

ISレーダー観測による極域TIDの特性

柴田 喬 (電気通信大学)

はじめに

波動構造が電離圏中を移動する様として観測される移動性電離層擾乱 (*Traveling Ionospheric Disturbance*; TID) は, 中性大気の波動である大気重力波 (*Atmospheric Gravity Wave*; AGW) によって引き起こされており, AGWに関するある種のトレーサーであると解釈されている。このAGW/TID現象の重要な側面の一つは, 下層大気から上層へおよび極域電離圏から中低緯度への余剰エネルギーの輸送/再分配を, この遠達性に優れたAGWが担っていることを示していることであり, 熱圏におけるダイナミクスやエナージェティックスを解明する上で貴重な手がかりを与えるものである。

AGW/TID現象の観測研究は, さまざまな電波技法 (イオノゾンデ, ファラデー回転, HF ドップラー, 流星レーダー, MSTレーダー, ISレーダー, HFレーダー, 等々) や光学観測によってここ数十年永続的に行われて来ており, そらを通じて熱圏AGWの伝搬姿態や擾乱活動のいろいろな様相はかなりの程度明らかにされて来ている。それらに関しては, 例えば, Yeh and Liu (1974), Francis (1975), Hunsucker (1982), Hocke and Schlegel (1996) 等のレビュー論文を参照されたい。

AGW/TID現象の基本的な扱い方としては, 例えば Hunsucker (1982) が示すように,

AGW 励起 × 大気圏効果 × 電離圏効果 × TID 観測

のように要素化することが一つの方法であろう。本稿では, これらの要素を後ろのものから順次検討することとし, とくに筆者が関わっているEISCATレーダー観測に基づいたAGW/TID解析に関して, (1) 電離圏プラズマのレーダー観測からAGW現象をどのように抽出するか, (2) AGWに対して電離圏プラズマはどのような応答をしているか, (3) AGWに伴う電離圏擾乱はどのような鉛直構造をしているか, 等について, 最近の二三の知見について概説することとする。

大気重力波擾乱の抽出

ISレーダーデータは, 言うまでもなく, 電離圏自由電子からの非干渉性散乱波のスペクトル形状から演繹されたものであり, 本質的に電離圏プラズマに関する構造 (電子密度 N_e , イオン組成 p) や, エナージェティックス (電子温度 T_e , イオン温度 T_i), ダイナミクス (イオンドリフト速度 V_i) に関連する情報を与えている。したがって, これらプラズマデータからAGWそのものに関する情報を得る為には, とくにEISCATによるような極域で取得されたデータの場合, 降下粒子や対流電場等による電磁気学的コンタミネーションから逃れる必要がある。筆者のグループでは, 電界の大きさとか, *frictional*効果や *Joule*効果, さらにエネルギー粒子降下等に伴う加熱現象, 電子密度の突発的増加などの有り無しを観察し, なるべく磁氣的に静穏とみなされるデータセットを選ぶことにしている。

また, AGWに伴うプラズマパラメータの変動は, 背景値に対して時に20%程度にまでなることもあるが, 通常は数%またはそれ以下の微小なものである。そのような場合, 変動解析の精

度は観測の S/N 比に大きく左右される。通常，散乱波観測の S/N 比は電子密度量に依存しているので，昼間や夏季の方が微小振幅 AGW/TID の解析に適していると言うことができる。

ところで，筆者らが主に扱っている CP-1 モードによる汎用データは，90km 弱から 260km 強の高度範囲を分解能約 3km でカバーしている。このような広い高度領域で AGW に伴う擾乱の各種物理量を統一的に評価するには，背景量に対する相対変動量として扱うことが要求され，そのためには正当な背景量の決定が不可欠である。この背景量の求め方には各研究者それぞれの解析目的に依存した独自性が含まれているようで，各高度毎に時間軸方向の移動平均を使ったり，適当なカットオフ周波数を設定して低域通過フィルターを掛けたり，さまざまである。筆者らは，高度 z と時間 t を引数として得られる観測量を例えば $X(z, t)$ とした場合，その中の背景成分 $X_0(z, t)$ を，直流成分 $X_{d.c.}(z)$ と幾つかの潮汐成分で構成されているとの仮定の下に

$$X_0(z, t) = X_{d.c.}(z) + \sum_{k=1}^n A_k(z) \cos \left(\frac{2\pi kt}{24} - \phi_k(z) \right) \quad (1)$$

と与え，これを各高度毎に元の観測量 $X(z, t)$ にフィッティングし， $X_{d.c.}(z)$ と潮汐成分の振幅 $A_k(z)$ ，位相 $\phi_k(z)$ を決定して $X_0(z, t)$ を求めている。考慮する潮汐成分の最高次数 n は解析目的によって変えることもあるが，通常は $n = 4$ とし，24，12，8，6-時間周期成分までを背景構成要素としている。

実際の観測データに対する式 (1) のフィッティング結果の一例を図 1 に示す。 P_{K_p} が $8+$ ， A_p 指数が 4 という磁氣的に非常に静かであった 1992 年 8 月 3 日のもので，イオン温度 T_i の高度 180km における観測データが黒点で，d.c. 成分と 24~6 時間周期の各潮汐成分が色の異なる細線

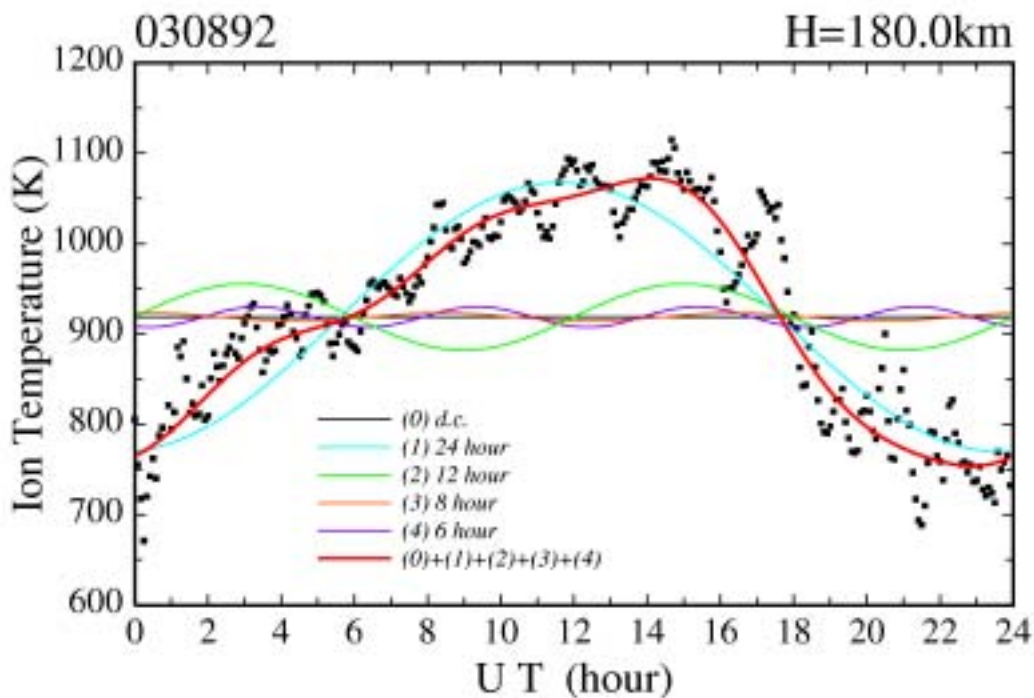


図 1 . 1992 年 8 月 3 日に EISCAT で観測した 180km でのイオン温度データに対する本文 (1) 式のフィッティング操作例。黒点は観測データ（高周波短波長成分を除去）を，カラー細線は d.c. 成分と各潮汐成分を，赤太線は背景成分をそれぞれ表す。

で，それらの合成により得られた背景量 $T_{i,0}(180\text{km}, t)$ が赤太線で，それぞれ示されている。この $T_{i,0}$ の時間変化それ自体の物理的意味を問うことはここでの本意ではなく，ただ，データ値の変化と対比して妥当とみなし得るとだけ述べておく。なお，ここで示しているデータは，生

データから変動周期約 12 分，鉛直波長約 7.2km のバンド幅を持つ二次元 Hanning 型フィルターによって高周波短波長成分を除去したものである。12 分というのはローカルな Brunt 周期に近い値であり，AGW を対象とする立場からはそれら高周波短波長成分は雑音とみなし得る。

このような手続きを各高度毎に実行して得られたものが図 2 であり，最上段 (a) は生データ T_i (高周波短波長成分を含む) を，(b) は背景量 $T_{i,0}$ を，(c) は背景量を差し引いて得られた相対変動量 $dT_i/T_{i,0}$ (高周波短波長成分を除去) を，それぞれ時間-高度-強度プロットで示している。(b) 図を見て分かるように，得られた背景温度 $T_{i,0}$ の時間-高度プロファイルは時空軸両方で滑らかな予測結果になっており，この背景量の上に目的とする AGW 擾乱が重畳していると見なしても，処理上のゴースト的構造はほとんど混入していないと期待されよう。そして，得られた (c) の相対変動量 $dT_i/T_{i,0}$ 強度分布からは，等位相面が下方に進むさまざまな時空スケールの構造が認められ，エネルギーを上方に輸送する上向き AGW に伴う擾乱の存在が明確となっている。

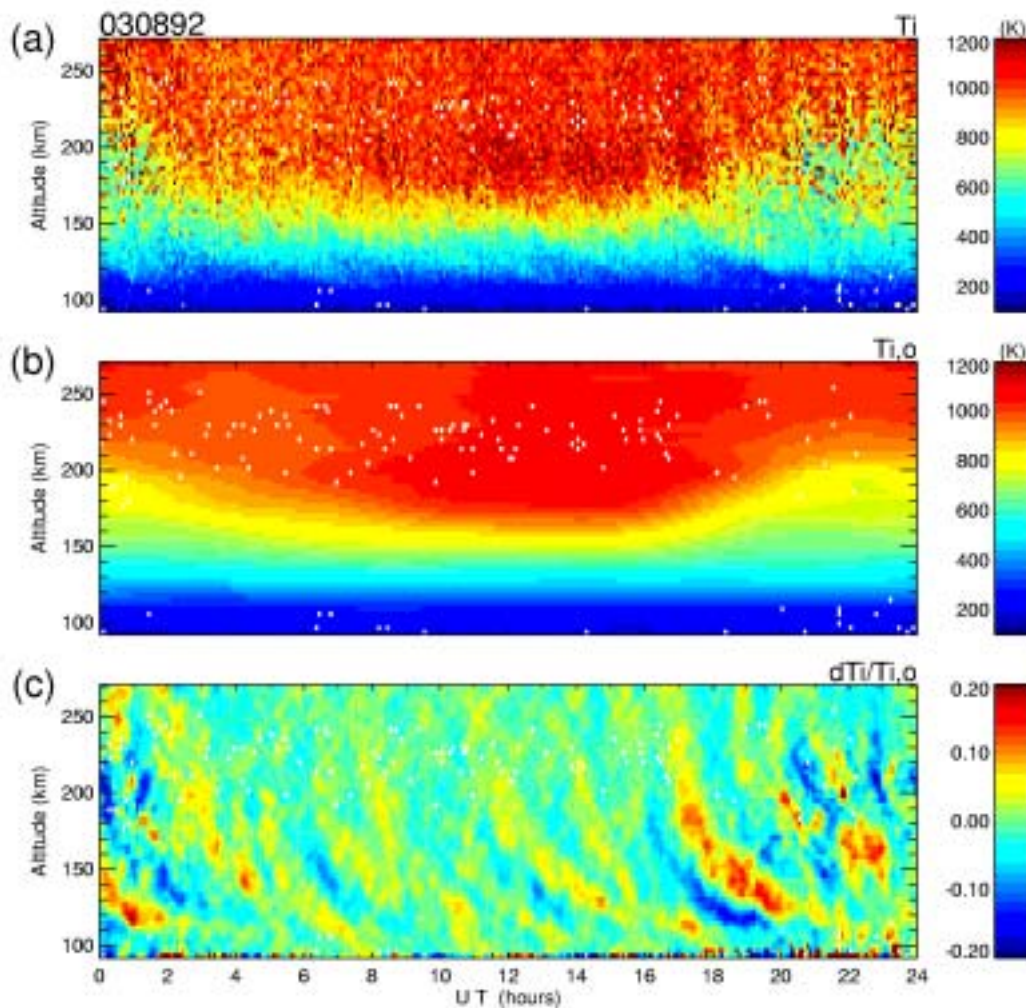


図 2 . 1992 年 8 月 3 日に観測されたイオン温度の時間-高度-強度プロット。(a) 観測イオン温度 T_i ，(b) 各高度毎に本文 (1) 式によって求めた背景イオン温度 $T_{i,0}$ ，(c) イオン温度の相対変動量 $dT_i/T_{i,0}$ 。

大気重力波に対する電離大気の応答

前節のような手法で AGW 擾乱を抽出し，さらにそれから AGW そのものの特性を演繹する為には，AGW に対して電離圏プラズマがどのように応答しているかを押さえておく必要がある。この「電離大気の AGW 応答」というテーマは非常に古く，例えば，その機構を解明しようと

試みた仕事としては、Hooke (1968, 1970a,b,c,d), Testud and Francois (1971), Clark *et al.* (1971), Klostermeyer (1972a,b), Davis (1973), Shibata (1983), 等々枚挙の暇なく、また最近では、観測された TID 特性から AGW パラメータを予測するシステムをモデル化した Kirchengast *et al.* (1995,1996), Kirchengast (1996) や、応答機構を実測データに基づいて検討しようとした Hocke *et al.* (1996) の仕事が挙げられる。

この最後に挙げた Hocke *et al.* (1996) は、EISCAT の long pulse データを利用して、上部 F 領域で観測された TID における N_e, T_e, T_i, V_i の変動の相対関係を調査しているが、筆者らも同様の解析を高度分解能のより良い multipulse データによって下部 F 領域を対象として行っている。図 3 は、1992 年 7 月 31 日に観測された TID イベントに対して周期 200~300 分の帯域のバンドパスフィルターをかけて求めた時間-高度-強度プロットで、(a) は電子温度相対変動量 $dT_e/T_{e,0}$ の、(b) はイオン温度相対変動量 $dT_i/T_{i,0}$ の、(c) はイオン速度の絶対変動量 dV_i の、それぞれ 0400-1700UT における波動構造を示している。他の時間帯では電磁気的と思われるコンタミネーションのために構造が明確ではなかったのが表示されておらず、また、電子密度データに関しては、背景量導出の際のフィッティング操作が十分な精度を持たなかった為に、全時間帯

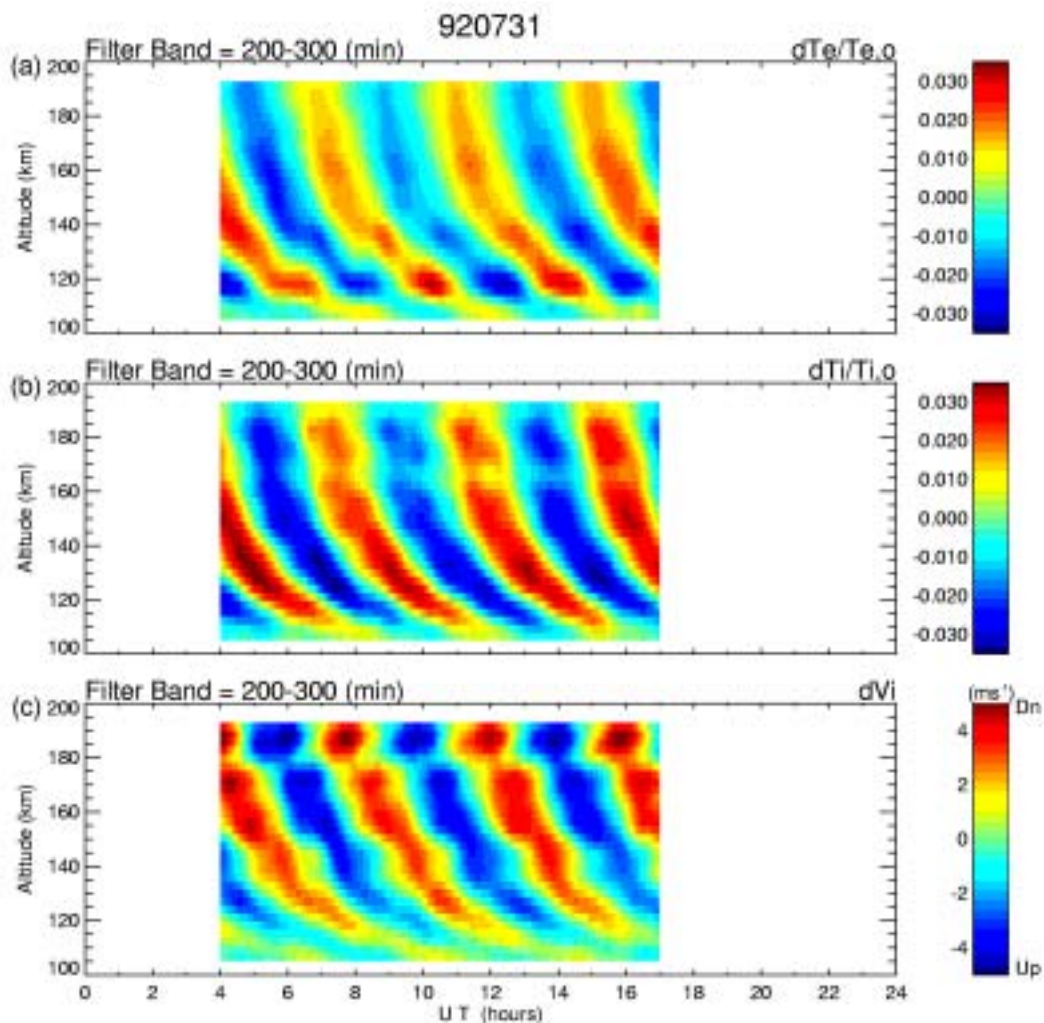


図 3 . 1992 年 7 月 31 日に観測された TID イベントの周期 200~300 分の帯域成分の時間-高度-強度プロット。(a) 電子温度相対変動 $dT_e/T_{e,0}$, (b) イオン温度相対変動 $dT_i/T_{i,0}$, (c) イオン速度絶対変動 dV_i 。

に渡って顕著な波動構造が得られていない。図 3 で明らかなように、 T_e, T_i, V_i といった異種のプラズマパラメータの変動が互いによく対応し、しかも AGW 特性に見合った波動構造をして

いると同時に、パラメータ間で微妙な位相ずれを起こしていることが分かる。この位相ずれを定量的に求める為に、各高度ごとに同一の時間窓で正弦波をフッティングさせた例が図4である。正弦波の周期は用いたバンドパスフィルターの中心周波数から与えており、この例の場合には周期240分である。このような作業を明確な波動構造を示す高度領域すべてに行い、各変動

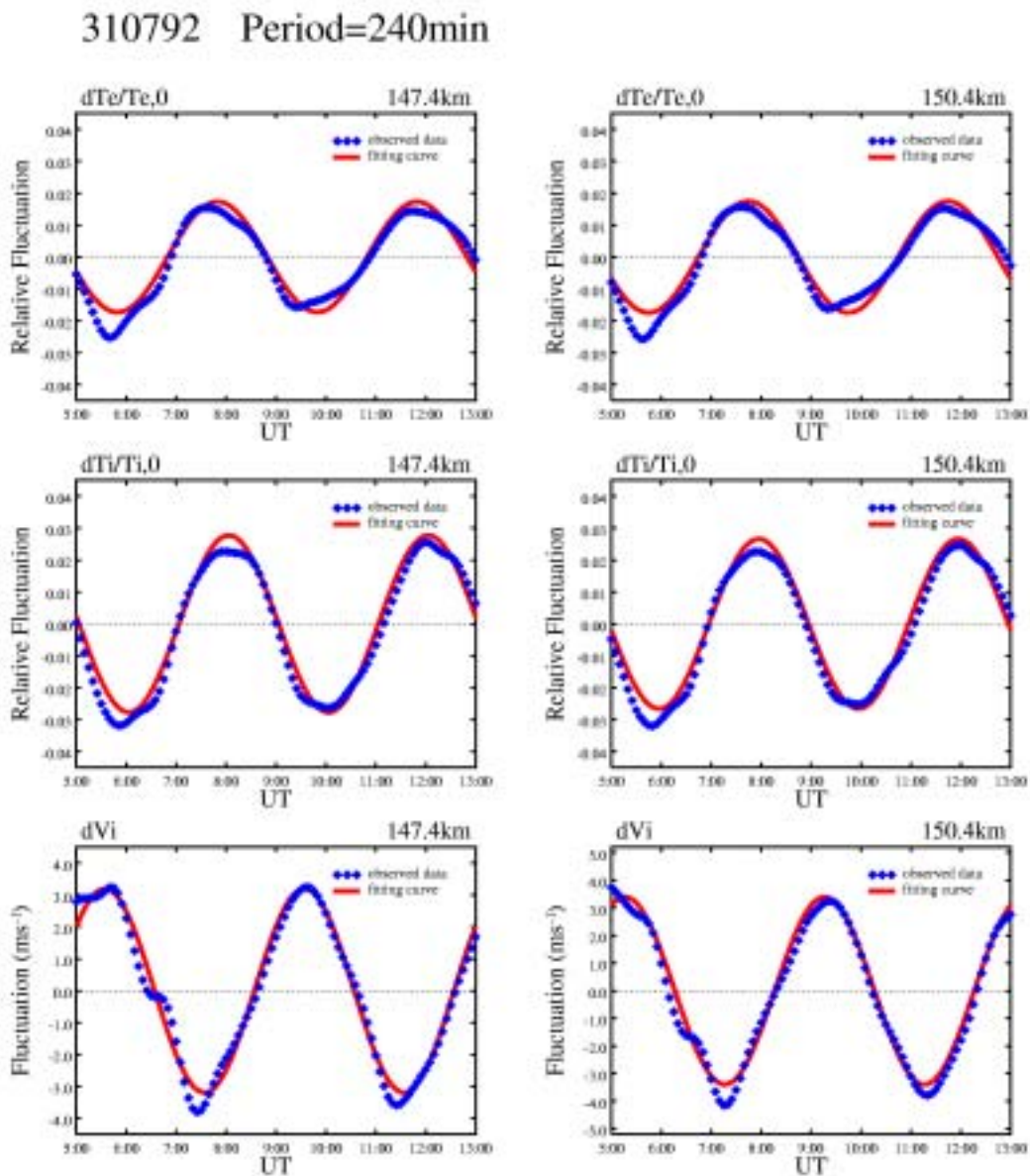


図4．図3の各変動量に対する周期240分正弦波のフッティング例。左列は高度147.4kmにおける、右列は高度150.4kmにおけるフッティング結果であり、上段は $dT_e/T_{e,0}$ を、中段は $dT_i/T_{i,0}$ を、下段は dV_i を示している。

間の位相差を求めたものが図5である。黄色で塗りつぶした高度領域は、正弦波フッティングの操作が振幅値で30%以下、位相で 30° 以下の誤差内に収まる領域である。この例の場合、 T_e 変動と T_i 変動の間にはほとんど位相ずれが無く、 V_i 変動と T_i 変動の間では前者の位相が $90\sim 140^\circ$ 程進んでいる。

このような解析を35日分のTIDイベントについて行った結果、各プラズマパラメータ変動の間の相対位相の分布は図6のように得られた。ただしこの棒グラフ表現においては、1つのTIDイベントについて高度を変えて解析を行い、得られた有意な結果をすべてカウントしているため、縦軸の発生数と解析対象のTIDイベント数とは異なっている。この結果の示すところは、 T_e

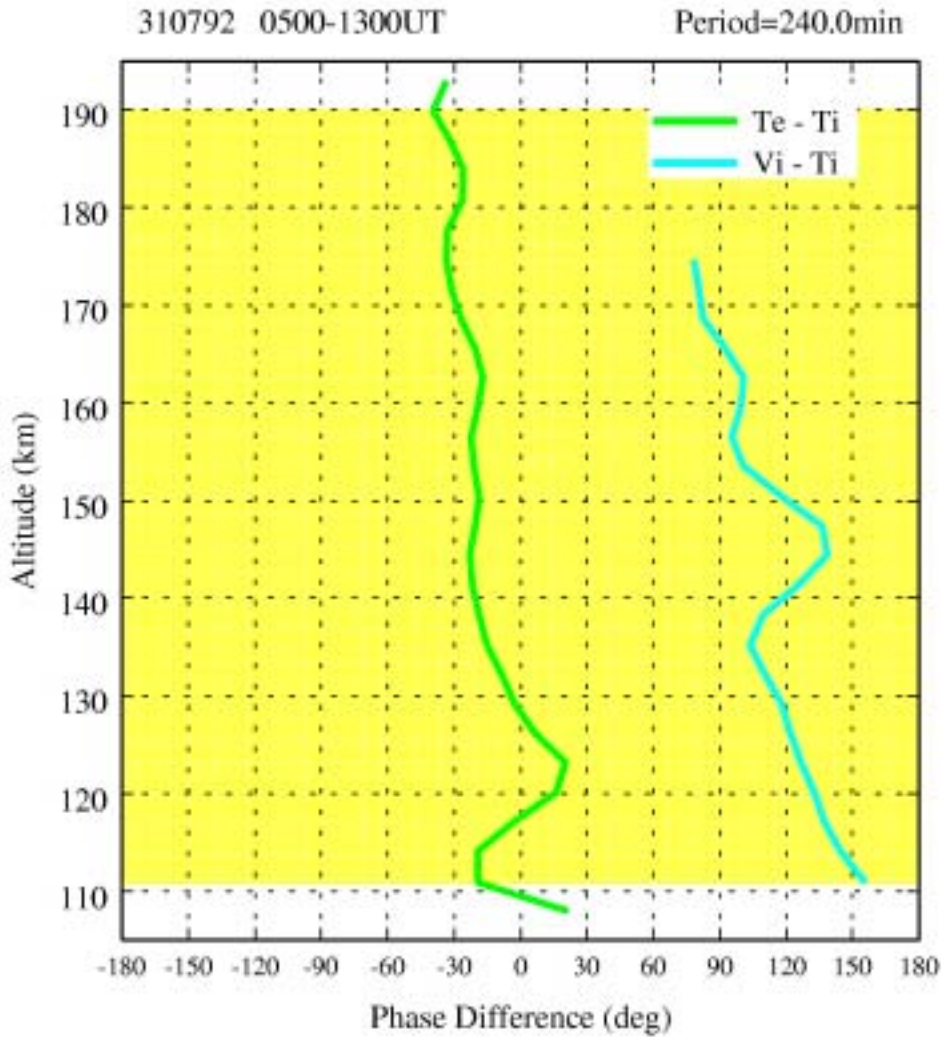


図5．図4のフィッティング操作から求めた各変動間の相対位相の高度変化。緑の線は電子温度変動対イオン温度変動の相対位相を，青の線はイオン速度変動対イオン温度変動の相対位相を表している。黄色で示した高度領域はフィッティングエラーが振幅値で30%以下，位相量で30°以下のところである。

変動と T_i 変動はほとんど同位相とみなして良いのに対して， N_e 変動と T_e 変動または T_i 変動は逆位相で起きているケースが多いということ，そして， T_i 変動と V_i 変動はかなりばらついた位相差分布を示しているということである。この最後の事柄は，検出した V_i 変動の中には背景風等のより大きなスケールの影響を完全には除去しきれていないものがあるということかも知れない。

これまでに沢山の研究者が行ってきた「電離圏プラズマのAGW応答」に関する研究の成果や，上部 F 領域における Hocke *et al.* (1996) の解析結果，下部 F 領域に関する筆者らの図6のような結果等をおおまかにまとめると，「AGW/TID 応答システム」として図7に示すようなプロセスが浮かび上がってくる。図中左側のAGWの列が大気重力波で，その代表的変動成分として密度変動 $\Delta\rho$ ，速度変動 Δv_n ，大気温度変動 ΔT_n が示されている。これら中性大気パラメータの変動は，図中二重線で結ばれているように，AGWの分散関係式，偏波関係式に拘束されたものとなっている筈である。それに対して右側の列は，TIDとしてISレーダー等で通常観測されるプラズマパラメータで，電子密度変動 ΔN_e ，イオン速度変動 Δv_i ，イオン温度変動 ΔT_i ，そして電子温度変動 ΔT_e が挙げられている。

AGW-TID間の作用をまず制御しているのは，イオンサイクロトロン周波数 Ω_i ，電子サイクロトロン周波数 Ω_e ，イオン-中性粒子衝突周波数 ν_{in} ，中性粒子-イオン衝突周波数 ν_{ni} ，イオン-

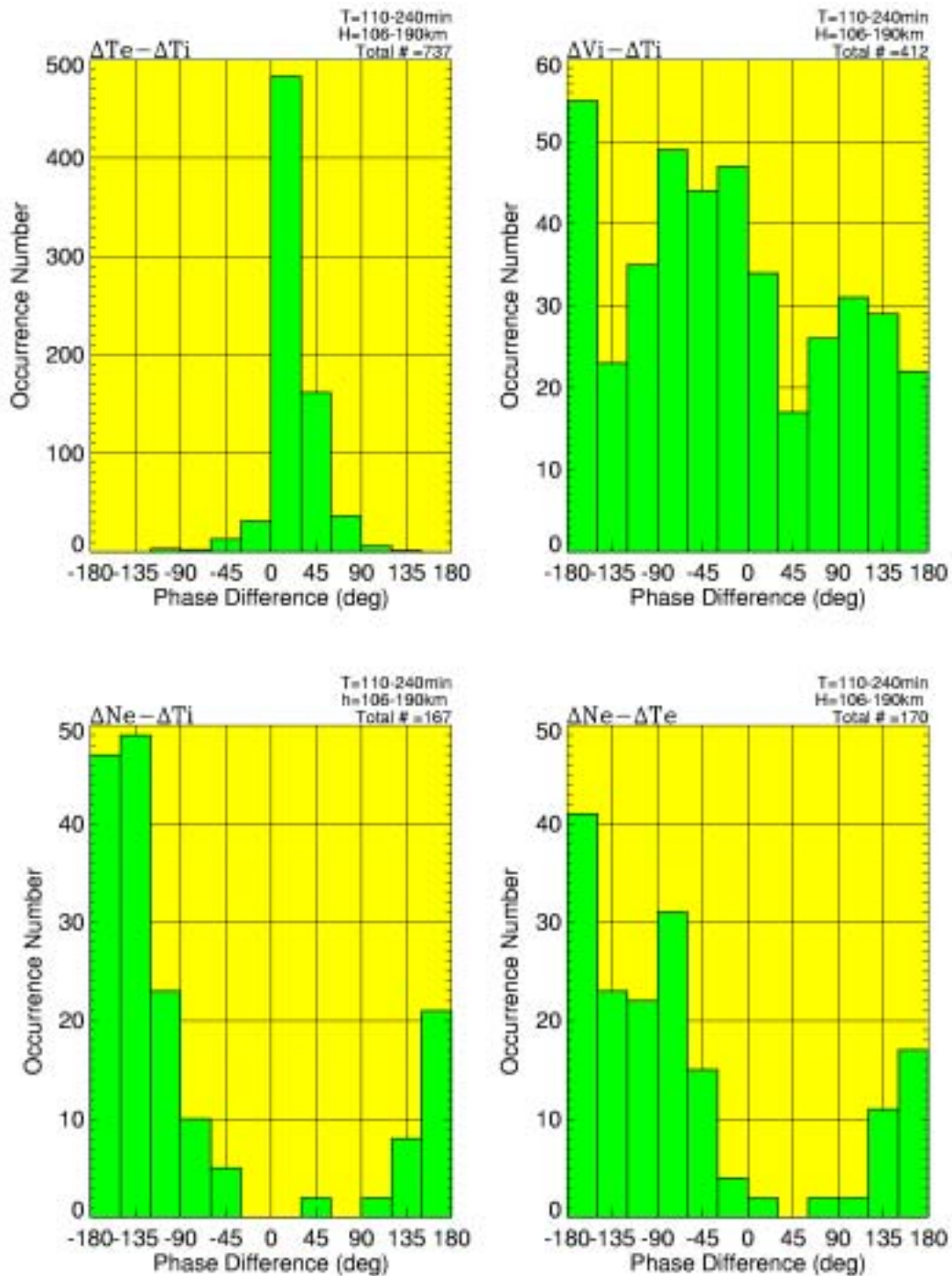


図6 . 35日分のTIDイベントから求めた各プラズマパラメータ変動間の相対位相の頻度分布。頻度のカウント方法については本文中の記述を参照されたい。

電子衝突周波数 ν_{ie} , および , 大気重力波の周波数 ω 等のいろいろな特性周波数である。典型的なAGWの場合 , 下部E領域以下を除く電離圏中では , $\Omega_e \gg \Omega_i \gg \nu_{in} \gg \omega$ が成り立っている。そして , それら特性周波数の制御の下 , AGWに対する電離圏プラズマの応答の中で一番効率の良いものは , 中性大気速度の変動 Δv_n がイオン-中性粒子間衝突 (ν_{in}) を介してイオン速度の変動 Δv_i を引き起こす *air drag* 効果であろう。前述のように $\nu_{in} \gg \omega$ なので , AGWの Δv_n とTIDの Δv_i はほとんど同位相と考えられる。ただし , $\Omega_i \gg \nu_{in}$ なので誘導されたイオンの運動は地球磁場方向に拘束されたものとなる。

イオン速度の変動 Δv_i が起きればそれはプラズマの移流 (*advection*) に変化をもたらし , プラズマ密度の変動 ΔN_e を引き起こす。ところで , 前述のように , $\Omega_i \gg \nu_{in}$ のためプラズマは磁力

AGW-TID Coupling

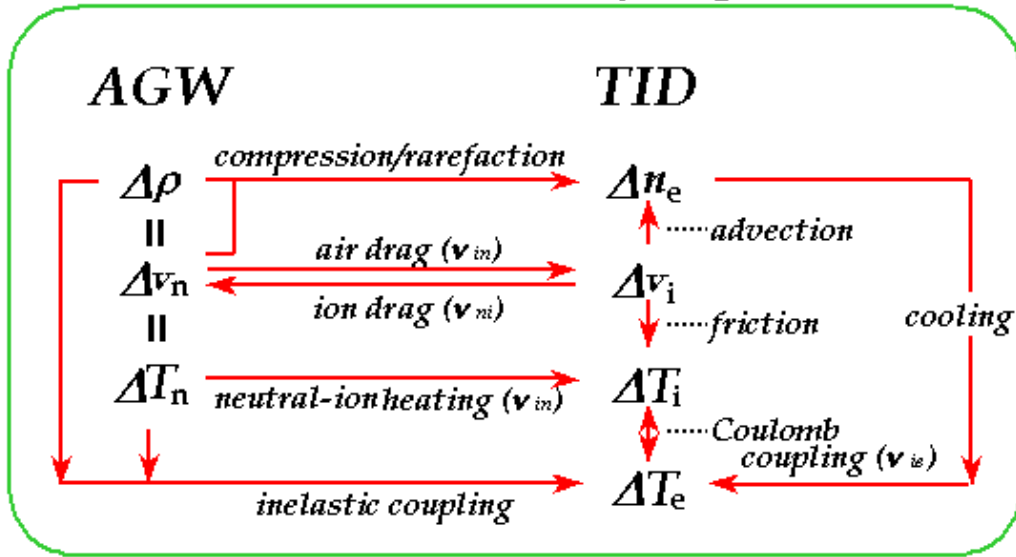


図7 . AGW/TID 応答システムの概念図。

線方向に拘束された運動を行うので、もともと横波的性質のAGWであってもプラズマにとっては縦波的效果として写る場合がある。その場合、AGWの密度変動 $\Delta\rho$ と速度変動 Δv_n が相乗した縦波的效果によるプラズマ密度の圧縮と希釈を引き起こし、 ΔN_e 変動に影響を与えることになる。これが *compression/rarefaction* 効果である。

イオンと中性粒子はそれらの質量がほとんど等しいため、エネルギー的にも運動量的にも強い結びつきが期待され、その結びつきの下に、AGWに伴う中性大気温度の変動 ΔT_n はほとんど直接的にイオン温度の変動 ΔT_i に投影されていると考えられる。これが図中のイオン-中性粒子間衝突(ν_{in})を介した *neutral-ion heating* 効果である。また、前述のイオン速度変動 Δv_i が起きれば、それに伴う中性粒子との摩擦 (*friction*) 効果の変調によってイオン温度の付加の変動もあるかもしれない。高度が高くなると、イオン-電子間衝突(ν_{ie})を通じて *Coulomb coupling* による高温電子との熱のやり取りによる変動も無視できなくなる。

電子温度の変動 ΔT_e には未知の部分が多く残されている。前述の *Coulomb coupling* によるイオンとの熱のやりとりに加え、AGWの密度変動 $\Delta\rho$ や温度変動 ΔT_n に伴う非弾性衝突 (*inelastic coupling*) を介した電子温度変動 ΔT_e がまず予想される。また、電子密度変動 ΔN_e が起きればそれに応じて電子温度の冷却率も変動するので、この *cooling* 効果によって ΔN_e と ΔT_e は逆位相変動となることも期待される。事実、先の図6に示したように、観測される ΔN_e と ΔT_e の間の位相関係には逆位相に近いものが多く認められている。ところが、観測上の ΔT_e と ΔT_i の関係を見るとほとんど疑い無く同位相で変動しており、さらに統一的な支配機構の存在が示唆されるようである。

以上のプロセスは基本的で代表的なものであるが、AGWによる密度変動 $\Delta\rho$ や温度変動 ΔT_n 、それらに呼応している電子密度変動 ΔN_e 、電子やイオンの温度変動 ΔT_e 、 ΔT_i は、衝突周波数や拡散係数等のいわゆる輸送係数に変調を与えAGW/TID応答の効率そのものを変化させることも期待される。また、AGWとTIDの関係は、前者から後者への単方向の作用だけには止まらず、例えば中性粒子-イオン間衝突(ν_{ni})を介した *ion drag* によってAGWの速度変動 Δv_n が抑え込まれ減衰し、それによる *frictional* 効果の変化により大気温度の変動成分 ΔT_n も影響を受けることになる。これらを含めた多くの事柄が電離度が1/数1000の弱電離気体中で起こっているわけであるが、その気体も単に中性と電離の区別だけでは済まされず、複雑な化学平衡の支

配の下で幾つもの成分によって構成されており，さらにそれらが，背景風も含めたさまざまなスケールの力学的場によって影響を受けている。

大気重力波に伴う擾乱の鉛直構造

AGWに伴う電離圏擾乱は，さまざまな時空スケールで起こっていると同時に鉛直方向にも複雑な変化を呈している。この鉛直構造を調べることは，例えば下層からAGWによって持ち込まれたエネルギーが電離圏領域のどの場所でどのように散逸されて背景場に供給されるかといった事柄を解明する上で，重要なステップの一つであると考えている。

AGW擾乱活動が高度に対してどう変化しているかを知る為に各観測高度でスペクトル解析を行った結果の一例が，図8である。1992年7月31日に観測した $dT_i/T_{i,0}$ の0500-1700UTの時間帯について，各観測高度毎に最大エントロピー法(MEM)によるスペクトル解析を行い，スペクトルピークの場所を周波数-高度座標で描いたものである。それぞれの円の中心がスペクトル

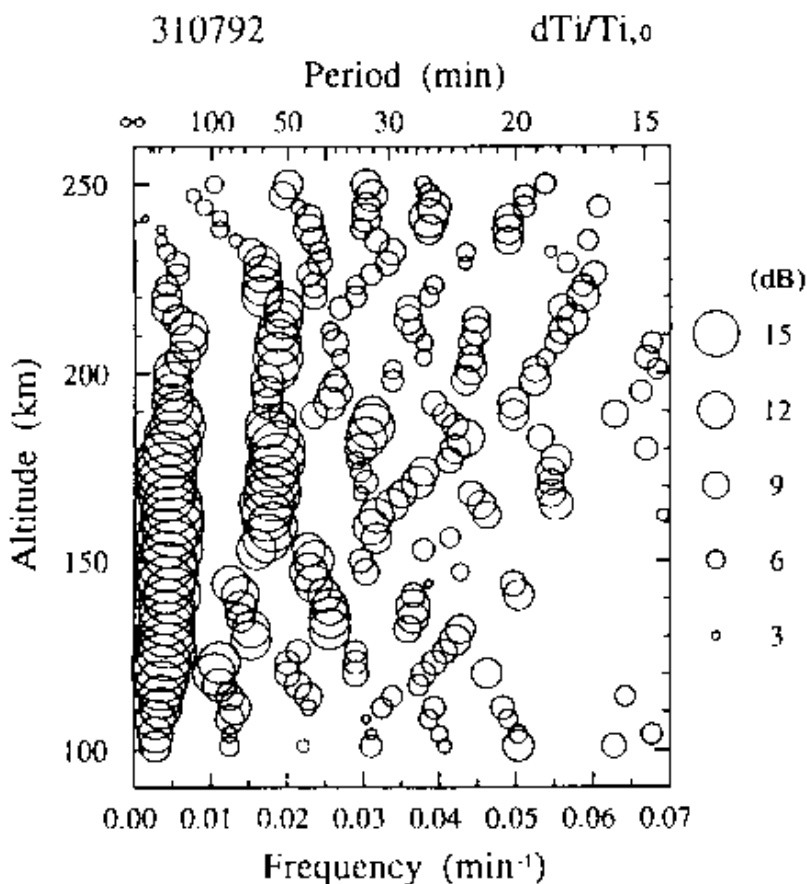


図8 . 1992年7月31日に観測されたイオン温度変動の0500-1700UTの時間帯におけるスペクトルピーク周波数の高度変化。各円の中心が周波数-高度座標におけるスペクトルピークの位置を示し，円の半径が背景スペクトル成分に対する相対スペクトル強度 (dB) を表している。

ルピークの位置を，円の半径が背景スペクトル成分に対する相対強度 (dB) を表している。一見して，擾乱のパワーのほとんどは長周期成分が担っており，短周期のものはその周波数の高度変化が激しいということが分かる。この後者の事柄は，スペクトル解析における周波数分解精度にも依存しているであろうが，短周期のものほど空間スケールが小さいために背景風等の影響を大きく受けるということとも関連していると思われる。

図8において周期200分前後の長周期成分に注目すると、周波数の微小な変化に加えてその強度も高度と共に変化しているのが認められる。このような強度変化の様子を見る為に、その周波数の変化が1%以内でかつ30km以上の高度範囲で連続しているスペクトルピークについて、高度方向に追跡してパワーの変化を求めたものが図9である。なお、MEMに基づくスペクトル解析では計算値それ自体は真のパワーを反映していないので、注目するピークの両側にある2つのパワーミニマムのところの周波数を検出し、その周波数間で積分したパワーを評価の対象としている。このパワー算出の経緯やスペクトルピークの追跡条件等に関する詳細は、Shibata *et al.* (1998) を参照されたい。

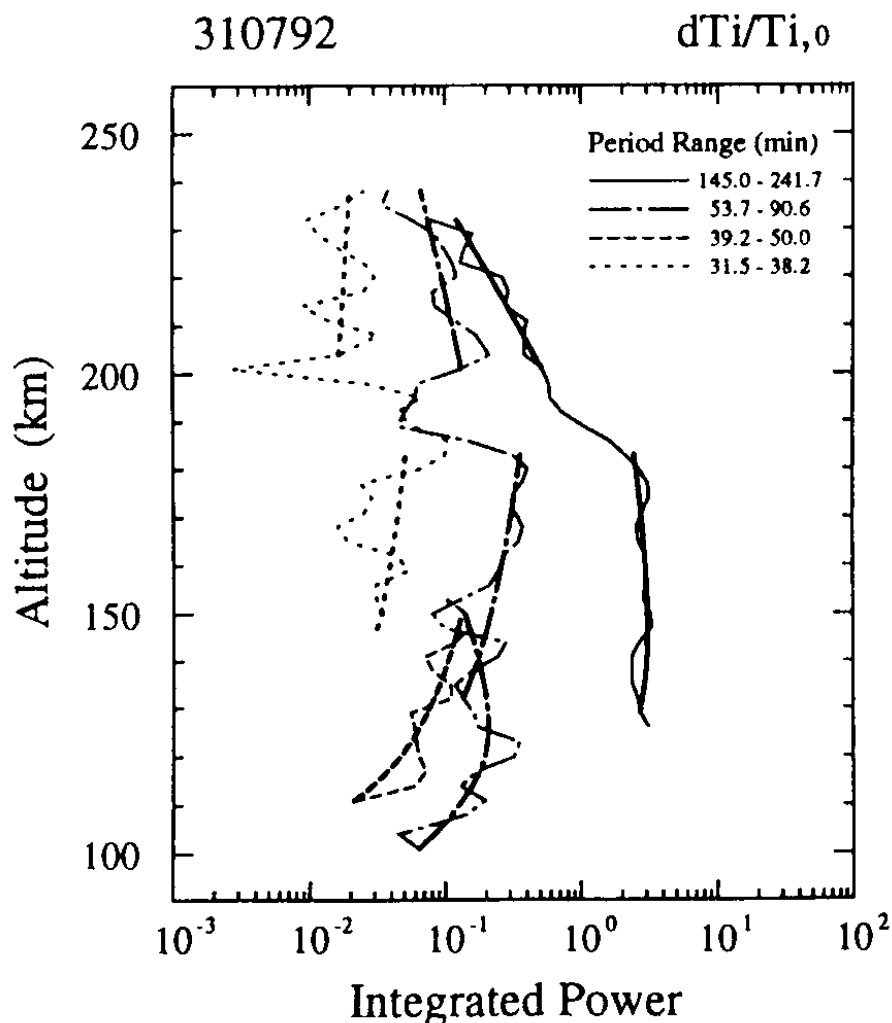


図9 . 図8のスペクトル分布において卓越成分を高度方向にトレースした場合のスペクトルパワーの高度変化。太線はその高度変化に対して本文(2)式をフィッティングした曲線を示す。線種の違いは図中に示すような変動周期に対応している。

図9の中の大線は、それぞれのパワー変化に対して、元となるAGWが単色波的であるとの仮定の下に、高度 z_1 から z_2 の間のパワーの変化が実効的鉛直方向減衰率 k_z^i と背景大気のスケールハイト H を用いて、

$$\propto \exp \left[-2 \int_{z_1}^{z_2} \frac{\bar{A}}{k_z^i - \frac{1}{2H(z)}} dz \right] \quad (2)$$

のように表されたとした曲線を、最小二乗法でフィットさせた結果である。スケールハイトの値はMSIS86モデルから求めている。このフィット曲線の具合から分かるように、スペクトルピー

ク追跡から求めた観測パワーの高度変化は、一見乱雑に見えるものの、その大勢は、式(2)に依るようなAGW振幅の鉛直方向減衰 (\bar{k}_z^i) と大気の成層構造に由来する振幅増加 ($1/2H$) のバランスで支配されていると見なすことができる。

この式(2)を用いたフィッティング操作により実効的鉛直方向減衰率 \bar{k}_z^i を決定することができ、1992年7月31日から8月4日までの間の静穏な4日間の $dT_i/T_{i,0}$ データに基づいて解析したところ、図10の赤丸印で示すような結果が得られている。図中の横棒はスペクトルピークを追跡している際の周期の偏移幅であり、縦棒はフィッティングエラーから見積もった鉛直方向減衰率の推定幅である。同図には、異なるデータに基づく Natorf *et al.* (1992) や Shibata and Schlegel (1993) の結果も併せて表示されているが、ここでの結果はそれらと矛盾していない。また、得られた減衰率 \bar{k}_z^i は 28~230 分の変動周期帯で約 $6 \times 10^{-6} \sim 4 \times 10^{-5} [\text{m}^{-1}]$ となっており、さらにそれらは周期に対して微増する傾向を示している。これらは、例えば Shibata (1983) による、大気粘性、熱伝導、イオンドラッグ、プラズマ拡散、等の効果を考慮した現実的熱圏モデルに基づく F 領域 AGW の減衰率特性とほぼ合致している。

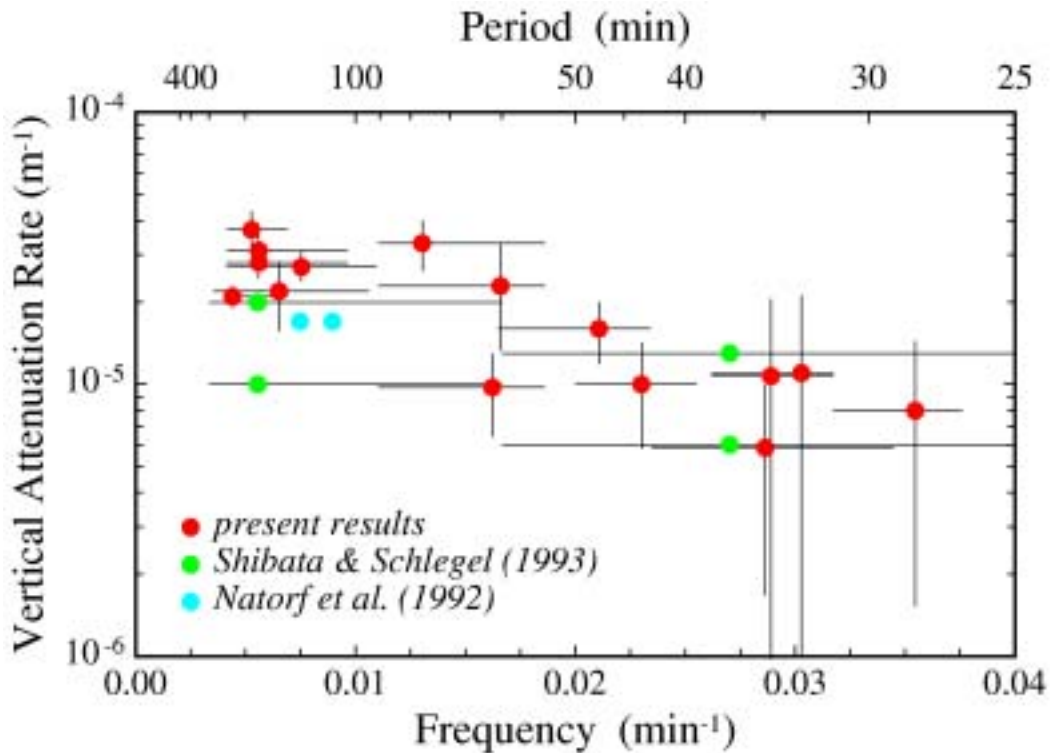


図10. 4日間のイオン温度変動から求めた電離圏擾乱の鉛直方向減衰率の周期依存性(赤丸印)。緑の丸印は Shibata and Schlegel (1993) による結果を、青の丸印は Natorf et al. (1992) による結果をそれぞれ示す。縦棒、横棒は予測誤差範囲を意味する。

この様に、電離圏擾乱パワーの高度変化は、大勢としては、熱圏大気中での通常のAGW伝搬効果で説明できるものの、例えば図9の高度180~200km領域における高さに対する擾乱パワーの急減を伴う変化はその範疇からは除外されるべきで、何らかの別の機構による減衰を考える必要があり、さらに、それによりAGWから放出されたパワーは何処にどのように移行したかを問わなければならない。Shibata and Schlegel (1993) は、ケーススタディーではあるが、背景風プロファイルの中の卓越潮汐波成分が1日周期から半日周期に遷移する高度領域と擾乱パワーの異常減衰の領域とがほぼ一致するという状況証拠を挙げている。熱圏における最大で最終のエネルギーシンクは中性大気と考えられるので、背景風も含めたより大きなスケールの時

空構造と AGW 活動との関連を調査して行く必要があるであろう。

おわりに

以上、EISCAT データに基づく筆者らの AGW/TID 解析に関して、結果の一部を述べさせて頂いた。表題の大きさからはほど遠い内容であろうが、紙幅の都合とご寛容頂きたい。ただ、緒言で触れた AGW/TID 現象の要素化に従うならば、そもそもの源であり最重要課題とも目される「AGW 励起」に関して、若干の付言が必要とされよう。

AGW そのものは、大気を乱す要因であればなんでも励起源となり得るが、とくに極域での大規模 AGW のかなりの部分は、磁気圏から流入してくる電磁気学的エネルギーを種としている可能性が高く、磁気圏-電離圏-熱圏カップリングの所産の一つとして AGW/TID 現象を位置づけることが重要になってくる。そのような立場に立った具体的で定量的な観測研究の代表的なものとして、イオノゾンデや流星レーダー、HF ドップラー、IS レーダー、さらにマグネトメーター等を駆使し、全体でほぼ四半球をカバーするほどの広範囲の電離圏ネットワーク観測を組織した WAGS (*Worldwide Atmospheric Gravity-wave Study*) キャンペーンが挙げられる。Rice *et al.* (1988) は、そのネットワーク観測で得られた AGW/TID イベントについて、波動パラメータを同定すると共に各観測局での走時特性から AGW 励起源の場所を推定し、それが DE 衛星のメージ観測によって得られた活発なオーロラバルジの西側境界域と磁気共役の位置にあることを見出している。また、Williams *et al.* (1993) は、この WAGS において AGW 励起の原因関数を調査する立場から、TID の周期性がオーロラ活動の繰り返し周期と合致している事、オーロラ電界の強さと中低緯度で観測される TID の振幅の間には比例関係がある事、等を明らかにしている。最近では、HF レーダーのグランドスキャッター波の解析から AGW/TID を検出する手法も確立し、励起源の場所の推定 (Samson *et al.*, 1990; Bristow *et al.*, 1994; Huang *et al.*, 1998a; Hall *et al.*, 1999 等) や、惑星間空間磁場の南方転向とオーロラエレクトロジェット、AGW 活動との 1 対 1 対応の観測 (Huang *et al.*, 1998b) 等に成功している。

表題に掲げた IS レーダーは、複数の電離圏プラズマパラメータを AGW/TID の検出にとって十分な時間、高度分解能で観測でき、さらに、電界や電流といったその励起に直接関連するパラメータや、領域は限られるが中性風のような伝搬を制御する背景のプロファイルも取得可能で、AGW 励起機構を調査する上で実に強力な観測手段である。しかし、目的とする AGW/TID が遠達性に富む現象であるということが時には逆に作用して、一地点での IS レーダーデータでは解釈が困難な場合があることも否めない。異種の観測手段を組み合わせるグローバルな視点から現象解明に取り組む事の必要性を今更ながら痛感すると共に、ほぼ子午線沿いに 950km 程離れて位置する ESR レーダーと KST レーダーの連携が AGW/TID 現象の *cause and effect* 研究に新たな方向づけをもたらすであろうことを期待するものである。

最後に、良質なデータを継続的に供給されている EISCAT、および名古屋大学太陽地球環境研究所の関連諸氏に深く感謝する。

参考文献

- Bristow, W. A., R. A. Greenwald, and J. C. Samson, Identification of high-latitude acoustic gravity wave sources using the Goose Bay HF radar, *J. Geophys. Res.*, **99**, pp.319-331, 1994.
- Clark, R. M., K. C. Yeh, and C. H. Liu, Interaction of internal gravity waves with the ionospheric F_2 -layer, *J. Atmos. Terr. Phys.*, **33**, pp.1567-1576, 1971.
- Davis, M. J., The integrated ionospheric response to internal atmospheric gravity waves, *J. Atmos. Terr. Phys.*, **35**, pp.929-959, 1973.

- Francis, S. H., Global propagation of atmospheric gravity waves: A review, *J. Atmos. Terr. Phys.*, **37**, pp.1011-1054, 1975.
- Hall, G. E., J. W. MacDougall, J.-F. Cecile, and D. R. Moorcroft, Finding gravity wave source positions using the Super Dual Auroral Radar Network, *J. Geophys. Res.*, **104**, pp.67-78, 1999.
- Hocke, K., and K. Schlegel, A review of atmospheric gravity waves and travelling ionospheric disturbances: 1982-1995, *Ann. Geophys.*, **14**, pp.914-840, 1996.
- Hocke, K., K. Schlegel, and G. Kirchengast, Phases and amplitudes of TIDs in the high-latitude *F*-region observed by EISCAT, *J. Atmos. Terr. Phys.*, **58**, pp.245-255, 1996.
- Hooke, W. H., Ionospheric irregularities produced by internal atmospheric gravity waves, *J. Atmos. Terr. Phys.*, **30**, pp.795-823, 1968.
- Hooke, W. H., The ionospheric response to internal gravity waves, 1. The F_2 region response, *J. Geophys. Res.*, **75**, pp.5535-5544, 1970a.
- Hooke, W. H., Ionospheric response to internal gravity waves, 2. Lower *F*-region response, *J. Geophys. Res.*, **75**, pp.7229-7238, 1970b.
- Hooke, W. H., Ionospheric response to internal gravity waves, 3. Changes in the densities of the different ion species, *J. Geophys. Res.*, **75**, pp.7239-7243, 1970c.
- Hooke, W. H., Ionospheric response to an isotropic spectrum of internal gravity waves, *Planet. Space Sci.*, **18**, pp.1793-1797, 1970d.
- Huang, C.-S., D. A. Andre, and G. J. Sofko, High-latitude ionospheric perturbations and gravity waves: 1. Observational results, *J. Geophys. Res.*, **103**, pp.2131-2141, 1998a.
- Huang, C.-S., D. A. Andre, and G. J. Sofko, Observations of solar wind directly driven auroral electrojets and gravity waves, *J. Geophys. Res.*, **103**, pp.23347-23356, 1998b.
- Hunsucker, R. D., Atmospheric gravity waves generated in the high-latitude ionosphere: A review, *Rev. Geophys. Space Phys.*, **20**, pp.293-315, 1982.
- Kirchengast, G., Elucidation of the physics of the gravity wave-TID relationship with the aid of theoretical simulations, *J. Geophys. Res.*, **101**, pp.13353-13368, 1996.
- Kirchengast, G., K. Hocke, and K. Schlegel, Gravity waves determined by modeling of traveling ionospheric disturbances in incoherent-scatter radar measurements, *Radio Sci.*, **30**, pp.1551-1567, 1995.
- Kirchengast, G., K. Hocke, and K. Schlegel, The gravity wave-TID relationship: insight via theoretical model-EISCAT data comparison, *J. Atmos. Terr. Phys.*, **58**, pp.233-243, 1996.
- Klostermeyer, J., Numerical calculation of gravity wave propagation in a realistic thermosphere, *J. Atmos. Terr. Phys.*, **34**, pp.765-774, 1972a.
- Klostermeyer, J., Influence of viscosity, thermal conduction, and ion drag on the propagation of atmospheric gravity waves in the thermosphere, *Z. Geophys.*, **38**, pp.881-890, 1972b.
- Natorf, L., K. Schlegel, and A. W. Wernik, Gravity wave parameters derived from traveling ionospheric disturbances observations in the auroral zone, *Radio Sci.*, **27**, pp.829-840, 1992.
- Rice, D. D., R. D. Hunsucker, L. J. Lanzerotti, G. Crowley, P. J. S. Williams, J. D. Craven, and L. Frank, An observation of atmospheric gravity wave cause and effect during the October 1985 WAGS campaign, *Radio Sci.*, **23**, pp.919-930, 1988.

- Samson, J. C., R. A. Greenwald, J. M. Ruohoniemi, A. Frey, and K. B. Baker, Goose Bay radar observations of earth-reflected, atmospheric gravity waves in the high-latitude ionosphere, *J. Geophys. Res.*, **95**, pp.7693-7709, 1990.
- Shibata, T., A numerical calculation of the ionospheric response to atmospheric gravity waves in the *F*-region, *J. Atmos. Terr. Phys.*, **45**, pp.797-809, 1983.
- Shibata, T., R. Fujii, and K. Schlegel, Vertical attenuation rate of atmospheric gravity waves in the lower-*F* region observed with the EISCAT radar (extended abstract), *Proc. NIPR Symp. Upper Atmos. Phys.*, **12**, pp.131-137, 1998.
- Shibata, T., and K. Schlegel, Vertical structure of AGW associated ionospheric fluctuations in the *E*- and lower *F*-region observed with EISCAT – a case study, *J. Atmos. Terr. Phys.*, **55**, pp.739-749, 1993.
- Testud, J., and P. Francois, Importance of diffusion processes in the interaction between neutral waves and ionization, *J. Atmos. Terr. Phys.*, **33**, pp.765-774, 1971.
- Williams, P. J. S., T. S. Virdi, R. V. Lewis, M. Lester, A. S. Rodger, I. W. McCrea, and K. S. C. Freeman, Worldwide atmospheric gravity-wave study in the European sector 1985-1990, *J. Atmos. Terr. Phys.*, **55**, pp.683-696, 1993.
- Yeh, K. C., and C. H. Liu, Acoustic-gravity waves in the upper atmosphere, *Rev. Geophys. Space Phys.*, **12**, pp.193-216, 1974.