

瀬戸内海における太陽エネルギーの 季節変動と水体内の分布

遠藤拓郎・松田 治・今林博道
(広島大学生物生産学部)

1983年10月15日受理

Seasonal variation of solar radiation and underwater irradiance in the Seto Inland Sea

Takuo ENDO, Osamu MATSUDA and Hiromichi IMABAYASHI

Faculty of Applied Biological Science, Hiroshima University, Fukuyama

内湾の富栄養化は近年になって著しく進行しており、また、これにともなって植物プランクトンによる赤潮が発生している。一般に、内湾の富栄養化・有機汚染の進行は、赤潮の発生をみないまでも植物プランクトンを増加させ、また、粒子状懸濁物・溶存態有機物が増えて、水中の透明度を著しく低下させている。その結果として、水体内への太陽エネルギー、すなわち光の透入は大きく減少していると推測される。

透入する太陽エネルギーの減少、すなわち海表面と海中での光の減衰は、水体内に生息する植物プランクトンや大型海藻類の垂直分布と量、また種類組成に大きな影響を与え、総じて生態系も従来とは異なってきたと考えられる。ただ、これら植物生産の基になる太陽エネルギーの水体内への透入の様相については Jerlov (1968) の総述その他はあるが、富栄養化海域についての資料が十分に蓄積されているとはいえない。

本研究では、瀬戸内海のおよそ中央に位置する定点(福山市鞆町仙酔島)で、全短波放射量、散乱放射量および光合成有効放射量を3ヶ年にわたって連続して測定した。ここでの全短波放射量の測定値は月平均で1日に17.5~6.4 MJ・m⁻²の範囲にあって季節変化し、冬季に小さく、夏季に大きかった。ただ、6月の梅雨期の値は前後の月に比べてやや低い。

一方、その前面にある小さな湾で、水面反射量と水中日射量の測定を20数回にわたって行った。また、瀬戸内海の数点で水中照度の減衰状況を測定した。瀬戸内海は伊予灘のように比較的透明度のよい海から広島湾のように悪い海域と変化の幅は大きい。いま、瀬戸内海の植物プランクトン生産を全短波放射量と比較すると、生産量は放射量の0.1%程度に相当するにすぎず、著しく小さかった。

方 法

日射量の観測地点は、広島県福山市鞆町の仙酔島にある広島大学生物生産学部の附属水産実験所(34°22'N, 133°24'E)である。

各種放射量の測定方法は、日射エネルギー観測資料No.3(1982)および内嶋・桜谷・奥山(1981)に報告されているものと同様であるが、水中日射・水面反射を測定するために一部を改変している。すなわち、全体のブロックダイアグラムを示すとFig.1になる。全体の機能としては、305(305nm以上を透過するフィルターを付けたMS-800型日射計、英弘精機産業株式会社製、なお赤外放射はカットされている)

は、バッファアンプを介し瞬時値を記録計とアナログ積算演算器に送り、これらの出力を記録する。すなわち全短波放射量である。**395** (395 nm 以上を透過するフィルターを付けたMS-800 型日射計)と**715** (715 nm 以上を透過するフィルターを付けたMS-800 型日射計)は各々バッファアンプを介した後それらの差を取る。つまり、光合成有効放射量の瞬時値を記録計とアナログ積算器に送り、これらの出力を記録する。なお、これらの出力は各々10 mVのバイアスをかけ極性を逆転し、記録計の10mV側より左の方向に記録する。また、**305** (305 nm 以上を透過するフィルターを付けたMS-800 型日射計)には遮蔽バンド(散乱光測定用のリング)で、直達光を遮蔽して散乱光のみを測定する。なお、赤緯を調節できるようになっている)をかけてあり、またバンドによる影の補正を手動設定する散乱光補正用増幅器が入っている。**MR-30** (下向きに設置する)はリフレクトメーターで反射日射量測定用日射計(MS-800 型)で、ここでは水面反射量を測定し、瞬時値と積算値を記録計の10mV側より左の方向に記録する。**MS-61** は水中日射量を測定する目的のもの(MS-61 型、耐水・耐圧処理をしてある。白・黒両板の温度差を熱電対を用い測定する日射計)で、瞬時値を記録する。なお、記録計は電子式、12打点方式のER-180 (横河電気製)である。

これらのうち、全短波放射量(**305**)、光合成有効放射量(**395**と**715**)、散乱放射量(遮蔽バンドを付けた**305**)の測器は実験所の屋上に設置した(Fig. 2)。一方、水面反射量(**MR-30**)と水中日射量(**MS-61**)の測器は、Fig. 3に示した筏の上方から吊りして、それぞれ水面上50cmと水面下50cmになる様にし、筏の四方にブイを付けて実験所前面の海上に浮かべた(Fig. 2)。なお、この筏を常時設置しておくことは漁業の作業上からも難しく、また筏は風波に対しての耐久性も弱いので、測定時の1~3日のみ海に出した。

一方、水中光量子計(ライカー社、LI-192SBとLI-188B)を用いて、光量子の鉛直方向(下方向照度)の減衰状況を測定した。また、広島大学の練習船「豊潮丸」(320トン)の海洋調査の際に、瀬戸内海各海域で水中光量子の鉛直分布を測定した。

また、水中分光放射照度計(Spectroradiometer, Biospherical Instruments Inc. MER-1000)を用い、410~694 nmの各波長別(12波長)照度とその積分値を、瀬戸内海各域で深度ごとに測定した。

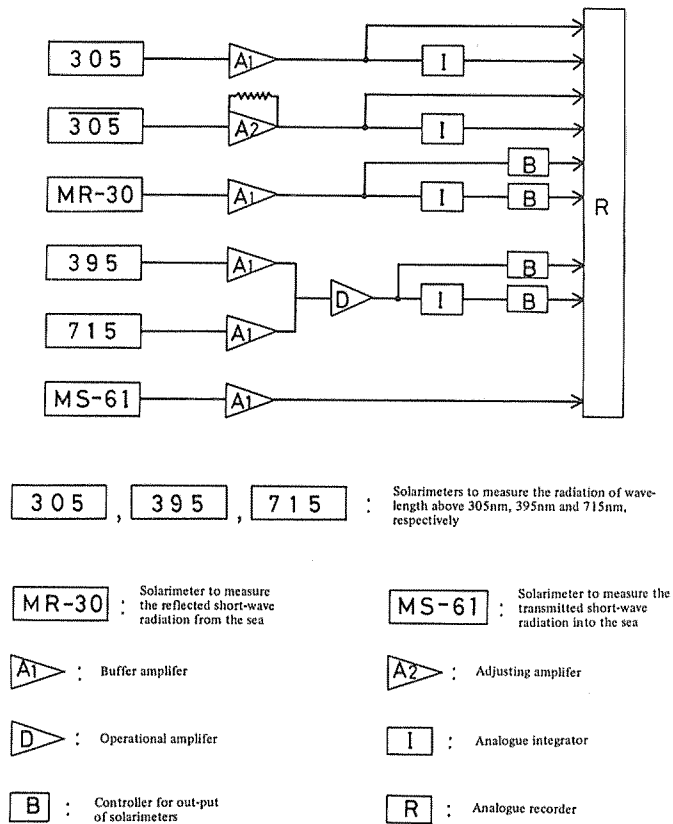


Fig. 1. Block diagram of measuring system of solar radiation.

結果および考察

1. 日射量

全短波放射量

全短波放射量（波長 305 nm 以上、 $Q+S$ で表す）の季節変化は、年によって異なるが、月ごとの平均値（日量）でみると、Fig. 4 に示したようになる（Table . 1）。全体の傾向としては 4 月から 5 月には増大する。6 月にやや減少しているが、これは梅雨にともなう雨天・曇天が多いことによるものである（中国地方では梅雨期は平年 6 月 7 日～7 月 18 日）。次いで、7 月には年間の最高値を示し、1981・1982 年の平均では日量 $17.0 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ （ $400 \text{ cal} \cdot \text{cm}^{-2}$ ）であった。その後は月を追って減少していき、冬の 11 月～1 月に最も低く、これらの月は 3 ケ年（1980～1982 年度）平均でともに 1 日当たり $7.4 \sim 7.5 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ （ $173 \sim 175 \text{ cal} \cdot \text{cm}^{-2}$ ）となった。2 月以降は増大していく。なお、1980 年の 6～8 月の値が他の年に比べて低いが、この年の夏は雨が多くまた曇天日が多く、冷夏であったことによっている。また、これは直達放射量（ $Q-RAD$ ）が他の年よりも著しく低かった（Fig. 5, $3.8 \sim 5.2 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ ）ことにも表われている。

上に述べた最大・最小の値を、内嶋らの関東地方南部（観音台と西ヶ原）の値（ $7 \sim 17 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ ）と比較すると最大値、最小値ともほぼ同程度である。

直達放射量・散乱放射量

直達放射量（全短波放射量と散乱放射量との差、 $Q-RAD$ ）は、Fig. 5 に示したように、全短波放射量と同様の季節変化をした。すなわち、月平均の日量は 5・7 月に大きく、最大は 7 月で、2 ケ年の平均（1980 年をのぞく）が $9.3 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$

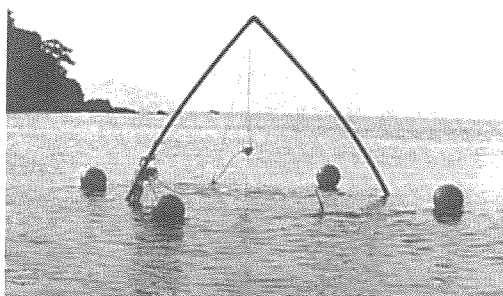


Fig. 2. Situation of solarimeters for measuring the solar radiation at Sensui Island of the Seto Inland Sea.

であった。一方、11～2 月に小さく、最低は 12・1 月で 3 ケ年の平均が $4.1 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ であった。

散乱放射量（遮蔽リングを用いて測定、 $S-RAD$ ）は、Fig. 6 に示したように、月平均値は 6 月に大きく、1 月に小さいという季節変化をし、全短波・直達放射量の変化とはやや異なった。全短波放射量との比（散乱放射量／全短波放射量の月平均値）をみると、Fig. 7 に示したように、 $39 \sim 62\%$ の狭い範囲にあり、全体の総平均は 49% となった。ただ、この比の日々の値をみると、晴天・曇天また雲の厚さによって大きく変り、 10% （晴天日）から 100% （雨天日）の間を変化する。

光合成有効放射量

光合成有効放射量（波長 $395 \sim 715 \text{ nm}$ 、PARQS）の月平均の日量は、Fig. 4 に示したように、全短

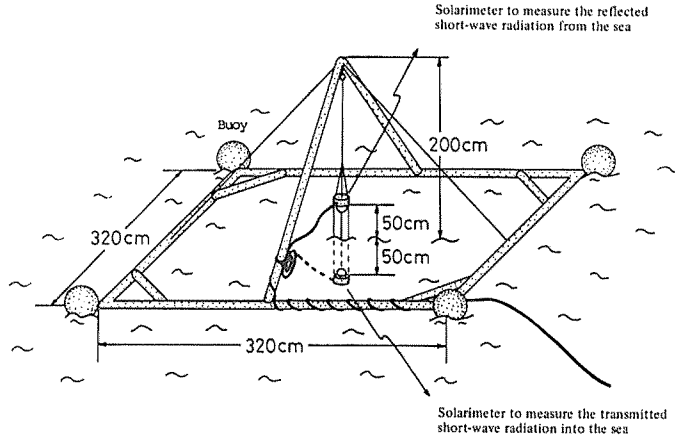


Fig. 3. Raft for measuring the reflected short-wave radiation from the sea and the transmitted short-wave radiation into the sea at Sensui Island.

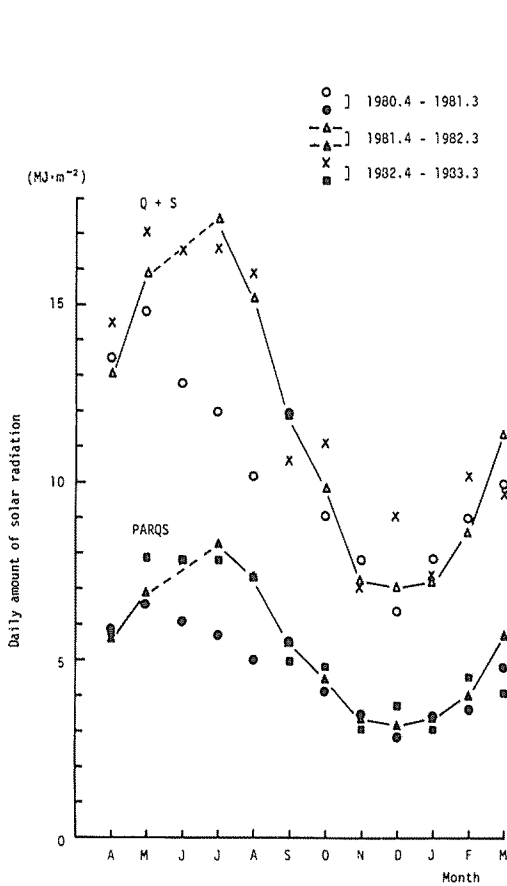


Fig. 4. Monthly changes in daily amount of the total short-wave radiation (Q+S) and that of the photosynthetically active radiation (PARQS) at Sensui Island.

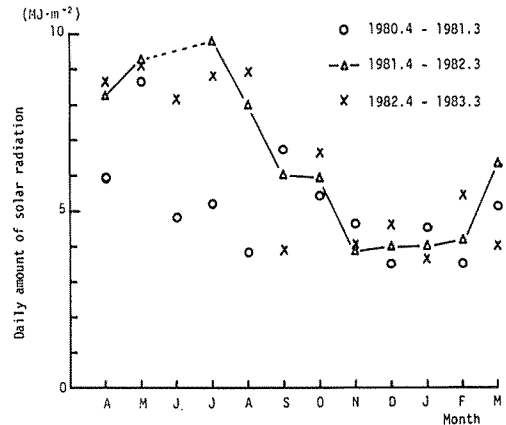


Fig. 5. Monthly change in daily amount of the direct short-wave radiation (Q-RAD) at Sensui Island.

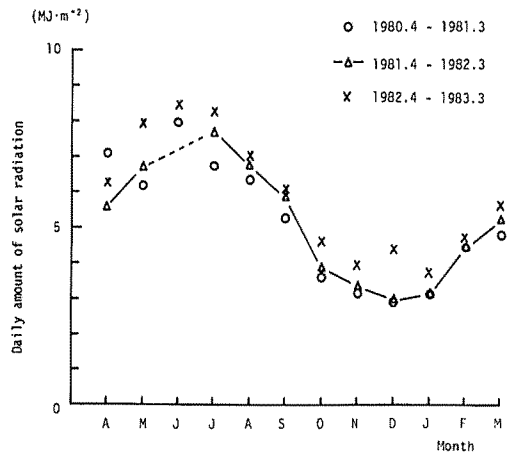


Fig. 6. Monthly change in daily amount of the diffused short-wave radiation (S-RAD) at Sensui Island.

Table 1. Monthly variation in daily amount means ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$) of solar radiation components at Sensui Island in 1980-1983

	Apr.	May	June	July	Aug.	Sept.	Oct.	Nov.	Dec.	Jan.	Feb.	Mar.
Q+S												
1980.4-1981.3	13.49	14.82	12.77*	11.98*	10.16*	11.97	9.02	7.82	6.38	7.68	7.95	9.91
1981.4-1982.3	13.06	15.91	-	17.48	15.20	11.87	9.83	7.23	7.06	7.21	8.63	11.34
1982.4-1983.3	14.54	17.07	16.58	(16.58)	(15.92)	10.63	11.14	7.06	9.05	(7.41)	10.18	9.62
Mean	13.70	15.93	16.58	17.03	15.56	11.49	10.00	7.37	7.50	7.43	8.92	10.29
Q-RAD												
1980.4-1981.3	(5.92)	8.65	4.84	5.18	3.84	6.73	5.42	4.65	3.48	4.54	3.49	5.13
1981.4-1982.3	8.25	9.30	-	9.79	8.01	6.01	5.96	3.91	4.02	4.06	4.22	6.40
1982.4-1983.3	8.66	9.09	8.15	(8.82)	(8.93)	3.91	6.67	4.06	4.65	(3.69)	5.47	4.00
S-RAD												
1980.4-1981.3	(7.07)	6.18	7.93	6.79	6.32	5.25	3.60	3.17	2.90	3.14	4.46	4.77
1981.4-1982.3	5.58	6.70	-	7.70	6.79	5.87	3.88	3.33	2.99	3.15	4.40	5.23
1982.4-1983.3	6.29	7.94	8.44	(8.25)	(7.02)	6.09	4.60	3.94	4.40	(3.73)	4.72	5.62
PARQS												
1980.4-1981.3	5.89	6.53	6.05*	5.72*	5.02*	5.55	4.12	3.47	2.86	3.42	3.61	4.89
1981.4-1982.3	5.60	6.90	-	8.29	7.33	5.55	4.46	3.30	3.18	3.34	4.03	5.72
1982.4-1983.3	5.74	7.91	7.81	(7.83)	(7.35)	4.97	4.83	3.08	3.74	(3.04)	4.53	4.06
Mean	5.74	7.11	7.81	8.06	7.34	5.36	4.47	3.28	3.26	3.27	4.06	4.89

(Note) Q+S ; total short-wave radiation
 Q-RAD ; direct short-wave radiation
 S-RAD ; diffused short-wave radiation
 PARQS ; photosynthetically active radiation
 () ; lacks of measurement for 5 - 14 days
 * ; mean excluded June - August, 1980, respectively

波放射量と同様に季節変化した。すなわち、4月から7月にかけて増大し、最大は7月の平均量 $7.3 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ ($171 \text{ cal}\cdot\text{cm}^{-2}$)であった。その後は減少して、12月には最小となり、 $3.3 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ ($77 \text{ cal}\cdot\text{cm}^{-2}$)である。なお、全短波放射量と同様に1980年6～8月の値は低かった。

これらのうち夏季の値は、内嶋らの関東地方南部(6月に最大の $9 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$)と比較すると、ここでの値はやや小さい。

光合成有効放射量の全短波放射量に対する比 ($\text{PARQS}/(\text{Q+S})$)は、Fig. 8にみるように、41～50%の範囲にあり、全体の総平均は46%となった。この総平均値は関東南部(47と48%)とほぼ同程度である。

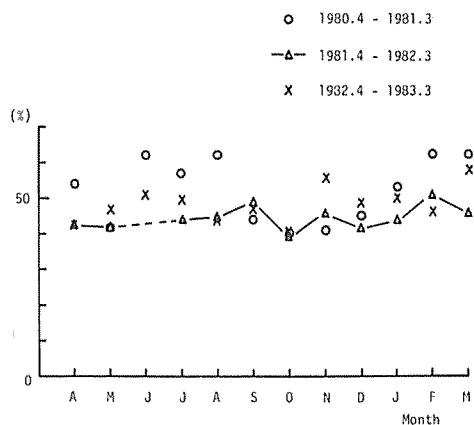


Fig. 7. Monthly change in ratio of the diffused short-wave radiation to the total short-wave radiation at Sensui Island.

2. 水中日射量および海中照度

水面反射量

水面反射量（海面上50cmで測定， R ）は，放射量・太陽高度・海面の状態（波の有無）などによって大きく変化する。

いま，水面反射量の全短波放射量に対する比（ $R/(Q+S)$ ，反射率 Albedo）を太陽高度についてみると，Fig. 9 となる。すなわち，太陽高度の高い12時前後には反射率は小さく，太陽高度が低くなると反射率は増大する。また，太陽高度が比較的高く推移する8月2日に全般に小さく，一方低く推移する12月17・18日には大きかった（両測定とも晴天）。ちなみに，晴天日のなめらかな水面での反射は，Jerlov（1968）によると次のようになる（なお，この値は Sverdrup *et al.*（1955）とやや異なる）。

高度（°）	90	60	50	40	30	20	10	5
反射率（%）	3	3	3	4	6	12	27	42

8月は上記の表の値（Fig. 9に破線で示した）とほぼ一致する。しかし，12月の値は太陽高度の低い（鞆町での冬至の太陽南中時高度 $57^{\circ}49'$ ）ことを考慮しても表より大きくなった。この理由は海表面の性状や海中濁度が大きいことなどによると考えられるが，明らかでない。

1日の積算値（日量）で反射率（ $R/(Q+S)$ ）をみると，Table. 2に示したように，夏季や晴天では小さくて最小が2.9%，冬季や曇天では大きくて最大が10%，総平均は5.8%となった。

なお，Jerlov（1968）によると晴天で波のない時の反射率は最も大きく6.6%，曇天で波のある時は最も小さくて4.3～4.7%としている。また，Sverdrup *et al.*（1955）によると完全な曇天で反射率は8%という。ともあれ，理論値や測定値，また気象・海象条件によって反射率は異なるが，ここでの測定値は大きくみてそれからかけ離れてはいないと考える。

水中日射量

水中日射量（海面下50cmで測定， I ）は，当然のことながら，太陽高度・全短波放射量・海表面の状況・海水の濁りの質と量などによって大きく変化する。1例として，1981年8月2日に観測したものを，Fig. 10 にあげた。ここで水中日射量は30分間当り0～0.41 MJ・m⁻²の範囲で変化し，全短波放射量に対する比（ $I/(Q+S)$ ）は0～29%（大部分が20%台）であった。なお，この日の正午に水中光量子計で測定した消衰係数は0.7（m⁻¹）（すなわち，0.5mでは表面光の70%に減衰）であった。

いま，8月2日の例（Fig. 10）で12時～12時30分の値について試算してみると，次の様になる。

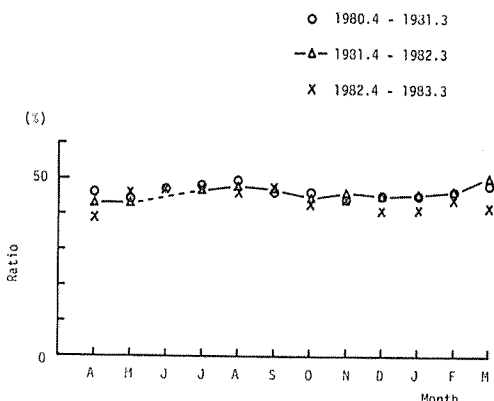


Fig. 8. Monthly change in ratio of the photosynthetically active radiation to the total short-wave radiation at Sensui Island.

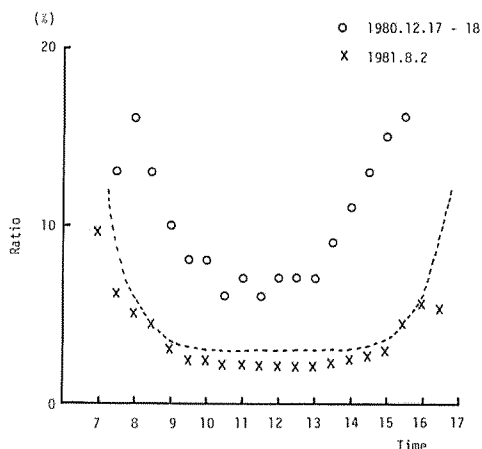


Fig. 9. Diurnal change in ratio of the reflected short-wave radiation from the sea to the total short-wave radiation, observed in clear skies at Sensui Island. Broken line is based on the reflection coefficient of Jerlov (1968).

全短波放射量 (Q + S)	1.42 MJ/m ² /30 min	100 %
水面反射量 (R)	0.03 MJ/m ² /30 min	2.1 %
水中への透入量	1.39 MJ/m ² /30 min	100 %
水中日射量 (I)	0.38 MJ/m ² /30 min	27 %
	(I / (Q + S) =	27 %)

Table 2. Monthly variation in daily amount (MJ·m⁻²) of solar radiation components at Sensui Island in 1980-1983

	Month	Date	Q + S	Q	Q/(Q+S)	S	S/(Q+S)	PARQS	PAR/(Q+S)	R	R/(Q+S)	I	I/(Q+S)	I/PAR	
(1980)	5	29	18.01	8.63	0.479	9.38	0.521	8.35	0.464	1.57	0.087	4.19	0.233	0.499	
	7	15	18.82	10.78	0.573	8.04	0.427	8.66	0.460	0.96	0.051	3.99	0.212	0.461	
		16	13.93	8.36	0.600	5.57	0.400	6.53	0.499	0.56	0.040	3.77	0.270	0.542	
	8	8	4.24	0.14	0.032	4.11	0.968	2.45	0.577	0.42	0.099	1.35	0.319	0.553	
	9	25-26	3.85	0.00	0.000	3.85	1.000	2.06	0.536	0.36	0.093	1.07	0.279	0.521	
	10	28-29	12.15	8.65	0.711	3.51	0.289	4.89	0.402	0.75	0.062	3.17	0.261	0.648	
	11	28-29	5.36	3.12	0.582	2.24	0.418	2.49	0.460	0.44	0.083	1.48	0.276	0.599	
	12	17-19	8.10	5.36	0.662	2.74	0.338	3.50	0.432	0.74	0.091	2.10	0.259	0.601	
	(1981)	2	9-10	6.70	2.56	0.382	4.15	0.618	2.90	0.433	0.50	0.075	2.05	0.306	0.708
		3	13-14	4.89	0.34	0.070	4.54	0.930	2.44	0.500	0.35	0.074	1.52	0.311	0.623
		5	7-8	21.86	16.70	0.764	5.16	0.236	9.88	0.452	1.06	0.048	7.10	0.325	0.719
			8-9	20.20	12.99	0.643	7.21	0.357	9.16	0.453	0.98	0.049	6.19	0.306	0.676
7		29	18.75	10.71	0.571	8.04	0.429	8.87	0.473	0.76	0.041	6.12	0.326	0.690	
		30	19.57	13.85	0.708	5.72	0.292	9.03	0.461	0.70	0.036	6.75	0.345	0.748	
		31	11.10	3.24	0.292	7.86	0.708	5.73	0.516	0.54	0.049	3.50	0.315	0.611	
8		1	20.12	13.83	0.687	6.29	0.313	9.60	0.477	0.76	0.038	5.96	0.296	0.621	
		2	22.26	18.91	0.850	3.35	0.150	10.52	0.473	0.90	0.040	5.44	0.244	0.517	
9		24-25	4.38	0.02	0.005	4.36	0.995	2.23	0.509	0.19	0.043	1.02	0.233	0.457	
		10	28	10.34	6.62	0.640	3.72	0.360	4.84	0.468	0.46	0.044	3.14	0.304	0.649
29			6.77	2.70	0.399	4.07	0.601	3.05	0.451	0.36	0.053	2.19	0.323	0.718	
12	8	5.71	3.07	0.538	2.64	0.462	2.67	0.468	0.28	0.049	1.36	0.238	0.509		
	9	7.00	4.11	0.587	2.89	0.413	3.20	0.457	0.48	0.069	1.63	0.233	0.509		
(1982)	2	8	7.56	2.87	0.380	4.69	0.620	3.45	0.456	0.45	0.060	2.16	0.286	0.626	
		9	11.88	7.16	0.603	4.72	0.397	5.17	0.435	0.73	0.061	3.31	0.279	0.640	
	4	18-19	17.21	9.91	0.576	7.30	0.424	8.19	0.476	0.92	0.053	4.23	0.246	0.516	
	7	22	17.44	8.37	0.480	9.07	0.520	8.66	0.497	0.80	0.046	4.38	0.251	0.506	
	10	7-8	11.52	8.86	0.769	2.66	0.231	4.88	0.424	0.33	0.029	1.17	0.102	0.240	
	10	27-28	10.62	6.78	0.638	3.84	0.362	4.33	0.408	0.31	0.029	1.30	0.122	0.300	
	11	30	12.25	7.68	0.627	4.57	0.373	5.50	0.449	1.01	0.082	2.13	0.174	0.387	

(Note) Q + S ; total short-wave radiation
 Q ; direct short-wave radiation
 S ; diffused short-wave radiation
 PARQS ; photosynthetically active radiation (PAR) in Q+S
 R ; reflected short-wave radiation from the sea
 I ; transmitted short-wave radiation into the sea

このように、光の透入量（全短波放射量－水面反射量）に対して水中日射量の値は著しく小さく、海の表面と表層において著しい減少がみられた（Strickland 1958 のいう Surface loss など）。これは表層の懸濁粒子や着色など（溶存有機物 yellow substance による）に起因するものであり、また表層で赤色光が吸収されるなど波長組成が変化することによる。なお、水中光量子計で測定した 0～0.5 m の減衰は 30%，一方、水中日射計のそれは 73% になったが、これは測定波長の差などによるものと考えられる。

何れにせよ、日量についてみると Table. 2 に示したように、測定日によって異なり、全短波放射量の 10～35% と変化し、総平均は 26.5% となった。なお、波長組成が似ていると考えられる光合成有効放射量（395～715nm）との比（I/PAR）をみたが、24～75%（Table. 2）と値は大きくなるものの、変化の幅は小さくならなかった。

また、水中濁度計（東邦電探、FN-3B型）で測定した濁度と、水中日射計で測定した消衰係数（ K^* ）を比較してみると、Fig. 11 になる。すなわち、濁度が大きくなると K は大きくなる傾向がみられる。なを、濁度 0 ppm のときの $K = 2.2$ は、古川・須藤（1980）や Jerlov（1968）のいう yellow substance に主として相当すると考えられる。*

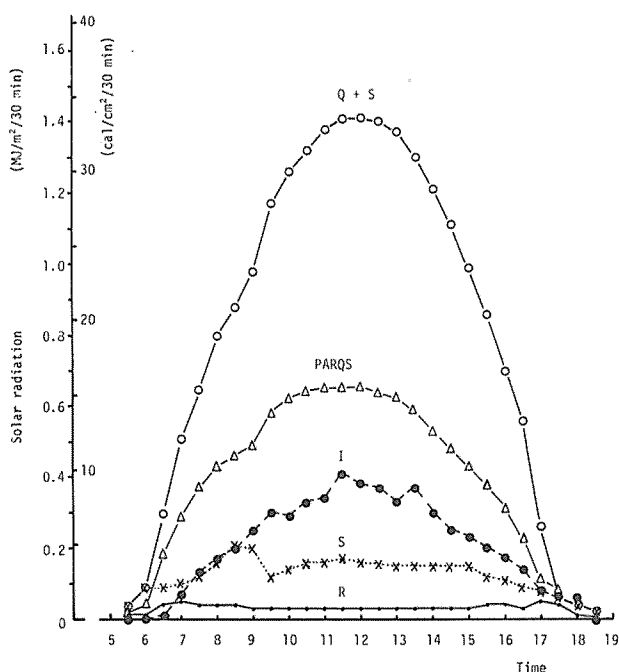


Fig. 10. Diurnal change in the solar radiation components at Sensui Island on August 2, 1981. Q+S; total short-wave radiation, S; diffused short-wave radiation, PARQS; photosynthetically active radiation, R; reflected short-wave radiation from the sea, I; transmitted short-wave radiation into the sea.

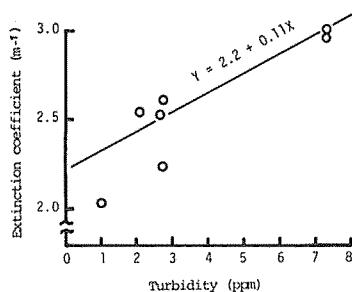


Fig. 11. Relationship between turbidity and extinction coefficient at Sensui Island.

* 全短波放射量（ $Q+S$ ）から水面反射量（ R ）を引いた光の透入量に対する水中日射量（ I ）の減衰、 $K = 2.3 \times \log \{ (Q+S-R) - I \} \div 0.5$

** $C = C_w + bp + ap + ay$

C : 全消散係数, C_w : 水の消散係数で一定、ただし小さい, bp : 粒子の散乱係数, ap : 粒子の吸収係数, ay : yellow substance の吸収係数

なお、水中濁度計は人工光（タングステンランプ）で水平方向に測定し、日射計は太陽光を垂直方向で測定しており、一義的には意味が異なる。

水中照度・水中光量子の鉛直分布

水中照度（石川産業，IU-2C水中照度計）の鉛直方向の減衰状態は，Fig. 12 に示した。ここでの消衰係数 K (m^{-1}) は 0.53～0.70 である。

また，水中光量子（ライカー社，192 SB水中光量子計）の消衰係数 K は，Fig. 13 にみるように 0.37～0.52 であった。

照度計で測定した値と，光量子計で測定した値を比較すると，照度計からの値が大きい，これは測定日が異なり，水質が違っていたことに起因する。

また，先に述べた水中日射計の消衰係数（Fig. 11，2.24～2.99）は，照度計・光量子計の値より著しく大きかった。表層（0～1 m層の間）は濁りが大きく，消衰係数も大きい，これを考慮に入れても大きいといえよう（光量子計でのこの層の値 0.34～0.89）。これは日射計での測定が空中を基準（100%）としているために，immersion effect（浸漬効果，測器表面で起る反射屈折現象が空中と水中で異なる，Jerlov 1968，松生 1982）がみられたことに起因すると考える。

なお，黒岩・高見（1981）によると，水中での光の減衰は熱量（日射計）が最も大きく，光量子，照度の順に小さくなり，これは測定器によりそれぞれの測定波長（波長範囲など）が異なるためであるという。

瀬戸内海の各海域で，水中光量子計によって測定した鉛直方向の光の減衰状況は，Fig. 14 に，また水中分光放射照度計（410～694 nmの積算）によって測定した結果を Fig. 15 に示した。Fig. 14 では，最も濁りが少なく消衰係数も小さいのは伊予灘と燧灘中央部で K (m^{-1}) は 0.21，一方，消衰係数の大きいのは播磨灘北部で K は 0.68 であった。また，Fig. 15 では姫島南が最も小さく $K = 0.25$ ，走島北が大きく $K = 0.41$ であった。したがって，水中日射量の観測地点（福山市鞆町）の値（ $K = 0.34 \sim 0.89$ ）は，瀬戸内海でも比較的濁りの多い海域にあっている。これは定点が岸に近く有機汚染の影響が強いことや，水深が 9 m 程度と浅く風波によって底泥が舞い上がりやすいことなどによっている。

なお，瀬戸内海での消衰係数（ $K = 0.21 \sim 0.68$ ）を，他海域の測定値と比較すると，外洋水（Jerlov の II 型；外洋は I～III 型，350～700 nm で測定）では 0.08 程度，平均的な沿岸水（Jerlov の 5 型；沿岸は 1～9 型，同上）では 0.4 程度である。したがって，測定器の違いはあるが，瀬戸内海は全体として Jerlov の沿岸水 1～9 型に入ると推定される。

波長別放射照度

瀬戸内海西部の各海域で，1982年12月に水中分光放射照度計を用いて，波長別の放射量を測定した。このうち，減衰の大きかった広島湾北部と，減衰の最も少なかった姫島南の例（Fig. 15）を，Figs. 16・

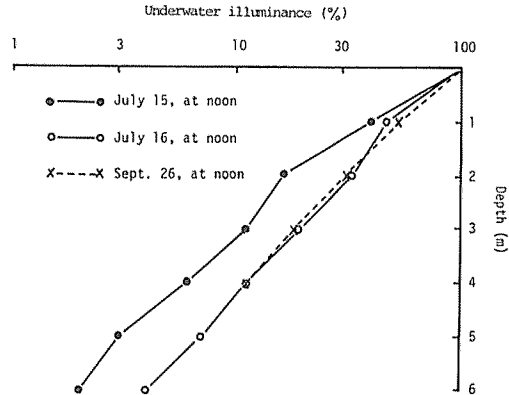


Fig. 12. Change with depth in the relative underwater illuminance at Sensui Island.

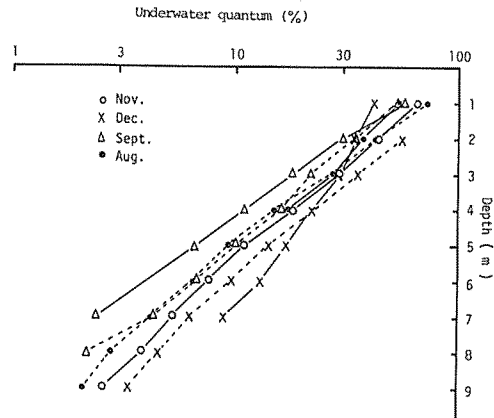


Fig. 13. Change with depth in the relative underwater quantum at Sensui Island.

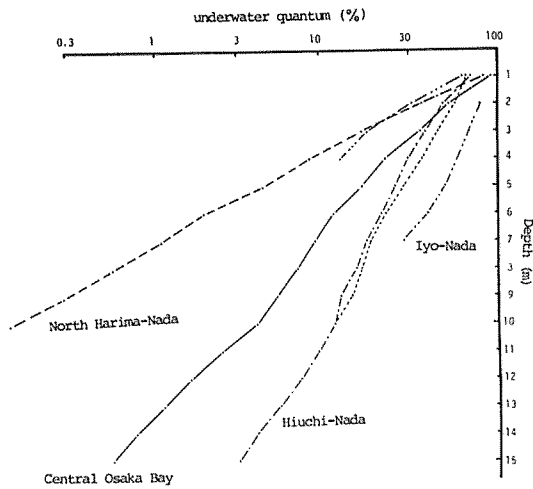


Fig. 14. Change with depth in the relative underwater quantum at the several areas of the Seto Inland Sea.

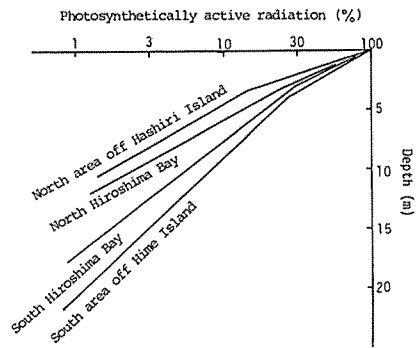


Fig. 15. Change with depth in the relative photosynthetically active radiation in the several areas of the Seto Inland Sea.

17に示した。

深さに比例して、各波長ともエネルギーは減衰していき、全般に姫島南に比べて広島湾北部での減衰が大きく、光合成有効放射量の減衰状態 (Fig. 15) と一致した。

各波長別にみると、両海域とも500~600nm (緑~黄)の減衰状況に比べ短波長側と長波長側での減衰が著しく大きい。これはよく知られているように、長波長側の光は吸収、短波長側は散乱されるためである。ただ、一般には475nm 付近 (青)の透過が最も良いとされているが、ここではそれがやや長波長側にずれており、とくに汚染の進んでいる広島湾北部で著しかった。これは、Jarlov (1968)の沿岸水3~7型での様相と一致しており、懸濁物の散乱・吸収と yellow substance の吸収により475nmの短波

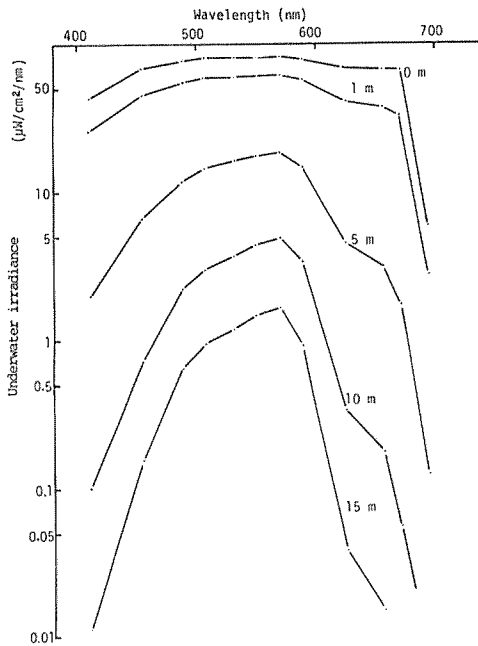


Fig. 16. Vertical distribution of spectral irradiance in the north area of Hiroshima Bay on December 8, 1982.

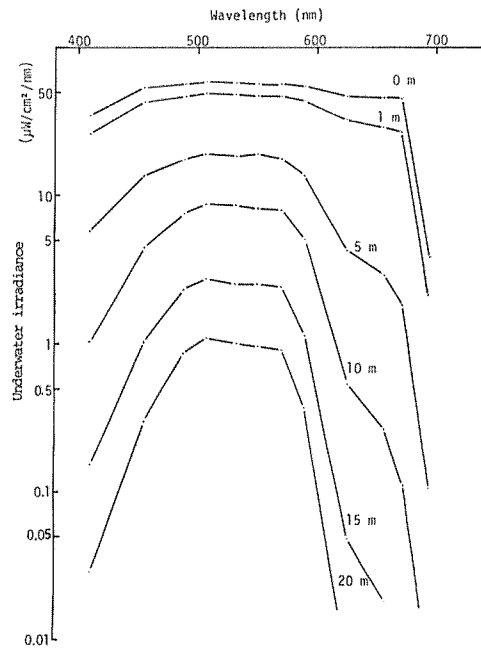


Fig. 17. Vertical distribution of spectral irradiance in the south area off Hime Island on December 10, 1982.

長の光も減衰したためと考えられる。

ちなみに、珪藻の光吸収とその波長の吸収を主として担う色素を、Fig. 18 に示した。沿岸海域で一次生産（植物生産）の主体をなすのは、大型の海藻類を除けば、植物プランクトンであり、これは主として珪藻類と渦鞭毛藻類からなる。色素としては主にクロロフィルa、陸上植物のクロロフィルbの代わりにクロロフィルc、補助色素としてβカロチン、ジアジノキサンチン、また珪藻はフコ

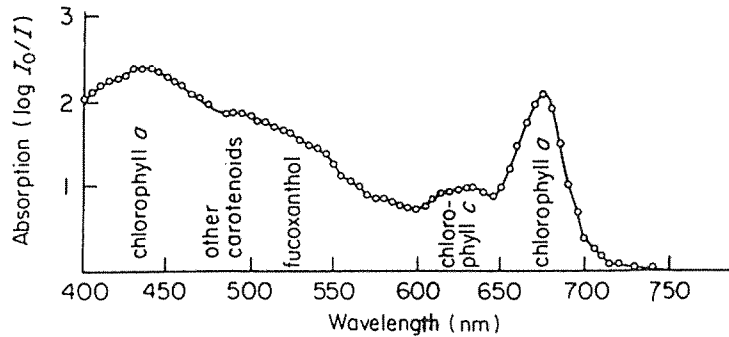


Fig. 18. Spectral absorption curve for the diatom, *Navicula*, and its pigments, based on the data of Lattimer (1957) and Yentsch (1980).

キサントニン、渦鞭毛藻はペリジニンを持っていて、それぞれの光を吸収・利用している。

ここで植物プランクトンの吸収スペクトル（Fig. 18）と、波長別放射照度（Figs. 16・17）とを比較すると、表層を除いては両者にズレがみられる。これは海中での光の著しい減衰と共に、植物プランクトンによる一次生産が必ずしも高くない原因の一つと考える。

3. 瀬戸内海の植物プランクトン生産

瀬戸内海における植物プランクトン生産（純生産量）は、別途に（文部省科学研究費）、1979年10月、1980年1月、4月、6月にタンク法を用いて測定した。これらの値を全短波放射量と比較すると次表になる。

	一次生産量			全短波放射量 Kcal/m ² /day	一次生産量 全短波放射量 %
	gc/m ² /day	平均	Kcal/m ² /day*		
10月	0.10~0.82	0.41	3.8	2200	0.0017
1月	0.05~0.29	0.12	1.1	1700	0.0006
4月	0.09~0.98	0.40	3.7	3100	0.0012
6月	0.10~0.63	0.36	3.3	3600	0.0009
				平均	0.0011

（*炭素1gを9.3 Kcalとして換算）

一次生産量の全短波放射量に対する割合は、冬の1月には低く、暖季の4・6月にはやや高く、10月が最も高かった。これは1月は低水温（11℃前後）であることと共に、植物プランクトン現存量（クロロフィルa量で代表させた）も少なかったことによる。一方、10月には水温が比較的高い（22℃前後）ことと、植物プランクトン現存量もやや多かったことに起因する。

ともあれ、総平均は0.11%（観測値の最小は0.03%、最大は0.3%）であり、陸上植物の利用率が1%より大きいと考えられているから（内嶋 1982によると最高値で4~5%）、瀬戸内海における植物プランクトンの太陽エネルギーの利用率（固定率）は著しく低いといえよう。もちろん、水温の上昇など太陽放射量の間接的な影響は無視できない。

なお、太陽光のうち光合成有効放射量との比（一次生産量/光合成有効放射量）は、総平均でみると0.25%となる。

上記の瀬戸内海における一次生産は、1963年頃に比べると、富栄養化の進行にともなって、植物プランクトンの種類組成や海況が変化し、したがって植物プランクトン生産の構造も変わってきている。これに

については別に検討し報告する。

最後に、放射量の測定資料を計算・整理された杉本泰弘・箕ノ口薫・井上啓子・藤井美智子・小畑節子の諸氏に感謝します。また、測定・調査などに協力して下さった水産実験所の(故)小山治行助教授、練習船「豊潮丸」の福浦船長はじめ乗組員の方々、また、水産環境学研究室昭和55～57年度の大学院生・卒論生の方々に感謝します。

また、本研究は豊林水産省大型別枠研究「グリーンエナジー計画」の一環として行われたものであり、登録番号は GEP-83-I-1-2 であることを記して感謝にかえる。

引用文献

- 1) 古川厚・須藤静夫(1980・1981): 浅沿海水内の太陽エネルギー分布に関する事業報告書, 昭和54, 55年度。海洋生物環境研究所。
- 2) JERLOV, N.G. (1968): Optical Oceanography. *Elsevier Oceanography series* 5. 194pp.
- 3) 黒岩澄雄・高見晋一(1981): 内水面に直達する太陽エネルギーの季節的・地理的分布に関する研究成績書(グリーンエナジー計画), 昭和55年度京都大学理学部植物生態研究施設。
- 4) 松生治(1982): 海洋の光とその散乱・吸収。海洋環境測定, 新水産学全集31, 恒星社厚生閣, 31-61。
- 5) 自然エネルギーの分布に関する研究グループ(系I-1)(1982): 日射エネルギー観測資料No.3(グリーンエナジー計画), 7-12。
- 6) SVERDRUP, H.U., M.W. JOHNSON and R.H. FLEMING (1955): The Oceans. *Prentice-Hall*, pp. 101-104.
- 7) 内嶋善兵衛・桜谷哲夫・奥山富子(1981): 関東地方南部の日射気候。農業技術研究所報告, A, 第27号, 91-145。
- 8) 内嶋善兵衛(1982): 耕・林地での太陽エネルギーの配分。農林・水産と気象, 現代の気象テクノロジー4, 朝倉書店。18-45。
- 9) YENTSCH, C.S. (1980): Light attenuation and phytoplankton photosynthesis. Physiological ecology of phytoplankton (Ed. I. Morris), *Studies in ecology Vol. 7, Blackwell Scien. Pub.*, pp. 95-127.

SUMMARY

The recent rapid eutrophication of the coastal seas of Japan has had a remarkable effect on the turbidity and transparency of the sea water, hence on the attenuation of underwater irradiance, which in turn influences the phytoplankton communities and primary productivity of the area.

The present study deals with the continuous three years observation of the total short-wave radiation, direct short-wave radiation, diffused short-wave radiation and photosynthetically active radiation of the Seto Inland Sea. Along with these observations, reflected short-wave radiation from the sea and transmitted short-wave radiation into the sea were determined. The availability of solar radiation for primary production, vertical distribution of spectral irradiance and attenuation coefficient were also discussed in relation to the optical water type of the region.

1. A typical seasonal variation in the monthly mean daily solar radiation (total short-wave radiation) was observed, with a maximal value of $17.0 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ in July and minimal

values of 7.4 to $7.5 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ through November to January.

2. Seasonal variation of direct short-wave radiation was nearly identical to that of total short-wave radiation, with $9.3 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ at maximum and $4.1 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ at minimum. Diffused short-wave radiation increased in June and decreased in January. The ratio of diffused short-wave radiation to total short-wave radiation ranged from 39% to 62% with an average of 49%.

3. Seasonal variation of photosynthetically active radiation was very similar to that of direct short-wave radiation, with values of $7.3 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ in July and of $3.3 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ in December.

4. The albedo at the sea surface changed according to the incidence angle and surface conditions. Average daily values ranged from 2.9% on a fine summer day to 10% on an overcast day in winter.

5. Underwater irradiance at a depth of 50 cm varied widely according to such parameters as turbidity and the surface condition of the water. Observation revealed a remarkable decrease of irradiance in the upmost 50 cm of the water column showing an inverse relationship between the intensity of underwater irradiance and turbidity.

6. From data on the vertical distribution of underwater irradiance, the attenuation coefficient for lux was calculated at 0.53 to 0.70, while that for quanta at 0.37 to 0.52.

7. As a result of spectral irradiance determination, a characteristic decrease in the long-wave range was observed, especially in polluted areas. The optical water type of the region, as proposed by Jerlov, was classified into the Type 3 to Type 7 class for coastal waters.

8. From the simultaneous determination of net primary production by the phytoplankton community, average availability of total short-wave radiation and that of photosynthetically active radiation for primary production were estimated to be only 0.11% and 0.25%, respectively.