

アレシボISレーダーによる成層圏大気潮汐波の観測

An Observation of the Stratospheric Tide by the Arecibo Incoherent Scatter Radar

前川 泰之[†]・深尾 昌一郎[†]・木村 磐根[†]・加藤 進[†]・佐藤 亨^{††} R. F. WOODMAN^{††}

Yasuyuki MAIKAWA[†], Shoichi FUKAO[†], Iwane KIMURA[†], Susumu KATO[†], Toru SATO^{††}, R. F. WOODMAN^{††}

[†] 京都大学工学部, ^{††} NAIC, アレシボ観測所

[†] Faculty of Engineering, Kyoto University, ^{††} NAIC, Arecibo Observatory

[1] はじめに

もともと、超高層大気(高度80km以上)を観測するために建設されたISレーダーが、近年、成層圏(高度10-50km)、中間圏(同50-80km)などの中層大気の運動を観測する手段として、広く用いられるようになった¹⁻³⁾。この領域での電波の散乱は、大気乱流による屈折率の不均一性が原因で生じると考えられており、この散乱エコーのドップラーシフトから、大気の平均的な運動(風速)を推定することが可能である⁴⁾。

通常ISレーダーでは、1分程度の時間分解能で風速の高度変化が得られるので、1分より長い周期の様々な変動現象(大気波動)を理解する上で、極めて有用である。周期が1日ないし半日の大気潮汐波については、アレシボや、ヒカフルカのISレーダーを用いて、上部対流圏から下部成層圏にかけての観測が、過去数回にわたって行なわれた。その結果、次の様な結果が得られている⁵⁻⁷⁾。

- i) 1日周期、半日周期成分とも、下部成層圏から上部対流圏にかけて、位相が下向きに伝搬している。これは、地表付近で励起されたエネルギーが、上方へ伝搬して行くことを意味する。
- ii) 鉛直波長は、1日周期成分については10km以下と非常に短い。一方、半日周期成分については鉛直波長が10km以下となる場合と、この領域で、位相が高度方向にはほとんど変化しない場合がある。

これらの観測結果は、従来の古典大気潮汐理

論(例えば、1日周期成分の鉛直波長は約30km⁸⁻⁹⁾とは、著しく異なるものである。

昨年(1979年)の6月と10月に、これらの大気潮汐波成分の特性をより明らかにするために、アレシボ(Arecibo)ISレーダー¹⁰⁾(18.3°N, 66.75°W; 送信周波数430MHz; 尖頭送信電力~2MW)を用いて、上部対流圏及び下部成層圏の風速の観測が行なわれた。以下では、主に観測時間の長い10月について、測定方法及び風速の推定法について述べ、さらに解析の結果得られた大気潮汐波の鉛直構造について論じる。

[2] 観測方法

観測期間は、6月25日から26日にかけての約44時間、及び10月10日から13日にかけての約53時間であり、この間、ほぼ連続に観測が行なわれた。アンテナビームは、ほぼ1時間毎に、天頂から斜15°西又は南方向に向けられ、南北風と東西風が交互に観測された(風の二成分の観測は、ISレーダーによる大気潮汐波の観測では、初めての試みである)。

送信パルスは、32ビットのコンプリメンタリーコード¹¹⁾で位相変調された。基本パルス長は1μs、パルスくりがえし周期は0.73msである。また観測高度範囲は、5.7~23.1kmの間で、高度分解能は約150mである。

受信信号は、同期検波された後、まず48回(35.64μs)コヒーレント積分された。次に、これにより得られた観測信号列に対して、アレイプロセッサにより32サンプル(1.125)毎に高速フ

ーリ交換 (FFT) が施された。こうして計算されたパワースペクトラムは、更に100組平均 (インコヒーレント積分) され、約2分間隔で観測テープに記録された。

〔3〕 風速の推定法

風速を求めるに当たっては、まず、約2分間隔で記録されたスペクトラムを、数10分から1時間程度 (アンテナビームが西又は南方向を向いている時間) 平均して用いた。これは、大気潮汐波を抽出するには、観測点が2~3時間に1点で充分と判断したことによる。

次いで、このような処理を施したスペクトラムに、モーメント法を適用して、風速の推定を行なった。その際、次の各点に注意した (図1参照)。

i) スペクトラムの折りがえし周波数は ± 14.3 Hz であり、これは、水平風速に換算すると 19.2 ms⁻¹ である。しかし、時折この値を越える大きな風速が観測されることがあるので、折りがえしの部分を展開して ± 21.3 Hz の範囲まで解析を用いた。

ii) スペクトラムの中央 (ドップラー) に現われる比較的大きなピークは、アンテナのサイドローブで受信された地表の固定物 (山等、或いは塔等) からのクラッターである。このエコーに関しては、次のような関数型で充分良い近似が与えられることが報告されている^{9), 12)}。

$$1/(C(f)-n) = af + b \quad (1)$$

$C(f)$; スペクトル密度 [dB]

n ; 白色雑音レベル [dB]

f ; ドップラーシフト [Hz]

a, b ; 定数

この関数によるクラッタースペクトラムの最小二乗近似値は、図1の細線によって示す曲線である。本観測でも、観測スペクトラムからこの最小二乗近似値を差引くことにより、クラッターを除去を行なった。

iii) スペクトラムの高度変化を見ると、いくつかのピークが現われて、ドップラーシフトの同じ位置のピークが連続して現われることがある。

POWER SPECTRA
12 OCT. 1979
ALTITUDE 8.6-13.0 km

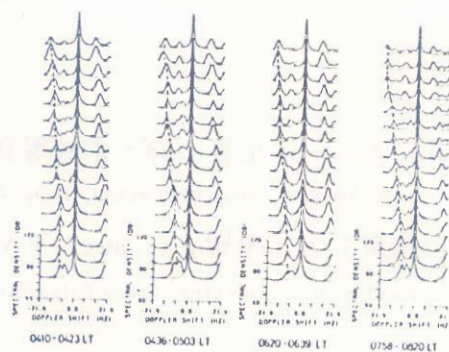


図1. 受信パワースペクトラムの例。細線は、推定されたクラッタースペクトラムを示し、破線は大気散乱エコーのピークの位置を示す。

これらは、変調されたパルスのサイドローブで受信されたエコーである可能性が強い。従って、これらのスペクトラム上に現われるいくつかのピーク (図で述べたクラッターを除く) の中から、大気散乱エコーによる真のピークを選ぶ必要がある。このため、適当な判断基準 (例えば、パルス・サイドローブエコーは、10高度以上にわたって、同じドップラーシフト値にピークが表われる) を設けて、他高度から混入したと思われるピークを除外し、さらに、風速の空間的、時間的な連続性を仮定して、前後の時間、上下の高度の真のピークの位置を参照にして、所望のピークを決定した。次いで、そのピーク近傍のスペクトラム値を用いて、モーメントを求め、得られた平均ドップラーシフトから風速を算出した。

〔4〕 観測結果

前章で述べた方法によって、風速が正しく推定されているかどうかを調べるために、バルーン (レーウィンゲンデ) による観測値との比較を行なった。図2は、10月の観測結果で、風速は、南北風、東西風それぞれ、北向き及び東向きを正として表わしてある。バルーンのデータ (実線) は、アレシボの東約75kmにあるサンチ

ン(San Juan)において、8時と20時(現地時間)に測定されたものであり、レーダーによる観測値(・印)は、同時刻のものである。

全般的に細かい鉛直構造に至るまで、両者により一致が見られる。対流圏においては数 ms^{-1} の差異が見られるものの、高度変化の傾向はよく似ているといえる。これは、対流圏では、地理的な影響がより大きいためには生じるものと考えられる。

図3に、観測値から、観測期間全体の平均値を差し引いた結果得られた変動成分を、等速度線図で示す(10月の例)。等速度線間隔は 5ms^{-1} で、ハッチを施した部分は、北向き及び東向きの風を表す。

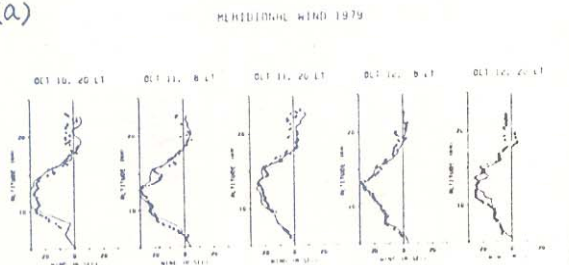
この日の対流圏界面高度(矢印)は、バルーン観測から約 16km と推定されるが、この図から、その高度を境にして上下で変動の様子が大きく異なることが分る。

[5] 大気潮汐波の検出

図3で示した変動成分から、大気潮汐波を検出し、その鉛直構造を調べるために、この変動成分に対し、1日及び半日周期の正弦波の合成関数で最小二乗近似を行なった(附録参照)。

図4に、その結果得られた各周期成分の位相と振幅の高度変化を10月の例について示す。位

(a)



(b)

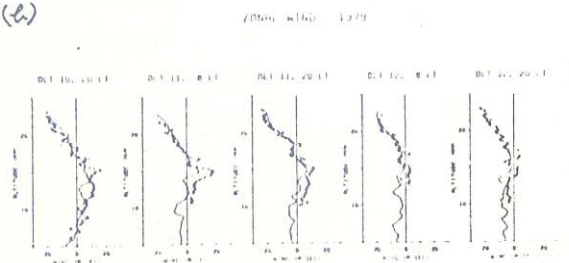
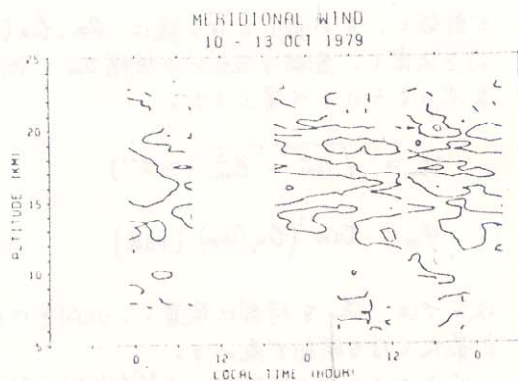
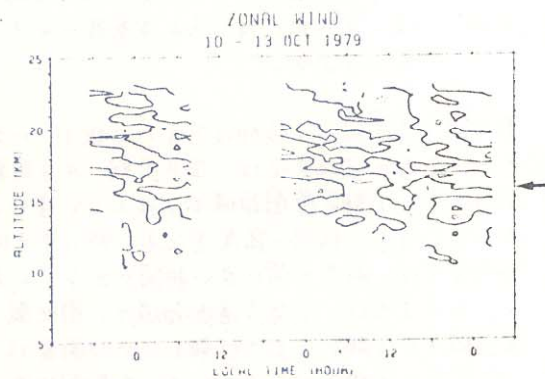


図2. サンファンから放球されたバルーンによる観測値(実線)とアレシボISレーダーによる観測値(・印)との比較。(a)は南北風、(b)は東西風で、それぞれ北向き、東向きを正として表わしてある。

相は、南北風は北向きが最大となる時刻、東西風は東向きが最大となる時刻で示し、東西風については、南北風に対して位相を $1/4$ 波長遅らせてプロットしてある。この図から分る様に、



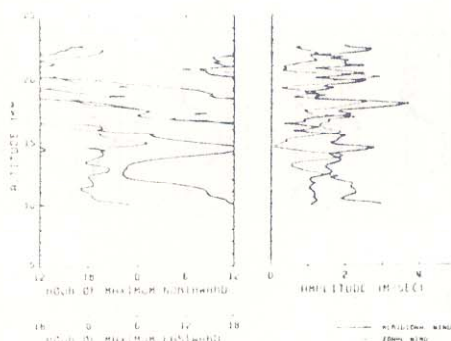
(a)



(b)

図3. アレシボISレーダーで観測された風の変動成分等速度線図。(a)は南北風、(b)は東西風で、ハッチを施した部分は、それぞれ北向き及び東向きの風を表す。等速度線間隔は 5ms^{-1} で、矢印は対流圏界面高度を示す。

(a)

DIURNAL
10 - 15 OCT 1979

(b)

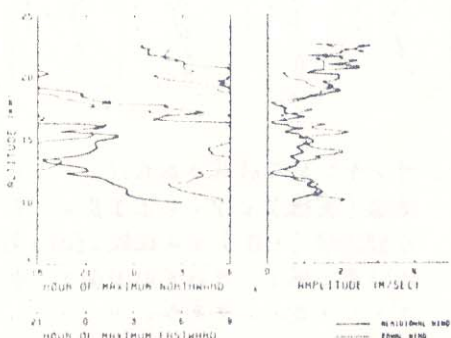
SEMI DIURNAL
10 - 13 OCT 1979

図4. 観測された大気潮汐波の位相と振幅の高度変化。(a)は1日周期成分、(b)は半日周期成分である。太線、細線はそれぞれ、南北風及び東西風から得られた結果である。東西風の位相は、南北風に対し1/4波長遅らせて示してある。

南北風、東西風とも位相は下方へ伝搬している。更に、両者の位相変化は、1日周期、半日周期成分とも、下部成層圏領域ではほとんど重なっている。また、振幅の高度変化も、特に半日周期成分では、両者の間に良い相関があるといえる。このように、下部成層圏領域で、南北風、東西風とも位相が下方へ伝搬し、かつ両者に、1/4波長の位相差があることは、大気潮汐波の南北成分と東西成分が同時に観測されたことを示唆と考えられる。これは、ISレーダーによる大気潮汐波の観測としては、今回初めて得られた結果である。

図4で、南北風、東西風それぞれから抽出された大気潮汐波は、互いに関係が深いことが明らかになったので、以下では、南北風と東西風の両観測値を用いて、次に述べるような方法で両者に共通して存在する大気潮汐波を抽出することを試みた。

今、南北風、東西風の変動成分をそれぞれ、

$$x_n(t_i); i = 1, \dots, N \quad (2)$$

$$x_e(t_j); j = 1, \dots, N' \quad (3)$$

とし、あらかじめ、1日周期成分、半日周期成分とも、東西風は南北風に対し位相が1/4波長遅れると仮定し、南北風、東西風をそれぞれ次のような関数で近似した。すなわち、

$$\tilde{x}_n(t) = \sum_{m=1}^2 \left\{ a_m \cos\left(\frac{2\pi m t}{T}\right) + b_m \sin\left(\frac{2\pi m t}{T}\right) \right\} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \tilde{x}_e(t) &= \sum_{m=1}^2 \left\{ a_m \cos\left(\frac{2\pi m t}{T} - \frac{\pi}{2}\right) + b_m \sin\left(\frac{2\pi m t}{T} - \frac{\pi}{2}\right) \right\} \\ &= \sum_{m=1}^2 \left\{ a_m \sin\left(\frac{2\pi m t}{T}\right) - b_m \cos\left(\frac{2\pi m t}{T}\right) \right\} \quad (5) \end{aligned}$$

ただし、 $T = 24$ 時間で、 $m = 1, 2$ はそれぞれ、1日周期、半日周期成分に対応する。ここで、近似値からの誤差を、

$$\begin{aligned} \epsilon^2 &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left\{ x_n(t_i) - \tilde{x}_n(t_i) \right\}^2 \\ &+ \frac{1}{N'} \sum_{j=1}^{N'} \left\{ x_e(t_j) - \tilde{x}_e(t_j) \right\}^2 \quad (6) \end{aligned}$$

で評価し、 ϵ が最小となる様に、 $a_m, b_m (m=1, 2)$ を決定し、各潮汐波成分の振幅 v_m と位相 ϕ_m を次のようにして算出した。

$$v_m = \sqrt{a_m^2 + b_m^2} \text{ [m s}^{-1}\text{]} \quad (7)$$

$$\phi_m = \tan^{-1}(b_m/a_m) \text{ [rad]} \quad (8)$$

以下では、 ϕ_m を時間に変換し、北向きに風速が最大となる時刻で表わす。

以上のようにして行なった関数近似の結果の一例を図5に示す。これは、10月の下部成層圏における結果で、図4の観測結果から予想される通り、南北風、東西風とも観測値(○印)が(4)(5)式で非常に良く近似されることが分る。

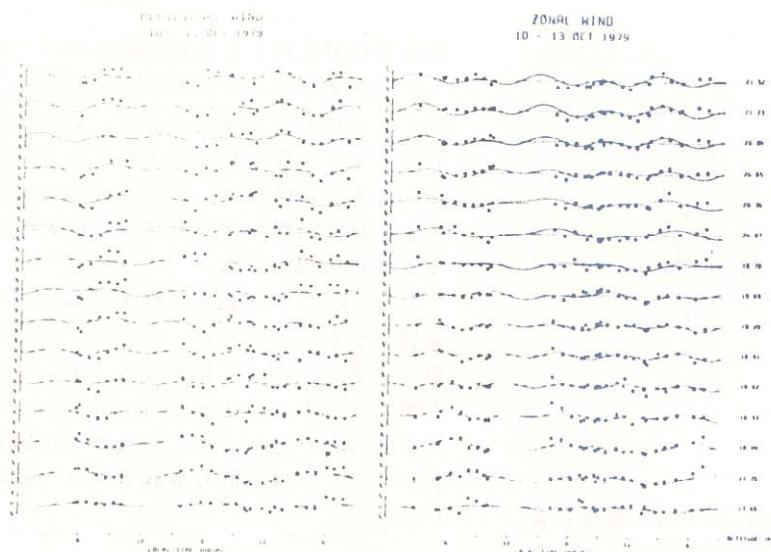


図5.
下部成層圏領域の南北
風(左)と東西風(右)に
対し、(4),(5)式で最小
二乗近似を行なった結
果。●印は観測値、実
線は近似曲線を示す。

次に、このようにして得られた大気潮汐波の位相と振幅の高度変化を調べて見る。図6に、各周期成分を等速度線図で示す。等速度線間隔は 0.5 ms^{-1} で、風の方向は南北成分で表わし(ありハッチを施した部分が北向きである(東西成分は位相が $1/4$ 波長逆相したものとなる))。この図より、1日周期・半日周期成分とも、下部成層圏領域では位相が下方へ伝搬していることが分り、位相がひと回りする高度差から波動の鉛直波長を読み取ると、1日周期成分で2~3 km、半日周期成分で約5 kmと非常に短い値が得られる。しかし、対流圏領域では、あまり顕著な位相の伝搬性は見られず、また、1日周期成分では高度11.5 kmと14 kmの近傍で、半日周期成分では高度12 kmと16.3 kmの近傍で、位相の、著しい不連続性(反転)が見られる。一方、図7に示す振幅の高度変化を見ると、各周期成分とも、上層

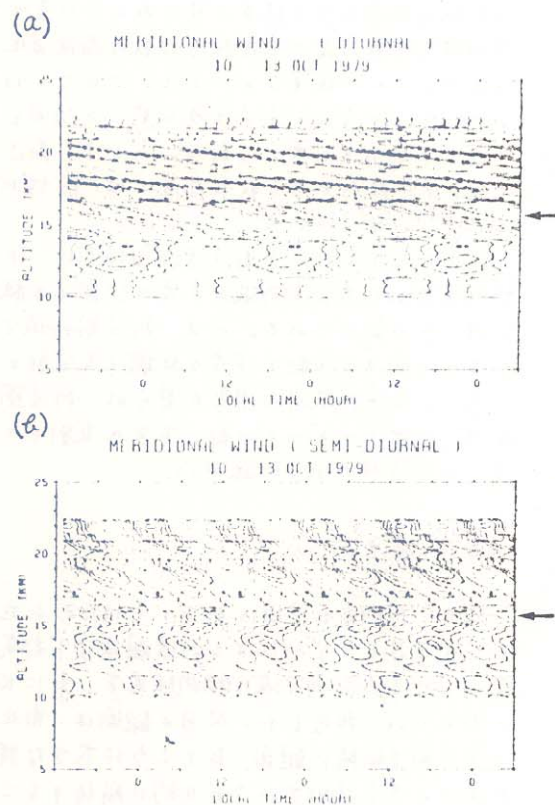


図6. 観測された南北風と東西風の両者を用いて検出された大気潮汐波を、南北成分について等速度線図で表わしたもの。(a)は1日周期成分、(b)は半日周期成分である。等速度線間隔は、 0.5 ms^{-1} で、ハッチを施した部分は北向きの風を示す。矢印は対流圏界面高度である。

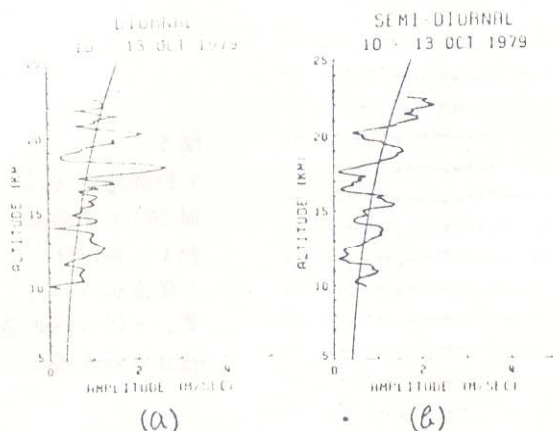


図7. 図6で示した大気潮汐波の振幅の高度変化。(a)は1日周期成分、(b)は半日周期成分。細線は、 $\rho^{-1/2}$ の高度変化を表わす(ρ : 大気密度)。

ほど振幅が増大する様子が現れ、その変化の傾向は、大気密度の平方根の逆数の高度変化(細線)とよく一致するといえる。このことは、4.1節と1.1)より一定のエネルギーの波が伝搬することを示すと考えられる。しかし、前述の他相の不連続性が見られる高度では、振幅が極端に小さくなっている。

以上のことから、下部成層圏領域では、下方で励起された大気潮汐波が上方へ伝搬する様子がはっきり認められる。一方、対流圏領域では、上方へ伝搬する波動と下方へ伝搬する波動との干渉による定在波的な現象が見られ、対流圏界面付近でエネルギーの一部、下方へ反射していることが予想され、興味深い。

[6] まとめ

以上、1979年に2回にわたって行われたアレシボISレーダーによる対流圏及び下部成層圏における大気潮汐波の観測結果を、主に10月の例について報告した。今回の観測は、南北風と東西風を同時に観測したところに大きな特徴があり、大気波動をベクトル的に解析することが可能となった。得られた主な結果は次の通りである。

i) 下部成層圏領域では、1日周期、半日周期成分とも、他相が下向きに伝搬し、かつ鉛直波

長は5km程度以下と比較的に短い。

ii) 大気潮汐波の各周期成分の振幅は、上層へ行くほど増大する傾向にあり、かつ高度方向に平均としてエネルギーが保存されている。

iii) 対流圏領域では、定在波的な減衰現象が見られ、対流圏界面付近で波の一部が反射していることが示唆される。

i)は、以前の観測から報告されていた内容を確認したものであるが、ii)に関しては、今回、南北・東西両成分を抽出することによって初めて得られたものである。またiii)については、まだ不明な点が多いので、今後さらに観測を積み重ねる一方、理論的な解析も併せて進める必要がある。

謝辞

有益な議論をしていただいた京都大学工学部におけるMU Radar Study Group(代表、加藤進)の関係者に、感謝の意を表する。また本研究の一部は、文部省科学研究費補助金を受けて行われた。

参考文献

- 1) Woodman, R. F., and A. Guillen, Radar observations of the winds and turbulence in the stratosphere and mesosphere J. Atmos. Sci., 31, 493-505, 1974.
- 2) Balsley, B. B., and K. S. Gage, The MST radar technique: Potential for middle atmospheric studies, Pageoph, 118, 452-493, 1980.
- 3) Röttger, J., J. Klostermeyer, P. Czechowsky, R. Rüster, and G. Schmidt, Remote sensing of the atmosphere by VHF radar experiments, Naturwissenschaften, 65, 285-296, 1978.
- 4) 植山、深尾、加藤、ISレーダーによる中層大気のリモートセンシング、日本気象学会機関誌「天気」、第26巻、第3号、1979。
- 5) Fukao, S., S. Kato, S. Yokoi, R. M. Harper, R. F. Woodman, and W. E. Gordon, One full-day radar measurement of lower stratospheric winds over Jicamarca, J. Atmos. Terr. Phys., 40, 1331-1337, 1978.
- 6) Fukao, S., K. Aoki, K. Wakasugi, S. Kato, and D. A. Fleisch, Some further results on the lower stratospheric winds and waves over Jicamarca, submitted to J. Atmos. Terr. Phys., 1980.
- 7) Harper, R. M., S. Fukao, T. Sato, N. Yamasaki, and S. Kato, Radar measurements of tidal winds at stratospheric heights over Arecibo, submitted to J. Atmos. Sci., 1980.

- 6) Kato, S., Dynamics of the upper atmosphere, Japan Scientific Soc. Press, 1980.
- 9) Chapman, S., and R. S. Lindzen, Atmospheric tides, D. Reidel Publishing Co., 130-157, 1970.
- 10) Evans, J. V., Theory and practice of ionosphere study by Thomson scatter radar, Proc. IEEE, 57, 496-530, 1969.
- 11) Rabiner, L. R., and B. Gold, Theory and application of digital signal processing, Prentice-Hall, 762pp, 1975.
- 12) 山崎 隆夫, 本間 加藤, アレシがISレーダーによるUF電波の成層圏散乱観測, 電学通信学会アンテナ伝搬研究, AP 77-58, 1979.

〔附録〕 最小二乗近似法の誤差評価

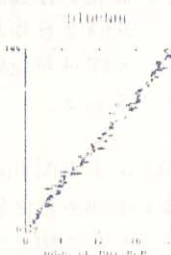
一般に、時系列データの周波数解析を行なう場合、サンプリング間隔とデータ長が、推定される振幅と位相の精度に大きな影響を及ぼす。特に本報告では、わずか2日余りのデータから1日及び半日周期成分を推定しているの、その推定精度を知る事が非常に重要である。ここでは、推定に伴う誤差の評価のために行なった計算結果について述べる。

まず、1日及び半日周期の各正弦波の振幅と位相を、それぞれあらかじめ与え、両者の単純和を取り時系列のデータとする。これに、ある標準偏差を持つ白色雑音でゆらぎを与え、適当な時間間隔でサンプルした。次いで、そのデータに、同じ周期の二つの正弦波の合成関数で最小二乗近似を行ない、初めに与えた各周期成分の振幅と位相が、どの程度復元されるかを調べた。附図1にその一例を示す。細線があらかじめ与えた振幅と位相である。ただし、振幅は、1日周期成分が 1.5 ms^{-1} 、半日周期成分が 1.0 ms^{-1} と、観測値と同程度の値に定めた。また、位相は各成分とも、1周期変化させ、両者の相対位相が異なる144例について計算した。また加えた白色雑音の標準偏差は 1.8 ms^{-1} で、これも実際の観測例(観測値と最小二乗近似曲線との差の標準偏差)に近い値である。計算に用いたデータ長は24時間で、サンプリング間隔は30分である(実際の観測では、データ長が2日余りで、南北・東西両データをを用いる場合、サンプリング間隔は約2時間)。一方、太線は最小二乗近似法により推定された振幅と位相である。この図から分る様に、各周期成分の相対位相の変化や、雑音が原因となり、推定された振幅と

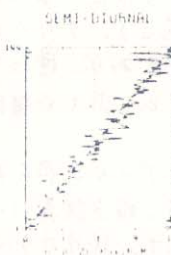
位相には、初めに与えた値からのずれが生じる。このずれが、最小二乗近似を行なう場合、真の値からの誤差になると考えられる。この要約の標準偏差は、1日周期成分では振幅 0.36 ms^{-1} 位相 1.03 hour 、半日周期成分では振幅 0.33 ms^{-1} 位相 0.69 hour となる。

主として本稿で論じた10月の観測では、24時間ほぼ連続にデータが得られているが、観測によっては、何らかの理由で一部の時間帯のデータが欠落している場合がある。従って、以下ではデータ長が24時間よりも短い場合について、推定誤差を計算した結果について述べる。すなわち、データ長を24時間から順に10時間まで減らして、上記と同様の方法で推定誤差の計算を行なった。あらかじめ与える各周期成分の振幅、位相、白色雑音の標準偏差、及びサンプリング間隔は、附図1の場合と同じである。附図2に、

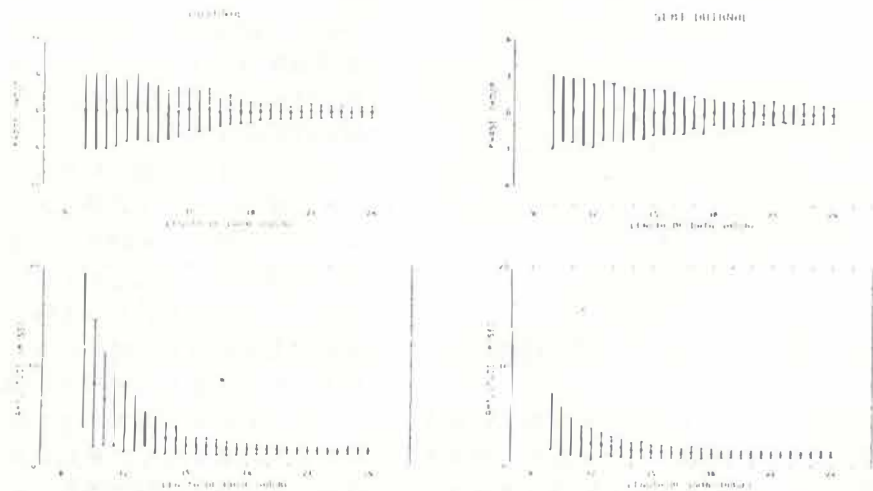
(a)



(b)



附図1. 白色雑音(標準偏差 1.8 ms^{-1})で生じた1日及び半日周期正弦波の時系列データについて、最小二乗近似法により推定された各周期成分の振幅と位相。細線が最初に与えた振幅と位相、太線が推定値で、縦軸方向に、144の事例について示す。(a)は1日周期で、(b)は半日周期である。



附図2. 振幅と位相の推定値のデータ長に対する依存性。

(a)は1日周期成分で、(b)は半日周期成分である。

・印は推定値の平均値、縦線は推定値の標準偏差を示す。

その結果を示す。(a)は1日周期成分、(b)は半日周期成分の振幅と位相の推定値である。・印は推定値の平均値、それに附した縦線が推定値の標準偏差を表す。附図2から、各成分の振幅と位相を精度よく推定するには(サンプリング間隔が30分の場合)、少なくとも18時間程度のデータ長が必要であり、逆にデータ長が15時間より短くなると、正しい推定が困難になることが分る。

また、実際に観測データが得られている時刻でサンプリングした場合、推定誤差について次の様な計算結果が得られた。10月の観測では、推定された振幅と位相の標準偏差は、1日周期成分についてはそれぞれ 0.37 ms^{-1} 、 0.98 hour 、半日周期成分についてはそれぞれ 0.32 ms^{-1} 、 0.71 hour となった。これらは、附図1から得られた結果と非常に良く一致する。一方、6月の観測では、1日周期成分についてはそれぞれ 0.46 ms^{-1} 、 1.3 hour 、半日周期成分についてはそれぞれ 0.49 ms^{-1} 、 1.1 hour と10月の観測と比べて幾分か大きくなった。これは、6月の観測データには位相の推定がうまくいかなかったと見られる。つまり、2日目

のデータ点も24時間前にずらせて2日目のデータに含めると(周期間数を用いて近似するから何周期かデータをずらせても結果は変わらない)約4時間連続してデータが欠落する時間帯が存在し、実質的なデータ長は約20時間となるためである。これらの推定値の標準偏差は、当然、附図2で示される値とよく一致する。

以上述べた方法により、実質的なデータ長が24時間に満たない場合でも、最小二乗近似法の推定誤差を正確に予測できることが明らかになった。この結果は、今後得られる観測の精度を評価する上で、極めて有用といえる。