

# 電離層を持つ無磁場天体表層部サウンダ観測

小林 敬生 小野 高幸  
東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻

## 1 はじめに

惑星科学を研究する者が抱く究極の夢は、研究の対象とする惑星を輪切りにして大気外圏部から惑星表面、地下深奥部そして中心核にいたるまでの各領域を詳細に調べることである。地上の観測施設における惑星の観測や、飛翔体による惑星探査で行われる観測は、すべて惑星科学研究者のこの夢に近づく営為に他ならない。

惑星の表面形状の観測や内部の質量分布についての研究は惑星探査の初期の時代から行なわれているが、惑星の進化に関する豊かな情報が蓄えられている地下構造の観測は技術的な制約から行なわれていなかった。しかし、近年の技術の進歩は高速・低雑音の信号制御・処理装置の小型軽量化を可能にし、惑星周回軌道上から電磁波パルスを用いた惑星表層部構造のレーダサウンダ観測が可能となってきた。

惑星表層部構造をレーダサウンダで観測する場合、惑星の電離層の存在が問題となる。レーダサウンダの電磁波パルスが探査機に搭載された送受信アンテナと惑星表層部との間を往復する際、分散性媒質である電離層プラズマ中を伝搬するため、送信されたサウンダパルスが変調を受けるからである。サウンダパルスの変調は観測に対し深刻な影響を及ぼすものと懸念される。

ところで、わが国は、月進化の謎の解明を目標とする月探査機「SELENE」を2005年に打ち上げる。「SELENE」には他のさまざまな観測機器とともに、HF帯の「月レーダサウンダ (Lunar Radar Sounder : LRS)」が搭載され、月表層部地下構造の全球的な観測を行なう。われわれはLRSのPIグループとして月におけるサウンダ観測のデータ解析手法の確立を目的として、旧大型計算機センターの時代からスーパーコンピュータSX4を使って月のサウンダ観測のシミュレーションを行ない、月表層部地下構造のレーダサウンダによる観測手法を研究してきた(小林他1999[4];小林他2000[5];小林他2001[6])。電離層を持たない天体である月の観測手法を確立した今、われわれの目標は火星、金星など電離層を持つ(しかし強い固有磁場を持たない)惑星表層部の観測にその手法を応用することにある。

本研究はこれまでのLRS観測シミュレーションを応用して、火星を代表とするこれら電離層を持つ無磁場天体表層部のサウンダ観測における問題とその解決策を示すことを目標とする。そのため、まず、具体的事例としてLRSと同型のサウンダをもちいた火星表層部探査のシミュレーションを行ない、地下境界面反射エコーの検出における電離層伝搬遅延効果の影響を調べる。そして、次にその結果を一般化して、電離層を持つ無磁場天体のサウンダ観測における問題の解決の指針を確立する。

## 2 シミュレーションモデル

### 2.1 LRS

本研究では、SELENE 計画の月レーダサウンダ (LRS) を用いて火星表層部地下構造探査を行なうとしてそのシミュレーションを行なう。そのため、サウンダの仕様はすべて LRS の仕様によるものとした。すなわち、レーダ方式は FMCW 方式でサウンダパルスの周波数は  $200\mu\text{sec}$  の間に 4MHz から 6MHz まで直線掃引する。LRS 送信波の周波数  $f$  は時間  $t$  の関数として、

$$f(t) = f_0 + \dot{f}t \quad (1)$$

と表現される。ただし、 $f_0$  は初期周波数 (4MHz)、 $\dot{f}$  は周波数掃引速度 ( $1 \times 10^{10}\text{Hz/sec}$ ) である。

FMCW 方式のレーダでは、ターゲットまでの距離を送信波と同形の参照信号の周波数  $f_{ref}(t) = f_0 + \dot{f}t$  とパルス送信後、伝搬時間  $\tau$  だけ経過してから受信されるターゲット反射信号 (レーダエコー) の周波数  $f_{echo}(t) = f_0 + \dot{f}(t - \tau)$  との差の周波数  $\Delta f = \dot{f}\tau$  を計測することにより伝搬時間  $\tau$  を決定して、ターゲットまでのレンジ、

$$R = \frac{1}{2}c\tau = \frac{c\Delta f}{2\dot{f}} \quad (2)$$

を得る。

送受信アンテナは長さ 30m のダイポールアンテナである。送信出力は 800W で、送信パルスの電場は微小ダイポールアンテナの放射電場で近似する。

LRS 探査機はモデル惑星表面上空 100km を水平な直線軌道に沿って移動しつつサウンダ観測を行なう。サウンダ観測を行なう位置は 80 m おきとし、シミュレーションでは合計 20 パルスの観測を行なう。

### 2.2 惑星表層部モデル

惑星表層部はこれまでの LRS 観測シミュレーションで用いたモデルを用いる。このモデルの地下構造は水平 2 層構造で、地下 1km の深さに 2 層を隔てる地下境界面を持つ。上・下両層とも均質な地下物質 (誘電体) で満たされており上層の地下物質の誘電率は  $\varepsilon_1 = 4.0 + i0.05$ 、下層は  $\varepsilon_2 = 8.0 + i0.05$  としている。これらの誘電率の値は地球上の岩石や Apollo 計画で採取された月サンプルの誘電率測定でごく普通に得られる値である。

惑星表面である上層上部境界面と地下境界面である下部境界面は独立な Gaussian ランダム粗面である。ランダム粗面パラメータは両境界面ともに、水平方向の相関長  $l = 60\text{m}$ 、鉛直方向の RMS 高さ  $\sigma = 1\text{m}$  である。惑星表面平均面の曲率は無視したので、両境界面の平均面は水平面である。

## 2.3 電波伝搬モデルと TEC 電離層

電離層プラズマ中の電波伝搬の問題は電離層中を伝搬する電波の屈折、反射、減衰を扱う問題で、古くから短波通信や短波レーダ運用の実用的問題として扱われており種々の解法が確立されている ( Budden, 1985 [1] )。本稿では、電離層中を伝搬するサウンダパルス電波の屈折は無視し、電波が静穏な電離層中を幾何光学光路に沿って伝搬すると仮定して、Stationary phase 近似による電離層伝搬遅延の計算を行なった。減衰については考慮しない。

この幾何光学光路の仮定は一見乱暴なようであるが、以下の2つの理由により本研究の目的を達成するには十分であることが説明される。

まず第一に、惑星周回軌道上からの惑星表層部サウンダ観測において研究者が注目するのは直下点エコーであるので、シミュレーションでは直下点反射の模擬が忠実にできれば十分であること。静穏な電離層のプラズマ密度勾配の方向は探査機から見た直下点方向に一致するため直下点方向に伝搬する電波は屈折によってその伝搬方向が変化することはなく、伝搬経路は幾何光学光路に一致する。したがって、この幾何光学光路近似によって直下点反射は忠実に模擬できる。

第二の理由は、直下点方向以外の周辺部散乱波はランダムなクラッタノイズであること。直下点方向以外の方向へ伝搬するサウンダパルス電波は電離層中を屈折しながら伝搬するため、その伝搬経路は幾何光学光路によって近似することはできない。しかし、サウンダ観測において観測される直下点周辺部散乱波は、直下点方向から返ってくる微弱な地下境界面反射エコーをマスクするランダムなクラッタノイズとしての役割しか果たさない。幾何光学近似の適用によって電波の伝搬経路が実際の伝搬経路から変化すると確かに受信のタイミングにずれは生じるが、ランダムなクラッタノイズとしての散乱波の統計的性質が変わることはない。したがって、本研究において幾何光学近似を直下点散乱波の伝搬経路の計算に適用しても、散乱波の振る舞いに本質的な影響を及ぼすことなくその影響を模擬できる。

LRS は FMCW レーダであるので、送信するサウンダパルスの周波数は連続的に変化する。このため、通常定義によって周波数を定義することはできない。本研究では、広く行なわれているように、便宜的に「瞬時周波数」を定義し、サウンダパルスの各位相要素はその対応する瞬時周波数の群速度で電離層中を伝搬するとして計算した。

電離層中の分散関係式は磁場なしの冷たいプラズマ ( Unmagnetized cold plasma ) を仮定して

$$(ck)^2 = \omega^2 - \omega_p^2 \quad (3)$$

とした。ただし、ここで  $c$  は光速、 $k$  は波数、 $\omega$  は  $\omega = 2\pi f$  で  $f$  は着目する電磁波の周波数、そして  $\omega_p$  は、同様に  $\omega = 2\pi f_p$  で  $f_p$  は電子プラズマ周波数

$$f_p = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{nq^2}{m\varepsilon_0}} \quad (4)$$

である ( $n$ 、 $q$ 、 $m$ 、 $\varepsilon_0$  はそれぞれ、電子密度、素電荷、電子質量、真空の誘電率)。

瞬時周波数  $f$  におけるサウンドパルスの群速度  $v_g$  は分散関係式 (3) より

$$v_g = \sqrt{1 - \frac{f_p^2}{f^2}} \quad (5)$$

となる。

サウンドパルスが送受信アンテナ 惑星表面間を往復伝搬するのに要する時間は

$$t(\theta) = 2 \int_S \frac{ds}{v_g(s)} \quad (6)$$

で計算される。ただし、ここで  $\theta$  は探査機直下点方向とサウンドパルス伝搬方向とがなす角で、積分は幾何光学光路  $S$  に沿って行なう。 $v_g(s)$  は (5) で表される局所的な電子プラズマ周波数の関数であるが、伝搬経路上で  $\omega_p \ll \omega$  なる条件が満足されれば、右辺の被積分関数を展開したのち、1次の項までを残して (4) を用いて最終的には

$$t(\theta) = \frac{2}{c} \frac{H}{\cos \theta} + \frac{1}{c} \frac{q^2}{4\pi^2 f^2 m \varepsilon_0} \frac{1}{\cos \theta} \int_S n(h) dh \quad (7)$$

を得る。ただし、ここで、 $H$  は探査機の高度、 $n(h)$  は伝搬経路  $S$  上、高度  $h$  における電子密度である。最後に残った積分は断面積が単位面積である直下点方向サウンドパルス伝搬経路に沿った柱状空間内の電離層電子の総数 (Total Electron Content) を表し TEC と呼ばれる。この積分の値を  $\text{TEC}(0)$  と表すことにすれば上式は

$$t(\theta) = \frac{2}{c} \frac{H}{\cos \theta} + \frac{1}{c} \frac{q^2}{4\pi^2 m \varepsilon_0} \frac{\text{TEC}(0)}{\cos \theta} \frac{1}{f^2} \quad (8)$$

となる。第1項の  $\frac{H}{\cos \theta}$  は直下点方向と  $\theta$  なる角をなす方向の幾何光学近似による伝搬経路長であり、第2項の  $\frac{\text{TEC}(0)}{\cos \theta}$  はその経路に沿った TEC である。そして、第1項は真空における伝搬時間を表し、第2項が電離層伝搬遅延を表す。

(8) 式で面白いのは、第2項の電離層伝搬遅延が伝搬経路の長短や電離層電子密度分布の形の影響を受けず、伝搬経路上の TEC という積分形で表わされるという点である。この事実は、電離層遅延効果の評価をするためのシミュレーションでは、TEC の値が正しく設定されていれば、探査機の観測高度は任意でよいことを意味する。月における SELENE の LRS 観測は高度 100km から行なわれるが、火星のサウンド観測は表面高度 300km 以上の高度から行なわれる。同じ LRS 装置による観測では、惑星表面の見込み角 (アンテナビーム幅) が同じであるためシミュレーションで扱うべき表面範囲が高度の二乗に比例して大きくなる。本研究のシミュレーションでは、計算機資源の節約を図るため、観測高度をこれまでのシミュレーションの月における LRS 観測と同じ 100km とした。

我々の興味はサウンドパルスの伝搬を (8) にしたがって計算して式中の第2項が観測結果に及ぼす影響を評価することにある。シミュレーションでは各タイムステップ毎に (1) で定義される周波数  $f$  について (8) によって伝搬時間を計算し、観測 (受信) データの波形を計算する。

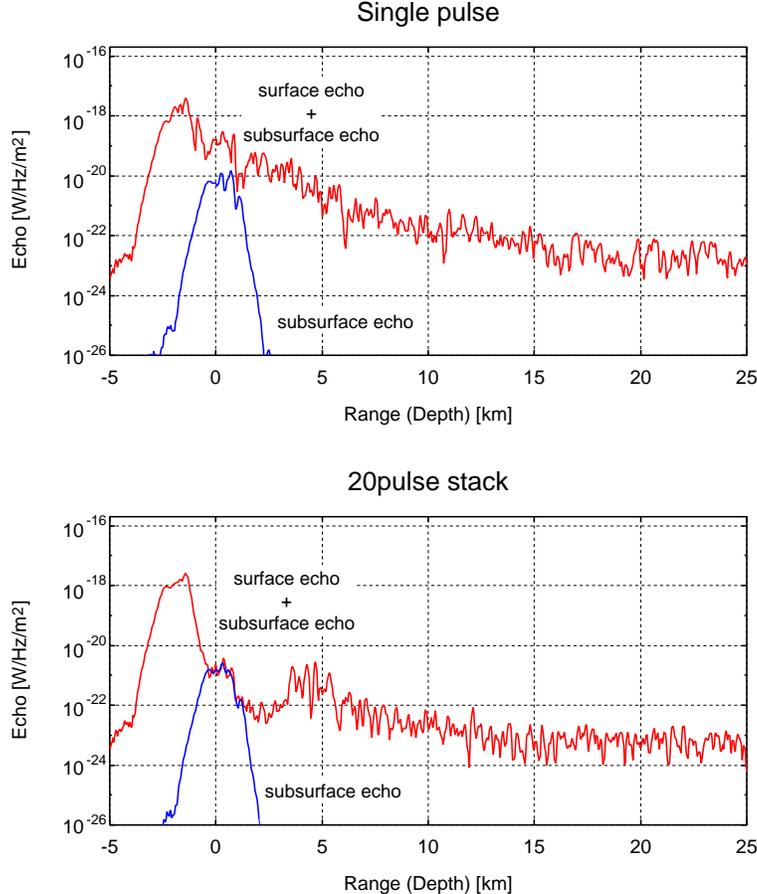


図 1: LRS による火星表層部サウンド観測

### 3 火星表層部サウンド観測

#### 3.1 LRS による火星表層部サウンド観測

上述のシミュレーションモデルを用いて LRS による火星表層部サウンド観測を模擬した。火星の電離層 TEC はこれまでの探査機による観測 (Ness et al., 2000[3]) から  $1 \times 10^{15} \text{m}^{-2}$  前後であると見積られる。そこで、本稿ではこの  $1 \times 10^{15} \text{m}^{-2}$  を火星電離層を代表する TEC 値とした。

図 1 はシミュレーションによって得られた LRS によるサウンド観測の A スコープである。A スコープとは、Amplitude scope のことで、レーダ観測データを受信信号強度対レンジのプロットで表したものである。レンジ軸の目盛は探査機直下点惑星表面レンジを基準にしている。レンジの正方向は表面下の深さ方向に一致する。図中、赤い実線で観測データ (表面反射波 + 地下反射波) を示し、比較のために青い実線で地下反射波成分のみを分離して示した。改めて説明するまでもないが、このような成分分離は数値実験だからこそ可能なことであり、シミュレーションの大きな利点である。

上図は単発パルスによる観測結果で、下図は 20 パルスの観測結果の重ね合わせ平均データによる結果である。20 の観測データの平均を取ったのは、ランダム信号成分である周辺部からの散乱波エコーを平均化処理によって減衰させ、コヒーレント信号成分である直下点エコーを残すためである。このデータ重ね合わせ平均化の手法は、LRS による月表層部

の観測で有効性が確認されている。

さて、図を見るとまず、この LRS の観測では直下点表面反射エコーを示す受信強度最大値を示すレンジが負のレンジに見える、つまり、表面直下点が見かけ上浮き上がって見えていることになる。この現象は地下反射エコーについても同様である（実観測では確認不可能であるが）。これは、受信波の FMCW 信号の周波数掃引率が変化したことによりレンジの決定が正しく行なわれなかったためである。受信信号の周波数掃引率が変化するのは、電離層プラズマが分散性媒質であるからで、FMCW 波である電磁波パルスの全体が同一速度で電離層中を伝搬することができないからである。

ところで、単パルスの観測では表面散乱波の強度が地下反射エコーの強度よりはるかに大きく、したがって、地下反射エコーの検出が不可能であることがわかる。そこで、観測データの重ね合わせ平均化の手法を適用するが、残念ながら、シミュレーション結果をみるとこの手法が有効であるとは言いがたい。表面散乱波のレベルは観測データの重ね合わせにより、確かにその強度を下げているがその一方、直下点表面反射エコーのピークの裾が広がっていて地下反射エコーピークの一部を隠してしまっている。このままでは、レンジ 0km に見えているピークの肩が地下反射エコーのピークであると積極的に主張することには無理がある。このピークの裾の広がり、受信エコーの周波数変化率の変化が一様ではなくなってしまったことに原因がある。このため、受信信号と参照信号との差周波数のスペクトルが広がってしまい、結果としてサウンダエコーのピークの裾が広がってしまったのである。

以上、図 1 からは、LRS で火星表層部のサウンダ観測を行なったとしても、レンジ決定に大きな誤差を含む直下点表面反射エコー以外に得るものはない、と結論できる。

### 3.2 参照信号変調の効果

前節のシミュレーションでは、LRS の火星観測について否定的結論を与えたが、この原因は、分散性媒質である電離層プラズマ中を FMCW パルスが伝搬する間にその周波数掃引率が変化してしまうためであった。ここで、FMCW レーダの原理について思い起こしたい。FMCW レーダの原理については 2.1 で簡単に触れたが、この説明は受信信号と参照信号の差周波数を計測することからわかる通り周波数領域における考え方によるものである。時間領域におけるこれと等価な考え方では、この原理は「受信信号と参照信号の相関をとる」として説明される。つまり、受信データの中から参照信号と同じ波形の信号を探し出すのである。

このように見方を変えると、前節の問題は「参照信号の形を受信信号の形と等しくする」ことにより解決できそうだと検討がつく。そこで、我々は FMCW レーダの信号処理部に、与えられた TEC 値に応じて参照信号を変調する機能を加えたシミュレーションを行なって、参照信号変調の効果調べた。

図 2 に示すのは、参照信号変調のために仮定する TEC 値を  $1 \times 10^{15} \text{m}^{-2}$  とした場合のシミュレーション結果である。図 1 と同様、上図は単パルス観測による A スコープ、下図は 20 パルス観測データの重ね合わせ平均化による A スコープである。

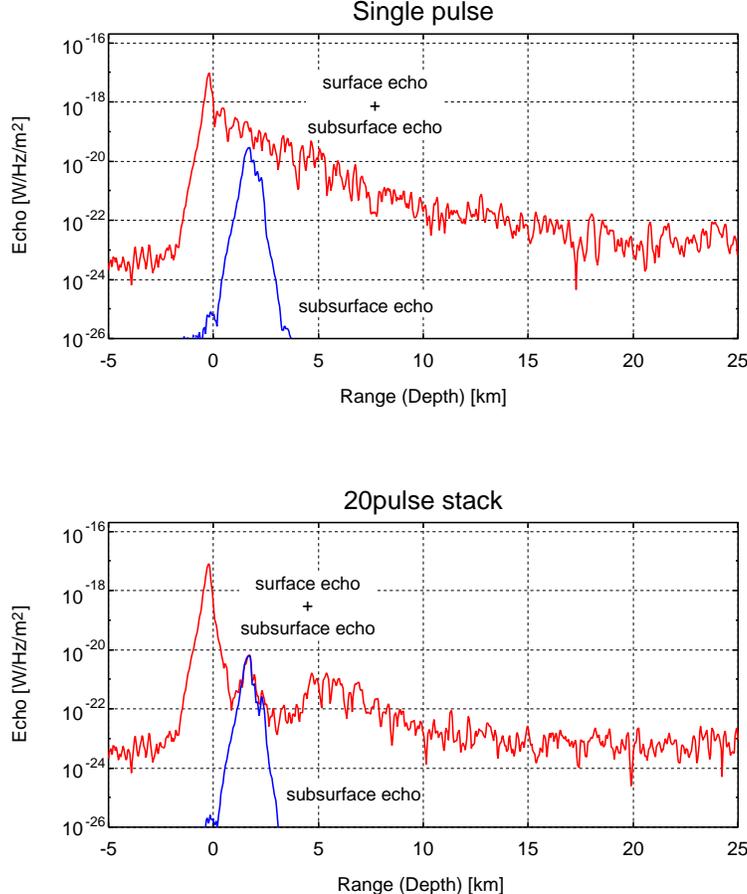


図 2:  $TEC=1 \times 10^{15}$  を仮定した参照信号による LRS 観測結果

効果は一目瞭然である。まず、単パルスの観測（図 2 上）では直下点反射エコーのレンジがほぼ正しく再現されている。また、データ重ね合わせの結果では、直下点反射ピークの裾の幅が狭まり見かけ深さ 2km のところに現れている地下反射エコーがはっきりと分離できている。

この結果から、TEC の値に応じて参照信号に変調をかけてやることにより受信エコーのレンジ決定が正しく行なわれるようになるほか、データ重ね合わせ平均化の手法を用いて A スコープ上で地下反射エコーの検出、分離が容易になり火星表層部のサウンド観測が可能になることが結論できる。

### 3.3 参照信号変調による LRS サウンド観測の改善

ところで、我々は火星電離層の TEC 代表値の概数値は知っていても、時と場所に依存して変動する電離層の TEC 値の詳細を把握しているわけではない。仮に火星探査機に TEC 計測装置を搭載し TEC 計測を行なったとしても計測値のばらつきはまぬかれ得ない。そこで、我々の次なる関心は、参照信号変調のために仮定した TEC 値と実観測における電離層の TEC 値との乖離をどこまで許容できるかという点に移る。

この点を明らかにするため、参照信号の変調に際して参照する TEC 値を変化させて前項の観測シミュレーションを行なった。結果を図 3 に示す。ここに示す図はすべて 20 パ

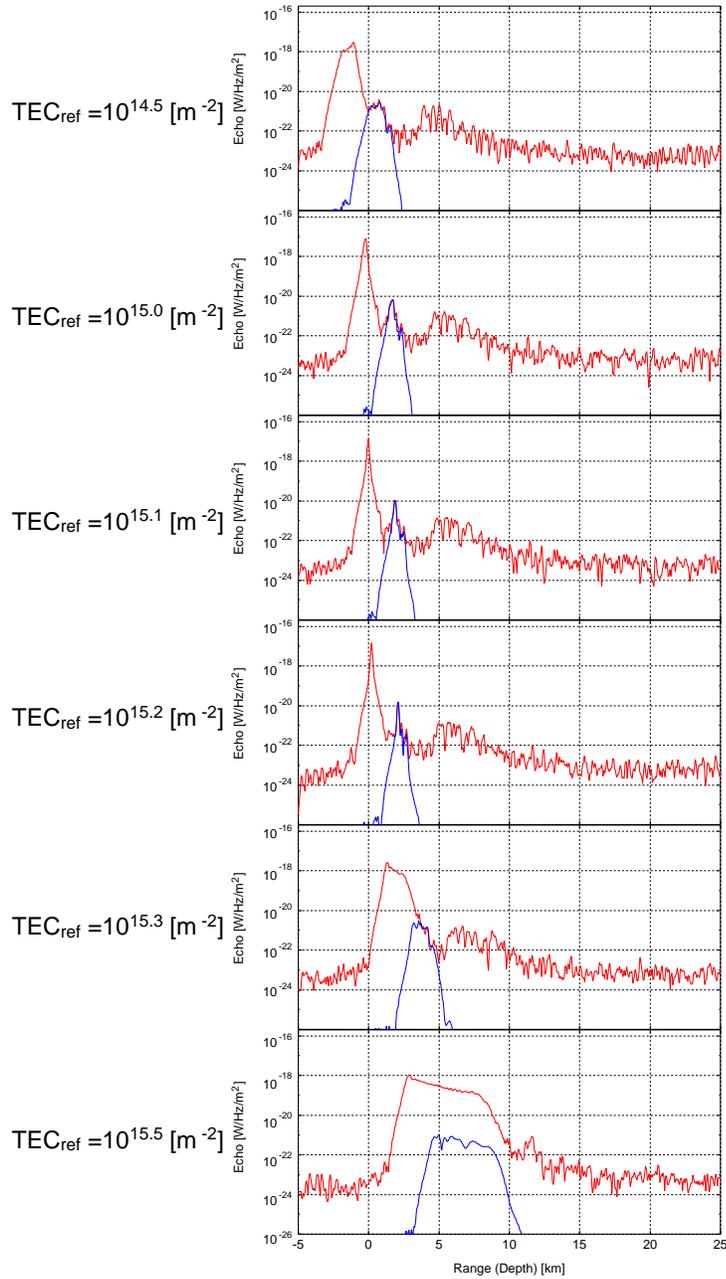


図 3: 参照信号変調の効果。

参照信号変調の際参照する TEC 値を変化させると A スコーププロットが影響を受ける。図中、各 A スコープの左に示された TEC<sub>ref</sub> の値が参照される TEC 値の大きさを示す。プロット線の色種は前掲 2 図に同じ。

ルスの観測データの重ね合わせ平均化処理を行なったものである。一見して明らかなように、A スコープの形は参照信号変調の TEC 参照値に依存して変化している。

注目すべきは、TEC 参照値が 0 (図 1) から  $10^{14}\text{m}^{-2}$  程度まで (図 3) まで、その大きさが 14 桁以上変化しても A スコーププロットの形がほとんど変わらないことと、その一方で、TEC 値  $1 \times 10^{15}\text{m}^{-2}$  の近傍では TEC 値 2 倍程度 ( $1 \sim 2 \times 10^{15}\text{m}^{-2}$ ) の変化で A スコープのプロットが大きく変化する点である。レンジ決定精度が最も良い結果は TEC 値が  $10^{15.1}\text{m}^{-2}$  の条件で参照信号に変調をかけた場合である。実際の TEC 値からわずかに外れた TEC 値を参照して参照信号を変調した場合に最良の結果が得られたのは、電離層伝搬遅延効果によって FMCW 信号の周波数掃引 (変化率) が直線性を失ったため、信号検出における信号の最良一致条件に変化が生じたからである。

さて、このような解析を他の電離層 TEC 値についても行なう必要がある。しかし、ランダム面を用いたシミュレーションを想定されるすべての場合について行なうのは計算機資源の浪費で現実的ではない。そこで、われわれは、ランダム面の代わりに完全平面を用いて、完全平面からの直下点反射エコーの振る舞いを調べた。その結果から、重ね合わせ平均化処理を行なった後の A スコープデータの振る舞いを知ろうというのである。ランダム面からの直下点反射エコーと完全平面からの直下点反射エコーの性質が同じであることは本研究のシミュレーションが基礎とする基本方程式を解析的に調べることにより示される (Kobayashi et al., 2002) [2]。

想定した TEC 値の範囲は  $1 \times 10^{12} \sim 5 \times 10^{15}\text{m}^{-2}$  である。着目したのは、直下点反射エコーの強度、直下点反射エコーレンジのずれの大きさ (絶対値)、そして、直下点反射エコーのピーク幅である。このピーク幅は反射エコー分離度の目安となる数値で、-30dB のレベルで定義した。図 4 にこれら 3 つのパラメータの値のプロットを示す。図では、電離層 TEC 値 (横軸) と参照信号参照 TEC 値 (縦軸) の関数として値の大きさを色別に表示した。

この結果からは、まず図 3 で認められた直下点エコーの振る舞いが電離層 TEC 値  $1 \times 10^{15}\text{m}^{-2}$  のところではっきりと確認でき、図 4 が LRS による火星表層観測の様子を教えてくれることが納得できる。そして、以下の結論を得る。本ケースで想定している LRS (5MHz) によるサウンダ観測の場合、電離層 TEC 値がおおよそ  $10^{14}\text{m}^{-2}$  以下であれば参照信号の変調は事実上考慮の必要はないが、それを超える大きさとなる場合は電離層 TEC 値に応じた参照信号の変調の必要が出てくる。そして、電離層 TEC 値が  $10^{15}\text{m}^{-2}$  程度の場合は、解析に堪えうるサウンダ観測データを取得するためには、数十パーセント内の誤差で電離層 TEC 値を計測あるいは仮定して参照信号の変調をかける必要がある。

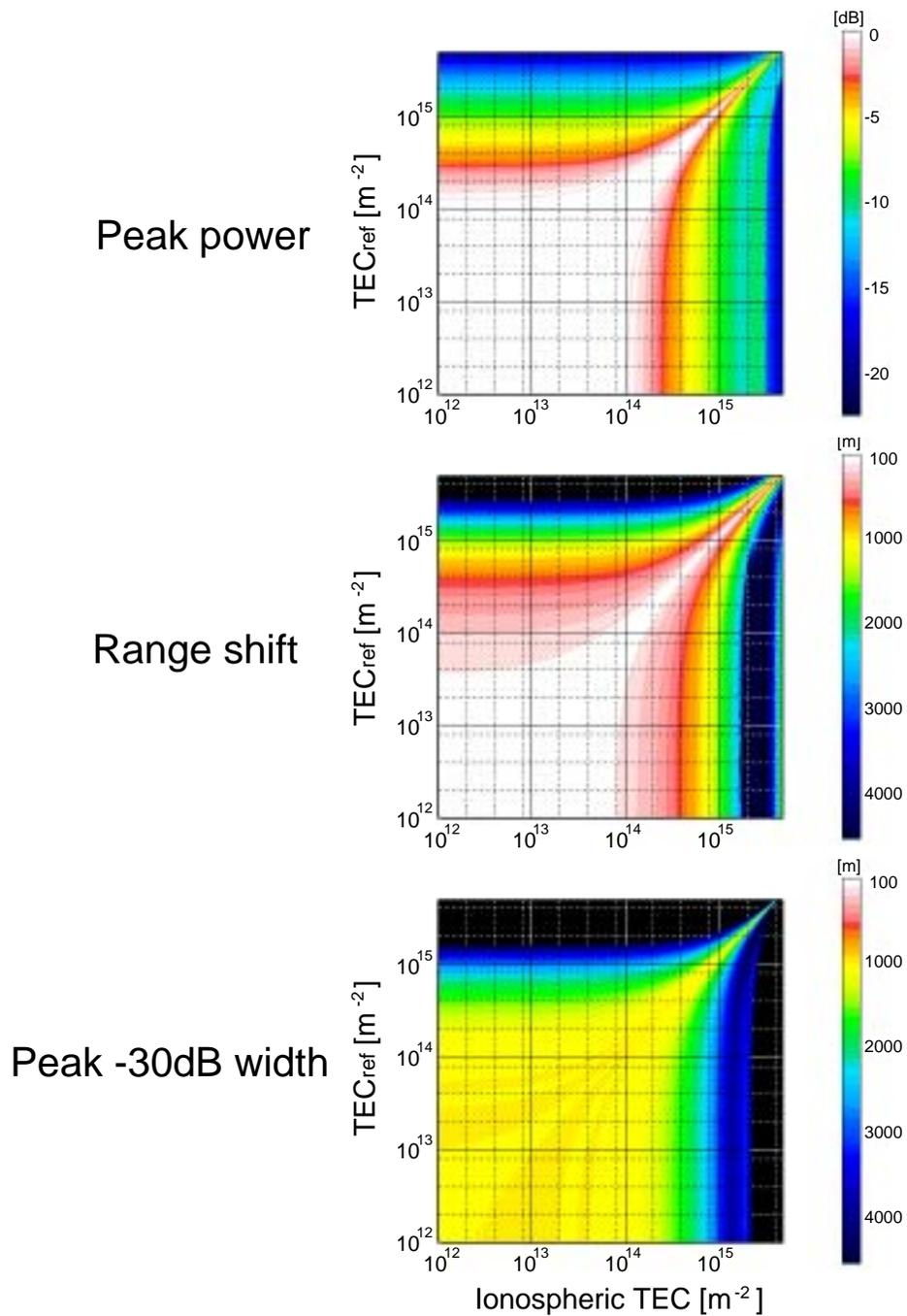


図 4: 電離層 TEC 値と参照信号参照 TEC 値がサウンダ観測に及ぼす影響。  
 電離層 TEC 値が  $1 \times 10^{14} \text{m}^{-2}$  を超えると急激にエコーのピークパワーの減衰、レンジ誤差の増大そして-30dB ピーク幅の増大が起こり、観測に大きな影響が及ぼされる。

## 4 一般の観測条件への適用

前項までに得られた結論は LRS (送信波中心周波数 5MHz) という特定の観測機器に対するものである。この結論を他の任意仕様のサウンダ観測に適用する方法を確立することにより、本研究の目的は達成される。

ここで、再び (8) 式を見る。第 2 項を

$$\frac{1}{c} \frac{H}{\cos \theta} \frac{q^2}{4\pi^2 m \epsilon_0} \frac{TEC(0)}{H} \frac{1}{f^2} \quad (9)$$

のように書き直すと、 $\frac{TEC(0)}{H}$  が TEC を定義した柱状空間内で形式的な平均電子密度を表すことから、(8) 式は (4) 式の関係を用いて

$$t(\theta) = \frac{2}{c} \frac{H}{\cos \theta} \left[ 1 + \frac{1}{2} \left( \frac{f_{TEC}}{f} \right)^2 \right] \quad (10)$$

と書き直すことができる。ここで、 $f_{TEC}$  は、TEC 定義柱状空間内の平均電子密度から形式的に求まる電子プラズマ周波数である。

(10) 式は、サウンダ観測における電離層伝搬遅延効果が TEC 値と観測高度  $H$ 、そして観測周波数  $f$  で決まる無次元量  $\frac{1}{2} \left( \frac{f_{TEC}}{f} \right)^2$  によって一意に決まることを示している。この無次元量を使うことにより、サウンダ観測周波数と TEC 値による電離層伝搬遅延効果の問題のスケーリングが可能となり他の観測条件への応用が容易になる。(8) 式中に現れる諸物性値は観測条件とは独立な定数なので、実用上は観測軌道高度  $H$  を決めてから

$$\frac{TEC(0)}{f^2}$$

項のみに着目して、図 (4) の軸の値を観測周波数  $f$  に応じて読み替えることになる。

たとえば、火星電離層の代表的 TEC 値  $1 \times 10^{15} \text{m}^{-2}$  のもとで参照信号の変調を考慮せずに観測を行なうために必要な観測周波数の最小値  $f_{min}$  を求めてみよう。電磁波は周波数が低いほど地下への浸透深さが増す。そのため地下探査を行なうためには観測周波数が低いほうが都合が良いのである。先に示したように、観測周波数  $f = 5\text{MHz}$  の LRS の場合、参照信号の変調を考慮せずに観測が行なえる TEC 値の範囲は

$$TEC(0) \lesssim 1 \times 10^{14} \text{m}^{-2}$$

であったから、求める周波数は

$$\frac{1 \times 10^{15} \text{m}^{-2}}{(f_{min} \text{MHz})^2} \lesssim \frac{1 \times 10^{14} \text{m}^{-2}}{(5\text{MHz})^2}$$

より、

$$f_{min} \gtrsim \sqrt{10} \cdot 5\text{MHz}$$

となって、必要な周波数の最小値が 15MHz であることがわかる。

## 5 おわりに

本研究は火星に代表される電離層をもつ無磁場天体表層部のサウンダ観測における問題の解決を目的としてFMCW方式のHFサウンダ観測のシミュレーションを行なったものである。

本シミュレーションの計算は大きく2段階に分けられる。まず前半段階では天体表面および地下境界面での反射波電場ベクトルの計算である。この計算ではモデル惑星の幾何形状を記述するグリッドデータ配列の各要素点における入射波電場、反射波電場を基礎方程式にしたがって求める。ここでは規則正しい大規模データ配列(1000 × 2000 及び 1 × 80000)に条件判断を伴わない画一的な加減乗除のみの計算で求まるデータを繰り返し(400回及び80000回)代入する計算を行なう。このような計算では言うまでも無くシミュレーションコードのベクトル化、並列化が力を発揮する。ベクトル化と並列化により、この前半段階の計算では計算速度が汎用機に比べて60倍以上向上している。

一方、後半段階では、電離層伝搬遅延の問題をモデル惑星表面のグリッド点に対応する各LRS送信パルス伝搬経路において数値的に解いている。今回開発したこの後半段階のシミュレーションコードはベクトル化・並列化を満足のゆく段階まで行なうことができなかった。検討の結果、ベクトル化・並列化を阻害する原因は数値解アルゴリズムの中のひとつの条件分岐にあることが判明したが、残念ながらアルゴリズムの改変にまでは至らず、この後半段階の計算では「ベクトル化・並列化による計算の高速化」というスーパーコンピュータの恩恵にあずかることはできなかった。

このように本シミュレーションの計算では、スーパーコンピュータの能力を十二分に引き出して活用するためには「アルゴリズムが肝要である」、というコード設計の基本を再認識させられることとなった。

さて、シミュレーションでは、分散性媒質である電離層の伝搬遅延効果を確認し、その影響を取り除くための具体的方策として参照信号の変調を提案しその有効性を確認することができた。さらに、現象に解析的な検討を加え、電離層をもつ無磁場天体表層部探索のためのサウンダ観測装置の設計の指針となる電離層伝搬遅延効果の評価手法を確立した。

将来の惑星探査におけるサウンダ観測装置の設計において本研究結果が活用されることが期待される。

## 6 謝辞

本研究は情報シナジーセンターとの共同研究、「電離層を持つ無磁場天体のHF/VHFサウンダ観測シミュレーションの研究」として行なわれた。情報シナジーセンター・スーパーコンピューティングシステムには有用な助言と指導を頂いた。

## 参考文献

- [1] K. G. Budden. *The propagation of radio waves*. Cambridge university press, Cambridge, 1985.
- [2] T. Kobayashi, T. Ono, and H. Oya. A-scope analysis of SELENE Lunar Radar Sounder (LRS) observation. *Earth, Planets, and Space*.
- [3] N. F. Ness, M. H. Acuna, J. E. P. Connerney, A. J. Kliore, T. K. Breus, A. M. Krymskii, P. Cloutier, and S. J. Bauer. Effects of magnetic anomalies discovered at mars on the structure of the martian ionosphere and solar wind interaction as follows from radio occultation experiments. *Journal of Geophysical Research*, 105, 2000.
- [4] 小林敬生, 小野高幸, 大家寛. SELENE 計画 月レーダサウンダによる月地下構造探査の計算機シミュレーション. *SENAC*, 32(2), 1999.
- [5] 小林敬生, 小野高幸, 大家寛. SELENE 計画 月レーダサウンダによる月高地領域地下構造探査と合成開口レーダ解析の計算機シミュレーション. *SENAC*, 33(3), 2000.
- [6] 小林敬生, 小野高幸, 大家寛. SELENE 計画 : 月レーダサウンダ (LRS) による月面 SAR/InSAR 観測の計算機シミュレーション. *SENAC*, 34(2), 2001.