

## (Ⅱ - 9) エアロゾルの空間分布を考慮した降雨の数値的研究

中央大学理工学部 池永 均 山田 正 ○神谷信弘  
中央大学大学院 松浦 直 斎藤大作 坂 憲浩  
北見工業大学工学部 内島邦秀

1.はじめに 近年、都市部での集中豪雨の多発に伴う都市災害の発生が問題となっている。集中豪雨多発の原因の一つとして都市化に伴う都市部での大気状態の変化が考えられる。そこで著者らは、大気状態の変化に大きな影響を与えるエアロゾルに注目し、エアロゾルの数濃度変化が大気状態及び降雨現象に及ぼす影響を数値的に明らかにしてきた<sup>1)</sup>。これまでの研究で著者らは、エアロゾルを解析領域に一樣に分布させ、エアロゾル数濃度が降雨に与える影響を明らかにしてきたが、本研究では著者らが提案したモデルに新たにエアロゾルの空間数濃度分布及び収支を導入して地形性降雨の数値シミュレーションを行った。さらに解析領域に流入する大気のエアロゾル数濃度を各種設定し、Steven-Hobbsモデル<sup>2)</sup>と本モデルとの比較検討を行い、エアロゾルが降雨に及ぼす影響を明らかにした。

2.モデルの概要 S. Twomey(1977)は雲中における凝結核数濃度と雲粒数濃度は一致することを報告しており<sup>3)</sup>、本研究では解析領域中に存在するエアロゾルは活性化状態において全て凝結核として作用すると仮定して計算を行っている。これは雲粒数濃度とエアロゾル数濃度が一致することを示している。通常大気中におけるエアロゾル数濃度の鉛直分布は地上から上空にむかい低下する傾向があり<sup>4)</sup>、本論文では地表面にエアロゾル数濃度を与えそれが主流風速によって拡散される過程を導入することにより、より実現性に沿うエアロゾル数濃度の高度分布を表現した。表-1、図-1はエアロゾル数濃度の空間的分布及びエアロゾルの収支を考慮した雲物理過程を示している。エアロゾル数濃度分布を考慮することにより、Steven-Hobbsモデル中の雲水の凝結、蒸発項(PCOND)を曲率効果であるケルビン効果と、溶質効果であるラウール効果を含むAPCOND項に変形した(表-2)。APCOND中におけるエアロゾル数濃度Cは、エアロゾル数濃度を空間一樣分布として与えている場合には、エアロゾル数濃度:  $C = \text{const.}$  とする。また、エアロゾルの空間数濃度分布を考慮した解析を行う場合にはエアロゾル個数濃度は表-1で示した基礎式によって求められる。図-1はエアロゾルが活性化状態となり雲粒として働く場合、雲粒がオートコンバージョン(PRAUT)及び雨滴による雲粒の捕捉(PACW)によって雨粒となり、落下することによってエアロゾル数が減少する過程を示している。

表-1 エアロゾル数濃度分布 基礎式

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + w \frac{\partial C}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( K_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) + S_{\text{net}}$$

$$C1 = \frac{dC}{C}$$

$$S_{\text{net}} = - \left( \frac{\text{PRAUT}}{C1} + \frac{\text{PRACW}}{C1} \right)$$

PRAUT Hobbsらによって定義されたオートコンバージョン( $\text{kg/m}^3/\text{s}$ )  
PRACW Hobbsらによって定義された捕捉( $\text{kg/m}^3/\text{s}$ )  
C エアロゾル数濃度 ( $\text{num./m}^3$ )  
 $K_x, K_z$  x, z方向の拡散係数 ( $\text{m}^2/\text{s}$ )  
 $q_c$  単位体積あたりの雲水混合比 ( $\text{kg/kg}$ )  
 $\rho$  乾燥大気密度 ( $\text{kg/m}^3$ )

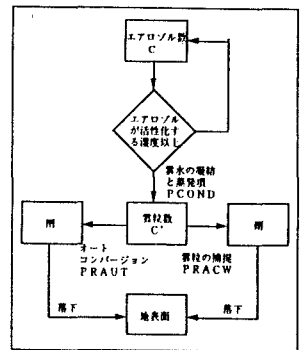


図-1 エアロゾルの雲物理過程図

表-2 雲水の凝結と蒸発 (PCOND) 項

1) Steven-Hobbs モデル

$$PCOND = \rho q_c - q_c \left[ \frac{4\pi r^2}{3} \left( \frac{e}{e_s} - 1 \right) \right] \quad (q_c < q_m \text{ ならば蒸発})$$

$\rho$ : 大気の密度 ( $\text{kg/m}^3$ )  $L_v$ : 水の凝結の潜熱 ( $\text{J/kg}$ )  
 $q_c$ : 水蒸気混合比 ( $\text{kg/kg}$ )  $c_p$ : 定圧比熱 ( $\text{J/kg/K}$ )  
 $q_m$ : 水の飽和混合比 ( $\text{kg/kg}$ )  $R_v$ : 水蒸気の気体定数 ( $\text{J/kg/K}$ )  
 $T$ : 温度 ( $\text{K}$ )

2) エアロゾルを考慮した本モデル

$$APCOND = \frac{dq_c}{dt} = \frac{4\pi r^2 \rho}{r A \rho_s} \left[ \left( \frac{e}{e_s} - 1 \right) - \frac{3.6 \times 10^{-4}}{r T} + \frac{8.6 m}{r M_w} \right] \quad (\text{ただし、} q_c > 0)$$

$$r = \sqrt{\frac{3q_c \rho_s}{4\pi \rho_s C}} \quad A = \frac{L_v \rho_s}{R_v T} + \frac{\rho_s R_v T}{L_v \rho_s}$$

C: エアロゾル数濃度 ( $\text{個/cm}^3$ )  $r$ : 雲粒の半径 ( $\text{cm}$ )  
 $\rho_s$ : 溶液 (滴) の密度 ( $\text{g/cm}^3$ )  $T$ : 温度 ( $\text{K}$ )  
 $\rho$ : 乾燥大気密度 ( $\text{g/cm}^3$ )  $M_w$ : 溶質の分子量  
 $e$ : 気圧 ( $\text{mb}$ )  $m$ : 溶質の質量 ( $\text{g}$ )  
 $e_s$ : 温度  $T(\text{K})$  における平らな水面に対する飽和蒸気圧 ( $\text{mb}$ )  
 $q_c$ : 雲水混合比 ( $\text{kg/kg}$ )  $L_v$ : 潜熱 ( $\text{J/kg}$ )  
 $q_m$ : 溶液の飽和混合比 ( $\text{kg/m}^3$ )  $R_v$ : 気体の状態定数 ( $\text{J/kg/K}$ )  
 $\rho$ : 溶液の密度 ( $\text{kg/m}^3$ )  
 $\rho_s$ : 空気中の水蒸気の分子拡散係数 ( $\text{m}^2/\text{s}$ )  
 $D$ : 空気中における水蒸気の分子拡散係数 ( $\text{m}^2/\text{s}$ )

3.計算条件 計算条件を表-3, 4に示す。風の場合はPotential flowモデルで計算し、水平方向の流入風速は $u=10.0(\text{m/s})$ 、流入大気の相対湿度は100%で与えた。通常大気中に含まれるエアロゾル数濃度のオーダは数百から数千(個/ $\text{cm}^3$ )であるが、本研究ではきれいな大気からかなり汚れた大気までを対象とし、流入大気中に含まれるエアロゾル数濃度を0~10000(個/ $\text{cm}^3$ )、地表面におけるエアロゾル数濃度を0~100000(個/ $\text{cm}^3$ )で与えた。

**4. 結果と考察** 図-2は、山頂の手前3km(水平距離29km)地点における大気中のエアロゾル数濃度の鉛直分布を示したものである。この図より、降雨発生時には大気中のエアロゾルが雨滴として落下するために、降雨が発生する地上2~3km地点でエアロゾル数濃度が減少していることが分かる。図-3は、Steven-Hobbsモデル(No. 1)とエアロゾルの空間分布を一樣としたモデル(No. 2)及びエアロゾルの空間分布及び降雨現象によるエアロゾルの収支を考慮した本モデル(No. 3)を用いて計算した地上降雨強度の水平分布を示したものである。計算条件は表-5に示す。この図より、No. 2及びNo. 3のモデルを用いて計算した地上降雨強度は、山の風上側斜面においてSteven-Hobbsモデルで計算した地上降雨強度よりも3~4 mm/hr弱いことが分かる。これはNo. 2及びNo. 3のモデルでは雲粒の落下速度を考慮しているために上昇風の強い領域では雨滴が落下しづらいためである。図-4は本モデルを用いて、地表面において一定値として与えるエアロゾル数濃度の値を変化させて計算したときの地上降雨強度の水平分布を比較したものである。流入大気中のエアロゾル数濃度を一定に保ち地表でのエアロゾル数濃度を变化させたNo. 4~No. 7の計算結果より、地表におけるエアロゾル数濃度の大小は降雨強度の水平分布に影響を与えないことが分かる。また、No. 5とNo. 8の計算結果より流入大気中に含まれるエアロゾルの数濃度の値の変化は降雨強度の水平分布に影響を与えることが分かった。

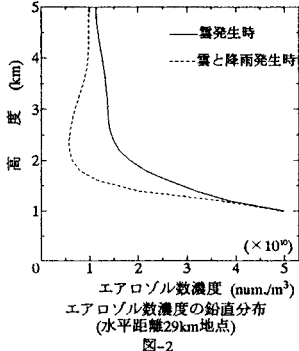


図-2

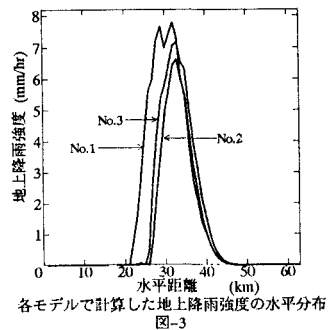


図-3

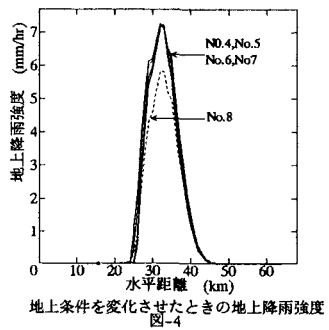


図-4

**謝辞** 本研究は文部省科学研究費一般研究(C)(代表山田正(中央大学))を受けている。ここに記し感謝の意を表す。

**参考文献** 1)坂憲浩・松浦直・池永均・山田正:エアロゾルを考慮した降雨に関する数値的研究, 水文・水資源学会1995年研究発表会要旨集, pp264-265, 1995. 2)Steven A.R. and Hobbs P.V.: The mesoscale and microscale structure and organization of clouds and precipitation in midlatitude cyclones. VII: A model for the "Seeder-Feeder" process in warm-frontal rainbands. Jour. Atmos. Sci., 40, 1185-1206, 1983. 3)S. Twomey: Atmospheric aerosols, Elsevier scientific publishing Co., p302, 1977. 3)磯野謙治編著: 大気汚染物質の動態, 東京大学出版会, pp121-125, 1979.

表-3 計算条件

| 計算項目       | 初期条件                                                                   | 境界条件                                     |
|------------|------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|
| 大気状態       | 計算領域内において雨降強度1.0 mm/hrの1.0 m厚の一部分を与える。                                 | 地上側境界から雨降強度1.0 mm/hrの一部分を与える。            |
| エアロゾル数濃度分布 | (1) 計算領域内において一定分布を与える。<br>(2) 計算領域及び地上側に一定分布を与える。<br>(3) 地上側に一定分布を与える。 | 地上側境界で指定する。<br>初期条件で指定する。<br>地上側境界で指定する。 |
| 降水分布       | 地上側境界を3.0, 1.0, 0.5 mm/hr, 1.0 mm/hrで与える。                              | 地上側境界で指定する。<br>初期条件で指定する。<br>地上側境界で指定する。 |
| 降水比        | $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3 = 0$                                     | 地上側境界で指定する。<br>初期条件で指定する。<br>地上側境界で指定する。 |
| 降水水蒸気収支    | $\alpha_1 = 100\%$                                                     | $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3 = 0$       |
| 気圧分布       | 地表付近で与える。                                                              | 地上側境界で指定する。                              |
| 気流分布       | 地上側境界から水平一様風速 $U=1.0$ (m/s) で与える。Potential flowモデルで計算する。               | 地上側境界で指定する。                              |
| 計算領域       | $1000 \text{ m} \times 1000 \text{ m} \times 10 \text{ m}$             |                                          |
| エアロゾル数濃度   | $1.5 \times 10^6 \text{ (m}^{-3}\text{)}$                              |                                          |
| 降水比        | $2.0 \times 10^6 \text{ (m}^{-3}\text{)}$                              |                                          |
| 湿度 (Pa)    | $1.0 \times 10^{-3} \text{ g/m}^3$                                     | エアロゾルが凝結性                                |
| 粒子半径       | 5.0, 4.0                                                               | 半径                                       |

表-4 計算領域

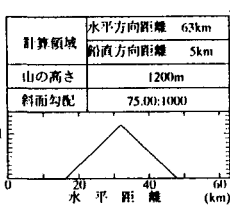


表-5 計算条件

| 計算項目  | 下流のエアロゾル数濃度 (num./cm³) | 地上側のエアロゾル数濃度 (num./cm³) |
|-------|------------------------|-------------------------|
| No. 1 |                        |                         |
| No. 2 | 50000                  | 1000                    |
| No. 3 |                        | 1000                    |
| No. 4 | 10000                  | 5000                    |
| No. 5 | 50000                  | 5000                    |
| No. 6 | 100000                 | 5000                    |
| No. 7 | 0                      | 5000                    |
| No. 8 | 50000                  | 0                       |