C363

孤立積乱雲の強度分布と最大鉛直速度

*中里 真久、鈴木 修、楠 研一、猪上 華子、石原 正仁（気象研究所）

1．はじめに

中里（気象学会 2010 春）では、竜巻の強度分布について定式化を行った。この研究では、竜巻の最大風速の度数分布が近似的に Maxwell-Boltzmann (MB)分布に従うことを示した。この分布式を使えば、竜巻の水平スケールに比べてメッシュの粗い現業用の数値モデル出力を使って、竜巻の発生数（又は発生確率）の期待値を強度の関数として推定することができる。この分布式には、竜巻固有のスケールパラメータは含まれていない。このため、この分布式は一般の積乱雲にも適用可能であることが示唆される。強度分布の変数は、この場合も竜巻と同様、分子１個当たりの運動エネルギーである。

積乱雲は、Richardson 数（以下、R と略記）を使って、シングルセル、マルチセル、及びスーパーセルに分類されることがある。R が 30～100 辺りに３者の遷移領域があると考えられている。Weisman and Klemp (1982) .(以下、WK82) によれば、ストーム中の鉛直速度が R の減少と共に単調減少することが数値実験で示されている。R が 10 以下で鉛直速度が 0 になる。これらの結果は、移流説 (Rotunno-Klemp-Weisman 理論：RKW 理論) で説明できるだろうと考えられている。その要点は、背の高い高相当温位気塊中を、下層の冷気流が通過する場合（これによって鉛直シアが生じると考える）において、両気塊の相対速度（鉛直シア）が強くなるほど、両空気塊の力学的バランスと持ち上げ空気の熱的変質のために、対流が発生した時の鉛直速度が遅くなるというものである。しかし、移流説の妥当性は、まだ定量的に明らかにされていない。

本研究は、竜巻の強度分布に関する研究で明らかになった、分布関数に関する考察を、一般の積乱雲に適用することにより、従来とは違った観点で、鉛直速度がパーセル法による予測の 60-70%になる理由と、R の減少に従って鉛直速度が減少する理由を統一的に理解することを目的としている。

2． 積乱雲の強度分布と鉛直速度の鉛直シア依存性

不安定な環境場の中で発生する積乱雲中の分子１個当たりの最大運動エネルギー（熱運動を無視）が e となる確率は、竜巻の場合と同様に、近似的に次の式で与えられると考えることにする。

$$p_e(e) = \exp\left(-\frac{e}{k_B T_c}\right) \qquad (1)$$

ここで、k_B は Boltzmann 定数、T_c は温度パラメータである。最大速度の期待値⟨V⟩は、分布関数を用いて計算することができ、次のようになる。

$$\langle V \rangle = \frac{\int_0^\infty V p_e(e)de}{\int_0^\infty p_e(e)de} = \sqrt{\frac{\pi}{3}(CAPE+CIN)} \approx 1.02\sqrt{CAPE+CIN} \qquad (2)$$

すなわち、ほぼ$(CAPE)^{1/2}$ に等しい（以下、簡単のため CIN を無視）。ここで注意すべき点は、⟨V⟩は鉛直速度ではなく、回転速度と鉛直速度を含めた速度の大きさの期待値である点である。エネルギーの観点から見た竜巻と積乱雲の違いは、エネルギーの担い手である。すなわち、竜巻の場合はエネルギーの大部分を回転運動が担い、積乱雲の場合は大部分を鉛直運動が担う。以下の議論を一言でいえば、「CAPE が鉛直運動にどの割合で分配されるかで鉛直速度が決まり、その割合が R によって変化する」ということである。ここでは、鉛直速度を R の関数として求めてみる。R は、シア速度ベクトルと速度ベクトルの間の角度 θ を用いて次のように表すことができる。

$$R \equiv \frac{CAPE}{\frac{1}{2}\overline{U}^2} \approx \frac{2}{\cos^2\theta} \qquad (3)$$

この式を用いて、鉛直速度 W の平均値⟨W⟩は次のようになる（式(2)を使用）。

$$\langle W \rangle = \langle V \rangle \sin\theta \approx \sqrt{\frac{R-2}{R}CAPE} \qquad (4)$$

WK82 では、鉛直速度 W と$(2CAPE)^{1/2}$の比 S を使って、鉛直速度の鉛直シア依存性を評価した。R を用いてパラメータ S の理論式を次のように得ることができる。

$$S \equiv \frac{\langle W \rangle}{\sqrt{2CAPE}} \approx \sqrt{\frac{R-2}{2R}} \qquad (5)$$

この式は、WK82 の図と直接比較することができる。図１は、パラメータ S の R 依存性を示す理論式(5)を図示したものである。WK82 で示されている鉛直速度の鉛直シア依存性がよく再現されていることが分かる。本研究によれば、次の２点が示唆される。

1. 実際の鉛直速度が CAPE から計算される鉛直速度の 60-70%程度になる主な理由は、鉛直速度が CAPE によって決定論的に決まるのではなく、M-B 統計の期待値として確率的に決まるためである。この点を考慮すれば、パーセル理論の予測値はかなり正確である。
2. 鉛直速度が鉛直シアの増加と共に減少する理由は、鉛直シアの増加によって回転運動エネルギーの割合が増加するためである。この例では、R=2 の時、全てのエネルギーが回転運動エネルギーに変換されるため、鉛直速度は 0 になる（しかし、R=2 の大気状態は鉛直速度 0 の対流の発生を意味するため、実際には実現できないだろう）。

式(5)は、WK82 中の initial storm の場合に相当するが、second storm と split storm の場合の S の式も同様にして得ることができ、数値実験の結果を再現することが確認できる。本研究から、積乱雲の発生数（又は発生確率）を強度（鉛直速度又はそれに類する物理量）の関数として推定することができるようになるかもしれない。

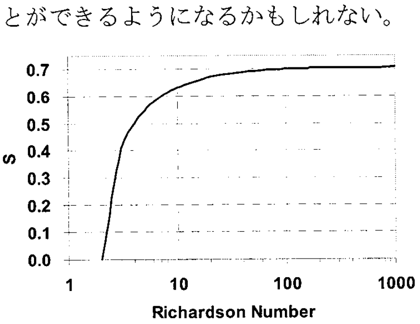

図１ 理論式(5)で計算されるパラメータ S（鉛直速度）の Richardson 数（鉛直シア）依存性。