

GPS 衛星電波を活用した超高層大気観測用マルチスタティックレーダーとその応用

代表研究者	中 村 卓 司	京大大学生存圏研究所准教授
共同研究者	堤 雅 基	国立極地研究所准教授
共同研究者	藤 原 康 徳	日本流星研究会会員
研究協力者	臼 居 隆 志	日本流星研究会会員

1 研究の目的

レーダー装置の送信受信地点をバイスタティック、マルチスタティック化することは、1990年代までは周波数や送信時刻の同期をとるためのシステムとして、マイクロ波リンクなど大掛かりな装置が必要であり、大規模なシステムを構築することとなっていた。ところが1990年代なかばから衛星測位システムの電波が民間でも容易に用いられるようになり、GPS(Global Positioning System)電波を用いた機器で、離れた2地点間で同一周波数標準やタイミング基準(PPS(pulse per second)信号)などが高精度で得られるようになり、マルチスタティックなレーダーの構築が容易になった。本研究では、京都大学のVHF帯の大気観測用大型レーダーであるMU(Middle and Upper Atmosphere)レーダー(46.5MHz, 1MW出力)を主システムとした小型かつ安価なリモート受信局を多数配置したマルチスタティックレーダー観測システムを構築し、超高層大気の観測を精密化する流星レーダーシステム(流星突入時に地球大気を電離する飛跡を標的とする超高層風のモニター)に応用するとともに、航空機の検出とトラッキングにも使用可能なマルチスタティックレーダーシステムを開発し、その性能を検証して、次世代的な安価なマルチスタティックレーダーシステムのプロトタイプを得ることを目的とする。本研究で開発するシステムが完成すると、たとえば、レーダー送信局の送信電波を信号源とするだけでなく放送局などの強力な電波を電波源として、多数のGPS同期小型受信システムを配置することで、上空の飛行体の監視を行なうシステムなど、わが国上空を広く見渡せる安価なレーダーシステムの構築、人工衛星の落下のリアルタイム・モニターシステムなど種々の応用が考えられ、社会的にも有意義である。

2 流星レーダーの概要

2-1 超高層大気の観測

高度10-100km付近までの中層大気(成層圏、中間圏に対応)は大気が流体的に振舞う領域であり地表付近の気象擾乱や対流活動などの変動の影響を強く受ける領域である。一方高度100km以上の超高層大気は熱圏、電離圏(電離層)などといわれる領域であり、太陽放射の極紫外線などを吸収して大気が加熱するとともに、一部が電離して電離層を形成している。太陽活動の影響を強く受ける領域であり、また大気はより粒子としての性質が主となっている。これらの境界にあたる高度100km付近の中間圏・下部熱圏領域は地球大気の種々の変動を最も敏感に反映する領域であるが、計測手段が限られているためまだまだ観測的研究が不足している。この領域の観測を行なう手段として、流星レーダー観測があり、レーダー技術やコンピュータ・信号処理・情報処理の発展とともに同観測法も発展してきており、世界的にもその設置数は増加してきている。

2-2 流星レーダー観測

太陽系内を漂う $\mu\text{g} \sim \text{g}$ 程度の粒子である流星物質は、地球大気に突入すると大気分子と衝突して高温となり電離プラズマを形成する。流星の軌道上には高度80-120km付近に直線状に電離飛跡が形成され、次第に径方向に拡散して希薄になる。この電離飛跡中に自由電子は電波を散乱するが飛跡は直線状になっているため、飛跡に直交する方向から照射される電波は強くフレネル散乱される。これが流星飛跡の散乱である。拡散による時間減衰を含めた信号強度を表すレーダー方程式は、受信電力 $P_R(t)$ は下記のように表される。

(McKinley, 1961) (ただし、アンダーデンス飛跡で後方散乱の場合)

$$P_R(t) = P_{RO} \times e^{-\frac{t}{T_{un}}} \times e^{-(8\pi^2 r_0^2 / \lambda^2)}$$

$$\begin{aligned} \text{ただし、} P_{RO} &= \frac{P_T G^2 \lambda^3 \sigma_e}{128\pi^3 R_0^3} \left[\frac{C^2 + S^2}{2} \right] q^2 \\ &= 2.5 \times 10^{-32} P_T G^2 \left(\frac{\lambda}{R_0} \right)^3 \left[\frac{C^2 + S^2}{2} \right] q^2 \quad [\text{w}] \end{aligned}$$

$$T_{un} = \frac{\lambda^2}{32\pi^2 D}$$

ここで、 $s = \int_{r_0}^c \sin \frac{\pi x}{2} dx$ 、 $c = \int_{r_0}^c \cos \frac{\pi x}{2} dx$ であるが通常の流星飛跡では $s = c = 1$ とおいてよい。なお、 $P_R(t)$ 、 P_T 、 G 、 R_0 、 D 、 λ 、 r_0 、 T_{un} はそれぞれ、受信電力、送信電力、アンテナ利得、飛跡までの距離、大気の高極性拡散係数、電波の波長、流星飛跡の初期半径、受信信号強度の減衰時定数を表す。

一方、 $\sigma_e = 4\pi r_e^2 \sin^2 \gamma \approx 1 \times 10^{-28} [\text{m}^2]$ は、電子1個の散乱断面積であり、 r_e : 電子の古典半径 ($2.8 \times 10^{-15} \text{m}$)
 γ : 電界と受信局の方向のなす角 で表される。後方散乱の場合には $\gamma = \pi/2$ であり、 $\sin \gamma = 1$ が常になりつつ。

30-50MHz 程度の VHF 帯の周波数ではエコーの継続時間は 0.01-1s 程度になる。流星物質が大気に突入して飛跡が成長するとともに信号強度は急速に立ち上がり、同時に位相が回転する。送信点から流星の軌道に下ろした垂線の足 (最短距離の点) を流星物質が通過するとそのあとの強度変化や位相変化は小さくなり、周囲の大気の運動 (風) によって飛跡がドリフトする運動がドップラー周波数シフトとして観測される。このときのドップラーシフト Δf は、 $\Delta f = -(2f/c) \vec{v} \cdot \vec{l}$ 、ただし、 \vec{v} は風速のベクトル、 \vec{l} は、飛跡の視線方向の方向ベクトルは送信電波の周波数、 c は光速である。流星レーダー観測では、一定時間について一定高度範囲の流星エコーを多数集めて異なる視線方向のドップラー周波数偏移を測り、当該高度時間格子内では風速場が一定であるとしてある時刻、高度の風速を推定する。すなわち、 i 番目の流星エコーに対して $\vec{v} \cdot \vec{l}_i = \Delta f_i (-c/2f)$ の式を用い、多数のエコーを集めて最小2乗法を当てはめて風速を推定する。なお、高度および飛跡の視線方向の決定のために、個々の流星エコーについて、レンジング (距離測定) と方向測定 (方位、仰角: 複数アンテナの干渉計による) を行なう必要がある。また、風速以外に減衰時定数から求まる拡散係数は、温度と気圧の関数であるため、大気温度の情報も得ることができる。この情報も基本的には、一定高度と時間範囲の流星エコーの観測データを統計解析することで行なわれる。

なお、送信点と受信点異なるバイスタティックあるいはマルチスタティックレーダーの場合は、以上の議論は前方散乱になる分だけ複雑になる。まず、モノスタティックレーダーで飛跡に直交する方向からのレーダー電波に対して強い後方散乱をしていたが、バイスタティックの場合には、送信点と飛跡反射点、受信点と飛跡反射点を結ぶ線分が飛跡直線に対して同じ角度となる場合 (正反射の関係) にのみ強いフレネル散乱が得られる。このときのドップラー周波数シフトは、送信点から飛跡方向を見る方向の方向ベクトル l_1 、飛跡から受信点を見る方向の方向ベクトル l_2 と用いて、 $\vec{v} \cdot \vec{l}_1 - \vec{v} \cdot \vec{l}_2 = \Delta f (-c/f)$ となる。もちろん、バイスタティック・マルチスタティックレーダーのドップラー周波数シフトの計測から風速場を求めることも可能である。

流星レーダーによる超高層大気 (80 - 100 km) の風系の観測は、20 世紀の半ばから行なわれており、上記のように干渉計を用いた精密な観測も 80 年代以降に盛んに用いられるようになった。90 年代にはコンピュータによる制御とデータ取得も容易になり現在では世界で 20 - 30 箇所の流星レーダー観測が行なわれている。これらの通常の流星レーダーは 30 - 50 MHz の電波を用い、10 kW 程度のピークパワーで 1 日あたり数千個の流星エコーを捉えて、たとえば 1 時間平均の風速プロファイルを計測することができる。京都大学では、1977 年に流星レーダー観測を開始し、1983 年 - 1986 年にはほぼ 3 年にわたり連続観測を行なうなど超高層大気の観測で成果を挙げてきた (Tsuda et al., 1987)。同レーダーは、さらにインドネシアの赤道大気の観測に 1992 年から 2000 年まで用いられた (Tsuda et al., 1995)。これらと並行して、1984 年に完成した京都大学の VHF 帯中層超高層大気観測用大型レーダー (MU レーダー: 46.5MHz, 1MW: 滋賀県信楽町) を用い

た流星観測法が開発され(Nakamura et al., 1991)、同レーダーでは1日約10,000個の流星エコーを受信して4chの干渉計で高度時間分解能の高い風系観測を行なってきた(Nakamura et al., 2002)。2004年に受信システムが29チャンネルと超多チャンネル化になりデジタル化され流星観測も飛躍的に感度が増大して1日5万個以上の流星を受信している。これによりこれまで不可能だった風速場の水平分布など超高層大気の3次元構造が観測できるようになった。現在、世界でもっとも高性能の流星レーダーとなっている。本研究ではさらに精度よく超高層大気の構造を調べるために、レーダー受信機をマルチスタティック化し、受信できる流星エコーの数を飛躍的に向上させるための基礎実験システムをGPS受信機を活用して得ることを目標とした。

モノスタティック、バイスタティックいずれの場合も、流星の飛跡の位置を計測することが重要でありそのために、レンジングと干渉計は必須となる。また周波数を精度よく(風速推定には0.1Hz程度までの絶対精度があることが望ましい)求めるために、受信機間での周波数の同期もとる必要がある。本研究では、マルチスタティック受信機には、レンジングおよび周波数同期の機能のみ搭載し、方向はMUレーダー本体での干渉計の計測のみを用いて、2地点間の正確な時刻と距離で同一流星を判定し、MUレーダー観測による流星位置データを検証しつつ、異なる視線方向のドップラー周波数偏移データを蓄積して、風速計測の精度を向上することを目指した。また、3地点以上で同一流星からのエコーを捉えてドップラー周波数を計測することで、きわめて限られた時間高度領域の3次元風速を求めることにも応用する。とくに鉛直風(上昇下降流)はこれまで求めることが困難でその動態がよくわかっていないため極めて貴重な情報となる。図1にマルチスタティックレーダーシステム概念を示した。

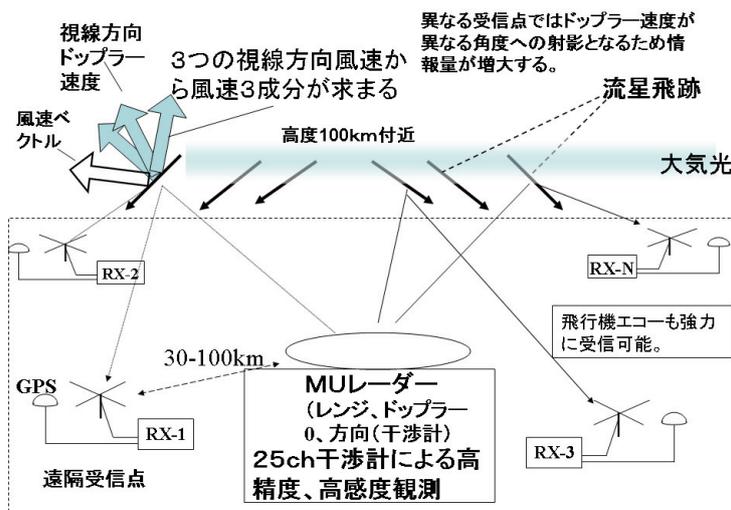


図1 本研究の対象となるMUレーダーを中心としたマルチスタティックレーダーシステム概念図

3 研究の概要

3-1 観測システム

図2にマルチスタティック用遠隔受信システム全体の構成図を示す。システムは46.5MHzの直交検波ダイレクトコンバージョン受信機と、200kHzの8ビットA/D変換装置とUSBインターフェース、それにWindows OSのPCが主要構成となる。46.5MHzの信号は外部からの10MHzの正弦波からシンセサイザで作られる。受信システムは、視線方向風速を0.5m/s以下の精度で計測できるものとする、ドップラー周波数シフトの計測精度は $0.5 / (6.45/2) = 0.16$ Hz 必要である。したがって、10MHzの基準周波数では0.033Hz程度の精度は必要である。そのため、本研究ではGPS信号を受信する周波数標準としてTCXOを用いた10MHzの信号源を使用することとしてシステムを設計した。なお、受信機内部にも水晶発振器を搭載しておりスイッチで切り替えることにより内部発振器だけで動作させることが可能である。レーダーの送信電波が直接受信可能な距離や地形の場合には送信電波とローカル発振器の周波数差を正確にモニターできるため、このような構成にすることによりシステムを簡単化できる。受信機の出力は、データ取得用の200kHz帯域幅の複素信号出力と音

MU遠隔受信システム ブロック図

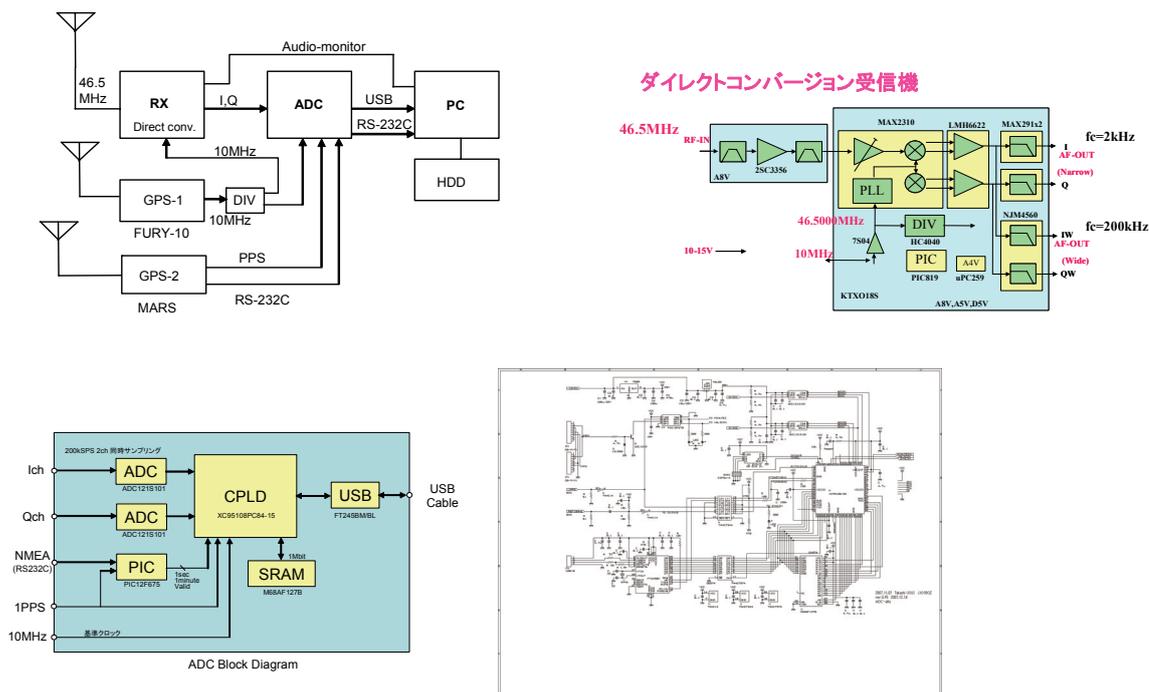


図2 受信システムの構成図 (左上)全体ブロック図、(右上)RX部の詳細、(左下)ADCの詳細、(右下)ADC内のCPLDの内部

声周波数でのモニター用の2系統を有している。

本助成で特に開発したADCの部分は、200kHzで連続的に受信信号を複素信号として取得することを目的としており、USBインターフェースによって汎用のWINDOWS PCにデータを入力することが特徴である。USBインターフェースを用いることで、データ取得PCにかかるコストを最低限におさえることができる。USBインターフェースにはFTDI社のFT245BM/BLを使用した。MUレーダーの受信機では、自分自身で送信パルスのタイミングを有しているため、送信開始後の任意の時間にAD変換を開始し、ある一定の高度範囲(データ点数)を取得して、また次の送信パルスタイミングに同期することができる。したがって、送パルス間隔(IPP)と受信データのサンプル間隔(サンプル周波数)の間には特に制限はない。ところが本研究の対象であるマルチスタティックレーダーシステムの場合、受信側では送信パルスのタイミングを逐次有しているわけではないので、上記のような送信パルスタイミングを駆使したデータ取得サンプルの時間制御は困難である。この場合、送信パルス間隔(IPP)が、サンプル間隔の整数倍であるとフリーランニングでもIPPごとに同じタイミングでサンプルが可能となる。さらに、IPPが1秒の整数分の1であると、サンプルタイミングをGPS同期のPPS信号(1秒ごとのパルス)に同期させることで、送信パルス間隔に同期したサンプルが可能となる。なお、このばあい送信信号のタイミングもGPS信号に同期している必要がある。MUレーダーの流星観測モードでは、送信パルス間隔が2ms、サンプル間隔(通常サブパルス間隔=パルス符号変調の符号間隔と同一)は6usでGPS電波に同期して送信されている(毎正秒に同期した送信となっている)。本研究では、サンプル間隔を6usから5usに短くし、1秒間に200kサンプルすることで、GPS同期のPPS信号に同期してフリーランニングすることで、送信パルスとの同期を確保することにした。なおこの場合、通常はパルス位相変調の復号符号が1, -1の単純な組み合わせ(1, -1は位相が0度、180度を表す)となるが、符号の幅とサンプル幅(間隔)が異なるために、下記のような復号符号を用意した。これは、6usの16bitコンプリメンタリ符号について、1us間隔でオーバーサンプリングした時系列を用意し、FFTで複素スペクトルに変換したあと、半値幅(片側)が200kHzの三角形重みの低域ろ波フィルター(スペクトル窓)を乗じて逆FFT変換したものを5us毎にサンプルして復号のための関数を作成したものである。これまでの受信実験では良好にパルス復号が行なわれていることが確認されている。

3-2 実験結果

まず、開発した ADC 部の性能として連続的にデータを取得できることを確認した。この段階で種々のハードウェアおよび PC 側のデータ転送ソフトウェアについて実験を繰り返して改良を行なった。図 3 に示すように、24 時間にわたってデータ転送数が PPS パルス間で 40 万データとなっており、取りこぼしなしで良好にデータが転送されていることがわかる。

実際にシステムを宇治キャンパスに設置して流星エコーと飛行機エコーを受信した例を図 4 に示す。上段が横軸時間 (秒)、縦軸送信点から散乱体をへて受信点までの距離の半分 (往復距離) にプロットした信号強度、中段は白枠で囲っ

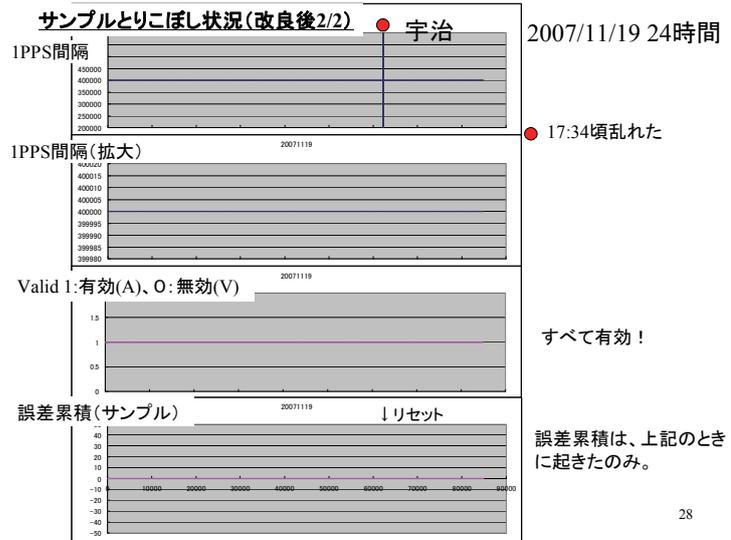
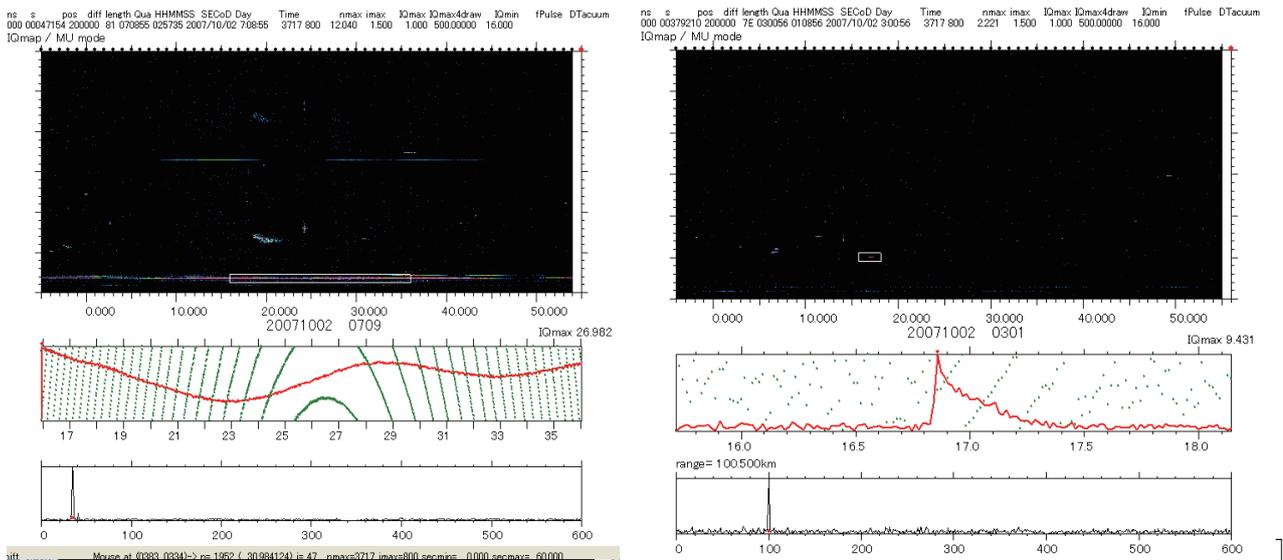


図 3 ADC の 1 秒分のデータ転送数 (1 段目と 2 段目)。40 万であれば OK。GPS の受信状況 (3 段目)。および累積取りこぼし量 (4 段目)。2007 年 11 月 19 日のデータ。



(a) 上段、信号強度の時間距離断面図。時間は 60 秒。縦軸は送信点—散乱体—受信点の距離を 2 で割ったもので、下端が 0 km、上端が 600 km。中段は、上段で白四角でかこった部分の振幅 (赤) と位相 (緑) の拡大時系列。下段は、白四角の部分の信号強度距離断面図。(図面作成ソフトは、寺澤敏夫氏による)

たエコーの振幅 (赤) と位相 (緑) の時間変化、下段は白枠付近の距離方向の信号強度断面図である。図 4 (a) では、往復距離 20km 付近に強いエコーが 1 分間にわたって現れており、これは飛行機エコーである。中段の拡大図では、ドップラーシフトが飛行機の移動とともに 0 になり、また遠ざかっていくドップラーは増えていく様子が見られる。このように飛行機エコーは強力に受信される。図 4 (b) は流星エコーの観測例であり、中段には、白枠で囲んだ流星エコーを拡大してある。この流星は距離 100 km 前後で、急速に立ち上がり時間とともに指数関数的に減衰する流星エコーの振幅と、飛跡形成後は背景風速でドリフトされ位相が時間変化する (小さなドップラーシフト) 様子が捉えられている。なお、これらの図におけるデータはいずれもパルス復号された受信信号を表示している。

4 まとめ

本研究では、超高層大気下端の高度 100 km 付近の大気の構造とくに風速場の構造を精密に計測するためのマルチスタティック流星レーダシステム開発を目的として、外部受信システムのうちとくに高速かつ安価な USB 接続用 ADC 装置を開発し、これらを用いたシステムを構築した。24 時間連続観測が可能なようにデータの取りこぼしのない取得を実現するハードウェアとソフトウェアを開発し、観測実験でこれを検証した。また、GPS 受信機による周波数と時刻の同期信号を入力して実際に遠隔サイトで観測を行い、流星エコー、飛行機エコーを受信した。完成したシステムは、信楽周辺の 6 観測地点での観測を順次立ち上げるべく準備中である。また、本年 8 月末から 11 月始めの月明のない期間において、MU レーダー、ナトリウムライダー（信州大）、大気光イメージャ、ファブリペロ干渉計（名古屋大）などとともに超高層大気の微細構造のキャンペーン観測を予定している。同観測には、カナダ・ニューブランズウィック大学から新開発のマイケルソン干渉イメージャ(MIADI)も参加する予定であり、国際的にも関心をもたれている。また、今回開発したシステムはさらに発展して、太陽系外からの宇宙線による宇宙線シャワーのレーダー観測検出システムへの応用も議論されており、地球大気観測やに留まらず広く宇宙の観測への応用が期待されている。このような有意義な観測システムの開発に援助いただいた電気通信普及財団殿にあらためて感謝する次第である。

5 謝辞

本研究を実施する上で、東工大・寺澤敏夫氏、名大・濱口佳之氏、日本流星研究会・上田昌良氏他の諸氏に観測実験、データ解析、ソフトウェア開発等でご協力いただいた。ここに謝意を表する。

【参考文献】

- McKinley, D.W.R., Meteor Science and Engineering, McGraw-Hill Book Co., New York, 1961.
- Nakamura, T., T. Tsuda, M. Tsutsumi, K. Kita, T. Uehara, S. Kato and S. Fukao, Meteor wind observations with the MU radar, *Radio Sci.*, 26, 857-869, 1991.
- Nakamura, T., S. Morita, T. Tsuda, H. Fukunishi, and Y. Yamada, Horizontal structure of wind velocity field around the mesopause region derived from meteor radar observations, *J. Atmos. solar-Terr. Phys.*, 64, 947-958, 2002.
- Tsuda, T., T. Nakamura, and S. Kato, Mean winds observed by the Kyoto meteor radar in 1983-1985, *J. Atmos. Terr. Phys.*, 49, 461-466, 1987.
- Tsuda, T., S. Fukao, M. Yamamoto, T. Nakamura, M. D. Yamanaka, T. Adachi, H. Hashiguchi, N. Fujioka, M. Tsutsumi, S. Kato, S. W. B. Harijono, T. Sribimawati, B. P. Sitorus, R. B. Yahya, M. Karmini, F. Renggono, B.L.Parapat, W.Djojonegoro, P.Mardio, N.Adikusumah, H.T.Endi and H.Wiryosumarto, A preliminary report on observations of equatorial atmosphere dynamics in Indonesia with radars and radiosondes, *J. Meteor. Soc. Japan*, 73, 393-406, 1995.

〈発表資料〉

題名	掲載誌・学会名等	発表年月
Meteor Orbit Determinations with Multistatic Receivers Using the MU Radar, (Fujiwara, Y., Y. Hamaguchi, T. Nakamura, M. Tsutsumi, M. Abo)	Earth Moon Planet (2008) 102, 309-314	2008
Meteor Orbit Determinations with Multistatic Receivers Using the MU Radar, (Fujiwara, Y., Y. Hamaguchi, T. Nakamura, M. Tsutsumi, M. Abo)	Meteoroids 2007, Barcelona, Spain	June 2007
Ultra-multi-channel and multi-static meteor radar observation of horizontal distribution of wind velocities with the MU radar and cooperative optical observations, (Nakamura, T., Masaki Tsutsumi, Takuya Kawahara, Kazuo Shiokawa)	IUGG XXIV General Assembly, Perugia, Italy,	July 2007
Advanced Meteor Radar Observation with the MU Radar for Observing Tridimensional Structure of Horizontal Velocities and Cooperative Optical Observations, (Nakamura, T., M. Tsutsumi, T. D. Kawahara, K. Shiokawa)	SCOSTEP International CAWSES Symposium, Kyoto, Japan,	Oct 2007
MUレーダーを中心としたGPS衛星電波同期によるマルチスタティック流星レーダー観測の展開、(中村卓司, 堤雅基, 臼居隆志, 濱口佳之, 藤原康德, 寺沢敏夫, 阿保真, 川原琢也, 塩川和夫, 山本道成)	第122回SGEPPSS総会及び講演会、	2007年9月
大型VHFレーダーによる流星観測とMLT協同観測、(中村卓司, 堤雅基, 川原琢也, 塩川和夫, 江尻省)	2007年度南極昭和基地大型大気レーダープロジェクト(PANSY)研究集会、	2007年12月
MUレーダー超多チャンネル流星観測によるMLT領域大気の3次元構造の観測と飛行機エコーを用いた干渉計較正法の開発 (中村卓司, 堤雅基, 塩川和夫, 川原琢也, 江尻省)	日本地球惑星科学連合2008年大会	2008年5月
Phase Calibration of Meteor Radar Antennas Using Airplane Echoes (Nakamura, T., and M. Tsutsumi)	37th COSPAR (Committee on Space Research) Scientific Assembly	July 2008