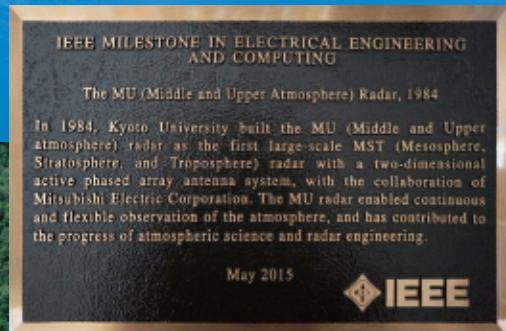


Middle and Upper Atmosphere Radar

# MU-レーダー



IEEE マイルストーン認定  
IEEE Milestone Dedicated



高  
度  
(メートル)  
Height (m)

京都大学生存圏研究所  
Research Institute for Sustainable Humanosphere (RISH)  
Kyoto University



MUレーダー

Middle and Upper Atmosphere Radar (MU radar, MUR)

MUレーダーは中層大気(Middle Atmosphere)と超高層大気(Upper Atmosphere)を観測するために作られた大型大気観測レーダーです。さらに下層の対流圏も詳細に観測することができます。世界最高性能かつアジア域最大級の大気観測レーダーで、1984年の完成以来「全国共同利用装置」として国内外の研究者に利用され、気象から超高層にいたる地球大気変動の解明に貢献しています。世界初のアクティブ・フェーズド・アレイ方式の大気レーダーとして、IEEEマイルストーンにも認定されています。国際的レーダーネットワークの連携した研究をより積極的に推進するため、2012年から共同利用の運営を赤道大気レーダーと統合しています。

The MU radar is an atmospheric radar for studying the middle and upper atmosphere, as well as the troposphere with fine time and spatial resolutions. It is the most capable system in the world, and is one of the biggest atmospheric radars in the Asian sector. Since its establishment in 1984, the MU radar has been operated under the inter-university collaborative program to study variability of the Earth's atmosphere from meteorology to upper atmosphere dynamics. The MU radar, which is the first large-scale MST radar with a two-dimensional active phased array antenna system, was selected for an IEEE milestone. Aiming for network experiment with other radars in the world, the collaborative program was merged with that of the Equatorial Atmosphere Radar in 2012.



## 大気レーダー観測の利点 Advantages of atmospheric radar

- 広範囲の高度を同時に観測できます。  
Covers large height region.
- 時間的に連続観測が可能です。  
Long-term continuous observations.
- 天候に左右されずに常時観測可能です。  
Unaffected by weather conditions.

MUレーダー諸元／MU radar specifications	
位 置／Location	滋賀県甲賀市信楽町／Shigaraki, Shiga, Japan (34° 51' N, 136° 06' E)
中心周波数／Center Frequency	46.5 MHz
周波数帯域／Bandwidth	3.5 MHz (1.65 MHz : 2003年まで／before 2003)
アンテナ／Antenna	直交八木アンテナ475本／475 Crossed Yagi antennas
構 造／Structure	直径103m円形アレイ／Circular array with diameter of 103m
機 能／Function	電子ビーム方向走査／Electronic beam steering
ビーム幅／Beamwidth	3.6° (半值全幅／half-power full width)
送信出力／Output power	1 MW (尖頭電力／peak power)

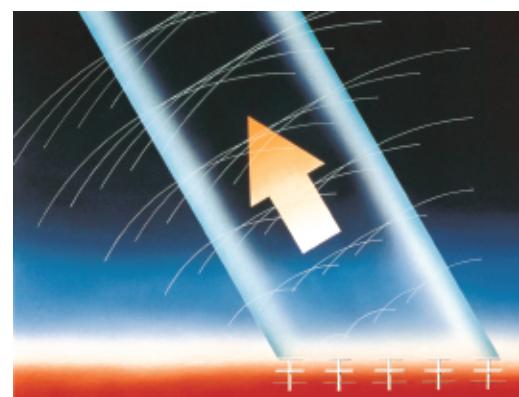
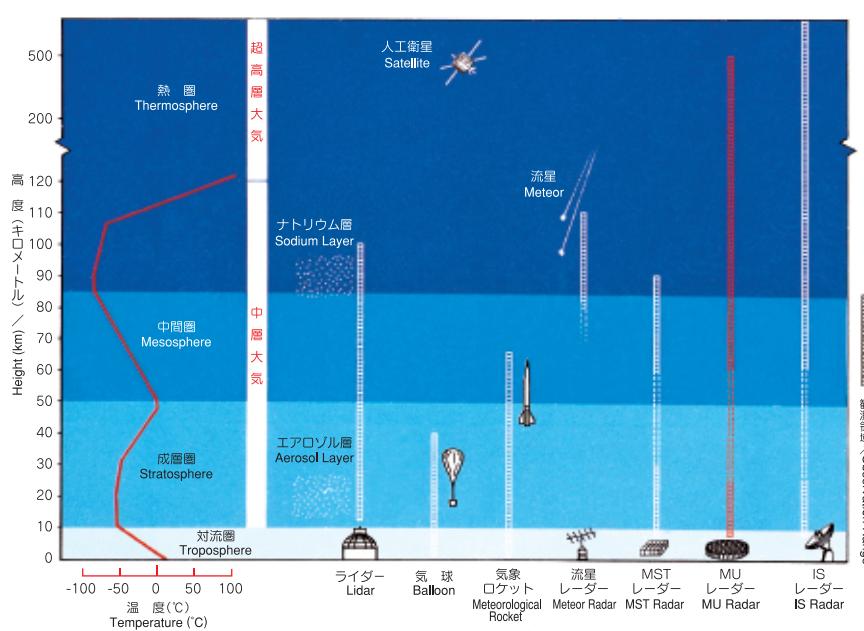


## MUレーダー観測の特徴 Characteristics of MU radar observations

さらにMUレーダーでは、各アンテナ素子に取り付けた合計475台の半導体小型送受信機(TRモジュール)群で送受信を行うことにより、

The MU radar transmits and receives signals using 475 Yagi antenna elements, each with its own solid-state TR (transceiver) module.

- 電波のビームを任意の方向にすばやく向けることで、風(大気の運動)や乱流の立体構造がわかります。  
The antenna beam can be electronically steered pulse-to-pulse to observe 3-D atmospheric structures such as wind and turbulence.
- アンテナや送受信機の各部をコンピュータで電子制御することで種々の複雑な観測法を瞬時に切り替えて観測することができます。  
All sub-systems are computer-controlled, allowing rapid setting of and switching between complicated observation configurations.



アンテナビーム走査の原理  
Illustration of the beam steering

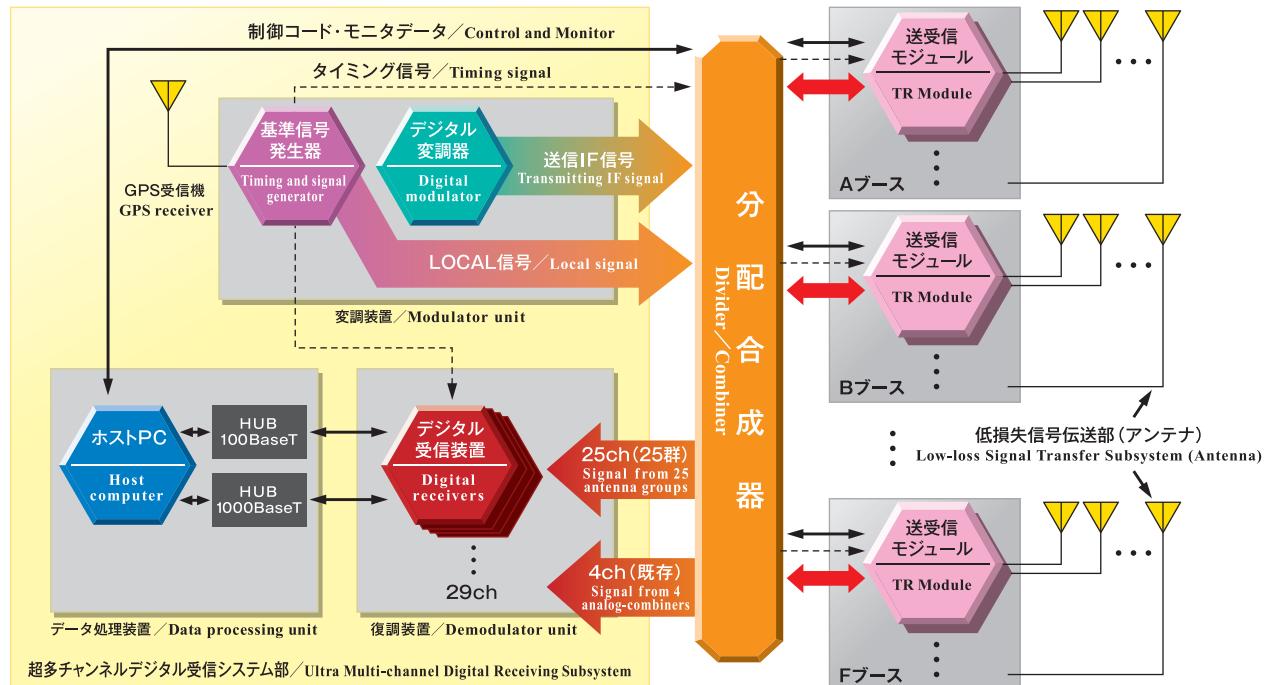


# MUレーダー観測強化システム

## MU Radar Imaging Observation System

MUレーダーの大幅な性能向上を目指して、2004年に「MUレーダー観測強化システム」が導入されました。超多チャンネルデジタル受信機による大気諸現象の微細な内部構造のレーダーイメージング観測が可能となり、地球環境変化の基礎過程の解明に貢献しています。2017年には「MUレーダー高感度観測システム」が導入され、感度向上が図られました。

This system was installed in 2004 to enhance the performance of the MU radar. Ultra multi-channel digital receivers make possible 3-D imaging of small-scale structures of atmospheric phenomena. The MU radar continues contributing towards understanding the fundamental processes determining the Earth's environmental variations. A MU radar high sensitivity observation system was installed in 2017 to improve the sensitivity.



MUレーダー系統図(観測強化システム導入後)  
Schematic diagram of the MU radar (after upgrade)

## 赤道大気レーダー

Equatorial Atmosphere Radar (EAR)



インドネシア共和国西スマトラ州の赤道直下に位置する、2000年度末に完成した大型の大気観測用レーダーです。周波数は47MHzで、八木アンテナ560本から構成される直径約110 mの略円形アンテナアレイを備えています。小型の送受信モジュールが全ての八木アンテナの直下に備えられたアクティブ・フェーズド・アレー構成をとっています。MUレーダーと比べて最大送信出力が1/10であるものの、高速ビーム走査が可能です。EARはインドネシア航空宇宙庁(LAPAN)との密接な連携のもとで運営されており、2001年7月から現在まで長期連続観測を続けています。

EAR is a large atmospheric radar located right over the equator in West Sumatra, Indonesia. It operates at 47 MHz and consists of 560 Yagi antennas in a near-circular field with the 110 m diameter. At the bottom of each Yagi antenna, compact transmit-receive module is equipped. EAR has almost the same functionality as the MU radar except that its output power is 100 kW. It can observe winds and turbulence in the height range of 1.5 km to 20 km (troposphere and lower-stratosphere), as well as ionospheric irregularities over 90 km. EAR is operated under close collaboration with the National Institute for Aeronautics and Space (LAPAN) of Indonesia, and has been continuing long-term observations of the atmosphere/ionosphere since July 2001.

# MUレーダーの建設が始まるまで

History prior to the MU radar

1972

ペルーのWoodman博士による、VHFレーダーでの中間層乱流散乱の発見 (MUレーダー、MSTレーダーの観測法の発見)  
Woodman discovers mesospheric turbulence echo using Jicamarca VHF radar (Peru), and invention of MST radar observation technique.

1975

京大・工・電離層研究施設によるIS(非干渉散乱)レーダー観測計画 (1976年断念)  
Planning of Japanese IS radar by Ionosphere Research Laboratory (a past name for the current institute), Kyoto University (halted 1976).

1976

MUレーダー第1案発表

Announcement of first MUR proposal.

1977

信楽町で流星レーダー観測開始  
ヒカマルカ(ペルー)での大型レーダー調査  
Start of meteor-radar experiment in Shigaraki. Feasibility study in Jicamarca (Peru) for a Japanese giant atmospheric radar.

1979

アレシボ(エルトリコ)大型レーダーでの観測研究  
Observational study with Arecibo IS radar (Puerto Rico).

1981

旧電離層研究施設が超高層電波研究センター(全国共同利用センター)に改組。MUレーダー計画始動  
Establishment of Radio Atmospheric Science Center, Kyoto University. Real start of the MU radar project.

1982

信楽町に8haの建設用地購入  
Land purchase for Shigaraki MU Observatory (8 ha).

1982 1983 1984 1985 1986 1987 1988 1989

## 中層大気国際協同観測計画(MAP)(1982-1985)

Middle Atmosphere Program (MAP)

MUレーダー一部完成  
Part of the MU radar completed

オゾンホール発見  
Discovery of ozone hole

MUレーダー基本観測法の開発  
Development of MUR standard observation modes

流星レーダー(信楽)の連続観測開始(~1986)  
Start of long-period observations with Kyoto Meteor Radar (through 1986)

初の台風観測  
First typhoon experiment with the MU radar

MUレーダー完成  
Completion of the MU radar

アイオノゾンデ  
Ionosonde

二周波レーダー  
Dual-frequency Radar

レーダー・音波併用の温度観測(RASS)開発  
Development of RASS observations with the MU radar and acoustic sources

MAPシンポジウム  
MAP Symposium

おおぞら衛星を用いたMUレーダーアンテナ特性の研究  
Measurement of MU radar antenna pattern from OHZORA satellite

IS観測の本格化  
IS experiment with the MU radar

中間層長期観測  
MU radar long-period observations of the mesosphere

電離圏F領域イレギュラティティの発見  
Discovery of midlatitude ionospheric F-region irregularities

日豪協同中間層観測  
Japan-Australia cooperation on mesosphere observations

スペースデブリ観測  
Observations of space debris

国際レーダー学校  
1st International School on Atmospheric Radar

MSTレーダーワークショップ  
4th MST Radar Workshop

MUレーダー流星観測の開発  
Development of meteor observations with the MU radar

赤道レーダー現地調査(インカ)  
Feasibility study for Equatorial Radar

大気重力波の解明  
Clarification of atmospheric gravity waves

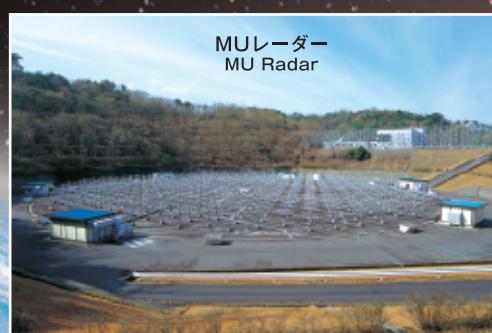
MUレーダーの整備  
MU radar-related development

観測装置の新設(信楽)  
Installation of supporting observation equipment in Shigaraki

インドネシアにおける観測装置の新設  
Installation of observation equipment in Indonesia

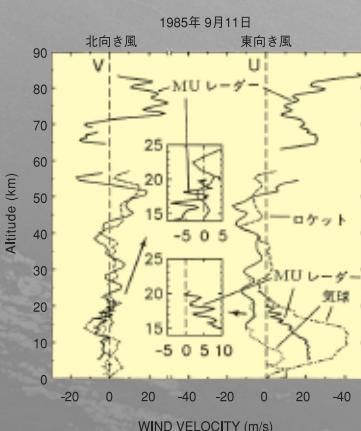
研究活動の記録  
Research activities

MUレーダー  
MU Radar



## 大気重力波特性の高度変化

Height variation of characteristics of atmospheric gravity waves



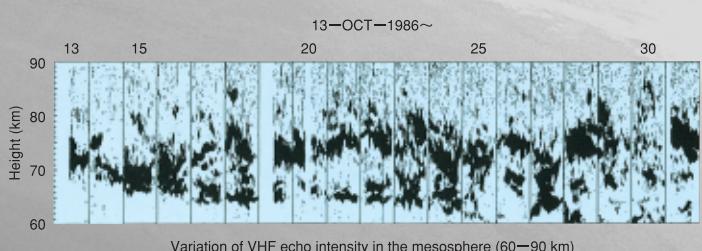
MUレーダー観測およびロケット・気球などとの協同観測により大気波動の特性や地球大気全体の大気循環や温度構造に与える影響が定量的に明らかにされました。

Observations with the MU radar, sounding rockets, and radiosondes, quantitatively clarified characteristics of atmospheric gravity waves and their effects on the Earth's general circulation and temperature structure.

## 中間層における乱流層の特性

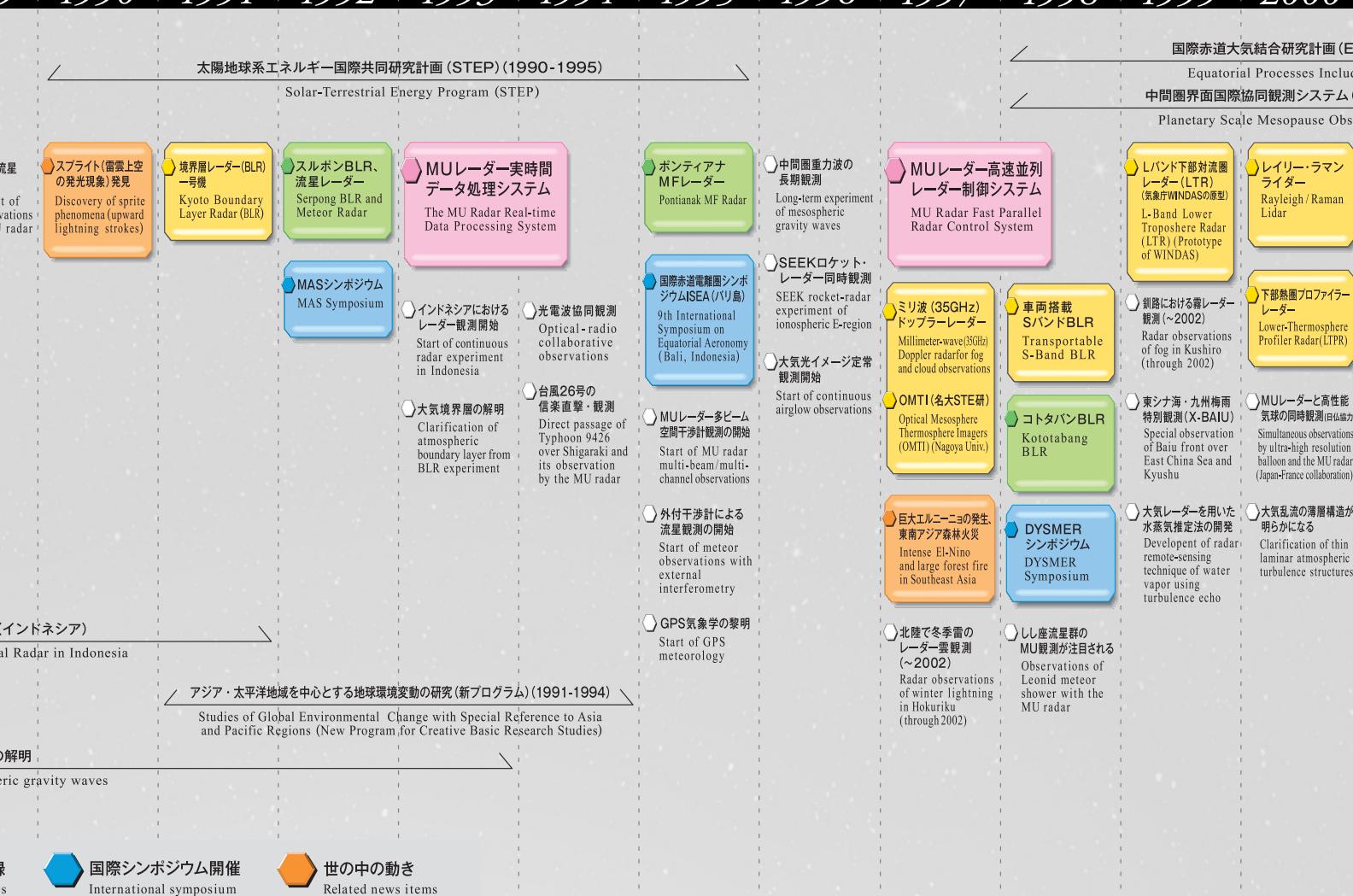
Characteristics of mesospheric turbulence layers

上空に伝播した大気波動が不安定になり乱流が生成される様子が乱流からの電波散乱を用いて詳細に研究されました。



Atmospheric waves propagating upwards become unstable and generate turbulence, which has been studied in detail from radiowave scattering of the resulting turbulence.

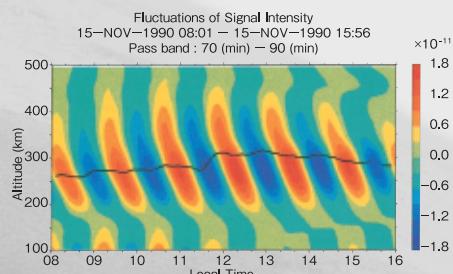
9 1990 1991 1992 1993 1994 1995 1996 1997 1998 1999 2000



## 電離圏インコヒーレント散乱の観測

IS (Incoherent Scatter) observations of the ionosphere

高度200–500kmの電離圏からの散乱では、アジア域唯一のISレーダーとして超高層大気の変動を明らかにしました。

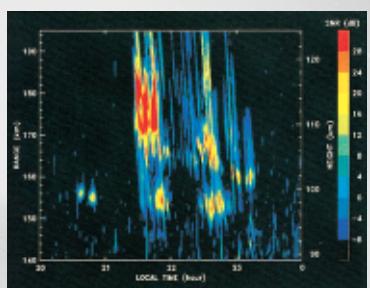


Variability of the upper atmosphere (ionosphere) has been observed with the MU radar, the only IS radar in the Asian sector.

## 中緯度電離圏不規則構造(FAI)の発見

Discovery of midlatitude ionospheric irregularities

地球の磁力線に直交する方向(日本では北)からの強い電波散乱エコーを観測し、さらにロケットや光学観測との協同観測で中緯度電離圏のFAIの仕組みを解明しました。

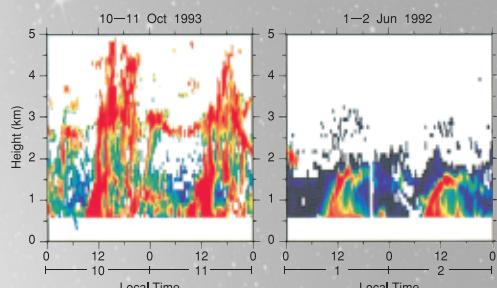


Strong echoes perpendicular to the geomagnetic field were observed, and in conjunction with sounding rockets and optical instruments the mechanism of midlatitude ionospheric irregularities has been clarified.

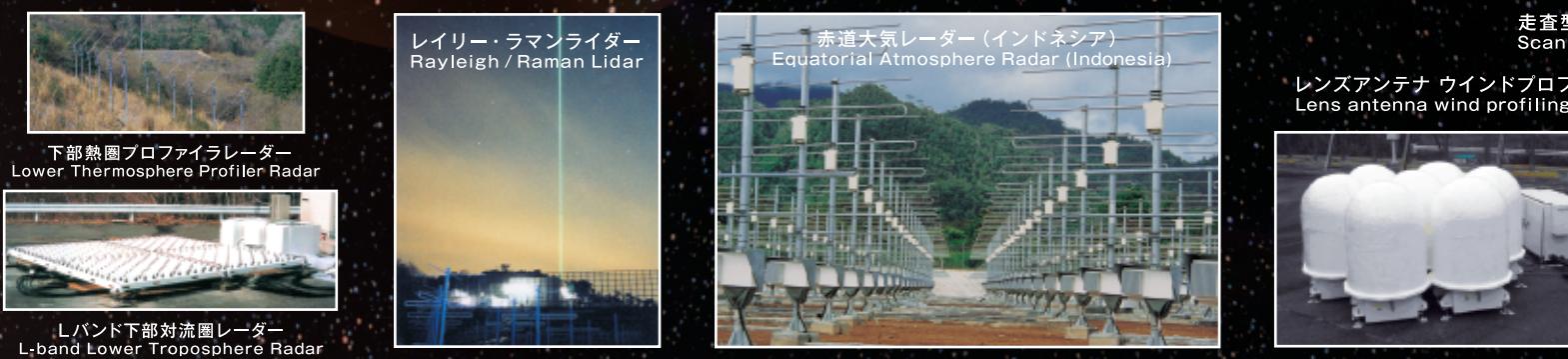
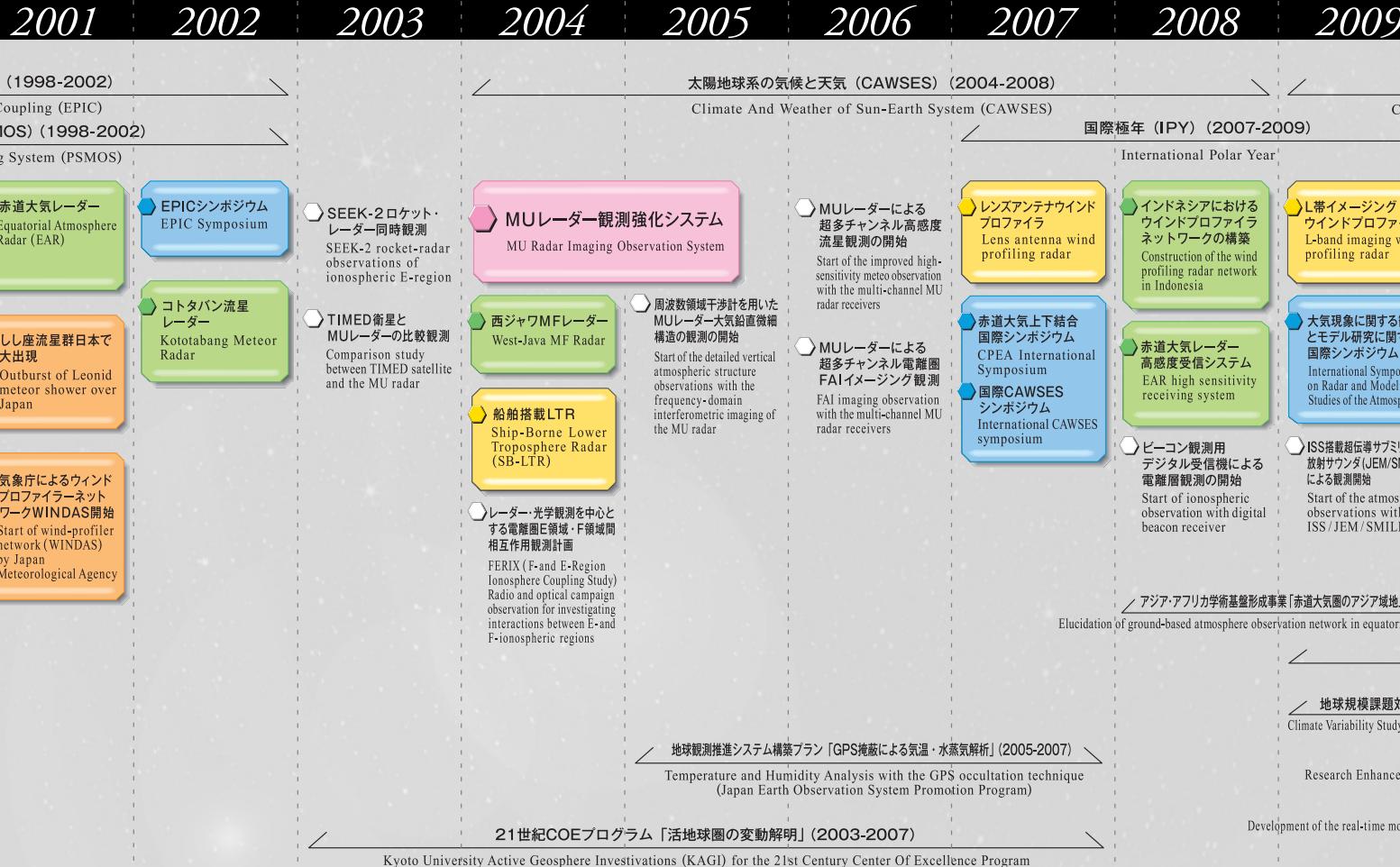
## 境界層レーダー観測

Boundary Layer Radar (BLR) observations

MUレーダーを小型化した境界層レーダーを開発し、信楽およびインドネシアで観測して中緯度と熱帯の大気境界層の顕著な違いを明らかにしました。



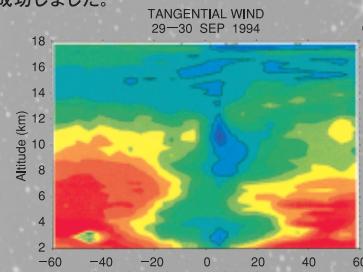
Several types of BLRs were developed based on experience with the MU radar, and differences in the boundary layer between midlatitude and equatorial regions elucidated.



## 台風の眼と断面の観測

Measurement of eye and cross-section of typhoons

鉛直風も観測できるMUレーダーは上昇下降流を伴う雲対流など気象観測でも威力を発揮します。1994年26号台風は信楽上空を通り、台風の断面の詳細な構造を捉えることに成功しました。

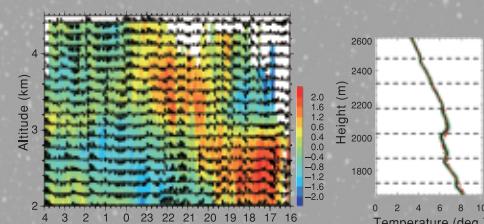


The MU radar can measure the 3-D wind, and is a powerful tool for studies of weather phenomena. Typhoon 9426 passed over the Shigaraki MU Observatory, and detailed structures of the typhoon cross-section were clarified.

## RASSによる気象擾乱の観測

RASS Observations of meteorological disturbances

地上から出す音波での電波散乱を利用して大気の温度を計測するRASSシステムを開発しました。前線の断面など気象擾乱をこれまでにない時間分解能で観測し、複雑な気象現象の実態を明らかにしました。また、MUレーダー観測強化システムを用いた微細鉛直構造観測アルゴリズムも開発されています。

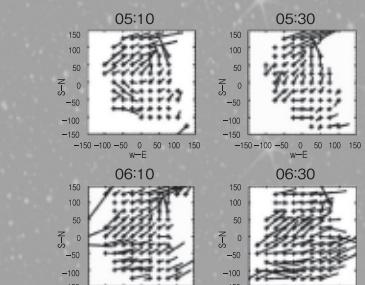


RASS was developed for remote sensing of atmospheric temperature, and uses sound wave to backscatter for the MUR. Complicated meteorological disturbances i.e. front systems, can be studied with higher temporal resolutions. Temperature profile within a radar range gate was analyzed by using the MUR imaging observation system.

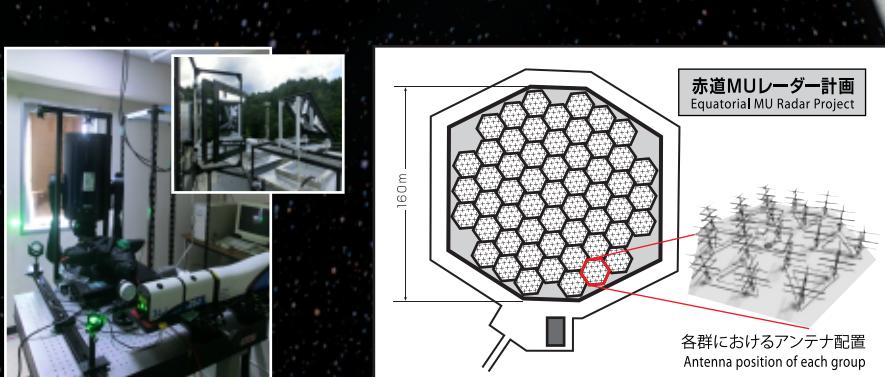
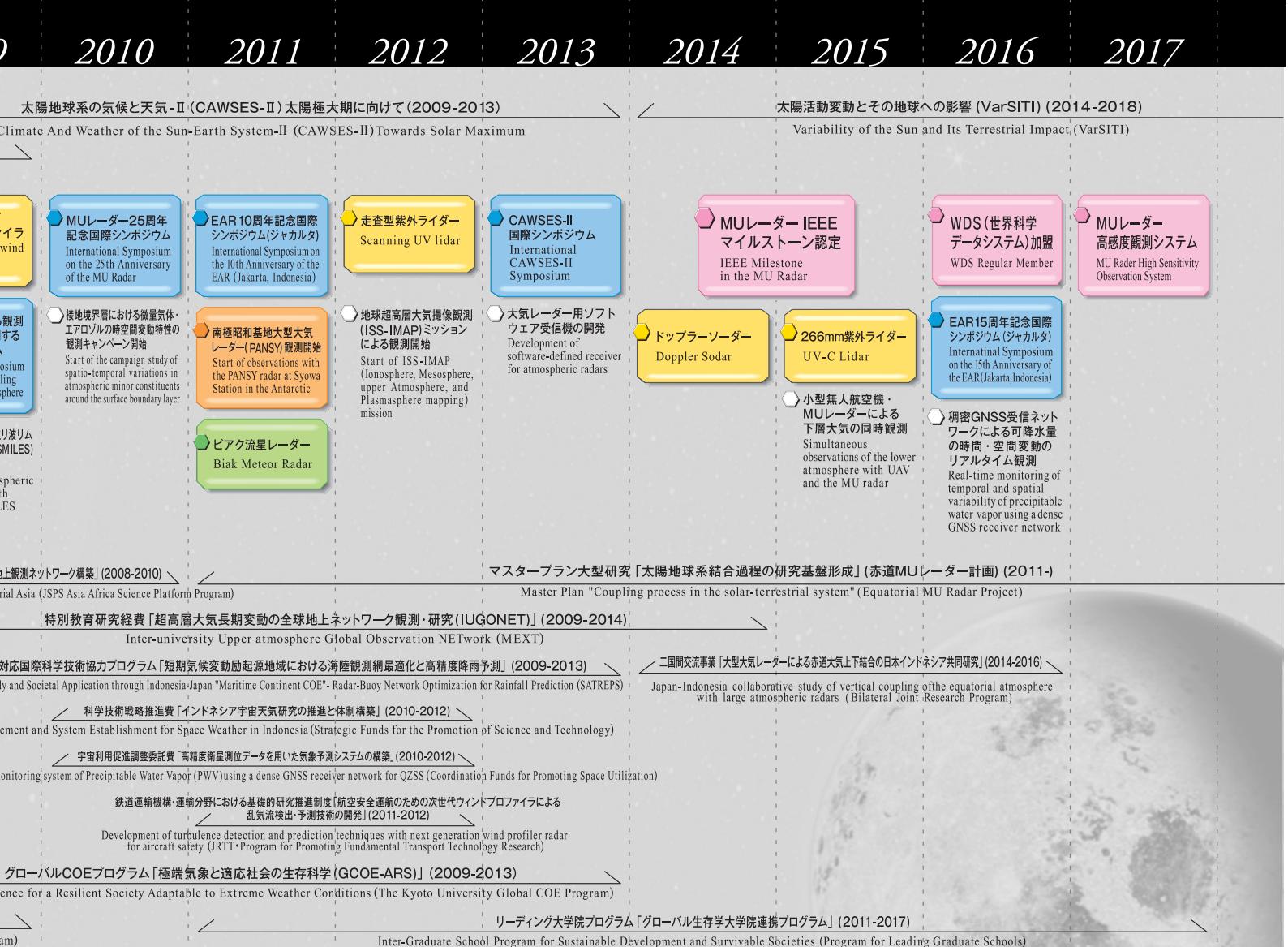
## 多チャンネル流星観測による風速水平分布

Horizontal distribution of horizontal wind velocity with meteor

地球上に降り注ぐ流星飛行により散乱される電波から風速を測るレーダー観測強化システムを用いることで、すぐれた水平分布を観測することができるようになりました。



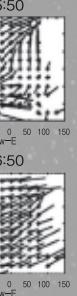
The MU radar can measure backscatters from meteor trails even in all weather conditions. The horizontal structure of wind was successfully analyzed by using multi-channel facility of the MUR.



## 分布の観測

ト定できます。MI

分解能で風速分布

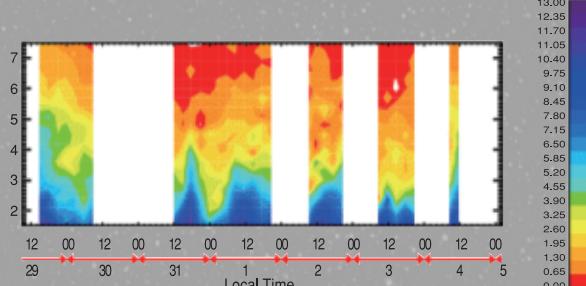


In daytime and under

## ◆ MUレーダーによる水蒸気リモートセンシングの開発 Remote-sensing of water vapor amount with the MU radar

## Remote-sensing of water vapor amount with the MU radar

大気からの散乱電波を詳細に解析することで、対流層の水蒸気の分布を連続観測する技術を開発しました。天候に関わりなく水蒸気を推定できることから激しい気象擾乱の解明への応用が期待されています。

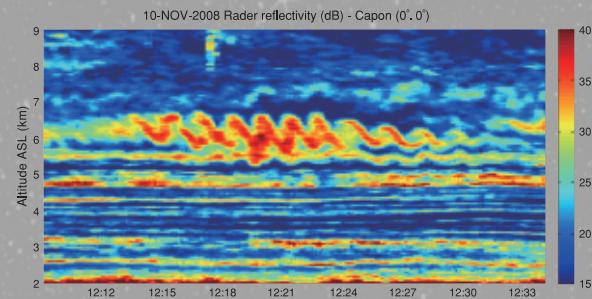


By analyzing echo power intensity, water vapor amount can be estimated in the lower atmosphere regardless meteorological conditions. Humidity profiles with the MU radar will be obtained by the method indicated above.

## ◆ MUレーダーイメージングによる大気乱流微細構造の観測 Detailed turbulence structure monitored with the MU radar imaging observation

Detailed turbulence structure monitored with the MU radar imaging observation

MUレーター観測強化システムを用いたイメージング観測により、今までにない微細な大気の鉛直構造が観測できるようになりました。これにより、大気中の乱流や層構造が短期間に変動する様子が明らかになりました。



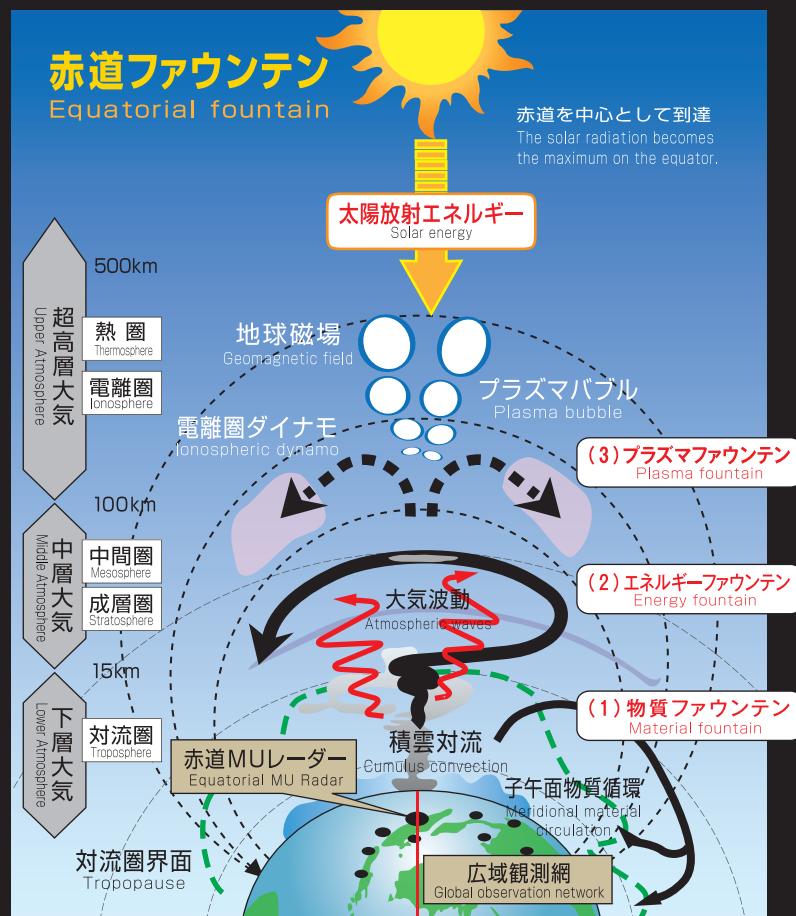
Detailed atmospheric structure with the excellent temporal and vertical resolutions was monitored with the MUR imaging observation system. The detailed variation of the atmospheric structure will be described in the following section.

# 「赤道MUレーダー(EMU)」の実現へ

## Toward establishment of "Equatorial MU Radar (EMU)"

赤道では、積雲対流と呼ばれる大気擾乱が活発です。これにより作られる大気波動が上空に伝わることで、エネルギーが地表付近から高い高度にある電離圏まで運ばれます。また、赤道には、中低緯度域から大気物質が集中してきますが、これも上に吹き上げられ、対流圏界面を通過して、地球全体に輸送されます。超高層の電離圏でもプラズマの擾乱(赤道異常)が起こります。このように、赤道域の全ての高度層で現れる、エネルギーと物質の流れを「赤道ファウンテン」として捉え、その変動を観測するため、赤道MUレーダー(EMU)の新設を提案しています。MUレーダーと同等の感度・機能を有するEMUは、2001年以来、インドネシアの西スマトラにおいて運用してきた赤道大気レーダー(EAR)に比べ10倍以上の感度を持ちます。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形成」(津田敏隆代表)は、日本学術会議のマスター・プラン2014重点大型研究計画および文部科学省のロードマップ2014に選定されています。

Cumulonimbus convection is active in the equatorial atmosphere. It generates various types of atmospheric waves that propagate upward to transport energy and momentum into the upper atmosphere including the ionosphere. Also, different kinds of materials (atmospheric minor constituents) originating at low- and middle-latitude regions converge into the equatorial region, and are blown upward through the tropopause; they eventually reach the middle atmosphere and spread to the whole globe. In the upper atmosphere, there are plasma disturbances, and equatorial ionization anomaly (EIA) is generated around the equator. We will capture the energy and material flow that occur in all height ranges to the equatorial atmosphere as "Equatorial Fountain", and study it by using radars and other facilities. We are proposing the "Equatorial MU Radar (EMU)" that is 10 times more sensitive than the EAR. The study of the Equatorial Fountain and the establishment of EMU is an important part of the research project "Coupling process in the solar-terrestrial system" that is one of 27 high-priority big research projects in the Master Plan 2014 by Science Council of Japan, and is selected as one of 10 new projects in the Roadmap 2014 by Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology (MEXT).



**京都大学生存圈研究所 信楽MU観測所**  
Shigaraki MU Observatory of Research Institute  
for Sustainable Humanosphere(RISH), Kyoto University

〒529-1812 滋賀県甲賀市信楽町神山  
Kouyama, Shigaraki, Koka, Shiga 529-1812, JAPAN  
Tel. 0748-82-3211 Fax. 0748-82-3217  
Phone +81-748-82-3211 Fax +81-748-82-3217  
E-mail : mu@rish.kyoto-u.ac.jp  
URL : <http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/mu>

赤道大気レーダーの共同運用/Collaborated operation of EAR

**インドネシア航空宇宙庁**  
National Institute of Aeronautics and Space (LAPAN)

MUレーダー・赤道大気レーダーの設計・製造  
Design and manufacture of the MU radar and EAR

MITSUBISHI ELECTRIC | 三井電機