

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 5 日現在

機関番号：12614

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24580261

研究課題名(和文)日照時間の経年変化が海藻群落へ及ぼす影響

研究課題名(英文)Influence of sunshine duration and solar radiation on seaweed forest formation

研究代表者

荒川 久幸 (ARAKAWA, Hisayuki)

東京海洋大学・海洋科学技術研究科・教授

研究者番号：40242325

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、日照時間の経年的な変動が海藻群落へ及ぼす影響を検討した。(1)日照の海中照度への影響に関しては、日本沿岸の日照時間の変化を解析し、日本海沿岸や伊豆諸島海域での減少が大きかった。また日本沿岸で日射量の増大が見られた。(2)三宅島におけるテングサ群落の鉛直的な分布を調べ、水深20mで最も高い密度がみられた。テングサの漁獲量の低下は、日照時間の長期的な変化に対応せず、日射量の経年的な増加と対応が見られた。日射量の増加がテングサ群落の上限水深を深化させている可能性が指摘された。

研究成果の概要(英文)：This research examined three points based on long-term climatic data: (1) How have total annual sunshine hours changed in certain areas in recent years? (2) How has light intensity under the ocean surface changed with respect to the sunshine? (3) What potential influences have affected seaweed forests because of the change? Total sunshine hours in 2004 decreased in many regions of Japan (e.g., Sea of Japan coast, Izu Islands) compared with totals 30 years prior (1974). However, the amount of solar radiation increased. The vertical distribution of the agar weed community in the Miyake-jima region southeast of Japan's main island of Honshu is densest at 20-m water depth. The decline in the agar weed catch did not correspond to the long-term change in sunshine hours but did correspond to the increased solar radiation.

研究分野：海洋環境光学

キーワード：日照時間 海藻群落 日本沿岸 伊豆諸島 海中照度 日射量 テングサ

1. 研究開始当初の背景

藻場は、沿岸の一次生産の場であるとともに、水産上有用な魚介類やその他の多様な生物にとっての生息場である。近年、日本各地で藻場の衰退が認められ、水産業に多大な影響を及ぼしている(水産庁 2007)。

広い海域において藻場の衰退に影響を及ぼす要因として、日照の影響が考えられる。瀧谷(1998)は、日照のデータとして稚内地方気象台の全天日射量のデータを用い、リシリコンブの生育段階毎の全天日射量と1・2等級のコンブの割合の間に関係があるかを調べ、日照が全体として右下がりの減少傾向にあることが、第二伸長生長期及び実入り期に影響して品質低下を招いていると述べた。また坂西・飯泉(2004)は、現場の光環境下でのガツカラコンブ、ナガコンブの生産力およびコンブ目藻類の生育限界水深についての考察を行い、この現象を物質生産に関わる生理生態学的観点から裏付けた。赤澤ら(2004)は、アマモ場分布状況調査および水質、底質、底層流速、塩分、光量、気象の生育環境調査を行った結果、アマモが順調に発芽し、生育するための条件の一つに生育期の十分な日照時間を挙げている。

商業的に重要なテングサの生産は海藻群落の中でも著しく減少している(伊豆の天草漁業, 1998)。テングサ生産の主産地であった伊豆諸島においてその傾向は特に顕著であり、従前の三宅島では800t、八丈島では600tの生産量があったが、現在ではそれぞれ50t未満、1t未満と激減している。

この原因の一つとして、鈴木(2004)は、テングサの主要な漁場である伊豆諸島の八丈島海区におけるテングサ漁獲量と気象要因および海況要因との多変量解析を行い、水温と日照時間が漁獲量に影響を及ぼしていると報告した。これらの研究では、日照時間の経年変化と単に比較しているだけであり、日照の変化が海中の光環境や群落の形成にどのような影響を及ぼしているのか検討されていない。

一方、日照の変動の報告として、Wild *et al.* (2005, 2007, 2008)およびWild (2009)は世界の日射量が1960-1980年代における緩やかな減少傾向から、1990年代に急激な増加傾向へ転じたことを報告し、気温、降水量および炭素循環への影響を懸念している。

2. 研究の目的

本研究は、日照の変動が海中に到達する光にどのように影響しているか、またそれがテングサ群落にどのような影響を与えているかを明らかにすることを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 解析資料および観測方法 八丈島の気象に関するデータは、気象庁のデータベース(<http://www.jma.go.jp/jma/index.html>)気象統計情報および財団法人気象業務支援

センター Japan Meteorological Business Support Center の地上気象観測原簿(1980-1989)から使用した。

太陽に関するデータは、国立天文台 National Astronomical Observatory of Japan が編纂する「理科年表」に記載されている太陽の地心距離(10日毎)、視赤緯(1日毎)、均時差(1日毎)を使用した。

また大気外日射量のデータは、国立海洋大気圏局 National Geophysical Data Center の Total Solar Irradiance データを使用した。1978/11/16 ~ 2003/9/31 の期間は Active Cavity Radiometer Irradiance Monitor (ACRIM) によって観測されたデータを、2003/10/1 ~ 2011/3/22 の期間は Solar Radiation and Climate Experiment によって観測されたデータを使用した。

海水の光学的性質およびテングサ群落の生息水深調査は、八丈島で観測に適切な群落が見当たらないことから、2009年9月に三宅島オオハシ地先において行った。海中照度測定は、水中分光照度計 PRR-600(Biospherical Instruments 社, USA) を使用して、下方向放射照度および光合成有効放射 PAR を測定した。またテングサ生息水深の把握は、三宅島カマノシリ地先のテングサ群落で行った。照度観測時にスクーバ潜水を行い、テングサ生息分布の目視観測からテングサ生息水深を決定した。

(2) 解析方法 気象および太陽に関するデータは毎時データに補正した。気象に関するデータのうち、全天日射量については、1時間のみデータの欠測は前後の値の平均を補整値として扱い、連続したデータの欠測は no data として解析から省いた。太陽に関するデータのうち、太陽の地心距離(10日毎)、視赤緯(1日毎)、均時差(1日毎)のデータについては、それぞれ Fortran 90 を用いてフーリエ級数変換を行い、1時間ごとのデータに補整した。大気外日射量のデータ(1日毎)についてはそのまま使用し、データの欠測は前後の平均を補整値とした。

(3) 全天日射量の直散分離 日照時間は「日照計で測定される直達日射量が 0.12kW/m^2 以上である時間」と定義されるため、日照時間からそのまま海中光環境の変化を検討することは難しい。そこで、全天日射を直達光と散乱光に分離し解析を行った。

直散分離のモデルとして、曾我ら(1998)により日本に適用する最適なモデルとして評価された Reindl *et al.*, (1990)の式を用いた。このモデルは、全天日射量と大気外日射量で表される晴天指数 k_t を重要なファクターとし、太陽高度、気温、相対湿度から、単位時間当たりの散乱比を求めるものである。散乱比に全天日射量を乗じて散乱日射量とし、全天日射量と散乱日射量の差を直達日射量として算出した。

なお大気外日射量は、放射強度が距離の二乗に逆比例して減少することから、次式で表される(小倉, 1999)。

$$I_0 = TSI (R_{av} / R)^2 \sin \alpha \quad (1)$$

α : 太陽高度、 I_0 : 大気外日射量 [W/m²]、 TSI : 太陽定数、 (R_{av} / R) : 地心距離
ここでは大気外日射量 I_0 を台形積分し、1 時間毎の大気外日射量とした。

また太陽高度 α は、緯度 φ 、半球における太陽の傾き δ ($-23^\circ 27' \leq \delta \leq 23^\circ 27'$)、時角 h を用いて次式で算出した。

$$\sin \alpha = \sin \varphi \sin \delta - \cos \varphi \cos \delta \cosh \quad (2)$$

ここで、 α : 太陽高度、 φ : 緯度、 δ : 半球における太陽の傾き ($-23^\circ 27' \leq \delta \leq 23^\circ 27'$)、 h : 時角。また、時角 h は次式より算出した。

$$h = \frac{(JST - 12)\pi}{12} + \text{経度差} + Eq \quad (3)$$

ここで、 JST : 日本標準時、 Eq : 均時差である。

(4) 光合成有効放射 (PAR) への変換

直達日射量および散乱日射量それぞれの日射量を光合成有効放射 PAR へ変換するため、Alados and Alados-Arboledas(1999) の式を用いた。この式は、brightness of skylight および sky clearness を重要なファクターとし、露点温度、天頂角を用いることで、PAR への変換を行うものである。

$Q_{pd} / I_d = 2.282 - 0.78\Delta + 0.067 \ln \varepsilon + 0.007T_d$
 $Q_{pb} / I_b = 1.659 + 129 \exp(-5\varepsilon) - 0.29\Delta + 0.39 \cos \theta$
 Q_{pd} および Q_{pb} : 散乱および直達光量子量 [mol/m²/h]、 I_d および I_b : 散乱および直達日射量 [J/m²/h]、 Δ : brightness of skylight、 ε : sky clearness、 T_d : 露点温度、 θ : 天頂角。なお、 Δ および ε はそれぞれ次式により算出される。

$$\Delta = I_d / I_0 \quad (5)$$

$$\varepsilon = \frac{((I_b + I_d) / I_d) + 1.041\theta^3}{1 + 1.041\theta^3} \quad (6)$$

本研究での直達日射量 I_b は、 $\cos \theta$ を掛けて法線面の値を使用し、直達光量子量 Q_{pb} は、 $\cos \theta$ で割ることで水平面の値にした。

さらに、Fresnel の式 (7) およびスネルの法則 (8) を用いて海面における反射率、水中における放射フラックスの指数関数的な減少 (9) を考慮し、式 4 より求めた PAR から海中光量子量を算出した (Kirk, 2002)。

$$r = \frac{1}{2} \frac{\sin^2(\theta_a - \theta_w)}{\sin^2(\theta_a + \theta_w)} + \frac{1}{2} \frac{\tan^2(\theta_a - \theta_w)}{\tan^2(\theta_a + \theta_w)} \quad (7)$$

$$\sin \theta_a / \sin \theta_w = n_w / n_a \quad (8)$$

ここで、 r : 反射率、 θ_a : 天頂角、 θ_w : 水中を透過する光の下向き垂直方向に対する角度、 n_w / n_a : 屈折率 (=1.33) である。ここではフラットな水面を仮定し、屈折率を 1.33 とした。

$$\Phi = \Phi_0 \cdot \exp(-K_{PAR} \cdot z) \quad (9)$$

ここで、 Φ : 水深 z における放射フラックス、 Φ_0 : 水面における放射フラックス ($Q_{pd} + Q_{pb}$)、 K_{PAR} : 消散係数、 z : 水深である。なお、 K_{PAR} は三宅島での観測で得られたテングサ生息水深における消散係数を使用した。

4. 研究成果

(1) 日照の変化 気象庁のデータより、八丈島における日照時間および気象観測統計指針に基づき補正した日照時間の長期的な傾向を把握するため、太陽周期を考慮し 11 年移動平均として Fig. 1 に示す。日照時間は 1980 年に約 1700 時間であったが、経年的に減少傾向を示し、2005 年に約 1400 時間であった。一方、全天日射量は経年的に増加傾向であった。また全天日射を直散分離し、PAR に変換した散乱光量子量、直達光量子量およびその合計である全天光量子量の経年変化を 11 年移動平均として

Fig. 2 に示す。全天日射は 1985 年に 6.5mol/m²/day であったが、2000 年には 7.5mol/m²/day となり、経年的に増加している。直達光量子量は、全天光量子量の変化に伴う増加傾向にあるが、散乱光量子量は小さな減少傾向にある。

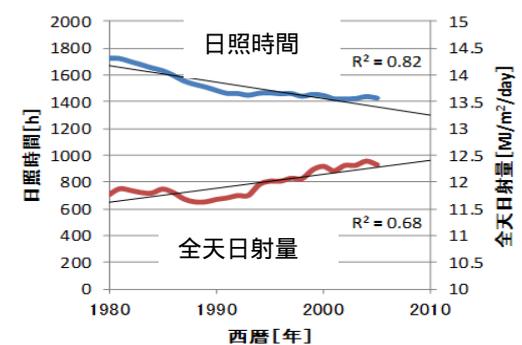


Fig. 1 日照時間の変化

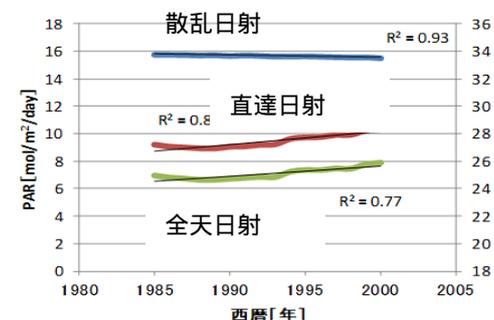


Fig. 2 PAR 光量子量の経年変化

(2) 海中照度およびテングサ群落の分布

三宅島オオハシ地先における下方向海中放射照度の分布を Fig. 3 に示す。表層の値は、水深 0.5~10m の PAR 鉛直変化から消散係数 K_{PAR} を 0.099 m^{-1} とし算出し、求めた。海水の光学的性質は海面から海底付近まで鉛直的に均一であった。

また、スクーバ潜水によるテングサ群落の目視観測を行った結果、テングサの生息水深は 15.8m (上限) ~ 21.3m (下限) であり、最も繁茂していた水深は 20m であった。そのため本研究ではテングサ繁茂水深を 20m、その水深における消散係数を 0.099 m^{-1} とした。なお、テングサ生息分布の上限水深、繁茂水深、下限水深の相対照度はそれぞれ 20.9%、13.8%、12.1% であった。

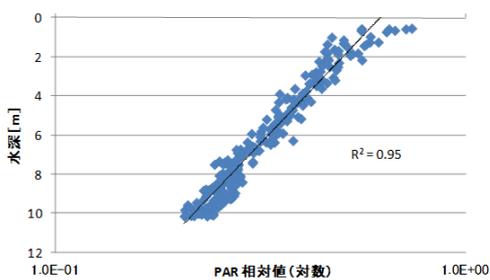


Fig. 3 三宅島オオハシにおける海中 PAR の鉛直変化

(3) テングサ繁茂水深における海中光量子量の経年変化

テングサ繁茂水深 (20m) における海中光量子量 PAR の月別変化を Fig. 4 に示す。ここで、ポイントは 1980 年~2005 年の平均値を表し、上下のバーは最大値、最小値を表す。テングサ生息水深 20m における PAR は夏にピークのある山なりの形になり、最大値と最小値の差は 7 月で最も大きい。またテングサ繁茂水深における PAR の月別の経年変化は、5 月および 6 月でわずかな低下傾向にあるが、他の月では経年的に増加傾向であった。すなわち、テングサ繁茂水深 (20m) における海中光量子量の経年変化は、全天日射の光量の増加に伴い、経年的な増加傾向にある。

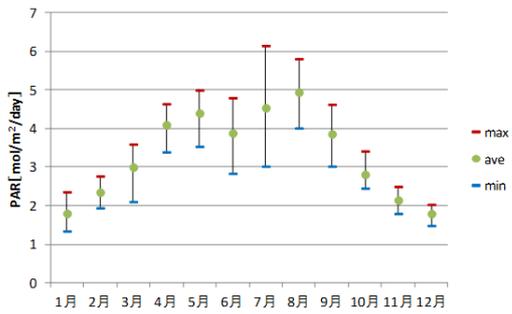


Fig. 4 テングサ生息水深 20m における PAR の月別変化

(4) 補償光量および最適光量以上の光が到

達している時間

前節で算出した海中光量子量を基に、テングサの成長に必要な光量以上が群落に到達している時間を評価した。テングサの成長に必要な光量は、漁港・漁場の施設の設計の手引き (2003 年度版) より海藻群落実験時の照度で限界値として示された 500 lx を時間に換算し (稲田; 1984)、 $30240 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{h}$ を補償光量、馬場 (2010) により示されたマクサ *Gelidium elegans* の成長に適した光量 $100 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ を時間に換算し、 $360000 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{h}$ を最適光量とし、補償光量、最適光量以上が到達している時間を求めた。

テングサ繁茂水深 (20m) において補償光量および最適光量以上が到達している時間の経年変化を Fig. 5 および Fig. 6 に示す。光量子量は 1990 年付近まで減少傾向にあるが、それ以降では増加傾向を示している。一方、補償光量以上が到達している時間は経年的に減少傾向であった。最適光量以上が到達している時間は、1990 年までは減少を示していたが、それ以降では増加傾向である。

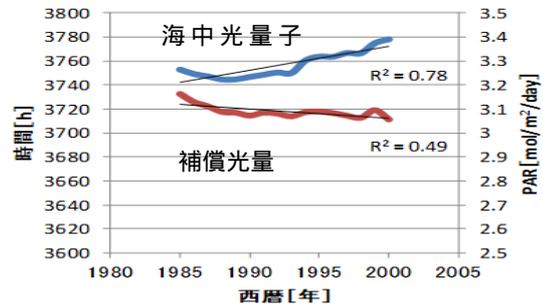


Fig. 5 補償光量以上が到達している時間の経年変化

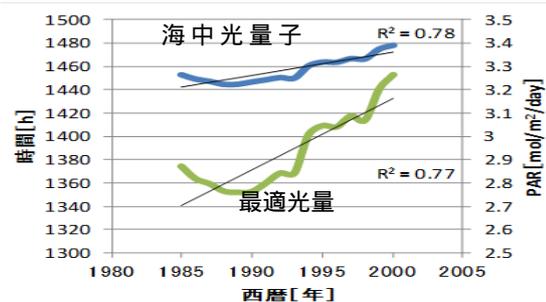


Fig. 6 最適光量以上の到達する時間

考察

日照の変動

世界気象機関 World Meteorological Organization (WMO) より、日照時間を日照計で測定される直達日射量が $0.12 \text{ kW}/\text{m}^2$ 以上である時間と定義されることから、本研究における全天日射量の直散分離で得られた直達日射量において $0.12 \text{ kW}/\text{m}^2 = 432 \text{ J}/\text{m}^2/\text{h}$ 以上である時間を日照時間として算出した。算出した日照時間、気象庁のホームページ上で公開している日照時間および気象観測統計指針に基づき補正した日照時間を Fig. 7 に示す。なお補正は気象観測指針に基づき、ジョルダン式日照計で観測した統計値において、月合計値が 75.0 時間以

上の場合には 15.0 時間を引き、75.0 時間未満の場合には 0.8 を掛けた。この補正值は、気象庁が主成分分析による方法（全国規模から地域規模まで様々なスケールの年変動などを主成分分析で求めて観測条件の変化がある地点の年変動を表現する方法）によって求めた（気象庁，2005）。

気象庁が公開している日照時間は経年的で著しい減少傾向にある。また、補正した日照時間は経年的に減少傾向にある。一方、日射から算出した日照時間に経年的な変化傾向は見取れない。

1996 年以前において日射から算出した日照時間と補正した日照時間との間には差があり、ジョルダン式日照計から回転式日照計に変更した 1986 年 1 月 1 日以前においてその差は顕著であった。このことから気象庁が公表している日照時間のデータの均質性の判断ができない。つまり、測器の変更前後における日照時間の比較が難しいことを示している。そのため、日照時間を用いた全天日射量の推定が試みられている（Ahmad and Tiwari, 2011）が、日本においては回転式日照計で観測した日照時間を用いた推定でなければ困難であり、異なった日照計のデータを連続して解析するには注意が必要である。回転式日照計に変わった 1986 年以降～1996 年において、補正した日照時間と算出した日照時間には差が見られる。この原因ははっきりしない。このことから、日照時間は経年的にわずかな減少傾向もしくは横ばいであるといえる。また 1996 年以降では補正した日照時間と算出した日照時間に差があまり見られない。

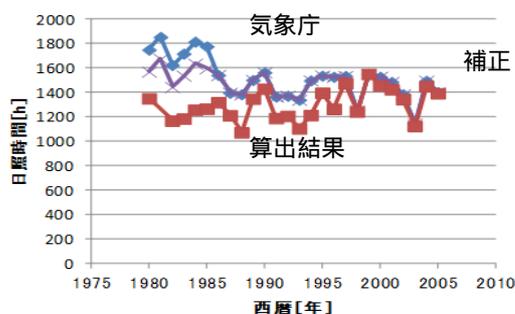


Fig. 7 補正および算出した日照時間の比較

テングサへの影響

テングサへの影響を検討するため、三宅島および八丈島のテングサ漁獲量とテングサ生息水深 20m における PAR との関係、三宅島および八丈島のテングサ漁獲量とテングサ生息水深 20m における最適光量以上が到達している時間との関係をそれぞれ月別に検討した。なお、テングサは多年草であり、寿命が 3 年と考えられていることから（藤田，2004）各データを 3 年移動平均にして関係を示した。両関係とも負の相関があり、月別にみると 2 月、3 月で強い相関があった。このことから、三宅島におけるテングサ群落で

は、直達日射量の増加に伴い生息域に届く光量が大きくなり過ぎていたため、光阻害が起きている可能性が示唆される。

以上のことより、胞子体が最も多く確認できる 7 月において直達日射量が増加することは、胞子体の発芽および成長を抑制している可能性が示唆される。また、Santelices (1991) が指摘するように、放射束密度と栄養塩濃度の相互作用を考えれば、2 月および 3 月の貧栄養時の直達日射量の増加も成長を抑制していると考えられる。

今後は、実際の現場に近い環境下、特に貧栄養時におけるマクサの生理生態学的研究が必要であり、また光環境の変化だけではなく高水温、貧栄養、高濁度などの環境要因を複合的に考える必要がある。

引用文献

- [1] 水産庁． 2007：磯焼けガイドライン
- [2] 瀧谷明郎．1998：リシリコンブの品質に関する要因，北水試だより，No. 41, 5-8
- [3] 坂西芳彦、飯泉仁． 2004：北海道根室半島沿岸の水中光量子量 コンブ目藻類の生育限界水深との関係，藻類，Vol. 52, No. 3, 141-148
- [4] 赤澤貴光、川井仁、浜辺聖、石崎修造、桐山隆哉、白井玄爾．2004：藻場による水環境の改善に関する研究，長崎県衛生公害研究所報 50, 72-75
- [5] 伊豆の天草漁業編纂会．1998：「伊豆の天草漁業」，成山堂書店
- [6] 東京都島しょ農林水産総合センター．2006：島しょ地域農林水産戦略構想
- [7] 鈴木亮．2004：伊豆諸島海域におけるテングサ漁獲量変動に対する気象・海況要因と漁獲努力量の影響，東京都立大学修士学位論文
- [8] Wild, M., Gilgen, H., Roesch, A., Ohmura, A., Long, C. N., Dutton, E. G., Forgan, B., Kallis, A., Russak, V., Tsvetkov, A. 2005: From dimming to brightening: Decadal changes in solar radiation at Earth's surface., *SCIENCE*, 308, 847-850
- [9] Wild, M., Ohmura, A., Makowaki, K. 2007: Impact of global dimming and brightening on global warming., *GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS*, 34(4), L04702
- [10] Wild, M., Grieser, J., Schaer, C. 2008: Combined surface solar brightening and increasing greenhouse effect support recent intensification of the global land-based hydrological cycle, *GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS*, 35(17), L17706
- [11] Wild, Martin 2009: Global dimming and brightening: A review, *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH-ATMOSPHERES*, 114, D00D16

- [12] 気象庁 (JMA) . : 気象庁ホームページ (<http://www.jma.go.jp/jma/index.html>), 気象統計情報, 過去の気象データ検索
- [13] 財団法人気象業務支援センター Japan Meteorological Business Support Center (JMBSC) . 1980-1989 : 地上気象観測原簿
- [14] 国立天文台 National Astronomical Observatory of Japan . 1975-2010 : 理科年表
- [15] 国立海洋大気圏局 (NOAA) : National Geophysical Data Center (<http://www.ngdc.noaa.gov/ngdc.html>) 1978-2003 : Active Cavity Radiometer Irradiance Monitor (ACRIM), 2003-2011 : Solar Radiation and Climate Experiment (SORCE)
- [16] 東京都労働経済局農林水産部水産課 . 1980-2005 : 東京都の水産
- [17] 気象庁 . 2005 : 気象観測統計指針
- [18] 曾我和弘、赤坂裕、二宮秀與 . 1998 : 全天日射量から直達日射量と天空日射量を推定する各種モデルの比較と評価 . , 日本建築学会計画系論文集 , 512 , 17-24
- [19] Reindl, D. T., Beckman, W. A., Duffie, J.A. 1990 : DIFFUSE FRACTION CORRELATIONS., *Solar Energy*, V45, 1, 1-7
- [20] 小倉義光 . 1999 : 「一般気象学 第2版」, 東京大学出版会
- [21] Alados, I., Alados-Arboledas, L. 1999 : Direct and diffuse photosynthetically active radiation: measurements and modeling., *Agricultural and Forest Meteorology*, 93(1), 27-38
- [22] Kirk, J. T. O. 2002 : 「水圏の生物生産と光合成」, 恒星社厚生閣
- [23] 漁港・漁場の施設の設計の手引き 2003年度版
- [24] 稲田勝美 . 1984 : 「光と植物生育」, 養賢堂
- [25] 馬場将輔 . 2010 : 紅藻マクサの生育に及ぼす温度、光量、塩分の影響 . , 海洋生物環境研究所研究報告 , 第13号 , 61-74
- [26] Ahmad, M. J., Tiwari, G. N. 2011 : Solar radiation models-A review., *INTERNATIONAL JOURNAL OF ENERGY RESEARCH*, 35(4), 271-290
- [27] 気象庁 . 2009 : 大気・海洋環境観測報告 第11号 2009年観測成果
- [28] Norris, J. R., Wild, M. 2009 : Trends in aerosol radiative effects over China and Japan inferred from observed cloud cover, solar “dimming” and solar “brightening” ., *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH-ATMOSPHERES*, 114, D00D15
- [29] 独立行政法人国立環境研究所 National Institute for Environmental

- Studies (NIES) . : 環境数値データベース (<http://www.nies.go.jp/igreen/>)
- [30] 竹村俊彦 . 2009 : エアロゾル気候影響評価の現状と今後の展開 , *EaroZoru Kenkyu*, 24(4), 237-241
- [31] 藤田大介 . 2004 : 「有用海藻誌」有用海藻の生物学 テングサ類, 内田老鶴園

5 . 主な発表論文等

- 〔雑誌論文〕(計 1件)
- Hidekazu SUZUKI, Tamotsu NAGUMO, Jiro TANAKA, *Cocconeis tortilis*: a new marine diatom (Bacillariophyta, Cocconeidaceae) from Japan, 査読有、161, 2014, 219-226
DOI:10.11646/phytotaxa.161.3.5

- 〔学会発表〕(計 1件)
- 中川雄太、荒川久幸、日照の変動がテングサ群落へ及ぼす影響、日本水産学会、2011年9月28日、長崎大学(長崎県)

6 . 研究組織

(1) 研究代表者

荒川 久幸 (ARAKAWA Hisayuki)
東京海洋大学・大学院海洋科学技術研究科・教授
研究者番号 : 40242325

(2) 研究分担者

小橋 史明 (KOBASHI Humiaki)
東京海洋大学・大学院海洋科学技術研究科・准教授
研究者番号 : 80377077

鈴木 秀和 (SUZUKI Hidekazu)
東京海洋大学・大学院海洋科学技術研究科・准教授
研究者番号 : 90432062

(3) 研究協力者

木本巧 (KIMOTO Takumi)
東京都島嶼農林水産総合センター