

Chap. 8 Thunderstorms

第一段落 (p.268 1.1)

- ・本章では対流性の雲の一種である積乱雲(雷雲)に注目する
- ・一個だけでも、メソスケール対流系の一部としてもあらわれるが、本章では一個だけの方を扱う
- ・なぜなら一個の積乱雲はそれ自体も、メソ対流系を構成する要素としても重要だから

第二段落 (p.268 1.13)

・最も見た目が印象的な現象の一つだが、本章では内部構造と力学に焦点を当てる

1. 小規模な積乱雲 (8.1),
2. より大規模な雷雲(マルチセル型雷雲, スーパーセル型雷雲) (8.2-8.6),
3. 大規模な雷雲の重要な循環の特徴(竜巻, 突風前線, 局所的下降流) (8.8-8.10),
4. 個々の雷雲が線状の雷雲群になるのに適した環境条件 (8.11)

8.1 Small Cumulonimbus Clouds

積乱雲の特徴

- ・氷を含まないものもある(熱帯を中心に)が、たいてい氷を含む
- ・上部は氷で構成され、平べったい、あるいは筋状に広がる anvil
- ・下部は球根状の塔が集まった感じ

fig.8.1 航空機観測を元に書いた小規模な孤立積乱雲の模式図

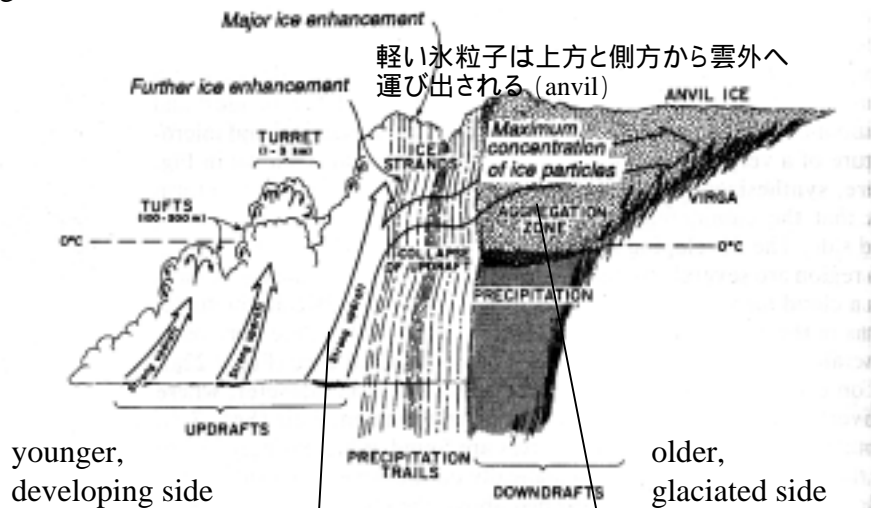


Figure 8.1 Empirical model of a small cumulonimbus cloud. Based on about 90 research aircraft penetrations of small cumulonimbus and large cumulus clouds. (From Hobbs and Rangno, 1985. Reprinted with permission from the American Meteorological Society.)

- turretの高さが 0°C 高度を超える $20\ \mu\text{m}$ を超えるサイズの降水粒子ができ始める
- ice enhancementが起こる 高濃度の氷粒子が短時間にできる (ice strands)
- ice strands の下の方: 強い上昇流によって大量の過冷却水が運ばれ, 氷粒子によって集められ, 霰ができる
- 上昇流が弱くなったところで重い氷粒子は落ちる
- anvil の氷粒子が落ちてきて 0°C 高度の上あたりに集まる
- 解けて層状性降雨をもたらす

シングルセル型雷雲ともいわれる

- ・一回強い雨を降らせて死ぬ
- ・上昇流がなくなると強い雨も無くなり、最後はanvilから降るブライtband付の相対的に弱い層状性降雨だけになる

雷の特徴

fig.8.2 シングルセル型雷雲のレーダーエコーの時間高度断面、上の矢印は放電を示す

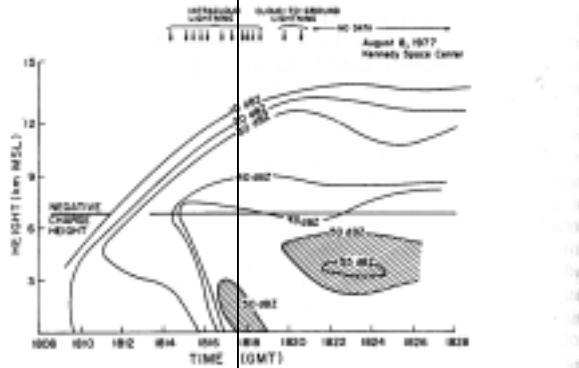


Figure 8.2 Time-height section of radar reflectivity for a thunderstorm near Cape Kennedy, Florida. Times of in-cloud (IC) and cloud-to-ground (CG) lightning are indicated. (From Williams et al., 1989. © American Geophysical Union.)

- ・時間とともに反射強度が強くなっていき、1818GMTには鉛直に伸びる芯ができる
- ・その後はブライトバンドを持つ層状性の構造
- ・-15 ~ -20 °C高度(図中では7kmくらい)まで雲頂が達しないと発生しない
- ・雲内放電(IC)がまず起こり、特にレーダエコーが強くなっている間数分に渡って高い頻度で起こる
- ・雲から地面への放電(CG)はICより頻度が低く、レーダーエコーが変化しなくなってから、場合によっては弱まり始めてから、ICのピークから5~10分遅れて起こる

雷が起こるといことは雲や雨の中に負に帯電している領域と正に帯電している領域があるということである
雷自体は電荷の移動で、雷が通った狭い領域は急激に30000Kまで加熱され、
圧力が1から2桁上昇し、急激に膨張して衝撃波と音波が出る

電荷分布の特徴

fig.8.3 積乱雲の中の典型的な電荷の分布

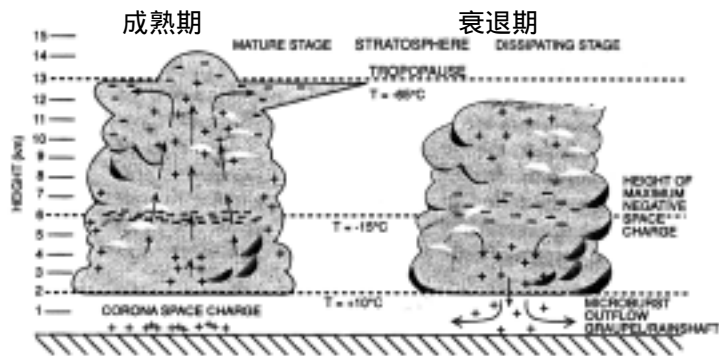


Figure 8.3 Schematic of the electrical structure of a cumulonimbus cloud. Positive and negative signs indicate the polarity of the charge at various locations. Streamlines indicate direction of airflow. (From Williams, 1988. © Scientific American, Inc. All rights reserved.)

- ・負に帯電している領域 が正に帯電している二つの領域 には含まれている
- ・正に帯電している領域は上の方 が大きい
- ・負に帯電している領域 は平べったく(厚さは1km以下なのに広さは数km)
-15 °Cの高度あたりにある
- ・anvilを含む積乱雲の上部を取り囲む薄い層 も負に帯電している

電荷分布ができる理由

- ・上部の負に帯電した層は宇宙線によって生じた - イオンを の正に帯電した層がひきつけてできる
- イオンは端の小さな雲粒子にくっつき screening layer を形成
- ・負に帯電した層は雲の下の地上にあるとがったものからの先端放電やコロナ放電を引き起こす
地表付近の大気には正電荷が残る
- ・ charge-reversal temperature による の負に帯電した層が 15°C の高度付近で
しかも と の間にあることの説明

霰粒子がより小さい氷粒子とぶつかるときの電荷の移動が大事

- ・気温と液体の水の量によって正に帯電するか負に帯電するか決まる
- ・ $-10 \sim -20^{\circ}\text{C}$ くらいの臨界温度 (charge-reversal temperature) より気温が低いと負に帯電, 高いと正に帯電 (from 室内実験)
- ・液体の水の量が与える影響については現在研究中

1. 降水仮説

- ・冷たい上層では霰粒子は氷粒子とぶつかって負に帯電し, 氷粒子を正に帯電させる
- ・霰は下に落ち, 氷粒子は落ちずに残る
- ・下層 (-15°C 高度付近) は落ちてきた霰によって負電荷が支配的になる
- ・それより下は暖かいので霰は降水粒子とぶつかって正に帯電する

2. 対流仮説

- ・ の正電荷は の正電荷が雲の下から上昇流によって雲の上の方へ運ばれてきたもの

どういう環境でどちらのメカニズムが卓越するのか, どのように二つのメカニズムが組み合わさって一般的な雷雲における電荷分布ができるのかはまだ良くわかっていない

電荷分布 放電

fig8.4 典型的な電荷分布における放電の模式図

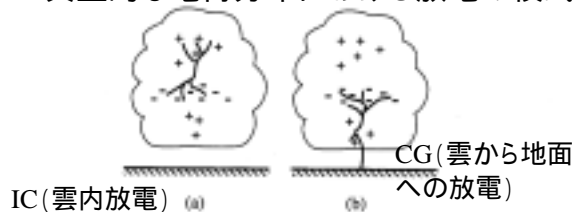
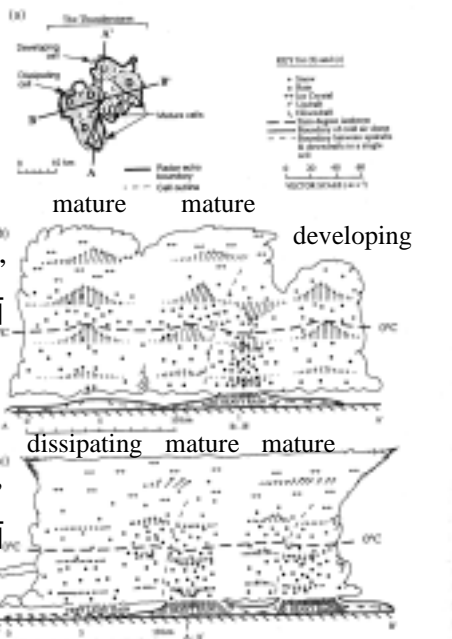


Figure 8.4 Depiction of lightning in prototype electrostatic structures: (a) intracloud; (b) dead-to-ground. Positive and negative signs indicate the polarity of the charge at various locations. (From Williams et al., 1989. © American Geophysical Union.)

- ・ IC は早い段階で, の負に帯電した領域から の正に帯電した領域へ電荷を運ぶ
- ・ CG は IC よりも遅れて起こり, から地面へ電荷を運ぶ (まれに正電荷を地面に運ぶこともある)

熱帯の氷を含まない雲でも雷が発生したという報告もあるが, めったに起きない現象であり, 現在氷を含む雲が帯電するのとは違うメカニズムで発生すると考えられている

8.2 Multicell Thunderstorms



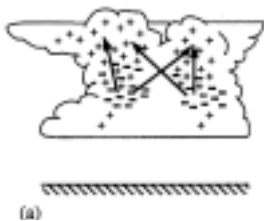
マルチセル型雷雲

- ・マルチセルを構成する個々の積雲は様々な発達段階
- 成長期: 活発な上昇流、降水粒子が急速に成長
- 成熟期: 活発な上昇流と強い降水による強い下降流
- 減衰期: 下降流のみ、弱まった降水
- ・寿命は数時間と、個々のセルの寿命(一時間以内)より長い
- ・それゆえ、マルチセルを構成する個々のセルは絶えず変化する

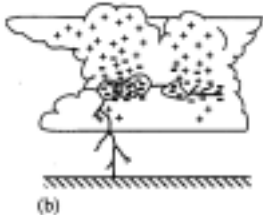
fig8.5 マルチセル型雷雲の模式図
(Thunderstorm Projectによる)

マルチセル型雷雲内の電荷分布と放電の時間発展

Mature storm

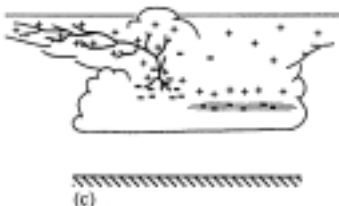


- ・2つのセル内の電荷分布はシングルセル型 (fig8.3) と同じ
- ・シングルセル型 (fig8.4a) と同様にはじめは雲内放電 (IC) で雲内の負電荷領域から正電荷領域へ放電
- ・ただし、片方の負電荷領域からもう一方の正電荷領域に放電する場合がある

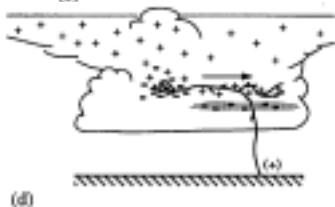


- ・シングルセル型 (fig8.2) と同様、ICの後に雲から地面への放電 (CG) が起き、負電荷領域から地面へ電荷を運ぶ
- ・放電が隣のセルの負電荷領域を横切るくらい広がることもある

Dissipating storm

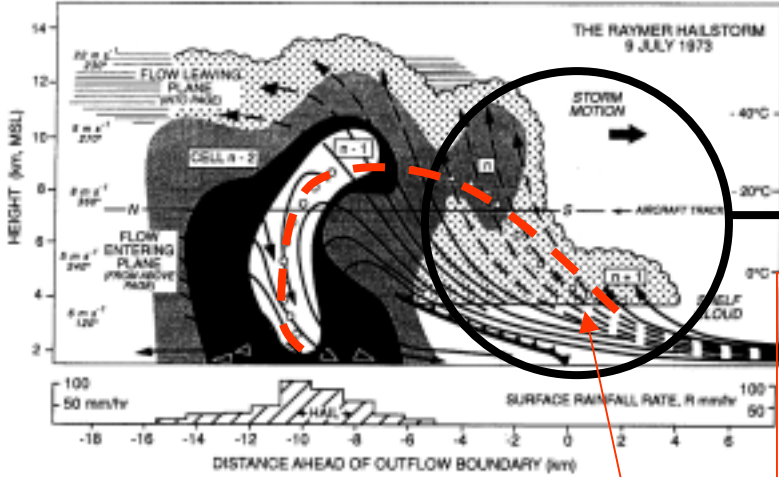


- ・anvilが広がり、ICが負電荷領域からanvilを貫通する
- ・CGも時々anvilを貫通して発生する
- ・セルの一つが死んで層状構造になる(グレーのところはブライトバンド)
- ・ブライトバンドには負電荷がたまる(温帯低気圧とメソ対流系の観測から)



- ・生きているセルの負電荷領域から死にかけのセル内の同じ高さの正電荷領域へ水平のIC
- ・数分間隔かそれ以上の頻度で繰り返して起こる
- ・時々死にかけのセルから地面へ正電荷の放電が起こる(この高度にたまった正電荷を放出するため)

組織化されたマルチセル型雷雲



一般風の鉛直シアがある程度強いときにマルチセル型降雨は組織化された形をとる

成長期のセル
ほとんど上昇流で
降水粒子は空中で成長するが落ちてこない

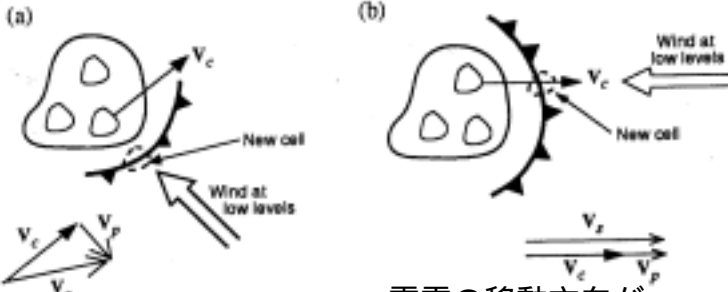
- 降水粒子
- ・ n+1のセルの雲底でできて、雲粒を集めて成長する
 - ・ 0 高度以上では主に氷粒子が雲粒集めできたあとは過冷却雲粒が氷粒子の上に凍りつく (riming) ことで主に成長する
 - ・ 霰や雹ができて、だんだん大きくなって地面へ落下する

fig 8.7 マルチセル型雷雲の模式図

雷雲の進行方向に沿った鉛直断面図、n-2,n-1,n,n+1という順序で発生発達した降水セルから成る。実線は雷雲に相対的な空気の流れ、破線は紙面に直角に入り込むあるいは出て行く部分。白丸は雹の軌跡、雲の輪郭の内側のシェードと白い部分はレーダーエコ - 強度でそれぞれ35,45,50dBZ

同じセル内にとどまるとした場合の雹の軌跡
他に小さなセルで生まれて最も活発なセルへ移流していく場合もある

組織化されたマルチセル型雷雲の水平構造



雷雲の移動方向がセルの移動方向に対して右
雷雲の移動方向がセルの移動方向と同じ

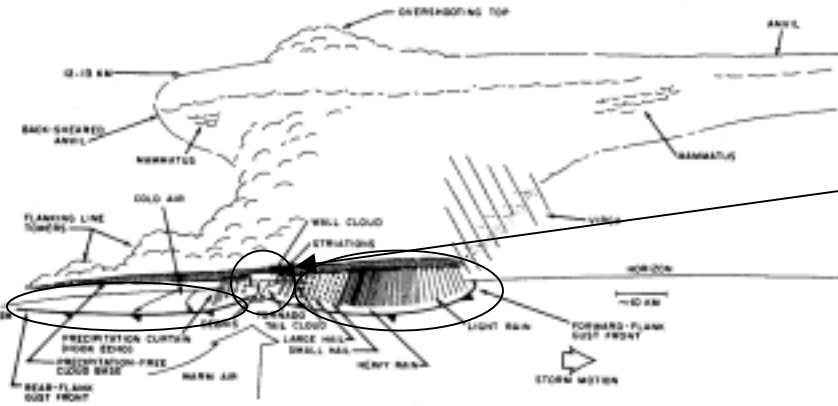
降水セルの自己増殖によってマルチセル全体としての移動が個々の降水セルの移動とは違ってくる

fig 8.7 マルチセル型雷雲内のセルの水平構造
Vc:セルの移動速度, Vp:新しいセルが発生することによる雷雲の伝播速度, Vs:雷雲の移動速度

8.3 Supercell Thunderstorms

スーパーセル型雷雲

- ・激しい気象現象で雹や竜巻による被害をもたらす
- ・竜巻の原因となる雷雲内の渦は地球流体力学によって表現される格好の現象
- マルチセル型雷雲と同じ位のサイズだが巨大な上昇流下降流の対を持つ孤立積乱雲



竜巻の渦

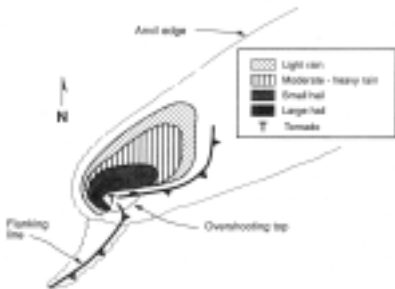
Tiltingで中層に渦ができる
 渦の中心で気圧が低下
 上から吸われて雲底から伸びるじょうご型の雲ができる

$$\frac{v^2}{r} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r}$$

旋衡風平衡: 遠心力と気圧傾度力の釣り合い
 渦の風速の2乗に比例して
 渦の中心に向かって気圧が下がる

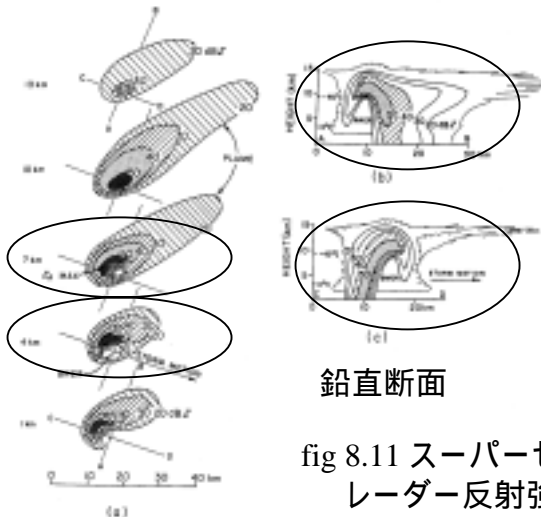
Fig. 8.9 スーパーセルの概念図

- ・竜巻は東あるいは南東から吹き込む下層の暖気のV字の先あたりでできる
- ・暖気はガストフロントを越えて上昇 スーパーセルの中の上昇流域
- ・強い下降流がガストフロントの後ろから吹き出す
- ・後ろ側面のガストフロントで竜巻ができることもある



- ・竜巻と暖気が入り込むV字の先と突き出た雲頂と降水域のくぼみが明らかに一致する
- ・弱い雨からだんだんとレーダーエコーが大きくなっていき、大きな雹が降水域のくぼみを囲んで特に強いエコーフックエコー

Fig 8.10 衛星画像による雲頂の特徴とレーダーによる下層の降水の平面図



鉛直断面

fig 8.11 スーパーセルのレーダー反射強度

高度ごとの水平断面

下層の切り欠きは突き出た雲頂に向かって広がるbounded weak-echo region (BWER) あるいはecho-free vaultにつながっている

スーパーセル内の雹の成長

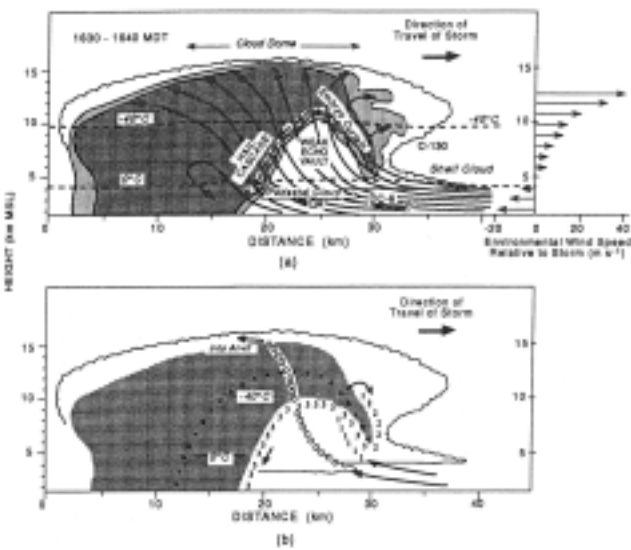


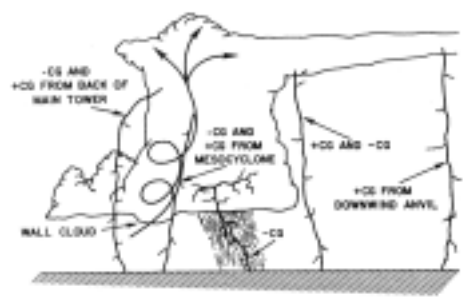
fig 8.12 スーパーセルの鉛直断面
 a) シェードはレーダー反射強度、太矢印は風速ベクトル、vaultの境界にある短細矢印は雹の軌跡を、細い線はスーパーセルに対して相対的な風速の流線、右にはスーパーセルの移動方向の風速の鉛直プロファイルを示す
 b) 1、2、3は雹の成長の3つのステージをあらわす

雹の種が最初にどこで発生してどのくらいの大きさかによって様々な軌跡をとる。

ステージ2からステージ3への移行は雹の種が、3のようにvaultの境界近くをとって大きく成長して落ちるケースで、上昇流に再突入することに相当する。
 そうでない雹はvaultの境界から離れて、あまり成長せず点で示した軌跡をとる。
 レーダーエコーに見られる特徴の原因

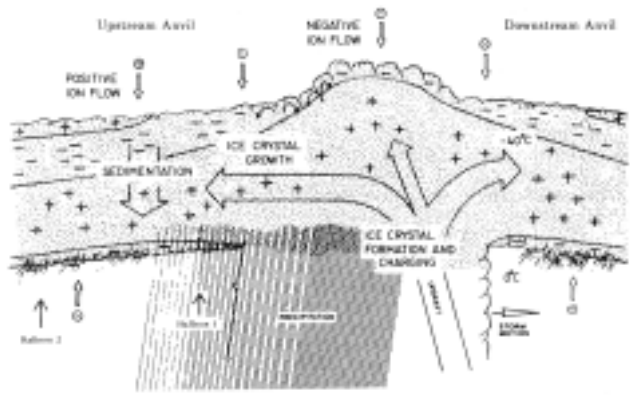
上昇流内で成長した雲粒は急速に上へ運ばれ降水粒子の大きさになる前にanvilへ放りだされる(軌跡o)
 vault及びBWERの原因

スーパーセルの放電と電荷分布



- ・スーパーセルはシングルセルやマルチセルと比べて激しく放電する
- ・シングルセルやマルチセルでは正のCGは減衰期のセルで起こるが、スーパーセルでは成熟期でも起こる
- ・しかし、正のCGの割合は少なく、激しい降水のところではまったく見られない

fig. 8.13 スーパーセルにおける雲から地面への放電(CG)の場所と極性
 螺旋は上昇流と回転が強いところ(メソサイクロン)



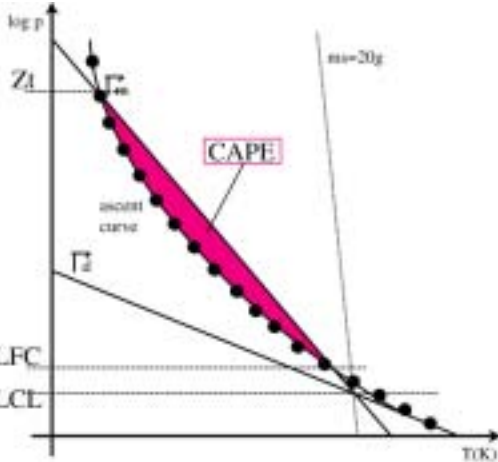
- ・電荷分布についてはあまりわかっていない
- ・氷の結晶が強い上昇流で運ばれ、正に帯電し、前と後ろのanvilに運ばれている
- ・anvilの上部は複雑な二重の層構造である
- ・シングルセルやマルチセルとは違う

fig. 8.14 スーパーセル上部の電荷分布の概念モデル

8.4 Environmental Conditions Favoring Different Types of Thunderstorms

雷雲がシングルセル型かマルチセル型かスーパーセルかは環境のシアと静的安定度で決まる
7.5.3節で取り上げた3次元の数値モデルで環境場と雷雲の関係を定量的に検討する

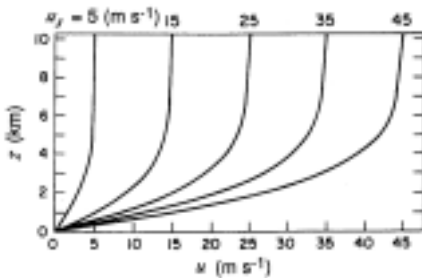
静的安定度の指標: CAPE(convective available potential energy)



$$CAPE \equiv g \int_{LFC}^{z_T} \frac{\theta(z) - \bar{\theta}(z)}{\bar{\theta}(z)} dz$$

ただし θ は $z=0$ から $z=z_T$ まで周囲と混合せずに持ち上げた気塊の温位、 $\bar{\theta}$ は環境場の温位

風速シア



- ・風向は高度によって変化しない
- ・地表面では風速0m/sで風速シアをあたえる層の一番上($z=z_s$)で u_s に漸近するように設定

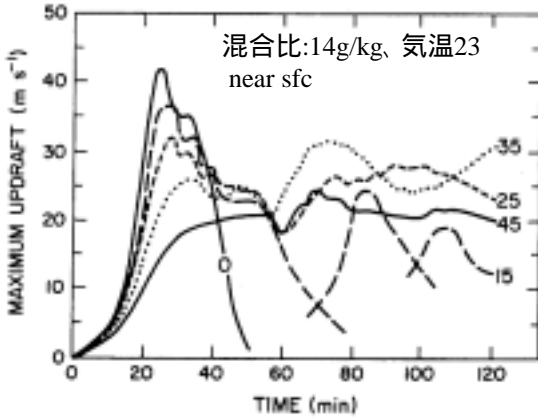
$$u = u_s \tanh(z / z_s), z_s = 3km$$

Fig 8.15 3次元数値モデルによるシミュレーションに使用する風速の鉛直プロファイル

数値実験の設定

- ・環境場の温位 $\bar{\theta}$ は飽和相当温位 が一定になる(つまり湿潤断熱線にそって気温が変化する)ように高度とともに増加するよう設定(条件付不安定と絶対安定の間)
- ・地表面付近の気温を固定して比湿をいろいろ変える
- ・水平方向の半径10km、鉛直方向の半径1.4km、中心で周囲より2 気温が高いバブルを導入
- ・風速は上述したように設定

数値実験の結果と考察



- ・風速シアがない ($u_s=0\text{m/s}$) とき
シングルセル型雷雲
- ・風速シアが中程度 ($u_s=15\text{m/s}$) とき
マルチセル型雷雲
- ・風速シアが強い ($u_s=25,35,45\text{m/s}$) とき
スーパーセル

fig 8.16 3次元数値モデルによるシミュレーションの結果
縦軸:鉛直風速の最大値、横軸:時間
線の横に書いてある数字は u_s で、風速シアの強さを表す

fig 8.17 中程度の風速シア ($u_s=15\text{m/s}$) のときの
マルチセル型雷雲

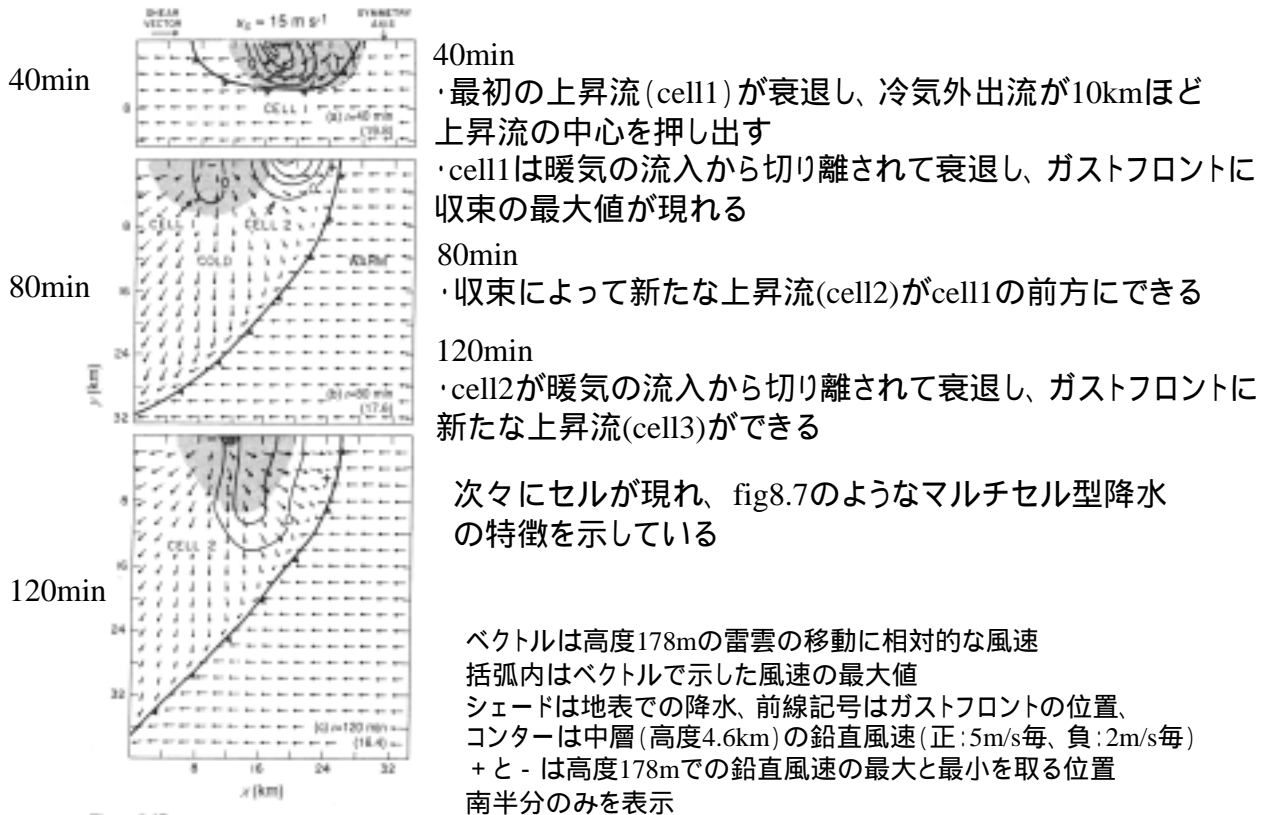


Figure 8.17

fig 8.18 風速シアが強いとき ($u_s=35\text{m/s}$) のときの
スーパーセル型雷雲

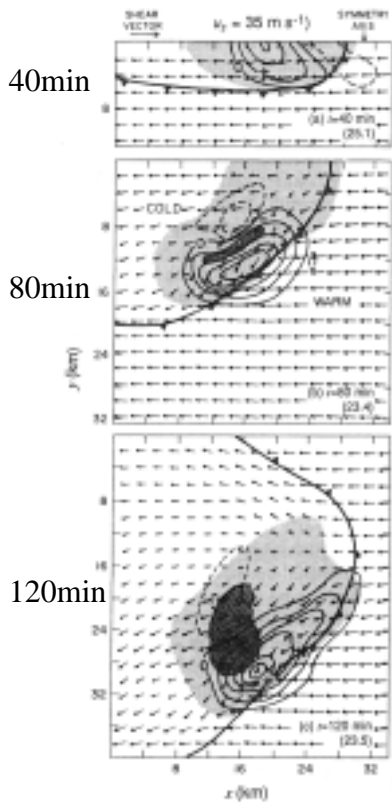


Figure 8.18

環境場の風向が高さ方向に変化しないので結果はy軸に対して対称になる
2つの独立した雷雲が発生しy軸から離れる方向へ進む

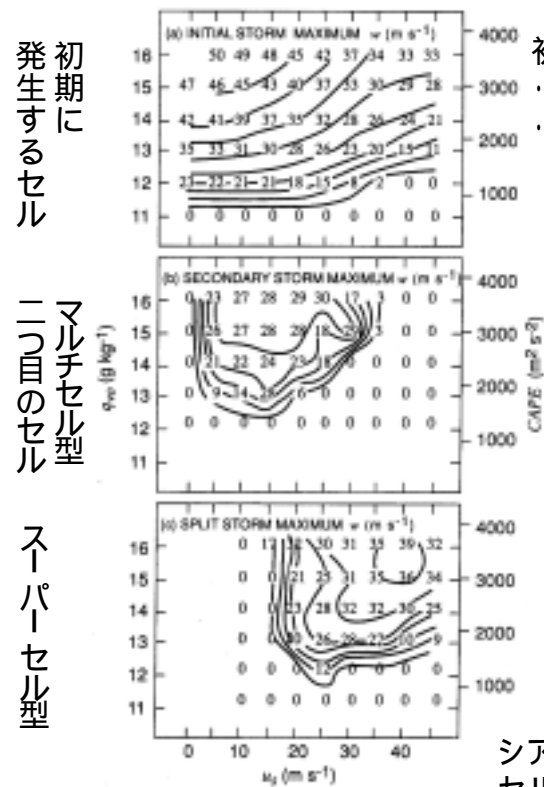
雷雲の分離 (storm splitting) といい、スーパーセルの力学では本質的
(inflowの方向に向かって右へ動く雷雲をright-moving storm、
もう一方をleft-moving stormという)

ガストフロントは上昇流の中心より前(右)へいかず、
冷気外出流と暖気の流入がほぼ釣り合うように一緒に動く

上昇流の中心がy軸から離れていくのは環境場の風速シアが大きいときに
特に強く現れるスーパーセル内の回転の結果である

上昇流の中心がy軸から離れていくのは環境場の風速シアが大きいときに
特に強く現れるスーパーセル内の渦のせいである

この結果はy軸に対称だが、環境場の風速だけでなく風向も高さ方向に
違っていれば、left-moving stormかright-moving stormのどちらかが
生き残ってどちらかが消えるようになる



初期に発生するセル
二つ目のセル
スーパーセル型

- 初期に発生するセル
 - ・静的安定度がある閾値を超えないと発生しない
 - ・不安定度が大きいほど、風速シアが小さいほど最大鉛直風速は大きい(シアが大きいほどエントレインメントが促進されるため)
- マルチセル型の二つ目のセル
 - ・風速シアが非常に小さいと発生しない(シアが小さいと地表で広がる下降流に見合うだけの暖気流入がなくなるから) その場合シングルセル型になる
 - ・風速シアが中くらいで暖気流入と冷気下降流が新しいセルができるのにちょうどいいと2つ目のセルができる
 - ・風速シアが非常に強いとエントレインメントが強くなって新しいセルができない
- スーパーセル
 - ・中くらいから高いシアのときしか発生しない

fig 8.19 鉛直風速の最大値
右縦軸: CAPE、横軸: u_s (風速シア)

シアが強いとエントレインメントが強くなるが、
セル内部の回転も強くなる
セル内部の回転が気圧の変動を力学的に引き起こし、
気圧の変動は雷雲の運動に影響を与える、結果としてsplittingや
Right- and left moving stormのような現象が起こる

スーパーセル内の回転の力学についてもっと詳しく見ていく