

# 430MHz のダクト伝搬について

## ～ダクトの発生メカニズムを考える

(改訂版 2004.01.04)

JG0TEV 中村 豊

### (1)はじめに

一般に430MHzの電波伝搬は「見通し距離による伝播」や「山岳回折による伝播」と言われていますが、時として数百キロ彼方からの電波が強力に受信でき、大騒ぎになることがあります。新潟県の事例でいうと、北は7エリアの秋田県や青森県、8エリアの北海道、西は9エリアの富山県、さらには3エリア、4エリア、6エリア、そしてHL, UAなどとの交信がそれです。これは「ダクトによる異常伝搬」と呼ばれており、UHF帯以上の周波数において見られる現象です。

(注意：2mまでのVHF帯では波長の関係上から理論上ダクト伝搬はできないとされています。)

強力なダクト伝搬においてプリアンブは必要ありませんし、アンテナもロッドアンテナ程度の利得でじゅうぶん交信することができます。

出力に至ってはQRP運用に相当する数W～数百mW程度でじゅうぶんできるのです。

もちろんハンディ機でじゅうぶんOK!

ではどのような時にダクト伝播ができるのでしょうか？ 探ってみましょう。

～ fun@ductではダクトの予想や発生解析を各種気象資料を用いて行っています。

ダクトによる大規模オープンスポット的なオープンも総観規模の気象変化の中で生じていると考えているからです。

### (2)通常の(標準大気における)430MHzの電波伝搬

430MHz電波の伝搬はその日の気象状況による大気の屈折率によって大きく変わります。

(注意：430MHz程度の波長では雨など空気中における降水粒子により電波の飛びが悪くなることはありません。あくまでも大気の屈折率による影響であることに注意してください。)

ここ数年、移動運用のベースポイントとして、長岡市のはずれを通る林道、通称「西山林道」の中に運用ポイントを選び、春先から秋までの約半年間に渡って同じ場所からの移動運用を行っています。

運用に使用するアンテナ、出力、リグ、その他の機材などの条件は比較のためにできる限り同じものを使用しています。

移動運用ポイントにおける標高は約300m近くありますので、通常交信が成立できる

「電波の見通し距離」はざっと片道70Kmといったところです。

この数値は「標準大気における電波の到達距離」として理論的に計算値で求められます。

ここでいう「標準大気」とは、ご存知のように大気層を断面として見たときに、地上付近から上空に向かって気温が下がり続け、大気の屈折率は少しずつ小さくなっていく状態をあらわします。

(上空に向かって「屈折率」は小さくなっていきますが、後で出てくる「修正屈折率」の数値は大きくなっていきます)

光学的見通し距離の算出  $L = 3.55 \times \text{送信アンテナの高さ(m)} \text{ (Km)}$

電波の見通し距離の算出  $L = 4.12 \times \text{送信アンテナの高さ(m)} \text{ (Km)}$

(電波の見通し距離算出係数4.12には標準大気における電波の屈折率を含みます)

電波の見通し距離の範囲内や山岳回折での交信は、通年安定して交信することができますが、さらに遠くとの交信となると相手局が手前側の地平線の影になってしまうので、標準大気中において電波は相手局のところまでは飛んでいかななくなってしまいます。

(注意：紙に図を書いて見ると容易にわかります。ただし、山岳回折や山岳多重回折は除きます)

ところが、普段は交信できない遥か遠くのエリアと驚くほど強力に交信できることがあります。これが430MHz帯以上における「ダクトによる異常伝搬」です。

日本は山岳と海洋が複雑に入り組んだ地形を持っています。ダクト伝播と山岳回折をうまく利用することでさらに遠方の局とも交信が可能になることがあります。

図1. 通常伝播

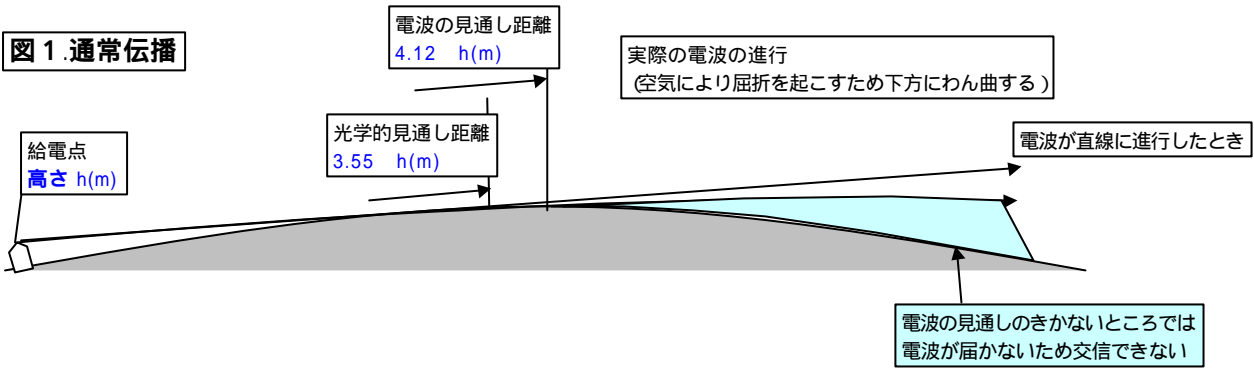


図2. ダクト伝播時の一例

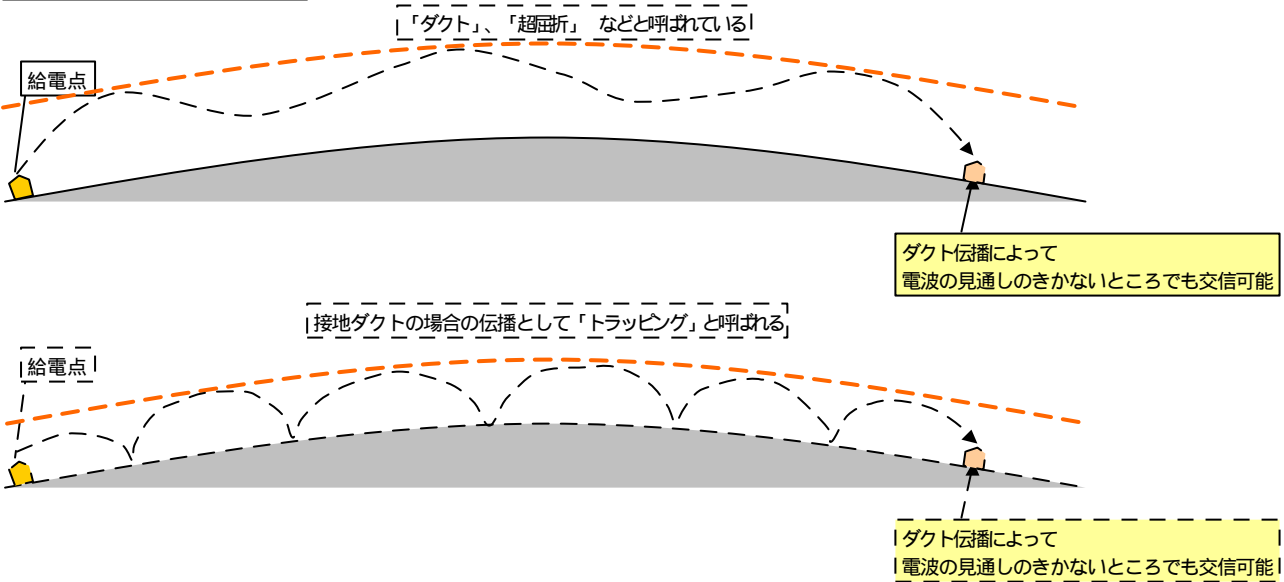
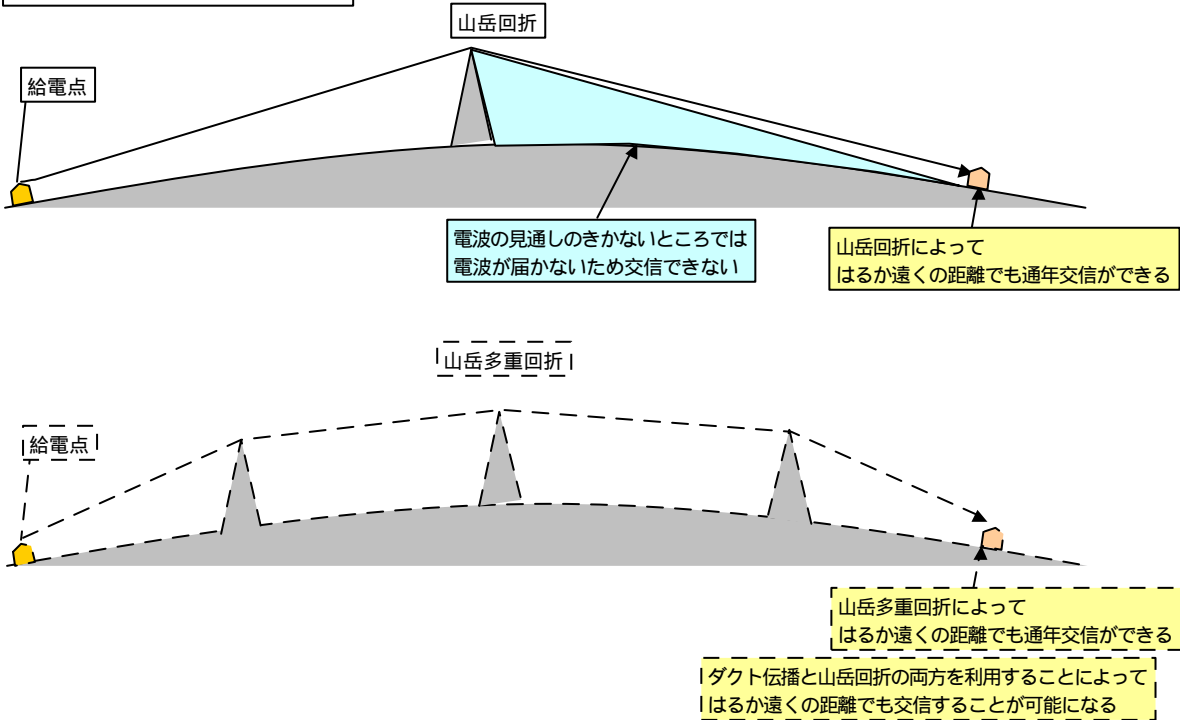


図3. 山岳回折利用時の一例



### (3) 「ダクト」とは？

「ダクト」という言葉には、  
「正体は何か良くわからないけど、とにかく遠くのエリアと交信することができてしまうすごいもの」というイメージがあります。そしてわけのわからないままいつからか「ダクト」という言葉だけが一人歩きしている風潮があることは少し残念なことです。  
「ダクト」とはご存知のように「逆転層」を指します。  
「逆転層」とは文字のあらわすごとく「大気屈折率分布が逆転している部分」をあらわします。

・・・詳細については無線工学などの書籍を参考されてください。

ですから「逆転層を形成するためのメカニズム」を知りそれを現実の気象現象にあてはめて精度良く予想することによってダクト発生によるオープンが予測できるというわけです。

ダクトは基本的には風の弱い晴天の日であれば接地逆転層として夕方から発生し次第に発達していき翌朝気温の上昇と空気の対流によって解消されていきますが、現実には気象変化にともなう気温の変化とその変化量、速さ、風、湿度変化などさまざまな要因によって発生頻度や発生時期、持続時間などは変わってしまいます。

また、局地的にダクトが発生していたとしても、数百Kmに渡って連続していなければ遠い彼方からの電波は受信できませんから、結局は1年を通して数回から数十回程度しかダクト伝搬として楽しめないことになってしまうのです。

よく言われている「コンディションが良い」とか「悪い」という表現は、大気中を伝搬する電波の伝搬状態が変わることによって感じていることなのです。

実際にはダクトが出ている状態というのは「異常な状態」ですから、「今日はダクトが出ているからコンディションがいい」という表現は不適切な表現といえるでしょう。むしろ「異常な状態」といったほうが適切でしょう。

一般に大気中での電波の屈折率は高度の上昇とともに一定の割合で低下します。つまりアンテナから地平線（水平線）に対して水平方向に発射された電波は距離が離れていくにしたがって地上に対して上空に向かうようになりますが、上空に行くに従ってわずかず地上側にわんきよくして進むのです。

#### # 標準大気中の電波の見通し距離の算出

アンテナから放射された電波が直接届く距離  
電波の見通し距離の算出  $L = 4.12 \times \text{送信アンテナの高さ(m)} \text{ (Km)}$   
あるいは  $L = 4.12 \times (\text{自局のアンテナ高さ } m + \text{相手局のアンテナの高さ}) \text{ (Km)}$

ところが、気象変化によってこの電波のわんきよく（屈折）の程度が変わることがあります。  
先に述べたように標準大気状態では大地の曲率と電波の曲率の間には

大地の曲率 > 電波の曲率

という関係があるので給電点からの距離が伸びるほど地上と電波との距離（高度差）が次第に大きくなっていきます。（図1参照）  
しかし、電波が上空に行くに従って電波の曲率（屈折率）が大地の曲率を上回る部分が発生すると「電波の超屈折」が発生します。  
（図2参照）

大気の状態によってダクト伝播が可能な状態であるかは、高さhによって修正屈折率Mがどのように変わるかが問題となります

#### 修正屈折率 M について

標準大気では地上からの高さにつれて気温が下がり修正屈折率 M は増加します  
気象条件によって上層の大気が下層の大気よりも高温、低湿度になると M の値は減少します  
修正屈折率 M の値が高さとともに減少する大気層を逆転層といいます  
逆転層と地表面または逆転層の上側境界面の M に等しい下層面との間にダクトが形成されます

大気中での屈折率の高さに対する変化率が負で、しかも通常より大きくなると電波の伝播の様子を決める修正屈折率の高さに対する変化率  $dM/dh$  が負になります。

この領域ができると電波はこの領域に閉じ込められて伝わるようになります。

この領域を「ラジオダクト」と呼びます。

図4 標準大気の修正屈折率変化

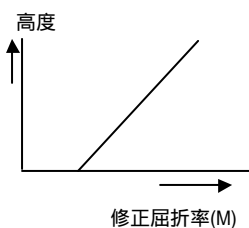
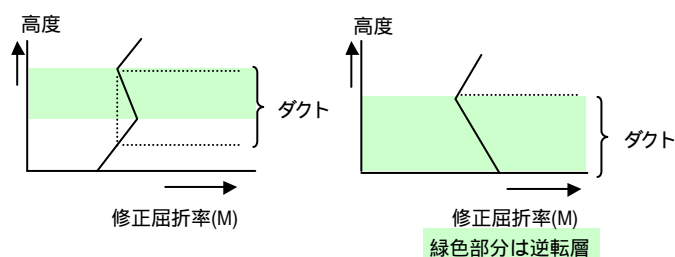
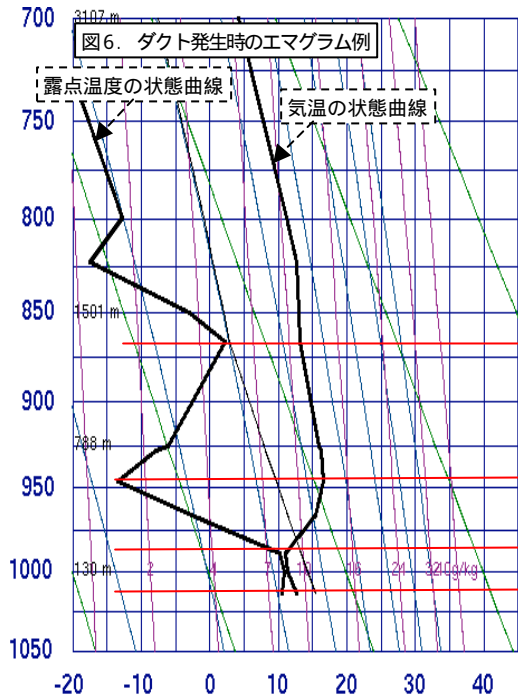


図5 ダクト発生時の修正屈折率変化



実際にエマグラムを使ってダクト発生状態であるか否かについて検討してみます



エマグラムの右側の実線は気温の状態曲線  
エマグラムの左側の実線は露点温度の状態曲線

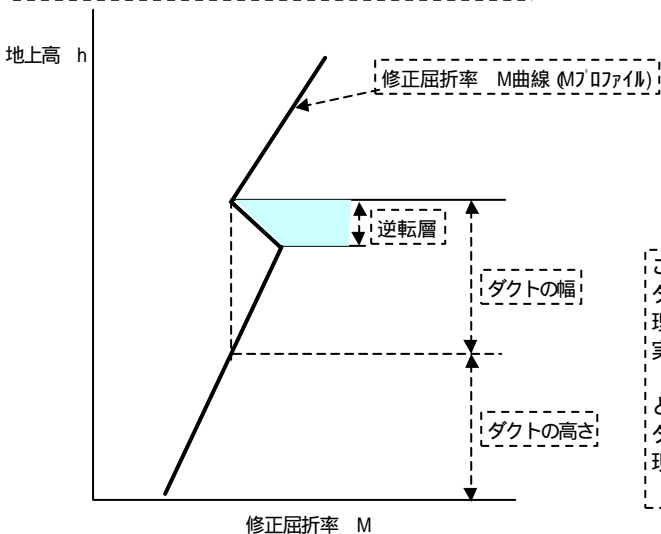
- 手順 1. 大気の屈折率  $n$  を求める  
$$n = 1 + ((79 * P) / (T * 1000000)) + (0.38 * e) / (T * T)$$
- 手順 2. 屈折指数  $N$  を求める  
$$N = (n - 1) / 1000000$$
- 手順 3. 修正屈折率を求める  
$$M = N + 0.157 * h$$
  
として算出します
- 手順 4. 修正屈折率の分布からダクト発生の有無を判定する  
<ダクト発生判定基準>  
 $dN/dh < -0.157$  ,  $dM/dh < 0$

今、仮に説明を簡単にするために左図のエマグラム上から任意の高度を選び ~ とした場合のそれぞれにおいて大気の屈折率、屈折指数、修正屈折率を求めてダクト発生状態であるか検定します。

P: 気圧(mb)	1016	P: 気圧(mb)	985	P: 気圧(mb)	945	P: 気圧(mb)	870
気温( )	13	気温( )	11	気温( )	16	気温( )	13
露点( )	10	露点( )	10	露点( )	-13	露点( )	3
T: 絶対温度(k)	286.15	T: 絶対温度(k)	284.15	T: 絶対温度(k)	289.15	T: 絶対温度(k)	286.15
e: 水蒸気分圧(mb)	12.2	e: 水蒸気分圧(mb)	12.2	e: 水蒸気分圧(mb)	2.25	e: 水蒸気分圧(mb)	7.5
h: 高さ(m)	0	h: 高さ(m)	250	h: 高さ(m)	600	h: 高さ(m)	1280
n=	1.000337	n=	1.000331	n=	1.000268	n=	1.000275
N=	337.1144	N=	331.2698	N=	268.4141	N=	274.995
M=	337.1144	M=	370.5198	M=	362.6141	M=	475.955
dN/dh ( - 間)	-0.02338	dN/dh ( - 間)	-0.17959	dN/dh ( - 間)	0.009678		
dM/dh ( - 間)	0.133622	dM/dh ( - 間)	-0.02259	dM/dh ( - 間)	0.166678		

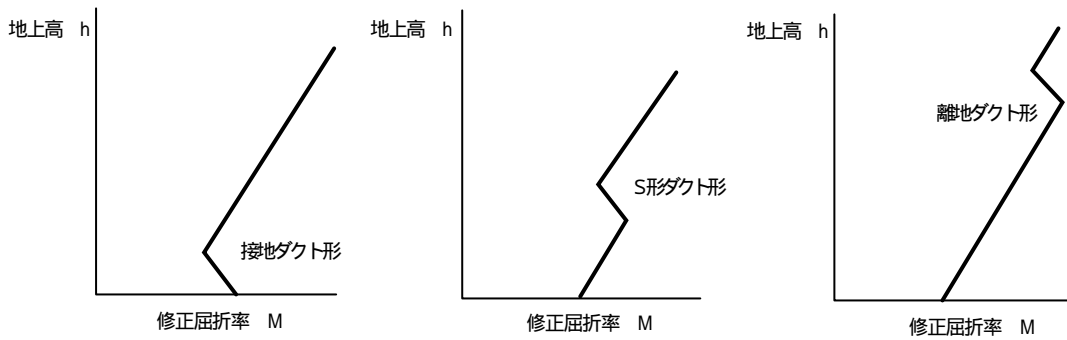
各間における屈折率の高さに対する勾配を求めると、 - 間の屈折指数  $N$ 、修正屈折率  $M$  の値と判定基準から「電波の曲率が地球の曲率より小さくなっている」ことより「逆転層が形成されている」「ダクトが発生している」と判断できます。

図7. Mプロファイルと逆転層・ダクトの幅・ダクトの高さ・種類



ここでは修正屈折率をもとにダクト発生の有無の判別のしかたを説明してありますが、理論上ダクトが発生していることが裏づけられていても実際にはオープンに至っていない事例があります。  
どのような場合に430MHzでのオープンが裏づけできるか、ダクト層の幅や高さ、水蒸気との関連などについて現在継続調査中です。

JGOTEV/中村



ダクトに対する電波の入射角が適当であれば、電波はダクトの中に閉じ込められダクト内で大きな屈折を何度も繰り返して、結果として見通し距離をはるかに越えたところまで伝搬するようになります。

#### (4)ダクト! その発生メカニズムに迫る!

「ダクト(逆転層)」は魔法や手品なんかではありません。  
ダクト発生に関して理論的に説明でき、また広く知られているものとしていくつか挙げると・・・

##### 空気の移流現象によるもの(移流性逆転)

海岸線付近で、朝から昼間にかけて暖まった地面上の空気が冷たい湿った海面上に流れていくと海面に近い下方の空気と上方の空気において空気の逆転層( $dT/dh > 0, de/dh < 0$ )が形成されます。

富山湾の屢気楼も冷たい海面上に流れ込んだ暖かい空気のうち、海面近くの空気が冷やされて「空気の逆転層」が形成されます。

屢気楼が発生しているときには必ずといってよいほどダクト伝播が体験できます。

また、日中は熱容量の大きい海面よりも熱容量の小さい陸上近くの空気の方が速く暖められます。

日中暖まった陸上の空気は上昇してそこに海上から比較的涼しい空気が陸上へと流れ込みます。

このとき陸上で空気の逆転層が発生することがあります。

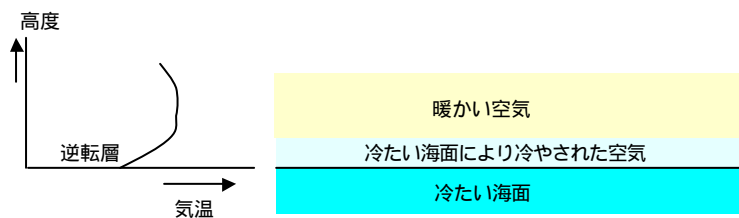
逆に、風の弱い晴れた日の夜間は海上の空気よりも地上の空気の方が速く冷やされるので冷やされた陸上の空気が暖かい海上に流れて逆転層を形成することがあります。

移流性逆転は、冷気の移流によって発生する場合もあります。

オホーツク海高気圧に伴い北海道から三陸にかけての太平洋岸では、オホーツク海高気圧から吹き出す暖かい空気が冷たい海面によって冷やされて海面付近に逆転層が形成されます。「やませ」といわれる北東気流が冷たいのはこのためです。

一般的に移流性逆転の発生高度は海風の発達高度に関係しますが、200m以下の低いところに出現することが多いとされています。

図8.屢気楼発生時・やませに発生時の大気の断面



##### 夜間冷却によるもの(放射性逆転・接地逆転層)

昼間、太陽から輻射される熱によって暖められた地面は、夜間には逆に熱を放出して冷えていきます。風の無い穏やかな晴天の日には、夕方から朝方にかけて地面が冷えるに伴って、これに接する大気が下方から冷やされ、逆転層( $dT/dh > 0$ ) (接地ダクト)が形成されます。

さらに雨が降って大地が湿っているときに、乾燥した空気が流れてきて地面から蒸発する水蒸気を受け入れる状態にあるときには、水蒸気を受け入れによってさらに空気が冷やされるので  $de/dh < 0$  という現象を伴い、強力なダクトが発生します。

夜間地表付近の陸風領域に発生し地上から高さ300m程度までに存在することが多いとされています。

盆地や内陸では逆転強度が強くなりますが、海上では海面温度の日較差が小さいため発生しにくいと考えられます。

図9.日中の大気の断面例

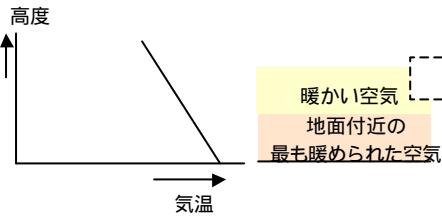


図10.夜間冷却時の大気の断面例

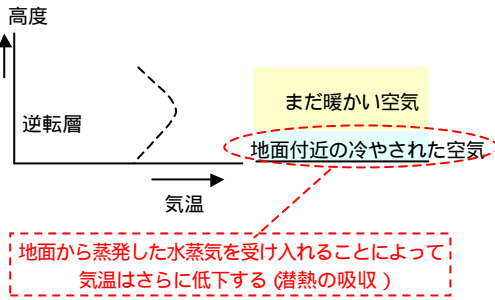


図11.放射性(接地)逆転の生成と崩壊(模式図)-1

逆転層の生成・発達 = 地表面からの放射により日没とともに地面に接する気層から逆転層が形成される。  
 夜間の冷え込みに伴い24時頃まで逆転層の厚さが増し、  
 その後日の出までは逆転層の強さ(逆転層上端と地上との気温差)が増す。  
 逆転層の解消 = 日の出とともに地面に接する気層から暖められるため逆転層が解消されていく。  
 この過程では上層にはまだ逆転層が残っているがやがて全層に渡って解消される。  
 逆転層の視覚的な確認 = 大気中に微細な塵や煤煙、排気ガスに含まれる不完全燃焼物が含まれているときに  
 接地逆転層が発生していると、朝と夕方2回にわたって接地逆転層の中に閉じこめられて  
 いる状態を確認することができる。

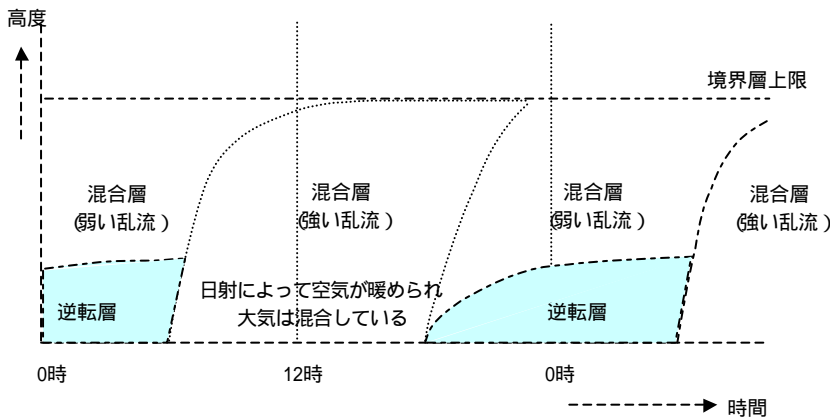
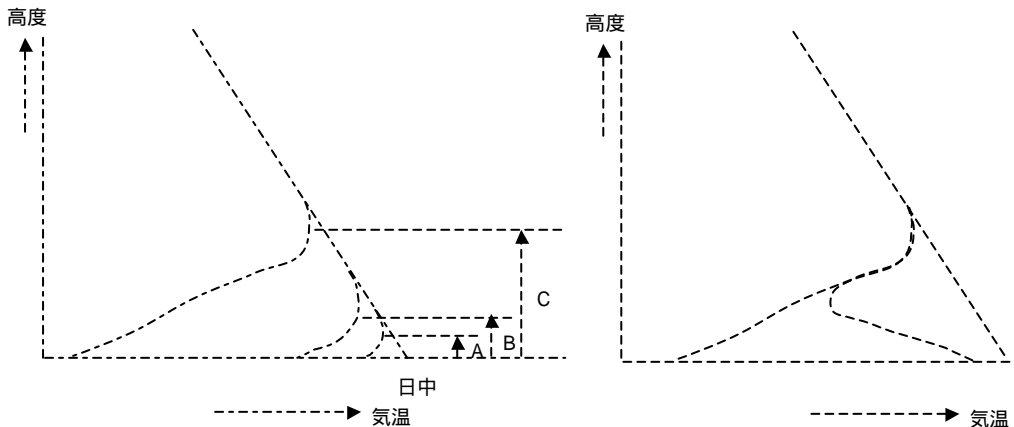


図12.放射(接地)逆転層の生成と崩壊(模式図)-2

逆転層の生成 = 日没後時間の経過とともに逆転層の厚さ、強さが増していく。のように  
 逆転層の崩壊 = 日の出後時間の経過とともに地面に接する気層から逆転層は解消していく。のように



逆転層発生時の大気の安定  
 = 逆転層が発生している状態では重い冷たい空気の上に暖かい軽い空気があるため安定している。混合しにくい。

逆転層解消時の大気の不安定  
 = 逆転層が解消していく状態では冷たい重い空気の下に暖められた軽い空気があるため対流しやすく不安定。混合しやすい。

接地逆転層の高度はその形成要因から気温の日較差によって高度を推定することが可能です。  
 簡単なモデルとして鉛直方向の熱輸送を考えると逆転層高度の最大値Hは次式により求められます。

$$H = (T_o - T_m) / \dots$$

$T_o$  = 地上の日最高気温  
 $T_m$  = 地上の日最低気温  
 = 逆転層内の鉛直気温勾配

実測結果の例によると、地上気温の日較差を  $T$  とするとき  
 $T < 5$  のとき 100m を超す逆転はほとんど起こらない  
 $T > 10$  なら 300m を超す逆転がおこることがある という報告例もあります

### 沈降現象によるもの(沈降性逆転)

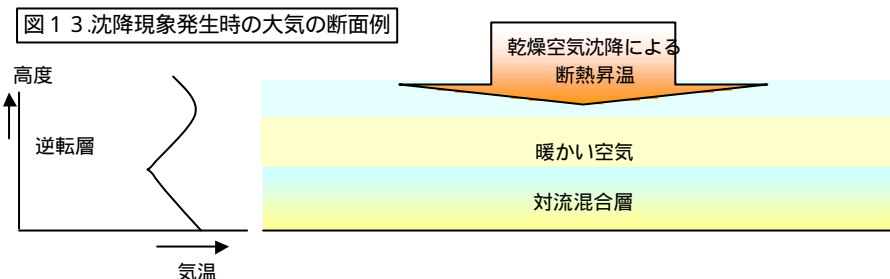
一般に高気圧圏内に生じるもので、「高気圧」の存在がとく言われる場合にはこの現象が大きく関連します。沈降現象とは高気圧圏内において空気が上方から下方に流れ、下方の大気を横の方に押し流しながら沈んでいく大気の垂直運動のことです。

乾燥した寒冷な空気が蒸発の盛んな海面または陸上に近づき、湿度の不連続性を生じてS形および離地形のダクトが形成されます。

一般に地表付近には乱流や日射による対流があるため沈降現象に伴う下降流は対流の盛んな層までは到達しません。

下降流がもっとも低下しても地上から数100mくらいとされています。

放射性逆転が夜間に発生しやすいのに対して、沈降性逆転は地上付近の日較差に影響されにくいいため終日に渡って形成されることがあると考えられます。



#### 沈降逆転層の特徴...

混合比は逆転層の底部でもっとも大きく、ここから上方に向かって急激に現象する。

沈降する気層の下面は逆転層の底面となる。ここに風の不連続が存在しやすい。

積雲などの下層雲が見られることがあるが、その雲頂は逆転層の下底高度となる。

沈降する空気は非常に安定な層を形成し、この下方の空気との混合は少ない。

数時間程度の間隔で気温の鉛直分布の変化を検討すると、沈降性逆転があれば

逆転層内の気温はほぼ乾燥断熱線に沿って変化するため、層の底部および頂部の温位は高度が変化しても

ほぼ一定であるため、混合比とともに温位に注目して沈降性逆転層を検出できることが多い。

沈降性逆転は移動性高気圧の進行方向前面でもっとも強く、下面高度も低くなる。

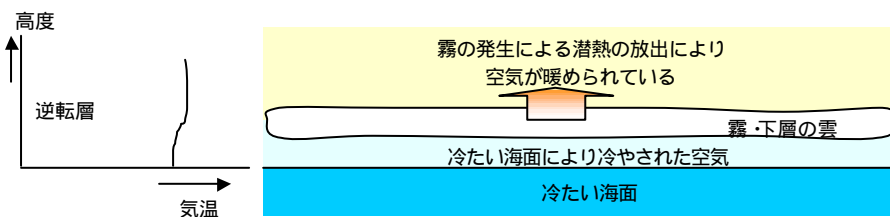
逆転面はしばしばドーム状になっていて、普通は地上の気圧上昇の中心上空でもっとも高くなっている。

...これらの特徴が実際にどのような形でオープン事例に至っているかは今後調査を続けていきたい。

### 下層雲・霧の発生によるもの

このほか、海面上の広い範囲に渡って空気が停滞し、かつ海面付近に濃い霧が発生している時は霧の発生に伴う潜熱の放出によって海面付近より霧の上方の空気の温度が高くなるため空気の逆転層が形成されることもあります。

図14.霧・下層雲の停滞時の大気の断面



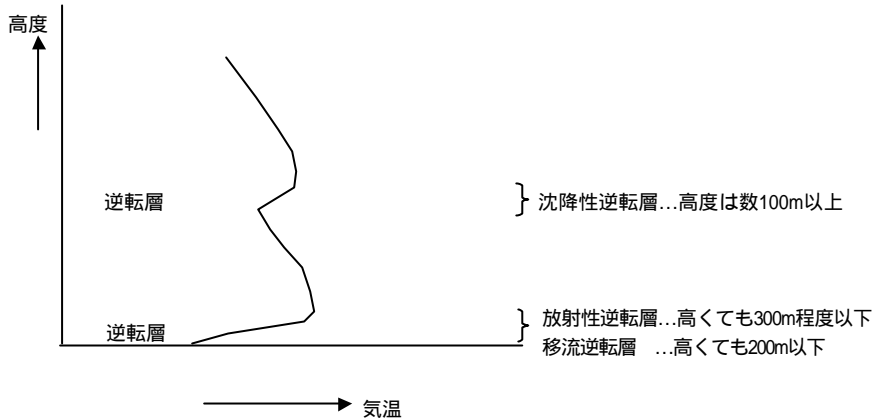
ダクト発生の予測として大切なポイントは、そのメカニズムを押さえることです。

実際の気象現象はさまざまな要因が複雑にかさなりあっていますので、どの要素がどの程度の影響を与えているかを把握したうえで、発生の有無、その規模や強さを推測していくことが大きなキーポイントとなるでしょう。

## (5) エマグラムから読みとれるいろいろな逆転層の例

エマグラムに逆転層の存在があったとき、発生している高度からどのような要因によるものか判別することが可能です。

図15 エマグラムの温度プロファイルから読みとれるさまざまな逆転層の例



## (6) ダクト解析～現状の課題と今後の展開

現在までのところ以上のようなことがわかっていますが、今後さらに調査をすすめていかなければならないことがたくさんあります。

- ・日本では接地逆転層は冬場に多く発生すると言われているが、冬場のオープン報告は極めて少ない
- ・沈降型逆転層は冬の季節風によって日本海側に雪を降らせるような場合でも形成されることがあるがオープン情報は皆無に近い
- ・Mプロファイルで逆転層が形成されていてもオープンが確認されていない事例が数多あるように感じる
- ・Mプロファイルで逆転層が形成されているかわからない状態でもオープン情報が飛び交っていることがある
- ・ダクトの幅や高さの違いによるダクト伝搬の違いは無いか
- ・大気中に含まれている水蒸気量の違いによってダクト伝搬の違いは無いか  
...などなど

上記に挙げてきた記載内容についても今後の新しい発見とともに随時見直していくことになるでしょう。

## (7) おすび

1995年から続けている移動運用では、当日の交信状況とダクト発生の有無を確認しながら継続調査をしています。すると見事にダクト発生のメカニズムの応用で理論的に説明ができるのです。逆に、理論的に説明できるものだからこそメカニズム、ポイントを理解していればダクト発生の予想ができるというわけです。

H F , V H F 帯の電波ではEスポによる伝搬が楽しめるように、日常は伝搬路における電波の減衰の大きい430MHz以上のUHF帯では、ダクトによる異常伝搬を楽しむことができます。

**あくまでも「異常伝搬」でのことですのでまったく実用にはなりません、楽しむ程度であれば興味の尽きないものといえるのではないのでしょうか。**

de JG0TEV

参考文献 一般気象学 (東京大学出版会)  
無線工学ハンドブック (オーム社)  
無線工学B (電機大出版局)  
環境汚染と気象 (朝倉書店)  
日本の気候 (古今書院) 他



# 430MH のダクト伝搬について

## ～ダクトの発生の実例からメカニズムを検証する

(初版 2003.11.28)

JGOTEV 中村 豊

### (1)はじめに

最近におけるダクト発生によるオープン実例の代表例をもとにダクト発生のメカニズムを検証を行います。

### (2)オープン実例にみるダクト発生メカニズムと検証

ダクト発生メカニズムの代表例

空気の移流現象によるもの

夜間冷却によるもの

沈降現象によるもの

下層雲・霧の発生によるもの

この中で比較的大規模そして頻繁に発生するものとして 夜間冷却によるもの 沈降現象によるもの  
下層雲・霧の発生によるもの が挙げられます

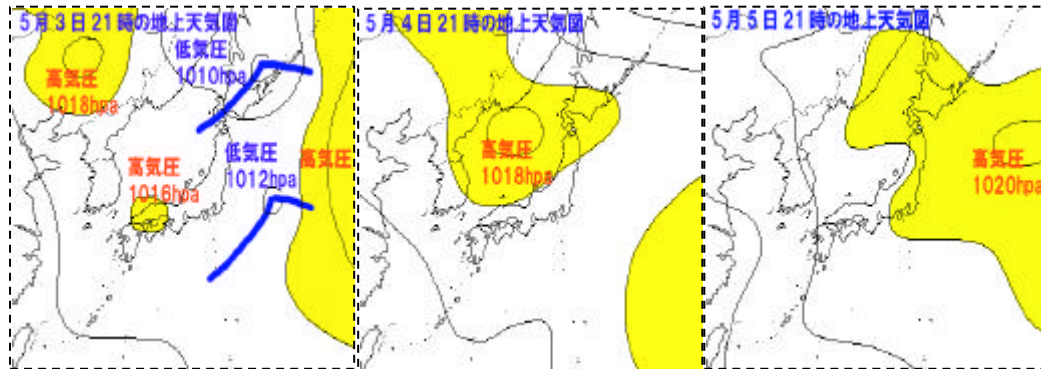
事例 2003年 5月3日～6日にかけての大オープン

( 夜間冷却 + 沈降現象 + 下層雲・霧の発生 による相乗効果 )

この期間は移動性高気圧が勢力を強めながら日本付近を通過しました。  
乾燥空気を伴った高気圧が勢力を強めたことによって、乾燥空気による下降流が発生。  
広い範囲に渡って一様に沈降現象による断熱昇温が生じたと考えられます。  
また、長時間にわたって気圧が上昇しつづけた(下降流が継続した)うえに、晴天による気温上昇によって水蒸気が地表付近(海面付近)に閉じ込められる状態が形成されました。  
また、日本海の広い範囲に下層雲あるいは霧が発生し、この上側では水蒸気の凝結に伴う潜熱の放出によって上空の空気が暖められる現象が発生したと考えられます。  
以上のメカニズムから3日に発生したダクトは時間の経過とともに強力となり、ダクト発生条件が崩れ出す6日まで広範囲に渡る強力なオープンが確認されました。

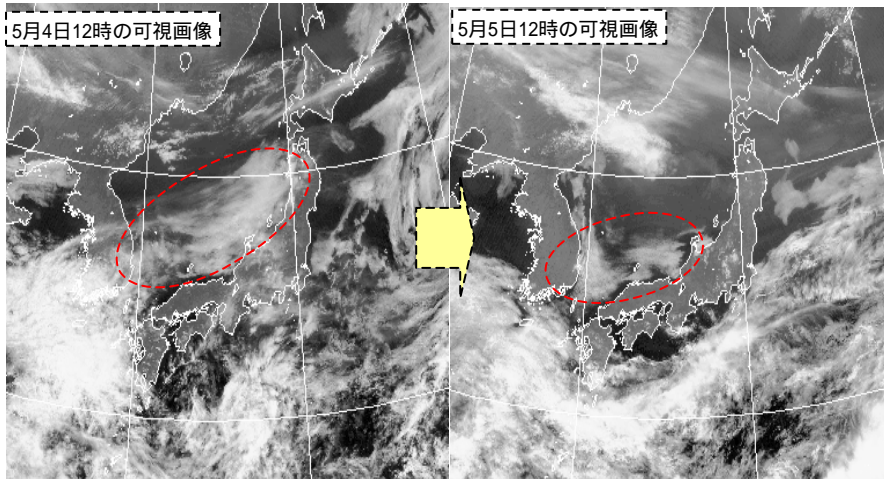
< 5月3日～5日にかけての地上天気図 >

移動性高気圧が勢力を強めながら日本付近をゆっくりと通過した。



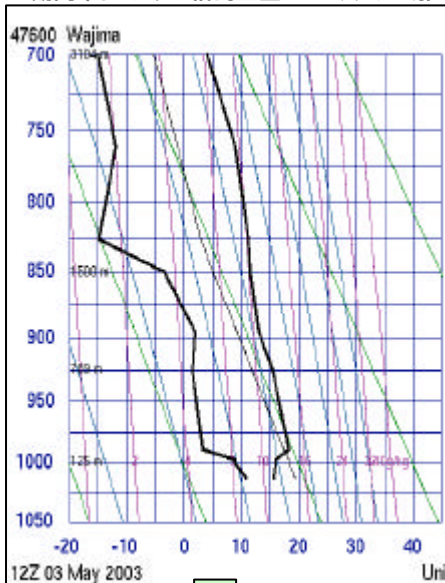
< 5月4日～5日にかけての気象衛星可視画像 >

日本海の広範囲に渡って下層雲・霧が発生していることがわかる。



< 5月3日～5日にかけての輪島上空エマグラムとMプロファイルによる検証 >  
 3日に発生した空気の逆転層が時間の経過とともに明瞭になっていくのがわかる。

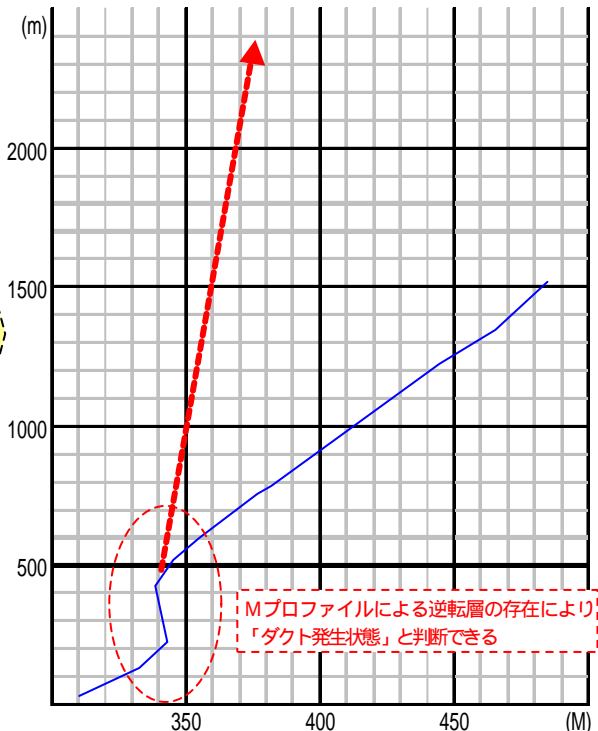
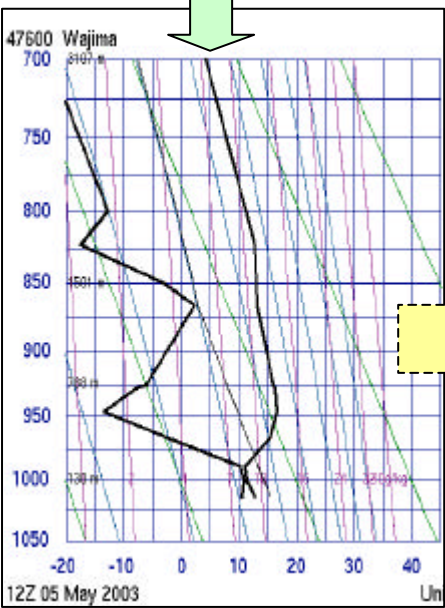
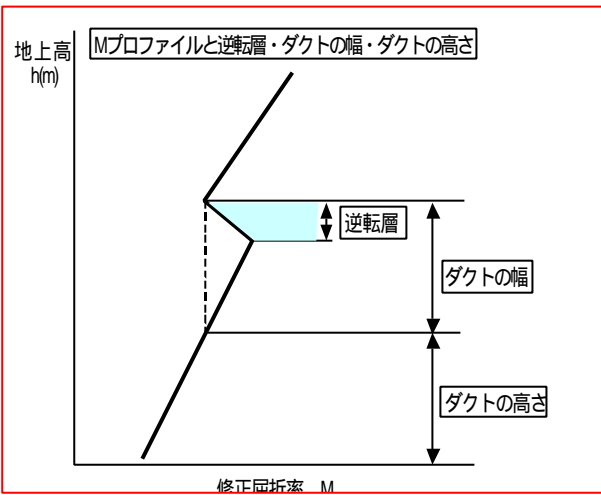
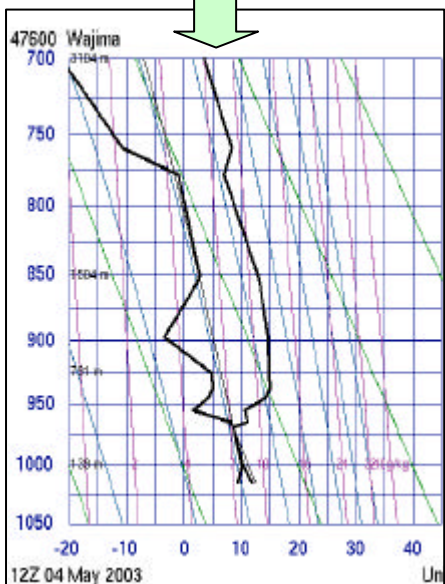
期間中における輪島上空のエマグラム推移



「エマグラム」と「Mプロファイル」について

エマグラムは気温と露点温度の分布を知ることができます。

Mプロファイルは大気の屈折率分布を知ることができるので、ダクト発生状態であるか否かを判断するには「Mプロファイルによる判断」を行います。



Mプロファイルによる逆転層の存在により、「ダクト発生状態」と判断できる