

電波リモートセンシング技術による大気擾乱の観測的研究

—2016年度日本気象学会藤原賞受賞記念講演—

津 田 敏 隆*

1. はじめに

この度は名誉ある日本気象学会の藤原賞を頂きまして身に余る光栄と感謝致しております。私は1970年代より大気レーダー (MU レーダー, 流星レーダー, 中波帯 (MF) レーダー, 赤道大気レーダーなど) を用いて対流圏, 中層大気 (成層圏と中間圏) および熱圏下部における大気力学過程を研究してきました。また, 1990年代後半から GPS で代表される衛星測位 (GNSS) データを活用して対流圏・成層圏および電離圏の状態を測定する「GNSS 気象学」にも研究テーマを広げてきました。これらの観測的研究の成果を総合的に評価して頂き, 今回, 藤原賞として顕彰して頂いたと思っています。

電波・光を用いた大気環境計測を一貫して研究して来ましたが, 時代の要請に順って観測対象を求め, また常に最新技術の活用を意識してきました。この機会に過去40年間に進めてきた研究を私なりに振り返ってみようと思います。

2. 研究の経緯

2.1 流星レーダー

大学院生の頃から独自に設計開発していました流星レーダーが1977年に完成しました。惑星間空間を浮遊する流星塵が地球に突入すると, 大気との摩擦により電離して, 高度70~120 km 付近に細長いプラズマ柱 (流星飛跡) を残します。流星飛跡は周囲の大気の動

きに従って流されますので, その動きをレーダーで測定すれば風速を推定できます。肉眼では一晩に流星を数十個程度しか認められませんが, 電波では眼視できない微弱な飛跡まで含めて数千個/日が検出できます。この流星レーダーを大型トレーラーに収納し, 滋賀県信楽町 (現在, 甲賀市信楽町) の国有林中に設置して観測を開始しました。10 kV という高電圧を使う真空管式送信機を用いていて, 今ならインターネット経由で遠隔地から運転状況を監視できるのですが, その頃は現場で立ち会う必要があり, 学生とともに人里離れた山中に泊まり込みました。1回あたり数日間のデータが月に2~3回程度しか収集できませんでした。その当時は中間圏・熱圏下部領域 (MLT : 高度60-150 km) の風速を測定する手段はほとんどなく, 流星レーダーにより初めて高度80-110 km における大気波動の動態を目の当たりにすることができました。また, 平均東西風が中間圏界面付近で小さくなり, 場合によっては風向が逆転することが明らかになりました。未解明であった中層大気大循環に対する大気波動の力学的効果によって, この弱風層が生成されていたのです。もっとも, この観測結果の重要性は, 松野太郎先生から研究会でご指摘されるまで十分に理解していませんでした。

赤道に対して信楽と対称の位置にあるオーストラリアのアデレード大学では MF レーダーを1960年代から運用していました。両地点間の比較から, 大気潮汐波などの南北半球間の非対称性や季節変化の差異が分かりました (Vincent *et al.* 1988)。また, 国際的なレーダーネットワークの一員としてプラネタリ波 (準2日波, 5日波, 15日波), 北極域の成層圏突然昇温 (SSW) の中緯度 MLT 領域への影響, さらに平均南北流の長周期変動とトレンドなどを研究しました。

* 京都大学生存圏研究所。
tsuda@rish.kyoto-u.ac.jp

—2016年9月8日受領
—2016年10月7日受理

信楽で流星レーダーを1990年頃まで運用しましたが、これをインドネシアに移設できないかと考えました。日豪国際協力による南北半球間の比較から、その間を埋めるべく赤道付近での観測が重要と認識されたのです。後述する赤道レーダー計画のために1986年からインドネシアの研究機関と協力していましたので、とんとん拍子で話が進み、ジャカルタ郊外の研究学園都市 (PUSPIPTEK) に観測所を構築できました。

1992年11月にインドネシアでの流星レーダー観測を開始し、約10年間継続しました。一方、同時期にアデレイド大学は東太平洋のクリスマス島にMFレーダーを新設しました。その結果、日豪の南北比較に加えて、赤道域での経度方向の比較も可能になりました (Kovalam *et al.* 1999)。こうして、赤道域のMLT領域における力学過程についても大変興味深い成果が得られました。例えば、周期が3-4日の超高速ケルビン(UFK)波、1日・半日・8時間周期の大気潮汐波、および大気重力波の長期変動などを研究しました。低緯度のMLT域の東西風は半年周期変動することは知られていましたが、その西向き風が2-3月季に限って2ないし3年毎に大きく増大する特異現象が見つかりました (Isoda *et al.* 2004)。さらにその周期性が成層圏のQBOと関係し、また、MLT高度の大気重力波の活動度とも相関があることが分かりました (Venkateswara Rao *et al.* 2012)。

流星レーダーによる研究成果に対して1994年度の堀内基金奨励賞「流星レーダーによる熱圏下部の大気運動の研究」を頂きました (津田 1996)。また、1999年度の秋季大会で、宮原三郎先生が企画されたシンポジウム「中層大気中の長周期振動」において流星レーダー・MFレーダーによる観測結果のレビューを報告しました (津田 2000)。いずれも「天気」に掲載されていますので、流星レーダーに関する研究としてご参照頂ければ幸いです。

ところで、後述するMUレーダーにより風速の高分解能観測が実現し、また、衛星からもグローバルな風速が測定できるようになり、流星レーダーやMFレーダーの価値は少々低くなってきた感があります。しかし、システム構成が簡便であることから、世界中の多くの地点で長期間にわたりこれらのレーダーの観測が続けられています。大気力学過程の全球特性、10年スケールの変動や長期トレンドを調べるのにも有用です。我々はこれらの観測データベースを整理し、その基本情報(メタデータ)を公開するシステム

(IUGONET) を、東北大、極地研、名大、京大、九大の大学間連携プロジェクトとして実施しました (Hayashi *et al.* 2013)。さらに要請にしたがい、データ自体も共同研究に提供しています。

2.2 MUレーダー

1970年代から大型大気レーダーを国内に建設する機運が高まっており、恩師である加藤 進先生がその旗振り役でした。当初は電離圏での非干渉性散乱 (incoherent scattering : IS) を対象としていました。ところが、1970年頃にペルーのヒカマルカ (Jicamarca) ISレーダーを用いて、下層の非電離大気から干渉性の電波散乱が検出されたという驚くべき報告がされました (Woodman and Guillen 1974)。観測手段が乏しかったため、当時「未知圏」と呼ばれていた中層大気(高度10-100 km)の風速を測定できると期待が集まりました。理論的研究により、この電波散乱は大気乱流による屈折率のわずかな変動によると解明されました。

1980年代にはオゾンホールおよび大気波動をはじめ中層大気の組成、放射、力学過程が注目されていました。廣田 勇先生をはじめ中層大気力学の理論研究者のご意見も踏まえ、我々のレーダー計画もIS散乱に加えて、むしろ乱流散乱を測定する機能を重視したシステムに改変されました。さらに、最新のアンテナ走査技術であるアクティブ・フェーズド・アレイアンテナを採用したMUレーダー(中層・超高層大気レーダー)を建設する計画が進められたのです(加藤 1989)。

MUレーダーは1981年に予算が認められ、3年をかけて1984年11月に完成しました。世界の著名な研究者を招待して完成式典を行い、同時に中層大気シンポジウムを開きました。早速MUレーダーを使った研究が進められ、海外との共同研究も活発になりました。

私自身は、中層大気における大気波動の研究を中心にMUレーダーを用いました。流星レーダーでは時間・高度分解能がせいぜい2時間×4 kmだったのが1分×150 mになり、見えてくる力学過程の描像が画期的に変わりました。大気重力波による運動量フラックスの季節変化および重力波の碎波による力学的ドラッグの定量評価 (Tsuda *et al.* 1990)、また、重力波の鉛直波数スペクトルの特性を明らかにしました (Tsuda *et al.* 1989)。以下に概要を紹介します。

Lindzen (1981) は線形理論をもとに、大気重力波

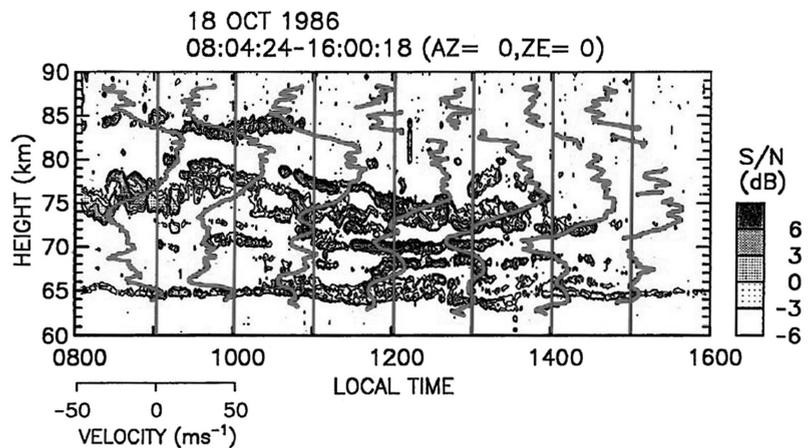
の水平伝搬方向の風速変動の振幅が、その波動の位相速度と背景風の差を上回ると不安定が起こって波動が減衰し、それに伴い運動量フラックスが減少するとともに大気乱流を生成すると予測しました。中層大気大循環の構造を定めるうえで、この砕波 (wave breaking) の過程が本質的に重要な役割を果たすことが示唆されました。

砕波のメカニズムを観測的に立証できないかと考え、MUレーダーを用いて中間圏の観測を行いました。第1図に1986年10月18日の昼間(8~16 LT)にMUレーダーで観測された大気乱流エコー強度の時間高度分布を背景の等高線で示し、同時に1時間平均の南向き水平風プロファイルを実線で重ね書きしています(Tsuda 2014)。(中間圏は電離圏D層とも呼ばれ、日照時のみ弱電離するので、自由電子による乱流散乱エコーは日中しか観測できません)

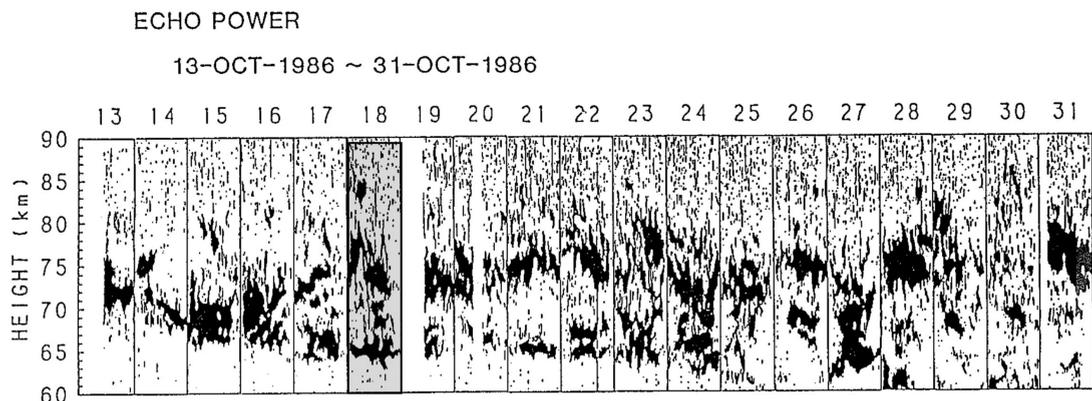
第1図で鉛直波長が数kmの大気重力波による風速変動が認められ、それに伴って高度70~80 kmに強い風速シアーが現れています。このシアーの高度が時間とともに下降しており、大気重力波が時間とともに下方へ位相伝搬の様子を示しています(線形理論に

よれば、位相速度とは逆の上向きに波動エネルギーが伝搬します)。第1図では背景の大気乱流層は風速シアーにしたがって下降しているように見えており、Lindzen (1981) が理論予想したように、大気重力波の不安定現象による砕波によって乱流層が生まれ出されていると考えられます(Tsuda 2014)。

第2図はMUレーダーを用いて1986年10月13-31日に行った中間圏の集中観測で得られたエコー強度の時間・高度分布を示します。なお、高度80~85 km以上に現れる点状のものは流星エコーです。一方、65 km付近にある時間的に高度変化しない薄いエコーは電離層底部からの反射エコーです。これらの中間にある一見不規則なものが大気乱流エコーです。



第1図 1986年10月18日にMUレーダーに観測された大気乱流層(背景の等高線)の時間高度変動と1時間ごとの南向き風(実線)(Tsuda 2014)。



第2図 MUレーダーにより、1986年10月13~31日の日中(8~16 LT)に観測された中間圏における大気乱流エコー強度の時間高度変化(Tsuda 2014)。

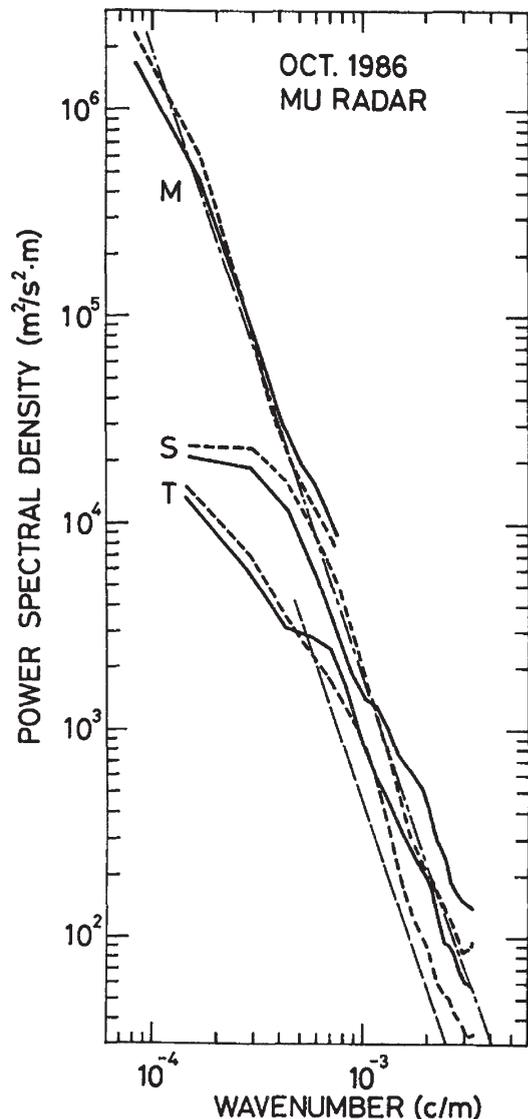
第1図は第2図で左から6枚目の小パネル(18)に対応します(なお、小パネル間は時間的に連続ではなく、16 LT~8 LTの16時間のギャップがあります)。それぞれの小パネルで、第1図と同様に時間高度変動する乱流層が現れており、大気重力波による碎波は突発的な事象ではなく、常時起こっていることがわかります。さらに、乱流層の高度分布が長期間にわたってある程度一定の構造を示しており、背景の平均風およびそれに重畳する大気潮汐波やプラネタリ波など、重力波よりも大規模な風系が碎波に影響していると思われる。

数年にわたるMUレーダー観測をもとに中間圏における運動量フラックスの東西成分 $u'w'$ (ここで u' 、 w' は水平東向き風と鉛直風の摂動分)を統計解析したところ、夏と冬で $u'w'$ の向きが逆転していました。さらにフラックス量が高度とともに減少しており、平均流に力学的ドラッグを与えていると解釈されました。数値モデルによる予想値とも定量的にも整合しています(Tsuda *et al.* 1990)。

大気重力波が単色波として捉えられるケースは少なく、通常は多くの波動が重畳して現れます。MUレーダーは時間連続で風速の高度プロファイルを観測できるので、周波数および鉛直波数スペクトルを解析するのに最適です。VanZandt (1982)は重力波のスペクトルは世界各地での観測結果に一定の普遍性があると報告しましたが、理論的立証は不十分でした。しかし、鉛直波数スペクトルについては、Lindzen (1981)による碎波過程を、波動が重畳した場合にも拡張した理論が提唱されました(Smith *et al.* 1987)。そのモデルでは、鉛直波数(m)が大きいほど碎波が起こりやすく、そのスペクトル密度の対数傾きが -3 になる(m^{-3})と予想しています。さらに、碎波している波動成分のスペクトル密度の上限値が背景の大気安定度で制限されることも示しています。重力波が上方伝搬する場合に、碎波が起こる条件の高度に達すると波動の成長が止まるように見えることから、重力波が飽和する(saturated gravity wave)と表現されています。

この飽和鉛直波数スペクトルをMUレーダーで実証しようと、T. E. VanZandt博士、S. A. Smith博士および当時アラスカ大にいたD. C. Fritts教授が信楽にやってきました。彼らと共同で1986年10月17~24日に行ったMUレーダー観測(第1図、第2図と同時期)による、東西風(実線)と南北風(破線)の鉛直

波数スペクトルを第3図に示します。図中のT、S、Mはそれぞれ対流圏(高度5~9 km)、成層圏下部(高度12~19 km)、中間圏(高度65~85 km)に対応します。特に重力波が卓越するSとMでモデル予想(一点鎖線)と定量的に一致しています。一方、対流圏では重力波に加えて対流などの大気現象が加わっていて、スペクトル密度がモデル値を上回ったと思われます(Fritts *et al.* 1988; Tsuda *et al.* 1989)。



第3図 MUレーダーにより観測された風速変動の鉛直波数スペクトル(本文参照)(Tsuda *et al.* 1989)。

私は、MU レーダーを用いた大気力学過程の研究を続けると同時に、電波散乱メカニズムの特性、MU レーダーの多機能性を活用した新しい観測技術の開発にも関わりました。特に、情報通信研究機構との共同研究として開発した、気温を測定する電波音波併用レーダー (RASS) では成層圏下部まで気温プロファイルを連続測定することに成功しました (Masuda *et al.* 1992)。RASS は対流圏下部を測る小型の境界層レーダーや、欧米やインドなどの大気レーダーにも応用されています (津田 2011)。もちろん我々の赤道大気レーダーにも RASS を適用し、熱帯対流圏の激しい気温変動の連続測定に用いています。

MU レーダーは観測開始から30年を経て、現在でも大気現象の研究および新しいレーダー技術の開発に活用されています。また、長期間のデータについて品質管理されたデータベースが公開されていて、国内外の研究者が活用しています。米国電気電子学会 (IEEE) は電気・電子技術やその関連分野で25年以上

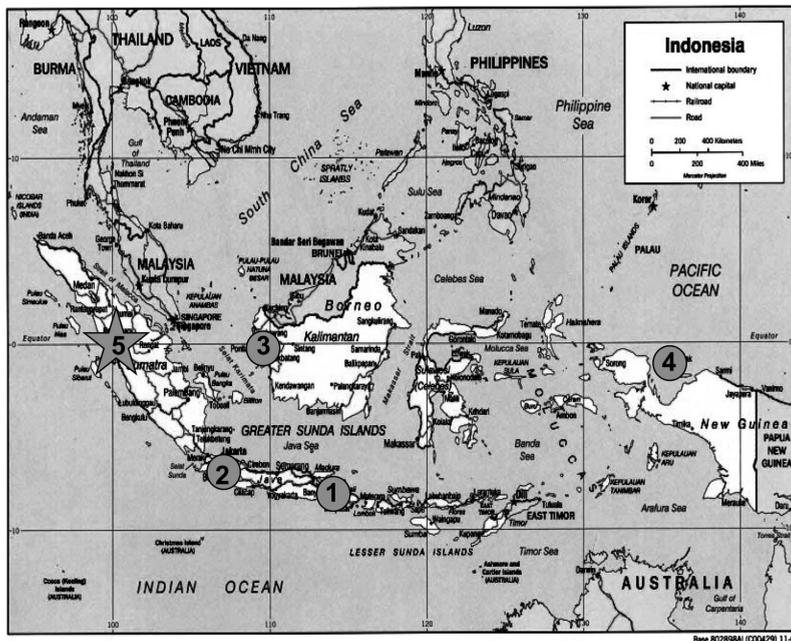
にわたって活用された実績があり、高く評価されている歴史的偉業をマイルストーンとして顕彰しています。MU レーダーはアクティブ・フェーズド・アレイ・アンテナ (active phased array antenna) を用いた大型大気レーダーとして IEEE マイルストーンに認定され、開発者である京都大学と三菱電機 (株) が 2015年 5月に表彰されました。

2.3 赤道大気研究

1984年に完成した MU レーダーにより次々と新しい知見が得られ、研究が華やかになりつつあった頃、加藤先生が赤道に大型大気レーダーを建設する将来計画を発動されました。赤道は大気力学過程の特異点であり、かつ地球上で最大の太陽放射加熱による大気擾乱が活発であることから、赤道大気研究は世界中の研究者が注目していました。我々が赤道大気研究に踏み出した経緯は1989年度に加藤先生が藤原賞を受賞された際の講演で紹介しておられます (加藤 1989)。また、後述する赤道大気レーダー (EAR) の建設に関

して深尾昌一郎先生が詳しい解説を「天気」に掲載しておられます (深尾 2011)。その当時、国立大学が海外に大型施設を設置することは非常識とされていた時代だったので、赤道レーダー事業には様々な困難が予想されました。まず、建設候補地の調査を始めることになり、地図上でキリバス、ボナベ、モルジブといった赤道付近に点々と分布する諸島を調べました。しかし、長期的な国際協力を考えるとインドネシアが最適であろうという結論に至りました。

第4図にインドネシアの地図を示しますが、赤道に沿って東西に約4千 km に広がっています。どこから手を付けたいのか不案内でしたが、幸い各地に観測所を構えているインドネシア航空宇宙庁



第4図 インドネシアに展開した観測拠点。①東ジャワのLAPANのワツコセ (Watakosek) 観測所。②ジャカルタ郊外の研究学園都市 PUSPIPTEK。なお、②の近くにLAPANの研究センターがあるバンドン (Bandung) 市、およびパンプク Pameungpeuk) のロケット打上げ場がある。③西カリマンタンのポンティアナ (Pontianak) 市。④パプア (Papua) のビアク (Biak) 島のLAPAN観測所。⑤西スマトラのブキティンギ (Bukittinggi) 市。郊外のコトタバ (Koto Tabang) に赤道大気レーダーを設置。

(LAPAN) のスギヨ (Soegiyo) センター長の協力を得ることができました。1986年に加藤先生、深尾先生と3名でインドネシアに出かけ、ジャカルタのLAPAN本庁で長官と面談し、さらに、西カリマンタンのポンティアナ (図中③)、パプアのピアク島 (図中④) にあるLAPANの観測所を調査しました。その後もいくつかの候補地に出向き、電波雑音環境や兵站などを数年にわたって現地調査した結果、1990年には西スマトラのプキティンギ郊外の山稜 (図中☆5) に候補地を定めました。

とはいえ、いきなりレーダー建設予算が認められるわけではなく、小型装置で赤道大気の観測を始めることになりました。私が最初に行ったのは、1990年に東ジャワのスラバヤ近郊のLAPANのワトコセ観測所 (図中①) でのラジオゾンデ実験でした。25日間にわたり6時間ごとに気球を上げるという、今では大学院生でもできそうな仕事ですが、大変苦労しました。しかし、実験の準備や実行を通じて海外でのフィールド実験に関する様々な知識を体得するいい経験ができました。

このデータを用いて、赤道域の対流圏界面がケルビン波の影響で大きく変動することや、成層圏における大気重力波が背景東風風の準2年周期変動と関係するといった興味深い特性を解明することができました (Tsuda *et al.* 1994a, b)。当時は東南アジア域で安定して定常ラジオゾンデ観測が行われていた気象観測所は少なかったと記憶します。ラジオゾンデ観測が有用であると分かったので、西ジャワのバンドン (図中②付近) にあるLAPANの研究所で1992年11月から翌年4月までの半年間にわたり、6時間ごとに1日に4回の観測を行い、さらに1996年3月までは1日に1回の放球を続けて計30ヶ月にわたる貴重なデータを得ました。これにより、対流圏界面付近の気温構造の変動、またケルビン波や重力波などの力学過程を明らかにしました (Shimizu and Tsuda 2001)。

次に取り組んだのは、1992年にジャカルタ郊外のPUSPIPTEK (図中②) に信楽から流星レーダーおよび境界層レーダーを移設して、小さいながらレーダー観測所を開設する仕事でした (津田 1996, 2000)。さらに、1995年にアデレイド大学と共同でポンティアナにMFレーダーを建設しました。続いて、2003年に流星レーダーをEARサイトに、またピアク島にも2011年に建設しました。老朽化したPUSPIPTEKの流星レーダーを1999年に停波し、そ

の代わりに2004年に西ジャワ南岸のパムンブク (図中②付近) のLAPANのロケット打上げ場にMFレーダーを新設しました。こうして、インドネシア国内で赤道に沿って東西に3点、およびジャワ島に1点の計4つの流星・MFレーダーが現在に至るまで稼働しています。インド・中国から太平洋域に広がる約20台のMLTレーダー観測網が構成されています。これらの研究成果の概要は既に2.1節に述べました。

2001年に深尾先生を中心に赤道大気レーダー (EAR) が西スマトラに建設されました。同時に2001~2006年に深尾先生が代表者となって特定領域研究 (CPEA) が行われ、赤道大気研究が一気に加速しました。深尾 (2011) はEARの建設の経緯を詳しく解説しています。CPEAの成果は2つの論文特集号にまとめられています (Fukao 2006; Fukao *et al.* 2009)。赤道域特有の積雲対流、赤道波、大気重力波、さらにQBO, MJO, エルニーニョ, また、低緯度電離圏の擾乱現象に関する新たな知見が得られました。

2.4 GNSS気象学

MUレーダーをはじめ地上からのリモートセンシングは大気現象の時間・高度変化を連続的に測定でき、詳細な物理過程の解明に大変役立ちます。一方、固定点での観測なので、まさに「井の中の蛙」で、空間的な変動を知ることはできません。大気重力波の特性を研究する過程で、励起源の緯度・経度変化や海陸分布、あるいは背景風の状態などに伴う波動の励起・伝搬・減衰過程のグローバル分布に興味を抱くようになりました。

UARS衛星などによる大気波動の全球分布に関する先行研究がありましたが、衛星搭載放射計の高度分布は限られていて、鉛直波長が数km以下の中規模変動である大気重力波の解析には不十分でした。ところが、1997年に始まったGPS電波掩蔽実験で測定された気温プロファイルでは、高度分解能約1kmで対流圏から成層圏中部までの気温プロファイルが得られ、大気重力波によると思われる細かい気温変動も現れていました (Tsuda *et al.* 2000)。このデータを入手した際に狂喜した記憶があります。

この最初のGPS電波掩蔽実験はGPS/Metと呼ばれ、小型衛星による地球観測の成功例とされています。なお、GPS電波掩蔽データは科学利用に加えて、気象数値予報モデルの予報改善に画期的な効果があることが認められています。GPS/Metに引き続き、ドイツのCHAMP衛星、台湾と米国の共同のCOSMIC

をはじめ多くの GPS 電波掩蔽ミッションが打ち上げられました。

私はこの GPS/Met の電波掩蔽データを初期に入手したメリットを活かすことができ、対流圏界面の気温変動、成層圏の大気重力波の活動のグローバル分布 (Tsuda *et al.* 2000)、赤道域の大気波動と電離層の擾乱との関連、さらに極域における SSW あるいは極夜ジェットと大気重力波のエネルギーの相関などを研究しました (Tsuda 2014)。これらの研究成果に対して、2003年度気象学会賞「GPS データを活用した大気重力波の研究」を頂いています (津田 2006)。

GPS 気象学はそもそも地上設置の受信機により対流圏の可降水量 (PWV)、あるいは電離圏での電子密度経路積分量 (TEC) の測定から始まっています。私は1995年に国内初の地上型 GPS 気象学観測キャンペーンのお手伝いをしたことが契機で、この興味深い学際分野の研究に入り込むことになりました。最近では、GEONET による水平間隔約 20 km の受信機ネットワークで得られる PWV の水平分布の間をさらに細かく解像すべく、1~3 km 間隔の超稠密 GPS ネットワークを独自に構成しています。JAXA が打ち上げた QZSS が高仰角で 6~8 時間連続で日本上空に滞在する利点を活用して、PWV の微細な水平構造を解明する研究に発展させています (Sato *et al.* 2013)。

3. 研究に関する雑感

気象学に限らず、地球惑星科学は現実世界に起こる事象を観察し、そのメカニズムを理解し、それを基礎に将来の変動予測を知ることが基本だと思います。同時に、科学的理解や統計データに基づき、防災・減災に貢献し、また温暖化で代表される地球環境変化が社会に与える影響を軽減するなど、実質的な研究成果の還元が求められています。

気象学は理学と工学の融合により成り立っている学問分野であり、その研究手法を大別すると第 5 図のようになります。これらの研究手法に軽重はなく、かつ、それぞれが独立ではなく、連携協力することで学問分野が成長していくと私は考えています。例えば、理論予想 (仮説) や数値モデルの結果は観測により実証されて初めて現実と認知されます。一方、観測の解析結果は理論・モデルによって定量的に解釈されねばなりません。欧州における中世の研究者の中にはこれらの多様な研究過程を一人で成し遂げた偉人もいます

が、現在では分業せざるを得ません。私は、第 5 図では装置開発を基礎に、フィールド観測さらにデータ解析までを主な研究手段としてきました。

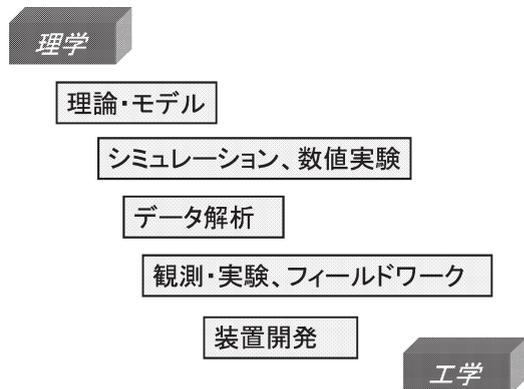
新しい計測装置の開発や観測拠点の構築には長い年月を費しますが、論文として成果公表するまでに 10 年近くかかったケースもありました。実際に観測データが取得できる段階になれば、研究過程の半分以上は達成できたと感じたことがありました。

1994年度の堀内基金奨励賞を頂いた際、受賞記念講演の報告で、私は次のように抱負を述べました。

「私の研究は観測が主体です。既成の測定装置や既存データを活用するのみならず、未知の大気パラメータについては、それを測定する装置・技術を開発することから始める努力をしています。科学の新展開と新技術開発は表裏一体となっており、私は電子工学の知識を基礎とし、それを地球科学に適用するという学際分野に今後とも従事していく所存です。」(津田 1996)。それから約 20 年を経て、今回、藤原賞の推薦理由として「電波工学研究と大気研究の両方を融合させている」と評価して頂き、あながち自分自身の目指していた方向が間違っていないかと考えています。

4. 大気科学コミュニティへの貢献について

私の研究は流星レーダーで始まったのですが、これは ICSU 傘下の太陽地球系科学委員会 (SCOSTEP) が 1976~79 年に実施した国際磁気圏研究計画 (IMS) において MLT 領域の風速測定が重要であることが盛り込まれたからです。さらに、MU レーダーの建設



第 5 図 地球惑星科学で用いられる様々な研究手法。

には、同じく SCOSTEP が1982~85年に行った中層大気観測計画 (MAP) が重要な国際的支援となっています。また、赤道大気レーダーも STEP プログラムの一環である赤道大気結合プロジェクト (EPIC) が契機になりました。

大型プロジェクトの企画・立案・実行にあたり、国内は当然ながら国際学術団体でも意見交換・合意を経て、コミュニティの支援を得ることが大変重要であると感じました。いずれは国際学会に貢献しようと考えていたところ、1995年に米国のボールダーで開かれた IUGG 総会の機会に、旧知の R. A. Vincent 教授から、IAMAS の中層大気分科会 (ICMA) のサイエンス・セクレタリを引き受けないかと打診されました。ICMA 委員長は MU レーダーの共同研究で知り合ったコロラド大の Fritts 教授だそうです。1990年代当時はオゾンホールや中層大気力学が大気科学の中心的課題のひとつで、著名研究者があまた集まり ICMA の活動は華やかでした。これを取りまとめるのは大変だと思ったものの、こういう経験も1期4年ならいいかと、ICMA の運営を引き受けました。1997年に IAGA/ICMA 共同の総会がスウェーデンのウプサラで開かれ、ほぼ2週間連続する中層大気シンポジウムが実施されました。続いて、1999年の英国バーミンガムでの IUGG 総会でも大規模な中層大気シンポジウムを構成でき、役目を果たせました。

これで ICMA の仕事はひと段落しましたが、再度 Vincent 教授、また UARS 衛星を成功させた M. A. Geller 教授から、次は SCOSTEP の理事 (Bureau) になるよう要請されました。私の研究活動はまさに SCOSTEP の支援によって進んだので、恩返しのもりでこれも引き受けました。

20世紀末にはオゾンホールの問題に一応の見通しがつき、次に温暖化が重要テーマになっていました。SCOSTEP は太陽活動と気候変化の関係に関する議論を展開し、国際共同研究プロジェクトとして「太陽地球系の気候と天気 (CAWSES)」を2004~2008年に実施しました。さらに未解明の課題に焦点を当てて、CAWSES Phase II が2009~2013年に延長され、計10年間にわたって継続されました。私は CAWSES の立案にかかわり、2007年に京都大学で CAWSES シンポジウムを主催したのち、SCOSTEP の理事を辞しました。これで終わりかと思っていたら、2011~2013年に CAWSES-II の後半期に国際リーダーに指名され、研究成果の取りまとめを任せられました。最終的に

CAWSES-II の2つの論文特集号が2015年に出版され (Tsuda *et al.* 2015; Yamamoto *et al.* 2015)、ようやく SCOSTEP の役割を終えました。結局、1995年に軽い気持ちで引き受けたのが、20年間引きずることになりました。

一方、国内でもいくつか学協会等で役職に就きましたが、特に2012年5月から2期4年間にわたり日本地球惑星科学連合 (JpGU) の会長を務めました。こういった学協会の役職は決して名誉職ではなく、実質的に時間も労力も消費するボランティアでした。しかし、そのおかげで、個別の研究分野に閉じこもってはいけなかったであろう多くの優秀な研究者と交流できたことは私自身にとって大変幸運であったと思います。皆様も機会があれば勇気を持って学会の役職を引き受けられ、コミュニティに貢献されることを期待します。

5. おわりに

私は1977年に京都大学の助手に採用されて以来40年近く教育研究を続けています。その間に地球惑星科学における課題も1970年代の宇宙開発から、80年代にはオゾンホールをはじめ中層大気科学が目ざされ、90年代からは温暖化、さらに太陽から始まり地球環境変動に至る結合過程の研究に変遷してきました。

私自身は電波・光を用いた大気環境計測を研究して来ましたが、できるだけ研究手段やテーマを固定化せず、時流に順って観測対象を求め、また、常に最新技術の活用を意識してきました。1970年代後半から流星レーダーおよび MU レーダー、90年代に赤道大気フィールド観測、90年代末から GPS 気象学に取り組んできました。

1984年に加藤先生を中心に建設された MU レーダーは国際的にも非常に高い評価を受けており、さらに2001年に深尾先生が実現された赤道大気レーダー (EAR) は今や世界的な赤道大気総合観測所に育っています。その流れをくんで、今後、MU レーダーと同等の能力を持つ赤道 MU レーダー (EMU) を EAR に隣接して建設し対流圏から熱圏に至る赤道大気的全容を解明することを目指しています (第6図)。

研究教育を行う過程で加藤先生、深尾先生、廣田先生をはじめ多くの先達からご教示を賜り、さらに同僚や共同研究者また企業関係者から多大なご支援を受けたことに心よりお礼申し上げます。国内外から集った優秀なポスドク研究員および熱心な学生に恵まれ、楽



第6図 インドネシアの西スマトラに設置された赤道大気レーダー (EAR) の鳥瞰図 (Google map). 敷地の中央部に赤道 MU レーダー (EMU) の完成予想図を示す. EMU を中核とする大型研究計画は, 日本学術会議が選定したマスタープラン2014の重点課題, および文部科学省によるロードマップ2014に採択されている.

しく研究を進めることができました。これまで交遊のあった方々のお名前を紹介し尽くせないことの失礼をご容赦下さい。荣誉ある日本気象学会藤原賞に値する研究成果を上げたとは決して思っておりませんが、少しでも地球惑星科学の進展に寄与できたならば望外の喜びです。

略語一覧

CAWSES : Climate and Weather of the Sun Earth System
 CHAMP : Challenging Mini Satellite Payload
 COSMIC : Constellation Observing System for Meteorology Ionosphere and Climate
 CPEA : Coupling Processes in the Equatorial Atmosphere
 EAR : Equatorial Atmosphere Radar
 EMU : Equatorial Middle and Upper Atmosphere Radar
 CPEA : Coupling Processes in the Equatorial Atmosphere
 GEONET : GNSS Earth Observation Network System
 GNSS : Global Navigation Satellite System
 GPS : Global Positioning System
 GPS/Met : GPS Meteorology

IAGA : International Association of Geomagnetism and Aeronomy
 IAMAS : International Association of Meteorology and Atmospheric Sciences
 ICMA : International Commission of the Middle Atmosphere
 ICSU : International Council of Scientific Unions
 IEEE : The Institute of Electrical and Electronics Engineers
 IMS : International Magnetosphere Study
 IS : Incoherent Scatter
 IUGG : International Union of Geodesy and Geophysics
 IUGONET : Inter-university Upper Atmosphere Global Observation Network
 JpGU : Japan Geoscience Union
 LAPAN : Indonesian National Institute of Aeronautics and Space
 MAP : Middle Atmosphere Program
 MF : Medium Frequency
 MLT : Mesosphere and Lower Thermosphere
 MU radar : Middle and Upper Atmosphere radar
 PUSPIPTEK : Pusat Penelitian Ilmu Pengetahuan dan Teknologi (in Indonesian)
 PWV : Precipitable Water Vapor
 QBO : Quasi-Biennial Oscillation
 QZSS : Quasi-Zenith Satellite System
 RASS : Radio Acoustic Sounding System
 SCOSTEP : Scientific Committee on Solar-Terrestrial Physics
 SSW : Stratospheric Sudden Warming
 STEP : Solar Terrestrial Energy Program
 TEC : Total Electron Content
 UARS : Upper Atmosphere Research Satellite
 UFK wave : Ultra-fast Kelvin wave

参考文献

Fritts, D. C., T. Tsuda, T. Sato, S. Fukao and S. Kato, 1988: Observational evidence of a saturated gravity wave spectrum in the troposphere and lower stratosphere. *J. Atmos. Sci.*, **45**, 1741-1759.
 Fukao, S., 2006, Coupling Processes in the Equatorial Atmosphere (CPEA) : A project overview. *J. Meteor. Soc. Japan*, **84A**, 1-18.
 Fukao, S. *et al.*, 2009, Coupling Processes in the Equatorial Atmosphere (CPEA). *Earth Planets Space*, **61**, 383-552.
 深尾昌一郎, 2011 : 京都大学がインドネシア赤道上に大型レーダーを建設した経緯. *天気*, **58**, 183-199.
 Hayashi, H. *et al.*, 2013: Inter-university upper Atmo-

- sphere Global Observation Network (IUGONET). *Data Sci. J.*, **12**, WDS179–WDS184.
- Isoda, F., T. Tsuda, T. Nakamura, R.A. Vincent, I.M. Reid, E. Achmad, A. Sadewo and A. Nuryanto, 2004: Intraseasonal oscillations of the zonal wind near the mesopause observed with medium-frequency and meteor radars in the tropics. *J. Geophys. Res.*, **109**, D21108, doi:10.1029/2003JD003378.
- 加藤 進, 1989: 大気潮汐・大気重力波, MST レーダ, 1989年度藤原賞受賞記念講演. *天気*, **36**, 681–685.
- Kovalam, S., R.A. Vincent, I.M. Reid, T. Tsuda, T. Nakamura, K. Ohnishi, A. Nuryanto and H. Wiryosumarto, 1999: Longitudinal variations in planetary wave activity in the equatorial mesosphere. *Earth Planets Space*, **51**, 665–674.
- Lindzen, R. S., 1981: Turbulence and stress owing to gravity wave and tidal breakdown. *J. Geophys. Res.*, **86**, 9707–9714.
- Masuda, Y., J. Awaka, K. Nakamura, T. Adachi and T. Tsuda, 1992: Analysis of the radio acoustic sounding system using a chirped acoustic wave. *Radio Sci.*, **27**, 681–691.
- Sato, K., E. Realini, T. Tsuda, M. Oigawa, Y. Iwaki, Y. Shoji and H. Seko, 2013: A high-resolution, precipitable water vapor monitoring system using a dense network of GNSS receivers. *J. Disaster Res.*, **8**, 37–47.
- Shimizu, A. and T. Tsuda, 2001: Seasonal and QBO-related variations in gravity wave activities observed with radiosondes at Bandung, Indonesia. *J. Meteor. Soc. Japan*, **79**, 185–200.
- Smith, S. A., D. C. Fritts and T. E. VanZandt, 1987: Evidence for a saturated spectrum of atmospheric gravity waves. *J. Atmos. Sci.*, **44**, 1404–1410.
- 津田敏隆, 1996: 流星レーダーによる熱圏下部の大気運動の解明, 1994年度堀内基金奨励賞受賞記念講演. *天気*, **43**, 9–23.
- 津田敏隆, 2000: 中層大気・熱圏下部における長周期波動の観測. *天気*, **47**, 419–432.
- 津田敏隆, 2006: GPS データを活用した大気重力波の研究, 2003年度日本気象学会受賞記念講演. *天気*, **53**, 19–29.
- 津田敏隆, 2011: RASS による気温計測について. *超音波 TECHNO*, **23** (6), 1–5.
- Tsuda, T., 2014: Characteristics of atmospheric gravity waves observed using the MU (Middle and Upper atmosphere) radar and GPS (Global Positioning System) radio occultation. *Proc. Japan Acad., Ser. B*, **90**, 12–27.
- Tsuda, T., T. Inoue, D. C. Fritts, T. E. VanZandt, S. Kato, T. Sato and S. Fukao, 1989: MST radar observations of a saturated gravity wave spectrum. *J. Atmos. Sci.*, **46**, 2440–2447.
- Tsuda, T., Y. Murayama, M. Yamamoto, S. Kato and S. Fukao, 1990: Seasonal variation of momentum flux in the mesosphere observed with the MU radar. *Geophys. Res. Lett.*, **17**, 725–728.
- Tsuda, T., Y. Murayama, H. Wiryosumarto, S. Woro, B. Harijono and S. Kato, 1994a: Radiosonde observations of equatorial atmosphere dynamics over Indonesia, Part I: Equatorial waves and diurnal tides. *J. Geophys. Res.*, **99**, 10491–10505.
- Tsuda, T., Y. Murayama, H. Wiryosumarto, S. Woro, B. Harijono and S. Kato, 1994b: Radiosonde observations of equatorial atmosphere dynamics over Indonesia, Part II: Characteristics of gravity waves. *J. Geophys. Res.*, **99**, 10507–10516.
- Tsuda, T., M. Nishida, C. Rocken and R. H. Ware, 2000: A global morphology of gravity wave activity in the stratosphere revealed by the GPS occultation data (GPS/MET). *J. Geophys. Res.*, **105**, 7257–7273.
- Tsuda, T., M. Shepherd and N. Gopalswamy, 2015: Advancing the understanding of the Sun–Earth interaction—the Climate and Weather of the Sun–Earth System (CAWSES) II program. *Prog. Earth Planet. Sci.*, **2**, 28, doi:10.1186/s40645-015-0059-0.
- VanZandt, T. E., 1982: A universal spectrum of buoyancy waves in the atmosphere. *Geophys. Res. Lett.*, **9**, 575–578.
- Venkateswara Rao, N., T. Tsuda and Y. Kawatani, 2012: A remarkable correlation between short period gravity waves and semiannual oscillation of the zonal wind in the equatorial mesopause region. *Ann. Geophys.*, **30**, 703–710.
- Vincent, R. A., T. Tsuda and S. Kato, 1988: A comparative study of mesospheric solar tides observed at Adelaide and Kyoto. *J. Geophys. Res.*, **93**, 699–708.
- Woodman, R. F. and A. Guillen, 1974: Radar observations of winds and turbulence in the stratosphere and mesosphere. *J. Atmos. Sci.*, **31**, 493–505.
- Yamamoto, M., K. Shiokawa, T. Nakamura and N. Gopalswamy, 2015: International CAWSES II Symposium. *Earth Planets Space*, **68**, 26, doi:10.1186/s40623-016-0392-6.

An Observational Study on the Atmospheric Disturbances
by Means of Radio Remote-Sensing Techniques

Toshitaka TSUDA*

* *Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto University, Gokasho, Uji-shi, Kyoto, 611-0011, Japan.*

(Received 8 September 2016; Accepted 7 October 2016)
