ソーラポンド塩水溶液の全透過率の現実に即した計算法*
(入射光の表面反射及び透過軌跡を考慮して)李 相 一^{*1}, 金山 公 夫^{*2}
馬 場 弘^{*2}, 遠 藤 登^{*2}Calculation on Total Transmittance of Salt Water Solution for Solar Pond
Based on Real Conditions
(Considering Reflection on the Water Surface and Locus of Incident Ray)Xiang-Yi LI, Kimio KANAYAMA,
Hiromu BABA and Noboru ENDOH

With respect to four kinds of salt water solutions, NaCl, KCl, MgCl₂ and CaCl₂, for the working substance of a solar pond, the total transmittance in the salt gradient layer could be calculated more exactly by means of numerical and analytical methods under the real conditions. The relation between absorption coefficient and salt concentration of working substance was found in each monochromatic wavelength in the base of the data of the spectral transmittance measured by the authors. Subsequently, corresponding to the real phenomena under the consideration of reflection on the water surface and transmission locus in the water due to refraction of incident ray, we could calculate the total transmittance against the pond depth by integral method over wavelength. Next, a conventional method by 5-band, 8-band and 18-band divisions which were effective as practical use was applied to the calculation of the total transmittance approximately.

Key Words: Solar Pond, Spectral Transmittance, Total Transmittance, Absorption Coefficient, Reflection and Refraction of Incident Ray, Analytical and Numerical Solutions

1. ま え が き

太陽エネルギーは無尽蔵でありながら、密度の低いエネルギー源であるので、実用には集熱、蓄熱過程を経てそのエネルギー密度を高める必要がある。広い面積と、長時間かけて集熱、蓄熱が可能なソーラポンドはそのための一つの有効手段である。しかし、実用規模のソーラポンドの設計、計算に必要な基礎データを現物の実測により直接入手することは困難である。ソーラポンドの性能に影響する因子は多く、スケール効果もあるので、これらの諸因子を考慮して実際に即したシミュレーションを行い、より正確な計算が要求される。

塩水濃度勾配型ソーラポンドにおいて、太陽光に対する全透過率を正確に計算するためには塩水溶液の濃度と吸収係数の関係を把握する必要がある。著者ら^{(1)~(11)}はすでに各種塩水溶液の分光透過率の測定、

分光吸収係数の波長依存性の解析および分光吸収係数と入射光の相関関係の解析を行い、NaCl水溶液に対し波長積分法およびバンド分割法による全透過率の計算、および全透過率に及ぼす諸因子の影響等について研究を行った。それに基づいて本研究では、ソーラポンド熱媒体としてのNaCl、KCl、MgCl₂およびCaCl₂の4つの塩水溶液に対し、水深差分法およびLambert式による解析解を用いて全透過率を計算する際、波長帯を5、8および18バンド分割法の精度について詳しく検討し、波長積分法を基準にその信頼性を検証した。なお、計算の際、Fresnelの式よりポンド表面の入射光反射率の影響を検討し、エアマスおよび各液層の屈折率の変化による透過光の軌跡を考慮し、より現実に近い計算結果を得るように努めた。

2. 主 な 記 号

h : 太陽高度 °

L : 媒体またはポンド深さ m

X : 媒体または勾配層の深さ m

* 原稿受付 1997年5月6日.

^{*1} 正員, 北見工業大学大学院 (☎090-8507 北見市公園町165).^{*2} 北見工業大学工学部.

λ : 波長 μm i : 分割された波長帯 $I_{\lambda 0}$: 媒体またはポンドに入射する日射の分光強度
 $W/(\text{m}^2\mu\text{m})$ I_{λ} : 光または日射の分光強度 $W/(\text{m}^2\mu\text{m})$ I_{i0} : 波長帯 i で入射する日射強度 W/m^2 I_L : 水深 L での日射強度 W/m^2 k_{λ} : 分光吸収係数 $1/\text{m}$ k_i : 有効吸収係数(波長帯 i の部分吸収係数) $1/\text{m}$ τ_{λ} : 分光透過率 $(= I_{\lambda L} / I_{\lambda 0})$ τ_L : 水深 L における全透過率 τ_i : 波長帯 i の部分透過率 A_m : エアマス $(= 1 / \sinh)$ C : 塩水濃度 % S : 水中の光路長さ m θ : 光の入射角 [入射光線の垂線とのなす角度
 $(= \pi / 2 - h)$] ϕ : 光の屈折角(屈折光の垂線とのなす角度) ϕ_x : 水深 X での光の屈折角 n_0 : 空気の屈折率 n_1, n_2, n_3 : 媒体の屈折率 n_x : 水深 X での媒体の屈折率 ρ_0 : ポンド表面の反射率 α, β, γ : $k = f(C)$ の係数 $1/\text{m}$ δ : $I = f(A_m)$ の係数 $W/(\text{m}^2\mu\text{m})$ ξ, η, ζ : $I = f(A_m)$ の係数

3. 分光吸収係数と有効吸収係数

本研究で全透過率計算にかかわる波長積分法と簡便計算法を理解するために、先ずそれぞれの計算に用いられる分光吸収係数と有効吸収係数を明確に定義する必要がある。

3-1 分光吸収係数 光に対し、媒体の吸収性質に波長依存性があることはよく知られている。ゆえに、全透過率を正確に計算するには単波長ごとに取り扱う必要がある^{(7)~(11)}。

波長 λ なる単色光が、分光吸収係数 k_{λ} の媒体の微小な層を透過する際、光強度の変化は Lambert's Law より式(1)で表わされる。

$$dI_{\lambda x} = -k_{\lambda} I_{\lambda x} dx \quad (1)$$

媒体の分光吸収係数 k_{λ} は境界条件($X=0$ で $I_{\lambda x} = I_{\lambda 0}$, $X=L$ で $I_{\lambda x} = I_{\lambda L}$)より式(2)のように求めることができる。

$$k_{\lambda} = -\ln(I_{\lambda L} / I_{\lambda 0}) / L \quad (2)$$

さらに、 k_{λ} が既知の場合、その媒体の分光透過率 τ_{λ} は式(3)によって計算される。

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

媒体の全透過率は分光透過率の波長積分値であるので、式(4)より求められる。

$$\begin{aligned} \tau_L &= \frac{\int_0^{\lambda} \tau_{\lambda L} I_{\lambda 0} d\lambda}{\int_0^{\lambda} I_{\lambda 0} d\lambda} \\ &= \frac{\int_0^{\lambda} \exp(-k_{\lambda} L) I_{\lambda 0} d\lambda}{\int_0^{\lambda} I_{\lambda 0} d\lambda} \quad (4) \end{aligned}$$

3-2 有効吸収係数 波長積分で正確な全透過率値を得ることができるが、それには媒体の分光吸収特性を知る必要があり、波長ごとの大量な計算をしなければならない。そこで、対象とする波長域をいくつかのバンド数 n に分割して考える簡便計算法が^(7~11)有効となる。つまり、一つのバンド i には多くの単波長が含まれるが、同一バンド内は皆同じ性質を持っていると仮定する。ゆえに、簡便計算は波長積分に比べ計算が非常に簡単になるが、同じ条件での波長積分計算によりその精度を確認する必要がある。

簡便計算では λ が i に変わるので、式(1)~式(4)において k_{λ} の代わりに有効吸収係数 k_i を用いる。すなわち、式(1)~(4)は式(5)~(8)に書き換える。

$$dI_{ix} = -k_i I_{ix} dx \quad (5)$$

$$k_i = -\ln(I_{iL} / I_{i0}) / L \quad (6)$$

$$\tau_{iL} = \exp(-k_i \cdot L) \quad (7)$$

$$\tau_L = \frac{\sum_{i=1}^n I_{i0} \exp(-k_i L) \Delta \lambda}{\sum_{i=1}^n I_{i0} \Delta \lambda} \quad (8)$$

つまり、有効吸収係数 k_i はバンド i の部分吸収係数で、分光吸収係数 k_{λ} を用いて、式(9)より求められる。

$$k_i = - \ln \frac{\int_{\lambda_{i-1}}^{\lambda_i} I_{\lambda} \exp(-k_{\lambda} L) d\lambda}{L \cdot \int_{\lambda_{i-1}}^{\lambda_i} I_{\lambda} d\lambda} \quad (9)$$

本研究では、式(9)より大型ソーラポンドにおいてよくみられる水深 $L = 3 \text{ m}$ での有効吸収係数 k_i を求めた。

4. 表面反射と透過光の軌跡

従来の研究では全透過率を考える際、ほとんどの場合光の水面による反射を無視し、また光の水中透過距離をポンド水深と同一に考えて扱ってきた。しかし、図1に示すように太陽高度が h の時、入射角 θ_0 で入射する太陽光がポンド水面でその一部が反射されて減衰する。

空気層から液層に入る光の軌跡を考える場合、空気層と清水層および塩水各層の濃度の違いにより相対屈折率が変化するので、光は各層の境界面で方向が変わる。特に、濃度勾配層では濃度の変化より相対屈折率

Fig.1 Structure of the pond and transmitting locus of the incident ray

が連続的に変化するので、入射光の方向も次第に変化する。その結果は入射光の軌跡は点線のような曲線となり、ポンドの垂直深さより長い距離を通過することで、吸収も大きくなる。ゆえに、透過光を正確に見積もるには、入射光のポンド表面での反射と光が各層を透過する軌跡の真の長さを計算する必要がある。

4-1 ポンド水面による光の反射 水面に入射した光の反射は水の屈折率、光の入射角および波長によって変化する。水面が完全平面と仮定して光の水面における反射率 ρ_0 は Fresnel の式⁽¹⁴⁾より式(10)で計算される。

$$\rho_0 = \frac{1}{2} \left[\frac{\sin^2(\theta_0 - \phi_0)}{\sin^2(\phi_0 + \theta_0)} + \frac{\tan^2(\theta_0 - \phi_0)}{\tan^2(\phi_0 + \theta_0)} \right] \quad (10)$$

式中 ϕ_0 は表面における入射光の水中への屈折角で、入射角 θ_0 および清水層と空気の相対屈折率 n_1 (以下屈折率と略称) により変化し、式(11)および式(12)により計算される。

$$\phi_0 = \sin^{-1} [(\sin \theta_0) / n_1] \quad (11)$$

$$\theta_0 = \pi / 2 - h = \pi / 2 - \sin^{-1}(1 / A_m) \quad (12)$$

図2に式(10)および式(11)による計算結果を示す。図よりわかるように、 $h \leq 30^\circ$ ($A_m \geq 2$) の場合反射率が急に大きくなる。

Fig.2 Change of reflectance and transmittance on the water surface with solar altitude

塩水溶液の屈折率は塩の種類、濃度、温度および透過光の波長によって変化する。実際のソーラポンドの上部清水層は、勾配層からの塩分子の拡散により2～3%の塩分を持つので、屈折率が真水より若干大きくなる。しかし、濃度の薄い塩水層の屈折率を考える場合、温度が常温付近であれば、真水とそれほど差がなく、 $n = 1.33 \sim 1.35$ ^{(13), (15)} の範囲内である。そして、屈折率の変化幅 $\Delta n = 0.01$ による反射率の変化はわずか0.2%に過ぎないので、本研究では計算の便宜上清水層の屈折率を $n_1 = 1.34$ とおいた。

4-2 透過光の軌跡と真の長さ 図1に示すように入射光は式(11)で計算される屈折角 ϕ_0 で清水層を透過する。透過光の清水層での軌跡は直線であり、その光路長さ S_1 は式(13)で計算される。

$$S_1 = L_1 / \cos \phi_0 \quad (13)$$

つぎの濃度勾配層では水深の増加とともに濃度が徐々に大きくなるので、屈折率も次第に大きくなる。従って、屈折角 ϕ_x が徐々に小さくなり、勾配層での光

Fig.3 Refraction angle and locus of incident ray in differential layer of salt gradient zone

の進む方向は連続的に変化し、軌跡は曲線となる。ゆえに、図3に示すような勾配層内の任意の厚さ dX の微小層に対して次の微分式が成り立つ。

$$dX = \cos \phi_x \cdot dS \quad (14)$$

式(14)中の ϕ_x は水深 X における屈折角で、pond表面での太陽光の入射角度 θ_0 と微小なる薄層の屈折率 n_x のみに関係あり、薄層上の液層の存在とは無関係⁽¹⁴⁾に、式(15)で求められる。

$$\phi_x = \sin^{-1}(\sin \theta_0 / n_x) \quad (15)$$

式(15)中の n_x は水深 X の塩水の屈折率で、屈折率および水深との関係より次のように計算される。

まず、塩水の屈折率と濃度の関係は濃度-屈折率データ⁽¹⁵⁾を用いて、式(16)の一次式で表わされる。

$$n_x = a_1 + b_1 C \quad (16)$$

表1に各塩水溶液に対する最小自乗法により求めた係数 a_1 と b_1 の値を示す。

Table 1 Coefficients of the correlation equation(16)

Salt Water Solution	a_1	b_1
NaCl	1.3324	1.800E-03
KCl	1.3326	1.302E-03
MgCl ₂	1.3327	2.694E-03
CaCl ₂	1.3328	1.200E-03

次に、濃度勾配層では濃度と水深は一般に直線関係にあるので、次の式(17)で表わす。

$$C = C_1 + b_2 X \quad (17)$$

式中 C_1 は本研究において3%とし、 b_2 は勾配層厚さ L_2 と蓄熱層濃度 C_3 によって決められる ($b_2 = (C_3 - C_1) / L_2$)。式(17)を式(16)に代入して整理すると、屈折率と水深の関係を表す式(18)が得られる。

$$n_x = a + b X \quad (18)$$

勾配層を透過する光の光路長さ S_2 は式(14)の積分により求められる。すなわち、

$$S_2 = \int dS = \int (1 / \cos \phi_x) dX \quad (19)$$

式(15)、式(18)および式(19)より積分式(20)が導かれる。

$$\begin{aligned} S_2 &= \int_{X_1}^{X_2} dS = \int_{X_1}^{X_2} \frac{dX}{\cos \left[\sin^{-1} \left(\frac{\sin \theta_0}{a + b X} \right) \right]} \\ &= \int_{X_1}^{X_2} \frac{dX}{\left[1 - \left(\frac{\sin \theta_0}{a + b X} \right)^2 \right]^{1/2}} \end{aligned} \quad (20)$$

式(20)より勾配層内を透過する光の光路長さを正確に計算することができる。

蓄熱層での光路長さ S_3 は、清水層と同じく式(11)と式(13)の形で計算される。

式(4)と式(8)を用いてpond水の全透過率を計算する際、分子に $(1 - \rho_0)$ をかけて修正し、 L および X を S に代えて計算する。

5. 全透過率の簡便計算法

全透過率計算には波長に対し、単色光ごとに取り扱う波長積分法と有限バンドごとに取り扱う簡便法がある^{(7)~(9)}。また、水深に対しては、Lambert式の厳密解析と数値解析法が適用できる。

清水層と蓄熱層では濃度が均一なので、いずれの計算法にも式(4)あるいは式(8)を用いて直接透過率を計算することができる。

濃度が水深によって連続的に変化する濃度勾配層に対しては、媒体の吸収係数が濃度によって変化するので、直接式(4)あるいは式(8)による計算ができず、式(1)の解析解あるいは式(3)を用いて数値計算により計算しなければならない。しかし、いずれの場合も吸収係数の濃度による変化の関係を把握する必要があ

る。著者ら^{(10), (11)}のこれまでの研究により、吸収係数の濃度による変化は式(21)のような二次関数でよく相関されることが分っており、NaCl水溶液に対してすでに種々の計算を行ってきた。

$$k = \alpha + \beta C + \gamma C^2 \quad (21)$$

表2に4つの塩水溶液に対する、簡便計算に用いられる相関式(21)の係数をバンドごとに示す。

透過率計算に使われる入射光(Moon⁽¹²⁾の日射スペクトル)に対しては、著者ら^{(10), (11)}によるエアマス(A_m)との相関が求められており、式(22)でその相関関係が示される。本研究ではこの相関式を用いて入射光を計算した。表3に式(22)の係数を単波長ごとに示す。

$$I = \delta \cdot \exp(\xi A_m + \eta A_m^2 + \zeta A_m^3) \quad (22)$$

簡便法計算では、表2で示す各バンドの分割法と同様に入射光を分割し、同じバンド中の分光入射光強度を積分してそのバンドの入射光とした。

5-1 水深差分法 水深差分法は勾配層がいくつかの均一層から成ると仮定して行う数値計算方法である。つまり、勾配層を充分薄く切った場合、薄い層に対して濃度は一定と見なしてよく、式(3)がそのまま適用できる。各層においての入射光は、図4に示すように上の層の透過光が次の層の入射光となる。つまり、差分化された任意の液層jに対し、次の式が成り立つ。

$$I_{i,j} = \frac{I_{i,j-1}}{I_{i,j-1}} = \exp(-k_i \cdot \Delta X) \quad (23)$$

図4および式(23)中のiは入射光あるいは分割バンドの番号で、jは勾配層の分割番号である。

全体としては、清水層の透過光が勾配層の最初の入射光となり、勾配層の透過光がまた蓄熱層の入射光となる。ゆえに、清水層の透過光が求められれば、式(23)を繰り返して計算し、最終の層(j=m)で勾配層の透過光が計算される。差分数mを充分大きくすることにより、正確な透過率値が得られることになる。

5-2 Lambert式の解析解 式(1)において、熱媒層に光が垂直に入射し、吸収係数kが定数の場合、解析解が式(3)の様に簡単に求められるが、勾配層ではkが濃度によって変わるのでkの各水深に対する変化関係を把握する必要がある。つまり、 $k = f(X)$ が

Table 2 Coefficient of correlation of equation(21)

Band i	Wavelength λ (μ m)	NaCl			KCl		
		α	β	γ	α	β	γ
1	0.30~0.41	2.71E-01	-8.26E-03	-7.58E-06	2.33E-01	8.43E-03	-9.12E-05
2	0.41~0.55	9.79E-02	-4.24E-03	-5.82E-05	1.04E-01	4.73E-03	-8.43E-06
3	0.55~0.61	1.94E-01	2.41E-03	-1.67E-04	1.89E-01	9.89E-03	-7.17E-05
4	0.61~0.70	4.29E-01	1.19E-02	-4.88E-04	4.27E-01	1.69E-02	-2.54E-04
5	0.70~1.20	8.98E+00	1.79E-02	-1.33E-03	9.10E+00	1.29E-02	-1.24E-03
1	0.30~0.41	2.71E-01	-8.26E-03	-7.58E-06	2.33E-01	8.43E-03	-9.12E-05
2	0.41~0.55	9.79E-02	-4.24E-03	-5.82E-05	1.04E-01	4.73E-03	-8.43E-06
3	0.55~0.61	1.94E-01	2.42E-03	-1.67E-04	1.89E-01	9.89E-03	-7.17E-05
4	0.61~0.70	4.29E-01	1.19E-02	-4.88E-04	4.27E-01	1.69E-02	-2.54E-04
5	0.70~0.74	1.06E+00	1.69E-02	-8.24E-04	1.05E+00	1.95E-02	-4.38E-04
6	0.74~0.81	2.71E+00	1.45E-02	-6.32E-04	2.71E+00	1.43E-02	-3.52E-04
7	0.81~0.84	4.09E+00	-7.81E-04	-6.33E-04	4.08E+00	-7.15E-04	-2.08E-04
8	0.84~1.20	3.54E+01	-7.90E-02	-1.12E-03	3.60E+01	-5.58E-02	-4.17E-03
1	0.30~0.38	5.61E-01	-2.80E-02	4.14E-04	5.36E-01	-1.12E-02	4.84E-04
2	0.38~0.42	1.74E-01	-4.82E-03	-3.73E-05	1.70E-01	5.34E-03	-4.77E-05
3	0.42~0.45	8.52E-02	-5.41E-03	8.59E-05	9.02E-02	4.31E-03	-3.04E-05
4	0.45~0.50	7.74E-02	-5.10E-03	1.04E-04	8.94E-02	3.87E-03	-2.34E-05
5	0.50~0.55	1.17E-01	-3.05E-03	1.47E-05	1.20E-01	5.28E-03	-2.38E-05
6	0.55~0.59	1.63E-01	1.11E-03	-1.18E-04	1.58E-01	8.95E-03	-5.12E-05
7	0.59~0.61	2.59E-01	4.90E-03	-2.62E-04	2.53E-01	1.19E-02	-1.16E-04
8	0.61~0.65	3.73E-01	9.51E-03	-3.89E-04	3.67E-01	1.58E-02	-2.20E-04
9	0.65~0.68	4.51E-01	1.32E-02	-5.29E-04	4.53E-01	1.73E-02	-2.55E-04
10	0.68~0.71	5.61E-01	1.50E-02	-6.61E-04	5.63E-01	1.88E-02	-3.40E-04
11	0.71~0.74	1.23E+00	-3.68E-03	-1.87E-04	1.25E+00	1.98E-02	-4.83E-04
12	0.74~0.78	2.83E+00	2.36E-02	-9.78E-04	2.83E+00	1.53E-02	-3.07E-04
13	0.78~0.81	2.58E+00	1.09E-03	-2.22E-04	2.57E+00	1.32E-02	-3.88E-04
14	0.81~0.84	2.72E+00	2.29E-02	-2.43E-04	2.72E+00	5.88E-03	-4.12E-04
15	0.84~0.88	4.60E+00	3.21E-03	-7.34E-04	4.63E+00	3.54E-03	-3.30E-04
16	0.88~0.92	6.23E+00	-5.28E-02	-6.37E-04	6.28E+00	-3.86E-02	-7.82E-04
17	0.92~0.96	9.98E+00	1.47E-03	-1.66E-03	1.71E+01	-3.80E-02	-2.34E-04
18	0.92~0.96	1.17E+01	-7.19E-04	-2.19E-05	2.81E+01	8.93E-03	-4.57E-03
Band i	Wavelength λ (μ m)	MgCl ₂			CaCl ₂		
		α	β	γ	α	β	γ
1	0.30~0.41	2.65E-01	-1.32E-02	4.93E-04	2.21E-01	3.81E-02	1.09E-03
2	0.41~0.55	1.07E-01	-4.94E-04	2.15E-04	9.94E-02	2.46E-02	7.92E-04
3	0.55~0.61	1.96E-01	1.07E-02	-8.12E-05	1.88E-01	3.07E-02	2.80E-04
4	0.61~0.70	4.42E-01	1.92E-02	-3.13E-04	4.32E-01	3.47E-02	1.63E-04
5	0.70~1.20	9.04E+00	2.85E-02	-6.62E-04	8.98E+00	3.77E-02	-5.97E-04
1	0.30~0.41	2.65E-01	-1.32E-02	4.93E-04	2.12E-01	3.94E-02	1.05E-03
2	0.41~0.55	1.07E-01	-5.02E-04	2.16E-04	9.94E-02	2.46E-02	7.92E-04
3	0.55~0.61	1.96E-01	1.07E-02	-8.11E-05	1.88E-01	3.08E-02	2.77E-04
4	0.61~0.70	4.42E-01	1.92E-02	-3.13E-04	4.32E-01	3.47E-02	1.63E-04
5	0.70~0.74	1.07E+00	2.49E-02	-5.57E-04	1.06E+00	3.58E-02	1.19E-05
6	0.74~0.81	2.72E+00	2.88E-02	-6.35E-04	2.71E+00	3.17E-02	3.04E-04
7	0.81~0.84	4.09E+00	2.03E-02	-2.23E-04	4.08E+00	2.27E-02	1.85E-04
8	0.84~1.20	3.56E+01	3.46E-02	-5.04E-04	3.54E+01	-2.51E-02	-1.11E-03
1	0.30~0.38	5.50E-01	-3.93E-02	1.18E-03	5.35E-01	3.09E-02	1.50E-03
2	0.38~0.42	1.75E-01	-5.83E-04	7.44E-05	1.50E-01	3.31E-02	1.14E-03
3	0.42~0.45	9.91E-02	-5.47E-04	1.23E-04	9.21E-02	2.10E-02	1.52E-03
4	0.45~0.50	9.03E-02	-2.59E-03	2.78E-04	8.49E-02	2.19E-02	9.29E-04
5	0.50~0.55	1.18E-01	3.65E-03	1.18E-04	1.15E-01	2.68E-02	4.57E-04
6	0.55~0.59	1.64E-01	9.81E-03	-5.86E-05	1.55E-01	2.99E-02	3.17E-04
7	0.59~0.61	2.64E-01	1.26E-02	-1.30E-04	2.57E-01	3.24E-02	2.00E-04
8	0.61~0.65	3.81E-01	1.66E-02	-2.41E-04	3.73E-01	3.39E-02	1.85E-04
9	0.65~0.68	4.71E-01	2.03E-02	-3.39E-04	4.59E-01	3.52E-02	1.54E-04
10	0.68~0.71	5.74E-01	2.36E-02	-4.53E-04	5.64E-01	3.55E-02	1.19E-04
11	0.71~0.74	1.27E+00	2.56E-02	-6.07E-04	1.27E+00	3.62E-02	4.36E-05
12	0.74~0.78	2.85E+00	2.77E-02	-7.09E-04	2.82E+00	3.16E-02	3.01E-04
13	0.78~0.81	2.57E+00	2.96E-02	-5.51E-04	2.53E+00	3.16E-02	4.25E-04
14	0.81~0.84	2.73E+00	2.51E-02	-5.42E-04	2.68E+00	2.14E-02	4.29E-04
15	0.84~0.88	4.63E+00	2.46E-02	-5.77E-04	4.62E+00	2.49E-02	1.35E-04
16	0.88~0.92	6.27E+00	-8.01E-03	1.31E-03	6.27E+00	1.79E-02	-1.77E-04
17	0.92~0.96	1.71E+01	5.28E-02	-1.35E-03	1.72E+01	1.22E-02	-1.91E-03
18	0.92~0.96	2.77E+01	5.01E-02	-5.68E-04	2.75E+01	2.61E-02	-1.82E-03

Fig.4 Mathematical model of salt gradient layer

わかれれば式(1)を水深Xに対して積分して解析解を得ることが可能である。

濃度と水深および吸収係数と濃度の関係は、それぞれ式(17)および式(21)で表されるので、これら2式より吸収係数と水深の関係が式(24)のように導かれる。

Table 3 Coefficient of correlation for Moon's spectrum in the equation (22)

$\lambda(\mu\text{m})$	a	b	c	d	$\lambda(\mu\text{m})$	a	b	c	d
0.30	450	-3.11E+00	-6.00E-01	0.00E+00	0.72	1443	-3.31E-01	4.32E-02	-4.73E-03
0.30	465	-1.98E+00	-8.32E-01	0.00E+00	0.73	1406	-2.18E-01	2.54E-02	-2.01E-03
0.30	520	-1.70E+00	-6.74E-01	0.00E+00	0.74	1366	-1.10E-01	-1.70E-02	3.15E-03
0.31	555	-1.61E+00	-5.12E-01	0.00E+00	0.75	1310	6.30E-02	-1.79E-01	2.41E-02
0.31	590	-1.58E+00	-3.52E-01	0.00E+00	0.76	1289	-5.12E-01	7.61E-02	-9.28E-03
0.31	625	-1.57E+00	-2.27E-01	0.00E+00	0.77	1269	-1.67E-01	1.97E-02	-1.90E-03
0.31	647	-1.51E+00	-1.50E-01	0.00E+00	0.78	1220	-1.92E-01	2.63E-02	-2.68E-03
0.31	669	-1.48E+00	-7.99E-02	0.00E+00	0.79	1186	-1.65E-01	1.97E-02	-1.70E-03
0.32	691	-1.43E+00	-3.00E-02	0.00E+00	0.80	1132	-1.30E-02	-9.17E-02	1.24E-02
0.32	713	-1.39E+00	2.90E-03	0.00E+00	0.81	1101	-2.31E-01	4.00E-03	-3.10E-04
0.32	735	-1.33E+00	1.12E-02	0.00E+00	0.82	1075	-2.27E-01	6.27E-02	-6.68E-03
0.33	810	-1.01E+00	-1.38E-02	0.00E+00	0.83	1022	-7.60E-02	-3.40E-03	5.20E-04
0.34	850	-9.11E-01	2.33E-02	0.00E+00	0.84	987	-5.70E-02	-1.10E-02	1.43E-03
0.35	910	-7.82E-01	-3.30E-03	0.00E+00	0.85	982	-7.00E-02	-5.70E-03	7.00E-04
0.36	995	-6.59E-01	-7.49E-02	1.81E-02	0.86	964	-8.90E-02	1.22E-02	-2.28E-03
0.37	1090	-6.62E-01	-3.37E-02	1.21E-02	0.87	936	2.80E-02	-8.28E-02	1.13E-02
0.38	1192	-7.48E-01	8.42E-02	-1.22E-02	0.88	921	-1.62E-01	-3.27E-02	4.67E-03
0.39	1293	-6.83E-01	7.24E-02	-1.14E-02	0.89	917	-3.21E-01	2.16E-02	-2.27E-03
0.40	1392	-5.18E-01	-3.07E-02	7.01E-03	0.90	885	-3.09E-01	1.10E-03	-1.40E-04
0.41	1478	-6.11E-01	7.38E-02	-8.55E-03	0.91	857	-3.51E-01	-5.04E-02	7.67E-03
0.42	1832	-4.29E-01	-1.65E-02	2.75E-03	0.92	840	-5.77E-01	2.09E-02	-1.37E-02
0.43	1908	-3.94E-01	-2.56E-02	4.22E-03	0.93	825	-7.95E-01	1.10E-03	0.00E+00
0.44	2012	-3.24E-01	-3.88E-02	5.21E-03	0.94	815	-5.79E-01	-1.20E-02	9.10E-03
0.45	2099	-2.75E-01	-5.25E-02	6.88E-03	0.95	788	-3.64E-01	8.99E-02	-1.25E-02
0.46	2160	-2.79E-01	-3.73E-02	5.19E-03	0.96	765	-1.55E-01	1.54E-02	-1.61E-03
0.47	2166	-2.50E-01	-4.03E-02	5.54E-03	0.97	705	4.58E-01	-3.58E-01	4.97E-02
0.48	2145	-2.45E-01	-2.60E-02	3.03E-03	0.98	735	-6.50E-02	9.00E-04	-8.00E-05
0.49	2112	-2.24E-01	-2.90E-02	3.61E-03	0.99	725	-6.20E-02	-2.00E-04	1.30E-04
0.50	2082	-2.18E-01	-2.67E-02	3.29E-03	1.00	710	-5.60E-02	-3.80E-03	6.80E-04
0.51	2009	-1.92E-01	-3.17E-02	3.83E-03	1.01	695	-5.50E-02	-2.80E-03	4.80E-04
0.52	1978	-1.95E-01	-2.73E-02	3.37E-03	1.02	684	-5.10E-02	-5.70E-03	9.60E-04
0.53	1960	-1.95E-01	-2.65E-02	3.46E-03	1.03	670	-4.70E-02	-6.20E-03	9.60E-04
0.54	1946	-1.87E-01	-2.80E-02	3.62E-03	1.04	658	-3.90E-02	-1.35E-02	1.48E-03
0.55	1937	-1.93E-01	-2.45E-02	3.28E-03	1.05	640	-4.30E-02	-2.41E-02	3.13E-03
0.56	1928	-1.99E-01	-2.05E-02	2.81E-03	1.06	631	-7.50E-02	-1.20E-02	1.78E-03
0.57	1908	-1.85E-01	-2.11E-02	2.84E-03	1.07	615	-6.20E-02	-1.79E-02	2.58E-03
0.58	1879	-1.88E-01	-2.26E-02	3.00E-03	1.08	610	-7.80E-02	-8.20E-03	1.38E-03
0.59	1870	-1.95E-01	-1.83E-02	2.58E-03	1.09	599	-6.60E-02	-9.00E-03	1.21E-03
0.60	1846	-1.85E-01	-2.19E-02	3.10E-03	1.10	580	-3.81E-01	3.71E-02	-2.75E-02
0.61	1814	-1.83E-01	-1.68E-02	2.62E-03	1.11	575	-5.42E-01	-1.09E-01	0.00E+00
0.62	1795	-1.82E-01	-1.45E-02	2.56E-03	1.12	565	-5.42E-01	-1.02E-01	0.00E+00
0.63	1761	-1.85E-01	-5.80E-03	1.29E-03	1.13	550	-1.16E-01	-7.25E-02	0.00E+00
0.64	1732	-1.85E-01	-1.50E-03	8.60E-04	1.14	540	-6.13E-01	8.70E-03	0.00E+00
0.65	1694	-1.76E-01	1.00E-03	4.10E-04	1.15	530	-3.95E-01	-5.88E-02	1.60E-02
0.66	1661	-1.77E-01	5.20E-03	-6.00E-05	1.16	524	-3.30E-01	1.83E-02	-2.26E-03
0.67	1619	-1.67E-01	4.40E-03	2.00E-05	1.17	511	-2.47E-01	2.11E-02	-3.04E-03
0.68	1587	-1.65E-01	3.50E-03	3.60E-04	1.18	500	-1.99E-01	8.30E-03	-1.17E-03
0.69	1529	-2.13E-01	-1.00E-03	5.40E-04	1.19	499	-2.13E-01	1.57E-02	-1.93E-03
0.70	1515	-1.77E-01	1.52E-02	-1.34E-03	1.20	497	-1.77E-01	2.68E-02	-3.75E-03
0.71	1471	-1.01E-01	-4.18E-02	4.43E-03					

$$k = (\alpha + \beta C_1 + \gamma C_1^2) + (\beta b_2 + 2 b_2 C_1 \gamma) X + \gamma b_2^2 X^2 = P + Q X + R X^2 \quad (24)$$

ここで、 $P = (\alpha + \beta C_1 + \gamma C_1^2)$ 、 $Q = (\beta b_2 + 2 b_2 C_1 \gamma)$ 、 $R = \gamma b_2^2$ 。

式(24)を式(1)に代入して積分すると、単色光あるいは単バンド光に対するLambert式の解析解が式(25)で求められる。すなわち、

$$\int dI = \int [-I(P + QX + RX^2)] dX$$

これを不定積分して

$$\ln I_x = -(PX + QX^2/2 + RX^3/3) + C_0 \quad (25)$$

ただし、 C_0 は積分定数である。

式(25)に境界条件($X = L_1$ で $I = I_1$ 、 $X = L_2$ で $I = I_2$)を代入して定積分値を計算すると、勾配層の透過前後の光強度、つまり透過率が求められる。

$$\tau = I_2 / I_1 \quad (26)$$

式(25)および式(26)は波長積分計算と、簡便計算のどちらにも適用できる。ただし、吸収係数と入射光を求める式(21)および式(22)の係数は、波長積

分計算⁽¹¹⁾と簡便計算とを区別して、それぞれの値を使い、さらに全透過率を求める場合は、式(4)および式(8)を使い分けて計算する。

6. 計算結果および検討

4種類の塩類水溶液に対し、数値解析および厳密解析を3種類の分割簡便計算法に適用して全透過率計算を行った。何れの解析も、波長積分計算により簡便法の計算結果の信頼性を検証した。また、ほとんどの場合、KClとMgCl₂の計算結果が極めて近似するので、両者はKClで代表させる。

表4に本研究における波長積分法による全透過率の計算結果を、光の表面反射および境界面での屈折を考慮しない計算値と比較して表示した。表より表面反射と屈折の全透過率への影響は100分率で大体3ポイント程度(1.3~3.8)で、透過性の悪い塩類ほどその影響が大きいことがわかる。

Table 4 Comparison of τ_L at pond depth $L = 3$ m under the different conditions

		τ_L^*	τ_L^{**}	τ_L^{***}
NaCl	considering ρ_o	0.317	0.338	0.294
	neglecting ρ_o	0.327	0.350	0.304
KCl	considering ρ_o	0.184	0.220	0.144
	neglecting ρ_o	0.190	0.227	0.149
MgCl ₂	considering ρ_o	0.186	0.222	0.143
	neglecting ρ_o	0.192	0.230	0.148
CaCl ₂	considering ρ_o	0.019	0.038	0.006
	neglecting ρ_o	0.020	0.040	0.006

Conditions of calculation: *correct, with refraction, ** $\theta_o = 0$, normal incidence, *** $\theta_o = \phi$, tilted incidence
 $A_m = 1.5$, $C_1 = 3\%$, $C_2 = 24\%$,
 $L_1 = 0.3$ m, $L_2 = 1.4$ m, $L_3 = 1.3$ m

Fig.5 Effect of number of the divided wavelength band in conventional calculation

図5に全透過率の計算例として、3種類の分割簡便法の計算結果と波長積分の計算結果を比較して示した。図より明らかなように分割数の増加によって簡便計算値が波長積分値により接近し、8バンド分割でかなり正確な値が得られることがわかる。

Fig.6 Comparison between differential and analytical methods in calculation of total transmittance

図6に全透過率の水深差分法による計算値と解析解による計算の値を比較して示した。図より、勾配層を2cmごとの薄層に切って行った水深差分法による数値計算値は、解析解にかなり近いことがわかった。

7. むすび

ソーラポンドの透過率の予測において、従来からの入射光の性質とポンド水の物性のほか、今回は特にポンド水の屈折率にもとづく光の水面での反射率と水中透過光の軌跡から真の光路長さを求めて、全透過率を正確に計算することを試み、全透過率値に対するそれらの影響を定量的に検討した。

その結果、NaCl、KCl、MgCl₂およびCaCl₂の4種類の塩類水溶液に対し、実際のソーラポンドに見られるこれらの現象を取り入れて、波長積分法によりより正確な全透過率を算出することができた。また、これら塩類水溶液の波長積分計算と簡便計算に用いられる吸

収係数をデータベース化し、濃度勾配層に対して数値計算法とLambert式の厳密解法による全透過率の計算を試みた。

5バンド、8バンドおよび18バンド分割簡便法による全透過率の計算結果について、波長積分法で得られた正確な計算値と比較してその信頼性を検討し、8バンド分割簡便法で十分信頼できる全透過率計算値が得られることが分かった。

参 考 文 献

- (1) Kanayama K. and Baba H., Proc. of the 1st Asian Thermophysic. Propt. Conf., (1986), 551-556.
- (2) Kanayama K. and Baba H., Sol. Engng., 1 (1987), 166-171.
- (3) Kanayama K. and Baba H., J. Solar Energy Engng., 110 (1988), 113-119.
- (4) 金山公夫・馬場 弘・遠藤 登・柳田英二, 日本太陽エネルギー学会、日本風力エネルギー協会合同研究発表講演論文集, (1992), 159-162.
- (5) 金山公夫・馬場 弘・遠藤 登・柳田英二, 第30回日本伝熱シンポジウム講演論文集, (1993), 964-966.
- (6) 金山公夫・馬場 弘・遠藤 登・柳田英二, 第14回日本熱物性シンポジウム講演論文集, (1993), 379-382.
- (7) 金山公夫・馬場 弘・遠藤 登・根本 勉, 日本機械学会論文集, B, 62-601 (1996), 3399-3405.
- (8) 金山公夫・馬場 弘・遠藤 登・根本 勉, 日本機械学会論文集, B, 63-606 (1997), 332-337.
- (9) 金山公夫・馬場 弘・遠藤 登・根本 勉, 日本機械学会論文集, B, 63-606 (1997), 338-342.
- (10) 金山公夫・李相一・馬場 弘, 熱物性, 11-2 (1997), 34-38.
- (11) 金山公夫・李相一・馬場 弘・遠藤 登, 太陽/風力エネルギー講演論文集, (1997), 437-440.
- (12) Moon P., J. Franklin Inst., 230 (1940), 583.
- (13) Defant A., Physical Oceanography, 1 (1961), 58, Pergamon Press, New York.
- (14) 山口重雄, 屈折率, (1981), 14, 共立出版.
- (15) 日本海水学会, 海水利用ハンドブック, (1974), 156.