

ポーカー・フラット及び稚内 MF レーダーにおける新観測—流星による風観測—

Wind Estimations with Meteor Observations by MF Radars at Poker Flat, Alaska and Wakkanai, Japan

川村誠治 堤 雅基 村山泰啓

KAWAMURA Seiji, TSUTSUMI Masaki, and MURAYAMA Yasuhiro

要旨

情報通信研究機構の二つの中波帯電波 (MF) レーダー (稚内、米国アラスカ州ポーカー・フラット) に 2004 年 8 月、流星を用いた新しい大気観測モードが加わった。流星飛跡を検出して、その位置を干渉計で特定するとともにドップラー・シフトから流星飛跡を押し流している大気風速を求めるもので、MF レーダーで従来行われている FCA による風観測の高度範囲よりも高い高度まで (約 80~120 km の範囲) 水平風速を推定することができる。両者の観測範囲が重なる領域では、流星を用いて推定された風速と従来法による風速は比較的良好一致を示している。本稿では、観測手法と実際の観測結果を紹介する。

A new measurement mode is introduced into two MF (medium frequency) radars of NICT at Wakkanai and Poker Flat, Alaska in August 2004. In this method, meteor trails are used to estimate wind velocities. The positions of meteor trails are determined by the interferometry technique, and horizontal wind velocities are estimated by their line-of-sight Doppler velocities. The height coverage of this technique by MF radars is from about 80 to 120 km. Wind velocities by meteors show quite good agreement with those by FCA technique (a traditional method to estimate winds by MF radar). In this paper, a method and observed results are reported.

[キーワード]

MF レーダー, 流星, 風速, 中間圏・下部熱圏

MF radar, Meteor, Wind velocity, Mesosphere and lower thermosphere

1 はじめに

地球大気とその気候状態は高度によって大きく変わり、各高度領域間の相互作用や上下方向の結合過程はいまだに大きな研究課題である。地球大気は、特に高度 100 km 付近を境にして下は大気過程が重要な領域、上は宇宙空間の影響を強く受ける領域と、特性が大きく異なる。地球大気と宇宙環境の関係を知る上で、遷移領域となる高度 100 km 付近の大気情報は極めて重要である。

MF レーダーは、高度約 60 km から 90 km の水平風速と電子密度を連続して測定することができ、中間圏・下部熱圏領域を観測する有効な手段の一つとして広く用いられている。水平風速は、

FCA (Full Correlation Analysis) と呼ばれる手法で大気の乱流構造の動きをとらえて推定される [1]。FCA については、他観測との比較等から高度約 90 km 以下での測風能力が検証されているが、その一方で高度 90 km を超えると推定誤差が大きくなることが知られている [2]。上記遷移領域とも重なってくる高度 90~120 km 程度の高度範囲は MF レーダーの FCA 観測ではカバーすることはできず、この領域の風速を推定するためには、HF 帯、VHF 帯の電波を用いた流星レーダーなどが用いられる。一方、中波帯の MF レーダーにおいても流星観測による水平風観測が可能なが Tsutsumi et. al, [1999] によって実証され [3]、南極昭和基地の MF レーダーでは FCA 観測と併用

表1 情報通信研究機構 MF レーダーの主要諸元

Site (Lat., Long.)	Yamagawa, Japan (31.20 N, 130.62 E)	Wakkanai, Japan (45.36 N, 141.81 E)	Poker Flat, Alaska (65.1 N, 147.5 W)
Frequency	1.9550 MHz	1.9585 MHz	2.43 MHz
Bandwidth	60 kHz (24 kHz since Sept. '96)	24 kHz	60 kHz
Peak Power	50 kW	50 kW	50 kW
Pulse duration	27 μ s (48 μ s since Sept. '96)	48 μ s	27 μ s
Time resolution	4 min.	4 min. (6 min. since Aug. '04)	3 min. (5 min. since Aug. '04)
Range resolution	7 km	7 km	4 km
Sampling interval	2 km	2 km	2 km
Antenna	Tx: 4 dipoles Rx: 3 cross-dipoles	4 cross-dipoles (for Tx and Rx)	4 cross-dipoles (for Tx and Rx)
Observation	FCA since Sept. '94 DAE since Sept. '98	FCA & DAE since Sept. '96 MET since Aug. '04	FCA since Oct. '98 DAE since Nov. '97 MET since Aug. '04

FCA: wind velocity measurement mode by Full Correlation Analysis.

DAE: electron density measurement mode by Differential Absorption Experiment.

MET: wind velocity measurement mode by meteor obserbation.

して流星による高度 100 km を超える領域の水平風観測が行われている[4]。

情報通信研究機構は、米国アラスカ州ポーカー・フラット、稚内、山川の3地点にMFレーダーを設置して水平風と電子密度を連続観測している。表1にこれらのレーダーの主要諸元を示す。このうち、アンテナ配置などハードウェアを変更することなく流星観測を導入できたポーカー・フラットと稚内で、2004年8月から流星観測による水平風推定を開始している。本稿では、ポーカー・フラットMFレーダーを例に、情報通信研究機構のMFレーダーに新たに追加された流星による風観測について紹介する。

2 流星による風観測の手法

まず、流星による風観測の概要を述べる。流星は地球大気に突入すると周りの大気を電離させながら進行し、やがて消滅する。このとき流星飛跡に沿ってできた棒状のプラズマは、拡散や再結合で散逸するまでの間背景の風によって流される。

このプラズマをレーダーで観測し、流星の位置とドップラー・シフトを求めることにより、レーダーから流星飛跡を見た方向(視線方向)内におけるプラズマの速度が求められる。この速度は背景大気風速の視線方向成分と考えることができる。ある空間・時間内で複数の流星を観測することで複数の視線方向風速が求められるため、鉛直風が十分に小さいという仮定の下に、フィッティングにより水平風速が推定される。流星の位置決定には干渉計の技術が必要なため、複数の受信アンテナを適切に配置する必要がある。

流星エコーは、流星によってできるプラズマのプラズマ周波数とレーダー電波の周波数の関係から、オーバーデンス・エコー(over-dense echo)とアンダーデンス・エコー(under-dense echo)に分けられる。プラズマ周波数が電波の周波数より高い場合にはオーバーデンス・エコーとなり、電波は棒状プラズマの表面で全反射してしまう。このときのドップラー・シフトは、背景大気の風速ではなく棒状プラズマが半径方向に広がっていく速度を反映したものとなるため、オーバーデン

ス・エコーは風速推定には使えない。棒状プラズマの内部を電波が伝搬できるアンダーダンス・エコーからのみ、背景大気の流れが推定できることになる。

流星による風速推定の主な流れは、次のようになる。

- a. 受信各チャンネル間の位相・振幅補正
- b. 受信データからの流星検出
- c. 流星の位置決定
- d. 風速推定

以下、順に各項目を説明していく。

2.1 受信各チャンネル間の位相・振幅補正

図1にポーカー・フラット MF レーダーのアンテナ配置図を示す。正三角形の各頂点と中心の4か所にクロス・ダイポール・アンテナが設置されており、四つのチャンネル(CH1~CH4)を形成している。干渉計により流星の位置を正確に決定するため、そして後で説明するオフラインビーム合成での流星検出の精度を上げるために、まずこれら4チャンネルの各受信信号の位相と振幅がほぼ同じになるように補正する必要がある。

図2は、CH4を基準に各チャンネルの位相差をプロットしたものである。2004年8月1日から2004年8月10日までの10日間のFCA観測

のデータを用いている。上段は位相差の高度分布で、高高度ほど位相差のばらつきが大きくなることが分かる。これは流星エコーなどの影響である。ここでは流星の影響がないと考えられる(天頂方向の大気からの分反射のみと考えられる)低高度(高度70 km以下)のデータのみを使用して位相補正を行う。下段に示すのは、高度70 km以下のデータのみを使用した位相差のヒストグラムである。フィッティングしたガウス曲線を赤線で示し

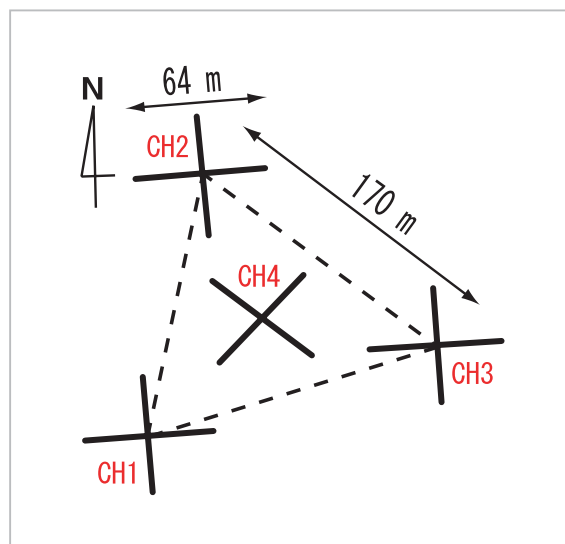


図1 ポーカー・フラット MF レーダーのアンテナ配置

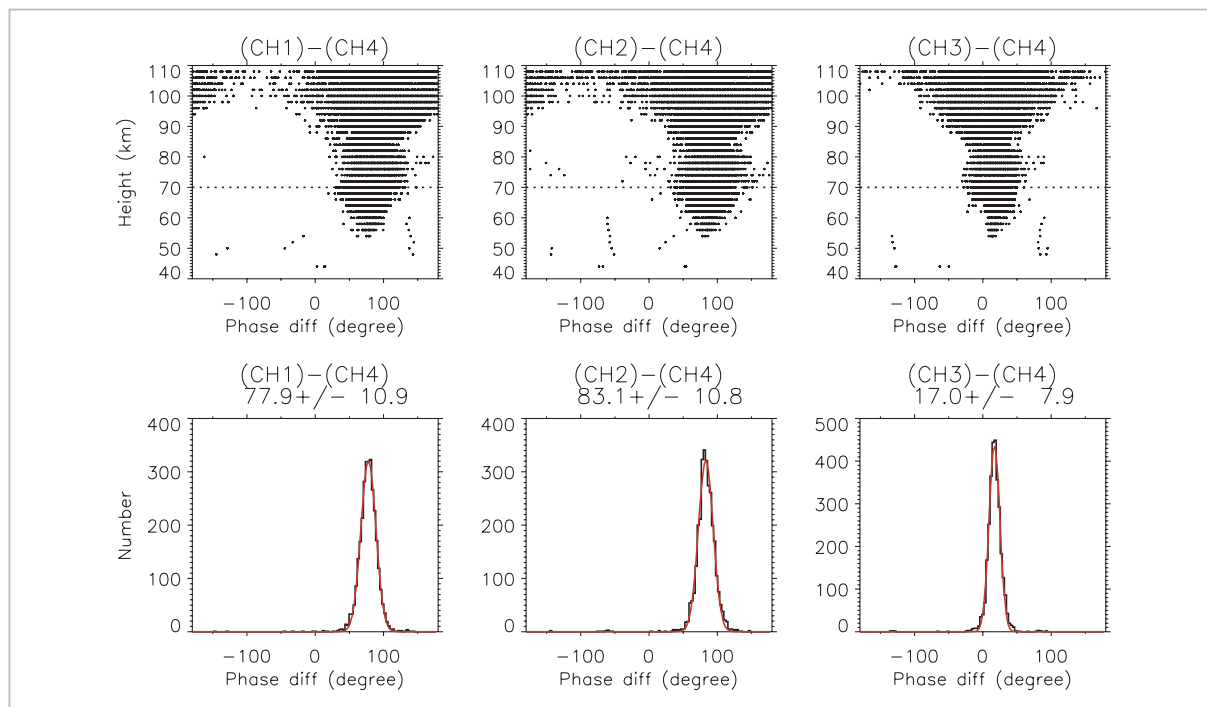


図2 各チャンネルの位相差の分布

ており、このフィッティングにより CH 4 に対する CH 1、CH 2、CH 3 の位相差はそれぞれ 77.9 度、83.1 度、17.0 度と決められる。振幅について同様のプロットをしたものが図 3 である。CH 1 を基準に各チャンネルの振幅比を示している。位相と同じく高度 70 km 以下のデータのみを使ってヒストグラムを作成し(下段の図)、フィッティングすることにより、CH 1 に対する CH 2、CH 3、CH 4 の振幅比がそれぞれ 1.089、0.931、0.607 と決められる。

2.2 受信データからの流星検出

流星による風速推定では、なるべく多くの流星を用いた方が時間・空間分解能を上げることができ、また推定精度も向上する。そのため、簡単なデジタルビームフォーミング(オフラインビーム合成)を行って天頂付近以外の流星も検出できるよう工夫している。図 4 にその概念図を示す。四つの受信信号を位相をずらして足し合わせることで、データ受信後に等価的に約 25 度傾いた斜め方向ビームを形成している。図 4 の A のように位相差を与えて各チャンネルを足し合わせると、図 4 右端の青い矢印 A の方向に 24.8 度傾いたビームを形成することができる。同じパターン

の位相差の与え方で青い矢印で示す 6 方向にビームを形成でき、また B のような位相差の与え方でも緑の矢印で示す 6 方向に 25 度傾いたビームを形成できる。合計 12 方向のビームと天頂ビーム(レーダー本来のビーム)を使って流星検出を行う。

受信信号時系列データからの流星検出の例を図 5、図 6 に示す。図 5 は各チャンネルの受信信号時系列の強度(左側)と位相(右側)を上段から CH 1、CH 2・・・の順に示したものである。位相には信号の終わりの方(グラフの右端付近)で他とは異なる変化が見られるが、このままでは信号強度に流星の痕跡を見つけることは難しい。これらの四つの受信信号に位相差を与えて合成した(オフラインビーム合成した)時系列を図 6 に示す。赤でハッチが掛かった部分に顕著に流星エコーが現れている。

オフラインビーム合成では多数の仮想ビームを形成するため、一つの流星が複数のビームでとらえられる可能性がある。そのため、時間・空間的に近く、同じ流星と思われるものについては重複しないように除去する必要がある。

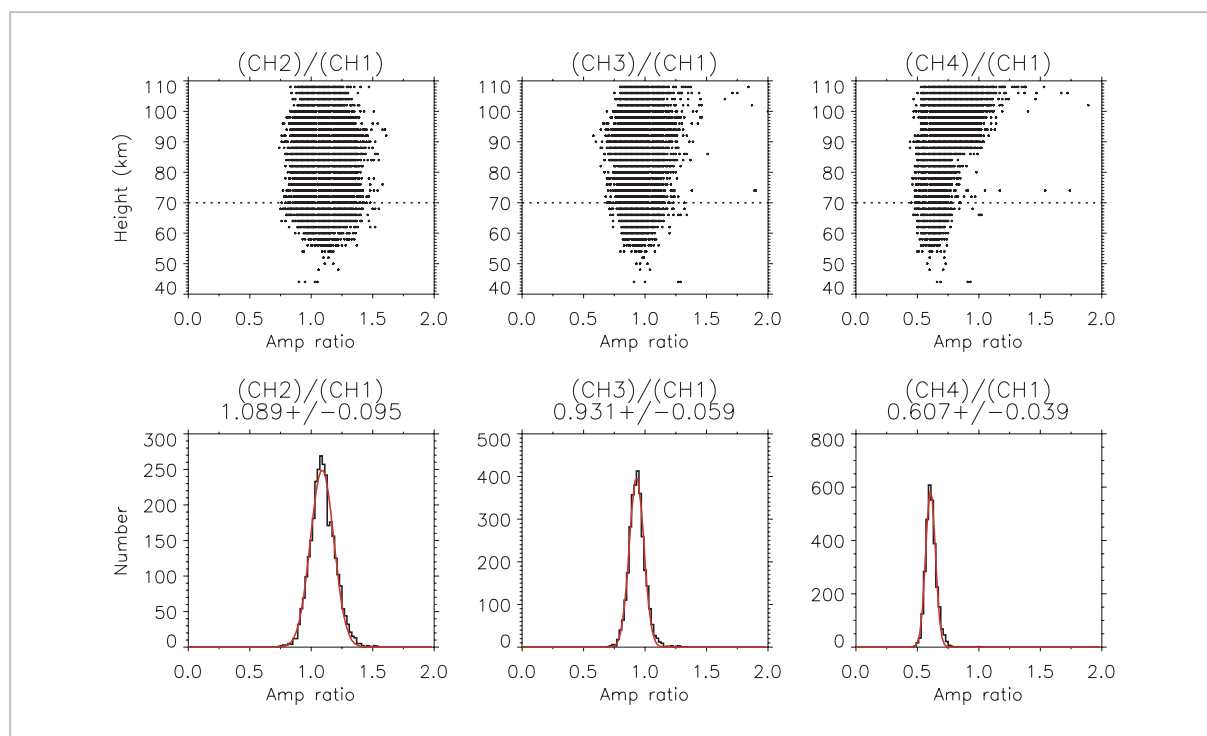


図3 各チャンネルの振幅比の分布

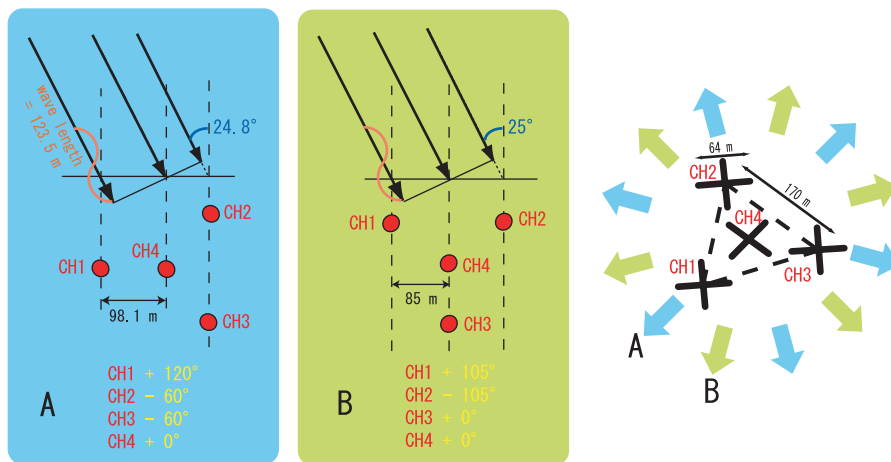


図4 流星検出のためのオフラインビーム合成の概念図

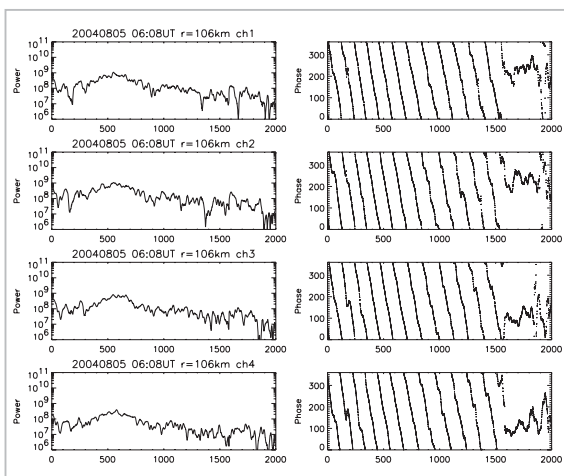


図5 各受信チャンネルの信号強度(左側)と位相(右側)の時系列

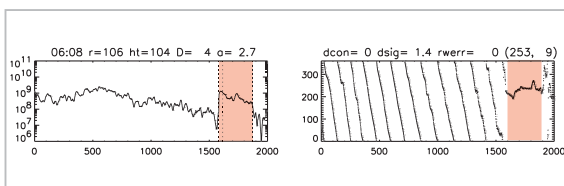


図6 オフラインビーム合成により現れた流星エコー

2.3 流星の位置決定

流星の位置は、図1に示す配置の各アンテナからの受信信号の位相を用いて、干渉計によって決定する。データ処理の最初に位相補正をすることはこのためである。干渉計を構成する複数の基線のうち、最長基線が長いほど流星位置の決定精度は

高くなるが、その一方で最短基線が送信電波の半波長以下でなければ流星の位置を一意に決定できない場合が生じる。ポーカー・フラットの場合、最長基線は170 m(正三角形の一辺の長さ)、最短基線は98.1 m(中心から他のアンテナまでの距離)である。最短基線が送信電波の半波長(61.7 m)よりも長い場合、流星位置に複数候補が現れることがある。こうした場合は、流星飛跡の現実的な出現高度などを条件に流星位置を決定する。

2.4 風速推定

流星が検出され、その位置が決まると、次に位相時系列から流星エコーのドップラー・シフトを計算する。このドップラー・シフトは、流星飛跡が背景風によって流される速度のうち、レーダーと流星を結ぶ直線方向(視線方向)内の成分に対応している。よって一つの流星から、その流星の位置における背景風の視線方向成分が求められる。ある時間・空間内で複数の流星を検出し、それぞれの視線方向風速を求めてフィッティングすることで、その時間・空間を代表する水平風速が計算される。このとき、風速の鉛直成分は水平成分に対して十分に小さいと仮定できるため無視する。風速の時間・空間分解能は、どの範囲の流星をまとめて水平風速推定に使うかで決まるため、なるべく多くの流星が検出できた方が分解能を上げることができ、また風速推定精度も向上させることができる。

3 流星の分布

流星観測によって推定された風速を示す前に、この節では検出された流星の分布について見てみる。図7に、2004年8月24日の24時間に検出された流星の諸分布を示す。この日は24時間で1398個の流星が検出された。上段左からLT(地方時)分布、レンジ分布、高度分布、下段左から天頂角分布、方位角分布、到来角分布である。流星個数は、1日の中でも変動が大きく、明け方に最大となっている。高度分布を見ると、流星は約100 km を中心に上下 20 km 程度に分布していることが分かる。図7右下の到来角分布では分布の形状に特徴が見られるが、これはMFレーダーのビーム形状を反映していると考えられる。図8にポーカー・フラットMFレーダーのビーム形状のイラストを示す。正三角形の頂点と中心の四つを送信点としているため、合成されたビームは赤線で示すような形状となる。この形状が到来角分布

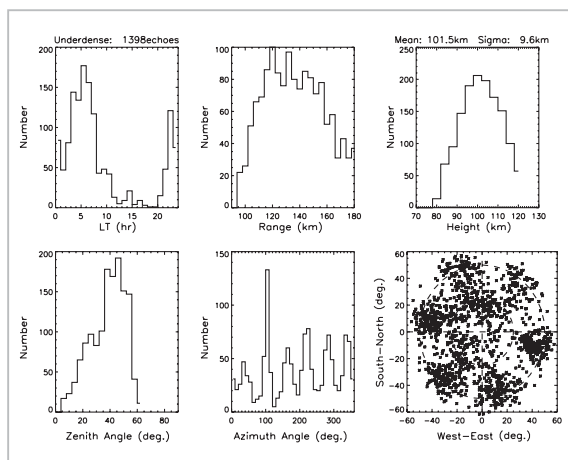


図7 2004年8月24日に検出された流星の諸分布

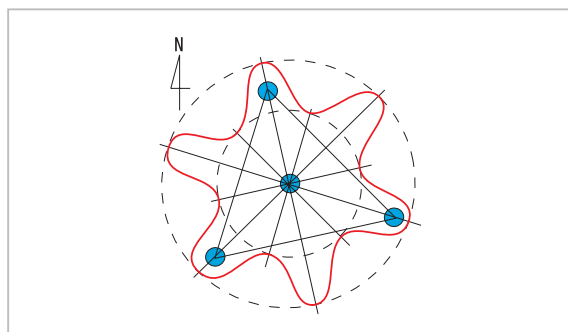


図8 ポーカー・フラットMFレーダーのビーム形状

の形状とほぼ一致する。ただし、MFレーダーのビーム幅は半値半幅で30度程度であり、流星の天頂角分布が約60度まで広がっているのはオフラインビーム合成によるものと考えられる。

図7の例では1日で約1400個の流星が検出されているが、流星個数は日によっても大きく変動し、1日に200個程度しか検出されない日もある。2004年8月の1か月間では合計約20,000個、1日平均約640個の流星が検出された。

4 流星により推定された風速

本節では、流星観測で推定された風速をFCAによる風速と比較する。ポーカー・フラットではFCA風速観測2分、DAE電子密度観測1分、流星観測2分を切り替えて繰り返しているため、FCAによる風速と流星による風速はほぼ同時に観測されたものと考えられる。流星による風速推定では、時間・高度分解能をそれぞれ1時間・4kmとした。FCAの高度分解能は4kmである。FCAの時間分解能は5分であるが、流星による風速と一致させるため1時間平均した値を用いて比較することにする。

2004年8月24日の風速推定結果を図9に示す。上から順に流星による東西風(東向き正)、FCAによる東西風、流星による南北風(北向き正)、FCAによる南北風で、一番下には流星による風速推定に使われた流星個数の分布を示してある。流星とFCAでは観測高度範囲が異なっていることに注意が必要である。観測高度が重なっている領域に注目すると、両者は比較的良い一致を示している。FCAによる風速は高度90kmを超えると小さく推定される傾向にあることが指摘されているが、今回の観測でも東西風の15~20 UTくらいで流星観測による風速の方がFCAの風よりも大きく推定されている。両手法の風を高度方向につなげて見ると、風速の大きさや変動パターンがよくつながっている。流星個数が少ないところで流星による風速に疑わしい変動が見えることもあるが、流星個数がある程度確保されれば、流星観測はFCAとほぼ一致する風速を推定している。

2004年8月9日から2004年9月9日までの約一か月間の平均日変化の比較を図10に示す。フォーマットは図9と同じである。一か月平均で

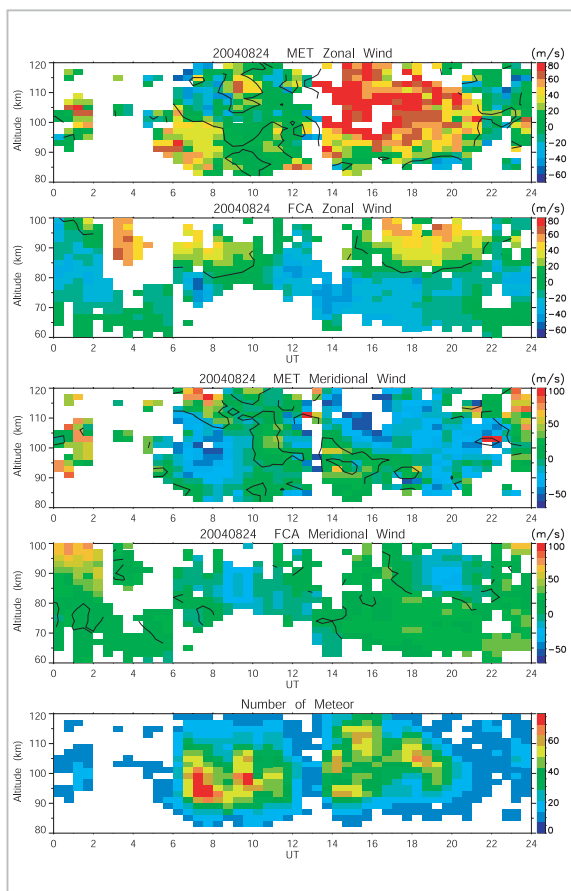


図9 流星とFCAにより推定された風速の比較

は両者が更に良い一致を示していることが分かる。

5 まとめ

情報通信研究機構が有する三つのMFレーダーのうち、米国アラスカ州ポーカー・フラットと稚内に、流星による風速観測の機能が追加され

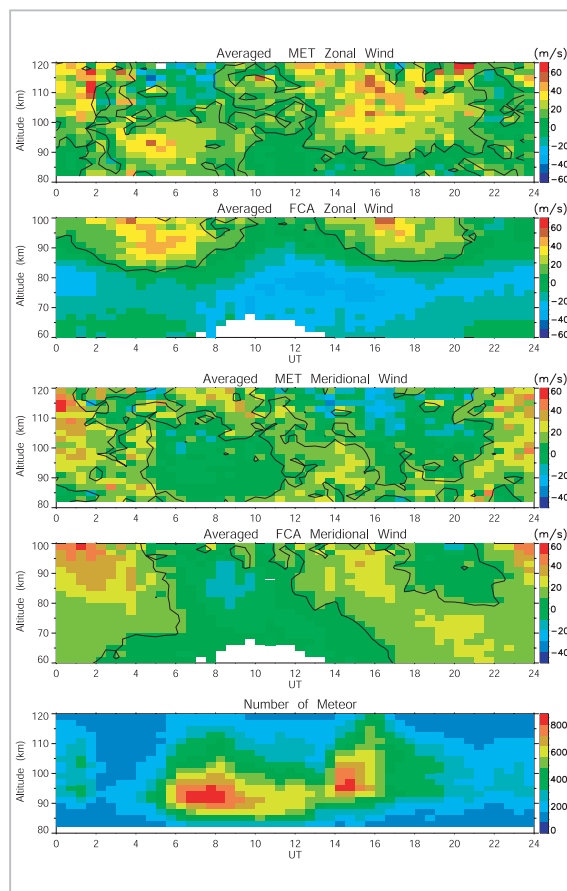
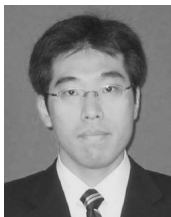


図10 流星とFCAにより推定された風速の
一か月平均値の比較

た。本稿ではポーカー・フラットの例を取り、MFレーダーによる流星観測について、その手法と観測結果を紹介した。流星は2004年8月の1か月間に約20,000個検出され、1日平均は640個程度であった。流星個数が十分に確保できれば、流星による風速はFCAによる風速と良い一致を示し、流星観測がMFレーダーの風速観測可能高度を引き上げ得ることが示された。

参考文献

- 1 B. H. Briggs, "The analysis of spaced sensor records by correlation techniques", Handbook for MAP, Vol.13, 166-186, 1984.
- 2 D. A. Holdsworth, "Influence of instrumental effects upon the full correlation analysis", Radio Sci., 34, 643-655, 1999.
- 3 M. Tsutsumi, D. Holdsworth, T. Nakamura, and I. Reid, "Meteor observations with an MF radar", Earth Planets Space, 51, 691-699, 1999.
- 4 M. Tsutsumi and T. Aso, "MF radar observations of meteors and meteor-derived winds at Showa (69S, 39E), Antarctica: A comparison with simultaneous spaced antenna winds", J. Geophys. Res., Vol.110, D24111, doi:10.1029/2005JD005849, 2005.



かわむらせいじ
川村誠治

電磁波計測研究センター環境情報セン
シング・ネットワークグループ研究員
博士(情報学)
大気物理学、レーダー工学



つづみ まさき
堤 雅基

国立極地研究所研究教育系准教授
博士(工学)
大気物理学



むらやま やすひろ
村山泰啓

総合企画部企画戦略室プランニングマ
ネージャー(前電磁波計測研究セン
ター環境情報センシング・ネットワ
ークグループ研究マネージャー)
博士(工学)
大気リモートセンシング、中層大気力
学