

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 17 日現在

機関番号：33910

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2014

課題番号：25630409

研究課題名(和文)高濃度CO<sub>2</sub>を活用した海藻の大量生産研究

研究課題名(英文)Research on Large Amount of Algae Production used High Concentration Carbon Dioxide

研究代表者

武田 邦彦(TAKEDA, Kunihiko)

中部大学・総合工学研究所・教授

研究者番号：80255645

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：海洋資源の利用、エネルギーおよび食糧資源の確保などの極めて重要な視点から高濃度CO<sub>2</sub>を活用した藻類の大量培養を進める必要があると考えられるが、本研究を通じて、早期に研究が必要なものは関連する化学工学の研究、それに付随して海洋工学、藻類研究と化学工学の融合である。工業化の研究段階は初歩的段階であるが、研究の社会的意義が大きいため公的資金獲得が可能であるので「有望である」という概念や研究申請が先行し、エネルギー収支、環境影響、科学的合理性に対する検討がまったく不十分であることが分かった。本研究を通じてCO<sub>2</sub>利用研究が単なる研究費獲得のための活動にならないことがもっとも重要であることが分かった。

研究成果の概要(英文)：The research and development on the application of high concentration carbon dioxide so as to culture the large amount of algae are indispensable for the utilization of sea resources and the cultivation of energy and foods. The most important item which should be studied in the early stage is the development of the chemical engineering being connected with Ocean engineering and the basic algae research. The imaginary concept of the significance and the offer for the research funds have been gone ahead instead that the studies on the energy balance, the effect to the circumstance and the logical structure for the significance. The research tends to change to the simple activity for the acquisition of research funds.

研究分野：資源材料工学

キーワード：資源 海洋 藻類 二酸化炭素 工業 培養 化学工学 研究

様式 C - 19、F - 19、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

本研究を開始する当初、本研究機関以外で進行していた背景と研究機関は次の通り。

#### (1) 藻類の培養研究

高知大学では、発芽体集塊化法によりホソエダアオノリ、昆布の培養速度の向上に成功していた。ただし、大型藻類の課題として、成長した藻類同士が絡まるため、培養リアクターが大きく設計されているなど、培養時の条件が定まるには基礎的知見が必要と考えられていた。

#### (2) 藻類の環境に及ぼす研究

鹿児島大学では、藻類などの微生物が環境に与える影響について研究を進めていた。研究当初はたとえば水が停滞する湖沼において、微生物が有効な汚染対策になり得るということで多くの成果を上げたが、微生物の湖沼環境全体、および特に湖沼周辺(上流、下流を含む)に対する影響についての研究を進めていた。

#### (3) 藻類に工業的培養に関する基礎的研究

琉球大学の装置ではアルカリ酸化物付加、有害とされる元素の調整と生物への影響、沖縄産の水産物への適応、高濃度CO<sub>2</sub>濃度の調液、およびこれらの基礎的知見に基づく培養リアクターのシステム工学的研究を進められていた。

#### (4) 高濃度CO<sub>2</sub>の藻類生育に関する概念研究(本研究機関の研究)

空気中のCO<sub>2</sub>量の減少(太古の昔から現代に至る)によってもたらされている植物生育速度を人工的に発生する高濃度CO<sub>2</sub>によって飛躍的に高める研究の一環として、そのもっとも基幹的な部分について、学問的、基礎的に研究を行っていた。

この研究は単にCO<sub>2</sub>の利用研究という側面ばかりではなく、たとえば火力発電所からの高濃度CO<sub>2</sub>の利用の場合に次の課題を生じる。

石炭は数億年前の植物の化学的変質物であり、それを火力発電所で燃焼させた排ガスは植物の体の成分の変質物と酸素の反応の結果で生じたものであり、CO<sub>2</sub>の他、植物由来のイオウ、チッソの酸化物、金属酸化物などである。

しかし、火力発電所の排ガスは「有毒物質」と言われる水銀、重金属をはじめとして、イオウやチッソ由来の二酸化硫黄、窒素酸化物を含む。このような元素や化合物は微量であるか、あるいは化合物の形態に因っては人間にも必須のものであり、また有毒物とは認識されない。すなわち水銀のような化合物も人体には微量に必要とされ、その制御自体に課題があることは明らかである。

### 2. 研究の目的

本研究では 1) 植物の変質物質としての空気中の酸素との反応生成物の分析と解析、2) 濃度調整やPHなどの調整に必要な酸化還元、酸塩基バランスの理論検討、3) スケールアップに伴って必要とされる新しい化学工学の体系、の3つを実施する計画であ

った。これまでエネルギー、有機物質の燃焼を中心に研究してきたので、その知見を「藻類の生物学生態学」ではなく、技術完成に必要なとされる基礎的分野をカバーし、新しい原理の構築を目指す。

### 3. 研究の方法

#### (1) 全体計画

これまで検討してきた工業的生産を視野に入れたプラントシステムを図2に示す。本プラントシステムはこれまでの農学的手法に加え、高効率で連続生産を可能にさせるため、次のような工学的要素を検討した。石炭火力発電所の排ガスのように大気中のCO<sub>2</sub>濃度の40倍と高濃度のCO<sub>2</sub>源を利用する、無気泡溶解装置を利用し、低圧力で高濃度のCO<sub>2</sub>を水に溶解させる、培養槽には太陽光以外に特定の波長の光(LED)を照射する。高効率回収システムの考案(分離工学)、連続生産を可能な循環型システムにする具体的設計を行う。

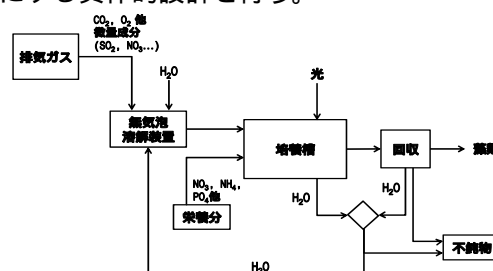


図1 プラントシステムフロー

#### (2) 高濃度のCO<sub>2</sub>の活用

高濃度炭素資源として、火力発電所の排ガスを利用する。火力発電所の排ガスには、CO<sub>2</sub>が14%と大気に含まれるCO<sub>2</sub>濃度の400倍と高濃度であり、火力発電所に利用される投入資源は、生物の死骸から成っているため、その燃焼後の排気ガス中には生物の成長に必要なO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>等も含まれる。ガスの溶解方法としては、既存のバブリング(液体に気体を溶解)方式ではなく、無気泡溶解装置を用いて装置内に気体を充満させ、一定の加圧状態の中に液体を通過させる溶解方法を採用する。

#### (3) 藻類培養と回収

琉球大学瀬名派研究室で使用していたリアクターにさらに改良を加え、密閉型の円筒型100Lリアクターを用いる。

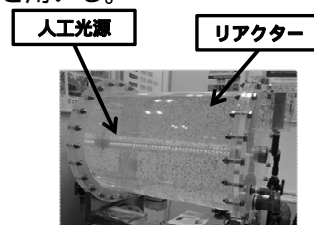


図2 密閉型円筒型リアクター

密閉型の円筒リアクターを用いることにより、高濃度CO<sub>2</sub>凝縮の培養を可能にし、ポンプから流入される角度を調整し溶解水の流速を利用してリアクター内

の藻類が攪拌する仕組みとなっている。また、リアクター中心に人工光源（LED）を照射し、日中の太陽光だけではなく、夜間も人工光源を利用し藻類の成長を促進することが可能となる。藻類の光合成に利用する光の波長は、440nm付近および670nm付近にピークがあり、リアクターに用いる人工光源は、波長を調整することが可能となっており、生産する藻類の種類に合わせて波長を調整することによりさらに高効率で光エネルギーを利用することが可能である。本研究では、生産速度を促進させるため、CO<sub>2</sub>濃度、PHの調整に加え、人工光源の波長調整を行う。これら投入資源から最終プロダクトまでの全体構成を考え、物質・エネルギーバランスを算出し、最適な培養条件を導く。特に培養中に細菌等による藻類の死滅を未然に防ぐため、培養槽を一つではなく、成長ステージに応じて、数個の培養槽を移行していく培養プロセスを設定する。

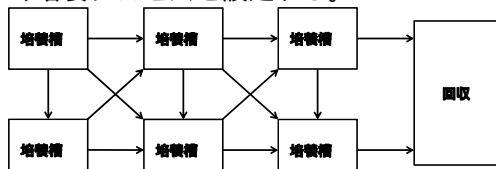


図3 培養層システムフロー

#### (4) 実験とプラントおよびシステムについての総合的研究計画

投入資源から最終プロダクトまでの全体構成を考え、物質・エネルギーバランスを算出、総合的データ処理し、最適な培養条件（pH、温度、光の調整）を導き出すための計算式（シミュレーションプログラム）を作成する。また、この計算式を用いて、実機レベルでの実証試験を行う場合の培養条件、運転効率を設定する。この計算式が確立できれば、どのような投入資源、培養生物、プラントサイズにおいても最適の条件を導き出すことが可能となる。

#### (5) 藻類の大量生産、高濃度CO<sub>2</sub>の利用がもたらす持続性への影響

様々な環境破壊、資源枯渇などが言われているが、現在の地球環境はそれ自体である調和的な状態にあり、藻類の大量精査やCO<sub>2</sub>の利用は一見して地球環境の改善につながるように見えるが、現実には現在の調和を乱すとも考えられる。この問題については直接的な研究とはことなり、より多くの研究者の参加を求めて研究を進める必要がある。そのために、主として持続性研究会のようなものを計画している。

### 4. 研究成果

#### (1) 新二酸化炭素溶解方法における培養結果

通常の曝気方式と、高濃度ガスを含んだ水を使用した酸素の溶存量の比較を行った。空気曝気と高濃度酸素の溶解槽方式では約3倍の差があり、また内水面の底面に豊富な二酸化炭素と酸素を必要な場所に投入することができることが明らかになった<sup>1)</sup>。

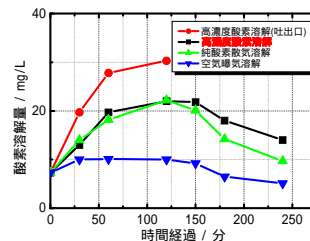


図4 気体原料の供給方式

この結果を受けて、2%純CO<sub>2</sub>濃度によるホソエダアオノリの500L大型水槽培養実験では、4日目までの自然海水との成長比は約1.5倍となり、オゴノリのピーカー培養実験ではCO<sub>2</sub>濃度1%の時、3.5倍の成長量が得られた。

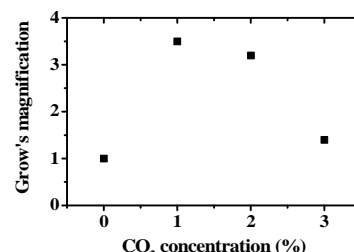


図5 CO<sub>2</sub>濃度とオゴノリの成長量

次に中期培養による増殖速度変化を調べた結果を示すが、高濃度二酸化炭素による緑藻類の培養速度の増加が見られた。

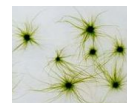
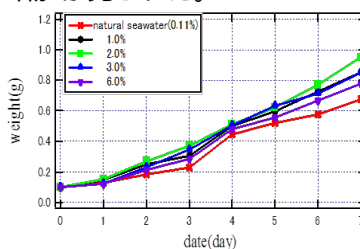


図6 高濃度CO<sub>2</sub>培養中期試験の結果

図の右に示した写真が培養の途中で得られた緑藻類であり、核を中心として四方に増殖が見られ、従来のように岩の表面を必要としないで増殖が続くことが明らかになった。

また、本報告では紙面の都合で、高濃度二酸化炭素の吸収、それによるPHの変化、石炭からの弱アルカリによる自然中和については割愛する。

#### (2) プラント設計および問題点の抽出

基礎研究で得られた数値を用いてプラント設計を行い大量培養のマスバランス、環境負荷、コスト試算などを行った。まず基本的なフローを設定し、それに基づき装置の設計およびマスバランス、エネルギーバランスの計算を実施した。検討結果は詳細にわたるので、全体像を図に数値を書き込んで示した。

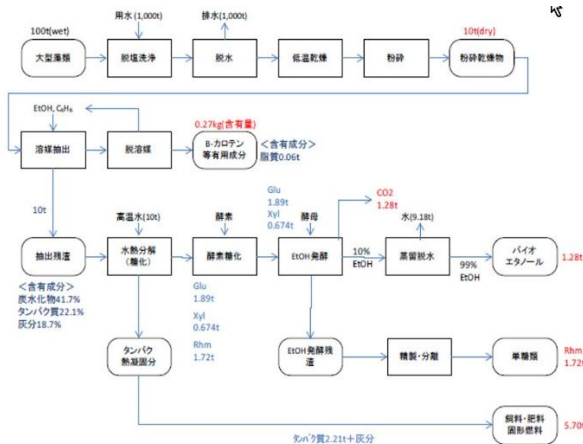


図 7 高濃度 CO2 を利用した藻類培養プロセスのマスバランスとフロー

その結果、単純に海水中の炭素資源（藻類）を培養して固定するだけでは培養プロセスの電力消費が大きく、工業的な生産としては不十分であること、さらに高付加価値製品を生産した場合においても現在の電力費からは工業化が困難であることが分かった。

表 1 プラントの電力消費量

種別	有用物質			工業製品			中間製品		合計
	βカロテン	EPA	エタノール	肥料	アルギン酸	糖類			
組成 [円/kg]	100,000	18,000	1,183	40	2,550	185			
生産可能量 [kg]	0.058	23	1,253	5,697	0	1,720			
売上見込額 [円]	5,800	414,000	1,482,137	227,880	0	318,200			2,448,017

(3) 全体的な概念に関する成果

人間の活動のほとんどは「還元された炭素」を使用し、それを「酸化された炭素（二酸化炭素）」にすることによって取り出される。還元された炭素としては過去の太陽の光でできた蓄積物（石炭、石油、天然ガス）と、現在の太陽光でできる植物プランクトン、植物（森林と穀類）がある。

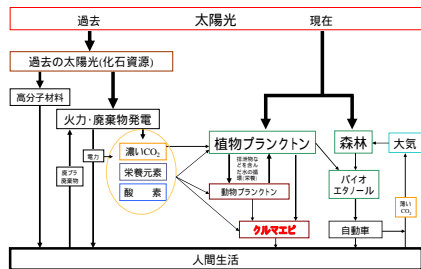


図 8 高濃度 CO2 利用の炭素資源の固定概念図

太陽の光は人間が利用するのに不都合な状態にある。太陽光の利用の方法は多くあるが、例えばもっとも効率的な利用の一つである植物による炭素の還元と固定において、地表に降り注ぐ太陽の光のエネルギーを 100 とすると、植物に有効に当たる光が 7 割、そのうち光合成に利用し得る光が 57%、植物の体内で有効なエネルギーに変換する効率を入れると 14%、さらにそのエネルギーを物質に変換する効率を

入れると 4.3%となる<sup>2), 3)</sup>。つまり、原理的に太陽の光を物質に変換すると約 25 分の 1 になる。さらに植物自体は生きていくために物質を作るのだから、その約 3 分の 2 は植物自体が使用する。従って最終的に人間が使用できる最大理論量は 1.3%、つまり 77 分の 1 だけ利用しうる<sup>4)</sup>。

理論量に対して、実際の炭素固定量を観測すると、陸上の樹木では愛知県をベースにすると図 9 の左の表に示したように、愛知県では年間 309kt が蓄積され、太陽光のエネルギー (GJ: ギガジュール) あたり 3.6g の還元炭素を蓄積することになる。これに対して、海上の植物では宇宙からのリモート測定結果であるが、GJ あたり 83g 程度の還元炭素が得られている<sup>5)</sup>。つまり理論量が太陽光 GJ 当たり蓄積還元炭素 268g であるので、陸上植物で得られる現実の炭素量は理論量の 1.3% にしかならないことが判る。これが、農業が工業に決定的に打ち負かされた理由である。

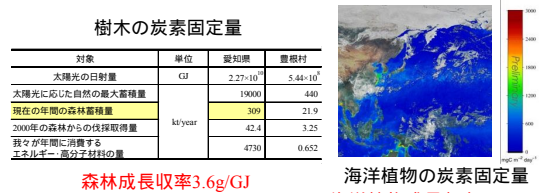


図 9 実際の炭素固定量

(左：陸上樹木、右：海洋植物)

これに対して海上における炭素固定量は陸上に比べて同一二酸化炭素固定量で約 6 倍であり、これは固体である「土」と液体である「海」の活動力の差が原因している。以上をまとめると表 2 に示したように、工業と対等な生産効率を有する第一次産業としては、第一に樹木を対象とするのではなく、植物プランクトンを対象とすべきこと、第二に、それでも生産効率は不十分であり、二酸化炭素の濃度を高めるなどの手段で、理論量を上回る環境を創り出すことが可能であるかに因ることが判る。

表 2 炭素固定原単位の第一次比較

植物種	CO2濃度	物質収量		効率倍率	
		理論値	現実値	理論値	現実値
	%	g/GJ		-	
樹木	0.035	268	3.6	1.0	1.0
	0.035	-	83	-	23.1
植物プランクトン	10	23700	1020	88	283
	14	33200	1430	124	397

バイオマスを利用して工業的効率に接近するためには陸上植物ではなく、海洋の植物プランクトンの利用がもっとも望ましいことが判った。これは太陽光と海の移動がエントロピーポンプであるということをも具体的に示したものである。植物の生育は光の強さと光の波長に依存する。北半球に生息する植物は光の強い夏期に固定量が高くなる<sup>6), 7) 8), 9)</sup>。二酸化炭素の濃度が上がれば光合成速度は向上し、また光の強さが強くなれば速度は上がる<sup>10), 11)</sup>。

高濃度のCO<sub>2</sub>源として火力発電所を考えると微量元素が植物の体に近い状態で含まれていることと、二酸化炭素の濃度が高いことである。二酸化炭素の濃度が大気中の濃度に対して400倍、酸素の濃度が4.76倍である<sup>12)</sup>。

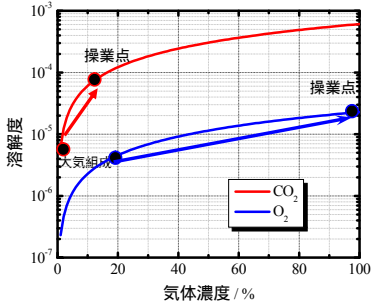


図 10 気体濃度と溶解度の基礎的關係

海水組成と人間の血清中の組成はすでに知られているが<sup>13), 14)</sup>、一般的に生態は周囲の自然界に対して独自の濃縮性を持つ。生態は自らの体の成分を調整する機能を持っており、環境が大きく変動しない限り、もっとも適した組成に調整しうる<sup>15), 16), 17)</sup>。

植物プランクトン、動物プランクトンおよびクルマエビの生育原料(通常は餌という)は複雑な関係になっているが、植物プランクトンが要求する栄養塩のうち、窒素では表のように動物プランクトンの排泄によるところが大きく全体の77%にも及ぶ<sup>18)</sup>。そのために例えば動物性プランクトンの養殖池の水を循環させ、植物プランクトンの水槽へ送ることが考えられる。

プラントは内水面を中心としてその周囲に維持に必要なプラントが配置される。原水タンク、混合水槽、殺菌槽、付属養殖場、動物性プランクトン育成槽、気体溶解エリア、分析管理研究棟、ストックエリア



などから構成される。

図 11 大量培養の工場のイメージ図

#### (4) 藻類の大量培養と持続性の検討結果

「持続可能」という用語は、「国連環境計画(UNEP)」と「世界自然保護基金(WWF)」との共同で「国際自然保護連合(IUCN)」が1980年にはじめて提唱したものである<sup>19)</sup>。この概念は、その後国連を中心に発展し、さらに「環境と開発に関する世界委員会(WCED)」での検討が進み、1987年に出された報告書「我ら共有の未来(Our Common Future)」で、「持続可能な開発」に対して「将来の世代のニーズを満たす能力を損なうことなく、今日の世代のニーズを満たすような開発」という考え方が示された<sup>20)</sup>。この概念が広く世界に知れ渡るきっかけになったのは、1992年にリオ

デジャネイロで開かれた「環境と開発に関する国連会議(地球サミット)」であり、そこで合意された「環境と開発に関するリオ宣言」や「アジェンダ21」などに具体的内容が記載されている<sup>21)</sup>。

日本においては、1993年に制定された環境基本法及び2001年に制定された循環型社会形成推進基本法に「循環型社会」が示されていて、それが「持続可能」に対する考え方の基礎になっている。

これらの持続性概念のうち、二酸化炭素による温暖化、および温暖化による環境破壊、さらには環境破壊による人類の文明に関する持続性の喪失についてはすでに1988年以後、世界的に膨大な論文や報告があり、ここでその事実や是非を論じるのは不適切であると考えられる。

地球が誕生したときに大気中のCO<sub>2</sub>は95%であり、多細胞生物が誕生した5億5千万年前、あるいは生物がもっとも勢いが良かったとされる約2億年前の中生代にはCO<sub>2</sub>濃度は現在の百倍程度であったこと、その状態で気温は現在より若干高い程度であり、決して生物が打撃を受ける環境ではなかったことから、少なくとも平衡論的には3百年後に現在の0.04%から0.06%程度に上昇したことによって極端な気象になる可能性が低いことを指摘する。

「持続性」という観点から発信すべきことはCO<sub>2</sub>の低下によって植物の生育が阻害され、食料、森林、炭素系天然資源を失い、ついには生物全体が絶滅する可能性が高い。

過去に大気にあったCO<sub>2</sub>が植物の活動によって炭素が固定され、高分子化合物やグルコースなどを形成し、生命体の体を形成し、エネルギーを得ることによって命を維持したこと、その過程で生成した生物の死骸が蓄積して現在の炭素系資源となったこと、炭素系資源を高分子材料として使用し、最終的に空気中の酸素と結合させて、大気中にCO<sub>2</sub>を出すことは、長期的に地球の炭素資源を循環して持続性を保つ行為である。

人間以外の生物の内、短期的には植物はCO<sub>2</sub>を固定する事も消費することもできない。植物は空気中のCO<sub>2</sub>と地中の水を取り込んで太陽光を利用して光合成を行い、植物の体とエネルギー源としての炭素化合物を得る。昼間に太陽光を浴びることができる場合には、呼吸によって炭素化合物を消費するが、光合成が勝りCO<sub>2</sub>の吸収側になる。一方、夜間は光合成が止まり呼吸で炭素をCO<sub>2</sub>にするだけなのでCO<sub>2</sub>の放出側になる。植物の重量が増減しない場合は一本の樹木であっても、森であってもCO<sub>2</sub>を吸収することはない。また時系列的には森林が定常である場合は、重量が増大している樹木はCO<sub>2</sub>吸収側、落葉、枯死などによって重量が減少している樹木はCO<sub>2</sub>排出側になる。ただ、天変地異などによって特別に地中や水中に倒壊し空気中の酸素と触れない場合はそのまま炭素として地球に蓄積されるが、その量は植物が固定する大気中のCO<sub>2</sub>の量の1万分の1以下であり、3百年ぐらいの期間では大気中のCO<sub>2</sub>濃度を変化させるには至らない。

## < 引用文献 >

- 1) 大栄株式会社, 酸素溶解比較試験レポート, 愛知県豊橋市 (2006).
- 2) 内嶋善兵衛, 太陽光と植物, 東京大学出版会 (1970), p8.
- 3) Sato, K., Komamine, A., *Photosynthesis*, p.41, Asakura Shoten (2002).
- 4) 坂本健太郎, 遠藤小太郎, 行本正雄, 武田邦彦, 日本機械学会論文集, 72, 722, B編 (2006).
- 5) 宇宙航空研究開発機構ホームページ, [http://www.eorc.jaxa.jp/imgdata/topics/2003/img/tp030620\\_02.jpg](http://www.eorc.jaxa.jp/imgdata/topics/2003/img/tp030620_02.jpg).
- 6) ICHIMURA & Y. ARUGA, Photosynthetic nature of natural algal communities in Japanese waters. *Recent Researches in the Fields of Hydrosphere, Atmosphere and Nuclear Geochemistry*, (1964), p.13-37.
- 7) 代田昭彦, 水産餌料生物学, 恒星社厚生閣 (1975).
- 8) Latimer, P. & Rabinowitch, E. Selective scattering of light by pigments in vivo. *Arch. Biochem. Biophys.*, 84 (1959).
- 9) Jhon T. O., 水圏の生物生産と光合成, 恒星社厚生閣 (2002).
- 10) ICHIMURA, S & Y. SAIJO & Y. ARUGA, Photosynthetic characteristics of marine photoplankton and their ecological meaning in the chlorophyll method. *Bot Mag. Tokyo*, 75 (1962), pp.212-220.
- 11) Rabinowitch, E. I., *Photosynthesis*, Vol. 1, New York: Interscience (1951).
- 12) 日本化学会化学, 便覧基礎編, 丸善 (2004).
- 13) K.H.Wedepohl, *Geochemistry*, Rinehart and Winston (1971) p.65.
- 14) 西村雅吉, 海洋科学, 産業図書(1983).
- 15) H. W. Harvey, *J. Mar. Biol. Assoc. U.K.*, 23 (1939), p.499.
- 16) K. A. Gusseva, *Mikrobiolgiya*, 6 (1937), p.292.
- 17) 元田茂, 海洋プランクトン, 東海大学出版会 (1975).
- 18) 代田昭彦, 水産餌料生物学, 恒星社厚生閣 (1975).
- 19) IUCN, UNEP, "World conservation strategy: Living resource conservation for sustainable development", Gland, Switzerland, International Union for the Conservation of Nature and Natural Resources (IUCN) (1980)
- 20) Brundtland, Gro Harlem, "World commission on environment and development", Our common future (1987).
- 21) United Nations, "Report of the United Nations Conference on Environment and Development", General Assembly (1992).

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計0件)

[学会発表] (計4件)

- 武田邦彦、「藻類の大量培養による環境悪化の可能性」、鹿児島大学水産学部前田研究室研究会、2014年12月05日、鹿児島大学水産学部前田研究室(鹿児島県、鹿児島市)
- 武田邦彦、「高濃度CO<sub>2</sub>による藻類の大量培養と環境問題」、琉球大学瀬名波研究室研究会、2014年11月30日、琉球大学瀬名波研究室(沖縄県、中頭郡)
- 武田邦彦、「高濃度CO<sub>2</sub>を活用した海藻の大量生産に伴う「死の谷」克服研究」、一般社団法人海洋創生機構平成26年度海洋環境創生機構講演会、2014年11月15日、TKP八重洲カンファレンスセンターホール(東京都中央区)
- 武田邦彦、「持続性に関する疑問と未来」、持続性と死の谷研究会、2014年7月14日、中部大学名古屋キャンパス(愛知県、名古屋市)

[図書] (計1件)

- 武田邦彦、金澤一輝、山内陸文ら、「持続性再考論 持続性は破綻しない」、持続性研究会 (2015) 中部大学ドキュメントセンター, pp.44-64, 117-120, 197-208, 209-229

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

武田邦彦 (TAKEDA, Kunihiko)  
中部大学・総合工学研究所・教授  
研究者番号: 80255645

(2) 研究分担者

中島江梨香 (NAKAJIMA, Erika)  
中部大学・総合工学研究所・博士特別研究員  
研究者番号: 70708932