乾燥空気の風解析コードの作成とその基本特性

田中伸和、服部康男、日下博幸
（電力中央研究所　地球工学研究所　流体科学領域）

1. 基礎方程式

弾性・圧縮性流体の式を基本にしているが、流入風の流速分布、温度分布が保持されるように、接地境界層内の鉛直方向の拡散を抑制する項、fu、fTを以下のように、運動方程式とエネルギー保存式にそれぞれ導入している. ここでは、x軸方向の定常の流入風を仮定しているので、以下のようにした.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u\cdot\frac{\partial u}{\partial x} + v\cdot\frac{\partial u}{\partial y} + w\cdot\frac{\partial u}{\partial z}$$
$$= \frac{\partial}{\partial x}\left\{\left(\frac{\mu}{\rho} + \nu_H\right)\cdot\frac{\partial u}{\partial x}\right\} + \frac{\partial}{\partial y}\left\{\left(\frac{\mu}{\rho} + \nu_H\right)\cdot\frac{\partial u}{\partial y}\right\}$$
$$+ \frac{\partial}{\partial z}\left\{\left(\frac{\mu}{\rho} + \nu_V\right)\cdot\frac{\partial u}{\partial z}\right\} - \frac{1}{\rho}\cdot\frac{\partial p}{\partial x} + f_u$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u\cdot\frac{\partial T}{\partial x} + v\cdot\frac{\partial T}{\partial y} + w\cdot\frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x}\left\{\left(\frac{K}{\rho\cdot C_V} + \kappa_H\right)\cdot\frac{\partial u}{\partial x}\right\}$$
$$+ \frac{\partial}{\partial y}\left\{\left(\frac{K}{\rho\cdot C_V} + \kappa_H\right)\cdot\frac{\partial u}{\partial y}\right\} + \frac{\partial}{\partial z}\left\{\left(\frac{K}{\rho\cdot C_V} + \kappa_V\right)\cdot\frac{\partial u}{\partial z}\right\}$$
$$- \frac{R_d}{C_v}\cdot T\cdot\left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z}\right) + \frac{\Phi}{\rho\cdot C_v} + f_T$$

ここで、

$$f_u = -\left[\frac{\partial}{\partial z}\left\{\left(\frac{\mu}{\rho} + \nu_V\right)\cdot\frac{\partial u}{\partial z}\right\}\right]_{流入部}$$

$$f_T = -\left(\frac{\partial}{\partial z}\left\{\left(\frac{K}{\rho\cdot C_V} + \kappa_V\right)\cdot\frac{\partial u}{\partial z}\right\} + \frac{\nu\cdot\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2}{C_V}\right)_{流入部}$$

である.

また、運動量の水平方向の乱流拡散係数は，等方性の渦動粘性モデルと同様に、以下の渦動粘性係数で表わされるものとした.

$$\nu_H = C_\mu\cdot k\cdot f_t$$

ただし、kは乱流エネルギー、f_t は乱流の局所時間スケールで、長野らの時間スケールモデルとk、ε 乱流モデルから求まる時間スケールとを組み合わせ、

$$f_t = Min\left(\tau_\mu, \tau_m\right)$$

$$\tau_\mu = \frac{k}{\varepsilon}$$

$$\tau_m = \left[\frac{1}{2}\left(\frac{1}{\tau_\mu} + \frac{C_S}{\tau_S}\right)\right]^{-1}$$

$$\tau_S = \frac{2}{\sqrt{S^2} + \sqrt{Q^2}}$$

とした. ただし、

$$S_{ij} = \frac{1}{2}\cdot\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)$$

$$Q_{ij} = \frac{1}{2}\cdot\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)$$

である. なお、Cs は係数で、長野らの示した 0.4 とした. 一方, 鉛直方向に対しては, 水平方向のものに次の浮力効果 B(局所リチャードソン数)を考慮した牛島・田中のモデルとした.

$$B = -\frac{g}{\rho}\cdot\frac{\partial\rho}{\partial z}\cdot\left(\frac{k}{\varepsilon}\right)^2$$

また, エネルギーの乱流拡散特性は運動量の乱流拡散係数を乱流プラントル数（一定と仮定）で除し、さらに鉛直方向に対しては、運動量の場合と同様に浮力の効果を考慮した. ただし, B は Launder らと同様の k, ε と密度勾配を用いた局所リチャードソン数で, 牛島らの実験によると流速勾配と密度勾配で定義される通常の局所リチャードソン数の約 25 倍に匹敵するものである.

2. 解析方法

ここでは、つぎのような曲線座標系への変換式を用いている.

$$X \equiv X(x)$$

$$Y \equiv Y(y)$$

$$Z \equiv Z(x,y,z)$$

すなわち、元の物理座標系での地表面は、座標変換後のZ＝0の(X,Y)平面となる. また、X軸とY軸とは直交するが、Z軸は必ずしもX軸, Y軸とは直交しない. 両座標系間でのメトリックやヤコビヤンは、(X,Y,Z)座標上で各辺の長さが1となる立方体として表される差分格子とそれと対応する元の(x,y,z)座標上での変形格子との関係より求める. ただし、基礎式の移流項を非保存系で表示することを基本にした.

3. 基礎方程式の離散化

座標変換された質量、運動量、エネルギーの各保存則に対しては、精度の良い 3～4 の高次精度の差分法を用い、乱流拡散係数を求める乱流方程式については、境界条件の取り扱いなどが簡単な 1～2 次精度の差分法を用いた. なお、前者の場合の時間変化項は 2 次の後退差分で、後者は、クランクニコルソン法で、陰的とした. そのため、繰り返し計算で時刻(n+1)での全ての変数を連立して求めることにした. また、各変数の配置はスタッガード配置とした.

4. 境界条件

地表面に最も近接した格子点上でも基礎式を解析するが、地表面近傍では流速の鉛直分布は地表面から最近格子点まで対数則分布に従うものと仮定した. すなわち、地表面では対数則分布より求まる摩擦応力と渦粘性モデルから求まる水平乱流粘性力とが一致

すると仮定し、その釣り合い式より地表面下の仮想格子点での流速を外挿することで、境界条件を表わした．また、地表面上でのk，ε は、それぞれ、0とすることとした．なお、計算式では、繰り返しの変換マトリックス中の係数に正値化を施し、音波に基づくクーラン数が 4〜5 まで安定になるようにした．

5．計算結果

山間部での実測結果と非圧縮のコードの結果と比較して，本コードの精度検証を進めた．ここでは，複数点での同時風観測が行われた，図－1に示す中部地方山岳部を対象に解析を行った．流入風速は地表面粗度高さは0.3mとした対数則に従うものとし，標高 10m で 10，と 15m/秒とした 2 ケースの異なる流入条件での計算結果を示す．なお、温位，密度および圧力の鉛直分布は中立安定条件を想定して設定した．

非圧縮性コードとの結果は定性的にも異なった．すなわち、上り斜面とともに強い増速が現れる平地の流入部の地点①と尾根頂部の地点②との相関については，図－2 に示すように非圧縮性コード（実線）および本コード（白抜き○）とも，増速率を精度良く再現した．しかしながら，図－3 に示すように、尾根後流の盆地部の地点③と地点①との相関に着目すると非圧縮性コードでは，流れ場のはく離が生じ，増速率も 1 以下の値をとる．一方，本コードによる結果では，地点①の地上高さ 10m における風速が 15m/秒の条件では，増速率が 1 以下となるものの，地点①の地上高さ 10m における風速が 10m/s の条件では，増速率は 1.3 と見積もられ，地形後部にはく離が形成されないことがわかった．地点①と地点③との相関について，図－3 から明らかなように、実測では地点①の風速が増加するにつれて，地点③での増速率が低下することがわかる．そして，実測値から見積もられる増速率は，本コードで得られた結果と対応するものになっている．

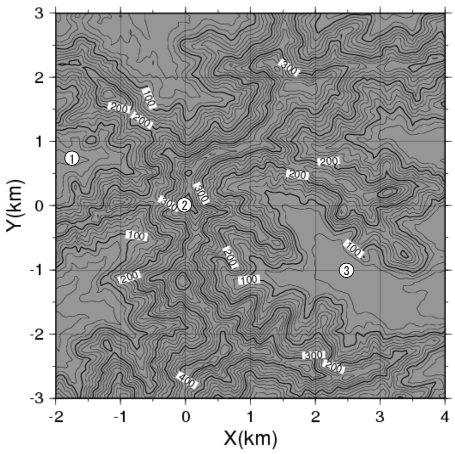
これらの結果から，特に山岳部などの複雑な地表面近傍の風況を検討する上での圧縮性を考慮した解析の重要性を確認することができる．

6．結　言

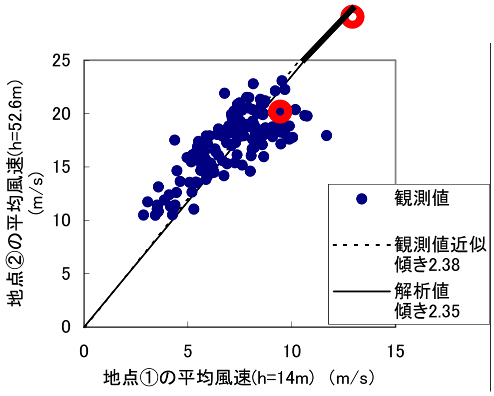
山岳部などに見られる複雑地形と密度効果とが重畳する場での風況特性の予測，評価に資するべく，空気密度と気温の変化を考慮した圧縮性流体に対して，3 次元非定常気流解析コード（M-WIND：Meteorological WIND simulation code）を開発した．単純形状模型や実観測を対象とした解析を実施し，実測値などとの比較から，本コードの高い現象再現性を確認した．さらに，解析結果を基に，山岳部などの地表面近傍の風況を検討する上での圧縮性を考慮した解析の重要性を明らかにした．

なお，いずれのケースも上空 50km までの対流圏と成層圏を解析対象にしているが，Δx、Δy=50〜100m、地表面近傍では，Δz=5〜8m で格子を配置している．その結果、本コードは地表面近傍の風況の詳細な把握を可能とするツールといえる（実際，各格子点の標高は国土地理院の数値地図の値を直接利用しており，特別なフィルター処理は施していない）．また，このような条件下においても時間ステップΔt=0.05s で安定な結果が得られており，風車の設計などに必要な風荷重，変動風荷重の鉛直分布の推定に有効と考えられる．

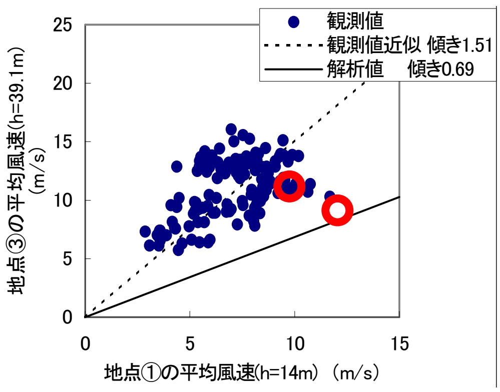
今後は，本コードの実用化に向けて，解析精度の検証事例を蓄積するとともに，計算負荷の低減や非圧縮性コードとの連携などを進める予定である．



図－1　風観測が行われた山岳域の標高と観測点



図－2　地点①と地点②との平均風速の比較



図－3　地点①と地点③との平均風速の比較