

気球によるシューマン共振現象の観測*

小川 俊雄**・安原 通博†・藤田 晃††
香西 和子**・川本 洋人**

概 要

1977年10月3～4日に、成層圏の二つの異なった高度(20km及び26km)において、超低周波(ELF)帯の垂直電界成分を約24時間にわたって観測した。これから、シューマン共振が第7モード(44.9Hz)まで存在し、共振電力のピーク周波数にライン・スプリッティングがあることを見出した。高度による共振電力の差が第2モードに観測された。共振周波数と共振電力の日変化と、Q型バーストの例を得た。また、50Hz(商用電源周波数)のノイズが観測された。

1. 序 論

シューマン共振とは、地表面と電離層を両電極とする球殻空洞内における超低周波(ELF)帯電磁波の共振現象である。その電磁波源は、主として地球表面で発生する雷放電であると考えられている。

いま地表面を完全導体と見なし、電離層を電気伝導度 σ の均質導電層と考え、また空電源を電流モーメント Il の垂直ダイポールとすると、ELF帯の電磁波に対するモード方程式の漸近展開から、垂直電界成分 E_r について次式が得られる[1], [2], [3]。

$$E_r \sim -i \frac{Il\nu(\nu+1)}{4\pi a^2 \epsilon_0 \omega h} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(2n+1)P_n(\cos\theta)}{n(n+1)-\nu(\nu+1)} \quad (1)$$

ここで、 a , ϵ_0 , h はそれぞれ地球の半径、真空の透電率及び電離層の実効的な高さで、 P_n は第1種ルジャンドル多項式である。また ν はモード方程式から決定される residue eigenvalue である。(1)式から明らかなように、共振の条件、すなわち $n(n+1) = \nu(\nu+1)$ から地球電離層空洞の固有共振周波数が決定される。いま電離層を完全導体とする簡単な場合には、共振周波数 f_n は

$$f_n = C/2\pi a [n(n+1)]^{1/2} \quad (2)$$

与えられる。ここに C は光速である。(2)式から最初の三つの共振周波数は $f_1 = 10$ 。

* 宇宙研特別事業費による研究論文

** 京都大学理学部

† 京都教育大学

†† 甲南大学理学部

6 Hz, $f_2 = 18.3$ Hz, $f_3 = 25.9$ Hz となる. しかしながら実際の電離層は完全導体ではなく, 電気伝導度の値が有限であるから, 共振周波数は完全導体の場合より低くなる. 実際に地表面で観測される周波数は $f_1 = 7.69$ Hz, $f_2 = 14.1$ Hz, $f_3 = 20.3$ Hz 等である [4]. このことから, 共振周波数の観測によって電離層電気伝導度を地球的規模でモニターすることが可能である. また電磁波源が雷放電であるとすれば, (1) 式からわかるように, 共振電力を観測することによって汎世界的な雷活動度をモニターすることができる. また電界強度は受信点と発振源の相対位置にも依存するから, 共振の次数 n を適当に組み合わせて受信することによって, 雷活動域を地球的規模でモニターできる可能性もある [5].

以上のような理由からシューマン共振現象は, 一方において雷活動度の地球規模での分布のモニターとして, また他方では電離層じょう乱を起こす太陽地球間環境のモニターとしても重要である [6], [7]. また, しばしば観測されるQ型バーストの発生源が雷放電であるかどうかについて疑問もあり [8], さらに多くの例を集める必要がある.

シューマン共振はこのように種々の興味と重要性を含む現象であるが, 地上では人工ノイズのため観測が著しく制約される. 特に商用電源からの 50 Hz 又は 60 Hz の空間放射が強いため, 観測に際しては通常これらの周波数ノイズの除去のためフィルターを用いる. また数 Hz 付近には大気電場のノイズ成分がかなり強く存在する. このような理由のため実際に観測できる周波数帯は主として 6 Hz - 30 Hz の領域に限られる. シューマン共振における電源周波数より高い周波数成分については, Balser and Wagner [9] が 50-100 Hz 帯にも共振が存在すると報告しているが, それ以後はこれを追認する報告がない. 地上における前述のような不利な環境から離れて, 気球を用いて成層圏で観測すれば, 純粋な形のシューマン共振現象をとらえることができ, 50 Hz 以上に共振が存在するかどうかを確認することができる.

次に, 自然の空洞共振器としての上限の電極であると考えられる電離層は, シューマン共振の周波数帯に対してはかなり低い高度 (20 km 程度) から始まると考えてよい [10]. 大気の電気伝導度は上空に向かってほぼ指数関数的に増大するから, 気球高度において多少とも電界強度の減衰が見られるかどうか, また共振周波数が地上と同じであるかどうか興味のある問題である.

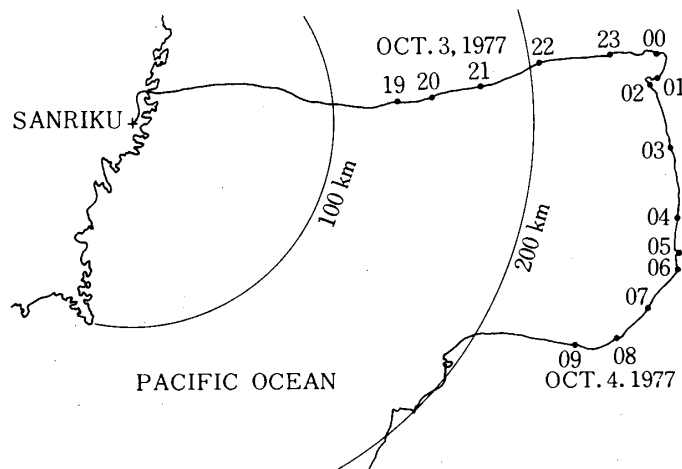
2. 観 測

Ogawa 等 [11], [12], [13] は地表面でのシューマン共振現象の観測に有利なポール・アンテナを考案した. これは, 中空金属導体を点アンテナとして, 地表面上ある高さの空間に絶縁して置き, 大地との間の電位差の変動成分を測定するものである. このとき入力回路の静電容量を小さくする程感度が増大する. この原理を応用して, 直流垂直電場測定用も兼ねた1対のワイヤー・アンテナをゴンドラの上下に配置し, これによって受信された信号は, まず高入力インピーダンス変換器 (入力抵抗 $1 \times 10^{12} \Omega$) を通した後, 増幅回路の中間段から, 5 Hz を下限とするバイパス回路を通してサブキャリア部へ導いた. 用いた I R I G サブキャリアの周波数応答は 160 Hz である. またアンテナの実効長は 7.56 m で, アンテナ入力からサブキャリア入力までの増幅度は約 16 db を用いた. 観測の結果はやや感

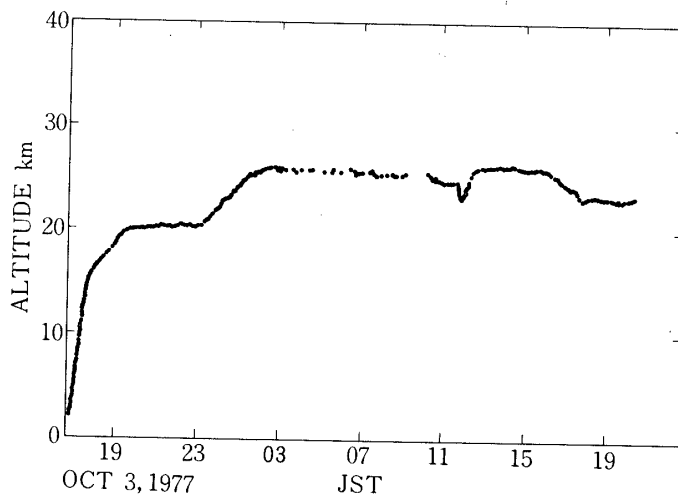
度不足と思われたので、磁気テープ再生出力から周波数解析を行う際には、さらに 20 db の増幅を行った。

観測経過の概要は以下の通りである。1977年10月3日16時42分(JST)、 5000 m^3 の気球を用いてアンテナ系を飛揚した。気球はまず、上昇速度 250 m/min で約 50 分間上昇し、高度約 14 km に達した後、数回にわたって He ガスを放出することによってゆっくり気球の上昇を抑制し、放球後約 3 時間、19時20分には、気球は高度約 20 km において安定に東進する軌道に乗った。この時気球は三陸観測所の東方海上約 140 km の地点にあった。その後気球は順調に東進し、23時20分には距離 245 km の地点に達した。ここでパラスト投下によって気球をゆっくり上昇させ、2時間30分後、02時00分(10月4日)には 26 km の高度に達した。この間 00 時頃より気球は、距離約 260 km のところで速度を落とし、以後約 25-26 km の高度を保ちつつ南進を始め、翌朝 09 時には約 150 km 東へ移動した。このような気球の航跡図と上昇曲線をそれぞれ第 1 図と第 2 図に示す。観測は、従って、18時30分～19時20分には気球上昇時に、19時20分～23時20分には 20 km の一定高度において、23時20分～02時00分には 20 km から 26 km への上昇中に、02時00分以後には高度約 26 km のほぼ一定高度で観測したことになる。09 時に送信電波が停止して観測は一時中断されたが、12時20分再び送信が復活して観測を再開し、20時54分まで観測を行った。

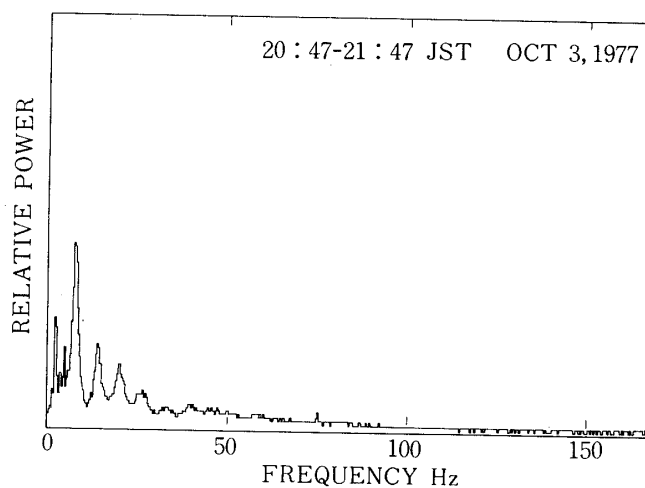
気球飛揚当時、三陸地方は大陸からの高気圧圏内であって、晴れの天気であったが、うすい高層雲が拡がりつつあった。当時日本の南岸沿いに前線があり、前線上の四国沖には低気圧があって東進しており、翌 4 日の午後には気球に近づいた。受信中断以後には気球の位置付近の天候がわるく、同時に測定した直流電場成分には、降水雲の影響と思われる変化が観測された。このような環境の下で ELF 帯の自然電磁雑音にどのような影響が現われるかに興味があったが、解析結果からは、特別の影響はなかった。



第 1 図 気球の航跡



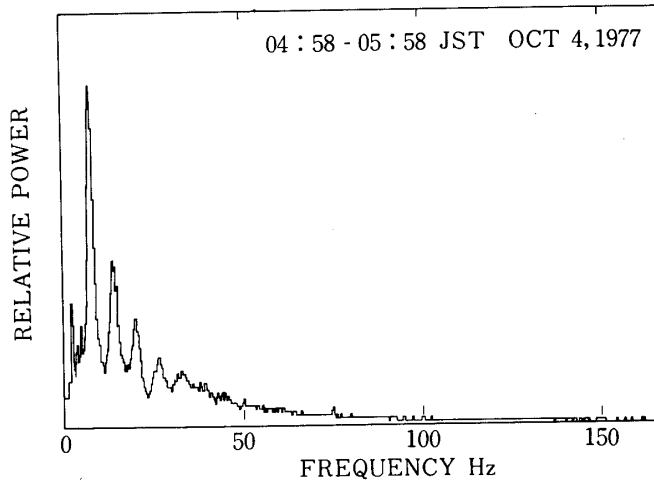
第2図 気球飛しよう高度の時間変化



第3図 周波数上限を166Hzとして解析したパワー・スペクトルの例

3. 結 果

観測結果はいったん磁気テープに録音され、後でその再生出力をFFT (fast fourier transform) 方式のスペクトル解析器にかけてパワー・スペクトルを求めた。第3図と第4図に、周波数範囲166Hz、すなわち観測された最高周波数までを含むパワー・スペクトルの解析例を示す。これらから明らかにシューマン共振現象が観測されていることがわかる。共振のスペクトルのピークは第7モードまで存在するが、第5以上のモードについては急速に減衰しているように見える。従って Balsler and Wagner [9] が指摘したような50-100Hz帯に、共振スペクトルが存在するようには認められない。第3図と第4図を比較すると、後者の場合の背景電力が前者よりずっと大きく、時間変動が激しいことがわかる。

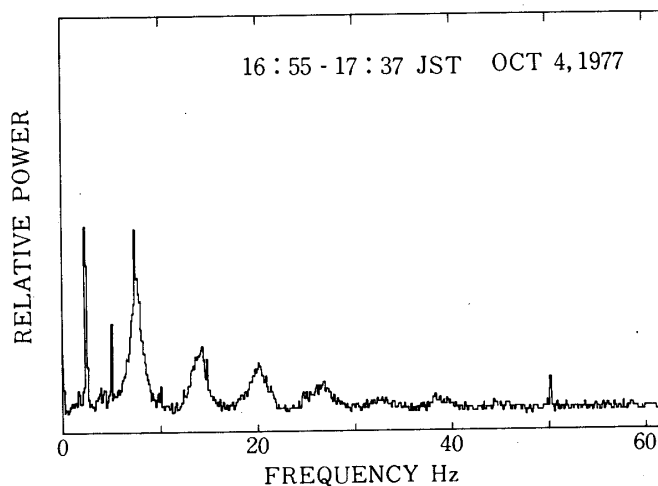


第4図 周波数上限を166Hzとして解析したパワー・スペクトルの例。ただし第3図と日時が異なる。

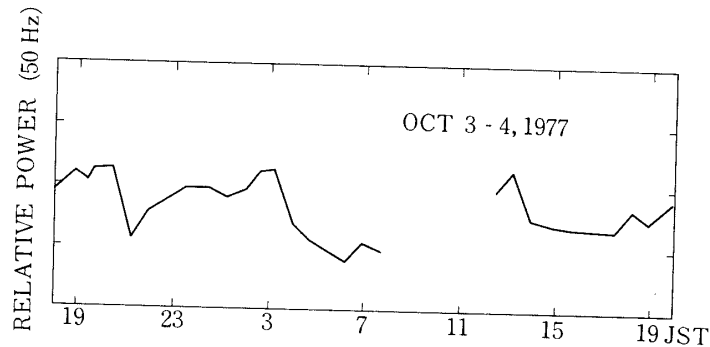
このような共振電力の時間変化については第9図で述べる。

次に最高周波数を62.5Hzとして解析したスペクトルの例を第5図に示す。この例からシューマン共振の第7モードまでのピーク周波数を読みとると、それらは7.67, 14.0, 20.1, 26.4, 32.9, 39.2及び44.9Hzとなる。

第5図のスペクトルには、50Hzの商用電源周波数に相当するところに鋭いピークが認められる。これが、商用電力線からの空間放射が成層圏まで到達したものであるのかどうかを検討するため、50Hzノイズの値を背景雑音レベルからの差として読みとってその時間変化を求めた。第6図がその結果であるが、ノイズは本州からの距離とともに減少する傾向



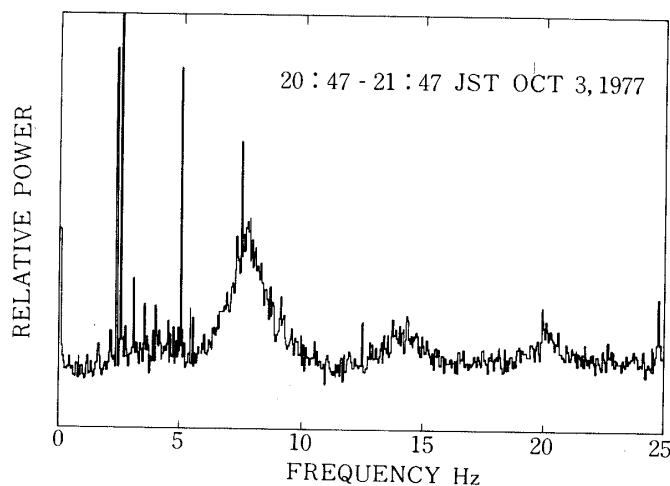
第5図 周波数上限を62.5Hzとして解析したパワー・スペクトルの例



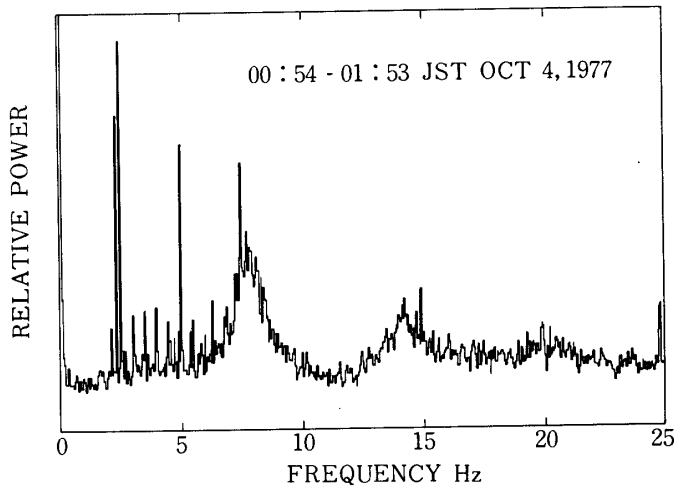
第6図 50 Hz ノイズの時間変化

を示さない。電力線からの放射がどの場所から、どのような時間変化で行われるかが明らかでないため、結論を得ることはできない。今後の観測によってさらに詳しく調査したい。なお、約 2.4 Hz, 5.0 Hz, 7.4 Hz に現われた鋭いノイズは、スペクトルの形から人工ノイズと判断され、おそらく受信時にデータ・レコーダの回転部分から発生したものと考えられる。

シューマン共振の第 1, 2, 3 モードに主として着目するため、周波数範囲をさらに狭く、25 Hz としてとった 1 時間の平均スペクトルの例を第 7 図と第 8 図に示す。これらから共振周波数近傍の様子がよくわかる。第 7 図における第 2 モードと、第 8 図における第 1 モードの共振では、いずれも共振周波数のピークが二つ以上に分裂しているように見える。このような分裂型のピークは、通常ライン・スプリッティング (line splitting) と呼ばれる。スプリッティングは地球磁場の効果によって、共振器である地球電離層球殻空洞が非一様、非等方性をもつため生ずると考えられているが、実在の共振器では Q 値が低いため、直接観測することは困難であるとされていた [14]。これに対し Tanahashi [15] は Chirp Z 変



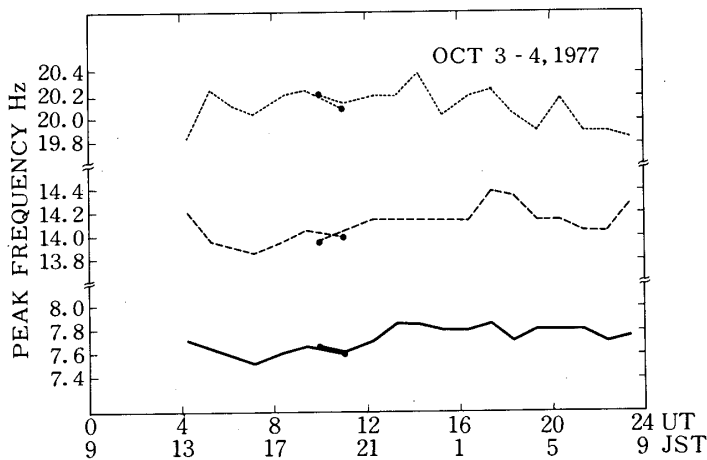
第7図 周波数上限を 25 Hz として解析したパワー・スペクトルの例



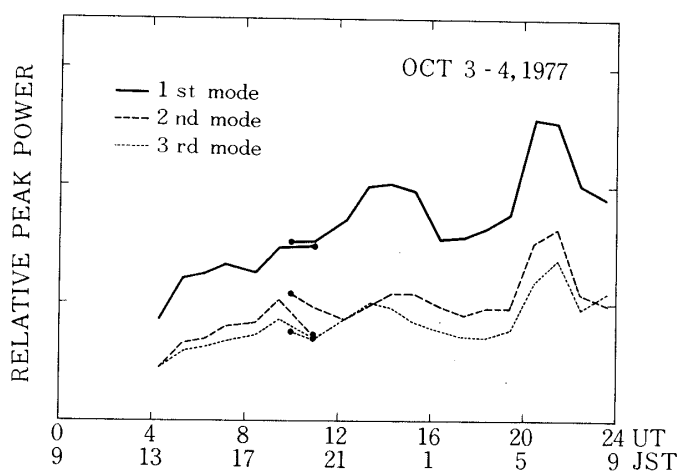
第8図 周波数上限を25 Hzとして解析したパワー・スペクトルの例。ただし第7図と日時が異なる。

換の方法を用いてデータを解析すると、スプリットングが常に現われることを示したが、この方法はまだ一般に普及していない。またスプリットングの別の原因として、2箇所以上の空電源からの電磁波を同時に受信した場合、(1)式からわかるように、それぞれの源による電界強度極大が現われて、スペクトルのピークが分裂することが考えられる。いずれにせよ今まで実験的にははっきりしたデータに乏しかったスプリットングの現象がこの観測ではっきり現われた。

第7図、第8図は1時間の平均スペクトルであって、このようにして求めた1時間毎の平均スペクトルから、各モードの振幅極大の周波数を読みとって求めた、主要3モードの共振周波数の日変化を第9図に示す。観測の最初と最後とで、各モードとも共振周波数がほとん

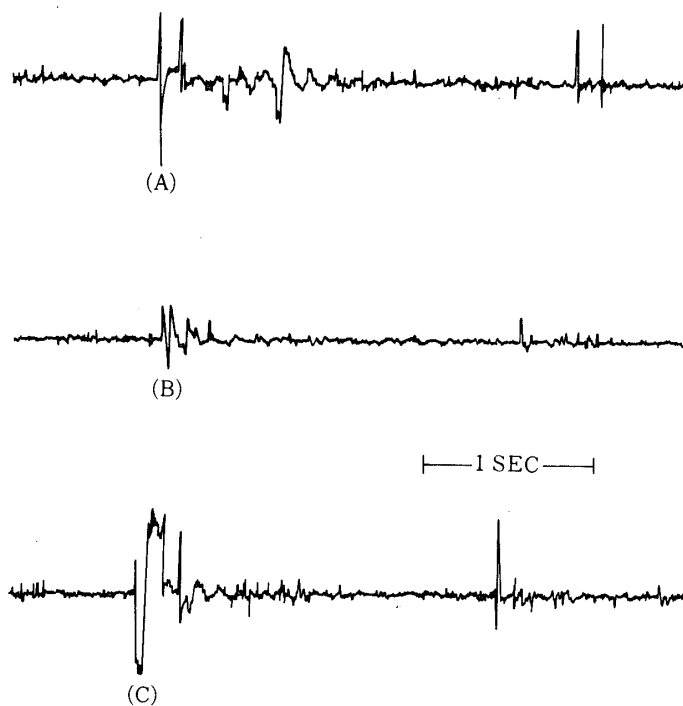


第9図 共振周波数の日変化



第10図 パワー極大値の日変化

ど一致している。このことは、空胴の境界を形成する電離層の汎世界的電気伝導度分布が、両日の同時刻の観測において共振に影響する程の変化がなかったことを意味すると同時に、電磁波源である雷発生地域の世界的分布がやはり変化しなかったことを意味するものと考えてよいであろう。



第11図 Q型バーストの記録例

第9図から1, 2, 3モードについて1日の平均値を求めると、それぞれ7.7 Hz, 14.1 Hz, 20.1 Hzとなる。これらを地上での観測値[4]と比べると、1, 2モードでは両者が一致するが、第3モードでは気球高度の方が0.2 Hz低い。

次に第9図を求めるのに用いた一連のパワー・スペクトルから、共振電力の極大値の日変化を求めて第10図に示した。(1)式から明らかなように、受信強度は空電源強度に比例する。そして空電源は主として雷活動と考えられているので、結局受信強度は汎世界的にみた雷活動頻度に比例することになる。このような汎世界的雷活動は一般に19-20時(UT)に極大、4時(UT)頃に極小となると推定されている[16]。第10図では、極大値は21時(UT)に、また極小値は、一時観測中断のためやや不確実ではあるが、4時(UT)頃に現われており、空電源が雷活動であるとする上記の推定を裏付けている。

第10図の観測の最初と最後は2日にまたがる同じ地方時での観測であるが、後の方が第2モードで約20%小さい値を示している。観測時の気球高度が、第2図からわかる通り、それぞれ最初20 km、最後に26 kmであったため、この高度差による影響が観測されたのではないかと思われる。しかし第1と3モードにははっきりした差が現われなかったため、これについての結論も将来に残さざるを得ない。

以上述べたようなシューマン共振現象は、一般にランダムな波形を有する背景雑音を解析して得られるものであるが、時には単発で振幅の大きい減衰型バーストにも共振が見られる。第11図に三つの例を示す。これらはQ型バーストと呼ばれ、一般にはVLF帯に及ぶ高い周波数成分を含まない[11]。Ogawa等[8]は、第11図の例より振幅のずっと大きい特別の1例について、カリフォルニアのPalo Alto、ハワイのKauai島、南極大陸付近のKergelen島と日本で同時に観測された例を検討し、地球外起源のものである可能性もあるとしている。Q型バーストの減衰特性がはっきりしている場合は、これから地球電離層空洞のQ値を求めることができる[17]が、今回の観測ではそれ程典型的な例が得られなかった。

4. ま と め

1977年10月3~4日に、成層圏の2つの高度、20 kmと26 kmにおいて超低周波帯の電磁ノイズを観測し、はじめて成層圏におけるシューマン共振現象のスペクトルを得ることができた。これらから、共振モードが第7モードまで存在することを確認し、共振周波数と電力の日変化を得た。高度の差による共振電力の差が第2モードに見い出されたが、結論するには資料不足である。ピーク周波数には明らかなライン・スプリッティングが現われた。また、50 Hzの商用電源周波数のノイズがスペクトルに現われたが、これが地上の電力線からの実際の空間放射の影響であるかどうかについてはまだ断言はできない。

最後に、この観測に際して終始御協力下さった、東京大学宇宙航空研究所三陸大気球観測所西村純教授、広沢春任助教授、その他研究室の方々に厚く御礼を申し上げます。またデータ解析に際して京都大学防災研究所後町幸雄助教授の協力を負うところが大きかった。ここに記して感謝します。

1978年5月27日

参 考 文 献

- [1] W. O. Schumann : Z. Naturforsch. **7A** (1952) 149
- [2] D. L. Jones and D. T. Kemp : J. Atmos. Terr. Phys. **32** (1970) 1095
- [3] J. Galejs : Terrestrial Propagation of long Electromagnetic Waves. Pergamon Press, New York (1972)
- [4] T. Ogawa, Y. Tanaka and M. Yasuhara : Contributions Geophys. Inst. Kyoto Univ. **8** (1968) 15
- [5] C. Polk : in Planetary Electrodynamics. **2** edited by S. C. Coroniti and J. Hughes, Gordon and Breach, New York (1969) 55
- [6] T. Ogawa, Y. Tanaka, T. Miura and M. Owaki : Rep. Ionos. Space Res. Japan **20** (1966) 528
- [7] T. Ogawa and Y. Tanaka : Special Contributions Geophys. Inst. Kyoto Univ. **10** (1970) 21
- [8] T. Ogawa, Y. Tanaka, M. Yasuhara, A. C. Fraser-Smith and R. Gendrin : J. Geomag. Geoelectr. **19** (1967) 377
- [9] M. Balser and C. A. Wagner : J. Research NBS D, **64D** (1960) 415
- [10] T. Ogawa and Y. Murakami : Contributions Geophys. Inst. Kyoto Univ. **13** (1973) 13
- [11] T. Ogawa, Y. Tanaka, T. Miura and M. Yasuhara : J. Geomag. Geoelectr. **18** (1966) 443
- [12] T. Ogawa, Y. Tanaka and T. Miura : Special Contributions Geophys. Inst. Kyoto Univ. **6** (1966) 9
- [13] T. Ogawa : Contributions Geophys. Inst. Kyoto Univ. **13** (1973) 111
- [14] P. V. Bliokh, A. P. Nikolaenko and Yu. F. Filippov : Ukrainian Phys. J. **14** (1969) 604
- [15] S. Tanahashi : J. Atmos. Terr. Phys. **38** (1976) 135
- [16] F. J. W. Whipple and F. J. Scrase : Geophys. Memoi. Lond. **68** (1936) 1
- [17] S. Handa, T. Ogawa and M. Yasuhara : Contributions Geophys. Inst. Kyoto Univ. **11** (1971) 11