有明海干潟域の乱流観測データを用いた バルク法の沿岸域への適用性に関する検証

Validity test on bulk transfer method over the coastal area of Ariake Sea using in situ turbulence data

田中健路1

Kenji TANAKA

The bulk transfer method is a most-widely used procedure for the seasurface-atmosphere energy interaction, in which the coefficients are parameterized by wind speed, temperature and humidity difference. This study aims to validate the coefficient over shallow water, called Panin model, including exposure/submerging process using in situ turbulence data observed at the intertidal zone nearby Kumamoto Port. The Panin model had a good correlation under the water level higher than 1.5m with westerly wind (i.e. sea breeze). Because of the correction coefficient has a -2/5 power of water depth, the correlation between Panin model and eddy correlation measurement became smaller as the water level decreased. The soil /water coverage of flux footprint area plays an important role in the validation of bulk method.

1. はじめに

バルク法は、平均風速と気温差・湿度差により、地表・ 海面から大気への運動量・熱輸送を算出する方法であり、 気象・海洋数値モデル(Xueら、1994; Mellorら、2003 など)や現地観測(Karaら、2000など)で非常に多く用 いられている.海面を対象としたバルク輸送係数は Kondo(1975)による風速に対する関数形などが知られ ており、これまで多くの研究により、様々な水面条件下 でのバルク輸送係数が求められてきている.浅い水面を 対象とした熱輸送モデルとして、Paninら(1996)が水深 と風速による補正関数を提唱しており、湖面上の観測に よる検証を行ってきている(Beyrichら、2002; Paninら, 2006).

有明海をはじめとする閉鎖性内湾を対象に熱環境特性 を含めた数値モデルの計算が行われてきているが、これ らの計算の殆どは、水位変動に伴うバルク輸送係数の影 響を無視している.また、Paninら (2006)のように、水 深2-3m程度の浅い水面での検証は行われているが、潮 間帯特有の干出・冠水時の水深が極度に浅くなる場合に ついて、現地でのフラックス直接観測による検証は行わ れていない.

そこで、本研究では、熊本港北部に観測塔(田中ら、 2004;成松ら、2005)で実施された干潟上の気象観測デー タを使用し、Paninら(1996)の提唱した輸送モデルの極 浅海条件下での適用可能性について検討を行った。

2. 浅い水面上のバルク法 (Paninモデル)

バルク法では,運動量フラックス(τ),顕熱フラック ス(H),潜熱フラックス(IE)は,それぞれ,式(1)~(3)で 表わされる.

$$\tau = \rho C_{\mathcal{M}} U_z^2 \tag{1}$$

$$H = \rho c_p C_H \left(T_s - T_z \right) U_z \tag{2}$$

$$lE = \rho l C_E (q_s - q_z) U_z \tag{3}$$

ここで、U=平均風速、 T_s =地表面温度、 T_s =平均気温、 q_s =地表面比湿 (kg/kg)、 q_s =大気比湿、 ρ =大気密度、 c_p =定圧比熱、I=水の蒸発潜熱を表す. C_M 、 C_H 、 C_E は 運動量・顕熱・水蒸気輸送に対するバルク輸送係数である.

Paninら(1996)は、浅い水面上でのバルク法によるフ ラックス補正法として、以下の補正関数を提唱した.

$$H = \rho c_p f(\eta, D) C_H \left(T_s - T_z \right) U_z \tag{4}$$

$$lE = \rho l C_E f(\eta, D) (q_s - q_z) U_z \tag{5}$$

ここで, fは水深 (D) と波高 (η)の関数

$$f(\eta, D) = 1 + k_{SW} \frac{\eta}{D} \tag{6}$$

であり、 C_{tt} 、 C_{ε} は水深が十分深いときの海面バルク輸送係数である.式(6)において、補正係数 $k_{str} \approx 2$ 、 η は有効波高であり、以下の式で定義されるものである.

$$\eta \approx \frac{0.07U_z^2 \left(gD/U_z^2\right)^{3/5}}{g}$$
(7)

1 正 会 員 博士(理学) 熊本大学大学院自然科学研究科助教



図-1 Paninモデルにおける水深補正係数(等値線)の水深・風 速依存性

式(6),(7)により与えられる補正関数の値と風速・水深 との関係を表したものを図-1に示す.

式(4), (5)の C_{H} , C_{E} は、中立時の係数 C_{HN} , C_{EN} に安定度 パラメータ(z/L)に依存する関数 f_{H} (z/L)

$$f_{H}\left(\frac{z}{L}\right) = \begin{cases} \left(1 - \frac{z}{L}\right) \left[1 + 10^{-2} \left(\frac{z_{0}u_{*}}{v}\right)^{\frac{3}{4}}\right] & \text{at } \frac{z}{L} < 0\\ \left(1 + 3.5 \frac{z}{L}\right)^{-1} \left[1 + 10^{-2} \left(\frac{z_{0}u_{*}}{v}\right)^{\frac{3}{4}}\right] & \text{at } \frac{z}{L} > 0 \end{cases}$$
(8)

を乗じることで得られる (Panin ら2006). ここで, ν は大気の分子粘性係数,uは摩擦速度, z_0 は海面の粗度 長で次式で表わされる.

$$z_0 = z \exp(-\kappa / C_U^{1/2})$$
 (9)

ただし, κはカルマン定数である.

3. 観測データを用いたフラックス算出

検証用の現地観測データとして,熊本港北側の干潟域 の観測塔(北緯32°46'5",東経130°35'40")で行われた一 般気象要素観測(田中ら,2004)および乱流渦相関フラッ クス観測(成松ら,2005)で取得されたデータを使用し た.図-2に観測点の位置を示す.水圧式水位計(PTX 1830,Druck)による平均水位測定データを用いて,補正 係数の算定を行った.解析対象は2005年7月26日~11月8 日まで期間で,平均水位5cm以上の冠水条件を抽出して 計算を行った.観測点付近では,昼間には有明海から熊 本平野への海風(240-360deg),夜間には熊本平野から 有明海への陸風(40-140deg)が吹く日変化が卓越してお り(Tanakaら,2005など),これに台風や移動性高気圧 などの大きなシステムに伴う風系が重なる特徴がある. 従って,バルク輸送と水位との関係の他に,風向依存性 に関する観点からの分析が必要となる.





図-2 有明海干潟環境観測塔の位置

渦相関フラックスの算出法を述べる.

(1) バルク法による計算

平均風速は、フラックス直接観測で使用している超音 波風速計(81000, YOUNG)の10Hzサンプルデータより 10分平均値を使用し、温度湿度計(HMP45A, VAISALA) による気温・湿度と組み合わせて計算を行った.海面温 度(T_{s})は、4成分放射計(MS70, EKO)より測定され る上下2成分の長波放射フラックスより算出した(田中 ら、2004).また塩分による影響を考慮するため、海面 の比湿を飽和比湿の0.98倍として計算を行った(日本気 象学会,2001).

(2)品質管理過程を含めた渦相関フラックスの算出
Paninモデルの比較検証のため、渦相関法に基づく顕
熱フラックス(*Heath*),潜熱フラックス(*IEeath*)

$$H_{eddv} = C_{p} \rho \overline{w'T'} \tag{10}$$

$$lE_{eddv} = l\rho \overline{w'q'} \tag{11}$$

を乱流観測の生データより算出して求めた. ここで, wは鉛直風速成分, Tは気温, qは比湿であり, 記号⁻⁻は 時間平均, は平均からの変動成分を表す. 品質の良好な 乱流観測データを抽出するために, 以下に示すデータ処 理を行った (Mauderら, 2004).

・測定レンジ外のデータの有無のチェック

- ・データスパイクチェック(Vickersら1997)
- ガス濃度と鉛直風速の相互相関の最大値解析
- ・パワースペクトル, 共スペクトルのロスの補正(Moore, 1986)
- ・鉛直風速に関する補正(Schotanusら1983)
- 密度の微変動に関する補正(Webb補正)(Webbら1980)
- これらのデータ処理を行った後、乱流統計量に関する定

常性パラメータ,積分化した乱流特性(*ITC*)の2種類の パラメータの大小により,それぞれに対する9段階のデー タ品質レベルを与え,二種類の品質レベルの組み合わせ により最終的には5段階のデータ品質レベルを決定する.

定常性パラメータ(RN)は、スカラーxと鉛直風速wとの共分散により、次式で定義される.

$$RN = \frac{\overline{(x'w')_{5} - (x'w')_{30}}}{\overline{(x'w')_{30}}}$$
(12)

添え字の30は30分間の統計値を表し,添え字の5は,毎5 分のx,wの共分散の平均値である.30分の時系列の中 に海風前線などの不連続な運動が含まれるとRNの数値 が大きくなる.

積分化した乱流特性 (ITC)は、スカラーxに対する無 次元標準偏差 (σ_x/x)の実測値と、 σ_x/x ・のz/Lに対する 理論関数とのズレを規格化して得られる.

$$ITC = \left[f\left(\frac{z}{L}\right) - \left(\frac{\sigma_x}{x_*}\right)_{\text{meas}} \right] / \left(\frac{\sigma_x}{x_*}\right)_{\text{meas}} \right]$$
(13)

式(12),(13)の2つのパラメータの大きさとそれに対応 するデータ品質フラグを表-1に示す.*RNとITC*の2つの パラメータが,30%以内であれば,データは良好とされ る.100%を超えれば,データ品質に無視できない問題 が含まれていることになる.

RNとITCの2種類の品質フラグの組み合わせと最終的 なデータ品質フラグとの対応を表-2に示す.表-2より得 られた5段階のフラグが,顕熱・潜熱フラックスのデー タ品質を判定するためのものになる.本研究では,表-2 のフラックスの品質フラグで1から3のレベルのデータを

表-1 品質管理パラメータと品質フラグとの対応(Foken ら 2004)

RN, ITC の数値	品質フラグ
0-15%	1
15-30%	2
31-50%	3
51-75%	4
76-100%	5
101-250%	6
251-500%	7
501-1000%	8
>1000%	9

表-2 フラックスの品質フラグの判定基準(Rebmann ら 2005)

品質フラグ(RN)	品質フラグ	フラックスの品
	(ITC)	質フラグ
1-2	1-2	1
1-2	3-4	2
3-4	3-4	3
3-4	5-6	4
5-9	7-9	5

抽出し、バルク法との比較を行った.

4. 結果

潜熱フラックスに関する計算結果として, Paninモデ ルによる計算結果と直接観測結果との比較を図-3に,従 来のバルクモデルと観測結果との比較を図-4にそれぞれ 示す. Paninモデルは従来のバルク法と比べてエネルギー フラックスを10~15%程度大きく算出する傾向が見られ る. 近似直線によれば,バルク法による計算では乱流渦 相関法による観測結果と比べて,15~30%大きく評価し ている.

図-5はPaninモデルで計算した潜熱フラックスに対し て、海風条件(240-360deg)を取り出したものである. 水深による影響を見るために1.5m以上と0.5m以下の計 算結果とに分けている.海風かつ水深1.5m以上の場合 にはR²>0.6と比較的良好な相関が得られているが、水深 の低下とともにフラックスのソース領域内に干出域が出 現し、干出した地表面からの蒸発・熱輸送の効果が無視 されなくなることが挙げられる.また、0.5m以下の水 深の場合には観測値に比べて計算値が全体的に大きく、



図-3 潜熱フラックスのPaninモデルによる計算結果(横軸) と直接観測(縦軸)との相関関係.



図−4 潜熱フラックスの従来のバルク法による計算結果(横軸)と直接観測(縦軸)との相関関係.



図-5 海風条件におけるPaninモデルによる潜熱フラックス (横軸)と渦相関観測による潜熱フラックス(縦軸)と の相関の水深依存性(縦軸・横軸の単位はWm²). 左 から水深1.5m以上, 0.5-1.5m, 0.5m未満の条件を抽出 したときの関係.

水深低下による補正効果観測結果と比べて2倍程度過大 になる傾向である.

図-6は、Paninモデルを用いた顕熱フラックスの計算 結果と渦相関法で観測された顕熱フラックスとの関係を 示したものである。冠水時全ケースを見た場合には、渦 相関観測とPaninモデルとの間の相関は弱く(R²~0.1)、 顕熱フラックスの数値的な範囲も狭い(0~100Wm²前後).



図-6 Paninモデルによる顕熱フラックス(横軸)と渦相関観 測による顕熱フラックス(縦軸)との相関(縦軸・横軸 の単位はWm²). 左から順に,冠水時全データ,海風 かつ水深1.5m以上,陸風冠水時それぞれの条件で抽出 したときの関係.

そのため、全体で見た場合には両者の間の相関関係は明確でない、ところが、潜熱フラックスと同様に、水深 1.5m以上の海風条件を抽出すると、数値自体は0~ 50Wm³の狭い範囲ではあるが、Paninモデルによる計算 結果と渦相関観測とが良く一致する結果が得られた。

陸風条件では、夜間の顕熱輸送が0Wm²前後の条件が 主であるが、観測塔直下の水深が10cm程度のごく浅い 時に、潮上帯側の活発な熱対流に伴う渦が陸風に乗って 測器まで到達する場合も含まれる.これらの条件が重な ることにより、計算値と観測値との相関が弱くなる.

5. 議 論

極浅水深 (水位0.5m以下)のフラックスのばらつきの 原因として、Paninの補正関数自体の効果が強すぎるこ とがまず指摘される.式(6),(7)によれば、補正関数 f(D, η) は 水深の-2/5乗に比例する項を持ち、水深が0に近 づくに連れて正の無限大に発散する.

もう一つの原因とされる水面・底面被覆の不均質性の 効果について,簡単なスケール計算で考えてみる.不安 定時の熱輸送の寄与域とされる,観測塔の風速計の高さ (10m)の10倍の長さの水平領域(半径100m)を考え,周 囲の最大傾斜方向の勾配が1/250と仮定した場合,観測 塔直下の水深が40cmを下回ると,領域内の一部が干出 しはじめ,水面・底面被覆の不均質性が高くなる.閾値 となる水深は,周辺の地形条件と大気の安定度・風向な どによって左右される.本研究では,観測塔周辺の地形 傾斜測定を行っていないため,観測塔周辺の地形情報を 取得し,Footprint 解析と組み合わせて適用限界水深をよ り精確に求めることが今後の課題である.

6. 結 語

本研究では、有明海干潟上の現地観測データを用いて、 拡張型のバルク法の一つであるPaninモデルの適用性に 関する検証を行った.主要な結論は下記の通りである. (1) Paninの提唱している浅い水面上の熱輸送モデルは、 水深1.5m以上の海風条件であれば、ある程度有効的で あることが観測データを用いた検証により示唆された. (2) 水深がゼロに近づくと補正関数が正の無限大に発散 することと、熱・水蒸気輸送の寄与域(観測塔より約 100m前後)に干出域が出現し、底質と大気間の直接的な 熱輸送が行われることにより、水深0.5mを下回る場合 には、補正効果が観測結果と比べて2倍以上過大評価を 引き起こし、かつ、相関が極度に弱くなる.

(3) 平野から数100m離れた潮間帯干潟上でも、相関係数 の差異により、輸送係数の陸風・海風などの風向依存性 が見られた.

上述の(2)と(3)は、海面・地表面の一様定常性を前提と した従来のバルク法の抱える問題点であり、熱交換過程 を取り入れた沿岸海洋モデルを扱う際に非常に重要であ る.

参考文献

- 田中健路・滝川清・成松明(2004):有明海干潟上における大 気-海面-陸面間のエネルギーフラックスに関する観測, 海岸工学論文集,51巻,pp.1131-1135.
- 成松明・田中健路・森本剣太郎・滝川清(2005):乱流渦相関 法を用いた有明海干潟上の地表面フラックス直接観測, 海岸工学論文集,52巻,pp.1081-1085.
- 日本気象学会 (2001):地表面フラックス測定法,気象研究 ノート 第199号
- Beyrich, F., H-J. Herzog, and J. Neisser (2002): The LITFASS project of DWD and the LITFASS-98 Experiment: the project strategy and the experimental setup. Theor. Appl. Climatol., Vol.73, pp.3-18.
- Foken, T., M. Göckede, M. Mauder, L. Mahrt, B. Amiro and W. Munger, (2004): Post-field data quality control, in Handbook of Micrometeorology: A Guide for Surface Flux Measurement and Analysis. Kluwer, Dordrecht, pp.181-208.
- Kara, A.B., P.A. Rochford, and H.E. Hurlburt, (2000): Efficient and accurate bulk parameterizations of air-sea fluxes for use in general circulation model, J. Atmos. Ocean. Tech., Vol.17, pp.1421-1438.
- Kondo, J. (1975): Air-sea bulk transfer coefficients in diabatic conditions, Boundary-Layer Meteor., Vol.9, pp.91-112.
- Mauder, M., and T. Foken (2004): Documentation and instruction manual of the eddy covariance software package TK2. Arbeitsergebnisse, Universit?t Bayreuth, Abteilung Mikrometeorologie, ISSN 1614-8916 26, 42 pp.
- Moore, C.J. (1986): Frequency response corrections for eddy correlation systems. Boundary-Layer Meteor., Vol.37, pp.17-35.
- Panin, G.N., A.E. Nasonov, M.G. Souchintsev (1996): Measurements and estimation of energy and mass exchange over a shallow sea. In: Donelan M. (ed) The air-sea interface. Miami, pp.489-494.
- Panin, G.N., A.E. Nasnov, T. Foken, and H. Lohse (2006): On the parameterization of evaporation and sensible heat exchange for shallow lakes, Theor. Appl. Climatol., Vol.82, pp.123-129.
- Rebmann C., M. Gockede, T. Foken, M. Aubinet, M. Aurela, P. Berbigier, C. Bernhofer, N. Buchmann, A. Carrara, A. Cescatti, R. Ceulemans, R. Clement, J.A. Elbers, A. Granier, T. Gr'nwald, D. Guyon, K. Havr'nkova, B. Heinesch, A. Knohl, T. Laurila, B. Longdoz, B. Marcolla, T. Markkanen, F. Miglietta, J.B. Moncrieff, L. Montagnani, E. Moors, M. Nardino, J-M. Ourcival, S. Rambal, ?. Rannik, E. Rotenberg, P. Sedlak, Unterhuber, G, T. Vesala, and D. Yakir, (2005): Quality analysis applied on eddy covariance measurements at complex forest sites using footprint modeling, Theor. and Appl. Climatol., 80, pp.121-141.
- Schotanus, P., F.T.M. Nieuwstadt, and H.A.R. DeBruin (1983): Temperature measurement with a sonic anemometer and its application to heat and moisture fluctuations. Boundary-Layer Meteor., Vol.26, pp.81-93
- Tanaka, K. A. Narimatsu, K. Morimoto and K. Takikawa, (2005): Turbulent Characteristics of the atmospheric surface layer on the inter-tidal zone of the Ariake Sea, Asian and Pacific Coasts 2005, September 4-8, 2005, Jeju, Korea, pp.1816-1829
- Vickers, D. and L. Mahrt, (1997): Quality control and flux sampling problems for tower and aircraft data, J. Atmos. and Ocean. Tech., Vol.14, pp.512-526.
- Xue, M., K.K. Droegemeler, V. Wong, A. Shapiro, and K. Brewster (1995): Advance Regional Prediction System (ARPS)
 Version 4.0 User's Guide, Center for Analysis and Prediction of Stroms, The University of Okulahoma, 380 pp