



Title	地震に先行するVHF（FM放送波）散乱波の観測的研究
Author(s)	森谷, 武男; MORIYA, Takeo; 茂木, 透 他
Citation	北海道大学地球物理学研究報告, 68, 161-178
Issue Date	2005-03-15
DOI	https://doi.org/10.14943/gbhu.68.161
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/14368
Type	departmental bulletin paper
File Information	68_p161-178.pdf



地震に先行する VHF (FM 放送波) 散乱波の観測的研究

森谷 武男

北海道大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻

茂木 透・高田 真秀・笠原 稔

北海道大学大学院理学研究科地震火山研究観測センター

(2005年1月11日受理)

Observational Research for VHF (FM radio broadcasting Waves) Scattering Waves as a Precursor of Earthquake Occurrence

Takeo MORIYA

Division of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Hokkaido University

Toru MOGI, Masahide TAKADA and Minoru KASAHARA

Institute of Seismology and Volcanology, Graduate School of Science, Hokkaido University

(Received January 11, 2005)

In order to confirm that VHF scattering electromagnetic (FM radio broadcasting) wave beyond line-of-sight transmit before earthquake occurrence, we have tentatively installed five observatories in Hokkaido, and started observation on December, 2002. We introduce here the result of observation containing statistical characteristics of some parameters of the abnormal transmission. We think that before 66 earthquakes, which occurred in and around the northern Japan and Hokkaido until November 2004, the scattering waves had observed. We found that logarithm of the total duration time of anomalous transmission, $\text{Log}(T_e)$, has important information about Magnitude (M) of earthquake, though T_e seems to be function of many parameters containing depth of hypocenter, distance to and power of broadcasting station, and surface condition of the Earth, that is sea or land. Beneath southern Hidaka Mountains, depth of hypocenter concentrates in a narrow range from 48 to 54 km, and relation between $\text{Log}(T_e)$ and M has good linearity. We could show that the scattering wave as a precursor of earthquake really exists. It is possible to analyze statistically duration time of the scattering waves, therefore monitoring of the scattering VHF FM radio waves observation is much useful to forecast earthquake occurrence.

I. はじめに

地震に先行する現象として、FM放送波が通常の到達範囲を越えて伝播することが知られてい

る。Kushida and Kushida (2002)によれば、伝播異常は数週間前から現れ、受信機の出力波形にはいろいろな特徴があるという。本来彼らの目的は流星観測であって、電離層のF層付近に流星が突入すると1秒間ほど電離層が生じ、これによるFM放送の反射波を観測することで流星の数を計測していた。使用している受信機は1980年代の比検波回路型音声復調回路を有するアナログ同調型であり、アンテナは鉛直方向に向けられている。彼らは偶然にFM放送の異常伝播波と地震の間に関係があることを発見した。注目すべきことは異常継続時間がマグニチュードに関係があると主張している点であるが、理論的な背景は全くわかっていない。このために素人の思い込みによる地震予知と決めつける考えがあるが、VHFに限らず広い帯域の電磁波が異常な伝播することは電気通信大学の早川研究室(Hayakawa, 1996; Fukumoto et al., 2002)、千葉大学の鷹野研究室(Sakai et al., 2001)、および東京学芸大学の鴨川研究室も研究を行っているこの現象を確かめている(Fujiwara et al., 2004)。著者もやはり何らかの真実が秘められていると考えて観測的な研究を始めた。Kushida and Kushida (2002)の方式では音声回路出力からは電界強度を取り出すことはできないので、同調をおよそ0.1~0.15 MHzずらして比検波回路出力から電界強度の変動を観測できるようにしている。この方式を彼らはセンターチューニング法と呼んでいるが、シフトチューニング法と呼ぶべきであろう。この方式で観測される地震前の異常波形には、基線がゆっくりとうねるタイプと細かい震動の振幅が次第に大きくなりまた元に戻るという二つのタイプがあるという。彼らはこの現象の原因については震央上の電離層に異常が現れるためであるといっている。またPilipenko et al. (2001)もこの異常電波伝播現象に興味を示し、E層付近に異常があることを考えている。しかしこの現象は大気内に散乱体が生じ地球の曲率による陰を越えてFM放送波が伝播することは間違いない。Fukumoto et al. (2000)は調布小金井に受信点を設け、仙台のFM放送の周波数にセットして方向や仰角の異なるアンテナを持つ6台のデジタル同調受信機で観測し、直接電界強度の測定をおこなった。地震と関連があった散乱波は水平または45度の仰角のアンテナを持つ受信機が強い電界強度の変動を記録したが鉛直のアンテナを持つ受信機ではほとんど変動は観測できなかった。またアンテナの素子の向きを鉛直にして仰角を水平に向けた受信機では地震に関係する散乱波(地震散乱波)は観測されていなかった。本来FM放送は水平偏波で行われているが、電離層でこれが反射されるとファラデー回転により垂直偏波成分も混入するはずである(Ichinose and Kainuma, 1996; Smith and Matsushita, 1962)。しかし実際には受信されないことや仰角の低いアンテナが強い散乱波を観測したので、地震散乱波が電離層よりも低い大気圏内の孤立した散乱体で発生している可能性が高いことを示している。このことはFujiwara et al. (2004)も確認した。また放送波の無い周波数(80.8, 80.9, 81.0 MHz)を受信していた受信機は常に何も受信していなかった。散乱波は自然界のノイズとは関係がないことを示している。Fujiwara et al. (2004)は埼玉県日高町で仙台のFM放送波を夜間の4時間だけ観測し、関東東部から福島県から千葉県沖の太平洋で発生した地震(M>4.8)について明らかな前兆的異常伝播が起こっていたことを示した。著者らはFM放送の散乱波と関連したと思われる地震との間に定量的な関係があるのかどうかを検証するために、2002年12月から

観測を始めた。本稿では地震散乱波を観測するための装置および観測結果について述べる。

II. 観 測 装 置

著者らが試行錯誤の実験的観測によって会得した装置の仕様・特性や受信機の改良箇所は次のようになっている。

1. アンテナの設置

5～10素子のアンテナを使い、仰角を10～20度に設置して、探査したい領域の方向または目標とする放送局の方角へ向けた。方向が同じで複数の受信機を使用する場合には分波器を使用することもある。アンテナの設置は強風に耐え、積雪に埋まることが無いようにした。場合によっては融雪ヒーターを使用した。Fig. 1は幌延町問寒別におけるアンテナ及び受信機収納コンテナの設置状況である。

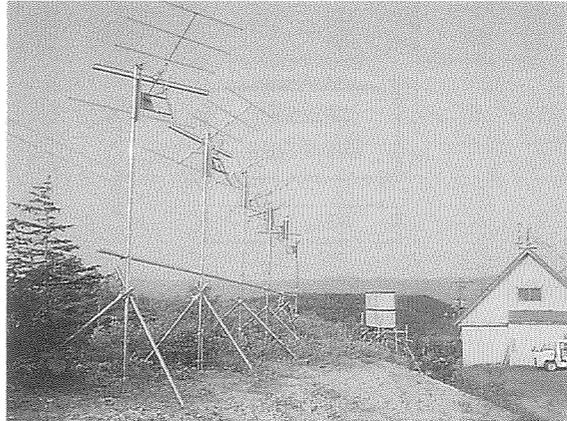


Fig. 1. View of antennas and container for VHF observing radios at Toikanbetsu, northern Hokkaido (TKB).

2. 受信機の選定とその設置

受信機にはできるだけ高感度で、同調周波数の安定したPLLデジタル同調の受信機を使った。多数の受信機を使用するのでそれぞれの受信機の感度をできるだけそろえた。受信機に供給する電力は安定化しノイズフィルターを付けた。放送局の周波数は0.1 MHz 間隔で決められているが、FM ラジオの帯域幅は0.35 MHz である。したがってもしも遠方から散乱波が伝播してくると混信することが考えられるので、これを避けるために受信機内部の中間周波増幅器に用いられているセラミックフィルターを350 KHzのものから13 KHzのものへと交換して帯域幅を狭くした。本来FM放送波の側波は広いスペクトルを持っているので狭くしても混信の可能性はあるが、できるだけ混信の影響を少なくするために狭帯域に改造した。また受信機に電界強度が直接出力できる端子を設けた。本観測では受信機内部に使われているIC (TA 8132 AF) のAGC (auto gain control) 端子を使用した。AGC回路はアンテナ入力信号レベルが -60 bdm を越えて大きくなると作動し始める。一方、散乱波は -100 から -60 db 程度の間で変動するのでAGC回路が散乱波強度の測定に影響することはほとんど無い。受信機の電源にはノイズフィルター付きの安定化電源を用いた。ただしスイッチング電源はVHF帯でのノイズを発生しているので使用できなかった。市販の受信機 (パナソニック, RF-U 99) は感度にばらつきが大きいので低い場合はセラミックフィルター後にトランジスター1個の増幅回路 (8～14 db) を付加して調節した。AGC端子からの出力レベルはデータ

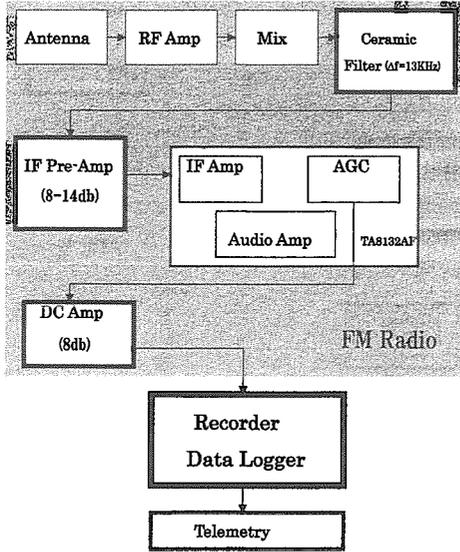


Fig. 2. A block diagram of observing system. Bold squares denote modified and attached circuits in Panasonic Radio.

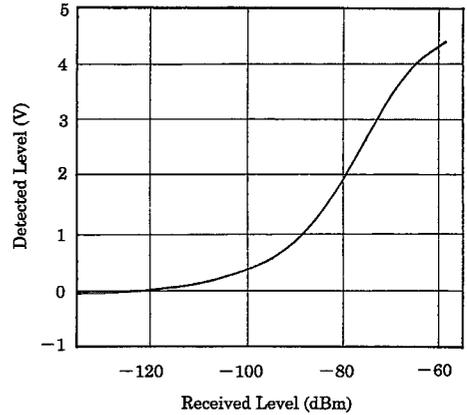


Fig. 3. Sensitivity curve of modified Panasonic radio.

ロガーに対して低いので8 dbの直流増幅器を付加した。Fig. 2には観測装置のブロックダイアグラムを、またFig. 3にはアンテナ入力に対する出力電圧の特性をそれぞれ示してある。受信機は室内の計測機器から放射されるノイズを避けるため屋外のプラスチックコンテナ内部に収納する。冬季低温時の性能劣化を保証するためにヒーターを使用した。

3. 観測点の選定

観測にふさわしい場所は当然のことながら電磁波ノイズは極力低いことが望ましい。場所の選定には十分な調査が必要である。大きな観測所では他の観測機器がノイズを発生していてACラインなどを介して外部に漏れていることがあるので注意が必要である。

4. 放送局の選定

目標とする放送局については同一周波数を持つ局は避けるようにした。やむをえない場合は観測点から見てより遠方の局が小出力である局を選んだ。また選定した局の±0.1, 0.2 MHz異なる局が観測点の近くにある場合には側波の影響が出て混信することがあるので十分な試験観測をして受信しないことを確かめる必要がある。通常時には受信しなくとも地震前の伝播異常時やスプラディックE層の擾乱時には影響することがあった。なおFM受信機は、受信周波数の10.7 MHz(中間周波数)だけ下側の発信を行っておりこれが妨害となって同一観測点では10.7 MHz下側に離れた放送局を受信することはできない。

5. データロガーなど

ロガー自身が出すノイズが観測に影響しないように受信機から数十メートルは離して設置することが必要であった。データのサンプリング周波数は 1 Hz とした。データはテレメータによりできるだけ早く監視者に送られることが重要で、地震発生のある程度の解析・解釈が行われなければならない。ロガーから直接電話回線を経由して北大の研究室のパソコンによるダイヤルアップによるか、観測点にパソコンを置いて一度ロガーからデータ転送を行い、ADSL などのパソコン間通信で北大の研究室へデータ転送を行っている。2004 年 11 月現在稼働中の観測点は次の 5 か所である (Fig. 4)。札幌市南区硬山の札幌地震観測所 (HSS)、エリモ地殻変動観測所 (ERM)、弟子屈地震地殻変動観測点 (TES)、天塩中川地震地殻変動観測点 (TNK)、幌延町北大天塩研究林内 (TKB)。それぞれの観測点では 3 - 8 台の受信機がおかれている。各観測点でのアンテナの方向と受信周波数は Fig. 5 に示してある。TES では放送波が割り当てられていない周波数 (80.8 - 81.0 MHz) を受信して雷や太陽フレアなどから発生する自然ノイズも観測してスホラディック E 層の擾乱や地震散乱波との識別に役立っている。

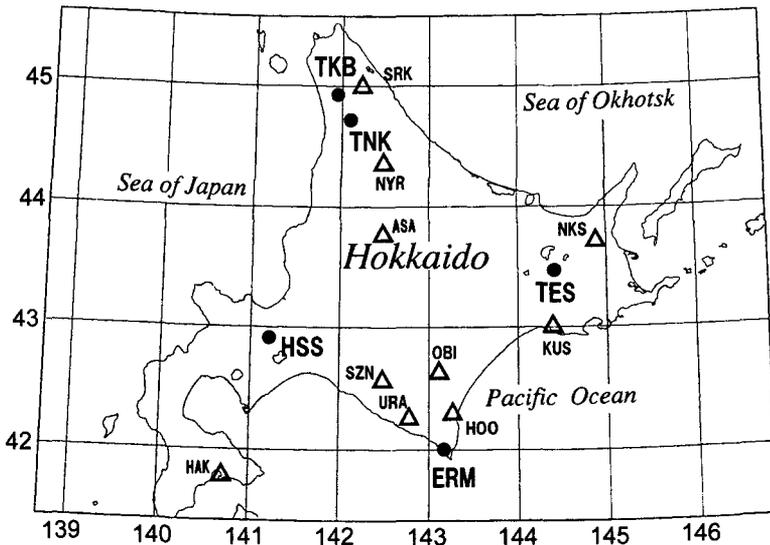


Fig. 4. Locations of observing stations (●) and FM radio broadcasting stations (△) in Hokkaido.

III. 探査領域の設定

Kushida and Kushida (2002) によれば地震散乱波は観測点と放送局の中間点付近の地震活動に対して関連するようである。彼らのモニターしている伝播経路は 1000 km にもおよぶ。このため中間地点付近の面積は大変広いので、どの地震と関連するかはかなり恣意的な判断となるであろう。伝播距離を短くすると地震の特定の精度は高くなる。散乱体がどのくらいの高さに出現す

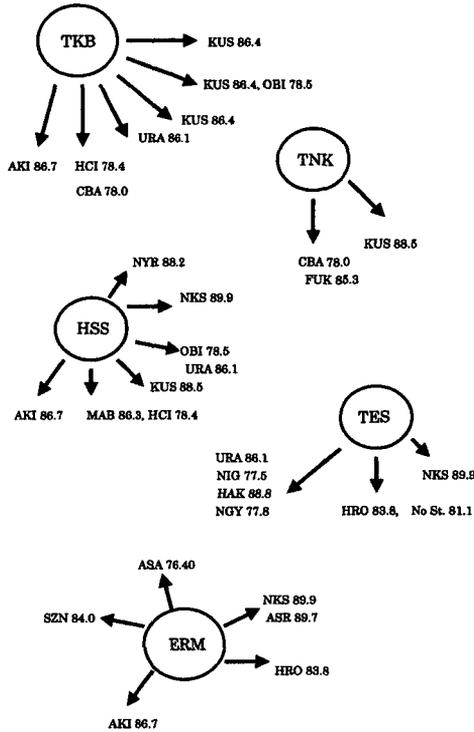


Fig. 5. Antenna directions and monitoring frequencies at five stations. The broadcasting stations are selected not to have duplicated frequency to other stations.

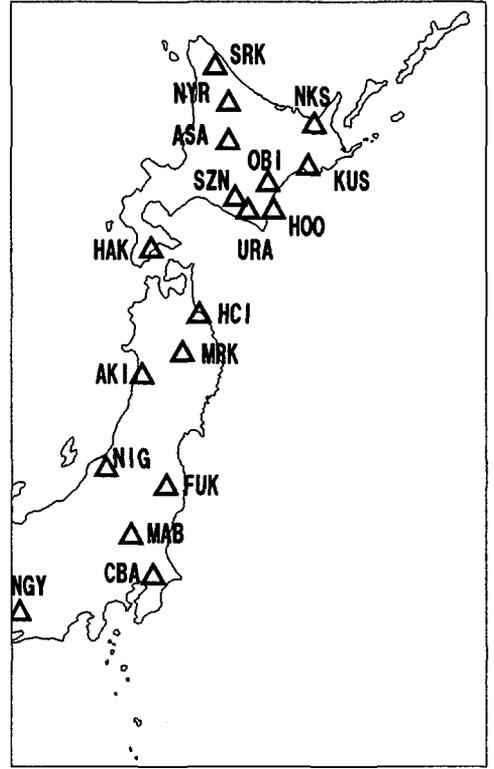


Fig. 6. Locations of FM radio broadcasting stations used for our observation in the northern Japan.

るかは良くわかっていないが、Fukuda et al. (2000)の観測からは100 kmよりはかなり低いようである。もしも10 km程度であれば伝播距離を50 km程度に設定することも可能であると考えられた。散乱体の高度が低い場合には遠距離で受信しようとする時には地球の曲率によって生ずる陰になり不可能である可能性もある。北海道における観測ではこのような問題を考慮して短い電波距離では約30 km (ERM-広尾NHK局)から、長い場合では約1200 km (TES-FM名古屋局)にまで設定している (Fig. 6)。北海道内では距離が比較的短いので探査領域は放送局周辺から中間点程度であろうと考えている。北海道東部から南千島にかけての海域領域をモニターするためには試行錯誤が必要であろう。散乱体がFukuda et al. (2000)の観測が示すように海域の地震であっても海岸域に強く出現するのであれば海域の監視は困難が予想される。現在弟子屈観測点ではアンテナを南東へ向けて、実際には北東方向にある中標津局からの電波で地震散乱波を受信しようとしている。もしも根室沖や国後島沖に散乱体が出現すると地震散乱波が観測される可能性があるからである。通常この中標津局の放送波は-70~-60 dbm程度のレベルで受信されているが、このレベルを越えて地震散乱波が観測されることがあった。

IV. 記 録 例

電波伝播異常として知られている現象には、流星による散乱、航空機による反射、スプラディック E 層 (Es) の擾乱による伝播、そして地震に係する散乱がある。その他に大気間放電や太陽フレアの活動によって電波ノイズが観測される。これらの受信波形は独特の形であり、波形から判別ができる。流星による散乱波形の継続時間はほとんどが短く 1 秒程度である。航空機による反射波の時間変化はゆっくりしていて滑らかに変化し、継続時間は 2 - 3 分である。Es の擾乱は数 100 km の広がりがあり、ほとんどの観測点で同時に激しく出現する。活発な場合には GPS 観測によって得られる総イオン量 (TEC) に大きな変動が現れることが多いので、関係しているホームページを参考にすると判別・同定ができる。雷放電は観測点近傍で発生したものが短いパルスとなってすべての受信機に同時に現れる。太陽フレアの活動は汎地球的規模で同時に観測される。これら二つのノイズは放送波の無い周波数 (上述) にチューニングした受信機にも受信されることで判別される。地震散乱波の特徴は、100 km 程度の近距離では急なレベルの増加、減少として階段状の波形となるが、遠方の場合には急に立ち上がりレベルは激しく変動する場合が多く数分間継続した後、急にもとのレベルに戻ることが多い。Fig. 7 a~7 d には以上でのべた波形の例を示す。

V. 2003 年 9 月 26 日十勝沖地震 (M8.0) に先行して観測された散乱波

弟子屈観測点 (TES) は北海道東部釧路および根室沖の異常を検出することを目的として設けられた観測点である。特に 1952 年十勝沖地震の再来を予測し、その前兆がもしも存在するのならばどのようなものであるかを観測することを目的とした。ところが観測を開始した次日 (9 月 4 日) から広尾局の放送波に異常が観測され始め、その後 16 日までほぼ毎日観測された。その記録を Fig. 8 に示す。また 9 月 10 日には札幌 (HSS)、TES および幌延 (TKB) において同時に異常が観測された (Fig. 9)。TES では 9 月 16 日までに散乱波の継続時間の合計が 1007 分間に達した。この後 HSS では本震発生まで釧路局の放送波の周波数に連続的なノイズが現れた。地震発生後これは Kushida and Kushida (2002) が定義した“BT 異常”であったことが推定された。我々の観測では“BT 異常”はこの他にはほとんど観測されず統計的な評価はできなかった。9 月 20 日ごろの時点では複数の中規模地震の発生が考えられたが、“BT 異常”については受信機の故障が原因であると考えていた。

VI. 地震散乱波の統計的な性質

2002 年 12 月から TNK と HSS で観測を開始した。その後 2003 年 3 月に ERM、9 月に TES および TKB の観測を始めた。2004 年 11 月までに起きた 2003 年十勝沖地震 M 8.0 とその余震を含む 66 個の東日本の主な地震について、関連すると考えられる地震の前に地震散乱波を観測した (Table 1)。また散乱波を観測できそうでできなかった中規模の地震はその推定理由と共に Table 2 に示した。地震散乱波の出現と地震との時間的な関係は Kushida and Kushida (2002)

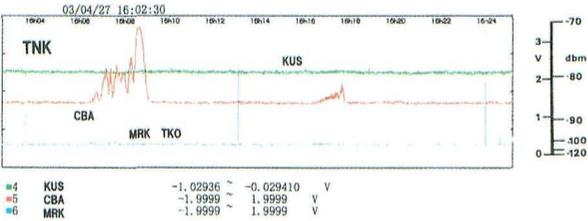
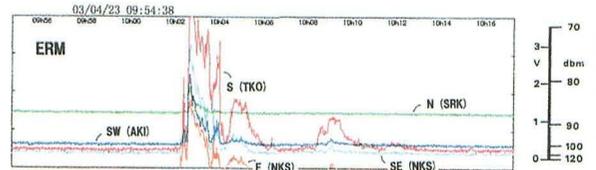
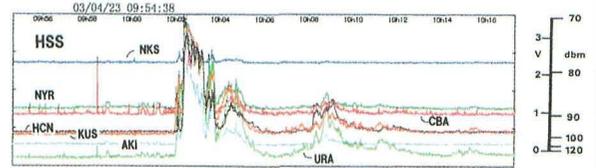
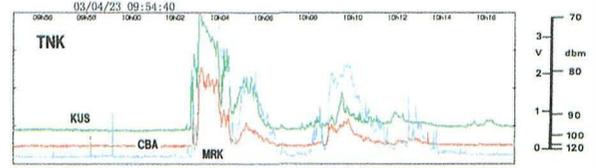
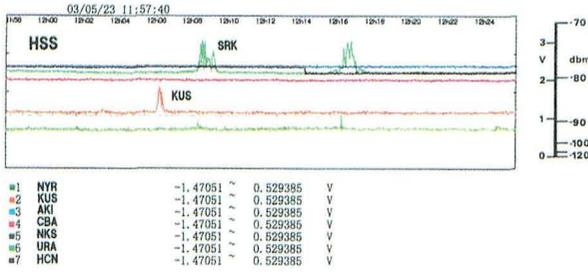


Fig. 7a. Example records of airplane reflections observed at HSS and TNK.

Fig. 7b. Example records of electromagnetic waves coasted by Solar flares simultaneously observed at TNK, HSS and ERM, on April 23, 2003.

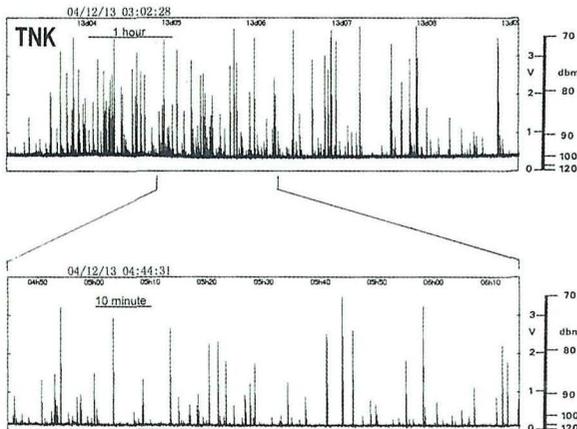


Fig. 7c. Example records of meteor reflections from Gemini, observed at TNK on 13 Dec. 2004.

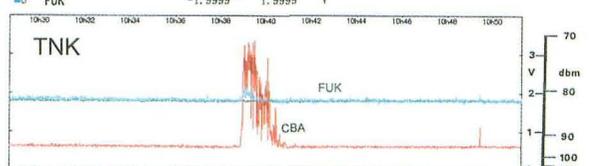
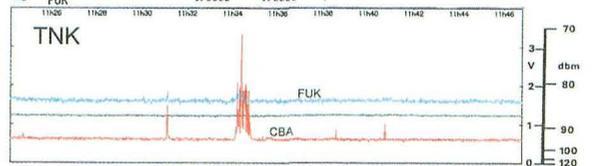
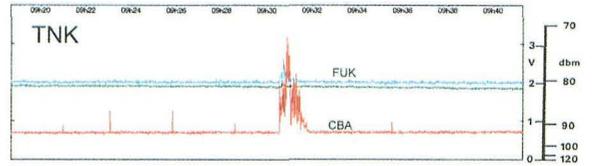


Fig. 7d. Example records of scattering FM radio waves from Chiba (CBA) FM station, observed at TNK, before earthquake, M5.7, which occurred on 20 Sep. 2003, near Boso peninsula, central Japan, in the depth of 70 km.

TES 03, Sep. 04

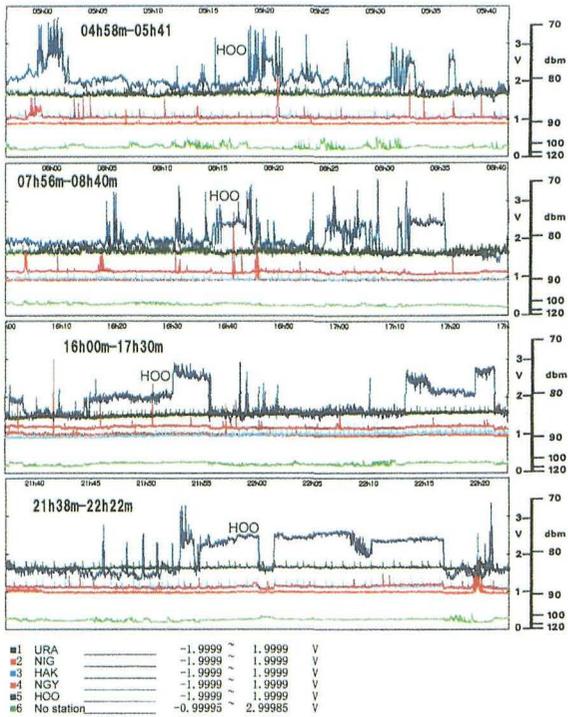


Fig. 8. Records of scattering FM radio waves from Hiroo (HOO) station, observed at TES, 22days before 2003 Tokachi-oki Earthquake, M8.0.

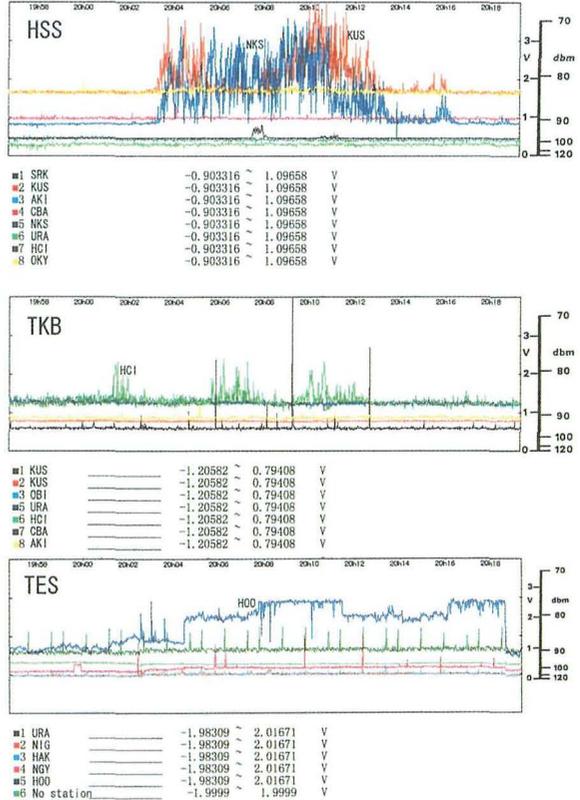


Fig. 9. Records of scattering FM radio waves observed simultaneously at HSS, TKB and TES, 16 days before 2003 Tokachi-oki Earthquake, M8.0.

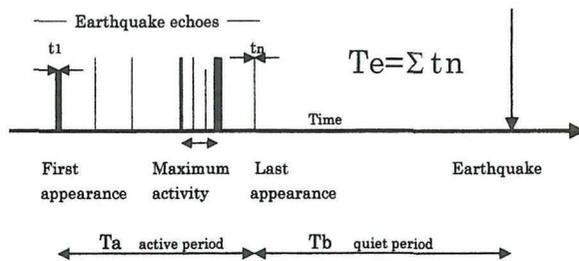


Fig. 10. Time chart of the scattering VHF waves observed before earthquake. Ta: Active period of the scattering waves, Tb: quiet period between the last appearance and earthquake, Tc: period between the most active time and earthquake, Te: Total duration time of the scattering waves.

Table 1. List of earthquakes, before which scattering electromagnetic waves had observed.

Y	M	D	H	M	E	N	D	M	Ta	Te	Tb	Tc	Rg*	Obs & Broadc Stns.	Ref*		
2002	12	01	18	57	143	58.1	42	39.6	103	5.4	6	10	5	9	C	HSS→Kus, Nks	1
2002	12	13	19	57	143	10.0	42	20.5	47	3.9	2	5.5	7	9	L	HSS→Kus, Nks	1
2002	12	23	05	31	139	59.2	36	12.0	55	4.1	9	6.0	5	6	L	TNK→Chb, Mrk	1
2002	12	29	04	23	143	27.9	42	35.5	53	4.0	9	24	9	14	L	HSS→Kus, Nks	1
2003	01	01	07	29	146	17.6	44	43.0	203	5.1	9	9.3	2	4	S	HSS→Nks	1
2003	01	06	13	42	142	21.3	41	03.8	45	4.9	12	9.2	4	16	S	HSS→Aki, Chb,Hci	1
2003	01	15	12	23	145	00.6	42	51.4	47	4.2	14	8.8	3	4	C	HSS→Kus, Nks	1
2003	01	28	20	09	142	04.5	41	19.7	25	4.5	9	2.5	2	7	S	HSS→Ura, Hci, TNK→Mrk, Chb	1
2003	02	13	04	17	144	39.9	43	33.0	12	4.1	5	29	9	10	L	HSS→Nks, Kus	2
2003	02	19	14	01	141	51.0	44	07.0	222	6.1	18	4.5	8	16	L	HSS→Srk, TNK→Mrk	2
2003	03	16	14	35	143	00.5	42	29.7	100	4.6	19	52	2	12	L	HSS→Kus, TNK→Mrk	1
2003	04	08	03	28	141	57.6	36	22.2	24	5.8	18	5.4	2	11	S	TNK→Chb	1
2003	04	14	12	46	143	07.3	42	21.7	50	4.3	8	17	3	4	L	HSS→Kus, Nks	1
2003	04	17	02	59	142	20.7	40	57.4	40	5.4	6	12	3	4	S	TNK→Mrk, HSS→Chb, Aki, Ura	1
2003	05	01	18	11	143	04.6	41	54.7	40	4.0	10	30	5	4	C	HSS→Ura, Nks, Kus, ERM→E,ES	2
2003	05	12	00	57	140	05.3	35	51.9	47	5.2	25	21	7	15	L	TNK→Chb	1
2003	05	26	18	24	141	40.9	38	48.3	71	7.0	18	195	2	3	C	TKN→Mro, Chb	1
2003	07	20	02	25	140	17.5	41	27.5	09	4.1	6	21	1	6	L	HSS→Aki	2
2003	07	26	07	13	141	10.4	38	24.1	12	6.2	17	79	6	9	L	TNK→Fuk	1
2003	08	18	18	59	140	06.7	35	48.0	69	4.6	11	12	3	7	L	TNK→Chb	1
2003	08	30	19	06	142	40.4	41	48.7	55	5.4	11	3	8	8	C	ERM→Sap, Asa	1
2003	09	20	12	54	140	18.2	35	12.9	70	5.7	28	36	4	18	C	TNK→Chb	1
2003	09	26	04	50	144	04.7	41	46.7	42	8.0	15	1006	8	7	S	HSS→Kus,Hci,TKB→Hci,Ura, TES→Hro	2
2003	10	05	00	30	137	17.0	36	00.2	15	4.5	5	16	9	12	L	HSS→Oky	2
2003	10	08	18	06	144	43.0	42	28.6	29	6.5	6	38	6	11	S	HSS→Nks, Kus, TES→Hro, TKN→Kus	1
2003	10	15	16	30	140	03.1	35	36.6	74	5.1	8	5.0	5	8	L	TNK→Chb	1
2003	10	18	18	32	143	50.6	43	25.4	08	4.5	6	2.8	3	4	L	HSS→Nks, Kus	1
2003	10	31	10	06	142	41.9	37	49.7	33	6.8	13	8.5	4	15	S	TNK→Fuk, Chb, TKB→Aki, Chb, Hci	2
2003	11	07	02	37	143	09.8	42	16.4	46	3.9	20	57	4	17	L	HSS→Kus	1
2003	11	15	03	43	141	10.1	36	25.7	48	5.8	6	5.3	4	6	C	TNK→Chb, Fuk	1
2003	11	23	07	00	141	07.8	35	34.3	39	5.1	7	9	2	3	C	TNK→Chb, Fuk	1
2003	11	24	21	18	143	00.3	42	18.8	52	5.3	17	96	3	7	L	HSS→Kus, TNK→Kus	2
2003	12	03	23	11	144	49.1	42	23.4	15	5.9	6	136	7	9	S	TES→Hro, 1	
2003	12	13	12	32	134	18.0	34	33.3	15	4.6	58	359	4	26	L	HSS→Oky	1
2003	12	12	10	46	143	02.0	42	28.9	59	5.0	14	123	4	5	L	HSS→Kus	1
2003	12	22	17	47	144	41.7	42	19.8	34	5.7	9	8.6	5	6	S	HSS→Nks	1
2003	12	29	10	30	144	45.5	42	25.0	39	6.0	6	40	6	10	S	HSS→Kus, Nks	2
2004	01	23	18	01	141	07.8	37	15.5	66	5.3	24	18	2	6	C	TNK→Fuk, Chb	2
2004	02	07	09	10	143	44.7	43	18.1	03	2.4	21	2307	6	23	L	TES→Hoo	2
2004	02	15	21	52	143	07.1	42	21.2	51	4.8	20	26.4	9	14	L	HSS→Kus	1
2004	02	17	16	46	145	59.8	43	05.5	46	5.6	1	14	5	5	C	TKB→Kus	1
2004	03	19	13	10	143	18.8	43	27.8	10	3.0	14	709	7	8	L	TES→Hoo	1
2004	03	27	00	20	144	22.5	41	45.3	37	5.8	1	6.5	2	2	S	TKB→Obi	2
2004	04	04	08	02	141	09.4	36	23.2	49	5.8	9	2.5	6	9	C	TNK→FUK,Chb	1
2004	04	12	03	06	144	59.8	42	49.7	47	5.8	8	156	3	7	C	TES→Hoo	1

2004	04	28	12	52	143	22.1	43	18.2	5	3.1	10	6.7	4	10	L	HSS→Nks	2
2004	04	28	18	16	139	50.6	36	54.7	8	4.0	9	3.2	6	9	L	TNK→Fuk, Chb	1
2004	05	06	22	43	145	07.2	42	28.3	43	5.7	1	1.5	4	4	S	TKB→Obi, Kus	2
2004	05	21	23	27	144	42.6	43	44.1	5	4.8	23	81	1	2	L	HSS→Nks	1
2004	05	29	12	47	142	01.4	37	39.6	38	5.9	9	57	1	1	C	TNK→Fuk, Chb	1
2004	06	11	03	12	143	08.0	42	19.1	48	5.2	4	387	3	4	L	ERM→Hoo	1
2004	06	12	02	05	142	11.9	40	01.8	55	4.6	10	70	1	9	C	HSS→Hci	1
2004	06	19	14	45	142	50.4	42	13.8	27	4.1	8	95	0	1	L	ERM→Hoo	1
2004	07	07	23	13	145	21.9	42	26.5	49	5.0	11	43	2	10	S	TES→Nks	1
2004	07	29	13	08	143	06.4	42	25.7	50	4.7	2	76	2	3	L	ERM→Hoo	1
2004	08	03	03	00	142	59.4	42	21.0	54	3.1	2	6	0	1	L	ERM→Hoo	1
2004	08	22	17	28	145	04.2	43	23.0	91	4.0	13	133	1	6	L	TES→Nks	1
2004	08	26	04	57	143	00.6	42	19.9	53	3.7	6	4.5	0	0	L	ERM→Hoo	1
2004	09	01	11	49	141	47.0	36	55.1	31	5.6	21	21.5	5	16	S	TNK→Fuk, Chb	1
2004	09	03	07	01	142	55.2	42	14.2	54	4.1	6	13	2	2	L	ERM→Hoo	1
2004	09	10	13	22	143	06.3	42	21.2	51	5.1	2	225	1	2	L	ERM→Hoo	1
2004	10	08	04	26	143	07.2	42	20.4	50	5.1	22	381	5	20	L	ERM→Hoo	1
2004	10	17	09	11	142	59.0	42	20.6	53	3.8	1	19	3	3	L	ERM→Hoo	1
2004	10	30	07	02	140	49.2	39	04.5	9	3.2	1	16	5	8	L	ERM→Akt	1
2004	11	11	19	02	144	29.3	42	04.6	39	6.3	2	117	1	2	S	TES→Hoo	1
2004	11	27	07	42	143	05.0	42	19.4	51	5.6	18	805	8	10	L	ERM→Hoo	1

Ref*:

1: noticed before earthquake

2: noticed after earthquake

Rg*:

L: land, S: sea, C: coast

が指摘しているように地震の数週間から数日前に、継続時間が数分から数時間の散乱波が観測され始め、一日に数回現れる。最後に現れた日から数日後地震が発生する (Fig. 10)。我々はいろいろな時間的なパラメータ (Fig. 10 の Ta, Tb, Tc, および Te) を設定して地震パラメータ、とくに深さとマグニチュード (M) との関係について調査した。最も注目しているのは地震散乱波の継続時間の合計、総継続時間 (Te) である。Kushida and Kushida (2002) は Te に相当する時間は M と関連があると主張している。一般的に言えることは、地表で観測される地震の前兆現象は、もしも存在すれば M が大きいほど広く、強く現れ、また震源の深さが深いほど弱くなるであろう。このことは地殻構造が均質な構造である場合であって、実際の地殻の電磁気的な構造はきわめて不均質であるから大雑把に考えても陸域と海域とは分けて扱う必要があろう。Kushida and Kushida (2002) はこのことを考慮していないで Te と M との関係を述べている点に疑問が残る。観測された Te の常用対数 $\text{Log}(Te)$ と M のプロットは Fig. 11 a と Fig. 11 b とに示してある。海域の地震の $\text{Log}(Te)$ は陸域の地震のそれよりも短い。また相当のばらつきがあって直線性はよくない。陸域の地震ではさらに乱れている。震源の深さが極めて浅い地震活動 (上土幌の群発地震、斜里岳南麓の群発地震など) も 2003 年十勝沖地震の後に発生しており、これらに関係した地震散

Table 2. List of moderate magnitude of earthquakes, before which scattering waves had not observed.

Y	M	D	H	M	D	M	Region	Reason*
2003	01	21	13	19	47	5.0	off Ibaraki Pref.	3,4
2003	02	16	12	03	63	5.0	off Fukushima Pref.	3,4
2003	03	03	07	46	41	5.8	off Fukushima Pref.	3
2003	04	29	22	53	18	5.9	E off Hokkaido	3,6
2003	05	17	23	33	47	5.1	near Choshi, Chiba Pref.	5
2003	05	26					some after shocks of the off Miyagi Pref. Earthquake	5
2003	06	16	18	34	77	5.0	Northern Miyagi Pref. Earthquake	1
2003	07	03	08	52	33	5.8	off Tokachi	1,3
2003	07	08	13	30	41	5.2	off Kushiro	3,4
2003	07	26					some after shocks of the Northern Miyagi Pref. Earthquake	5
2003	09	26	—	11	30		some aftershocks of the Tokachi-oki Earthquake	3,4
2003	11	23	17	56	44	5.2	off Fukushima Pref.	3,4
2003	11	24	18	48	55	4.8	Hidaka Mts.	5
2003	12	27	6	35	30	5.2	off Kushiro	3,4
2004	01	15	9	10	106	5.1	off Kunashiri Is.	2,4
2004	02	04	15	08	63	5.3	N coast of Iwate Pref.	2,4
2004	02	17	16	46	46	5.6	off Nemuro	6
2004	03	03	4	37	37	5.4	off Nemuro	6
2004	03	11	11	34	48	5.3	off Ibaraki Pref.	4
2004	03	18	16	04	32	5.3	off Kushiro	3,4
2004	05	08	18	42	11	5.0	off Sanriku	3,4
2004	05	16	16	20	25	5.0	off Hachijyo Is.	6
2004	05	30	05	56	23	6.7	off Hachijyo Is.	6
2004	06	13	14	55	65	5.3	off Sanriku	6
2004	06	22	11	17	29	5.0	off Tokachi	3,4
2004	06	26	06	42	37	5.0	off Akita Pref.	3,4
2004	07	03	03	59	23	5.2	off Erimo	3,4
2004	07	17	15	10	69	5.5	off Boso Peninsula	1
2004	07	20	05	58	98	5.0	Hidaka Mountains	2,4
2004	08	10	15	13	48	5.8	off Iwate Pref.	1
2004	08	17	12	01	47	5.1	off Erimo	4
2004	08	19	20	40	73	5.0	off Fukushima Pref.	4
2004	08	21	05	33	38	5.4	off Boso Peninsula	4
2004	09	05	19	07	38	6.9	off Tokai	6
2004	09	05	23	57	44	7.4	off Tokai	6
2004	10	06	23	40	66	5.7	Chiba Pref.	7
2004	10	17	03	54	49	5.7	off Ibaraki Pref.	7
2004	10	23	17	56	13	6.8	Niigata Pref.	6

*Reasons:

- 1 Interrupted by Es activity
- 2 No Eq-echo (deep hypocenter)
- 3 No Eq-echo (deep sea region)
- 4 No Eq-echo (small magnitude)
- 5 Duplicated (± 4 days) with another earthquake
- 6 Out of detectable region
- 7 Trouble of instruments

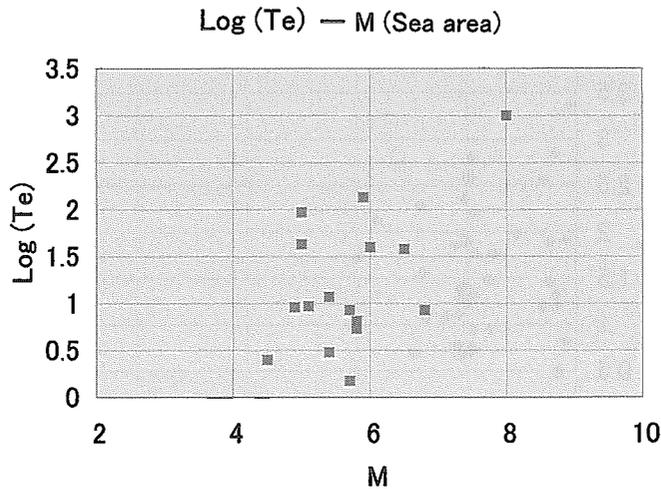


Fig. 11a. Plots of Log (Te) versus Magnitudes of earthquakes, which occurred in the oceanic region near northern Japan.

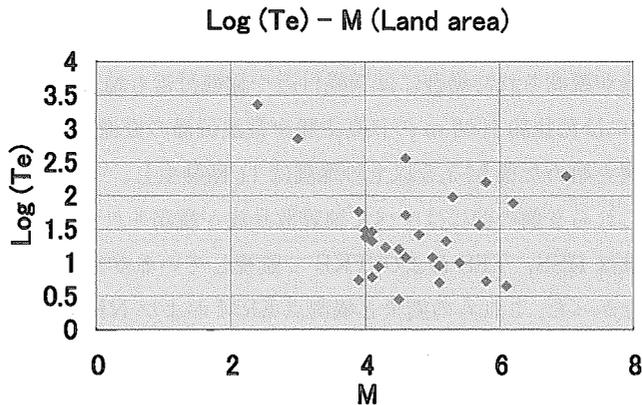


Fig. 11b. Same as Fig. 7a but for earthquakes, which occurred in the land area in northern Honshu and Hokkaido.

乱波は非常に長く続いた。震源の深さと Te の関係を Fig. 12 に示してある。Te の最大値のトレンドは震源の深さが浅いほど長い傾向がはっきりしている。Te を決定するパラメータは多数存在すると考えられ、それらは M, 震源の深さ, 放送局の出力, 放送局から受信点までの距離, 地表の状況(海か陸か, 陸の場合は岩盤か地盤か), および受信機の感度などであろう。もしも深さが一定の地震活動があれば, Te の性質がはっきりわかるはずである。

VII. 日高山脈南部の地震群と散乱波

日高山脈南部には深さが 50 km 付近に地震活動の集中域がある。ここは 2003 年十勝沖地震の

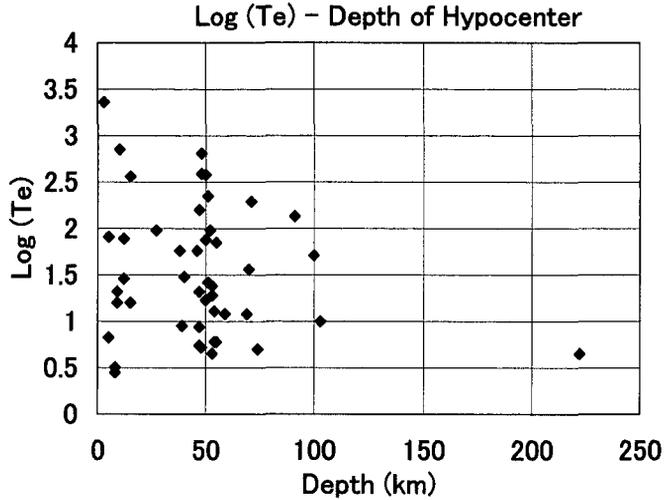


Fig. 12. Plots of Log (Te) versus depths of hypocenters of earthquakes.

余震域でもあるために、現在は地震活動が活発である。ERM では 30 km しか離れていない NHK 広尾局（この周波数は 83.8 MHz で北海道内には羽幌と遠軽に同一の周波数を持つ送信所がある。そのために散乱波が観測された場合には羽幌付近や遠軽付近も地震発生の可能性がある）も監視している。その間には海拔約 1000 m の日高山脈が電波伝播の直進を妨げている。2004 年 6 月からこの経路での観測を始めた後 M 3.5 以上の地震は 11 回発生し、それらの深さは 2 個を除き 48~54 km であってこれら 9 個の前にはすべて地震散乱波が観測されている。ただし震源域に近い浦河局からの放送波は HSS, TES および TKB で監視しているが日高山脈南部の地震に対して散乱波は観測されなかった。これらの震央と観測点 ERM および NHK 広尾局の位置を Fig. 13 に示す。深さがおよそ 50 km の 9 個の地震と深さ 27 km の地震 1 個に対する Te と M との関係を図 14 に示す。しかし深さが 98 km, M 5.0 の地震（震央は Fig. 13 の +印）も発生したが関係した地震散乱波は観測されなかった。このように震源の深さが一定ならば Te と M との間には直線的な関係があることがわかる。しかしまだ起こっていない地震の深さを知ることはできないので M を推定することはできない。次に注目しているパラメータは、地震散乱波が最後にあらわれた時間から地震発生までの静穏期 Tb である。観測された Tb の最短時間は日高山脈南部の地震で 20 時間、最も長い時間は 9 日であった。全地震についての Tb のヒストグラムを Fig. 15 a に、日高山脈の地震についてのそれを Fig. 15 b にそれぞれ示す。Ta と Tc の M や深さに対する関係は大きくばらついて特に意味があると考えられる結果にはならなかった。

VIII. 考察・結論

Kushida and Kushida (2002) が主張している FM 放送波の異常伝播は地震の前に現れることが確かめられた。ERM におけるわずか 30 km しか離れていない広尾局の監視記録は日高山脈の

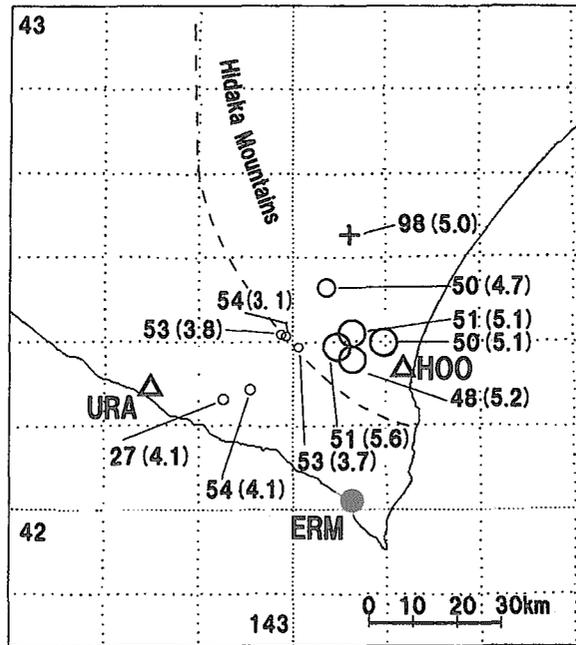


Fig. 13. Locations of epicenter of eleven earthquakes, observing station ERM, FM stations HOO and URA, and summit of Hidaka Mountains (broken line). Numerals and those of in parentheses denote depth of hypocenter of and magnitude of earthquakes, respectively.

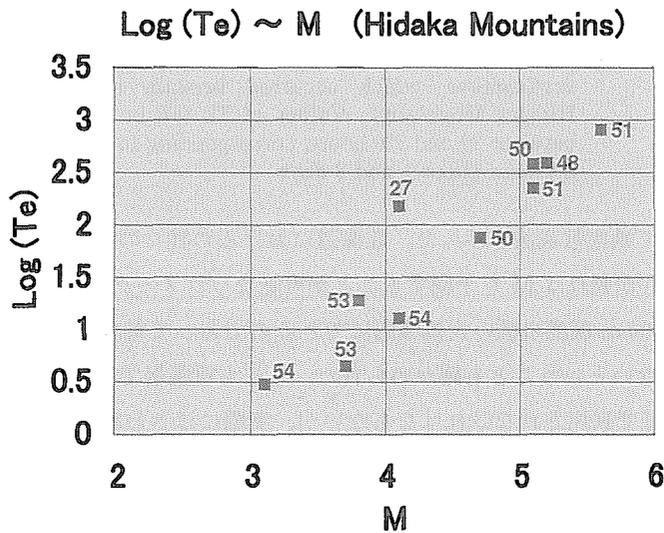


Fig. 14. Plots of Log (Te) versus Magnitude of earthquakes which occurred beneath southern Hidaka Mountains. Numerals are depth of hypocenter in km.

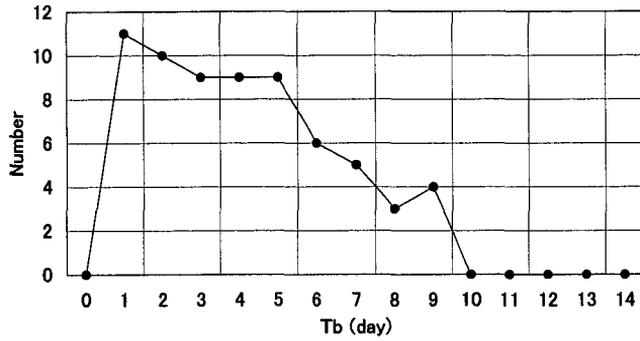


Fig. 15a. Histogram of T_b (unit is day) for 66 earthquakes.

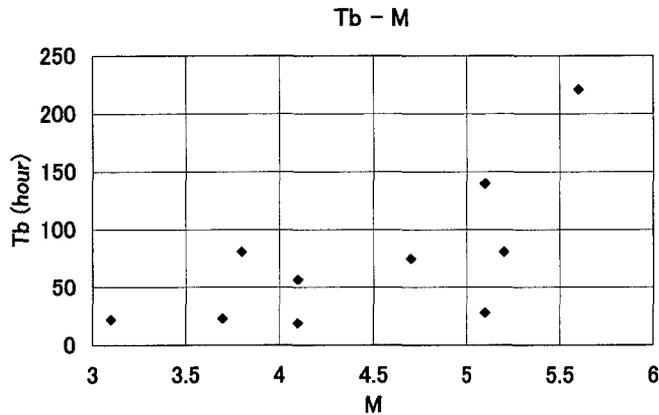


Fig. 15b. Plots of T_b (unit is hour) versus magnitude of earthquakes, which occurred beneath southern Hidaka Mountains. Values of T_b fall in a range between 20 and 220 hours, corresponding to a range between about 1 and 9 days.

地震のみに関連して地震散乱波を示した。北海道におけるの我々の観測によって初めて総継続時間 T_e は震源の深さが判れば M を予測することが可能なパラメータであることが示された。さらに、散乱体は数 1000 m 程度の低い大気圏内のできるのであって電離層などという非常に高い場所にはできるのではないということも確かめられた。もしも電離層で散乱波が生ずるのであれば半径数 100 km の領域で観測されなければならないが、実際にはきわめて狭い領域でしか観測されなかった。千葉局、福島局の地震散乱波は房総半島沖や福島県沖の M 約 5.5 以上の地震や宮城県沖地震 (2003 年 5 月 26 日 M 7.0)、宮城県北部地震 (同年 7 月 26 日 M 6.2) などに反応して地震散乱波を発生させたが、関東地方内陸部の地震についてはよくわからなかった。また 10 月 23 日に新潟県中部で発生した中越地震については、TES で監視していた新潟局からの散乱波を観測できなかった。これらの観測結果から 500 km 以上離れた場所の異常は地球の曲率の陰になるほど

の低い大気中に発生し、遠方では検出できないということが言えそうである。北海道からの観測からは関東東海岸付近が観測できる限界であろう。

地震予知計画が始まって40年が経とうとしているが地震散乱波の観測によって地震予知は可能になるのでしょうか？地震散乱波には地震の深さに関する情報は含まれていないので、 T_e から直接 M を推定できない。 M は深さとトレードオフの関係にあるため、また海域と陸域では T_e との関係が異なるため、将来起こる地震の領域および深さを推定することは確率的な予報でしか言い表すことはできない。このような意味で地震予知(=100%当たる地震予報)は不可能である。例えば、釧路放送局の散乱波が合計100分観測されたとする。もしも海域の地震であれば M は6から7の地震が予想され、沿岸部の震源の深さが50~60 kmの地震であれば M は5.5から6.0の地震が予想される。しかしもしも内陸の地殻内部の深さ10 kmに震源がある地震ならば M は4~5程度の小地震となる。どれが起こるかはその時点での地震活動の推移から判断しなければならないであろう。我々の観測では、大きい M の地震の前には複数の経路について散乱波が観測され散乱体の存在が広範囲に分布していることを予想させた。しかし広域的に観測される異常が大きい地震の前兆とは限らない。静穏期間 T_b の値から判断すると100 km程度はなれていて1週間程度の間隔で発生する地震は区別ができないので M 6程度の地震が1週間程度の間隔で連発する可能性もある。おそらく他のあらゆる地震の物理的前兆現象は地震散乱波と同じように深さ情報を持っていないと思われるので、地震予知は困難であろう。ただし地震散乱波では静穏期間 T_b は1~8日間であり、なんらかの規模の地震が起こることはかなりの高率で言えるので、注意深く長期的かつ短期的な地震活動の推移を追跡することで確率的に地震予報を出せるはずである。

地震散乱波の観測はいまだに試行錯誤の最中である。その発生理由は不明だが地表付近や大気中の電磁場の測定が鍵を握っていきそうである。これからも観測装置の改良や観測項目を増やすことでより確実な地震前兆としてのVHF散乱波観測の方法を確立したい。確かなことは、地震散乱波は地震の発生に深く関係していることで、著者らの観測経験が多くのの人々に興味を持つきっかけとなることを期待している。

謝辞 研究するきっかけを与えてくださった八ヶ岳南麓天文台串田嘉男氏に感謝します。観測点設置作業には以下の方々に援助をいただいた。記して感謝します。北海道大学理学研究科小山順二教授、東海大学総合科学研究所馬場久紀助教授、名古屋大学大学院環境学研究科地震火山観測研究センター山田守技官、東北大学大学院理学研究科院生小泉洋介氏、同植原稔氏、北海道大学北方生物圏フィールド科学センター天塩研究林(林長野村睦博士)の北条元技官および浪速彰彦技官。またFM受信機の感度をキャリブレーションするために精密発信機を貸与していただいた岡山大学工学部山本勲教授、銀河電磁波について教えていただいた広島市立大学情報科学部吉田彰顕教授、および我々の観測データに肯定的議論をしていただいた北海道大学理学研究科渡部重十教授に感謝します。さらに終始研究を励ましていただいた東海大学上田誠也教授に感謝しま

す。本研究課題は2004年8月に発表された「地震予知のための新たな観測研究計画（第2次）」平成16年度実施計画に新たに盛り込まれました。関係各位に深く感謝します。

文 献

- Fujiwara, H., M. Kamogawa, M. Ikeda, J. Y. Liu, H. Sakata, Y. I. Chen, H. Ofuruton, S. Muramatsu, Y. J. Chuo and Y. H. Ohtsuki, 2004. Atmospheric anomalies observed during earthquake occurrences, *Geophys. Res. Lett.*, **31**, L17110.
- Fukumoto, Y., M. Hayakawa and H. Yasuda, 2002. Reception of over-horizon FM signals associated with earthquakes, *Seismo Electromagnetics: Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling*, Eds. M. Hayakawa and Molchanov, 263–266.
- Hayakawa M., 1996. Electromagnetic precursors of earthquake: Review of recent activities, *Rev. Radio Sci.*, 1993-1996, Ed. By W. Ross Stone, Oxford Univ. Press, 807pp.
- Ichinose, M., and S. Kainuma, 1996. Polarization characteristics of VHF radio waves reflected by the Es-Layer, *IEEE Trans. Broadcasting*, **42**, 82–87.
- Kushida, K. and R. Kushida, 2002. Possibility of earthquake forecast by radio observation in the VHF band, *Journal of Atmospheric Electricity*, **22**, 239–255.
- Pilipenko, V., S. Shalimov, S. Uyeda, and H. Tanaka, 2001. Possible mechanism of the over-horizon reception of FM radio waves during earthquake preparation period, *Proc. Japan Academy*, **77**, Ser. B, 125–130.
- Sakai, K., T. Takano and S. Shimakura, 2001. Observation system for anomalous propagation of FM radio broadcasting wave related to earthquakes and preliminary result, *J. Atmos. Electr.*, **21**, 71–78.
- Smith, E. K., Jr. and Matsushita (Eds), 1962, *Ionospheric Sporadic E*, Pergamon, New York, 391pp.