

# 吸収係数・濃度および日射強度・エアマス間の相関によるソーラポンド塩水溶液の全透過率の分光計算

Spectral Calculation of Transmittance Using Correlations between Absorption Coefficient and Radiation Intensity and Air Mass on Salt Water Solutions as Working Fluid of Solar Pond

李 相一<sup>\*1</sup>

Xiang-Yi LI

金山公夫<sup>\*2</sup>

Kimio KANAYAMA

馬場 弘<sup>\*2</sup>

Hiromu BABA

## Abstract

With respect to four kinds of salt water solutions used as working fluid of a solar pond, such as sodium chloride, potassium chloride, calcium chloride and magnesium chloride - water solutions, the absorption properties were analyzed in the ranges of  $0.3\sim0.2 \mu\text{m}$  of wavelength and  $0\sim25 \text{ W\%}$  of salt concentration. Two correlation equations between the absorption coefficient and salt concentration, and between the intensity of incident ray and air mass ( $A_m$ ) were derived every monochromatic wavelength. Using these two correlations, the total transmittance which is the most important property of solar pond working fluid could precisely be calculated against normal incident ray with changing concentration and  $A_m$ . The result calculated by this numerical method was well compared with the standard calculation for each salt - water solution with uniform concentration. The coefficients of the correlation equations were arranged as a data - base, so that the total transmittance of the solar pond with a salt gradient layer could easily be calculated for the various surrounding conditions.

**キーワード：**太陽エネルギー、塩勾配型ソーラポンド、分光透過率、全透過率、吸収係数、塩濃度、エアマス、相関式

**Key words:**Solar energy, Salt gradient solar pond, Spectral transmittance, Total transmittance, Absorption coefficient, Salt concentration, Air mass, Correlation equation.

## 1. まえがき

ソーラポンドの熱的性能はポンド塩水の透明度と濃度勾配層の維持の如何にあるといつても過言でない<sup>(1)～(3)</sup>。濃度勾配層の形成、維持、管理についてはこれまで多くの研究<sup>(4)～(6)</sup>がなされているが、ポンド水の透明度、すなわち透過率の測定に関する研究は少ない。その中でRabl-Nielsen<sup>(7)</sup>、Hull<sup>(8)</sup>らはDefant<sup>(9)</sup>が過去のデータをまとめた水の波長帯域透過率を用いて全透過率を算出し、Nielsen<sup>(10)</sup>、Hawladarら<sup>(11)</sup>は水および塩水溶液の全透過率を測定してソーラポン

ドの熱計算に用いた。海水や湖沼水など天然水の分光透過率に関する古いがしかし詳細な研究<sup>(12)</sup>がある。ソーラポンド熱媒としての水および塩水溶液の基本的な光学性質である分光透過率や吸収係数に関する直接的な研究は極めて少なく、わずかにLund-Keinonen<sup>(13)</sup>およびUsmanovら<sup>(14)</sup>による測定値がある程度である。しかし、これらの結果は分光透過率測定の際の波長精度や試料作成の準備段階で問題があるものと推察され、全透過率の計算には適当とは思われない。著者ら<sup>(15), (16)</sup>は既に水および食塩水溶液の分光透過率を広い濃度範囲にわたって系統的に測定し、その結果

\*1会員 北見工業大学大学院

\*2会員 北見工業大学工学部(〒090-8507北見市公園町165)  
(原稿受付 平成10年5月11日)

Doctoral Course, System Engineering  
Department of Mechanical Engineering  
Kitami Institute of Technology

をもとに吸収係数を算出し、ソーラポンドの全透過率算出のための基礎データを提供した。Tsilingiris<sup>(17)</sup>,<sup>(18)</sup>およびChangら<sup>(19)</sup>は著者らのこのデータを用いてポンド水の全透過率を算出し、他の値と比較して種々検討、評価を行っている。

本研究では、今回新たに波長分解能のより良い回析格子型分光放射計を用いて4種類の塩水溶液の分光透過率を精度良く測定<sup>(20)~(22)</sup>できたので、分光スペクトルから得られた吸収係数をもとに全透過率を算出し、ソーラポンドの熱計算を容易にするための相関式および計算法を提示した。

全透過率の計算に当たって、まず単波長ごとに塩水濃度と吸収係数の相関式を求め、次に入射スペクトル（エアマス）と日射強度の相関式を与え、両者から分光透過率を数値計算により求めて、最後に全透過率を算出する方法をとった。相関式を用いた数値計算の結果は、濃度一様層に対して吸収係数を用いて波長積分により直接算出された全透過率基準値と比較された。

## 2. 主な記号

- h : 太陽高度 °
- $A_m$  : エアマス (大気の垂直厚さの倍数)
- C : 塩水濃度 mass% (本文中の濃度は全てmass%)
- $\lambda$  : 波長  $\mu\text{m}$
- $\Delta\lambda$  : 波長の刻み  $\mu\text{m}$
- L, X : 媒体あるいはポンドの深さ m
- $I_{\lambda 0}$  : 分光日射の入射強度  $\text{W}/(\text{m}^2 \mu\text{m})$
- $I_{\lambda L}$  : 水深Lにおける日射の分光強度  $\text{W}/(\text{m}^2 \mu\text{m})$
- $k_\lambda$  : 波長λの吸収係数  $1/\text{m}$
- $\tau_\lambda$  : 分光透過率 ( $=I_{\lambda L}/I_{\lambda 0}$ )
- $\tau_L$  : 水深Lにおける全透過率
- $\alpha_\lambda$ ,  $\beta_\lambda$ ,  $\gamma_\lambda$  :  $k_\lambda = f(C)$  の係数  $1/\text{m}$
- $\delta_\lambda$  :  $k_\lambda = f(A_m)$  の係数  $\text{W}/(\text{m}^2 \mu\text{m})$
- $\varepsilon_\lambda$ ,  $\zeta_\lambda$ ,  $\eta_\lambda$  :  $k_\lambda = f(A_m)$  の係数

## 3. 測定値および数値処理

基礎となる分光透過率の測定値は、NaCl, KCl, MgCl<sub>2</sub>およびCaCl<sub>2</sub>の4種類の水溶液の濃度0~25%の試料について著者ら<sup>(20)~(22)</sup>によって測定されたものである。計算の際の入射光にはMoon<sup>(24)</sup>の日射スペクトルを用いた。

図1に示すように、塩水ソーラポンドは上部対流層

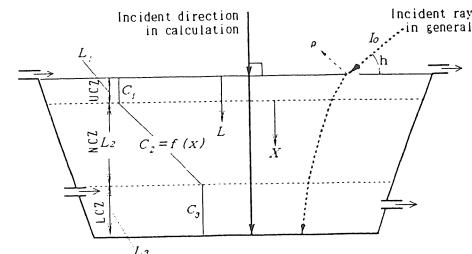


図1 塩水濃度勾配層型ソーラポンドの概略図

(UCZ:上部対流層, NCZ:非対流層, LCZ:下部対流層)

Fig.1 Schematic structure of a solar pond with salt gradient layer

(UCZ:upper convecting zone, NCZ:non-convecting zone, LCZ:lower convecting zone)

$L_1$ , 濃度勾配層  $L_2$  および下部対流層（蓄熱層） $L_3$  からなる。ソーラポンドに入射した光は長波長分はポンド水上部の浅いところで吸収され、底部に到達する光はエネルギー分布割合の大きい0.4~0.6  $\mu\text{m}$ の範囲である。ゆえに解析は主にこの波長帯に重点を置いて行った。

### 3. 1 測定データの整理

測定データは測定の際の誤差などの原因でバラツキは避けられない。本研究において吸収係数の濃度による変化は大部分が規則的な関係にあるが、その関係から逸脱した小数の測定値は修正を行って平滑化し、連続関数で表すようにした。測定値のデータ処理は先ず試料の分光透過率測定値  $\tau_\lambda$  を Lambert式を用いて吸収係数  $k_\lambda$  を算出することである。すなわち

$$k_\lambda = -\ln \tau_\lambda / L \quad (1)$$

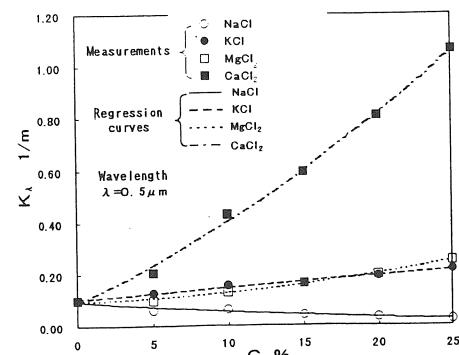


図2 4種塩水溶液に対する単色光( $\lambda=0.5 \mu\text{m}$ )の  $k_\lambda$  とCの相関関係

Fig.2 Correlation between  $k_\lambda$  and C at  $\lambda=0.5 \mu\text{m}$  for four kinds of salt water solutions

つぎに各種水溶液について吸収係数  $k_\lambda$  と濃度 C との関係を単波長ごとにプロットすると、若干の平滑化を必要とする場合もあるが、いずれも 2 次関数でよく相関されることがわかった。

$$k_\lambda = \alpha_\lambda + \beta_\lambda C + \gamma_\lambda C^2 \quad (2)$$

式(2)に対して重相関係数は  $\geq 0.96$  である。

図2にこれら塩水溶液の波長  $0.5\mu\text{m}$  の実測値 (○□■) と、それらから得られた相関曲線の例を示す。

### 3. 2 データの修正

吸収係数と濃度との関係を波長ごとに図示した場合、図3のNaCl水溶液の様にある波長 ( $0.41\mu\text{m}$ )において測定値のばらつきが大きいことがある。これを修正する方法は次の通りである。まず、 $C=0\%$ の値は水の  $k_\lambda$  であり、4種類の塩水溶液のこの値は等しくなければならないので、それらの平均値をとて矢印のように下方修正する。この点は他の測定値に比べて4倍の重みがあるから、以後の処理においては動かさない。この点と5点の生データから最小二乗法で求められた回帰曲線(波線)から  $C=20\%$  の測定点だけがへだたりが大きい。この場合入 =  $0.41\mu\text{m}$  の前後の波長の回帰曲線の  $C=20\%$  における  $k_\lambda$  の絶対値および曲線の勾配  $d k_\lambda / d C$  を参考に矢印のように上方修正する。1回の修正でへだたりが  $\pm 20\%$  以上あり、平滑化が不十分な場合は他の点よりへだたりが小さくなるよう2回目以降の修正を行う。これらの修正の結果、2点の修正点と4点の非修正点から最小二乗法により図3に示す実線のような新しいより確かな相関関係が得られる。

このようにして得られた相関式(2)の各項の単波長ごとの係数  $\alpha_\lambda$  ( $C=0\%$ , 水),  $\beta_\lambda$ ,  $\gamma_\lambda$  の重点

表1 4種類の塩水溶液の相関式(2)の係数

Table 1 Coefficient of correlation Eq.(2) for four kinds of water-solution

$\lambda/\mu\text{m}$	$\alpha$			$\beta$			$\gamma$					
	NaCl	KCl	MgCl <sub>2</sub>	CaCl <sub>2</sub>	NaCl	KCl	MgCl <sub>2</sub>	CaCl <sub>2</sub>	NaCl	KCl	MgCl <sub>2</sub>	CaCl <sub>2</sub>
0.40	-1.478E-01	1.474E-01	1.521E-01	1.398E-01	-3.240E-03	6.800E-03	-7.900E-04	3.328E-02	-4.000E-05	-8.600E-05	1.400E-04	1.113E-03
0.41	1.243E-01	1.242E-01	1.283E-01	1.201E-01	-3.350E-03	5.520E-03	4.000E-05	2.728E-02	-3.800E-05	-8.500E-05	1.050E-04	1.306E-03
0.42	1.001E-01	9.880E-02	1.051E-01	1.017E-01	-3.320E-03	5.820E-03	3.800E-04	2.340E-02	-1.600E-05	-8.500E-05	1.120E-04	1.535E-03
0.43	9.300E-02	9.510E-02	9.680E-02	9.200E-02	-5.860E-03	3.820E-03	-2.380E-03	2.003E-02	7.900E-05	-1.300E-05	2.070E-04	1.841E-03
0.44	8.480E-02	8.390E-02	8.710E-02	8.480E-02	-4.530E-03	4.420E-03	-2.140E-03	1.985E-02	4.900E-05	-5.100E-05	1.850E-04	1.408E-03
0.45	8.470E-02	8.510E-02	9.000E-02	8.620E-02	-4.910E-03	4.180E-03	-3.980E-03	1.867E-02	8.700E-05	-6.900E-05	2.790E-04	1.338E-03
0.46	8.710E-02	8.850E-02	8.580E-02	8.860E-02	-5.710E-03	3.130E-03	-3.730E-03	1.748E-02	1.000E-04	-1.700E-05	3.000E-04	1.305E-03
0.47	8.180E-02	8.490E-02	8.290E-02	8.540E-02	-5.190E-03	3.520E-03	-2.230E-03	2.031E-02	9.500E-05	-1.000E-05	2.720E-04	1.010E-03
0.48	8.530E-02	8.810E-02	8.670E-02	8.460E-02	-4.480E-03	4.970E-03	-1.210E-03	2.422E-02	7.200E-05	-4.700E-05	2.550E-04	8.880E-04
0.49	8.900E-02	9.340E-02	8.760E-02	8.380E-02	-3.420E-03	4.650E-03	-3.400E-04	2.547E-02	2.800E-05	-1.900E-05	2.450E-04	5.650E-04
0.50	8.650E-02	1.000E-01	9.720E-02	9.080E-02	-4.220E-03	4.980E-03	1.820E-03	2.632E-02	5.300E-05	-1.500E-05	1.810E-04	4.970E-04
0.51	1.078E-01	1.074E-01	1.098E-01	1.055E-01	-2.740E-03	6.180E-03	1.310E-03	2.657E-02	-3.100E-05	-3.500E-05	2.030E-04	4.720E-04
0.52	1.251E-01	1.233E-01	1.242E-01	1.236E-01	-3.680E-03	5.430E-03	2.970E-03	2.554E-02	4.400E-05	2.800E-05	1.350E-04	5.050E-04
0.53	1.239E-01	1.234E-01	1.253E-01	1.219E-01	-1.460E-03	6.060E-03	7.140E-03	2.770E-02	-3.400E-05	3.400E-05	-9.000E-06	4.160E-04
0.54	1.386E-01	1.352E-01	1.387E-01	1.318E-01	-9.800E-04	5.480E-03	6.850E-03	2.804E-02	-5.400E-05	5.800E-05	7.000E-06	3.950E-04
0.55	1.469E-01	1.491E-01	1.502E-01	1.411E-01	-2.200E-04	6.030E-03	7.550E-03	2.820E-02	-6.100E-05	3.700E-05	0.000E+00	3.870E-04
0.56	1.527E-01	1.537E-01	1.592E-01	1.481E-01	3.000E-05	8.520E-03	9.080E-03	2.927E-02	-8.200E-05	-5.700E-05	-4.200E-05	3.460E-04
0.57	1.605E-01	1.576E-01	1.632E-01	1.542E-01	2.900E-04	1.029E-02	1.111E-02	3.090E-02	-8.900E-05	-9.000E-05	-9.200E-05	2.800E-04
0.58	1.838E-01	1.815E-01	1.838E-01	1.759E-01	-8.000E-05	9.510E-03	1.180E-02	3.136E-02	-6.400E-05	-4.900E-05	-1.030E-04	2.510E-04
0.59	2.255E-01	2.250E-01	2.240E-01	2.159E-01	1.010E-03	1.027E-02	1.211E-02	3.224E-02	-1.070E-04	-7.300E-05	-1.050E-04	2.130E-04
0.60	3.108E-01	2.932E-01	3.011E-01	2.988E-01	2.460E-03	1.205E-02	1.247E-02	3.258E-02	-1.820E-04	-1.120E-04	-1.150E-04	1.860E-04

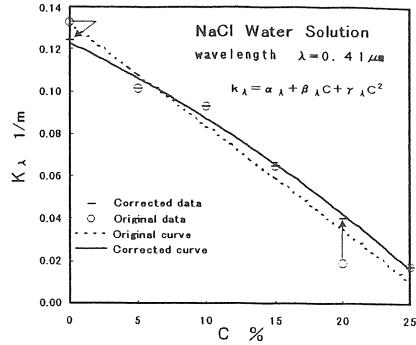


図3  $k_\lambda$  と  $C$  の相関を求める過程

Fig.3 Correction process between  $k_\lambda$  and  $C$

波長域  $0.4\sim 0.6\mu\text{m}$  の値を表1に示す。当然であるが、式(2)から求められた各塩水溶液の  $\alpha_\lambda$  は非常に近似する。

### 3. 3 透過率の濃度特性

図4(a)～(d)に4種の塩水溶液の吸収係数  $k_\lambda$  と波長入の関係を示す。吸収係数は塩の種類によって大きさ傾向ともに異なるが、各塩水溶液とも波長依存性は  $0.4\sim 0.6\mu\text{m}$  の範囲ではあまり大きな変化は見られない。

光の透過性質と定義から分光透過率は式(3)で表わされる。

$$\tau_{\lambda L} = \frac{I_{\lambda L}}{I_{\lambda 0}} = \exp(-k_\lambda L) \quad (3)$$

式(3)より、式(1)で示される  $k_\lambda$  が大きい程  $\tau_\lambda$  は小さくなる。図4(a)～(d)を比較すると4種の塩水溶液の濃度に対する透過傾向にはかなりの相違が見られる。特に注目されるのはNaClで4つの塩

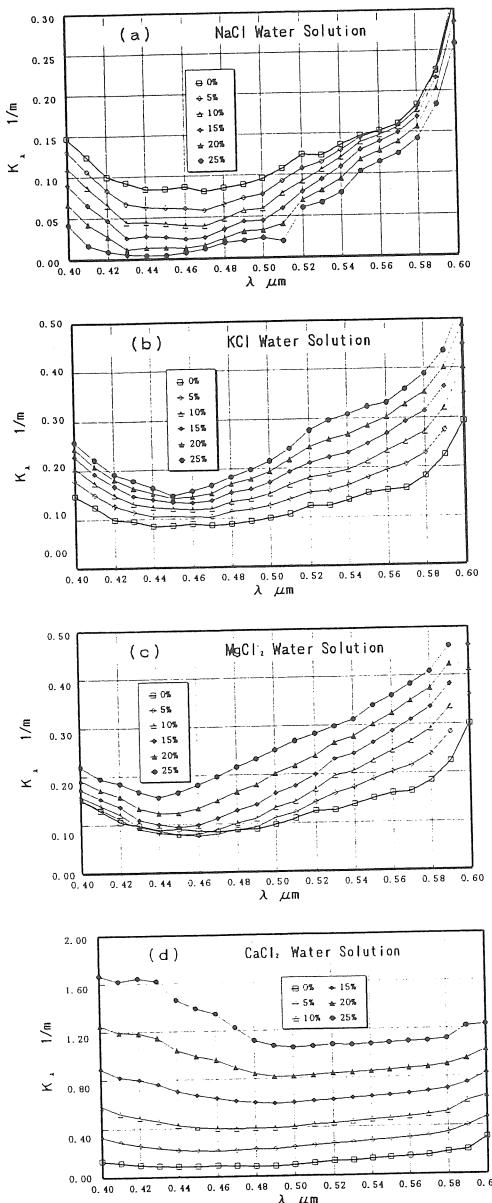


図4 4種類塩水溶液に対する相関式による吸収係数  
Fig.4 Absorption coefficient obtained by correlation equation for 4 salt-water solutions

のうちで最も透過がよく、しかも濃度の増加によってほかの塩は透過が悪くなるに対して、NaClだけは  $k_\lambda$  が減少して逆に透過が良くなる。この透過特性は表1に示したように式(2)の第一次の項の係数  $\beta_\lambda$  が0.4~0.6  $\mu\text{m}$  の範囲で21点中17点がマイナスになることからも理解される。最も透過性が悪いのはCaCl<sub>2</sub>で、

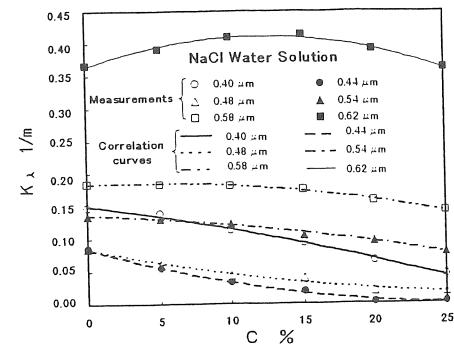


図5 6個の単色光に対する  $k_\lambda$  と  $C$  の相関  
Fig.5 Correlation between  $k_\lambda$  and  $C$  for six wavelengths

本文に後述するように、全透過率がボンド水深3mでNaClより%で30ポイントぐらい小さくなる。この点からもNaCl水溶液は他の塩よりソーラボンド媒体として適していることがわかる。

吸収係数の濃度による変化は、対象とする波長で異なる大きさと傾向を示す。一例として、図5にNaCl水溶液の特定波長に対する吸収係数と濃度の関係を示す。吸収係数は濃度に対して一定の傾向は示さず、波長によって上に凸あるいは凹の形で変化する。この現象の説明はさておき、ここではデータ処理によって得られた相関により吸収係数の濃度による変化が連続であることを示すにとどめる。

#### 4. 入射光強度のスペクトルとエアマス

太陽光が大気中を通過する距離を表すエアマス  $A_m$  は、太陽高度  $h$  の関数で式(4)で定義される。

$$A_m = 1 / \sin h \quad (4)$$

太陽高度は地上の位置および時刻によって変化し、その地点に到達する直達光の強度はエアマスとともに連続的に変化する。太陽高度、経緯度、時刻のほか、散乱光も考慮に入れた入射光の計算方法にBirdら<sup>(23)</sup>のモデルがあるが、その計算に用いられる大気条件と計算過程はかなり複雑である。

そこで、本研究では直達日射のみを考えることとし、Moon<sup>(24)</sup>の日射スペクトルを入射光として採用する。いま、Moonの日射スペクトルをエアマス  $A_m$  の関数として相関式(5)で表す。

表2 Moonの入射光スペクトルの相関式(5)の係数  
Table 2 Coefficients of correlation Eq.(5) for  
Moon's incident spectrum

$\lambda \mu\text{m}$	$\delta$	$\epsilon$	$\zeta$	$\eta$
0.40	1.392E+03	-5.180E-01	-3.070E-02	7.010E-03
0.41	1.729E+03	-6.110E-01	7.380E-02	-8.550E-03
0.42	1.832E+03	-4.290E-01	-1.660E-02	2.750E-03
0.43	1.909E+03	-3.940E-01	-2.560E-02	4.220E-03
0.44	2.012E+03	-3.240E-01	-3.880E-02	5.210E-03
0.45	2.099E+03	-2.750E-01	-5.250E-02	9.80E-03
0.46	2.100E+03	-2.790E-01	-3.730E-02	5.100E-03
0.47	2.166E+03	-2.500E-01	-4.030E-02	5.540E-03
0.48	2.145E+03	-2.450E-01	-2.600E-02	3.030E-03
0.49	2.112E+03	-2.240E-01	-2.900E-02	3.810E-03
0.50	2.082E+03	-2.180E-01	-2.670E-02	3.290E-03
0.51	2.008E+03	-1.920E-01	-3.170E-02	3.830E-03
0.52	1.978E+03	-1.950E-01	-2.730E-02	3.370E-03
0.53	1.960E+03	-1.950E-01	-2.650E-02	3.400E-03
0.54	1.946E+03	-1.870E-01	-2.800E-02	3.820E-03
0.55	1.937E+03	-1.930E-01	-2.450E-02	3.280E-03
0.56	1.928E+03	-1.990E-01	-2.050E-02	2.810E-03
0.57	1.908E+03	-1.950E-01	-2.110E-02	2.840E-03
0.58	1.879E+03	-1.880E-01	-2.280E-02	3.000E-03
0.59	1.870E+03	-1.950E-01	-1.830E-02	2.580E-03
0.60	1.846E+03	-1.850E-01	-2.130E-02	3.100E-03

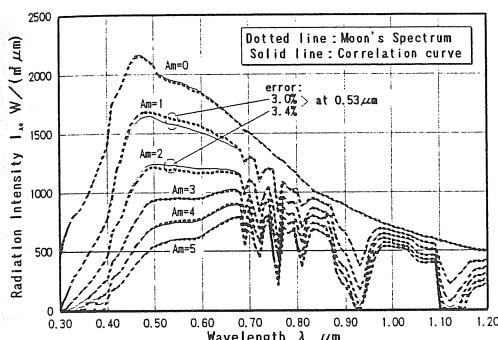


図6 式(5)による入射光とMoonのスペクトルの比較  
Fig.6 Comparisons of incident intensity correlated by Eq.(5) with Moon's spectrum

$$I_{\lambda 0} = \delta_{\lambda} \cdot \exp(\epsilon_{\lambda} A_m + \zeta_{\lambda} A_m^2 + \eta_{\lambda} A_m^3) \quad (5)$$

式(5)の  $\delta_{\lambda}$ ,  $\epsilon_{\lambda}$ ,  $\zeta_{\lambda}$  および  $\eta_{\lambda}$  は波長  $\lambda$  に対応する係数で、加重最小自乗法により求めた。算出されたこれらの重点波長域 0.4~0.6  $\mu\text{m}$  の係数を表2に有効数字4桁で示す。この場合、重相関係数は0.97以上であった。また図6に日射強度と波長との関係を  $A_m$  をパラメータにとって示す。図中太い点線は Moon のスペクトルで、細い実線が式(5)による相関曲線である。図より両者は良く一致し、相関が良いことがわかる。ただし、全透過率計算において入射光は垂直方向に限り、スペクトルのみが  $A_m$  によって変化するものとした。

## 5. 全透過率計算による相関式の検討

吸収係数の濃度との相関および入射光のエアマスとの相関の結果を検討する目的で、これらの相関式を用いて全透過率の計算を行って、正規の波長積分法による計算値を基準値として比較した。

計算はまず与えられたエアマスにより入射スペクトル  $I_{\lambda 0}$  を決め全透過率の計算を行う。

透過厚さ  $L$  の媒体の全透過率  $\tau_L$  は

$$\tau_L = \frac{\sum I_{\lambda L} \cdot \Delta \lambda}{\sum I_{\lambda 0} \cdot \Delta \lambda} \quad (6)$$

式(6)に式(3)から導出された  $I_{\lambda L}$  を代入して

$$\tau_L = \frac{\sum I_{\lambda 0} \cdot \exp(-k_{\lambda} L) \cdot \Delta \lambda}{\sum I_{\lambda 0} \cdot \Delta \lambda} \quad (7)$$

となる。式(7)を波長積分して得られた全透過率を基準値とする。

一方、相関式(2), (5)および式(3)を用いて、 $L$  における光強度  $I_{\lambda L}$  は

$$I_{\lambda L} = \delta_{\lambda} \cdot \exp(\epsilon_{\lambda} A_m + \zeta_{\lambda} A_m^2 + \eta_{\lambda} A_m^3)$$

$$\exp\{-(\alpha_{\lambda} + \beta_{\lambda} C + \gamma_{\lambda} C^2) \cdot L\} \quad (8)$$

となる。ゆえに全透過率  $\tau_L$  は式(6)に式(5)および式(8)を代入して相関式(9)を得る。

$$\tau_L = \frac{\sum \delta_{\lambda} \cdot \exp(\epsilon_{\lambda} A_m + \zeta_{\lambda} A_m^2 + \eta_{\lambda} A_m^3)}{\sum \delta_{\lambda} \cdot \exp(\epsilon_{\lambda} A_m + \zeta_{\lambda} A_m^2 + \eta_{\lambda} A_m^3)}$$

$$\cdot \exp\{-(\alpha_{\lambda} + \beta_{\lambda} C + \gamma_{\lambda} C^2) \cdot L\} \cdot \Delta \lambda \quad (9)$$

以上の計算において、 $\Sigma$  の波長範囲は  $0.30 \mu\text{m} \sim 1.2 \mu\text{m}$  とし、表面反射の影響は考えないものとした。

図7に4種の塩水溶液の濃度一様層の全透過率と透過厚さ  $L$  の関係を、基準計算値を○印および相関計算値を実線で比較して示した。両者は非常によく一致しており、相関式(2)および(5)は濃度一様層の全透過率の計算に有効であることがわかった。

つぎに濃度勾配層の全透過率を求めるために、相関式(2)および(5)を含む式(9)を適用して計算する。その一例として深さ方向への差分法による計算

(12)

法および結果を示す。

図1に示すような厚さ $L_2$ の濃度勾配層に対して水深 $X$ について差分法により全透過率計算を行う場合、勾配層を $n$ 個の薄い層に分割して考える。 $n$ を十分大きくとれば $\Delta X = L_2/n$ は十分薄くなり、薄い層の濃度を一様と見なすことができる。ゆえに、この薄い層では式(2)および式(7)がそのまま適用できる。計算において、各層への入射光は上の層の透過光である。

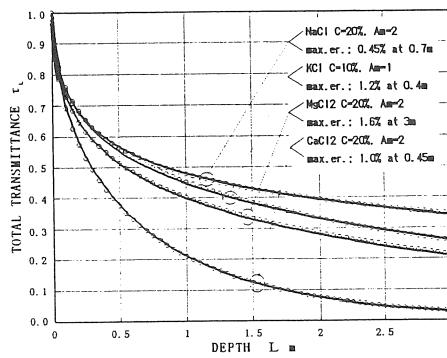


図7 測定値に基づく全透過率の基準計算結果(○)と相関式(2)及び(5)による計算結果(実線)の比較  
Fig.7 Comparison between standard calculation (circle) by measurement value and correlation calculation(solid line) by Eqs.(2) and (5)

る。すなわち、 $i=1 \sim n$ の範囲で第*i*層を透過する光強度 $I_{\lambda i}$ は式(10)で表される。

$$I_{\lambda i} = I_{\lambda i-1} \cdot \exp(-k_{\lambda i} \cdot \Delta X) \quad (10)$$

式(10)の $k_{\lambda i}$ は式(2)によって与えられるが、式(2)の濃度 $C$ は水深 $X$ によって変化するので、結局 $X$ の関数として表わされる。ここで、 $X=\Delta X \cdot i$ である。濃度勾配層の濃度は水深の一次関数とすると、*i*層の濃度 $C_i$ は式(11)で表わすことができる。

$$\begin{aligned} C_i &= C_1 + \{(C_3 - C_1) / L_2\} \cdot (L_2/n) \cdot i \\ &= C_1 + \{(C_3 - C_1) / n\} \cdot i \end{aligned} \quad (11)$$

したがって、式(11)を式(2)に代入して式(12)を得る。

$$\begin{aligned} k_{\lambda i} &= \alpha_{\lambda} + \beta_{\lambda} \cdot [C_1 + \{(C_3 - C_1) / n\} \cdot i] \\ &\quad + \gamma_{\lambda} \cdot [C_1 + \{(C_3 - C_1) / n\} \cdot i]^2 \end{aligned}$$

計算は $i=1 \sim n$ の範囲で行い、 $i=n$ で所要の透過光強度 $I_{\lambda n} (= I_{\lambda L})$ が得られ、式(6)により濃度勾配層 $L_2$ を透過する全透過率が得られる。

図8に濃度勾配層に対する全透過率の計算例として、NaCl水溶液について式(12), (10), (5)および(6)を用いて計算した結果を示す。計算条件は図中に示す通りである。

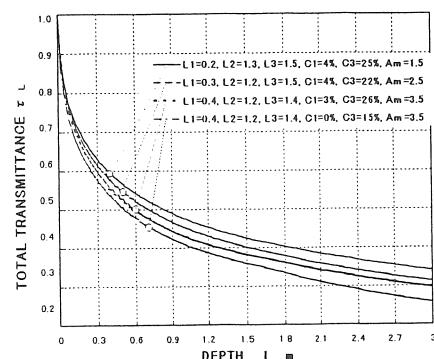


図8 水深3mのNaCl濃度勾配層に対する全透過率の相関式による計算結果  
Fig.8 Results of total transmittance calculated by correlation equation for 3m depth in NaCl gradient layer.

## 6. むすび

ソーラポンド熱媒に用いられる4種の塩水溶液に関して、吸収係数-濃度および日射強度-エアマスの相関式を用いて全透過率の計算を行い、次のような結論を得た。

(1) NaCl, KCl, MgCl<sub>2</sub>およびCaCl<sub>2</sub>の4つの塩水溶液について、分光透過率の測定データの解析を行った結果、単波長ごとに吸収係数は濃度の変化に対して連続性であることがわかった。

(2) この結果、得られた吸収係数と濃度の相関式および入射強度にMoonのスペクトル相関式を用いて濃度一様層に対する全透過率を計算し、分光透過率から波長積分で算出された全透過率基準値と比較してよい一致が得られた。

(3) このことから濃度勾配層を含む実際のソーラポンド熱媒に対してもこれら二相関式を用いて全透過率の計算を行うことが可能になった。

(4) 得られた相関式の各係数は基礎データとしてデータベースに整理され、これによって種々の条件に対するポンド水の垂直入射に対する全透過率の計算に供することができる。

## 文 献

- (1) Shah, S. A., Short, T. H. and Fynn, R. P., Modeling and testing a salt gradient solar pond in Northeast Ohio, *Solar Energy*, 27-5(1981), 393-401.
- (2) 稲葉英男ほか, 寒冷地における塩水太陽池の熱特性評価, 日本機械学会論文集B, 56-523(1990), 788-795.
- (3) Kanayama K., et al., Experiment and analysis of practical-scale solar pond stabilized with salt gradient, *Solar Energy*, 46-6(1991), 353-360.
- (4) Nielsen, C. E., Conditions for absolute stability of salt gradient solar ponds, Proc. of ISES, Silver Jubilee Congress, ed. by K. W. Boer and B. H. Glenn, Atlanta, GA, (1979), 1176-1180.
- (5) Zangrando, F., A simple method to establish salt gradient solar pond, *Solar Energy*, 25(1980), 467-470.
- (6) Atkinson, J. F., et al, A note on gradient maintenance in a salt gradient solar pond, *Solar Energy*, 34-2(1985), 163-169.
- (7) Rabl, A. and Nielsen, C. E., Solar pond for space heating, *Solar Energy*, 17(1975), 1-12.
- (8) Hull, J. R., Computer simulation of solar pond thermal behaviour, *Solar Engg.*, 25(1980), 33-40.
- (9) Defant, A., Physical Oceanography, 1(1961), 51-57, Pergamon Press, New York.
- (10) Nielsen, C. E., Experience with a prototype solar pond for space heating, Proc. Conf., "Sharing the Sun", ISES, 5(1976), 169-182.
- (11) Hawlader, M. N. A., and Brinkworth, B. J., An analysis of the non-convecting solar pond, *Solar Energy*, 27-3(1981), 195-204.
- (12) たとえば Clarke, G. L. and James, H. R., Laboratory analysis

of the selective absorption of light by sea water, J.O.S.A., 29(1939), 43-55.

- (13) Lund, P. D. and Keinonen, R. S., Radiation transmission measurements for solar ponds, *Solar Energy*, 33-314(1984), 237-240.
- (14) Usmanov, Yu., Eliseev, V., and Uharov, G., Optical characteristics of a solar reservoir, *Gelioteknika*, 7-1(1971), 28-32.
- (15) Kanayama, K. and Baba, H., Transmittance properties of pure and impure salty waters, Proc. of ASME-JSME-JSES Solar Energy Conf., 1(1987), 166-171.
- (16) Kanayama, K. and Baba, H., Transmittance of distilled water and sodium-chloride-water solutions, *Trans. of ASME, J. of Solar Energy Engng.*, 110(1988), 113-119.
- (17) Tsilingiris, P. T., The radiation transmission across a salinity gradient, *Energy Convers. Magnt.*, 32-4(1991), 333-343.
- (18) Tsilingiris, P. T., Radiation transmission through a composite pure water layer of uniform and depth-dependent extinction characteristics, *Int. J. of Energy Research*, 15(1991), 723-730.
- (19) Chang, C-H. and Bannerot, R. B., Effect of indirect insolation turbidity and bottom reflectance on transmittance in a solar pond, *ASME, Solar Engng.*, 1(1992), 657-664.
- (20) 金山公夫, 馬場弘, 遠藤登, 根本勉, ソーラポンド熱媒としての水および塩化ナトリウム水溶液の分光透過率, 日本機械学会論文集B, 62-601(1996), 3399-3405.
- (21) 金山公夫, 馬場弘, 遠藤登, 根本勉, 塩化ナトリウムおよび塩化カリウム水溶液の分光透過率および全透過率, 日本機械学会論文集B, 63-606(1997), 688-693.
- (22) 金山公夫, 馬場弘, 遠藤登, 根本勉, 塩化マグネシウム水溶液の分光透過率および全透過率, 日本機械学会論文集B, 63-606(1997), 694-698.
- (23) Bird, R. E., A simple, solar spectral model for direct-normal and diffuse horizontal irradiance, *Solar Energy*, 32-4(1984), 461-471.
- (24) Moon, P., J. Franklin Inst., 230(1940), 583-617.