

1. はじめに

顕熱・潜熱フラックスなどの乱流フラックスの計測は, “直接測定” である渦相関法を除いては, 間接測定で, 物理過程に関する知識をもとに行っている. 例えば, ボーエン比法は温度と湿度の間の相似性 (Reynolds' Analogy) を基礎としている. 過去半世紀以上における微気象学/大気境界層科学での研究の成果は, さらに多くの計測手法の可能性を示唆するものであり, 従来の熱収支観測や乱流観測に比べて, 簡易で実用的なフラックス計測法が産み出される可能性をはらんでいる. 本研究では, このような可能性の一つとして, 乱流消散率からフラックスを算定する” 消散法” の一例を実データに応用し, その可能性を検討することを目的とする.

2. 消散法

乱流エネルギー ($\bar{e} \equiv (\overline{u'u'} + \overline{v'v'} + \overline{w'w'})/2$) およびスカラー量 ($c = \theta, q$) の分散 ($\overline{\theta\theta'}$) は, シアーまたは浮力によって生成され, 分子粘性によって散逸するが, この散逸する量を消散率とよび, それぞれ ϵ, ϵ_c と書く. この消散率は, 境界層乱流の生成要因である乱流フラックスと関連があることから, 消散率から顕熱・潜熱フラックスが求められる. このような手法を” 消散法” と呼び, 主に海洋上のフラックス観測などに用いられている.

モニン=オブコフ相似則 (MOS) によれば, これらは以下のように無次元化され, 安定度 (z/L) の関数として表される. (以下 $c = \theta, q$)

$$\frac{kz\epsilon}{u_*^3} \equiv \phi_\epsilon\left(\frac{z}{L}\right) \quad \frac{kzu_*\epsilon_c}{\overline{w'w'}^2} \equiv \phi_{\epsilon_c}\left(\frac{z}{L}\right) \quad (1)$$

ここで, $L \equiv (-Tu_*^3)/(kg\overline{w'\theta'})$ はオブコフ長さ, $\phi_\epsilon, \phi_{\epsilon_c}$ は, z/L のみの普遍的な関数である. ϵ, ϵ_c が既知であり, また $\phi_\epsilon, \phi_{\epsilon_c}$ の関数形があらかじめ分かっているならば, 式 (1) は, u_* と $\overline{w'w'}$ を未知数とする連立方程式であり, 繰り返し計算によって, $\overline{w'w'}$ すなわち顕熱フラックス ($H = \rho C_p \overline{w'\theta'}$) あるいは潜熱フラックス ($E = \ell \rho \overline{w'q'}$) が求められる. また, 温度と湿度が相似であれば, $\phi_{\epsilon_\theta} = \phi_{\epsilon_q}$ となることから, 式 (1) の第2式の温度に関する式 ($c = \theta$) と湿度に関する式 ($c = q$) の比より, ボーエン比が求められる.

$$Bo = H/E = C_p/\ell (\epsilon_\theta/\epsilon_q)^{1/2} \quad (2)$$

一方, 弱風の日中のような強い不安定条件下では, 式 (1) が u_* に依存しなくなることから, $\phi_\epsilon, \phi_{\epsilon_c}$ の関数

形が $\phi_\epsilon = C_\epsilon(-z/L), \phi_{\epsilon_c} = C_{\epsilon_c}(-z/L)^{-1/3}$ ($C_\epsilon, C_{\epsilon_c}$ は定数) のように単純になる. よって, 以下の式により繰り返し計算をすることなく顕熱・潜熱フラックスが求められることになる

$$H = \rho C_p \left(\frac{g}{T}\right)^{\frac{1}{5}} \left(\frac{\epsilon_\theta}{C_{\epsilon_\theta}}\right)^{\frac{3}{5}} (kz)^{\frac{4}{5}} \quad (3)$$

$$E = \ell \rho \left(\frac{\epsilon_q}{C_{\epsilon_q}}\right)^{\frac{1}{2}} (kz)^{\frac{2}{3}} \left(\frac{g\overline{w'\theta'}}{T}\right)^{\frac{1}{6}} \quad (4)$$

3. 観測概要および解析データ

解析に用いた観測データは, 1998 年 10 月に行った大気境界層観測によって得られたものである. 観測地点は, 新潟県南蒲原郡中之島町土地改良区内の水田である. 周辺は, 信濃川右岸に広がる約 5km × 20km の広大でかつ圃場の行き届いた水田地帯であり, 観測地点から周辺約 4km 四方は全く遮蔽物の無い平坦な土地である. 観測期間は収穫直後であるため, 水稻の株が残っており, 排水は終わっている状態であった. 表 1 に示すとおり, 観測項目は乱流計測器を中心としたものと風速のプロファイルの測定を目的としたものであり, このうち本発表では乱流計による観測データの解析について発表する.

乱流データの前処理 (工藤他, 1998) は, 玉川 (1999) や塚本 (1998) によるものを本研究での使用測器に合わせて採用している.

4. 消散法の応用

観測データを用いて, 上記の消散法による顕熱・潜熱フラックスを算定するにあたり, まず消散率の算定が必要である.

i) 消散率の算定 乱流観測データから消散率を求めるには, 一般に慣性小領域におけるエネルギースペクトルと消散率の関係を利用する方法がとられるが, ここでは構造関数から算定する方法 (Albertson et al., 1997)) を用いる. 慣性小領域において, 2 次の

表 1: 観測項目の諸元

観測計器	観測項目
超音波風速計 (カイジヨー, DA600)	u, v, w, T
赤外線湿度二酸化炭素変動計 (Advantec E009B)	q, c
温湿度計 (Vaisälä HUMICAP)	$\overline{T}, \overline{q}$
傾斜計 (カイジヨー, CM100R)	DA600 の傾斜
回転台 (Emotator)	DA600 の向き
三杯微風速計・風向計 (牧野)	\overline{u} , 4 高度

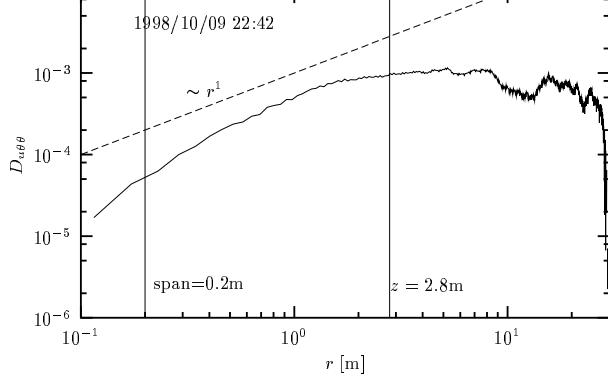


図 1: 構造関数の一例と式への当てはめの例

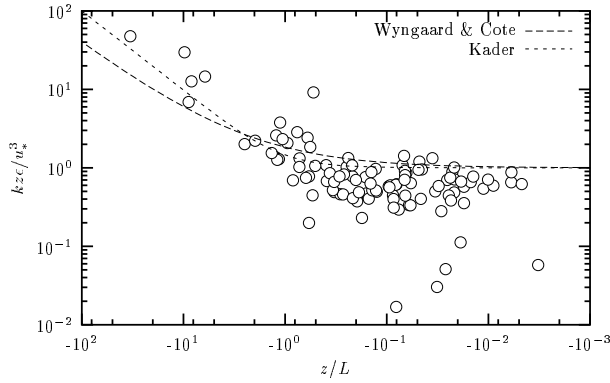


図 2: 式 (6) により算定された ϵ

構造関数 $D_{aa}(r) \equiv \overline{(\Delta_r a)^2}$ ($\Delta_r a \equiv a(x+r) - a(x)$) は乱流消散率と以下の関係があることが等方性乱流理論 (Kolmogorov, 1941) から導かれる.

$$D_{uu}(r) = 4.0\alpha\epsilon^{\frac{2}{3}}r^{\frac{2}{3}} \quad D_{cc}(r) = 4.0\beta\epsilon_c\epsilon^{-\frac{1}{3}}r^{\frac{2}{3}} \quad (5)$$

α, β は, それぞれ定数 ($\alpha \sim 0.52, \beta \sim 0.8$) である. また, 3 次の構造関数 $D_{abc}(r) \equiv \overline{\Delta_r a \Delta_r b \Delta_r c}$ も同様に,

$$D_{uuu}(r) = -\frac{4}{5}\epsilon r \quad D_{ucc}(r) = -\frac{4}{3}\epsilon_c r \quad (6)$$

観測データより求めた構造関数に上記の式を当てはめ, ϵ, ϵ_c を求める. 構造関数の一例を示したのが図 1 であり, 求められた ϵ を MOS によって無次元化して z/L に対してプロットしたのが図 2 である.

ii) 消散率からフラックスの算定 上記のようにして求めた消散率から, 式 (2)-(4) を用いてフラックスあるいはボーエン比を求めた. 図 3, 4 はそれぞれ, 渦相関法による観測値との比較である.

5. 考察

本研究の結果より消散法に関して以下のことが明らかになった. 1) 2 次構造関数からの消散率の算定においては, α, β の値の確定が重要である. 2) 消散法によるフラックスの算定は, ばらつきが大きく, 精度向上の方策が必要であるが, 3) 一方ボーエン比の算定はかなり良い精度である. 特に 3) は, 慣性小領域の等方性乱流において, 温度と比湿の相似が良くなり立つことに他ならない.

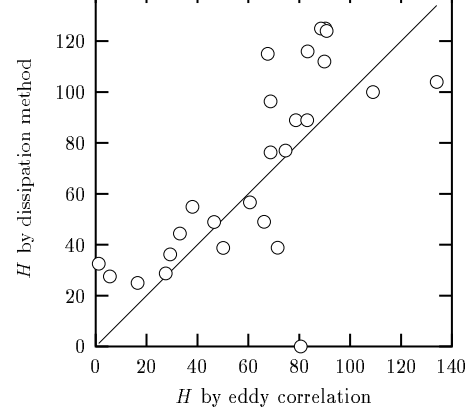


図 3: 消散法 (式 (6) と式 (3)) によって求められた H と渦相関法による H の比較

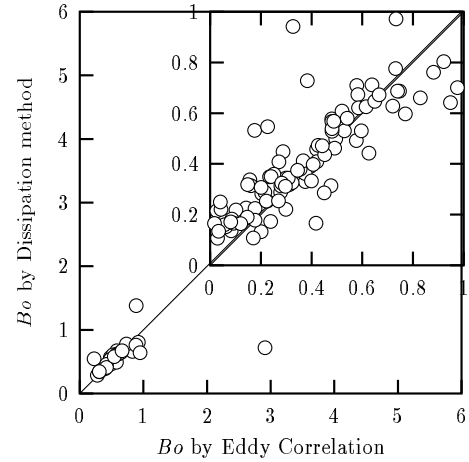


図 4: 消散法 (式 (5) と式 (2)) によるボーエン比と渦相関法によるボーエン比との比較

本研究では, 様々な消散法のうち, 最も簡易な一例を紹介した. 今後の課題としては, 1) 時系列より構造関数を求めるときに用いる凍結乱流仮説の妥当性に関する検討, 2) 様々な手法による消散率の算定の比較, 3) 幾つかの種類の消散法の比較・検討, 等があげられるであろう.

謝辞 観測に用いた水田を快く貸して頂いた, 室橋正雄氏および中之島土地改良区に感謝致します. 乱流観測の観測法に関して, 京都大学防災研石川裕彦教授よりアドバイスを頂いた. 文部省科学研究費 (奨励 A, 課題番号 10750386) および日産科学振興財団より研究費援助を受けた.

参考文献

- Albertson J., et al. (1997): J. G. R., **102**(D12)
 工藤, 浅沼, 早川 (1999): 土木学会年次講演会予稿集
 玉川一郎 (1999): 水文・水資源学会誌, **12**(2)
 塚本修 (1998): 京都大学防災研究所共同研究”大気接
 地層における乱流輸送過程の観測法に関する研究”

キーワード : 蒸発散, 乱流相似則, 大気境界層, 接地層乱流