

1 はじめに

降雨の原因には、台風を典型的な例とするような低気圧によるもの、夏の日々の夕立のように熱対流によるもの、梅雨前線に代表とされるような前線によるもの、そして、地形の起伏によって雲が発生するような地形性のもの等が挙げられる。本研究は、その中で最後の地形性の降雨について、有限要素法を用いて定量的に降雨量を予測することを目的とする。降雨のモデルとしては、暖かい雨に対する物理モデルであるケスラーモデル^[1]を用い、流れ場の解析は非圧縮粘性流体を仮定し、降雨場と流れ場の三次元連成解析を行う。

2. 基礎方程式

降雨場の解析に用いる暖かい雨に対する物理モデルであるケスラーモデルは、空気中の水粒子を、雲水量（周りの空気に対して相対的に降下しない粒子）と雨水量（周りの空気に対して相対的に降下する粒子）とに分けて、それぞれの保存式を連立させて解くものである。基礎方程式は次式で与えられる。（図-1 参照）

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -u \frac{\partial c}{\partial x} - v \frac{\partial c}{\partial y} - w \frac{\partial c}{\partial z} - AC - CC + EP + CV \quad (1)$$

$$\frac{\partial r}{\partial t} = -u \frac{\partial r}{\partial x} - v \frac{\partial r}{\partial y} - (w + V) \frac{\partial r}{\partial z} + AC + CC - EP \quad (2)$$

ここに、 c : 雲水量 (g/m^3)、 r : 雨水量 (g/m^3)、 u, v, w : 空気の流速 (m/s)、 V : 降雨粒子の落下速度 (m/s)、 AC : 雲水の雨水への転換、 CC : 雨水による雲水の捕捉、 EP : 雨水の蒸散、 CV : 凝結である。

$$V = -38.3 N_0^{-1/8} r^{1/8} \exp(kz/2)$$

$$AC = k_1(c - \alpha)$$

$$CC = k_2 E N_0^{1/8} c r^{7/8} \exp(kz/2)$$

$$EP = k_3 N_0^{7/20} c r^{13/20}$$

$$CV = w(A + Bz)$$

$$R = 138 N_0^{-1/8} r^{9/8}$$

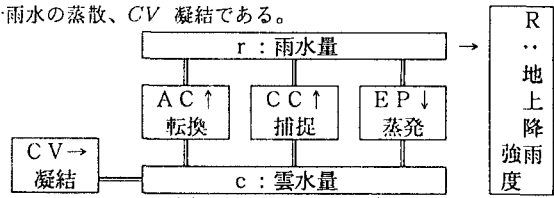


図-1 ケスラーモデル

ここに、 N_0 : 定数 (1×10^7)、 k_1 : 定数 (1×10^{-3})、 k_2 : 定数 (6.96×10^{-4})、 k_3 : 定数 (1.93×10^{-6})、 k : 定数 (1×10^{-4})、 α : 雲水の雨水への転換の臨界値 ($0.5 \text{g}/\text{m}^3$)、 E : 捕捉率 (1.0)、 A : 定数 (3×10^{-3})、 B : 定数 (-3×10^{-7})、 R : 地上での降雨強度 (mm/hour) である。

また、流れ場の解析に用いるナビエ・ストークスの運動方程式及び連続の式は次式で与えられる。

$$u_{i,t} + u_j u_{i,j} + \frac{1}{\rho} p_{,i} - \nu (u_{i,j} + u_{j,i})_{,j} = f_i \quad (3)$$

$$u_{i,i} = 0 \quad (4)$$

ここに、 $\cdot$ は偏微分を表し、 u_i は流速成分、 p は圧力、 ρ は密度、 ν は渦動粘性係数、 f_i は物体力である。

3. 有限要素法

降雨場及び流れ場の基礎方程式に対して、それぞれ3段階テイラーガラーキン有限要素法^[2]によって離散化を行う。また、要素としては8節点六面体要素を用いる。

計算は各時刻ステップ毎に流速を求め、それを用いて降雨場の解析を行うという手法で行う。

4. 数値解析例

今回の解析は、図-2 に示すような領域を考え高さ 1000m の山周辺の地形性降雨の解析を行った。解析には、節点数 30876、要素数 29200 の有限要素分割を用いた。計算条件として、風上で $u = 3z^{1/4} (\text{m}/\text{s})$ となる流速分布を与えた。また、降雨の境界条件は風上で雲水量、雨水量ともに 0 及び上層境界で雨水量を 0 とした（図-3 参照）。また、レイノルズ数は 100、微小時間増分 Δt は 10 秒とした。そして、図-4 と図-5 に定常状態に達した雲水量と雨水量の分布図、図-6 に地上降雨強度の分布図を示す。図より、山頂付近で降雨強度が大きいことがわかり、定性的に良好な結果が得られている。

5. おわりに

本報告において、地形性降雨の三次元有限要素解析法として3段階テイラーガラキン法に基づく手法を示した。その結果二次元解析の場合^[3]と同様、定性的に良好な結果が得られた。今後は、計算効率の向上の手段として解析的積分を導入し、実地形モデルへの適用について検討する所存である。

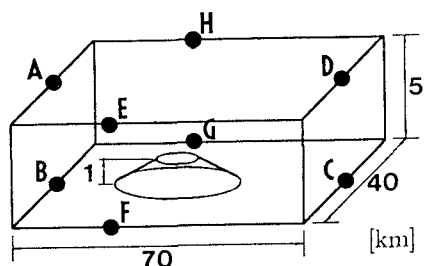


図-2 解析モデル

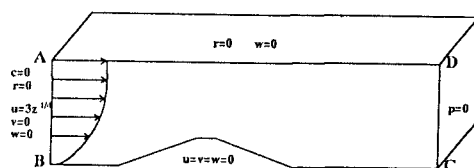


図-3 境界条件

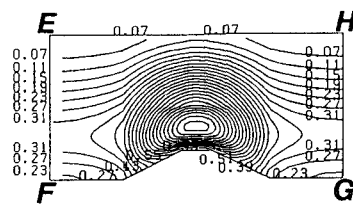
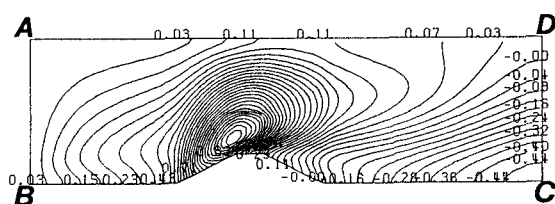


図-4 雲水量分布図 (g/m^3)

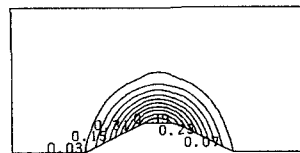
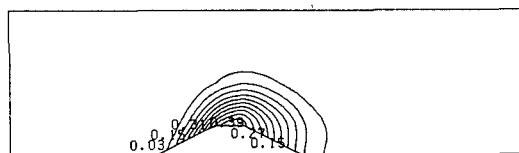


図-5 雨水量分布図 (g/m^3)

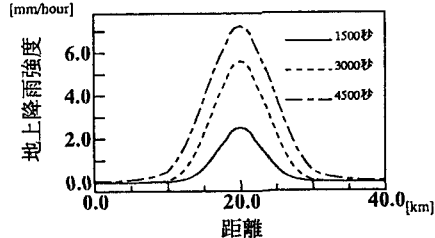
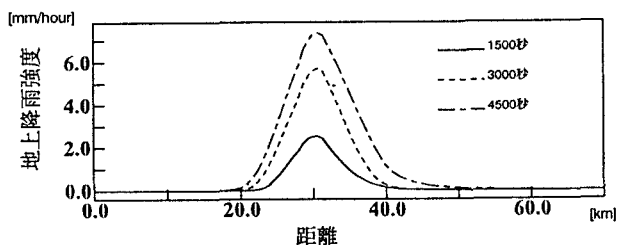


図-6 地上降雨強度の分布

参考文献

- [1] E. Kessler : Model of microphysical parameters and processes, Meteorological Monographs, Vol.10, pp26-31, 1969
- [2] 金子賢一、檜山和男 : 3段階テイラーガラキン法による2次元角柱周りの流れ解析, 第20回関東支部講演概要集, pp146-147, 1993
- [3] 檜山和男、山田正 : 有限要素法による地形性降雨の解析, 第46回年講演講演概要集, 第2部, pp.56-57, 1991