

大気潮汐・大気重力波, MST レーダ*

—平成元年度藤原賞受賞記念講演—

加藤 進**

1. はじめに

平成元年度の藤原賞を頂き大変嬉しく、光栄に思っている。賞のメダルには藤原先生御自身の筆による渦巻が彫ってあった。NHK 文庫の「気象学者藤原咲平」の初めの頁に同じ図があった。授賞式の直後藤原先生の御子息に偶然お目にかかり、大気の渦巻も藤原先生の興味の対象であったと承った。気象学会のメンバーになってから数年に過ぎない著者が、藤原賞を頂き誠に恐縮である。この機会に、最近発展した中層大気力学で重要視されるようになった大気潮汐波、大気重力波に関する研究の歴史を著者の研究と関連させて紹介させて頂く。

2. 大気潮汐

2.1 古典潮汐論の生いたち

大気潮汐が大気力学の問題として気象学者の関心をひくようになったのは、中層大気の研究が盛んになったごく最近のことである。しかし著者が研究を始めた1950年代の初め電離層の研究の間では、大気潮汐は電離層の運動を支配する重要な要素と考えられていた。第1図にあるように、地上で測られた地磁気の日変化は規則正しく一日の周期で太陽時で変化している。この変動の原因は大気潮汐と考えられていた。ただし、これは磁気嵐のような擾乱日を除いた静穏日のことである。

電離層は電離大気——その頃プラズマと言う言葉はなかった——であるから、風が地球磁界を横切って吹くと、ファラデーの法則で知られているように、起電力が発生し、電流が流れる。この電流が地球規模であれば、この電流の作る磁場はほとんど減衰を受けずに、地上に伝わる。これが地磁気の日変化場である。このもとになる大規模な電離層内の風は太陽時で変化する大気振動、

つまり太陽大気潮汐風であろう、という説が19世紀末スチュウアートによって提唱された。

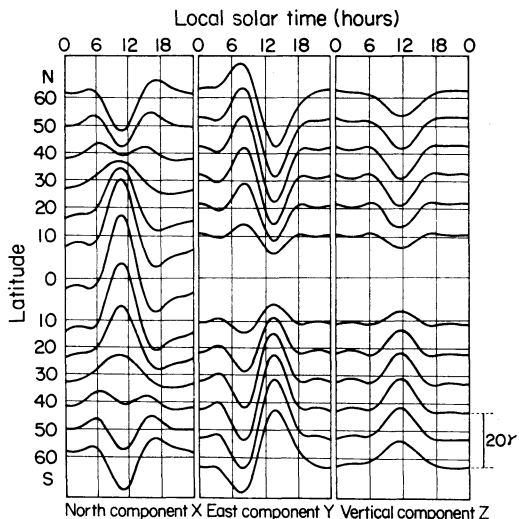
1952年著者は京都大学理学部地球物理教室の長谷川万吉教授のもとで大学院生として研究生活を始めた。長谷川先生は静穏日地磁気日変化電流系の研究で1949年に日本学士院賞を受けておられ、電離層電流は研究室の中心課題であった。先輩の広野求和助手(現九州大学名誉教授)、前田坦大学院生(現京都大学名誉教授)の仲間入りをさせて頂いた著者は、潮汐ダイナモ論に基づいて地磁気日変化のデータから電離層の潮汐風を求めることを試みた。いまになって振り返ると、このアイデアを誰が最初持ったのかさだかでないが、上記両先輩のどちらかであろう。この研究は意外なほど大きな反響を呼んだ。数学的取扱を簡単にするため広野氏は風の場を非発散、前田氏は非回転と仮定したのに対して、若く生意気な著者は、勉強し始めた大気潮汐の運動方程式を用いる事にした。われわれ3人の得た計算結果はそれぞれの仮定の違いを越えて、一つの重要な共通の結果をもたらした。どれも風の場は主として一日周期であった。著者のこの仕事はその後15年もの間しばしば引用され、教科書にも載った。この時著者が求めた第2図にある圧力分布は後に潮汐理論の固有関数(Hough 関数)と直接比較ができた。電離層で一日潮汐が主であることは地磁気変化(第1図)からも容易に想像できる。

一方、大気潮汐は地上では1mb程度の振幅を持つ気圧の規則正しい半日周期振動として古くから知られている。19世紀末より、この地上気圧の半日周期変動の解明が進められていた。「地球大気は振動系として、半日の共鳴周期を持つ」英国の物理学者ケルビン卿によって1882年提出されたこの理論は、その後多くの数理物理学者により発展させられ、集大成がM.V. Wilkesの著書Oscillation of the earth's atmosphere (Cambridge University Press, London 1949)として刊行された。

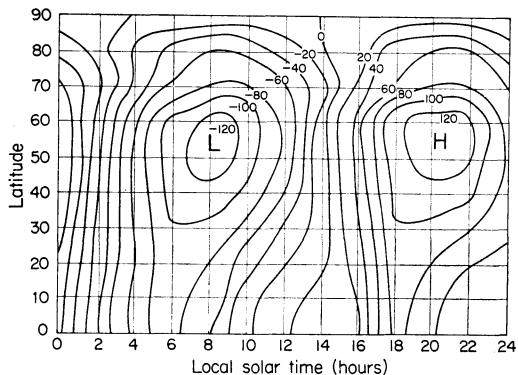
地球大気の共鳴周期を決めるものは地上から超高層ま

* Mesosphere (中国圏), Stratosphere (成層圏), Troposphere (対流圏)を観測するレーダという意味でMSTレーダと呼ぶ。

** Susumu Kato, 京都大学超高層電波研究センター。



第1図 様々な緯度における地磁気の静穏日日変化,位相が規則正しく緯度変化する (Chapman, S. and Bartels, Geomagnetism Vol. 11, Oxford University Press, London, 1940)



第2図 電離層の大気潮汐気圧分布 (S. Kato, J. Geomag. Geoele. 第8巻24頁,1956) 但し値は (p'/ρ) , p' 圧力変動, ρ 大気密度, $10^8 \text{ cm}^2 \text{ sec}^{-2}$.

での気温の高度分布であった。当時成層圏以上の気温のデータはほとんど無かった。しかし1950年代後半までに、ロケット観測により、高度 100 km まで正しい大気温度分布が知られるようになった。ロケット観測によれば、成層圏最上部の温度の極大は、従来潮汐論が仮定していたものよりずっと低かった。この低い値では共鳴周期は決して半日にはならないことが分かり、半世紀余にわたって支持された共鳴理論は壊れた。

1950年中頃、電離層の潮汐を説明するためには、半日潮ではなく、一日潮を研究することが重要ではないのかと著者は考えるようになった。しかし、計算を始めてすぐに大変な困難にぶつかった。潮汐論の基本方程式の級数解が収れんしない。当時、研究室で使用していた電動式計算機では無理な計算だった。

1960年、京都大学の電子計算機第1号である KDC-I が活動を始めた。好運にも、この KDC-I のお守が著者の仕事であった。昼間は一般利用者へのサービスに追われたが夜間は計算機を独占できた。好機到来。級数項を20項以上に増やした途端急速に収れんしてくれた！感動が体の中を駆け巡った。しかし、Wilkes の本にある説明からは予想できない負の固有値が出てきた。この基本固有値の固有関数に対応する気圧の緯度分布が第2図にある電離層の潮汐による気圧分布とよく一致した。こ

の負モードとよばれるようになったモードは上下に伝搬しない。この他、正の固有値に対応する正モードと呼ばれる伝搬出来るモードもあるが、垂直波長高々30 km と短いのが特徴である。これに対し半日周期の潮汐のものは 100 km もある。ここに地上気圧潮と電離層潮の違いの謎を解く鍵があった。

地上気圧潮の謎解きには、著者とほとんど同時にかつ独立に、米国の Lindzen が挑戦した。地上で観測される大気潮汐は対流圏に分布する水蒸気および成層圏のオゾン層が吸収する太陽熱で励起される。いろいろな高度で励起された色々なモードの波が地上に到達する。すると垂直波長の短い一日潮はモード間の位相差のため干渉が起こって小さくなる。一方波長の非常に長い半日潮ではこうならない。

電離層についての著者の謎解きで、一日潮は電離層で太陽紫外線が酸素分子を解離するときの加熱で励起されること、しかも負の基本モードが地球磁場の緯度分布のため、起電力に最も有効であることが分かった。

かくして、前世紀に始まる大気潮汐の問題解決の基礎は確立した。この基となった理論を古典潮汐論という。

この理論が明らかにした一日潮に見られる負モードの存在は他の半日以上周期を持つプラネタリー波全般にいえることであり、気象擾乱の役を演じるロスビー波はこのモードであることも分かった。流れのない、温度が水平に一樣な、回転する球面大気内に存在するグローバルな波の固有モードの全貌が初めて明らかになったのもこの時だった。この各モードの固有関数を Hough 関数といい、完全直交関数系を構成する (厳密な証明はない!)

Hough 関数は以後気象学の解析に用いられるようになった。かくして、古典潮汐論は気象学へ大きな貢献をした。

2.2 最近の大気潮汐の研究

現実の大気は古典潮汐論が取り扱ったものより遙かに複雑である。大気モデルとして、粘性、その他の減衰効果、背景風、超高層では非線形効果等を考慮しなければならない。励起源としては対流圏の水蒸気、成層圏のオゾンによる太陽光吸収に伴う加熱の他、電離層での酸素分子の解離、酸素原子、窒素分子の電離に伴う加熱、さらに地形と共に変わる地面の加熱、雲の分布なども考慮しなければならないことになる。例えば、背景風の緯度分布は古典論では独立なモードを互いに結合させる。経度方向に一樣でない熱源は西向きに太陽と共に伝わる潮汐波のほか、そうでない潮汐波も作り出す。非線形効果は潮汐波の砕波に繋がり、背景風を加減速する。こうなると、数値的解法以外方法はない。これらに関して、多くの優れた研究が1960年代以来行われている。最近の注目すべきものの一つに気象の数値予報に開発された大気大循環モデル (GCM) を用いたシミュレーションがある。日本の気象研究所や九州大学のこの方面研究成果は注目に値する。従来、あまり日本では盛んでなかった大気潮汐の理論研究が、今や新しい時を迎えた感が深い。

1970年代に入って、観測法が大きく発展した。これはコンピュータが観測システムの制御、データ取得に広く取り入れられるようになったからである。かつては地上での気圧変動、電離層の電流変動を通してしか知られなかった大気潮汐の姿を途中の様々な高度でも見ることが出来るようになった。最も有望と著者が判断したのがレーダ観測だった。これは複雑化を迎えるだけに見えた理論から観測へと転ずることを著者に決意させた。まず流星レーダをつくることにした。80~100 km の高度に出現する流星飛跡が局所的な風とともに動くのを追尾し風を測る。このレーダは最近まで活動し、大いに名を挙げた。赤道に対し、京都と対照的位置に在るアデレード (オーストラリア) との同時観測キャンペーンは潮汐論の検証となった。ごく基本的な点、つまり、振幅の大きさの程度や高さ分布、安定性などは理論と一致するが、潮汐波の位相、南北の逆対照性などは未解決の問題である。観測の上では、とくに、赤道域の観測の欠損は深刻な問題である。

3. 大気重力波と MST レーダ

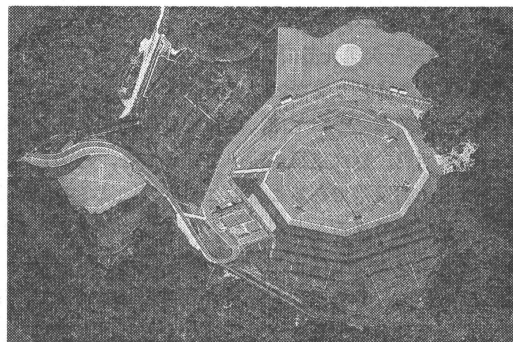
3.1 砕波と大気大循環

1970年代の終わりまでに、成層圏とその上にある中間圏の大気大循環については、中緯度高度約60 km を中心に、冬は西風、夏は東風が吹いていること、約80 km の高度は常に弱風帯であること、この高度では冬の極が夏の極より高温であることが知られるようになった。これは放射平衡の大気では予想できない状況だ。放射平衡では、明らかに、冬極が最も低温で、夏極に向かって、単調に、気温は上昇するはずである。すると、温度風の関係で、各緯度で東西の風 (地衡風) は高さと共に、単調に増加するはずだ。「これは、この高度で何か摩擦力が東西に作用していることを意味する。この摩擦力と釣り合うために夏極から赤道を越えて、冬極に向かう風があり、これが作るコリオリ力が必要になる。さらに、この南北の流れは連続の関係で、夏極のこの高度に上向き、冬極に下向きの流れ (風) を作り、断熱膨張による降温が夏極に、断熱圧縮による昇温が冬極に起こる。これですべてが説明できる」ことが分かった。この基本となる摩擦力の実体が大気重力波ではないかと言う仮説が Lindzen (米), Holton (米), 松野 (日本) により提出された。この検定には観測が不可欠である。

3.2 MST レーダによる大気重力波の観測

流星レーダで腕を磨いたので、いよいよ大型レーダを建設する時がきた。

1970年の初期、ペルーのヒカマルカーで電離層観測用インコーヒレントレーダが中間圏からの強いエコーを受信した。このエコーが大気乱流のつくる電波の屈折率の乱れによるものであり、エコーのドップラー変位から、乱れの動き、つまり乱れを運ぶ風を求めることが出来る。また重力波らしいものも見つかった。それでは重力波を観測するために最適のレーダを作ろう。この頃すでに日本では、中層大気に興味を持つ研究者のかかなり大きいグループが文部省科学研究費総合研究班を組み、活動していた。機は熟した。シンポジウム、ワークショップを開き技術的なこと、研究問題、設備の運用と利用組織を議論した。京都大学のグループは文部省科学研究費海外学術調査班としてヒカマルカやアレンポーに出かけ、そのレーダを使わせて貰い技術的訓練を積んだ。この時、これらレーダの生みの親である米国ライス大学教授ゴードン氏から受けた授助は大きかった。現地に経験豊かな御弟子さんを派遣してくれた。後同教授自身京都大学に1カ月来訪され著者らの計画を指導してくれた。わ

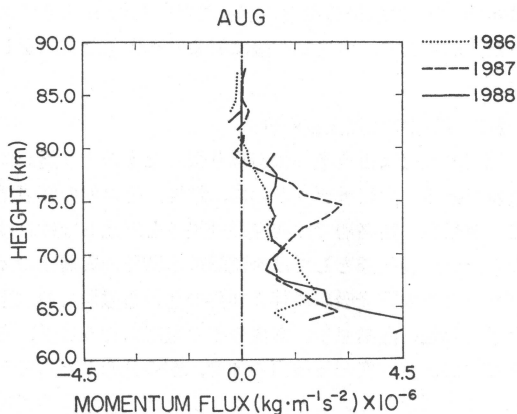


第3図 MU レーダー, 甲子園球場より大きいアンテナ面, 高さ3mの475本の八木アンテナが並ぶ

れわれが計画したレーダはその観測対象である中間圏 (Mesosphere), 成層圏 (Stratosphere), 対流圏 (Troposphere)の頭文字をとって MST レーダと呼ばれる。

1981年度 (昭和56年度) 建設が認められた大型 MST レーダである京都大学 MU レーダは3年の月日をかけて1984年秋完成した。第3図にある様に, 滋賀県信楽町の国有林内に建設されたこの施設は完成の前年より, 部分的には活動していた。台風時に対流圏上部までの細かい大気の動きを観測し気象観測器としての潜在力を示した。予想されていた台風に伴う重力波の発生も観測できた。時あたかも中層大気国際共同観測計画 MAP (1982-1985年) が進行中で, 出生から国際的な期待を負った MU レーダであった。MU レーダ完成を機に MAP 国際シンポジウムが京都で開催され国内外から200名が出席した。

MU レーダの最大の特長はレーダのビームを500マイクロ秒の間に天頂から30度内のいずれの方向へも向けることが出来ることである。これで, 1分の間隔で, 150mの高度毎に, 3次元の風を観測できる。現在, 全面活動に入って5年経っている。一つの中心課題であった重力波についてはかなりの成果が挙がっている。しばしば観測される準単色の重力波を東西南北および真上に向けたレーダビームで測定し, 速度を求めて, 分散式に基づいて, 周期と伝搬方向を決定する。長期観測により, その季節変化まで論ずることが出来るようになってきた。また風の変動が多くの重力波から成るとして, 鉛直波長のスペクトル分布を求め, これが理論的に予想される飽和スペクトルとなっていることも明らかにした。運動量フラックス (第4図) を観測して, その高さ微分より背景風を加速するレイノルド応力を求めた。重力波が中間圏



第4図 モーメント・フラックスの平均 $\rho \langle u'w' \rangle$, ここで u' , w' は各々重力波の風速の水平, 垂直成分

界面で碎波し背景風を減速させるという上述の仮説を, これらの観測結果が実証をしつつあると言える。

4. まとめ

古典論に始まって, 大気潮汐の理論研究は大きく発展してきた。これは他の分野にもみられるように電子計算機の発展に負うところが大きい。1960年代初めに著者が用いた KDC-I は当時いわば計算センターの中心的大型設備であったが, 現在のパソコンの能力にも劣っている。正に今昔の感に耐えない。しかし研究の歴史とは多くの場合こんなものだろう。これに関連して, 最近始められ, いくつかの先駆的成果をあげている GCM によるシミュレーションの今後の発展を期待している。

大気潮汐の研究における大きな問題は今でも観測データの不足にある。潮汐波は励起源が同定出来かつ位相が確定している唯一のグローバルな重力波として大変重要で興味深いものである。しかし, 反面, その解明には, 地上から超高層までのあらゆる高さでかつグローバルな大気速度の日変化の観測データを必要とし, 誠に厄介である。特に上述したように低緯度赤道域の観測データの欠損は深刻である。また重力波を含む他の大気波動の研究でもコリオリ力の消える赤道域は特異でかつ重要な意味もっている。また大気に注入される太陽エネルギーの極大域であることから見ても, 大気研究一般において, 赤道が重要な地域である事は明らかであるが, 先進国が同地域に皆無であるため研究の盲点になってきた。特にインドネシア地域は海洋大陸と呼ばれ, そこでの気

象や海洋の状況の変動がエルニニョの様にグローバルな気候変動と深く関連していることが分ってきた。そこでインドネシアで大気観測をすることは大きな意義を持つ。

著者は赤道域大気の解明のために赤道レーダの建設を広い国際的支援の基に計画している。IUGG (国際測地学・地球物理学会) は1982年の総会で赤道レーダ建設の

勧告を出している。これは MU レーダの約10倍の規模のシステムを建設し地上より超高層までの大気の動きを一分の分解能で一気に測定しようとするものである。将来、この強力な設備を中心にした国際赤道大気研究所が日本の力で実現できることを切に願っている。地球環境問題解明に対する日本のユニークな貢献ともなるであろう。

平成元年度「気象研究所研究発表会」のお知らせ

日時：平成元年11月29日(水) 9時30分～17時

場所：気象研究所講堂

問合せ：企画室、手塚 ☎ 0298-51-7111 (内 204)

プログラム：

09:30～09:35 あいさつ(岡村 存 気象研究所長)
《座長：台風研究部長》

09:35～10:00 梅雨前線上のじょう乱の振舞と構造
*秋山孝子(予報研究部)

10:00～10:30 成層圏の季節変化の数値実験
*柴田清隆, 千葉 長(気候研究部)

10:30～11:00 北半球冬季中・高緯度対流圏における波動・平均流相互作用の解析的研究
*佐藤康雄(気候研究部)

《座長：気象衛星・観測システム研究部長》

11:00～11:30 日本付近における対流圏エロゾルの観測

*池上三和子, 財前祐二
(物理気象研究部)

11:30～12:00 サブミクロン・エロゾル粒子の Nucleation Scavenging について

*岡田菊夫, 田中豊頭, 成瀬 弘, 吉川友章(応用気象研究部)

—【昼 食】—

《座長：海洋研究部長》

13:00～13:40 台風域内の非対称構造

*岡村博文(台風研究部)

13:40～14:20 台風の非対称構造から生じる中心の移動に関する研究

*大西晴夫(台風研究部)

《座長：物理気象研究部長》

14:20～14:45 一次散乱近似により求められる日本における地震波減衰の地域性

*後藤和彦, 千場充之(地震火山研究部)

14:45～15:00 地震波減衰における多重散乱の影響

*千場充之, 後藤和彦(地震火山研究部)

—【休憩】—

《座長：気候研究部長》

15:20～15:50 太平洋における海洋特性量の分布と海洋大循環

*周東健三(海洋研究部)

15:50～16:30 海底設置型ドップラー多層流速計による海流観測

*四竈信行, 佐野 昭, 周東健三
(海洋研究部)

16:30～17:00 海洋の炭素循環における溶存有機炭素の役割

*杉村行勇, 鈴木 款(地球化学研究部)

閉会のあいあつ(椎野 企画室長)

【懇親会】 (*印は、発表者)