

琵琶湖湖面蒸発量の観測と評価

Observation and Estimation on Evaporation from Lake Biwa

京都大学防災研究所 正員 池 淵 周 一
建設省琵琶湖工事事務所 竹 林 征 三
日本気象協会関西本部 大 藤 明 克

1. はじめに

湖沼の水管理にあつては、その流入量および湖水位の時系列把握・予測が不可欠であるが、琵琶湖といった広大な湖面積および周辺流域をもつ湖にあつては逆算流入量で対処しているのが実情である。すなわち、湖水位変化と南郷洗堰、宇治発電、京都疎水からの放流量とで、連続式をたて、逆算的に流入量を評価するわけであるが、これには湖面降水、湖面蒸発、周辺域からの河川表流水、地下水の流入などが出入りが分離されずにトータルな形で含まれている。本研究は湖沼の水管理という実用目的にあつても、また湖と周辺域の水収支機構の解明をはかっていく上においても、湖面それも広域の湖面からの長期間にわたる蒸発量を評価していくことが重要であるとの立場から、それを実施していくための観測システムの構成と、それに基づく評価法を展開するものである。

2. 湖面蒸発量の観測とその求め方

湖面蒸発量の観測とその求め方にも多くの方法があるが、代表的には以下のものが考えられる。1)渦相關法；大気中で風速、気温および湿度の変動量を追従性の早い測器で測定して求める。2)傾度法、バルク法；乱流によって垂直に運ばれる風、気温および湿度をそれらの平均分布と結びつけたもので、数点の異なる高さで風速、気温および湿度を測定して求める。3)水収支法；蒸発以外の降水、流出等の量を求め、水収支式の残余量を蒸発量とする。4)熱収支法；水面に出入りするあらゆる熱を測定し、熱収支式の残余量を蒸発に要した潜熱とし蒸発量を求める。5)水蒸気収支法；湖面から大気上層までの範囲を考えて、その中に流入、流出する水蒸気や雲の中に含まれる水分を測定し、大気中の水分の水収支式の残余量から蒸発量を求める。6)その他の方法；i)大型蒸発計による方法、ii)Penmanの方法、iii)Thornthwaiteの方法。

3. 琵琶湖での観測システムと評価システム

琵琶湖といった広域の湖水面からの蒸発量を評価する場合、1)渦相關法、2)傾度法（バルク法を含む）、3)水収支法、4)熱収支法、の4種の方法をあげることができる。水収支法は、広域評価にとって望ましいが、水収支各項の測定が困難であると同時に、それらの誤差が残差としての蒸発量に含まれる可能性があり、湖面蒸発量のみでの評価には限界がある。また、長期連続して評価するとなると測器の安定性の問題から、2)傾度法、4)熱収支法、が妥当であろう。しかし、渦相關法は傾度法のもととなるものであつて、季節変化を明らかにするためにも、短期間ごとに渦相關法を併用することが望ましい。また、これら観測とともに、1)、2)、4)で求めた蒸発量との比較を行うため、大型蒸発計による観測も同時に実施する必要がある。さらに、観測点付近の蒸発量は以上述べた方法により評価できるが、湖面全体からの蒸発量を評価する場合は、ローカルな蒸発量はローカルな風速等に支配されるとして、観測点で評価した値との関係を見出し、何らかの補正をはかりながら湖面全体へ適用するため、湖面全体の風速分布等の測定も必要となる。

こうした観測を実施するためには湖面上数地点で定常的に観測を行う基地が必要となるが、本年度は基礎調査として1地点にしぼった。その観測点の選定には、1)湖面上での境界層が十分発達している場所である、2)周辺の熱的環境が自然の状態に近い場所である、3)測器の保守・運用が行いやすい場所である、4)人の出入りが少ない場所である、といったことを考え、彦根の滋賀県水産試験場を陸上部に、その200m沖合いにある取水塔を湖上部として、これらを湖東基地観測点とよぶことにした。

図-1はこれら方針に基づく調査フロー図であり、観測は大きく、通年観測と特別観測に分けられており、

前者は湖東基地観測点で毎日24時間連続観測を実施し、評価法として傾度法、バルク法、熱収支法、大型蒸発計（湖上部では設置場所の余裕がないので陸上部に設けた）を採用する。後者の特別観測(1)では水温上昇期（4～6月）、水温高頂期（7～9月）、水温下降期（10～11月）、水温低頂期（12～3月）について各期2週間程度の集中観測を実施し、蒸発量の直接かつ厳密観測に相当する渦相関法を採用する。したがって、この蒸発量を真値と考え、通年観測用の評価法に必要なバルク輸送係数などを大気安定度、風速などとの関連で同定することになる。一方、特別観測(II)では上記各期の集中観測期間中2、3日を取り、船舶を使用した移動観測を実施し、傾度法、バルク法による蒸発量の水平分布を求める。こうした観測システムにより、評価の精度、観測保守の難易性、コストなどを比較検討し、琵琶湖の水管理に適した観測および評価法を抽出する。

図-2に通年観測、特別観測(1)の測器構成（湖上部）を、図-3に移動観測の測器構成を示す。

4. 観測結果および考察

(1) 渦相関法の実測値の検討

渦相関法において比湿変動を測定するために使用した測器は熱電対乾湿計である。熱電対乾湿計は乾球温度計と湿球温度計から成るが、湿球温度計の感部の大きさを小さくできないために比湿の変動の周波数の高い領域まで測定できない。このことによって生ずる蒸発量の過少評価量は、塚本らによると20%程度である。特別観測(1)のデータから蒸発量の過少評価量を以下に述べる方法で評価した。

渦相関法の算定式において、比湿の鉛直輸送を表す共分散 $\overline{q'w'}$ は比湿 q と鉛直流速 w のコスペクトル密度 $CO_{qw}(n)$ の積分値として

$$E = \overline{q'w'} = \int_0^{\infty} CO_{qw}(n) dn$$

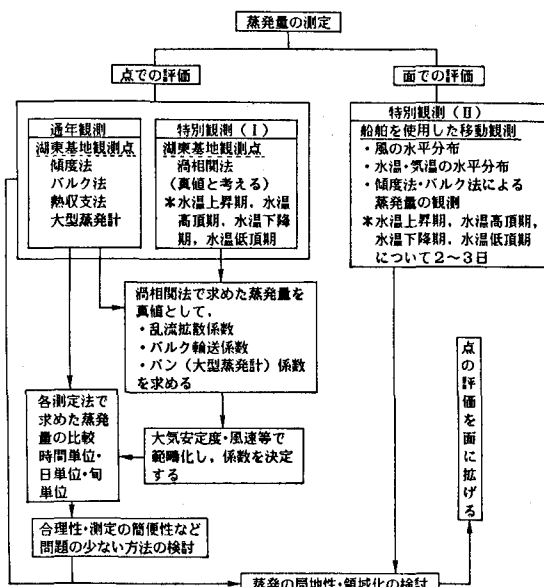


図-1 湖面蒸発量の調査フロー

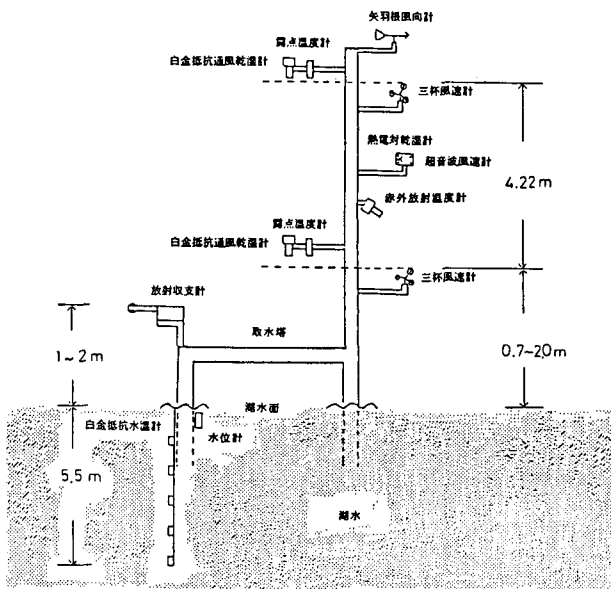


図-2 通年観測、特別観測(1)の測器構成図(湖上部)

で与えられる。この式から
周波数間隔 Δn における曲
線によって囲まれた面積は
 q' と w' との共分散($q'w'$)
に比例することがわかる。
一方、比湿の鉛直輸送量を
評価する観測システム(超
音波風速計と熱電対乾湿計
との組み合わせ)の時定数
は、主に比湿変動の測定値
(主に熱電対湿球温度計)
から制約を受けるものと
考え、比湿のパワースペクトルからスペクトル密度が高

周波数側において周波数の $-2/3$ 乗の直線に
乗る部分から $1/2$ に値が減少する周波数(カ
ットオフ周波数; n_c)であると考え(図-4
参照)。この n_c の箇所からコスベクトルに
 $-4/3$ 乗の直線(直線の始点は $CO_{wa}(n_c)$ 付
近とする)を描き(図-5の---の部分)、
この直線で描かれたコスベクトルの面積と、
測定値から計算されたコスベクトルの面積(図-5の—の部分)との比を求める。そして、この比によって熱電対湿球温度計の高周波数側の変動の減衰による蒸発量の実測値の補正を行った。図のケースでは、実測値は真値と考えられる値より16%の過少評価量であった。他の結果とも合わせて考えると、熱電対乾湿計の高周波数側の減衰による過少評価量は大気の安定度のいかんにかかわらず、13~20%の範囲にあり、平均16%程度と結論づけることができる。

(2)バルク係数と渦動拡散係数の範疇化

コスベクトルの
比較により渦相関
法による測定結果
が真値に対して平
均16%の過少評価
であることがわか
かったので、測定値
に16%の補正を行
ったものを真値と

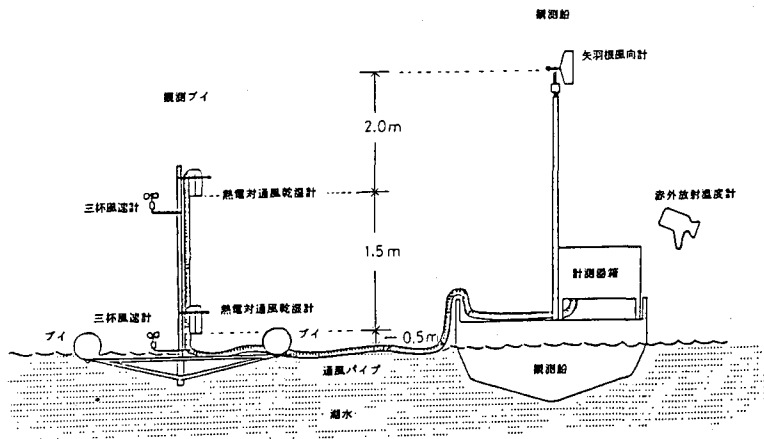


図-3 移動観測の測器構成図

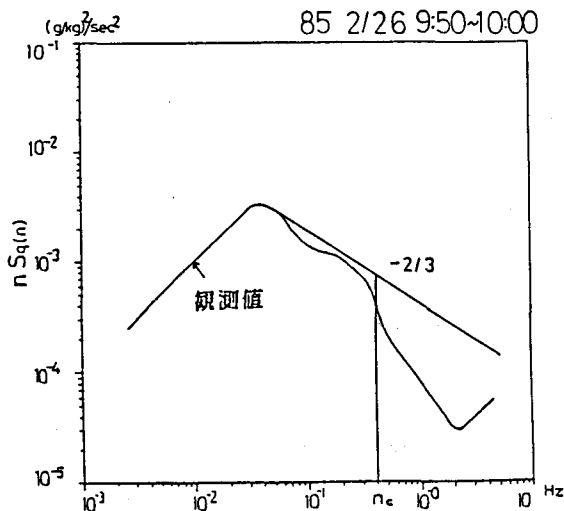


図-4 比湿のパワースペクトル

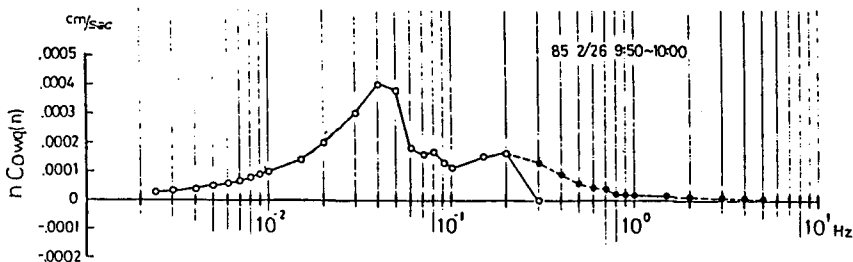


図-5 比湿と鉛直流とのコスベクトル

考え、以下のバルク係数、渦動拡散係数の範疇化を行った。すなわち、バルク係数CBおよび渦動拡散係数CKは次式で与えられることになる。

$$CB = E / \{ \rho (q_s - q_1) \cdot w_{s1} \} \quad (1)$$

$$CK = E / \{ \rho (q_2 - q_1) \cdot (w_{s1} - w_{s2}) \} \quad (2)$$

ここに、E：蒸発量の真値、 ρ ：空気密度、 q_s ：湖面上での飽和比湿、 q_1, q_2 ：湖面上約6mおよび2mの高さでの比湿、 w_{s1}, w_{s2} ：湖面上約6mおよび2mの高さでの風速、である。

特別観測(1)期間中の10分ごとのバルク係数と風速との関係を大気の安定度別と風向別（湖面上からの風と陸上からの風）に示したものの一例が図-6である。バラツキのあるものの、これら係数が大気の安定度別と風向別で範疇化でき、風速の関数として与えられることが見出される。また、バラツキの程度からいうと、

バルク係数のほうが風速の関数としてよい推定値を与える。このことはこれら各係数を用いて(1)、(2)式からいわゆるバルク法および傾度法で求めた蒸発量と渦相関法で求めた蒸発量が、前者において0.91、後者において0.66の相関であったことから、バルク法の有効性を認めることができる。なお、

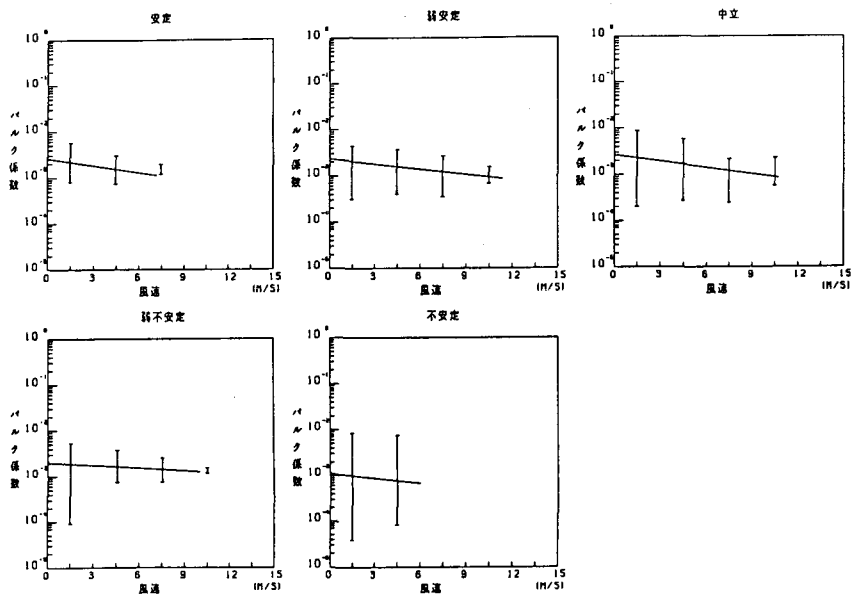


図-6 大気の安定度別による風向（湖上からの風：西南西～北東）風速とバルク係数との関係

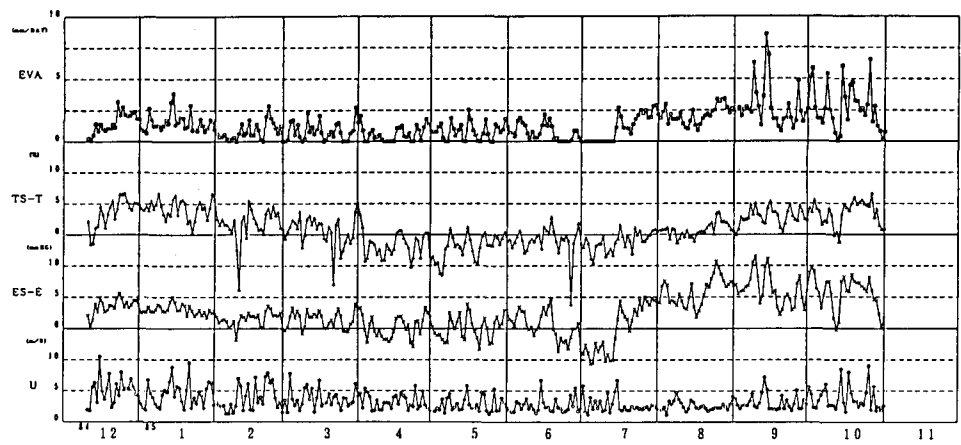


図-7 日蒸発量（EVA）の時系列変化

安定度は次式で与えられるリチャードソン数で分類したものである。

$$R_i = \frac{g}{\bar{T}} \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial Z} \right) / \left(\frac{\partial U}{\partial Z} \right)^2 \quad (3)$$

ここに、 $\bar{T}$:上下の平均気温、 T :気温、 u :風速である。
すなわち、 $R_i \leq -0.2$:強不安定、 $-0.2 < R_i \leq -0.03$:弱不安定、 $-0.03 < R_i \leq 0.03$:中立、 $0.03 < R_i \leq 0.1$:弱安定、 $0.1 < R_i$:強安定。

(3) 湖面蒸発量の時系列変化

このように、大気の安定度別と風向別にバルク係数が風速の関数として与えられるとなると、バルク法が精度の上においても、その測定要素数の少なさ、測定の容易さからみても通年観測に適した方法といえる。

図-7はバルク法によって算定した湖面蒸発量の日合計値(16%の補正を行っていない)を時系列で示したものである。同図にはTS-T(表層水温-5.5m高度での気温)、ES-E(表層水温での飽和蒸気圧-5.5m高度での蒸気圧)、 u (風速)といった要素の時系列変動も併記してある。9,10月の変動が大きいく、4,5月の春先に比べて真冬の値が結構大きいこと、風速

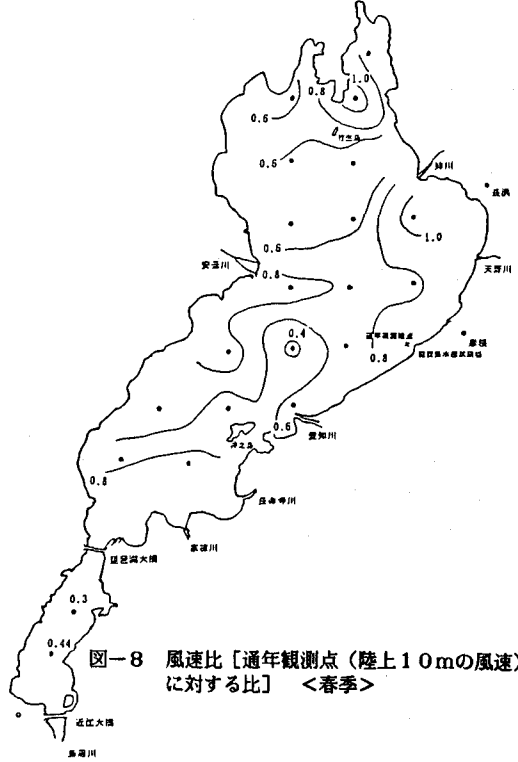


図-8 風速比[通年観測点(陸上10mの風速)に対する比] <春季>

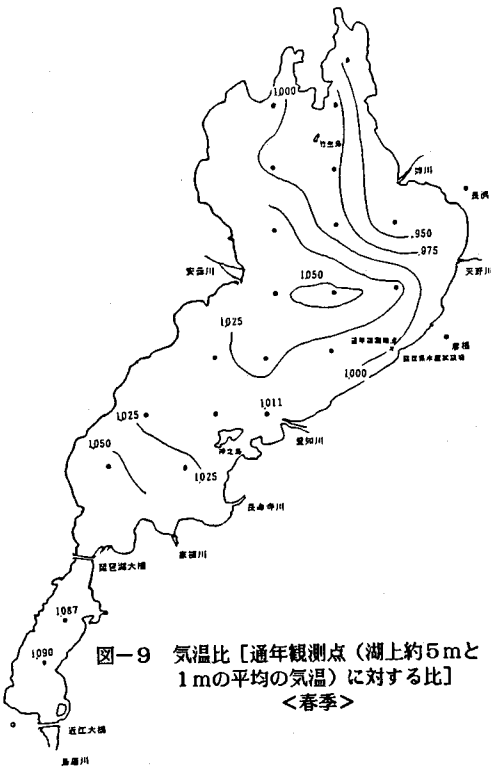


図-9 気温比[通年観測点(湖上約5mと1mの平均の気温)に対する比] <春季>

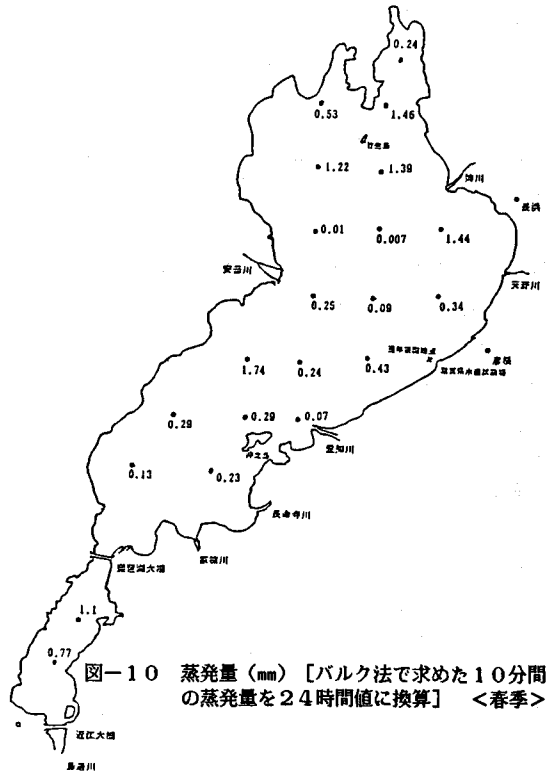


図-10 蒸発量(mm)[バルク法で求めた10分間の蒸発量を24時間値に換算] <春季>

が大きいとき蒸発量が大きくなる傾向があること、などが読み取れ、琵琶湖の秋、冬の水位低下に湖面蒸発の大きさが反映されている。

なお、バルク法と熱収支法および大型蒸発計との比較であるが、現段階では熱収支法においては水体の貯熱量評価を計算に入れるまでに至っていないこと、また、大型蒸発計は降雨、凍結の影響の除去、水温補正など、いくつかの問題を残しているため、本論では提示することができなかった。今後こうした問題を解決し、日および半旬単位で蒸発量が渦相関法、バルク法などと比較、評価できるよう高めていきたい。

(4)移動観測と面的評価の試み

移動観測結果の一例として60年5月下旬に実施したものを図-8,9,10に、それぞれ風速比、気温比（移動観測点の湖東基地観測点との比）および蒸発量（バルク法で求めた10分間の蒸発量を24時間値に換算）で示す。蒸発量については、種々の気象要素の反映された結果であり、この図から単純に各地点間の違いを議論できないが、バルク法においてはバルク係数 CB が 10^{-3} のオーダー、風速 W_{s1} は 10^2 のオーダー、 $q_s - q_1$ は 10^{-2} のオーダーだから、蒸発に大きく関係する要素は風速となる。そこで大胆であるが、風速比のみを用いた湖面蒸発量の求め方を以下に記す。

まず、琵琶湖全域で北よりの風か南よりの風か風系別にまとめ、風速比の分布パターンを構成する。いま、冬季と春季の風系は北寄りであったので、北寄りの風系での風速比の平均的分布を描くと図-11のようになる。この図の等値線から、風速比を領域ごとに描き直したものが図-12である。図-12の領域ごとの風速比をそれぞれの領域の面積で重みづけして平均すると0.781が得られる。湖東基地のある基準メッシュで風速比は0.8となるので、基準メッシュでの蒸発量を E_R とすれば湖全体の平均的な蒸発量は、 $0.781 \times E_R / 0.8$ となり、湖全体からの蒸発量は、 $0.781 \times E_R / 0.8 \times (\text{湖の表面積})$ で与えられる。図-13は湖東基地で1.26(mm/day)の蒸発量を観測した日の領域ごとの湖面蒸発量の値である。

5. おわりに

以上、琵琶湖湖面蒸発量の観測・評価システムを中心に述べてきた。その結果、通年観測にあつては測定要素が少なく、維持管理も容易なバルク法が精度的にも上位にあり、今後とも水位低下の把握・予測に有用な情報を提供しえることがわかった。今後は、バルク係数の範囲化をデータ収集と併せてさらに改善していきたい。一方、面的評価にあつては、風速比のパターン化のみで実施したが、今後は風速比に加えて気温比、水温比も考慮してバルク係数を定め、バルク法による推定を試みたい。

参考文献

- 1) 光田寧・塚本修：湖面蒸発量の直接測定について、京大防災研水資源研究センター研究報告、頁3-22, S. 59.1

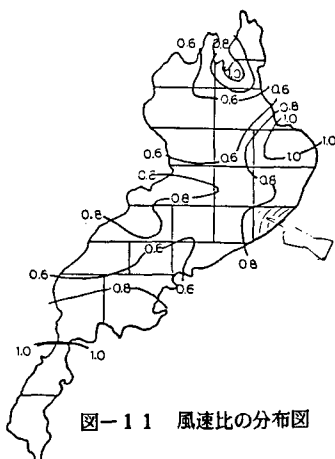


図-11 風速比の分布図

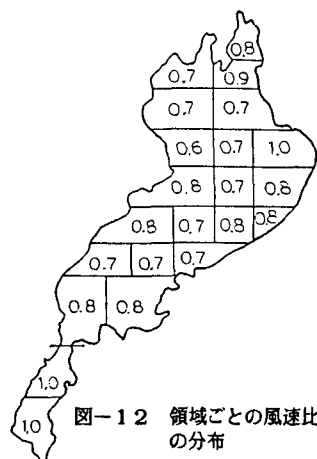


図-12 領域ごとの風速比の分布

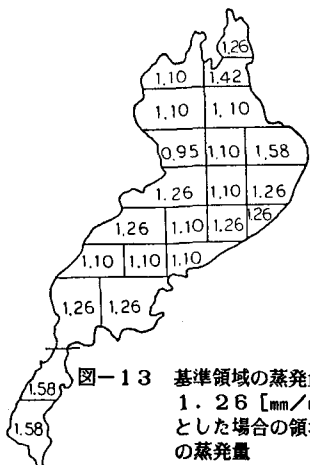


図-13 基準領域の蒸発量を1.26 [mm/day]とした場合の領域ごとの蒸発量