

レーダーと GNSS による大気現象の解明

津田敏隆（情報・システム研究機構理事、
京都大学生存圏研究所特任教授）

1. はじめに

平成 29 年秋季の褒章において、はからずも「大気物理学研究」に対して紫綬褒章を賜りました。文部科学省においてまとめられた推薦資料によれば、私がこれまで 40 余年に亘り行った研究について、「超高層物理学の分野において、電波・光を利用した各種の大気計測装置（レーダー、RASS、ライダー等）を開発し、国内およびインドネシア等で先駆的なフィールド観測を成し遂げ、大気波動による大気大循環の駆動に関する研究で多大な成果を上げるとともに、斬新な GPS 電波掩蔽データを用いて大気重力波および電離層擾乱の全球分布を世界で初めて明らかにするなど、顕著な功績を上げた。」ことが顕彰されたそうです。

この度は「知球会」の定期講演会で、研究活動を紹介する機会を与えて頂きまして、まことに有難うございます。私の研究の主なキーワードは、レーダー（流星レーダー、MUレーダー、赤道大気レーダー）、大気波動（大気潮汐、大気重力波、プラネタリ波）、赤道大気力学（積雲対流、赤道波）、GPS 気象学（GPS 可降水量：GPS-PWV [Precipitable Water Vapor]、GPS 電波掩蔽：GPS-RO [Radio Occultation]）になるかと思います。それらに関する研究成果についての詳しい解説は、例えば文末に列記しました日本気象学会の「天気」に報告しておりますので、ご参照頂ければ幸いです。こ

の稿では研究にかかわる雑感を少々記したいと考えています。

2. 流星レーダー

高校生時代はラグビー部、写真部、科学部に所属していて、それぞれに体力と知力を費していました。科学部の夏休みのクラブ活動の一つとして、8 月にペルセウス座流星群の目視観測が例年行われていました。画用紙程度の大きさの枠を針金で作し、4 隅に棒を立て、寝転がってその真ん中に頭を置いて、夜空を見上げると星図の一部を切り取ったようになります。流れ星が走ると、残像をもとに始点と終点を手元の星図に書き込み、視野内の星の光度を参考に、明るさをメモします。流星が現れるのは深夜から未明です。滋賀県近江八幡市の郊外にある古刹、長命寺の麓の民宿に泊まり、早々に夕食を切り上げて、琵琶湖畔の波止場に寝転がります。11 月のしし座流星群などでは、活発な時は、分刻みで流星が現れる流星雨と呼ばれる現象が起こり、壮観です。ペルセウス座流星群では頻度はせいぜい数分に 1 つ程度ですが、明るい流星が尾を引くことがあり、単なる観察という以上の興奮を覚えたことを記憶しています。宇宙飛行を想像し心地よくなると寝てしまい、流星が全く現れない欠測期間ができて、仲間から非難の目を向けられます（お互い様ですが）。

1971 年に京都大学の電気電子工学科に入学し、電子回路をはじめ通信システム、半導体などを学びました。卒業研究では核融合にも活用されるプラズマビーム注入装置に取り組みましたが、修士では、何となくその当時黎明期だった宇宙関係の研究をしてみようかと思い、加藤進教授、松本紘助教授

(当時)の研究室(電離層研究施設)に進みました。選んだ研究が流星レーダーの開発で、当時助手だった麻生武彦先生、同級生の唐沢好男さん(電通大名誉教授)、さらに後輩の大学院生とともにレーダーを手作りしました。

私の担当はレーダー観測の計算機制御と取得データのリアルタイム処理でした。ミニコンと呼ばれていた当時の計算機では主記憶が24kByteで、現在のパソコンの8GByteと比べると、 $2.4 \times 10^4 : 8 \times 10^9$ と百万分の3という容量比になり、外部メモリーはオープンリールの磁気テープ(100MB)、OSは紙テープで読ませるといったまさに隔世の代物でしたが・・・(図1)、こういう話は同世代にしか通じないでしょうね。



図1 1977年に信楽に設置した流星レーダーの計算機システムと受信機類。

流星群の無い通常の夜でも、電波で検出できる流星は2千個程度発生しますが、それぞれの継続時間は1秒以下です。図2は、オシロスコープに映した流星エコー強度の時間減衰の様子(対数軸)およびドップラー信号の例です。

24時間データを取り続けても2,000/86,400秒=2.3%しか有効な情報は含まれないので、リアルタイムで信号処理し、流星エコーのみを選別する必要があります。また、流星エコーの探査モード時に大出力の電波を出し続けるのは非効率です。当時は高電圧(10kV)の電子管を使った送信機だったので、焼損率を下げるため、流星が起こった時間のみ送受信の繰り返し間隔を狭める工夫をしました。

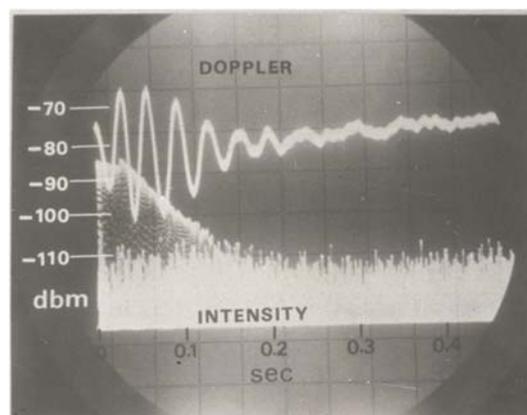


図2 流星エコー強度およびドップラー偏移信号のオシロスコープ画像。

これらの送受信スキーム制御、データ取得監理を司り、さらにデータをリアルタイム処理して流星エコーの到来方向と距離、ドップラー偏移(視線速度)、エコー減衰率(大気密度に関係)をリアルタイム処理する一連の操作をアセンブラ言語で構成しました。容易な仕事ではありませんでしたが、熱中して楽しかった記憶があります。(もっとも、現在のパソコンでなら1-2ヶ月でできるプログラムでしょう)。オシロスコープに映る流星エコーの信号をカメラ撮影し、手作業で事後解析していた時代でしたから、

画期的なレーダー制御システムができた
と自画自賛していました。

1977年に信楽町の人里離れた国有林の奥深くに、トレーラに積載した流星レーダーシステムを持ち込みました。送信周波数が31.57MHzなので、半波長が約5mになり、5素子の八木アンテナは5×10mもの大きさになりますが、これを大学院生の協力も得て数台設置しました。商用電源を引き込むのも一苦勞で、最初のデータを取るまでに結局足掛け3年の歳月がかかりました。(なお、MUレーダーはこの流星レーダーから谷筋一つ東側に設置されました。)

当時の電波監理規制によれば、送信局には無線技術士資格のある者が常時立ち会う必要があり、山中のプレハブ小屋に3-4日寝泊まりし、自炊しながらデータを収集していました。異常が起これなければ、磁気テープの交換以外にあまり用事が無いので、日中は山中をハイキング、夜はセミナー用の資料作成など、今から思うとあまりにも自由な研究生活を過ごしました。

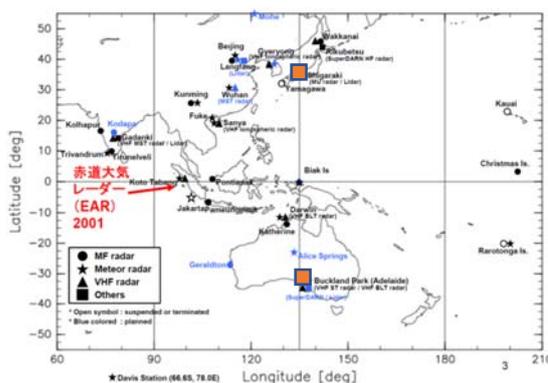


図3 アジア太平洋域における流星レーダー、MFレーダー等の分布。信楽とAdelaideは赤道に対して対称の位置にあたる(橙色の□)。

この流星レーダーは1990年まで信楽で稼働し、高度80-110km(中間圏・熱圏下部の一部)における大気力学過程に関して多くの研究成果を生み出してくれました。米国、カナダ、欧州などと国際協同観測を行い、大気潮汐やプラネタリ波の季節・経度変化などを明らかにしました。

一方、オーストラリアのAdelaide大学は京都と赤道に対して対称地点でMF(中波帯)レーダーを運用しており(図3)、この利点を活かして大気力学過程の南北対称・非対称性を研究するとともに、研究者交流を活発に進めました。

私は修士課程を修了した1977年に助手に採用されましたが、その主なミッションは、流星レーダーと平行して進んでいたMUレーダーの計画です。具体的な設計を進めつつMUレーダーの概算要求が始まり、1981年に予算が認められ3ヶ年を経て1984年11月にMUレーダーが完成しました。私はこの際もレーダー観測制御のプログラム作成に携わり、連日信楽に通う日々が続きました。(MUレーダーに関しては何度か別の機会に報告しておりますので、この稿では割愛します。)

ところで、日豪共同研究を進めるうちに、その間を埋める観測点の必要性を痛感しました。ちょうど、1980年代後半には赤道大気の研究が注目されるようになりました。赤道にMUレーダーを、と夢は広がり、1986年にインドネシアに初めて出向いて、政府機関との接触、建設候補地の巡検を続けました。

とはいえ、いきなり大型レーダーの建設計画が認められる訳はなく、まず、信楽の流星レーダーをインドネシアに移設すること

を計画しました。その際に、システムの改修を行い、ミニコンはパソコンになり、磁気テープは FDD、HDD へと替わりました。送信機を真空管から半導体に置き換えたことで動作は格段に安定し、観測の無人化も見通しが立ちました。

インドネシア政府機関である科学技術応用評価庁(BPPT)と交渉し、インドネシアのジャカルタ郊外に開設された研究学園都市 (PUSPIPTEK) の片隅に約 40m 四方の敷地が与えられました。装置を搬入する際に、まず防護柵を作り、ガードマンの配置を進めるよう BPPT から指示されました。レーダー観測のためにインドネシアに常駐する訳にはいかないの、無人運転を想定していたからです。流星レーダーおよび境界層レーダー、さらに地上観測装置類を大型コンテナ一本分に満載して船便で輸送しました。大学院生及び企業の技術者を含む 6 名が、設営・調整と試験観測のために約 2 ヶ月間 PUSPIPTEK のゲストハウスに泊まり込みました。

作業量が多く週末も仕事を続けていたのですが、3 週目あたりからメンバーの疲労が目立ちだしました。休養が必要。そこで、金曜日の夕方 5 時には、プログラムの試験調整、あるいは電子回路のハンダ付の途中であろうと、作業を一斉に中止し、翌月曜日の朝食時にゲストハウスで会うまで仕事から離れることにしました。その間約 60 時間は完全に自由として、ジョグジャカルタでラーマヤナの舞踏を観劇、ポロブドールやプランバナン遺跡を見学、バリ島のコテージで昼寝などなど、頭を切り替えて、週末にメンバーが思い思いの過ごし方を楽しみました。こうして、1992 年 11 月末にレー

ダー観測所の開所式を迎えることができました。2000 年頃まで順調に観測を継続した結果、未解明だった赤道大気の状態が明らかになってきました。

なお、2001 年には西スマトラ州の Bukittinggi 市郊外に赤道大気レーダー (EAR: Equatorial Atmosphere Radar) が設置され、対流圏・成層圏下部と電離圏の観測が進められています (EAR についても別に報告していますので割愛します)。

1990 年代には流星レーダー (および MF レーダー) を販売する会社がカナダ、オーストラリアなどに現れ、広く使われるようになりました。図 3 の地域で約 20 台の MF レーダー・流星レーダーが運用されています。

我々が持ち込んだ流星レーダーは 2000 年頃に使命を果たし停波しました。2005 年にオーストラリアの会社から既製品を購入して、EAR の敷地内に 1 台を設置しました。その後、2011 年に、NICT の協力を得て、小金井市から流星レーダーを西パプアの Biak 島にある LAPAN の観測所に移設しました (図 3)。別途、我々は日豪協力により 2 台の MF レーダーを西ジャワと西カリマンタンに設置しており、計 4 台の MF レーダーと流星レーダーをインドネシアとの国際協力で運用しています。

なお、我々の MF レーダーと流星レーダーの全データ、さらにインド・米国等による一部のレーダー観測データは IUGONET を通じて世界の研究者に公開されています。

<http://www.iugonet.org/index.jsp?lang=en>

3. 運動量フラックス

一般的な物理法則の復習で恐縮ですが、

保存量 (X) の鉛直輸送フラックス F は、鉛直風 w を用いて、両者の摂動分の covariance の時間平均として $F = \langle X' w \rangle$ で求められます。保存量の例としては温位 θ 、運動量 Mu (M : 質量, u : 水平速度) があげられます。大気波動の場合、質量密度: $\rho = \rho_0 e^{-z/H}$ (z : 高度, H : スケールハイト) を用いて、 $F = \rho \langle u' w \rangle$ と表せます。

大気波動が減衰せずに上方に伝搬する場合は、 F は高度について一定です。しかし、大気波動は対流不安定、KH 不安定など、様々なプロセスで減衰しますので、 F は高度について減少し (運動量を減らし)、その結果として、背景風を加減速することが理論予想されました (Lindzen, 1981, J. Geophys. Res.)。

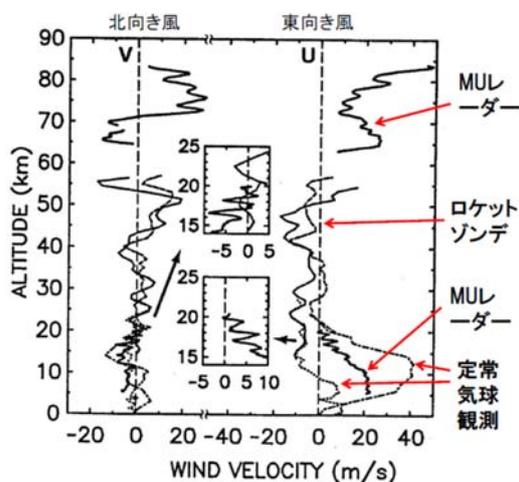


図4 MUレーダー、気球観測、ロケットゾンデで観測された東向き風 (右) と北向き風 (左) の高度プロファイル。 [Tsuda, Proc. Japan Academy, Series B, 2014, Vol.90, No.1, pp.12-27]

図4に示す風速プロファイルには、平均風

に重畳して、高度方向に振動する大気波動 (大気重力波) が現れています。高度とともに鉛直波長が長くなり、一般に振幅も大きくなっていますが、大気密度が高度とともに指数関数的に減衰することを考慮すると、大気波動が減衰し、その振幅増大が飽和しているとされています。それに伴い F が減少していると考えられます。

大気重力波による平均風加速の仮説を実証するには、 $u'w'$ を測定することが重要になりますが、これは2次の微小量であるため、測定精度が問題になります。

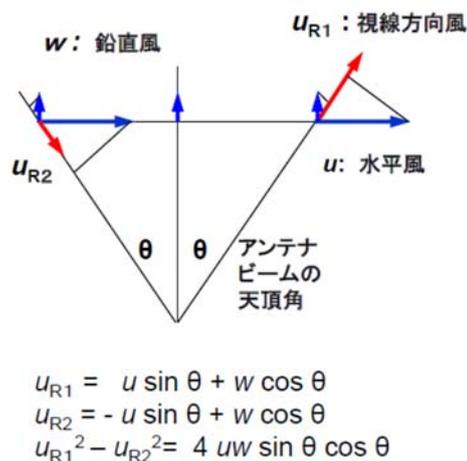


図5 運動量フラックスを測定するアンテナビーム対法の概念図。

大気レーダーでは視線方向の風速 U_R を測定しますが、アンテナビームの天頂角を θ とすると、水平風 u および鉛直風 w の視線方向への投影分の和として、 $U_R = u \sin \theta + w \cos \theta$ と表現されます (図5)。当然ながら、 $\theta=0$ ならば、 $U_R = w$ です。ここで、ある視線方向風と鉛直風を同時観測し、アンテナビームを走査する範囲では風速場は水平変化しないと仮定すると、水平風 u が算出できます。これと鉛

直風 w とを掛け合わせて $u'w'$ を求めることが考えられますが、数式を実際に解けば分かるように計算過程で $(w')^2$ の項が含まれてしまいます。 w は一般に小さく、さらに様々なシステム雑音も含まれ、測定精度が劣るとされています。結果的に、2次微小量である $u'w'$ の解析に対する $(w')^2$ の誤差による精度劣化が無視できず、あまり良好な結果が得られませんでした。

Vincent and Reid (1983, *J. Atmos. Sci.*, pp1321-)は Adelaide 大学の MF レーダーを用いて $u'w'$ の巧妙な方法を考えつきました。天頂角が同じで反対方向に傾けた1対のアンテナビームで視線方向風を同時に観測し、それらの自乗値の差を求めると $u'w'$ の項が残るので、精度よく F を推定できるのです(図5)。私はこの方法を MU レーダーに適用し、中間圏(高度80 km付近)における F の高度減少率を解析し、理論予想と整合的な結果を得ることができました。

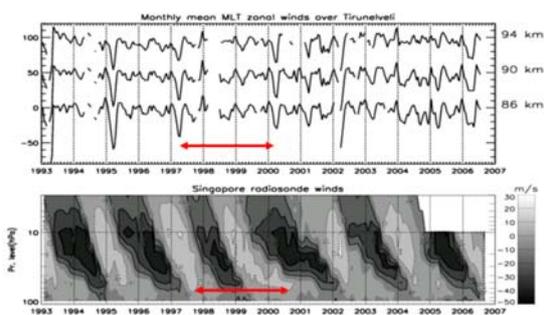


図6 赤道上空における気球による成層圏(下)、および MF レーダーによる中間圏(上)における東向き風の時間高度分布。

[N.V. Rao et al., *J. Geophys. Res.*, 117, A10312, 2012, doi:10.1029/2012JA017850]

赤道大気でも F を求められないかと思

案しました。赤道上空の中間圏では、ほぼ2年周期で東西平均風が変動し、下層の成層圏における準2年周期振動: QBO (Quasi-Biennial Oscillation) と関連があるとされています。ただし、中間圏の QBO は2-3年おきに西向き風が異常に大きくなるのが成層圏とは異なります。図6では、中間圏の QBO の間隔が1997-2000年には3年になっていますが(図中の赤矢印)、それに呼応して成層圏の QBO も伸びていることから、両者の関係が示唆されます。

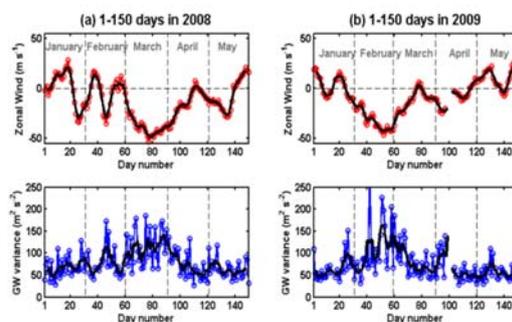


図7 赤道域のMFレーダーで観測された、中間圏における東向き風(上)と大気重力波の力学的エネルギーの時間変化(下)。

[N.V. Rao et al., 2012, *Ann. Geophys.*, 30, 703-710, doi:10.5194/angeo-30-703-2012]

また、中間圏では、2-3年毎の西向き風増大時に大気重力波の強度も大きくなるのが分かっており、両者の関係が話題になっています(図7)。大気重力波が下層から輸送する運動量は何らかの理由で大きくなり、西向き風を加速しているとの仮説があります。

しかし、実際に $u'w'$ を測定しなければ決着しません。あいにく、MU レーダーのような大型大気レーダーがないので別の代

替案を考えました。

Adelaide 大の Vincent 教授、Reid 教授と共同で 1995 年からインドネシアの西カリマンタンの Pontianak 市郊外で MF レーダーを運用していました。使用している周波数が 2MHz なので半波長が 75m になり、このダイポール（銅線）を高さ 10m 程度の鉄塔の間にわたします。半波長のクロスダイポールアンテナ 3 つを一辺 180m の正三角形の頂点に置いて（図 8）、空間相関法（SAD: Spaced Antenna Drift）で中間圏の風速を測定していました。

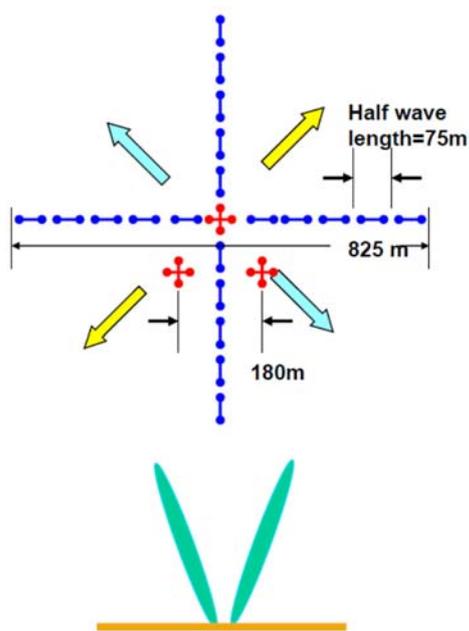


図 8 MF レーダーによる SAD 法（赤）のアンテナ配置、およびビーム走査のための長大アンテナ（青）。下図は青色のアンテナアレイによるアンテナビーム走査の立面図。

新たに、これをアンテナビーム走査型に拡充して、視線方向風を測定できないか検討しました。つまり、半波長アンテナ 11 基

を直線状に並べたものを（総延長 825m）、東西と南北方向に直行して配置し、ダイポールアンテナを位相制御して斜め向きのアンテナビーム対を、東西・南北から 45 度方位角を曲げた方向に生成しようとした（図 8）。

位相制御により、東北—南西のペアと、北西—南東のペアを切り替えることで、2 対の直行方向の F が測定できます。この実験のために、3km×3km の敷地を確保し、アクセス道路も開拓しました。当地は海岸から 20 km 程度内陸に入っていますが、海拔高度は 1—2m です。川の流れもどちらが川下かかろうじてわかる程度の緩やかな流れです。雨季には一面が水没する湿地帯で、アクセス道路も水面下になります。レーダー装置のある建物は湖に孤立したような状態で、車で近づくのも一苦労です。



図 9 Pontianak に設置した長大な半波長アンテナアレイの一部。高さ 10m の鉄塔の間にアンテナ（銅線）を張り、その中間にバランを設置。下部の赤白ポールは信号ケーブル敷設用で、水没および鼠害を防ぐ。

ただし、一帯が湿地帯なのは平坦な電波反射板が広がっていることになり、アンテナ特性には好都合です。装置は約2年がかりで作成したものの、頻繁に雷害を受け、十分にデータが取れないまま、いったん計画を断念しています。

一方、流星レーダーを用いて $u'w'$ を測定する新たな手法が Hocking (2005, Ann. Geophys., pp. 2433-)により提案されました。一般に流星レーダーでは全方位からの流星エコーを検出し、視線方向風を個別に測定しています。この方位角を真東および真西からある程度の方位角幅に制限し (図10の赤三角)、視線方向風を求めれば、上述のビーム対法と同様に $u'w'$ が推定できると報告しています。

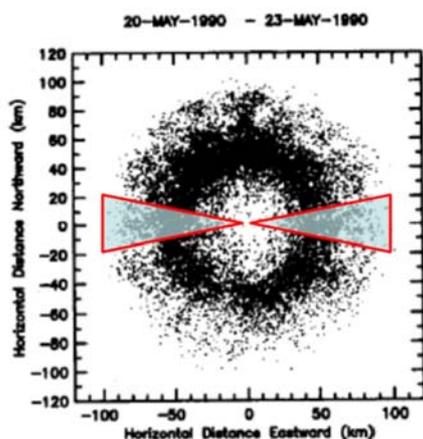


図10 流星エコーの水平分布。東西方向の特定の方位角を切り取ることでアンテナビーム対と同等の観測が模擬できる。

この測定原理は統計的には正しそうですが、MUレーダーのようにアンテナビームを明確に定義できる方法と比べると誤差に問題がありそうです。我々は、2011年以降、インドネシアの東端の西パプア州 Biak に

流星レーダーを設置しているので (図3)、西スマトラの赤道大気レーダーに併設した流星レーダーと同時観測を行いました。これら2台の流星レーダーは同じ仕様で性能も同等なので、両者で $u'w'$ を解析し、比較することで Hocking 法の蓋然性チェックすることを計画しました。残念ながら、これらの流星レーダーも雷害や停電等により重複して観測できた期間が短く、統計的に有意な結果を出せないままです。

これらの MF レーダーあるいは流星レーダーを用いた実験は、現時点では徒労を重ねてきただけの感がありますが、いつの日か正しい解析結果を出して、赤道大気の不思議を明らかにしたいと思っています。

4. GPS 電波掩蔽

一般に掩蔽現象とは、月や惑星の影に星が隠れることをいいます (星食とも呼ばれます)。惑星探査機が金星や火星の向こう側に飛翔する際に、通信用の電波が惑星大気中を屈折しつつ通過して地上に届く様子から、大気密度などの観測が1960年代から行われてきました。

地球大気に対しては、1995-97年にGPS受信機を搭載した約50kgの小型低軌道衛星による電波掩蔽観測 (GPS/Met) がUCARにより初めて行われました。

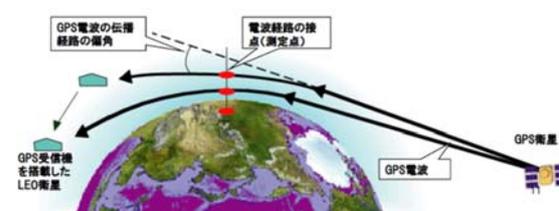


図11 GPS電波掩蔽の概念図

GPS 電波掩蔽の概念を示した図 11 ではかなり誇張されていますが、電波屈折角は極わずかですが、その屈折角から大気・電離層の電波屈折率が得られます。さらに、大気が球対称であると仮定して電子密度、大気密度（気温）、湿度の高度プロファイルが算出されます。

GPS 電波掩蔽法は Limb Scan 法の一つで、高度分解能が優れていることが特徴です。特に、電波伝搬特性を詳細に解析する手法（Wave Optics）を用いると、対流圏界面付近において高度分解能 100m 以下で気温を求めることができ、定常気球観測に匹敵する細かな変動を検出できます。

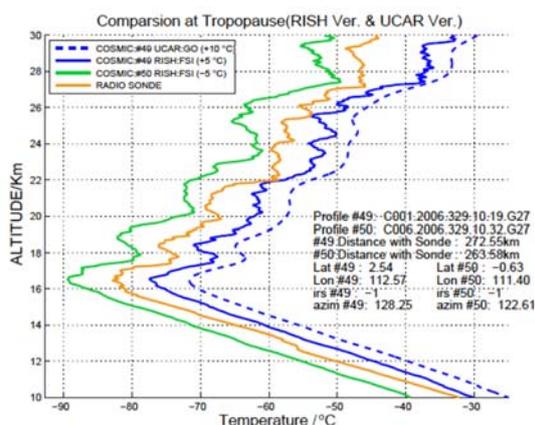


図 12 ボルネオ島上空で GPS 掩蔽に WO 解法を適用して得られた気温プロファイル（緑、青）と Kuching における気球観測の比較。青破線は、青線と同じ基礎データを低分解能の幾何光学法で解析した結果。[Tsuda, et al., Atmos. Meas. Tech., 2011, 4, 1627-1636, doi:10.5194/amt-4-1627-2011]

図 12 では熱帯域の対流圏界面のシャープな気温構造の変化、あるいは成層圏にお

ける大気波動による変動が明らかで、波動の水平伝搬にともなう位相の高度変化も認められます。この稀有なデータを活用して、微細な気温変動の解析が続々と行われています。さらに、数値予報（NWP）モデルにデータ同化することで、メソ現象を含めて予報精度を各段に向上させることが分かっています。なお、GPS 電波掩蔽法は信号の強度ではなく主に電波位相を用いるため、測定装置（衛星）の世代交代によるバイアスの影響を受けにくく、長期の気候変動（温暖化）の監視に適しています。

GPS 気象学の学問分野は、そもそも衛星測位に対して大気中の電波伝搬が精度劣化を起こすことを改善しようとする研究から始まったのですが、実はその誤差に有効な大気情報が含まれることが分かり大きく発展した経緯があります。この経験から、One person's noise is another's signal と喧伝されていますが、他の観測についても起こり得ることだろうと感じています。

5. おわりに

地球物理学の研究手法は様々で、理論から発し、モデル、数値シミュレーションへと進む方向性、一方、観測原理の新発想、装置開発、フィールド実験からデータ解析へとたどり着く道があります。私は主に後者を 40 数年間続けてきましたが、その一端を本稿で紹介させて頂きました。

観測結果は理論によって説明されなければならないとは思いますが、様々な複雑過程を包含した自然現象を切り取った観測データは一本筋の仮説やモデルではとても解釈できません。実直に、得られた自然の描像を正確に示すことが基本であると考えてい

ます。そのために、観測装置の限界、様々な誤差要因の吟味を追及することが観測者の責務であり、曖昧さを残したまま「事実」としてデータを示すのは戒められるべきだと思います。

私の研究は観測装置の開発を基礎にフィールド実験を行うことが主で、一人で実行できる仕事ではありません。このたび荣誉ある紫綬褒章を賜りましたのは、研究グループとしての成果を評価して頂いたものと考えています。私が研究を行う過程で多くの先達からご指導を賜り、さらに同僚や後輩さらに学生諸氏からご助力を得たことに心よりお礼申し上げます。私の研究がわずかでも地球物理学の進展に寄与できたならば望外の喜びです。

参考文献：日本気象学会「天気」

- (1) 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—
https://www.metsoc.jp/tenki/pdf/1996/1996_01_0009.pdf
- (2) 日本気象学会 1999年度秋季大会シンポジウム「中層大気中の長周期振動」の報告
2. 中層大気・熱圏下部における長周期波動の観測
https://www.metsoc.jp/tenki/pdf/2000/2000_06_0419.pdf
- (3) 日本気象学会 2000年秋季大会シンポジウム「人工衛星からの大気観測—その歴史的展開—」の報告 3. GPS電波を用いた気象観測
https://www.metsoc.jp/tenki/pdf/2001/2001_07_0461.pdf

- (4) GPSデータを活用した大気重力波の研究—2003年度日本気象学会賞受賞記念講演—
https://www.metsoc.jp/tenki/pdf/2006/2006_01_0019.pdf
- (5) 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—
https://www.metsoc.jp/tenki/pdf/2016/2016_12_0003.pdf