

## II-392 酸性雨研究のためのDiagnosticな雲物理モデルのLOD-FEM コードによる実行

豊橋技術科学大学 (正会員) 北田敏廣、北川恵一、P.C.-S. Lee  
国立公害研究所 植田洋圧

## (はじめに)

日本海沿岸における酸性物質の湿性沈着量の観測データは、大陸諸国からの当該物質の流入を示唆している。特に、冬期季節風時と梅雨期はその量が多い（例えば、藤田、1988<sup>1)</sup>）。ところで、酸性雨発現のメカニズムの解析には、汚染物質の輸送／反応モデルとともに雲物理モデルの使用が不可欠である。すなわち、雲粒子の生成速度およびその雨や雪への成長の速度は雲物理モデルの出力として得られるが、気相汚染物質が雲、雨、雪などに取り込まれる速度は、上記の速度と密接な関係を持つからである。

筆者らは、気相物質の輸送／反応モデル (Kitada ら、1984<sup>2)</sup>) やおよび雲水や雨水中での液相化学反応も含めた汚染質輸送モデル (Carmichael ら、1986<sup>3)</sup>) をすでに持っている。本研究では、Rutledge and Hobbs (1983, 1984)<sup>4), 5)</sup> の雲物理モデルをLOD-FEM (Locally-One-Dimensional, Finite Element Method) の計算機コード (Kitada ら、1983<sup>6)</sup>) によって実行し、酸性雨メカニズムの解明のために、冬期季節風時および梅雨期の降水場の標本を得ることを目的とする。いずれも、水平方向スケールは500km 未満である。

## (雲物理モデル)

Rutledge and Hobbs のモデルは、(1) "bulk water" type であり、かつ、(2) 診断的 (diagnostic) なモデルである。"Bulk water type" とは、各相間 (すなわち、水蒸気、雲水、雲氷、雨、雪) の水分移動を、各相の水分量や気温というマクロ変数によってパラメタライズするものである。このとき、雲、雨、雪、雪あられ等の粒径分布には、あらかじめ決まった分布を仮定する (例えば、雲粒子には均一粒径、雨粒子には Marshall and Palmer 型)。さらに、" 診断的 (diagnostic)" であるとは、流れ場そのものは観測あるいは何らかの方法で推定し、その流れ場および適切な境界条件のもとで平衡状態にある気温場、各相の水分場を求める指す。もちろん、上記の(1) と(2) は対になっている必要はなく、予測的な通常の流れ方程式系に(1) のモデルを組み込むこともできる。ただ、現状では、主として計算コストの面から、かなり立ち入った雲物理過程を含む予測的な計算は、水平スケールが50km程度、シミュレーション時間が2時間程度の積雲、積乱雲等の対流雲の生成に限られており、逆に、より広い範囲 (例えば、2000km以上；そこでは、水平格子長が50km程度) に対する予測的な計算では、雲物理過程はもっと簡単にモデル化される。

## (支配方程式系および数値解法)

前述のように、流れ場 ( $u, v, w$ ) は観測、推定等により与えられるので、その下での各相水分および熱の輸送方程式は以下の様である<sup>4), 5)</sup>。

水蒸気、雲水、雲氷 (それぞれ、 $q_v, q_c, q_i$ ) に対して：

$$\frac{\partial q_\alpha}{\partial t} + u \frac{\partial q_\alpha}{\partial x} + v \frac{\partial q_\alpha}{\partial y} + w \frac{\partial q_\alpha}{\partial z} = \frac{S_{0\alpha}}{\rho}, \quad \alpha = v, c, \text{ or } i \quad (1)$$

雪、雪あられ、雨 (それぞれ、 $q_s, q_g, q_r$ ) に対して：

$$\frac{\partial q_\beta}{\partial t} + u \frac{\partial q_\beta}{\partial x} + v \frac{\partial q_\beta}{\partial y} + (w + \bar{V}) \frac{\partial q_\beta}{\partial z} + \frac{q_\beta}{\rho} \frac{\partial \rho \bar{V}}{\partial z} = \frac{S_{0\beta}}{\rho}, \quad \beta = s, g, \text{ or } r \quad (2)$$

気温 (T) :

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \left( \frac{\partial T}{\partial z} + r_d \right) = \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{S_h}{\rho} \quad (3)$$

ここに、(2) 式中の  $\bar{V}$  は粒径分布を考慮した平均の重力沈降速度を、(3) 式の  $r_d$  は気温の乾燥断熱減率を表わす。(1)、(2) 式の  $S_{0\alpha}, S_{0\beta}$  は、図1に示す各相間の水分移動速度項を示す。また、(3) 式の  $S_h$  は、 $S_{0\alpha}, S_{0\beta}$  で表わされる各過程に伴う発熱、

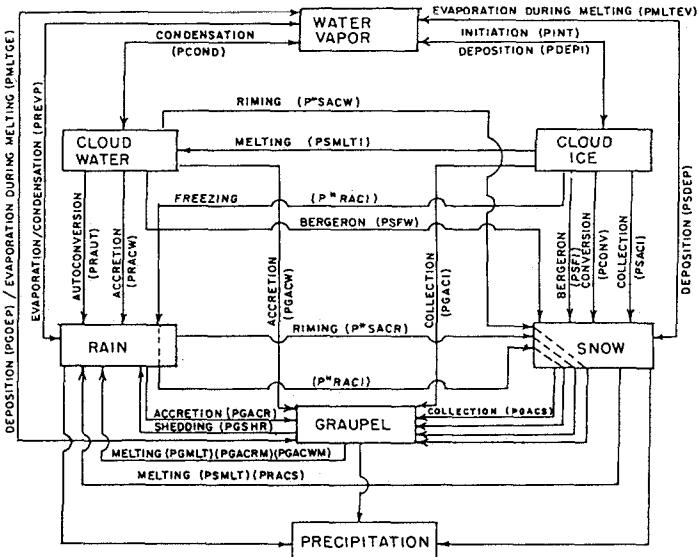


Fig. 1. 雲物理モデルに考慮されている水の相と相間の移動を示す諸過程<sup>4), 5)</sup>。

吸熱の速度を示す。

(1) ~ (3) の方程式系は、 $S_o \alpha$ 、 $S_o \beta$ 、 $S_h$  を化学反応項と見た場合に、汚染物質の輸送／反応方程式に極めて近く、LOD-FEM のコード<sup>6)</sup>が有効に利用できると考えられる。すなわち、(1) ~ (3) 式を、 $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向の三つの一次元輸送方程式系と  $S_o \alpha$ 、 $S_o \beta$ 、 $S_h$  を含む移動速度式系に分割し、1 タイムステップの計算を進めるために輸送方程式は有限要素法により、また非線形の移動速度式は区別的解析解法により順次解くものである。

$$(i) \quad \frac{\partial q_\alpha}{\partial t} + u \frac{\partial q_\alpha}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial q_\beta}{\partial t} + u \frac{\partial q_\beta}{\partial x} = 0, \text{ and} \quad \frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} = 0;$$

$$(ii) \quad \frac{\partial q_\alpha}{\partial t} + v \frac{\partial q_\alpha}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial q_\beta}{\partial t} + v \frac{\partial q_\beta}{\partial y} = 0, \text{ and} \quad \frac{\partial T}{\partial t} + v \frac{\partial T}{\partial y} = 0;$$

$$(iii) \quad \frac{\partial q_\alpha}{\partial t} + w \frac{\partial q_\alpha}{\partial z} = 0, \quad \frac{\partial q_\beta}{\partial t} + (w + \bar{V}) \frac{\partial q_\beta}{\partial z} + \frac{q_\beta}{\rho} \frac{\partial p \bar{V}}{\partial z} = 0, \text{ and}$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + w \left( \frac{\partial T}{\partial z} + r_d \right) = \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial T}{\partial z} \right);$$

$$(iv) \quad \frac{\partial q_\alpha}{\partial t} = \frac{S_{o\alpha}}{\rho}, \quad \frac{\partial q_\beta}{\partial t} = \frac{S_{o\beta}}{\rho}, \text{ and} \quad \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{S_h}{\rho}.$$

#### (モデルの応用：冬期季節風時および梅雨期)

冬期季節風時には、シベリヤ寒気団が暖かい日本海上を通過し、それに伴うロール渦の生成と渦の上昇域での筋状の雲列の生成がしばしば見られる。また、梅雨期には梅雨前線に沿っての雲列群の生成が見られる。これらの大陸から日本付近にかけての雲生成が、大陸起源の汚染質の酸性物質への変換にどのような役割を果たすか興味深い。講演時には、上記の気象場に対応する雲水、降水場の計算結果を示す。

(文献) 1) 藤田慎一(1988) 電力中研報告、NO.T87103, 18pp. 2) Kitada, T. et al. (1984) JCAM, Vol.23, 1153-1172. 3) Carmichael, G.R. et al. (1986) Atmos. Environ., Vol.20, 173-188. 4) Rutledge, S.A. and P.V. Hobbs (1983) J. Atmos. Sci., Vol.40, 1185-1206. 5) \_\_\_\_\_ (1984) J. Atmos. Sci., Vol.41, 2949-2972. 6) Kitada, T. et al. (1983) Numer. Methods in Eng., P. Lascaux, Ed., Vol.2, 223-233.