

バルク法で用いる係数について*

山 岸 米 二 郎**

要 旨

接地層に適用されるフラックスとプロファイルの間の関係式を用いて、バルク法の係数を求めることについて議論する。係数の風速依存性は用いる関係式のみでなく、粗度定数や、分子拡散が卓越する領域での取扱いの仮定にも大きく依存する。

バルク法で用いる係数について

先に筆者はバルク法を用いて地表面ストレスを求める時の抵抗係数 C_D 及び地表面からの顕熱と水蒸気のフラックスを求める時の係数 C_H , C_E を大気最下層の安定度及び風速の関数として近似することを試みた(山岸, 1975)。しかしこれについて若干不十分な点があったので再検討した。

前と同じく議論は地表面が海面の場合に限定する。海面での運動量交換には表面が波うつ影響を考慮しなければならない。このため海面上では粗度定数 Z_0 をあらかじめ与えることが出来ない。一般には Z_0 と摩擦速度 U^* との間に比例関係、 $Z_0 = \beta U^{*2}/g$, β は定数又は風速の関数、 g は重力の加速度、が仮定されているが β は研究者により必ずしも一定ではない。又海面との境界には主として分子拡散により熱や水蒸気が輸送される層が存在するわけであるが、この領域の取扱いも充分には解明されていない。近藤(1975)はこれらの点について論じ、 C_D , C_H , C_E を風速及び安定度の関数として計算する近似式を提案している。ここでは、接地層内のフラックスとプロファイルの間の関係式を利用して C_D 等を求めた時、その値が上に述べた点の取扱いの差によりどの程度かわりうるかを吟味した。

接地層内のフラックスとプロファイルの間の関係式としては前と同じく Businger 他(1971)によるものを用いる。

$$\left. \begin{aligned} \phi_m &\equiv \frac{kZ}{U^*} \frac{\partial U}{\partial Z} = (1-15\zeta)^{-1/4} \\ \phi_h &\equiv \frac{Z}{\theta^*} \frac{\partial \theta}{\partial Z} = 0.74 (1-9\zeta)^{-1/2} \end{aligned} \right\} \text{接地層不安定} \quad (1.1)$$

$$\left. \begin{aligned} \phi_m &= (1+4.7\zeta) \\ \phi_h &= 0.74+4.7\zeta \end{aligned} \right\} \text{接地層安定} \quad (1.2)$$

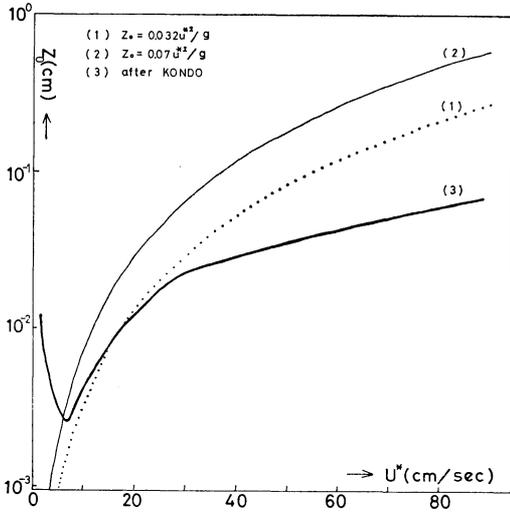
ここで $\theta^* = \overline{\theta'W'}/kU^*$, $\zeta = Z/L$, $k=0.35$, L はモニン-オブクホフのスタビリティレングスである。比混 q については温位 θ と同じ関係式が成立するとされている。ここで(1.1)或いは(1.2)を高度 Z_0 から接地層内の或る高度 Z_m まで積分する。この時外部パラメータとして高度 Z_m での風速、温位、比湿、 U_m , θ_m , q_m と高度 Z_0 での温位と比湿 θ_0 , q_0 (θ_0 , q_0 は正しくは $Z=Z_0$ の高度への外挿値であるが、以後は簡単のため $Z=Z_0$ での値と呼ぶ)を与えれば、運動量、顕熱及び水蒸気のフラックス、 τ , H , E を与えられた外部パラメータと Z_m/Z_0 の関数として求めることができる。一方バルク法では

$$\left. \begin{aligned} \tau &= \rho C_D U_m^2 \\ H &= \rho C_H C_H U_m (T_s - T_m) \\ E &= \rho C_E U_m (q_s - q_m) \end{aligned} \right\} \quad (1.3)$$

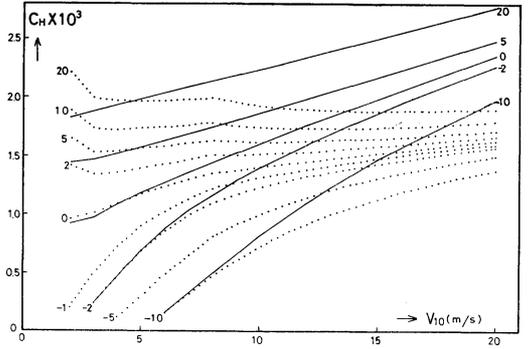
と表現される。ここで T_s , q_s は海表面の温度及び比湿 C_P は空気の定圧比熱である。従って T_s と T_0 及び q_s と q_0 の関係と Z_0 についての別の情報を与えれば(1.1)或いは(1.2)に対応する C_D , C_H , C_E を求める事が出来る(例えば片山(1972))。ここでは冬期を念頭において $T_m=0^\circ\text{C}$ とし Z_m は 10 m に固定し、 T_0 を 0.5°C 毎、 U_m を 1 m/s 毎に変えていくつかのケースについて C_D , C_H ($-C_E$) を求めてみた。 q_m については相対湿度 100% と仮定して求めた(気温が低いので相対湿度を 30% 程度にまで下げても結果は変わらない)。計算

* On coefficients for use in bulk aerodynamic method

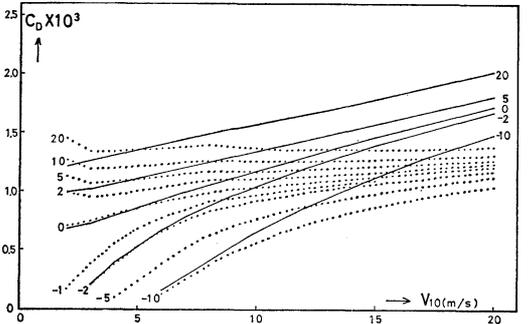
** Y. Yamagishi 気象庁 電計室
—1975年11月14日受領—
—1976年1月12日受理—



第1図 テストに用いた Z_0 と U^* の関係。



(a)



(b)

第3図 第2図に同じ、但し点線はケースCの場合。

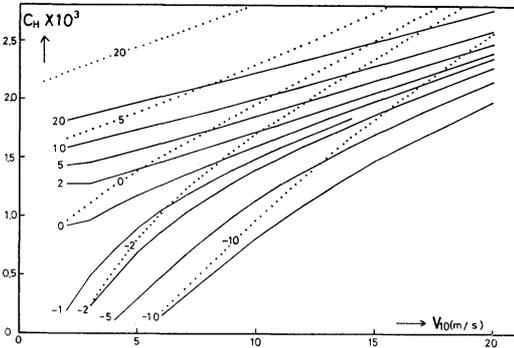
したケースは以下のものである。

(1) ケースA, $T_s = T_0$ と仮定, $Z_0 = 0.032 U^{*2}/g$ を用いる。以後他のケースはすべてケースAを基準にして比較する。

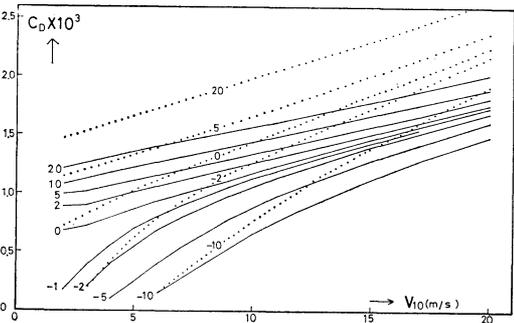
(2) ケースB, $T_s = T_0$ と仮定, $Z_0 = 0.07 U^{*2}/g$ 。

(3) ケースC, $T_s = T_0$ と仮定, $Z_0 = \beta U^{*2}/g$ で β として近藤(前出)が用いた関係を適用。但し(1),(2)の場合は $Z_0 \geq 0.0015 \text{ cm}$ とする。

以上はすべて $T_s = T_0$ と仮定した場合である。 $T_s \neq T_0$ とした場合については後で述べる。第1図にケースA, B, Cの場合の Z_0 と U^* の関係を示す。第2図(a, b)の実線はケースA, 点線はケースBの場合の C_D と C_H である。縦軸は $C_{D,H} \times 10^3$, 横軸は高度10mでの風速, 点線及び実線の右肩或いは左肩の数字は $T_0 - T_m$ ($^{\circ}\text{C}$) を示す。ケースCの場合を第3図(a, b)に点線で示す。この図及び以後の同種の図では比較のためケースAの場合が実線で示してある。 Z_0 と U^* を一義的に関係づける事は中立状態での抵抗係数 C_D を風速の関数として与える事に相当するわけであるが、この与え方

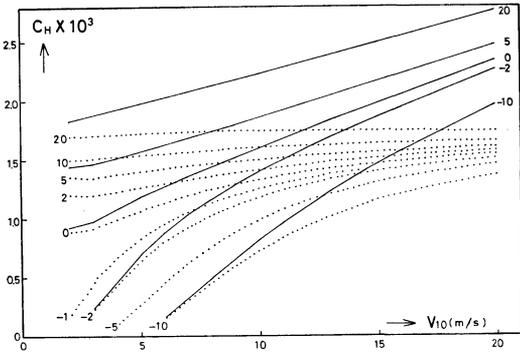


(a)

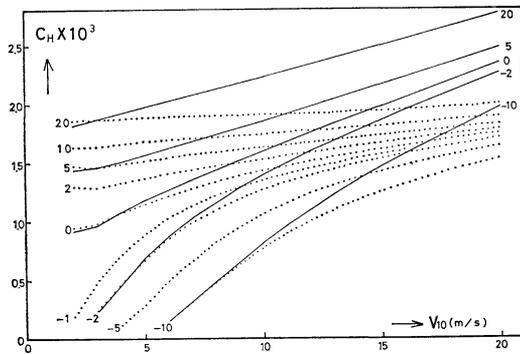


(b)

第2図 10m 高度の風速(横軸, m/s)と接地層の安定度($T_0 - T_m$ で示し, 図中の曲線に付す, $^{\circ}\text{C}$)をパラメータとしてあらわした C_H (a) と C_D (b), 実線はケースA, 点線はケースB。



(a)



(b)

第4図 10 m 高度の風速 (横軸, m/s) と接地層の安定度 ($T_0 - T_m$ で示し図中の曲線に付す, $^{\circ}\text{C}$) をパラメーターとしてあらわした C_H . (a), (b) の点線はそれぞれケース D と E, 実線はケース A のもの.

が、非中立状態での C_D, C_H の風速に対する依存の様子に大きく影響している事がみられる。 β の小さい場合 (ケース C) では接地層が不安定の場合に C_D, C_H は風速と共に減少する傾向を示している。

次に $T_s \approx T_0$ の影響を調べてみる。近藤 (前出) は T_s と T_0 の差を与える式を

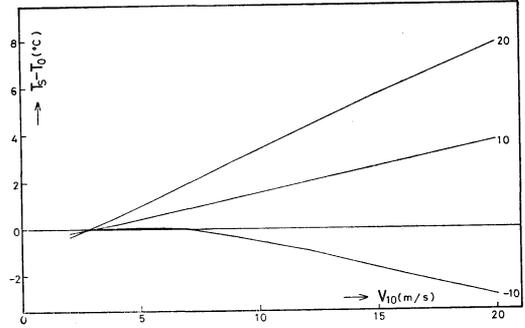
$$T_s - T_0 = H B_H^{-1} / C_p \rho U^* \quad (1.4)$$

として B_H^{-1} を観測から求めている。ここでは近藤 (前出) にある 2 つの表現式

$$B_H^{-1} = 0.54 (U^* h_p / \nu)^{0.45} \quad (1.5)$$

$$B_H^{-1} = 1/k \ln (\nu / \alpha + k U^* h_p / 15 \alpha) \quad (1.6)$$

を形式的にすべての領域に対して適用した場合について計算してみた。ここで ν, α は空気動粘性係数及び温度拡散係数である。又、カルマンの定数 k はここでは 0.4 とされている。実際の計算では近藤の与えた経験式



第5図 10 m 高度の風速 (横軸, m/s) と $T_0 - T_m$ ($^{\circ}\text{C}$ 単位, 曲線に付す) をパラメーターとしてあらわした $T_s - T_0$ ($^{\circ}\text{C}$ 単位, 縦軸), 但しケース D の場合.

(私信)

$$h_p = 0.1 + 0.09 U^*$$

により B_H^{-1} を U^* のみの関数として表現して用いた。計算結果は、

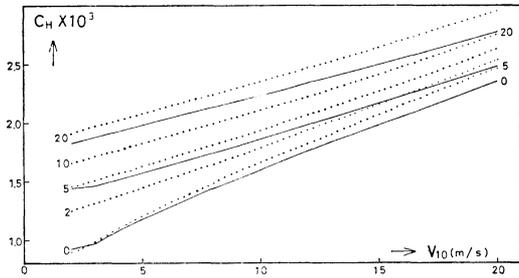
(4) ケース D. $Z_0 = 0.032 U^{*2} / g$, B_H^{-1} は (1.5) 式.

(5) ケース E. $Z_0 = 0.032 U^{*2} / g$, B_H^{-1} は (1.6) 式. について示す。定義により高度 Z_0 での風速 $U_0 = 0$ であるから $T_s \approx T_0$ とした場合と $T_s = T_0$ と仮定した場合で C_D はかわらない。従って結果は C_H についてのみ示す。第4図 (a) の点線はケース D, 第4図 (b) の点線はケース E のものである。実線はケース A の時のものを示す。 $T_s \approx T_0$ と仮定する場合には C_D, C_H 等の安定度に対する依存性は $T_s - T_m$ について示すべきであるがここでは整理の都合上 $T_0 - T_m$ について示してある。なお参考のため (1.6) 式を用いた場合の $T_s - T_0$ 値を 10 m 高度の風速及び $T_0 - T_m$ の 3 つの値をパラメーターとして第5図に示してある。第4図にみられるようにケース D, E でも不安定の場合には C_D は 10 m 高度の風速に殆んど依存しない結果となる。第5図からわかるように安定度を $T_s - T_m$ で整理しなおせば不安定領域で C_H は風速と共に減少するという結果が得られる (C_D についても安定度を $T_s - T_m$ で整理すれば $T_s = T_0$ と仮定した場合とことなる風速依存性が得られる)。

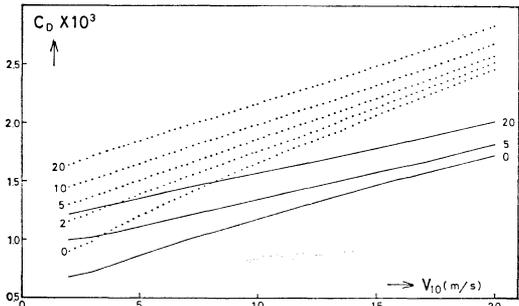
これまではずべて Businger 他 (前出) の式を用いてきたが、比較のため近藤 (前出) が用いた式

$$\left. \begin{aligned} \phi_m &= (1 - 16 \zeta)^{-1/4} \\ \phi_h &= (1 - 16 \zeta)^{-1/2} \end{aligned} \right\} \text{接地層不安定} \quad (1.7)$$

をケース A と同じ条件で解いた結果を第6図に示す (こ



(a)



(b)

第6図 点線はケースAと同じ条件で(1.6)式から得られる C_H (a)と C_D (b). 実線はケースAのもの。

れをケースFとする)。第6図(a, b)の点線が(1.7)式から得られるもので実線はケースAのものである。み

かけ上の式の形が殆んど等しいにもかかわらず C_D の値が大きくことなるのはカルマンの定数にあたる k がBusinger 他の場合には0.35とされており近藤の場合には0.4とされているからである。

結論

大規模現象の予測を目的とする数値予報モデルでは地表面での運動量や熱のフラックスの見積りに例えば(1.1)のような形の式を解くのは計算時間の点でも得策でなく、バルク形式が便利である。バルク形式で表現した時の C_D や C_H の振舞いをみる目的でいくつかの計算を実行してみた。ここでは種々の条件が結果に及ぼす影響をみるのが目的なので、式を原著者の適用範囲を越えて用いたものもある(例えば(1.5)式)が、次のように結論してもよいであろう。接地境界層内のフラックスとプロファイルの間の関係式($\phi_{m,h}$)を用いて、 C_D や C_H を求める時には、 C_D や C_H の風速依存性を用いる $\phi_{m,h}$ によりかわるのみでなく、同じ $\phi_{m,h}$ を用いても Z_0 , $T_s - T_0$ のとりかたにより大きく変化する。結果をみやすくする意味で中立時の C_D , C_H の各ケースの値($U_m = 8 \text{ m/s}$, 16 m/s の時)と用いた仮定を第1表に示す。表に示した全ケースの平均値に対する最大と最小の値の比は $U_m = 16 \text{ m/s}$ の時に C_D 及び C_H は各々24%, 37%に達する。従ってバルク法を用いる時にはこの点に注意して論ずる必要がある。従って特にルーチンモデルでは1つの仮定から得られる、風速や安定度に対する複

第1表 中立時の各ケースについての C_D と C_H の比較

| ケース | $C_D \times 10^3$ | | $C_H \times 10^3$ | | Z_0 | ϕ | B_H^{-1} | k |
|-------|-------------------|--------|-------------------|--------|------------------|---------------|------------|-------------------|
| | U_m | | U_m | | | | | |
| | 8 m/s | 16 m/s | 8 m/s | 16 m/s | | | | |
| A | 1.06 | 1.52 | 1.44 | 2.05 | $0.032 U^{*2}/g$ | 式(1.1), (1.2) | 0 | 0.35 |
| B | 1.29 | 1.94 | 1.74 | 2.62 | $0.07 U^{*2}/g$ | 〃 | 0 | 〃 |
| C | 1.01 | 1.15 | 1.36 | 1.54 | (Kondo) | 〃 | 0 | 〃 |
| D | 1.07 | 1.52 | 1.25 | 1.49 | $0.032 U^{*2}/g$ | 〃 | 式(1.5) | 〃 |
| E | 1.07 | 1.52 | 1.34 | 1.64 | 〃 | 〃 | 式(1.6) | 0.35 ⁺ |
| F | 1.48 | 2.15 | 1.48 | 2.15 | 〃 | 式(1.7) | 0 | 0.4 |
| Kondo | 1.40 | 1.60 | 1.23 | 1.26 | Kondo (1975) | | | 0.4 |
| ちがいの幅 | ±20% | ±24% | ±18% | ±37% | | | | |

⁺ ただし式(1.6)は $K = 0.4$ を使用

⁺⁺ ちがいの幅は各ケースの最大と最小の幅を全ケースの平均値で割ったもの。

雑な依存性を考慮するよりも、現段階では一定値の C_D , C_H を用いてもよいかもしれない。しかも垂直の分解能のよくないモデルでは地表面付近の風速や気温の推定値の影響が地表面摩擦や熱のフラックスの見積りに大きく効いてくる。従って用いる一定値といっても境界層の理論から一義的に決定されるというよりも、用いるモデルの特性により適宜の調節をなさざるを得ない面がある。

謝 辞

先の筆者の論文（前出）での考察の不十分さを御指摘いただいた気象研究所片山博士にお礼申し上げます。又この報文作成に当たり御指導、御討論いただいた東北大学近藤博士にお礼申し上げます。日頃御指導いただいて

いる伊藤室長はじめ電計室の方々に感謝致します。

文 献

- Businger, J.A., J.C. Wyngaard, Y. Izumi and E.F. Bradley, 1971: Flux-profile relationships in the atmospheric surface layer. *J. Atmos. Sci.* 28, pp. 181-189.
- 片山 昭, 1972: 大気境界層のパラメタリゼーションと数値実験. *天気*, 19, pp. 633-643.
- Kondo, J., 1975: Air-sea bulk transfer coefficients in diabatic conditions., *Boundary Layer Meteor.*, 9.
- 山岸米二郎, 1975: 数値モデルからみた冬期の気団変質. *天気*, 22, pp. 253-262.