

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 30 日現在

機関番号：18001

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2008～2011

課題番号：20310014

研究課題名（和文）地球温暖化と海洋の酸性化に対するサンゴ礁生態系の応答と激変

研究課題名（英文）Response of coral reef ecosystem to global warming and ocean acidification and the possible drastic change.

研究代表者

大森 保 (OOMORI TAMOTSU)

琉球大学・大学教育センター・非常勤講師

研究者番号：00045022

研究成果の概要（和文）：

サンゴ礁における炭酸系変動の時系列観測により、瀬底島サンゴ群集は二酸化炭素濃度=945ppmvに達すると石灰化速度がゼロになること、および、アラゴナイト飽和度が1（平衡状態）となる結果が得られた。IPCC報告書の数値予測モデルによれば、早ければ21世紀末以降に、大気中の二酸化炭素濃度が950ppmvレベルに達し、アラゴナイト質骨格を形成する海洋生物の生存が極度に脅かされ、サンゴ礁生態系激変の可能性が示唆される。

サンゴ飼育水槽実験により、光ストレス・農薬・有害化学物質ストレスに対する代謝応答（光合成・石灰化）、枝状サンゴの骨格形成における微量元素（Sr, Mg, U）の取り込み応答、稚サンゴの骨格形成の応答等について解明した。さらに、サンゴの骨格形成における基質タンパク質の効果について解明した。

研究成果の概要（英文）：

Time-series observation of carbonate system at coral reef of Sesoko Island revealed that calcification rate of coral community around this island reaches to zero at $PCO_2=945$ ppmv in sea water. It is suggested that calcifying organisms in Sesoko coral reef will face to severe damage and that drastic change in ecosystem will be caused at the end of 21 century or later, according to the rapid prediction model of atmospheric CO_2 increase in IPCC report.

Coral incubation studies revealed the characteristic responses of coral metabolisms of photosynthesis-calcification to light-radiation stress, hazardous chemical stress, as well as responses of trace elements incorporation such as Sr, Mg and U into skeleton and of skeletal mineral formation of juvenile coral.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	7,400,000	2,220,000	9,620,000
2009 年度	4,300,000	1,290,000	5,590,000
2010 年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2011 年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
総計	13,800,000	4,140,000	17,940,000

研究分野：地球化学

科研費の分科・細目：環境学・環境動態解析

キーワード：二酸化炭素、サンゴ礁、光合成、石灰化、温暖化、酸性化、基質タンパク質

1. 研究開始当初の背景

サンゴ礁は、熱帯・亜熱帯域の貧栄養の浅い海に、多様な生物が棲息し、生物生産が極めて高い特異な生物圏である。サンゴ礁における高い生物生産は、生物の個体レベルおよび生物群集レベルでの代謝（光合成・石灰化）によって維持され、大気-海洋間の二酸化炭素フラックスを通して大気中の二酸化炭素濃度変動やグローバルな炭素循環と密接な関係を有する。

人間活動によって大気中に放出された二酸化炭素は、約 1/2 が大気に蓄積し、残りは海洋（30%）や陸上植物等（20%）に吸収される（IPCC 2001、Sabine et al., 2004）。大気中の二酸化炭素濃度は、産業革命以前には 280ppm 程度であったが、近年急速に上昇し 2005 年には 380ppm となり、毎年約 1.8ppm ずつ増加しつつある。全球的な炭素循環のモデル計算によれば、21 世紀の後半以降には産業革命以前の約 2 倍（560ppm）から 3 倍（840ppm）に達すると予測されている。

大気中の二酸化炭素濃度が 2～3 倍に増加することの生態系への影響は重大である。熱力学的平衡モデルによれば、表層海水の pH 値（海水基準表示）は、産業革命以前には pH=8.16 であったが、現在 pH=8.05、そして 21 世紀後半には、pH=7.91（2 倍 CO₂）～7.76（3 倍 CO₂）まで低下（“酸性化”）する（Houghton 2001）。さらに、大気中の二酸化炭素濃度の低減技術として、人間活動によって排出される大量の二酸化炭素を海洋処分（隔離・拡散）することが提案されている。これは海洋の酸性化を中層・深層海洋にまで拡大することになる。

結果として海洋における炭酸カルシウムの飽和度が低下し、炭酸塩骨格を形成する生物の生存が脅かされる。炭酸塩骨格や石灰殻を形成する一次生産者である植物プランクトンやサンゴの生存が脅かされることにより、それに従属する生物群集や生態系が変質し、近い将来には生態系の激変の可能性が危惧される。

現在サンゴ礁は、グローバルな環境変動と人間活動の影響により衰退の傾向にある。海洋の酸性化の進行は、その傾向をさらに

加速して、炭酸塩骨格や殻を形成する海洋生物の生存場を脅かす。海洋における炭酸システムの変質過程とサンゴ礁生態系の応答について、系統的な理解を得ることが必要である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、「大気中の二酸化炭素濃度の増加とそれに伴う地球温暖化および“海洋の酸性化”に対するサンゴ礁生態系の応答」について解明を試みるものであり、以下の課題を追究する。

- (1) サンゴ礁における炭酸システムの時系列変動の解明
- (2) サンゴ礁生物による代謝機能（光合成-呼吸）の応答の解明
- (3) サンゴ礁生物による骨格形成の応答の解明

3. 研究の方法

1. 野外観測

サンゴ礁炭酸システムの長期変動の観測と解析の課題についておこなう。

- (1) 瀬底島に設置してある炭酸システムの自動計測装置および水質監視用ゾンデを利用して長期連続観測をおこなう。
- (2) 具体的には、瀬底島サンゴ礁において、炭酸系成分の日変動、月変動、季節変動の観測をおこなう。
- (3) サンゴ礁海域の潮流変化を考慮したボックスモデルを用いて、サンゴ礁生物群集による生物生産（光合成・石灰化）の時系列データを得る。
- (4) これらの観測値を用いて、大気中の二酸化炭素濃度、大気-海水間の二酸化炭素フラックスおよび大気中の二酸化炭素濃度の変動との関係について観測結果から検討する。

2. 飼育実験

1) サンゴ礁生物群集による代謝機能の応答の解明

「連続流水混合システム」を用いて、サンゴ礁生物の代謝（光合成-呼吸、石灰化）量を測定する。「連続流水混合システム」を用いて、サンゴ礁生物の代謝量を測定する。

2) サンゴ礁生物による骨格形成の応答の解明 炭酸塩骨格の化学組成・鉱物組成と酸性化・温暖化への応答の解明のために、実験終了後も一定の条件下で飼育し、骨格中に含

有する無機金属元素濃度 (Mg, Sr, UO_2 , 重金属元素など)、炭酸塩骨格に含有する有機基質の蛋白質・アミノ酸の分析をおこない、骨格形成における有機基質の役割および環境変動との関係について解析する。

4. 研究成果

1. 野外観測

- 1) サンゴ礁炭酸システム変動の長期観測
 - (1) 瀬底島に設置してある炭酸システムの自動計測装置および水質監視用ゾンデを利用して長期連続観測をおこなった。
 - (2) 炭酸系成分の日変動、月変動を観測した。
 - (3) サンゴ礁海域の潮流変化を考慮したボックスモデルを用いて、サンゴ礁生物群集による生物生産(光合成・石灰化)の時系列データを得た。サンゴ礁生物群集による石灰化速度は海水中の二酸化炭素濃度と逆相関を示し、 $PCO_2=945\text{ppmv}$ において石灰化速度がゼロとなる結果を得た (図1)。この時、海水中のアラゴナイト飽和度 $\Omega=1$ (0.97、ほぼ化学平衡) となる (図2)。IPCC レポートに報告された予測モデルに従えば、早ければ 21 世紀末頃には大気中の PCO_2 濃度が 900ppmv を超える可能性がある。近い将来、サンゴ礁生物の骨格形成が著しく阻害され、生態系激変の可能性が高くなることが観測データにより確認された。

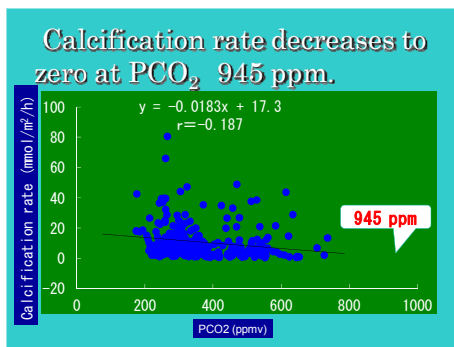


図1 サンゴ礁群集による石灰化速度と海水 PCO_2 の関係

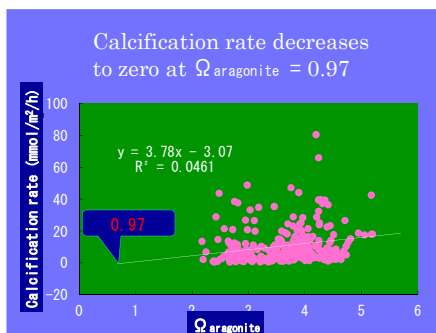


図2 石灰化速度とアラゴナイト飽和度

($\Omega_{\text{aragonite}}$) との関係

(4) 東シナ海におけるアラゴナイト飽和度の経年変化 (2000-2011)

東シナ海海水中の炭酸系成分の分析結果から、2000-2001 年の表面海水のアラゴナイト飽和度は $\Omega \approx 4 \sim 5$ であったが、2010-2011 年では $\Omega \approx 2 \sim 3$ となり、約 10 年間でアラゴナイト飽和度が低下したことが示唆された (図3)。

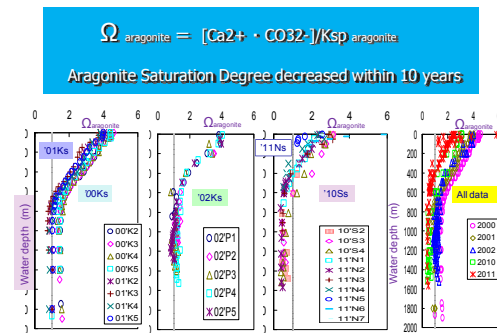


図3 東シナ海におけるアラゴナイト飽和度垂直分布の経年変化 (2000-2011)

アラゴナイト飽和の臨界深度 ($\Omega=1$) は、東シナ海南部海域では水深 600m であったが、東シナ海の北部海域では水深 400m となり、海洋酸性化による海洋生物の石灰化への影響は、北の海域でより顕著に表れることが示唆された (図4)。

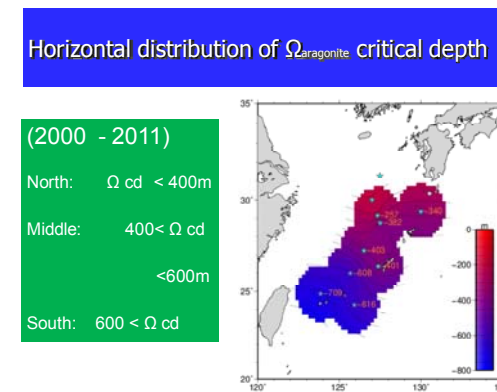


図4 東シナ海におけるアラゴナイト飽和臨界深度 ($\Omega_{\text{aragonite}}=1$) の水平分布 (2000-2011)

2. 飼育実験

1) サンゴ礁生物群集による代謝機能の応答の解明

「連続流水混合システム」を用いて、サンゴ礁生物の代謝(光合成-呼吸、石灰化)量および微量元素の吸収量を測定し、光ストレス、農薬・有害化学物質ストレス化学物質に対する応答、および炭酸塩骨格への微量元素の取

り込み実験をおこない、温暖化・酸性化などの環境変動指標の可能性を追求した。

2) サンゴ礁生物による骨格形成の応答の解明

(1) 海水温度を 22°C、26°C および 30°C の一定条件下でサンゴ *Porites* を飼育し、骨格中に含有する無機金属元素濃度(U, Mg, Sr など)の分析をおこない、水温および海水中の炭酸システム変動との関係について解明した(図 5)。

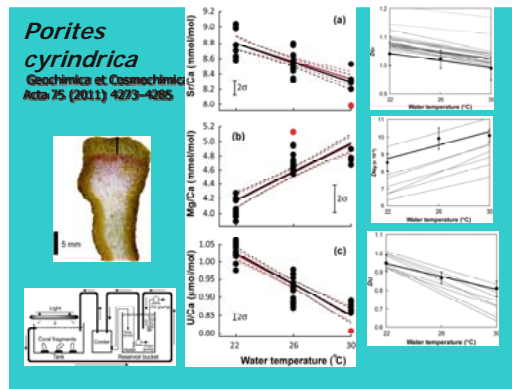


図 5 枝状サンゴ骨格中に取り込まれた Sr/Ca、Mg/Ca および U/Ca 比と水温との関係

(2) 稚サンゴを海水組成を調節した海水で飼育し、骨格形成への影響を調べた。稚サンゴの骨格形成は、低マグネシウム海水ではカルサイトの骨格形成が行われ海水組成の影響がみられたが、成長したサンゴでは海水組成の影響は小さく、生物による調節機能が働いていることが示唆された。

(3) 八方サンゴ類の骨格形成について、基質タンパク質の分析と炭酸塩鉱物形成への効果について実験した。カルサイト形の炭酸塩骨格を形成する軟体サンゴや宝石サンゴの有機基質には、炭酸カルシウムの結晶形成に極めて特異な効果を示す酵素タンパク質が含まれる。八方サンゴの骨片からタンパク質を分離精製する方法および抽出した酵素タンパク質について特許申請した(2009年3月)

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 26 件) すべて査読有

1) M. Azizur Rahman, Hiroyuki Fujimura, Ryuichi Shinjo, Tamotsu Oomori(2011) Extracellular matrix protein in calcified endoskeleton: a potential additive for crystal growth and design. *Journal of Crystal Growth and Design* 324, 177-183.

2) Alrum Armid, Ryuji Asami, Tanri Fahmiati,

Mohammed Ali Sheikh, Hiroyuki Fujimura, Tomihiko Higuchi, Eiko Taira, Ryuichi Shinjo, Tamotsu Oomori(2011) : Seawater temperature proxies based on D_{Sr} , D_{Mg} , and D_U from culture experiments using the branching coral *Porites cylindrica*. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 75 (2011) 4273-4285.

3) Azizur Rahman, Tamotsu Oomori and Gert Wörheide (2011) : Calcite formation in soft coral sclerites is determined by a single reactive extracellular protein. *The Journal of Biological Chemistry* 286: 31638-31649.

Doi:10.1074/jbc.M109.070185.

4) Takuroh Noguchi, Ryuichi Shinjo, Michihiro Ito, Jitsuya Takeda and Tamotsu Oomori(2010) Barite geochemistry from hydrothermal chimneys of the Okinawa Trough: insight into chimney formation and fluid/sediment interaction. *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences* Vol. 106, 26-35.

5) Gamo, T., U. Tsunogai, S. Ichibayashi, H. Chiba, H. Obata, T. Oomori, T. Noguchi, E. T. Baker, T. Doi, M. Maruo and Y. Sano. (2010) Microbial carbon isotope fractionation to produce extraordinarily heavy methane in aging hydrothermal plumes over the southwestern Okinawa Trough. *Geochemical Journal*, 44, 477-487.

6) Tomihiko Higuchi, Hiroyuki Fujimura, Yuya Hitomi, Takemitsu Arakaki, Tamotsu Oomori and Yoshimi Suzuki.(2010)

Photochemical Formation of Hydroxyl Radicals in Tissue Extracts of the Coral *Galaxea fascicularis*. *Photochemistry and Photobiology*, 2010, 86: 1421-1426,

DOI:10.1111/j.1751-1097.2010.00802.

7) S. Kawaguchi, T. Toki, J. Ishibashi, K. Takai, M. Ito, T. Oomori, and T. Gamo (2010): Isotopic variation of molecular hydrogen in 20-375 °C hydrothermal fluids as detected by a new analytical method. *J. of Geophysical Research*: doi:1029/2009JG001203.

8) Sheikh, M. A., Higuchi T., Imo, T, Fujimura H, Oomori, T.(2009) : Impacts of booster biocides (Irgarol-1051 and diuron) on photosynthesis and calcification rate of coral *Galaxea fascicularis*. *Proceedings of the 11th Pacific Science Inter-Congress 2-6 march 2009, Tahiti, French Polynesia(accepted)*

http://webistem.com/psi2009/output_directory/cd1/Data/articles/000296.pdf

9) F. Moriyama, Y. Tahara, Y. Arakaki, M. Kinjo, T. Oomori and A. Tanahara (2009) Characterization of cave atmosphere exchange by continuous monitoring of radon concentration. *J. Speleology* 34, 30-37. (in Japanese with English Abstract).

- 10) T. Higuchi, H. Fujimura, T. Arakaki, T. Oomori (2009) : Activities of antioxidant enzymes (SOD and CAT) in the coral, *Galaxea fascicularis* against increased hydrogen peroxide concentration in seawater. *Proceeding of the 11th International Coral Reef Symposium, Florida*. 926-930.
- 11) Armid, A., Takaesu, Y., Fahmiati, T., Yoshida, S., Hanashiro, R., Fujimura H., Higuchi, T., Taira, E., Oomori, T. (2009) U/Ca as a possible proxy of carbonate system in coral reef. *Proceeding of the 11th International Coral Reef Symposium, Florida*. 92-96.
- 12) Sheikh, M. A., T. Higuchi; H. Fujimura; T. S. Imo; T. Miyagi; T. Oomori. (2009) : Contamination and impacts of new antifouling biocide Irgarol-1051 on subtropical coral reef waters. *Int. J. Environ. Sci. Tech.*, 6 (3), 353-358.
- 13) Sheikh, M.A., H. Fujimura, T. Miyagi, Y. Uechi, T. Yokota, S. Yasumura, T. Oomori (2009) : Detection and ecological threats of PSII herbicide diuron on coral reefs around the Ryukyu Archipelago, Japan. *Mar. Poll. Bull.* 58. 1922-1952
doi:10.1016/j.marpolbul.2009.09.010.
- 14) M. Azizur Rahman and Tamotsu Oomori.(2009) Influence of Cell-free Proteins in the Nucleation of CaCO₃ Crystals in Calcified Endoskeleton. *World Academy of Science, Engineering and Technology (WASET)*, 56: 728-732.
- 15) M. Azizur Rahman and Tamotsu Oomori.(2009) : In vitro regulation of CaCO₃ crystal growth by the highly acidic proteins of calcitic sclerites in soft coral, *Sinularia polydactyla*. *Connective Tissue Research* 50, 285-293.
- 16) M. Azizur Rahman and Tamotsu Oomori.(2009) : Analysis of Protein-induced Calcium Carbonate Crystals in Soft Coral by Near-Field IR Microspectroscopy. *Analytical Sciences* 25: 153-155.
- 17) Higuchi T., H. Fujimura, T. Arakaki and T. Oomori. (2009) : The synergistic effects of hydrogen peroxide and elevated seawater temperature on metabolic activities of the coral, *Galaxea fascicularis*. *Marine Biology* 156, 589-596.
- 18) Higuchi, T., H. Fujimura, H. Ikota, T. Arakaki and T. Oomori.(2009) : The effects of hydrogen peroxide on metabolism in the coral, *Goniastrea aspera*. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 370, 48-55.
- 19) M. Azizur Rahman and T. Oomori (2008) : Aspartic acid-rich proteins in insoluble organic matrix play a key role in the growth of calcitic sclerites in alcyonarian coral. *Chinese Journal of Biotechnology* 24, 2127-2129.
- 20) Takuroh Noguchi, Ryuichi Shinjo, and Tamotsu Oomori (2008) : Data report: Pb isotope composition of sediment from the eastern flank of Juan de Fuca Ridge. *Proceedings of the Integrated Ocean Drilling Program, Volume 301*,1-7.
- 21) M. Azizur Rahman, Tamotsu Oomori (2008) : Identification and Function of New Proteins in Calcified Endoskeleton : a New Insight in the Calcification Mechanism of Soft Corals. *OCEANS 2008 (IEEE Xplore)*, 1-4:2139-2145.
- 22) J. Ishibashi, M.Nakaseama, M.Seguchi, T.Yamashita, S.Doi, T.Sakamoto, K.Kazuhiko, N.Shimada, T.Noguchi, T. Oomori, M.Kusakabe, T.Yamanaka. (2008) : Marine-shallow hydrothermal activity and mineralization at the Wakamiko crater in Kagoshima bay, south Kyusyu, Japan. *Earth and Planetary Science Letters* 173, 84-98.
- 23) Yukio Kitada *, Hodaka Kawahata, Atsushi Suzuki, Tamotsu Oomori(2008) . Distribution of pesticides and bisphenol A in sediments collected from rivers adjacent to coral reefs. *Chemosphere* 71, 2082-2090.
- 24) Azizur Rahman, Tamotsu Oomori(2008) Structure, crystallization and mineral composition of sclerites in the alcyonarian coral. *Journal of Crystal Growth* 310: 3528-3534.
- 25) Hiroyuki Fujimura, Tomihiko Higuchi, Kazuyo Shiroma, Takemitsu Arakaki, Asha Mansour Hamdun, Yoshikatsu Nakano, Tamotsu Oomori(2008) : Continuous-flow Complete-mixing system for assessing the effects of environmental factors on colony-level coral metabolism. *Journal of Biochemical and Biophysical Methods* 70, 865-872.
- 26) Imo, T. S., Sheikh, M. A., Sawano, K., Fujimura H. Oomori, T.(2008). Distribution and possible impacts of organic pollutants on coral reef ecosystems around Okinawa Island, Japan. *Journal of Pacific Science. Vol. 62 (No.3)*, 317-326.

[学会発表] (計 42 件)

- 1)Tamotsu Oomori (基調講演、招待) : Response of coral reef to global warming and ocean acidification and possible drastic change. *First International Symposium on Impacts & Vulnerability and Adaptation to Climate Change in Small Island Developing States(12-14 December, 2011 Zanzibar, Tanzania)* (2011 年 12 月 13 日、Zanzibar, Tanzania)
- 2)佐々木岳・石川恵・藤村弘行・樋口富彦・カサレト B.E.・鈴木款 : エダコモンサンゴの微量金属元素の濃集による酵素活性と高水

温耐性. 日本サンゴ礁学会第14回大会(2011年11月5日、沖縄、那覇)

3)中井達郎・藤村弘行・佐々木岳・Beatriz Casareto・鈴木款:LDO およびマイクロチャンバーを用いた溶存酸素量現地観測の方法について・第2報 ~サンゴ礁上における有機物生産量の空間構造把握のために. 日本サンゴ礁学会第14回大会(2011年11月5日、沖縄、那覇)

4)中野義勝・中井達郎・藤村弘行・樋口富彦・Agostini Sylvain・Casareto E・Beatriz・鈴木款: 瀬底島クンリ浜(瀬底ビーチ)礁池内におけるサンゴ群集変動(2006-2011) 日本サンゴ礁学会第14回大会(2011年11月5日、沖縄、那覇)

5)鈴木款・カサレト ベアトリス・アゴスティーニ シルバン・田代翼・脇坂傑智・藤村弘行・中野義勝: サンゴ礁の基礎生産量の再評価: サブ環境の相互連携. 日本サンゴ礁学会第14回大会(2011年11月4日、沖縄、那覇)

6)樋口富彦・鈴木款・藤村弘行: 高水温下における造礁サンゴのペルオキシダーゼ系酵素活性 日本サンゴ礁学会第14回大会(2011年11月4日、沖縄、那覇)

7)藤村弘行・兼城貴司・大森保・佐川鉄平・樋口富彦・カサレト B.E.・鈴木款: 石垣島白保海域および轟川における農薬の分布、日本サンゴ礁学会第14回大会(2011年11月4日、沖縄、那覇)

8)Baek, D-Y., H. Fujimura, T. Oomori, T. Higuchi, B.E. Casareto and Y. Suzuki : Boundary depth of aragonite saturation during 10 years around Okinawa and East China Sea. *Goldschmidt 2011* (2011年8月17日、Prague, Czech Republic)

9)Fujimura, H., A. Aoyama, T. Oomori, T. Higuchi, B. E. Casareto and Y. Suzuki: Prediction of coral reef calcification in Sesoko Island by ocean acidification. *Goldschmidt 2011* (2011年8月17日、Prague, Czech Republic)

10)Kaneshiro, A., H. Fujimura, T. Oomori, S. Gima, T. Higuchi, B.E. Casareto, Y. Suzuki and T. Sagawa : Seasonal Distribution and Effects of Herbicides on Coral Reefs Around Okinawa, Japan. *Goldschmidt 2011* (2011年8月16日、Prague, Czech Republic)

11)Kawamura, R., H. Fujimura, R. Uemura, T. Higuchi, B.E. Casareto and Y. Suzuki: Stable isotope approach for feeding structure of mudskipper *Periophthalmus argentilineatus* at different habitats in Okinawa Islands, Japan. *Goldschmidt 2011* (2011年8月16日、Prague, Czech Republic)

12)Alrum Armid, 浅海竜司*, Tandri Fahmiati, M. Ali Sheikh, 藤村弘行, 樋口富彦, 平良栄康, 新城竜一, 大森保: 指枝状サンゴ *Porites cylindrica* (ユビエダハマサンゴ) を用いた水

温指標の評価実験. 日本地球惑星科学連合2011年大会(2011年5月26日、千葉、幕張)

ほか30件

〔図書〕(計1件)

1)2012年: "Herbicides -Environmental Impact Studies and Management Approaches (edited by R.A. Fernandez, published by InteQ) pp258: Chapter 5, "Distribution and potential effects of antifouling PSII herbicide diuron on subtropical coral reefs", 83-94 (co-author).

〔産業財産権〕

○出願状況(計1件)

名称: 新規な炭酸水脱水酵素およびその分離精製方法

発明者: Md アジズールラーマン, 大森保

権利者: 琉球大学

種類: 特許

番号: 特願 2009-069644

出願年月日: 2009年3月23日

国内外の別: 国内

○取得状況(計0件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

取得年月日:

国内外の別:

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大森 保 (OOMORI TAMOTSU)

琉球大学・大学教育センター・非常勤講師

研究者番号: 00045022

(2) 研究分担者

藤村 弘行 (FUJIMURA HIROYUKI)

琉球大学・理学部・准教授

研究者番号: 20398308