

夜間の電離層吸収

I. 第2-8次南極観測船上短波電界強度測定

若井 登*・大瀬 正美**・田之畑一男***

HF RADIO WAVE ABSORPTION IN THE NIGHTTIME

PART I. MEASUREMENTS OF THE FIELD INTENSITY OF HF RADIO WAVES ON BOARD THE SHIP FOR THE 2ND (1958)-8TH (1966) JAPANESE ANTARCTIC RESEARCH EXPEDITIONS

Noboru WAKAI*, Masami OSE** and Kazuo TANOHATA***

Abstract

Observations of the nighttime ionospheric absorption have been carried out since 1958 on board the ship for the Japanese antarctic research. Field intensities of the HF standard frequency signals at different frequencies were measured during hours around midnight.

In this paper, techniques of the measurement for extracting a relatively small quantity of the nighttime absorption are described.

Existence of the absorption is confirmed from the fact that the rate of decrease of field intensities against the ground range at a lower frequency is much larger than that at a higher frequency. Moreover, the dependence of absorption upon the solar activity is found out from the measurement over nine years in the declining epoch of the last solar cycle.

A provisional expression for estimating the nighttime absorption is proposed.

1. 緒 論

短波の伝搬は、ごく近距離を除いては、ほとんど電離層という絶えず変動する媒体を介して行なわれる。この短波電波の受信電界強度の算定法は、無線通信上の必要性から、電離層の性質の理解と相まって、現在に至るまで各国で研究されてきた (CCIR, 1966a)。

* 電波研究所 平磯支所. Hiraiso Branch, Radio Research Laboratories, Nakaminato-shi, Ibaraki.

** 電波研究所 電波部. Radio Research Laboratories, Koganei, Tokyo.

*** 電波研究所 山川電波観測所. Yamagawa Radio Wave Observatory, Radio Research Laboratories, Ibusuki-gun, Kagoshima.

本文では、電界強度変動を引き起こす多くの要因のうち、従来の算定法に加味されていなかった、また電離層物理学的にも理解のうすかった、夜間の電離層吸収に関して、実験結果とその解析をのべる。

IGY（国際地球観測年、1957～1958年）を契機として開始された日本の南極観測において、南極までの往復の船上で、短波電界強度の測定が第2次観測（1958）から実施された。その結果、従来無視しうるほど小さいと考えられていた夜間の電離層吸収が、伝搬距離、使用周波数によっては、相当の量に達することが明らかにされ（WAKAI, 1961）、研究の重要性から現在に至るまで引き続いて観測が行なわれている。このうち第6次（1961～1962）観測の結果は、田之畑・石川（1963）により解析され、量的には多少のくい違いはあるにせよ、夜間吸収の存在は確認された。このプロジェクトは今後も引き続いて実施されるが、太陽活動のほぼ1サイクルを経過し、一応所期の成果のあがったこともあり、理論的解析の一部もできたので、現在までの結果を総括的にまとめることにした。今後の結果は解析がすみ次第、逐次発表する予定である。

南極船上電界強度の測定は、送受信中点が正子にあたる時刻に、標準電波の停波時間の相違を利用して、人が希望測定波を確認しながら（測定誤差の原因となる混信波の有無を確認しながら）行なうという、測定技術的に初期の段階と、標準電波の側帯波だけを狭帯域フィルターにより抽出し、標準電波同志の混信妨害を除去して、自動的に強度変動を測定するという第2の段階とに区分できる。たまたまこの前期（第2次観測、1958年～第8次観測、1966年）が、太陽活動の極大期から極小期への下降の半サイクルにあたり、後期が新たなサイクルの上昇期に相当することもあるが、本文の第I部においては、前期の測定の概要と、太陽活動の変化に伴う電離層吸収の変化についてのべることにする。第II部においては、標準電波受信自動記録装置とそれによる測定記録に関する技術的記述を主にした測定結果の報告を行ない、さらに第III部において、夜間電離層吸収の理論的背景と測定結果の定量的解析についてのべる。

2. 船上電界強度測定の目的と測定電波

南極観測の目的は、日本にとって唯一の高緯度観測所である昭和基地において、極地特有の地球物理学的観測ならびに研究を行なうことである。と同時に副次的ではあるが、地球半周に相当する広大な地域を経由しての航海途上における多分野にわたる船上観測も、南極観測の大きな眼目の一つであった。電波科学部門では、現在までに多くの船上観測を実施して

きたが、船上電界強度測定は、船の移動という特長を生かした電波伝搬実験としては格好の観測項目である。

短波帯電波による通信は、電離層と地表との間を反射をくり返して伝搬する空間波に主として依存している。従って、受信点での電波強度に影響を及ぼすのは、送信機およびアンテナの諸条件、送受信点間距離、受信機感度、受信アンテナ等いわば人為的要因の他に、伝搬媒体である電離層と、それを通過する時の電波の状態である。一般的にいて短波電界強度の測定は、電離層吸収の変化特性を明らかにすることが目的であるが、本文で報告する船上電界強度測定は、従来ほとんど問題にされなかった、夜間の電離層吸収を究明するために、実施されているものである。

夜間の電離層吸収の存在が、はじめて実験的に確かめられたのは、第2次南極観測の帰途であった。電離層吸収の主因であるD、E層の電子密度は、日没と同時に、急速に減少する。従来信じられていたように、もしも電波がその領域を通過する際にうける吸収は、ゼロであるとする、電界強度の距離に対する逓減率は、理論的に周波数に無関係（送信電力、アンテナ指向性、伝搬モードは同じとして）になる。しかし実際に、第2次と第3次観測に際して、4つの異なる周波数で、夜間測定された電界強度の距離に対する低下の度合は、周波数が低い程大きいという結果になった。しかも吸収が無偏倚（non-deviative）であるとする、量的にも実測結果をよく説明できることから、夜間も存在する 10^3 個/cm³程度のE領域の電離が、この夜間電離層吸収の原因であると結論された（WAKAI, 1961）。距離に対するこの変化特性を、異なる伝搬距離をもつ固定局間の実験から求めることは、測定技術的に非常に難しい問題であって、量として小さい夜間吸収が検出できたのは、移動しながら同一局の電波強度を連続的に測定するという方法によったからである。本プロジェクトこそ船上観測の特長が十分に生かされた好例であるといえよう。

測定上の必要性から、測定波は、周波数、出力共に安定しており、同一地点から異なる周波数で常時発射されているという条件をすべて備えた標準電波（JJY）が選ばれた。更に南アフリカ連邦ヨハネスブルクから発射されているZUO局標準電波も補足的に測定された。送信諸条件の明細が不明なため、測定データの定量的解析は行なわなかったが、距離に対する変化の傾向はJJYと非常によく一致している。

3. 測定機器と測定法

使用した装置は、携帯型の短波電界強度測定器であって、それぞれ較正されたループアン

テナと校正用発振器を備えており、 $1\mu\text{V}/\text{m}$ を基準とした受信電界強度を指示メータから直読できるようになっている。校正用発振器を含めた装置全体は、標準磁界発生器を用いて、東京出港前および帰港後に校正を行なった。

測定時刻は後述するように、送受信点間大圏コースの中央点が正子にあたる時刻の近傍である。東京から南極に至る航路上の最大経度差は約 90° (6時間) であるから、測定時刻における送受信点の地方時は3時と21時の間にある。

電離層吸収を太陽天頂角の函数として表現する実験式は、いくつかあるが、ESSA (LUCAS and HAYDON, 1966) の短波電界強度算定法によると、吸収係数 I は太陽天頂角 γ の函数として次のようにあらわされている。

$$I \propto (\cos 0.881\gamma)^{1.3} \quad (1)$$

この式は、110 km の高度での日没が起る天頂角 102.2° 以上では、吸収がないことを表現している。また記号は異なるが、宮 (1950) による計算法では、 $\gamma = 105^\circ$ 以上で、減衰係数 $K=0$ とおいている。このように多少の相違こそあれ、従来の短波空間波強度の評価においては、 $\gamma \geq 105^\circ$ 以上では電離層吸収はゼロ、すなわちいわゆる無減衰の状態と見なされる。従って本測定の測定時刻は、全コースを通じて、無減衰という条件を満足している。

電界強度は出力メータにより指示される。信号強度はフェージングを伴って変動するので、約1分間のメータの読みのほぼ50%値(中央値)をもって電界強度値とした。ただし測定波が標準電波であるために、JJY以外の WWV, WWVH, ZUO, BPV 等の混信に注意しなければならない。混信に関連して、前述の測定時刻を正子近傍とのべた理由は次の通りである。規定の時刻に JJY の強度が、最も卓越していると確認される場合は問題はないが、大体において強い混信を示す WWV と WWVH が存在する時は、WWV に対しては毎時の45分から49分、WWVH に対しては毎時の15分から19分までの間の停波時間を利用して、JJY のみを測定した。本文の第II部においてのべる第9次観測以降の測定では、混信を除去するために各標準電波の変調周波数の相違を利用して、それらを分離したが、ここで使用した受信機のバンド幅は約4KHzであるから、同一周波数の搬送波で発射されている標準電波間の混信はやむを得ない。現在における各国標準電波の1時間内の発射明細 (CCIR, 1966d) を参照すれば、上述の停波時間、また第II部において問題となる変調周波数ならびに変調時間の対比が容易である。

測定周波数は表1に示すように、第2次と第3次には JJY の 2.5, 5, 10, 15 MHz の全部の電波、第6次には 2.5, 5, 10 MHz の3波、第7次と第8次には 2.5 と 5 MHz の2波

表 1 南極船上短波電界強度測定の概要

Voyage for JARE	Month,	Year	Frequencies (MHz)	Course			SSN	Observer
				From	To	Via		
2nd	Feb. - Apr.,	1958	2.5, 5, 10, 15	Antarctica	Tokyo	Indian Ocean	200	N. WAKAI
3rd	Nov. - Dec.,	1958	2.5, 5, 10, 15	Tokyo	Antarctica	Indian Ocean	180	N. WAKAI
6th	Nov.,	1961	2.5, 5, 10	Tokyo	Antarctica	Indian Ocean	50	K. TANOHATA
6th	Mar. - Apr.,	1962	2.5, 5, 10	Antarctica	Tokyo	Indian Ocean	40	K. TANOHATA
7th	Nov. - Dec.,	1965	2.5, 5	Tokyo	Antarctica	Australia	23	M. OSE, S. HASEGAWA & T. TAKEUCHI
8th	Dec.,	1966	2.5, 5	Tokyo	Antarctica	Australia	72	M. OSE, K. AIDA & I. NISHIMUTA

Notes: Transmitting station - JJY, Tokyo (35° 42' N, 139° 31' E).

Carrier frequencies and power - 2.5, 5, 10, and 15 MHz, 2 kW.

Transmitting antenna - Vertical $\lambda/2$ dipoles, top-loaded $\lambda/2$ dipole for 2.5 MHz.

Receiving antenna - Loop antenna.

Time of measurements - The time when the midpoint of a transmission path is at local midnight.

SSN - Averaged sunspot number (12 months running average of the Zurich sunspot number).

であった。このように第8次観測までは、観測担当者の負担を軽減するために、吸収量の決定に最も有効な低い周波数での測定に集約して、次第に測定波の数をへらしたが、第9次以降は測定器の整備と相まって、2.5から10 MHzまで順次測定波の数を増やし、測定精度を高めるようにした。

4. 測定期間と航路

船上電界強度測定は表1に示すように、第2次観測の帰路(1958年)から第8次の往路(1966年)まで、前節でのべたような測定法により行なわれた。その間の第4次(1959~1960年)には、比較的高い周波数で電界強度測定が行なわれた(栗城・大瀬, 1961)ので、夜間吸収の解析には不向きである。また第5次観測(1960~1961年)には2.5 MHz近傍での空電強度測定が行なわれ、空電の諸特性の他に、夜間吸収の存在をうらづける結果が得られた(Ishizawa *et al.*, 1962)が、本題から外れるのでここでは述べない。

表1にはそれぞれの期間内の太陽活動度をあらわす量として、相対黒点数の12カ月移動平均値 \overline{SSN} を示してある。解析においては太陽活動度を考慮して、第2次から第8次までの次の3つの期間に区分した。すなわち第2次~第3次は太陽活動の最盛期、第6次は極小期への移行期、第7次~第8次は極小期に相当する。ただし表中の黒点数からみると、第8次

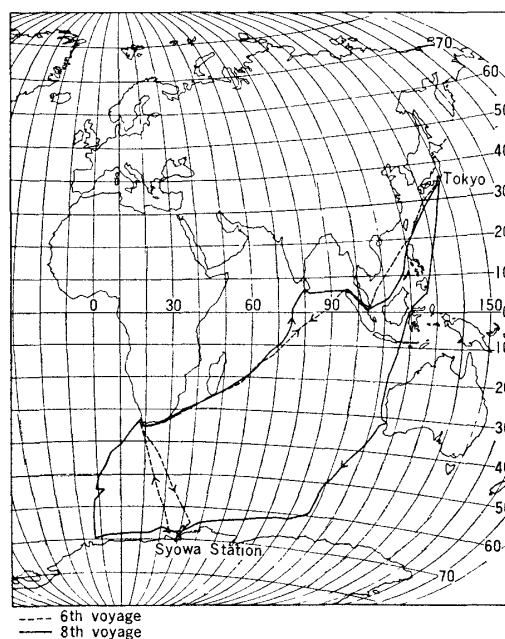


図1 南極観測船航路図

の1966年にはかえって第6次の場合よりも増加し、次の活動期への上昇の途中にあることを示しているが、測定強度の変化としては第7次とほとんど差異がみとめられないので、一括して整理解析を行なった。

南極観測船の航路は、図1に示すように、第6次まで（例として第6次を図示した）は往復とも、シンガポール、インド洋、ケープタウン経由であったが、南極観測の一時的中断を経て、観測再開の第7次以降（例として第8次を図示した）は、往路はフリーマントル（オーストラリア）経由、帰路はケープタウン、インド洋、シンガポール経由であった。何れにせよ、電波通路としては、途中はほとんど海上であり、電離層伝搬の際の大地反射は、反射損失の非常に少ない海面反射と見なすことができる。

5. 測定結果

受信点は絶えず移動するわけであるが、測定時刻における船の位置を受信点とし、東京都

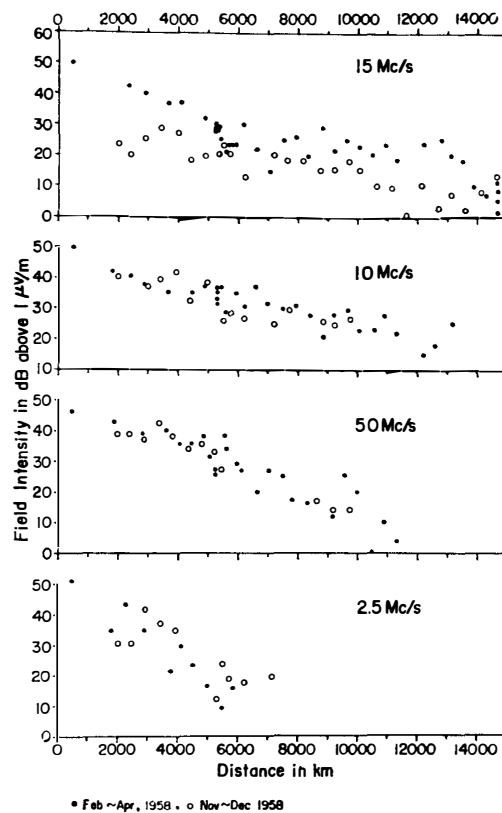


図2 第2次 (Feb.-Apr., 1958) および第3次 (Nov.-Dec., 1958) 船上電界強度測定による JJY 標準電波強度の地表距離に対する変化

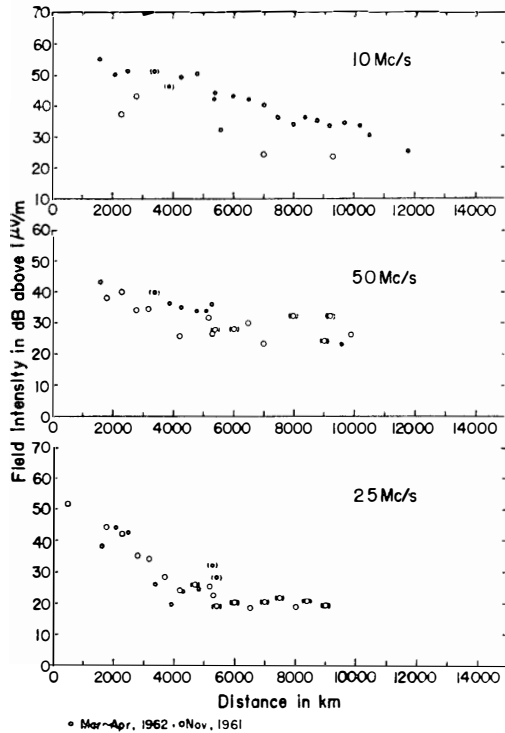


図 3 第 6 次 (Nov. 1961-Apr. 1962) 船上電界強度測定による JJY 標準電波強度の地表距離に対する変化

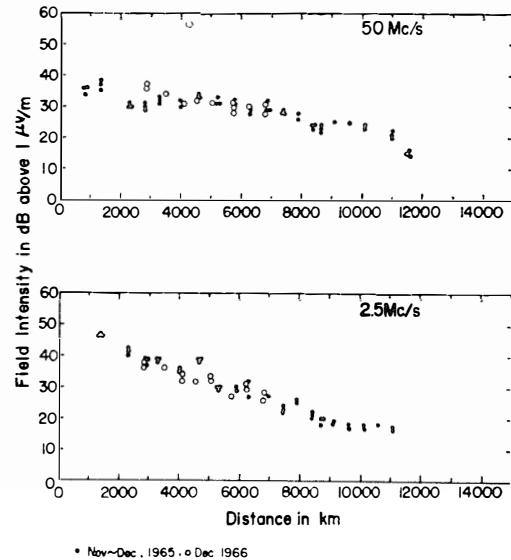


図 4 第 7 次 (Nov.-Dec. 1965) および第 8 次 (Dec. 1966) 船上電界強度測定による JJY 標準電波強度の地表距離に対する変化

小金井市電波研究所標準部 JJY 発射所 (35°42' N, 139°31' E) を送信点として、送受信点間地表距離を計算する。

図 2 ~ 図 4 には、この地表距離に対する電界強度測定値をプロットして示してある。船の 1 日の航程は第 6 次以前と第 7 次以降とで多少異なるが、約 500 km であり、従って逐日の測定値は大体 500 km につき 1 点得られる。しかし第 7 次と第 8 次には正子とその前後の 1 時間にそれぞれ 1 回、計 3 回測定を行なったので、1 夜に大体 3 点ずつプロットして示してある。これら 3 回の測定値はほぼ同じ値を示し、少なくとも 2 時間程度の時間内では、電界強度は安定していることをあらわしている。データの解析にあたっては、3 点の平均値をとり 1 点として扱った。

図に示すいわゆる電界強度の距離特性は、伝搬研究にとって非常に有効である。一般に距離特性を求めるには、送信局から距離の異なるいくつかの受信局で測ったデータを用いるが、アンテナを含む受信装置、伝搬条件を統一することは、実際的にかなり難かしく、従って測定データの均一性が失われがちであり、量的に詳細な議論はできない。これに反し、船上

電界強度測定は、伝搬距離が近距離から 14,000km まで、ほぼ連続的に変化する間に、一つの受信装置が用いられ、しかもいくつかの異なる周波数で測定されたので、距離特性が非常に精度よく測定されたわけである。

図2～図4中の測定値、特に 2.5 MHz の強度は、必ずしも系統的な変化の傾向を示しているとはいえないが、強度に影響を及ぼす多くの要因を含んでいる以上、ある意味では当然のことである。しかし全体の傾向として、周波数が低いほど、距離に対する減衰率は大きくなっている。また太陽活動の低下と共に、同一周波数で比較した時、遠方まで電波が到達（すなわち同一距離では強度が大きい）していることがわかる。以下の解析においては、主としてこの2点についてのべる。

6. 結果の解析

空間波電界強度を評価するには、取り扱う周波数帯、測定量によって、また与えられた回線の条件等によって、それぞれ便利な表現 (CCIR, 1966b; CCIR, 1966c; NORTON, 1959; DAVIES, 1965) があるが、本文では次の計算式を用いることにする。

$$E_r = E_o + P_t + G_{ta} - L_d - L_i - L_g \quad (2)$$

ここで

$E_r = 1 \mu\text{V/m}$ を基準にした受信電界強度 (dB)

$E_o =$ 等方性アンテナから 1 kW の電力が輻射された時の、距離 1 km の地点における電界強度 (dB)

$P_t = 1 \text{ kW}$ を基準にした送信電力利得 (dB)

$G_{ta} =$ 等方性アンテナに対する送信アンテナ利得 (dB)

$L_d = 1 \text{ km}$ を基準とした通路長伝送損失 (dB)

$L_i =$ 電離層吸収損失 (dB)

$L_g =$ 大地反射損失 (dB)

上記各量を本測定に適用すると、

E_r : 船上測定場所周辺には多少のじょう乱物体はあるが、測定された電界強度中央値

E_o : 自由空間にある $\lambda/2$ 垂直ダイポールの最大輻射方向における距離 1 km の点での電界強度は、1kW の電力に対して 106.9 dB (222 mV/m) であるから、 $\lambda/2$ ダイポールの等方性アンテナに対する利得 2.15 dB を差引いて

$$E_o = 104.75 \text{ dB}$$

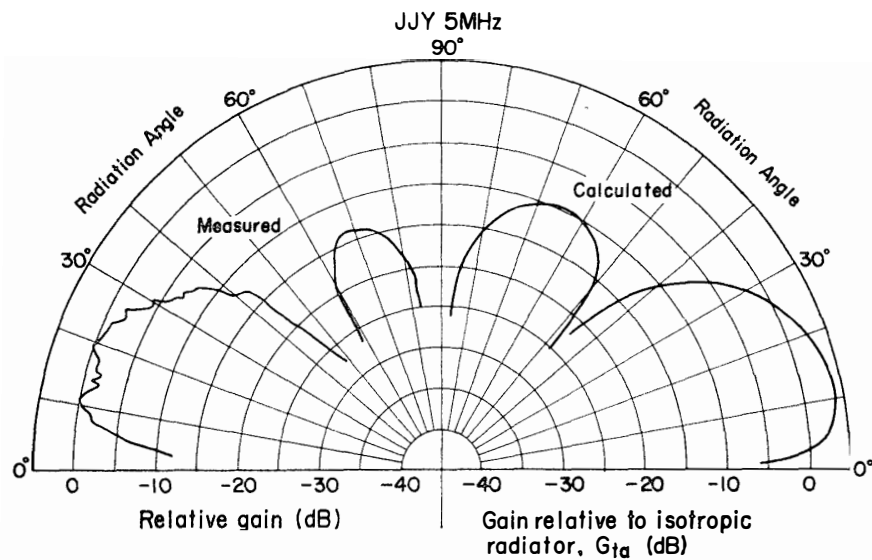


図 5 JJY 5MHz 用送信アンテナの垂直面内指向性 (左, 実測値; 右, 計算値)

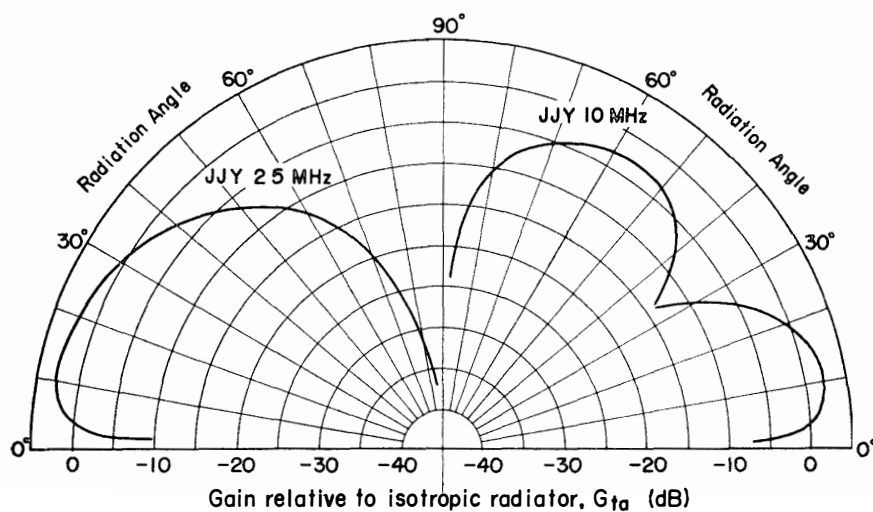


図 6 JJY 2.5MHz と 10MHz 送信アンテナの垂直面内指向性

P_t : 測定した JJY 標準電波は 2 kW であるから

$$P_t = 3 \text{ dB}$$

G_{ta} : 図 5 と図 6 に, 2.5, 5, 10 MHz の JJY 送信アンテナの, 投射角に関する垂直面内指向性を示す. このうち 5 MHz 用アンテナは, ヘリコプターによる指向特性の実測が行なわれたことがあり (渡辺, 1958), その結果を図 5 の左に示した. 図の右側の計算値は等方性アンテナに対する利得で示してあるが, 実測指向性の利得軸は任意スケールである. この両者がかなりよく一致していることから, 計算値は一

応正確に実際のアンテナパターンを表わしていると考えられる。本文の計算においては、図5と図6の G_{ta} を用いた。

L_d : 電離層の見かけ反射高を 250 km と仮定して計算した通路長による伝送損失。従来知られている夜間の電離層の電子密度分布 (WAKAI, 1967; WAKAI, 1968) を考慮すると、5 MHz と 10 MHz に対してはこの仮定はほぼ正しいと考えられるが、2.5 MHz の低角度発射波に対しては、E 層反射となると思われるので、必ずしも正しいとはいえない。厳密には電子密度分布を与え、ray-tracing により通路を決定しなければ、正確な L_d を求めることはできない。しかし量的には、低角度発射波すなわち遠距離まで到達する電波の通路長は、仮定する反射高によってあまり変わらないので、本文では反射高一定という近似的取り扱いにとどめ、第III部において詳細に議論する。

L_i : 電離領域を通過する際にうける、いわゆる無偏倚吸収*量。ただし前述 L_d 同様、2.5 MHz 波の低角度発射波が F 層反射モードでなく、E 層モードになる場合には、無偏倚吸収の近似は適当とはいえない。しかし電子衝突回数の大きい領域での反射になるから、かなりの吸収を受けることも確かであって、この点についても別の論文 (第III部) で詳述する。

L_g : 大地反射点は海と考えられるので、大地常数として海水の $\epsilon=80$, $\sigma=5$ mhos/m を用い、HAYDON *et al.* (1962) による曲線からよみとった。

(2) 式中の $(E_0 + P_t + G_{ta} - L_d)$ を無減衰電界強度 E_u と定義すると

$$E_r = E_u - L_i - L_g \quad (3)$$

E_u はすでに与えた各量を用いて、容易に計算することができる。図7には1回から4回反射までの伝搬モードに対して計算した E_u 曲線群を示す。図中の数字は発射角(度)である。

図2の15MHz測定値に対しては、以後の測定値がないこと、第2次と第3次の測定値との間に原因不明の差異があること(ただし距離特性にはほとんど差異はない)、太陽活動が低くなる時期には、無偏倚吸収だけでなく偏倚吸収も考慮しなければならないこと等の理由から、定量的解析を省略した。また図3の10MHzに対しても、往路と復路とで系統的な差

* 無偏倚吸収 (non-deviative absorption). 使用周波数が電離層の等価プラズマ周波数に比べてはるかに大きく(屈折率が1に近い)、その領域を通過する際、電波の屈曲が事実上起こらないと見なせる場合に適用される吸収の近似的取り扱い。これに対して偏倚 (deviative) 吸収は、電波通路の屈曲の起こる(屈折率がゼロに近い)反射点近傍での吸収を近似する取り扱いである。

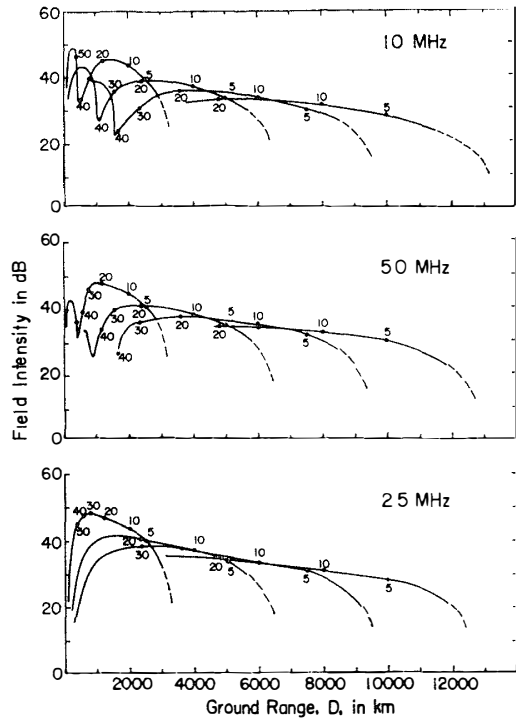


図 7 1~4回F層反射モードに対する E_u 曲線
線：図中の数字は発射角（度）

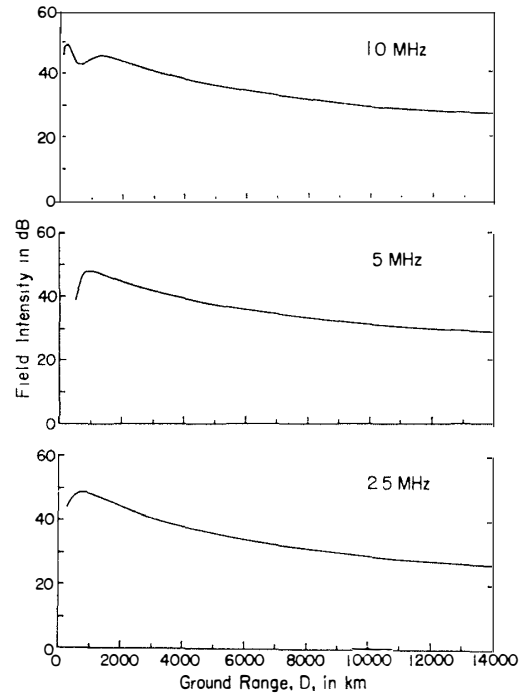


図 8 電離層吸収算定の基準とした E_u 曲線

があり、その原因が不明なので解析を行なわなかった。

図7の各反射モードに対する E_u 曲線の上縁を連ねた曲線を最終的な無減衰電界強度とし図8に示す。この図8の E_u から測定値 E_r を差し引き、さらに大地反射損失 L_g をひくと L_a が求められる。このようにして各測定値に対して L_a を求め、距離に対してプロットしたのが図9~図11である。ただし図では測定時期ではなく、周波数に関してまとめ直し、太陽活動による影響が見やすいようにした。10 MHz の測定は1例しかない(図11)ので比較できないが、図10の5 MHz, 特に2.5 MHz (図9)に関しては、太陽活動の低下につれて吸収量が少なくなっていることがよくわかるであろう。図には測定点に適合する直線を、表2にはその係数を示した。

日中の電離層吸収が太陽活動に支配されることはよく知られている。それは吸収の主たる原因である D, E 領域の電離が、太陽放射線の強い影響をうけていることによる。その反面、夜間は D 領域の電離は完全に消滅し、E 領域には 10^3 個/cm³ 程度の電子密度をもつ E 層が消滅しないまま存続する。このいわゆる夜間 E 層は太陽活動の影響をうける(WAKAI, 1968)から、量こそ少ないが吸収も太陽活動に依存するはずである。しかし実験的にこの両

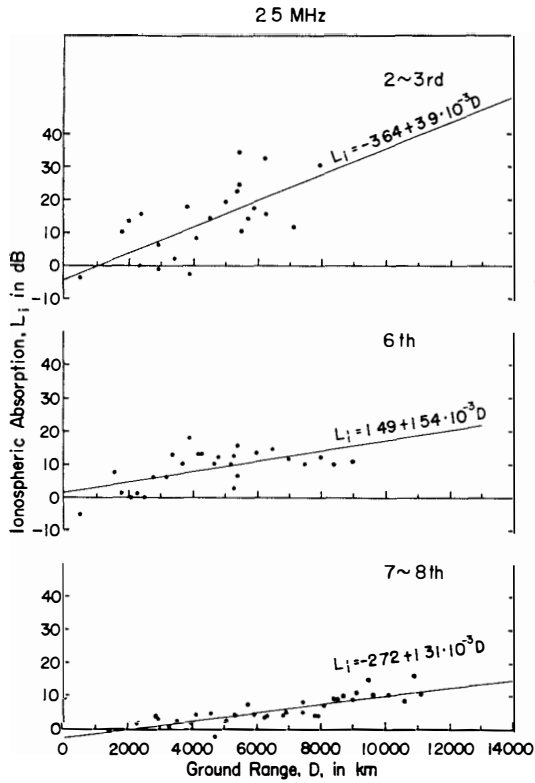


図 9 第 2～8 次観測における 2.5MHz 電波に対する電離層吸収の距離特性

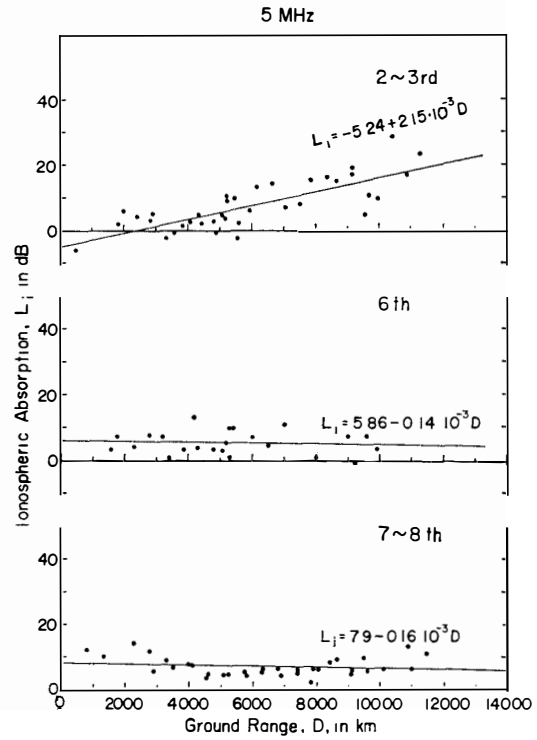


図 10 第 2～8 次観測における 5MHz 電波に対する電離層吸収の距離特性

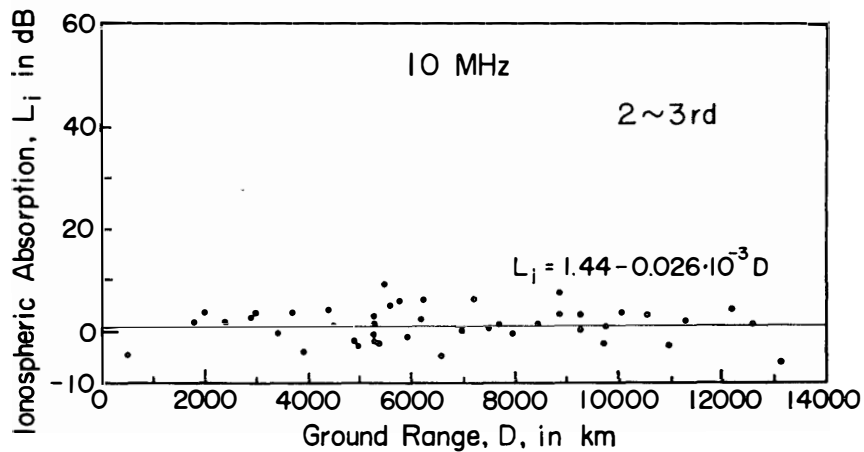


図 11 第 2～3 次における 10 MHz 電波に対する電離層吸収の距離特性

者の関連を見いだした論文は、なかったように思われる。この意味で上述の結果は注目に値する。ただし太陽活動度と夜間の電離層吸収との関係を確認するためには、まだ測定データが不充分であり、このプロジェクトの今後の進展にまたなければならない。

表 2 $L_i(\text{dB})=a+b\cdot 10^{-3}\cdot D(\text{km})$ における a と b の値

Voyage	SSN	2.5 MHz		5 MHz		10 MHz	
		a	b	a	b	a	b
2-3rd	200-180	-3.64	3.9	-5.24	2.15	1.44	-0.026
6th	50-40	1.49	1.54	5.86	-0.14		
7-8th	23-72	-2.72	1.31	7.9	-0.16		

7. 考 察

本文においては、WAKAI (1961) および田之畑・石川 (1963) による解析と多少異なる方法で解析を行なった。従って、求められた電離層吸収量には差異がみとめられる。一方、LUCAS and HAYDON (1966) は、夜間の電離層吸収は彼等が与える吸収係数として 0.1 をこえないであろうとのべている。本節においては、これらの結果に対する考察を行なうと共に、実用的な意味を含めて夜間の電離層吸収の算定式を提案する。

WAKAI (1961) は、宮 (1950) による日中の電離層吸収の距離特性をあらわす式を夜間に適用して、斜入射電離層吸収量 Γ_N と垂直投射吸収量 Γ_{NV} とを次の式で関係づけた。

$$\Gamma_N = \Gamma_{NV} \cdot n \cdot \exp\left(\frac{d}{k_a \cdot n}\right) \quad (4)$$

ここで、 n は反射回数、 d は伝搬距離、 k_a は実験的にきまる常数である。第 2 次～第 3 次観測による 4 周波数の距離特性 (図 2) を満足するように Γ_N を求め、(4) 式から Γ_{NV} を計算した結果、2.5 MHz に対する値として、 $\Gamma_{NV} = 1.7$ dB を得た。

田之畑・石川 (1963) はほぼ同様の方法によって、第 6 次観測に際しての、2.5 MHz 測定値からは $\Gamma_{NV} = 1.0$ dB、測定波全部を用いて計算した場合には 2.5 MHz 換算値として、 $\Gamma_{NV} = 2.5$ dB を得ている。

一方 ESSA により提案され (LUCAS and HAYDON, 1966), CCIR (1970) において採択された電界強度算定法では、電離層吸収量 A (dB) を次のように与えている。

$$A = \frac{677.2 \cdot n (\sec \phi) I}{(f + f_H)^{1.98} + 10.2} \quad (5)$$

$$I = (1 + 0.0037S) (\cos 0.881 \Psi)^{1.30} \quad (6)$$

ここで、

ϕ = 電離層への入射角

n = 反射回数

f = 使用電離層 (MHz)

f_H = 地上 100 km におけるジャイロ周波数 (MHz)

S = 12カ月移動平均相対黒点数

Ψ = 太陽天頂角

この式の適用できる下限周波数は 3 MHz という条件はあるが、2.5 MHz にも適用できるものとして以下の検討を行なう。(6) 式はすでにのべたように、 $\Psi > 102.2^\circ$ においてはゼロになるべき量であるが、夜間の吸収はゼロでないことを考慮して、 I が 0.1 より小さい場合には適用できないという制限ももうけている。

今 (5) 式から電離層吸収の距離特性を求める。 f_H は日本近辺で約 1.2 MHz、航海途上の赤道地方で約 0.9 MHz、南半球中緯度で約 1.2 MHz であるから、ここでは平均的に 1.0 MHz とする。使用周波数 2.5, 5, 10 MHz に対して、(5) 式はそれぞれ次のようになる。

$$A_{2.5} = 30.57 \cdot n(\sec \phi) I \quad (7)$$

$$A_5 = 13.30 \cdot n(\sec \phi) I \quad (8)$$

$$A_{10} = 5.39 \cdot n(\sec \phi) I \quad (9)$$

$n(\sec \phi)$ は反射高を仮定すれば地表距離と等価の量であるから、 I を 0.01 から 0.1 までの間適宜に与えて、地表距離 D に対する吸収量 A を求めると図12のようになる。この図と図9～図11とを比較することにより、表3に示すような等価的吸収係数 I を定めることができる。

表によれば次のことがいえる。

(1) 2.5 MHz に対しては吸収量が大きいので、比較的正確に太陽活動度の変化による影響があらわれている。

(2) 5 MHz に対しては、第2～第3次の場合のみ $I=0.1$ が得られているが、その他は表2中の b がマイナスという実際には起こり得ない値であるため、10 MHz に対してと同様に I の値を決定することはできない。

(3) 結局夜間吸収の決定には、2.5 MHz が最も有効であり、太陽活動の影響も検出できる。しかし吸収量が小さくなる5および10MHzでは、測定の精度および無減衰電界強度の算出の中に含まれうる誤差を考慮すると、太陽活動が特に大きくない限り、夜間吸収の定量的解析はかなり難しい。

表3の2.5MHzに対する I の値から、垂直投射に対する吸収 A_{NV} を求めてみると、第2

～第3次については $A_{NV}=2.75$ dB, 第6次については $A_{NV}=1.2$ dB となる. A_{NV} は (4) 式の Γ_{NV} に対応する量であるが, (4) 式と (5) 式とでは距離係数が異なるので直接の比較はできない.

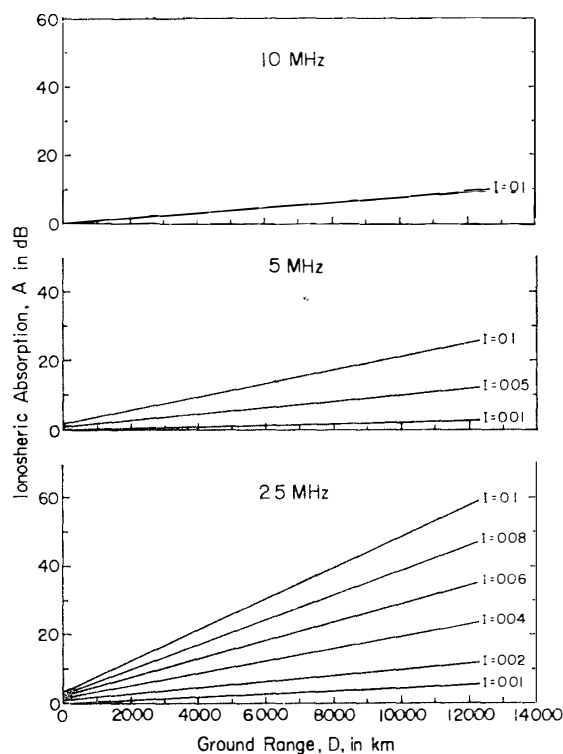


図 12 ESSA の計算法による吸収量 A の地表距離 D に対する変化

表 3 測定値に適合する等価的 I 係数

Voyage	\overline{SSN}	2.5 MHz	5 MHz	10 MHz
2-3rd	200 - 180	0.09	0.1	<0.01
6th	50 - 40	0.04	<0.01	
7-8th	23 - 72	0.03	<0.01	

さらに表 3 の, 第 2～第 3 次の 2.5 と 5 MHz に関しては, $I \doteq 0.1$ であり, LUCAS and HAYDON(1966) が与えた夜間吸収は $I=0.1$ の程度であるという表現とよく一致する. しかしこの値は太陽活動極大期におけるものであって, その他の時期に対しては適用できないことは本文の結果によって明らかである.

そこで試みに表 3 の 2.5 MHz に対する I の値から, (6) 式に対応する夜間の吸収係数 I_N

を求めてみると次のようになる。

$$I_N = 0.025 (1 + 0.013 S) \quad (10)$$

従って(5)式に相当する夜間の電離層吸収量 A_N は、

$$A_N = \frac{677.2 \cdot n(\sec \phi) \cdot I_N}{(f + f_H)^{1.98} + 10.2} \quad (11)$$

(5), (6) 式と(10), (11)式との接続, すなわち夜間と日中との適用計算式の切り換えは, S を与えた時に(10)によってきまる I_N の値を最小値とし, その値になるまで(6)が適用できるものとして行なえばよい。

8. 結 論

1958年から1966年にかけて行なわれた, 南極観測船上短波電界強度測定によるデータを解析した結果, 次のことが明らかになった。

(1) 電界強度の距離特性から, 夜間の電離層吸収の存在を確認した。異なる周波数の電波の同時測定によると, この夜間吸収は無偏倚吸収の関係を満足しているので, 夜間も存在するE層の電離がその原因であると考えられる。

(2) 夜間の電離層吸収は太陽活動度の影響をうける。また短波帯低域の電波の空間波電界強度の評価には見過すことのできない要素であって, 一例をあげると, 太陽活動最盛期における測定では, 2.5 MHz 電波に対して, 地表距離 8,000 km の地点において, 約 30 dB に達する吸収を与えた。

(3) 実用上の算定に便利な, 夜間の電離層吸収をあらわす実験式が提案された。

謝 辞

多くの測定上の悪条件にもかかわらず, この船上電界強度測定を実施していただいた, 観測担当者, 長谷川貞雄, 竹内鉄雄, 会田一夫, 西牟田一三の各位にあつくお礼申し上げる。

文 献

- CCIR, (1966a): Report 252-1, XIth Plenary Assembly, Oslo, Vol. II, 247-251.
 CCIR, (1966b): Recommendation 341, XIth Plenary Assembly, Oslo, Vol. III, 34-36.
 CCIR, (1966c): Report 112, XIth Plenary Assembly, Oslo, Vol. III, 80-85.
 CCIR, (1966d): Report 267-1, XIth Plenary Assembly, Oslo, Vol. III, 285-294.
 CCIR, (1970): Report 252-2, XIIth Plenary Assembly, New Delhi.
 DAVIES, K. (1965): Ionospheric Radio Propagation. Natn. Bur. Stand., Monogr. 80.

- HAYDON, G. W., D. L. LUCAS and R. A. HANSON (1962): Technical considerations in the selection of optimum frequencies for high frequency sky-wave communication services. Natn. Bur. Stand., Rep. 7249.
- ISHIZAWA, K., N. WAKAI, S. HASEGAWA and N. KAWAJIRI (1962): Measurement of atmospheric radio noise on 2.5 Mc/s on board the antarctic research expedition ship "Soya". J. Rad. Res. Labs., 9, 293-308.
- 栗城 功・大瀬正美 (1961): 宗谷船上観測による短波電界強度の距離特性. 電波研究所季報, 7, 288-292.
- LUCAS, D. L. and G. W. HAYDON (1966): Predicting statistical performance indexes for high frequency ionospheric telecommunications systems. Envir. Sci. Serv. Adm., Tech. Rep. IER 1-ITSA 1.
- 宮 憲一 (1950): 短波通信回線の設計に必要な電波伝播特性の研究. 電気通信学会雑誌, 33, 3-14.
- NORTON, K. A. (1959): Transmission loss in radio propagation II. Natn. Bur. Stand., Tech. Note 12.
- 田之畑一男・石川三郎 (1963): 宗谷船上における電界強度測定結果. 南極資料, 17, 51-55.
- WAKAI, N. (1961): Non-deviative absorption at night. J. Rad. Res. Labs., 8, 213-218.
- WAKAI, N. (1967): Quiet and disturbed structure and variations of the nighttime E region. J. Geophys. Res., 72, 4507-4517.
- WAKAI, N. (1968): Mean variations of the nighttime ionospheric E layer. J. Rad. Res. Labs., 15, 109-132.
- 渡辺千代松 (1958): Private communication.

(1970年9月4日受理)