

MU レーダー IEEE マイルストーン認定

橋口 浩之^{1*}

The MU radar IEEE milestone dedicated

Hiroyuki Hashiguchi^{1*}

概要

MU レーダー (Middle and Upper atmosphere radar: 中層超高層大気観測用大型レーダー) は、1984 年に滋賀県甲賀市信楽町に設置されたアジア域最大級の大気観測用大型レーダーであり、対流圏から超高層大気に至る大気の運動、大気循環を観測している。MU レーダーは、アクティブフェーズドアレーシステムを用いた世界初の大規模大気レーダーとして、大気科学やレーダー技術の発展に貢献したことが評価され、2015 年に IEEE マイルストーン (IEEE Milestone in Electrical Engineering and Computing) に認定された (図 1)。本稿は、MU レーダー建設の経緯からその後の発展、また IEEE マイルストーンについて概説する。

1. MU レーダー建設の経緯

地球大気は、気温の高度変化によって、対流圏(地表～高度 10km)、中層大気(高度 10～100km)、超高層大気(高度 100km 以上)に分けられる。MU レーダーは当初の主な観測対象が中層大気(Middle atmosphere)と超高層大気(Upper atmosphere)であることから、その頭文字を取ってそう呼ばれることになった。

MU レーダー建設の計画はすでに 1960 年代に始まっていた。当時、超音速機の排出するガスが中層大気中のオゾン層を破壊し、地上に達する紫外線が増え、人の健康を害する恐れがあると研究者が指摘したことから、中層大気研究への関心が急速に高まった。しかし、中層大気の観測手段は、時間分解能の劣るロケットや気球による直接測定以外になく、大気状態が未解明であったため「未知圏」と呼ばれていた。ちょうどその頃、超高層観測を主目

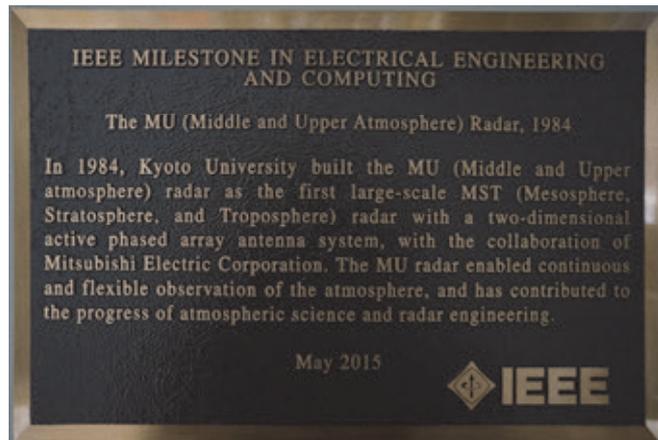


図 1: IEEE マイルストーン銘板

(和訳)

電気電子情報通信分野における IEEE マイルストーン「MU レーダー(中層超高層大気観測用大型レーダー), 1984」1984 年に建設された京都大学の MU レーダー(中層超高層大気観測用大型レーダー)は、二次元アクティブフェーズドアレーアンテナシステムを用いた世界初の大規模大気レーダー(MST/IS レーダー(中間圏・成層圏・対流圏観測/非干渉散乱レーダー))で、三菱電機(株)との共同で開発されました。MU レーダーにより、連続的で柔軟な大気観測が可能となり、大気科学、レーダー技術の発展に大きく貢献しました。

2015 年 5 月

2016 年 6 月 28 日受理。

¹〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所レーダー大気圏科学分野。

* E-mail: hasiguti@rishi.kyoto-u.ac.jp.

的としたペルーのヒカマルカレーダーによって、中間圏(高度 50~80km)からの電波散乱が発見され、風速の観測に成功したことが報告された¹⁾。ヒカマルカレーダーは 300m×300m の巨大アンテナを用いた 50MHz 帯レーダーである。その後、中層大気の散乱機構の理論的検証がなされ、大気乱流による密度変動などが引き起こす電波屈折率の揺らぎによるブラッグ散乱であることが分かった。この「揺らぎ」がその場の大気の流れと共に移流するので、これをレーダー電波のドップラー偏移として捉えることで、大気の運動をリモートセンシングできることが 1975 年頃から次第に明らかになってきた。その後、成層圏(高度 10~50km)・対流圏でも乱流散乱を利用すれば天候にかかわらず風速三成分を測定できることが分かった。特に大気重力波が中層大気運動の理解に不可欠とされ、この目的に最適な観測装置として大型大気レーダーの開発建設が計画された。

日本の気象、電離層、電波研究者は 1960 年中頃から、中層大気研究の重要性に強い関心を持ち、加藤進京大教授(当時)を中心とする大きな WG を組織した。MU レーダー建設の計画は、この WG メンバーの強い協力で行われた。1970 年代後半には具体的な大型レーダー建設計画が立案され、変動の激しい中層大気観測に対してヒカマルカレーダーのパッシブアレー方式の限界を見出し、アクティブフェーズドアレーアンテナを備えた最新型レーダー「MU レーダー」が提案・設計された²⁾。1981 年に予算化され、滋賀県信楽町の山中で大規模な土木工事が開始された。

2. 世界初のアクティブフェーズドアレー大型大気レーダー「MU レーダー」

MU レーダー建設計画は、気象だけでなく超高層大気の実験者からも熱烈な支持を受け、中層大気と超高層大気の両方を観測できることが求められた。そのためには 50MHz 帯周波数で、送信尖頭電力 1MW、アンテナ開口径 100m という大規模なシステムが必要であった。激しく変動する大気の運動を 3 次元的に捉えるためには、観測方向(アンテナ方向)を高速に切替えることが必須である。しかし、ヒカマルカレーダーのような既存の大型レーダーシステムでは巨大な送信機の出力を一本一本のアンテナに分配するためアンテナ入力端で 1kW 程度の電力となり、位相を高速に変えることは困難であった。

MU レーダーでは高速ビーム走査可能なシステムの実現が設計の大目標におかれた。しかし、そのような大気レーダーは当時世界中のどこにも存在しなかった。メーカーとの議論の中で、「分散型送受信(アクティブフェーズドアレー)方式」という案が浮上した。それは従来の巨大な送信機を用いる方式ではなく、(八木)アンテナ素子の一本一本に小型送信機を接続し、それらの位相を制御しようというものであった。それは原理的に高速ビーム走査を可能とするが、500 台近くの送受信機(送受信モジュール)すべての位相を揃えて動作させる必要があることから、電子工学の専門家からも実現性を否定する声が上がった。

この新方式について京都大学とメーカーの関係者は 2 年以上に渡って検討を重ね、斬新な機能を持つ大気レーダーが実現するに至った。図 2~4 に、MU レーダーの全景(空撮)、八木アンテナ、送受信モジュールの写真を示す^{3,4)}。MU レーダーはコンピュータ制御による自動観測を可能にし、パルス送信毎すなわち 1 秒間に 2500 回ビーム方向を変更でき、多様な観測目的に柔軟に対応できる高機能をもたらした。



図 2: MU レーダーの全景。中央の直径 103m の円形がアンテナアレー



図 3: MU レーダーの直交三素子八木アンテナ



図 4: MU レーダーの送受信モジュール

3. MU レーダーによる観測

MU レーダーによる標準的な観測では、天頂および天頂角 10° で東西南北の計 5 方向にレーダービームを向けて視線方向速度を測定し、レーダービームが走査する空間・時間内で速度場が一様であると仮定して風ベクトルを求める。大気レーダーは、鉛直流を含む風ベクトルを時間的に連続に観測できるという優れた利点を持っている。従来のセンサーを付けた気球を放球して測定する方法では、データ間隔は数時間以上で間欠的である。MU レーダーでは、1 分に 1 回気球を放球するのと同様な非常に高時間分解能で連続データを得ることができる。MU レーダーで観測される物理量は基本的にレーダー直上の高さ方向の一次元量であるが、近似的に気象システムの空間構造が観測時間内で大きく変わらないとすれば、一般に同システムが西から東に移動することを利用して、時間変化を水平変化と解釈し、その高度・東西距離断面構造を推定することができる。同種の現象の観測を積み重ね、異なる南北位置における断面図を合成することで、現象の立体構造を解明できる⁵⁾。

一般に、中層大気の振る舞いは様々な時空間スケールを持つ大気波動が重なったものとして理解することができるので、このような高度・時間の連続データは波動を解析する上で好都合である。特に大気重力波はスケールが小さく、従来は適当な観測手段がなかったことから、その実態解明に大気レーダーが大きな役割を果たした⁶⁾。MU レーダー観測は、中層大気中に大気重力波が普遍的に存在することを明らかにしただけでなく、波のパラメータを定量的に明らかにした。さらに、対流圏下層で発生した大気重力波がジェット気流に捉えられ、またジェット気流で励起された波が上方に伝搬する途上で臨界層によって次々に捉えられる様子なども MU レーダーで初めて直接観測された⁷⁾。さらに大気波動が励起源となり、中緯度電離圏に特有の擾乱が引き起こされていることも、MU レーダー観測により発見された⁸⁾。

大気レーダーの観測分解能はレーダーシステムで規定され、 $1\mu\text{s}$ の送信パルスの場合高度分解能は 150m となる。これは層厚が数 m~100m とされる薄層乱流などの観測には不十分である。このため、帯域内で複数の周波数を用いて、レーダー映像法(radar imaging)により、パルス幅よりも細かい高度分解能を得る技術開発が進んでいる⁹⁾。2004 年に「MU レーダー観測強化システム」が導入された際に、この機能も追加され、ケルビン・ヘルムホルツ(シアア)不安定の S 字型波形(ピロー)などが明瞭に観測できるようになり、物質や熱の輸送を考える上で重要な知見が得られている¹⁰⁾。

4. MU レーダー観測を基礎とした大気レーダーの発展

MU レーダーを中核設備とする信楽 MU 観測所は、共同利用者によって関連する装置が持ち込まれ

て、複合計測施設としての大気実験場として発展している。我々も信楽 MU 観測所において、MU レーダーを基礎として小型可搬型レーダー(ウィンドプロファイラー)の開発を行ってきた。まず 1990 年頃に 1357.5MHz を用いたアンテナ径 2m、送信出力 1kW の境界層レーダーを開発し¹¹⁾、その後、1999 年に新しいアンテナ素子を用いた一辺 4m の矩形アレーを開発し、送信出力を 2kW としたレーダーを試作した。これは常時、高度 5km 程度までの下部対流圏の風ベクトルが観測可能なことから「下部対流圏レーダー(Lower Troposphere Radar: LTR)」と名付けられた¹²⁾。気象庁は LTR を全国に展開し、ウィンドプロファイラー・ネットワーク「局地的気象監視システム(WInd profiler Network and Data Acquisition System: WINDAS)」を完成させ、2001 年から現業利用を開始した¹³⁾。観測データは中央監視局で品質チェックされた後、数値予報モデルの初期値として利用されており、局地的集中豪雨などの予報精度向上に貢献している。

MU レーダーの建設中に早くも赤道域に大型大気レーダーを建設する「赤道レーダー」構想が立案され、現地調査が開始された。地球規模の大気循環の駆動源とされる赤道域では、強い太陽放射加熱によって大規模な積雲対流が発生・組織化する。また赤道域ではコリオリ因子がゼロに近づくため、鉛直伝搬可能な大気波動の帯域が広がる。これが上方伝搬し背景風と相互作用することによって赤道域特有の顕著な振動を引き起こしており、さらに超高層大気の振る舞いとも強く関わっている。気球や小型レーダーを用いた観測を経て、2001 年に「赤道大気レーダー(Equatorial Atmosphere Radar: EAR)」がインドネシア共和国西スマトラの赤道直下に設置された¹⁴⁾。EAR のアンテナ開口径は 110m で、MU レーダーより若干大きい。送信電力はその十分の一の 100kW で、感度は著しく劣っている。しかし、EAR は MU レーダーと同じアクティブフェーズドアレー方式を採用し、柔軟な運用が可能である。これにより地表付近から下部成層圏までの全高度域と、高度 100km 以上の電離大気擾乱など様々な物理量が高分解能・高精度で時間的に連続に観測できる。EAR は我が国の大学が海外で運用する初めての大型設備であり、現地 LAPAN(インドネシア航空宇宙庁)との共同運用により、約 15 年に渡って安定して運用されてきた。

EAR により多くの成果が得られているが、送信出力が MU レーダーの十分の一であるため、中間圏の乱流や電離圏の IS 観測はできない。我々は、MU レーダーで培ってきた技術を集大成した「赤道 MU レーダー(EMU)」を赤道直下に建設し、赤道大気の観測機能を飛躍的に向上させることを計画している。EMU を主要設備の一つとする「太陽地球系結合過程の研究基盤構築」を国立極地研究所他と共同で提唱しており、それは日本学術会議のマスタープラン 2014 と文部科学省のロードマップ 2014 に採択されている。

5. IEEE マイルストーン

MU レーダーは完成以来全国共同利用に供され、気象学・大気物理学、超高層物理学、天文学・宇宙物理学、電気・電子工学、宇宙工学など広範な分野にわたって多くの成果を上げ、その後の大気レーダー開発に大きな影響を与えた。MU レーダーは IEEE マイルストーンに認定され、その記念式典が 2015 年 5 月 13 日に京都大学において開催された。記念式典では、約 120 名の方々の列席のもと行われた贈呈式において、Howard E. Michel IEEE 本部長から山極壽一京都大学総長と柵山正樹三菱電機(株)執行役社長に銘板(図 1)が贈呈された。

IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers)は、1884 年創立の AIEE (American Institute of Electrical Engineers)と 1912 年創立の IRE (Institute of Radio Engineers) が 1963 年に合併した電気・電子・情報・通信分野の世界最大の学会である。会員数は世界 190 カ国以上に 40 万人を超える。米国の学会であるが、半数以上を米国外が占め、日本の会員数は 9 支部合計で約 14,000 人である。

IEEE マイルストーンは、IEEE の分野において達成された画期的なイノベーションの中で、開発から 25 年以上経過し、地域社会や産業の発展に多大な貢献をしたと認定される歴史的業績を表彰する制度であり、IEEE 創立 100 周年を翌年に控えた 1983 年に創設された。その狙いは、優れた技術成果

に光を当てると共に、それを生み出した技術者に対する社会一般の理解と評価を高めることにある。マイルストーンに認定されると、その業績を記した銘板(Plaque)が贈呈され、ゆかりの地に展示される。

2016年5月までに認定、贈呈式を終えた総件数は165件で、Regionごとの分布は次表の通りである(2件が2つのRegionにまたがる)。(http://ethw.org/Milestones:List_of_IEEE_Milestones)

Region	1-6 (米国)	7 (カナダ)	8 (欧州・アフリカ)	9 (中南米)	10 (アジア・太平洋)
認定数	82	15	36	4	30

国際的にはENIACコンピュータ、トランジスタ製造、ボルタ電池などが認定されている。国内では、表1に示すように、八木・宇田アンテナ、富士山レーダー、東海道新幹線など28件が認定されており、MUレーダーが25件目の認定である。

表1: 日本のIEEEマイルストーン

	テーマ	記念すべき年	贈呈式の年月日
1	指向性短波(八木・宇田)アンテナ	1924	1995.6.17
2	富士山頂レーダー	1964	2000.3.6
3	東海道新幹線	1964	2000.7.13
4	電子式水晶腕時計	1969	2004.11.25
5	電卓の先駆的開発	1964-1973	2005.12.1
6	家庭用ビデオ VHS	1976	2006.10.11
7	鉄道自動改札	1965-1971	2007.11.27
8	日本語ワープロ	1971-1978	2008.11.4
9	依佐美送信所	1929	2009.5.19
10	フェライト開発・応用	1930-1945	2009.10.13
11	電子式TVの開発	1924-1941	2009.11.12
12	太平洋横断TV衛星中継	1963	2009.11.23
13	黒部川第四発電所	1956-1963	2010.4.9
14	太陽電池の産業化	1959-1983	2010.4.9
15	直接衛星放送サービス	1984	2011.11.18
16	電界放出形電子顕微鏡	1972-1984	2012.1.31
17	G3 FAX 国際標準化	1980	2012.4.5
18	ラップトップ PC T1100	1985	2013.10.29
19	日本の一次・二次電池産業の誕生と成長	1893-1971	2014.4.12
20	高効率音声符号化(LSP)	1975	2014.5.22
21	シャープ 14 インチ TV 用 TFT-LCD	1988	2014.6.10
22	電力用酸化亜鉛形ギャップレス避雷器(MOSA)	1975	2014.8.18
23	20 インチ光電子増倍管	1979-1987	2014.11.5
24	太平洋海底ケーブル TPC-1	1964	2014.11.12
25	MU レーダー	1984	2015.5.13
26	高品質光ファイバの量産製造技術「VAD 法」	1977-1983	2015.5.21
27	緊急警報放送	1985	2016.5.11
28	ハイビジョン	1964-1989	2016.5.11

6. まとめ

MU レーダーは、アクティブフェーズドアレー方式の技術的先駆性により、大気科学、超高層物理学、電子工学、電波科学等の広い分野で共同利用研究に活用され、多くの研究成果を生み出した。高機能のレーダーシステムを活用して、新しい観測技術が開発され、一部は気象予報等にも実用されている。MU レーダーは大型大気レーダーの源流となり、その技術は国内外で開発された多くの大気レーダーに引き継がれている。国際的大型大気レーダーネットワークの中核として、今後も活躍が期待されている。

謝辞

MU レーダーは、加藤進京都大学名誉教授のリーダーシップにより、三菱電機(株)・京都大学の産学連携により開発されました。MU レーダー、LTR、EAR の開発・研究の中心におられた深尾昌一郎京都大学名誉教授は、IEEE マイルストーン認定の約 1 年前に逝去されました。心よりご冥福をお祈りします。

参考文献

- 1) Woodman, R.F., Guillen, A., Radar observations of winds and turbulence in the stratosphere and mesosphere, *J. Atmos. Sci.*, **31**, 493-505, 1974.
- 2) Fukao, S., Kato, S., Aso, T., Sasada, M., Makihira, T., Middle and upper atmosphere radar (MUR) under design in Japan, *Radio Sci.*, **15**, 225-231, 1980.
- 3) Fukao, S., Sato, T., Tsuda, T., Kato, S., Wakasugi, K., Makihira, T., The MU radar with an active phased array system, 1. Antenna and power amplifier, *Radio Sci.*, **20**, 1155-1168, 1985.
- 4) Fukao, S., Tsuda, T., Sato, T., Kato, S., Wakasugi, K., Makihira, T., The MU radar with an active phased array system, 2. In-house equipment, *Radio Sci.*, **20**, 6, 1169-1176, 1985.
- 5) Shibagaki, Y., Yamanaka, M.D., Hashiguchi, H., Watanabe, A., Uyeda, H., Maekawa, Y., Fukao, S., Hierarchical structures of vertical velocity variations and precipitating clouds near the baiu frontal cyclone center observed by the MU and meteorological radars, *J. Meteor. Soc. Japan*, **75**, 569-596, 1997.
- 6) Tsuda, T., Characteristics of atmospheric gravity waves observed using the MU (Middle and Upper atmosphere) radar and GPS (Global Positioning System) radio occultation, *Proc. Jpn. Acad.*, **90**, 12-27, 2014.
- 7) Yamanaka, M.D., Fukao, S., Matsumoto, H., Sato, T., Tsuda, T., Kato, S., Internal Gravity Wave Selection In The Upper Troposphere And Lower Stratosphere Observed by the MU Radar: Preliminary Results, *Pure Appl. Geophys.*, **130**, 481-495, 1989.
- 8) Yamamoto, M., Fukao, S., Woodman, R.F., Ogawa, T., Tsuda, T., Kato, S., Mid-Latitude E-Region Field-Aligned Irregularities Observed with the MU Radar, *J. Geophys. Res.*, **96**, 15943-15949, 1991.
- 9) Luce, H., Mega, T., Yamamoto, M.K., Yamamoto, M., Hashiguchi, H., Fukao, S., Nishi, N., Tajiri, T., Nakazato, M., Observations of Kelvin-Helmholtz instability at a cloud base with the middle and upper atmosphere (MU) and weather radars, *J. Geophys. Res.*, **115**, D19116, 2010.
- 10) Fukao, S., Luce, H., Mega, T., Yamamoto, M.K., Extensive studies of large-amplitude Kelvin-Helmholtz billows in the lower atmosphere with the VHF Middle and Upper atmosphere radar (MUR), *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **137**, 1019-1041, 2011.
- 11) Hashiguchi, H., Fukao, S., Tsuda, T., Yamanaka, M.D., Tobing, D.L., Sribimawati, T., Harijono, S.W.B., Wiryosumarto, H., Observations of the planetary boundary layer over equatorial Indonesia with an L-band clear-air Doppler radar: Initial results, *Radio Sci.*, **30**, 1043-1054, 1995.
- 12) Hashiguchi, H., Fukao, S., Moritani, Y., Wakayama, T., Watanabe, S., A Lower Troposphere Radar: 1.3-GHz Active

Phased-Array Type Wind Profiler with RASS, *J. Meteor. Soc. Japan*, **82**, 915-931, 2004.

- 13) Ishihara, M., Kato, Y., Abo, T., Kobayashi, K., Izumikawa, Y., Characteristics and performance of the operational wind profiler network of the Japan Meteorological Agency, *J. Meteor. Soc. Japan*, **84**, 1085-1096, 2006.
- 14) Fukao, S., Hashiguchi, H., Yamamoto, M., Tsuda, T., Nakamura, T., Yamamoto, M.K., Sato, T., Hagio, M., Yabugaki, Y., Equatorial Atmosphere Radar (EAR): System description and first results, *Radio Sci.*, **38**, 1053, 2003.

著者プロフィール



橋口 浩之 (Hiroyuki Hashiguchi)

<略歴> 1992 年京都大学工学研究科修士課程電子工学専攻修了／同年日本学術振興会 特別研究員 DC1／1995 年京都大学工学研究科博士後期課程電子工学専攻修了（工学博士）／同年日本学術振興会 特別研究員 PD／1997 年京都大学超高層電波研究センター 助手／2000 年京都大学宙空電波科学研究センター 助手／2001 年同助教授／2004 年京都大学生存圏研究所 助(准)教授、現在に至る。<受賞歴> 2006 年科学技術分野の文部科学大臣表彰科学技術賞(深尾昌一郎・渡邊伸一郎と共同受賞)／2008 年日本気象学会堀内賞。<研究テーマ> 大気観測用レーダーの開発及びそれを用いた気象観測への応用研究。