

「電磁波がつくる大気環境、電磁波でさぐる地球環境」

Effects of solar radiation on the Earth's environment and radio-optical remote sensing techniques of the atmosphere

津田 敏隆*

Toshitaka Tsuda*

1. はじめに

私たちは人類の生存を支える領域を「生存圏」と捉え、これが「生活圏」、「森林圏」、「大気圏」および「宇宙圏」を中心に構成されると考えています。ここで、「圏」とは空間（場所）を指すだけでなく、そこに起こる様々な現象に加えて、それらに関する科学研究と技術開発とを含んでいます。これらを一体化した学問分野として「生存圏科学」を創成しようとしています。

21世紀社会は様々な問題を抱えていますが、生存圏研究所では特に環境、エネルギー、宇宙利用、資源・材料を喫緊の課題と考え、まずその現状を精確に調べて評価すること（診断）を基礎に、それらに対して具体的な解決策（治療）を提示することを目指しています。将来的に持続的発展可能な社会（Sustainable Humanosphere）を実現するために人類が選択すべきシナリオを示したいと考えています。

我々の生存環境である大気圏は主に太陽エネルギーによって生成・維持されています。太陽が放射する電磁波（電波と光）の影響を受け、地球大気は様々な時間・空間スケールの変動を示します。一方、大気環境を診断するために、電磁波が活用されています。つまり、大気環境が電磁波によってつくられ、同時に環境計測に電磁波が用いられるという、地球環境と電磁波とが相互に密接な関係を持っていることが分かります。本講演では太陽と地球の関係（太陽地球系結合過程）を説明し、さらに電磁波を用いた地上および人工衛星からの計測技術（リモートセンシング）を紹介します。

2. 生存圏における太陽の重要性

我々は「宇宙圏」として地球周辺宇宙および太陽を中心とする惑星系を研究対象にしています。地球外からのほとんどのエネルギー・物質の流入は太陽を源としています。太陽は50億年前に誕生し、これからも数十億年輝くとされています。700万年にわたる人類活動とその生存環境は、太陽エネルギーを直接あるいは間接的に享受することで維持されてきました。太陽活動は黒点数の変動で知られている11年周期を基本とし、さらに長期の変化を示し、その影響は地球の気候変動にも及ぶとされています。また、突発的な太陽面爆発および太陽からのプラズマの流れ（太陽風）により地球周辺宇宙の状況は大きく乱され、例えば、現代社会を維持するうえで必須の社会インフラとなっている通信、放送、測位、地球観測衛星が深刻な影響を受けることがあります。

太陽光は植物の生育に必須です。陸地面積の3割を占める森林圏において、光合成により持続的に生産される植物バイオマスは地球上に約1兆8千億トンも蓄積されていて、埋蔵が確認されている石油

* 〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京大大学生存圏研究所大気圏精測診断分野。
E-mail: tsuda@rish.kyoto-u.ac.jp

資源の10倍以上と見積もられています。森林は有機物の発散と吸収、水の保持・蒸散作用、酸素や温暖化ガス(CO₂)の吸収と排出などを通して、地球気候システムに大きな影響を与えています。また、落葉により土壌に養分を与え、さらに河川を通じて海へ栄養を供給して海洋の生態系にも影響しています。森林は土砂災害を防止し水源を供給する一方、文化をはぐくみ、健康増進機能も持っています。

大気圏は森林圏と隣接し、同時に宇宙圏の影響を受けています。気温の高度変化にしたがって大気圏はいくつかの層に分類されています。[注：下層から対流圏(～10 km)、成層圏(10～50 km)、中間圏(50～90 km)、熱圏(90 km～1,000 km)と呼ばれており、また成層圏と中間圏を合わせた領域を中層大気(10～100 km)ともいいます。]高度約100 kmまでは、二酸化炭素をはじめとする温室効果気体が熱収支を支配するとともに、太陽光による光化学反応で生成される電離層およびオゾン層が生命体にとって有害な太陽紫外線を吸収・除去して地上の生命活動を保護しています。しかし、近年の産業活動増大により、人為的に放出される気体が温室効果を加速しており、またオゾン層破壊を引き起こしていることが問題となっています。

こういった現状に鑑み、大気圏の状態を精緻に把握し、それを基礎に将来予測をする研究が求められています。大気の流れや大気質(微量成分、塵など)をレーダーやライダーで代表される地上リモートセンシング、あるいは人工衛星でグローバル観測し、さまざまな時間・空間スケールの大気現象を理解する必要があります。さらに、これらの観測で得られる新たな環境情報を整理したデータベースを構築し、それを高度利用することも重要です。

3. 電磁波を用いた環境計測

携帯電話をはじめとする通信、TV・ラジオ放送ならびに測位(GPS)などに広く電波が使われています。図1に示すように電波は周波数で識別されます。一方、光は波長で区別されます。可視光の波長はおよそ360～800 nmで、それより短い光は紫外線、長い方は赤外線と呼ばれます。電波と光をまとめて電磁波と呼びます。

物体の中にある荷電粒子が振動すると電場を作ります。これにより磁場振動が誘導され、電磁波が放射されます。実はすべての物体は電磁波を輻射していて、その波長分布は物体の温度に依存します。太陽(光球)の表面温度は約6000Kなので、太陽光は可視光(黄色)で最大になります。一方、宇宙空間から見た地球の平均気温は約255 Kで、赤外線を中心に放射しています。地球は太陽放射の可視光で加熱され、逆に地球全体から赤外線を放射して冷却することで熱収支がバランスしています。このバランスから求まる地球の等価温度が255 K(–18° C)なのです。しかし、地表気温は全球平均でおよそ15° Cとされています。実は、大気中の微量成分が地表からの赤外放射をいったん吸収し、地表に向けて再放射します。その結果、温室効果が起こり地表付近は上記のように、約30度も暖められています。現在、人工的に排出されるCO₂等の温室効果気体の増加により、保温効果が少し過剰になっていることが地球温暖化の原因です。しかし、もし温室効果がなくなったら地球は水の惑星になったことでしょうか。また、既に触れましたが、大気は太陽光に含まれる紫外線を吸収する働きを持ち(その結果、オゾン層等ができる)、紫外線が生命に危険を及ぼさないように保護する役割を果たしています。これらの例からも分かるように、電磁波と大気が相互作用することで快適な生存環境が作り出されています。

ところで、電磁波を情報通信に使う際、大気が伝搬路となります。一般に大気を通信路として扱う場合は、大気は電波に対して透明でなんの干渉もしないと仮定されています。しかし、詳しく見ると、電磁波と大気とは様々な相互作用を起こしています。

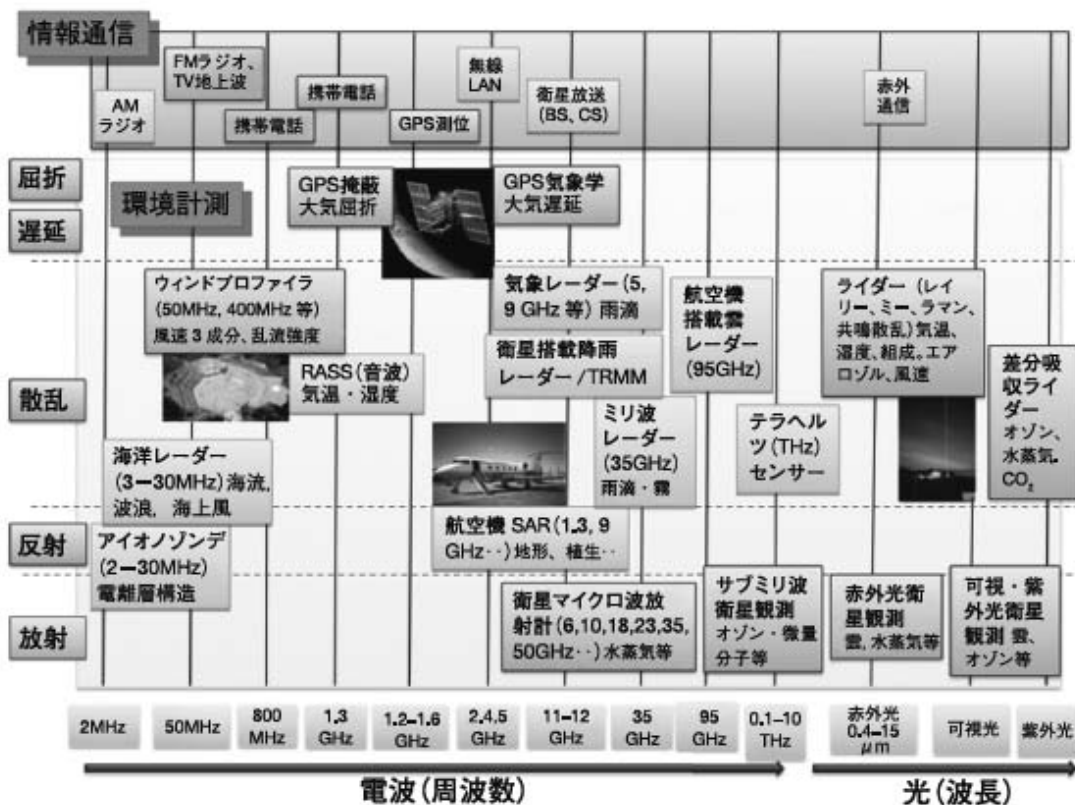


図1：情報通信および環境計測に用いられる電磁波（電波と光）と大気との相互作用

それらの物理現象をうまく活用すれば、大気の状態を計測することができます(石原、津田、2012)。これまでに開発されている主な大気リモートセンシング法について、電波周波数あるいは光波長について図1に例示しています。

まず、地上あるいは衛星搭載の装置により大気が放射する電磁波を受信すれば、気温や組成などの大気情報を得ることができます。これは自然界の電磁波を用いるため、受動的 (passive) 手法に分類されます。一方、人工的に電磁波を放射して大気を計測する場合は、能動的 (active) 手法と呼ばれます。電波が大気中で散乱・反射される現象を用いるレーダーが典型例です。京大・生存研では特に大型大気レーダーの開発で国際的に先駆的研究をしており、滋賀県の信楽にMUレーダー (Middle and Upper atmosphere radar) を1984年に建設したのに加え、2001年にインドネシアの西スマトラに赤道大気レーダー (EAR:



図2：様々な大気計測法

Equatorail Atmosphere Radar) を設置しています。これについて後節で詳しく説明します。

電磁波の伝搬速度は真空中では光速に等しくなることが知られています。しかし、大気中ではわずかに真空中より遅くなり、その速度比を屈折率と定義します。屈折率に高度勾配があると、電波は屈折率の大きい側に曲がる性質があり、地球大気の外にある衛星等から侵入する電波は地球に近づく方向にわずかに曲がります。これらの遅延あるいは屈曲により電波伝搬が真空中の状態からずれる効果はごくわずかなので、一般に通信・放送では問題にされません。しかし、GPS で代表される衛星測位では衛星から発射される電波の到達時間を元に宇宙規模での三角測量をしていて、1 mm の精度が要求されていることから、伝搬誤差が問題になっています。その誤差を評価して除去するうちに、誤差から有用な信号を取り出せることに気が付きました。つまり、GPS 電波が大気中で遅延や屈折することから、その原因となる大気状態（気温、湿度など）を計測する「GPS 気象学」が進展しています。測位にとって邪魔なノイズを大気信号と捉える、“One person’s noise is another’s signal” という理念が新発想の計測技術を生んだのです。

図2は地上および衛星からのリモートセンシング法および飛翔体（気球、航空機、ロケット）による直接観測を併用した地球大気の複合観測の概念図を示します。大気環境の長期的な変化、あるいは集中豪雨といった極端気象を理解し、現象の将来予測をするには精密かつ正確な計測を続けることが重要です。

4. 「太陽地球系結合過程」に関する研究プロジェクト

太陽地球系結合過程の研究は、太陽から地球に流入するエネルギー、およびそれに対する地球環境の応答を解明することを目的としています。ICSU (International Council for Science: 国際科学会議) 傘下の SCOSTEP (Scientific Committee of Solar Terrestrial Physics: 太陽地球系物理学科学委員会) はこれまで地球惑星科学に関する多くの国際共同研究プロジェクトを過去 50 年以上にわたって実施してきました。最近では、2004～2013 年の 10 年にわたって行われた CAUSES: Climate and Weather of the Sun-Earth System 「太陽地球系の気候と天気」において太陽と地球の長期的（気候）および短期的（天気）な結合関係が主題でした。我が国は SCOSTEP のプロジェクトで中心メンバーとして当初から幾多のプロジェクトに参加し、特に地上からのリモートセンシング観測で貢献してきています。

地球大気の基本状態は太陽エネルギー入力に対するバランスで規定されています。しかし太陽活動には長期・短期の変動がある上に、自然界に内在する擾乱および人為起源の変動があり、それらへの応答は複雑で未解明です。太陽活動の変動と大気圏の応答過程を知り、太陽地球系の結合過程を解明し、統一システムとしての定量的な理解を深めることが重要です。

図3に示すように、太陽からのエネルギー入力は放射エネルギーと太陽風（高エネルギー粒子の流れ）から構成されます。前者は赤道域で最大であり後者の電磁エネルギーは磁力線を通じて極域に集中的に流入します。これらのプロセスを解明することを目指し、国内の関連コミュ

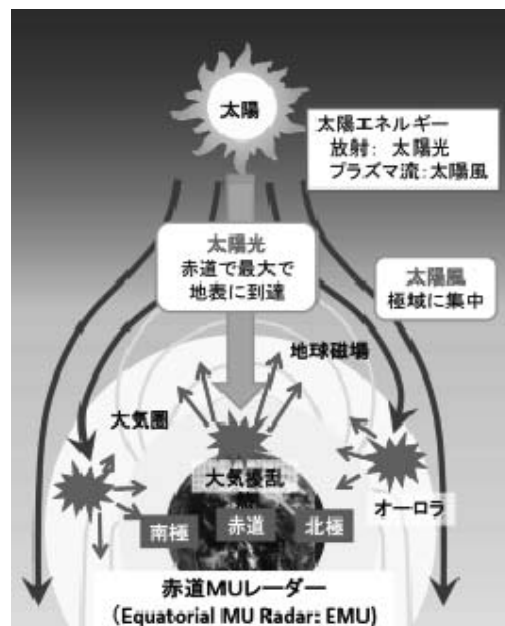


図3：太陽からのエネルギー流入過程

ニティにおける議論を重ねた結果、「①赤道大気」と「②極域現象」という特異点に大型レーダーを建設し、全球にわたる「③広域観測網」を整備し、衛星観測等との連携を踏まえて研究推進する大型研究プロジェクト「太陽地球結合系の研究基盤形成（研究代表者：津田敏隆）」が提案されました。以下に主要3課題の研究内容を概説します。

- ① 赤道大気： 太陽からの放射エネルギーは赤道域の地表を暖め活発な積雲対流を生み大気波動を発生させます。大気波動のエネルギーと運動量は姿を変えつつ電離圏まで運ばれ地球周辺環境を変動させます。赤道域の地表から放出される大気物質は、対流圏を循環しつつ積雲や巻雲の生成・発達に寄与し、対流圏界面を通過して噴出され中高緯度まで広く輸送されます。赤道域における複合観測によって、大気の全高度域に現れるエネルギー・物質フローを解明することが求められます。我々は地球上で最も大気擾乱現象が活発なインドネシアの総合観測拠点に最新式の大気レーダーである「赤道 MU レーダー (EMU: Equatorial MU Radar)」を設置し、地表付近の対流圏、中層大気、から電離圏（超高層大気）に至る高度領域に共通するエネルギー・物質の噴流・循環過程（赤道ファウンテン）を解明したいと考えています。
- ② 極域現象： 南極、北極は太陽を起源とする高エネルギー粒子や太陽風、電磁エネルギーが直接流入するユニークな領域です。プラズマ流の立体構造を高解像観測し、オーロラ微細構造やプラズマ-中性大気相互作用等の素過程を理解し、磁気圏最大のエネルギー解放現象であるサブストームをはじめとする重要現象の解明を目指します。国立極地研究所を中心に、北極域のスカンジナビア半島北部に大型レーダーシステム EISCAT_3D を6ヶ国の共同出資で建設することが提案されています。太陽風エネルギー流入により大きく変動する電離圏・磁気圏を高解像度で3次元観測し、極域の電離圏・中層大気へのエネルギー流入とその応答過程を解明します。
- ③ 広域観測網： アジアとアフリカの赤道域を中心に極域までつながる子午面観測網によりエネルギー・物質の経度方向の循環過程を研究します。さらに太陽および大気圏の衛星観測、数値モデリング、データベースを組み合わせ、地球規模でのグローバルなエネルギーと物質の流れを明らかにします。既に国内外の多くの研究機関が実施してきた地上観測データを統合したメタデータ交換システム（ IUGONET: Inter-University Upper Atmosphere Global Observation Network <http://www.iugonet.org/> ）の構築に 2009～2014 年に取り組んでおり、観測データを相互に有効利用し、学際的な視点で地球環境変化を研究する仕組みができています。

この大型研究プロジェクトを国内の研究機関が共同で推進しますが、①赤道は京大・生存研、②は

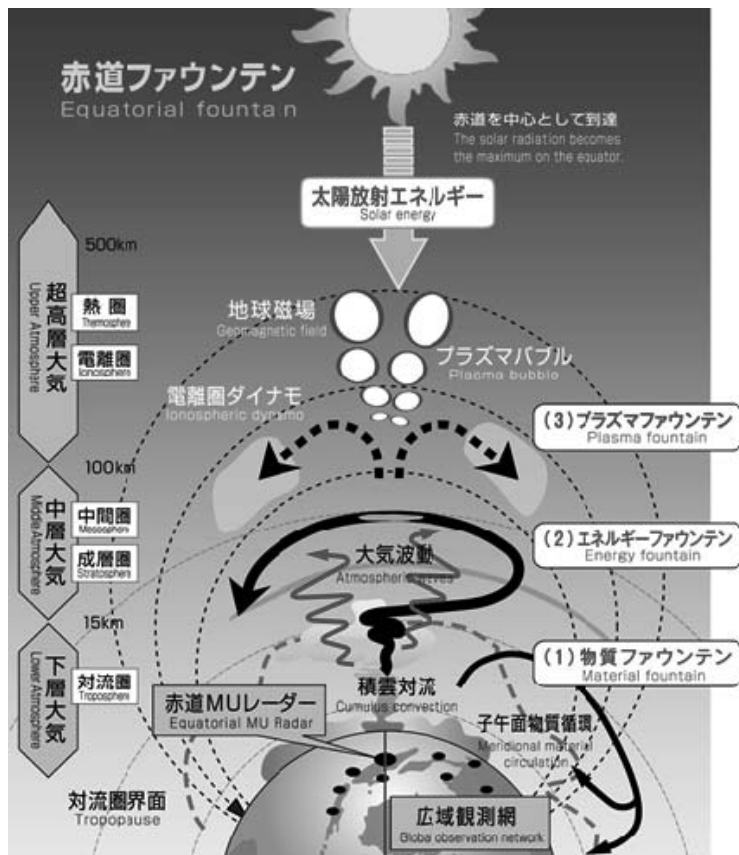


図4：「赤道ファウンテン」の研究課題

極地研が、また③では名大・太陽地球環境研究所 (STE 研)、九大・国際宇宙天気科学・教育センター (ICSWSE)、京大・生存研をはじめ多くの大学・研究機関がフィールド観測を担当します。

我々のプロジェクトは日本学術会議が審査した「大型研究計画のマスタープラン 2014」における 29 件の重点課題に選ばれました。さらに文科省が審議会における議論をもとに 10 件を選定した「学術研究の大型プロジェクトの推進に関する基本構想 (ロードマップ 2014)」に採択されました。今後、速やかに研究計画が具体化することを期待しています。次に京大・生存研が主導する赤道大気研究について詳しく説明します。

5. 赤道ファウンテン

太陽放射は赤道で最大になり、南北30度以内の緯度域で太陽エネルギーのほぼ2/3を受け取っています。強い太陽加熱により大気擾乱 (積雲対流) が活発に起こっています。なかでもインドネシアを中心にインド洋から西太平洋に広がる領域は海洋と諸島が混在する「海洋大陸 (maritime continent)」と呼ばれ、世界中でも最も気象擾乱が激しく、かつその変動が大きいことが知られています (Tsuda, 2014)。

先進国が集中している中緯度域の地表付近で人工的に排出された気体を含む大気はいったん赤道域に集められ、赤道域の対流圏界面を通過してのみ成層圏に吹き上げられます。中層大気に持ち込まれた大気成分は、緯度方向の子午面循環によって全球に広く輸送されます。

赤道域の対流圏では、積雲や巻雲が生成され発達します。特に、積雲対流と呼ばれる大気擾乱が活発に起こり、これがさらに様々な大気波動を励起します。大気波動は中層大気の特異な長周期・不規則変動を駆動しています。さらに、電離圏では中性風によるダイナモ電場が地球磁場と相互作用してプラズマを噴き上げています。

赤道域で特徴的な物質・エネルギーフローを「赤道ファウンテン」として総括的に捉え、その変動が特に激しい熱帯アジア・西太平洋域で研究を進めます。このため、インドネシアの西スマトラで運用している赤道大気レーダーに各種のリモートセンシング装置を結集して拠点観測を行います。同時に、広域ネットワーク観測、衛星データ、数値モデルを駆使して、赤道ファウンテンの動態を解明し、全球に及ぶ大気変動を引き起こすメカニズムを定量的に理解することを目指しています。

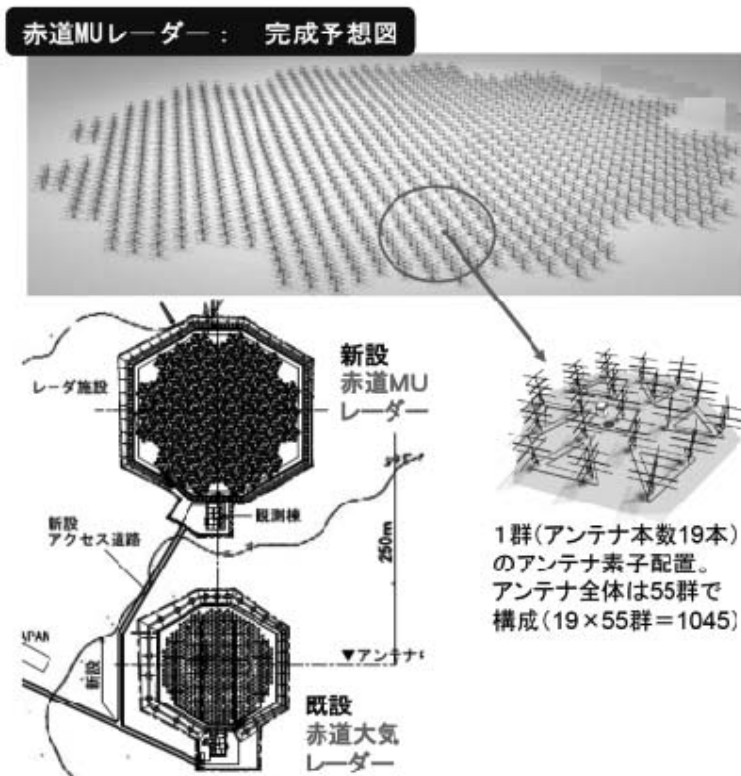


図5：赤道MUレーダーの完成予想図

6. 赤道MUレーダー

赤道大気は地球環境全体に大きな影響を与えていることから、風速変動をはじめとする大気状態の観測データが重要で、生存研がインドネシアで運用している赤道大気レーダーを中心とした総合観測に期待が集まっています。さらに、大気質に影響を与える微量気体の発生源である植生を含む陸域生態系および水圏・地圏と大気圏との相互影響の探究が大きな鍵となります。一方、地表から惑星間宇宙につながる大気層の間の上下結合、さらに太陽地球結合過程の解明が、大気圏におけるエネルギー・物質輸送の観点から重要です。我々は赤道大気的重要性を鑑み、1980年代後半からインドネシアの政府研究機関や大学等との共同研究を続けてきています。インドネシアの西スマトラに2001年に赤道大気レーダー（EAR）を建設し、多くの光・電波リモートセンシング装置を持ち込んで、総合観測所を構築しました。EARを中心に赤道大気集中観測計画「赤道大気上下結合 CPEA: Coupling Processes in the Equatorial Atmosphere（代表者：深尾昌一郎）」を2001～2006年に実施し国際的にも注目される研究成果をあげました（Fukao, 2006, 2009）。さらに、連続観測を行い2011年には観測所10周年記念行事を、インドネシア科学技術大臣、在インドネシア公使、文科省学術機関課長をはじめ多くの来賓のご出席を得て盛大にジャカルタで開きました。15年近くに及ぶ実績をもとに、次期計画としてEARの10倍の測定感度を持ち、より高機能の大型大気レーダー「赤道MUレーダー（EMU）」を建設するプロジェクトを推進しています。EMUでは、直径約163mの大型アレイアンテナを構成する1045本の個々の八木アンテナに半導体化した送受信モジュールを取付けます。EMUはフェーズドアレイを用いたイメージング観測に特徴を有していて、電波リモートセンシング技術や超高速信号処理技術の点で電子情報通信工学への貢献が期待できます。また、この設備は全国・国際共同利用に供されますので、インドネシアのみならずアジア諸国および欧米の研究者が集う研究拠点になることは間違いありません。EMUにより、既に述べた「赤道ファウンテン」の解明を画期的に推進することができると期待されています。

さらに副次効果もあります。地球周辺の宇宙空間には多数の人工衛星が飛び、有人宇宙活動も常時行われていますが、この計画の成果は宇宙天気予測の精度向上に貢献できるので、衛星システムの安全・安心な運用に役立ちます。さらに衛星測位システムや衛星通信・放送に対する太陽活動の影響の回避にも貢献できます。大気観測レーダーによる風速データの活用によって天気予報の精度が向上すると期待されます。赤道MUレーダー（EMU）や広域地上観測網による共同研究や国際スクールの実施などを通じて、アジアやアフリカ地域等の発展途上国の若手研究者を育成でき、これは科学技術を通じた平和外交ともなるでしょう。

7. むすび

持続的発展が可能な社会である生存圏（Sustainable Humanosphere）を構築するには、21世紀に顕在化した多くの課題を科学的に理解し、その解決策として先端技術を基礎とした具体的な方策を示すことが求められています。生存研では喫緊の課題として「環境計測・地球再生」、「太陽エネルギー変換・利用」、「宇宙環境・利用」、「循環型資源・材料開発」の4ミッションを掲げ、電波科学、木質材料科学、地球惑星科学、応用生命科学などを基軸とした学際的研究を推進しています。これらの研究に



図6：生存圏フォーラムのロゴ

大学院生や博士研究員も参加させ、新たなパラダイムを理解した若手人材の育成にも配慮しています。

4ミッションを中核とした生存圏科学の進展により、今後千年にわたり人類が安寧な生活を過ごし、同時に調和のとれた産業発展を進められると期待しています。我々の目標は、その道標を科学的に示すことだと考えています。文理、理工にまたがる多岐にわたる学問分野を糾合して生存圏科学を創成しようとしています。このような幅広い研究分野は単一の学協会では対応できないことから、一般市民、産業界も含めて広く議論をする場として「生存圏フォーラム」を組織しています。是非皆様にも会員になって頂き、情報・意見交換の議論に0参加して頂きますようお願い致します。

参考文献

- 1) 石原正仁、津田敏隆, 「最先端の気象観測」, シリーズ新しい気象技術と気象学第 6 巻, 東京堂出版, ISBN : 9784490207613, 2012 年 10 月.
- 2) Fukao, S., Coupling Processes in the Equatorial Atmosphere (CPEA): A Project Overview, *J. Meteorol. Soc. Japan*, vol. 84A, pp. 1-18, 2006,
- 3) Fukao S. (ed.), Coupling Processes in the Equatorial Atmosphere, special issue, *Earth, Planets and Space*, vol 61, pp 383-552, 2009.
- 4) Tsuda, T., Characteristics of atmospheric gravity waves observed using the MU (Middle and Upper atmosphere) radar and GPS (Global Positioning System) radio occultation, *Proc. Japan Academy, Series B, Physical and Biological Sciences*, Vol. 90, No. 1, pp. 12-27, 2014