

流況シミュレーションにおける水上風の補正

WIND CORRECTION AND ITS EFFECT ON LAKE HYDRODYNAMICS SIMULATION

平山彰彦¹・和氣亜紀夫²
Akihiko Hirayama and Akio Wake

¹正会員 M.S. 清水建設(株) 技術研究所 (〒135東京都江東区越中島3-4-17)

²Ph.D. 同上

A method of over-water wind velocity correction, using land-based wind data, was applied to a hydrodynamics simulation in a large lake based on a roughness change compensation combined with two-dimensional effective fetch concept. Wind speed could be accelerated as much as 1.4 times when wind moves from land to water surface at a 10 km fetch. The wind speed increase corresponds to doubling of wind shear stress, suggesting its significant effect on hydrodynamics.

Compared with uncorrected simulation results, the corrected approach reproduced significantly more accurate water level variations particularly under strong winds, pointing to the need of such land-to-water wind modification for precise modeling of hydrodynamics of large water bodies.

Key Words : Wind, roughness, fetch, seiche, simulation

1. 目的

水質の予測などを目的として水域の流れを計算する際には、風は既存データとして与えられることが多いが、そのデータの質が吟味されることは少ない。精度の良い流れや波の計算には、精度の良い風の場の再現が不可欠であるが、ほとんどの場合、風のデータは最寄りの測候所で観測されたものであり、水域の内部で測られたデータが得られることは1部の例外を除いてまれである¹⁾。

水上の風は、周辺の地形により空間的に変化すると共に、陸から水域へ吹く風は、表面粗度の変化により風速が変化する。風の空間的な変化を再現するためには、限られた沿岸の測候所の風のデータを補間する必要がある、これに関しては5大湖におけるPlatzman²⁾による研究がよく知られている。琵琶湖南湖を対象に一樣風と分布風による流況の違いを大久保ら³⁾が数値実験により調べた例もある。一方、測候所で測定された風が、陸域で発達した風の場合には、表面粗度の変化に対する補正を行う必要があると考えられるが、この補正が行われることはまれである。

風が陸から水域へと吹く場合には、表面粗度が低減するために水上で風速が増す。例えば、霞ヶ浦の

湖岸近くにある土浦測候所で測られた風速は⁴⁾、同じ時間に湖心観測所で測られた風速に比べて⁵⁾、常に小さい。本文で記すように、市街地で発達した風が水面上に移動した場合、フェッチが10kmの場合で、水上風速は約1.4倍にもなる。したがって、湖周辺で測定された陸風のデータを流況の計算に用いる場合には、フェッチを考慮した表面粗度の補正を行う必要があるといえる。

本報においては、湖周辺の測候所の風のデータを、フェッチと表面粗度の変化を考慮して補正する例を示す。ヨーロッパ最大の湖であるハンガリーの巴拉トン湖のデータを対象に、2次元流況の計算を行い、実測値との比較を行うことにより、風の補正の重要性を示す。

2. 風速の補正

(1) 粗度とフェッチの変化

陸域で十分に発達した風が水域に入ると、大気境界層内では、表面粗度の低減により風速は増加し、水域の粗度に応じた風速まで発達する。逆に、風が水域から陸域に移動する場合には、粗度の増加により、風速は徐々に低減し、陸域の粗度に応じた風速

に落ち着く。この遷移領域の風の変化は、粗度が変化してから距離（フェッチ）の関数として表すことができる。遷移領域における風の摩擦速度を $u_{*,local}$ 、発達風の摩擦速度を $u_{*,a}$ とすると、この2つの摩擦速度の比は、フェッチファクターとして定義され、Deaves and Harris model⁶⁾ により次式で計算することができる⁷⁾。

$$S_x = u_{*,local} / u_{*,a} = 1 - \frac{\ln(z_{0,b} / z_{0,a}) \ln(10 / z_{0,a}) S_{E,b}}{0.42 + \ln m_0 \ln(10 / z_{0,b}) S_{E,a}} \quad (1a)$$

$$m_0 = 0.32 X / [z_{0,a} (\ln m_0 - 1)] \quad (1b)$$

ここに、 z_0 =粗度パラメータ、 S_E =エクスポージャーファクターで、発達風の風速と基準風速との比。添え字a, bは粗度変化した後とする前の環境を表す。式1の計算には繰り返し計算が必要になる。式1の計算結果は、フェッチが大きくなると、1に漸近するが、フェッチが100kmより短いときは図-1のように、ほぼ対数近似をすることが可能であり、繰り返し計算を行わなくても簡単に、 S_x を求めることができる。図中、記号は式1による計算値、実線と破線は図中に示されている近似式による計算値を示している。この図では、 S_E は粗度変化が2-3階建ての建物でできた街（粗度区分4； $S_E=0.711$ ， $z_0=0.3m$ ）から水面（粗度区分0； $S_E=1.211$ ， $z_0=0.003m$ ）に移動する場合と、田畑と林（粗度区分3； $S_E=0.861$ ， $z_0=0.1m$ ）から水面に移動する場合を対象にしている。フェッチに応じた風速の変化は、 S_E の比に S_x を乗じて次式により計算できる。

$$V_{local} = \frac{S_x S_{E,a}}{S_{E,b}} V_b \quad (2)$$

ここに、 V_b は粗度が変化する前の環境における発達風の速度、 V_{local} は粗度が変化した後の局地風速である。 V_b にかかる粗度補正係数の計算結果を、図-2に示す。風の移動が粗度区分4→0の場合には、フェッチが10 kmの地点において、風速は1.4倍になることが分かる。これは応力に換算すると約2倍であり、流況および波の推算値の精度を大きく左右し、したがって、水質に大きな影響を及ぼす底質巻き上げの予測精度にも極めて大きな影響を及ぼすことが分かる。

(2) 有効フェッチ

フェッチは、風上湖岸から水上のある点までの距離であるが（実フェッチ）、フェッチに比べて水域の幅が狭い場合には、風から水へのエネルギーの伝達が制限されることが知られている（例えば、近藤⁸⁾）。その場合のフェッチの計算にはShore Protection Manual⁹⁾で提案されている、有効フェッチを用いるのが最も適切であると考えられる。これは、風の主方向両側45°の間の最短フェッチの余弦を、重ね合わせて主方向のフェッチを求めるも

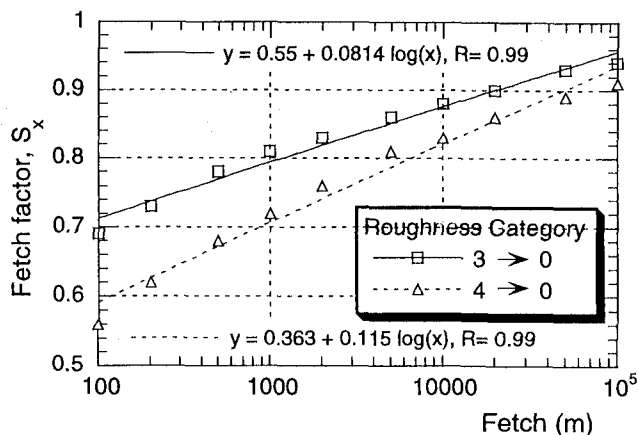


図-1 フェッチとフェッチファクターの関係

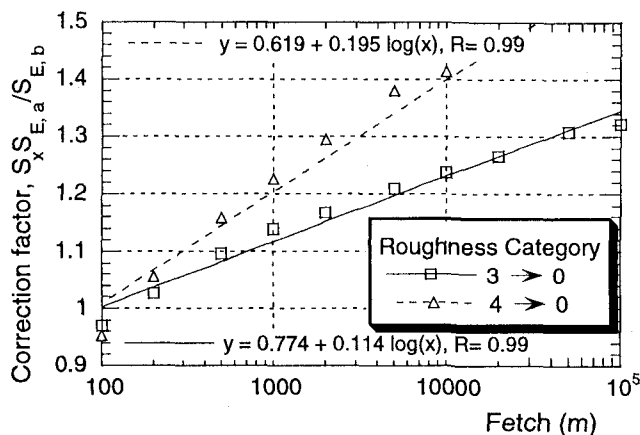
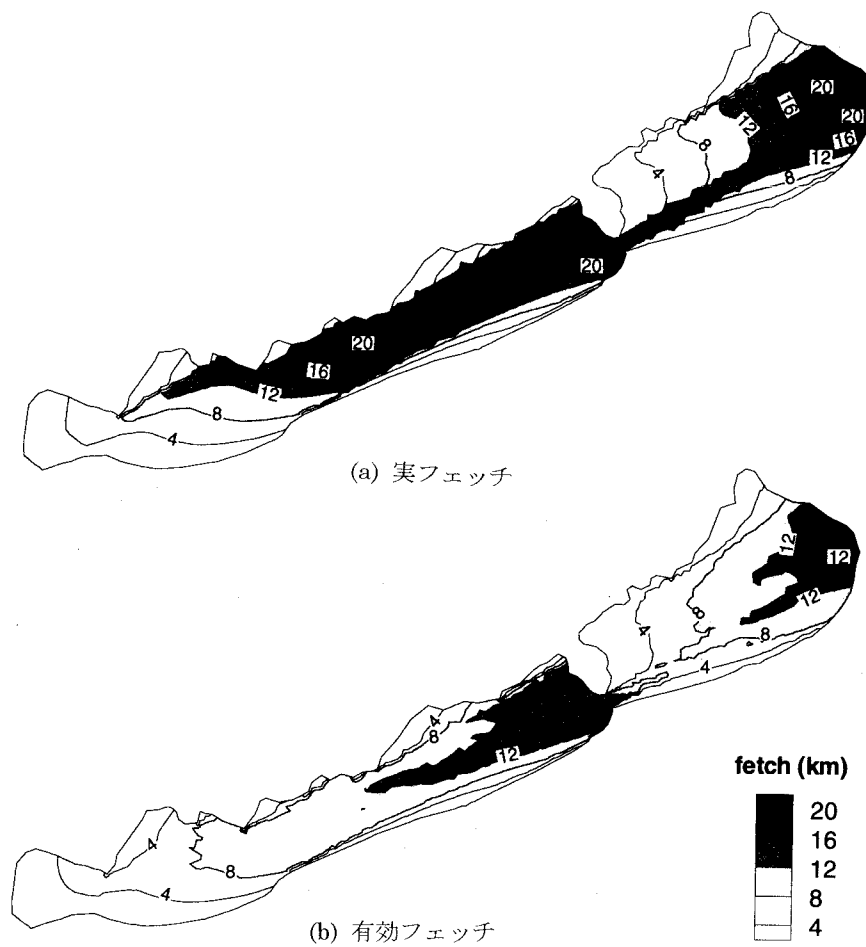


図-2 フェッチと粗度補正係数の関係

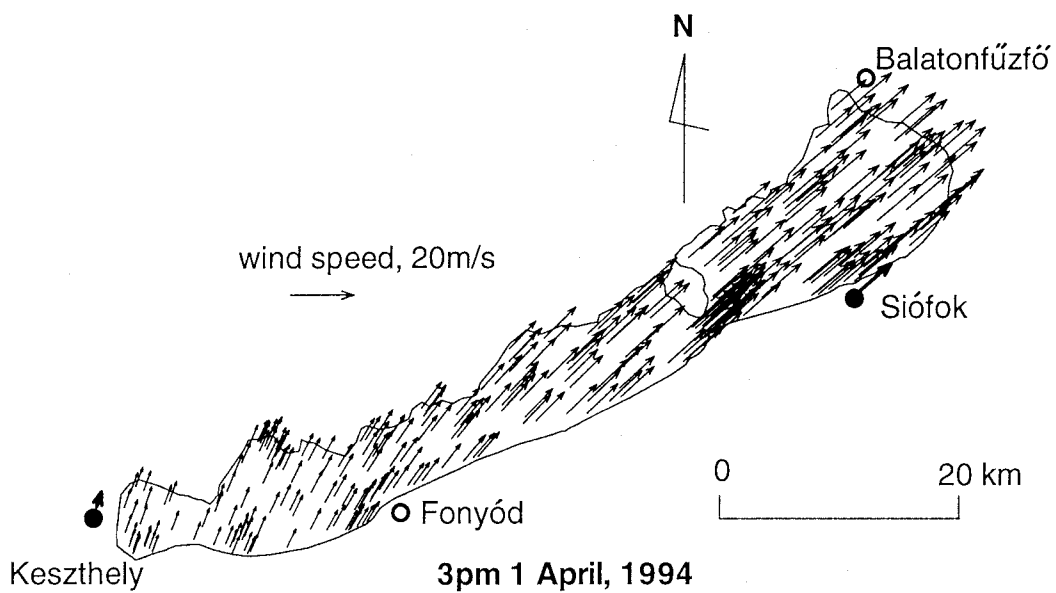
ので、左右45°の範囲の最短フェッチが主方向のものより短い場合には、フェッチは主方向だけを考えたものより短くなる。図-3に、バラトン湖を対象に実フェッチと有効フェッチを比較したものを示す。風向きは、湖の軸方向に、南西方向から吹いた場合を考えている。実フェッチの場合には、南西岸からの距離と共にフェッチが長くなり、半島のある峡部を越えて、20km以上のフェッチゾーンが継続することになり、これを計算に用いるのは不合理である。これに対して、有効フェッチの場合には半島のところで水域が狭くなる影響が考慮されるためにフェッチが一度途切れ、より現実的な状況を表していることが分かる。

3. 強風時の水位変動の再現

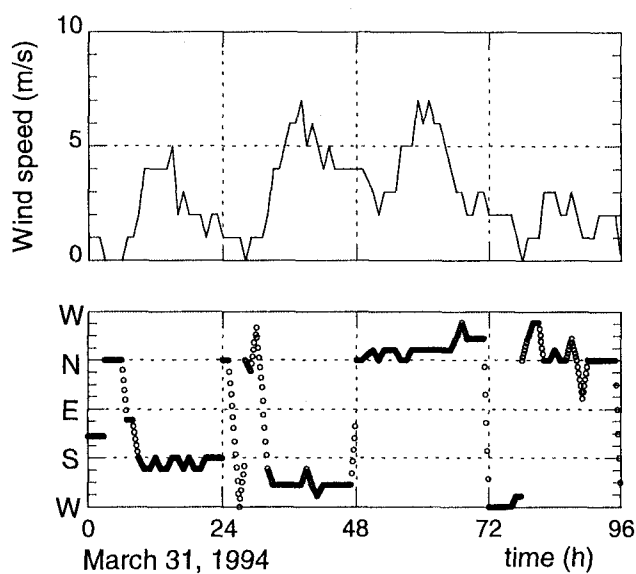
上記の風の補正法に基づいて、バラトン湖の流況計算を行った。基礎方程式は非線型移流項、拡散項、コリオリ力、底面応力、風による表面応力からなる深さ方向に積分した2次元の運動方程式および連続方程式である。数値計算には有限要素法¹⁰⁾を用い、



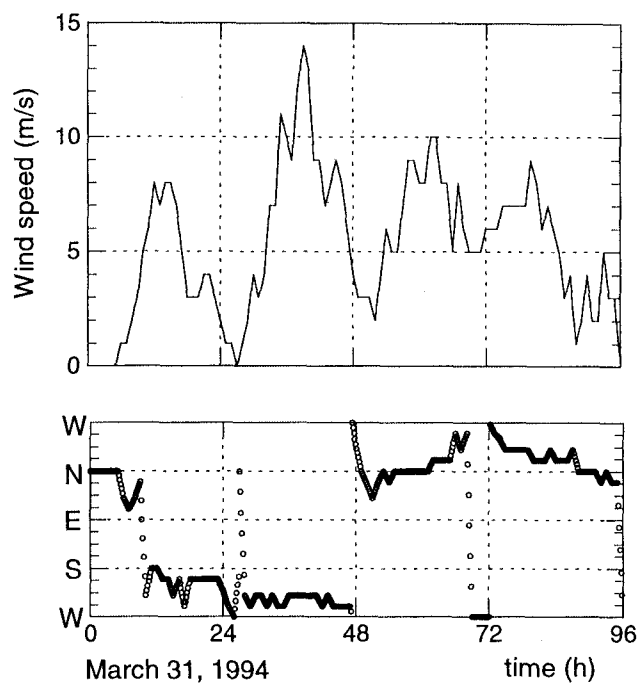
図一3 南西風に対する実フェッチと有効フェッチのコンター図



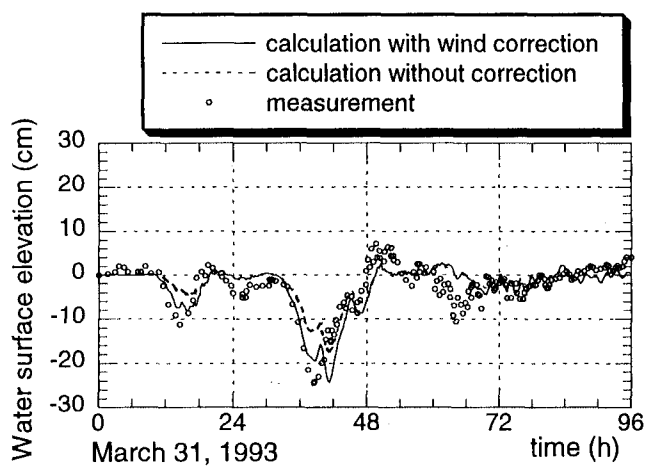
図一4 粗度補正と空間補間を行った湖上風の分布



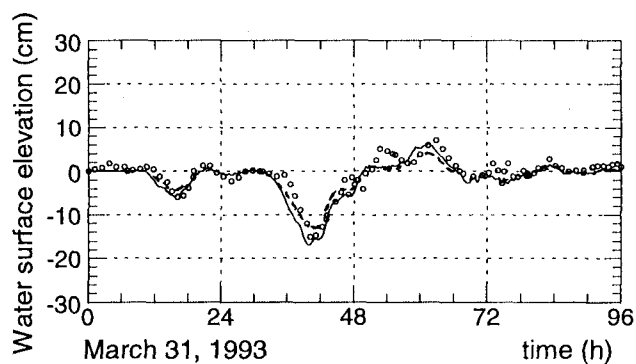
(a) Wind data at Keszthely



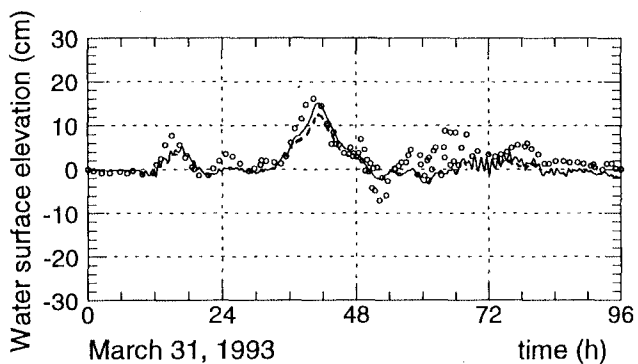
(b) Wind data at Siófok



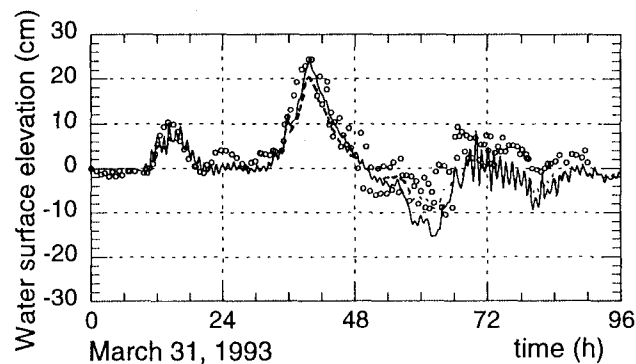
(c) Keszthely



(d) Fonyód



(e) Siófok



(f) Balatonfüzfő

図一五 風のデータと粗度補正前・後の水位の計算値と計測値との比較

湖を約7000個の三角形要素に分割した。風の抗力係数は流れの計算に一般に用いられ、風速の関数である $Wu^{11)}$ の式を用いている。水平方向の渦動粘性係数は、Smagorinsky model¹²⁾ に基づいて各要素での流速勾配から求めている。バラトン湖の平均水深は約3mで、沿岸部の70%は人工護岸であり、最低水深を50cmとした。底質は主にシルト質で、Manningの粗度係数を $0.02s/m^{1/3}$ に設定した。KeszthelyとSiófokにある測候所において毎時の10分間平均風速が観測されている(図-4参照)。Keszthely測候所は湖岸より約1km内陸部にあり、東からの風を除けば、陸域で発達した風を計測していることになり、風速の粗度補正が必要である。周辺の環境は、2-3階の建物からなる町と林が散在する畑からなり、粗度区分を3.5とした。Siófok測候所は湖岸に位置しており、湖から吹く風の粗度補正は必要ない。南方からの風に関しては、粗度区分3の陸上で発達した風として粗度補正を行った。各要素のノードにおける風は、粗度補正した2点のデータを測候所からの距離の2乗分の1で重み付けして空間補間を行い分布させた。各ノードにおけるフェッチは36方向(10度の分解能)で計算している。

計算に用いた風のデータは、1994年3月31日から4日間のものである。図-4に、最大風速時(4月1日午後3時)の風の分布を示す。一樣風に比べて、風向、風速が大きく変化していることが分かる。この図では見易いように、風のベクトルの数を約10分の1に間引いて示してある。図-5(a, b)の風の時系列データに示されるように、地形の影響により、一般にKeszthelyで観測される風速がSiófokのものに比べて小さく、風速の粗度補正と共に、風を空間分布させることが重要であるといえる。風向から判断できるように、Keszthelyにおいてはほぼ全期間中、Siófokにおいては4月1日午後と2日の強風時に、計算において風速の粗度補正が行われている。

図-5(c-f)は、粗度補正を行った場合と行わない場合の水位の計算結果を計測値と比較したものである。4月1日の南西の強風による吹き寄せにより、湖の西側にある2地点(Keszthely, Fonyód)と東側の2地点(Siófok, Balatonfűzfő)の水面変動の位相が逆になっていることが分かる。SiófokとBalatonfűzfőで顕著に見られる、72時間近辺における周期約1時間の水位の振動周期は、Merianの式から導かれるセイシュの周期にほぼ一致し、60時間前後に吹いた北風により発生した短軸方向のセイシュである可能性が高い。図-5(c)に示されるように、風速補正の影響の大きいKeszthelyにおいては、粗度補正を行った結果、強風時の水位の再現性がかなり改善されている。その他の場所においても、全般に風速の粗度補正を行った方が、計算値の予測精度が上がる事が分かる。

流れの計算結果に影響する他のパラメータとして、Manningの粗度係数 n および風応力の抗力係数 C_d があるが、基本的には物理的根拠なしに変化させるもの

ではない。浅い水域の計算では、 n は0.02前後を用いるのが一般的であり、バラトン湖でも過去にShanahan¹³⁾が0.019を用いている。例えば、 n を0.01にすることで、Keszthelyの41時間における水位のピーク値に近い値が得られるが、45時間におけるピークが過大になるなど問題がある。さらに本質的には、風速の補正は風の場合が本来持っている空間的な非一様性を再現しようとするものであり、 n , C_d のキャリブレーションとは別個なものである。

以上の結果より、湖全体における、風の分布、表面粗度、底面粗度の条件が適切であることが分かると共に、湖の西側を支配するKeszthelyの風のデータの粗度補正を行うことにより、実測値に近いより妥当な計算結果が得られることが分かる。

4. 結論

粗度変化と有効フェッチを考慮して水上風を補正する方法を示し、バラトン湖周辺において2カ所で測られた風の実測データを補正して、強風時の流れの計算を行い、水位の実測値との比較を行った。その結果、風速の補正を行った計算結果は、実測値をよりよく再現するようになり、精度の良い流れの計算を行う上で、水上風の補正が重要であることが分かった。

参考文献

- 1) Resio, D. T. and Vincent, C. L.: An examination of the viscous wind-driven circulation of the arctic ice cover over a two-year period, AIDJEX Bulletin No. 37, pp95-134, 1977.
- 2) Platzman, R. S.: Estimation of winds over the Great Lakes, Miscellaneous paper H-76-12, Corps of Engineers, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Miss., 1976.
- 3) 大久保賢治、村本嘉雄、久保田一: 琵琶湖南湖の湖流解析、京都大学防災研究所年報, No. 26 B-2, pp. 503-530, 1983.
- 4) 気象庁アメダスデータ、土浦、1988.
- 5) 田中昌宏: 日成層が浅い湖の流動と混合に及ぼす影響について、東京工業大学博士論文、1990.
- 6) Harris, R. I. and Deaves, D. M.: The structure of strong winds, Wind Engineering in the Eighties, Proc. of the CIRIA, Construction Industry Research and Information Association, Paper 4, pp. 1-93, 1981.
- 7) Cook, N. J.: The designer's guide to wind loading of building structures, Butterworths, 1985.
- 8) 近藤純正、水環境の気象学—地表面の水収支・熱収支—、朝倉書店、1994.
- 9) U.S. Army Coastal Engineering Research Center: Shore Protection Manual Volume 1, 1973.
- 10) 平山彰彦、和氣亜紀夫、熊谷道夫: 富栄養水域水質の短期変動の数値シミュレーション、海岸工学論文集、No. 40, pp. 1066-1070, 1993.

11)Wu, J.: Wind stress and surface roughness at air-sea interface: J. of Geographic Research, Vol. 74, No. 2, 444, 1969

12)Smagorinsky, J.: General circulation experiments with the primitive equations: I. the basic experiment, Monthly Weather Review, Vol. 40, No. 1, pp. 91-106, 1983.

13)Shanahan, P.: Linked hydrodynamics and biogeochemical models of water quality in shallow lakes, MIT Ralph M. Parsons Laboratory Aquatic and Environmental Engineering, Report Number 268, 280 p., 1982.

(1997.9.30受付)