

## 光量子と日照時間・全天日射量及び珪藻類増殖との関連

古賀 秀昭

### Relationships between Quantum and Sunshine Duration, Global Solar Radiation, and Growth of Diatoms

Hideaki KOGA

#### Abstract

Measurement of quantum of one day's integration had been done to find the relationships with sunshine duration and global solar radiation.

The values of quantum varied greatly depending on atmospheric conditions, but, the fluctuations of its moving average were similar to the height of the sun, minimum and maximum level appeared in December and June, respectively.

General fluctuations of sunshine duration were almost same to quantum's one, but, there were large difference between both items by season and weather. Therefore, it would be impossible to estimate the value of quantum from the linear equation which obtained by relationship between both items through the year. Although, the linear equations which obtained by data of each month would be useful to some degree.

On the other hand, about global solar radiation, correlation with quantum was very high through the year. Linear equation was indicated as follows,

$$Y(E \cdot m^{-2} \cdot day^{-1}) = 0.928 + 2.084 X (MJ \cdot m^{-2} \cdot day^{-1}) \quad (r=0.979)$$

And, the relationship between quantum and red tide of diatoms in winter was investigated as one example using quantum. As the result, in fiscal 1987, it was presumed that the growth of diatoms occurred at the time when quantum was increasing and water temperature was getting higher after low salinity.

#### まえがき

植物プランクトン、ノリ等光合成を行なう藻類の研究には、光を示す要素としてこれまで日照時間や照度が多く使われてきた。このような研究において、光の要素は極めて重要であるが、前者についてはあくまでも太陽光線の照射時間であり、漠然とした気象要素の一つにしか過ぎず、後者については瞬間的な明るさの度合を示すだけのものである。このため、近年、光をエネルギーとして

捉えることにより植物との関連について論じられ、一般に日射量 $cal \cdot cm^{-2}$ 、 $J \cdot m^{-2}$ 等で表わされることが多い<sup>1,2)</sup>。しかし、光合成有効放射はエネルギーよりも光量子によって評価する方が誤差が少ない<sup>3)</sup>ことから、エネルギー素量としての光量子 $\mu E \cdot s^{-1} \cdot m^{-2}$  (瞬時値)、 $E \cdot m^{-2}$  (積算値)で表わされることが多くなってきた<sup>4-10)</sup>。

しかし、そのような測定手段がない場合、日照

時間等を用いざるを得ず、光に関する単位相互の関係について明らかにしておくことが必要と思われる。山本ら<sup>11)</sup>は福岡湾周辺域における光量子と全天日射量との関係について報告しているが、日照時間との関係については不明である。そこで、光量子計を用い、周年にわたる光量子を測定し、日照時間、全天日射量との関係について求めた。

また、近年、有明海湾奥部では冬季に珪藻赤潮

が発生<sup>2,4,5,12-15)</sup>し、栄養塩類が急減する現象がみられ、ノリ養殖の大きな隘路となっている。珪藻類は光量子が1年中で最も低い12月中には極めて少なく、1、2月に急激に増殖する傾向がこの数年みられており<sup>4,5,12)</sup>、珪藻類の増殖に光の要素が大きく関与していることが推測される。そこで、光量子と珪藻類の増殖との関連についても若干の検討を加えた。

## 材料及び方法

### 1. 光量子

光量子計はLI-1000 DATALOGGER、センサーはLI-190SA quantum sensor (米国LI-COR社製)を用いた。光合成有効放射の波長域は400~700nmと定義され、当センサーは400~700nm間を等しい光量子感度としたもので、光合成に有効な総光量子の測定に有効とされている<sup>3)</sup>。このセンサーを当水試 (N: 33° 11' 80", E: 130° 13' 15") 屋上に水平に設置した (Fig. 1 : St.A)。周辺には高い建造物や木立はなく、周年にわたり日陰となることはない。原則として、1時間積算値を測定し、これにより1日の積算値を求めた。測定は1986年10月12日から開始し、1987年10月までの測定値を用いた。

なお、光量子とは、光のエネルギーが粒子 (quanta, photon) として放出、伝搬または入射する場合に、この粒子の物理的最小単位とされている<sup>3)</sup>。

### 2. 日照時間及び全天日射量

当水試から直線距離約10kmの北東方向に位置する佐賀地方気象台 (Fig. 1 : St.B) の資料を用いたが、天候の相違はほとんどないものと考えられる。日照時間は回転式日照計、全天日射量は熱電堆式全天日射計による観測値である。なお、日照時間において日照が全くないときには (—) で表わされるが、これについては0時間として扱った。

なお、光の単位相互の関係については、LI-COR社LI-1000 DATALOGGER INSTRUCTION MANUALによると以下のとおりである。

$$\begin{aligned}
 1 \text{ E} \cdot \text{m}^{-2} &= 6.022 \cdot 10^{23} \text{ photons} \cdot \text{m}^{-2} \quad (\text{E: Einstein}) \\
 &= 6.022 \cdot 10^{23} \text{ quanta} \cdot \text{m}^{-2} \\
 1 \text{ Wh} \cdot \text{m}^{-2} &= 0.0860 \text{ cal} \cdot \text{cm}^{-2} \\
 &= 0.0860 \text{ langley} \\
 &= 3600 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}
 \end{aligned}$$

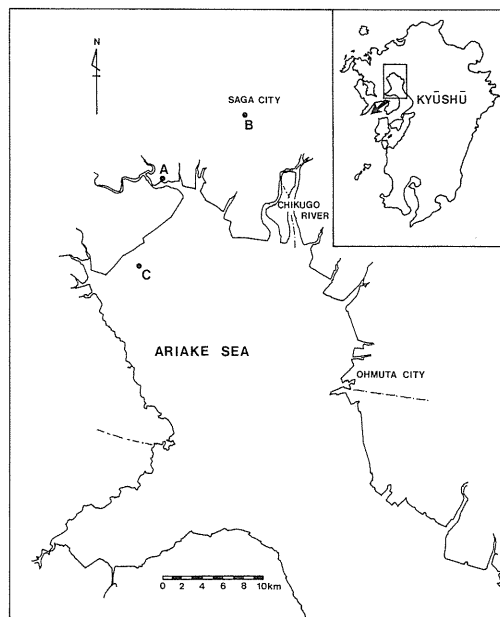


Fig. 1 測定地点  
Points of measurement.

Quantum and Sunshine duration, global solar radiation were measured at Saga prefectural Ariake fisheries experimental station (A) and Saga Meteorological Observatory (B) in Saga city, respectively. The distance between both stations is about ten kilometers in a straight line.

The data of diatom red tide were obtained at Station C.

### 3. 光量子と冬季における珪藻赤潮との関連

#### (1) 珪藻類の資料

1986、1987年度の赤潮調査の資料<sup>4,5)</sup>から、*Skeletonema costatum*, *Asterionella kariana*の初期発生海域と推定されている<sup>4,5,12)</sup>国営有明地区干拓地地先の精密調査定点(Fig. 1 : St.C)の資料(11月下旬から2月上旬までの表層)を用いた。なお、調査はほぼ7日ごとに行なわれている。

#### (2) 光量子の測定

前述の方法により測定して得られた日積算値の資料を用いた。

#### (3) 解析方法

重回帰分析により珪藻類増殖の要因について検討を加えたが、目的変数は珪藻類全細胞数から求めた増殖率( $\mu_2$ )とした。説明変数は、当海域においては珪藻類増殖の制限要因ではないとされ<sup>15)</sup>、また、珪藻類の増殖によってその値が左右される栄養塩類等は用いず、水温、塩分と光量子とした。

なお、ここでは、これらの変動が珪藻類の増殖にどれほどの関連をもっているかについて検討するため、水温、塩分については絶対値を用いず変動の大きさ(1日当りの変化量)、また、光量子については、調査日以前7日間平均値、また、それ以前7日の平均値との比(光量子が増加、あるいは減少傾向かの目安)とした。

$$\text{増殖率}(\mu_2) = (\ln C_1 - \ln C_0) / (t_1 - t_0) \ln 2$$

$$\text{光量子}(a) = \text{調査日以前7日間平均値} (E \cdot m^{-2} \cdot \text{day}^{-1})$$

$$\text{光量子の変動}(b) = (a) / \text{それ以前7日間の平均値}$$

$$\text{水温の変動}(c) = (WT_1 - WT_0) / (t_1 - t_0)$$

$$\text{塩分の変動}(d) = (S_1 - S_0) / (t_1 - t_0)$$

※ C : 細胞数 (cells · ml<sup>-1</sup>)

t : 調査日

重回帰式は変数の打ち切り基準をF in = 2, F out = 100として変数減少法<sup>16)</sup>により求めた。

## 結果及び考察

### 1. 光量子の変動

周年にわたる日積算光量子の変動をFig. 2に示した。なお、図中の曲線は移動平均値(n=15)を示す。また、偶数月における快晴時の1時間積算

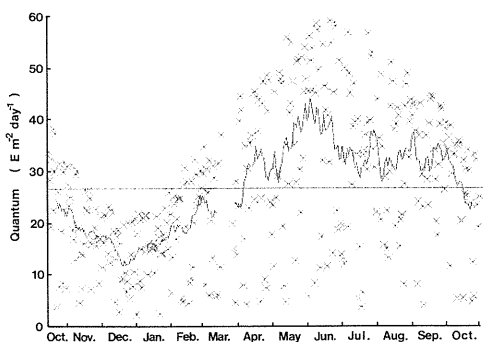


Fig. 2 日積算光量子の変動  
Fluctuation of quantum, one day's integration.

Curved and horizontal lines indicate the value of moving average (n=15) and the mean value through all the period, respectively.

値の日変化をFig. 3に示した。

光量子の変動は天候に大きく左右されるが、移動平均値をみると季節的相違が顕著であった。すなわち、冬至前後の12月に最低(12 E·m<sup>-2</sup>·day<sup>-1</sup>程度)となり、その後増減の変動はあるものの徐々に増加し、6月に最高値(40 E·m<sup>-2</sup>·day<sup>-1</sup>程度)を示し、その比は3倍以上に達した。最も高い値を示すものと考えられる夏至前後に若干落ち込みがみられるが、これは梅雨の影響と考えられる。また、日積算値の最高は1987年6月22日の59.13 E·m<sup>-2</sup>·day<sup>-1</sup>、最低は1987年1月2日の2.30 E·m<sup>-2</sup>·day<sup>-1</sup>であった。

快晴時の日変化については、いずれの月においても12時から13時を最高値としてほぼ左右対称形を示し、太陽の高度とよく対応している。日最高値を示す1時間積算値を比較すると、最低である12月は最高値を示す6月の約50%に過ぎず、12月の正午前後の光量子は6月の8時、17時前後と変わらない。

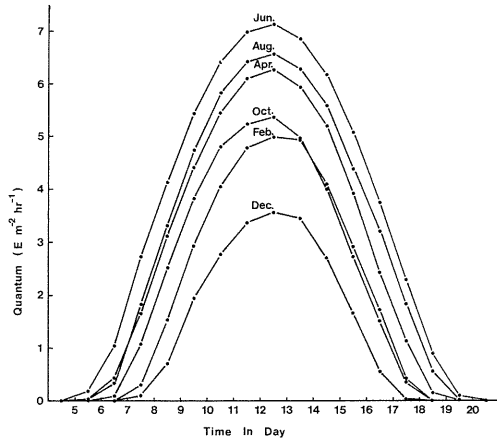


Fig. 3 快晴時における光量子の経時変化  
Hourly changes of quantum, one hour's integration in clear day.

なお、6月22日の12~13時には $7.12 \text{ E} \cdot \text{m}^{-2} \text{ hr}^{-1}$ と期間中の1時間最高値を示した。光量子から照度への換算係数は光源によって異なるが、白熱球とした場合、LI-COR社LI-1000 DATALOGGER INSTRUCTION MANUALによると、

$$1 \text{ k lux} = 19.5 \mu\text{E} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$$

とされており、約101,000 luxの太陽光線が1時間を通じて照射したことになる。

## 2. 光量子と日照時間

周年にわたる日照時間の変動をFig. 4に、日積算光量子と日照時間との関係をFig. 5に、また、両者の月毎の最高、平均、最低値をTable 1に示した。

日照時間の移動平均値をみると、全体的には光量子とほぼ同様の変動パターンを示したが、短期的な変動幅は光量子に比べ大きかった。これは光量子に比べ日毎の気象の変化に大きく左右されるためであろう。逆に長期的な変動幅は小さかった。すなわち、月平均値をみると光量子の最高月と最低月の比は2.73、一方、日照時間では1.71と小さく、季節による相違は光量子ほど明瞭ではなかった。

Fig. 5に示したように両者の間には $r=0.807$ と直線的な関係がみられるものの、両者の座標は大きな菱形の枠内に散在し回帰直線からの偏差が大

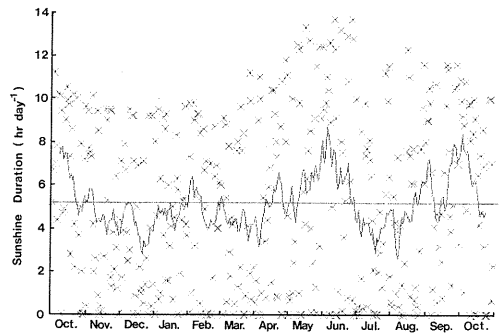


Fig. 4 日照時間の変動  
Fluctuation of sunshine duration.

Curved and horizontal lines indicate the value of moving average ( $n=15$ ) and the mean value through all the period, respectively.

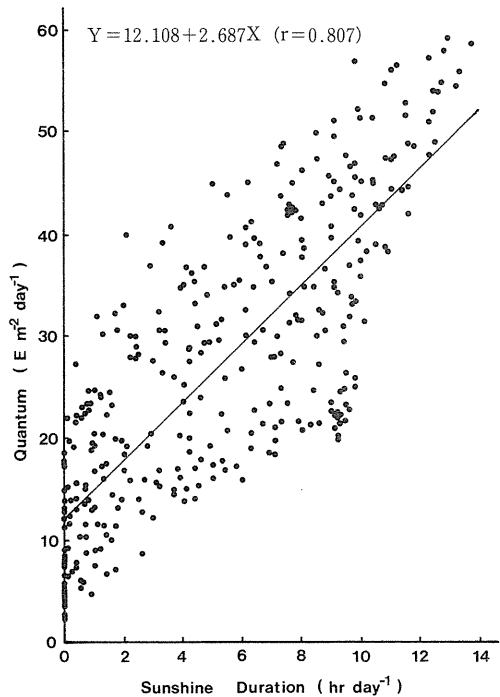


Fig. 5 光量子と日照時間の関係  
Relationship between quantum of one day's integration and sunshine duration.

きいことが認められた。例えば、日照時間0の時の日積算光量子は $2.30 \sim 18.64 \text{ E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$ 、同じく5時間の時では $15 \sim 45 \text{ E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$ 、10時間の時では $20 \sim 57 \text{ E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$ の範囲にありその

Table 1 日積算光量子と日照時間の月別最高、平均、最低値  
 Monthly maximum, mean and minimum value of quantum of one day's integration and sunshine duration.

Quantum of one day's integration ( $E \cdot m^{-2} \cdot day^{-1}$ )												
	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	June	July	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.
Maximum	25.9	32.2	36.9	48.5	55.8	59.1	56.2	50.9	44.6	39.3	31.4	23.2
Mean	16.0	20.0	21.7	30.9	34.7	39.8	32.4	31.5	32.8	27.0	19.1	14.6
Minimum	2.3	4.4	4.5	4.2	4.7	5.8	3.6	8.0	4.0	3.8	4.5	2.7
Sunshine duration ( $hr \cdot day^{-1}$ )												
	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	June	July	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.
Maximum	9.8	9.8	11.2	11.8	13.3	13.7	11.5	12.3	11.6	11.2	10.1	9.5
Mean	4.9	4.8	4.3	5.5	5.7	7.0	4.1	4.5	6.1	6.2	4.5	4.2
Minimum	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Measurements had been done from 12 Oct. 1986 to Oct. 1987, so, data of October include both years.

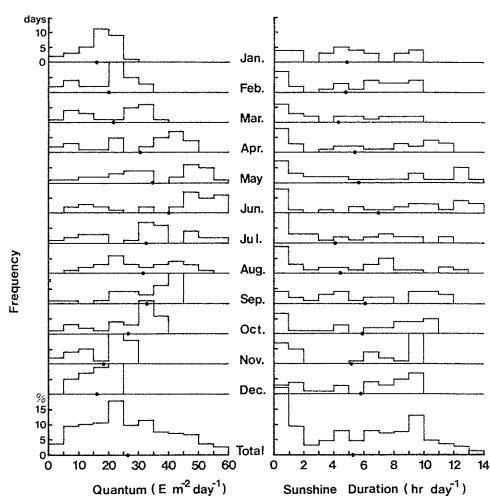


Fig. 6 光量子と日照時間の月別頻度分布  
 Frequency distributions of quantum and sunshine duration in each month.

幅は極めて広い。また、Fig. 6 に月別の両者の頻度分布を示したが、モードをみると日照時間では0～1時間にあるのに対し、光量子では20～25  $E \cdot m^{-2} \cdot day^{-1}$ であり、その分布傾向は極めて異なっている。さらに、両者の月平均値をみると、日照時間が最低を示した7月は、光量子の最低月であった12月の2.22倍もの光量子がある等、日照時間は必ずしも光の状況をよく反映しているとはいえない。つまり、日照時間の値が同じであっても、実際の光のエネルギー量（光量子）は季節によ

て大きく異なっている。

この理由として、①日照時間は季節や日中の太陽高度（太陽光線入射角）の相違に関係なく測定される。②日照時間の場合、降雨日や曇天日において、その程度にかかわりなく日照がなければ0となり、一方、光量子では少しでも明るさがあれば記録され、決して0にはなり得ない。③曇天でも季節、雲の厚さ等によってかなり明るさの相違があること等があげられる。以上のことから、日照時間から日積算光量子を求める場合、年間を通じたFig. 5の直線式を用いることは極めて誤差が大きく有効ではないものと考えられる。

そこで、季節によるバラツキを除くため各月毎の両者の関係について求めた。その結果、相関係数はほぼ0.9以上と年間を通じた値よりも高い値を示したことから、Fig. 5の直線式よりも有効であることが明らかとなった。Table 2に各月毎の両者の関係式を示したが、季節による直線式の傾き、切片に大きな相違があり、両者の関係は季節（月）によって変わることが明らかである。これによれば日照時間からの光量子の推定はある程度可能であると考えられる。

### 3. 光量子と全天日射量

全天日射量の最高値は1987年6月10日の27.8  $MJ \cdot m^{-2} \cdot day^{-1}$ 、最低値は1987年2月2日の0.8  $MJ \cdot m^{-2} \cdot day^{-1}$ であった。Fig. 7に両者の関係を示したが、両者の間には次式で示される強い直線

Table 2 日積算光量子と日照時間との関係  
Relationship between quantum of one day's integration and sunshine duration.

Month	a	b	r
Jan.	1.674	7.790	0.914
Feb.	2.119	9.786	0.861
Mar.	3.061	8.837	0.936
Apr.	3.201	13.416	0.936
May	2.943	17.765	0.943
June	3.276	16.924	0.948
July	3.624	17.793	0.893
Aug.	3.072	17.694	0.941
Sep.	2.473	17.732	0.893
Oct.	2.501	11.909	0.924
Nov.	1.863	10.862	0.901
Dec.	1.664	7.633	0.924

$Y = aX + b$  Y: Quantum of one day's integration ( $E \cdot m^{-2} \cdot day^{-1}$ )  
X: Sunshine duration ( $hr \cdot day^{-1}$ )

関係にあり、光量子と同様の変動傾向を示した。

$$Y = 0.929 + 2.084X \quad (r = 0.979)$$

Y: Quantum ( $E \cdot m^{-2} \cdot day^{-1}$ )

X: Global Solar Radiation ( $MJ \cdot m^{-2} \cdot day^{-1}$ )

このことから、この式を用い地方気象台で観測されている全天日射量から日積算光量子を求めても大きな誤差はないものと思われた。

#### 4. 光量子と冬季における珪藻赤潮との関連

得られた重回帰式を以下に示す。

$$1986 \text{年度} \cdots \cdots \text{増殖率} (\mu_2) \\ = 0.035a + 0.106b + 0.178c - 0.247d - 0.572$$

$$1987 \text{年度} \cdots \cdots \text{増殖率} (\mu_2) \\ = -0.013a + 0.172b + 0.911c + 1.128d - 0.160$$

1986年度については重相関係数( $R^2$ )は0.264と低く、珪藻類の増殖について前述の変数では説明がつかない。一方、1987年度については重相関係数は0.765と比較の高い値で、自由度調整済み重相関係数も0.577を示したことから、この式により珪藻類の増殖は半分以上説明できる。

このように、年によって極端な相違がみられたが、比較的高い重相関係数を示した1987年度の珪藻類の増殖について検討する。各変数の係数をみ

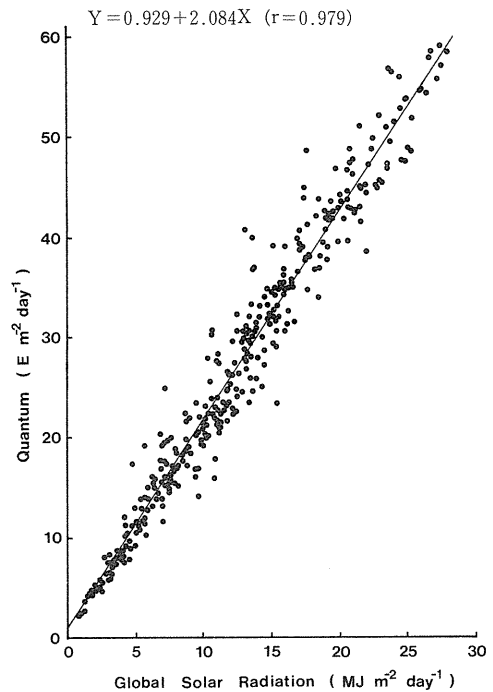


Fig. 7 光量子と全天日射量の関係  
Relationship between quantum of one day's integration and global solar radiation.

ると、光量子の変動(b)、水温の変動(c)は正の値を示している。また、塩分(d)についても正の値となっているが、この時期は年間を通じて最も塩分が安定している時期であることから、塩分の変動が正の値であるということは、前回調査時点に塩分低下が起こっており、それが回復している状態と考えられる。このことから、珪藻類は光量子が増加傾向、水温は上昇傾向の時期に、塩分低下後しばらくして(7日前後)増殖したことが推測される。言い替えれば、光量子、水温とも減少、下降傾向にあり、降雨も少ない12月には珪藻類は発生しにくいものと考えられる。一方、光量子の絶対値(a: 7日間平均値)は負の値を示し、光量子の増加傾向と反するように思えるが、珪藻類増殖の光要因としては光量子の絶対値よりむしろ、その値が低くても増加傾向にあることが大きいものとみなすことができる。これは、変数減少法による次のステップでは変数a(光量子の

絶対値)が除去されることから推定される。

当海域における冬季の珪藻類増殖機構は様々な要因が複雑に絡み合っているものと思われるが、光要因を見逃すわけにはいかない。年による相違も大きく一概には言えないものの、以上のように珪藻類増殖に光の要因もある程度関与しているものと推定された。しかしながら、変数の取り方等不備な点も多く、さらに検討する必要がある。また、一口に光量子といっても地表面(海表面)の値であり、珪藻類との関連について論じようとするならば当然海水中の光量子を用いる必要があり、海表面の値で一概に片付けられない。特に当海域は本邦一の潮汐差、広大な干潟を有することから海水の濁度が極めて高く、海域、潮時、月齢によ

てもその程度は異なる。このことから、海水中での光量子の減衰の程度を種々の条件下について把握しておく必要がある。

以上、光量子と日照時間、全天日射量との関係、さらに、冬季の珪藻赤潮との関連について述べたが、光量子の測定は藻類との関連において今後ますます重要になってくるものと思われる。また、気象台が観測した全天日射量から光量子を求めることができることから、既往資料の再検討も可能となるであろう。さらに、藻類との関連だけではなく、干潟泥温との関係等を求めることにより干潟生物研究面にも応用できるものと考えられ、今後、広範囲に検討していく必要がある。

## 要 約

1. 光量子計を用い、周年にわたる光量子の測定を行ない、日照時間、全天日射量との関係について求めた。
2. 光量子の年変動は12月に最低、6月に最高を示す等明瞭な季節変動がみられた。また、快晴時の1時間積算値は各月とも12~13時の1時間が最も高い値を示したが、12月の正午前後の光量子は6月の約50%に過ぎず、6月の8時、17時前後と同程度であった。一方、日照時間の年変動は全般的には光量子と同様であったが、光量子ほど明瞭な季節変化はみられなかった。
3. 年間を通じた光量子と日照時間との間には直線的関係( $r=0.807$ )がみられたものの、季節による相違が大きかった。しかし、月別の両者の関係

を求めると相関係数はより高くなり、日照時間からの光量子の推定はある程度可能であると思われた。

4. 日積算光量子と全天日射量の間には次式で示される強い直線関係がみられた。

$$Y (E \cdot m^{-2} \cdot day^{-1}) \\ = 0.929 + 2.084X (MJ \cdot m^{-2} \cdot day^{-1}) \\ (r=0.979)$$

5. 光量子と冬季における珪藻赤潮との関連について若干の検討を行なった。その結果、年による大きな相違はみられたものの、1987年度については、光量子が増加傾向、水温が上昇傾向の時期に塩分低下後しばらくして、珪藻類が増殖したものと推定された。

## 参 考 文 献

- 1) M. TAKAHASHI, J. BARWELL-CLARK, F. WHITNEY and P. KOELLER 1978: WINTER CONDITION OF MARINE PLANKTON POPULATIONS IN SAANICH INLET, B.C., CANADA. I. PHYTOPLANKTON AND ITS SURROUNDING ENVIRONMENT. *J. exp. mar. Biol. Ecol.*, Vol. 31, 283-301.
- 2) 福岡県有明水産試験場 1988: 昭和62年度九州海域赤潮調査報告書(西海ブロック)水産庁他, 89-97.
- 3) 稲田勝美 1984: 光と植物育成. 一光選択利用の基礎と応用一, 養賢堂. 東京.

- 4) 佐賀県有明水産試験場 1987: 昭和61年度九州海域赤潮調査報告書 (西海ブロック). 水産庁他, 79-98.
- 5) 佐賀県有明水産試験場 1988: 昭和62年度九州海域赤潮調査報告書 (西海ブロック). 水産庁他, 69-88.
- 6) W. Admiraal 1977: Influence of Light and Temperature on the Growth Rate of Estuarine Benthic Diatoms in Culture. *Marine Biology* 39, 1-9.
- 7) Charles L. Gallegos, George M. Hornberger, and Mahlon G. Kelly 1980: Photosynthesis-light relationships of a mixed culture of phytoplankton in fluctuating light. *Limnol. Oceanogr.*, 25(6), 1082-1092.
- 8) John Marra and Kristina Heinemann 1982: Photosynthesis response by phytoplankton to sunlight variability. *Limnol. Oceanogr.*, 27(6), 1141-1153.
- 9) N. S. Fisher and R. A. Cowdell 1982: Growth of Marine Planktonic Diatoms on Inorganic and Organic Nitrogen. *Marine Biology* 72, 147-155.
- 10) C. Nalewajko and K. Lee 1983: Light stimulation of phosphate uptake in marine phytoplankton. *Marine Biology* 74, 9-15.
- 11) 山本千裕・田中義興 1988: 福岡湾周辺における光量子量とその時系列変化. 福岡水試研報 14, 55-60.
- 12) 古賀秀昭 1988: 有明海における珪藻赤潮の初期発生過程. プランクトン研究集会講演要旨, 日本プランクトン学会報, 35, 2, 180-181.
- 13) 古賀秀昭 1986: 昭和59年度における植物プランクトンの出現状況とその発生予測. 佐賀有明水試報10, 89-99.
- 14) 川村嘉応・北嶋博卿・小澄千尋・山下康夫 1986: 六角川河口沖合定点における微細環境-I, 珪藻類と水温・塩分・栄養塩類との関連について. 佐賀有明水試報10, 71-88.
- 15) 佐賀県有明水産試験場 1985: 昭和59年度九州海域赤潮予察調査報告書 (西海ブロック). 水産庁他, 59-79.
- 16) 田中 豊・垂水共之・脇本和昌 1985: パソコン統計解析ハンドブック II多変量解析編, 共立出版. 東京.