

水中光量の実測値と日射量による計算値との比較

藤澤邦康・小橋啓介・林 浩志

Comparison of the measured Light Intensity by Quanta Meter in the Sea with the calculated
Photosynthetically Available Irradiance using Solar Radiation Data

Kuniyasu FUJISAWA, Keisuke KOBASHI, and Hiroshi HAYASHI

キーワード：日射量，光量子数，照度消散係数，水中光量

浅海域に生息するアマモの生育には，水中光量が制限因子となっている。アマモ場造成のための適地を判断するためには水中光量を把握する必要がある。その方法として，直接メモリー式照度計をアマモ生息水深に設置する方法があるが，多定点かつ継続した測定には，定期的なセンサーの掃除等保守管理の上からも限界がある。

石川ら¹⁾は，アマモ場造成限界水深の推定のため，日射量統計により，全天日射エネルギー中の光合成有効波長の比率，空中から水中への透入エネルギーの割合を文献値から，また，透明度と消散係数との経験的な関係から消散係数を算出し，日間水中光量を推定している¹⁾。しかし，計算で求められた水中光量がどの程度，実測値に対応しているか明らかでない。このことから，ここでは，日射計による測定値からの水中光量の推定を行い，その結果を現場海域で直接測定された水中光量との対比を行ない，その妥当性を検討した。

方 法

日射量 日射量は，図1に示した牛窓港に繋船している漁業調査船わかせとに設置した日射計センサー(Aanderaa 2770)により，毎日，10分間隔で00時00分から23時50分まで，1日計144回を測定してきた。このうち，1998年7月29日～10月9日の測定値を用いた。

水面上光量子数 日射計の近傍に光量子計(Biospherical Instrument Inc. QSP-160)を置き，'00年8月11日，9月6日，10月18日，11月13日にそれぞれ10分間隔で00時00分から23時50分まで測定した。得られた日射量と光量子数から両者の関係式を求めた。そして，この関係式より日射量を光量子数に換算し水面上の光量子数とした。

水面入射光と照度消散係数 図1の岡山県備前市の片

上湾内の定点1にて，8月～10月の間，計11回，水深，透明度(セッキ板による)及び光量子数(QSP-160)を水面上，そして，水面下0.5m層から海底直上まで0.5m間隔の光量子数を測定した資料を用いた²⁾。

現場調査で得られた光量子数鉛直分布データより水面入射光量として，水面下0.5m層光量子数/水面上の光量子数比を求め，得られた比の値を上述の水面上の光量子数に乗じて，7月29日～10月9日毎日の10分間隔の水面上0.5m層光量子数とした。

現場調査で得られた光量子数鉛直分布データより水面下0.5m層光量子数($I_{0.5}$)を基準とした海底上0.5mの照度消散係数 $k_{B-0.5}$ を下記の式³⁾より算出した。

$$k_{B-0.5} = -\text{LN}(I_{B-0.5}/I_{0.5})/Z$$

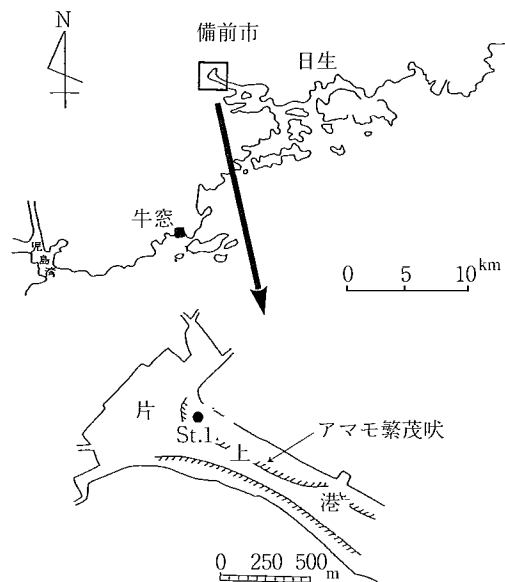


図1 片上港調査定点及び牛窓港調査船係船位置図

ここで $I_{B-0.5}$ は海底上0.5mの光量子数であり、 $I_{0.5}$ は水面下0.5m層光量子数、 z は水面下0.5mから海底上0.5mまでの水深(m)を表す。この $k_{B-0.5}$ 値は後述の海底上0.6m、0.2m層両方の光量子数計算に用いた。

片上港定点潮高 片上港の潮高の基準面、高低潮時及び高低潮高は、標準港姫路の潮汐⁴⁾より算出した。さらに下記の余弦式より1時間間隔の潮高を求めた。

$$H=L+A/2(1+\cos((t-T_n)\times\pi/B)) \quad (\text{高潮}\rightarrow\text{低潮})$$

$$H=L+A/2(1+\cos((t-T_l-B)\times\pi/B)) \quad (\text{低潮}\rightarrow\text{高潮})$$

L は低潮潮高、 A は高低潮高の差、 B は高低潮時の差、 T_l は低潮時、 T_n は高潮時、 t は任意の正時である。

そして、基本水準面を基準としたSt.1の水深0.75m²⁾を補正し、St.1での7月29日～10月9日の間の1時間毎の水深変化を求めた。

片上港定点海底上0.6m、0.2m層光量子数 計算は下記の式により計算した。

$$I_z = I_{0.5} e^{-kz}$$

なお、 z は水面下0.5mから海底上0.6mないし0.2mまでの水深(m)、 $I_{0.5}$ は水面下0.5m層光量子数、 $k_{B-0.5}$ は照度消散係数である。

以上の計算の結果、得られた1時間毎の海底上0.6m、0.2mの水層の光量数は、日単位の値に集計した。

現場水中光量子数実測 片上港St.1において、'98年7月29日～10月9日の間、海底上0.6m、0.2mの水層にメモリー照度計(アレック電子MDS-L)を設置し、10分間隔の測定を行った。得られた海底上0.6m、0.2mの水層の光量数は、日単位の値に集計した。

2種の照度計比較 光量子数照度計QSP-160とメモリー照度計MDS-Lを水槽内の同一水深に並べて設置し、得られた両者のデータを比較し、MDS-Lを補正した。

水中光量子数データによる照度消散係数 現場光量子数実測データを用いて次の式により計算した。

$$k_{B-0.6} = -\ln(I_{B-0.6}/I_{0.5})/z \quad k_{B-0.2} = -\ln(I_{B-0.2}/I_{0.5})/z$$

ここで $I_{B-0.6}$ は海底上0.6mないし $I_{B-0.2}$ は海底上0.2mの現場光量子数実測値であり、 $I_{0.5}$ は上記の水面下0.5m層光量子数、 z は上記の水中光量の計算の際に用いた値であり、水面下0.5mから海底上0.6mないし0.2mまでの水深(m)を表す。なお、 k 値は11:00、12:00、13:00の値の平均値をその日の値とした。

結果と考察

日射量 '98年7月29日～10月9日の間の牛窓における日射量の日積算値を図2に示した。7月29日～10月9日にかけて、太陽高度の低下に伴い徐々に低くなっている。また、9月下旬には低い日が続いた。月平均値でみると、8月が15.2MJ/m²、9月が10.8MJ/m²であり、理科年表(国立天文台、1997)による高松の'74～'90年平均値は(8月が18.2MJ/m²、9月が13.5MJ/m²)と比べてやや低い値であった。

日射量から水面上の光量子数への換算 まず、日射計で測定された日射量の瞬間値データと日射計の近傍に設置した光量子計で得られた光量子数との関係式を表1に示した。係数値は8月～11月にかけて徐々に上昇した。これらの係数値(A)は、各月日の係数(at)を月日(t)の一次関数 $at = At + b$ として求めた。そして、日射量瞬間値 R にこの at 値を乗じて、水面上の光量子数(I_{air})とした。

この方法で求めた水面上の光量子数は、石川ら¹⁾の計算に用いた1E/m²/day(PAR)=0.2MJ/m²/day及び全日射量のうち光合成有効放射量が42%の値を用いて試算した値と比べると2.25倍と高い値であった。この点について

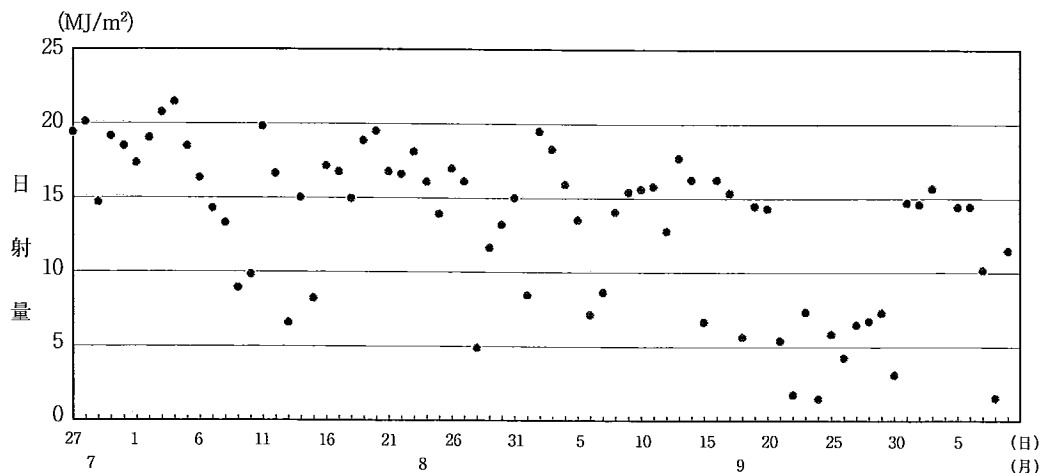


図2 牛窓港で測定された日射量日積算値の推移 (1998年7月28日～10月9日)

は、後述する光量子数照度計QSP-160はスカラー全光量子数計との測定値に1.813倍の差のあることと関係があるものと思われ、現在検討している所である。

片上港での入射光の割合 1998年の7月29日～10月9日の間、定期的に片上港St.1における光量子数測定結果を用いて、水面上から水面下0.5m層への入射光の割合を計算した。その結果は表2に示したが、7月29日、8月13日がそれぞれ0.14%、0.13%と低かったが、その他の調査日では0.23～0.27%であった。ここでは、入射光の割合は平均値の0.23%を用い、水面下0.5m層の光量子数($I_{0.5}$)を求めた。

照度消散係数と透明度 現場調査で測定した光量子数鉛直分布データを用いて照度消散係数 $k_{B-0.5}$ （海面下0.5m～海底上0.5m層）を求め、各調査日の $k_{B-0.5}$ 値を表2に示した。 $k_{B-0.5}$ 値は0.8531～1.4307の範囲にあり、8月中下旬、9月中旬に高く、8月上、下旬、9月、10月上旬に低くなっている。

表1 日射量(R)と光量子数(E)の関係式

測定日	関係式	相関係数
8月11日	$E = 0.1506R$	0.9922
9月6日	$E = 0.1554R$	0.9986
10月18日	$E = 0.1826R$	0.9793
11月13日	$E = 0.1919R$	0.9585

R : kW E : E/m²/min

表2 片上港調査定点における透明度と光量子数分布より求めた0.5m層透過光減衰率、照度消散係数

調査年月日	透明度(m)	0.5m層入射光減衰率*	照度消散係数($k_{B-0.5}$)**
'98/07/29	1.8	0.14	1.2844
'98/08/06	1.1	0.24	1.0986
'98/08/13	1.3	0.13	1.9924
'98/08/20	1.5	0.23	1.8054
'98/08/27	1.6	0.26	0.9547
'98/09/03	1.6	0.24	1.4524
'98/09/11	1.1	0.27	1.6336
'98/09/18	—	0.23	1.4388
'98/09/24	1.9	0.23	0.8531
'98/10/02	1.9	0.26	0.9030
'98/10/09	1.5	0.26	1.4307

*水面上光量/水面下0.5m層光量

**水面下0.5m～海底上0.5m層

照度消散係数と透明度との間には海域固有の負の相関関係がみられている。透明度値を照度消散係数に変換できれば広範囲の地域の水中光量を推定するために有用である。片上港の照度消散係数 $k_{B-0.5}$ と透明度 T_t の場合、これらの両対数グラフを図3に示したが、両者の間には、透明度が1mと低い値を除くと、 $LN(k_{B-0.5}) = -2.3996 LN(T_t) + 1.4138$ の関係式が得られ、相関係数は $r = 0.7630$ であった。片上港では透明度が1m前後と非常に低くなると照度消散係数と透明度の対応関係が悪くなること分かった。透明度が極端に悪い現象は表層付近でのプランクトンの増殖によるものと考え、データを積み重ねてさらなる検討を行う必要である。

片上港定点の潮高変化 片上港St.1での1998年7月29日～10月9日の1時間間隔の潮高変化は図4に示した。潮高変化による水深は、大潮時期1.0～2.7m、小潮時期1.5～2.3mの間で変化し、大潮時期と小潮時期では約1m程度の差がみられた。

メモリー照度計の補正 光量子数照度計QSP-160はスカラー全光量子数計であり、全光量子数を測定しており、実測で用いたメモリー照度計MDS-Lは下方向光量子数を測定している。QSP-160とMDS-Lで得られた両者のデータ間には、 $QSP = 1.813MDS$ の関係式（QSP-160で0～819 μ E/m²/secのデータ）が得られた。このことから、片上港St.1でのMDS-Lによる実測値は1.813を乗じて補正した。

水中光量の計算値と実測値の比較 図5には、1998年

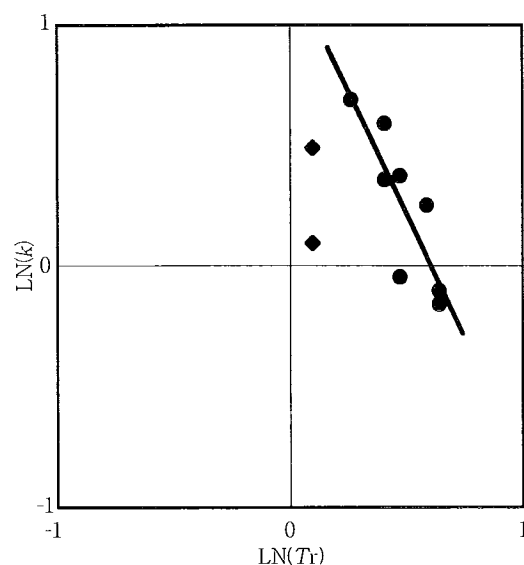


図3 透明度(T_t)と照度消散係数(k)の関係

(LN: 自然対数 回帰直線: 透明度1mの値
回帰直線: 透明度1mの値(◆)は除いて計算)

7月29日～10月9日の計算値とメモリー照度計補正值を示した。計算値の海底上0.6mと海底上0.2mの日変化は、同一データを用いていることから同じ変化を示している。また、実測値の海底上0.6mと海底上0.2mの日変化は、測定場所が同じであることから、値の大小はあるが同様な変化を示している。

実測値と計算値の比較では、個々の日でみると差がみ

られた。期間中の平均値では、海底上0.6mの実測値が $8.02\text{E}/\text{m}^2/\text{day}$ 、計算値が $7.27\text{E}/\text{m}^2/\text{day}$ であり、海底上0.2mは実測値 $4.11\text{E}/\text{m}^2/\text{day}$ 、計算値が $4.21\text{E}/\text{m}^2/\text{day}$ であり、計算値はほぼ同程度の値となった。また、実測値及び計算値は共に半月間隔で高低値が交互にみられ、潮汐変化と対比してみると、大潮時に高く、小潮時に低くなっている。

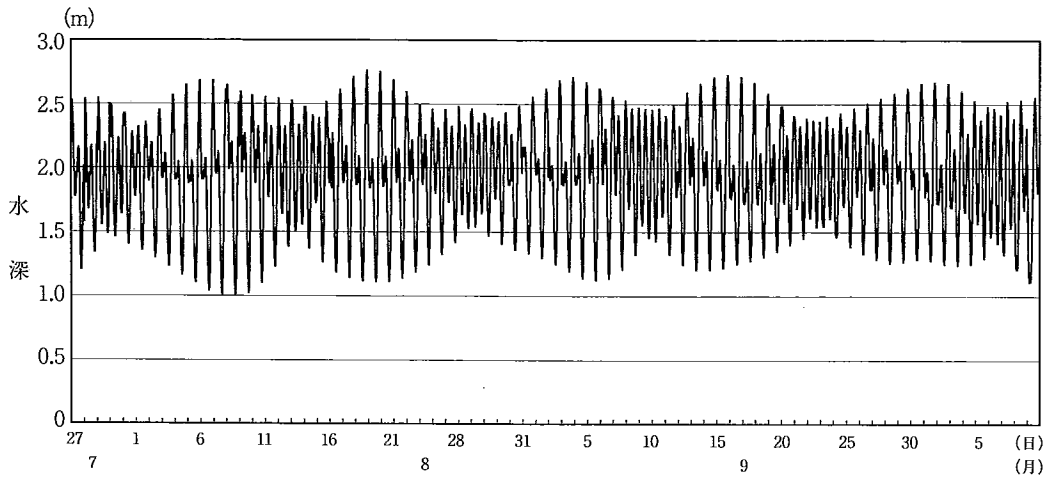


図4 片上港St.1における潮高変化 (1998年7月27日～10月9日)

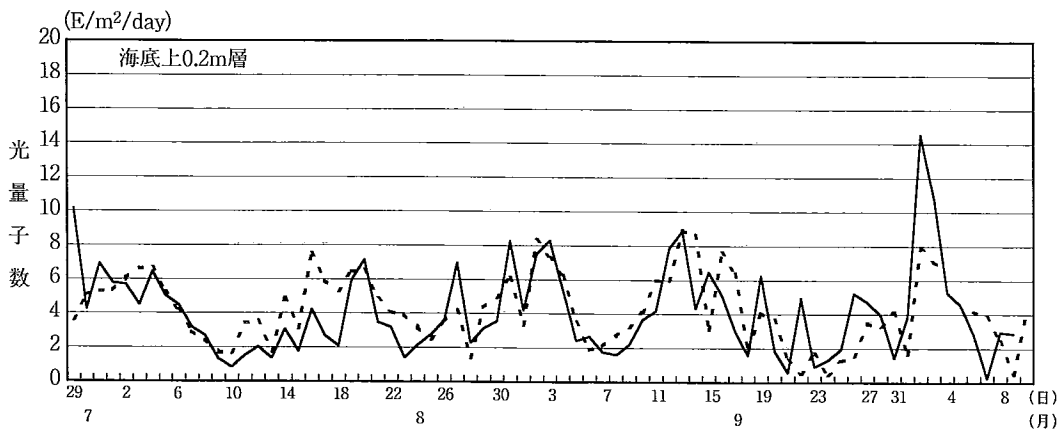
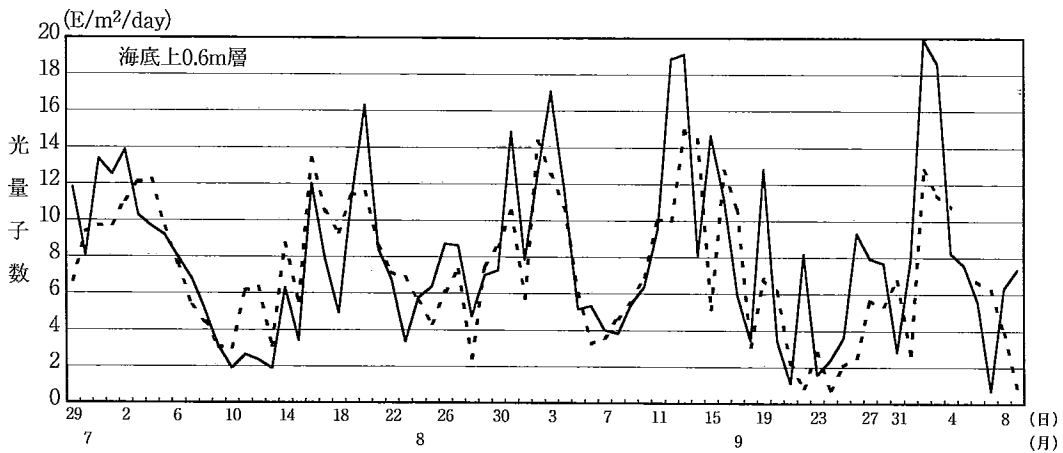


図5 片上港St.1の海底上0.6m層と0.2m層における光子数の推移 (実測値：—，計算値：…)

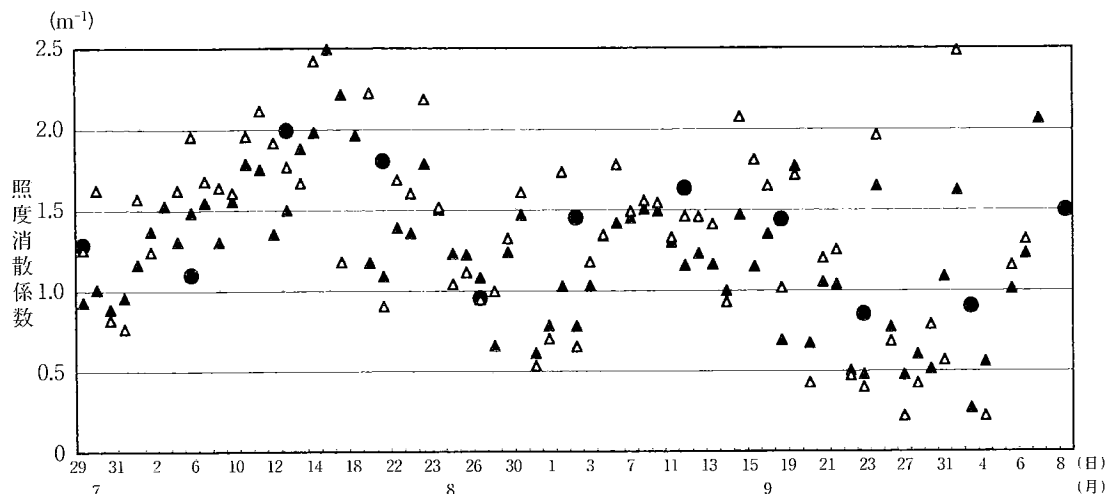


図6 片上港St.1の海底上0.6m層と0.2m層に設置したメモリー照度計データを用いて計算した照度消散係数(0.6m:△, 0.2m:▲)及び現場調査における光量子数鉛直分布データを用いて計算した照度消散係数(●)の推移

以上結果より計算値は実測値に代わりうるものといえるが、個々のデータ間についてさらに詳細な検討の必要がある。

水中光量子数データによる照度消散係数 海底上0.6m及び0.2mでのメモリー照度計データから求めた照度消散係数計算値 $k_{B,0.6}$ 、 $k_{B,0.2}$ と現場調査における光量子数鉛直分布データから求めた照度消散係数 $k_{B,0.5}$ を図6に示した。 $k_{B,0.6}$ 値は $k_{B,0.2}$ 値よりやや高めであり。 $k_{B,0.6}$ 値、 $k_{B,0.2}$ 値ともに変動が大きく、8月中旬、9月中旬～10月の変動はさらに大きい。全体的にみると、 $k_{B,0.6}$ 値、 $k_{B,0.2}$ 値は、8月中旬にかけて高くなり、その後8月末に低くなっている。そして、9月中旬に再び高くなっており、そして9月下旬に低くなり、その後、再々度高くなっている。 $k_{B,0.5}$ 値は、 $k_{B,0.6}$ 値、 $k_{B,0.2}$ 値とほぼ同様な推移を示しており、その値も同程度である。このことが水中光量の計算値と実測値がほぼ同程度の値になったものといえる。

$k_{B,0.6}$ 値、 $k_{B,0.2}$ 値の大きな変動要因については今後の検討課題であり、照度消散係数に影響を与える濁度が短期に大きく変動している可能性もあり、この点についても明らかにしてゆくつもりである。

要 約

1. 日射量は日射計センサー(Aanderaa 2770)により牛窓港で測定された1998年7月29日～10月9日のデータを用いた。この間、日積算値は太陽高度の低下に伴い低くなっている。月平均値でみると、8月が $15.2\text{MJ}/\text{m}^2$ 、9月が $10.8\text{MJ}/\text{m}^2$ であった。

2. 日射計で測定された日射量の瞬間値データと日射計の近傍に設置した光量子数照度計QSP-160で得られた光量子数との関係式より水面上の光量子数への換算した。係数値は8月～11月にかけて徐々に上昇した。

3. 岡山県備前市の片上湾内のSt.1において、'98年7月29日～10月9日の間、計11回、光量子数(QSP-160)を水面上、そして、水面下0.5m層から海底直上まで0.5m間隔の光量子数を測定した。このデータを用いて、次の計算を行った。

水面上から水面下0.5m層への入射光の割合は0.14～0.27%、平均値0.23%であり、この値を計算に用いた。照度消散係数 $k_{B,0.5}$ (海面下0.5m～海底上0.5m層)は、0.8531～1.4307の範囲にあった。

照度消散係数と透明(T_r)度との間には透明度が1mと低い値を除くと、 $\text{LN}(k_{B,0.5}) = -2.3996 \text{LN}(T_r) + 1.4138$ の関係式が得られ、相関係数は $r=0.7630$ であった。

4. 片上港St.1の'98年7月29日～10月9日の1時間間隔の潮高を潮汐表より求めた。潮高変化による水深は、大潮時期1.0～2.7m、小潮時期1.5～2.3mの間で変化し、大潮時期と小潮時期では約1m程度の差がみられた。

5. 光量子数照度計QSP-160とメモリー照度計MDS-Lで得られた両者のデータ間には、 $QSP = 1.813MDS$ の関係式が得られた。

6. 水中光量の計算値と実測値の対比を行った。計算値の海底上0.6mと海底上0.2mの'98年7月29日～10月9日の日変化は、同じ変化を示した。また、実測値の海底上0.6mと海底上0.2mの日変化もほぼ同様な変化を

示している。実測値と計算値の比較では、個々の日で見ると差がみられた。期間中の平均値では、海底上0.6mの実測値が $8.02\text{E}/\text{m}^2/\text{day}$ 、計算値が $7.27\text{E}/\text{m}^2/\text{day}$ であり、海底上0.2mは実測値 $4.11\text{E}/\text{m}^2/\text{day}$ 、計算値が $4.21\text{E}/\text{m}^2/\text{day}$ であった。また、実測値及び計算値は、大潮時に高く、小潮時に低くなっている。

7. メモリー照度計データによる海底上0.6m及び0.2mでの照度消散係数計算値の $k_{B-0.6}$ 、 $k_{B-0.2}$ を求めた。 $k_{B-0.6}$ 値は $k_{B-0.2}$ 値よりやや高めであった。 $k_{B-0.6}$ 値、 $k_{B-0.2}$ 値はともに変動が大きく、8月中旬、9月中旬～10月の変動は特に大きかった。全体的にみると、 $k_{B-0.6}$ 値、 $k_{B-0.2}$ 値は、8月中旬にかけて高くなり、その後8月末に低くなっている。そして、9月中旬に再び高くなっており、そして9月下旬に低くなり、その後、再々度高くなっている。 $k_{B-0.5}$ 値もほぼ同様な推移を示しており、その値

も $k_{B-0.6}$ 値、 $k_{B-0.2}$ 値と同程度であった。

文 献

- 1) 石川雄介・川崎安夫・本田正樹・丸山康樹・五十嵐由雄, 1988: 電源立地点の藻場造成技術の開発, 第9報水中の光条件に基づくアマモ場造成限界深度の推定手法, 電力中央研究所報告, 20pp.
- 2) 浅海域緑化技術の開発グループ, 1999: 平成10年度浅海域緑化技術の開発に関する報告書, 社団法人マリノフォーラム 21, 沿岸漁場造成技術研究会, 202pp.
- 3) 杉浦康宏・坂本 亘, 1985: 海洋環境光学, 東海大学出版会, 356pp.
- 4) 海上保安庁水路部, 1998: 平成10年潮汐表, 第1巻, 海上保安庁, 454pp.