

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 21 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K12134

研究課題名(和文) 造礁サンゴの光合成速度・石灰化速度の流速依存性の解明とモデル化

研究課題名(英文) Elucidation and modeling flow rate dependence on photosynthetic and calcification rates of hermatypic corals

研究代表者

中村 隆志 (Nakamura, Takashi)

東京工業大学・環境・社会理工学院・准教授

研究者番号：20513641

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：サンゴの代謝速度は流れの影響を大きく受けると考えられているが、その定量的な評価は十分ではない。本研究では、循環型水槽で流速を制御した環境下で、微小溶存酸素電極を用いてサンゴの正味の光合成速度や呼吸速度、拡散境界層(DBL)の厚さを調べた。その結果、DBLの厚さは平均流速の -0.8 乗に比例するという結果を得た。これは理論および半経験的に求められた関係と整合的である。このことからサンゴ表面での物質交換速度は、平均流速の 0.8 乗に比例することが導かれる。ただし、光合成速度や呼吸速度は、流速とはあまり良い相関は得られておらず、サンゴ内外の物質交換速度以外の要因に律速されている可能性が示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年の大気二酸化炭素の増加に伴う地球温暖化や海洋酸性化は、海洋生物に様々な影響を与えることが予想され、その実態解明に向けた様々な研究が行われている。特に海洋酸性化はサンゴなどの石灰化生物の石灰化速度を低下させることが実験的に示されており、サンゴ礁生態系の衰退をもたらすことが危惧されている。一方で、流速の違いによる石灰化速度の変動幅は、海洋酸性化で予想されている成長速度の減少幅に比べて1桁大きい。本研究では、サンゴ表面での物質交換速度は流速の 0.8 乗に比例することが確認された。この流速依存性の感度は高く、本研究の成果は、サンゴ礁生態系の将来予測の精度を上げるためには非常に重要である。

研究成果の概要(英文)：It is considered that coral metabolic rates are greatly affected by flow conditions. However quantitative assessment of this factor is completely lacking. In this study, the net photosynthetic and respiration rates of corals and the thickness of the diffuse boundary layer (DBL) were investigated using micro-dissolved oxygen electrodes under controlled flow velocity in a recirculating aquarium. In this result, it is confirmed that DBL thickness was proportional to the -0.8 power of the mean flow velocity. This is consistent with the theoretical and semi-empirical relationships of previous works. This leads to the conclusion that the rate of mass exchange at the coral surface is proportional to the 0.8 th power of the mean flow velocity. However, photosynthetic and respiration rates did not correlate well with flow velocity, suggesting that they may be limited mainly not by material transfer at the coral surface but by other metabolic factors of corals.

研究分野：生態系モデリング

キーワード：サンゴ 光合成速度 石灰化速度 流速依存性 拡散境界層

1. 研究開始当初の背景

近年の大気二酸化炭素の増加に伴う地球温暖化や海洋酸性化は、海洋生物に様々な影響を与えることが予想され、その実態解明に向けた様々な研究が行われている。特に海洋酸性化は、海水中の炭酸カルシウム飽和度 (Ω) の低下を招き、サンゴなどの石灰化生物の石灰化速度を低下させることが実験的に示されており、サンゴ群集の衰退をもたらすことが危惧されている (e.g., Kleypas et al. 2006, Kurihara 2018)。一方で、サンゴの光合成速度、呼吸速度、石灰化速度といった代謝速度は流れの影響を大きく受けると考えられる。乱れが少ない環境においては、生物表面の拡散境界層 (Diffusive Boundary Layer: 以下 DBL) の層厚が大きくなるため、生物表面を介しての物質交換は DBL における拡散に律速される。つまり、十分な代謝のポテンシャルがあったとしても、生物表面での代謝に必要な物質/イオン等の不足もしくは、代謝副産物の生物表面での蓄積による障害効果によって、十分な代謝速度が得られない状態に陥ると考えられるためである。サンゴ礁地形学の分野では、古くは Hopley and Barnes (1985) より、風上側のサンゴ礁は風下側に比べ、礁の発達が良いことが知られていた。これは一般的に風上側の方が波あたりが強く攪乱が大きいため、サンゴ-海水間の物質交換速度が促進され、サンゴの礁成長速度 (石灰化速度) が早くなるためと考えられている。このことは、流速の違う環境下における飼育実験でも確認されており、流れの早い環境下のサンゴの成長速度は低流速に比べ、優に 3 倍も大きいという結果が得られている (Nakamura and Yamasaki, 2006)。これは、海洋酸性化で予想されている成長速度の減少幅に比べて 1 桁大きい。このように、流動環境の違いはサンゴの成長速度ひいてはサンゴ礁の発達具合にまで影響を及ぼす極めて重要なファクターであるにもかかわらず、高水温や低 pH の暴露実験に比べ、流れの影響を調べた研究例は極端に少ない。

研究代表者らは、これまでの研究でサンゴ生体内部の物理・化学・生理学的な素過程を詳細に記述し複合的な環境に対する応答を再現できるモデル (Nakamura et al., 2013) の開発に成功しており、海洋酸性化や高水温によるサンゴの白化現象などの主だったサンゴの環境応答過程が組み込まれている。また、このポリプモデルにはシンプルな流れに対する応答モデルも組み込まれている。このサンゴポリプモデルとサンゴ礁スケールの流動-物質循環モデルとの結合モデルの開発にも成功しており (Nakamura et al., 2018) この結合モデルを用いてシナリオ解析によるサンゴ礁生態系の将来予測を行った結果、海水準上昇はサンゴ礁内の海水の循環や流れを活発にするため、サンゴの石灰化速度が上昇することが予想された。しかし、このモデルで計算されるサンゴの代謝速度に対する流速依存性の感度は高く、モデルの妥当性および精度が全体の結果を大きく左右する。これらのことから、サンゴの代謝速度の流速依存性を定量的に評価し、適切にモデル化することが、将来予測の精度を上げるためには非常に重要である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、上記の問題点に答えるべく、サンゴの光合成速度や石灰化速度等の代謝速度の流速依存性を定量的に明らかにすることである。

3. 研究の方法

本研究では、まず、様々な流速条件に設定できるような水流循環型の飼育水槽を新たに作成した。そしてその中で、イシサンゴの一種であるエンタクミドリイシ (*Acropora solitaryensis*) を飼育した。この飼育水槽の上部には微小溶存酸素 (DO) 電極 (OXR50, FireSting) が取り付けられており、マイクロマンピュレーターによって、微小 DO 電極の先端位置を手動ないしは自動で精密操作することが可能となっている (図 1a)。センサー先端位置は、PC に接続したデジタル顕微鏡カメラを用いて観察することが可能となっており、サンゴ表面直上へとセンサー先端を導くことができる (図 1b)。水槽上部には高輝度 LED ライト (XR30 G5 PRO, Radion) が設置されており、これによって光量を制御し、実際の光量子フラックスは光量子センサー (DEFI2-L, JFE Advantech) によってモニターした。

このシステムを用いて、明条件や暗条件において、様々な流速条件におけるサンゴ表面の DO の鉛直プロファイルを計測し、DBL 内の DO 濃度の空間勾配よりフィックの法則を用いて DO のフラックス、つまりは明条件下での正味の光合成速度および暗条件下での呼吸速度を測定した。また、同時に DBL の層厚を調べた。水槽内に浮遊する微細な粒子 (ゴミ) の動きを顕微鏡カメラが捉えることで、Particle Image Velocimetry (PIV) の手法を用いることで、流れ場の可視化および平均流速を測定した。

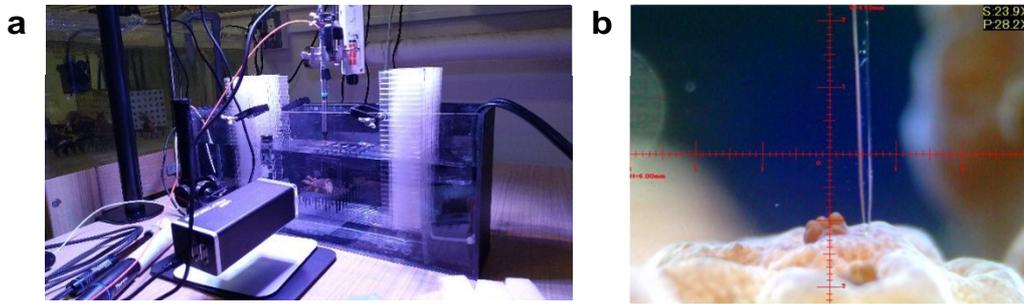


図 1. 実験システムの概観 (a) およびサンゴ表面に微小 DO 電極を近づけたところ (b).

4. 研究成果

図 2 は明条件(光量子フラックス: $396 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) および暗条件(光量子フラックス: $0 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)でのサンゴ表面直上での DO の鉛直プロファイルの一例を示している。図 2a は平均流速 3.5 mm s^{-1} および、図 2b は平均流速 10.1 mm s^{-1} の結果である。これらの結果より、平均流速 3.5 mm s^{-1} の明条件での正味の光合成速度は $2.4 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 、DBL の厚さは 0.11 mm 、暗条件での呼吸速度は $1.1 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 、DBL の厚さは 0.10 mm と推定された。また、平均流速 10.1 mm s^{-1} の場合の明条件での正味の光合成速度は $3.5 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 、DBL の厚さは 0.08 mm 、暗条件での呼吸速度は $0.8 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 、DBL の厚さは 0.09 mm と推定された。同様の計測を、平均流速 3.2 mm s^{-1} 、 3.1 mm s^{-1} 、 1.9 mm s^{-1} 、 1.1 mm s^{-1} においても行った。

生物表面でのある物質の物質フラックス (J) は、生物表面の物質濃度 $[C]_s$ および、周辺域の物質濃度 $[C]_\infty$ を用いて、

$$J = S ([C]_\infty - [C]_s) \quad (1)$$

と表される。ここで、 S はある物質の物質移動速度である。この物質移動速度は、境界面極近傍ではフィックの法則に従うため、DBL の厚さ (δ) とある物質の分子拡散係数 (D) を用いて

$$S = D / \delta \quad (2)$$

と表される。また、理論および半経験的に、

$$S \propto \tau^{0.4} Sc^{-0.6} \quad (3)$$

の関係が知られている (Falter et al., 2004; 2007; 2016)。ここで、 τ は流体による底面せん断応力、 Sc はシュミット数である。なお τ は、

$$\tau = 0.5 \rho C_d U^2 \quad (4)$$

と表すことができる。ここで、 ρ は海水密度、 C_d

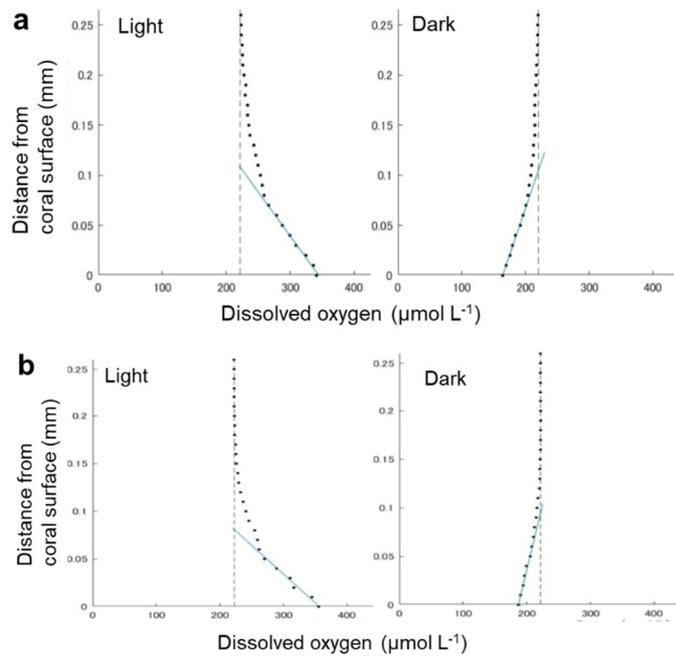


図 2. 明条件(光量子フラックス: $396 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) (左) と暗条件(光量子フラックス: $0 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) (右) の DO 鉛直プロファイル。(a) 流速 3.5 mm s^{-1} および、(b) 流速 10.1 mm s^{-1} の結果

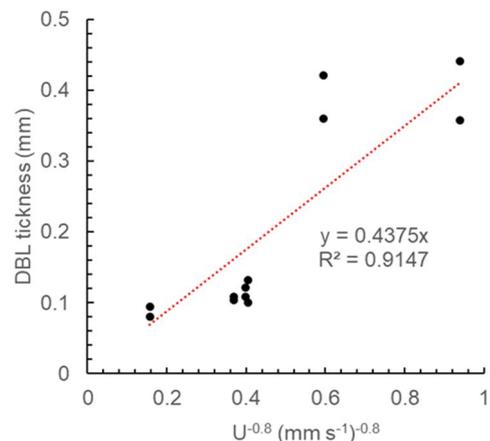


図 3. 本実験により得られた流速の -0.8 乗と DBL の厚さとの関係。

は底面摩擦係数、 U は平均流速である。式(2)~(4)より、DBL の厚さ δ と流速 U には、

$$\delta \propto U^{-0.8} \quad (5)$$

の関係があることが分かる。図 3 は、流速 U の -0.8 乗と DBL の厚さとの関係をプロットしたものである。この結果より、DBL の厚さは流速 U の -0.8 乗に良く相関することが確認され、式(3)の関係性を確認することができた。

もし、サンゴの呼吸速度や光合成速度が物質交換速度に律速されているとすると、式(1)および式(2)の関係より、呼吸速度および光合成速度はそれぞれ流速 U の 0.8 乗に比例することが予想される。図 4a および図 4b はそれぞれ流速 U の 0.8 乗と暗条件の呼吸速度および明条件の正味の光合成速度との関係をプロットしたものである。

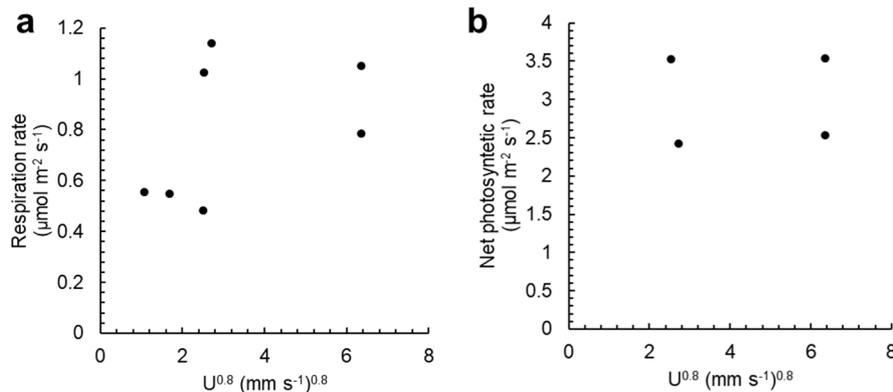


図 4. 流速 U の 0.8 乗と暗条件の呼吸速度との関係 (a) と、流速 U の 0.8 乗と明条件の正味の光合成速度との関係 (b).

暗条件の呼吸速度は、流速が低いときは弱い正相関がみられるが、流速が大きくなるとほぼ相関は見られない。このため、流速が低いときは、酸素の獲得量に律速するが、流速が大きくなると酸素の獲得量以外の内部要因に律速されているものと考えられる。呼吸速度は、石灰化速度に直接的に関わってくるため (Nakamura et al., 2013) 流速が小さい場合は石灰化速度も制限される可能性が高い。一方で、正味の光合成速度は流速との相関が見られなかった。正味の光合成速度は純光合成速度から呼吸速度を差し引いたものなので、呼吸速度が流速に依存すると、正味の光合成速度はより複雑な挙動をすることが予想されるが、そのことも含め、正味の光合成速度は流速よりもサンゴの内部的な要因に強く律速されていると考えられる。

引用文献

- Falter JL, Atkinson MJ, Lowe RJ, Monismith SG, Koseff JR (2007) Effects of nonlocal turbulence on the mass transfer of dissolved species to reef corals. *Limnol Oceanogr* 52:274–285
- Falter JL, Atkinson MJ, Merrifield MA (2004) Mass-transfer limitation of nutrient uptake by a wave-dominated reef flat community. *Limnol Oceanogr* 49:1820–1831
- Falter JL, Lowe RJ, Zhang Z (2016) Towards a universal mass-momentum transfer relationship for predicting nutrient uptake and metabolite exchange in benthic reef communities. *Geophys Res Lett* 43:9764–9772
- Hopley D, Barnes R (1985): Structure and development of a windward fringing reef, Orpheus Island, Palm Group, Great Barrier Reef. *Proc. 5 th Int. Coral Reef Congr.*, 3, 141-146
- Kleypas JA, Feely RA, Fabry VJ, Langdon C, Sabine CL, Robbins LL (2006) Impacts of ocean acidification on coral reefs and other marine calcifiers: A guide for future research. *Natl Sci Found*, Washington, DC
- Kurihara H, Takahashi A, Reyes-Bermudez A, Hidaka M (2018) Intraspecific variation in the response of the scleractinian coral *Acropora digitifera* to ocean acidification. *Marine Biology* 165: 38-49
- Nakamura T, Nadaoka K, Watanabe A (2013) A coral polyp model of photosynthesis, respiration and calcification incorporating a transcellular ion transport mechanism. *Coral Reefs* 32:779–794
- Nakamura T, Nadaoka K, Watanabe A, Yamamoto T, Miyajima T, Blanco AC (2018) Reef-scale modeling of coral calcification responses to ocean acidification and sea-level rise. *Coral Reefs* 37:37–53
- Nakamura T, Yamasaki H (2006) Morphological changes of pocilloporid corals exposed to water flow. *Proc 10th Int Coral Reef Symp* 875:872–875

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Eladawy Ahmed, Nakamura Takashi, Shaltout Mohamed, Mohammed Asmaa, Nadaoka Kazuo, Fox Michael D., Osman Eslam O.	4. 巻 9
2. 論文標題 Appraisal of coral bleaching thresholds and thermal projections for the northern Red Sea refugia	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Frontiers in Marine Science	6. 最初と最後の頁 1-16
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3389/fmars.2022.938454	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 Yoshikai Masaya, Nakamura Takashi, Bautista Dominic M., Herrera Eugene C., Baloloy Alvin, Suwa Rempei, Basina Ryan, Primavera Tirol Yasmin H., Blanco Ariel C., Nadaoka Kazuo	4. 巻 127
2. 論文標題 Field Measurement and Prediction of Drag in a Planted Rhizophora Mangrove Forest	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Oceans	6. 最初と最後の頁 1-17
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1029/2021JC018320	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 中村隆志, 小又寛也, 佐久間魁史, BA Oumou Kalsom Diegui	4. 巻 54
2. 論文標題 ハインドキャストシミュレーションによる過去のサンゴ礁域の環境復元	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 月刊海洋	6. 最初と最後の頁 468-475
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 中村隆志	4. 巻 22
2. 論文標題 複合環境影響評価のためのサンゴ礁生態系モデル開発にむけて：サンゴポリブモデルの開発と流動-物質循環モデルとの連成	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本サンゴ礁学会誌	6. 最初と最後の頁 45～60
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3755/jcrs.22.45	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Takashi Nakamura, Toshihiro Miyajima, Tomihiko Higuchi, Sylvain Agostini, Ikuko Yuyama, Hiroyuki Fujimura
2. 発表標題 Coral Bleaching simulation in the Sekisei Lagoon, Okinawa, Japan, based on a coupled hydrodynamic-biogeochemical-polyp-scale coral bleaching model
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2022年大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yuta A. Takagi, Takashi Nakamura, Dominika Wara Christiana, Faisal Amri, Masaya Yoshikai, Novi Susetyo Adi, Kazuo Nadaoka
2. 発表標題 A coupled watershed-ocean-ecosystem model for assessing the turbidity and nutrient reduction ability of seagrass meadows
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2022年大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Ahmed Eladawy, Takashi Nakamura
2. 発表標題 Integrated Modeling and Mapping for Assessing Red Sea Coastal Ecosystem Vulnerability to Multiple Stressors
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2022年大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takashi Nakamura
2. 発表標題 Modeling coral polyp-scale bleaching phenomenon and upscaling to reef-scale
3. 学会等名 14th International Coral Reef Symposium (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

High-resolution hindcast in Sekisei Lagoon
http://www.nakamulab.mei.titech.ac.jp/yaeyama_hindcast_simulation

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------