

Full

wave法による波源を考慮した電離層中のELF/VLF
電波伝搬に関する研究

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2017-10-05 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/2297/16116

氏名	宮村和俊
生年月日	
本籍	石川県
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	博甲第227号
学位授与の日付	平成9年9月30日
学位授与の要件	課程博士(学位規則第4条第1項)
学位授与の題目	Full wave法による波源を考慮した電離層中の ELF/VLF電波伝搬に関する研究
論文審査委員	(主査)長野 勇 (副査)橋本 秀雄, 村本健一郎, 西川 清, 八木谷 聡

学位論文要旨

This thesis describes a method developed to calculate the distribution of electromagnetic fields generated by a monochromatic or impulsive ELF/VLF source in or below the lower ionosphere. The calculation also covers the propagation and time evolution of those fields.

For the case of monochromatic ELF/VLF waves, we have improved efficiency of calculation of the field distributions at satellite heights by using Fourier expansion of a spherical wave into a large number of plane waves, and parallel computation by many workstations with PVM (Parallel Virtual Machine) software. With the improved method, we have calculated energy distributions of Omega signals (10.2 kHz) in the altitude range from 300km to 2,000km. The calculated results are in good agreement with the actual measurements by Akebono satellite.

As for the analysis of impulsive ELF/VLF waves, we have calculated the time evolution of ELF/VLF electromagnetic fields generated by a return stroke of a lightning discharge, in free space and in the lower ionosphere above the discharge. The calculation method developed involves electrostatic fields originated from charge placement as well as inductive and electromagnetic fields, with a full wave technique. The calculated results reproduce an intense electric field generated by the lightning discharge, which explains the relation between the ionospheric region of the intense field and newly discovered luminous emissions called "sprites" associated with the lightning discharge.

1. 諸論

地上の送信局や雷放電から発せられる ELF/VLF 電波もしくは電離層中を波源とする ELF/VLF 電波が電離層および磁気圏中を伝搬するとき、これらの領域を満たすプラズマ粒子や地球磁場と深く結びついて様々な興味ある現象を引き起こす。これらの ELF/VLF 電波を地上やロケット、科学衛星などで観測することにより電波の伝搬機構のみならず電離層や磁気圏のプラズマ媒質の大域的な構造、プラズマ粒子と電磁波との相互作用のメカニズムなどを解明するための有効な情報を得ることができる。特に電離層の高度の比較的

低い領域 (<300 km) における ELF/VLF 電波の伝搬解析をすることで、ELF/VLF における自由空間モード波からホイストラモード波への結合特性や電離層へのエネルギー透過特性などを明らかにすることができる。さらに工学的には電波伝搬経路の媒質推定など電離層のリモートセンシングへと応用することができる。

電離層の高度の低い領域では媒質の空間変化が ELF/VLF 電波の波長に比べて急峻であるため、その媒質中で成立するマクスウェルの方程式を直接解かなければならない。そこで、電離層を垂直方向のみに媒質が変化すると仮定して均質な多層で垂直方向に分割し、各層で成立する平面波についてのマクスウェル方程式を境界条件で接続して解くことにより層中の電磁界を求める均質多層分割法 (full wave 法) [1] がよく用いられる。これにより平面波の伝搬による電離層中の任意の高度における電磁界強度を厳密に計算することができる。さらに、球面波の平面波展開を利用することによって電離層下の自由空間や下部電離層中に置かれたダイポール波源から放射された ELF/VLF 電波による電離層中の電磁界分布を full wave 法を用いて厳密に数値計算する手法もこれまで開発されている [2]。

本研究はこの延長線上に位置するものであり、電離層下の自由空間もしくは下部電離層中にある単一周波数もしくはパルス的な波源からの ELF/VLF 電波による自由空間および電離層中の電磁界分布を厳密に計算する手法を開発し、地上からの ELF/VLF 波が電離層中に形成する電磁界分布や、自由空間波がホイストラモード波へと結合する過程などを明らかにすると同時に、電磁界の観測による波源のパラメータや電離層媒質の推定の可能性を探ることを目的とする。

2. 地上付近のダイポール波源による電離層中の電磁界分布の計算

地上のダイポール波源から放射された ELF/VLF 電波による電離層中の電磁界強度分布を求める従来からの計算手法は、ダイポール波源からの球面波を平面波に展開し、展開された各平面素波による電離層中の電磁界を full wave 計算法により求め、最後に電離層中においてこれらの平面素波電磁界を合成するものである。

これに対して、(i) 球面波の平面波への展開にフーリエ変換を適用することと (ii) 平面素波電磁界の full wave 計算を PVM (Parallel Virtual Machine) [3] と呼ばれるソフトウェアを利用して複数の計算機 (ワークステーション、以下 WS と略す) で並列処理を行う改良を図った。平面波展開にフーリエ変換を適用することにより数値計算にて高速フーリエ変換 (FFT) が利用できるため、計算時間が大幅に短縮できて、従来手法に比べて高い空間解像度の電磁界分布の計算が可能となった。また、従来手法に比べて電磁界分布の離散的な数値計算に伴うエリアシングの評価や計算精度の評価が離散フーリエ変換の性質によってより明確になった。PVM を利用して複数の WS による並列計算を実行すると、計算時間を 1 台の WS の場合のおよそ (使用する WS の台数) 分の 1 に短縮することができた。

さらに、改良した計算手法を利用して地上のダイポール波源からの VLF 電波による高度 300 km におけるポインティングフラックス強度分布を計算し、その地方時依存性すなわち電離層の電子密度プロファイル依存性を明らかにした。高度 300 km に到来する地上からの VLF 電波の電力値は、地方時 (LT) 0 時では波源からの全放射電力値の 20% 程度、LT 12 時では 0.2% 程度になることが分かった。

3. 衛星低高度観測におけるオメガ電波強度分布の解析

あけぼの衛星がオメガ送信局上空を低高度 (300~2,000 km) で通過するときの観測で得られたオメガ電波 (10.2 kHz) の衛星の軌道に沿った強度分布に対して、第 2 章で述べた計算手法を用いて解析を行った [4]。オメガ電波は船舶等のナビゲーションのための VLF 電波であり、あけぼの衛星はオーロラに関する波動-粒子現象の観測を目的として打ち上げら

れ、現在もなお観測を続けている科学衛星である。ここでは、あけぼの衛星がオメガ送信局上空でオメガ電波を観測した4つのパス(対馬局上空2パス, アルゼンチン局上空1パス, ラレユニオン局上空1パス)における観測データの解析を行った。観測結果より、一般的に昼の場合に比べて夜の場合にオメガ電波の強度は強く、信号強度の空間的な強弱の間隔が狭いことが明らかになった。

次に、電子密度プロファイルに IRI モデルを、地球磁場ベクトルの高度プロファイルに IGRF モデルを用いて、第2章で示した full wave 計算法にてあけぼの衛星の観測高度におけるオメガ電波のポインティングフラックス強度分布を計算し、観測値との比較を行った。その結果、対馬局上空の一方の観測データ(図1)において、オメガ送信局真上付近で信号強度がもっとも強いところで両者はよく一致した。しかし、送信局真上から離れた強度の小さいところでは両者の差は大きいところで10 dBにもなった。

そこで1つの観測パスにおいて衛星が移動する範囲における電子密度と地球磁場ベクトルの高度プロファイルの変化を調べたところ、特に緯度による地球磁場の伏角の変化が大きく、電離層が水平方向で均質で、平面層状媒質とする full wave 計算上の仮定が成り立たないことが分かった。そこで、計算領域を緯度方向に分割してそれぞれの領域において別々の適切な計算パラメータを用いて各領域別にオメガ電波の強度分布の計算を行うことにした。その計算結果と観測結果を比較すると、オメガ送信局真上から離れた点においても両者の値はよく一致する結果となった(図2)。なお、領域を分割したモデルによる理論計算は、その計算量がおおよそ(分割した領域の数)倍になるため、フーリエ変換および並列計算による計算時間の短縮によって実現可能となったものである。

計算領域を分割したモデルを用いて、その他3つのパスについてのオメガ電波強度分布を計算し、あけぼの衛星による観測値との比較を行った。その結果、アルゼンチン局上空のデータについては観測値と計算値が比較的よく一致した。もう1つの対馬局上空のデータについては、両者の差がもっとも強度の強いところで観測値の方が5 dB 小さく、場所によっては観測値の方がおおよそ10 dB も小さい結果となった。この原因として、このデータの観測時において電離層 D 層の電子密度が IRI モデルより数倍高かった可能性が考えられる。ラレユニオン上空のデータについては、この観測時のオメガ局の正確な送信電力値が不明であったが、これを4 kW と仮定すると観測値と計算値がよく一致する結果となった。

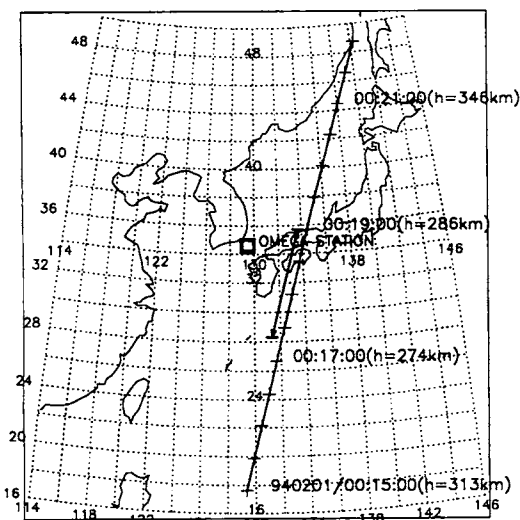


図1 対馬オメガ局上空を通過するあけぼの衛星の軌道。(□がオメガ送信局の位置, 94年2月1日00:15~00:22UT)

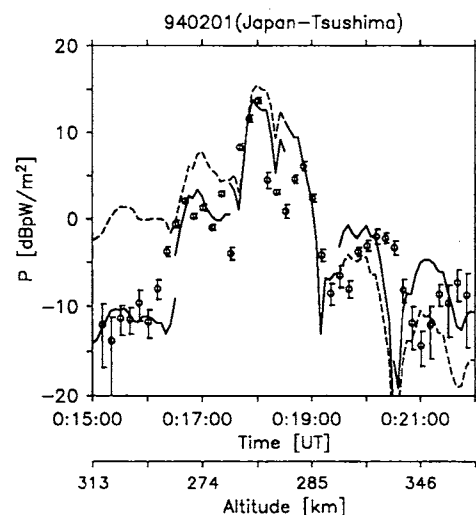


図2 あけぼの衛星の軌道に沿ったオメガ電波強度の観測値と計算値(丸印と縦棒: 観測値, 実線: 分割モデルによる計算値, 破線: 非分割モデルによる計算値)

また、地球磁場ベクトルに対するオメガ電波の伝搬ベクトルとポインティングベクトルの方向を観測値と full wave 計算結果との両方で算出して比較したところ、地球磁場ベクトルが IGRF モデルと非常によく一致していることと、領域分割して理論計算することの妥当性が明らかになった。

4. 雷放電により発生する ELF/VLF 電磁界の full wave 計算

雷放電により発生する ELF/VLF 電波の電離層下の自由空間および電離層中における電磁界分布の時間変化を厳密に数値計算する手法を開発した [5]。計算手法は、雷放電(第一帰還雷撃)電流を伝送線電流と仮定し、第2章で述べた地上の単一周波数の ELF/VLF ダイポール波源による電離層下の自由空間および電離層中の電磁界分布を計算する手法に時間-周波数に関するフーリエ変換を組み合わせて、電磁界の時間変化を計算するものである。この計算手法は full wave 法を用いているため、電磁界の静電界および誘導界、放射界すべての成分を含んでおり、また、電離層の垂直方向の不均質によって生じる分反射なども考慮された厳密な計算手法であることが特長である。計算量が非常に多いため PVM を利用した複数の WS による並列計算によって初めて実現が可能となった。

次に、この計算手法を用いて雷雲-地上間雷放電によって生じる電磁界分布の時間変化を雷放電直後から 2 ms までの範囲、空間的には雷放電の位置を中心として南北 100 km および高度 30 km から 140 km の範囲で計算を行った。これにより、雷放電電流によって発生する放射電磁界および誘導電磁界だけでなく、雷放電による電荷の移動によって生じる準静電界成分も含めた電磁界の時間変化を明らかにすることができた(図3, 図4)。また、雷放電からの電磁界パルスが分散性をもつ電離層に入射してホイスラモード波へと移行する様子や、電磁界パルスが電離層と地表面との間を反射を繰り返しながら伝搬する様子などを観察することができた。

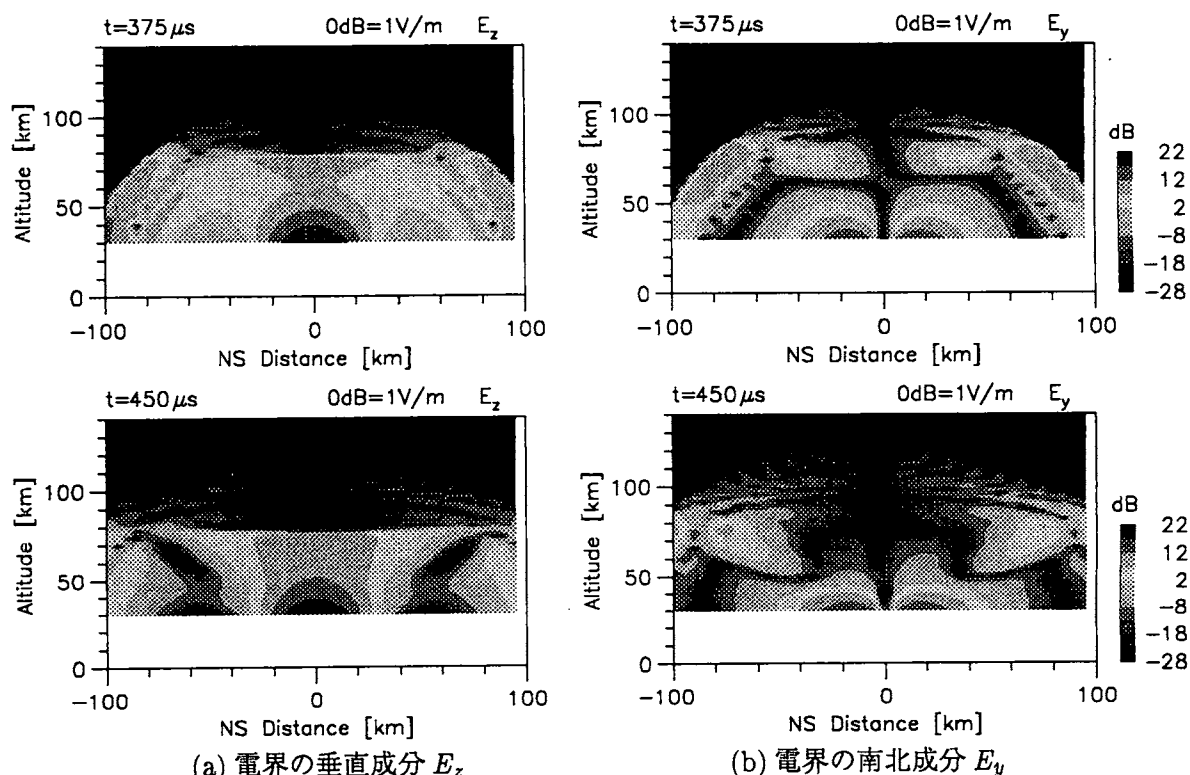


図3 垂直な雷雲-地上間雷放電開始から $t=375 \mu\text{s}$ 後(上) および $t=450 \mu\text{s}$ 後(下)における高度 30 km~140 km, 雷放電を中心に南北 100 km の範囲の電界分布 (原点が雷放電真下の地上の点に相当する)。

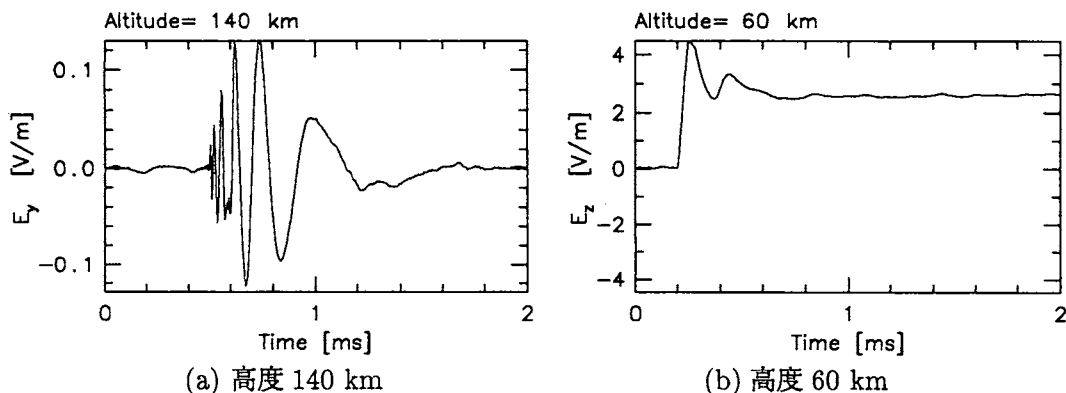


図4 雷放電の真上 ($y = 0$ km) の高度 140 km における E_y および高度 60 km における E_z の波形

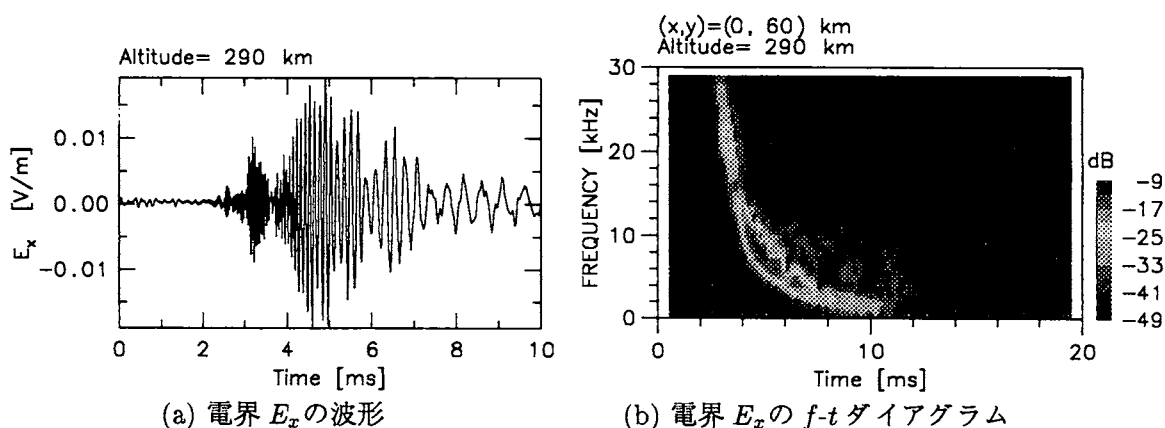


図5 full wave 計算によって得られた雷雲上空 (高度 290 km, 水平距離 60 km) における雷放電によって生じた電界の水平成分 E_x の波形と f - t ダイアグラム.

さらに、雷放電電流パルス幅や電流パルスの移動速度、雷放電高度によって電磁界分布の時間的推移がどう変化するかを明らかにした。例えば、自由空間中では雷放電によって生じる電界パルスのピーク値は電流パルス速度に比例するが、電離層中では分散性による電界パルス波形のくずれにより電流パルス移動速度に比例しなくなることが分かった。また、水平雷放電の場合の電磁界計算も行い、垂直雷放電では雷放電真上で放射電磁界パルスの強度がもっとも弱くなるのに対して、水平雷放電では真上の強度がもっとも強くなることを確認することができた。

また、ロケットによって実際に観測された高度 300 km 付近における雷放電に起因した電界パルス波形 [6] に対して、適当な雷放電電流を仮定して本手法により観測した高度における電磁界波形を計算した (図 5)。電界波形の周波数の時間変化において計算値と観測値とがほぼ一致する結果が得られた。しかし、電界強度の周波数特性が両者で異なる部分もあり、さらなる解析が必要と考えられる。

最後に、最近注目されている “sprites” や “elves” と呼ばれる雷放電に伴う下部電離層における発光現象 [7], [8] の発生領域と雷放電によって生じる電界分布との関係についての考察として、これらの発光現象を起こすと報告されている大規模な雷放電を仮定し、それによって発生する電界強度分布を本手法を用いて計算した。そして、大気発光と関係の深い大気の絶縁破壊に必要な電界強度に達する領域を求めると、sprites 現象が発生する領域と一致する結果を得ることができた。

5. 下部電離層中の波源からの ELF/VLF 波の電離層伝搬におけるイオンの影響

これまでに開発されている電磁界の波数空間へのフーリエ変換とダイアディックグリーン関数, full wave 法を用いて下部電離層中のダイポール波源から放射される VLF 電波の上空の電離層における電磁界分布を計算する手法 [9], [10] に, 正イオンの考慮を加えることにより ELF への適用を可能にした。

周波数 200 Hz でダイポール波源を高度 70 km に置いた場合の高度 300 km におけるポインティングフラックス強度分布において, イオンを考慮しないときには空間的な強度の強弱の縞が現れていたのが, イオンを考慮するとこれが消えて空間的になめらかな分布になることが分かった。また, 高度 1,200 km において, イオンを考慮するとプロトンサイクロトロンモード波が現れ, ビーム (集中的に強度が強くなっている部分) の中心付近ではホイストラモード成分よりプロトンサイクロトロンモード成分が強くなることが明らかになった。

6. 結論

地上のダイポール波源からの ELF/VLF 波による電離層中の電磁界分布の計算手法において, 球面波の平面波展開にフーリエ変換を適用することと PVM を利用して複数の WS で並列計算することにより, 従来より高い精度と高い空間解像度で電磁界分布を計算することが可能になった。これを用いて, 地上の VLF 送信局 (オメガ局) 上空を通過する科学衛星により観測された送信局からの VLF 電波の空間強度分布の詳細な解析が可能となった。

さらに, 地上における単一周波数の ELF/VLF ダイポール波源による電離層中の電磁界分布の計算手法に時間-周波数に関するフーリエ変換を組み合わせることにより, 雷放電により発生する電離層下の自由空間および電離層中の ELF/VLF 電磁界分布の時間変化を厳密に計算することに成功した。これにより, 雷放電によって生じる電離層下の自由空間における準静電的な電磁界の時間変化や ELF/VLF 波が電離層に入射してホイストラ波へと変化する過渡的な現象などを明らかにすることができた。

また, 下部電離層中のダイポール波源からの VLF 波による衛星高度 (~1,000 km) における電磁界分布の計算手法に, 電離層中の伝搬にイオンの影響を考慮することにより ELF 帯での適用も可能にした。

今後の研究課題として, あけぼの衛星によるオメガ電波の観測データの full wave 計算を用いた解析においては, 電離層の緯度方向の不均質性を計算手法の中に組み込むことが挙げられる。これが実現できればさらに広い領域の伝搬解析に本手法が適用可能となると考えられる。また, 雷放電による ELF/VLF 電磁界分布の時間変化の計算においては, さらに実際の観測結果に対する解析を進めることや, 地上の電磁界を求めることを試みて tweek 空電などの観測結果との比較を行うことなどが挙げられる。

参考文献

- [1] Nagano, I., M. Mambo, and G. Hutatsuishi, Numerical calculation of electromagnetic waves in an anisotropic multilayered medium, *Radio Sci.*, 10 (6), 611-617, 1975.
- [2] 長野 勇, 北岸陽一, 八木谷聡, 満保正喜, 木村磐根, ダイポール波源による電離層上部の VLF 波電磁界マッピング, 電子情報通信学会論文誌, *J74-B-II* (5), 285-293, 1991.
- [3] Geist, A., A. Beguelin, J. Dongarra, W. Jiang, R. Manchek, and V. Sunderam, *PVM3 user's guide and reference manual*, Oak Ridge National Lab., Oak Ridge, 1993.

- [4] 宮村和俊, 長野 勇, 八木谷聡, 木村磐根, あけぼの衛星の低高度観測におけるオメガ電波強度分布の Full wave 計算による解析, 電子情報通信学会論文誌, *J80-B-II* (7), 595-603, 1997.
- [5] 宮村和俊, 長野 勇, 八木谷聡, 雷放電から放射される VLF 電磁界波形の Full wave 計算, 電子情報通信学会論文誌, *J80-B-II* (5), 387-396, 1997.
- [6] Kelley, M. C., J. G. Ding, and R. H. Holzworth, Intense ionospheric and magnetic field pulses generated by lightning, *Geophys. Res. Lett.*, *17* (12), 2221-2224, 1990.
- [7] Sentman, D. D., E. M. Wescott, D. L. Hampton, and M. J. Heavner, Preliminary results from the Sprites94 aircraft campaign: 1. Red sprites, *Geophys. Res. Lett.*, *22* (10), 1205-1208, 1995.
- [8] Fukunishi, H., Y. Takahashi, M. Kubota, K. Sakanoi, U. S. Inan, and W. A. Lyons, Eleves: Lightning-induced transient luminous events in the lower ionosphere, *Geophys. Res. Lett.*, *23* (16), 2157-2160, 1996.
- [9] 長野 勇, 宮村和俊, 八木谷聡, 木村磐根, 岡田敏美, 橋本弘藏, 電離層中のダイポール波源による VLF 波の強度計算 —HIPAS-あけぼの共同実験の解析—, 電子情報通信学会論文誌, *J76-B-II* (7), 615-624, 1993.
- [10] Yagitani, S., I. Nagano, and K. Miyamura, Full wave calculation of ELF/VLF propagation from a dipole source located in the lower ionosphere, *Radio Sci.*, *29* (1), 39-54, 1994.

学位論文審査結果の要旨

平成9年7月28日に第1回論文審査委員会を開催し、提出された論文及び関連資料について検討するとともに、面接審査を合わせて行った。8月6日の口頭発表後、第2回審査委員会を開催し、以下の通り判定した。

本論文は、地上—大気—電離層領域において、連続波及びパルス波波源からのELF/VLF電波による電磁界分布を計算する手法の開発と、逆問題として科学衛星観測による波動データからの波源パラメータや媒質定数の推定について研究したものである。以下にその内容を要約する。

- (1) 従来から開発されている地上のELF/VLFダイポール波源による電離層中の電磁界分布を計算する手法に対して、平面素波展開にフーリエ変換を用いることと、平面素波電磁界の計算を複数の計算機による並列処理で行うという改良を加えたことにより、計算時間の短縮と電磁界分布の精度と空間解像度の向上を実現した。そして、この計算手法により科学衛星の観測高度におけるオメガ電波の強度分布を計算し、観測結果を十分に説明することができた。
- (2) (1)の手法に時間に関するフーリエ変換を組み合わせることにより、雷放電電流などのパルス波源により発生する電離層中の電磁界分布の時間変化を計算することに成功した。これにより電磁界の時間変化とパルス電流波源のパラメータとの関係が明らかになり、雷放電に起因する電界パルス波形のロケット上の観測結果のシミュレーションが可能となった。

以上の研究成果は電離層のリモートセンシングだけでなく、最近、新たに発見された雷放電に伴う大気発光現象の機構解明にも応用でき、学術的に価値の高いものである。したがって、本論文は博士論文に値するものと判定した。