

3次元走査型ドップラーライダーで風を観る



藤吉康志

北海道大学低温科学研究所(雲科学分野)

空想科学の勧め

空想

夢想

空見

雲見

Visible 気象

観天望気：「風が雲を持っている。いつも持っているから雲が風を連れてくる。」*

*「天気で読む日本地図」(山田吉彦、PHP新書)

天気の変化は山から始まる

北海道樽前山 2010年1月31日

9時00分



9時30分



10時00分

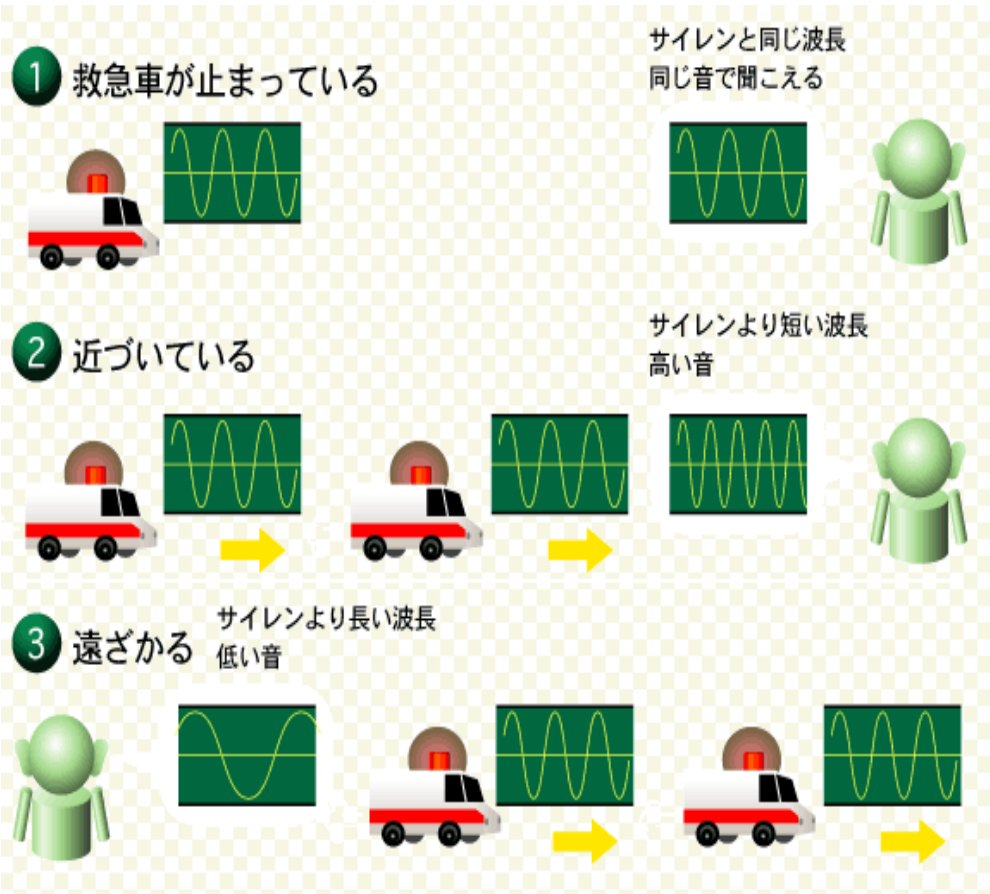


10時30分



風のリモートセンシング

音、電波、光のドップラー効果



ドップラーソナー

(音)

空気の密度の乱れ

ウィンドプロファイラー

ドップラーレーダー

(電波)

雨、雪粒、雲粒

ドップラーライダー

(光)

塵 (エアロゾル)、

空気分子

- 音波は騒音問題あり
- マイクロ波は、携帯電話の普及、ペースメーカーなどで使用制限
今後も増加
- 分光技術、レーザー発振技術の発展（低い消費電力、安全性）
光を用いた通信・観測技術
が急発展中

New Visible気象学

Cloud Science and 3D-CDL

Study of clouds becomes important especially in recent years, since they play an essential role in global climate systems and the earth environment.

**Aerosol-Cloud interaction:
the Largest Climate Uncertainty**



**Need seamless observation
Aerosol, wind, clouds**



3D-scanning Coherent Doppler Lidar

3D-scanning Coherent Doppler Lidar

Mitsubishi Electric Co. Ltd



Laser Source: DFB-Er doped fiber laser

(Pre. Amp. : Er doped fiber amplifier)

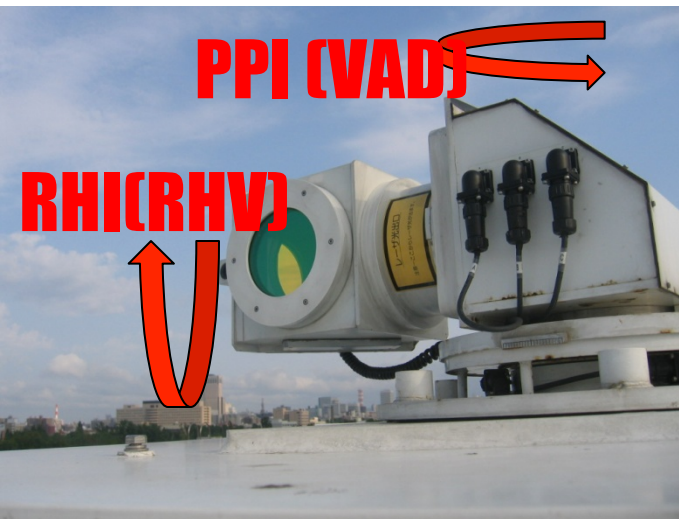
[Power Amp.: Yb:YAG laser pumped OPA]

Pulse energy : 0.5 mJ/pulse

PRF : 4kHz, Average power: 2W

Pulse width: 200 ns

Receiver diameter: 110mm



Wavelength : 1.54 μ m (eye-safe)

Detection range :20km maximum

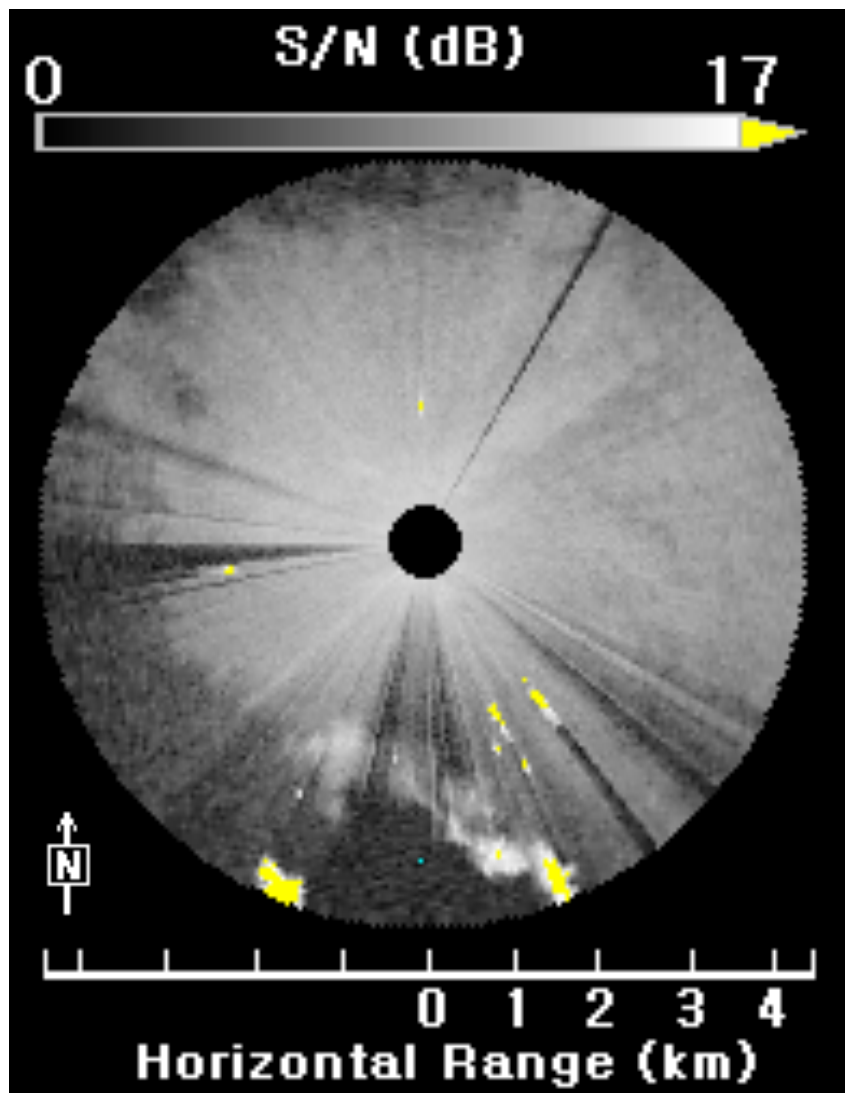
Resolution :25m minimum

80 range bins: (25m,2km),(50m,4km),(100m,8km)

Intensity (S/N), Doppler velocity, Velocity width

Scanning speed: ~3rpm (variable)

花火の煙 (人工のトレーサー)



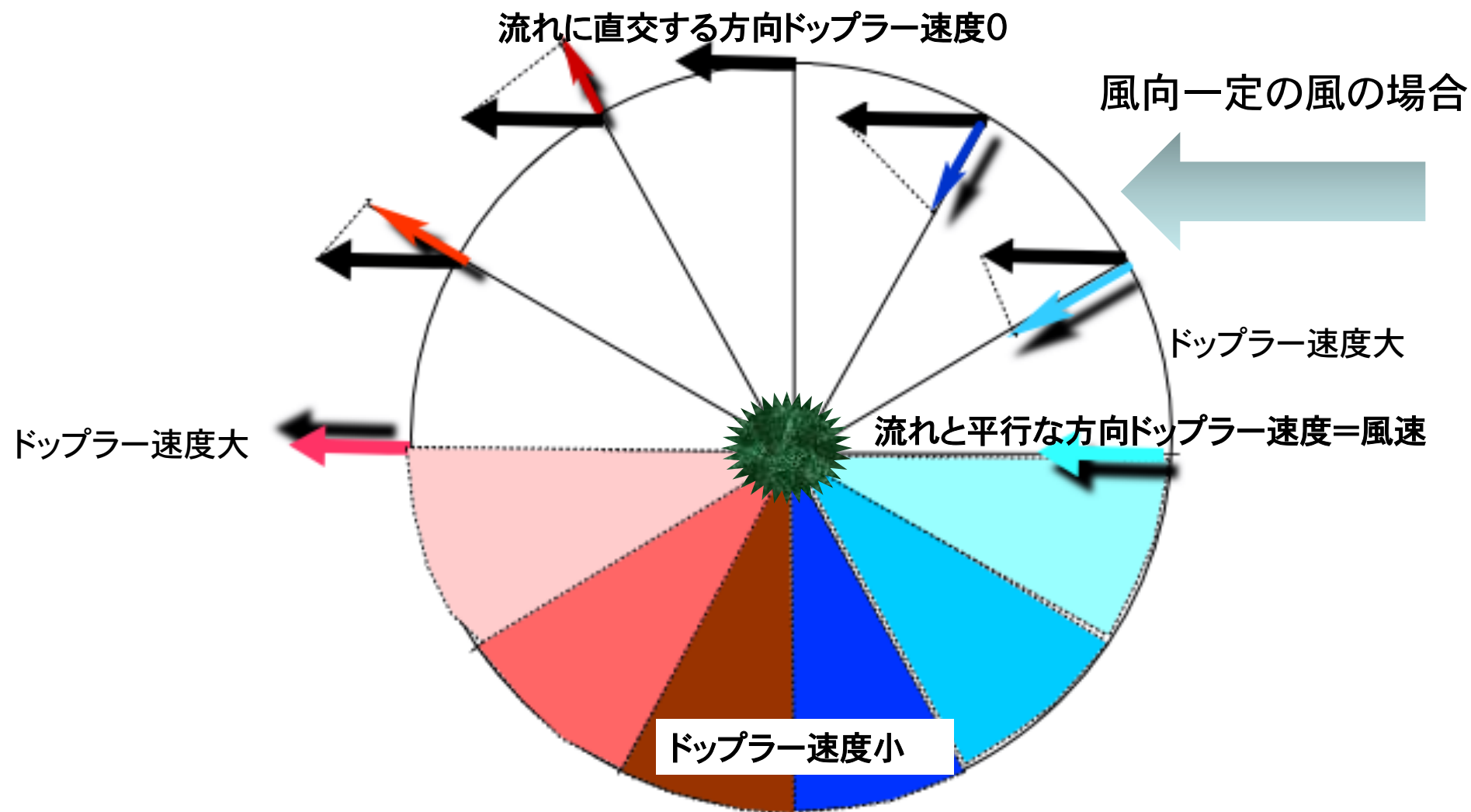
elevation angle 2.2°



15 July ,2005 20:42 JST

ドップラー速度表示の見方

視線方向の速度成分のみ検出



Observation started in March 2005

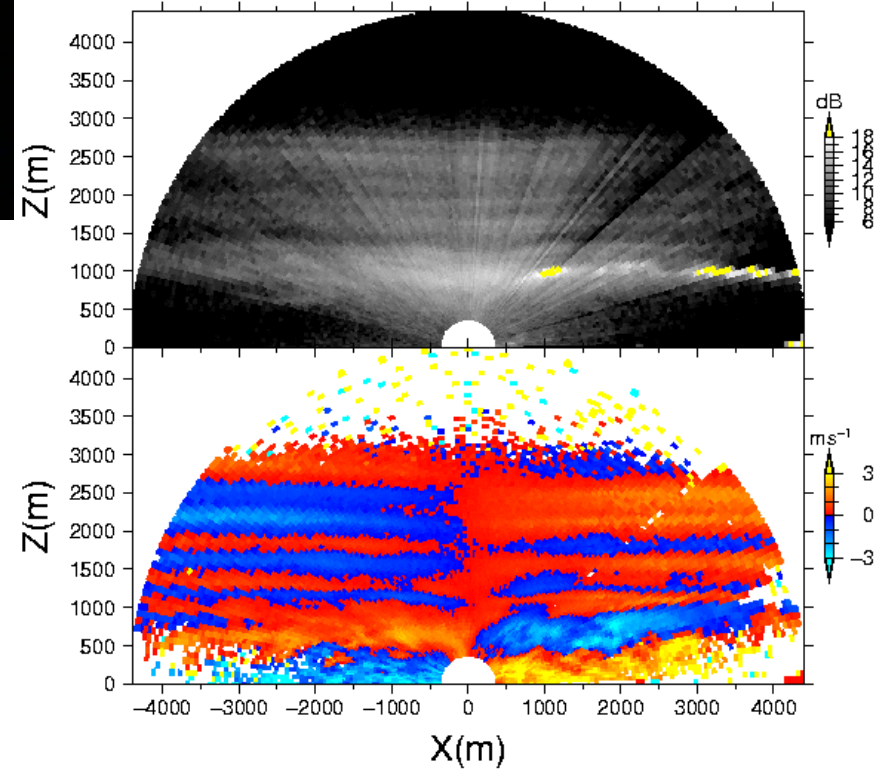
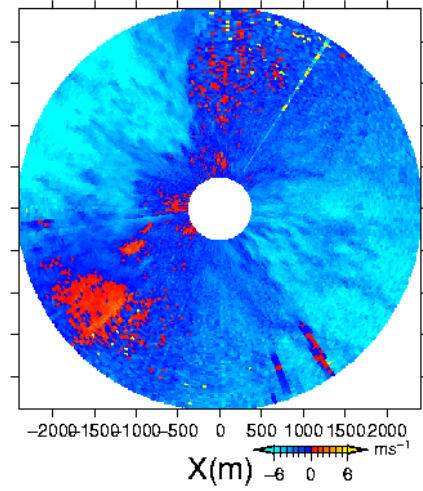
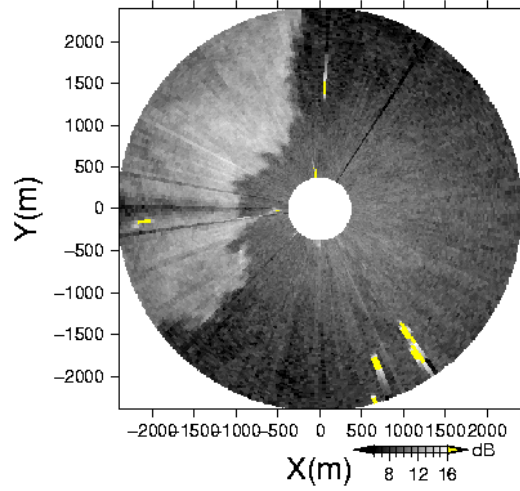
Sea-breeze

0606131419 1

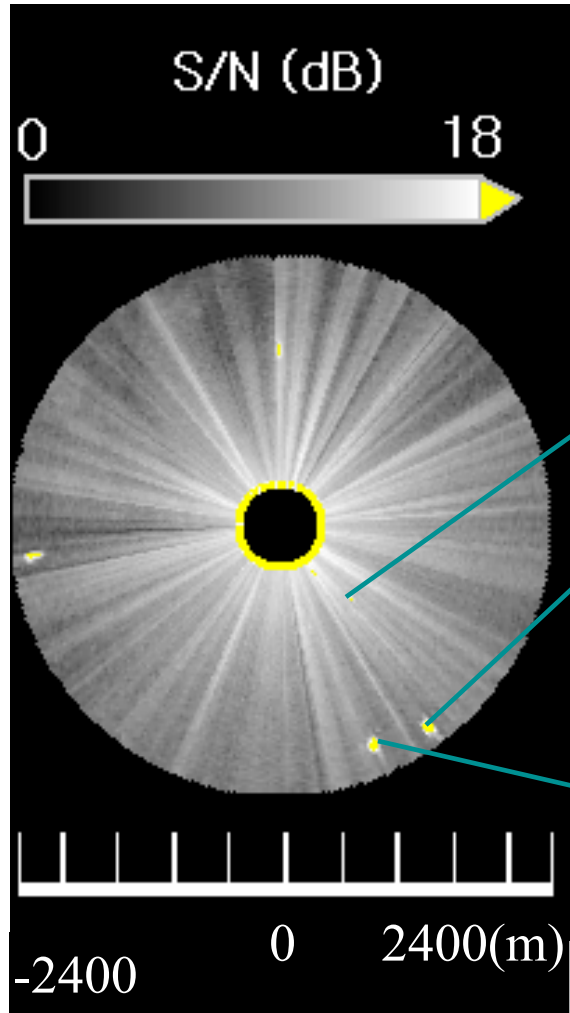


0606041539 1

0606041539 1



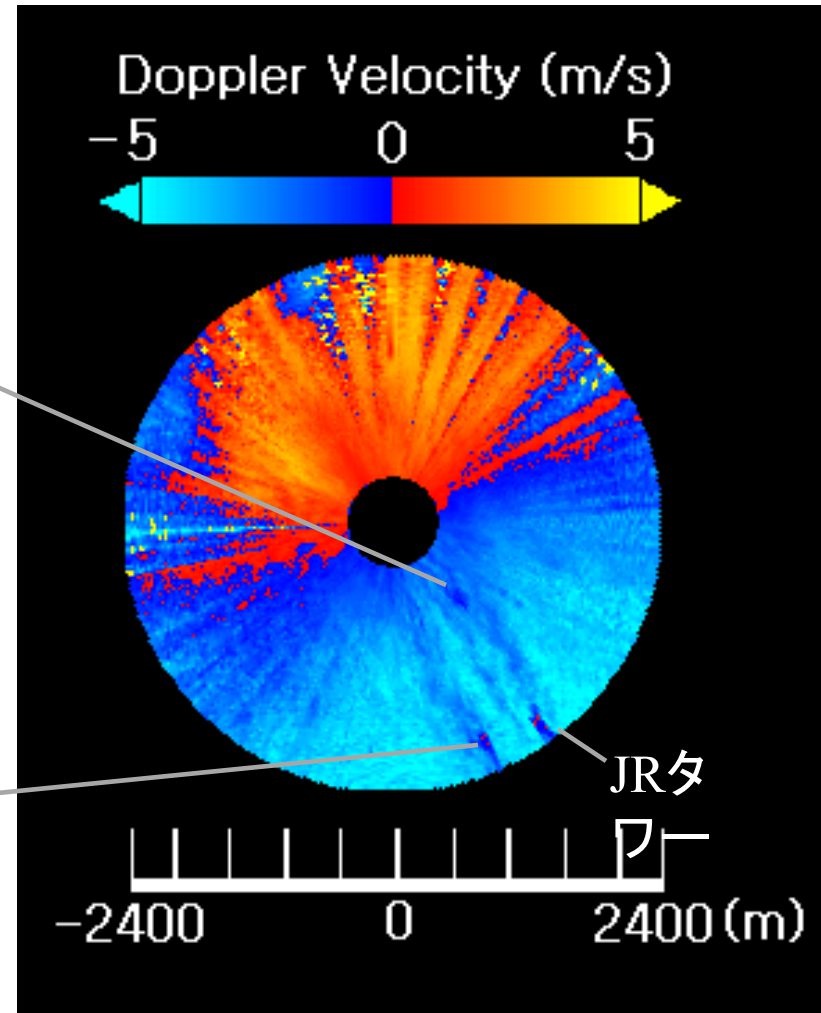
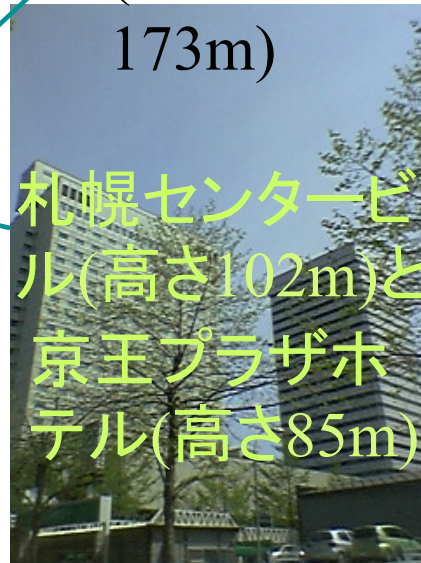
JRタワーの後流



北大病院

JRタワー
(高さ
173m)

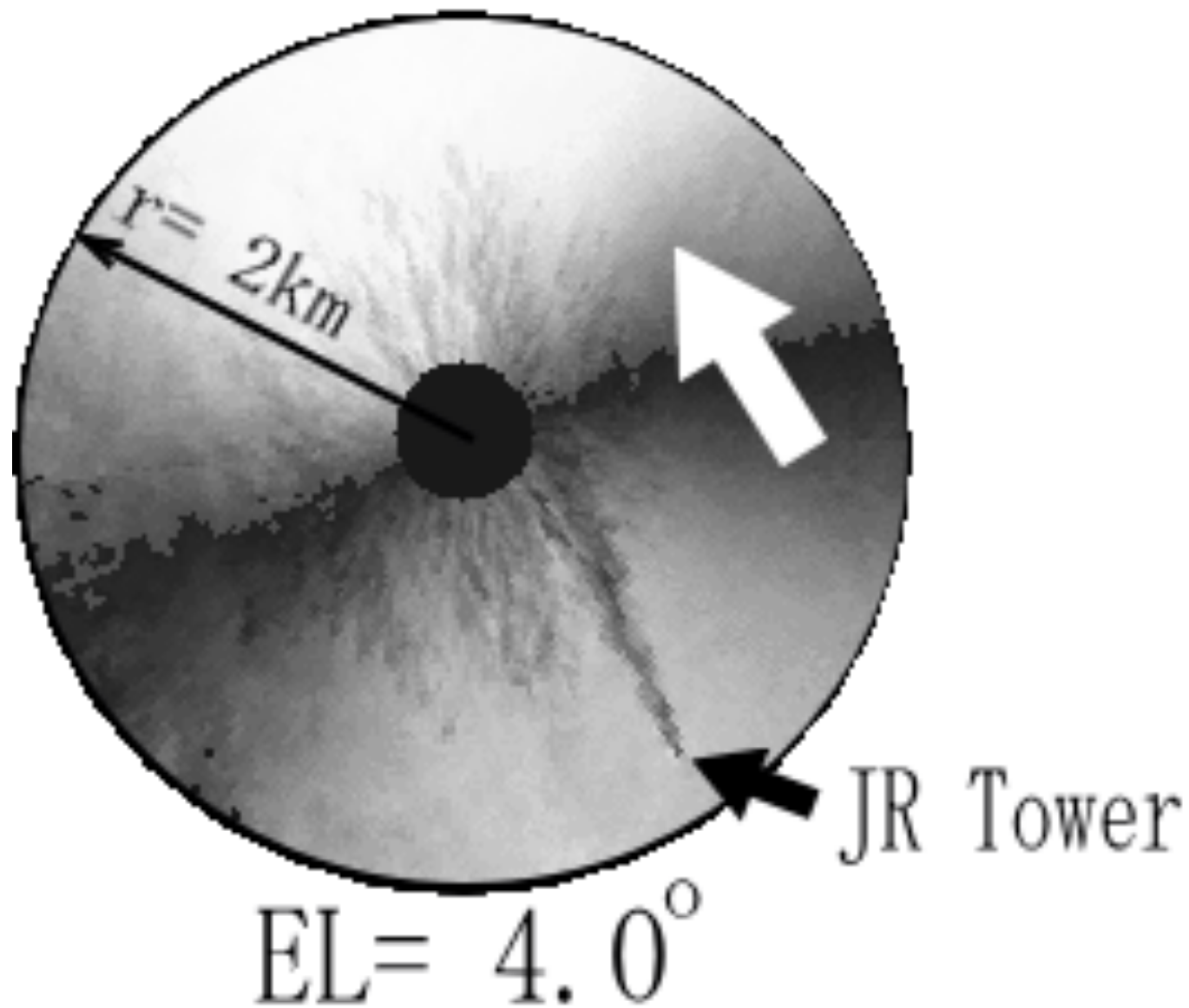
札幌センタービル(高さ102m)と、
京王プラザホテル(高さ85m)



15 March ,2005 06 JST

建物の影響が風下数kmに及んでいる。

4 Nov., 2006



身近に吹く風の可視化

- 穏やかな晴天日に吹く風
- 強風時の風の構造

LESの気象への応用、気象研究ノート219号, pp. 164 (2008年11月発行).

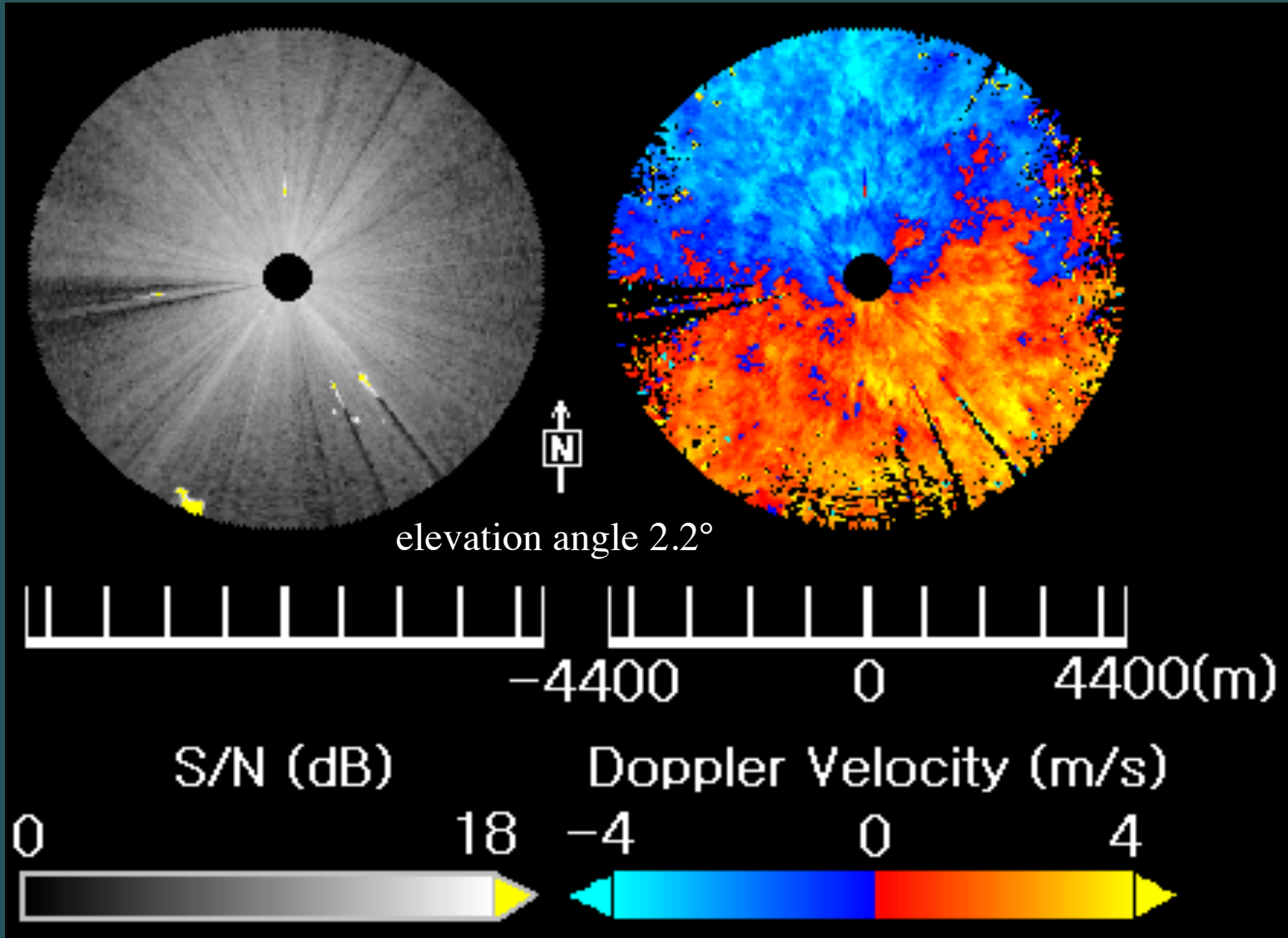
Fujiwara et al.: Dust devil-like vortices in an urban area detected by a 3-D scanning Doppler lidar

J. Applied Meteorology and Climatology

doi: 10.1175/2010JAMC2481.1

網目構造

弱風 < 5m/s

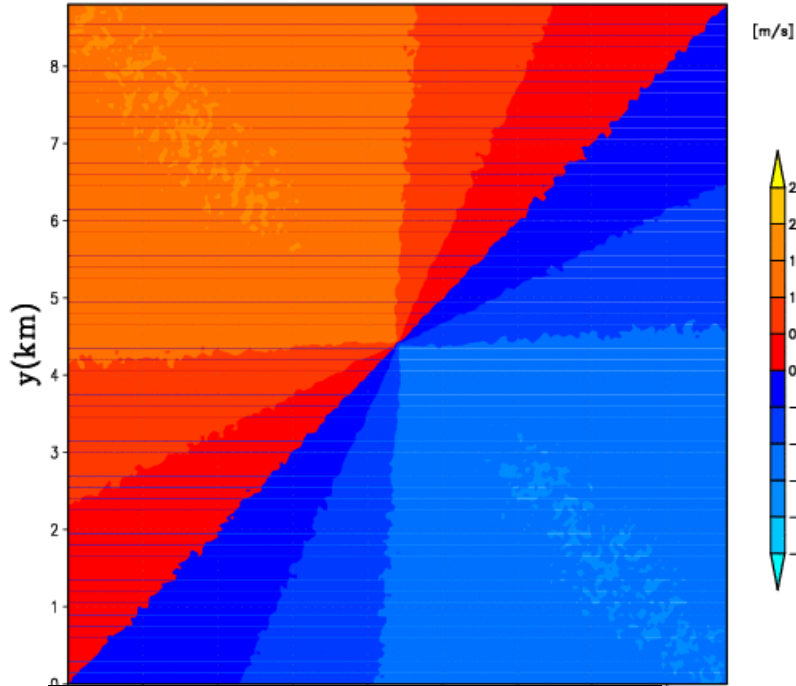


14:15 JST 24 April, 2005

網目構造

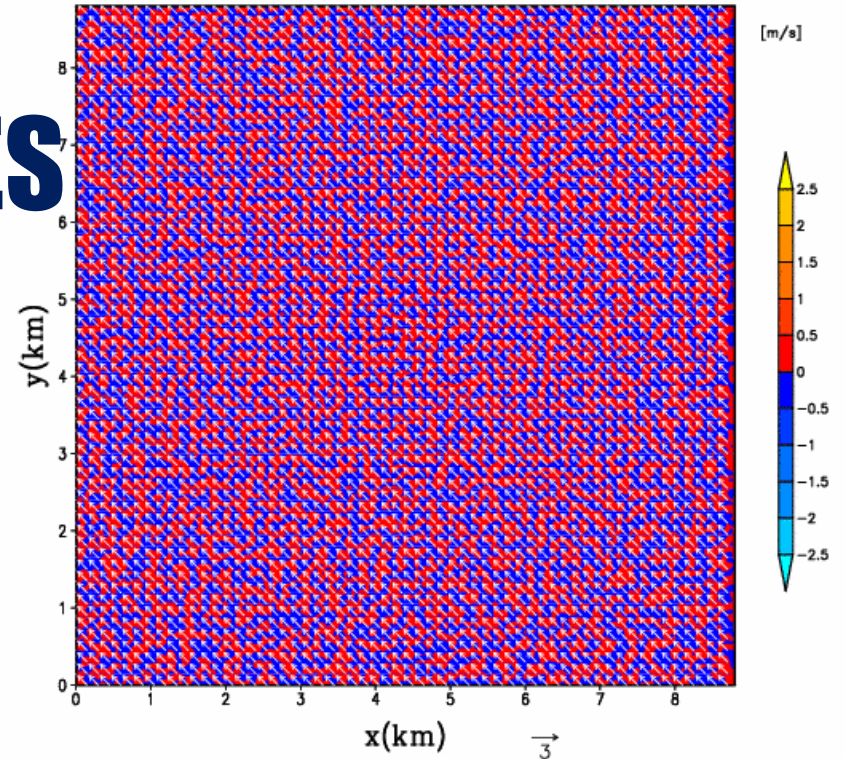
風速 < 5m/s

Run 16 DV EL=2.2 T=1 1.5m/s 0.24Km/s



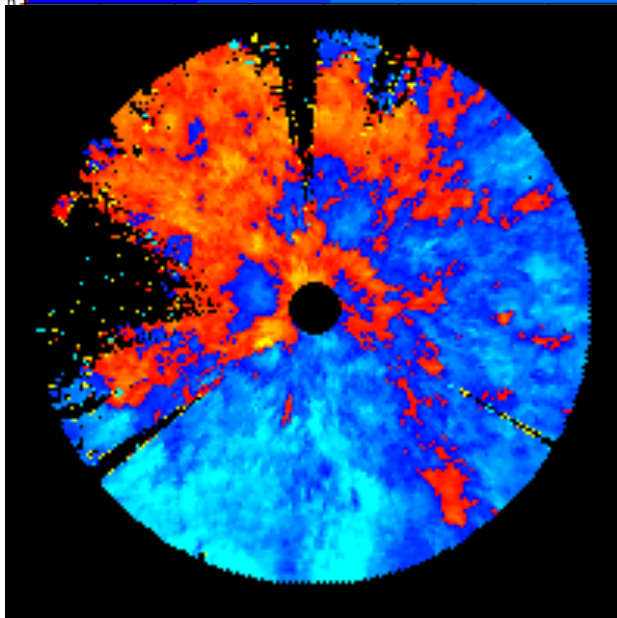
LES

Run 16 DV EL=2.2 T=1 1.5m/s 0.24Km/s



Obs.

風ベクトルと上昇流域



Dust Devil

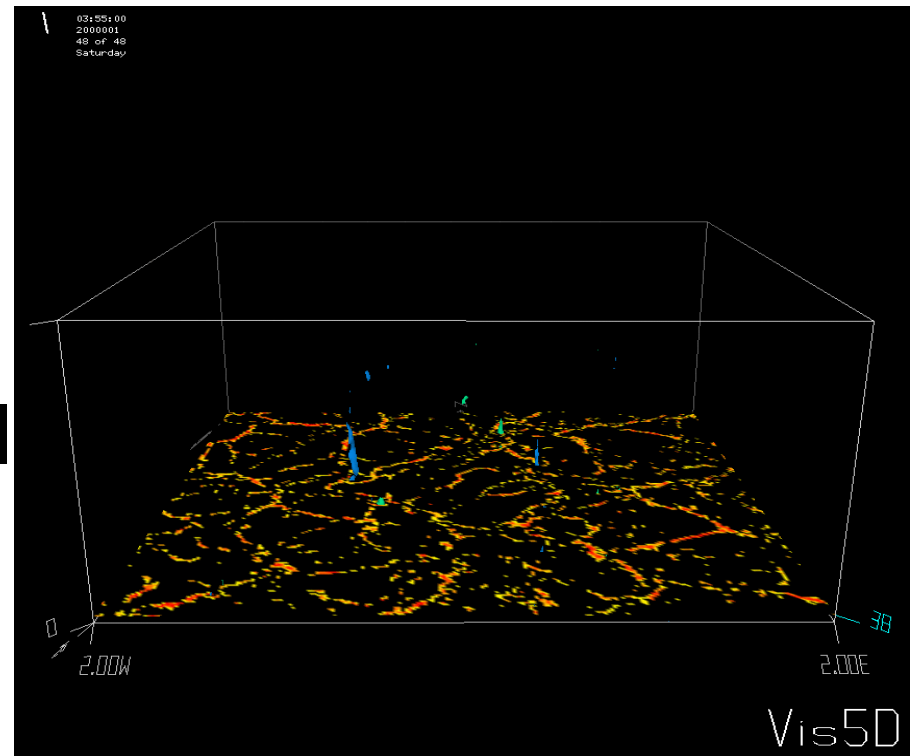
Small scale vortex

Visible by tracers of dust in desert or relatively flat area.

No study on urban and invisible dust devils.



Possible sources of vertical vorticity:
Tilting of ambient horizontal vorticity associated with convective-cell circulation
“Fish nets”.



渦検出アルゴリズム(メソサイクロン検出(鈴木ら 2006))

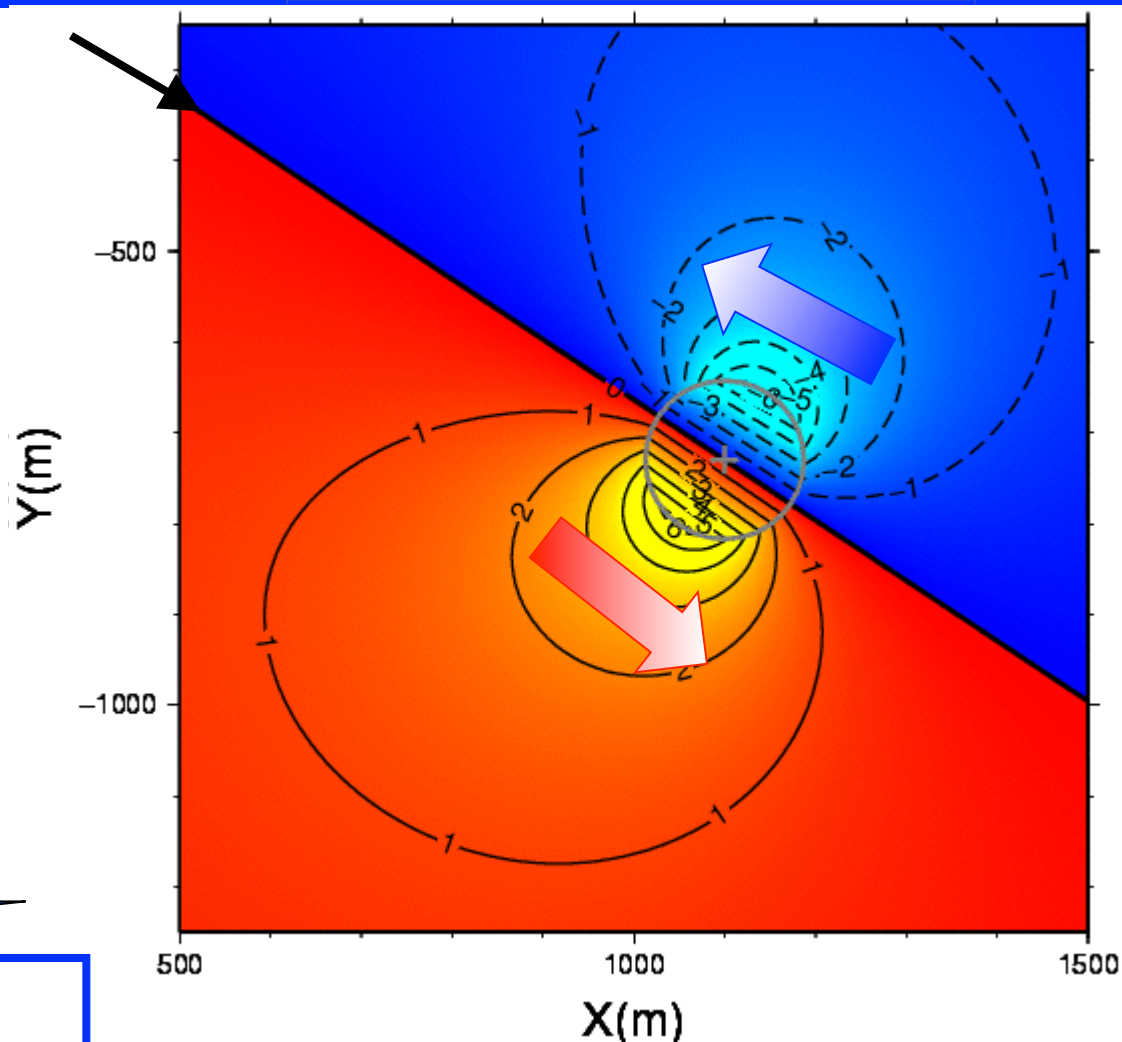
ドップラーレーダー → ドップラーライダー

- 方位微分が閾値以上
- 極大値・極小値の検出
- **ランキンの複合渦**を
仮定し、フィッティング

$$v_s = \frac{\xi_0}{2} r \quad (0 \leq r \leq a)$$

$$v_s = \frac{\xi_0 a^2}{2} \cdot \frac{1}{r} \quad (a < r)$$

時間連続性
ノイズ除去



渦度の見積もり

(Bluestein et al. 2004)

・生データ

$$\delta = \frac{2(V_{\max} - V_{\min})}{D} \quad (D = 2a)$$

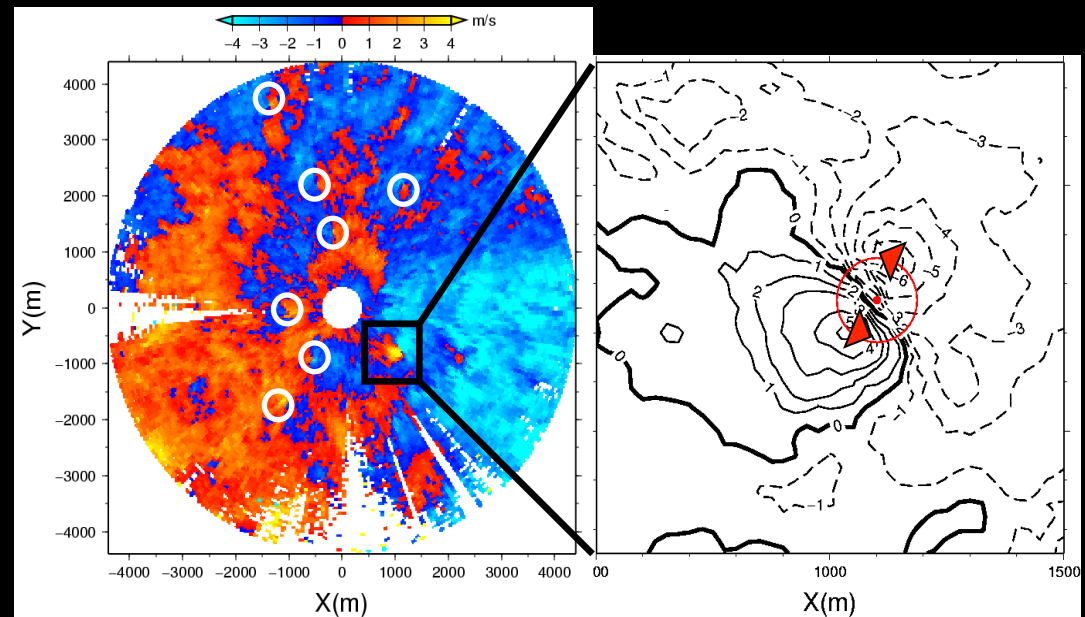
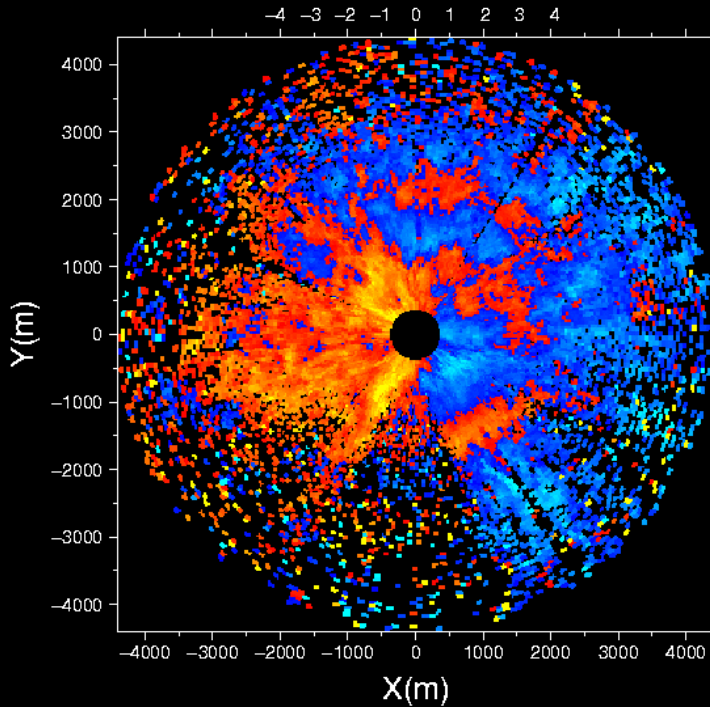
解析事例

06/10/4、07/6/22、07/6/25

Invisible and urban Dust Devils (Obs.)

22 June 2007 11:48-12:33 LST

Doppler velocity (PPI: EL=2.2deg)

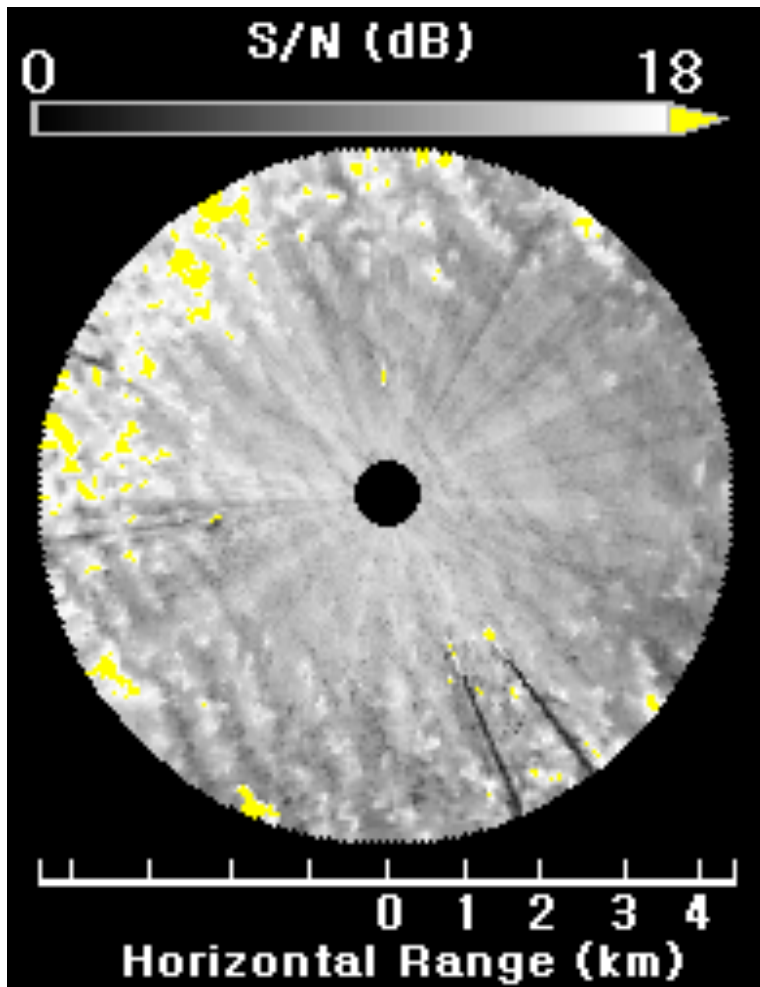


Scale:170m、vorticity $0.15s^{-1}$

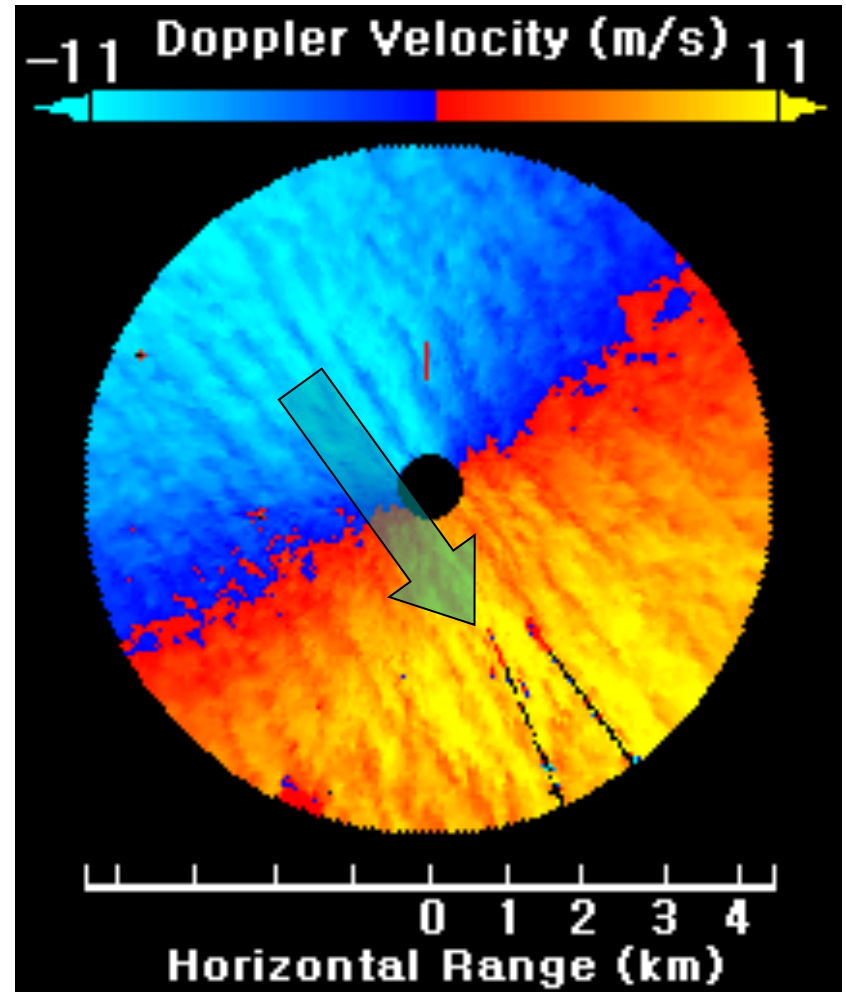
- More than 100 detected
- Horizontal scale : 30~320 m
- Max. Vorticity: $0.38s^{-1}$
- Some cases developed along the sea-breeze front

Streak structure

Ubiquity: Surface wind $> 5\text{m/s}$



05 June, 2005

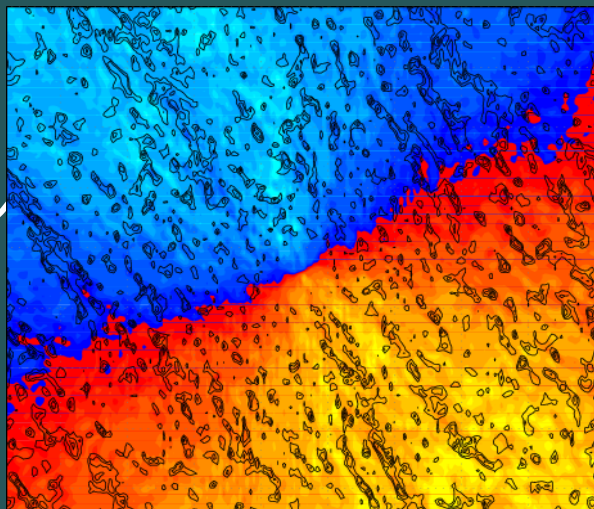


elevation angle 2.2°

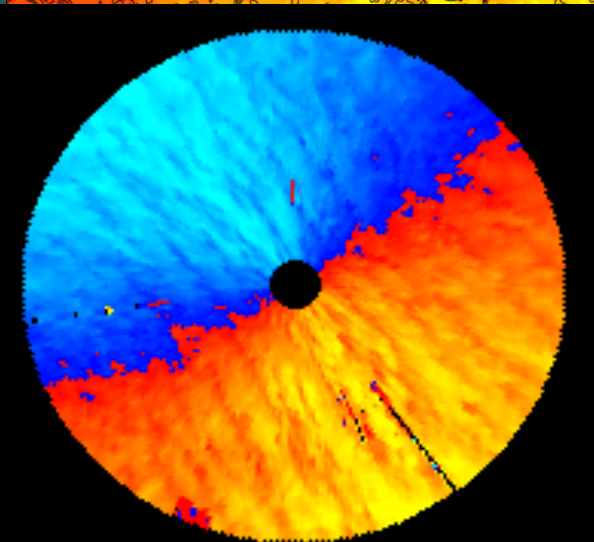
数値モデルとの比較

Simulated Doppler Velocity

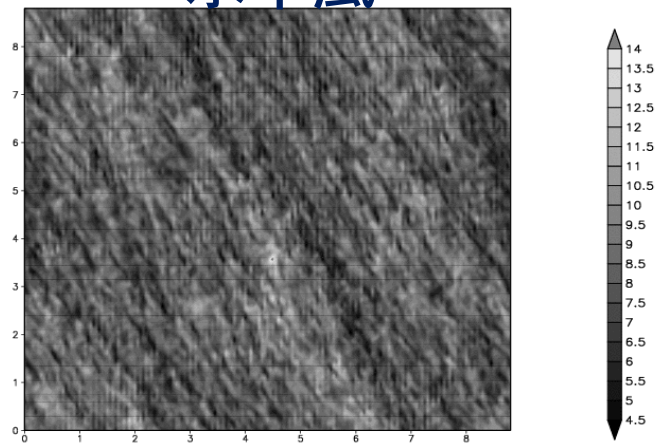
モデル



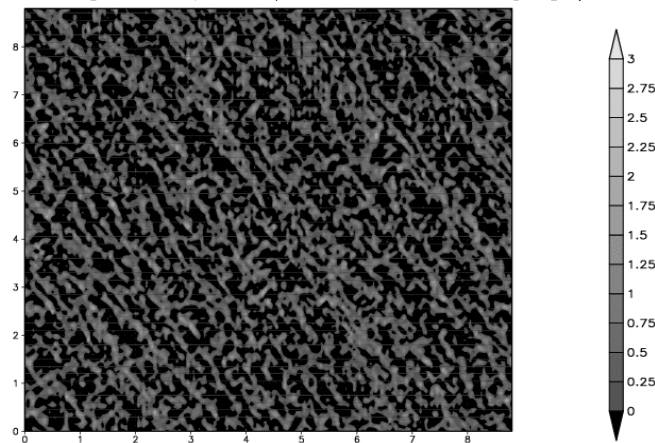
実測



水平風

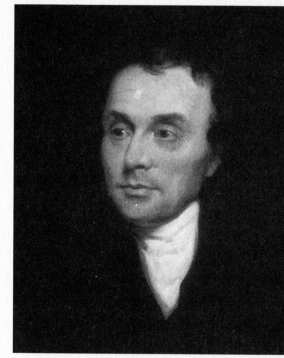


鉛直風(上昇・下降)



The Invention of Clouds

Luke Howard (December 1802)



Portrait of Luke Howard by John Opie, c. 1807

and in so doing he had be



Cirrus radiatus



Cirrostratus fibratus



Cirrocumulus undulatus



Cumulonimbus mammatus



Cumulonimbus incus

How these clouds are formed?



Altopcumulus stratiformis



Altostratus translucidus



Altopcumulus undulatus



Altopcumulus castellanus



Altopcumulus lenticularis



Stratocumulus undulatus



Stratus opacus



Cumulus humilis



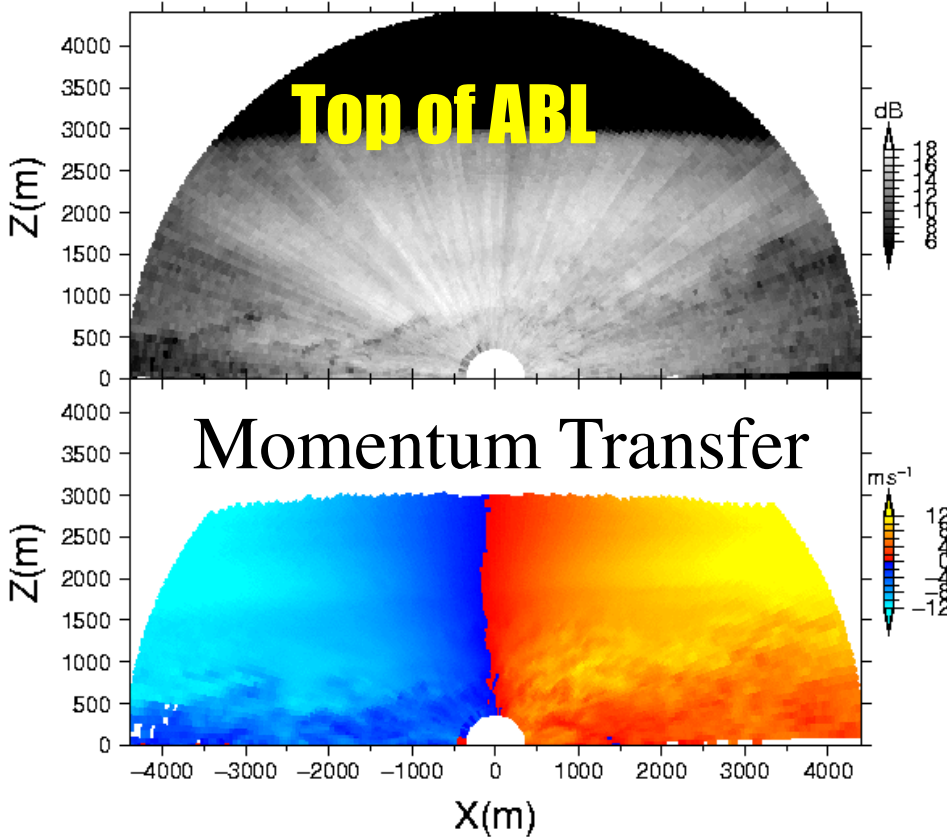
Cumulus congestus



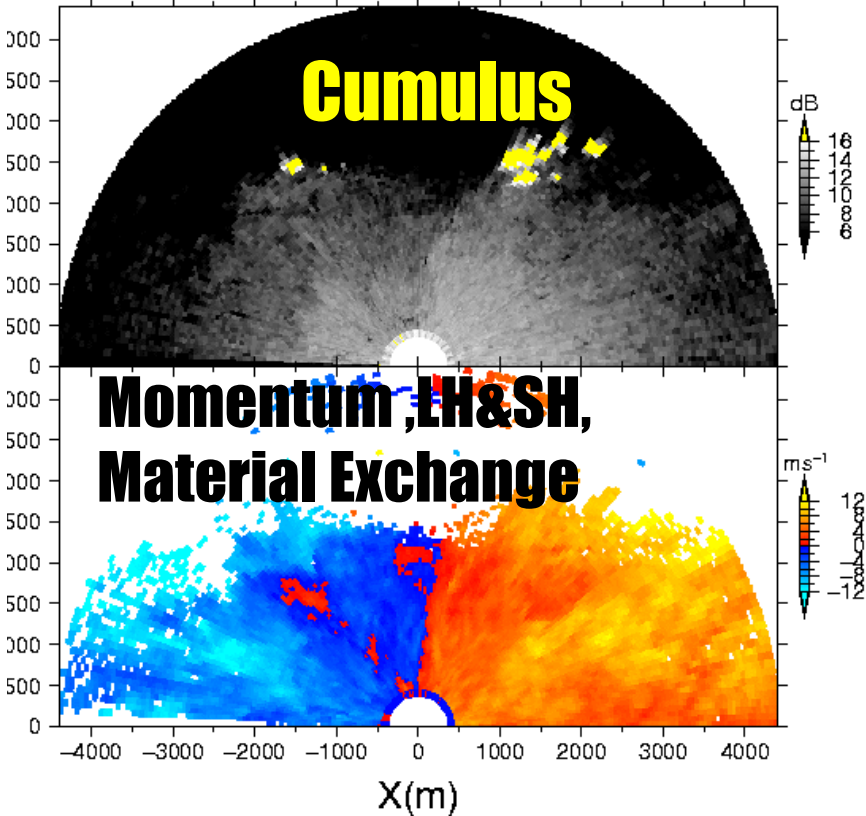
Cumulonimbus with tornado

Blue and Wet Thermals

0505021346 27



0505031122 40











晴天乱流・乱気流

肉眼で見えない大気の乱れ

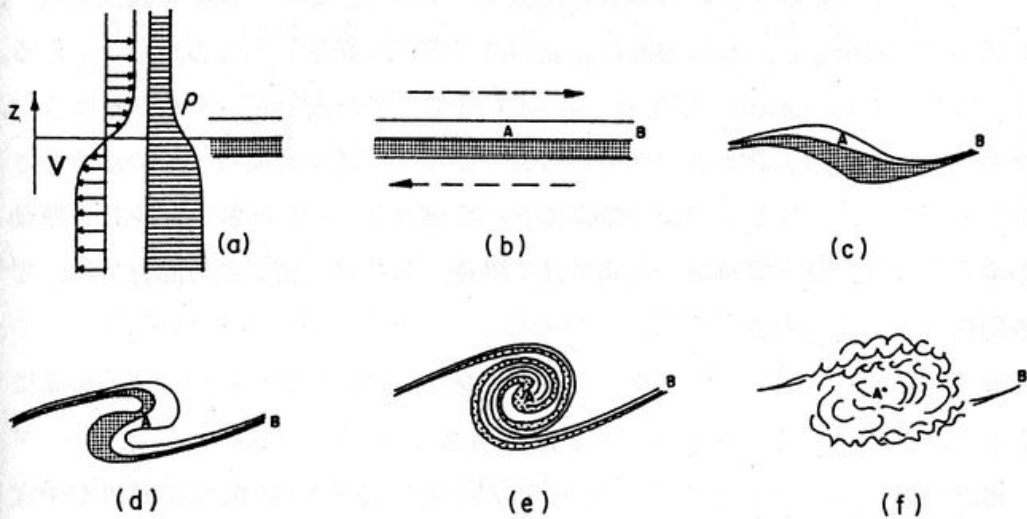
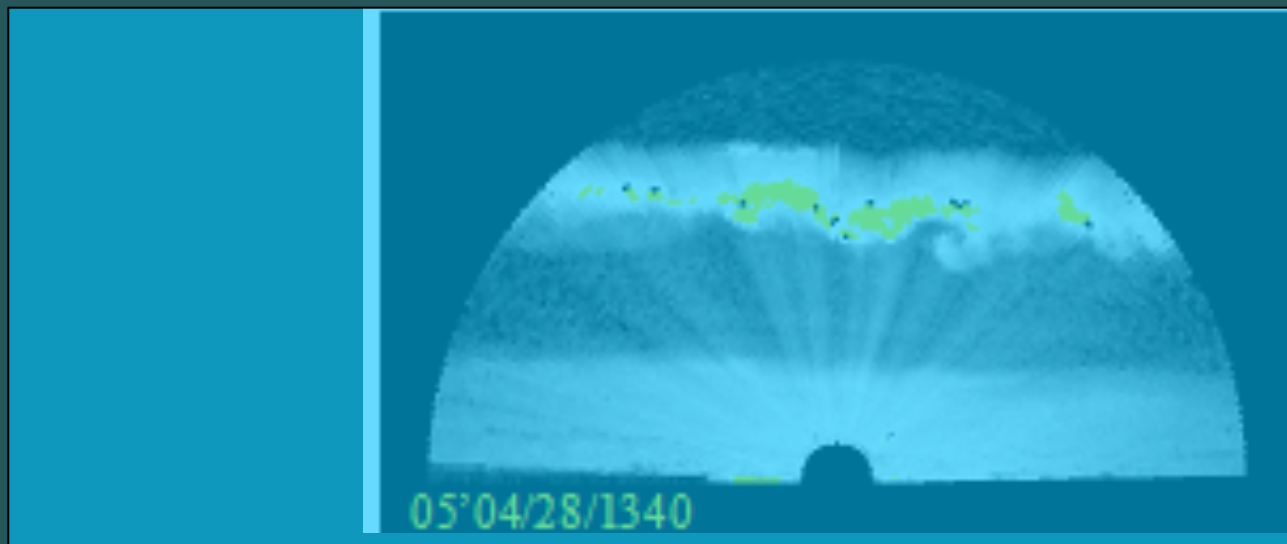


図 6.5 安定成層内のケルビン・ヘルムホルツ不安定による波動の発達と破碎の模図 (Thorpe) 文献(21)より引用
 図の a は波動が発達する前の流れの速度と密度の鉛直分布で b から f が波動の発達状況である。

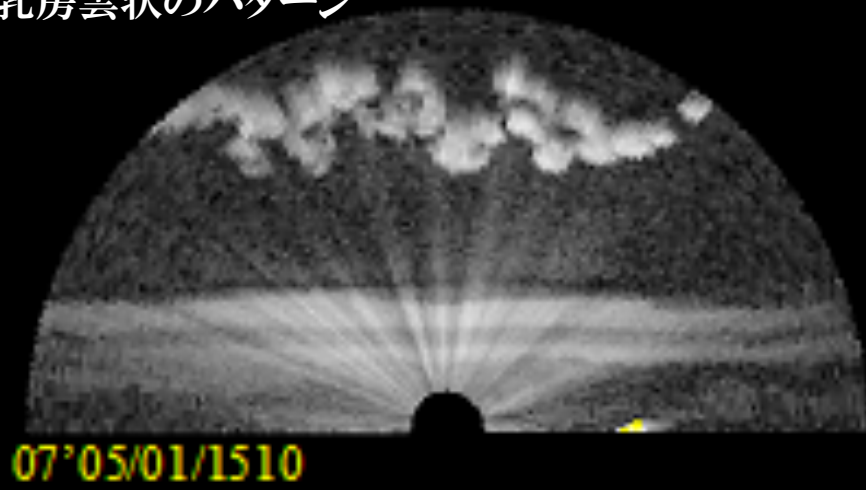
鉛直シアー不安定 (Kelvin-Helmholtz Instability)



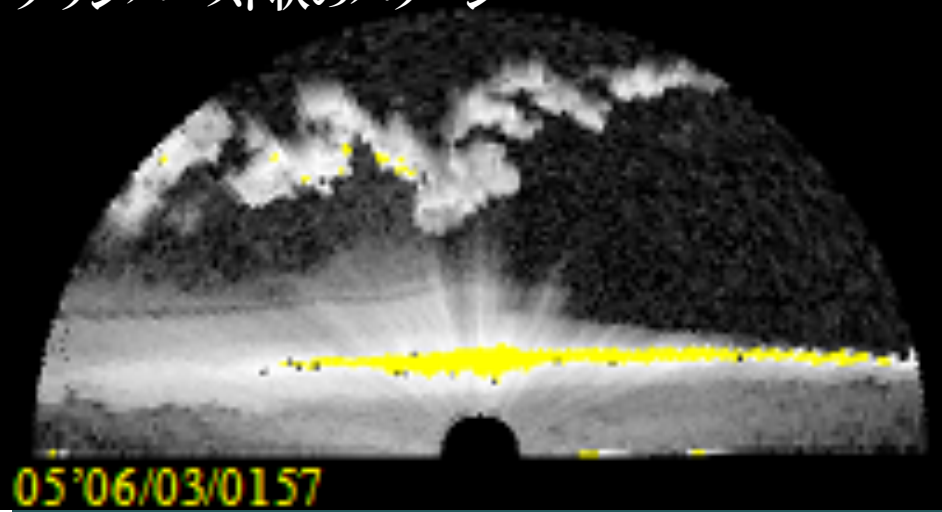
中層から上層の薄い層雲の雲底部に形成された様々な組織的な構造
薄い雲にもかかわらず予想以上に強い上昇・下降流を伴い、航空機の航行に注意
が必要



乳房雲状のパターン

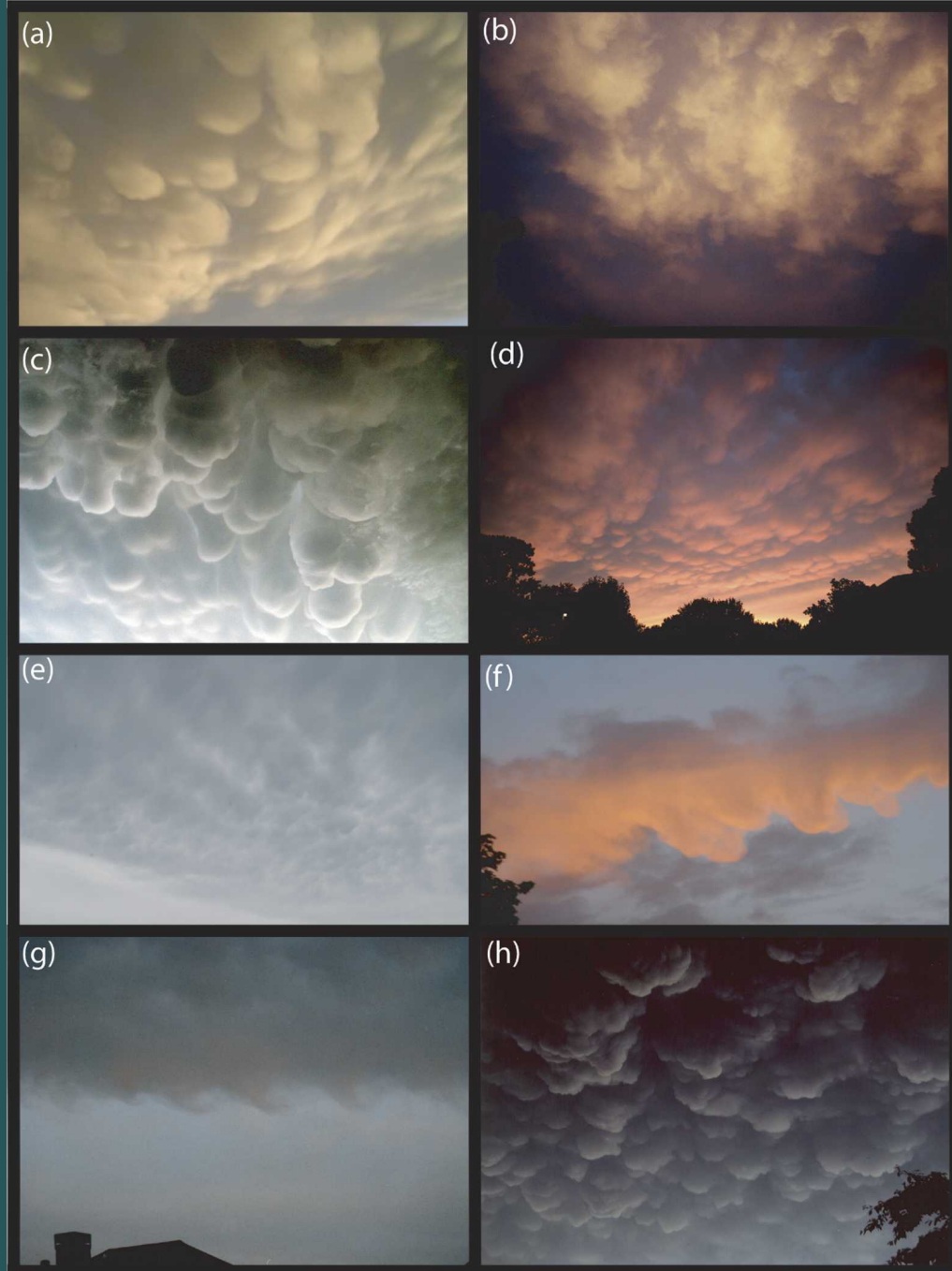


ダウンバースト状のパターン



層雲系の雲底は、気温・湿度・風・等の不連続面に位置しているため、力学的・熱力学的な不安定現象が起こりやすいはずである。最近、マンマタスなどの研究が進んできたが、雲底部の構造に関する研究は意外と少ない

Kikuchi et al., 1991;
Schultz et al., 2006;
Sassen et al., 2007;
Kanak et al., 2008



Schultz et al., 2006

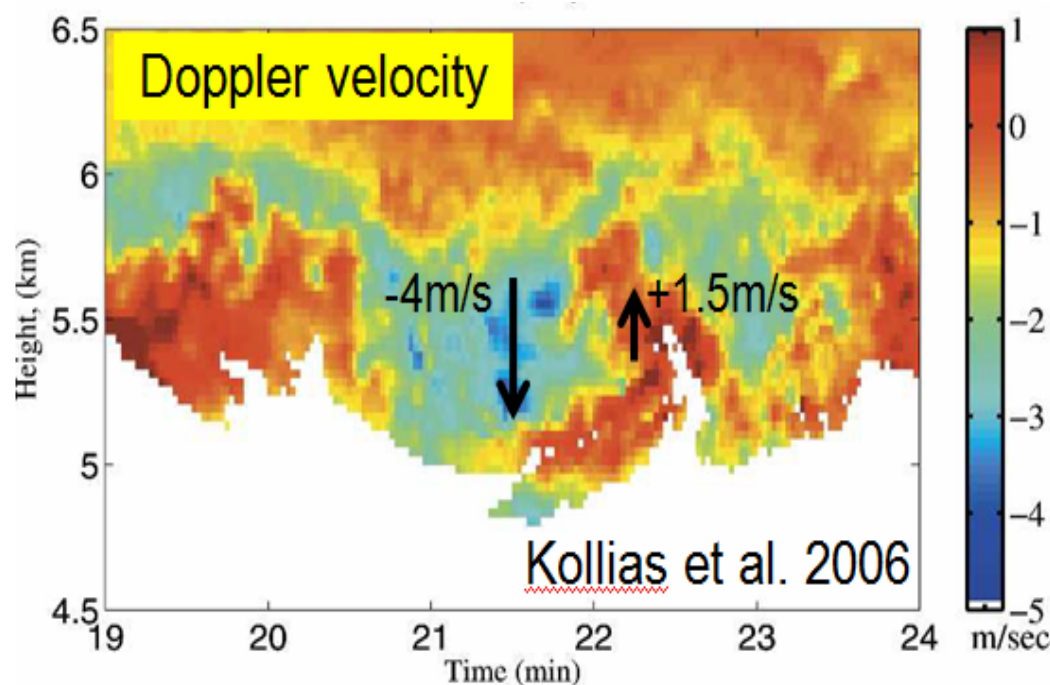
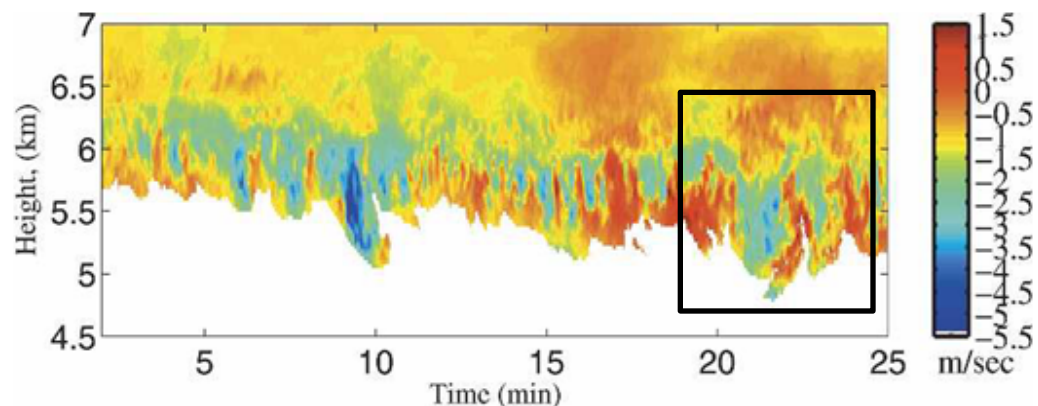
乳房雲の研究

一房の特性

- 鉛直流 : $-6.0 \sim +1.5$ (m/s)
- 水平幅 : $0.25 \sim 3$ (km)
- 鉛直幅 : $0.3 \sim 1.1$ (km)
- 寿命 : ~ 10 (min)

生成要因

「雲底直下の昇華/蒸発」
「降水粒子の融解」



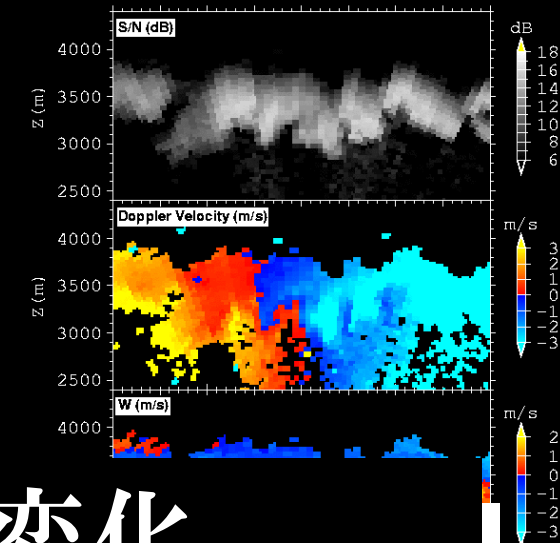
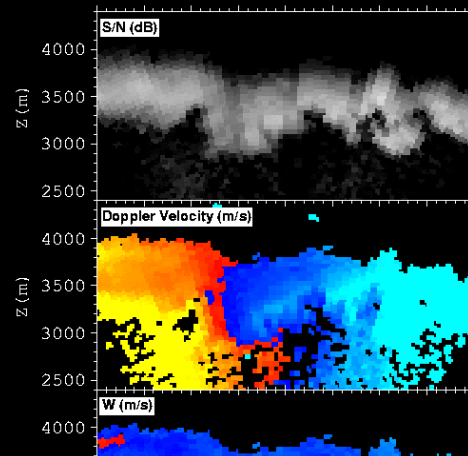
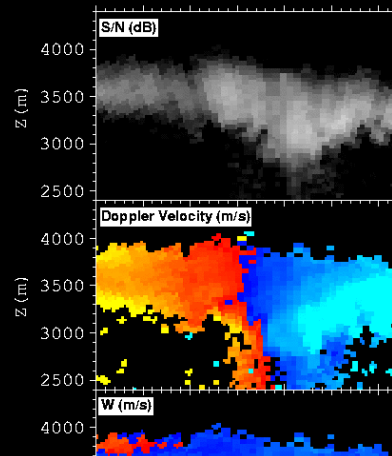
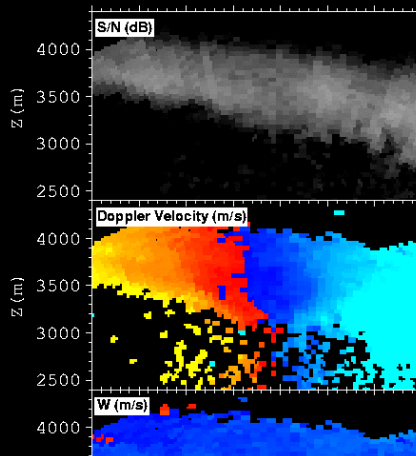
真上鉛直のデータのため、2次元的な時間発展が捉えられていない

0705011510-22

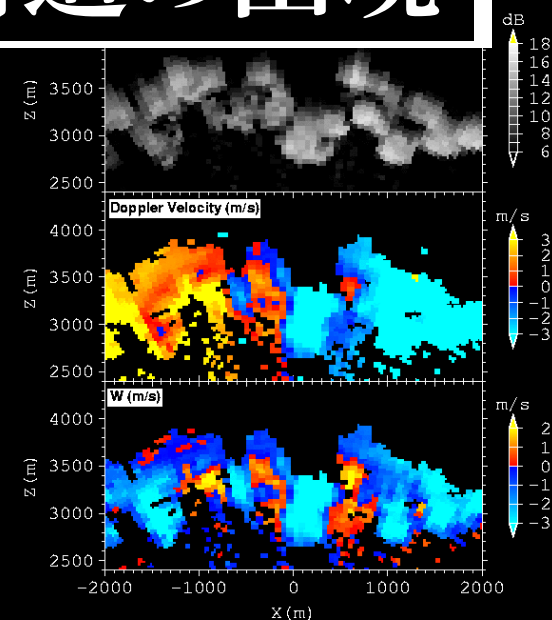
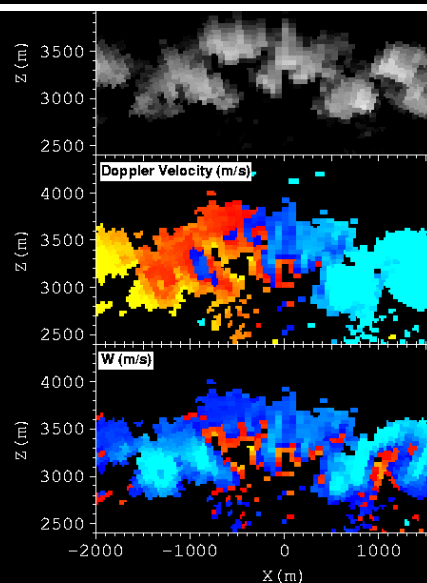
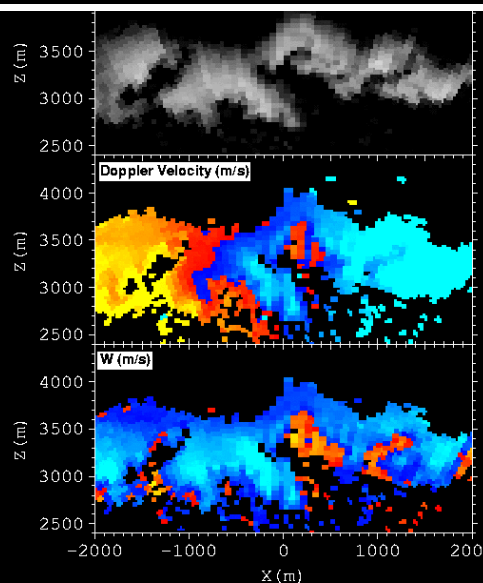
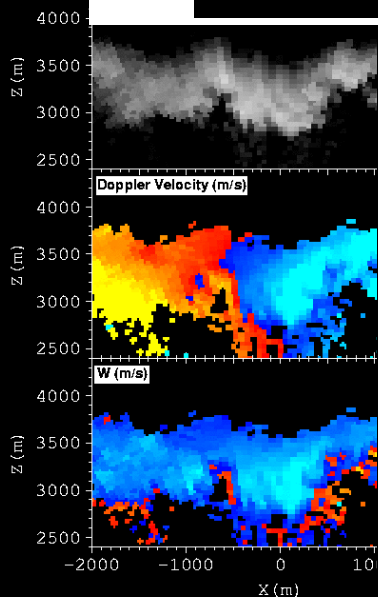
0705011510-26

0705011510-27

0705011510-28



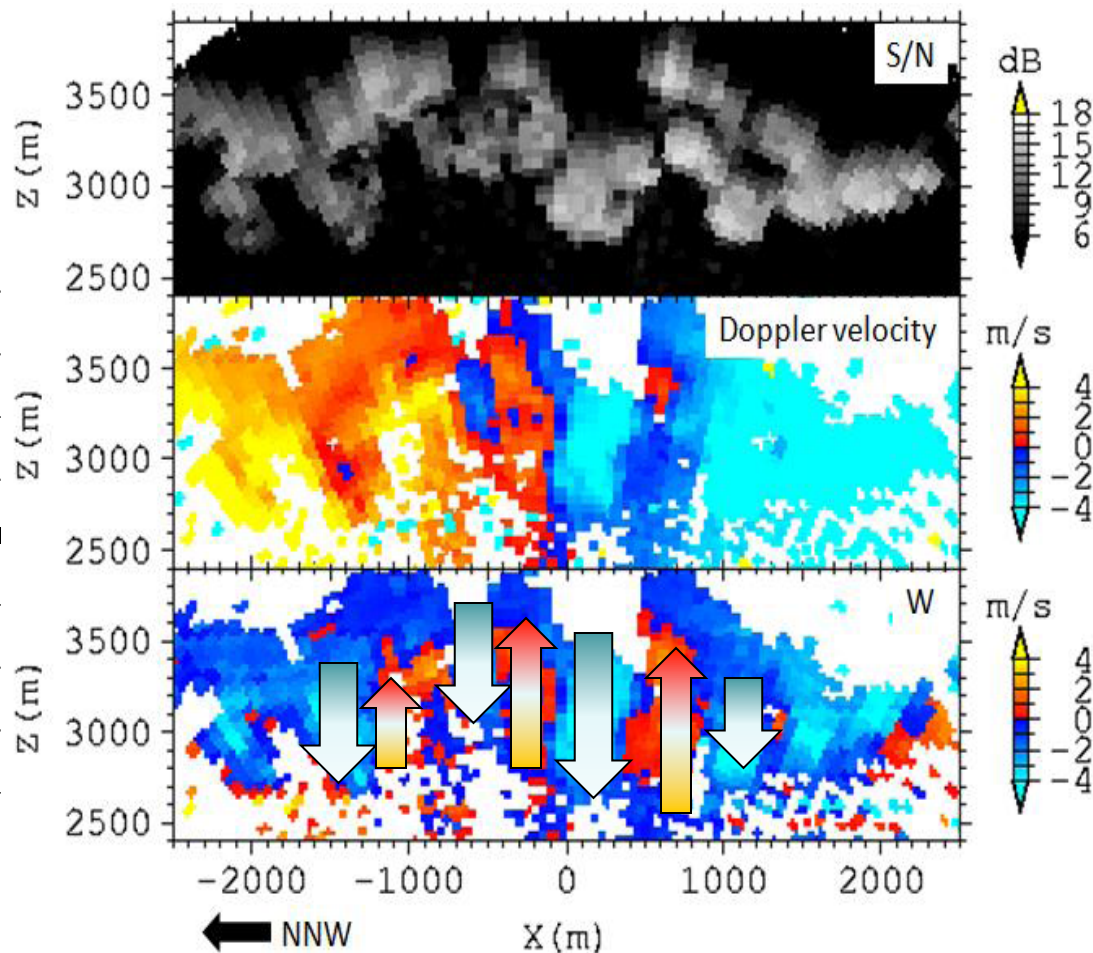
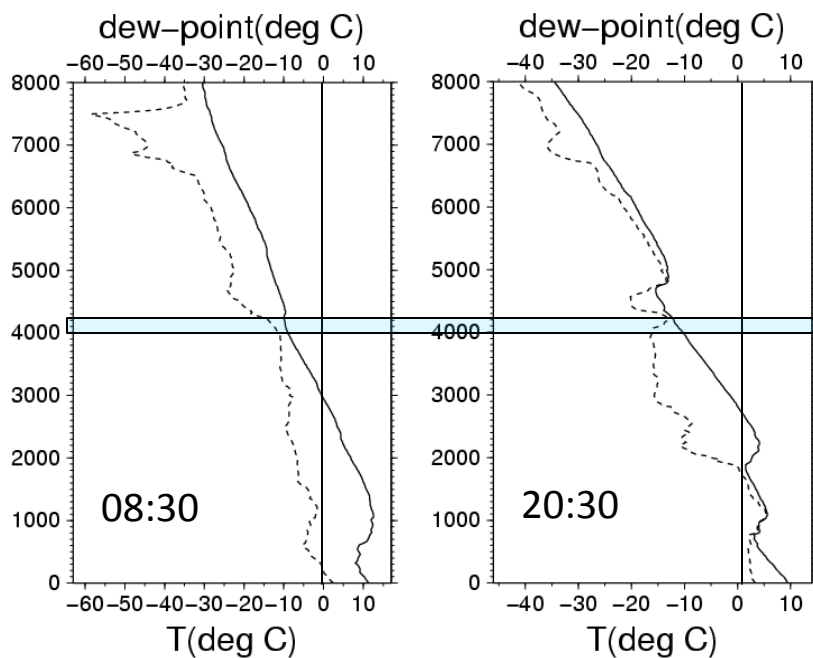
約10分弱に生じた変化
上下に並んだカール状構造の出現



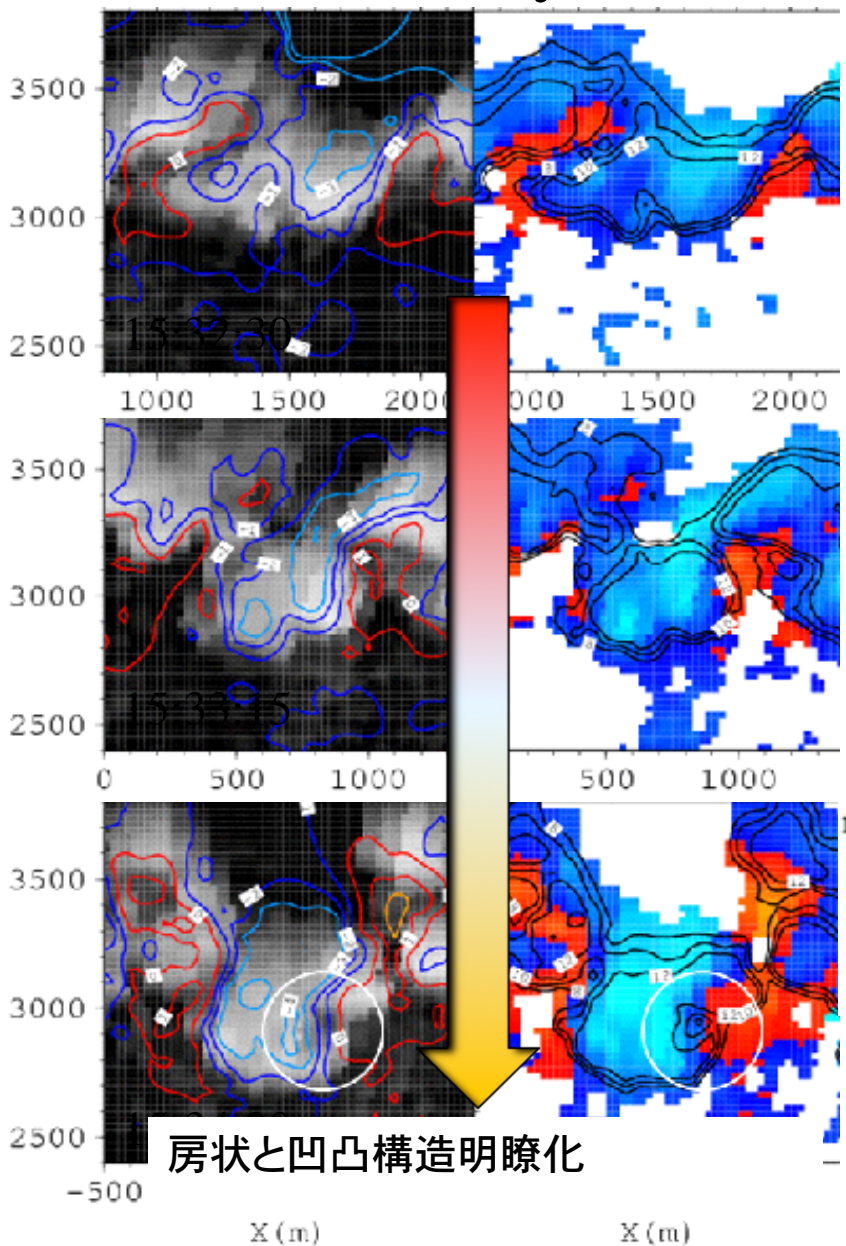
房の諸特性

- 鉛直流 : $-4.5 \sim 1.5$ (m/s)
 - 一房の水平幅: $0.35 \sim 1.4$ km (0.6 km)
 - 一房の鉛直幅: $0.15 \sim 0.6$ km (0.45 km)
 - アスペクト比* : $0.8 \sim 2.5$ (1.6)
- ()内は最頻値、*(水平スケール/鉛直スケール)

温度逆転層下の薄い氷雲
雲底下は乾燥



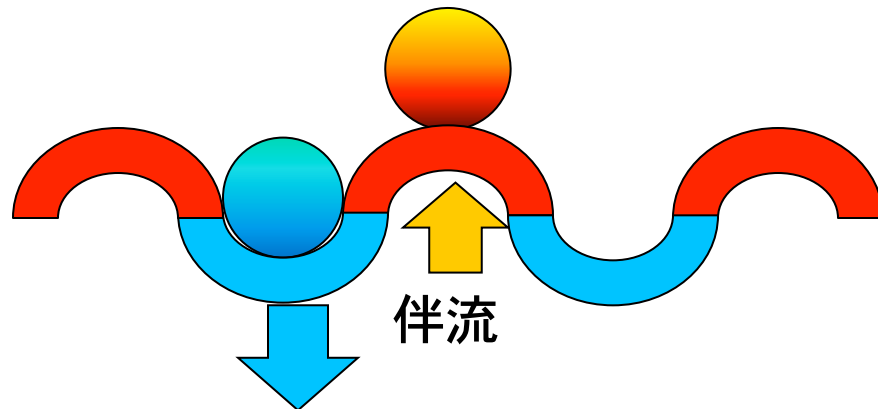
1 May 2007



凹凸構造

氷晶成長 ⇨ 落下

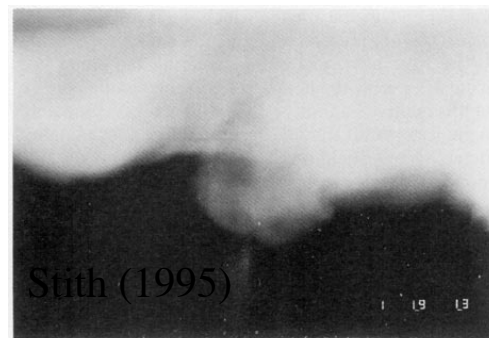
上昇域での昇華凝結+潜熱放出



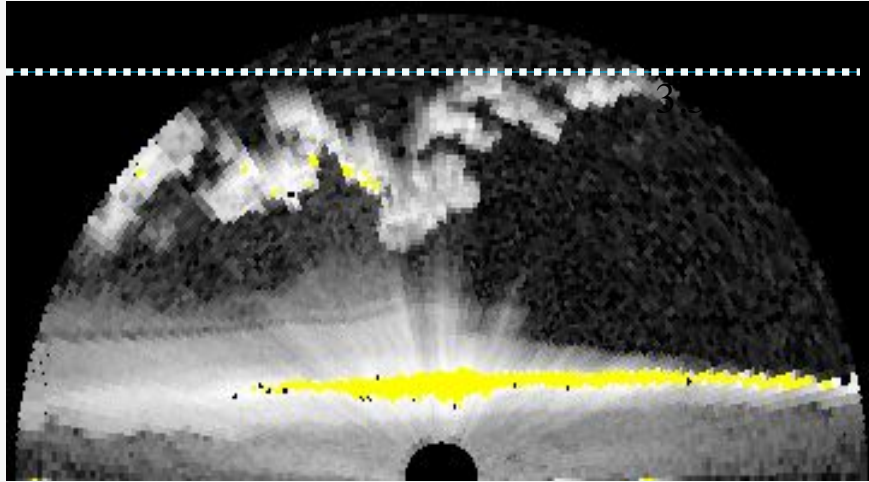
下降域での昇華蒸発

カール状構造

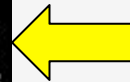
数100mスケールの混合



強い下降流(8 m/s)を伴う房状構造

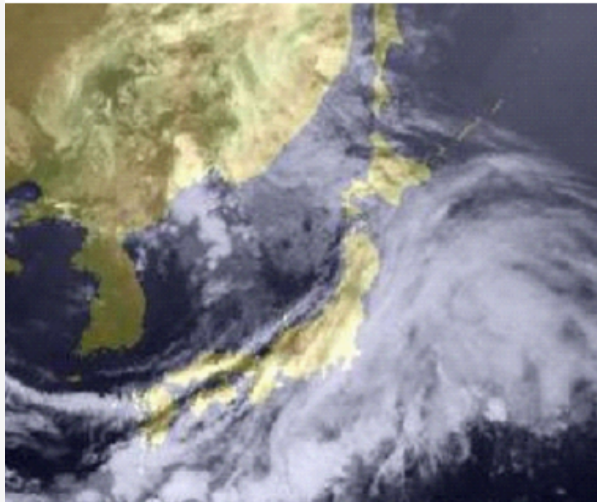


雲底直下は非常に乾燥
発生開始高度は0°C高度
(3.5km)

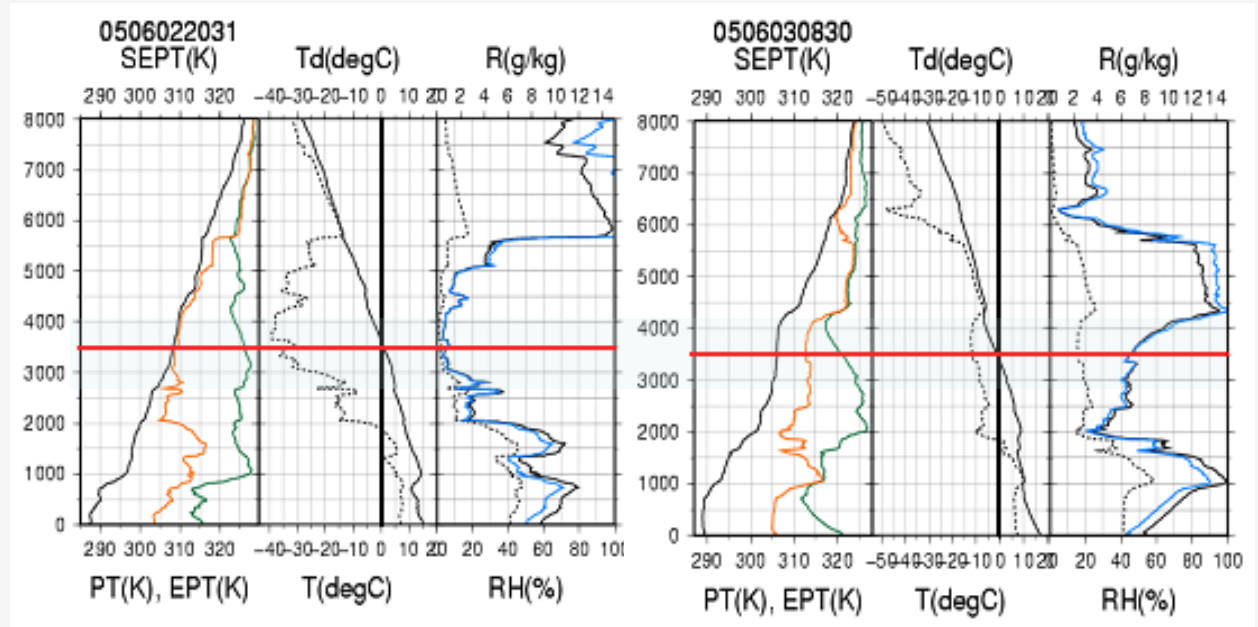


1km付近の安定層直下の薄い下層雲

3 June 2005 01:57



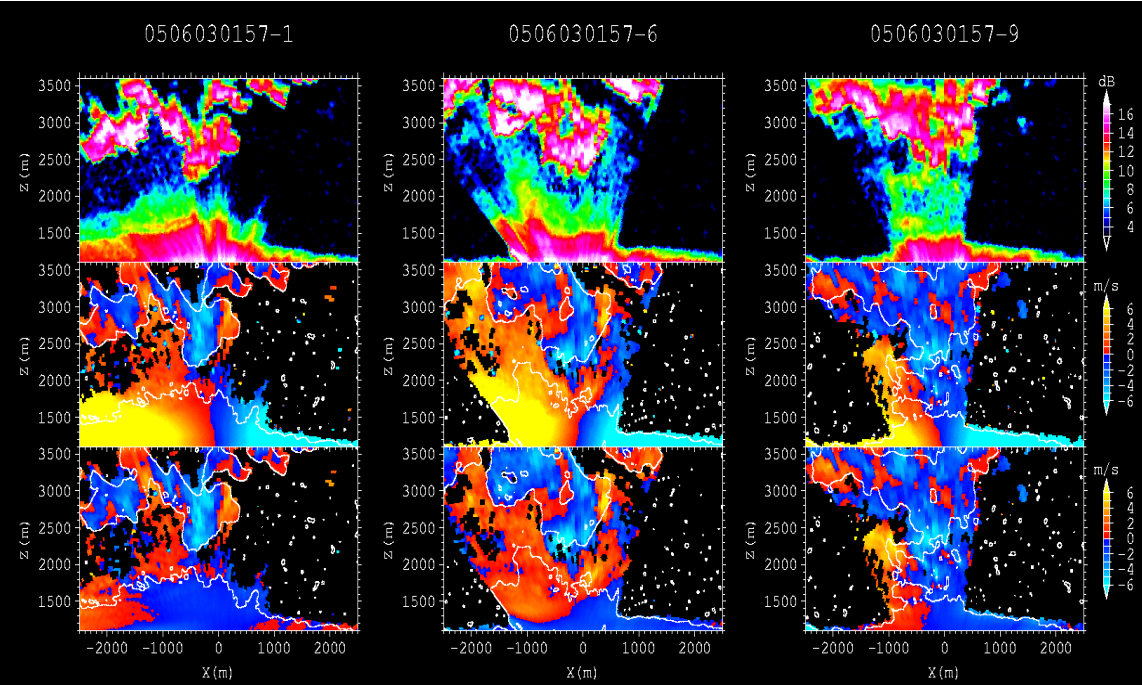
03日01:00(JST)



02日20:30(JST)

03日08:30(JST)

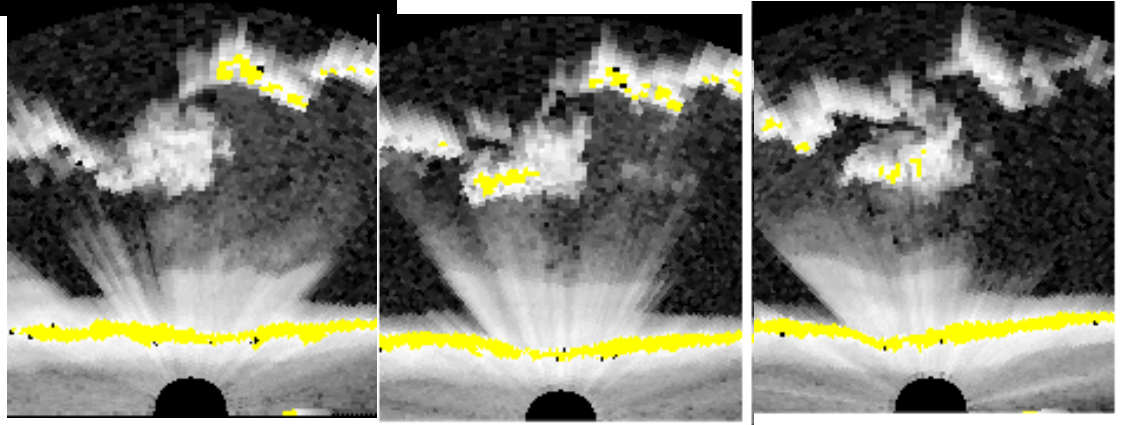
S/N比の強い領域よりも早く下降



下降流は地上に達してはいなかった（地上気象データより）

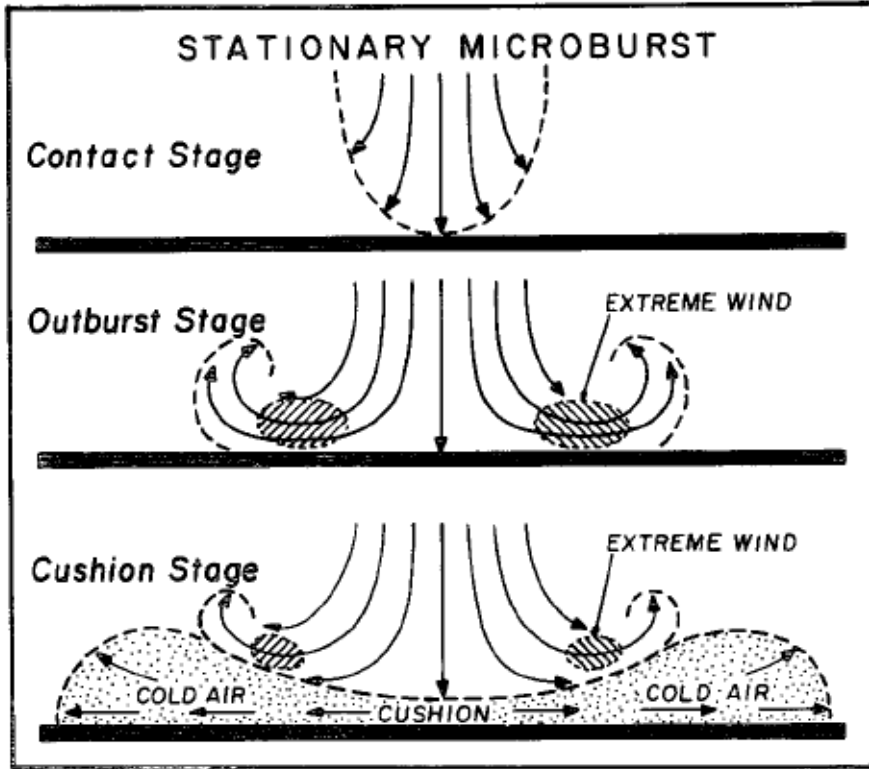
下層の安定層に衝突し、これを通り抜けられなかったためと推測できる

大気境界層のハンモック効果

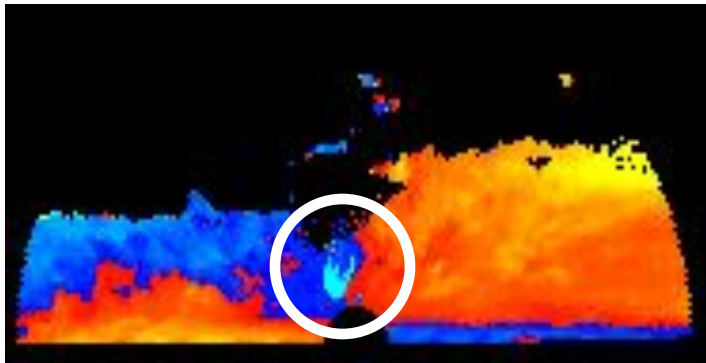
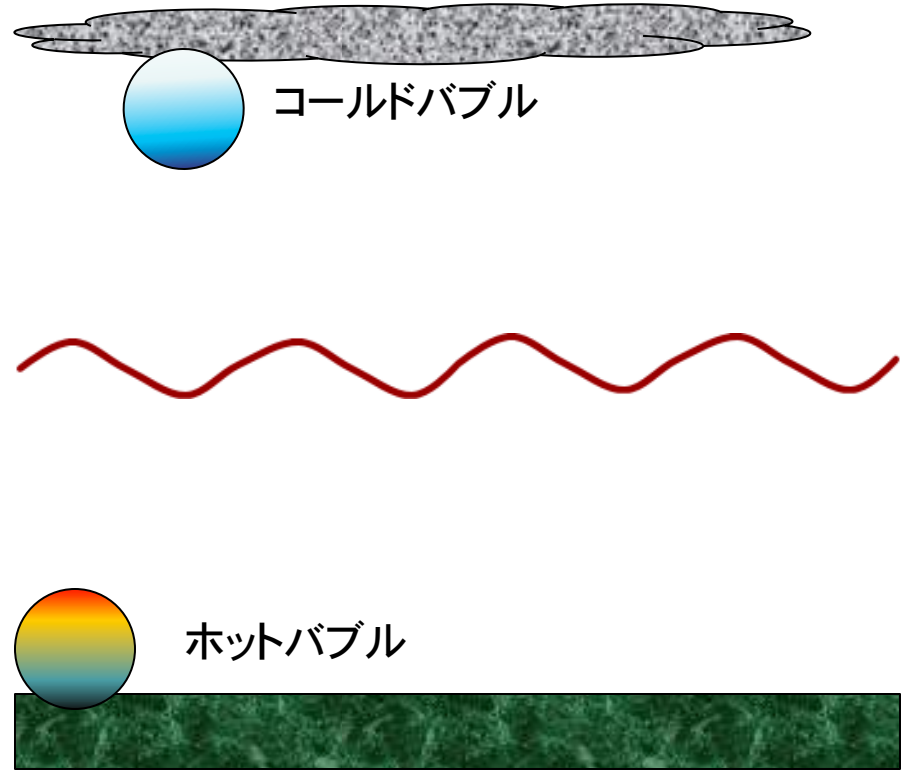


03日02:00(JST)

クッション効果 Fujita,1981



大気境界層のハンモック効果



積乱雲からのダウンバースト(10 m/s以上)の観測事例:地上にダメージ無し

23June, 2005 13:41

風の利用

3杯式風速計



翼車式風速計



回転エネルギー 風力発電

ここに陸終わり、海始まる
ヴァスコ・ダ・ガマ

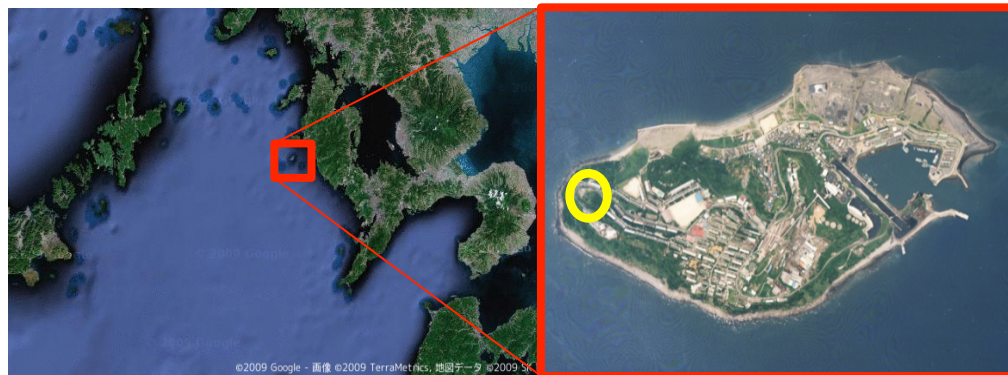


長崎市池島での海上風と鳥の観測

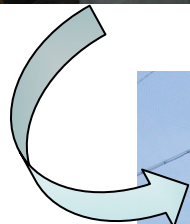
— 洋上浮体型風力発電 —

観測サイト(長崎県池島)

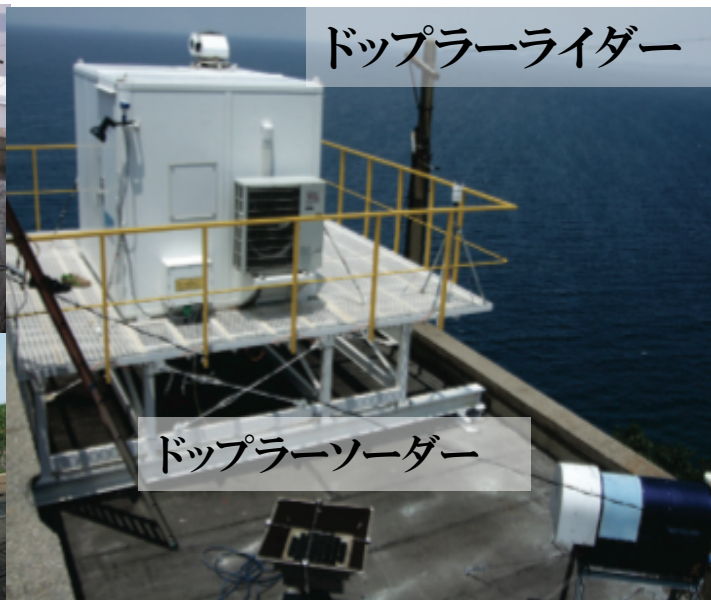
設置前の建物



観測機器設置状況



設置後の建物



ドップラーライダー

ドップラーソーダー

鳥監視用レーザー

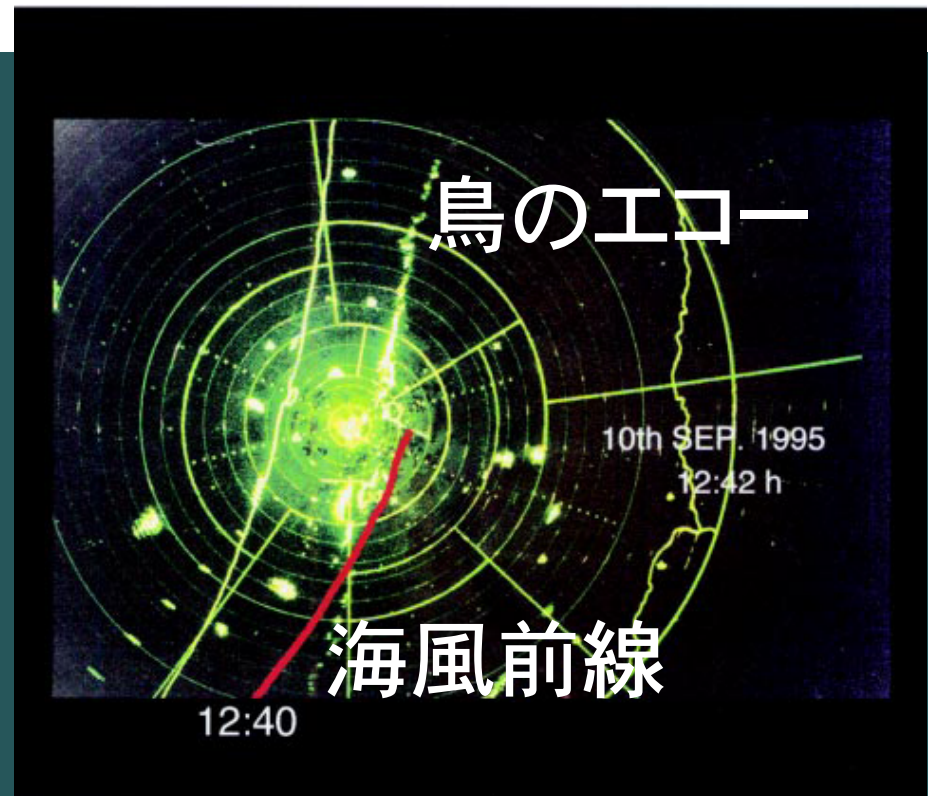
Migrating Soaring Birds Align along Sea-Breeze Fronts: First Evidence from Israel

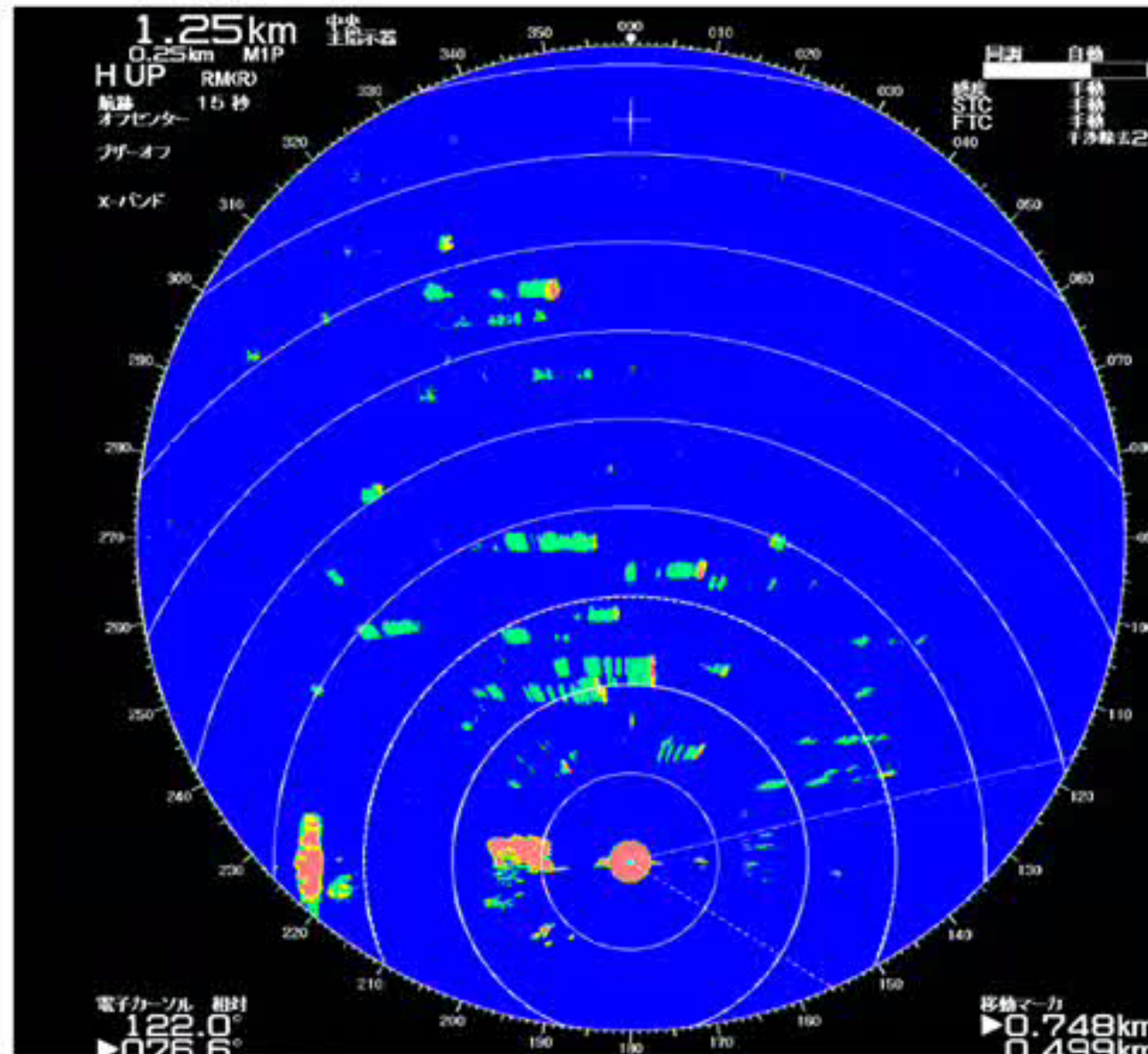
Bulletin of the American Meteorological Society (81),2000

Sea-breeze in Israel are quite vigorous but mostly appear without clouds because of the frequent dry subsidence above the sea breezes and are therefore difficult to directly detect by radar. It has been found, however, that not infrequently, the migrating birds soaring over Israel identify the SBFs and actively search the upward motion associated with the converging lines of the SBF in their migration through the country. Here, we present, for the first time, an example in which migrating birds of the species honey buzzard (*Pernis apivorus*) are seen by the radar as biological target lines that are very closely aligned with the SBF convergence lines



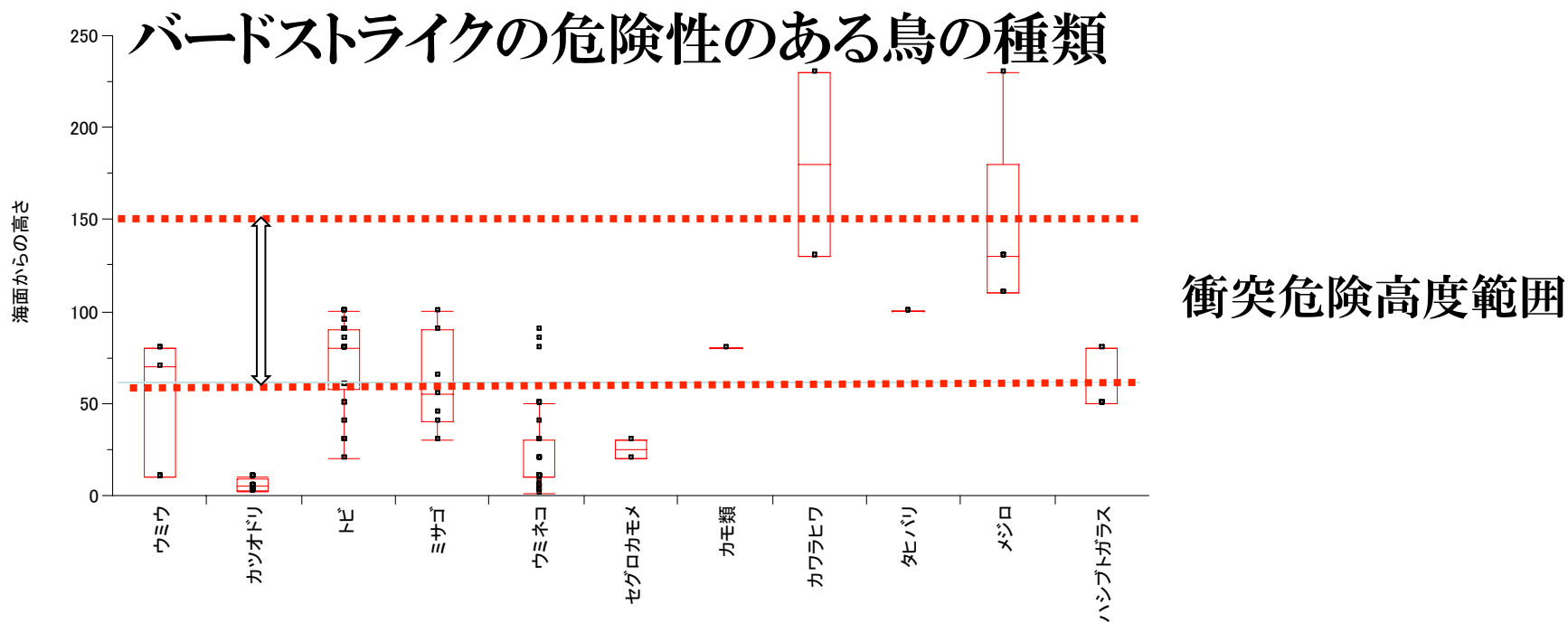
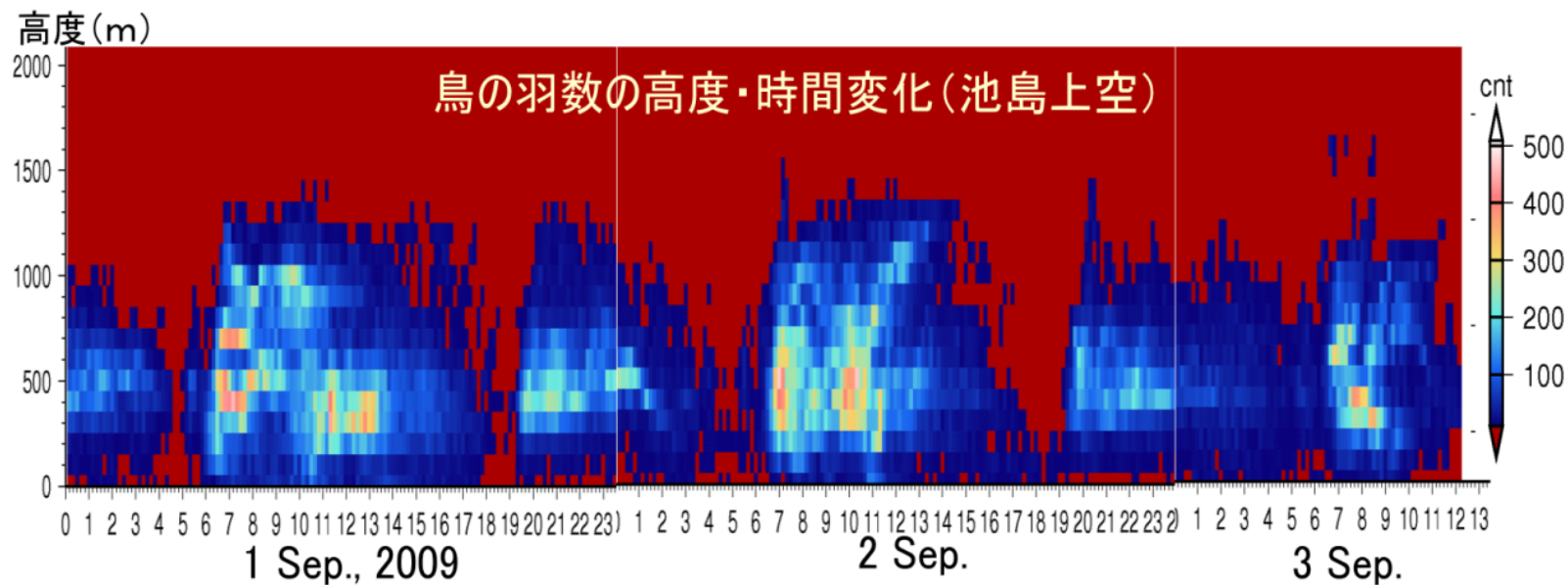
鳥のエコーと海風前線





レーダー表示	調整	システム
対水安定		
カーソル 相対方位 距離	000.1° 2.095km	
相対ベクトル CPA新到 TCPA新到	オフ 0.ONM 1分	
EPAデータ 目録番号 経過時間 CPA TCPA 対向 速度 距離 真方位	1	
メニューを閉じてください。		

野鳥の飛行数の高度別日周期活動



海風前線と蛾の数

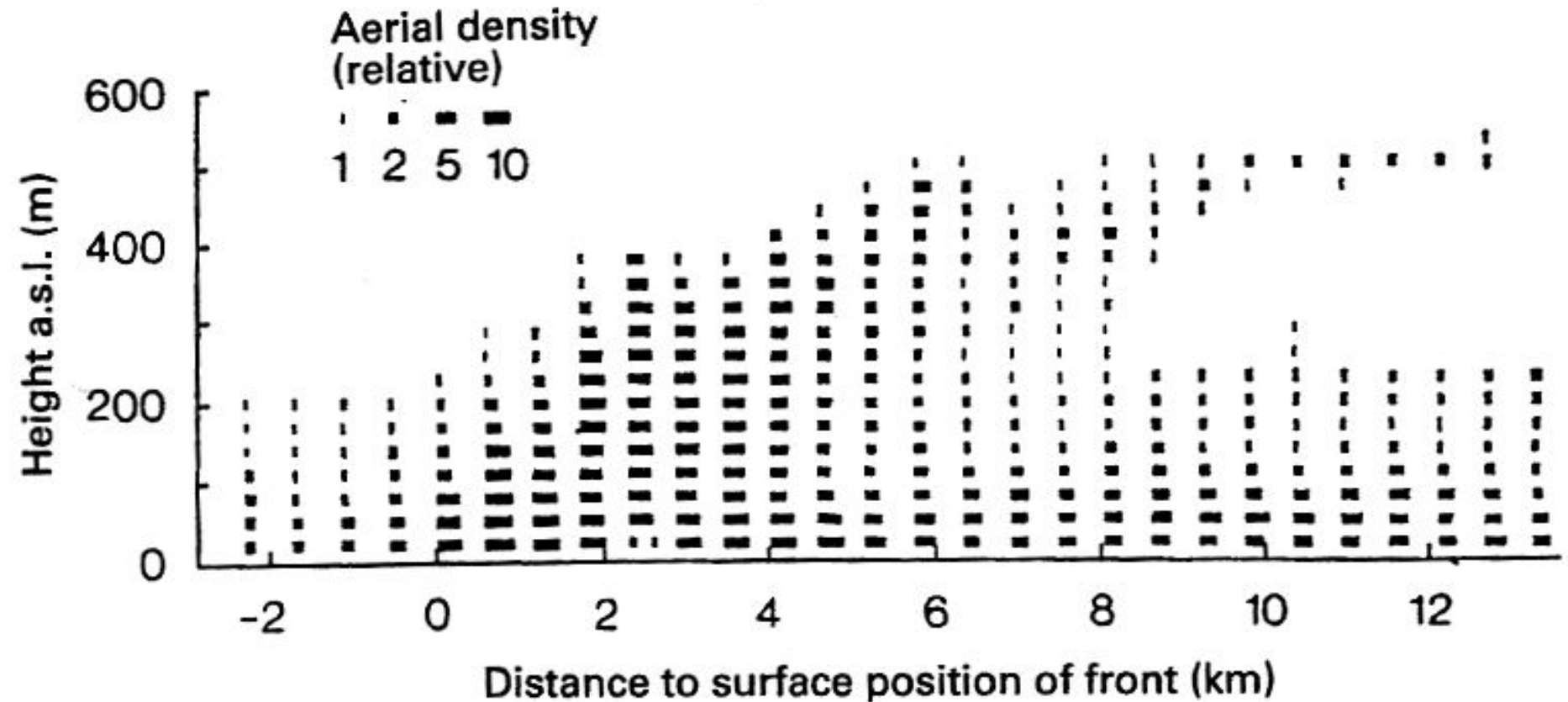


Figure 8.12. Density of flying moths at a sea-breeze front, seen from airborne radar traverse. A high concentration can be seen, sweeping up along the leading edge of the front. New Brunswick, Canada, 10 July 1976. (Courtesy of K. Allsop.)

新たな挑戦

大気プランクトンを気象レーダーでとらえる

楠 研一・松村 雄

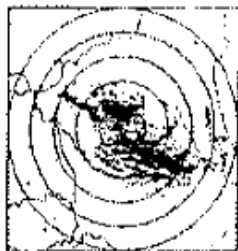


写真1—茨城県つくば市にある気象研究所のドップラー気象レーダー

うか。非降水エコーは上空約1,000 mまでの間に現れるので、1,500 mまで揚げられる係留気球（長さ9 m、横幅4 m）を、その時エコーの現れている高度帯まで揚げて、浮遊物を採集しました（松村ら 1996）。

採集場所は茨城県つくば市です。

同市の気象研究所にあるドップラー

気象レーダーに非降水エコーが現れ

た時、その構内で係留気球を揚げま

した。気球の係留ロープに大型の捕虫ネ

ットを取りつけ、レーダーで見てエコーの最も濃

い高さ（約300～500 m）まで捕虫ネットを揚

げます（写真2）。そこにネットを一定時間

とどめて空中浮遊物を採集しました。

捕虫ネット（写真3）のサイズは直径90 cm、

長さ180 cmで、口には新体操用のリングを用

いました。網にはゴース布地（0.3 mmメッシ

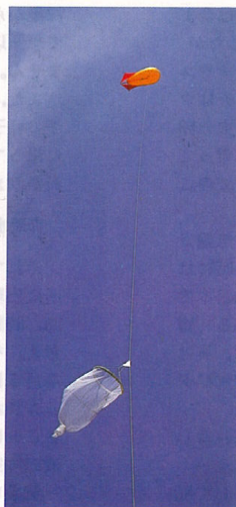


写真2—上昇中の観測気球と捕虫ネット



写真3—係留ロープに固定して揚げられる捕虫ネット

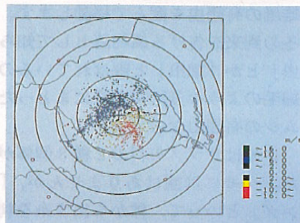


写真4—採集時の非降水エコーの一例
1995年7月27日、15時25分（楠ら 1997a）

ユ）を使い、弱風のときに垂れ下がって捕虫不能とならないように、できるだけ軽量にする工夫をしました。末端の捕虫器は直径15 cm 長さ30 cmで、中に入った虫が逃げられないように返しをつけ、チャックで本体から離せるようになっています。これを用いて1994年から現在までに4回大気プランクトンの採集を試みました。採集時点にドップラー気象レー

ダーに現れた非降水エコーの1例が写真4です。

こうして採集された浮遊物は表1のとおりです。昆虫、クモ、植物種子、大気チリといった多様なものでした。最も多いのは昆虫で、4目15科24種51個体でした。主なものはハチ目（寄生バチ類）、カメムシ目（アブラムシ類、キジラミ類）、ハエ目（ヌカカ類、クロバネキノコバエ類）でしたが、ハチ目のホソハネコバチ科を除いては、とくにまとまって採れたものはありませんでした（写真5）。当初は、季節的に特定な種がかたよって採れるだろうと推測していたのですが、予想に反して実に多種多様な昆虫が空中を浮遊して

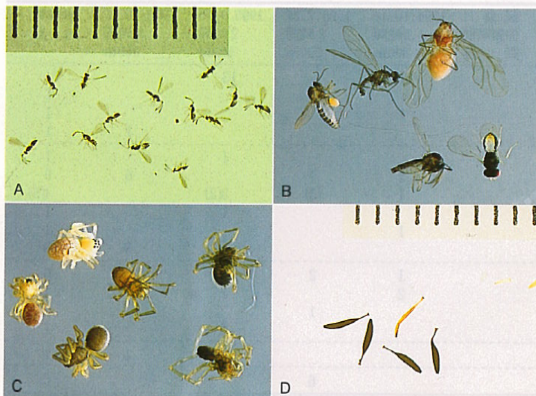
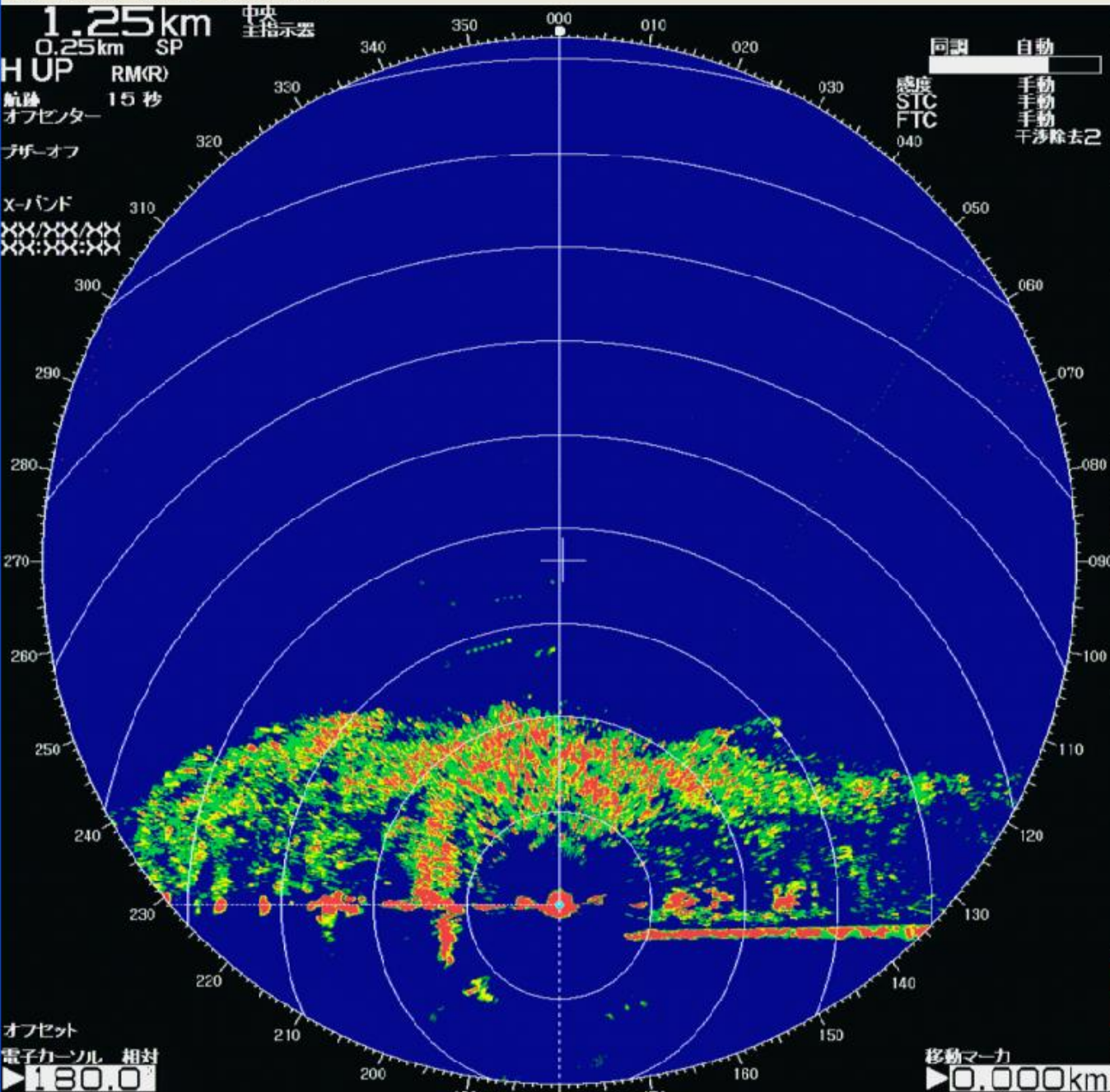


写真5—採集された大気プランクトン A：ホソハネコバチ類（1995年9月28日） B：上左から、ヌカカ科の1種、タマバエ科の1種、タマワタムシ科の1種、下左から、ヌカカ科の1種、ヒメコバチ科の1種（1995年7月27日） C：サラゴモ科の幼体（1995年7月27日） D：キタ科の種子（1994年10月14日）



レーダ 表示 調整 システム	
対水安定	
カーソル 相対方位 距離	000.6° 0.917km
相対ベクトル CPA 範囲 TCPA 範囲	オフ 0.0NM 1分
EPAデータ 目標番号 経過時間 CPA TCPA 針路 速度 距離 真方位	1

ikejima
Friday, August 27
10:57:01
No Alarm

ウンカの飛来予測

<http://agri.narc.affrc.go.jp/indexj.html>

独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構の中央農業総合研究センター（と九州沖縄農業研究センター、および日本原子力研究開発機構は、高精度な気象シミュレーションを用いて、イネの重要害虫であるウンカの海外から日本への飛来をリアルタイムに予測するシステムを開発しました。

ウンカは風によって運ばれると考えられますから、風を予報することが必要です。まず気象庁が毎日午前9時現在の大気の状態を解析します。その気象データが農林水産研究計算センターのデータベースにオンラインで到着します。それから数値予報モデルMM5（天気予報をコンピュータで行う数値モデル）を用いて当日の午前9時の大気を初期値として3日間の予報を行い、風の状態を計算します。さらにその風を長距離移動シミュレーションモデルGEARNに入力して、ウンカの位置を計算します。

モデルでは、ウンカは中国や台湾の水田地帯に設定された複数の飛び立ち域から、朝方と夕方に飛び立ちます。飛び立つウンカの数はその飛び立ち域ごとに約2000匹です。その後風とおなじ速度で移動します。移動中は16℃より高い温度領域中を移動します。ウンカの位置から地上100mまでの大気中の相対的な密度を計算して、分布図にします。

予測の精度

2004年の評価結果は[こちら](#)、的中率は84から96%でした。

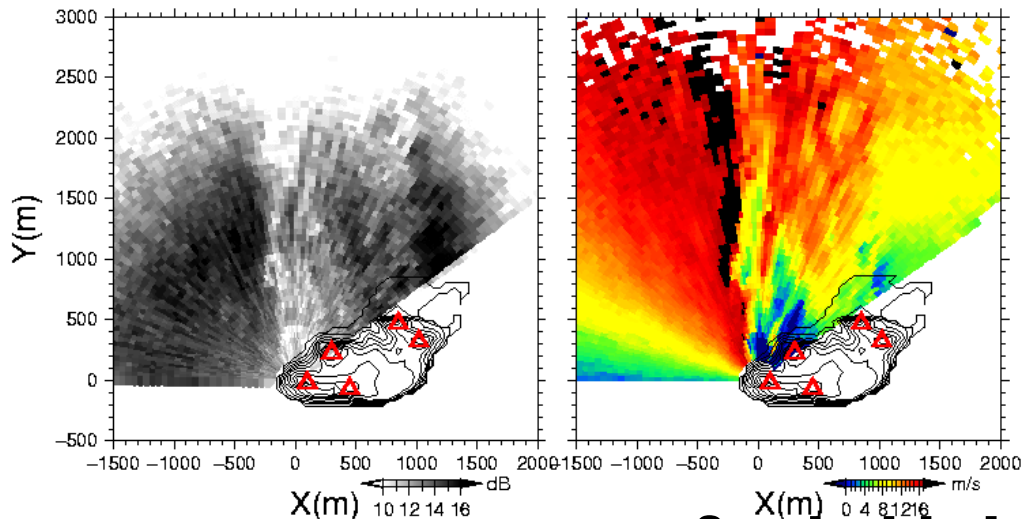
2003年シーズンの初飛来（6月12日）を予測できました。

また2003年6、7月の40日間の日別捕獲データを用いて評価したところ、的中率は74%でした。これは気象庁が発表した翌々日に九州地区に1mm以上の雨の降る予報の的中率75%（2003年6月）と同程度でした。的中率は、ウンカの飛来を正しく予測できた日数／合計予測日数×100で計算しました。

Wake flow of the small island

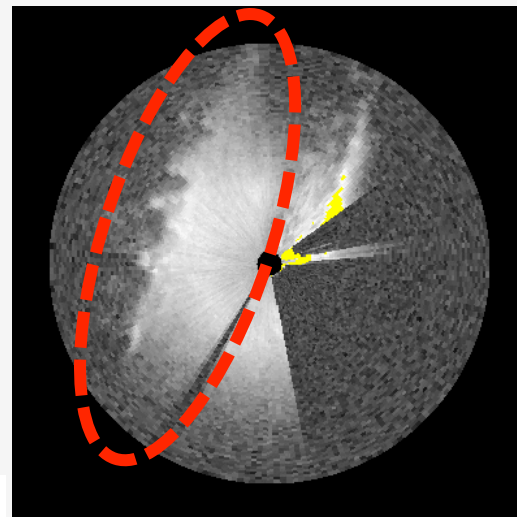
1006261450 1

1006261450 1

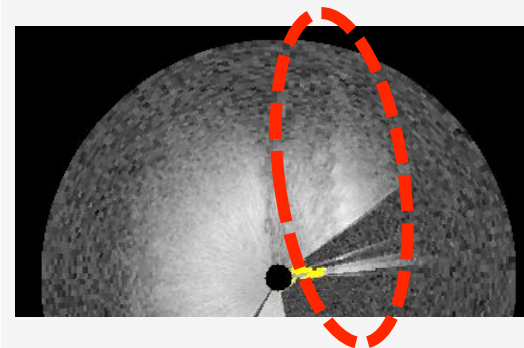
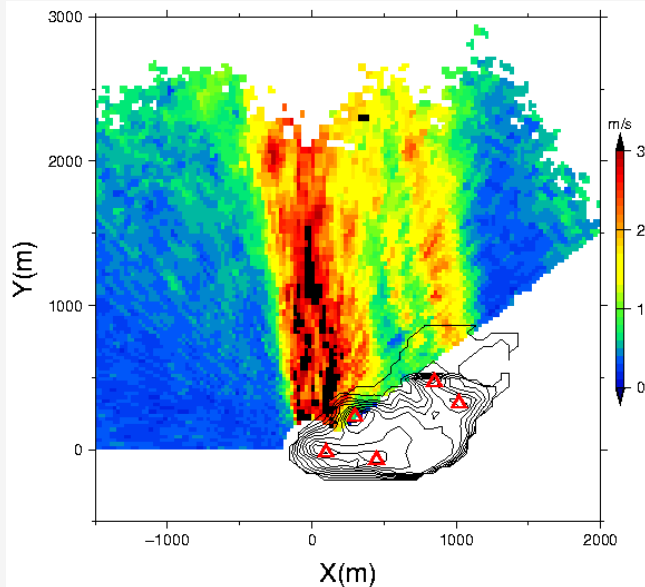
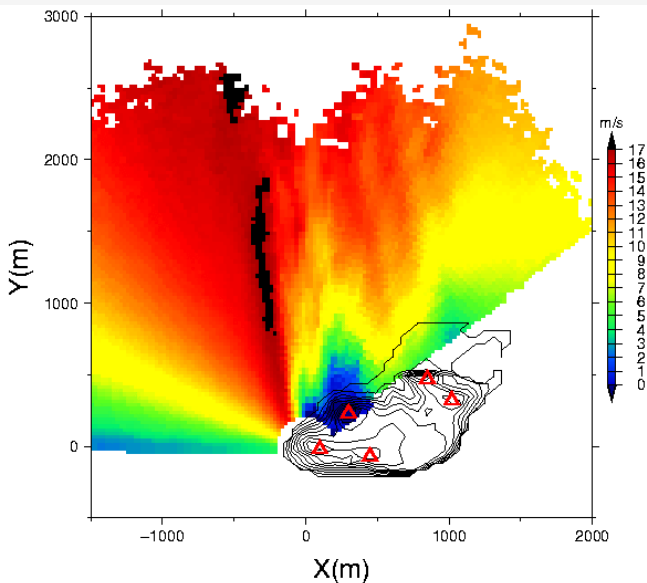


Time average of Doppler velocity

Standard deviation of Doppler velocity



K-H instability Wave Or Karman Vortex

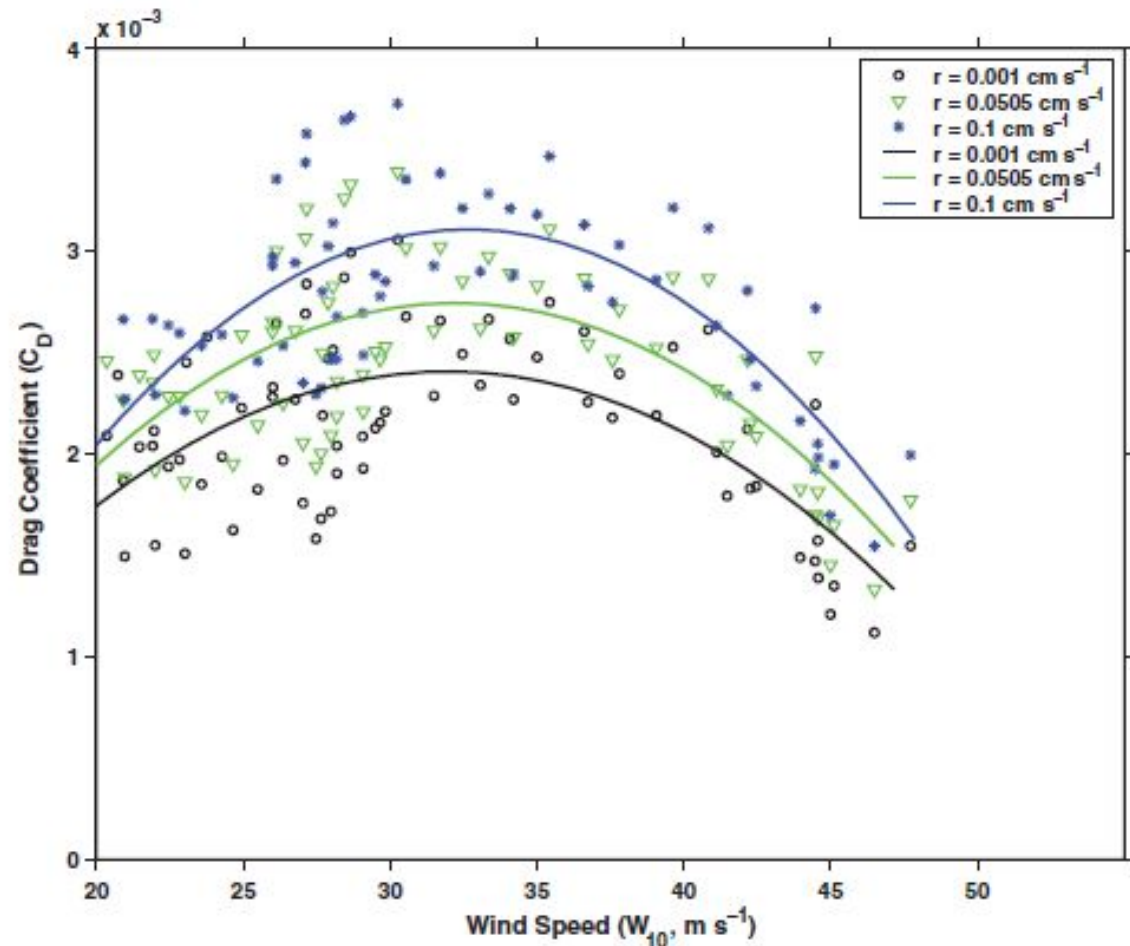


Bottom-Up Determination of Air-Sea Momentum Exchange Under a Major Tropical Cyclone

Ewa Jarosz, Douglas A. Mitchell, David W. Wang, William J. Teague

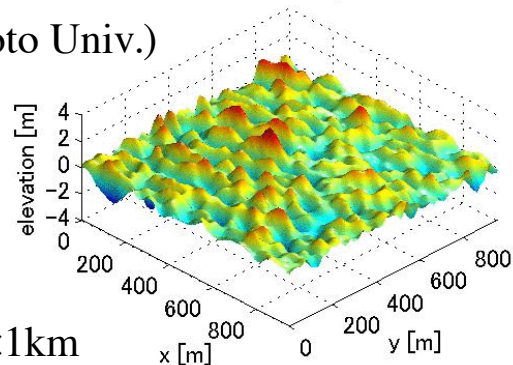
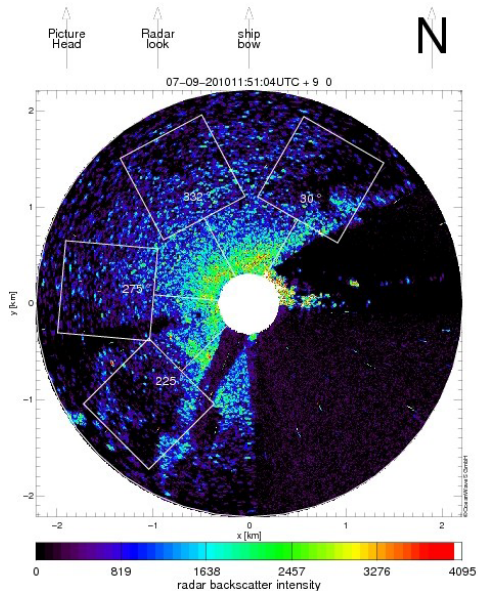
SCIENCE VOL 315 23 MARCH 2007

Fig. 2. Drag coefficient for several resistant coefficients. C_D is shown as a function of the wind speed at 10 m (W_{10}) for several different resistance coefficients r (open black circles – $r = 0.001 \text{ cm s}^{-1}$; green triangles – $r = 0.0505 \text{ cm s}^{-1}$; blue asterisks – $r = 0.1 \text{ cm s}^{-1}$). The solid lines represent quadratic curves fitted to the evaluated C_D separately for each r .



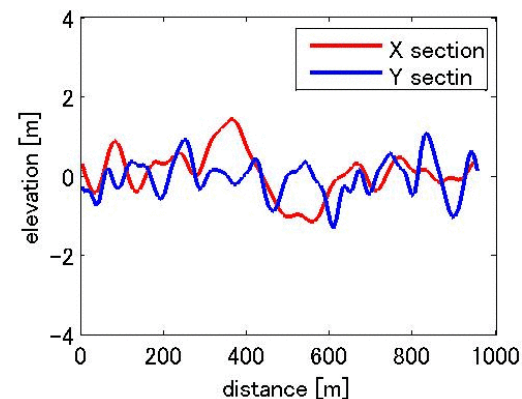
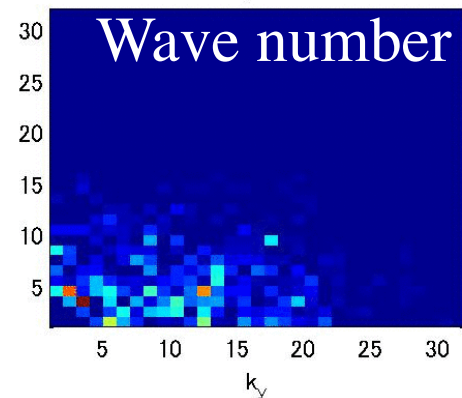
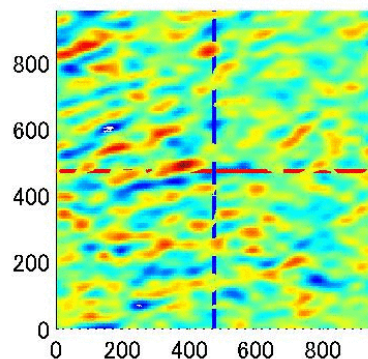
Courtesy of Profs. Mase and Mori (Kyoto Univ.)

WaMoS II radar image with measurement boxes

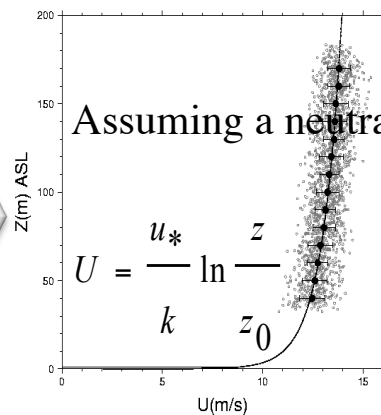


1km×1km

水面変位

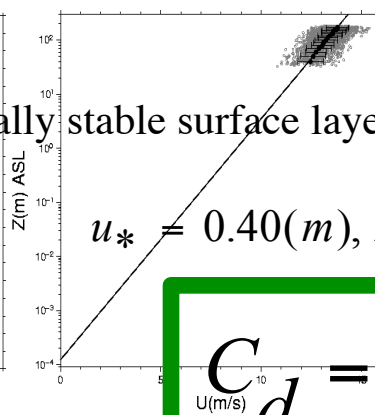


Vertical profile of wind velocity



Assuming a neutrally stable surface layer

$$U = \frac{u_*}{k} \ln \frac{z}{z_0}$$



$$u_* = 0.40(m), z_0 = 1.2 \times 10^{-4} (m)$$

$$C_d = 1.3 \times 10^{-3}$$

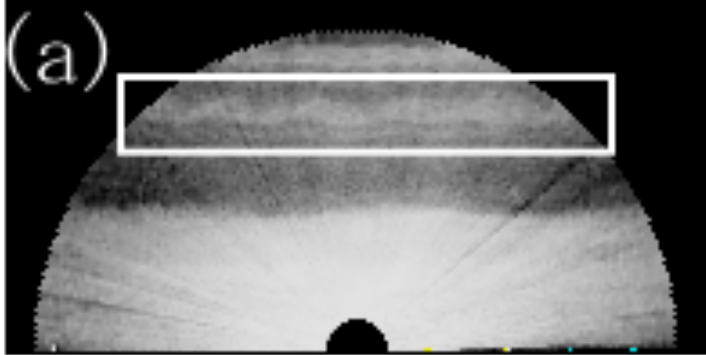
風を観ること

- 観天望気だけではなく
- 風によって輸送される物質（水蒸気・各種気体成分、鳥・昆虫・バクテリア）の挙動を調べることで、防災、海洋学、生態学、都市工学、エネルギー工学などの発展にも貢献

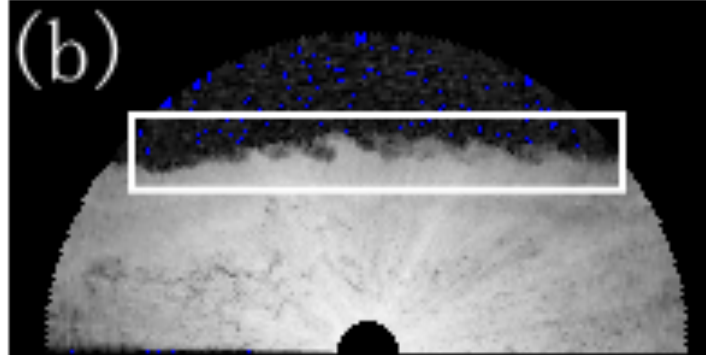
**Thank you for your
attention**



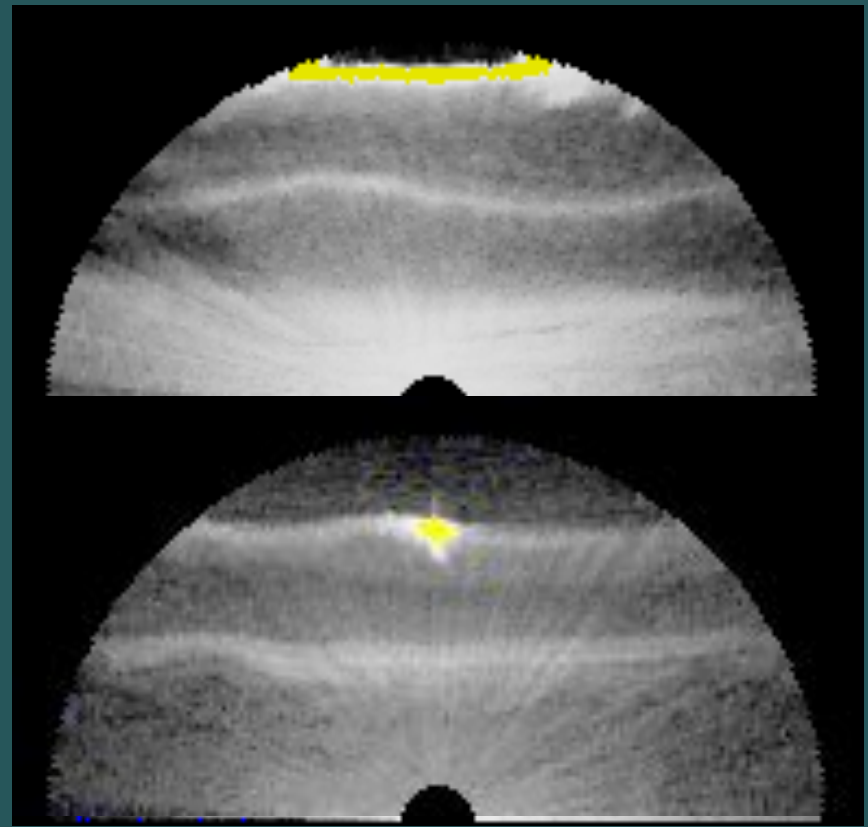
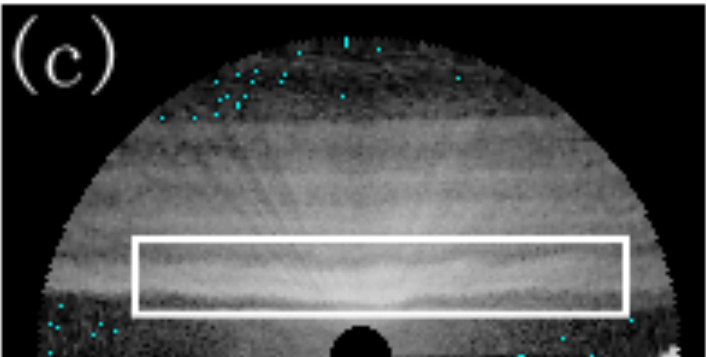
22 June, 2005



2 May, 2005

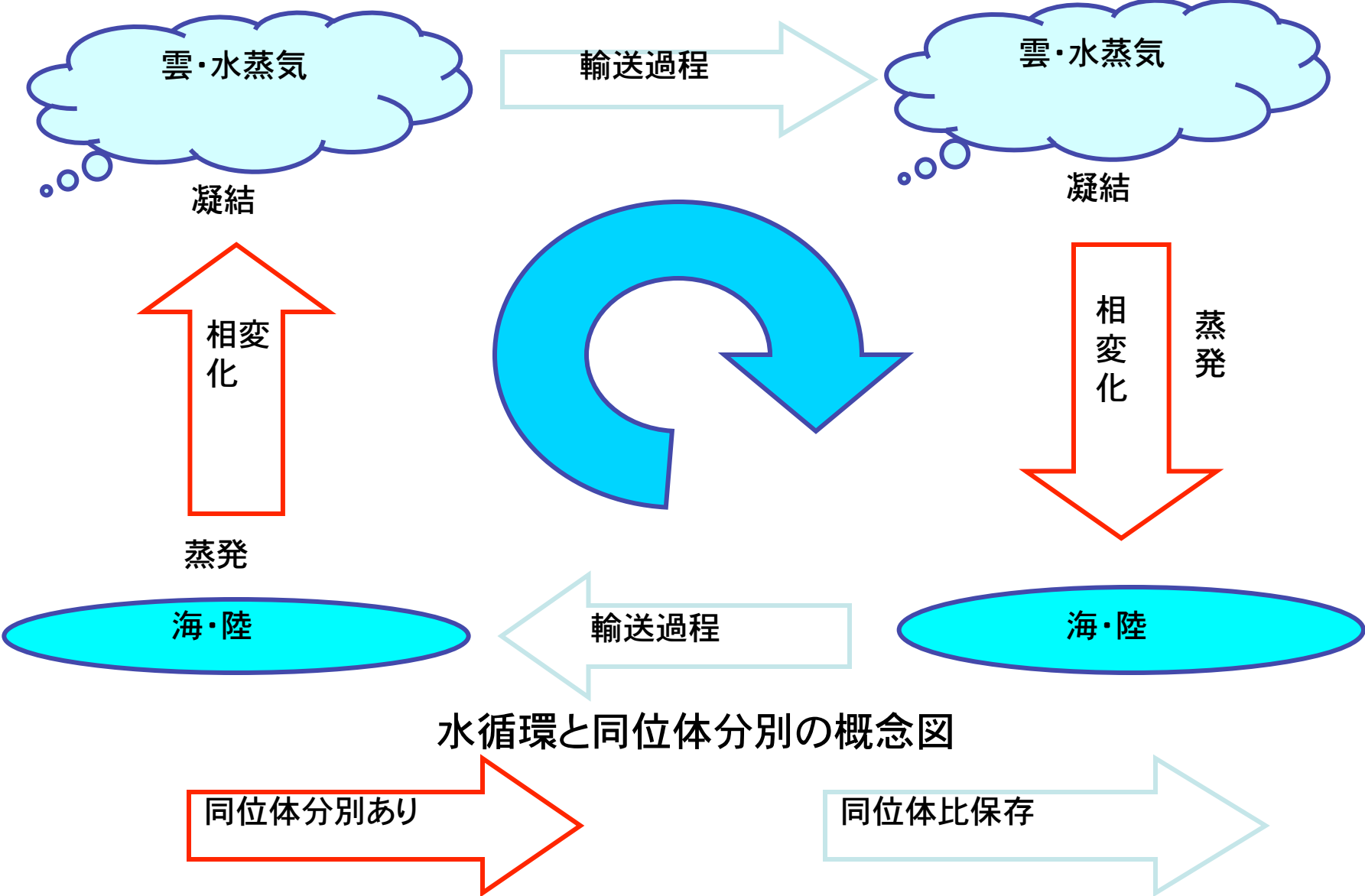


13 June, 2006



大気は成層状態が普通
→ 気層学
→ 大気境界層と自由
対流圏との混合

水循環と同位体分別



水循環と同位体分別の概念図

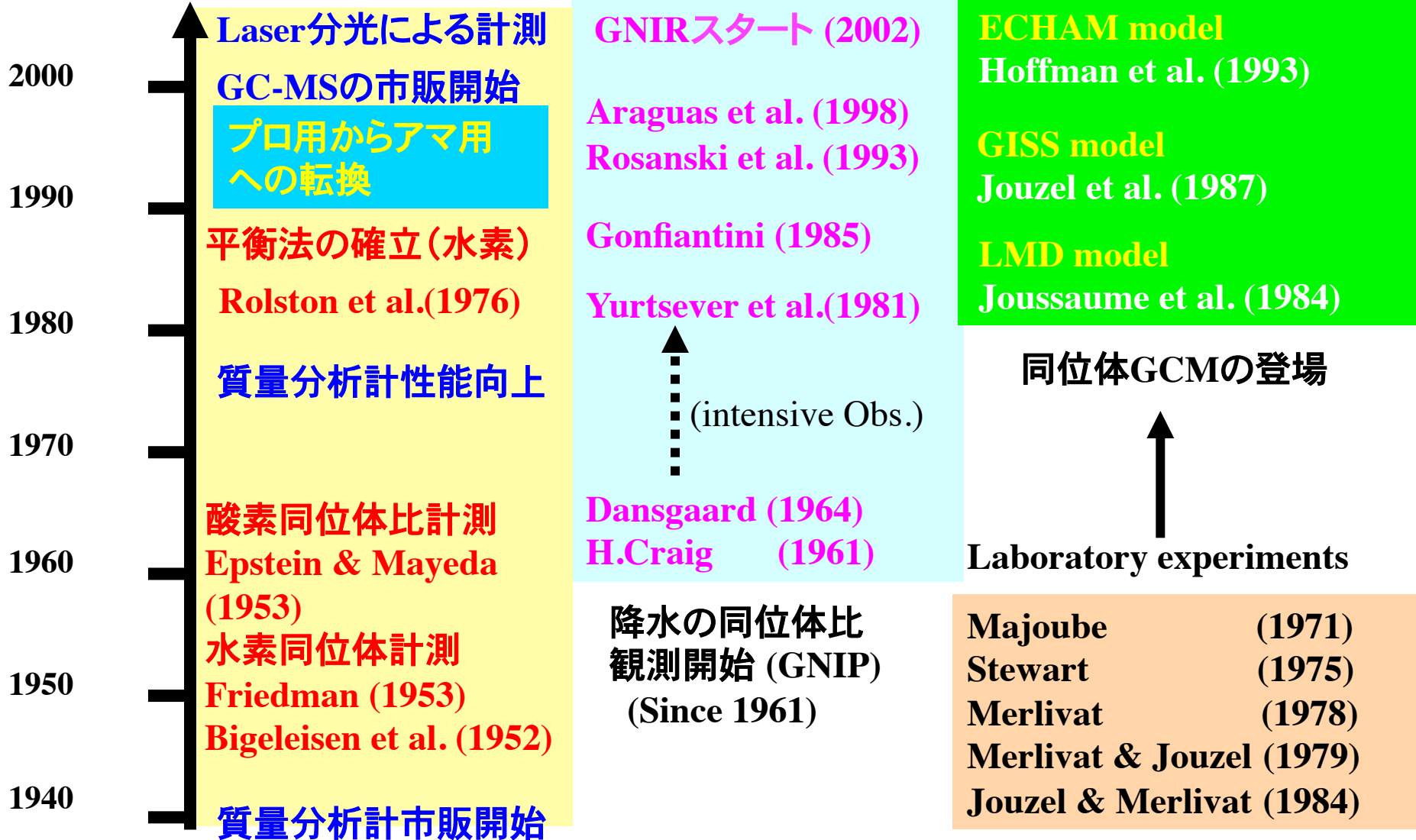
水同位体研究の歴史



機器開発

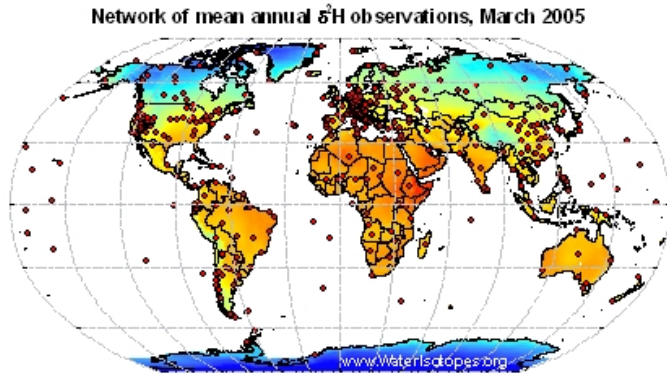
観測

モデル



Water vapor Isotope Analyzer (LGR)

降水の同位体モニタリング



<http://www.waterisotopes.org/>

同位体を気象学に応用するには、降水よりも水蒸気
の同位体比モニタリングが
不可欠



Cavity ring-down 分光法(CRDS)

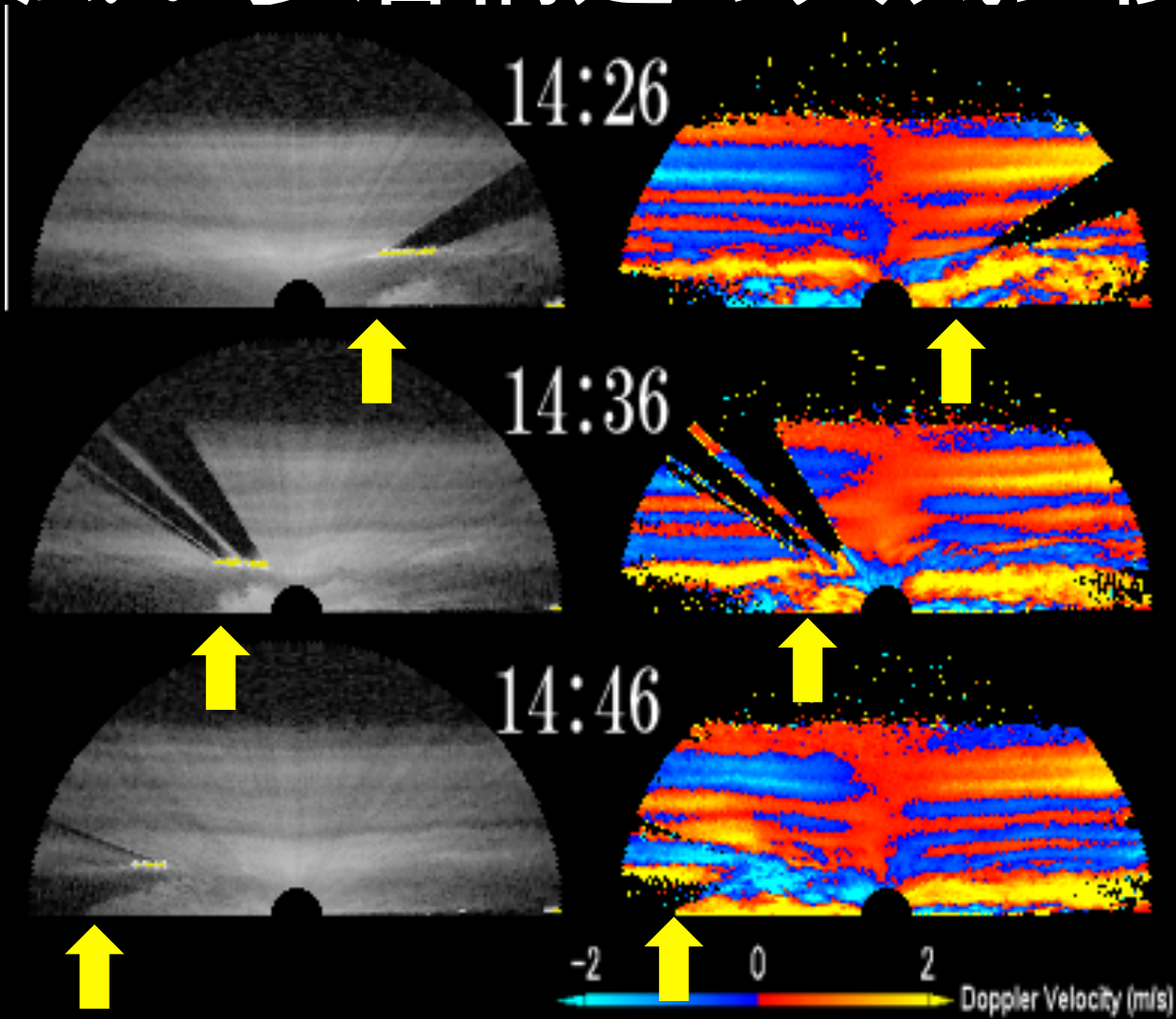
30 sec Precision:

$\delta\text{D}=0.5\text{‰}$ & $\delta^{18}\text{O}=0.15\text{‰}$

自然変動は大きい

現地で連続的に、水蒸気同位体比計測する

海風が多層構造の大気に侵入

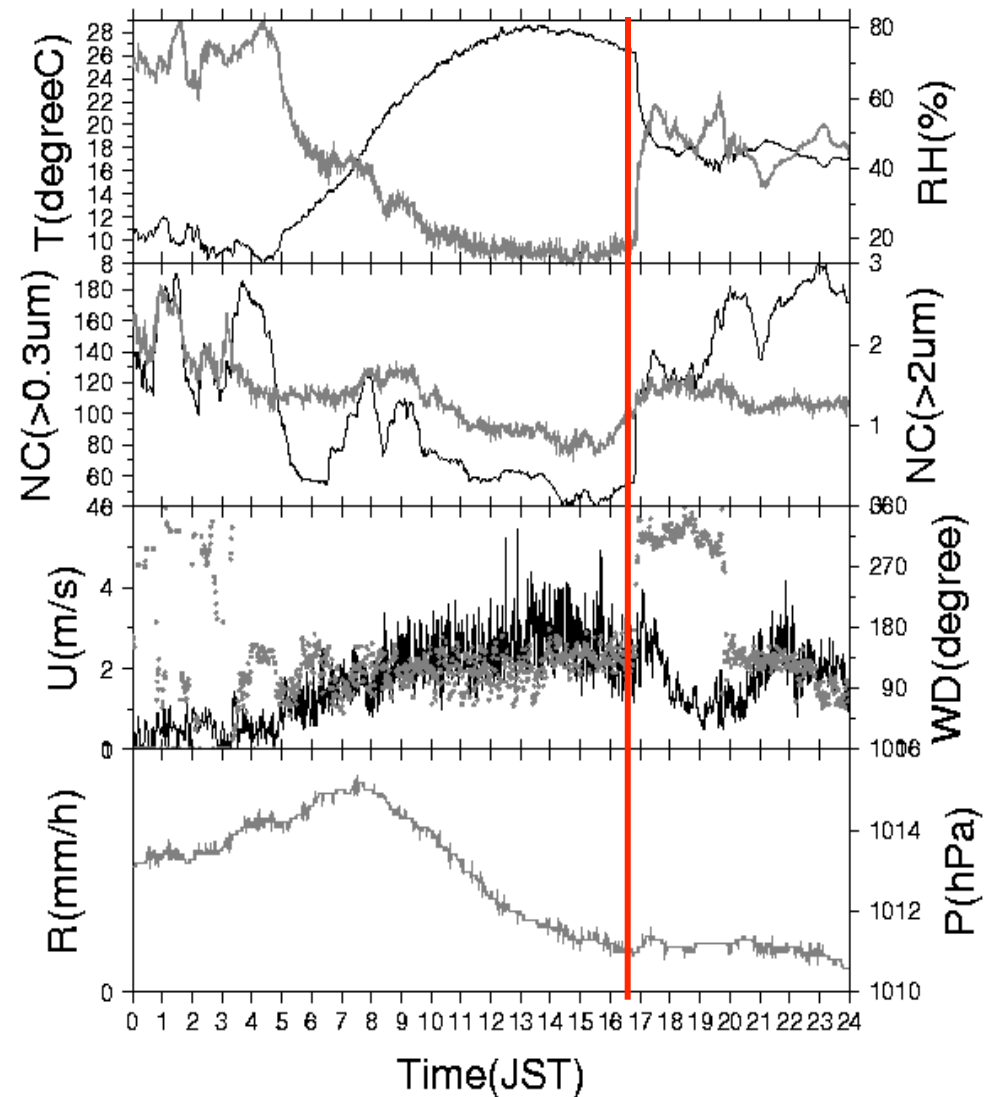
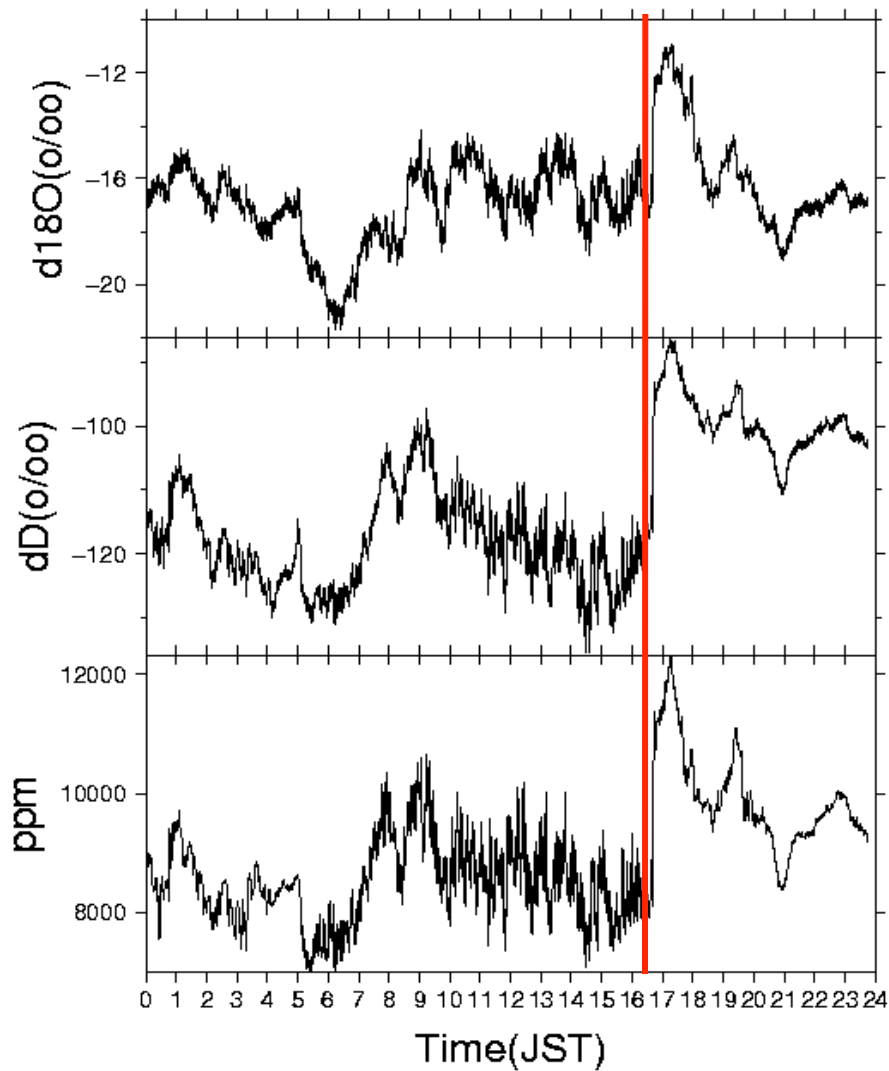


13 June, 2006

CASE 1: SEA-BREEZE

20090521

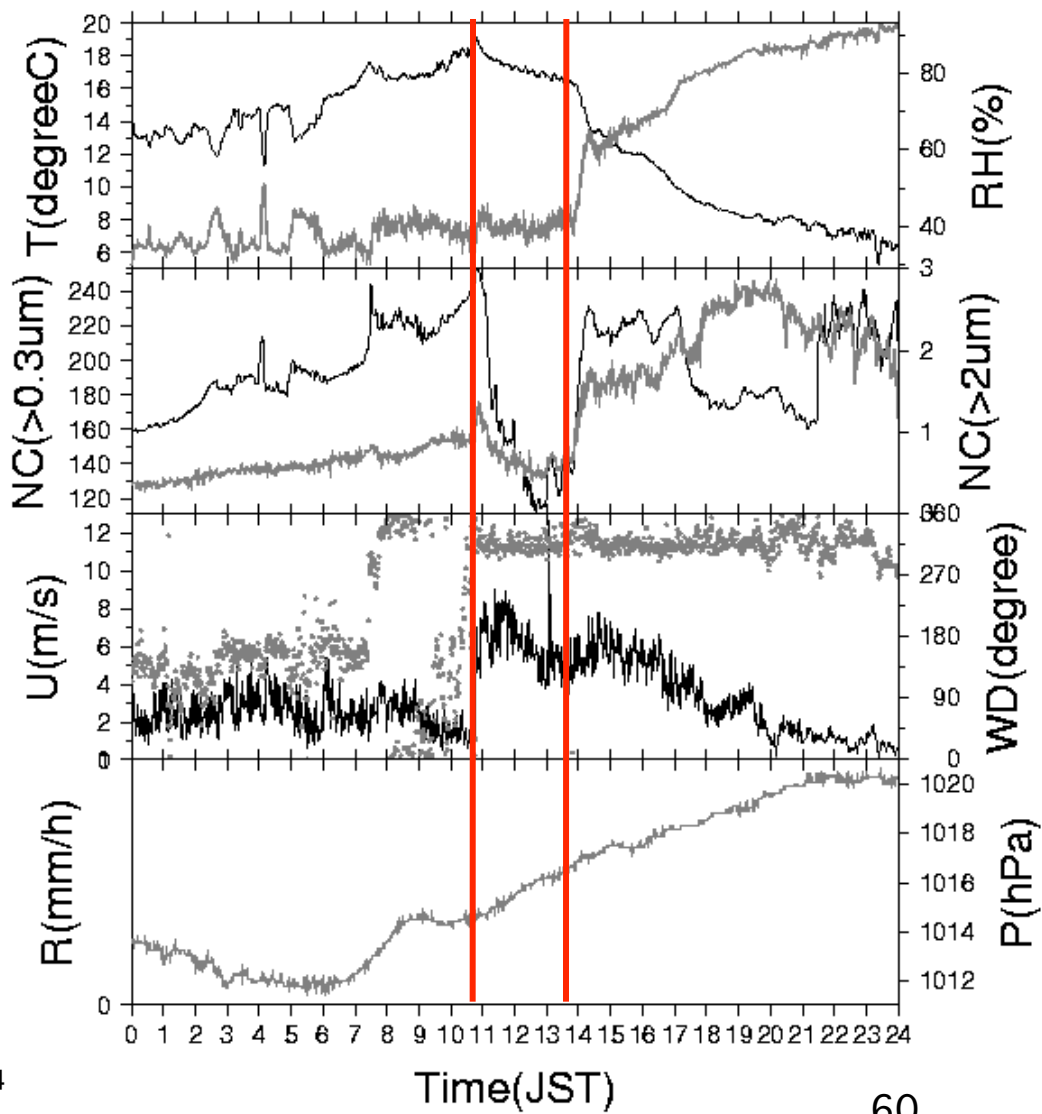
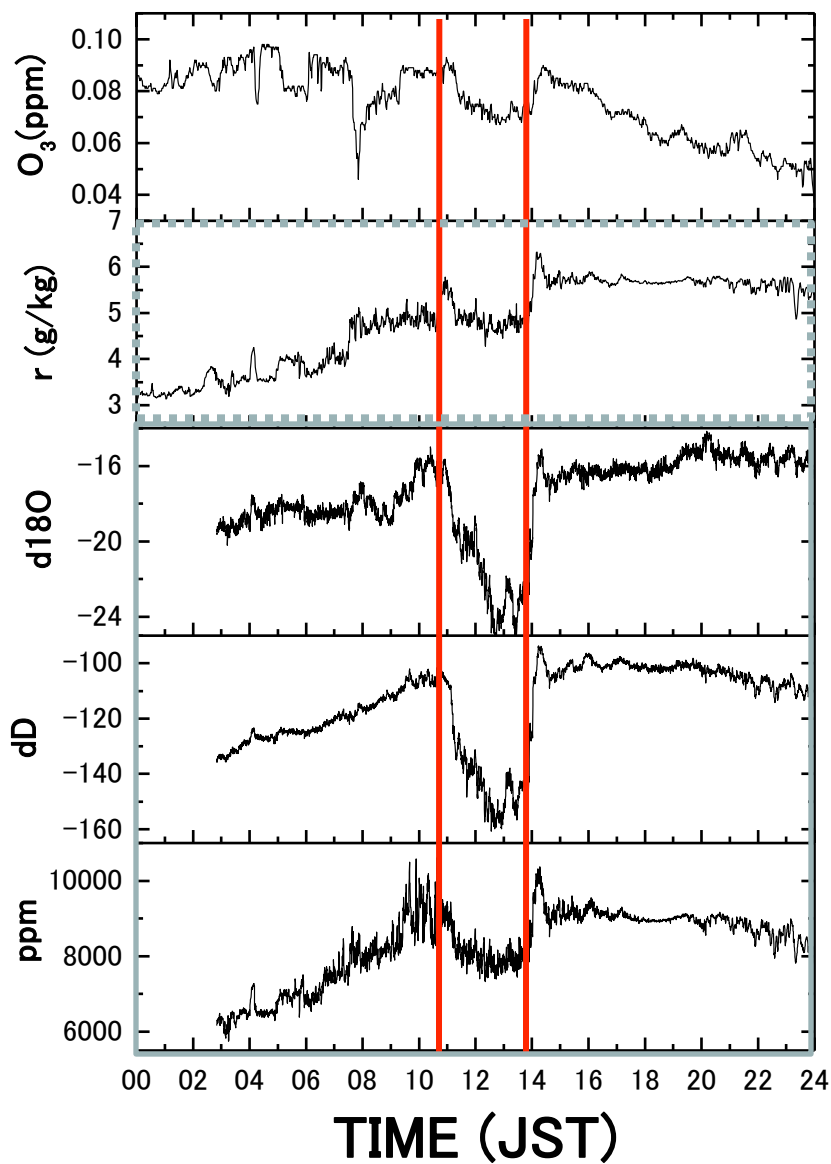
20090521



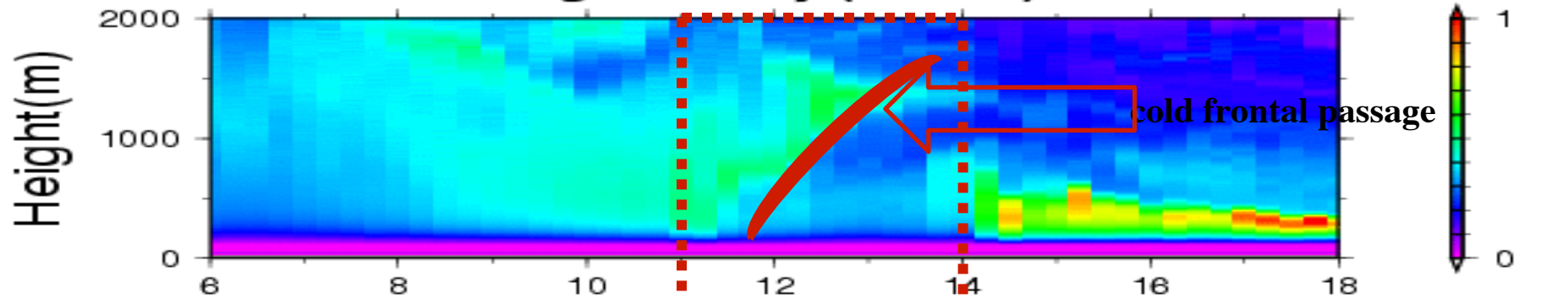
CASE 2: DRY INTRUSION & SEA-BREEZE

2009.05.01

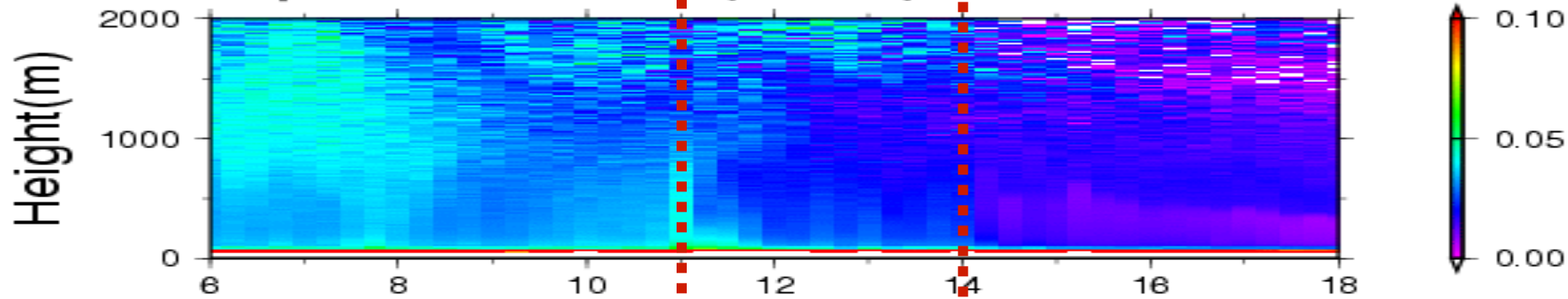
20090501



Backscattering intensity (532nm) :090501



Depolarization ratio (532nm)



Int1064/Int532

