

II—14 水面蒸発量に関する実験的研究 (第1報)

北見工業大学 正会員 佐渡 公明
北見工業大学 正会員 中尾 隆志

1. まえがき

河川・湖沼・貯水池の水資源の有効利用には水面蒸発量が重要な問題であり、またこれらの水温解析を行なう場合、熱収支要素の1つである潜熱輸送量の算定にも蒸発量が必要となる。降水、流出、蒸発という水文サイクルの中で、蒸発現象は他の2つに比べ研究が活発でないように思われる。水面蒸発量の評価を行なう場合、種々の方法があるが¹⁾、その中で実用的算定法として、比較的簡便で最も精度の良いのはバルク法であり²⁾、現地により適合するバルク公式を見出す必要性がある。本論文では、最初に低温室における自由対流による蒸発実験と風による強制対流が加わった場合の蒸発実験を述べ、バルク公式の中で比較的信頼できると思われるShulyakovskiy式、修正Shulyakovskiy式、Rymsha & Dochenko式、Hefner湖の式および近藤の式を比較検討する。

次に北見工業大学の敷地内および屈斜路湖畔で行なった水面蒸発観測について、先に述べたバルク公式の適用性について検討を行なう。

2. 室内実験

水面蒸発は接水気層の水蒸気輸送現象であるが、これには風による強制対流と空気の密度差に基づく浮力による自由対流に大別することができる。特に風速が弱く、水面温度が気温より高い場合には自由対流による蒸発量が卓越する。例えば、冬期の開水面や冷却池では自由対流の影響が大きい³⁾。自由対流および強制対流による蒸発量を調べるために、低温室に直径1.2m、深さ25cmの大型蒸発計を設置し、水面蒸発の実験を行なった。

2-1 実験方法

広さ3.1×3.6m、高さ2.6mの低温室の中央部分に大型蒸発計を設置して、以下に示す条件で3回蒸発実験を行なった。

Case 1: 実験開始後2日間、低温室の気温をほぼ15℃に一定に保ち、その後室内を25℃まで温度上昇させたのち、再び室温が5℃になるように温度制御し、水温・気温がほぼ等しくなる約3.5日間実験を行なった。低温室内の風速は送風機を止め、ほぼ無風状態(風速0.10~0.15m/s)である。水面水温は0.32mmのCC熱電対を用いセンサー先端のハンダ部分が水面上部に接触する場合、およびハンダ部分を水面下に落らせハンダの上部が水面下に接触する場合の2つを計測した。

Case 2: Case 1と同様に無風状態で実験を行なった。気温は室温から低下させ-5℃に維持し、水温が0℃になるまでの約1日間実験観測を行なった。大型蒸発皿の底面と側面からの熱流出を防ぐため、周囲をスタイロホームとグラスファイバーで断熱した。また、水面水温として、0.1mmの熱電対を用いCase 1の2つ以外にセンサー先端のハンダ部分の中心が水面に一致する場合についても測定した。

Case 3: 室温条件、測定方法はCase 2と全く同様に行なったが、扇風機の羽根の中心が水面上約20cmにくるよう扇風機2台を取り付け、風速が2.14~2.32m/sの強制対流を起こして実験を行なった。

各Caseについて水面上18cmにデジタル湿度計を取り付け、大型蒸発計のすぐ横には3方向型超音波風速計を固定し風速を測定した。風速計の水面上の設置高さは、Case 1,2,3に対しそれぞれ16.7, 18.0, 18.0cmである。

気温、水温は全てCC熱電対を用い、温度分布を測定するため、次に示す高さで測定した。

気温: 水面上1, 2, 3, 5, 10, 18, 20, 50, 100, 150 cm 水温: 水面下1, 2, 4, 7, 10, 13, 16, 18, 19, 20 cm

水面蒸発は水面温度と気温の差が大きい、いわゆる不安定時の方が蒸発量が大きくなるため、各Caseとも実験

に用いた水温は実験開始直後において34.5～36.4℃の温水を用いた。蒸発量測定は予め大型蒸発皿に取り付けておいたフックゲージで、3回測定し1/20mmまで読み、その平均値を蒸発量の実測値とした。測定間隔は蒸発量の大きい初期には10分間隔とし、以下蒸発量の減少に伴ない測定間隔も大きくしていった。

2-2 バルク公式

数多くあるバルク公式の中から比較的信頼性の高い5つの式を下記に示す。

Shulyakovskiy は、平板上の自由対流熱輸送の結果から水蒸気の浮力効果も含んだ次式を提案した。

$$E = \{0.15 + 0.112 v_z + 0.094 (\Delta \theta_r)^{1/2}\} (e_o - e_z) \quad (1)$$

さらに、Ryan & Stolzenbach は、実験室内の蒸発実験と冷却池データの検証から、式(1)の自由対流項の定数を省いて、次の修正Shulyakovskiy式を導いている。

$$E = \{0.112 v_z + 0.094 (\Delta \theta_r)^{1/2}\} (e_o - e_z) \quad (2)$$

ここに、 E : (mm/day), v_z : 水面上高さ2mの風速(m/s), $\Delta \theta_r$: 水面上の飽和空気温度と水面上高さ2mの湿潤空気温度差, e_o : 水面上の飽和水蒸気圧(mb), e_z : 水面上高さ2mの水蒸気圧(mb)

一方、Rymsha & Dochenkoは冬期の河川水面蒸発量のデータに基づいて、水面水温 θ_o と水面上高さ2mの気温 θ_{az} を用いて、

$$E = \{0.209 + 0.00915 (\theta_o - \theta_{az}) + 0.1018 v_z\} (e_o - e_z) \quad (3)$$

を示し、Marciano & HerbeckはHefner湖による蒸発実験から、次の式を提案している。

$$E = 0.131 v_z (e_o - e_z) \quad (4)$$

近藤は、風速0.3m/s以上の海面・湖面を対象に水蒸気輸送量の算定式を半理論的に導いており、水面上高さ2mの水蒸気輸送に対するバルク輸送係数 $C_E(2)$ を用いて、次式を提案している。

$$E = (5.37 \times 10^{-4} / p) p_{az} C_E(2) v_z (e_o - e_z) \quad (5)$$

ここに、 p : 大気圧(mb), p_{az} : 水面上2mの空気密度(kg/m³)

近藤の式はバルク輸送係数 $C_E(2)$ の中に水温、気温差に基づく大気の安定度の影響を考え、自由対流を考慮しているが、式(5)から直接蒸発量に占める自由対流と強制対流の割合を求めることは難しい。式(4)は、風による強制対流のみであり、浮力による自由対流は全く考慮されていない。

2-3 実験結果

図-1(a),(b)はCase 2,3の風速、相対湿度、水面水温、気温(水面上18cm)、水温と気温の温度差(DTV)を示したものである。水面の水温はセンサー先端が水面上面に接触したものをを用いている。

Case 2の風速は無風状態で行なったが、低温室の送風機が天井付近に取り付けられており冷機の下降および水温が常に気温よりも高いため自然対流が生じ、わずかに風速(0.10～0.15m/s)が記録された。

先に述べたように、水面水温としてCase 1では2種類、Case 2,3では3種類設置した。これらを用いて計算を行なったが、後で述べるように、実測値に対する計算値の誤差の標準偏差は、センサー先端のハンダの上を水面下面に接触させた場合が最も小さく、以下、水面水温として、この場合を用いる。また、高さ2mへ

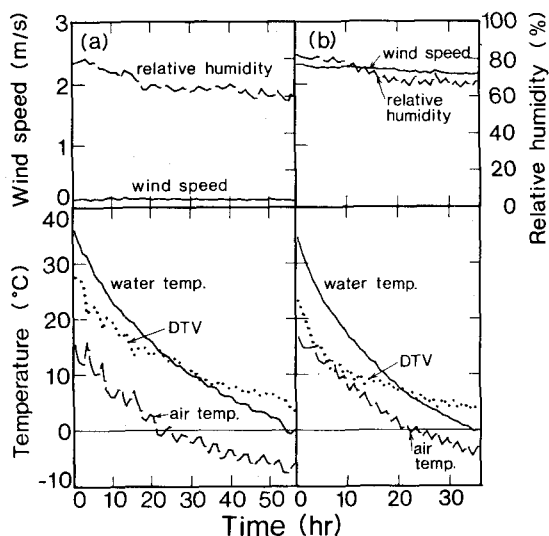


図-1 (a) Case 2, (b) Case 3の風速、相対湿度、水面水温、温度差

の気温、水蒸気圧、風速の高度変換は室内であるため行わず、気温2mの値として高さ1.5mの気温を用い、風速と相対湿度は一樣であるとして処理した。

図-2 (a), (b) はそれぞれCase 2, 3の蒸発量の実測値と式(1)~(5)を用いた計算値を1時間当りの蒸発量で示したものである。Case 2においては風速が非常に弱いので、例えばShulyakovskiy式を用いた場合、全蒸発量に対し自由対流の占める割合は95.9%~97.1%となり大部分は自由対流に基づく蒸発である。したがって、自由対流を考慮していない式(4)のHefner湖の式は、他のバルク公式に比べかなり小さな値となっている。式(1)~(3)の各バルク公式による計算値は実測値と比較して最初の6時間は蒸発量が小さい。これは、水面温度と気温の仮温度差が大きい強い不安定時には、式(1)~(3)の自由対流項は過少評価しているものと思われるからである。時間の経過と共に仮温度差が小さくなるので、蒸発量は減少している。Case 3は、風速が2.14~2.32m/sあり、蒸発は自由対流と強制対流の2つを含んでいるためCase 2より蒸発量が大きくなっている。各計算値と実測値を比べるとCase 2よりも、さらに誤差が大きくなっており、自由対流と強制対流が組合わされた蒸発量の算定がより困難になることを示している。

表1は実測値から各バルク公式の計算値を引いた誤差の平均値とその標準偏差を表わしたものである。先に述べたように誤差の平均値は、どのCaseについても負となり実測値に比べ、いずれの場合も計算値は小さな値になっている。どのCaseについても誤差の標準偏差が小さいのは、自由対流を大きく評価しているShulyakovskiy式とRymsha & Dochenko式の2つである。Case 1, 2の無風時に比べ、強制対流を含めCase 3の場合、誤差の標準偏差は大きくなるが、各バルク公式間の誤差の標準偏差は差が小さくなっている。このことより、各バルク公式の強制対流の見積りにはそれほど差がなく、自由対流による蒸発の評価に差があることがわかる。Case 3における、誤差の標準偏差が最も小さいShulyakovskiy 式の場合、全蒸発量に対する自由対流の占める割合は54.1% (仮温度差の最小値 3.0℃のとき) ~61.7% (仮温度差の最大値 23.2℃のとき) と50%以上であり、仮温度差が大きくなると自由対流による蒸発は当然増えてくる。

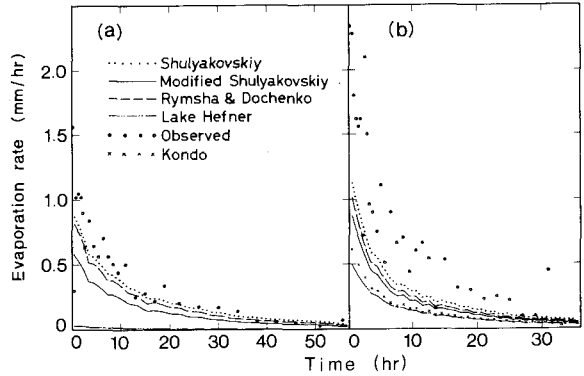


図-2 (a) Case 2, (b) Case 3の蒸発量の比較

表1 蒸発量の実測値と計算値の誤差 (室内実験)

Bulk formula	誤差の平均			誤差の標準偏差		
	Case 1	Case 2	Case 3	Case 1	Case 2	Case 3
Shulyakovskiy	-0.022	-0.066	-0.280	0.057	0.087	0.255
Modified Shulyakovskiy	-0.083	-0.186	-0.355	0.111	0.148	0.309
Rymsha & Dochenko	-0.044	-0.098	-0.319	0.054	0.097	0.279
Lake Hefner	-0.160	-0.385	-0.444	0.249	0.290	0.392
Kondo	—	—	-0.414	—	—	0.370

3. 屋外観測

自然条件下での蒸発量を求めるため、1983年8月6日12:00~8月11日12:00までの4日間、北見工業大学の敷地内に水槽を設置し、また1983年8月23日18:00~8月31日12:00までの約8日間、屈斜路湖畔美留和地区で蒸発量の野外観測を行なった。以下に、それぞれの観測方法を示す。

3-1 観測方法

北見工業大学内に設置した水槽による蒸発実験に用いた水槽は、4m×1.2mの大きさであり、内部は黒色に塗装されており、水深26cmで実験を行なった。蒸発量の実測値は、大型蒸発計用フックゲージを用い、毎日午前7時、午後4,7時の4回実測し、さらに必要に応じて測定回数を増した。観測回数合計は26回である。各測定

時における蒸発量の測定は、低温室における室内実験と同様3回測定し、その平均値を蒸発量とし、降雨時における蒸発量の補正のため、水槽の横に雨量計を設置した。3方向型超音波風速計は水槽のすぐ横に固定し(水面上12.5cmに設置)、水槽上に気温測定用CC熱電対を水面上12.5, 20cmの高さにポールで固定し取り付け付けた。デジタル湿度計は小形百葉箱内に収納し、超音波風速計と同じ高さになるように水槽上に取り付け、水面水温としてCC熱電対先端のハンダ部分の中心が水面上にくるよう設置した。

次に、屋斜路湖畔で行なった蒸発観測の方法について述べる。蒸発量に関する測定器は測定台に取り付け、弟子屈町美留和にある北見工業大学屋斜路研修所に隣接する屋斜路湖畔の岸辺から2.5m沖にコンクリートブロックで測定台を固定した。大型蒸発計は岸辺より3.2m陸上部に設置し、蒸発皿の中にはCC熱電対をたらし置き、蒸発皿の水温も記録した。気温センサーは、測定台に超音波風速計と同じ高さ(水面上1.37m)と2mの高さにアリキ製の日よけと共にポールで固定した。雨量は降雨時、毎時観測し蒸発量の観測は日の出後と日の入前の午前5時と午後6時の1日2回測定した。

3-2 観測結果

図-3, 4に屋外観測で得られた風速, 相対湿度, 水面温度の結果を示す。水槽実験での風速は0.18~0.20 m/sの間にあり、ほぼ一定で微風であった。また、水槽内の水に水道水を使ったため、実験開始直後には水温と気温には温度差がみられるが、それ以後は最大でも3.9℃である。これは、水槽内部が黒く塗装されており、また水深も26cmと浅く水体への熱授受が盛んに行われたためであり、水温と気温の仮温度差も小さくなり昼間、仮温度差が負となり、いわゆる大気の安定状態がみられる。一方、湖水実験では水温の日較差がほとんどなく、夜間でも水温が低下しないため水温と気温差が大となり、不安定な状態となる。あすかに、26, 28日の昼間に安定状態が見られる。これは、観測地点のすぐそばに、上記研修所の浄化槽排水口があり、常に温水が排水されているためである。また、8月29日の昼間から31日の昼間までほぼ連続的に降水があり、このため日中でも気温は上昇せず、昼夜を問わず不安定な状態となっている。

気温の測定高さは、水槽実験、湖水実験共に、超音波高さの気温と他の高さの気温を用いた場合、観測値と各バルク公式の計算値との誤差の標準偏差にはほとんど差がないので、以後気温として両者とも超音波設置高さの気温を用いる。また気温、水蒸気圧、風速の2mへの高度変換には、風速が0.3m/s以下のときはベキ乗則を用い、0.3m/s以上のときは対数分布則を用いた。

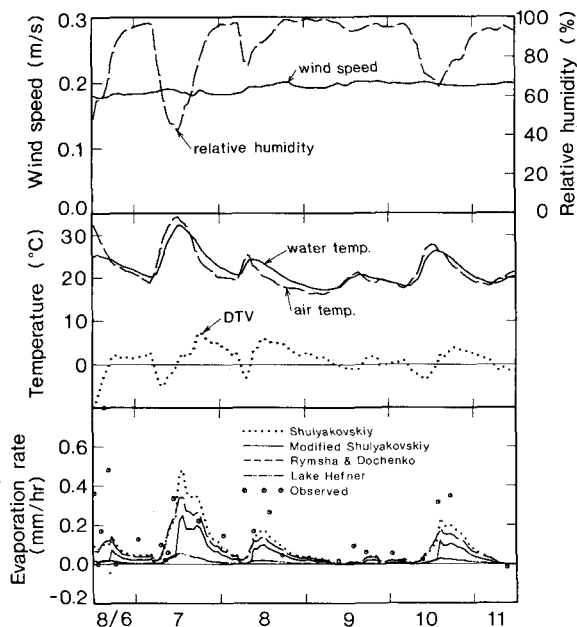


図-3 風速, 相対湿度, 水面温度, 気温, 仮温度差と蒸発量の比較(水槽実験)

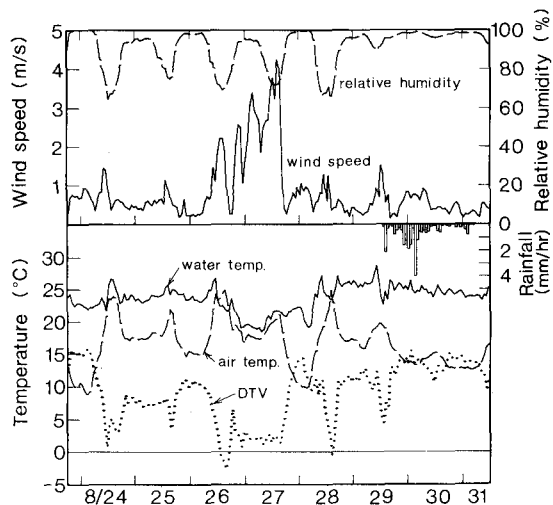


図-4 風速, 相対湿度, 水面温度, 気温, 仮温度差, 雨量(湖水実験)

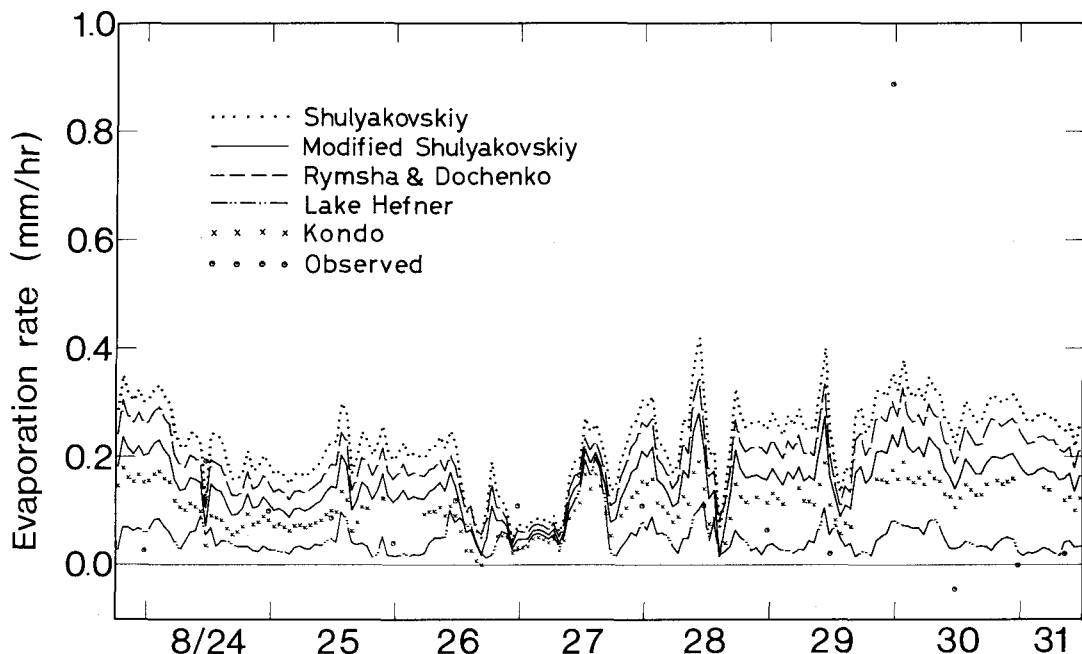


図-5 蒸発量の比較 (湖水実験)

図-3に示す水槽実験における蒸発量の比較で、風速の最大値は0.20 m/sであり、近藤の式での計算値は求められなかった。観測値と各バルク公式では、室内実験と同様に計算値の方が小さくなっており、特にHefner湖の式では、自由対流項を考慮しておらず、風速も小さいので計算値の中で特に小さい値となっている。仮温度差が負となる安定時には自由対流による蒸発量は小となり、強制対流による蒸発が卓越している。各バルク公式の計算値には違いがみられるが、その傾向は観測値とほぼ同じ傾向である。

図-5は屈斜路湖で行なった蒸発量の観測値と各バルク公式の計算値を1時間当りで示し、その比較を示したものである。水槽実験の場合と同様に、計算値は安定時を除き、Shulyakovskiy式、Rymsha & Dochenko式、修正Shulyakovskiy式、近藤の式、Hefner湖の式の順に小さくなっている。観測値と計算値の傾向は水槽実験ほど一致せず、計算値は大きめになっている。特に8月29日後半から、計算値は観測値に比べ、かなり大きくなっている。この理由は、計算に用いた湖水の水温が研修所からの温排水により高温で図-4に示すように明瞭な日変化がみられないのに対し、蒸発量の観測値を得るために湖畔岸辺に設置した大型蒸発皿の水温は湖水水温より全般的に低いかからである。また、降雨時には蒸発量と降水量の測定誤差が影響していると思われる。⁴⁾

表2は屋外観測の観測値と計算値の誤差の平均値とその標準偏差を示したものである。誤差の標準偏差が最も小さいのは、水槽実験ではRymsha & Dochenko式であり最も誤差が大きいのが修正Shulyakovskiy式となっているが、両者の誤差の程度は室内実験に比べ、さほど大きな差は見られなかった。同様に湖水実験で、観測値と各バルク公式の誤差の標準偏差が小さいのは修正Shulyakovskiy式、近藤の式であるが、これに比べ最も誤差の大きいShulyakovskiy式の場合でも0.005 mm/hrの差であり、各バルク公式間には相違はないという結果になる。

最後に、屋外観測で行なった蒸発観測のうち、各観測

表2 蒸発量の観測値と計算値の誤差 (屋外実験)

Bulk formula	誤差の平均		誤差の標準偏差	
	水槽実験	湖水実験	水槽実験	湖水実験
Shulyakovskiy	-0.065	0.100	0.169	0.206
Modified Shulyakovskiy	-0.129	0.024	0.179	0.201
Rymsha & Dochenko	-0.078	0.068	0.165	0.202
Lake Hefner	-0.152	-0.075	0.177	0.202
Kondo	—	-0.015	—	0.201

値と最も良く適合するバルク公式として、水槽実験ではRymsha & Dochenko式、湖水実験では修正Shulyakovskiy式を取り上げ、全蒸発量に占める自由対流の影響を述べる。

水槽実験で自由対流の占める割合は、最も小さい場合でも実験開始直後の8月6日13時の79.2%である。これは水道水を用いたため、水温と気温差が -7.4°C と最も小さくなった時であり、自由対流の占める割合が最大となるのは、8月8日0時の89.7%で水温と気温差は 2.7°C であった。一方、湖水実験では、8月26日14時から17時と28日15時に仮温度差が負となり自由対流が0となる場合を除き、最小の割合となるのは、観測期間中、風速が最大を示した($v_{\max}=4.25\text{ m/s}$)、8月27日15時の18.1%であり、この時の仮温度差は 1.6°C であった。また、最大の割合を示すのは、8月29日17時の92.2%であり、この時の平均風速は 0.16 m/s と小さく、仮温度差は 12.5°C であり、風速が小さく仮温度差が大きい場合は自由対流による蒸発量の割合は大きいことがわかる。

4. 結 論

以上、低温室内において、3つのCaseで蒸発実験を行ない、さらに屋外では水槽実験および湖水実験を行ない観測値と各バルク公式による計算値の比較検討を行なった。今回の実験観測において明らかとなった事項を以下に示す。

1) 低温室で行なった実験では、いずれのCaseでも、本論文で取り上げた5本のバルク公式の計算値の精度は自由対流を大きく評価しているShulyakovskiy式、Rymsha & Dochenko式が最も良く、各計算値の差は大きい、屋外観測の水槽実験、湖水実験とも観測値と計算値の誤差の標準偏差には差がほとんど見られない。

2) 低温室のCase 3では強制対流の評価の誤差も加わり、Case 1,2の場合よりも誤差の標準偏差は大きくなっている。

3) 各バルク公式において、強制対流の見積りにはほとんど差はないが、自由対流の評価に差が表われている。

今回、室内実験では気温、水蒸気圧、風速の高さ2mへの高度変換は行わなかったが、室内と現地での相似則を今後の課題としたい。

参 考 文 献

- 1) 佐渡公明：バルク法による河川水面蒸発量の研究，第26回水理講演会論文集，pp. 549~554，1982.
- 2) 佐渡公明：河川水の熱収支と水温解析に関する研究，北海道大学博士論文，1983.
- 3) 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.
- 4) 気象庁：地上気象観測法，気象庁，pp 163-166，1971.