

バルク法による河川水面蒸発量の研究

A Study on Evaporation from River Surface by Bulk Formula

北見工業大学 正員 佐渡 公明

1. まえがき

河川の水温や結水現象は、流れと水体に対する熱収支により説明される。この熱収支の1つの大きな要素が蒸発量による潜熱輸送量である。海、湖、貯水池の水面蒸発量にくらべ、河川水面の蒸発量はそれほど研究されていない。本論文では、最初に水面蒸発量を算定するために従来種々提案されているバルク公式を整理し、蒸発量に及ぼす風速、接水気層の安定度の影響を検討する。

次に、河川に対して特に問題となる表面流速とフェッチについて述べる。最後に、1981年9月23日～9月30日と1979年6月24日～7月1日の2回、常呂川・若松大橋で実施した熱収支観測のうち蒸発量についてバルク法によるHefner湖の式、近藤の式、修正Shulyakovskiy式を比較検討する。

2. バルク法による水面蒸発量の算定

水面蒸発量の評価は一般に、空気力学的方法(バルク法、傾度法、渦相関法)、熱収支法、水収支法(河川水体、接水気層)、バルク法と熱収支法の混合法がある。これらを河川に適用する場合、水体の水収支法は、蒸発量の値が0～10mm/dayなので流量測定の誤差の中に入り不可能である。接水気層中の水収支法は観測が3次元で大規模になる。熱収支法と混合法は、水体に対する熱収支機構が完全に解明されたとはいえないし(河床伝熱量の算定方法、日射の吸収・反射など)、さらに各熱収支要素を観測するのはかなり繁雑である。渦相関法では、垂直方向の風速と湿度の変動量を測定する応答性の早い測定器が必要である。傾度法は水面上2点の高さで風速、湿度、気温を測定しなければならない。バルク法は1点の高さの風速、湿度、気温と水面温度で蒸発量が計算でき、傾度法より測定器の精度を必要としない。

結局、河川水面蒸発量の実用的算定法としてはバルク法が最も優れている。

2-1 従来の研究

バルク法による水面蒸発量 E は、次式で表わされる。
$$E = \Psi (e_0 - e_z) \quad (1)$$

ここに、 e_0 は水面温度 θ_0 における飽和水蒸気圧、 e_z は水面上高さ z の水蒸気圧、 Ψ は風速と安定度の関数で蒸発係数と呼ぶことにする。

さて、これまで式(1)の形式のバルク公式が数多く提案されている。例えばPaily et al.¹⁾は野外観測に基づく公式30個、蒸発皿や実験室での観測に基づく公式12個、ソ連人とポーランド人によって提案された公式21個、総計63個を整理している。これら多数の蒸発式は風速・気温・湿度を測定する水面上の高さ、観測時間の長さが異なり、対象水域も貯水池、湖、冷却池、海、蒸発皿とまちまちである。

測定高度は水面上2mが一般的で、式(1)は次式となる。
$$E = \Psi (e_0 - e_2) \quad (2)$$

蒸発係数 Ψ を高さ2mの風速 v_2 の1次関数で表わしたバルク公式を経験式と呼んでおり、代表的なのが次のZaykovの式⁴⁾とMarciano & HarbeckによるHefner湖の式²⁾である。

$$\text{Zaykov 式 (1949)} \quad E = (0.15 + 0.108 v_2)(e_0 - e_2) \quad (3)$$

$$\text{Hefner 湖の式 (1954)} \quad E = 0.131 v_2 (e_0 - e_2) \quad (4)$$

ここに、 E : mm/day, v_2 : (m/s), e_0 : (mb), e_2 : (mb)

蒸発係数の中に、風による強制対流以外に浮力による自由対流を考慮しているか否かも重要な問題である。冷却池や実験室では勿論自由対流が卓越するが、現地水域でも風速が弱く、水面温度が気温より高い不安定時には自由対流を考慮した Ψ の形式が必要になる。Paily et al.が整理した公式には、自由対流を考慮した式は3個入っている。以下のRymsha & Dochenkoの式¹⁾、Shulyakovskiy式⁴⁾、修正

Shulyakovskiy式³⁾である。さらに、T. V. A. の式²⁾と近藤の式⁵⁾を加えて以下に年代順に示す。

$$\text{Rymsha \& Dochenko 式 (1958)} \quad E = \{ 0.209 + 9.107 \times 10^{-3} (\theta_0 - \theta_{a2}) + 0.1018 v_2 \} (e_0 - e_2) \quad (5)$$

$$\text{Shulyakovskiy 式 (1969)} \quad E = \{ 0.15 + 0.112 v_2 + 0.094 (\Delta\theta_v)^{1/3} \} (e_0 - e_2) \quad (6)$$

$$\text{T. V. A. の式 (1972)} \quad E = 0.131 v_2 f(R_i) (e_0 - e_2) \quad (7)$$

$$\text{修正 Shulyakovskiy 式 (1973)} \quad E = \{ 0.112 v_2 + 0.094 (\Delta\theta_v)^{1/3} \} (e_0 - e_2) \quad (8)$$

$$\text{近藤の式 (1974)} \quad E = (5.37 \times 10^4 / p) \rho_{a2} C_E(2) v_2 (e_0 - e_2) \quad (9)$$

ここに、 E : (mm/day) , θ_0 : 水面温度 ($^{\circ}\text{C}$) , θ_{a2} : 2 m の気温 ($^{\circ}\text{C}$) , e_0 : (mb) , e_2 : (mb)
 v_2 : (m/s) , p : 気圧 (mb) , ρ_{a2} : $z = 2\text{ m}$ の空気密度 (Kg/m^3) , $\Delta\theta_v$: 水面上の飽和空気 の 仮温度 T_{0v} (K) と 水面上 2 m の 湿潤空気 の 仮温度 T_{2v} (K) の 差

$$= T_{0v} - T_{2v} = (\theta_0 - \theta_{a2}) + 0.378 \{ (\theta_0 + \delta) e_0 - (\theta_{a2} + \delta) e_2 \} \quad (10)$$

$\delta = 273.15$, (ただし $\Delta\theta_v < 0$ のときは $\Delta\theta_v = 0$ とする。)

$C_E(2)$: 水面上 2 m における水蒸気輸送に対するバルク輸送係数 , R_i : リチャードソン数

Rymsha & Dochenko式は冬期の河川水面蒸発量のデータに基づいた式である。Shulyakovskiyは、平板上の自由対流熱輸送の結果からZaykov式(3)に水蒸気の浮力効果も含んだ自由対流項を加えた式(6)を提案した。T. V. A.の式は、Hefnar湖の式に R_i の関数(安定時 $(1+34R_i)^{-0.8}$ 、中立時1、不安定時 $(1-22R_i)^{0.8}$)を掛けた形であるが、現地データによる検証がなされておらず試験的な式である。これを他の式と比較すると不安定時で自由対流による蒸発量を過大評価している。

Ryan & Stolzenbach³⁾は実験室内の蒸発実験で式(8)の自由対流項を確かめ、冷却池データと検証して式(6)が平均的に大きな蒸発量を与えるためこれを修正して提案したのが修正Shulyakovskiy式である。近藤⁵⁾は海面、湖面を対象に運動量・水蒸気・顕熱輸送量の算定式を半理論的に導いた。運動量・水蒸気・顕熱輸送による高さを $z\text{ m}$ におけるバルク輸送係数を中立時に対しそれぞれ $C_{D0}(z)$ 、 $C_{E0}(z)$ 、 $C_{H0}(z)$ とし；非中立時に対し $C_D(z)$ 、 $C_E(z)$ 、 $C_H(z)$ と表わし；高さ $z\text{ m}$ の風速を v_z とすると、近藤の式の誘導過程は次の通りである。

中立時の場合、既往の研究結果を整理してドルトン数と $C_{D0}(10)$ を v_{10} の関数で表わし、これから $C_{E0}(10)$ 、 $C_{H0}(10)$ を v_{10} で表わす実験式を $0.3 < v_{10} < 50\text{ m/s}$ に対し求めた。任意の高さに対する $C_{D0}(z)$ 、 $C_{E0}(z)$ 、 $C_{H0}(z)$ は風速の対数分布法測から逐次近似法で求めている。なお、風速・比湿・気温分布に対する粗度高さ z_0 、 z_q 、 z_θ はこれらのバルク輸送係数から計算できる。非中立時の場合、 $C_D(z)/C_{D0}(z)$ 、 $C_E(z)/C_{E0}(z)$ 、 $C_H(z)/C_{H0}(z)$ を次の安定度パラメータ S_K

$$S_K = S_0 \frac{|S_0|}{|S_0| + 0.01} \quad S_0 = \frac{\theta_0 - \theta_{a2}}{v_z^2 \{ 1 + \log_{10} (10/z) \}^2} \quad (11)$$

の関数で表わしている。 S_K の負、0、正が安定、中立、不安定になる。

さて、仮温度は聞きなれない言葉であるが、その定義は「湿潤空気を、それと同じ圧力と密度の乾燥空気におきかえた時にその乾燥空気を持つべき温度」である。水蒸気は乾燥空気より軽いから、仮温度は湿潤空気自体の温度より高い。図-1は水温・気温の差 $\theta_0 - \theta_{a2}$ と両者の仮温度差 $\Delta\theta_v$ の違いを表わしている。

これから水面上と高さ 2 m の空気に含まれる水蒸気量の差が大ききほど $\Delta\theta_v$ と $\theta_0 - \theta_{a2}$ の差が大きくなるのがわかる。なお式(10)の $\Delta\theta_v$ の近似式は精度が高く、誤差は $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 以内である。

$\Delta\theta_v$ と $\theta_0 - \theta_{a2}$ の安定度の関係は表-1のように対応する。 $\Delta\theta_v$ の0と $\theta_0 - \theta_{a2}$ の0の対応は湿度100%のときである。

表-2は修正Shulyakovskiy式とRymsha & Dochenko式において自由対流による蒸発量が全蒸発量に占める割合を示している。不安定になるほど自由対流の割合が大きくなっている。

表-1 仮温度差、水温・気温差と安定度の関係

$\Delta\theta_v$	$\theta_0 - \theta_{a2}$
正 (U)	正 (U) U: Unstable
0 (N)	0 (N) N: Neutral
負 (S)	負 (S) S: Stable

2-2 修正 Shulyakovskiy 式, Hefner 湖の式および近藤の式の比較検討

多くの経験式の中から信頼性の高いデータに基づく Hefner 湖の式 (4) を取挙げ, 自由対流を考慮したバルク公式から信頼性の高い修正 Shulyakovskiy 式 (8) と近藤の式 (9) を取挙げ比較検討を行う。式 (4), (8), (9) の蒸発係数をそれぞれ Ψ_H, Ψ_S, Ψ_K とすれば上記より,

$$\Psi_H = 0.131 v_2 \tag{12}$$

$$\Psi_S = 0.112 v_2 + 0.094 (\Delta\theta_v)^{1/3} \tag{13}$$

$$\Psi_K = 5.37 \times 10^{-4} \rho a_2 C_E(2) v_2 / p \tag{14}$$

となる。まず, Ψ_H と Ψ_K の大小関係は

$$\left. \begin{aligned} C_E(2) \leq 2.44 \times 10^{-6} p / \rho a_2 \dots \Psi_K \leq \Psi_H \\ C_E(2) > 2.44 \times 10^{-6} p / \rho a_2 \dots \Psi_K > \Psi_H \end{aligned} \right\} \tag{15}$$

となり, 図-2 に $p = 1000 \text{ mb}, \rho a_2 = 1.2 \text{ Kg/m}^2$ の場合を示す。これから風速の弱いときは, 安定度の影響すなわち自由対流の効果が大きいことがわかる。 Ψ_H と Ψ_S の関係式は (12), (13) より次の式 (16) となり, 同様に Ψ_S と Ψ_K の関係式は (17) となる。

$$\left. \begin{aligned} \Delta\theta_v \leq 8.26 \times 10^{-3} v_2^3 \dots \Psi_S \leq \Psi_H \\ \Delta\theta_v > 8.26 \times 10^{-3} v_2^3 \dots \Psi_S > \Psi_H \end{aligned} \right\} \tag{16}$$

$$\left. \begin{aligned} \Delta\theta_v \leq 0 \text{ のとき} \\ C_E(2) \leq 2.08 \times 10^{-6} p / \rho a_2 \dots \Psi_K \leq \Psi_S \\ C_E(2) > 2.08 \times 10^{-6} p / \rho a_2 \dots \Psi_K > \Psi_S \\ \Delta\theta_v > 0 \text{ のとき} \\ (\Delta\theta_v)^{1/3} \leq \{ 57.1 \times 10^{-4} \rho a_2 C_E(2) / p - 1.19 \} v_2 \dots \Psi_S \leq \Psi_K \\ (\Delta\theta_v)^{1/3} > \{ 57.1 \times 10^{-4} \rho a_2 C_E(2) / p - 1.19 \} v_2 \dots \Psi_S > \Psi_K \end{aligned} \right\} \tag{17}$$

図-3 に式 (16), (17) で $p = 1000 \text{ mb}, \rho a_2 = 1.2 \text{ Kg/m}^2$ の場合を示す。図の第1象限は, $v_2 =$ 一定の曲線より左側の領域が $\Psi_S > \Psi_K$, 右側の領域が $\Psi_S < \Psi_K$ である。図-2, 3 より $\Delta\theta_v \leq 0$ の安定または中立時のとき $\theta_0 - \theta_{a2} \leq 0$ で, $\Psi_H > \Psi_K$, $\Psi_H > \Psi_S$ となり Hefner 湖の式は蒸発量が大き過ぎる。

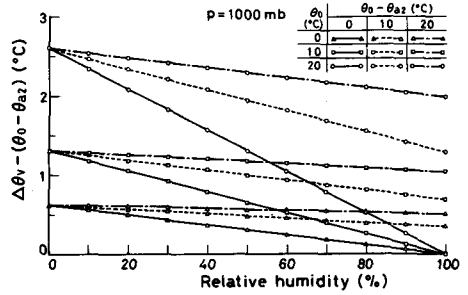


図-1 仮温度差と水温・気温差の関係

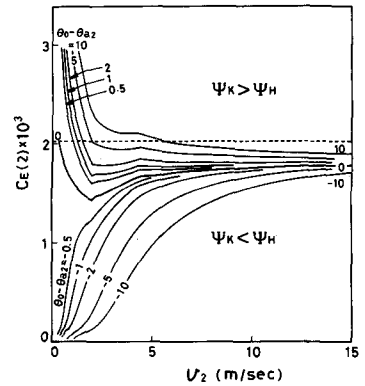


図-2 Ψ_K と Ψ_H の大小

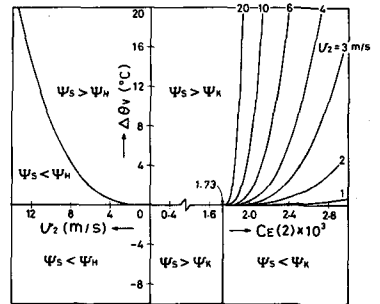


図-3 Ψ_S と Ψ_H および Ψ_S と Ψ_K の大小

表-2 自由対流による蒸発量が全蒸発量に占める割合(%)

(a) Modified Shulyakovskiy Formula

$\Delta\theta_v$ (°C)	V_2 (m/s)				
	0.5	1.0	2.0	5.0	10.0
1	62.7	45.6	29.6	14.4	7.7
5	74.2	58.9	41.8	22.3	12.6
10	78.3	64.4	47.5	26.6	15.3

(b) Rymsha and Dochenko Formula

$\Delta\theta_v$ (°C)	V_2 (m/s)				
	0.5	1.0	2.0	5.0	10.0
5	14.9	12.8	9.9	6.0	3.6
10	35.0	22.7	18.1	11.3	6.9
20	41.2	36.9	30.6	20.2	12.9

v_2 が小さく $\Delta\theta_v$ と $\theta_0 - \theta_{a2}$ が大となる強い不安定時には $\Psi_H < \Psi_K$, $\Psi_H < \Psi_S$ となり Hefner 湖の式は蒸発量が小さ過ぎる。 Ψ_S と Ψ_K については, ある限界風速より弱いとき $\Psi_S > \Psi_K$, 強いとき $\Psi_S < \Psi_K$ とな

る。この限界風速は例えば $p = 1000\text{mb}$, $\rho_{a2} = 1.2\text{kg/m}^3$ の場合, $\Delta\theta_v < 0$ に対し $v_2 = 7.6\text{ m/s}$, $\Delta\theta_v > 0$ に対し $v_2 = (\Delta\theta_v)^{1/3} (685\text{ C}_E(2) - 1.19)$ である。

3. 河川水面蒸発量算定の問題点

3-1 フェッチと測定高度

河川に対する蒸発量の研究は殆んどないので、貯水池・湖・海に対するバルク公式を適用しているのが現状である。この場合、フェッチと表面流速に注意しなければならない。気温・風速・湿度の水面上の測定高さは、水面を吹送してきた空気中で占められる高さ（2次境界層）以内にしなければならない。これより上層では異質の気層となるからである。測定高さの上限は、フェッチの $1/200$ 程度とされている⁸⁾。フェッチは河川水面の平面形状と風向により決まるので、中小河川で河岸からの風向のときフェッチが短くなり特に問題となる。ところで、2-1で述べたように蒸発量の算定には $z = 2\text{m}$ での風速、水蒸気圧、気温が必要になる。したがって、ある高さ z_1 の風速 v_{z1} 、水蒸気圧 e_{z1} 、気温 θ_{z1} を別の任意の高さ z_2 の風速 v_{z2} 、水蒸気圧 e_{z2} 、気温 θ_{z2} に変換しなければならない。このためには、中立時の対数分布則を用いて近似的に次式を用いる。

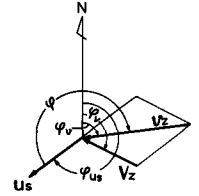


図-4 相対風速ベクトル

$$\left. \begin{aligned} v_{z2} &= v_{z1} \frac{\ln z_2/z_0}{\ln z_1/z_0}, & e_{z2} &= e_0 + (e_{z1} - e_0) \frac{\ln z_2/z_0}{\ln z_1/z_0} \\ \theta_{az2} &= \theta_0 + (\theta_{az1} - \theta_0) \frac{\ln z_2/z_0}{\ln z_1/z_0} \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

中立成層に近い状態では、いわゆる“対数+直線”則が適用できる。例えば風速分布の場合、摩擦速度、粗度高さ、モーニン・オブコフ長さ、モーニン・オブコフ係数を観測データから決めることは、これらの値が相互に関連しているため相当困難である^{6), 7)}。より広い安定度範囲に対する垂直分布には無次元風速傾度、無次元比湿傾度、無次元気温傾度の統一された無次元高さの関数形が必要である。

3-2 表面流速

貯水池、湖では普通風速にくらべて流速は小さいので表面流速は無視して固体壁面上の風速として扱える。しかし河川では表面流速が風速より大きい場合もあり、表面流速は無視できない。これは運動する物体に作用する抵抗力が、向かい風のときと追い風のときでは異なるのと同じ現象である。

したがって、これまで、でてきた風速として、表面流速と共に移動する座標からみた相対風速を考えなければならない。相対風速ベクトル V_z は、図-4に示すように絶対風速ベクトル v_z から表面流速ベクトル u_s を引いて得られる。

$$V_z = v_z - u_s \quad (19)$$

ここでは、通常風速・風向を絶対風速・絶対風向と呼ぶことにしそれぞれ v_z , φ_v と表わす。表面流速を

$$V_z = \sqrt{v_z^2 + u_s^2 + 2v_z u_s \cos \varphi} \quad (20)$$

ただし、 φ は u_s から v_z へ時計回りに測った角度で $\varphi = \varphi_v - \varphi_{us}$, $\varphi < 0$ のときは $\varphi = \varphi + 360^\circ$ φ_v の計算式は紙数の関係で省略する。式(20)から、風向が川下からのとき ($0 \leq \varphi \leq 90^\circ$, $270 \leq \varphi \leq 360^\circ$) または $v_z \leq u_s/2$ のときは、 $V_z \leq v_z$ となる。

なお、水面幅が水深 h にくらべて充分大きいとき水面に最大流速が生じ、その表面流速は対数分布則より断面平均流速 U から次のように得られる。

$$u_s = U + 7.8\sqrt{hi} \quad (21)$$

ここに、 i は水面勾配である。この関係は河床が粗面でも滑面でも適用できる。

4. 常呂川中流・若松大橋（北見市）における観測例

常呂川中流・若松大橋より下流32mを測定断面とし熱収支観測を実施した。第1回は1979年6月24日12:00から7月1日14:00まで(Case 1),第2回は1981年9月23日0:00から9月30日24:00まで(Case 2)である。ここでは蒸発量に関係することだけを記し,熱収支については別の機会に発表することにする。Case 2から述べる。

蒸発量に関係する観測項目,測定器および測定開始時点の水面上のセンサー位置は次の通りである。

水面温度(CC熱電対0.32mm),気温(CC熱電対0.32,0.65mm; $z=0.1, 0.5, 1, 2m$),
絶対風向・風速(3方向超音波風速温度計; $z=1m$),気圧(アネロイド型自記気圧計),
湿度(アスマン通風乾湿計,毛髪式自記湿度計; $z=1m$),雨量(普通雨量計),水位(量水板),
流量(プライス式流速計,プロペラ式流速計)

上記の熱電対,風速計,温度計はフロート柱水位計を固定するH鋼に取付けた。

観測期間中の水位変化は,55.947~56.080mである。表面流量は平均0.79 m^3/s でその方位角は347°である。相対風向の主風向はほぼ下流からの北で,このとき右岸からH鋼に取付けた測定器までのフェッチは310mである。したがって気温・風速・湿度の測定高さは1.55m以内となり,2mの気温は対象外である。以下,気温は1mの気温を使うことにする。

図-5は観測期間中の気温,水面温度,湿度の1時間平均値の変化である。図-6は1時間平均の絶対風速と相対風速である。絶対風向の主風向もほぼ下流からなので,全体的には相対風速が絶対風速より大きくなっている。

図-7は1時間平均のデータを用いて修正Shulyakovkiy式,Hefner湖の式および近藤の式から得られた1時間当りの蒸発量(それぞれ E_S, E_H, E_K とする)である。リチャードソン数 Ri ,近藤の安定度パラメータ,仮温度差による接水気層の成層状態も示している。 S_K の欄の×印は $V_2 < 0.3 m/s$ のため近藤の式が使えないことを示している。 Ri は勾配型リチャードソン数を水面と $z=2m$ で差分にした近似値を用いた。3者による安定度の判定には,図-5の気温と水温が交差する付近すなわち水温・気温差が小さいときに若干の違いがあるが,ほぼ一致している。 E_H の変化は,相対風速が増加し湿度が減少するときに大きくなり,相対風速が減少し湿度が増加するときに小さくなっている。 E_S と E_K の変化は E_H を安定度で補正した変化を示している。3者の大小関係は,安定時には $V_2 < 7.6 m/s$ なので2-2で述べたように $E_H > E_S > E_K$ となっている。不安定時には V_2 が小さいため式(16),(17)より $\Psi_S > \Psi_H, \Psi_S > \Psi_K$ となりまた式(15)から $C_E(2)$ が大きいとき $\Psi_K > \Psi_H$ で小さいとき $\Psi_K < \Psi_H$ となる。結局強い不安定時には $E_S > E_K > E_H$,弱い不安定時には $E_S > E_H > E_K$ を示している。

Case 1の観測はCase 2とほぼ同様の方法で実施したが,紙数の関係で E_S, E_K, E_H の変化を図-8に示すだけにする。6月24日16:00頃に蒸発量が大きいのは,水温が高く湿度が低いために $e_0 - e_2$ が19~20mbと大きくなったためである。

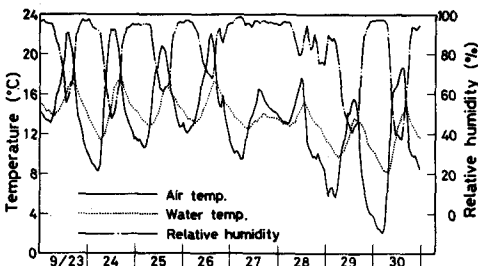


図-5 気温,水面温度,湿度(Case 2)

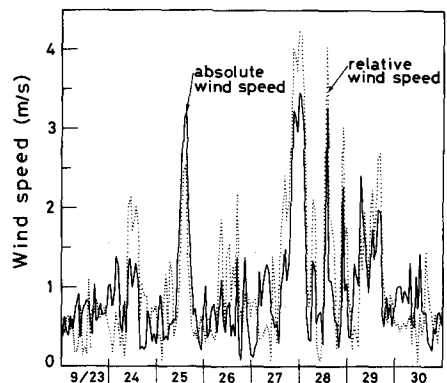


図-6 絶対風速と相対風速(Case 2)

5. 結 語

従来種々提案されているバルク法による水面蒸発量の算定式を安定度を考慮しているかないかにより分類し、修正 Shulyakovskiy 式、近藤の式、Hefner 湖の式の比較検討を行ない、これを常呂川の 2 回の熱収支観測で確かめた。また、河川水面蒸発量に対するフェッチと表面流速について述べ、自由対流による蒸発量が全蒸発量に占める割合を求め自由対流の重要性を示した。今後の課題は熱電対乾湿温度計などにより蒸発量の直接測定を行い、種々のバルク公式を比較検討していくことである。

参考文献

- 1) Paily, P.P., E.O. Macagno and J.F. Kennedy: Winter-regime surface heat loss from heated streams, IIHR Report No 155, 137 pp., Mar., 1974.
- 2) T.V.A.: Heat and mass transfer between a water surface and the atmosphere, Water Resources Research Lab. Report No 14, Apr., 1972.
- 3) Ryan, P.J. and K.D. Stolzenbach: Environmental heat transfer, M.I.T. Summer session text, Ch. 1, 1973.
- 4) Shulyakovskiy, L.G.: Formula for computing evaporation with allowance for the temperature of the free water surface, Soviet Hydrology: Selected Papers, No 6, 1969.
- 5) 近藤純正: 海面と大気間の運動量・顕熱・水蒸気に対する輸送係数, 国立防災科学技術センター研究報告, 第10号, pp. 41~63, 1974年10月.
- 6) 片野尚明: 海面からの蒸発と熱交換係数に関する検討と新しい熱交換計算図表の提案, 電力中央研究所報告, 376008, 53 pp., 1977年1月.
- 7) 鳥羽良明: 海洋科学基礎講座1, 海洋物理I, 第II編, 東海大学出版会, pp. 145~263, 1977.
- 8) 近藤純正: 蒸発についての問題点, 海と空, 第45巻, 第2号, pp. 3~75, 1969年10月.

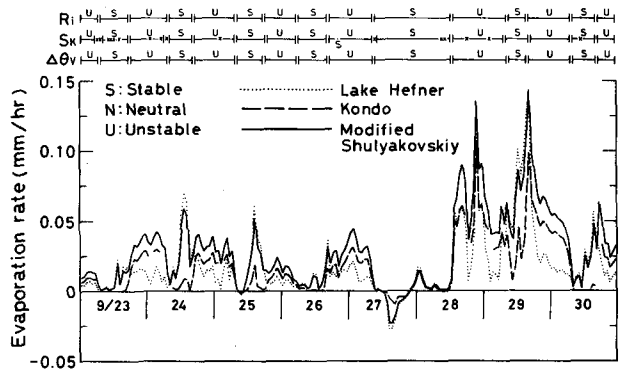


図-7 蒸発量の比較 (Case 2)

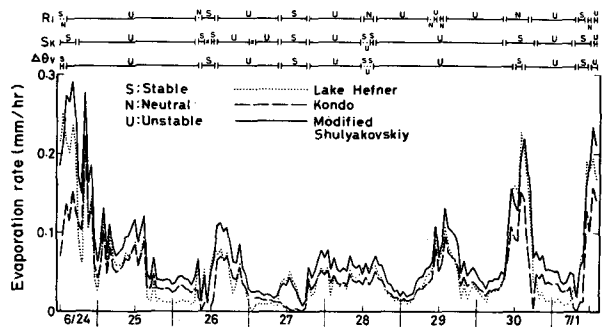


図-8 蒸発量の比較 (Case 1)