

超低緯度ホイスラ先行空電発生位置測定法

石黒 靖司*, 太田 健次**, 早川 正士***, 島倉 信****

Direction Finding of Causative Atmospherics
of Whistlers at Very Low LatitudesSheiji ISHIGURO*, Kenji OHTA**
Masashi HAYAKAWA***, Shin SHIMAKURA****

(Received May 31, 1993)

The simultaneous locations of the ionospheric exit points of whistlers and of their causative sferics are known to be very important in the extensive study of the propagation mechanism of whistlers along the total path from the source to the receiver. But these simultaneous locations have so far been lacking, because of the problem of the distance. In this paper we calculate the distance of the causative sferics by the FFT method and phase difference method using waveguide dispersion of the tweek and whistler only at one station.

1. まえがき

雷放電から放出される電磁波は、 $300[Hz] \sim 30[kHz]$ の低周波帯に強いエネルギー成分を持っており、そのエネルギーの大部分は電離層と大地の間を多重反射し遠距離まで伝搬する。これは電磁波に対して完全導体と見なせる大地と電離層が導波管的役割を果たすからである。特に夜間時においては低損失で導波管伝搬した電磁波をトウィーク空電と言い遮断周波数の近傍で長い持続時間を持つ空電となる¹⁾²⁾。

また、雷放電から放出された電波の一部は電離層を突き抜け、磁力線に沿って生成されるダクトと呼ばれる伝搬路を通して磁気圏内を伝搬する。磁気圏は磁場とプラズマの存在する空間で、磁気圏を伝搬するとき雷放電による電磁波の伝搬速度（群速度）は真空中に比べ著しく遅くなり、高い周波数で伝搬速度が速く、低い周波数で遅い。従ってこのような電磁波が反対半球の電離層まで

到達し、その一部が電離層を突き抜けて地上に伝搬する電磁波をホイスラと呼ぶ³⁾。

遠距離で発生する空電の発生位置測定には従来ゴニオメーター法を用いているが、この方法では1000km程度離れた多点同時観測が必要であり容易に行うことはできない。そこで我々はトウィーク空電がホイスラの先行空電となる夜間ホイスラにおいてホイスラ分散値測定とトウィークの方位角測定⁴⁾、またはトウィークの伝搬距離測定とトウィークの到来方位測定により1観測地点のみで先行空電の発生位置を同定する手法を考案したので報告する。

2. 周波数解析法と位相差法

ここで取り扱うホイスラとトウィーク先行空電は第1図に示す中国超低緯度のZhanjiang, Wuchangにおいて1988年1月5日より1月11日まで観測したホイスラの多点同時観測⁴⁾によるデータである。これらのデータを用いて、周波数解析法と位相差法によって先行空電の発生位置測定を行なった。ここで言う周波数解析法とは時系列データをFFT解析し周波数分解した振幅と位相

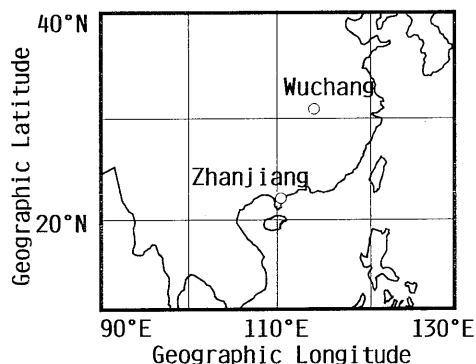
*電気工学専攻大学院生 (Graduate Student, Electronic Engineering)

**電子工学科 (Department of Electronic Engineering)

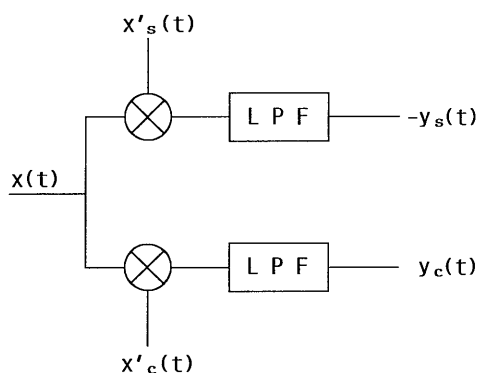
***電気通信大学 (The University of Electro-Communications)

****千葉大学 (Chiba University)

のデータを用いて解析を行う測定法である。この周波数解析法によりホイ斯拉分散値を測定し先行空電の発生位置を測定した結果は文献4) に詳しく記載されているので参照されたい。また位相差法とは第2図に示すように観測された信号 $x(t)$ と擬似信号 $x'_s(t)$, $x'_c(t)$ を乗算し、LPFを通した $y_s(t)$, $y_c(t)$ の位相を用いて解析を行う測定法である。



第1図 中国における多点観測地点



第2図 位相差法の信号処理の流れ図

3. 周波数解析法によるトウィーク伝搬距離の測定法

トウィーク空電は雷放電によって放射された電磁波が電離層と大地に挟まれた空間である電離層・大地間導波管を伝搬したVLF帯の電磁波である。

平面大地近似モデルにおいて、電離層高度を h , n 次モードの空電の遮断周波数を f_{nc} , 伝搬距離を d , 光の伝搬速度を c とすれば伝搬時間 t_g における瞬間周波数 $f(t_g)$

は(1)式で与えられる。

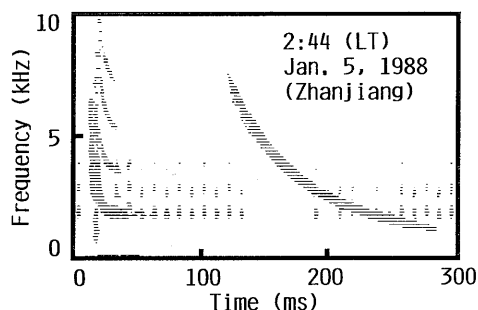
$$f(t_g) = f_{nc} t_g / \{t_g^2 - (d/c)^2\}^{1/2} \quad (1)$$

$$f_{nc} = nc / 2h$$

いま雷放電の発生時間を t_0 とすれば、(1)式より受信された n 次モードの空電の瞬間周波数 $f(t)$ は(2)式となる。

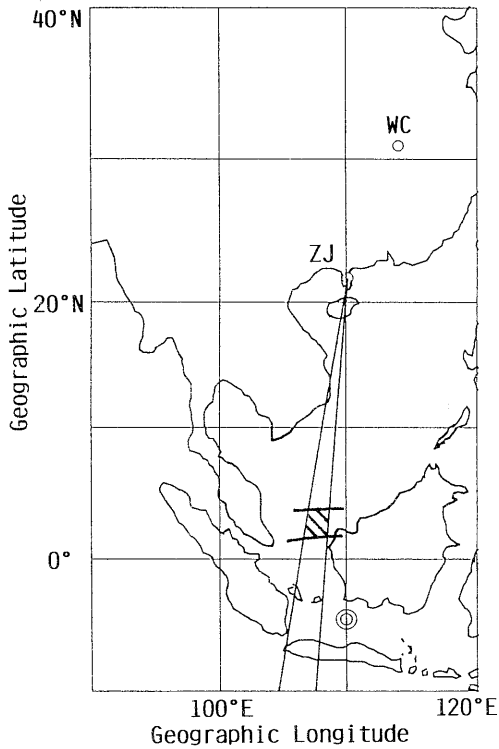
$$f(t) = f_{nc}(t - t_0) / \{(t - t_0)^2 - (d/c)^2\}^{1/2} \quad (2)$$

第3図は1988年1月5日2時44分にZhanjiangにおいて観測されたホイ斯拉とトウィーク先行空電をサンプリング周波数50kHzでデジタル化させ、データ長1024でFFT解析を行い周波数解析をしたデジタルソナグラムである⁵⁾。デジタルソナグラムでは強度は任意のレベルで16分割のカラー表示が可能である⁶⁾。また f_{nc} もソナグラムより計測できる。よって時刻 t における最大強度である中央部分の周波数 f が測定可能となる。このように測定した (f, t) のデータを用いて最小2乗法でトウィーク先行空電の伝搬パラメータである伝搬距離 d を測定する。この伝搬距離とトウィーク空電の到来方位を電磁界解析法で解析した測定結果⁸⁾より先行空電の発生位置を同定する。

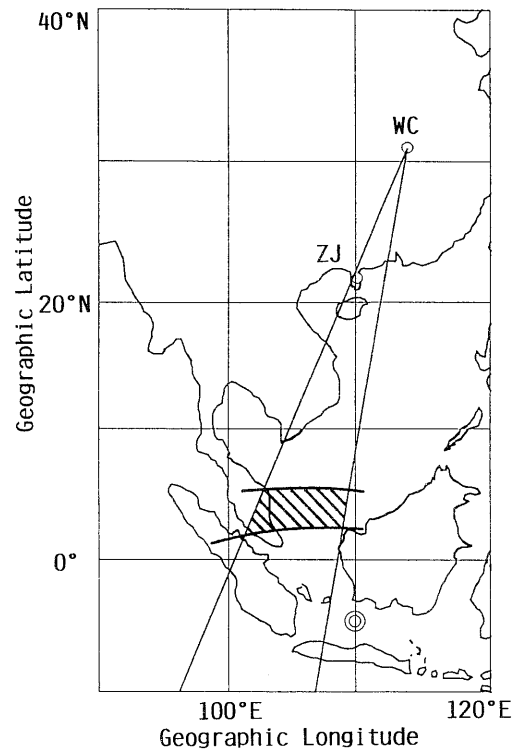


第3図 Zhanjiangで観測されたトウィーク空電とホイ斯拉

第4図(a)にZhanjiang, (b)にWuchangでのトウィーク伝搬距離の測定結果を示す。斜線部は先行空電の発生位置を示す。Zhanjiangで観測されたトウィークの伝搬距離は 2020 ± 250 km先行空電の到来方位角は $188.8 \pm 2.5^\circ$, Wuchangで観測されたトウィークの伝搬距離は 2950 ± 350 km到来方位角は $196.0 \pm 6.5^\circ$ である。



第4図 周波数解析法によるトウィーク伝搬距離の測定結果
(a) Zhanjiangでの測定結果



第4図 周波数解析法によるトウィーク伝搬距離の測定結果
(b) Wuchangでの測定結果

4. 位相差法によるホイスラ分散値測定法

雷から放出された電磁波の一部は、磁気圏を伝搬してホイスラとして観測される。このホイスラ分散値は低緯度では $30\text{s}^{1/2}$ 以内であり、その持続時間は周波数を6 kHzから1 kHzとすれば600ms以内である。これまでは周波数解析即ち動スペクトルが用いられていたが持続時間の極めて短い非定常信号に対する解析法としては精度には自ずと限界があり必ずしも最適とは言えない。そこでこのような非定常信号に対しては時系列データのまま信号の位相変動を測定する位相差法を用いて測定した⁸⁾。今回測定に用いた位相差法とは、擬似ホイスラと観測されたホイスラとを乗算してその位相差を計算しその差が最小となる擬似ホイスラの分散値を求めるものである。

ホイスラの分散特性は、雷の発生時刻を t_0 、分散値を D とすれば、(3)式で与えられる。

$$t - t_0 = Df(t)^{-1/2} \quad (3)$$

即ち、瞬時周波数 $f(t)$ は(4)式となる。

$$f(t) = D^2 / (t - t_0)^2 \quad (4)$$

いま、(4)式の分散式の瞬時周波数を積分して擬似ホイスラの位相 $\phi'(t)$ は(5)式で与えられる。

$$\phi'(t) = 2\pi f(t) dt = 2\pi D^2 / (t - t_0) + K \quad (5)$$

ここで K は積分定数であり擬似ホイスラの初期位相を表している。また周波数が変動する非定常信号 $x(t)$ は、信号強度を $a(t)$ 、位相変動を $\phi(t)$ とすると(6)式で与えられる。

$$x(t) = a(t) \cos \phi(t) \quad (6)$$

いま、観測される信号の擬似信号を $x'_c(t)$ 、 $x'_s(t)$ 、擬似位相を ϕ' としたときの擬似信号を(7)式で表す。

$$\begin{aligned} x'_c(t) &= \cos \phi'(t) \\ x'_s(t) &= \sin \phi'(t) \end{aligned} \quad (7)$$

この(7)式を観測信号に乘算し、低域通過フィルタ通過後の信号をそれぞれ $y_c(t)$ 、 $y_s(t)$ とすれば(8)式を得る。

$$\begin{aligned} y_c(t) &= a(t) / 2 \cos \{ \phi(t) - \phi'(t) \} \\ y_s(t) &= -a(t) / 2 \sin \{ \phi(t) - \phi'(t) \} \end{aligned} \quad (8)$$

$y_c(t)$ 、 $y_s(t)$ は時間とともに緩やかに変動する信号であり、観測信号の位相即ち分散特性は(9)式で与えられる。

$$\phi(t) = \phi'(t) + \arctan \{ y_s(t) / y_c(t) \} \quad (9)$$

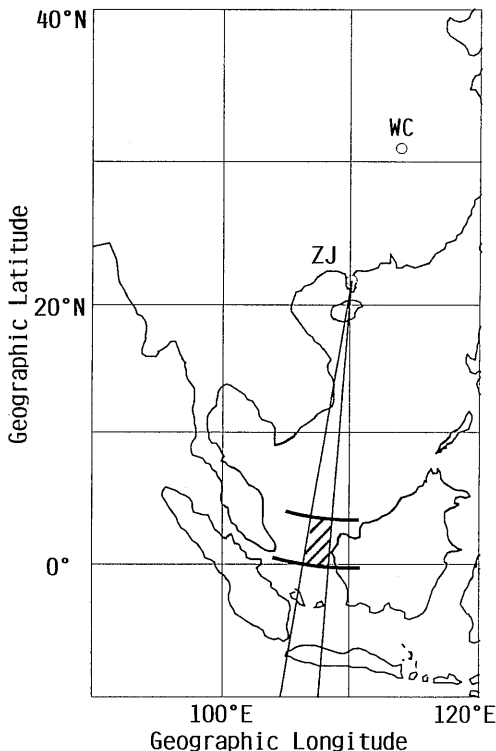
またこのときホイ斯拉の位相は(10)式で表される。

$$\phi(t) = -2\pi D^2 / (t - t_0) + \arctan \{-y_s(t) / y_c(t)\} \quad (10)$$

ここで初期値 D , t_0 , K を与え擬似ホイ斯拉を構成し, (11) 式に示す重み付き誤差関数 ε を最小とする分散値を求める。

$$\varepsilon = \sum \{ \phi(t) - \phi'(t) \}^2 (t - t_0)^2 \rightarrow \min \quad (11)$$

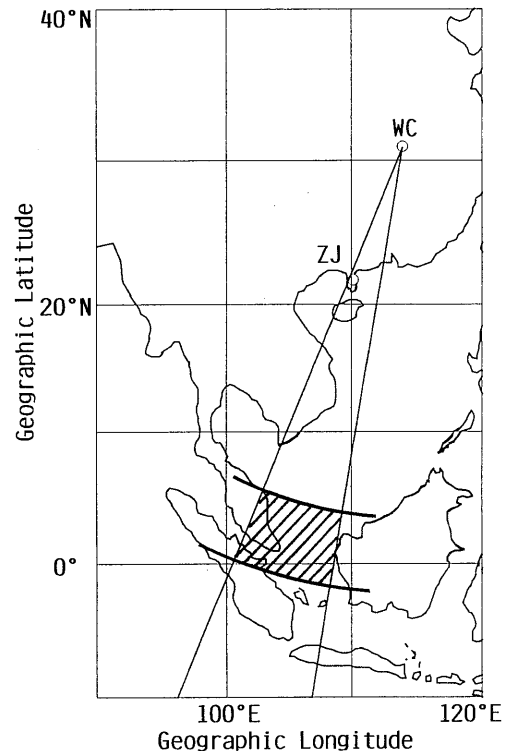
このように重み付き誤差関数を用いることにより, 極小値問題は線形方程式を解く問題となり簡単となる。即ち, 擬似ホイ斯拉のパラメータ D , t_0 , K を最小2乗法によって求めることが可能となる。



第5図 位相差法によるホイ斯拉分散値を用いた測定結果
(a) Zhanjiangでの測定結果

このように測定されたホイ斯拉分散値から電磁波がダクトの入り口に達した時刻が求められる。この電離層上昇透過点に到達した時刻と観測地点に先行空電が到達した時刻の時間差から雷放電の発生位置は電離層上昇透過点と電離層下降透過点を2定点とした双曲線上に存在する⁴⁾。これとトウィークの到来方位を重ねて先行空電の発生位置を同定する。

第5図(a)にZhanjiang, (b)にWuchangでの先行空電発生位置の測定結果を示す。斜線部は先行空電の発生位置を示す。Zhanjiangで観測されたホイ斯拉分散値は $9.76 \pm 0.03^{1/2}$, Wuchangで観測されたホイ斯拉分散値は $9.78 \pm 0.04^{1/2}$ となる。



第5図 位相差法によるホイ斯拉分散値を用いた測定結果
(b) Wuchangでの測定結果

5. 位相差法によるトウィーク伝搬距離の測定法

雷放電により放出された電磁波が電離層・大地間導波管を伝搬して発生するトウィーク空電は平面大地モデル近似において n 次モードの瞬時周波数 $f(t)$ は f_{nc} を遮断周波数, d を伝搬距離, t_0 を先行空電の発生時間とすると(12)式で与えられる。

$$f(t) = f_{nc} (t - t_0) / \{ (t - t_0)^2 - (d/c)^2 \}^{1/2} \quad (12)$$

先行空電の周波数特性は(12)式から伝搬パラメータによって特徴づけられている。即ち, (12)式を積分すると時

刻 t における位相 $\phi(t)$ は(13)式で与えられる。

$$\phi(t) = 2\pi f_{nc} \{ (t - t_0)^2 - (d/c)^2 \}^{1/2} \quad (13)$$

また空電は一般的に n 次モードの空電の電解強度 $x(t)$ は(14)式で与えられる。

$$x(t) = a(t) \cos \{ 2\pi f_{nc} \{ (t - t_0)^2 - (d/c)^2 \}^{1/2} \} \quad (14)$$

今回の測定においては, (14)式を使用して擬似空電を作成した。

空電の2次モードより高いモードは非常に強度が弱く,

また低周波数帯域にはノイズが含まれている。よって伝搬パラメータの測定には2次モードの現れる周波数よりも低い周波数帯域で低周波数帯のノイズを除去するのに十分な周波数までの1次モードの限られた信号のみをバンドパスフィルタを用いて取り出し、観測信号として伝搬パラメータの測定に使用する。

いま、観測される信号の擬似信号の位相を ϕ' とすると擬似信号 x'_c, x'_s は(15)式で表される。

$$\begin{aligned} x'_c(t) &= \cos \phi'(t) \\ x'_s(t) &= \sin \phi'(t) \\ \phi'(t) &= 2\pi f_{nc} \{ (t-t_0)^2 - (d/c)^2 \}^{1/2} \end{aligned} \quad (15)$$

(15)式を観測信号のトウィーク空電に乗算して低域通過フィルタ通過後の信号をそれぞれ y_c, y_s とすれば(16)式を得る。

$$\begin{aligned} y_c(t) &= a(t) / 2 \cos \{ \phi(t) - \phi'(t) \} \\ y_s(t) &= -a(t) / 2 \sin \{ \phi(t) - \phi'(t) \} \end{aligned} \quad (16)$$

よって(16)式より(17)式が導出される。

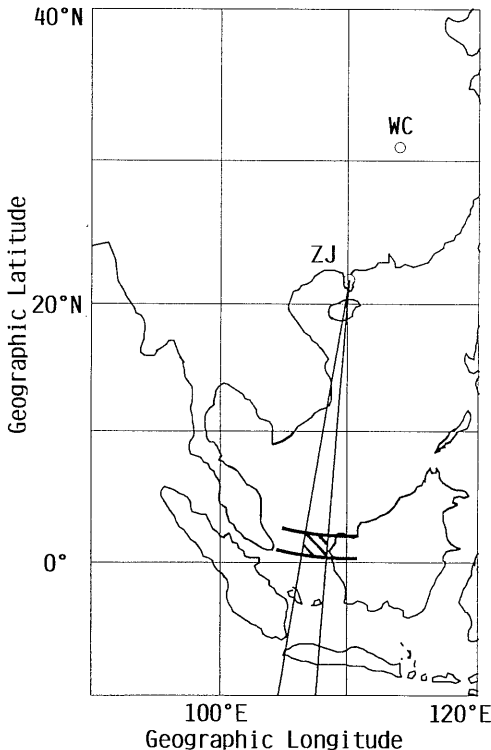
$$\begin{aligned} -y_s(t) / y_c(t) &= \tan \{ \phi(t) - \phi'(t) \} \\ \phi(t) &= \phi'(t) + \arctan \{ -y_s(t) / y_c(t) \} \end{aligned} \quad (17)$$

ここでホイスラ分散値を測定するのと同様に重み付き誤差関数 ε を(18)式のように与える。

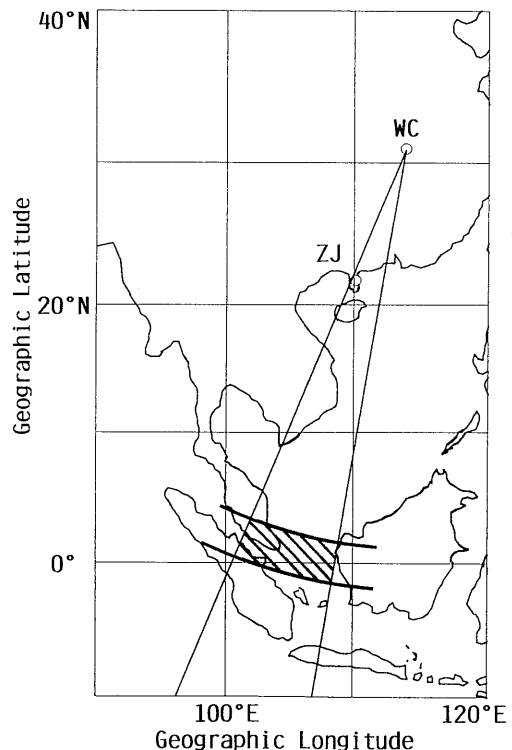
$$\varepsilon = \sum \{ \phi(t)^2 - \phi'(t)^2 \} \rightarrow \min \quad (18)$$

この重み付き誤差関数 ε を最小となる伝搬パラメータを求める。即ち擬似トウィークの伝搬パラメータ d, t_0, f_c を最小2乗法によって測定する。このように測定された伝搬距離 d と先行空電の到来方位を重ね合わせることで先行空電の発生位置を同定する。

第6図(a)にZhanjiang, (b)にWuchangでの位相差法によるトウィーク伝搬距離の測定結果を示す。斜線部は先行空電の発生位置を示す。Zhanjiangで観測されたトウィーク空電の伝搬距離は $2095 \pm 100\text{km}$, Wuchangで観測されたトウィーク空電の伝搬距離は $3100 \pm 150\text{km}$ である。



第6図 位相差法によるトウィーク伝搬距離の測定結果
(a) Zhanjiangでの測定結果



第6図 位相差法によるトウィーク伝搬距離の測定結果
(b) Wuchangでの測定結果

6. むすび

周波数解析法と位相差法はほぼ同じ測定結果となり、どの測定法によっても1観測地点で先行空電の発生位置

を同定することが可能であることを示した。

それぞれの測定結果を比較すると周波数解析法よりも位相差法の解析結果は精度で優れている。しかし、周波

数解析法は実際にどの(f - t)成分をトレースしているかがデジタルソナグラム上で容易に識別できる。位相差法においては擬似信号を用いたシミュレーションでは高精度で測定されることが確認されているが、実際に観測された信号にはノイズが含まれており擬似信号とは条件が異なる。例えば初期設定値の t_0 , D , d , f_{nc} などをかなりの精度で与えないと測定結果の分布は大きくばらつく。このため測定結果が正確であるかを判別することは困難となっている。よって位相差法では最終結果を直接評価するにはデジタルソナグラムで擬似ホイスラまたはトウィークを描かせ分散曲線に合致していることを再度確認する必要がある。実際の解析においてはまず周波数解析法で t_0 , D , d , f_{nc} などを測定し、その測定結果を用いて位相差法でさらに高精度で解析する必要がある。よって、周波数解析法と位相差法とは相補的な関係にあり両方式を用いることにより、より精度の高い1点観測が可能となろう。

ホイスラは磁気圏のプラズマ媒質を伝搬することにより周波数の伝搬速度に分散を受ける。この分散を測定することにより磁気圏中の電子密度等の情報を得られる。これらの情報分析、及び電離層・大地間の多重反射やダクト内伝搬での損失を知るには先行空電の位置測定が不可欠である。このため測定が容易な先行空電の1点観測法を更に研究する必要がある。

7. 謝 辞

本研究は本学の特別研究費の御援助によるものであり、関係各位に深謝する。また、常に御指導を頂く三上 修教授、江口博之教授に感謝すると共に測定法について御

助言を頂いた千葉大学大学院生本郷義太加氏に感謝する。

参 考 文 献

- (1) Otsu, J.: "Numerical study of tweeks based on waveguide mode theory", Proc. Res. Inst. Atmosph., Nagoya Univ., 7, pp. 58-71, 1960
- (2) Alpert, Ya.L.: "Radio Wave Propagation and the Ionosphere", New York, Consultants Bureau, 1963
- (3) Storey, L.R.O.: "An investigation of whistling atmospherics", Phil. Trans. Roy. Soc., **A246**, pp.113-141, 1953
- (4) 石黒靖司, 高橋 修, 馬場清英, 太田健次, 早川正士: "ホイスラ分散式に基づく先行空電発生位置測定", 中部大学工学部紀要 23, pp.45-50, 1992
- (5) 太田健次, 友松 通, 早川正士, 島倉 信: "ホイスラーの電離層下降透過点と先行空電の到来方位測定", Lett. Atmos. Electr., **10**, pp.89-101, 1990a
- (6) 太田健次, 早川正士, 江口博之: "ホイスラーのスペクトルにおけるパッチ状構造とその解釈", 信学論B-II, **J72-B-II**, 7, 351-358, 1989
- (7) 馬場清英, 太田健次, 友松 通, 早川正士: "トウィーク空電の波動特性の周波数依存性", 信学論B-II, **J74-B-II**, 11, pp. 587-593, 1991
- (8) 太田健次, 早川正士, 島倉 信, 友松 通: "中国超低緯度における夜間ホイスラの多点同時観測による到来方位測定", 信学論B-II, **J74-B-II**, 4, 182-189, 1990b
- (9) 島倉 信, 椿 明浩, 早川正士, 鈴木弘喜: "導波管効果を伴う遠距離伝搬磁気圏波動の電離層透過域推定", 電子通信学会アンテナ・伝搬研究資料, A.P86-129, pp.13-18, 1987