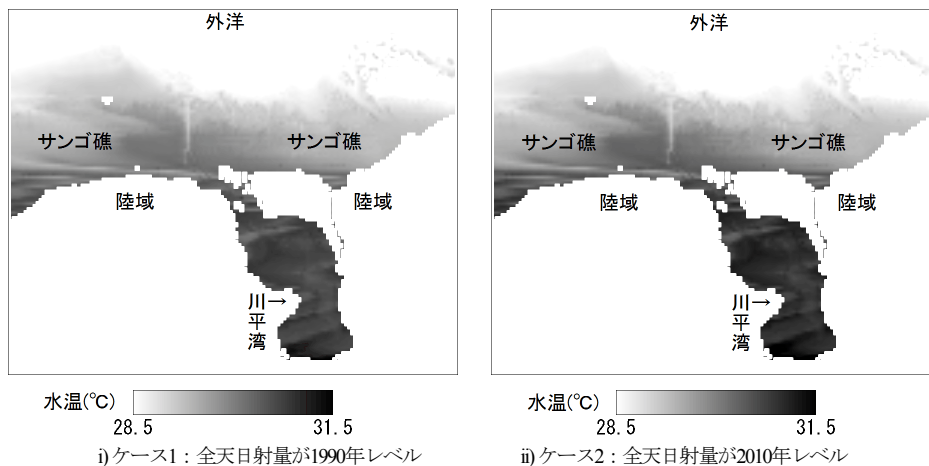


図-5 数値計算により得られた干潮時の底層水温分布

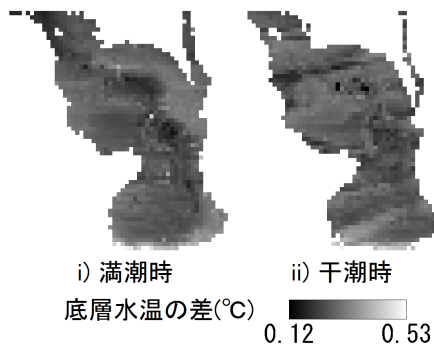


図-6 ケース2とケース1との底層水温差の川平湾内空間分布。
正の値はケース2の方が高温であることを示す。

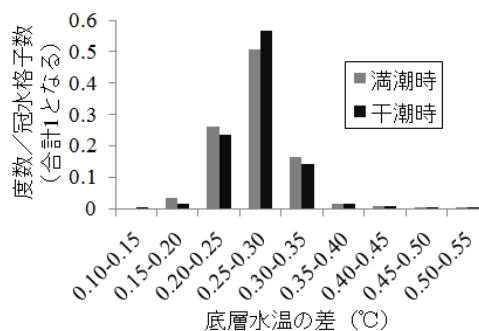


図-7 川平湾内の格子に関する、ケース2とケース1との底層水温
差の頻度分布。縦軸は度数（格子数）を正規化したもの。

図4～図7からわかるように、ケース1に比べてケース2では、川平湾内や湾外の礁池（サンゴ礁の内部）で、水温が上昇していた。ケース2での川平湾内のセルに関する1潮汐平均水温は、ケース1と比較して、表層の空間平均で0.32℃（30.76℃→31.08℃）、サンゴの生息する底層の空間平均で0.27℃（30.67℃→30.94℃）、全層の空間平均で0.29℃（30.68℃→30.97℃）、それぞれ上昇した。よって、冒頭で述べた「全日射量の増加がサンゴ礁水温を上昇させている」という仮説は、証された。

本数値実験では天候や昼夜が平均化されているため、実際の晴天時の昼間に関しては、さらに大きな水温上昇が見込まれる。また、沖縄県のサンゴ礁海域では、夏季の高水温によるサンゴの白化が頻繁に発生しており、夏季の水温が、サンゴの分布を決定する因子の1つであると考えられている⁷⁻¹⁰⁾。従って、平均水温の0.5℃未満の上昇でも、サンゴの白化・死滅を促進し、サンゴの分布を変化させる可能性がある。

4. まとめ

本研究は、全日射量の経年増加が水環境に与える影響を検証した、著者らが知る限り初めての研究である。具体的には、川平湾周辺海域を例に、全日射量の増加がサンゴ礁温熱環境に与える影響に関する数値実験を行った。その結果、全日射量の増加が、近年のサンゴ礁水域の高水温化に寄与し、サンゴの白化の一因となっている可能性が示唆された。

本研究は、「全日射量の経年増加が水環境に与える影響」という着眼・テーマ設定を、水環境分野に問うことを意図したものであり、数値実験の内容自体には改善の余地がある。しかし、本研究のような数値実験は、全日射量の変化による水環境への影響を明らかにするための、現時点で最も有効な手段であろう。本研究を先駆けとして、様々な沿岸域・湖沼を対象に数値実験を行うことが、今後の課題である。

水域によっては、日射量の増加とそれに伴う水温上昇

が、鉛直混合を妨げたり、植物プランクトンによる光合成や有機物の光分解を加速したりしている可能性がある。そのような水域では、鉛直拡散の再現性に優れたモデルや、炭素・窒素・リンなどを考慮した物質循環・生態系モデルの使用が必要になるであろう。

参考文献

- 1) Ohmura, A. : Observed Long-Term Variations of Solar Irradiance at the Earth's Surface, *Space Science Reviews*, Vol. 125, pp. 111-128, 2006.
- 2) Norris, J. R., and M. Wild : Trends in aerosol radiative effects over China and Japan inferred from observed cloud cover, solar “dimming,” and solar “brightening”, *J. Geophys. Res.*, Vol. 114, D00D15, 2009.
- 3) Wild, M. : Global dimming and brightening: A review, *J. Geophys. Res.*, Vol. 114, D00D16, 2009.
- 4) 堤之智, 村上 誠一 : 北日本での全日射量と雲量の増加について, 日本気象学会大会講演予講集, Vol. 97, p. 95, 2010.
- 5) 神野有生, 鯉渕幸生, 磯部雅彦 : 川平湾周辺のサンゴ礁海域における物理・栄養塩環境, *海岸工学論文集*, Vol. 54, pp. 1051-1055, 2007.
- 6) 鯉渕幸生, 佐々木淳, 磯部雅彦 : 東京湾における窒素・リンに着目した物質循環機構, Vol. 48, pp. 1076-1080, 2001.
- 7) 灘岡和夫, 若木研水, 鹿熊信一郎, 二瓶泰雄, 諸見里聡, 大見謝辰男, 岩尾研二, 下池和幸, 谷口洋基, 中野義勝, 池間健晴 : 広域水温モニタリングネットワーク展開による沖縄サンゴ礁水温環境地域差の解析, *海岸工学論文集*, Vol. 48, pp. 1276-1280, 2001.
- 8) 熊谷航, 田村仁, 灘岡和夫, 波利井佐紀, 三井順, 鈴木庸孝, 茅根創 : 石垣島白保海域における水温環境特性と造礁サンゴ群集の分布, *海岸工学論文集*, Vol. 51, pp. 1066-1070, 2004.
- 9) 灘岡和夫, 山本高大, 有坂和真, 前田勇司, 本岡俊介, 茅根創, 前川聡 : サンゴ白化要因としての高水温ストレスの時空間分布に及ぼす局所的地形・気象効果, *海岸工学論文集*, Vol. 55, pp. 1106-1110, 2008.
- 10) 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 : 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*, Vol. 11, pp. 131-140, 2009.

(2011.8.8受付)

NUMERICAL SIMULATION OF EFFECT OF INCREASING SOLAR RADIATION ON CORAL REEF THERMAL ENVIRONMENT

Ariyo KANNO, Yoji TANAKA and Ryuichiro SHINOHARA

Surface solar radiation (SSR) is increasing all over the world since around 1990. However, the effect of the increase on water environments has not been examined yet. In this study, we analyzed the effect of in-

creasing SSR on the thermal environment of coral reef area around Kabira bay, Ishigaki City.

Firstly, we fitted a linear trend onto the SSR time series of Ishigaki City observed from 1990 to 2010. As a result, it was found that the monthly average of SSR in July had increased by 9.9 % (from 21.5 MJ/m²/day to 23.6 MJ/m²/day) during this period. Based on the result, we simulated the average physical environment of July using a quasi-3D hydrodynamics simulation model for two cases: one with SSR of 1990 level (21.5 MJ/m²/day), and another with SSR of 2010 level (23.6 MJ/m²/day). Consequently, the water temperature of the bottom layer (where corals live), averaged over the whole bay and over a tidal cycle, was 30.67 degree Celsius in the former 1990-level case and was 30.94 degree Celsius in the latter 2010-level case. The 0.27 degree Celsius of difference in the averaged bottom-layer water temperature between these two cases indicates that the increase in SSR may be contributing to the bleaching and extinction of corals in summer.