

# 電磁波伝搬の可視化

元電子情報支援隊司令 阪上廣治（72 幹候）

## はじめに

米海軍は、90 年代初期に洋上でのレーダの低高度目標に対する最大探知距離が予想より短いと結論した。それは極低層大気のリゾダクト、特に蒸発ダクトに関係しているという。英国防省の文献によれば、1967 年以降、対艦ミサイルに関わる戦闘は 241 回生起しており、ハードキル（ミサイル等）で対処したのが 1 回、ソフトキル（電子戦兵器）で対処したのが 127 回、対処できなかったのは 113 回である。これに対する米海軍の分析は、「状況把握の欠如、即ちレーダ探知に問題、さらにダクトでレーダ探知性能が低下している」である。対艦ミサイルのレーダ断面積は小さくなり、さらにダクトの影響でレーダ探知距離が予想より短くなっているという。<sup>1</sup>

電磁波は大気中を伝搬する際に屈折する。屈折率は気温、水蒸気および気圧の関数である。この 3 要素は高度が高くなるにつれ低下すると、ものの本には書いてあるが、実際は気温と水蒸気はこの通りにはならないことが多い。気温や水蒸気の鉛直変化が逆転すると、逆転層が発生しダクトが形成される。ダクト高がレーダ高より高い場合、ダクトが導波管になりレーダ波は取り込まれ、ダクト層の上を飛行する目標を探知できないことになる。

以下、電磁波の異常な伝搬の特性、それを検知し利用する諸外国の動向について述べてみたい。

## 1. 気象が電磁システムに与える影響の可視化

米海軍は、90 年代末の METOC（気象・海洋）プロダクトでは、イージス武器システムの性能を最大に発揮するには不十分であり、リトラルでの気象環境状態をリアルタイムに把握するために必要な空間的、時間的な分解能を持っていない、と結論した。<sup>2 3</sup>

技術はレーダ等のセンサーの有効性や能力を改善したが、その有効性等は依然として気象・海洋環境に左右される。

例えば、レーダ覆域にはダクトによりスキップゾーンやレーダホールが生じる。また逆にレーダ波が水平線以遠に伝搬し、自艦が相手を探知する前に逆探知される恐れもある。さらに電波の屈折によって、探知した目標の高度が実際と違うことがある。

通信においては、ダクトにより途絶や干渉が生じる。遠距離での逆探知の恐れもある。

<sup>1</sup> Association of Old Crows: Journal of Electronic Defense, p.24 (2012)

<sup>2</sup> Kenneth Anderson : "Radar detection of low - altitude targets in a maritime environment," SPAWAR, USA (1993)

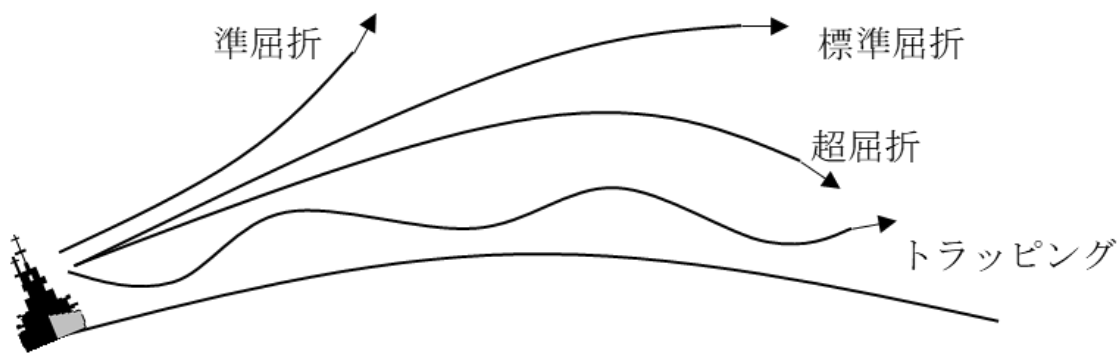
<sup>3</sup> Dean Sadanaga, "Performance evaluation of integrated METOC measurement system supporting naval operations," Naval Postgraduate School, USA(1999)

武器システムでは、ダクトにより目標の高度誤差が生じた場合、SAM（対空ミサイル）の中間誘導で誤差が生じる。SAMはダクト下では増強されたシークラッタを受信することになり、目標ロックオン率が低下する。

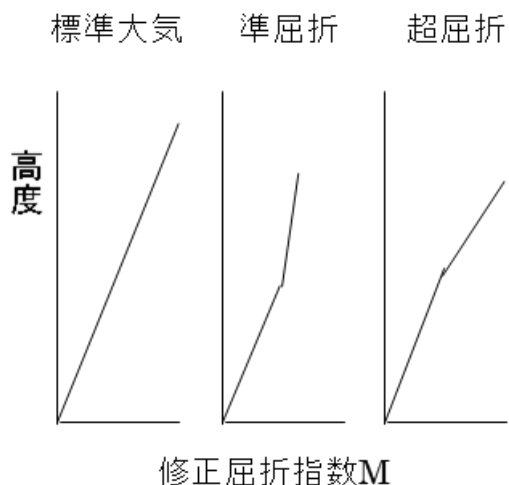
そのため米海軍は電磁波環境を可視化し、状況把握、戦術的意思決定、およびセンサーの設定等を最適化しようとしている。

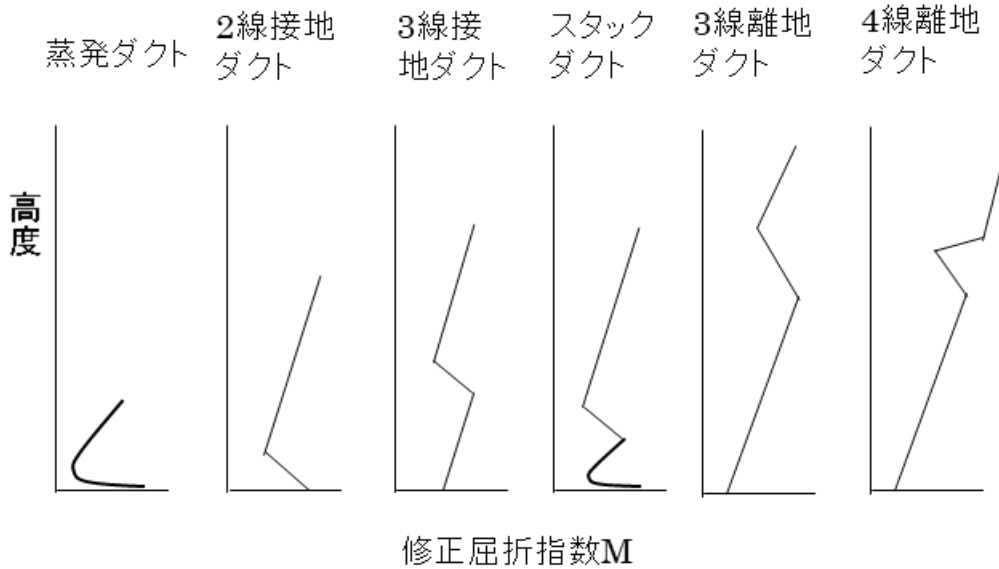
## 2. 電磁波伝搬の特性

電磁エネルギーは大気中を伝搬する際に気象特性により屈折する。屈折には下図の通り4つの形態がある。準屈折は送信機から放射された電磁エネルギーが徐々に地表面から離れる。標準大気下ではわずかに地表に曲がる。それより大きく地表に曲がるのが超屈折である。地表に近いところでトラップ（trap）が起きるのがトラッピングはダクティング（ducting）ともいう。



上記の形態について修正屈折指数（M）と高度を変数にして区分したのが、下図である。





標準大気では  $M$  が高度に伴い直線的に増大する。通常使用しているレーダ水平線は標準大気の場合を前提にしているが、電磁波はわずかに地表面側に屈折するため、光学水平線よりわずかに遠くなる。

準屈折はある高度で  $M$  の勾配が減少するため、電磁波は地表面から離れる方向に屈折する。超屈折における  $M$  曲線は準屈折と逆である。この場合、電磁波到達距離は通常のレーダ水平線よりさらに遠くなる。

下段はダクトである。蒸発ダクトは艦艇に最も影響を与える現象である。海面から水蒸気は常時発生しており、この水蒸気の影響を受け、 $M$  曲線は図のようになる。図の最小  $M$  値がダクト高である。このダクト高は最大 40m 程度である。影響を受ける周波数は、原理的には 100MHz 以上であるが、ダクト層の厚さの関係から 3GHz 以上が影響大である。

接地ダクト下での  $M$  曲線は 2 線と 3 線がある。ダクト層が地表面に接していることから接地ダクトと言う。ダクト高は 50~300m である。ダクト高が高くなるため、VHF でも影響を受ける。これが発生する気象条件は、高気圧による空気塊の沈降、夜間冷却、海陸風の移流、および前線などにより、高度とともに温度が上昇する場合、即ち温度逆転が起きる場合である。

スタックダクトは蒸発ダクト層に接地ダクトが重なった場合である。

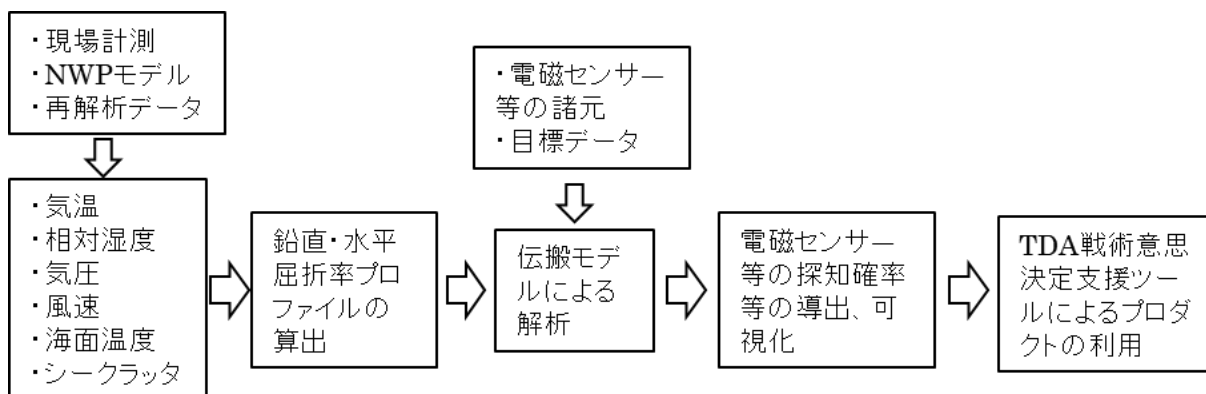
離地ダクトは、ダクト層が地表面から離れている場合である。 $M$  曲線は 3 線と 4 線がある。離地ダクトは上空の冷たい気流が湿った空気の上に乗り上げたときに発生し、その際、大気は高高度で局部的に圧縮され加熱されることになる。その結果、離地した温度逆転層と湿度の捕らえこみ (trapping) が起きる。ダクト層は通常 1,500m 以下に形成されるが、ときには 4,500m にもなる。ダクトの厚さはかなり大きい。このダクトは航空機のレーダや通信に顕著な影響を与える。

ダクトの発生率は、日本周辺で 50% 以上、南シナ海からベンガル湾では 40% 以上、アラビア海、ペルシャ湾、およびアデン湾は 60% 以上となっている。さらにダクト別の発生率は、南シナ海では、蒸発ダクト (高度 10m 以上) 約 8 割、接地ダクト 1 割弱、離地

ダクト 2 割弱となっている。4この数字から分かる通り、各国とも蒸発ダクトに最も関心を寄せている。

### 3. 電磁波伝搬の可視化プロセス

電磁システムに気象が影響する状況を常時把握し可視化するため、環境の気象データを得て、屈折率を求め、それを伝搬モデルで解析し、最終的に電磁システムの性能を計算・可視化するプロセスは下図の通りである。



以下、このプロセスに従って解説する。

#### a. 環境の気象データ

求める気象データは、艦艇が自艦の観測センサーで得るか、あるいは数値気象予報 (NWP) データや再解析データを気象機関から得ることができる。

シークラッタは極低層大気の屈折率を求めるための要素である。余計な装置が不要であることから、海外では盛んに研究されている。

NWP は最新の気象データから数時間、数日先の気象を予想するものである。気象庁にも NWP として、全球、メソ、および局地モデルがある。局地モデルはレーダ性能を評価するのに十分な精度を有している。米海軍は、艦艇が計測した気象データと COAMPS という NWP モデルを使用する。このような形態はカナダ、ニュージーランド、英、およびオランダ海軍でも同様である。

再解析データは、NWP データと同様に欧米や気象庁で作成されている。過去数十年の気象データを統計処理したものであり、将来の作戦における海域の電磁波伝搬特性を分析するために使用される。

#### b. 鉛直・水平屈折率プロファイルの算出

屈折率プロファイルは、鉛直と水平方向に求める。米海軍は、極低層は蒸発ダクトモデルによって、上層および広域は NWP モデルのデータから屈折率プロファイルを求め

<sup>4</sup> Caglar Yardim, "Statistical estimation and tracking of refractivity from radar clutter," Univ. of California, USA (2007)

る。極低層の鉛直屈折率プロファイルを求めるモデルは種々開発されている。

### c. 伝搬モデルによる解析、評価

鉛直・水平プロファイルは、電磁センサー等の諸元および目標データと共に、伝搬モデルに入力され解析される。このモデルも各国で種々開発されている。

### d. 電磁センサー等の探知確率等の導出、可視化～TDA(戦術意思決定支援)

#### ツールによるプロダクトの利用

伝搬モデルの解析結果からセンサーの探知確率等を可視化し利用するためにTDAツールが開発されている。これは、米海軍では艦艇用に MORIAH、陸上司令部用に BUILDER、英海軍は NEMESIS、オランダ海軍は CARPET、スランス海軍は PREDEM、およびトルコ海軍は PETOOL である。

## 4. 諸外国の取り組み

### a. 米海軍の取り組み

米海軍はダクト計測プログラムを1989年に開始した。ダクトに関わる研究場所の1つは、カリフォルニア州、サンディエゴ沖にある米海軍情報戦センターの F35 サイトである。

2014年からは、CASPER 複合大学研究計画プロジェクトが、米海軍研究局をスポンサーとして始まった、多くの専門分野の大学間研究構想であり、沿岸の海洋大気境界層での電磁波伝搬に関する全般的な知識の欠落に対応するものである。CASPER プロジェクトのゴールは、リトラルでの大気内の電磁波伝搬に関して、空・陸・海を結合した数値シミュレーションおよび予測を改善することである。重点は、電磁ダクト環境である。<sup>5</sup>

米海軍は以前 AREPS という屈折効果予測ソフトを公開していたが、バージョン 3.6 以降は非公開となった。その後抜本的に改善している。

### b. 中国の取り組み

中国の大気ダクト予測の研究開始は2000年前後であり比較的遅い。しかし、その後の研究は活発であり、東シナ海から南シナ海、そこからアデン湾に至るまで研究を実施した。その中でも南シナ海は常続的な観測・予報態勢を敷いている。

2002年、東シナ海で広域の蒸発ダクト高予報を研究した。これは東シナ海、台湾東方

<sup>5</sup> Naval Postgraduate School, “Coupled Air Sea Processes and EM Ducting Research (CASPER)”, <[https://www.unols.org/sites/default/files/201708sco\\_ap14.pdf](https://www.unols.org/sites/default/files/201708sco_ap14.pdf)>

海域において、蒸発ダクトモデルと NWP モデルを組合わせて蒸発ダクト高を予報するものである。福建省沿岸に気象観測塔を設置している。<sup>6</sup>

2011 年、西太平洋と南シナ海の蒸発ダクト高の予報について研究した。これは米海軍の NWP データと蒸発ダクトモデルを利用している。<sup>7</sup>

2014 年には南シナ海で各種の蒸発ダクトモデルの適合性について研究した。またこの海域には高さ 100m の観測塔、観測ブイ、観測船を配置して、観測網を敷いており広東省広州市でモニターしている。<sup>8</sup>

2010～2012 年には、調査船により南シナ海からベンガル湾までダクトの発生率等を調査した。<sup>9</sup>

2015 年にアデン湾の蒸発ダクトについて研究している。利用したモデルは米海軍大学院の蒸発ダクトモデルおよび米国環境予測センターの再解析データである。<sup>10</sup>

### c. オランダの取組み

オランダの沿岸警備隊は、北海のオランダ EEZ 内をレーダと AIS（船舶識別装置）で海上交通を監視している。センサーの覆域や探知距離の問題は、状況把握、海上交通の安全確保および不法行為の取締りに影響する。沿岸警備隊の AIS と沿岸レーダのオペレータは、任務中、北海のオランダ EEZ 内において、AIS と沿岸レーダの覆域ギャップや探知距離の変化のような異常現象を何回も経験しているという。このような異常現象は電磁伝搬への環境の影響、即ち異常伝搬が原因という。このため、NWP データを利用して AIS とレーダの覆域を毎日予報し、オペレータの監視任務を支援している。<sup>11</sup>

## おわりに

平間洋一氏（幹候 8 期）の随想『日本海』に日本海の特性についての記述がある。随想には、舞鶴の第 31 護衛隊司令のとき（1980～1982 年）日本海で（ラジオ）ダクトを経験されたことから、「電磁波伝搬等を含む自然現象を解明し利用する態勢を早急に確立すべし」と主張されている。<sup>12</sup> 筆者も艦艇勤務時ダクトと思われる現象を何度か経験した。例えば演習で山陰沖（対馬暖流の流域）を航行中、低空で接近してきた仮想敵 P-3C が部隊内の 3 種類の対空レーダに探知されず HVU をオントップしたことがあった（見張りは発見していた）。本機が離隔し高度を上げたところで初めてレーダにエコー

<sup>6</sup> Shaobo Yang, et al., “Application of the PJ and NPS evaporation duct models over the South China Sea in winter,” Tianjin Univ.(2016)

<sup>7</sup> ditto

<sup>8</sup> Shi Yang, et al., “A New Evaporation Duct Climatology in the South China Sea,” Northwestern Polytechnical Univ. , China (2015)

<sup>9</sup> Zhao Xiaofeng ,et al., “Statistical estimations of atmospheric duct over the South China Sea and the tropical Eastern Indian Ocean,” PLA Univ. of Science and Technology, Chinese Academy of Sciences, China (2013)

<sup>10</sup> Qi Zhang, et al., “Spatial and temporal variability of the evaporation duct in the Gulf of Aden,” Northwestern Polytechnical Univ., China (2016)

<sup>11</sup> E.R. Bruin, “On propagation effects in maritime situation awareness,” Utrecht Univ., Nederland (2016)

<sup>12</sup> 平間洋一, “「日本海」(我が海、我が庭、我らが祖父 栄光の海),”  
<[http://hiramayoihi.com/keireki/ke\\_nihonkai\\_kansentoanzen.pdf](http://hiramayoihi.com/keireki/ke_nihonkai_kansentoanzen.pdf)>

として現れた。

新潟の気象レーダが秋田沿岸の風車群からのレーダ反射を降雨と誤観測したことがある。気象庁のホームページには異常伝搬が原因となっている。そのレーダと風車の間は**200km**を越えておりほとんどが海面である。レーダ波伝搬経路にかなりのダクトが発生したのであろう。

その他我が国ではダクト現象は各地に見られるが、ダクトの場所を特定し、可視化する試みは見られない。筆者らは平成 29、30 年に海自の「異常伝搬に関する調査研究」に参加し、長崎沖に計測船を出して約 1 週間実験した結果、ダクトは毎日発生していることを確認した。空自や陸自にも監視レーダが目標を途中で失探するという現象を関係者から聞いている。

筆者は継続して研究するが、我が国において平間司令の主張にかなうような研究が引き続き実施されることを願う次第である。