

第4章 水蒸気パターン*

4.1 水蒸気パターン

水蒸気画像では雲がなくても水蒸気をトレーサとして上・中層の大気の流れを可視化できる。このため、水蒸気画像で現れる明・暗領域のパターンから、上・中層のトラフ・渦・リッジ、ジェット気流の位置を推定したり、明・暗域の時間変化から上・中層のトラフの深まり／浅まりを推定することができる。水蒸気画像では上・中層の状態は知ることが出来るが、下層の状態は水蒸気の吸収によりほとんど情報を得ることが出来ないことに留意しなければならない。

4.1.1 暗域

水蒸気画像で黒く見える領域を暗域と呼ぶ。暗域は、温度の高い領域を示し、上・中層が乾燥していることを表す。

図4-1-1ではAの部分がかこれにあたる。



図4-1-1 暗域や明域の水蒸気画像 1999年10月19日18UTC

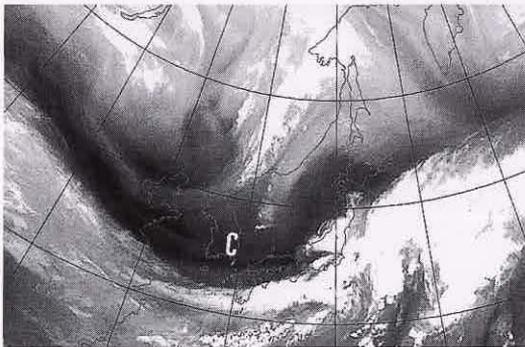


図4-1-2 水蒸気強調画像 1999年10月19日18UTC

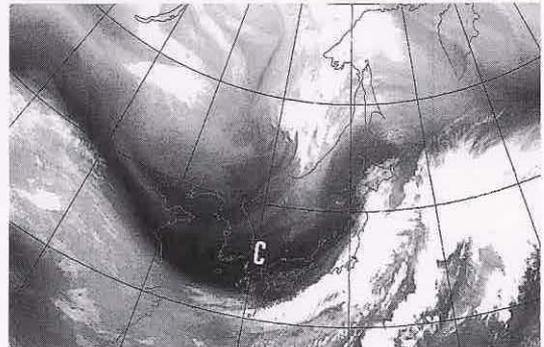


図4-1-3 暗化の進んだ水蒸気強調画像 10月20日00UTC

4.1.2 明域

水蒸気画像で白くあるいは灰色に見える領域を明域と呼ぶ。明域は、温度の低い領域を示し、上・中層が湿っているか、上・中層に雲頂を持つ背の高い雲域であることを表す。なお、明域・暗域は定量的な基準で判別されるものではなく、画像上で明るい部分や暗い部分を指す定性的な概念である。

図4-1-1ではBの部分がかこれにあたる。

4.1.3 暗化 Darkening

暗域が時間と共に暗さを増すことを暗化と呼ぶ。暗化域は活発な沈降場に対応し、トラフの深まりや高気圧の強まりを表している。

図4-1-2の(C)と図4-1-3の(C)を比較すると、暗域が時間と共に暗さが増しているのがわかる。

* 4.1 瀧田 信敏 4.2 田中 武夫、鈴木 和史 4.3 江上 公、田中 武夫

4.1.4 乾燥貫入 Dry Intrusion

低気圧近傍の下層に下降してくる極めて乾燥した空気の流れを乾燥貫入と呼ぶ。水蒸気画像では、下降してきた乾燥気塊は明瞭な暗域や暗化域として認識でき、乾燥貫入の発達を知ることができる。キース・ブラウニング (1999) は、乾燥気塊は圏界面付近から下降してきていることや低い相当温位によって対流不安定及び対流の発生と密接に関連していることなどから、乾燥貫入が温帯低気圧の前線・雲・降水の構造に及ぼす効果を強調している。

下降する乾燥気塊は、寒冷前線後面で低気圧中心に向かう流れと高気圧性の流れに分離する。この時水蒸気画像では暗域が「hammer head」パターン (図 4-1-4a) を示すことがある。

図 4-1-4b に乾燥貫入の例を示す。日本海にある低気圧に大陸から黄海を経て向かう暗域があり、低気圧後面で分流し一方は低気圧中心に向かい

方は東シナ海に向かっている。この形状は「hammer head」パターンとなっている。

4.1.5 ドライスロット Dry Slot

発達中の低気圧中心に向かって寒気側から流れ込む乾燥気塊の流れをドライスロットと呼ぶ。水蒸気画像では、ドライスロットは低気圧中心に巻き込むような細長い溝状の暗域としてみられる。可視画像や赤外画像では、雲がない領域か下層雲域としてみられる。ドライスロットは乾燥貫入により形成される。

図 4-1-4b,c にドライスロットの例を示す。日本海西部にある低気圧中心の東側から南側の細長い暗域 (矢印) がドライスロットで、「hammer head」パターンの一部である。可視画像では、この部分は雲がほとんど存在しない晴天域 (矢印) となっている。

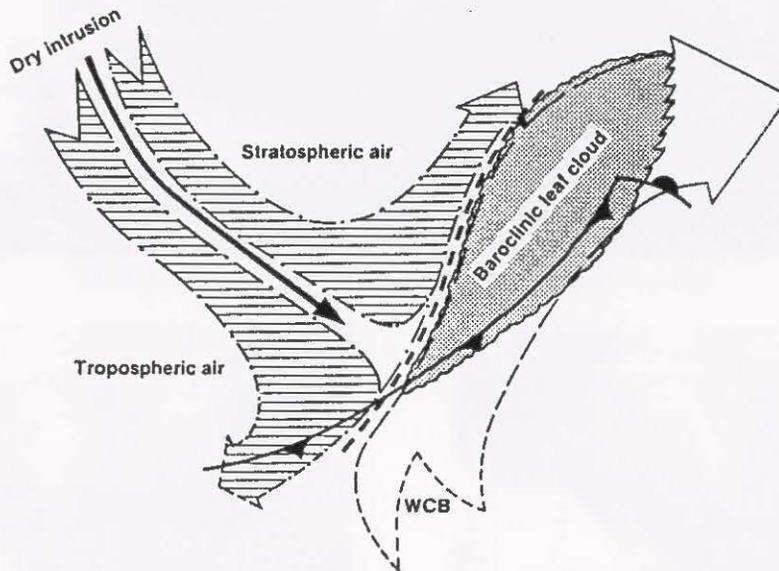


図 4-1-4a 乾燥貫入及び hammer head パターンの模式図 (Young et al. 1987)

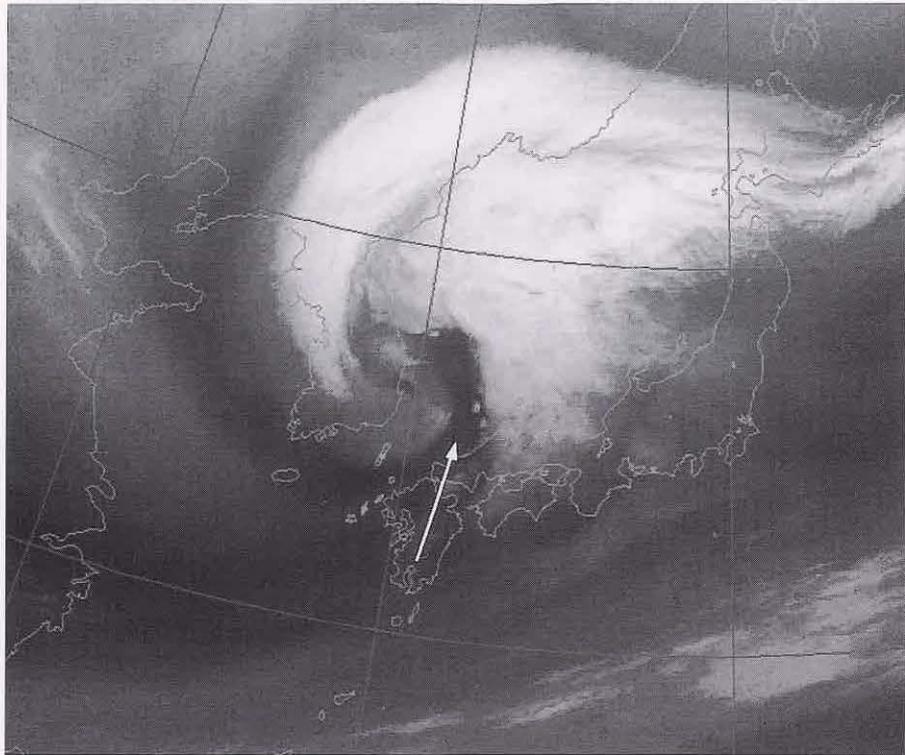


図4-1-4b 乾燥貫入の水蒸気画像 1999年4月6日00UTC

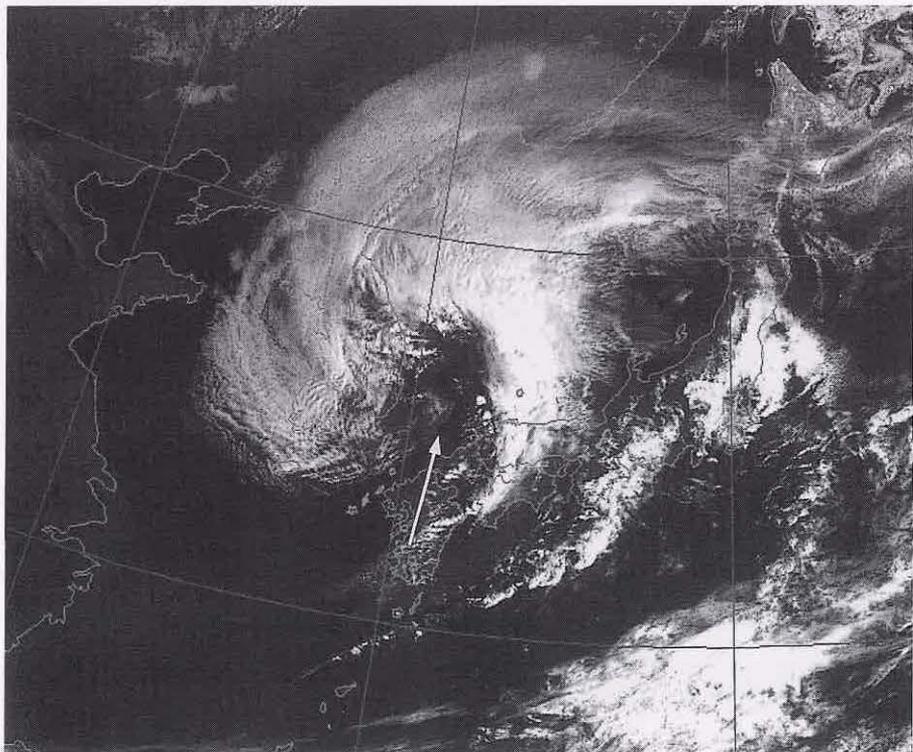


図4-1-4c 乾燥貫入の可視画像 1999年4月6日00UTC

4.1.6 上層トラフ

水蒸気画像では、明域と暗域の境界であるバウンダリーの低気圧性曲率の極大(暗域が南側に凸)の場所にトラフを解析できる(図4-1-5a)。

水蒸気画像のバウンダリーの形から上・中層のトラフの把握を、暗化の度合いからトラフの深まり・浅まりを推定できる。

図4-1-5bでは、バウンダリーの曲率から山東半島から長江下流域にトラフが解析でき、500hPaの客観解析からも同じ位置にトラフが解析される。

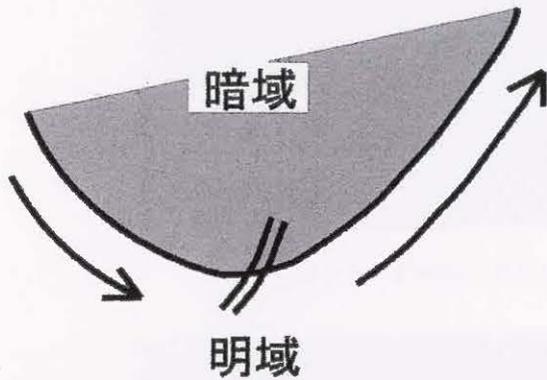


図4-1-5a 上層トラフの模式図

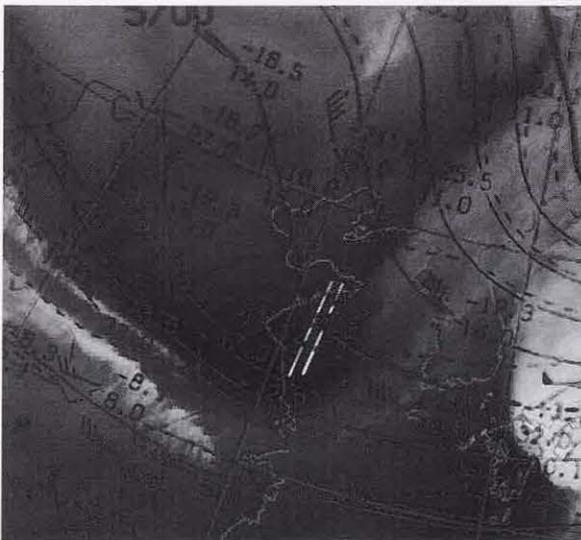


図4-1-5b 上層トラフの水蒸気画像 1999年10月17日 12UTC

実線：500hPa等高度線(60m毎) 二重線：上層トラフ

4.1.7 上層渦

水蒸気画像では多くの渦をみることができる。渦はスパイラル状に巻き込んでいる明域と暗域のパターンや動画による明域や暗域の回転からも特定できる。水蒸気画像で特定できる渦を上層渦と呼ぶ。上層渦は、上・中層における低気圧やトラフを検出するのに有効である。

図4-1-6は、スパイラル状に巻き込んでいる明域と暗域のパターンから特定できる上層渦(図中矢印)の例である。



図4-1-6 上層渦の水蒸気画像 1999年10月11日 00UTC 矢印：本文参照

4.2 バウンダリー

水蒸気画像における明域と暗域の境界をバウンダリーと呼ぶ。バウンダリーは、上・中層における異なる湿りを持つ気塊の境界である。空間的に湿りが著しく変化すれば明・暗域のコントラストが鮮明となり、バウンダリーは明瞭に現れる。水蒸気画像で現れるバウンダリーは、大気鉛直方向の運動や水平方向の変形運動により形成され、それぞれ特有なパターンを示す。

Weldon and Holmes(1991、気象衛星センターによる和訳(1993)がある)は、バウンダリーを7種類のパターンに分類し(表4-2-1)、その特徴を述べている。これらのバウンダリーは、成因や構造から「ジェット気流に関連するもの」「ブロッキング状態を表すもの」「サージを示すもの」「その他」に分けられる。なおバウンダリーは常に同じ性質を保つものではなく変化する。例えばベースサージバウンダリーからインサイドバウンダリーに移行する場合や、バウンダリーの上流部分はドライサージバウンダリーだが下流部分は傾圧リーフバウンダリーである場合など、時間的にも空間的にも変化することに留意が必要である。

ここではWeldon and Holmesが分類したバウンダリーにしたがい、それぞれを説明する。

4.2.1 ジェット気流に関連したバウンダリー

水蒸気画像の最も有効な利用法のひとつに、ジェット気流の挙動の観測がある。一般にジェット気流を境に極側の気団は赤道側の気団より冷た

く乾燥し、赤道側では暖かく湿っており前線に対応した雲域が存在して明域を形成することでバウンダリーが現れる。図4-2-1にサブ系とポーラ系の前線帯の概念図(Ramond et al.1981)を示す。ジェット気流近傍の前線帯上空の極側では沈降が強まり、乾燥域が圏界面から下方へ伸びる。ジェット気流北側の暗域はこの乾燥域に対応し、明瞭なコントラストを持つバウンダリーとなる。一般にサブ系の前線帯は幅が広く傾斜も急なので、ポーラ系の前線帯より幅が広く明瞭なバウンダリーとなりやすい。

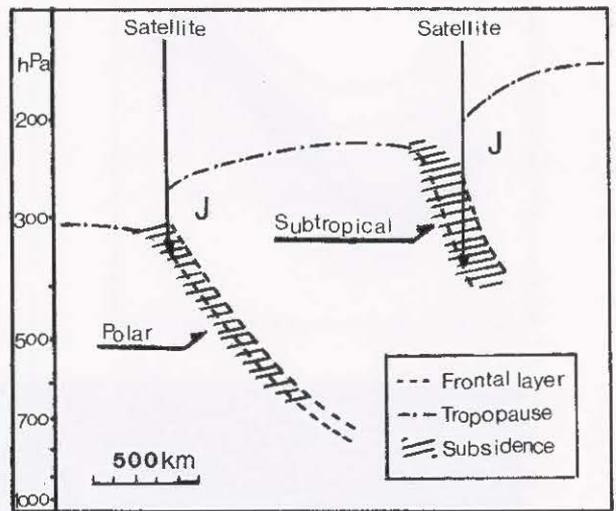


図4-2-1 サブ系とポーラ系の前線帯の概念図 (Ramond et al.1981)

表4-2-1 バウンダリーの分類

ジェットに関連したバウンダリー	ジェット気流平行型バウンダリー
	傾圧リーフバウンダリー
ブロッキングに関連したバウンダリー	ヘッドバウンダリー
	インサイドバウンダリー
サージを示すバウンダリー	ドライサージバウンダリー
	ベースサージバウンダリー
その他	リターンモイスチャーバウンダリー

(1) ジェット気流平行型バウンダリー

このバウンダリーは、模式図にあるようにジェット気流に伴う雲域（明域）と極側の暗域との境界で形成され、コントラストは明瞭ではほぼ直線的な形状を示すことが多い。暗域はジェット気流の極側に帯状に現れることが多い。ジェット軸はバウンダリーの位置にほぼ一致するが、偏西風帯ではジェット軸の西端は変形場にあたることが多いので、バウンダリーの形状やコントラストは

東端よりやや不明瞭だったり、ジェット軸と一致しないことがある。

ジェット気流平行型バウンダリーの例を示す（図4-2-2）。日本海にバウンダリー（図中三角印）があり100ktのジェットコアに対応している。バウンダリーは黄海から大陸に伸びている。バウンダリーの西端（110° E付近）はジェットコア入口にあたるので、バウンダリーとジェット軸との対応は不明瞭である。

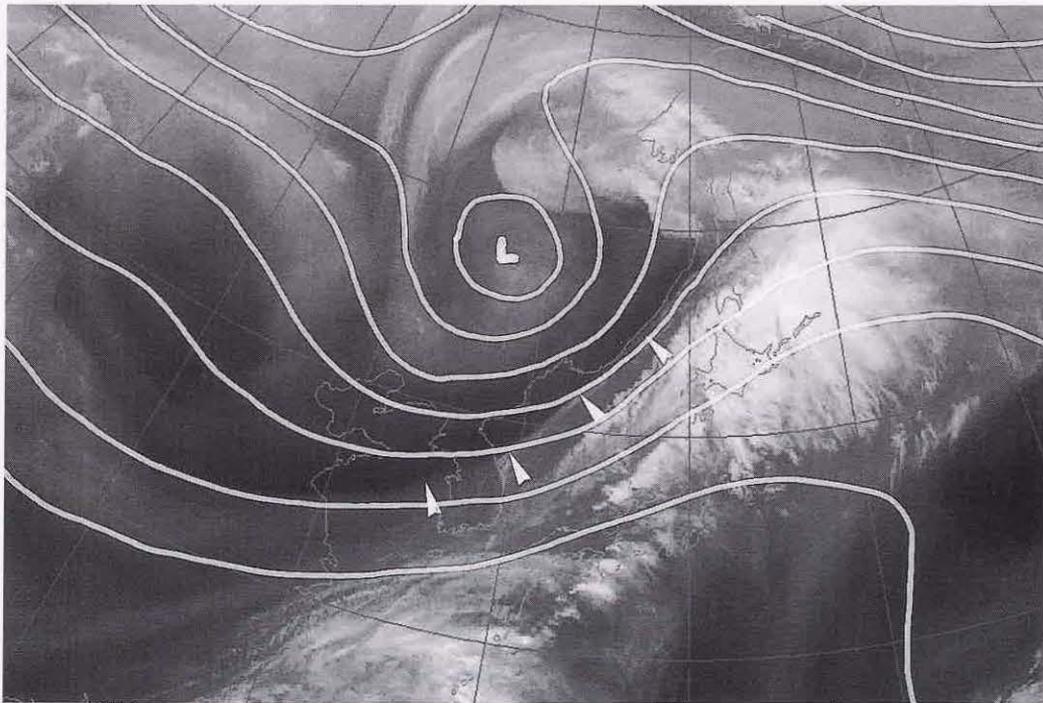
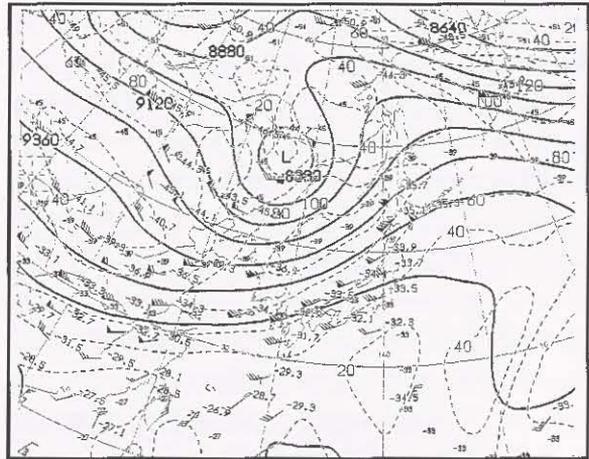
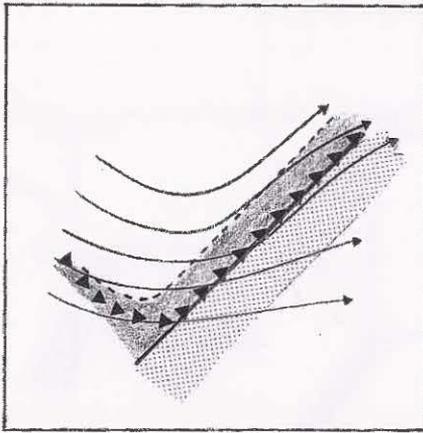


図4-2-2 ジェット気流平行型バウンダリー

左上：モデル図。黒い部分が暗域、白い部分が明域、点彩域は雲域を示す。太線：バウンダリー、細矢印：流線、

黒三角：強風軸

右上：水蒸気画像と同じ時刻の300hPa天気図

下：水蒸気画像（1998年10月15日00UTC） 三角印はバウンダリーを示す。

(2) 傾圧リーフバウンダリー

傾圧リーフは、ジェット気流平行型バウンダリーのうち、偏西風帯の中の低気圧の発達初期に現れる木の葉状雲域（クラウドリーフ）を伴う状態を指す。低気圧の発達初期には暖湿な気流であるWCB（ウォームコンベヤベルト、5.1節参照）により、模式図にあるようにトラフ前面で雲域がリーフパターンを示し、バウンダリーはS字形状を示す。一般にS字形状を示す明域が極側に膨らんだ境界付近ではジェット軸に一致するが、赤道側にへこんだ境界付近は変形場に近くジェット軸

と必ずしも平行ではない場合がある。

傾圧リーフバウンダリーの例を示す（図4-2-3）。日本付近に発生期の低気圧に対応する木の葉状の雲域があり、北縁は高気圧性曲率を持ってジェット軸に一致している。傾圧リーフが形成される時は、ジェット気流の合流場にあたることが多く、この例でも近接してジェット気流平行型バウンダリーがみられ（図中矢印）、高気圧性曲率を持つ部分（北日本）で傾圧リーフバウンダリーと一致している。

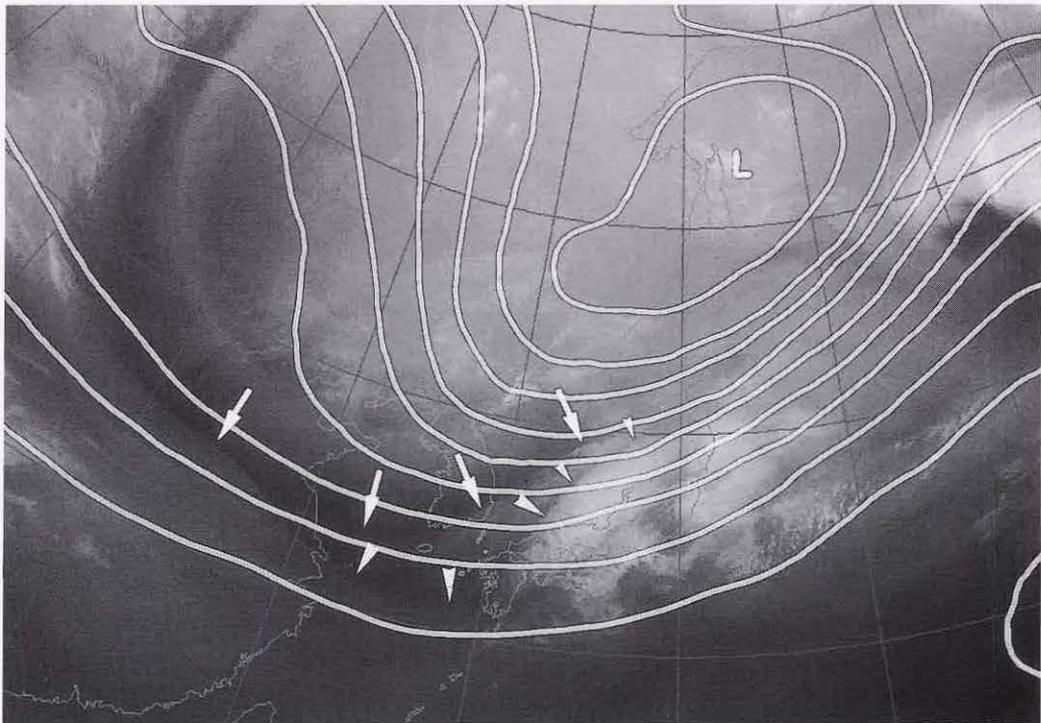
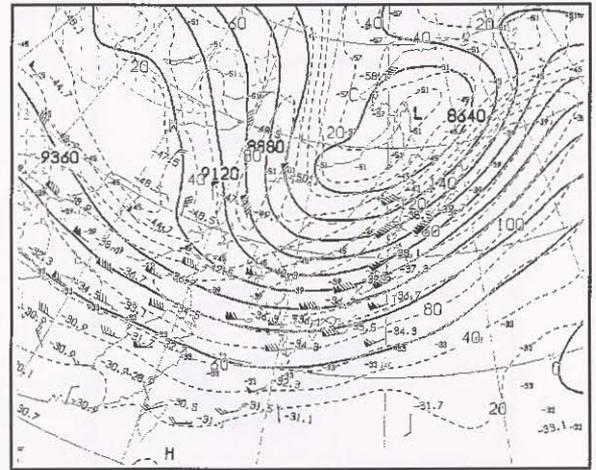
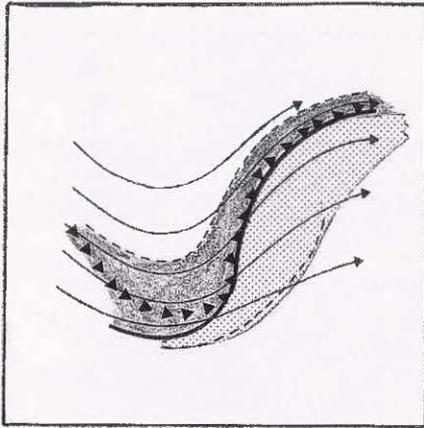


図4-2-3 傾圧リーフバウンダリー

画像時刻は1999年2月11日00UTC. その他は図4-2-2に同じ.

4.2.2 ブロッキングの状態を表すバウンダリー

このタイプのバウンダリーは、上層の比較的弱風域内において、周囲の風と反対方向の風を持つ循環が発達することにより形成される。周囲の風を阻むような循環場が形成されることから、ブロッキングの状態を表すバウンダリーとして区別される。循環場の成因から、低気圧の形成に関連するヘッドバウンダリーと高気圧の形成に関連するインサイドバウンダリーがある。

(1) ヘッドバウンダリー

ヘッドバウンダリーは、凸状の明域と周囲にある暗域との境界で形成される。バウンダリーの動

きや変化は遅い。このバウンダリーは低気圧の発生に伴う総観規模の流れにより形成される。模式図にあるように、低気圧の発生により下層から湿った気塊が上昇しヘッド状の明域を形成する。明域は低気圧に伴う流れと低気圧北側の高気圧性の流れへと分流する。この明域の流れは周囲の乾燥した西風にブロックされ、境界で下降流となる。上層の流れの場で見ると、変形場の伸長軸に沿ってバウンダリーが形成される。

水蒸気画像(a)で総観規模のヘッドバウンダリーを示す。朝鮮半島から日本海にかけバウンダリー(図中三角印)がみられる。これは300hPaで

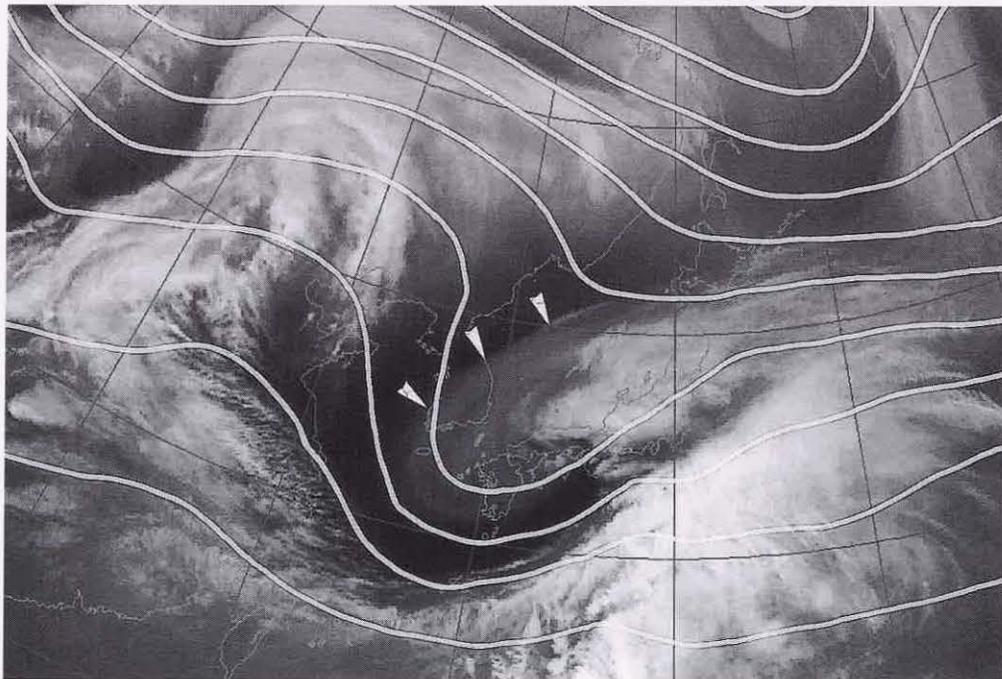
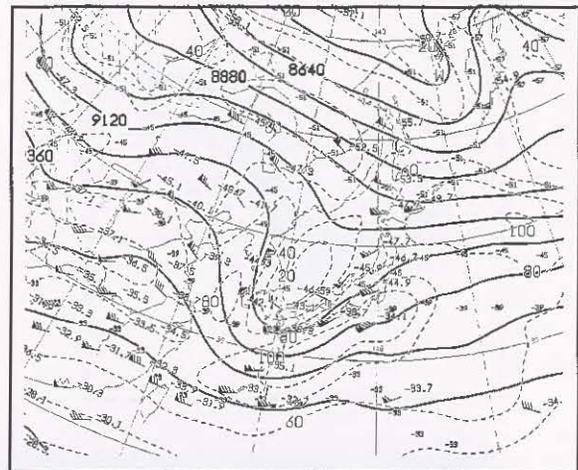
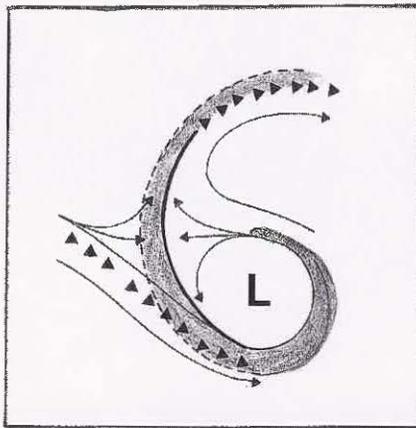


図4-2-4a ヘッドバウンダリー

画像時刻は1999年4月10日12UTC。その他は図4-2-2に同じ。

対馬付近にある低気圧循環に伴う東風と大陸からの北西風との境界で形成されたものである。天気図だけでは判断しにくい上層低気圧の存在やそのスケールがバウンダリーを通して容易に推定できる。なおこの時の地上低気圧は、ヘッドバウンダリーを伴う上層低気圧から500kmほど下流の紀伊半島沖にあり、活発な対流雲を伴っている。

先に述べた総観規模に伴うヘッドバウンダリーのほか、メソスケールの対流現象に伴うヘッドバウンダリーもある。この場合は、クラウドクラスターの風上側の縁に沿ってごく幅の狭い帯状の暗域が現れ、雲域との間にバウンダリーが形成される。バウンダリーのスケールは数十キロメートルで持続時間も短い。クラウドクラスターの最盛期に現れることが多く、狭い帯状の暗域はクラウドクラスター内の気流構造と結びついていると考えられる。藤吉(1999)は中層からの乾燥気塊の流入が積乱雲の急速な発達・衰弱をもたらした例を報告しており、メソスケール対流現象に関連した乾燥気塊が暗域として観測されたものと考えられる。

水蒸気画像(b)でメソスケールのヘッドバウンダリーを示す。中国大陸にある直径100～200kmの発達中のクラウドクラスターの風上側にごく幅

の狭い暗域(図中三角印)がみられる。この暗域は、クラウドクラスターの非常に明るい雲域との間にバウンダリーを形成している。バウンダリーは比較的スケールの大きなクラスターの最盛期に現れており、クラスターの衰弱と共にバウンダリーも消滅した。Weldon and Holmesは組織化されたメソ対流系システムであるクラウドクラスターに伴い現れるこの種のバウンダリーもヘッドバウンダリーとして分類しているが、成因やメカニズムは先に述べた総観スケールに対応するヘッドバウンダリーとかなり異なると考えられるので、新たな分類が必要かもしれない。

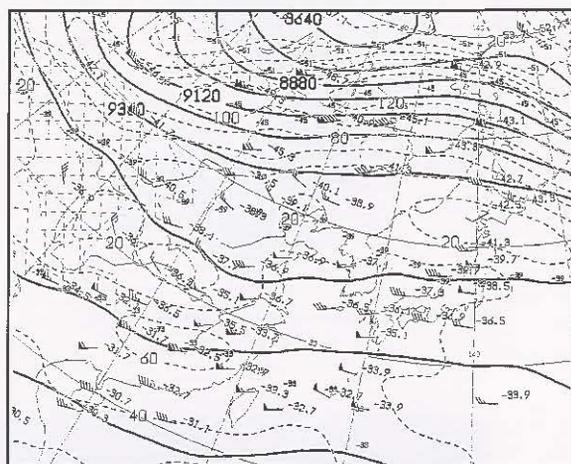


図4-2-4b ヘッドバウンダリー

上右:(b)と同じ時刻の300hPa天気図 下:水蒸気画像(1998年4月22日18UTC)

(2) インサイドバウンダリー

上層の高気圧による沈降で形成される乾燥域が広がるとき、上流側のトラフに伴う比較的湿った流れとの間で境界を形成する。高気圧性循環内の流れで形成されるこの境界を、インサイドバウンダリーと呼ぶ。模式図にあるように、バウンダリーは上流側に向かって凸状の暗域と周囲の明域との間に形成される。バウンダリーの動きや変化

は遅い。インサイドバウンダリーは、プロッキング高気圧の消長や動向の監視に利用できる。

インサイドバウンダリーの例を示す(図4-2-5)。東経130度線に沿って南北に伸びたリッジが発達し暗域(乾燥域)が広がっている。このリッジによる高気圧性の流れとその上流側にあるトラフ前面の湿った西風(明域)との間に、インサイドバウンダリー(図中三角印)が形成されている。

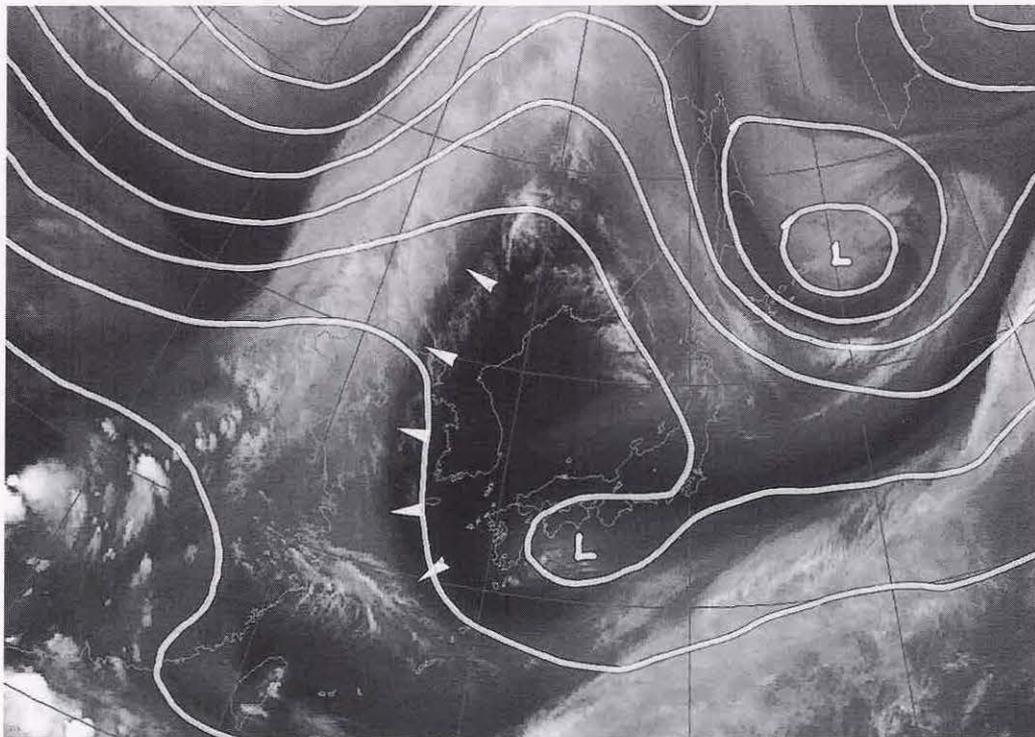
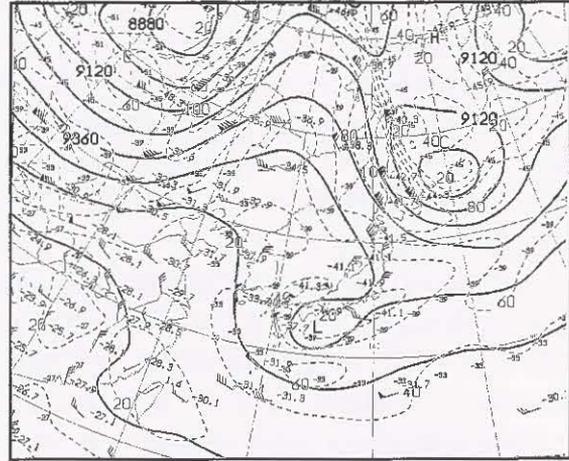
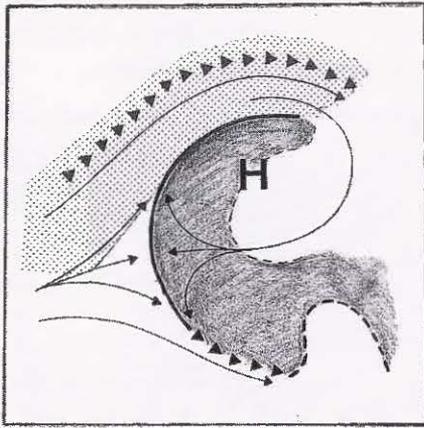
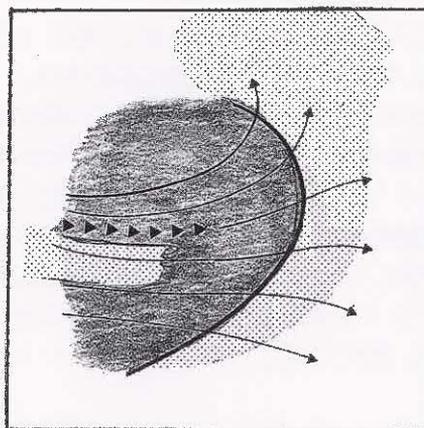


図4-2-5 インサイドバウンダリー

画像時刻は1998年5月21日12UTC。その他は図4-2-2に同じ。

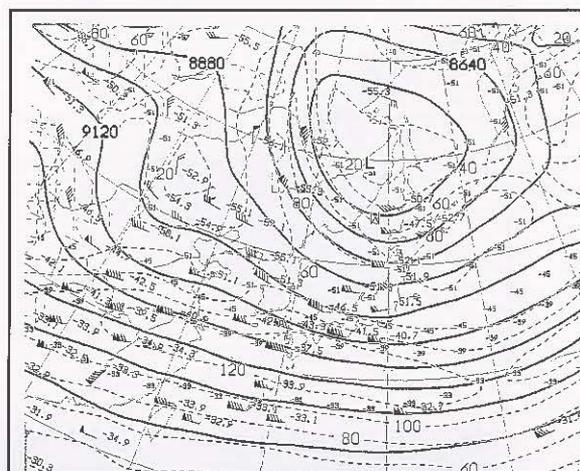
4.2.3 サージを示すバウンダリー

水蒸気画像で暗域が流れに沿って上流から一気に押し寄せてくるようにみえることを、サージと呼ぶ。この暗域と進行前面の明域とで形成されるバウンダリーをサージバウンダリーと呼ぶ。サージバウンダリーには、暗域が東側に向かって凸状に広がるドライサージバウンダリーと暗域が赤道側に向かって凸状に広がるベースサージバウンダリーとがある。サージに伴うバウンダリーは、上層に乾燥した気塊を伴うことにより対流活動を助長したり乱気流発生に関連するなど、水蒸気画像の解析では重要な概念の一つである。



(1) ドライサージバウンダリー

ドライサージバウンダリーは、下降流の発達による急速な暗化が主要な役割を果たす。下降流を発達させる要因としては、「上・中層の寒気移流」「ジェットコア下流における減速」「発達した低気圧後面での沈降」などがある。こうした下降流に伴う暗域は、前面の低気圧システムに伴う雲域との間に明瞭な境界を形成し、ドライサージバウンダリーと呼ばれる。模式図にあるように、暗域は下流に向かって凸状となり、バウンダリーは速い速度で動く。



ドライサージバウンダリーでは、下層に暖湿な気塊が存在するときはサージに伴う上層の乾燥気塊が流入し不安定を助長しやすいため、バウンダリー付近では対流雲の発達に注意が必要である。また、バウンダリーと上流側の暗域との間では、CAT（晴天乱気流）など乱気流が発生しやすいとされている（池田、奥村 1999）。

ドライサージバウンダリーの例を示す（図4-2-6）。大陸から南東進する暗域の先端が、三陸沖にある発達中の低気圧の雲域の後面でバウンダリーを形成している。この暗域は寒気を伴った乾燥気塊で、暗化を強めながら速い速度で南東進しており、低気圧後面での下降流が強いことを表している。

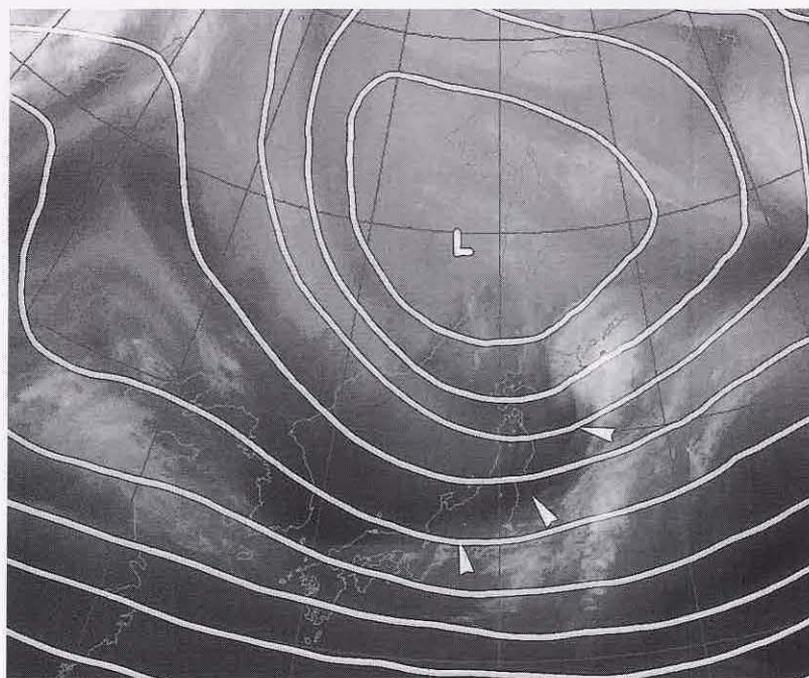


図4-2-6 ドライサージバウンダリー

画像時刻は1998年12月26日00UTC. その他は図4-2-2と同じ。

(2) ベースサージバウンダリー

ベースサージバウンダリーは、上層リッジの強まりによりリッジ東側で北風成分が増大し、乾燥気塊が南下して赤道側の湿潤気塊との間に形成される。当初バウンダリーは幅の狭い帯状の形態を示すが、リッジの強化に対応して模式図にあるように、乾燥域(暗域)が南下・拡大する。ドライサージと同様にバウンダリーと上流側の暗域の間では、CATなど乱気流が発生しやすいとされている(池田、奥村1999)。ベースサージバウンダリー

は、ITCZ(熱帯収束帯)まで南下して対流活動を活発化させることがある。特に熱帯域では対流システムの発生・発達にこのバウンダリーの監視は重要である。

ベースサージバウンダリーの例を示す(図4-2-7)。東経120度付近で発達したリッジから南下する乾燥気塊(暗域)が、その南にある湿潤気塊(明域)との間にベースサージバウンダリー(図中三角印)を形成している。

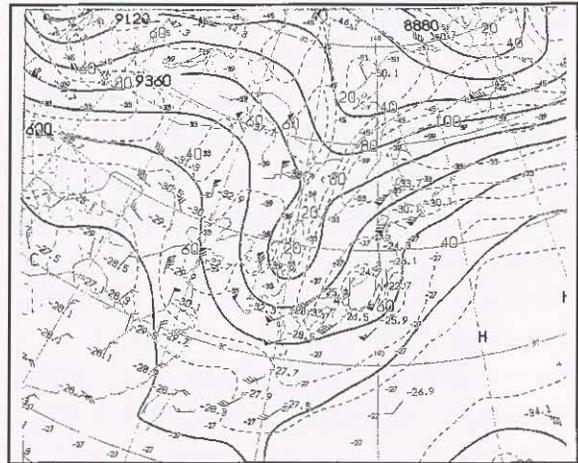
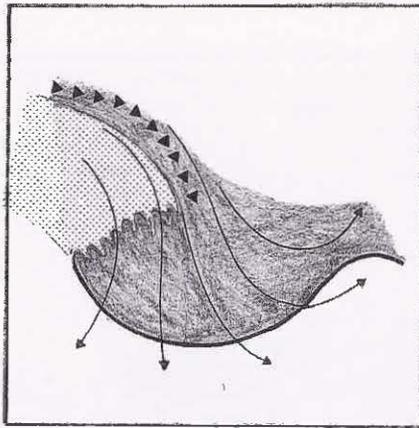


図4-2-7 ベースサージバウンダリー

画像時刻は1998年9月16日00UTC. その他は図4-2-2に同じ.

4.2.4 その他

(1) リターンモイスチャーバウンダリー

リターンモイスチャーバウンダリーは、上層リッジの東側で湿潤気塊（明域）が南下し乾燥域（暗域）との間に形成される。このバウンダリーは、上層の湿潤気塊が総観規模の鉛直方向の運動の影響を受けないで赤道方向に流れることにより形成される。トラフ前面で北上した湿りがリッジを乗り越え赤道方向に戻ることからこの名前が付けられた。リターンモイスチャーバウンダリーは、画像ではベースサージバウンダリーと明・暗

域が逆のパターンとなるが、下降流に関連していない。また、前線や低気圧など顕著な気象じょう乱と対応することもない。

リターンモイスチャーバウンダリーの例を示す（図4-2-8）。日本海から華北を通してモンゴル付近にかけ赤道側に凸状の明域が、華中から日本列島に伸びるジェット気流極側の暗域（乾燥域）との間でバウンダリーを形成している。この明域は、バイカル湖の北で発達したリッジから南下する気流に関連している。

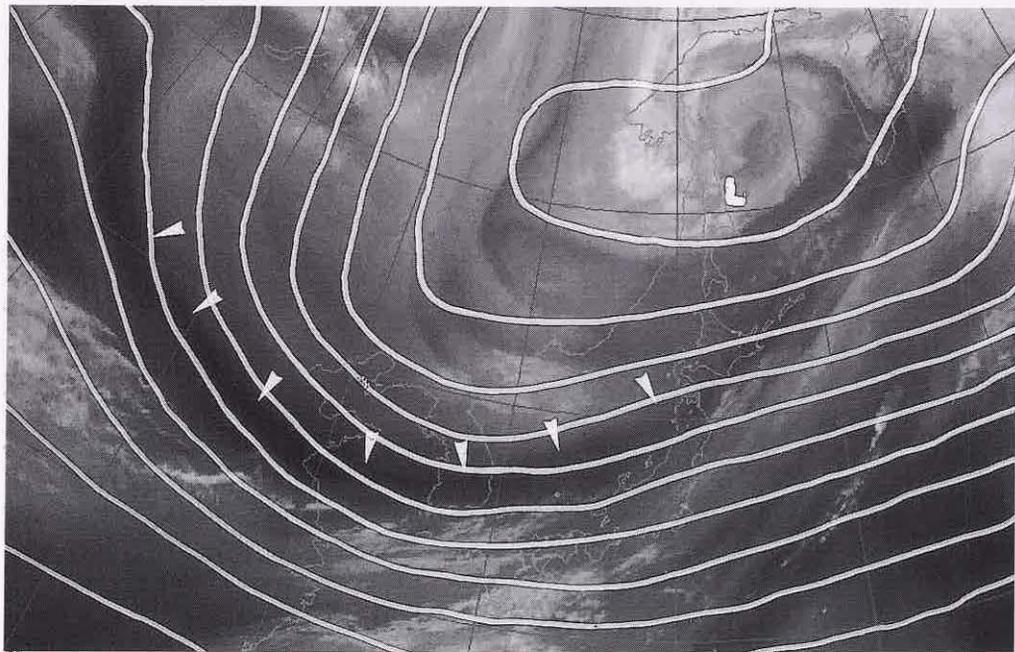
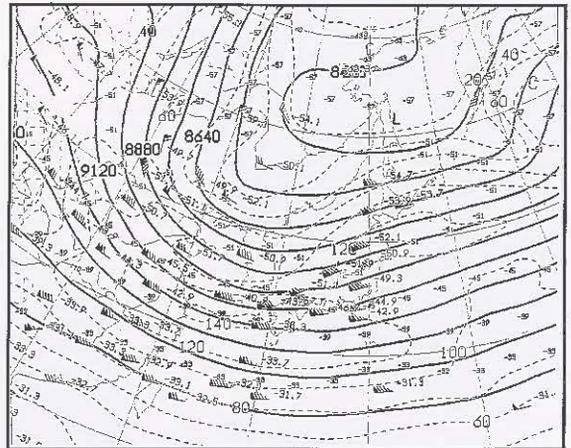
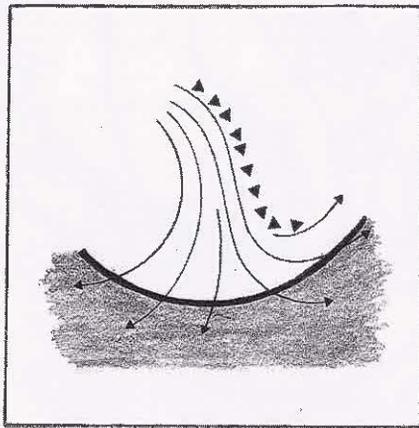


図4-2-8 リターンモイスチャーバウンダリー
画像時刻は1999年10月17日00UTC。その他は図4-2-2に同じ。

4.3 水蒸気画像による解析

4.3.1 寒冷低気圧

水蒸気画像では、渦が水蒸気のパターンにより可視化されるため、雲がない場合でも上層渦として解析・追跡することができる。この上層渦は寒冷低気圧（寒冷渦）に対応する場合が多い。

上層渦が朝鮮半島から日本に南東進した時の例を示す。水蒸気画像（図4-3-1a）では、朝鮮半島南部に明域の渦状パターンがみられ、上層渦を識別

できる（図中、矢印の矢先が渦中心）。500hPa天気図（図4-3-2a）と比べると、渦中心と寒冷低気圧中心は一致していることがわかる。朝鮮半島の上層渦は、24時間後、関東付近まで東進した（図4-3-1b）。渦パターンは依然明瞭で、上層渦を識別できる。500hPa天気図（図4-3-2-b）と比べると渦中心と寒冷低気圧中心は一致している。

なお、この事例は、6.2節に経過を詳細に述べているので、参照されたい。

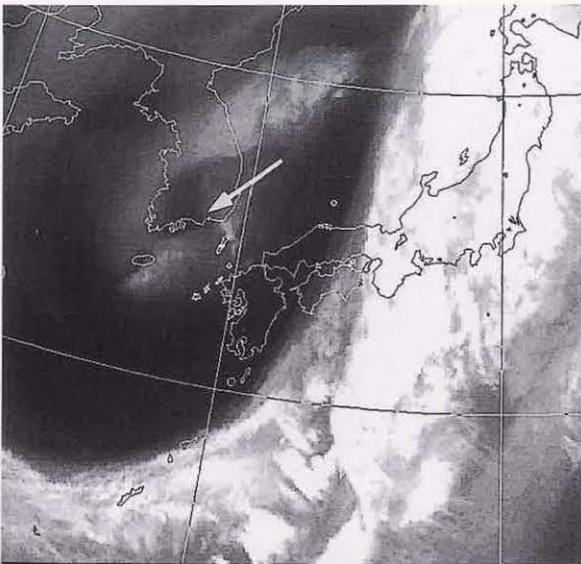


図4-3-1a 寒冷低気圧の水蒸気画像 1997年4月6日12UTC 記号：本文参照

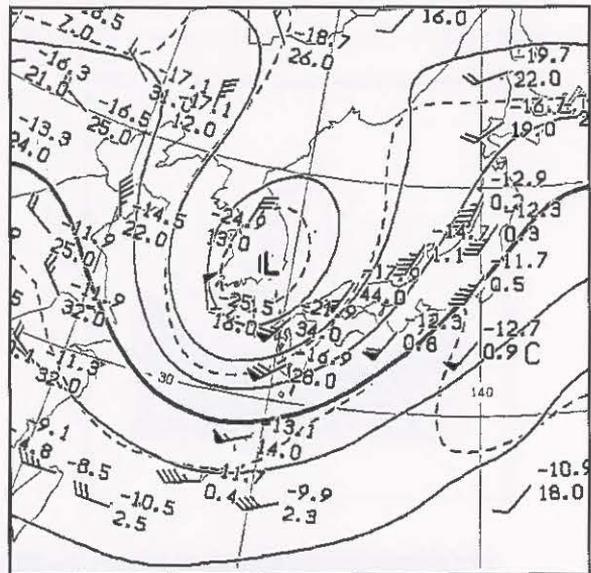


図4-3-2a 500hPa天気図 1997年4月6日12UTC

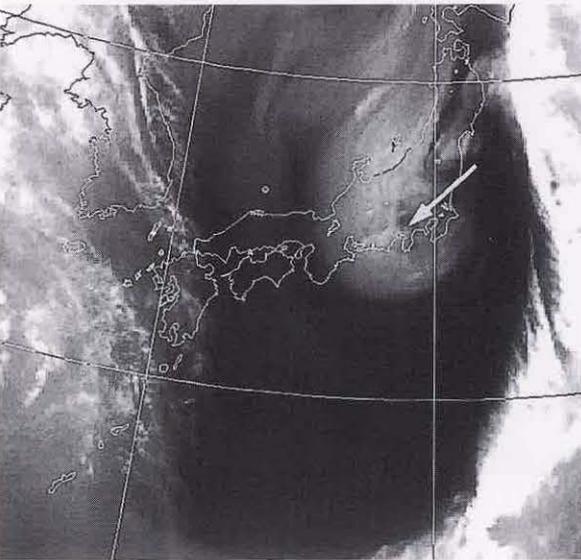


図4-3-1b 寒冷低気圧の水蒸気画像 1997年4月7日12UTC 記号：本文参照

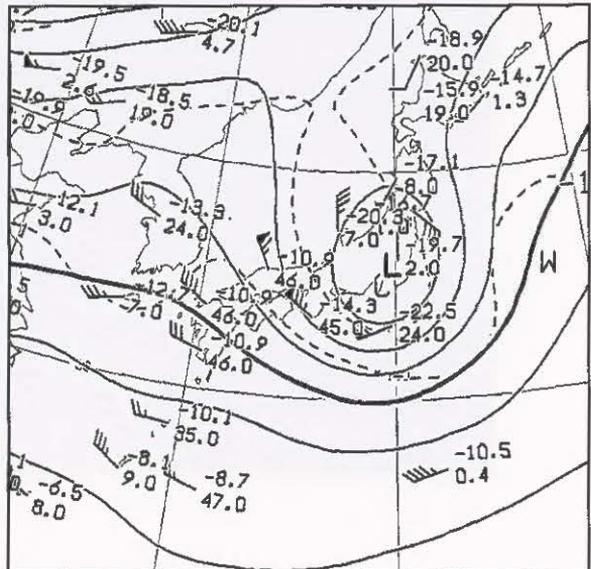


図4-3-2b 500hPa天気図 1997年4月7日12UTC

4.3.2 UCL(Upper Cold Low)

寒冷低気圧のうち、熱帯域から亜熱帯域で解析される寒気核型低気圧性循環をShimamura(1981)は、UCL(Upper Cold Low)と呼び、次のことを述べている。

①UCLの発生初期段階には、中層においてUCLの中心の東側で湿潤域、中心付近とその西側に乾燥域がしばしばみられ、この乾湿分布と雲域との対応はよい。

②UCL周辺では対流雲が活発化し、この対流雲域付近で台風に至るまで発達することがある。

また、内藤(1993)及び高嶺(1995)は、日本付近の上層から沈降しながら南下する気流と熱帯収束帯の上層から沈降しながら北上する気流により

形成された熱帯対流圏上層トラフ(TUTT)に沿って、UCLはしばしば観測されるとしている。

以上のことから、熱帯じょう乱を監視する上で、このUCLを追跡することは重要である。

図4-3-3a,bは、UCLに対応した2つの上層渦A、B(中心を三角印で示した)が北緯30°帯と10°帯を西進した時の水蒸気画像である。この画像では、上層渦Aは主に東側での対流雲域の発達・拡大が著しく、上層渦Bは東側より西側で乾燥しているのがわかる。

図4-3-4a,bはこの時の200hPa天気図で、上層渦A、Bとほぼ同じ位置に、2つのUCLが解析されている。

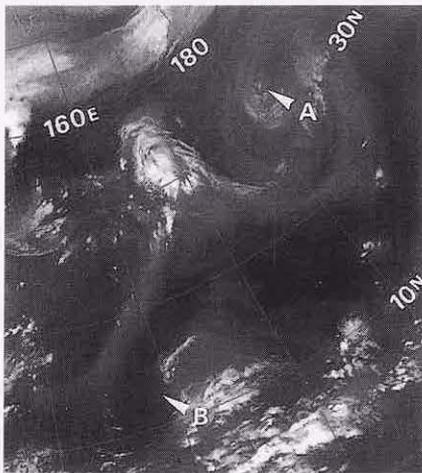


図4-3-3a UCLの水蒸気画像 1999年8月25日00UTC
記号：本文参照

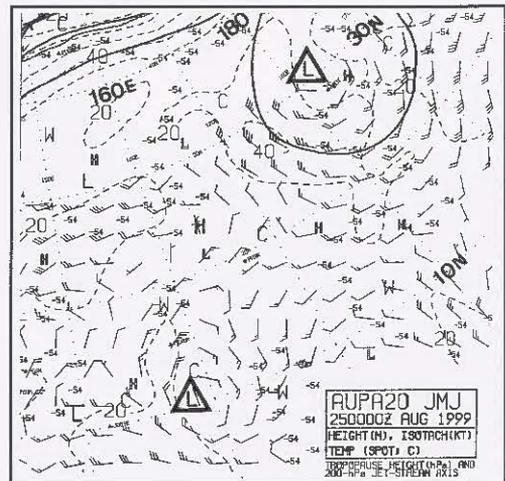


図4-3-4a 200hPa天気図 1999年8月25日00UTC

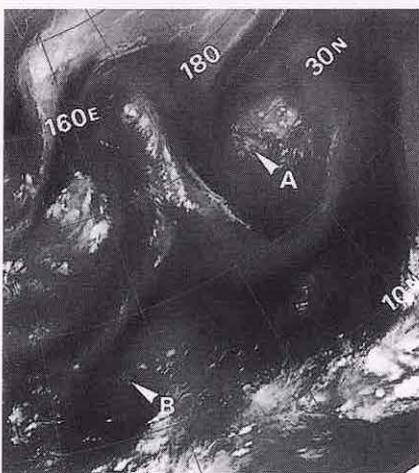


図4-3-3b UCLの水蒸気画像 1999年8月26日00UTC
記号：本文参照

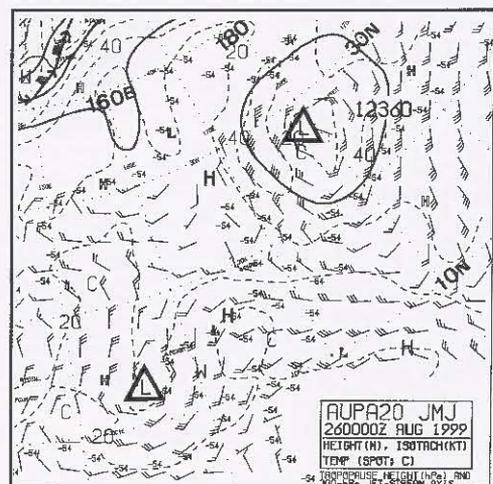


図4-3-4b 200hPa天気図 1999年8月26日00UTC

4.3.3 対流活動の助長

上層への乾燥気塊（暗域）の流入は、上層における低相当温位気塊の流入に対応するので、下層の状態が変わらなければ安定度を悪化させることに相当する。対流雲が存在する環境に暗域が流入すると、安定度の悪化により対流活動を助長する。暗域の進行前面ではこのような状態が生じやすく、バウンダリー付近で対流活動が活発化することがある。特にサージバウンダリーを形成する暗域は寒気を伴うことが多く、寒気による不安定度増大の効果も加わり、対流雲を発達させやす

い。

図4-3-5は、ベースサージバウンダリーの事例である。日本付近は東谷の場となり、大陸にあるリッジで形成された気塊が流れ込みやすく、南海上にベースサージバウンダリー（図中三角印）を形成している。この時刻にはまだ対流活動は活発ではないが、6時間後バウンダリー付近でCbが発達・発生している。発達したこれらの対流雲は、6時間前はバウンダリー付近に散在するCg・Cu程度で、暗域の流入により対流活動が助長されたようにみえる。

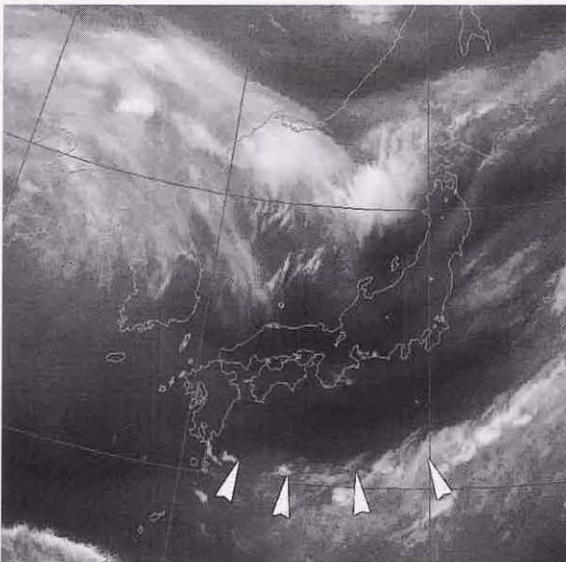


図4-3-5a 水蒸気画像 1999年6月5日18UTC

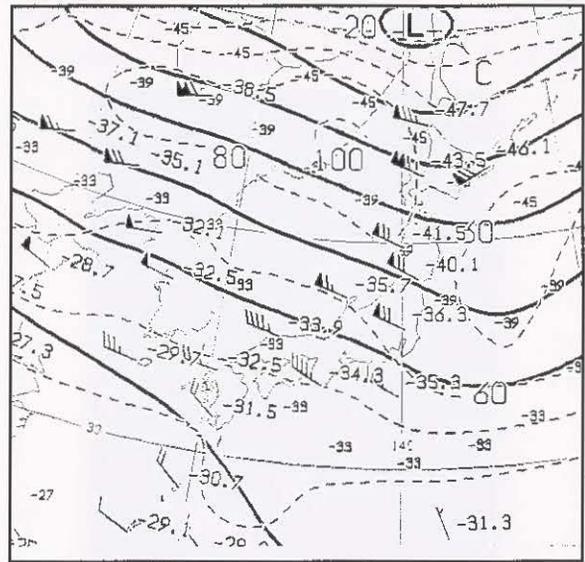


図4-3-5c 300hPa天気図 1999年6月6日00UTC

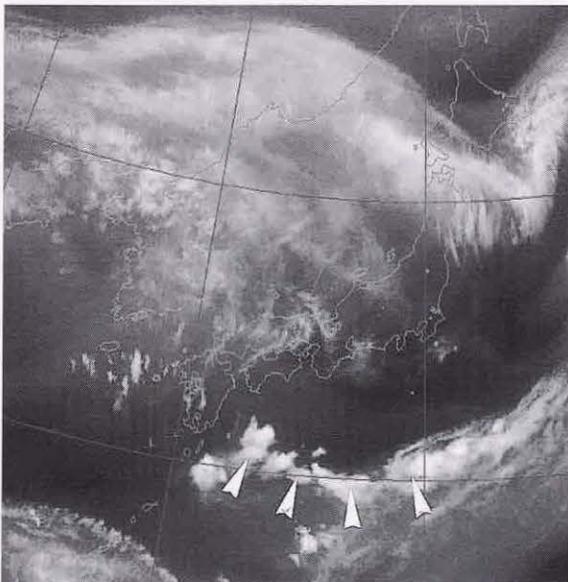


図4-3-5b 水蒸気画像 1999年6月6日00UTC