

3次元任意地形周りの水文気象解析

Hydro-Meteorological Analysis around the 3D Arbitrary-Shaped Boundary

神田 学*・前田 俊一**・日野 幹雄***

BY Manabu Kanda, Syunichi Maeda and Mikio Hino

A new numerical model has been developed to investigate the hydrological and micrometeorological phenomena near around the 3D arbitrary-shaped boundary. This model has the following features.

1) Adaptive grid method is adopted to generate the grid system. Using this method, orthogonality and density of the grid are easily and arbitrarily controlled. 2) Momentum, heat, and vapor fields are solved simultaneously. For the parameterization of turbulence, LES model is adopted. 3) Distribution of insolation on the ground surface is considered. The temperature of the ground surface is determined from the energy budget.

The flow near the isolated mountain is calculated and the results get agreement qualitatively with the experimental data.

Keywords : adaptive grid method, arbitrary-shaped boundary, insolation, gravity wave, LES

1. はじめに

密度成層内の任意地形周辺の流れは、重力波や渦などが混在するために、非常に複雑なものとなっている。とりわけ、3次元地形周りの流れの研究については、Hunt & Snyder¹⁾に代表される実験的手法、つまり、可視化手法に頼っているのが現状であり、流体力学的に完全な理解が得られているとは言い難い。また、水文学的観点からみると、3次元地形は、斜面の向きやその傾斜角の差異によって直達日射エネルギーの複雑な空間分布を作り出すために、局地気象を一層複雑なものとしており、地形を考慮した地表面での熱・水収支解析や、地形起因の雲・降雨形成過程の研究等、興味ある問題を提供している。そこで、本研究では、直交曲線座標系を用いて、3次元地形周辺の局地気象の数値解析を行った。

2. 3次元直交格子形成法について

差分法で流れの基礎方程式を解く場合、領域が複雑な形状（例えば、地面の凹凸や、航空機の翼の形状）をしていることは少なくない。この様な場合、古くは境界の形状とは無関係に、正方形や長方形などの様な格子が用いられてきたが、最近では、境界形状に合わせて曲線座標格子を用いることが一般化している。

* 正会員 工修 東京工業大学助手 工学部土木工学科

** 学生会員 工学 東京工業大学大学院 理工学研究科土木工学専攻

*** 正会員 工博 東京工業大学教授 工学部土木工学科

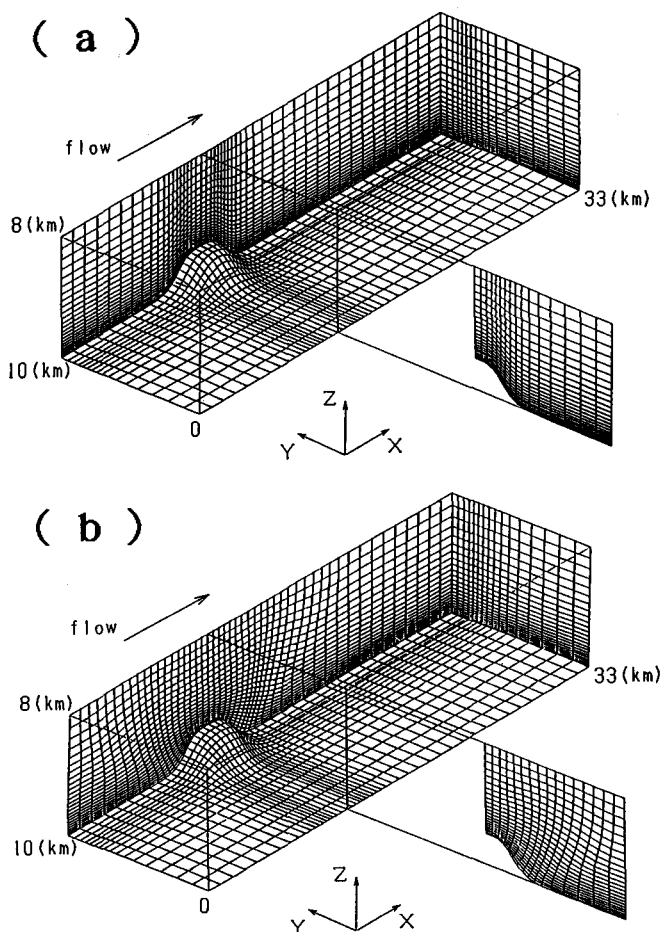
(〒152 東京都目黒区大岡山2-12-1)

これに対して、気象学における数値解析では、幾何的に作成された σ 座標系の非直交格子（例えば、高度を表す独立変数 z の代わりに、 $s=(z-h(x,y))/(H-h(x,y))$ ）を新たな独立変数とする。 H :解析領域上端の高度、 $h(x,y)$:地点 (x,y) の地表面の標高）が多用されており、直交格子はほとんど用いられていない。Satomura²⁾は、この点に着目し、 σ 座標系の非直交格子と変分法によって作成した直交格子で山の形状が半円の2次元山岳波の数値解析を行い、Miles & Huppert³⁾の導出した理論解との比較をした。その結果、 σ 座標系の非直交格子では、山頂の上空で打ち切り誤差が増大し、理論解とはかなり異なったものになるのに対し、直交格子では、理論解とよく一致することを示した。我々は山の数倍の高さにも及ぶ重力波や、カルマン渦、Hydraulic jump、ローター、境界層の剝離などのフルード数やレイノルズ数に依存する諸現象を詳細に調べ、それらの現象を含めた大気と土壌との相互作用を考慮した局地気象解析を目指している。よって、直交地形適合格子を生成して数値解析を行う方が適当であると思われる。

以上のようなことから、本研究では、任意地形周りの微細気象を表現するのに、地表面に沿った直交曲線座標格子を採用することにした。

直交曲線座標系には、①直交もしくは、それに近いこと、②メッシュ間隔の任意性、の2点が要求される。①の座標の直交性（特に地表面境界が重要）は、地表面からの影響伝達の物理的観点からみた合理性の確保、座標変換に伴う斜交成分誤差の排除、陰的計算における収束性の改善、境界条件の定式化における簡便性の点から、②は、地表面近傍や、地形の凹凸の激しいところなどの解像度を上げるために、メッシュを細かく切らなければならないことから必要となる。

本論文では任意地形に対応するために、3次元格子形成法の中でも優れていると言われるNakahashiの”ADAPTIVE GRID METHOD”⁴⁾を用いて格子生成を行った。この格子生成法は、元来、衝撃波のフロント部のような物理量の変化の激しい場所に、メッシュを効率的に集めるために開発された方法であるが、物理量として、地表面の標高に関連したものを取ると、地形に適合した格子の生成に利用することができる。この格子生成方法の原理は、各格子点を tension spring と torsion spring で結合させたバネのシステムのアナロジーに基づいている。まず、一種の重み関数である tension spring のバネ係数を調節することによって、メッシュを好みの場所に集めることが可能となる。また、torsion spring は格子の直交性を



図－1 ADAPTIVE GRID METHODによる直交格子生成

(a) 初期格子 (σ 座標系)

(b) 計算後の直交格子

確保するために必用なものであり、隣接する格子点同士のなす角の直角からの偏差量に比例した復元力が働くようになっている。これらのバネによる力を考慮して、力のつりあいの方程式を立てて解けば、地形に適した直交格子を作ることができる。この格子生成法の詳細はNakahashiの論文を参照していただきたい。

我々がこの方法を用いて作成した直交地形適合格子を示す。初期格子として図1(a)の σ 座標系非直交格子を使い、図1(b)の様な直交地形適合格子を得ることができた。

3. 計算手法の説明

基礎方程式は著者らの3次元水文気象プログラム⁵⁾を使用する。全ての基礎方程式は曲線座標空間上に変換されるが、その詳細については文献6)を参照されたい。本モデルで、新たに取り入れたことは、先に書いたように以下の2点である。

- ① 3次元の任意地形の場を対象としていること
- ② 任意地形に伴う直達日射エネルギーの空間分布を考慮していること

4. 密度成層内の孤立峰周りの流れの解析(地表面温度の変化無視)

4-1 計算条件等 まず、直達日射エネルギーの空間分布を無視し、3次元地形として図1(b)に示した孤立峰を選び、その周りの流れについて上述の3次元水文気象プログラムの大気部のみを使用して数値解析を行った。パラメーターとして一般風と温位勾配を選択し、それぞれ、8.0(m/s)、0.005(K/m)とした。半円球や円錐も含めた孤立峰周り流れの研究では、上述の可視化手法の他に、非粘性・線形近似などの限定された場合についての解析が主体となっており、塩水による密度成層を利用した室内実験に相当する数値解析でさえままならない状況にある。それ故に、気象現象を伴う大気中の孤立峰周りの数値解析を行うことは、直達日射エネルギーの空間分布を無視しても十分に意義のあることと思われる。

4-2 計算結果と考察

以下に示す図は、直交地形適合格子点で得られた解析値をもとにして新たに作成した平面上の格子点での値を内挿し、その内挿した値から作成したものである。

実験結果との比較：30分経過後の頂上付近($z=3$ km)における温位擾乱の $x-y$ 断面を図2(a)に示す。山の背後には内部重力波が形成されている。図2(b)に示した日野⁷⁾らによる伝導度計を用いた密度測定結果と定性的に見て一致していると言ってよいであろう(ただし山の形状等が若干違う)。

2次元計算との比較：今回の計算とはほぼ同じ条件のもとで著者らが(神田・日野・前田)⁸⁾以前に行った2次元計算結果との比較を行う。図3(a),(b)には領域中央を通る $X-Z$ 断面における上昇流速のコンター図をそれぞれ3次元・2次元計算について示す。3次元計算の場合、2次元計算に比べて内部重力波はあまり明瞭には形成されていない。後述するが、3次元計算の場合は側方へ回り込む気流がかなり存在するためである。

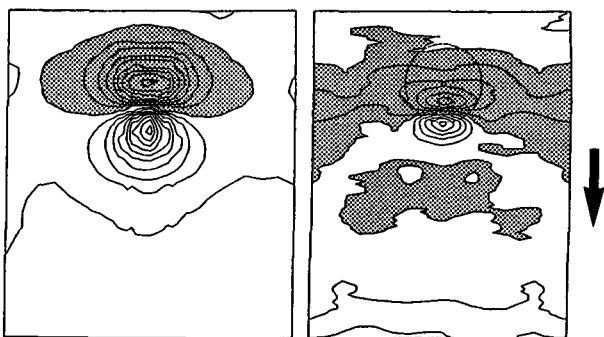


図-2 山頂近傍の水平断面における温位擾乱のコンター図

(ハッチは負の温位擾乱を表す)

(a)計算結果

(b)実験結果(日野・日向・奥村)⁷⁾

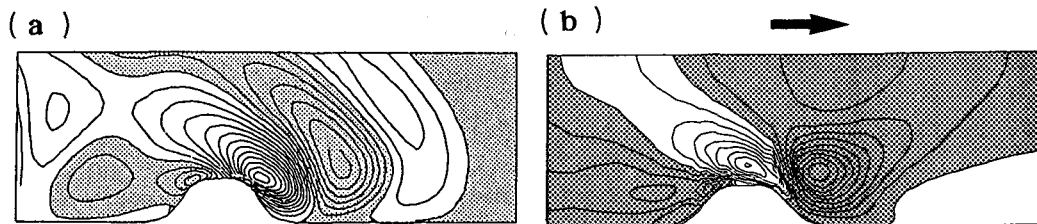


図-3 XZ鉛直断面（山の中心線を通る）に於ける上昇流速のコンター図
（ハッチは上昇流を表す）

(a) 3次元計算 (b) 2次元計算（神田・日野・前田）⁸⁾

3次元流れの詳細と内部重力波：

図4には高さ1 km（山の中腹程度）でのXY断面における上昇速度成分のコンター図を示す。地表付近の空気塊の大半が密度成層内の山を乗り越えるだけの運動エネルギーを有していないために山をある程度昇った所で失速し、山の斜面を回り込む強い下降流になって、山の背後でそれらが上昇流を形成している。図5(a)、(b)には山の頂上及び山の風下側斜面を降りきった裾野における速度ベクトルのYZ断面を示す。山の頂上近傍では側方へ回り込む斜め下向きの強い下降流に対応して山の両斜面上に補償流が生じている。一方、山の裾野部分では両側から回り込んできた流れが収束し上昇流を形成し始めるため、頂上近傍とは逆向きの補償流が生じている。以上の点を踏まえ異なる3高度におけるXY断面の風速ベクトルを図6に示す。山の頂上を越えた流れが内部重力波を形成すると同時に、側方から回り込んできた流れは山の背後で収束し上昇流を形成しており、両者が混在した流れ場となっている。

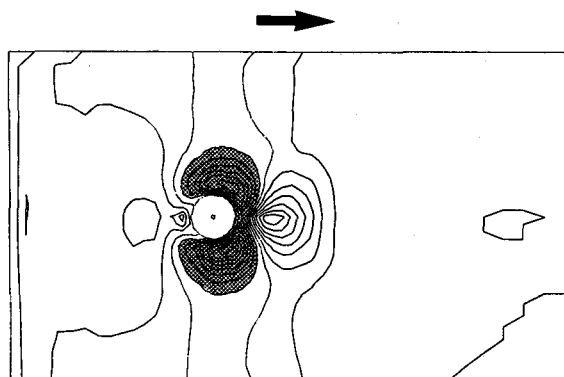


図-4 XY断面（高さ1 km）における
上昇速度成分のコンター図
（ハッチは下降流を表す）

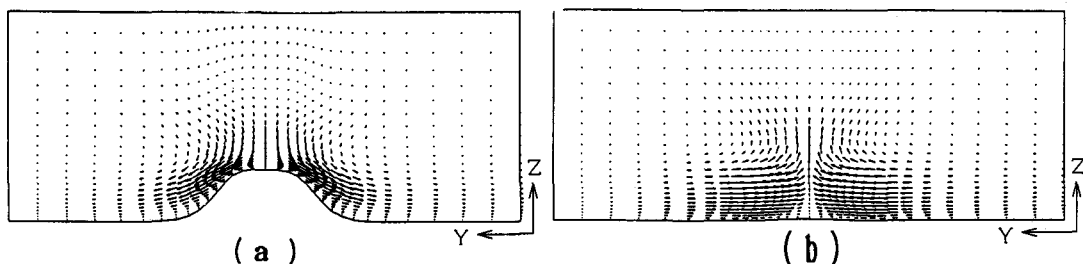


図-5 YZ断面における速度ベクトル図（流れの向きは紙面に突き刺さる方向）
(a) 山の頂上部 (b) 山の風下側斜面の裾野

5. 熱・水収支解析も考慮した解析

5-1 計算方法等 赤外線放射温度計を使って飛行機から測定した午前8時すぎの富士山の地表面温度分布を図7に示す(湯山⁹⁾)。この図から富士山の山肌は直達日射エネルギーの空間分布の影響を非常に強く受けていることがわかる。また、午前中に日のよくあたる富士山の東側斜面から積雲が発生しやすいという報告もある⁹⁾。これらの例から斜面での地表面温度分布は雲の発生や降雨などの気象現象に大きな影響を及ぼしていることがわかる。しかしながら、地表面温度は潜熱・顕熱の輸送を通して、大気という密度成層内の風の流れの影響を強く受けるために、上述のように密度成層内の流れが未解明の状態では、これらの現象について、ラフな議論しかできない。今回我々は、密度成層内の任意地形場の流れの解析が可能となったので、これに熱・水収支解析をさらに加えることにより、大気と土壤の相互作用考慮した数値解析の第一段階として、孤立峰周りの風が、地表面温度にどのような影響を及ぼすのかを検討することができるようになった。

一般に、ある地点での直達日射エネルギーは太陽高度とその地点での斜面の傾斜角が既知ならば、日照のコサイン法則から求めることができるので、この法則から直達日射量の地表面分布を求めると図8のようになる。次に、このことを考慮に入れて地表面での熱収支式を解けば地表面の温度分布が求まるわけである。この際、地表面からの潜熱・顕熱フラックスは接地境界層内の風速分布の関数になっているので、地表面の温度分布は接地境界層内の風の場の影響を直接受けるようになっている。

5-2 計算結果と考察

4で図示した風速場のもとの地表面温度分布を図9(a)に示す。比較のためポテンシャル流速場から求めた地表面温度分布を図9(b)に示すが、図9(a)の地表温度とはかなり異なっており、山近傍の流れ場が地表面熱収支に大きな影響を与えていることがわかる。最高地表面温度の場所に着目すると、ポテンシャル流速場では直達日射量が最高となる場所とほぼ一致しているのに対して、4で計算した風速場では山の upstream 側斜面の裾野部分に移動している。理由を考えると、この場所は流れが側方へ流れ込み淀み域となっているために風速

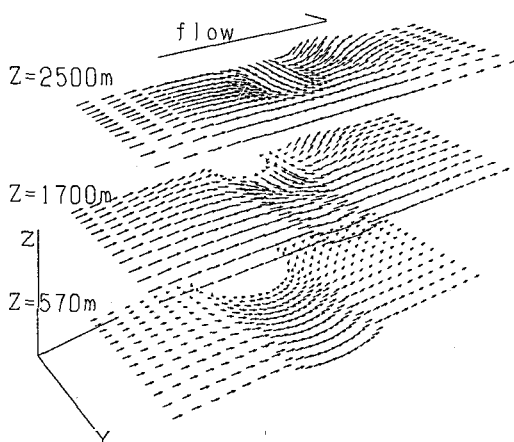


図-6 3つの高度における速度ベクトル図

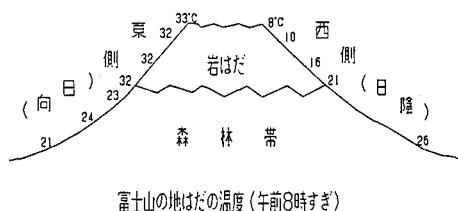


図-7 富士山の地表面温度分布(湯山⁹⁾)

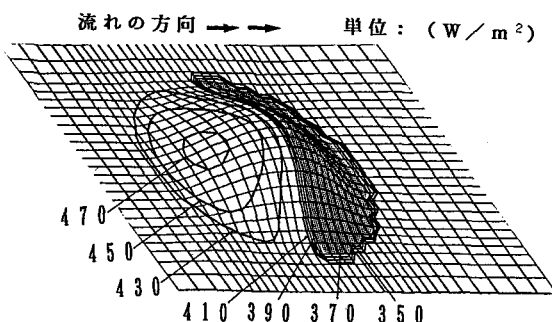
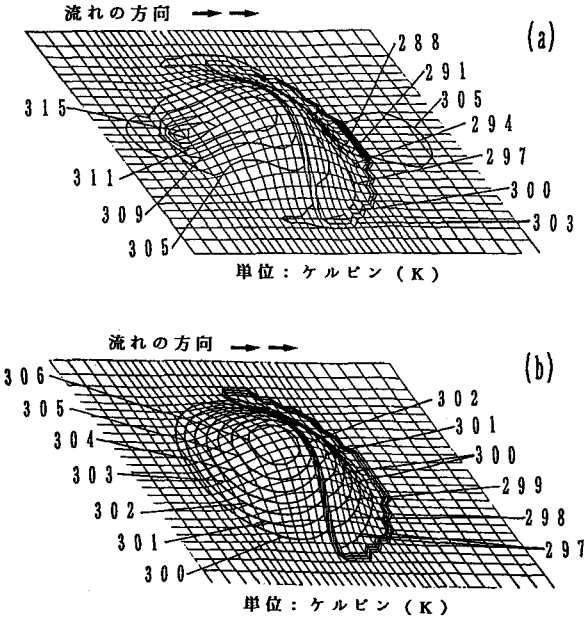


図-8 直達日射量の地表面分布

が低下し、地表面からの潜熱・顕熱フラックスが減少したからであろう。逆に強い下降流の生じる側面部などでは熱交換が増し、温度が下がると同時に日向・日陰の境界線上の地表面温度勾配が図9(b)に比べて緩やかなものとなっており、地表面温度の一樣化が強風によってかなりなされていることがわかる。



図－9 地表面温度分布

- (a) 4 で計算した風速場から求めた地表面温度
(b) ポテンシャル流速場から求めた地表面温度

謝辞 本研究は文部省科学研究費一般研究(B) 課題番号03452207「植生の気候緩和効果に関する土・植・気圏を一体とした水文学的研究、研究代表者、日野幹雄」の補助を受けて行われたものである。ここに謝意を表する。

参考文献

- 1) Hunt, J. C. R. & Snyder, W. H.: Experiments on stability and neutrally stratified flow over a model three-dimensional hill, J. F. M., 96, pp. 671-704, 1980.
- 2) T. Satomura: Compressible Flow Simulation on Numerically Generated Grids, J. Meteor. Soc. Japan, vol. 67, No. 3, pp. 473-482, 1989.
- 3) Miles, J. W. and H. E. Huppert: Lee waves in a stratified flow. Part 2. Semi-circular obstacle, J. F. M., 33, pp. 803-814, 1968.
- 4) K. Nakahashi and G. S. Deiwert: Three-Dimensional Adaptive Grid Method, AIAA, vol. 24, No. 6, 1985.
- 5) 神田学・日野幹雄: 大気-土壌系の相互作用に着目した対流性雲の発生・発達に関する3次元LESモデルによる検討, 水工学論文集 第35巻, pp. 27-32, 1991.
- 6) 日野幹雄・太田猛彦・砂田憲吾・渡辺邦夫: 洪水の数値予報, 森北出版, pp. 140-166, 1989.
- 7) 日野幹雄・日向博文・奥村卓也: 安定成層中における孤立峰周りの流れの可視化, 可視化情報, 1991.
- 8) 神田学・日野幹雄・前田俊一: 一般座標系を用いた水文気象プログラムによる任意地形周りの微細気象(重力波・渦・雲)解析, 水学会要旨集, pp. 84-87, 1991.
- 9) 湯山生: 気象研究ノート, 第118号, pp. 23-38, 1974.