

# 光資源を活用し、創造する科学技術の振興 (仮称)

文部科学省科学技術・学術審議会  
資源調査分科会報告書(案)

光資源委員会  
2007年6月28日

## 目 次

### まえがき

#### 第1章 光と地球環境及び環境計測

名古屋大学太陽地球環境研究所教授 松見 豊

#### 第2章 豊かなくらしに寄与する光

##### 1 光触媒で快適空間を作る

(財)神奈川科学技術アカデミー理事長 藤嶋 昭

##### 2 光と植物 - 植物工場

東海大学開発工学部教授 高辻 正基

##### 3 光と水産

東京海洋大学海洋科学部教授 森永 勤

#### 第3章 健康なくらしに寄与する光

##### 1 照明光に対するヒトの適応能

九州大学大学院芸術工学研究院長 安河内 朗

##### 2 光の治療的応用～光による生体リズム調節

滋賀医科大学睡眠学講座教授 大川 匡子

##### 3 光を用いた非侵襲生体診断

電気通信大学電気通信学部教授 山田 幸生

#### 第4章 経済・社会の高度化に寄与する光

##### 1 大容量、高速光通信ネットワーク

NTT 未来ねっと研究所長 萩本 和男

##### 2 光による粒子の加速とその利用

(独)日本原子力研究開発機構量子ビーム応用研究部門長 加藤 義章

##### 3 アト秒パルス、テラヘルツ光等新しい光

(独)理化学研究所緑川レーザー物理工学研究室主任研究員 緑川 克美

#### 第5章 提言 今後の展開方向と課題

##### 1 光資源を活用し、創造する科学技術の展開方向

1 - 1 地球環境問題の解決のために

1 - 2 より豊かで快適な生活のために

1 - 3 健康にくらすために

1 - 4 光科学技術によるイノベーション

##### 2 光資源を活用し、創造する科学技術に共通する課題

2 - 1 学際的交流の促進

2 - 2 行政、産業等関係者の連携確保等

2 - 3 人材の育成

2 - 4 国民の理解と支持の獲得

## まえがき

地球に降りそそぐ太陽光は、地球環境システムの根幹をなすものであり、すべての生命の源である。

46億年ほど前、誕生したばかりの地球にはオゾン層がなく、生物のDNAを破壊する紫外線がふりそそいだことから、生物は水中にしか存在し得なかった。約27億年前、水中のラン藻類の光合成は、次第に大気中の酸素濃度を増大させ、オゾン層が形成されて有害紫外線がカットされるようになり、4億2千万年前には生物が陸上に進出することが可能となった。このようにして、次第に現在の地球環境が形成されて、その下に、多様な生物が現れるとともに、人類が誕生し、人類は、光環境に様々に適応しながら、また、光を活用して、文明社会を築き上げてきた。

太陽光は、地表上の気温を保つことなども含めて、生命の生存の基盤となっているが、経済活動の高度化等に伴う地球温暖化、オゾン層の破壊等の地球環境問題は、その基盤の存続を脅かしかねないものとなっている。

また、太陽光は、光合成を通じて地球上の生命現象のほとんどすべてを支えており、文明社会の基礎となっている石油、天然ガス等の化石エネルギー資源や水力、風力等のエネルギーも、もとをたどれば皆、太陽光が源であるということが出来るが、太陽光の地表に到達するエネルギーのうち、食料やエネルギー源として有効に使われているのは、その十万分の一程度に過ぎないといわれている。

更に、人類は、白熱灯や蛍光灯などの照明やレーザー、放射光といった新しい光を創出し、また、光触媒、光ファイバー通信をはじめ、光に関連する科学技術を飛躍的に発展させてきたところであり、21世紀は、エレクトロニクス時代からフォトニクス（光科学）の時代、「光の世紀」になると言われるほど、光科学技術の研究開発には大きな期待が寄せられているが、今なお、光の持つポテンシャルは、十分に活用されているとは言えない。

このような中で、経済と環境を両立させつつ、安全かつ安心して暮らせる豊かな未来の実現を図るためには、光全体を様々な可能性を秘めた資源として捉えて、これを活用し、又は創造する科学技術を振興していくことが極めて重要である。

このような観点に立って、科学技術・学術審議会資源調査分科会では、光資源委員会を設置して、光科学技術を振興し、光資源を総合的に活用する方策について、調査審議を行ってきたものである。

なお、本報告書は、光科学技術に関するすべての内容を網羅するというよりも、特に日常生活に関わりの深い分野を中心に取り上げるとともに、光科学技術に関する国民一般の理解を深めるという観点から、わかりやすく記述するという方針で取りまとめている。

### 1 - 1 はじめに

最近、地球環境問題がテレビや新聞等で報道や特集されない日がない程の状況であり、非常に注目を集めている。世界各地での旱魃、洪水、異常高温・低温などの異常気象が地球環境問題と関連して考えられるようになってきた。オゾン層破壊や大気汚染とその健康への影響に関も大きな話題となっている。この地球環境問題の根源には急速に増大する人間活動による環境への影響があると認識されはじめており、このまま人間活動の影響の増大が続くとどうなるか、どうすれば環境問題を軽減できるかなどが社会的な重要な関心事項となっている。地球環境問題に対する対策を議論する中で、今後の数十年から百年の長期的な地球環境の変動予測が重要な資料として用いられている。地球環境は極めて複雑なシステムであるので、そのモデルシミュレーション計算による将来予測は非常に難しい。将来予測のモデル計算をより確からしくするための重要な基礎となるものに、地球環境問題を引き起こしているメカニズムに対するより深い理解、および環境計測によるより正確な状況把握がある。このメカニズムと環境計測において光が重要なかわりを持っている。一つは、光が要因となって様々な環境問題を引き起こしている点である。すなわち光が地球環境問題のメカニズムの根幹に関与している。もう一つは、より正確な高度な地球環境の計測に光技術を応用した計測技術が活用されている点である。この2つの面での光と地球環境のかかわりを見てゆく。

### 1 - 2 地球環境問題に関わる光の役割

地球の環境システムは、主に、大気圏、水圏、雪氷圏、陸域、および生物圏の5つのサブシステムからなっている。これらは太陽からの光によって強い影響を受けているし、またサブシステム同士の強い相互作用がある。大気圏は、その地球環境システムのうち最も不安定で急速に変化するサブシステムである。地球の大気は、15kmの高度で圧力が地上より1/10になり、30kmの高度で地上の1/100になる。地球の直径13,000kmに比較するとはるかに小さく、大気はリンゴの薄皮のようなものである。地球大気の主成分は窒素、酸素、水蒸気、アルゴンである。この大気中に土壌・海洋・火山や樹木などからいろいろな気体が放出されている。人間活動(によっても様々な気体が大気中に放出される。とくに産業革命以降の産業・農業・交通などの発達により地球大気へ様々な人為起源の微量気体を放出

する量が大きくなっている。図1に大気中の4つの化学成分の西暦1750年以降の濃度変化を示した。二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)は石油などの燃焼により放出され、メタン(CH<sub>4</sub>)および一酸化二窒素(N<sub>2</sub>O)は農業などにより放出される。CFC-12は後で述べるオゾン層破壊物質である塩化フッ化炭素化合物(CFC compounds、フロン)の一種であるCF<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub>である。これらの微量成分は、大気全体の0.1%を占めるに過ぎない。しかし、これらの微量成分が光との相互作用を通じて、地球環境に大きな影響を与える。現在、地球規模の環境問題として成層圏オゾン層破壊、地球温暖化、大気環境汚染などの問題が大きな関心を呼んでいる。これらはいずれも大気圏の問題である。地球環境問題のメカニズムの解明のなかで、光が中心的な役割を果たしていることがわかってきている。

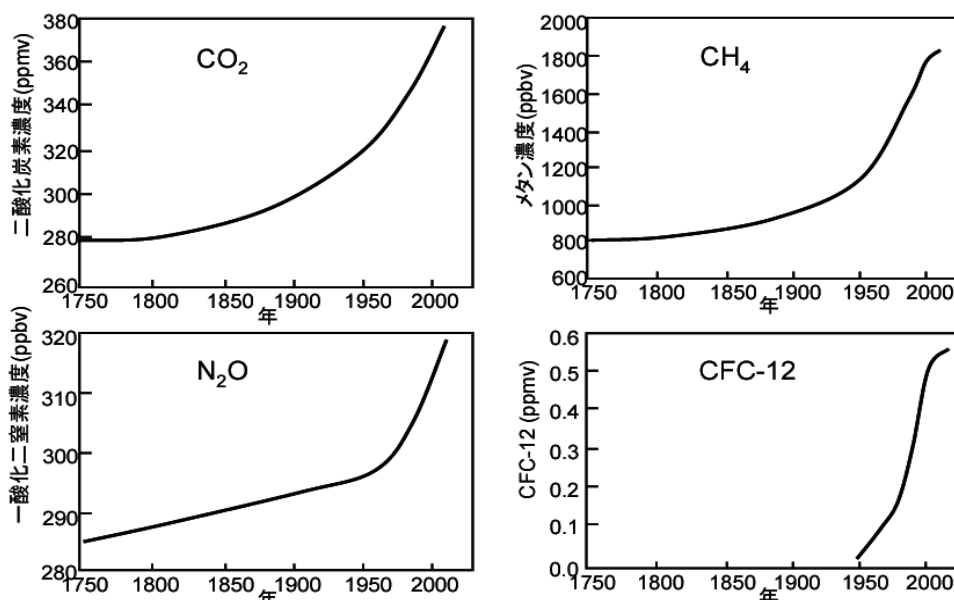


図1 西暦1750年以降の大気中の微量成分気体の増加の様子

### (1) 成層圏オゾン層破壊問題における光が果たす役割

成層圏オゾンは地球大気中の酸素分子と太陽放射光との光化学反応により作られる。太陽光は温度約6000 K (5700 )の黒体放射とみなせるので、図2において「大気の外からの太陽光」として示されているスペクトル分布を持っている。太陽光は目に見える可視光の領域(400–700nm)が最も強いが、波長の短い200–400 nm付近の紫外光も地球大気に降り注がれている。大気主成分である窒素分子(N<sub>2</sub>)は100 nmより短い波長にしか光吸収を持たないので太陽光による光化学反応には関与しない。次に多い成分である酸素分子(O<sub>2</sub>)は、図2に示すように、240 nm 程度まで光吸収スペクトルがあるので、太陽光のスペクトル強度と重

なる部分がある。このため、 $O_2$ は太陽紫外光を吸収する。240nmより波長の短い光子のエネルギーは $O_2$ の化学結合エネルギーより大きいので、 $O_2$ は光吸収の後、2つの酸素原子(O)に光分解する。大気中で生成したO原子は周囲にある $O_2$ と結合してオゾン分子( $O_3$ )になる。

大気上部から透過してくる太陽光のうち、 $O_2$ の光吸収に相当する部分は多量の $O_2$ により吸収されてしまい、高度の低い所まで到達できない。従って、 $O_2$ の光分解による酸素原子の生成が起こらないために低い高度ではオゾンの濃度は低い。また、高い高度では $O_2$ の濃度が低いためオゾンの濃度が減少する。このようにしてオゾンは地球大気の高さ 15–50 km、すなわち成層圏に集中して存在する。成層圏に層をなして存在するので成層圏オゾン層と呼ばれる。

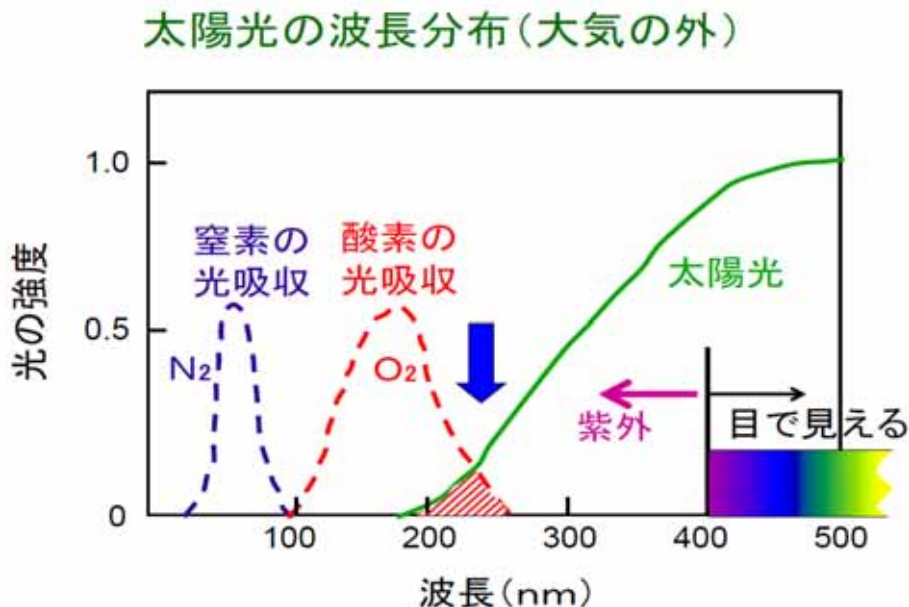


図2 大気の外の大気中の太陽光の強度の波長分布、および窒素分子 $N_2$ と酸素分子 $O_2$ の光吸収スペクトルの概念図。太陽光は目で見える可視(400-700 nm)の部分が強いが、紫外線にも光強度を持つ。酸素分子の光吸収と紫外線の太陽光の重なり(青矢印で示した斜線部分)により、酸素分子の光分解が起こる。これが成層圏オゾンの生成につながる。

オゾン分子 $O_3$ は図3に示すように200–300 nmに非常に強い光吸収を持つ[1]。このため、この波長域の太陽光が地上に届くのを防いでいる。300nm付近から短波長の光は地球上の植物・動物などの生き物にとって非常に有害である。生物が細胞増殖するとき用いるDNA(デオキシリボ核酸)の中の核酸分子がこの波長域の紫外光を吸収して、損傷してしまうからである。たとえば、人間においては皮膚がんの原因になる。成層圏オゾン層が地球上の生物を太陽紫外光から守っている。

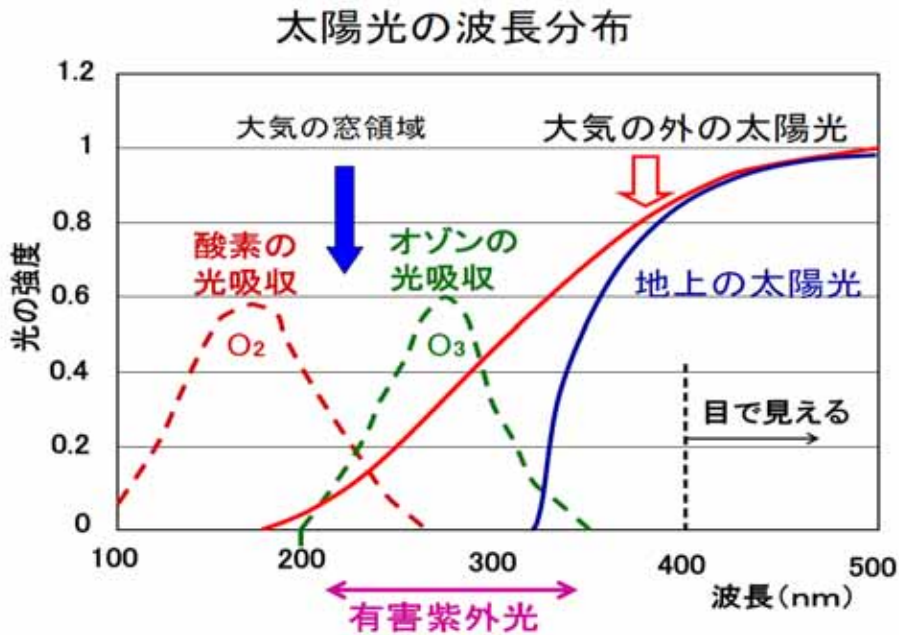


図3 大気の外と地上での太陽光の強度の波長分布、および酸素分子O<sub>2</sub>とオゾン分子O<sub>3</sub>の光吸収スペクトルの概念図。成層圏オゾンが200-300 nmの有害な太陽紫外光を吸収して、地上に届かないようにしている。青矢印は酸素分子とオゾンの光吸収の狭間の「大気の窓」の波長領域を示す。

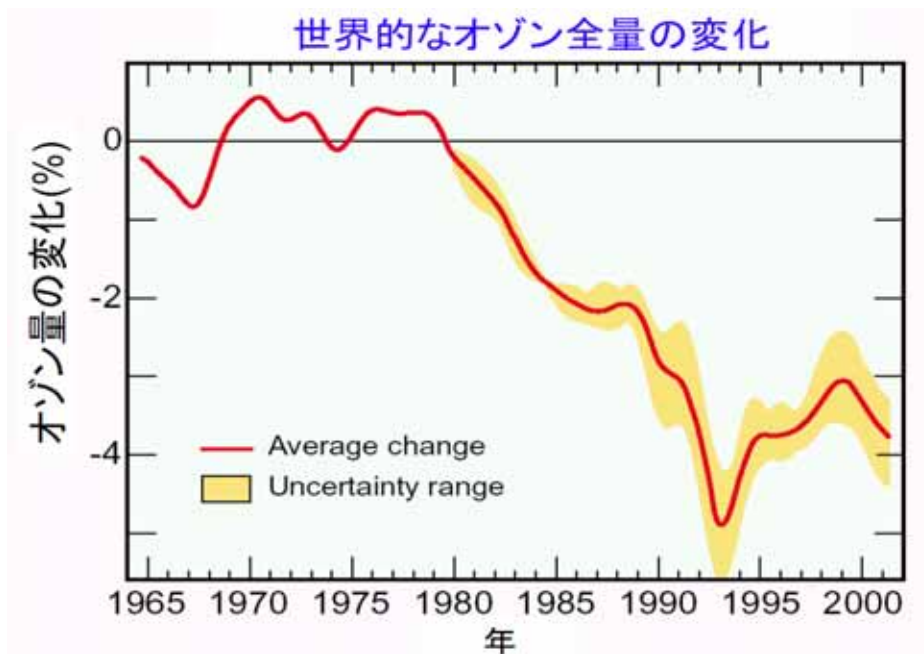


図4 世界的な成層圏オゾン全量の変化[2]。1980年以降、4%程度の成層圏オゾンが減少している。

成層圏オゾンは1970年ごろから10年で3%程度の割合で減少している(図4参照)[2]。その減少は図1に示されているCFC-12の濃度の増大とほぼ同期して起こっている。成層

圏オゾンが減る原因は人間が大気中に放出したフロンのためであると考えられている。フロンは、エアコンの冷媒、精密部品の洗浄剤などに使用されてきた。天然には存在せずに、人類が合成した化学物質である。フロンは非常に化学的に安定である。大気中に放出されたほとんどの気体物質は対流圏大気中の OH ラジカルと反応して除去される。ところがフロンは OH ラジカルと反応しない。また、フロンは 250 nm より短い波長に光吸収を持つため、300 nm より長い波長しかない持たない地上付近の太陽光では光分解されない。表 1 にフロン、代替フロンやその他の化合物の大気中の寿命をまとめた。CFC-11 や CFC-12 などのフロンが 50–100 年程度の非常に長い寿命を持っていることがわかる。地上で放出された気体が高度 10 km 以上の成層圏まで拡散して行くのには数年かかる。寿命の長い CFC 化合物は安定なので対流圏にどんどん蓄積して、成層圏まで拡散してゆく。

化合物	大気寿命
$\text{CFCl}_3$ (CFC-11)	45 年
$\text{CF}_2\text{Cl}_2$ (CFC-12)	100 年
$\text{CClF}_2\text{H}$ (HCFC-22)	12 年
$\text{CHF}_2\text{-CHF}_2$ (HFC-134a)	14 年
$\text{CH}_4$ (methane)	5 年
CO	2 ヶ月
$\text{C}_3\text{H}_8$ (Propane)	10 日
NO <sub>2</sub>	2 日

表 1 種々の化合物の大気中の寿命。大気中に放出されたこれらの気体は、大気中の OH ラジカルと反応して大気から除去されるのが主たる消失過程で、OH との反応速度の大きさに寿命が決まっている。

成層圏オゾン層の中で高度が上がっていくと、酸素分子の光吸収とオゾン分子による光吸収との狭間である 200 nm 付近の太陽光の照射を受けるようになる。図 3 に示すように、この 200 nm 付近の領域は”大気の窓”と呼ばれている。フロンは 200 nm 付近に強い光吸収を持つので、成層圏に拡散したフロンは太陽光を吸収して分解され、塩素原子を放出する。塩素原子 (Cl) はオゾン分子と反応して、ClO 分子を生成する。オゾン層には O 原子が存在するので、ClO 分子は周囲の O 原子と反応してまた Cl 原子へ戻る。Cl 原子は再びオゾン分子と反応する。この反応が繰り返されるので、サイクル反応と呼ばれている。図 5 にこのサイクル反応が繰り返される様子を図示した。成層圏のフロンの濃度はオゾン分子の数万の 1 なので、それから生成する塩素原子が 1 つのオゾン分子を消失させるだけならほ



とんど何の問題も起こらない。図5のサイクル反応において塩素原子が触媒のような働きをしている。すなわち自分自身は変化せずにオゾン分子の消滅を進めている。このサイクル反応により、成層圏で1個生成した塩素原子が数千個から数十万個のオゾン分子を消失させる。これが大規模な成層圏オゾン破壊となる。南極オゾンホールは、南極の気候特有の条件により上記の塩素原子によるオゾン破壊が南極の春(9-10月)に局所的に非常に激しく進行し、成層圏オゾンが半分以上なくなってしまうものである。この南極オゾンホールは、特殊な現象としてとらえるより、世界的に起こっている成層圏オゾン破壊が最も著しく現れていると考えるべきである。

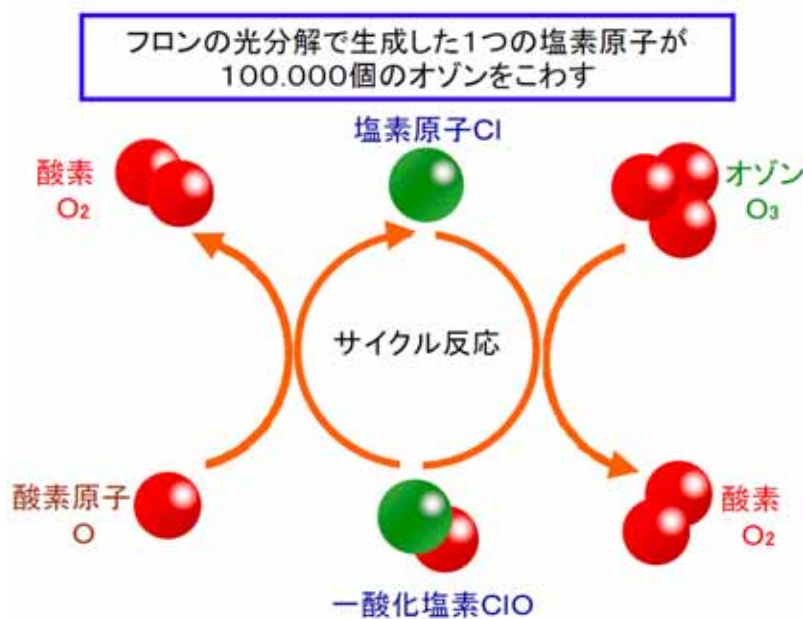


図5 フロンの光分解で生成した塩素原子Clがオゾン破壊するサイクル反応の模式図。このサイクル反応により塩素原子が一度生成すると、同じ塩素原子が何度もオゾン破壊を行う。

成層圏オゾン層が破壊・減少することにより、有害紫外線強度が増大し、動物・植物に悪い影響を与えることが予測されている。人為起源のフロンによる成層圏オゾン層破壊を防ぐために、1987年にモントリオール議定書という形で国際的なオゾン破壊物質の使用・生産・放出の規制が始まり、その後も何度か追加の規制がなされている。大気中の塩素化合物の濃度は徐々に減少していくと考えられている。図6上に成層圏オゾンの回復の予想図を示した。2000-2005年あたりが最もオゾン破壊が激しい時期であり、今後は回復していくと予想されている。表1に示すように、CFC化合物の大気中の寿命は非常に長いので、回復は極めてゆっくりであると考えられる。図6下に示すように、南極オゾンホールが消滅するのも2040-2060年ごろと予想されている。しかし、フロンガスの生産・使用禁止の

取り決めやフロン回収の取り組みなどが予測通りに進行するかどうか不確定な部分もあり、今後のオゾン層の回復について注意深く検証していくことが必要である。さらに、地球温暖化により成層圏オゾンを取りまく環境が変化しつつあり、この変動がフロンによるオゾン層破壊を活発にする可能性があり、この面でも今後注意が必要である。

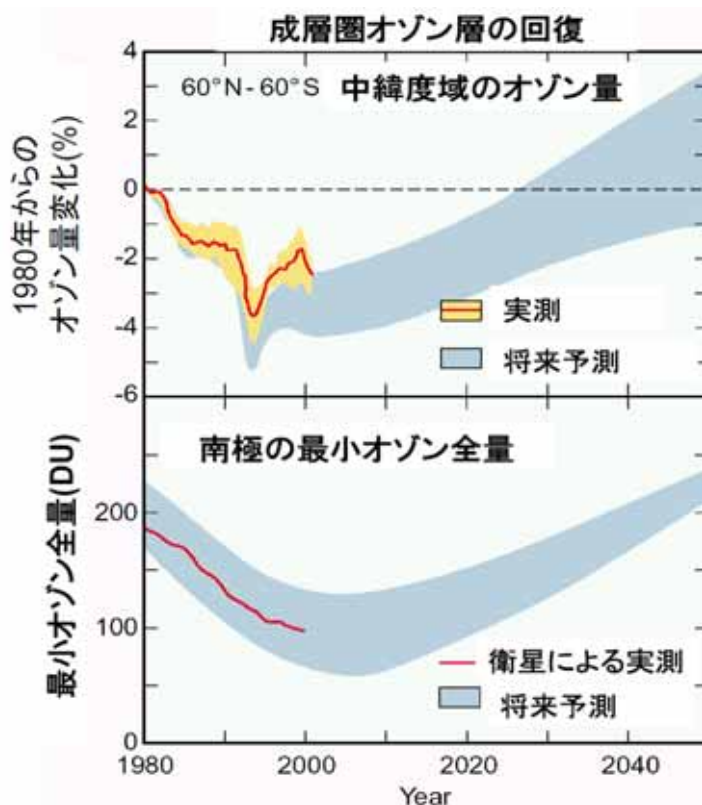


図6 今後の成層圏オゾン量の変動の将来予測[2]。オゾン破壊の原因物質のフロンの大気中の寿命が長いので、回復には数十年かかる。

## (2) 地球温暖化問題における光の役割

我々人類が住んでいるこの地球のエネルギーのほとんどは、直接ないし間接的に太陽からの光に由来するものである。太陽からの光は地球に平均光放射エネルギー $1,370 \text{ Wm}^{-2}$ で降り注いでいる。そのうちの約30%は、地球表面または大気・雲によって宇宙に向かって反射または散乱される。残りの部分は地球または大気によって吸収されて熱に変換され、それから再び宇宙空間へ放出される。この熱の流れが、雨、風、雪を通じて地球の気候システムを形成している。太陽から受ける光のエネルギーと地球から宇宙空間へ放出する光エネルギーのバランスすることによって、地球の温度は一定に保たれている。太陽からの光は $6,000 \text{ K}$  ( $5,700$ )の熱放射光であるけれども、地球大気の上端から出て行く光は $255 \text{ K}$  ( $-18$ )の熱放射光である。この2つの熱放射光は波長領域が大きく異なる。図7に示す

ように太陽光は可視波長領域（ $0.4\text{-}0.7\mu\text{m}$ ）が最も強いが、地球からの熱放射光は数  $10\mu\text{m}$  の赤外領域にピークを持つ。太陽放射光の波長領域には大気成分はほとんど光吸収を持たない。したがって太陽光はほぼそのまま地表まで到達する。一方、地球から外に出てゆく熱放射の光の波長領域には大気中の水蒸気、二酸化炭素、メタン、オゾンなどの気体が光吸収を持っている。これらの気体は温室効果気体と呼ばれている。図8に示したように大気の外の人衛星から夜間の地球からの放射光を観測したスペクトルを見ると、大気中のこれらの気体による光吸収が起こっていることがわかる。

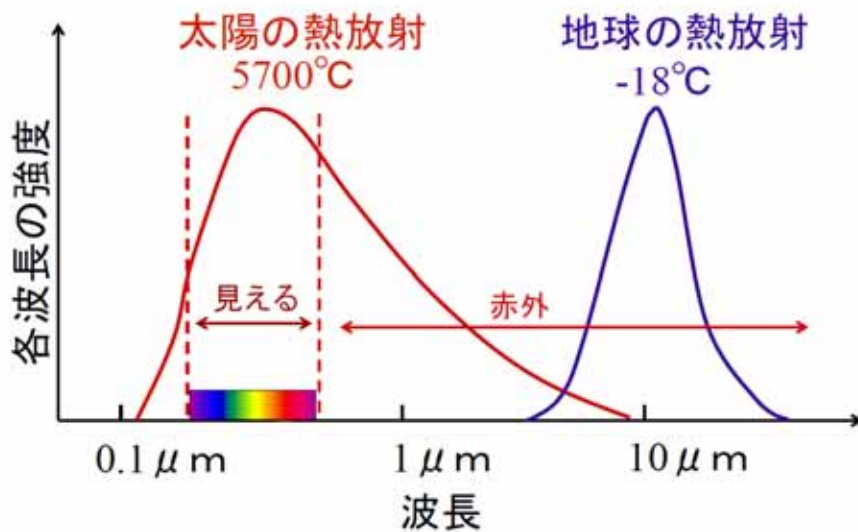


図7 太陽および地球の熱放射光のスペクトル分布。太陽光は  $5700$  の黒体放射で、可視波長領域 ( $400\text{-}700\text{ nm} = 0.4 - 0.7\ \mu\text{m}$ ) にピークを持つ。一方、地球からの熱放射は低温なので、 $10\mu\text{m}$  付近の波長の長い赤外領域にピークを持つ。

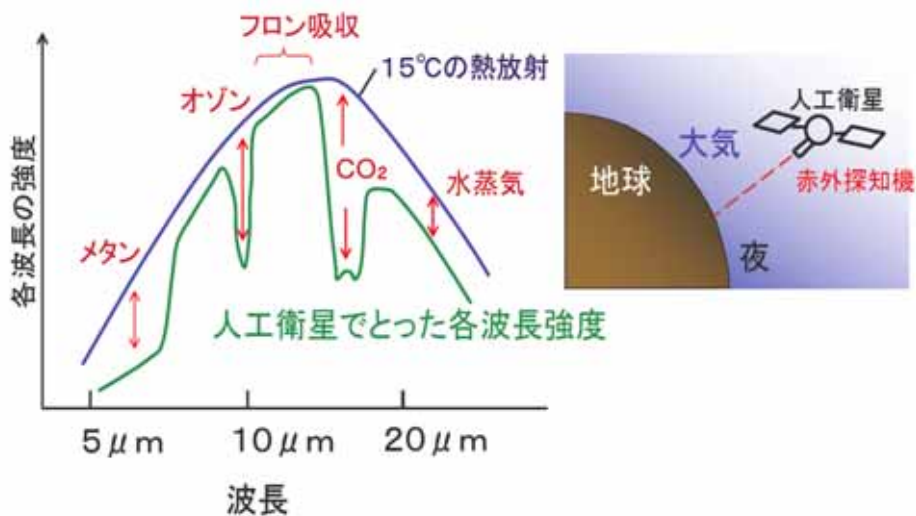


図8 人工衛星から測定した地球の赤道付近の夜の熱放射光のスペクトル。地球大気に含まれる大気微量成分による光吸収が現れている。

地表面や下層大気から射出される赤外放射の光の一部は宇宙空間に逃れることが出来ずに、大気の温室効果気体によって吸収され熱に変換され、再び地表に向けて長波長の光を射出することになる。図9に、太陽入射光と地球からの赤外放射の光のバランスの模式図を示した。図9左に示すように地球大気がないとすると、入射と出射のエネルギーバランスを保つためには、地表面は-18℃である必要がある。出てゆく赤外放射の光のエネルギー強度は地球の温度に比例して多くなる（正確には4乗に比例する）。図9真ん中のように地球大気があると、地表面付近からでた赤外放射の光の一部が大気中の温室効果気体によって一部吸収されまた地表へ戻ってくる。大気の一番外側では入射と出射のエネルギーバランスが取れ、途中で取られて地表へ戻る分を補うために地表からの熱放射の光エネルギーを増やす必要があり、地表の温度は15℃になる。大気中の温室効果気体が増大すると、さらに途中で取られて地表へ戻る量が増えるので地表面はさらに温度を上げて、赤外放射の光エネルギーを増やすことになる（図9右）。これが地球温暖化現象である。

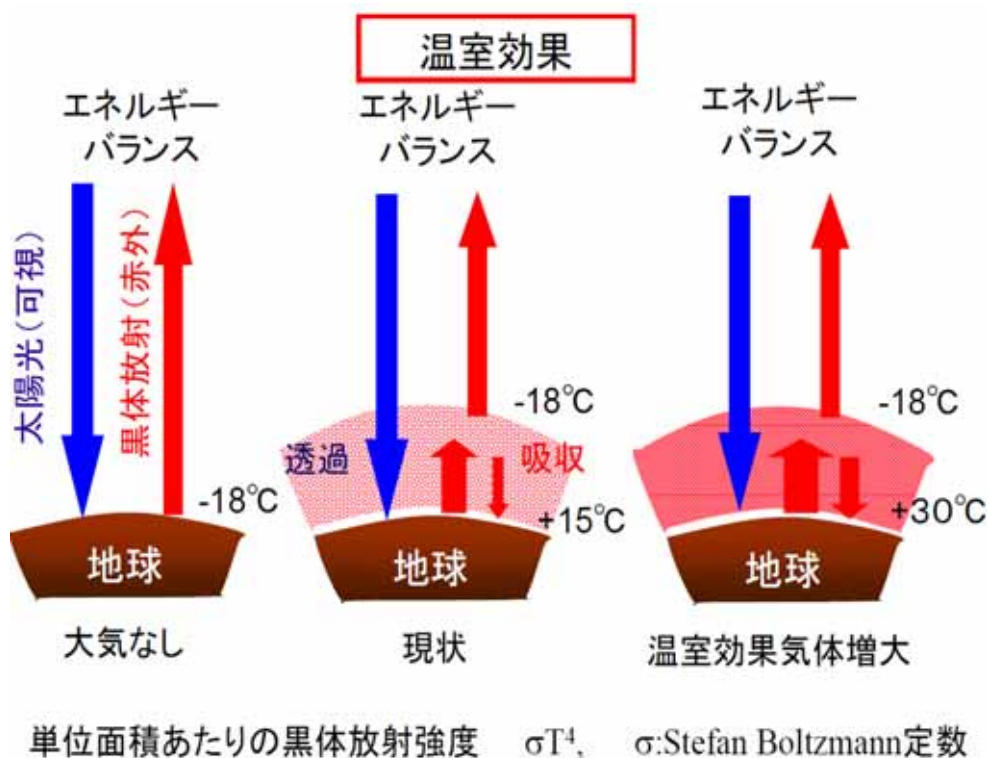


図9 温室効果気体による地表面の温度上昇すなわち温暖化のしくみの模式図。左：地球大気がないとすると、地表面の温度が-18℃のときに、太陽光入射と地球の光放射がバランスする。真中：現状の温室効果気体がある状況では、地球からの光放射の一部が温室効果気体により吸収され地球に戻される。大気の外で入射と出射がバランスするためには、地表面からの光放射を増やす必要があり、すなわち温度を上昇が起きる。右：より多くの温室効果気体があると地表面の温度はさらに上昇する。

温室効果気体のなかで最も寄与の大きいのは水蒸気であるが、水蒸気は天然の温室効果気体であるといえる。人類活動により大気中に放出されて大気中へ蓄積されて地球温暖化に最も寄与しているのは二酸化炭素であると考えられている。この100年間に地球の平均気温はおよそ0.6℃上昇したと推定されている。その主たる原因は、人間活動による二酸化炭素の大気への放出など温室効果気体の大気濃度の増大であると考えられている。この温室効果気体の増大は地球の光放射のバランスを変化させ、地球温暖化を引き起こし、気候を変化させる。このまま人類が二酸化炭素を放出し続けるとおよそ100年後の2100年には世界の気温は3 - 4℃上昇すると予測されている[3]。

二酸化炭素以外にも、大気中に存在する微量成分のメタン、亜酸化窒素、オゾン、フロンなども赤外波長域に光吸収を持っており、温室効果気体として働く。水蒸気や二酸化炭素が光吸収する波長域以外に光吸収を持つこれらの分子は、1分子あたりの温室効果の働きがより大きい。したがって、これらの微量気体の増大も地球温暖化にかなり寄与する。近年の大気中のメタン、亜酸化窒素、オゾン、フロン、代替フロンなどの濃度の増大が地球温暖化に及ぼす効果の総和は、二酸化炭素の濃度の増大の効果に匹敵するくらいであると計算されている。そのため、これらの気体の排出の抑制も非常に重要である[3]。

### (3) 大気環境汚染における光の役割

大都市への人々の集中と拡大に伴って、空気の質が悪化し、大気汚染は都市の周辺部にも広がる。大気汚染の典型的なのが光化学スモッグである。自動車の排ガスや化石燃料の消費で放出される窒素酸化物( $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$ )や炭化水素が、太陽の紫外線との光化学反応によって局所的な高濃度の光化学オキシダント(主にオゾン)を作り出す。そのとき視程の悪化が同時に起きやすいため、これを光化学スモッグと呼ぶ。大気汚染物質の多い地域で夏季の日差しの強い風のない日に起きやすい。1970年代に米国ロサンゼルスや東京で被害が現れ大きな社会問題になった。その後、大気汚染の防止対策により下火になったが、ここ数年、日本でも注意報の発令がまた増えている。近年の東アジアの急速な工業の発展とモータリゼーションの進行が比較的広域の地表オゾン生成の増大を招いていることが、その原因の一つと考えられている。窒素酸化物と炭化水素からオゾンが生成する光化学反応を図10に示した。炭化水素が大気中で酸化されるサイクルの中で $\text{NO}$ を $\text{NO}_2$ に変換し、 $\text{NO}_2$ は400nmより短い波長の太陽紫外線で光分解して酸素原子を放出して、オゾン生成を行う。大気汚染の光化学反応では、文字通り太陽紫外光が中心的な役割を果たす。



オゾン(オキシダント)生成に必要なもの

$\text{NO}_x$  (= NO +  $\text{NO}_2$ )

炭化水素類

太陽紫外線 ( $\lambda < 400 \text{ nm}$ )

図10 大気中の炭化水素の酸化過程は窒素酸化物の介在によりオゾンを生産する。

### 1 - 3 . 地球環境を光で計測する

前章で述べてきたように、大気中の微量成分は光の作用と相まって、オゾン層破壊、地球温暖化、大気環境汚染などの環境問題を引き起こしている。大気中の微量成分を信頼性高く計測することは、地球環境の変動や環境問題のメカニズムの解明、およびその対策を行ってゆく上で非常に重要である。光のもつ遠隔到達性、高速応答性、時間・空間分解能、エネルギー(スペクトル)分解能、非破壊性などの特性は環境計測において極めて有用である。1980年代半ばに南極でオゾンの春先の異常な減少を始めて発見したのは、地上で太陽紫外線を分光してオゾン濃度を測定するドブソン分光計による計測であった。その後、宇宙から衛星で太陽紫外光散乱の計測によるオゾンセンサーで、これがオゾンホールであり、その規模や時間的な成長が明らかにされた。環境計測において光応用技術は確実な優れた方法として環境モニタリングに広く用いられている[4,5]。先端的な新しい光計測法の開発により、より高度の測定困難であった微量成分の計測がなされて、大気環境問題の解明・対処に役立てられている。光応用の環境計測で用いる光源は、受動的な計測では、太陽光、月光、地球の光放射など自然の光源であり、能動的な計測ではランプやレーザーなどの人工光源が用いられる。光応用の大気微量成分計測には大きく分けて2つの種類があり、一つは観測装置の設置点から遠くの気体中の微量成分を計測する遠隔計測(リモートセンシング)であり、人工衛星からの大気計測やレーザーレーダー(ライダー)観測などがある。もう一つは、その場計測で、計測器を置いた地点の周囲の大気を装置に導入し計測する。一般的には、遠隔計測では測定の空間分解能は悪いが、より広い範囲の大気中の成分計測ができる。一方、その場計測は、空間分解能は高いが、装置を置いた地点しか測定できないという特徴を持つ。

## (1) 光を応用した遠隔計測(リモートセンシング)

### 宇宙から地球環境を計測する衛星観測

遠隔計測による地球大気の計測の方法を図11に示した。光技術を応用した観測衛星はかなりあるが、ここでは大気環境計測を行う日本の地球観測衛星とセンサを紹介する。宇宙航空研究開発機構(JAXA)の地球観測技術衛星「みどり I(1996年)、みどり II(2002年)」には、環境省と国立環境研究所が開発した改良型大気周縁赤外分光計である ILAS I および ILAS II センサが搭載された[6]。この光学応用の人工衛星センサは、地球規模の成層圏オゾン層の変動の監視とオゾン層変動に関わる物理・化学過程の解明のためのデータを提供した。ILAS センサは図11の人工衛星(A)で示した太陽掩蔽法を原理としている。太陽掩蔽法では、太陽からの光が地球縁辺の大気層を通過するときに受ける吸収量をグレーティング分光器でスペクトル分解して測定する。物質は固有の吸収波長特性を有することから、吸収スペクトルにより、存在する物質の同定、定量化が可能である。また、太陽を追尾しながら連続的な測定を行うと、衛星の進行に連れて太陽光の通過する大気層の高度は変化する。すなわち異なる大気層を通過した太陽光の減衰を測定することから、吸収をもたらす物質の高度分布に関する情報が抽出できる。主な測定対象は、赤外波長(6.2 $\mu\text{m}$ ~11.8 $\mu\text{m}$ )の吸収測定から、オゾン、一酸化二窒素、硝酸、二酸化窒素、メタン、水蒸気等の濃度の高度分布、エアロゾル消散係数等の高度分布である。

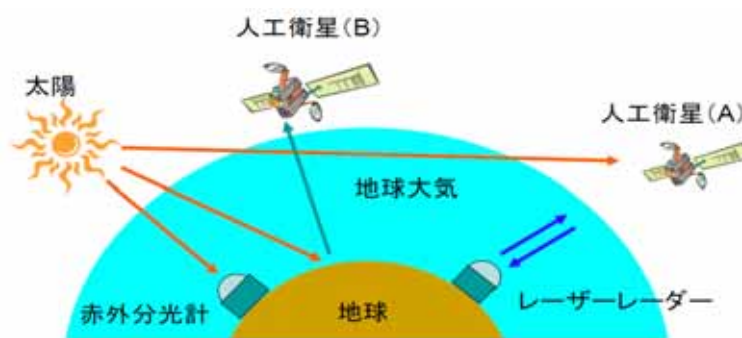


図11 光技術を応用した遠隔計測(リモートセンシング)による地球大気観測法の模式図

温室効果気体観測技術衛星(GOSAT)の開発は環境省と JAXA および国立環境研究所が進めており、2008年ごろ打ち上げられる予定である[7]。GOSAT 衛星では、太陽光に含まれる比較的波長の短い赤外光(近赤外光)が、地表面で反射して再び宇宙に出て行く光の強さを測定する。すなわち図11の人工衛星(B)の太陽光後方散乱検出法を

用いる。地表面からの反射光を比較的分解能の高いフーリエ変換型の分光器で分光して、各波長の光の強度を測定し、二酸化炭素やメタンの濃度を測定する。太陽から地表へ、地表から宇宙へと赤外光が往復する間に、地球大気中の二酸化炭素などの温室効果気体が特有の波長の光を吸収する現象を利用する。図12にGOSAT衛星が観測する予定の波長1.6 $\mu$ m付近の地表面の反射スペクトルの予想図を示したが、二酸化炭素やメタンによる吸収線が現れており、この吸収線の強度からそれらの温室効果気体の濃度を求めることが出来る。第3回気候変動枠組条約締約国会議(COP3、京都会議、1997年)で採択された「京都議定書」の発効が2005年2月に実現し、温室効果気体の排出量削減、吸収源対策の推進など地球温暖化防止のための取り組みが国際的に重要な課題となっている。二酸化炭素などの温室効果気体の世界的な濃度分布を宇宙から人工衛星で観測し、各国地域の温室効果気体の吸収排出状況の把握することは、世界的な温室効果気体の排出削減を実施していく上で重要なことである。

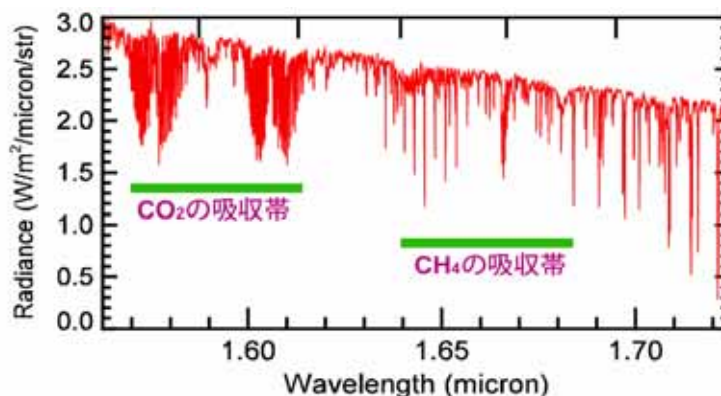


図12 GOSAT衛星で観測する1.6 $\mu$ m付近の太陽光の地球表面反射光の予想スペクトル。図中に示したように、温室効果気体である二酸化炭素CO<sub>2</sub>およびメタンCH<sub>4</sub>の光吸収を観測することができる。この光吸収の強度から、地球上の各点でのこれらの気体の濃度を算出する。

#### 地上からの大気の遠隔計測：レーザーレーダー

地上から上方の大気中の微量成分を遠隔計測する方法の一つとしてレーザーレーダー（略してライダー）がある。ライダーは、大気中の微粒子（エアロゾル）を測定することが出来る。地上からパルスレーザー光を出射して、上空の微粒子で散乱されて戻ってくる光を望遠鏡で集光して検出する。たとえば、ライダー計測の応用として中国の砂漠地帯から風で巻き上げられて上空の偏西風に乗り、中国、韓国、日本や太平洋遠くは北米まで運ばれる土壌粒子エアロゾルである黄砂の観測がある。黄砂現象



の実態解明とメカニズムについて、環境省・国立環境研究所が東アジアの様々な地点に展開している大規模な地上ライダー装置のネットワークによって解明されようとしている[8]。

大気微粒子ばかりでなく、様々な波長のレーザーが利用可能となって大気中の微量成分気体の濃度およびその分布を計測することが出来るようになってきた。特定の成分気体を吸収する波長のレーザー光(ONライン)と、吸収しない波長(OFFライン)の2つの波長のパルスのレーザー光を発射し、大気中のエアロゾルや空気分子などの光散乱体からのレーザーの散乱光を望遠鏡で集光して、その中のONラインとOFFラインのレーザー光の強度比を測定する。これにより、光散乱過程などの色々なパラメータを考慮することなく対象気体の濃度を精度良く測定することが出来る。レーザーパルスの発射から受光系に到達するまでの時間差で、レーザー光が到達した距離がわかり、またレーザーを発射する方向を変えることにより、三次元の濃度分布も測定することが可能である。この方法は差分吸収ライダー(DIAL)と呼ばれている。図13に成層圏のオゾン計測するライダーの模式図を示した。高度10-50kmのかなり遠方の成層圏オゾン測定のために比較的大型のレーザーと大型の望遠鏡を使用する。ONラインはオゾンの光吸収のあるXeClレーザーの308nm、OFFラインはオゾンの光吸収のないNd:YAGレーザーの第三高調波355nmを用いる。このDIAL方式で大気中のオゾン以外にもメタン、水蒸気、二酸化炭素、窒素酸化物などが測定され、地球環境の計測に活用されている。

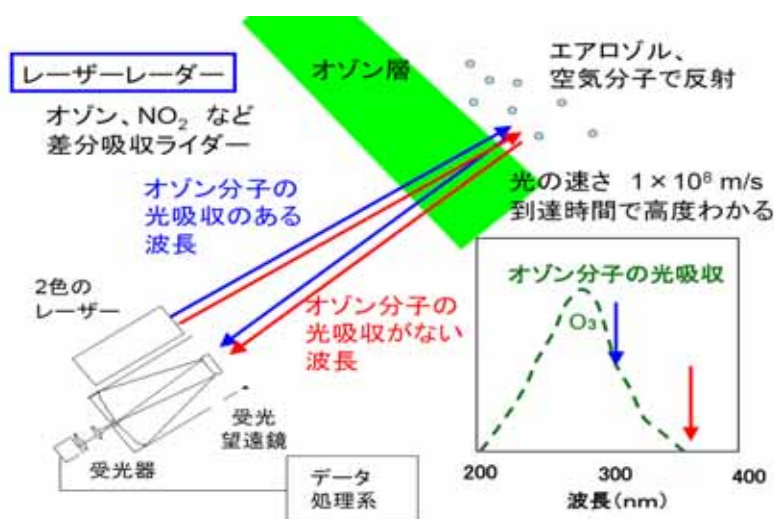


図13 成層圏オゾン計測するレーザーライダー(ライダー)装置の概略図。オゾン分子の光吸収のある波長のレーザー(青矢印)と光吸収のない波長のレーザー(赤矢印)の2つのレーザーを発射し、オゾン層を通してエアロゾルや空気分子などによる反射光を望遠鏡で観測する。

## 地上分光計測

太陽光は大気中の微量成分による光吸収を受けながら地上に届いている。したがって、地上で太陽からの光を観測することにより、大気中の微量成分の濃度に関する情報を得ることが出来る。先に述べたようにオゾンは紫外波長領域に光吸収を持つので、地上に届く太陽光の紫外波長領域の強度を観測することにより大気中のオゾンの大気上端からの地上までの濃度の総和すなわち気柱濃度を測定することが出来る。この原理に基づいたドブソン分光計が世界の標準的なオゾン計測器として活躍している。地上で観測する太陽光の赤外波長領域には、大気中の微量成分の分子振動に基づく光吸収が現れる。非常に分解能の高いフーリエ変換型赤外分光計で太陽スペクトルを測定して、大気中のオゾン、CO, HCl, HF, HCN, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>などの微量成分の濃度を計測できる [9]。大気は高度で圧力が異なるので、高分解能スペクトルで得られる一つの回転振動線のラインプロファイルの解析から濃度の高度分布も算出することが可能である。

さらに高いところの高度 90-500km の超高層大気からの主に夜間の発光現象であるオーロラや大気光などを地上の高感度の光検出器で観測し、超高層大気における物理・化学過程を解明する研究がなされている。観測対象は酸素原子、窒素原子および OH ラジカルなどの可視・赤外波長領域の発光である。高緯度地域で観測されるオーロラは、太陽からの荷電粒子（プラズマ）が太陽風として 2 日程かけて地球に到達して地球の磁気圏にトラップされ、磁力線に沿って大気中に突入し、大気中の酸素や窒素と衝突することによって発生すると考えられている。大気光は、昼間の太陽の紫外放射で電離した大気中の分子や原子が夜になって再結合して発光するためと考えられている。全天に広がる大気光を極めて高い感度で写す全天カメラを用いて観測し、大気下部から上部へ大気波動が伝播してゆく様子を明らかにしている。

## (2) 光を応用したその場環境計測

光の持つ高速応答性、時間・空間分解能、エネルギー（スペクトル）分解能などの特性は、遠隔計測ばかりでなく、その場で大気を直接計測する装置にも生かされて、光技術が応用されている。とくに、分子の持つ固有の光吸収スペクトルにあわせた光計測では、他の同時に存在する種々の気体の干渉を避けて、高い選択性を持った計測が可能である。既に JIS で定められ、市販されていて各地の環境測定局の標準の計測法になって環境行政の基本データを提供している光応用の大気微量成分の計測機器がある。さらに先端的な大気環境計測のために研究開発されている先端的な計測機器まで種々の光応用環境計測機器が

ある。

#### 広く環境計測に用いられている光計測技術

大気中のオゾン $O_3$ の濃度の計測に光吸収法が用いられている。光源として低圧水銀灯の253.7nmが用いられ、大気を導入したセルを通して、光量を測定しオゾンによる光吸収量からオゾンの濃度を算出する。先に述べたようにオゾンは紫外波長領域に強い光吸収を持つので、数10cm程度のセル長でも大気中のオゾン濃度を充分計測することが出来る。この方法はJISで定められ、環境モニタリングの測定局で広く用いられている。二酸化炭素、一酸化炭素や炭化水素の測定にも光吸収法が用いられている。赤外光領域のこれらの光吸収の強さにより濃度測定がなされる。

化学発光法が大気中の一酸化窒素 $NO$ の計測に用いられている。計測装置内で発生したオゾンと減圧した大気とを混合することにより、一酸化窒素とオゾンの化学反応で二酸化窒素の電子励起状態が生成して、それが可視～赤外波長領域に発光する。その発光強度を計測することにより一酸化窒素の濃度を計測できる。化学反応生成物が発光することを利用するので、化学発光法と呼んでいる。大気中の二酸化窒素( $NO_2$ )は、触媒コンバータに通して一酸化窒素に変換してからこの化学発光法で計測する。大気環境汚染に密接に関連する窒素酸化物( $NO$ ,  $NO_2$ )は、JISでも定められているこの方法で広くモニタリングがなされている。大気中の二酸化硫黄 $SO_2$ は、蛍光法で計測されている。 $SO_2$ の光吸収にあわせた220nm付近の紫外波長領域のフラッシュランプの光を大気試料に照射することにより、 $SO_2$ を電子励起状態に励起して、そこからの発光を観測する。この方法も広く環境モニタリングに使用されている。

#### 新しい光応用環境計測技術：キャビティリングダウン分光法

光を用いて大気中の微量成分気体を計測する場合、測定対象分子の持つ特有の光吸収に基づく光吸収によって計測する方法がある。この光吸収法は、すべての原子・分子に適用可能であり、分子の吸光係数が既知であれば標準濃度の参照標準濃度気体の測定をしなくても濃度を算出できるという利点を持っている。一方、光吸収測定法は感度が低いという問題点を有しており、微量気体の計測には不向きである。最近、大気計測に新しい吸収分光法であるキャビティリングダウン分光法(CRDS)が応用されるようになってきた[10,11]。図14にパルスレーザーを用いたCRDS装置の概略図を示した。検出用レーザーパルスを2枚の高反射率ミラー( $R>0.9999$ )で構成された光学キャビティへ注入し、もう一方のミラーから漏れ出した光を検出する。漏れ出した光の強度

は、指数関数的に減衰する。キャビティ内に、検出光を吸収する物質が存在すれば、減衰の時定数(リングダウンタイム)が短くなることを利用し、吸収物質の濃度を測定する。CRD法は、2枚の高反射率ミラーで構成した光学キャビティ内に、レーザー光を閉じ込めることにより、光パルスを数10cmの光学キャビティ間を数千から数万回往復させ、数km～数10kmに及ぶ実効光路長を得ることにより高感度化を実現した、超長光路吸収分光法である。CRDSの測定精度は、原理的にレーザー光強度のふらつきに依存しないことも高感度計測が可能となる要因の1つである。CRDSは吸収分光法であるため、多くの大気微量成分の検出に適用できるのに加え、濃度の絶対値が求まることから、装置の感度校正が不必要であるという利点がある。CRDSを用いることにより、高感度かつ高い時間・空間分解能での計測が可能となる。具体的には、大気中のNO<sub>2</sub>, NO<sub>3</sub>, IO, CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, CO, NH<sub>3</sub>などの分子の計測が試みられている。

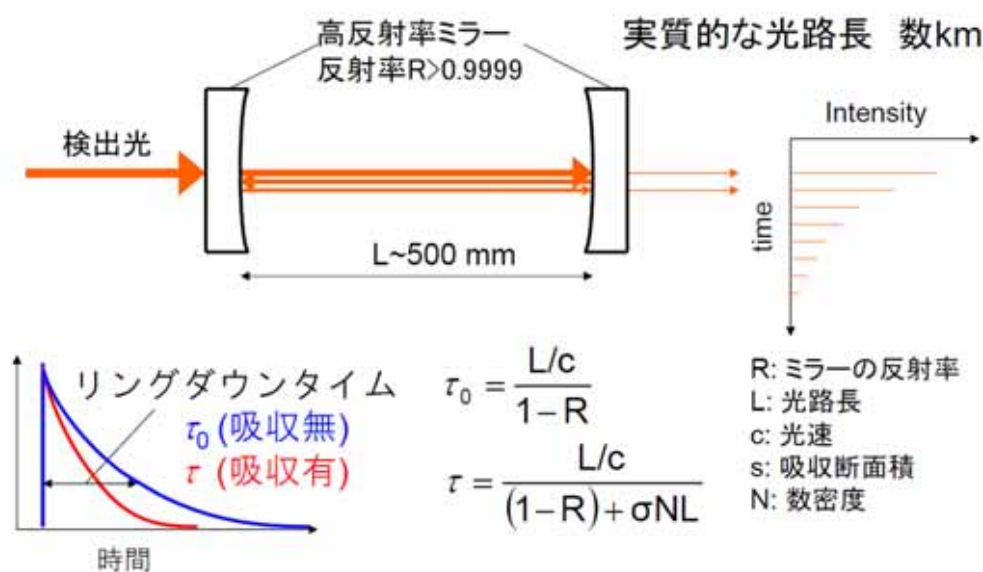


図14 新しい光応用環境計測技術の一つであるキャビティーリングダウン法の原理の模式図。高反射率のミラーで形成したキャビティーの中にパルスレーザー光を導入し、キャビティーから漏れてくる光強度の時間変化を観測する。キャビティー内に入れた大気試料の中にレーザー光を吸収する気体があれば、減衰時間が速くなる。

### (3) レーザー誘起蛍光法

紫外・可視波長領域のレーザーの波長を対象分子の吸収波長に合わせて照射して、分子を電子励起させて、そこからの発光を観測する方法であるレーザー誘起蛍光(LIF; Laser-Induced Fluorescence)法が、高感度な大気微量成分計測法として大気環境の研究に用いられている。大気中のOHラジカル、NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>などの検出の装置が開発されている

[12,13,14]。OHラジカルは、大気中に放出された有機物や窒素化合物、硫黄化合物、COなどと反応して、大気からそれらを酸化して取り除く役割を果たしているため、非常に重要な大気中の化学種である。OHラジカルは、大気中寿命は地表付近では1秒以下と非常に短く、その濃度は高くても数密度  $10^7$  個/cm<sup>3</sup>程度であり、その濃度の測定が難しい。大気中で重要な役目を果たしているため、測定法の確立には多くの努力が払われてきた。その測定にLIF法が用いられている。その装置の模式図を図15に示した。低圧のセル内に導入された大気に、OHの紫外波長領域の電子遷移の1つの振動回転線(308nm付近)に波長を合わせたパルスレーザーを照射し、時間的にやや遅れて発生する308nm付近の蛍光(蛍光寿命約200ns)を光電子増倍管で測定する。測定感度を上げるためにはレーザーパルスのエネルギーを上げるのが簡単だが、この場合はそれを行うことができない。大気に含まれるオゾン(O<sub>3</sub>)がレーザー光分解して励起状態の酸素原子O(<sup>1</sup>D)がまず生成し、それがさらに豊富に存在する水蒸気と反応し、人工的にOHを生成してしまう干渉(オゾン干渉と呼ばれる)が起きるためであり、レーザーパルスのエネルギーが大きいほどこの干渉が問題となる。低い濃度のOHを計測するため、レーザーのパルスエネルギーを上げずに、パルス繰り返しを高くしなければならない(1-10kHz程度)。また、比較的高い波長分解能がレーザー光源に要求され、非常に高価で特殊なレーザーが用いられる。このように大気OHの計測は非常に難しく、原理が30年以上前に提案されて種々の取り組みがなされてきたが、当初はオゾンの光分解による干渉問題に気が付かず、予想の100倍くらいの計測濃度値が出て不可思議な謎となっていた。レーザー技術の発展などにより、実際にもっともらしい計測値が得られるようになったのはこの10年程度である。レーザー誘起蛍光法によるOH測定装置は、ようやく地上・航空機・船舶観測で用いられるようになり、大気化学反応過程の解明に重要な役割を果たすようになって来た。

レーザー誘起蛍光法は高感度であるが、光吸収測定法と異なって、信号強度から直接濃度の絶対値を求めることは出来ない。安定な分子のNO<sub>2</sub>やSO<sub>2</sub>に関しては既知濃度のそれらの分子を含むガスボンベの標準試料を計測することにより装置の信号強度から絶対濃度への変換係数を求めることができる。ところが、不安定分子のOHラジカルは反応性高く保存できないのでOHの標準濃度のガスボンベなどはない。この面でもOHなどのラジカルの計測は困難を伴う。光強度のわかった真空紫外光源で水蒸気を光分解させて生成するOHの濃度を計算して標準試料とするなどの高度な技術を必要とする。

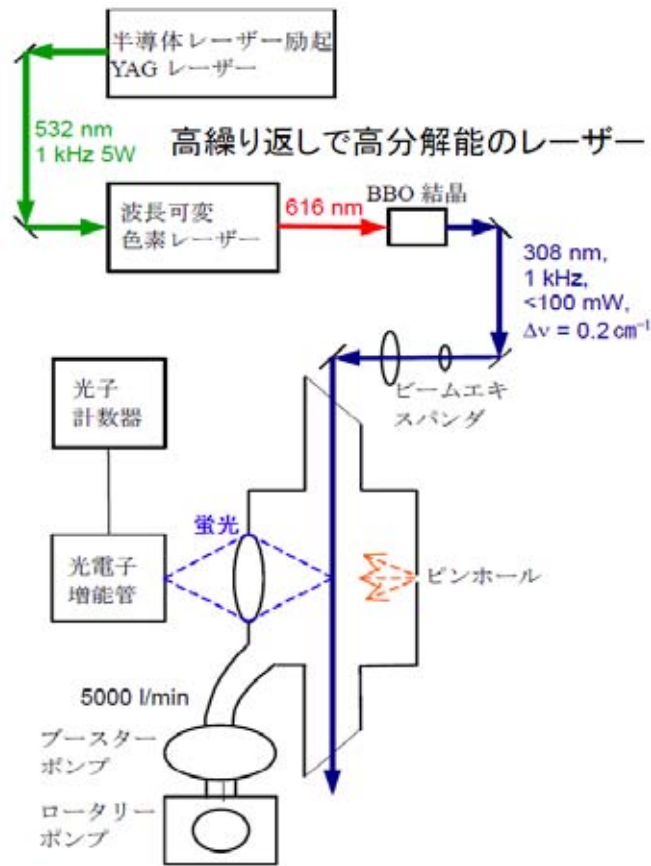


図15 大気中のOHラジカルを計測するためのレーザー誘起蛍光法の装置の概略図。オゾン分子による干渉を防ぐために、パルスあたりのエネルギーは低いが高繰り返しで。同時にOHの吸収回転線に適合させるため波長可変で高波長分解能のレーザーを用いる。

#### (4) レーザー光イオン化質量分析法

大気中の揮発性有機化合物(Volatile Organic Compounds: VOC)は、自動車排ガス、工場排ガス、化学工業、塗装、印刷などによる人為起源のものと、植物などから放出されるもの、および森林火災などにより放出されるものがある。VOCはそれ自身の毒性ならびに後続する化学反応で光化学オゾン形成するなど健康被害や環境汚染の原因物質になりうる。したがって、その大気環境中の濃度をそれぞれの有機化合物について測定することが必要である。そのためには選択的かつ高感度な計測法が求められる。レーザー光と質量分析装置を組み合わせたレーザー光イオン化質量分析法によるVOCの高感度検出法の開発がなされている[15]。従来の質量分析法では、高エネルギーの電子線を有機分子に衝突させてイオン化する方法が取られてきた。この方法では有機物分子はイオン化するだけでなく、分子内の結合が切れる過程が起こり、元の分子がイオン化するだけでなく多種類の質量のイオンが生成する(図16上参照)。これをフラグメンテーションと呼んでいる。電子線の

代わりに真空紫外領域の光を照射することにより、元の分子を壊さずにイオン化することが可能である。多くの有機物分子のイオン化ポテンシャルは9-11eV付近にあり、イオン化ポテンシャル近傍のエネルギーに対応する真空紫外のレーザー光を照射することにより、イオン化の再のフラグメンテーションを防いで分子をイオン化できる(図16下参照)。フラグメンテーションが起こらなければ、測定したイオンスペクトルから元の分子の同定が可能となる。すなわち種々の有機物分子が混ざった状態でもそれぞれの有機物分子の濃度を計測することが可能となる。真空紫外レーザーの光源としてNd:YAGレーザーの3倍波355nmをさらに希ガス中で高調波発生させて9倍波118nmに変換したものが良く用いられる。この真空紫外レーザーイオン化質量分析法により、燃焼炉の排ガス中に存在するダイオキシンの前駆体と考えられている塩化ベンゼン類の計測の研究がなされている[16]。

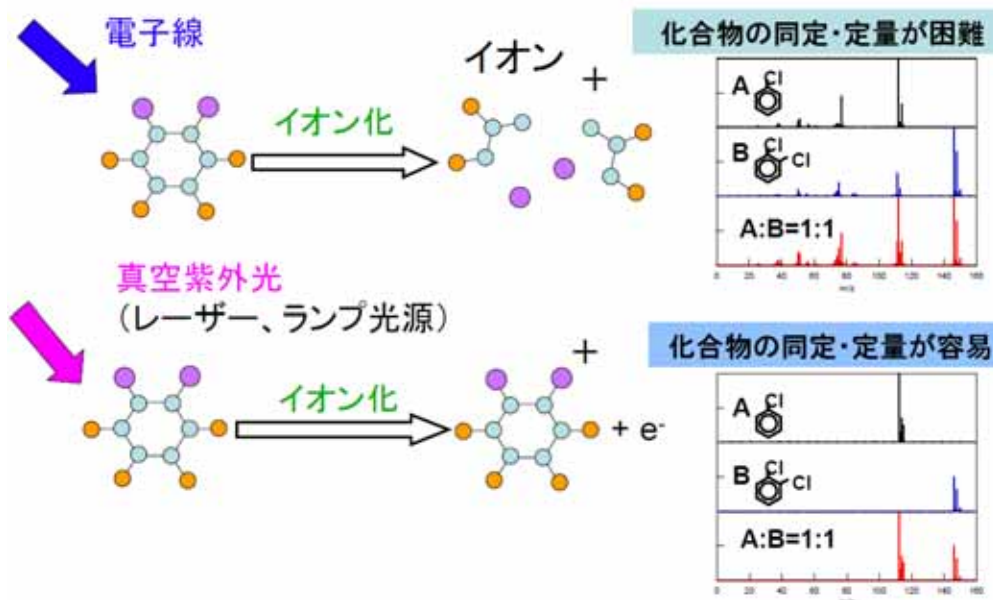


図16 大気中の有機化合物計測における、従来の電子衝撃イオン化法と真空紫外イオン化法の比較。電子衝撃法では高エネルギーの電子を照射するので、対象の有機物分子の化学結合が切れてしまい、様々なイオンが検出される。一方、真空紫外光によるイオン化では、分解が起きずに親分子イオンだけを観測することができる。

### (5) レーザーイオン化大気エアロゾル分析法

大気中には、エアロゾルとよばれる固体や液体の粒子が浮遊している。エアロゾル粒子は、健康へ悪影響を及ぼしうるほか、地球の温暖化・冷却化、粒子上での反応を介在したオゾンホールへの関与など、地球環境にも大きな影響を与えられている。そのため、エアロゾル粒子の化学成分分析への要求が高まっている。既存のエアロゾルの成分分

析では、大気をろ紙を通して吸引することによりろ紙上に多数のエアロゾル粒子を収集して、そのろ紙から成分を抽出し、化学分析していた。しかし、この方法にはいくつかの問題点がある。吸引の最中やろ紙の輸送中および保存中に、化学変化を起こして、実際の大気でのエアロゾル粒子の状態と違ってしまう。また、比較的長い吸引時間を必要とするので、大気エアロゾルの化学的な変動をリアルタイムに追いかけることができない。さらに、例えば2つの成分が検出された場合に、一つ一つの粒子に2つの成分が含まれているのか(内部混合)それとも成分の異なる2種類の粒子が混合しているのか(外部混合)分からない。これらの問題点を克服できるようなレーザー光を応用した大気中の粒子を一粒ずつ分析する装置が開発されている。図17にその装置の断面図を示す。粒子を含む大気サンプルを、段階的に真空度を高めた部屋に通す。粒子はビームの形で、六角型の真空槽の中央にあるイオン化領域に到達する。粒子の一粒一粒を、レーザーにより気化・プラズマ化してイオン化し、質量選別して検出する。気化・イオン化用のレーザーは、瞬間的にパワー密度の高いものでなければならないので、ナノ秒( $10^{-9}$ s)の時間幅の紫外波長領域(248 nm)のパルスレーザー光を集光して用いる。レーザーパルスが真空槽内を飛行している粒子ビームに命中するように、時間的および空間的な狙いをつける必要がある。そこで、粒子ビームの行路上に、粒子検出用のもう一つのレーザー(532 nm)が横切っている。このレーザーは、あたかも懐中電灯のように時間連続した光を射出しているので、光路上に粒子が到達すると、レーザー光が散乱される。光検出器でレーザー散乱光が観測されると、1個の粒子が検出用レーザーを横切ったことを示す。散乱光が得られた瞬間に、紫外パルスレーザー光をその粒子を狙って照射し、粒子を気化・イオン化する。生成したイオンを質量分別して検出し、質量スペクトルを得る。これにより、一つ一つのエアロゾル粒子の化学組成に関する情報をリアルタイムで得ることができ、粒子の変質を避けることができる。また、化学成分と同時に粒子の大きさに関する情報も得ることができるので、成分の粒子サイズ依存性も知ることができる。この装置の計測では短時間で数万から数十万個のエアロゾル粒子の質量スペクトルが得られるので、統計的に処理して成分の相関や変動の情報を得ることが出来る。この装置により日本に飛来する黄砂粒子の観測が行われている。中国の砂漠地帯から日本に飛来して沈着する黄砂エアロゾルが、中国や韓国の都市域や工業地帯の上空を通過するために、汚染大気中の微量成分やエアロゾルを吸着していることが明らかにされた[17]。



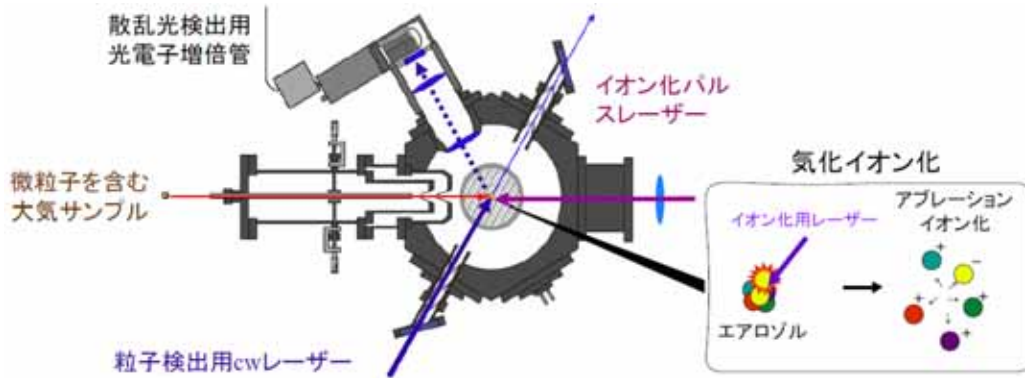


図17 レーザーイオン化大気エアロゾル分析法の装置の概略図

#### 1 - 4 . おわりに

地球の46億年の歴史のなかでも太陽光は地球環境に大きな影響を及ぼしてきた。当初の地球大気には酸素がそれほどなく、酸素から生成するオゾン層がないために、陸上には生物のDNAを破壊してしまう紫外線が降り注いでいて、生物は陸上では生存できず水中にしか存在できなかった。水中のラン藻類の光合成により次第に大気中の酸素濃度が増大し、オゾン層が形成され有害紫外線がカットされることにより、今から約4億2千万年前になって生物が陸上に進出することが可能になった。その後の陸上での植物・動物の爆発的な進化によって現在の地球環境がある。また、それよりはるかに以前であるが、太陽は恒星進化理論によると25億年前は現在の太陽の80%程度の明るさしかなかった。もし地球大気が現在のものであれば、太陽放射が小さいために地球表面の温度はかなり低く、地球の海洋は凍結のために存在できないことになる。ところが、地球上には海洋は少なくとも38億年前から存在していた地質学的な証拠がある。この矛盾は「暗い太陽のパラドックス」と呼ばれている。このパラドックスは、原始の地球にたくさんあった二酸化炭素が解いてくれると考えられている。太陽が暗いときは、地球の大気の主成分であった二酸化炭素が地球を暖めていた。すなわち二酸化炭素は温室効果を大いに発揮していた。このように地球の歴史を振り返っても、光と地球環境は密接な関連を有していることがわかる。光と地球環境との関係を明確に解析しながら、地球環境問題のメカニズム解明を行い、それらに関する対処の方途を探究して解決してゆくことが重要である。

大気計測装置の今後の発展方向として、その場計測装置の小型化・ポータブル化・信頼性向上の方向があり、あらゆるところに設置して大気微量成分の計測の広範囲でかつ詳細な計測を可能にする方向が考えられる。また、人工衛星からの遠隔計測においては、これ

までは太陽光やその反射光を計測する受動的な計測が主であったが、より能動的な人工衛星からレーザーを発射するライダー計測などが発展すると考えられる。今後の大気微量成分の計測法の発展において、どの微量成分・分子を計測するか、どの程度の精度で計測するか、どの領域・高度・空間を測定するかは、大気環境化学や地球環境問題の解明の科学的なニーズに基づき決まってゆくであろう。しかし、測定可能になるかどうかは技術の発展に依存する。たとえば、人工衛星から世界各地の地上付近のOHラジカルやSO<sub>2</sub>の濃度を世界的な規模で地域分布や長期変動を調べることは、大気汚染の状況を調べる上で非常に有用である。汚染気体が国境を越えて広がる越境汚染などを調べることが可能となる。しかしながら、人工衛星からのこれらの計測の実現には、今後の計測技術の発展が必要である。

もし高感度で正確な環境計測法の開発がなければ、温室効果気体と地球温暖化の関連やフロンとオゾン層破壊の関連、光化学スモッグと排出気体の関連などの地球環境問題のメカニズムの理解が遅れていたであろう。長期間の定量的な大気中の微量成分の計測は、それぞれの成分が地球温暖化・気候変動やオゾン層破壊などの地球環境問題の中で果たす役割を明確にするための重要な基礎データとなる。また、長期間かつ広範囲の大気微量成分の計測結果は、地球環境のシミュレーション計算モデルが正しい結果を出しているかどうかを検証する重要なデータを提供する。地球環境の将来予測の精度の向上には、環境計測技術の向上が不可欠である。

## 参考文献

- [1] Y. Matsumi and M. Kawasaki, "Photolysis of atmospheric ozone in the ultraviolet region", *Chem. Rev.*, 103, 4767-4781 (2003).
- [2] WMO, Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2002, Global Ozone Research and Monitoring Project-Report No. 47, Geneva, (2003).
- [3] IPCC Third Assessment Report 2001, Houghton, J. T. et al., Cambridge University Press, 2001.
- [4] D. E. Heard, ed, "Analytical Techniques for atmospheric measurement," Blackwell Publishing, Oxford UK, (2006), ISBN: 978-1-4051-2357-0.
- [5] 岡本謙一、「地球環境計測」、オーム社 (1999), ASIN:427407885X.
- [6] ILAS: <http://www-ilas.nies.go.jp/> ILAS II: <http://www-ilas2.nies.go.jp/>
- [7] GOSAT: <http://www.satnavi.jaxa.jp/project/gosat/>
- [8] Shimizu, A., N. Sugimoto, I. Matsui, K. Arao, I. Uno, T. Murayama, N. Kagawa, K. Aoki, A. Uchiyama, and A. Yamazaki, "Continuous observations of Asian dust and other aerosols by polarization lidars in China and Japan during ACE-Asia," *J. Geophys. Res.*, 109, D19S17, doi:10.1029/2002JD003253, (2004).
- [9] M. Koike, N. B. Jones, P. I. Palmer, H. Matsui, Y. Zhao, Y. Kondo, Y. Matsumi, and H. Tanimoto, "Seasonal variation of carbon monoxide in northern Japan: Fourier transform IR measurements and source-labeled model calculations", *J. Geophys. Res.*, 111, D15306, doi:10.1029/2005JD006643, (2006).
- [10] 江波進一、川崎昌博, 「キャビティーリングダウン分光法による微量物質検出」レーザー研究, 34, 289-294(2006)
- [11] M. Mazurenka, A. J. Orr-Ewing, R. Peverall and G. A. D. Ritchie, "Cavity ring-down and cavity enhanced spectroscopy using diode lasers", *Annu. Rep. Prog. Chem., Sect. C: Phys. Chem.*, 101, 100 - 142, (2005).
- [12] D. E. Heard and M. J. Pilling, "Measurement of OH and HO<sub>2</sub> in the Troposphere", *Chem Rev.* 103(12), 5163-98 (2003).
- [13] Y. Matsumi, H. Shigemori, and K. Takahashi, "High-sensitive instrument for measuring atmospheric SO<sub>2</sub>," *Atmos. Env.*, 39, 3177-3185, (2005).
- [14] F. Taketani, M. Kawai, K. Takahashi, and Y. Matsumi, "Trace detection of atmospheric NO<sub>2</sub> by laser-induced fluorescence using a GaN diode laser and a diode-pumped YAG laser", *Applied Optics*, in press (2006).
- [15] D. J. Butcher, "Vacuum ultraviolet radiation for single-photon ionization mass spectrometry: A Review", *Microchem. J.* 62, 354 (1999).
- [16] K. Tonokura, T. Nakamura, and M. Koshi, "Detection of chlorobenzene derivatives using vacuum ultraviolet single-photon ionization time-of-flight mass spectrometry," *Anal. Sci.*, 198, 1109 (2003).
- [17] J. Matsumoto, K. Takahashi, Y. Matsumi, A. Yabushita, A. Shimizu, I. Matsui, N. Sugimoto, "Scavenging of pollutant acid substances by Asian mineral dust particles", *Geophys. Res. Lett.*, 33(7), L07816, 10.1029/2006GL025782 (2006).

## 第2章 豊かなくらしに寄与する光

### 1 光エネルギーを利用する光触媒の現状

(財)神奈川科学技術アカデミー理事長 藤嶋 昭

#### 1 - 1 - 1 光触媒の実用された例

すべての人の希望することは何かと言えば、健康で、快適に、天寿を全うすることではないかと思っている。このすべての人が希望することをかなえるようにする、これがわれわれ科学者あるいは技術者の任務ではないかと思う。何のために研究するのか、最終目的は何かというと、これに尽きるのではないか。

では、われわれ科学技術者はどうすればよいのか。天寿を全うするための科学技術の一つとして、光触媒がその一つの例になるのではないかと思い研究してきた。ここでは光触媒についてまとめるが、筆者は、川崎市の教育委員としても勤めているので、去年、市民講座で連続5～6回、一般市民の方に話をしたことがある。それをまとめたものが図1に示す「天寿を全うするための科学技術 - 光触媒を例にして - 」というタイトルの本である。



図1 最近出版した光触媒の本

光触媒を応用していただいている1つの例が横浜みなとみらいMMタワーズである。図2に示すが、このビルのすべてのタイル表面に光触媒がコーティングされていて、汚れないビルになっている。



図2 光触媒が応用されている横浜みなとみらいのMMタワーズ

図3は、去年の2月、愛知万博の前にオープンした中部国際空港のガラスである。オープンする1週間前に招待していただいたが、ここにも光触媒が応用されている。このガラスの表面すべてに光触媒でコーティングされていて、汚れないガラス、曇らないガラスになっている。雨が降ったときに行ったことがあるが、普通のガラスとは全然違い、水滴が見えなかった。

あとでも紹介するが、光触媒ミュージアムを2年前にKSPにつくった。溝ノ口からシャトルバスで5分であるので、簡単に来てもらうことができる場所にある。その中庭のフロアに展示してあるテント材料を見ると、光触媒はすごいなと評価していただける。東京ドームで使っているのと同じテント材料であるので、普通なら汚れてくるが、光触媒を使うと、全然汚れない。また、これをガラスを通して見ると、雨の日であれば、ガラスはふつつう水滴がついて曇るところが、光触媒付ガラスであると全然曇らないということで、はっきりと見ることもできる。



図3 中部国際空港では光触媒ガラスが活躍

去年の8月にオープンしたつくばエクスプレスのつくば駅、あるいは、そのほかの駅にも光触媒付テント材料が使われるようになってきた。

図4はついこの間、9月24日オープンした東横線の元住吉駅であるが、そのテント材料にも、すべて光触媒が使われている。



図4 元住吉駅での光触媒テント

### 1 - 1 - 2 酸化チタン電極での水の分解

さて、光触媒は何かということである。筆者は東大大学院のマスター1年生のときに、神戸の中住さんが酸化チタンの単結晶をつくっているということを知り、ぜひ結晶を使わせてくださいということをお願いしたのが光触媒の発端である。

この単結晶を使い、リード線を出して、電気分解の電極にした。そして、光を当てながら、水の電気分解の可能性を調べるという実験を行った。その当時、まだ誰もこの結晶を使っている実験はしていなかった。

図5に、このときの電圧と電流の関係を示す。水の電気分解を考えると、水から酸素の発生する電圧はかなりプラス側である。ところが、酸化チタンに光を当てると、光の強さに比例して反応が起った。しかも、光のエネルギーを吸収することによって反応が非常に起こりやすくなり、マイナスの電圧でもおこるようになった。光エネルギーによって水から酸素がでる反応が加速されたわけである。

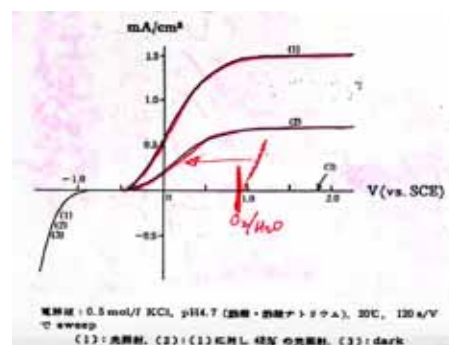


図5 酸化チタン単結晶電極での電流電圧曲線

酸化チタン以外にも光を感じるものはいろいろの半導体、例えば Ge、Si あるいは ZnO などであるが、それらは全部水中で分解してしまう。酸化チタンは、化学的に安定で、それ自身分解せずに水を分解して酸素が出る。筆者は酸素が出ることに非常に感動した。なぜかという、光を当てると水から酸素が出るということでは、植物がやっている葉の表面で起こっている光合成反応と同じなわけである。葉緑素の代りに酸化チタンが似た作用をしていると気がついたときが、一番うれしかった。

植物がやっている光合成反応は、2種類の葉緑素が太陽エネルギーを受けて、炭酸ガスを還元しながら水を分解して酸素を葉の表面から出している。これと似たことを酸化チタンと白金を使ってできたわけで、炭酸ガスを還元することも大事なことであるが、水から水素を出すということも重要である。

水素はクリーンエネルギーである。つまり、燃料電池などにも使われているが、燃やせばまた水に戻るだけのクリーンエネルギーである。図6に示すように、酸化チタン、そして白金電極を用い、抵抗をつなぐだけで、光を当てると酸素と水素が発生するという論文を『ネイチャー』に発表したのが1972年であった。

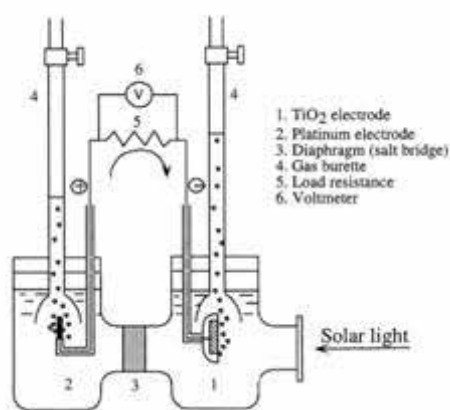


図6 光だけで水が分解して酸素と水素が発生

それを発表したのが、ちょうど第1次オイルショックの前の年であつたので、世界中の人が「『ネイチャー』に日本人の出した論文があるではないか、石油がなくなっても大丈夫ではないか」と言ってくれていたようである。このことを朝日新聞の元旦の1面トップ記事として書いてもらったのが1974年で、今から32年前のことになる。

その後、水素を発生させる実験を精力的に行ったが、高価な単結晶を使うわけにいかない、安い材料で、しかも大量につくらなければ実際に使ってもらうことができないと

ということになった。どうしたらいいか考え、チタンの金属をバーナーであぶる方法を使った。薄い金属チタンはかなり安いもので、チタンを買ってきてバーナーであぶって、表面に酸化チタン皮膜をつくった。これで単結晶以上の効率が出るのがわかった。図7に示すように、1メートル四方の大きなものをつくり、東大工学部の本郷キャンパスの屋上で太陽光の下で実際に水素をとる実験を続けた。夏であると、1日7リットルぐらいの水素をとることができた。酸化チタンは太陽光の3%しか吸収できないので効率的にはかなり低くなった。この研究を発表したのが1975年であるから、もう三十数年前になってしまった。しかし、この研究は今度また見直していただいている。特にアメリカのブッシュ大統領が、最終的には太陽エネルギーを使って水から水素をとるのが理想的なエネルギー変換技術ではないか、ソーラーハイドロジェンプログラムというのが一番大事だ、ということを出した。去年ぐらいからアメリカを中心にして、筆者たちのこの研究が再度評価してもらえるようになってきた。



図7 太陽光下での水素発生実験

### 1 - 2 - 1 発想の転換で微量のものを相手に

もちろん、エネルギー変換というのは難しいことである。水1モルというのは18グラムであるが、18グラムの水を使って水素をとるのに幾つの光の数が必要か考えてみる。1モルというのはアボガドロ数  $6 \times 10^{23}$  で、ほぼゼロが24桁もあるわけである。これが難しいもとである。

酸化チタンが感じる太陽光は光の数にすると1秒間、1平方センチメートル当たり  $10^{15}$  個である。 $10^{15}$ でも多いが、水1モルは24乗であるから、9桁違う。これがエネルギー変換の難しい点である。そこで、どういうふうにしようかと考えた。すぐに使ってもらえるのは、微量のものを相手にする事ではないかと考えた。例えば、大腸菌が  $10^6$  個、



つまり 100 万個ある。1 平方センチ当たり 100 万個の大腸菌があって、それを光子 1 個に対して 1 個の大腸菌が殺せるとすれば、光の数として  $10^6$  個あればいいわけである。光は  $10^{15}$  個あるから、この場合では十分すぎる、つまり 9 桁も多いわけである。

そこで、エネルギー変換は少し待って、まず表面にある大腸菌を殺す研究を始めた。また、たばこのにおいなど、微量でも困っているものを相手にしようと考えた。微量なものを相手にして、これらを分解して快適空間をつくろうというテーマにした。これが光触媒としての取り組みの最初である。そこでまず実施したのが大腸菌などの殺菌である。タイルの上に酸化チタンを透明にコーティングした。そして大腸菌を置いた。MRSA、緑膿菌も使った。これらの菌が簡単に死んでしまった。これが私たちの最初の光触媒の成果であり、今から十五、六年前のことである。

### 1 - 2 - 2 殺菌できるタイルとしての応用

図 8 に示すように、光触媒付きタイルを病院の手術室の床と壁に実際に使った。床や壁には蛍光灯の光あるいは太陽光が当たるので、空気中の空中浮遊菌もなくなるという結果が得られ、これは使えそうだということがわかった。



図 8 手術室の床と壁に光触媒タイルを使用

空気清浄機としての応用も行った。ハニカム型のセラミックフィルターの上面に酸化チタンをコーティングして空気清浄機に使った。筆者は、1 週間に 1 回行くだけであるが、JR 東海の研究所長にもなっている。2007 年の 7 月から「のぞみ」は N700 系の車両になるが、客室内ではたばこを吸えなくなる。しかし、たばこをどうしても吸いたいという人のために、デッキのところに 2 人用、4 人用の喫煙ルームをつくることになり、ここでも光触媒空気清浄機が使われる。

さて、光触媒について簡単に説明したが、先ほどの手術室の床や壁に酸化チタンをコー

ティングしたケースでも、研究していると、そんなにすぐに実用化ができたわけではない。プラス アルファの技術が必要であった。酸化チタンだけを使うと効果が完全ではない。どうしても欠点がある。欠点を克服することを考えなければいけないわけである。光触媒というのは光が当たっているときにしか効果がないから、暗いときはどうするのか、夜はどうなるのかと言われる。

それを保証しなければいけないということになる。その一つの例として、図9に示すように、酸化チタンをコーティングした後に、硝酸銀の水溶液の中に入れて光を当てまして、酸化チタン上に銀をつける。ナノサイズであるから、見た目にはわからないが、表面に銀がついている。銀とか銅は殺菌力がある。10円玉や100円玉のコインメタルには殺菌力がある。銀や銅を酸化チタン表面につけたことによって、光が当たっているときは光触媒作用で非常に効果があり、かつ暗いところでも銀などの金属によって徐々に殺菌ができる。このような工夫をした。

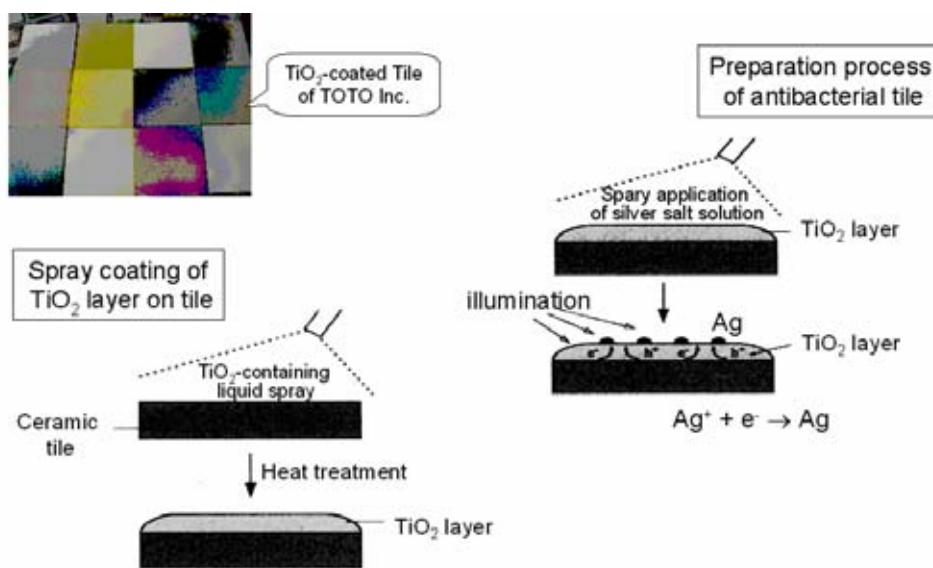


図9 酸化チタンコーティングと、その上に Ag をつけて殺菌効果を増す

### 1 - 2 - 3 照明機器のカバーガラスへの応用

次に行ったのが、高速道路のトンネルの照明器具への応用である。日本道路公団の方が来られ、東名の大和トンネルのように交通量が多いところでは、照明器具の表面が油汚れしてしまうので困っているという話があった。ガラスの表面に酸化チタンを透明にコーティングしたら、油汚れがつかなくなった。今では、全国の高速道路のトンネルの照明器具に使われている。

このときも最初からうまくいったわけではなくて、試行錯誤があった。なぜかという、普通のガラスはソーダ石灰ガラスで、ナトリウムイオンが入っている。酸化チタンを表面に透明にコーティングしてガラスの上につけるわけだが、常温では密着力がないから、300度ぐらいに熱する。そうするとガラスの中のナトリウムイオンが酸化チタンに拡散してきて化合し、チタン酸ナトリウムというものになる。これは光触媒特性を示さない。そういうものができてしまうため、幾ら実験しても光触媒効果がなかった。最初、理由が分からず悩んだが、ナトリウムイオンが拡散してくるということが分かった。ナトリウムイオンをブロックする層、いわゆる透明にできたシリカを下地層としてコーティングしてから、酸化チタンをコーティングし温めた。つまり、ナトリウムイオンに対するシリカによりブロック層を入れることによって初めて光触媒による油分の分解に成功することができた。この場合も光触媒プロセスにプラスアルファの技術が必要であるということがわかった。

#### 1 - 2 - 4 超親水性効果の発見

鏡が曇るという現象は一般的である。特にシャワーを浴びると鏡が曇る。これも、酸化チタンを透明にコーティングして光を当てたら曇らなくなった。曇るという現象は何かというと、小さい水滴がついて光が散乱される事で起こるので、その水滴の接触角度が大事である。この接触角が普通は70、80度、水滴の表面がまんまるになるときは150度ぐらいの角度になる。この角度が限りなくゼロになれば、全面を水が覆ってしまうことになる。これを親水性という。水になじみやすいということである。しかも、この角度が10度以下のときに「超」の字をつけて、「超」親水性と言うが、酸化チタンを鏡にコーティングして光を当てるとこの超親水性特性になるということがわかった。

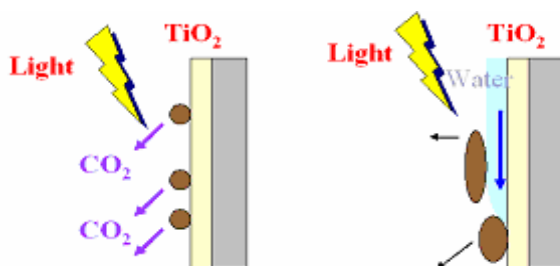
この現象、表面の油汚れがなくなったことでおこることだと最初は思っていたが、前に述べた強い酸化力によるのではないらしいと分かってきた。反応機構としては、まだはっきりしない面があるが、筆者の後継者の東大先端科学技術研究センターの所長をやっている橋本和仁さんは今でもこの反応機構について研究している。酸化チタンは、安定で表面が変化しないと思っていたが、表面第一層の酸素は脱離するらしい。そこに水が付きやすくなる。しかし、その状態は不安定で、また徐々に安定な状態に戻るらしい。このように、酸化チタンは水を分解したり、油汚れを分解できる。しかし、この強い酸化力に加えて、表面が水になじみやすくなるという超親水効果もあることが分かった。

この現象は、例えば車のサイドミラーに使っていただくようになっている。トヨタの新

車は、90%ぐらい使っているのではないかと思います。雨の日でも運転がしやすくなっている。だから、交通事故が減っているのではないかと、われわれも期待している。このときもプラスアルファの技術が必要であった。酸化チタンプラスシリカをガラスの上にコーティングしている。シリカが水を保ちやすいからである。

### 1 - 2 - 5 セルフクリーニング効果

光触媒特性の中でも、今一番注目されているのが、図10に示すように、セルフクリーニング効果である。酸化チタンをタイルなどの外装建材に透明にコーティングして、太陽光が当たると、わずかの油汚れは分解して最終的にCO<sub>2</sub>になる、たくさんの油汚れがある場合は、水をかければいい。あるいは、雨が降れば、水が全面を覆ってしまい、油汚れが浮いてくる。自然に外装建材がきれいになってしまうという光触媒のセルフクリーニング効果である。



- 1) 強い酸化力で油汚れを分解      2) 多量の油汚れは超親水性効果で雨水などで洗い流す

図10 光触媒のセルフクリーニング効果

最近、パナホームが、エコ&クリーンホームということで、太陽電池を使って電気をつくり、建物全体は光触媒タイルを用い、汚れなくしましたということで宣伝している。三郷にあるみさと公園パナタウンというのを発売したそうだが、図11に示すように、全部光触媒付タイルの家でできているということだ。



図11 パナタウン(埼玉県みさと公園)では光触媒タイルを使用

光触媒は、これまで述べたように原理は非常に簡単である。キーワードはたった2つ、酸化チタンに光である。空気がきれいになる。しかし部屋の中の空気をきれいにするのは光源の問題があって難しい点がある。部屋の中のシックハウスの原因物質を分解するために光触媒系をどうやって使うかというのが一番難しいところになっている。光触媒の可視光問題として、NEDOのプロジェクトが3年間実施され最近終わった。可視光光触媒を、壁紙や天井材に応用したり、さらに部屋の中の家具などに応用していこうと検討された。例えばホルムアルデヒドの分解や、たばこの臭いの除去である。部屋の外では、NO<sub>x</sub>の除去もできる。水もきれいにしたい。これは難しいテーマであるが、一生懸命研究されている。それから、殺菌ができる。特にウィルスを殺すことができる。鳥インフルエンザ問題、SARS問題のときには、本命は光触媒ではないかと言われ、今、アジア地区ではこのようなウィルス問題に対しても非常に効果があるということから、検討されている。

### 1 - 3 - 1 JIS化やISO化

酸化チタンというのは特別な材料ではなくて、一般的な材料である。チタンはクラーク数が十位である。だから、資源的な問題は全然ない。しかも、酸化チタンは、日本人は1人1年間で2キロ使っている一般材料である。白いペンキの元は全部酸化チタンである。衣服にも使っているし、紙にも使っている。そのような一般材料であるが、それをうまく工夫して使うと、光触媒として有効利用ができるということである。

ところが、簡単そうに見えるものであるから、市場には、これも光触媒製品、あれも光触媒製品と出てきている。ひどい例が造花である。光触媒付きと書いてあるのが、ほとんど効果がないものが多い。われわれがチェックしたら全然効果がなかった。そういう紛い物はやめてくださいとお願いしたこともある。光触媒関連のJISがようやく確定してきた。筆者はこのJIS委員会の委員長をさせていただき、空気をきれいにする、水をきれいにする、表面が汚れない、殺菌ができるというJISを制定しつつある。今、その最終段階になっている。

次が光触媒をISOにもっていこうということである。今、光触媒のISOに対しても国際委員会で検討されている。この光触媒のISO化であるが、日本がリードして動いている。しかし、日本がリードすると、今度はどうしても、韓国が一部を分担したいと言い出すし、ヨーロッパのドイツなども自分たちも担当したいということで、その辺は今折衝しているところである。

### 1 - 3 - 2 可視光効果

もう1つ大事なことは何かというと、酸化チタンは透明であるから、太陽光の3%しか使うことができない。では、先ほど述べた部屋の中のシックハウスのもとのホルムアルデヒドなどをのぞくために壁紙にどうやって光触媒を応用するのかということになる。可視光も感じる光触媒をつくらないといけないということになり、これが今一番大きな話題である。

どうしたらいいかということ、酸化チタンを工夫して、 $TiO_2$ のOのところを窒素で少しだけ入れかえる。そして感じる光をもう少しエネルギーの小さい領域にする。窒素をドーピングすることによってエネルギーの小さな、つまり可視光領域の光を使うことができるようにする。これが今一番の話題であり、もちろん日本が中心であるが、外国でも研究されている。白い粉だった酸化チタンが少し黄色になる、これが可視光効果である。450 あるいは500 ナノメートルぐらいまで利用することができるような光触媒が研究されている。

### 1 - 3 - 3 光触媒ミュージアム

光触媒ミュージアムをつくらせていただいて、2年少しになる。図12に示すように、筆者が最初に実施した水の分解実験装置もある。光を酸化チタン電極表面に当てると水が酸素と水素になるというのを体験してもらえらる。



図12 光触媒ミュージアム

いろいろなものを展示しているが、本当に光触媒効果があるかをチェックしてから展示している。紛い物は展示しない。

筆者にとって一番うれしいのは、オープンして1年後に来館者が1万人になり、2年たった今、あともう少して2万人になることである。今年も、夏休み光触媒コースを実施した。二、三百人の小学生・中学生が来てくれた。

図13に示すように、このミュージアムの中庭にも展示材料を置いている。テント材料も最初は同じ白色だったのが、光触媒の有無でどんどん差が出てきた。太陽光と雨だけの作用で、一方は真っ白で、最初と全く同じである。もう一方の光触媒なしのものは真っ黒になっていて、その差を見ていただくだけで、これは使えそうだなということを感じていただけ。



図13 左部分に光触媒を使ったテント

#### 1 - 4 終わりに

酸化チタン光触媒が各方面から注目していただき、上述のように色々の製品も上市されている。イノベーションの目玉とも言うていただくことがあるし、ナノテクの応用例であると言ていただくこともある。さらに広く利用していただくことができれば、この分野に長く関わってきたものの一人として研究者冥利に尽きる。

光触媒に関連する本

われわれがまとめました本を以下にいくつか紹介しておく。

光触媒のしくみ 日本実業出版社 (2000年) 藤嶋 昭、橋本和仁、渡部俊也

光触媒のすべて 工業調査会 (2003年) 橋本和仁、藤嶋 昭

天寿を全うするための科学技術 かわさき市民アカデミー出版 (2006年) 藤嶋 昭

光機能化学 昭晃堂 (2005年) 藤嶋 昭、瀬川浩司

## 2 - 1 植物の光反応

植物の主要な光反応のスペクトルを図1に示す。植物は基本的には光合成 によって成長するが、その他の重要な光反応に光形態形成がある。これには弱光反応、と強光反応があり、フィトクロームという色素の働きを介して種子発芽、花芽分化、開花、子葉の展開、葉緑素合成、節間伸張などの植物の質的变化を誘起する。

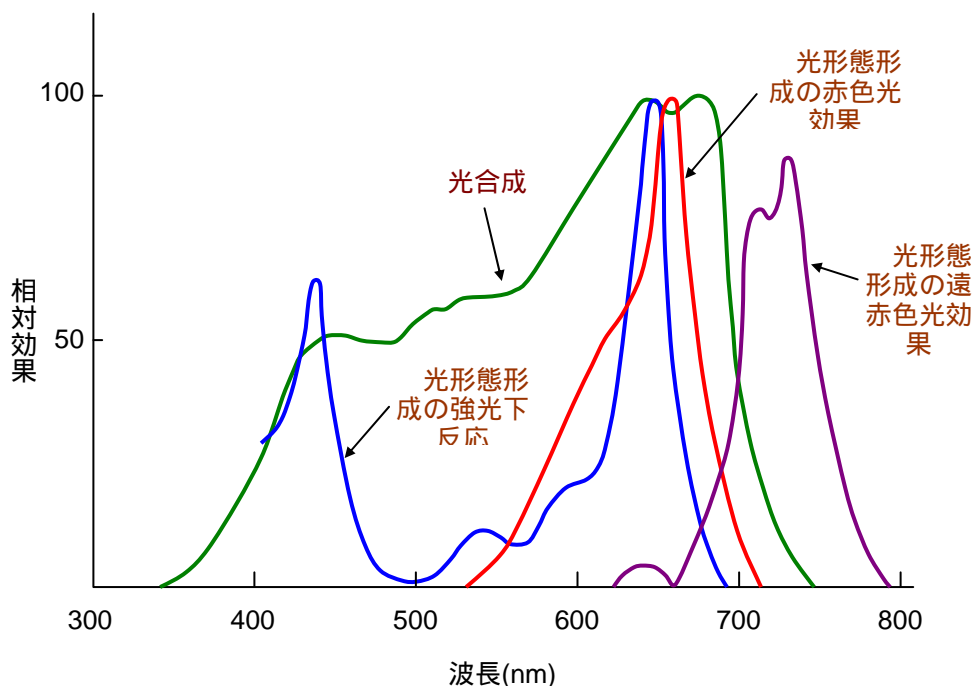


図1 植物の光反応の作用スペクトル

光合成にはクロロフィル(葉緑素)という色素が関わっているが、これは図2に示すような吸収スペクトルを持っている。これを見ると、赤色(660 nm 近辺)と青色(450 nm 近辺)に二つの吸光吸収ピークがあり、この波長が光合成に特に有効であることがわかる。白色光が葉に当たると赤と青が吸収されて、残りの光は緑が多くなるので葉は緑色に見えるのである。筆者らの実験によると植物の健全な生育にはこの赤色光と青色光がバランスよく配合されていることが大切で、後に述べる光量子束密度の単位で R/B 比(赤と青の比率)が 10 : 1 あるいは 5 : 1 が適切なようである。



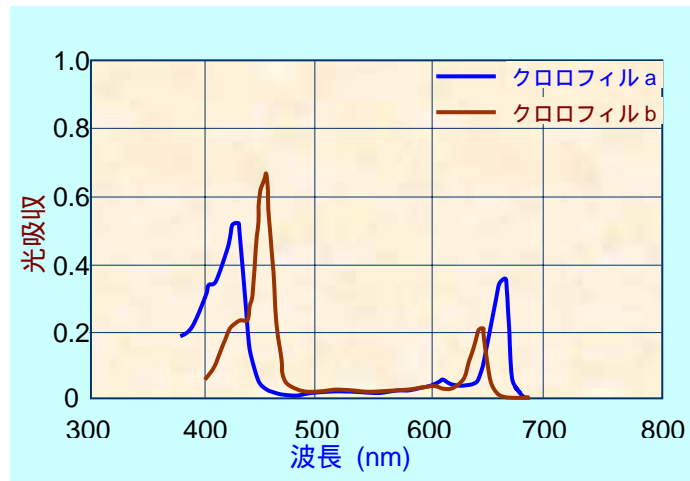


図2 クロロフィルの吸収スペクトル

一方、光形態形成に関わるフィトクロムは、弱光反応では660 nm 近辺の赤色光によって活性化され、730 nm 近辺の遠赤色光によって不活性化されるという性質を持っている。強光反応では420 nm 周辺の青色が有効であり、植物を頑丈に育てるなどの効果がある。

## 2 - 2 栽培光源

植物栽培の人工光源としてはこれまで高圧ナトリウムランプ、メタルハライドランプ、蛍光灯、LEDなどが使われてきた。植物工場に対しては最近まで、発光効率の高さから高圧ナトリウムランプが主流だった。しかし植物に必要な赤色と青色の比率が少ないことと、大量の熱線を発生するため植物との距離を十分に取る必要があり、したがって多段栽培ができないという欠点がある。一方、蛍光灯とLEDは熱をあまり発生しないので植物に近接させて照明することができ、照明効率を大幅にアップできる利点がある。蛍光灯は一応可視光をカバーしており、安価で取扱い易い。したがって以前から植物工場の有力な光源であったし、最近では液晶テレビのバックライトに使われている冷陰極管や無電極管の利用が試みられている。これらは長寿命ではあるがコストが高い。一方、中国製の電球型蛍光灯は非常に安価で、今後の栽培光源として有力である。



図3 蛍光灯植物工場の例(高柳)

最初に蛍光灯植物工場の実用化を試みたのは高柳栄夫氏である。高柳氏が開発した植物工場（図3）の特徴をいくつかあげると、照明には太陽光に近い光質の特注蛍光灯（出力36W）を使用し、日長16h、かなり低い照度（5,000 - 8,000 lx）でリーフレタス（グリーンウェーブ）等を栽培する。これには近接照明とともに、反射フィルムの材質や形状のノウハウもあるようだ。育苗に3週間程度かけ、定植後2週間たらずで収穫される。また徹底して安い資材を使用している。さらに培養液には活性炭で処理した水を使い、二酸化炭素濃度は1,000 ppm程度与えている。これらの結果、従来の植物工場に比べてかなりの省エネとコストダウンが達成されたという。

次にLEDとLD（半導体レーザー）には蛍光灯にはない別の利点がある。LEDは現在いろいろの波長のものが開発されており、各種照明や信号機、表示板などに用途が拡大している。植物の光生理の研究にも広く使われ始めている。植物工場への応用も注目されているが、照明設備が高価になる難点がある。LEDは従来光源に比べて発光波長をクロロフィルの吸収ピークと、光形態形成の強光反応の作用スペクトルのピークにほぼ一致させることができる、熱放射がない、小型軽量、長寿命、低電圧駆動、光合成に有利なパルス照射が可能、といういくつかの利点がある。図4に示すように、赤色（波長660nm）と青色（波長450nm近辺）のLEDとLDは偶然ではあるが、上記を満たしている。そのため植物による光の吸収効率が高くなり、比較的弱い光でも健全に生育させることができる。とくに赤色LEDは比較的安価なのと発光効率が30%と高いのが有利である。比較的近い将来に青色LEDの低価格化が実現されるだろう。

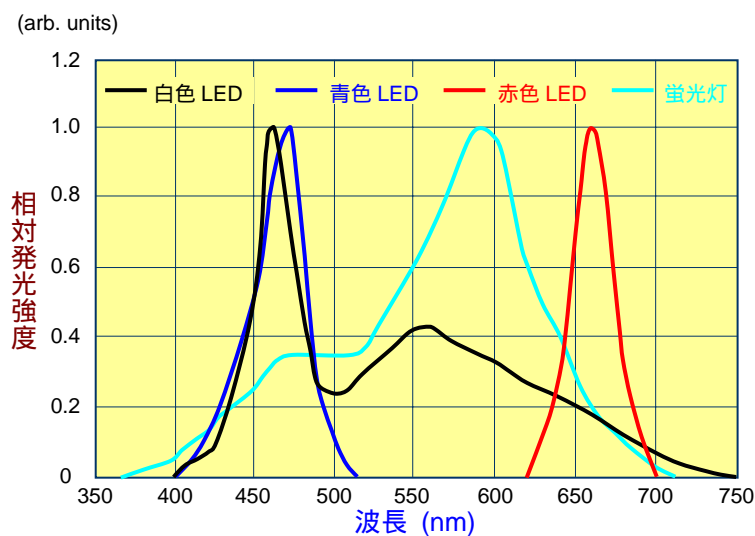


図4 光源の発光スペクトル

赤色と青色の LED による植物栽培の研究は、1994 年に東海大学などわが国の二、三のグループでほぼ同時に開始された。筆者のグループでは、いくつかの色の LED 単独および組合せによって、植物がどういう色を好むかについて研究し、さまざまなデータを集積した(図5)。



図5 LED による植物栽培実験(東海大学)

### 2 - 3 光強度の単位

植物工場を考える場合に光強度の単位を明確にしておくことは非常に大切である。というのはほとんどの光源は人間用に開発されているので視感度を元にした単位が使われているが、光合成はこれと何の関係もないからである。例えば、450 nm の青色光は比視感度が 0.038、つまり、555 nm の緑色光と比べると、同じエネルギーであっても 4% 程度しか眼には感じない。植物の栽培に必要な光強度を求めるためには、光合成の特性に合致した単位を使う必要がある。

1 秒間に放射される光のエネルギー(単位 ,W)を視感度で除したものを光束といい、lm (ルーメン)で表す。1 m<sup>2</sup>の面積に照射される光束を照度といい、lx (ルクス)で表す。人間が感じる明るさは照度で表現され、視感度が関係していることから心理物理量といわれる。光源の特性はしばしば、単位立体角(立体角：単位長さの半径の球の表面積に相当する)当りの光束で表現され(光度)、cd(カンデラ)で表す。1 cdは周波数 555 nm(緑色)の単色光が単位立体角に放射する電力(放射束) 1.46mWと定義されている。

さて光合成を始めとする光化学反応は基本的には電子の働きによる。この電子を励起するのは光量子であるから、光量子のエネルギー単位で光強度を表さないと、光合成に対する光の効果を正しく評価できないことになる。1 個の光量子のエネルギーは $hc/\lambda$  (h: プランクの定数  $6.62602876 \times 10^{-34}$  J·sec、c: 光の速度  $299,792,458$  m·s<sup>-1</sup>、 $\lambda$ : 光の波長)で、これを最

小単位としてエネルギーのやり取りが行われる。1 lmの青色LED光と赤色LED光について、関係する諸量を表1にまとめておく。

表1 1 lm の LED 光と各種エネルギー量

LED 波長	量子エネルギー	比視感度	電力	光量子束
470 nm	$4.225 \times 10^{-19} \text{J}$	0.091	16.0mW	0.063 $\mu\text{mol}/\text{sec}$
660 nm	$3.009 \times 10^{-19} \text{J}$	0.061	23.9mW	0.132 $\mu\text{mol}/\text{sec}$

ここで、 $\mu\text{mol}$  (マイクロモル) =  $10^{-6} \times (\text{アボガドロ数}) = 10^{-6} \times 6.02 \times 10^{23}$  で、光量子数は普通  $\mu\text{mol}$  を単位として表現される。植物栽培では光強度として光合成有効光量子束密度(PPFD)という言葉が使われるが、これは光合成に有効な可視領域 400 ~ 700 nm の光の単位時間、単位面積当たりの量子数を表す。発光波長  $\lambda \text{nm}$  の LED が  $x \text{ mW}$  の光エネルギーを出力する場合の光量子束は次式で求められる。

$$\text{光量子束} = x \cdot \lambda / 119500 \text{ } [\mu\text{mol}/\text{sec}]$$

LED 以外の光源、例えば蛍光灯などを使う場合には、各エネルギー単位間の変換係数が求められている。例えば蛍光灯は電力 (W) 単位で出力が与えられる場合が多いが、白色蛍光灯の  $\mu\text{mol}/\text{s}$  と W の換算係数  $\mu\text{mol}/\text{s}/\text{W}$  は 4 . 5 9、つまり  $1 \text{ W} = 4.59 \mu\text{mol}/\text{s}$  になる。

## 2 - 4 植物工場

### (1) 植物工場の意義

21世紀が地球と人類にとって非常に困難な時代になることは各方面から指摘されている通りである。人口増大、エネルギー資源の枯渇、異常気象と土壌の荒廃による農業生産の停滞などの要因によって、21世紀の前半から地球は壊れ始めるという予測にはかなりの説得力がある。その頃から、世界経済の大勢はかなりの低成長を強いられるだろう。この中でも、人類にとって直接的にもっとも深刻なのは食糧危機である。わが国はいま飽食の時代にあるが、異常気象や国際紛争のあおりを受け食糧の輸入制限などの事態などになれば、自給率40%のわが国は大変なパニックに陥るだろう。

一方、わが国では近年、食品の安全・安心、高付加価値化が叫ばれている。中国や韓国などからの輸入野菜が急増しており、農薬過多や虫の混入問題が指摘されてきた。そこで2006年5月29日から残留農薬のポジティブリスト制度が施行され、農薬が基準を超

えて残留した食品は販売を禁止されることになった。これによって、中国等からの輸入野菜の多くは輸入禁止になる可能性が高い。また中山間地域において自然エネルギーを最大限に利用して、安全・安心な野菜を消費者に直接供給するというのも一つの夢であろう。さらに自給率の低い日本にとっては、いざというときには穀物まで生産可能という意味で、植物工場は食糧安全保障にも寄与するだろう。

また近年、都市住民に新鮮な作物と憩いを提供する都市型農業が盛んである。都市型農業とは一般に都市近郊の農業一般を意味し、大消費地に近い農業地域、都市の生産緑地、市民農園などにおいて営まれる農業を包含する概念である。都市型農業は住民に新鮮で安全な農産物を供給するとともに、水や緑、自然空間の提供により環境や景観を維持し、ゆとりやうるおいを提供する貴重な役割を担っている。その一環として、観光農園や産地直売所が設置されたりする。またアトリウムの緑化や、ヒートアイランド対策として屋上緑化、側壁緑化が注目されているが、これらに関わる植物の効率的生産にも植物工場の技術は有用である。

(株)パソナのビル地下農園に見られるような新しい都市型農業も注目されている。ここではLEDやLD(可視半導体レーザー)を含む人工光を利用して花、ハーブ、イネ、野菜、観葉植物などを栽培する部屋をつくり、野菜はサラダ用にカフェテリアに供給している。ビル内の田園化による憩いの場の提供という新しい都市型農業としての意義は高い。太陽が少しもあたらないビル内部や地下空間を再生させ、室内空間における生産と都市アメニティを追求することを可能にする。以上すべてに対応可能なのが植物工場<sup>1・3)</sup>であり、時代の要請ともいえるだろう。植物工場は消費者に無農薬、新鮮、清潔、高付加価値の作物を安定供給するという使命を有している。最近たしかに実用化に近づいたが、経済性の問題が一般的にはまだ解決されていない。

農業生産は環境制御の観点からいうと、露地栽培→施設園芸→水耕(養液)栽培→植物工場の順で高度化していく。植物工場とは野菜や苗を中心とした作物を施設内で光、温湿度、二酸化炭素濃度、培養液などの環境条件を人工的に制御し、季節に関係なく自動的に連続生産するシステムをいう。植物工場には太陽光利用型と、もっぱら人工光(ランプ)による完全制御型の2種類がある。太陽光利用型はかなり普及しているものの、気象条件に左右されずに完全無農薬で生産できるのは完全制御型だけであり、将来は葉采類やハーブの工場的生産の主流になると考えられている。

## (2) LED植物工場

最近注目されているのが、コスモプラントが開発した赤色LED利用の植物工場である(図6)。



図6 LED植物工場(コスモプラント)

10階建てのビル型植物工場が静岡と千葉、和歌山、北海道二ヶ所、岩手、東京ディズニーランドなどで稼働している。経営がうまくいっているところもあるが、なかなか難しいところもあるようである。育成にもっぱら赤色LEDを使用している理由は、安価で発光効率が30%と高いからである。青色と白色LEDは高価で大量には使えないので、現状では赤色LEDのみを使用するしか採算が取れない。しかし赤色だけでは苗が健全に育たないので、苗作りには蛍光灯を利用している(図7)。



図7 蛍光灯による育苗

この種の典型的なシステムは高さが15mあり、10階の各階には80穴の栽培トレイが112本あるから植付株数は約9万株になる。光強度は $150\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ 程度に設定し、リーフレタスの場合、定植後24時間照明で2週間程度で収穫できる。したがって年間26回転で、商品化率を90%として、毎日5800株、年間200万パック以上の生産量になる。このようなLED植物工場をつくるには200万個のLEDが必要で、全体の設備コストは5億円程度かかるという。生産物の栄養価は非常に良好という結果が出ている。2007年4月に完成する東京ディズニーランドのLED植物工場はこの2倍の規模になっている。

赤色だけでも健全に育つ野菜にはリフレタス、エンダイブ、コリアンダー、パセリ、ルッコラ、コマツナなどがある。LED植物工場の弱点は、このように栽培品目が限られること、LEDロッドにバラツキが多いこと、そして照明設備に膨大なコストがかかることである。LED植物工場の普及の鍵を握る技術はとりわけ、効率良く冷房できて湿度に対する対策が取られているような信頼性が高く、かつ安価なLEDパネルの製造である。

### (3) 植物工場の生産コストの概算

植物工場のコストには基本的なものが二つある。一つは上記の生産コストであり、もう一つは最初に必要になる設備コストである。設備コストには建築、照明設備、電気設備、空調設備、給排水設備、水耕設備、機械装置など、またそれらの工事費、現場経費など諸経費が含まれる。これらすべてにおいてコストダウンの努力が必要である。光源にLEDを使うと特に照明設備のコストが膨大になり、全体の半分を占めることもある。一方、生産コストは電力代や各種材料費、人件費、出荷経費、管理費などの変動費および上記設備コストの償却費から成る。収入は少なくとも変動費以上でないといけないし、利益を出すためには販売価格は変動費+償却費を上回る必要がある。

いま大中規模の植物工場における生産コストの概算を行ってみよう。完全制御型植物工場において、設備コストの中で大きな要因を占める照明設備のコストをx円とする。まずLEDのみ利用の植物工場の場合を考えよう。この場合は全設備コストが照明設備の2倍かかるとして2x円になる。償却年数を10年とすると、償却費はx/5になる。全生産コストを償却費の3.3倍(償却費が30%)と考えるとして、 $3.3x/5$ 円が与えられる。1日の生産株数をn、全植付株数をm、栽培日数tとすると、 $n=m/t$ が成立する。栽培日数tを20日と固定すると、商品化率を90%として1株当たりの生産コストkは、上記を $0.9 \times n \times 360 = 324n$ で割って $k = 20x/491m = x/24.6m$ と求められる。植付1株当たりの照明設備

のコストを  $y=x/m$  と置くと、 $k=y/24.6$  と書ける。

一方、蛍光灯植物工場の場合は、全設備コストは照明設備コスト ( $x$  よりずっと安く  $z$  と置く) の 3 倍かかるとして  $3z$  円になる。蛍光灯の寿命は LED より短い、簡単のためこの場合の償却年数も 10 年と考える。全生産コストを償却費の 4 倍 (償却費が 25%) と考えるとして、償却費は  $0.3z$ 、全生産コスト  $1.2z$  が与えられる。その場合は植付 1 株当たりの照明設備のコストを  $y = z/m$  と置いて、 $k=y/13.5$  になる。安価な電球型蛍光灯の場合は全設備コストは照明設備コストの 5 倍になるとして  $k=y/8.1$  になる。

最後に LED + 蛍光灯併用型の場合は上記二つの場合の間になると考えられる。全設備コストは照明設備コスト ( $x$  と  $z$  の中間の  $w$  と置く) の 2.5 倍かかるとして  $2.5w$  円になる。この場合の償却年数も 10 年と考えると、全生産コストを償却費の 3.6 倍 (償却費が 28%) と考えるとして、償却費は  $0.25w$ 、全生産コスト  $0.9w$  が与えられる。その場合は植付 1 株当たりの照明設備コストを  $y = w/m$  と置いて、 $k=y/18$  になる。

例えば蛍光灯植物工場の場合に  $y$  を 1500 円として を使うと、 $k=111$  円と計算される。電球型蛍光灯の場合に  $y$  を 750 円とし を使うと、 $k=92.6$  円になりいちばん安い。蛍光灯 + LED 植物工場では  $y = 2500$  円と考えると、 $k=185$  円となる。最後に LED のみの場合に  $y$  を 6000 円として を使うと、 $k = 244$  円と計算される。コスモプラント植物工場の場合、 $y = 6537$  円になっている。LED の寿命が長いとはいえ、単純計算では LED を使う植物工場の採算性はかなり難しいことがわかるだろう。以上の考察では LED と蛍光灯の寿命および生産物の品質、生育の違いは考慮されていない。

上記を一般化してみる。照明設備コストを  $x$ 、全設備コストを照明設備の  $a$  倍： $ax$ 、償却年数を 10 年として償却費は  $ax/10$ 。全変動費は償却費の  $b$  倍として  $bax/10$ 。全生産コストは  $(1+b)ax/10$ 。1 株当たりの生産コスト  $k$  は、これを  $0.9 \times n \times 360 = 324n$  で割って  $k=(1+b)ax/162m$ 。植付 1 株当たりの照明設備のコストを  $y=x/m$  と置くと、 $k=(1+b)ay/162$  と書ける。 $a, b, y$  が小さいほど生産コストは安くなるが、 $a, b$  と  $y$  は相反関係にある。

## 2 - 5 光合成反応とパルス照射—LED 植物工場の課題

LED 植物工場の将来の課題としてパルス照射は大切である。植物は基本的に光合成によって生育するが、従来の光合成の研究や実際の栽培場面はほとんど連続照射下で行われてきた。ところで光合成の反応経路を子細に見ると、その中には光を当てる必要のない部分があることがわかる。よく知られているのは明反応と暗反応の区別であり、炭水化物を生成する暗反応には光を必要としない。光合成において光を必要としない時間には光を当て



ず、光を必要とする時間だけ光を当てるような間欠照射を行えば、単位光量当たりの光合成速度を増大させることができるだろう。

明反応と暗反応の場合には、光強度が十分に強いときでないとも効果が現れない。植物工場ではもっと弱い光を使うし、暗期が長すぎて植物が健全に育たない。筆者らは光が絶対に必要だと考えられている明反応において、もっと短い光の不要な時間がないかどうか調べてみた。ここで光合成反応を簡単に説明しておく（図8）、暗反応によって炭水化物をつくるためには二酸化炭素を還元するNADP・H<sub>2</sub>分子と、エネルギー源として使うATPが必要である。これらを作るのが明反応の役目である。明反応のプロセスは、光によるクロロフィル分子の活性化とその後の電子の流れと考えることができる。調べたところ明反応を構成する光化学系Ⅱの反応中心クロロフィルP680の還元時間に200μsかかり、この間は光照射が必要ないことがわかった。

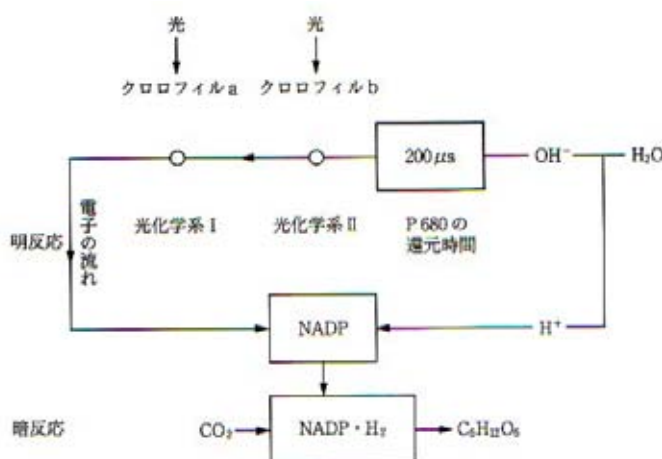


図8 光合成反応と光化学系Ⅱの還元時間

こうした早い変化はLEDやLDでないとも実現できない。我々は白色LEDを明暗比率1の間欠光とし、サラダナでパルス照射実験を行った<sup>4)</sup>。光量を一定にして、2μsから10msまでのいろいろな周期で栽培してみると、周期10msの場合を除いて全体的に単位光量当たりの相対成長率（1日に重量が増える割合）、光合成速度とも連続光に比べて増大した（図9）。とくに周期400μs（パルス幅200μs）の間欠光でサラダナの成長が目に見えて著しかった（図10）。この場合、連続光に比べて成長率、光合成速度とも20～25%の増大が見られた。さらに明暗比を1：2つまりDT比（明期/周期）を33%にすると、成長率はさらに増大した。このことは植物工場生産物の生産原価が2-3割も低下することを意味する。

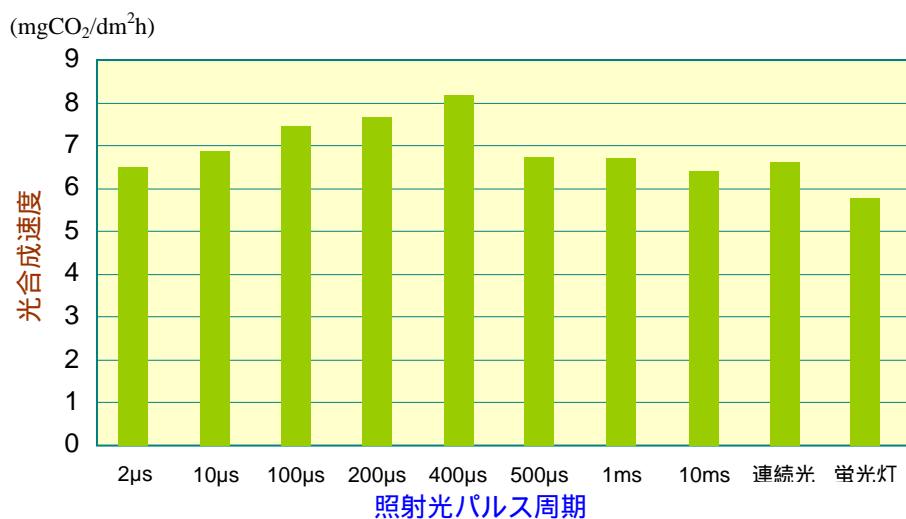


図9 パルス光がサラダ菜の光合成速度に与える影響



図10 白色LEDパルス光照射下のサラダナの生育

## 2 - 6 技術課題とマーケティング

### (1) 農工融合

植物工場は農工融合の典型といわれるが、実用化のためにもっとも大切なことは、農と工を単につなぐのではなく、真の意味の農工融合の実現である。工の観点から実用化の最大のネックは作物の成長が遅いことと、作物の価格が一般に安価なことである。したがって農および工の観点から成長を大幅に促進させ、かつ成長が早く付加価値の高い品種を開発する必要がある。最後にできるだけ安価な方法で工学的にシステムを実現することである。つまり植物生理学とエレクトロニクスの融合であり、植物の光生理の有効利用による成長促進、人工栽培に適した品種の開発、適切な環境制御の実現、の三つが基本的

テーマになる。

については野菜を主な対象として、光合成や光形態形成のスペクトル特性と動的反応特性に重点を置き、単位投入エネルギー当たりの成長がもっとも早いという意味での最適環境条件を探索する必要がある。 については、最適品種が与えられた環境条件に大きく依存することに注意を要する。まず既存品種の中から、与えられた光条件、栽培条件のもっとも成長の早い品種を選抜する。長期的には成長の早さに関連すると考えられる遺伝子を探索し、これによって品種改良を試みることが期待される。

植物工場の採算性はいまギリギリのところにある。経済性がなかなか成立しにくい理由は償却費と変動費がかかるためであるから、まずできるだけ設備を安くつくることと、省エネのあらゆる工夫が求められる。その他いろいろの面でのコストダウンの努力が必要である。まず照明については、照明効率を高めるための反射板の工夫が実際的にはもっとも重要になる。冷房に関しては、植物体の近辺とか培養液のみを冷却する局所冷房や間欠冷房などの採用が望ましい。完全制御型では昼夜を逆転させて安価な夜間電力の使用が必須であろう。水耕栽培では各種作物の栽培ノウハウを蓄積することである。

## (2) マーケティング

現実にはマーケティングが非常に大切である。従来の農業においてもっとも欠けていたのがマーケティングであり、植物工場のような高付加価値農業に対しても同様なことがいえる。植物工場で作られた作物を高く売る流通・販売の努力とともに、どのような作物に隠れた需要があるのかを探る必要がある。植物工場生産物の原価は、現状では一般に従来の方法によるものの5割増しから2倍になる。いくら無農薬、新鮮、清潔、高付加価値といっても、売れなければ植物工場の存在意義はあまりない。消費者に受けるようにうまくブランド化したり、機能性の高い品種を開発することが求められる。また新野菜といわれるものの中から、ヒット野菜をつくるさまざまなアイデアが必要である。

高価に売れる販路を求める例として、例えば香港や上海の富裕層は日本産の野菜を高価に購入することが知られている。香港のあるスーパーでは日本産の上物が日本の2 - 3倍の値段で売られている。2005年6月の調査ではレタス1個が465円、シュンギク1袋330円、コマツナ360円、ミズナ1袋495円、葉ネギ1束285円、ミニトマト1パック420円といった具合である。健康志向が高まるなかで野菜の機能性を高める努力も始まっている。植物工場関連では、例えばビタミンB12を多く含むカイワレが村上農園によって開発された。同社ではまた、がん予防効果があるとされる「スルフォラファン」

の豊富なブロッコリーのスプラウトを販売している。また高い機能性を有する遺伝子組換え作物の植物工場的生産も今後の重要なテーマになるだろう。

植物工場の技術革新は今後も工学面、光生理面、栽培面などいろいろの面で出てくるだろう。筆者の予測では2010年代になると、全国で100箇所以上の完全制御型植物工場が実用化され、安全・安心な野菜を消費者に提供することになるだろう。植物工場は過疎地対策としても有効であるし、アジアや中東など海外への進出も盛んになるとと思われる。

## 2 - 7 蛍光灯 + LED + 有機栽培の導入

蛍光灯の欠点は真中と両端部でかなりの照度ムラがあること、また赤色の成分が少ないために生産物の品質に多少の問題がある。一方、LEDの長短はその逆になっている。主に赤色LEDを利用しているため赤色の好きな植物には有利で、一般に糖分の多い作物ができる。しかし大量に使用するLEDパネルのコストが膨大になって、植物工場の経営を圧迫する最大要因になっている。また先に述べたように栽培品目が限られること、LEDのバラツキといった問題がある。生産物はたしかに無農薬・新鮮・清潔ではあるが、水耕栽培利用では味や硝酸態窒素の問題がないとはいえない。

これらの欠点を克服するために筆者らのグループでは最近、蛍光灯とLEDを一定の割合で組合せた光源を用い、さらに特殊な有機栽培を導入することによって硝酸態窒素が格段に少なくておいしい完全無農薬野菜をつくることに成功した<sup>5)</sup>。実験の様子を図11に示す。これを大規模化し植物工場として採算ベースに乗せるためには光源の更なる低価格化が必要で、赤色成分を増強させた電球型蛍光灯の開発利用を考えている。



図11 蛍光灯 + LED + 有機栽培の結合実験

## 参考文献

- 1) 高辻正基, 植物工場の基礎と実際、裳華房(第2版2006)
- 2) 高辻正基編, 植物工場ハンドブック、東海大学出版会(1997)
- 3) 植物工場研究所ホームページ <http://www.sasrc.jp/pfl.htm>
- 4) 森 康裕, 高辻 正基, 植物工場学会誌, 14, 136(2002)
- 5) 朝日新聞 平成 18 年 12 月 26 日朝刊

## 3 - 1 光反応の不思議——魚の集散——

集魚灯を利用する漁業としてはイカ釣り漁業が代表的であり、日本海や函館では夏の夜の風物詩にもなっている。イカ釣り漁業は大きな出力光源の集魚灯を補助機材として船上に設置し、誘引されたイカを機械で自動的に釣り上げることにより行われている。これらの光は通常(日常)に使用する定常光(連続光)であり、イカの走光性を利用してイカを船周辺へ誘致して、集魚効果に役立っていることを示す。(図1)

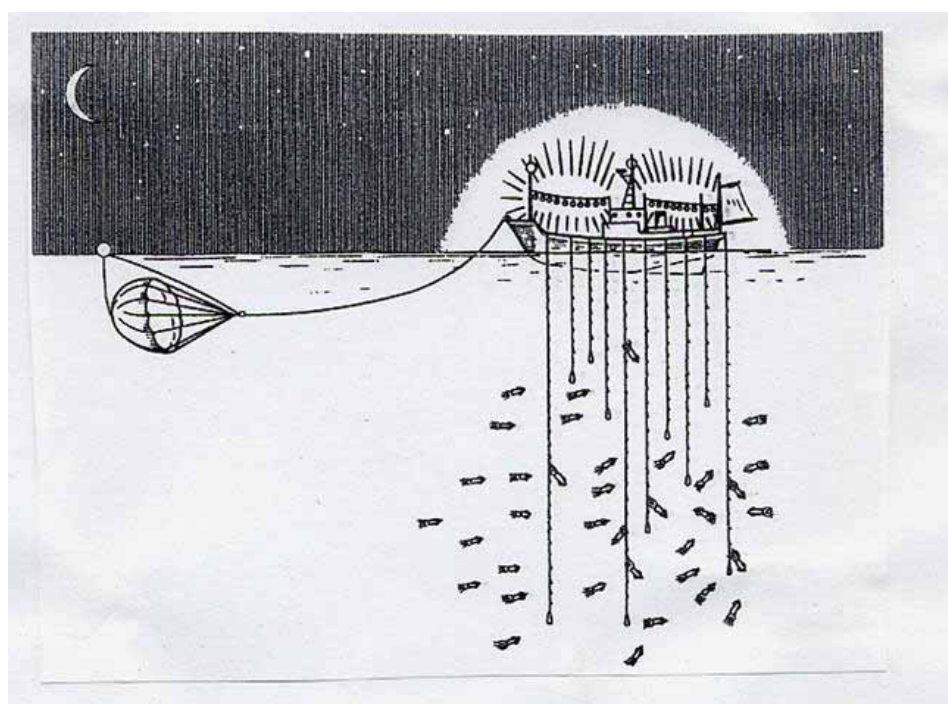


図1 集魚灯を利用したイカ釣り漁(有元・稲田、2003)

一般に集魚灯の光源出力は大きいほど釣獲量が増大すると古来より言われている。漁業者は海中の明るさを高めることが漁獲の増大に直結すると盲信し、光源出力の過剰な競争の拍車により漁家の経営に負担を強いている。このことにより光力規制の必要性が叫ばれ、調査研究されている。

図2はイカ釣り小型漁船(16トン)周囲の水中放射照度分布を示している(荒川ら、1996)。光源の光力は80Kw、海中光の波長は510nmである。船底下は非常に暗いが、少し離れると明るくなり、13m深以下では深さとともに再び暗くなる。舷側は海面から15m深まで等照度で、非常に明るいことがわかる。また、図3は操業時のソナー画像(イカの群れ)

と水中放射照度分布である(Arakawa *et al.*, 1998)。 船底下の 30~70m深にイカが濃密に群れている。 その中央の照度は  $2 \times 10^{-2} \mu W \cdot cm^{-2} \cdot sec^{-1} (510nm)$  で、イカの好適照度が読み取れる。 一方、図 4 は光源出力と一日平均漁獲量の関係を示している。 この図より、光源出力が 100kW程度まで漁獲量は出力に比例して増大するが、150kW以上の高出力では漁獲量のばらつきも大きくなっている。 このような実態をも含めて総合的な見地から、集魚灯光源の適正光力は 180 kWといわれている (有元・稲田、2003)。

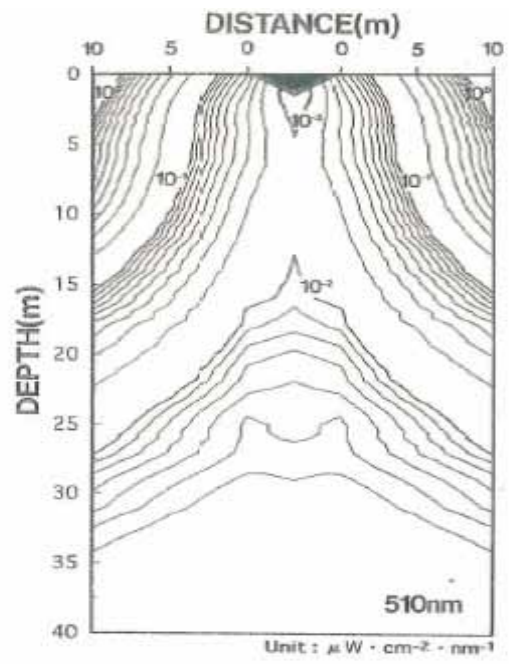


図2 イカ釣り船周辺の水中照度分布(集魚灯の点灯時)

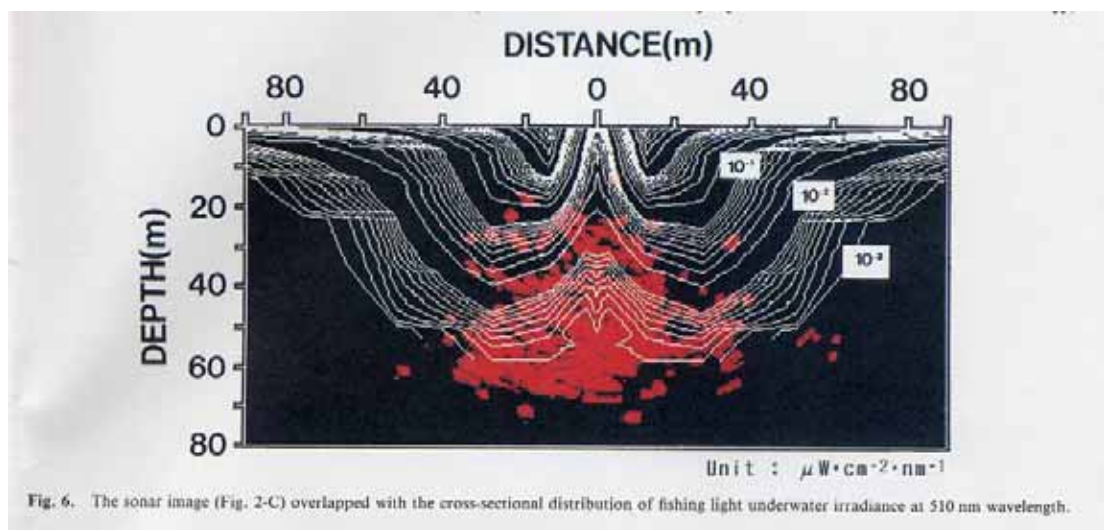


Fig. 6. The sonar image (Fig. 2-C) overlapped with the cross-sectional distribution of fishing light underwater irradiance at 510 nm wavelength.

図3 イカ釣り作業時におけるソナー画像と水中照度分布

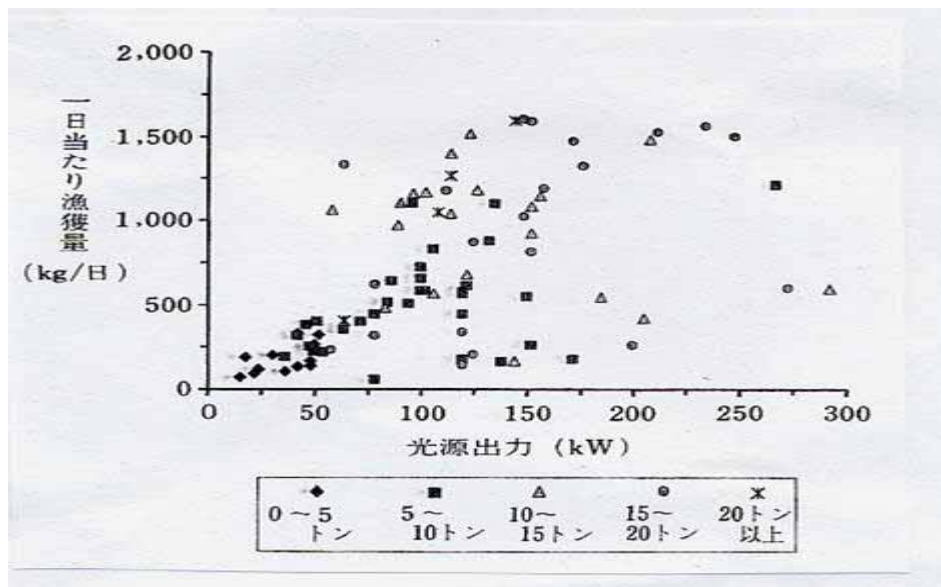


図4 光源出力と漁獲量の関係

集魚灯の光源として、従来、たいまつやかがり火 白熱灯 ハロゲン灯 そして放電灯 (メタルハライド灯) が使用され、近年では発光ダイオード (LED) へ次第に交換され、消費電力の軽減やランプの寿命などの利点により環境にやさしい省エネ化を目指している。しかし、光源の性能は釣獲の多寡に寄与しないと報告されている(岡本、2006)。

一方、連続光 (定常光) に対して断続光の光反応行動では、集魚灯のランプの切れる寸前、点滅やちらつきなどでスルメイカの逃避 逸散する現象が漁業者達から報告されている。このような光環境の急激な変動の有する刺激効果に対して、小池 (1989) はマアジへの断続光照射の一連の実験を行っている。走光性の強いマアジを一周 18m のドーナツ型水路に放ち、夜間に定常光を水路内の一点に照射すると、魚群は直ちに整然とした群れで光源に向かって遊泳し、光源下の直前で反転して暗い方へ向かう。その後 再び光源に近づきその直前で同じように反転して暗い方へもどる。

定常光の代わりに断続光を照射すると、魚群の行動は今までとは変わっている。明暗周期が 3.0 c/s では、照射と同時に光の届かない水域に回避するが、時々 光源域に近づいたりするのが見られる。明暗周期 1.36-0.62 c/s では照射中に光の届く水域への接近やその通過はなかった。図 5 は一例を示す。白丸は断続光の照射の時 魚群が光源下へ接近した回数 黒丸は明るさが断続光の最大照度と同一の定常光の時、魚群が光源下へ接近した回数である。



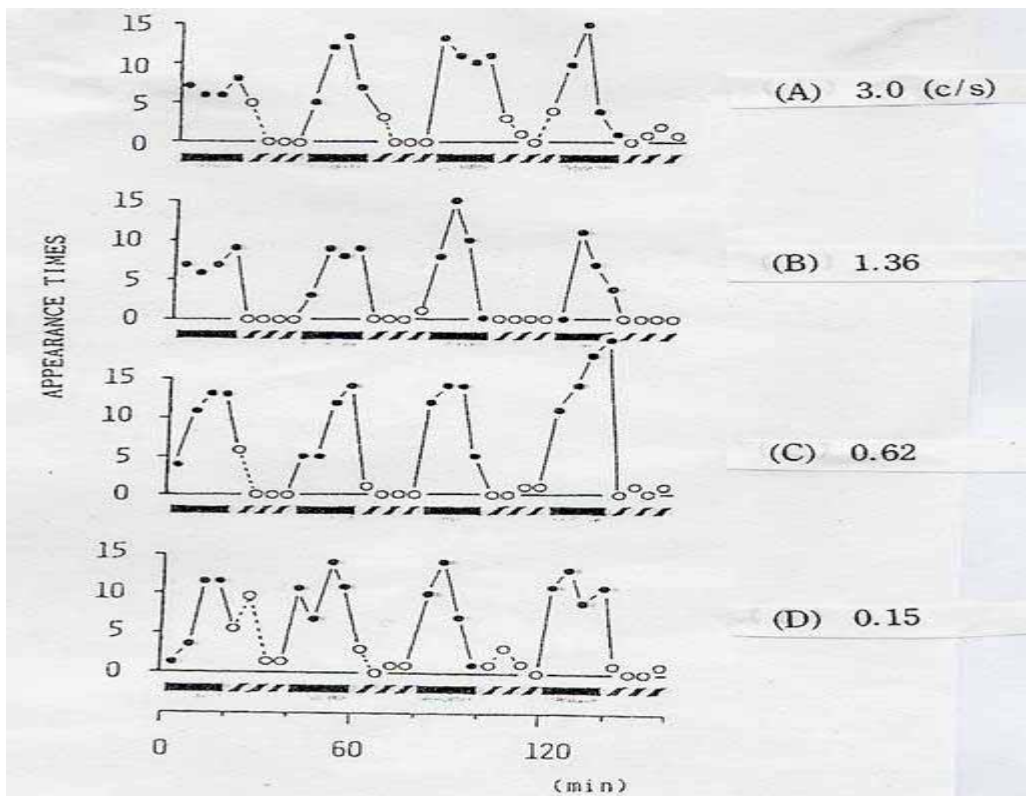


図5 断続光に対するマアジの光反応(明暗周期)

図 6 は水路内の照度(背景照度)変化における断続光および定常光の魚群行動の関係を示す。背景照度 0.01 lx 未満のもとで明暗照度比が 60:1 以上の断続光では、魚群は直ちに回避して光源域への接近は見られない。背景照度が 0.01-0.02 lx 以上と明るくなると、魚群は光源下へ接近あるいは通過している。

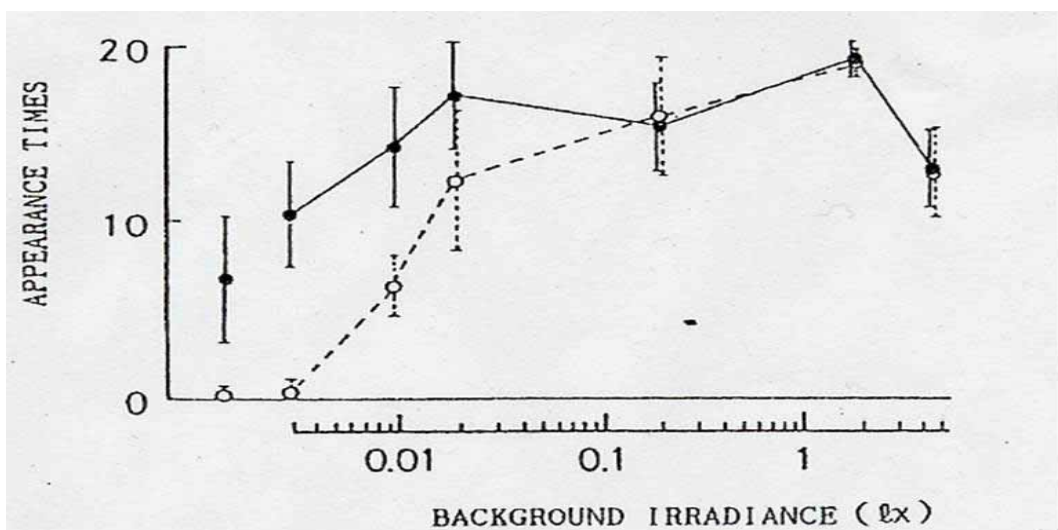


図6 断続光に対するマアジの光反応(背景照度)

断続光に対するマアジの行動反応（小池、1989）について、「光環境の短時間における変化の影響は、集魚効果（蝟集行動）とは全く逆の嫌忌効果（回避行動）として現われ、その効果は断続光の明暗周期や明暗照度比および照射光の色のみならず眼の順応状態によっても大きく変わる。これらの反応は生理学的な面からの感知限界 即ち 臨界融合頻度や明暗弁別閾値と異なる。」と要約されている。

これらの成果から多光束照射装置（写真1）が考案され、この装置を光の垣網や汚染魚の囲い込み技術、あるいは海洋牧場へ応用できることを示唆している。

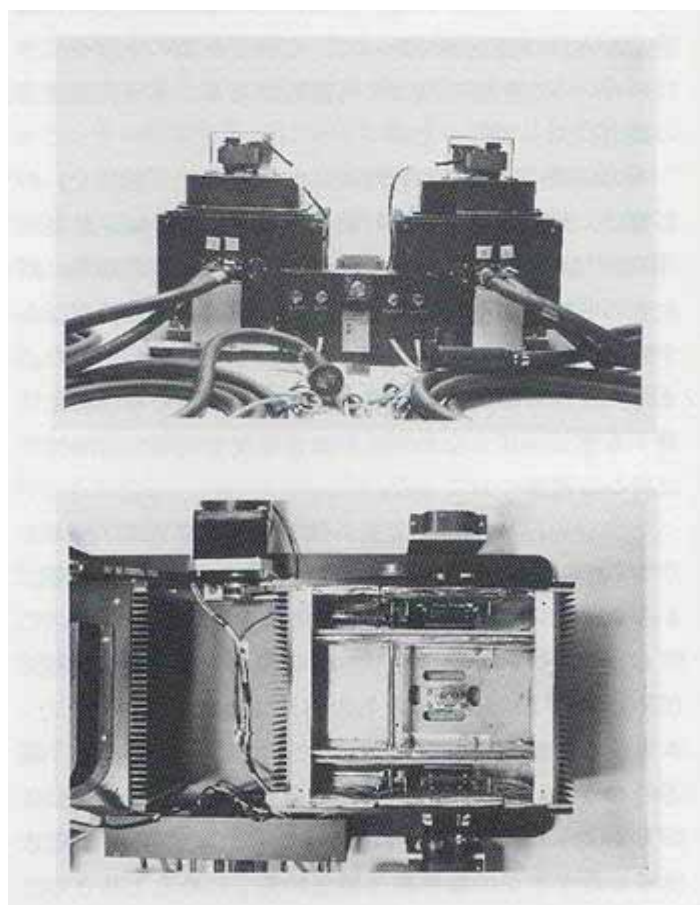


写真1 多光束照射装置

### 3 - 2 釣獲率の向上 ——釣り糸の見分け——

まぐろは世界の人々が最も好む食用魚の1つで、近年の健康ブームの拍車もあり、まぐろの価格は高騰している。

まぐろの捕獲方法は大まかに二通りに分かれ、一つは小型魚体の群れを取り囲むまき網法、他は大型魚の単体を対象とする釣り漁法である。後者の釣り漁法では一本の釣り糸による曳縄操業と延縄操業が行われている。まぐろ曳縄操業の漁場は大間 松前 高知〔土

佐清水) など有名で、操業風景がテレビで度々 放映されている。 また、まぐろ延縄操業の漁場は通常、沖合域および遠洋(海外漁場)である。この漁業は漁獲制限枠の減少に加え人件費や油代などの莫大な経費を必要とするため、採算がとれず縮小傾向にある。

科学技術の進歩による新素材の開発で、まぐろの釣り糸資材に従来のワイヤーがナイロンテグスへと取り替えられ、その結果、釣獲率の向上に役立つといわれている。このナイロンテグス資材はモノフィラメント製であり、保存の手入れもし易く、耐久性に優れている特性がある。

春日(1990)はインド洋のベンガル湾漁場において、釣り糸の資材比較の試験操業を実施している。例えば、1988年の釣獲率はナイロンテグスが2.01%、ワイヤー資材が0.34%であり、前者が著しく大きい。即ち1000本の釣り針のうち、前者が20.1匹 後者が3.4匹 それぞれまぐろが釣獲されていることになる。

まぐろなどをはじめ魚の感覚器官は人間と同様、五感、即ち、視覚、聴覚、嗅覚、味覚および触覚が備わっている。特に、視覚は魚の生態行動に最も重要な役割を果たしていると思われる。森永ら(1990)は釣り資材の取替えによる釣獲率の向上の主因を、操業中の資材の視認距離の差異によるものと推測している。(図7)

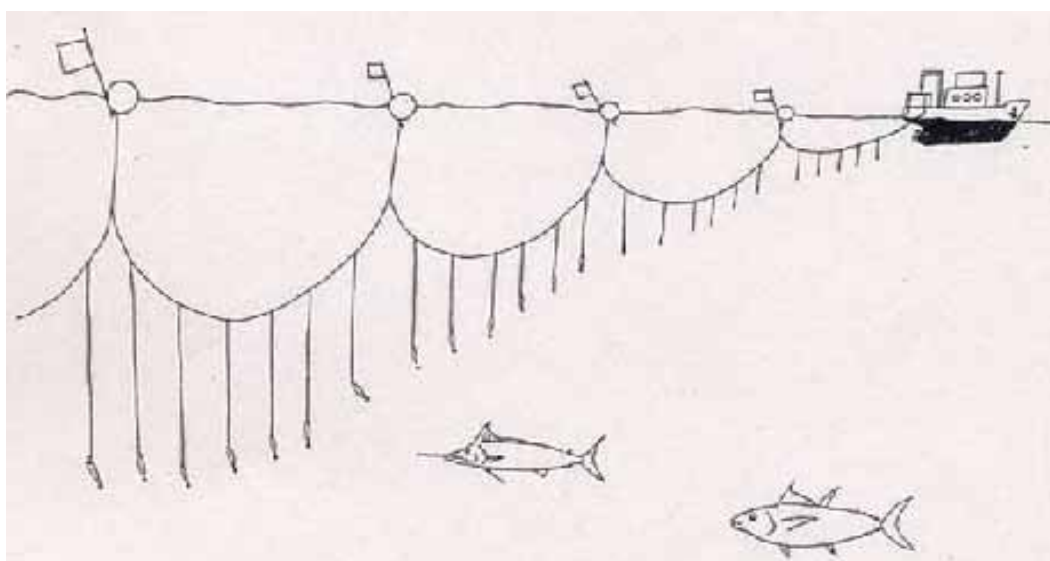


図7 延縄操業の模式図

水中物体の視程理論では魚が物体を視認し得るか否かは物体の大きさ、物体のコントラストおよび海中の明るさの三要素で決まる。視認し得る物体の大きさは見た位置での視角(見込み角)で限定され、次式の関係が成り立っている。

$$D = 2 \cdot r \cdot \tan \frac{\Phi}{2}$$

ここで、D は物体の大きさ、r は物体からの距離および  $\Phi$  は視角である。なお 視角  $\Phi$  の逆数を分単位表示したものが視力の定義とされており、まぐろの視力は Nakamura(1968) によると 0.18(skipjack tuna)と報告されている。また、物体の形状が枝縄のように非常に細長い時、通常の視力と異なり線視力が適用され、まぐろの線視力は 0.90 (視力の 5 倍) と仮定する。水中における物体の見かけのコントラストと固有のコントラストとの関係は次式のように示される。(水平方向を考える。)

$$C(r) = C(o) \cdot \text{EXP}(-\alpha \cdot r) \frac{Bb(o)}{Bb(r)}$$

ここで C(r)と C(o)は見かけおよび固有の各コントラスト、 $\alpha$  は海水の光束消散係数、r は物体までの距離、Bb(o)と Bb(r)は物体の位置および距離 r での背景の反射輝度である。また、枝縄の釣元ワイヤー (#28、3x3) およびナイロンテグス(#150、モノフィラメント製)の固有のコントラストは水槽実験から求めると、前者が 6.3 後者が 1.1 に推定される。また、資材や餌のサイズ計測では、釣元ワイヤーは 1.7mm(直径)、テグスは 2.0mm(直径)および餌のサバは 250mm(尾叉長)、70mm(体高)である。

釣り糸の視認距離を推定するには見かけのコントラストと視角との関係図を作製する。まぐろのコントラスト閾値を 0.05、十分な明るさ(170 lx 以上)の条件の時、中村(1989)の方法により 清澄な水中における視認限界範囲を線視力 0.9 として求める。これより、まぐろの視認距離は釣元ワイヤーで 3.6m、ナイロンテグスで 1.1m と推定できる。このことは枝縄の視認距離が資材の種類で変わり、小さくなることを意味する。即ち 餌に向かって突進してきたまぐろは釣元ワイヤーの場合は、枝縄の手前 3.6m の距離で、ナイロンテグスの場合は、枝縄の直前 1.1m の距離でそれぞれ視認することになる。このことが釣獲率の上昇に寄与しているものと考えられる。

参考として 世界における各漁場での釣り糸の視認距離を表 1 に示す(Morinaga et al.,1993)。ワイヤーとテグスの視認距離の差異は最も清澄水のサンゴ海漁場では約 3m と大きく、海水が濁るほどその差は小さくなる。また、同じ漁場において餌の視認距離は 41m で、枝縄の手前のかかなり遠方の位置から視認していることもわかる。

このように、水中視程において釣り糸の種類により視認距離が小さくなる。このことがまぐろ釣獲率の向上に役立ち、ひいては省エネ化 省力化に貢献していると考察できる。

Oceanic region	Beam attenuation coefficient	Wire (D:1.7mm)	Visibilities Nylon (D:2.0mm)	Mackerel (L:250mm, H:70mm)
Coral Sea	0.078 m <sup>-1</sup>	4.3 m	1.2 m	41 m
Off-Hawaii region	0.084	4.2	1.2	39
Mediterranean Sea	0.13	3.6	1.1	28
Andaman Sea	0.28	2.7	0.96	16

Letters D, L and H denote diameter, fork length and body height, respectively.

表1 釣り糸(ワイヤーテグス)や餌(サバ)の視認距離

### 3 - 3 海苔の誕生——さざ波効果——

浅海の海面付近で栽培するノリ養殖では、秋から翌年春までの期間、季節風の弱い年より連吹期の長い年にノリの生育が良好である経験則が知られている(田中、1966)。このような現象の起因には波動のレンズ作用による太陽透過光の短時間変動(佐々木、1953)の影響、大気と海面での溶存ガスの交換量の増大および栄養塩類の豊富な底層水の補給が挙げられている。また、海の表層における水中照度変動は濁り濃度が低いほどその変動ピークは深く、そこに生息する生物に影響があるとの報告(Dera and Gordon、1968)から、前記の経験則は海表面における光変動と関連があると推測され、藻類への断続光照射実験が試みられている(図8)。

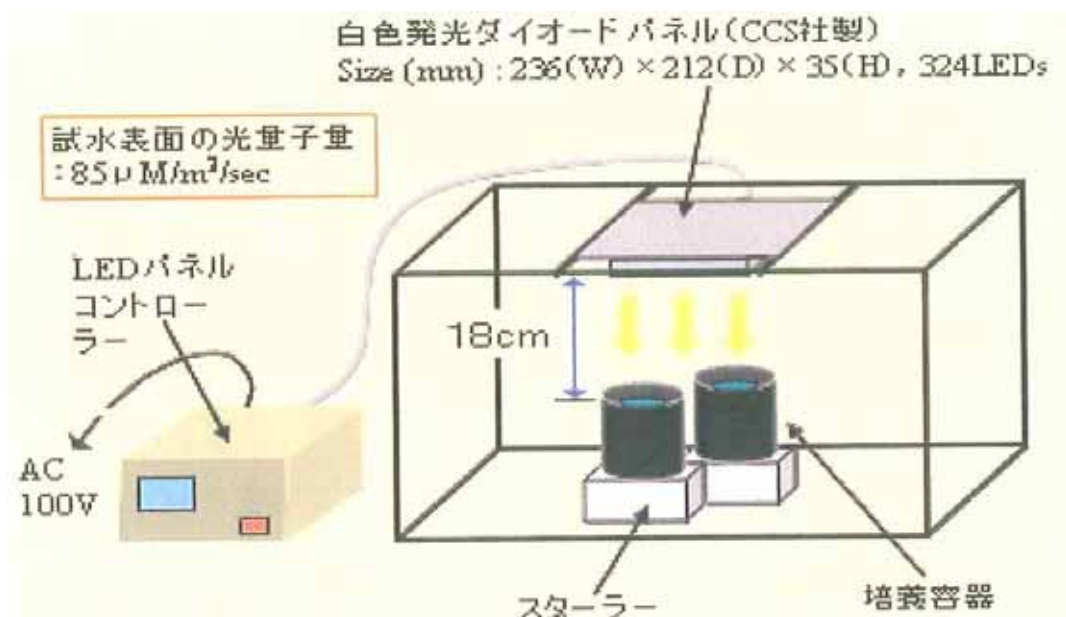


図8 LED光照射実験装置

実験材料としてノリの代わりに微細藻のイソクリシス・ガルバナ(球形、粒径: 4  $\mu\text{m}$ )を採用している。この試料は形状が球のため計測に適しており、また、海産性の単細胞であり幼貝の初期餌料として多用されている。照射光はさざ波程度の波動で生じる周波数の断続光を製作して、平穏な海面状況の連続光との対比照射により微細藻の増殖量; 粒子数、体積および色素含有量 の比較が検討されている。

照射光源の白色発光ダイオードのスペクトル分布では、波長 460nm、560nmにピークがあり 長波長側で減少する分光特性を持っている。照射光量は 8.5  $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 、周波数は 0.5、1.0、2.0 Hzの三段階および連続光(定常光)としている。各培養容器内の微細藻は下部のスターラで常時攪拌されるため、試料へ万遍に照射され、また、水温は  $20 \pm 1$  に保持するよう設定されている。培養液はF/2 培地を使用している。増殖の評価は成長曲線下面積の多寡を基準に決めている。

図9はイソクリシス粒子数の増殖の経日変化を示している(大久保、2003)。光条件は左図が日周期(12L:12D)、右図が終日照射(24L)である。両照射期とも連続光が断続光より粒子数の増加が大きい傾向であることがわかる。例えば、1.0Hzの粒子数を比較すると断続光は連続光のそれぞれ 41-42% と 58-62% に該当している。また、体積の増殖の経日変化は粒子数の場合と同様で、連続光が常に大きい現象を示している。さらに、図10は総色素含有量の増殖の経日変化を示している。左図の日周期では連続光と断続光の意差は見られないが、右図の終日照射では連続光と断続光の相異に有意の差(危険率 0.05)がある。しかし断続光間では総色素含有量の相異は見られない。表2は実験最終日、9日目における各色素含有量の値を示している。この表より、クロロフィル a(Chl.a)、ディアディノキサニン(Dd) フコキサニン(Fc)の各色素では断続光が連続光より大きいことがわかる。ここで一日あたりの照射総光量子量を同等にして比較すると、やっぱり断続光の方が色素含有量の増加割合が多いといえる。従って、植物色素を多く含む葉体が良質で美味しい海苔であることから、季節風による海面のさざ波作用で発生した海中透過光の短時間変動がノリの色素含有量の増加を促進させ、美味しい海苔が産出されることになる。

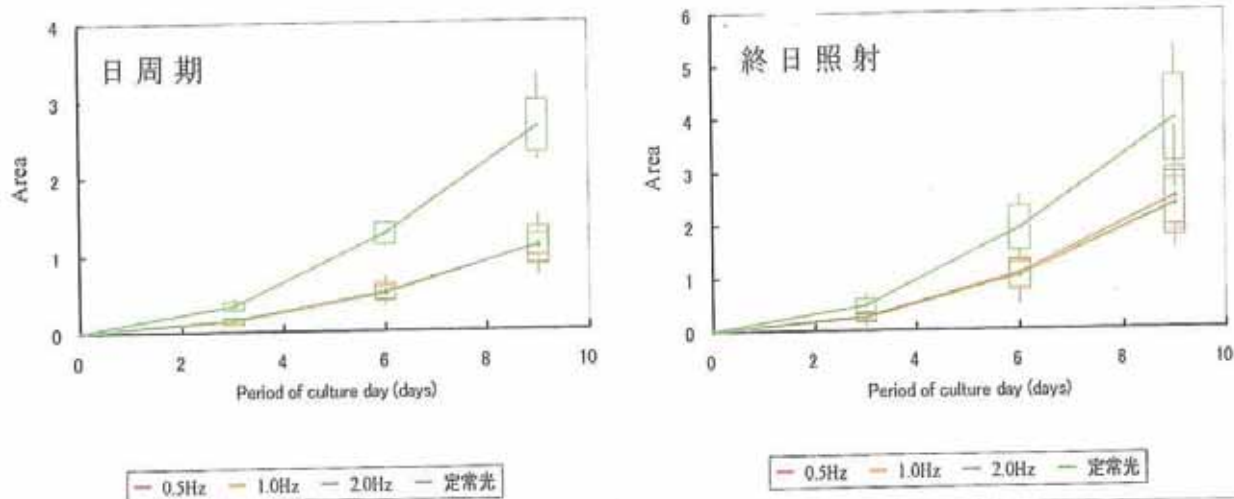


図9 細胞数の増殖の経日変化

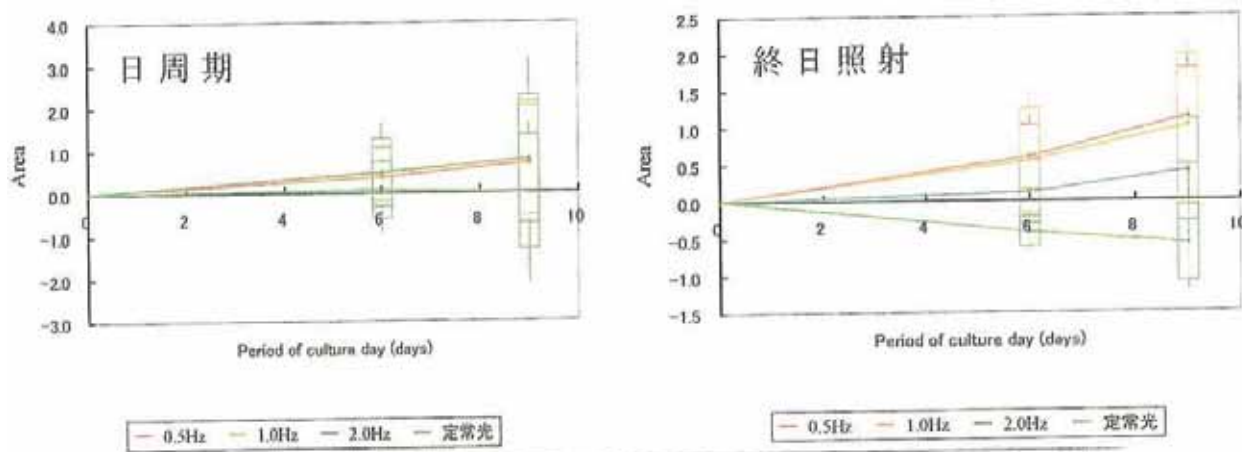


図10 全色素含有量の増殖の経日変化

表2 各色素含有量の増殖割合

Chl.a: クロロフィール a    Chl.c: クロロフィール c  
Dt: ダイアトキサンチン    Dd: デイアデキノキサンチン  
Fc: フコキサンチン

色素 照射光	Chl.a	Chl.c	Dt	Dd	Fc
0.5Hz	0.79 ± 0.50	0.05 ± 0.05	0.01 ± 0.00	0.14 ± 0.05	0.12 ± 0.12
1.0Hz	0.74 ± 0.73	0.03 ± 0.04	0.01 ± 0.01	0.12 ± 0.07	0.10 ± 0.17
2.0Hz	0.28 ± 0.47	0.02 ± 0.05	0.01 ± 0.01	0.09 ± 0.07	0.00 ± 0.13
定常光	-0.52 ± 0.37	0.02 ± 0.04	0.01 ± 0.01	0.07 ± 0.08	-0.15 ± 0.09

### 3 - 4 アワビの成長——光の謎——

沿岸資源生物のアワビは夜行性動物であり、昼間は深所の巣穴に潜み、夜間 特に闇夜では巣穴から出て、索餌や移動のため活発に匍匐行動する。また、彼等は藻場に群生しているワカメ、アラメおよびカジメなどの海藻を摂食し、成長している。なお、アワビの光感知器官は外見からではその位置の確認は困難であるが、触覚である細長い 2本のひげの根元に備わっている。

アワビの夜間行動は屋外水槽による目視観察や匍匐行動計測装置により調べられている(森川ら、1993)。表3は自然光下における夜間行動の目視観察結果である。この表より、匍匐距離と静止時間については 月夜と闇夜で大きく相違することがわかる。

表3 月夜と闇夜に於ける匍匐量、摂餌量、静止時間

	Moonless	Moonlit
Creeping (m)	44.4	27.5
Feeding (g)	20.9	28.0
Resting (min.)	1530	260

また、図11は匍匐行動計測連続記録装置の計測システムの模式図を示す。この計測装置はカゴの中に1個体を入れ、移動ごとの重心位置の変化がカゴを吊り下げた糸の張力変化に連動し、コンピュータで連続記録できる仕組みである。図12はこの装置を利用して夜間行動を抑制する明るさを求めるデータの一例を示す(森川ら、1995)。実験日1-6日及び13-18日における光条件は 昼間の明るさ  $10\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 、夜間は暗黒としている。図より昼間は静止、夜間は行動する活動パターンが読みとれる。実験日7-12日では夜間の明るさを  $10^{-2}$ 、 $10^{-3}$ 、 $10^{-4}$ 、 $10^{-5}$  と順次低下させ夜間活動のパターンの変化を読み取り統計の検定により求める。夜間行動を抑制する明るさは  $10^{-3}\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 以上となる。

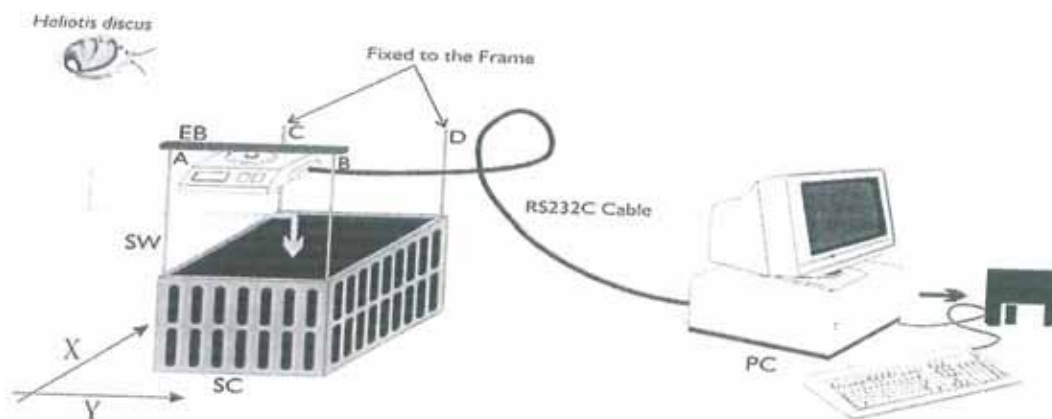


図11 アワビ匍匐行動計測システム



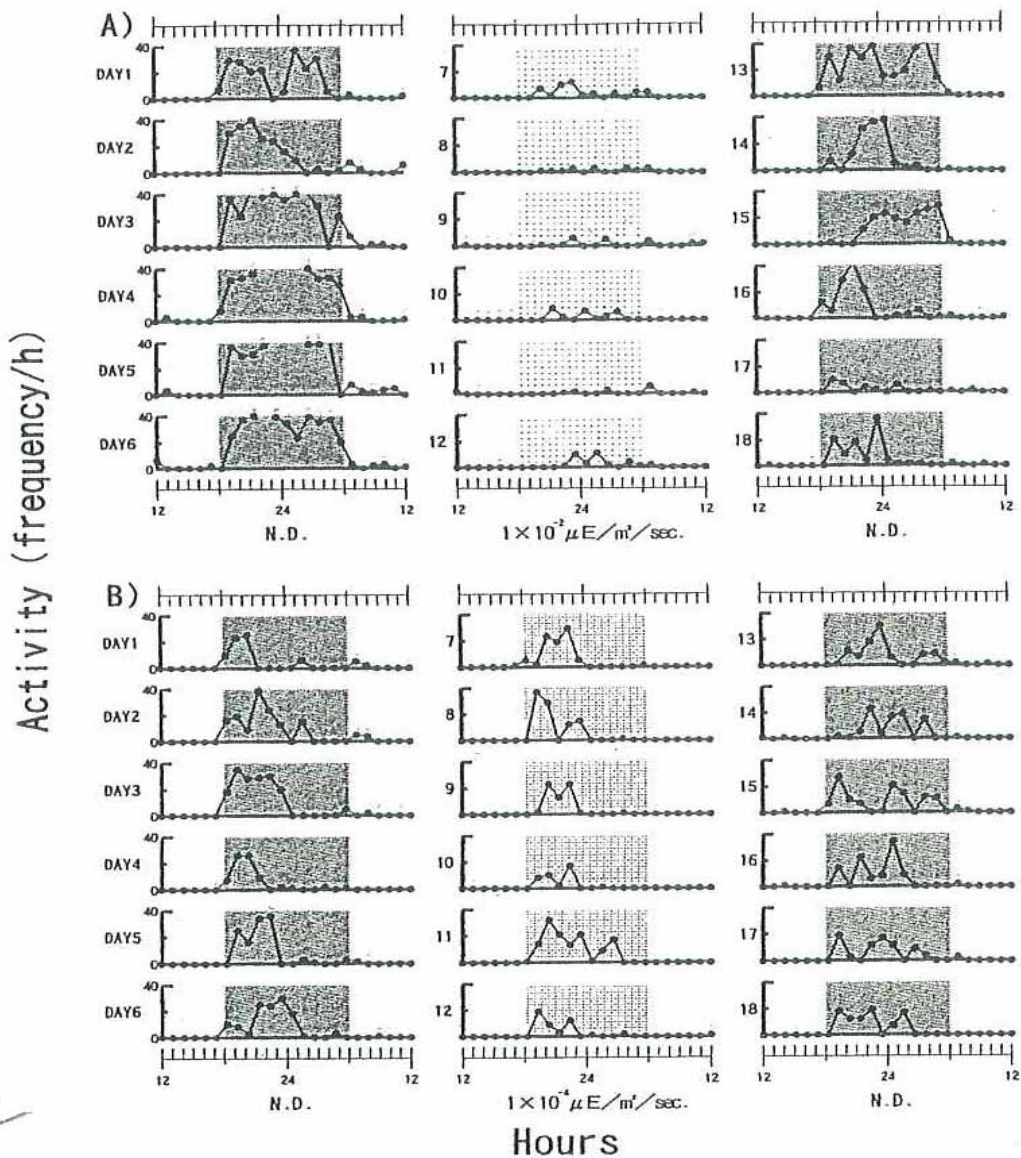


図 12 光量別匍匐行動の頻度分布

アワビ類の増殖事例として、光周期短縮によるクロアワビの成長が調べられている。人工照明の光源として白熱電球（20W、100V）を二個 配備し、タイマーで光周期の短縮を調節する。光周期の短縮は五段階：24D（恒暗）、15L9D、12L12D、9L15D、6L6Dx2（L:明期 D:暗期）である。実験の方法は各水槽内にカゴ網を設置、その中にシェルター（巣穴）を敷設して、流水状態で飼育する。稚貝のサンプル（平均殻長：6cm 平均湿重量：35g）は各 16 固体、成貝のサンプル（平均殻長：10cm 平均湿重量：136g）は 3 - 4 固体とする。それぞれのサンプルは個体識別可能であり、飼育期間は 1 年間 餌料はアラメ・カジメの藻類を十分与えている。図 13 は稚貝の光周期別な成長を示す。上部が殻長 下部が湿重量をそれぞれ表している（森川、1995）。図中の棒線は標準偏

差を意味する。この図から、成長の良い順の光周期は 24D、9L15D・・・である。これらの光周期はいずれも検定（危険率 0.05）で有意な差がある。一年間の成長量をみると、殻長では 24D（恒暗）で約 18mm 9L15Dで約 11mm、湿重量では前者が約 40g 後者が約 21gそれぞれ増加している。また、6L6D x2 の光周期は一年未満であるけれど成長に効果がある。図 14 は成貝の光周期別な成長を示す。上部が殻長下部が湿重量をそれぞれ表している。例えば、9L15D では成長量(1年間)は殻長 約 2mm 湿重量 約 22gである。実験個体数が少ないけれども、この成長段階のレベルでは光周期は成長にあまり影響しない傾向である。両サンプルの化学成分の分析結果は不明である。以上から、アワビの光感覚は非常に優れている。また、光周期短縮によるアワビの成長促進は成貝で無く、稚貝に効果があり、その効果は成長段階レベルで変化し、最大効果の光周期は 24D（恒暗）であると考えられる。

今後、成長速度や成熟の速い夜行性生物を対象にすれば光資源の有効活用となるであろう。

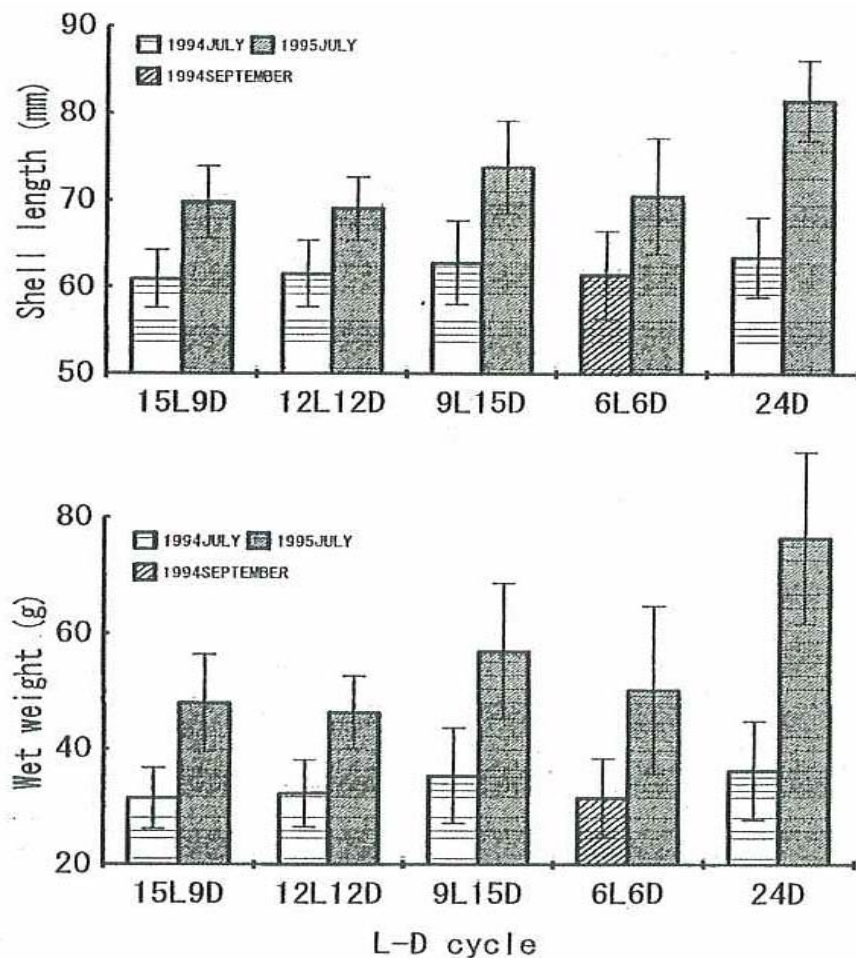


図 13 稚貝の光周期短縮による成長(上部:殻長 下部:湿重量)

## 引用文献

- 1) 荒川久幸・崔 析珍・有元貴文・中村善彦 (1996): 小型イカ釣り漁船の集魚灯の海中照度分布 日水誌 62(3),420~427
- 2) Arakawa H., Choi S., Arimoto T. and Y. Nakamura(1998): Relationship between underwater irradiance and distribution of Japanese common squid under fishing lights of a squid jigging boat. Fish. Sci. 64(4), 553-557
- 3) 有元 貴文・稲田 博史 (2003): スルメイカの世界—資源・漁業・利用— 成山堂書店 東京
- 4) 岡本 研正 (2006): イカ釣り漁船用青色 LED 集魚灯の開発で消費電力を抑え省エネ化を実現 Techno Innovation 16(4) 54-55 (社)農林水産先端技術産業振興センター
- 5) 小池隆 (1989): 断続光にたいするマアジの行動反応に関する研究 三重大生資 紀要 2, 23~53
- 6) 春日功 (1990): テグス (モノフィラメント) 製鮪延縄漁具による試験操業について 水産技術と経営、200, 55~62
- 7) Morinaga T., A. Imazeki, H.Arakawa and T. Koike (1993): Underwater visibility in different optical type water mass of the oceans. La mer 31, 11~18
- 8) 田中 小治郎 (1966): 栽培技術論 上田書店
- 9) 佐々木 忠義 (1953): 集魚灯——その理論と実際—— 1~168 イデア書院
- 10) Dera and Gordon(1968): Light field fluctuation in the photic zone. Limnol. Oceanogr., 13,697-699
- 11) 大久保 べに(2003): 断続光の植物プランクトンの成長への効果 東京水産大学 大学院 修士学位論文 1~54
- 9) 森川由隆・小池康之・森永勤 (1993): 自然光下における水中の明るさとクロアワビの夜間行動との関係 La mer 31,199~204
- 10) 森川由隆・小池隆・森永勤 (1995): クロアワビの夜間行動を抑制する水中の明るさ La mer 33, 215-220
- 11) 森川由隆 (1995): クロアワビ (*Haliotis discus*) の行動におよぼす光の影響 東京水産大学 博士学位論文 1~100.