



Title	地震に先行するVHF帯散乱波の観測的研究(II)
Author(s)	森谷, 武男; 茂木, 透; 高田, 真秀 他
Citation	北海道大学地球物理学研究報告, 72, 269-285
Issue Date	2009-03-15
DOI	https://doi.org/10.14943/gbhu.72.269
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/38159
Type	departmental bulletin paper
File Information	19_Moriya.pdf



地震に先行する VHF 帯散乱波の観測的研究 (II)

森谷 武男・茂木 透・高田 真秀

北海道大学大学院理学研究院附属地震火山研究観測センター

山本 勲

岡山理科大学工学部

(2009 年 1 月 20 日受理)

Observational Research for VHF Scattering Waves Prior to Earthquakes (II)

Takeo MORIYA, Toru MOGI, Masamitsu TAKADA

Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Hokkaido University
and

Isao YAMAMOTO

Faculty of Engineering, Okayama University of Science

(Received January 20, 2009)

A new observation system established in Hokkaido, northern Japan to confirm a suspected relationship between anomalous radio-wave propagation and impending earthquakes has been documenting anomalous VHF-band radio-wave propagation beyond the line of sight prior to earthquakes since December, 2002. During such events, radio waves transmitted from an FM radio station were scattered, such that they could be received by an observation station beyond the transmitting station's line of sight. A linear relationship was established between the logarithm of the total duration time of the anomalous transmissions (Te) and the magnitude (M) or maximum seismic intensity (I) of the impending earthquake for M4- to M5-class earthquakes that occurred at depths of about 50 km beneath the Hidaka Mountains in Hokkaido, Japan in June 2004 and March 2008 as reported in the previous paper (Moriya et al., 2005). Similar linear relationships are also valid for earthquakes that occurred at other depths. Te is longer for shallower earthquakes and shorter for deeper ones. Numerous parameters seem to affect Te , including hypocenter depths and epicentral surface conditions (i.e., sea versus land). This relationship is

important because it means that pre-seismic, anomalous transmission of VHF-band waves may be useful in predicting the size of an impending earthquake.

To avoid misidentification of FM stations that have identical frequencies, three 64 MHz band transmitters were established, each with a unique frequency. Earthquakes that occurred in and around eastern Hokkaido scattered waves from FM-band and 64 MHz-band stations and provided quantitative relationships between Te and M , and between Te and I .

Using the interferometer at the TES observation site, the incident azimuth of the scattering waves from the Hiroo station was measured. Prior to two earthquakes that occurred beneath almost the same part of the Tokachi region at depths of 86 km and magnitudes of M 4.9 and 4.0, the interferometer yielded incident azimuths of S18W and S34W. The true azimuths from TES to the hypocenters of the two earthquakes were S35W and S38W, respectively. These two measurements, therefore, suggest that anomalous transmission of VHF waves is caused by scattering at the epicenters of impending earthquakes.

1. はじめに

地震発生の前に電波の伝播異常が起こることが知られている (Hayakawa, 1996). 特に VHF 帯ラジオ電波伝播異常現象は注目されている (Kushida and Kushida, 2002). 我々はそれによって主張された地震に先行する FM 放送波の異常伝播現象の存在に啓発されて, 2002 年 11 月から観測をはじめた. 北海道の観測点から北海道, 本州北部, 東北地方を監視する試みを行った結果, 地震の発生前にその震央付近の放送波の散乱波が観測されることが確認できた (森谷・他, 2005, 以下前報と記す). また, このような地震に関連して FM 放送波の見通し外伝播として観測される散乱波を“地震エコー”と呼ぶことにした. さらに前報では, 電波伝播経路が短いほど関係があったと思われる地震の同定の精度が高いこと, 観測された散乱波の継続時間の総和 (Te) とこれから起こる地震のマグニチュード (M), 最大震度 (I) 及び震源の深さ (h) に対して定量的な関係の存在が示唆された. 特に, 日高山脈南部で起こった地震群に対しては, Te の常用対数 $\text{Log}(Te)$ と M や I との関係を簡単な一次式であらわすことができた. 異常が観測される段階では震源の深さはわからないので, M の推定はできないが I を予測することが可能となった. このような経緯を経て, 北海道の観測点を使って本州を監視することは諦めて, 北海道内を細かく監視する観測態勢を構築した. 一方, 同じ周波数を発信する FM 放送局が複数あることで異常が発生した地域を間違って推定する問題は, 地震予知計画においてデータ通信用に製作された 64Mhz 帯の地震観測用発信器 (出力 10W) の電波を用いることにより大きく改善された. 観測点数は 2002 年から順次設置した結果, 現在では 9 ヶ所となっている. この内 2 点は, 日高山脈南部の地震の発生前に観測される広尾 FM 放送局 (HOO) からの散乱波を詳し

く調べるためのもので、えりも観測点からそれぞれ約 5 km の間隔で設置したアレイ的な観測点である。

本報告では、前報以降の日高地域や道東地域での 2008 年 3 月までの観測結果を紹介するとともに、えりも地域のアレイ観測点での散乱波の偏波角度変化や、弟子屈 (TES) 観測点において散乱体の位置を特定する第一段階として散乱波の到来方位を推定するための干渉観測を行った結果等について述べる。

II. 観測点と発信点の増設

2005 年当時のテレメータ観測点は、天塩中川町 (TNK)、札幌市南区 (HSS)、えりも町 (ERM)、弟子屈町 (TES および厚岸町 (AKP)) にある地震および地殻変動観測施設に設置した 5 ヶ所であった。2003 年に開設した幌延町の観測点 (TKB) は、台風で被害を受けたため 2004 年に廃止した。その後、根室市落石 (OCI) と広尾町豊似 (HIR) の民有地に順次設置し 7 ヶ所とした。さらに、日高山脈南部で発生する地震に関係した広尾 FM 放送局 (HOO) からの散乱波だけを観測目的とし、テレメータ伝送は行わない観測点をえりも近くの様似町留崎 (RSK) およびえりも町東洋 (TYO) の 2 ヶ所設置した。Fig. 1 に観測点の位置、目標 FM 局、64MHz 帯発信点位置を示す。

観測開始当初から使用していたパナソニック受信機 URF99 は製造中止になったので、現在はオンキョウ社製 FM 受信機 T-422M やアマチュア無線用の受信機 AR5000A と VR5000 を使用している。Fig. 2 には受信機の感度曲線を示す。URF-99 改造型よりも後者の三つの型は感度が高く直線性が良いことが分かる。地震予知計画においてデータ通信用に利用している 64MHz 帯発信器は 10W の出力があるので、試験的に北海道東部の弟子屈町仁多 (NIT)、厚岸町あやめが原 (AYM) および根室市別当賀 (BTG) の 3 ヶ所に設置したところ、根室付近の地震などの発生前にこの 64MHz 帯の電波も FM 放送波によるものと同時に散乱波を発生させたことが確認できた。64MHz 帯発信器は日高山脈西部の三石町 (MUJ) にも設置された。Table 1 には、観測点と発信点の位置座標および発信周波数などを示した。Table 2 には、各観測点の目標発信局などをまとめて示した。

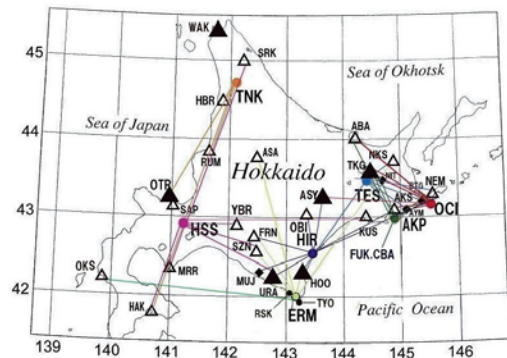


Fig. 1. Location of observing stations (closed circles) and target FM stations (triangles): $\triangle$ = horizontally polarized emission, $\blacktriangle$ = Vertically polarized emission.

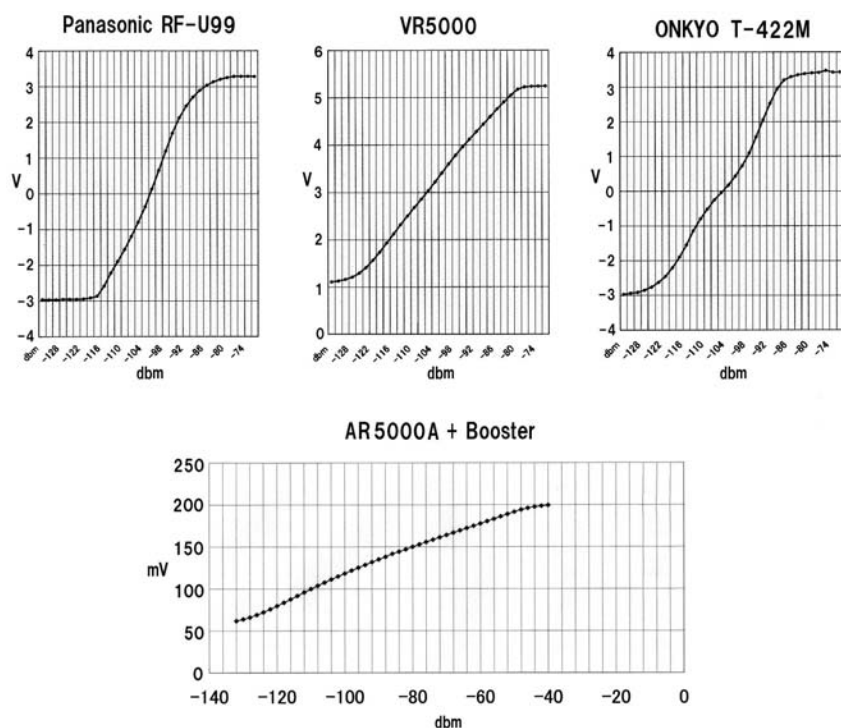


Fig. 2. Sensitivity curves of radios. Four types of radios are used. They are Panasonic (RF-U99), Onkyo (T-422M), VR5000 and AR5000A.

Table 1. Locations and start dates for nine observatories. TKB was abandoned in Nov. 2003 due to power line trouble.

Observing Point	Code	Lat.	Long.	Altitude (m)	Beginning	Closing
Teshio-Nakagawa	TNK	44° 46' 33"	142 05 02	60	02 Dec. 04	
Sapporo-Toyama	HSS	42 57 53	141 13 57	215	03 Feb. 07	
Erimo	ERM	42 00 54	143 09 26	40	03 Mar. 18	
Teshikaga	TES	43 29 00	144 24 10	220	03 Sep. 03	
Akkeshi-Aikappu	AKP	43 01 00	144 50 32	80	04 Dec. 25	
Nemuro-Ochiishi	OCI	43 09 48	145 29 56	50	05 Oct. 06	
Hiroo-Toyoni	HIR	42 23 53	143 20 13	43	06 Sep. 08	
Horonobe	TKB	44 56 40	141 58 07	240	03 Jul. 16	04 Nov. 30

Emitting Point	Code	Lat.	Long.	Altitude (m)	Beginning	Frequency (MHz)
Mitsuishi	MUJ	42 16 59	142 35 09	35	05 Jul. 05	63.965
Nemuro-Bettoga	BTG	43 14 00	145 26 18	39	05 Jul. 11	64.145
Akkeshi-Ayamegahara	AYM	42 59 40	144 55 08	120	05 Jul. 11	64.085
Teshikaga-Nita	NIT	43 29 39	144 30 31	164	05 Jul. 11	64.175

Table 2. FM stations producing anomalous radio waves, with station code and tuned frequencies, and azimuth of antennas deployed to receive them at nine observing stations.

Obs St.	Target FM Stn.	Frequency	Receiver	Antenna & Azimuth	
1	TNK	+-10.48576 Volt, 20 bit			
	HBR	NHK	83.8	PANA08	A SW
	RUM/FRN	NHK	84.8	PANA05	A SW
	HAK	NHK	79.4	PANA47	B SSW
	SAP	NHK	85.2	PANA52	B SSW
	OTR/WAK	NHK	84.5	PANA02	C SSW
2	HSS	+-2.5 Volt, 16 bit			
	MUR	HNK	89.4	PANA01	A S
	MUJ	64M	63.965	AOR +booster	B SE
	URA	NHK	86.1	PANA53	C SE
	SRK	NHK	89.1	PANA09	A S
	OTR	Air-G	81.8	PANA07	F E
	KUS	NHK	88.5	PANA14	D E
	YBR	HNK	85.8	PANA11	D E
	HAB	NHK	83.8	PANA03	E E
3	ERM	Hioki	+-10 Volt, 16 bit		
	H00	NHK	83.8	ONKY08	A ENE
	NKS	NHK	89.9	PANA26	B EN
	H00	NHK	83.8	PANA18	C E
	SAP	Com	76.8	PANA13	D NW
	RUM/FUN	NHK	84.8	PANA15	E NW
	SZN	NHK	84.0	PANA51	F NW
	MUJ	64M	63.965	AOR +booster	G Vertical
	H00	NHK	83.8	ONKY09	H ENE, Vertical
4	TES	+- 1.25 Volt, 16 bit			
	URA	NHK	86.1	PANA43	A SW
	BTG	64M	64.145	AOR +booster	B Vertical
	AYM	64M	64.085	VR5000	B Vertical
	AYM	64M	64.085	VR5000	C SE
	H00	NHK	83.8	PANA41	D SW
	OBI	Com	77.8	PANA42	E W
	ASY	NHK	89.7	PANA48	F WSW
	BTG	64M	64.145	AOR +booster	C SE
	H00	NHK	83.8	Interferometer	G SW (Array)

5	AKP	+2.5 Volt, 16 bit			
	NEM	Com	76.3	PANA55	A E
	TKG	NHK	89.5	PANA10	B NW
	ABA	Air-G	83.1	PANA27	B NW
	BTG	64M	64.145	AOR +booster	C Vertical
	FUK	NHK	85.3	PANA22	D SW
	CBA	NHK	78.0	PANA23	D SW
	ASY	NHK	89.7	PANA24	B NW
	NIT	64M	64.175	AOR +booster	E Vertical
6	OCI	Hioki +10 Volt, 16 bit			
	NEM	Com	76.3	PANA14	A ESE
	ASY	NHK	89.7	PANA19	B NW
	TKG	NHK	89.5	PANA25	C NW
	NIT	64M	64.175	AOR +booster	D Vertical
	NIT	64M	64.175	AOR +booster	E Horizontal
	AYM	64M	64.085	VR5000	D Vertical
	AYM	64M	64.085	VR5000	E Horizontal
	HOO	NHK	83.8	Interferometer	F W (Array)
7	HIR	Hioki +10 Volt, 16 bit			
	URA	NHK	86.1	PANA47	A SSE
	RUM/FRN	NHK	84.8	PANA06	B NW
	OBI	Com	77.8	PANA16	C N
	NKS	NHK	89.9	PANA20	D NE
	NEM	Com	76.3	PANA21	D NE
	MUJ	64M	63.965	VR5000	E Vertical
	ASY	NHK	89.7	ONKY01	F NE
	NKS	NHK	89.9	ONKY02	G NE
	MUJ	64M	63.065	VR5000	E Horizontal
	TKG	NHK	89.5	Interferometer	H NE (Array)
8	TYO	Hioli +10 Volt, 16 bit, Local recording			
	HOO	NHK	83.8	ONKY06	A N, Horizontal
	HOO	NHK	83.8	ONKY07	B N, Vertical
	OKS	NHK	76.2	ONKY11	C W
9	RSK	Hioki +10 Volt, 16 bit, Local recording			
	HOO	NHK	83.8	ONKY06	A N, Horizontal
	HOO	NHK	83.8	ONKY07	B N, Vertical

III. 散乱波の観測事例

1. 日高山脈の地震群

2003 年 9 月 26 日に発生した十勝沖地震 (M8.0) 以来日高山脈南部の地震活動は非常に高い状態が続いたが、次第にそれ以前の地震活動に戻りつつある。HOO での発信電波の散乱波を ERM で受信する観測を 2003 年 5 月に開始して以来、この地域で M4 以上の地震が発生する前には、必ず散乱波が ERM で観測されることがわかった。前報では、観測された散乱波の合計時間の常用対数 $\log (Te)$ は M や I との関係をも簡単な一次式で表すことができることを示した。2003 年の ERM での観測開始以来 HOO からの散乱波を観測した地震は 39 回起きた。これらのほとんどが M4 以上の地震であるが、震源の深さが 30km より浅い地震では M3 クラスでも散乱波が観測された。ただし、M4 以上が起こったが観測装置の故障のために散乱波を確認できなかった地震が 2 回あった。また、前報でも示した 2004 年 12 月 14 日の留萌北部地震 (M6.1) の時に HOO と同じ周波数 (83.8MHz) の羽幌放送局からの散乱波が混入し、HOO からの散乱波と間違えて日高山脈の地震が発生するのではないかと考えて混乱したこともあったが、それ以降このような混乱はない。前報までには観測されていなかったやや深発地震や地殻内部の地震が観測され、いろいろな深さの地震によるデータが増加した。Fig. 3 には日高山脈とその周辺で発生した地震 ($M > 4$, ただし陸域で 30km より浅いものは $M > 3$) の震央を示した。この中で○印はその発生以前にいずれかの観測点で散乱波を観測したもの、×印は観測できなかったものであり、+は観測機器故障により観測されなかった地震である。Fig. 4 には、ERM で観測された HOO からの散乱波の $\log (Te)$ と M とのプロットを示す。深さが 20km 未満の地殻内部地震 (◆)、島弧地殻の衝突と考えられている深さ約 50km の地震 (▲) およびプレート内部のやや深発地震 (■) という 3 種類の震源の深さごとに独立した関係式が成立しそうであることが分かる。また、数が少ないが深さ 30km 付近の地震 (□) も地殻内部地震と衝突地震の間に分布する。しかも一次式の係数は深さに対して系統的な関係を持っていて深いほど大きい値を持っている。3 種類の深さに対する経験式から傾斜を深さの関数と考えることができるので、以下の近似式を得ることができる。

$$\log (Te) \simeq (0.0098h + 0.6)M - (0.016h + 1.7) \quad (1)$$

また、Fig. 5 は $\log (Te)$ と最大震度 I とのプロットであり、これは M に関係が無く次のような単純な一次式で表すことができそうである。

$$\log (Te) = 0.68I + 0.40 \quad (2)$$

これらの関係は前報でも示したが、その後観測事例が増えてもほぼ同じ関係が得られており、日高山脈の地震群に対して散乱波の観測時間と地震大きさとの間の関係は十分な再現性がある。

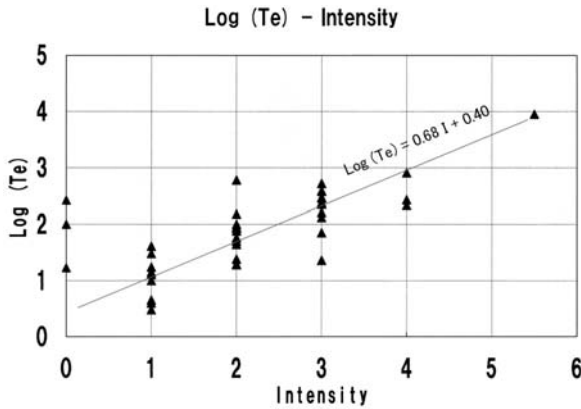


Fig. 5. Log (Te) versus the maximum seismic intensity (I, defined by Japan Meteorological Agency). An intensity of 5.5 was recorded for the southern Rumoi sub-prefecture earthquake. The line illustrates the linear relationship between Log (Te) and I.

信頼性が高いことがわかる。

2. 日高山脈地震群による HOO からの散乱波の偏波角度変動

ERM では日高山脈南部地震に対応して HOO からの散乱波が観測されるので、この偏波特性、方位特性、空間分布あるいは同時性を調査するために、ERM に近くに HOO だけを目標とする観測点を 2 ヶ所設置した。FM 放送波は通常水平偏波で発射されることが多いが、HOO や浦河 FM 放送局 (URA) は垂直偏波で発射されている。ERM では HOO からの散乱波は水平に設置された八木・宇田アンテナで受信されてきたので垂直に設置した八木・宇田アンテナでも同時に観測を行って比較したところ、全く観測されないことが判明した。Fig. 6 には散乱波が観測された時の ERM, RSK および TYO の 3 ヶ所の記録である。TYO では散乱波は観測されて

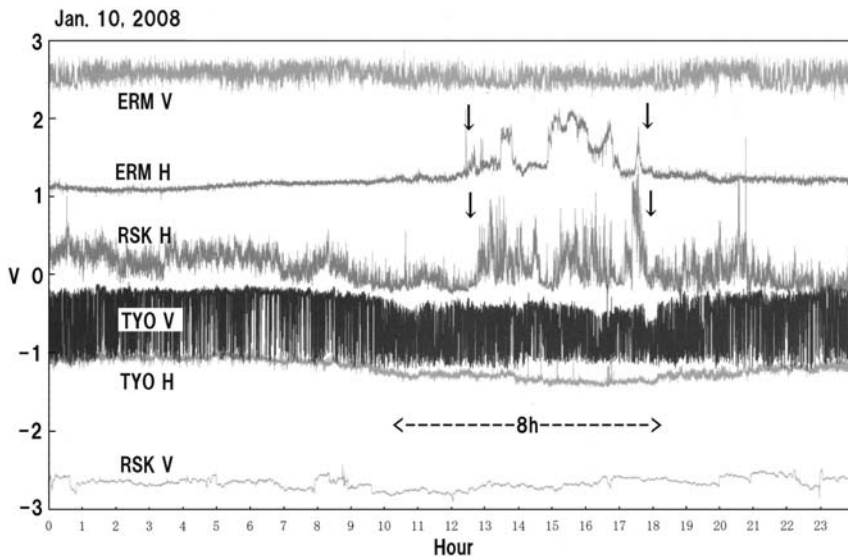


Fig. 6. Example records of EQ echoes from HOO FM radio station recorded at ERM, RSK and TYO before the earthquake in the Hidaka Mountains.

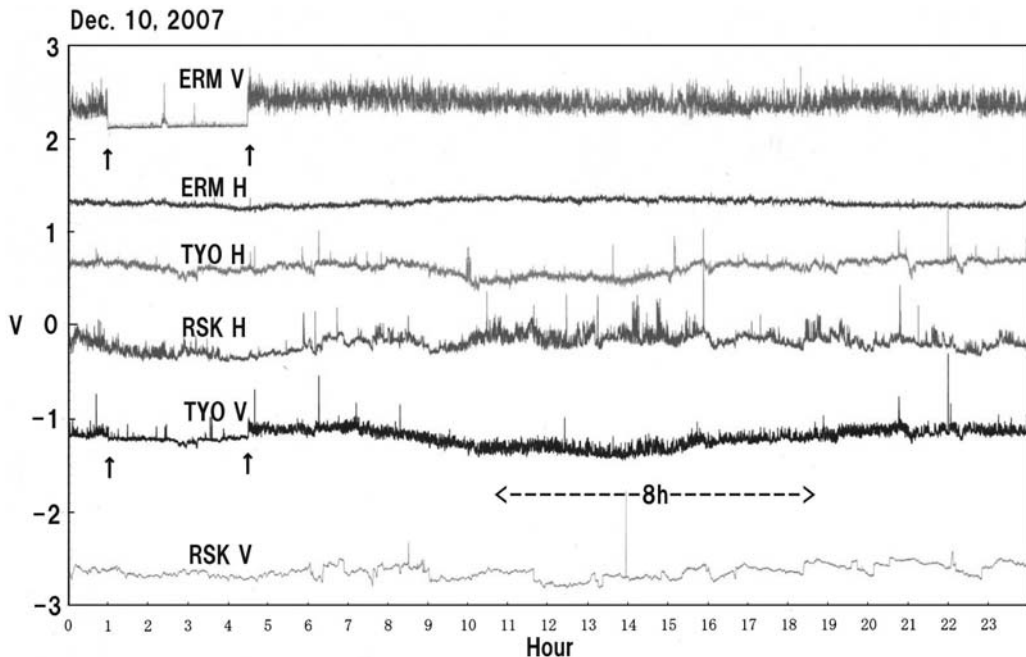


Fig. 7. Example records at ERM, RSK and TYO showing decrease of electromagnetic field strength by stop of emission at HOO. Weak direct waves from HOO were always received at ERM and TYO.

いないが RSK と ERM の水平アンテナには散乱波がほぼ同時に記録されているが、どの観測点でも垂直アンテナには見られない。ところが HOO が保守点検のために夜中に放送を停止した時、直達波が届いている ERM, TYO では垂直アンテナにのみ電界強度レベルの低下がはっきりと見られる (Fig. 7)。すなわち、垂直アンテナには通常は直達波が弱く届いているが散乱波の偏波角がほぼ直角に回転しているので感知できないのである。このような観測結果から、一般的に散乱波はその偏波角が回転しているので観測アンテナは発射時の偏波角に対して直交させて設置し、直達波を弱めて散乱波を強調する方が良いと言える。散乱波の偏波角が変化することは散乱波生成のメカニズムを考える上で重要な手がかりとなりそうである。

3. 十勝地方での散乱波の方位測定

現在では 2003 年十勝沖地震の余震活動がおさまリ、この地域の地震活動は低調である。TES では 2005 年に散乱波の方位を推定する干渉計を設計製作して設置した。干渉計には 2 台ないし 3 台の受信機を使用する。これらの局部発信器の位相が同じになるように 1 つの回路から供給すると中間周波の位相を比較することで受信波の位相差を計測できる。Fig. 8 には位相差計のブロックダイアグラムを示してある。TES では 3 台の受信器を用いて Fig. 8 に示した位相差計を二組用い、散乱波の位相差を計測してその到来方向を推定可能とした。設置後、観測点の周辺から小電力の電波を発信してその方位を測定し、系統的な誤差を補正するためのキャリブレーションを行った。目標とする放送局は HOO である。

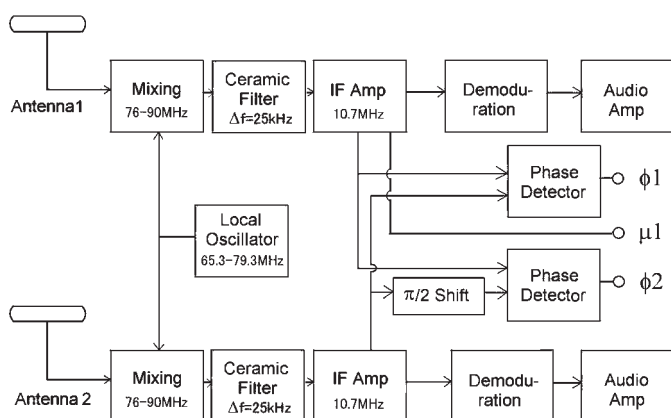


Fig. 8. Block diagram of interferometer using two FM radios. $\mu 1$ is an output terminal for amplitude of electromagnetic field. $\phi 1$ and $\phi 2$ are output terminals for phase angles.

2006 年 6 月 13 日と 7 月 17 日に十勝沿岸のほとんど同じ震央位置を持つ深さ 86km の地震 (M4.7 と 4.0) が発生した。これらの前に TES で水平八木・宇田アンテナによって HOO から の散乱波を観測した。Fig. 9 は 6 月 13 日の地震の前に 6 月 11 日に観測された記録である。Fig. 9 の上図は電界強度出力電圧 (mV) の変化であり、22 時 51 分から 23 時 25 分まで電界強度 の急激な上昇と下降とが見られる。Fig. 9 の下図は位相変化を表す電圧変化である。図中の $\Phi 1 \sim 4$ は位相に関する電圧 (mV)、 $\mu 1 \sim 2$ は干渉計のアンテナで観測した電界強度の電圧 (dbm) である。これらは、Fig. 9 上図の HOO の記録と同じ HOO の電界強度であるが、測定精度を良くするために受信帯域幅が非常に狭くした記録である。電界強度が上昇している時の変動には細かい変動があるがほぼ一定の値を保っている。これは散乱波の到来方向がほとんど一定であるこ

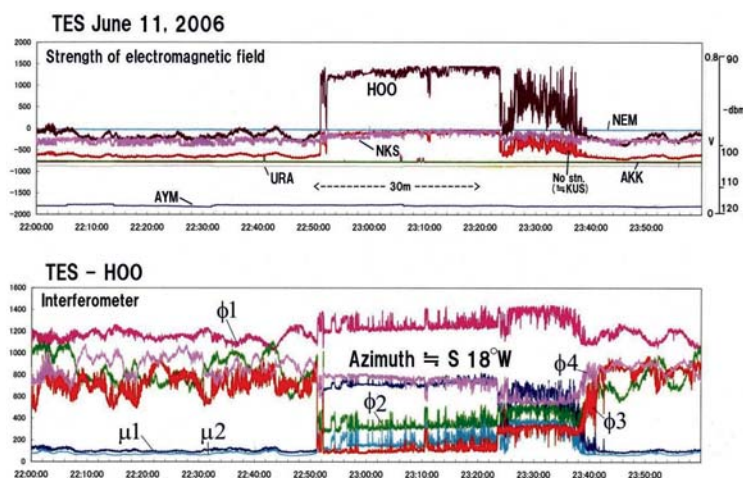


Fig. 9. Example records of EQ echo (upper) and change of azimuth data (lower) observed at TES on June 11, 2006, before intermediate deep earthquake (M4.7), which occurred on June 13, in Tokachi sub-prefecture. $\Phi 1$, $\Phi 2$, $\Phi 3$, and $\Phi 4$ are phase signals (mV) related to azimuth of incident EQ echoes. $\mu 1$ and $\mu 2$ are strength of the electromagnetic field (mV) of EQ echoes.

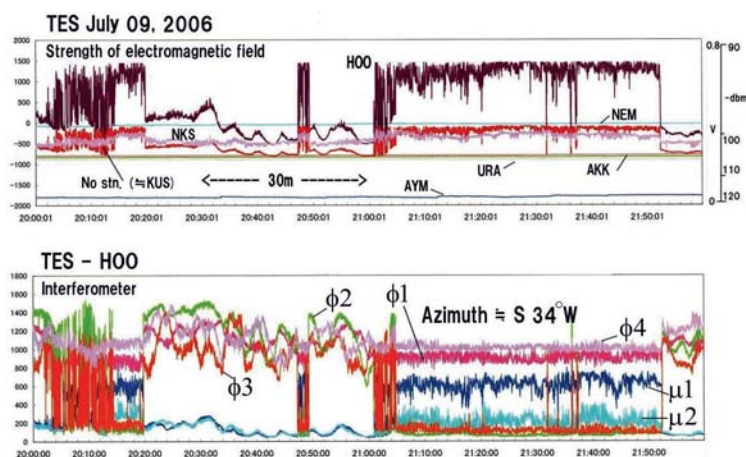


Fig. 10. Example records of EQ echo (upper) and change of azimuth data (lower) observed at TES on July 09, 2006, before intermediate deep earthquake (M4.0), which occurred on July 17, in Tokachi sub-prefecture. $\phi 1$, $\phi 2$, $\phi 3$, and $\phi 4$ are phase signals (mV) related to azimuth of incident EQ echoes. $\mu 1$ and $\mu 2$ are strength of the electromagnetic field (mV) of EQ echoes.

とを意味している。この時の到来方向は、 $\phi 1 \sim 4$ を使いアンテナの方位と方位キャリブレーションによる偏りを考慮すると南から 18 度西と計算された。また、7 月 17 日の地震の前に 7 月 09 日 21 時 00 分から 21 時 55 分まで観測された散乱波の到来方向は南から 34 度西と計算された。これらの計測誤差は ± 5 度程度と思われる (Fig. 10)。実際には弟子屈から見て震央の方向は、それぞれ南 35 度西および南 38 度西にあり、また、HOO の方向も南 35 度西である。この観測から、少なくとも HOO からの電波が震央付近で散乱し、偏波回転を伴って散乱波として TES へ到来している可能性が非常に高いと言えるであろう。これらの二つの地震後、十勝地方では未だに散乱波を発生させるような地震は起こっていない。十勝地方や十勝沖で発生した地震に対する $\text{Log}(Te)$ と M の関係を見ると Fig. 11 に示すように陸上 (●), 沿岸域 (■), および大陸棚下で起きた 2003 年十勝沖地震の本震と余震 (△) のように地域ごとに分けて見るとそれぞれの地域ごとに一次式であらわすことができそうである。ただし、発生数が日高山脈の地震群ほど

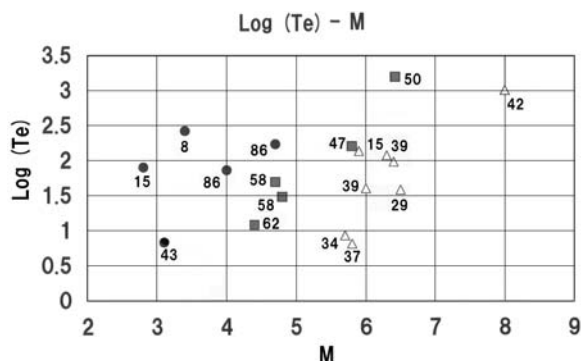


Fig. 11. $\text{Log}(Te)$ for EQ echoes from HOO recorded at TES versus magnitude (M) of associated earthquakes beneath Tokachi sub-prefecture and continental shelf. Numerals represent the focal depths in kilometers: ● = inland, ■ = coastal, and ▲ = continental shelf.

多くないので再現性を十分検証できていない。問題は十勝内陸部で 2003 年十勝沖地震の後に起こったいくつかの非常に浅い群発地震に関係する可能性がある散乱波群であるが、その後群発地震は無く再現性を検証できていないので今後の課題である。

4. 釧路・根室地方での観測

2003 年十勝沖地震が発生し、新たな海溝型巨大地震が連発する時代へ入ったと考えられる。厚岸観測点の計画段階であった 2004 年 11 月 30 日と 12 月 2 日に厚岸沖で M7.1 と M6.9 が発生したが TES ではどの受信器にも異常は現われなかった。そこで次に起こる可能性が高い根室沖、北海道東方沖あるいは国後島・択捉島南東沖の巨大地震を検知するために TES に続いて厚岸町 (AYM) と根室市 (BTG) に 64 MHz 帯の発信点と観測点とを設置した。この地域の観測網の特徴は観測点近傍に 64MHz 帯発信点も設置したことで、弟子屈 FM 局 (TKG), 根室 FM 局 (NMR), 厚岸 FM 局 (AKK), 釧路コミュニティ (KSR) などの小電力 FM 局と組み合わせて受信することで散乱波の判定の信頼性が非常に高くなると考えられる。次に、2006 年 4 月 10 日の根室支庁の地震 (M5.6, 震源の深さ 90 km 最大震度 5) に先行した散乱波の観測例を示す。Fig. 12 に示してあるのは 2006 年 4 月 04 日と 05 日に観測された散乱波の記録である。TKG (垂直偏波発信で出力はわずかに 1W) からの散乱波が、AKP の水平八木・宇田アンテナでステップ状の変動を起こしながら観測されている。TKG は標高 270 m の摩周カルデラ外輪山山麓にあって AKP までは直進する電波を遮る山はないが、AKP では通常その電界強度はほとんどノイズレベル以下で受信できない。OCI が完成して以来、根室付近と根室沖で発生した地震 ($M > 4.0$) は 40 回あったがこの内散乱波を観測できた地震は 20 回であった。これらの震央を Fig. 13 に示してある。陸域や沿岸部では多く海域では少ないが色丹島に沿う領域では散乱波が現われることが多かった。Fig. 14 には 2006 年 12 月 23 日と 27 日に観測された AYM

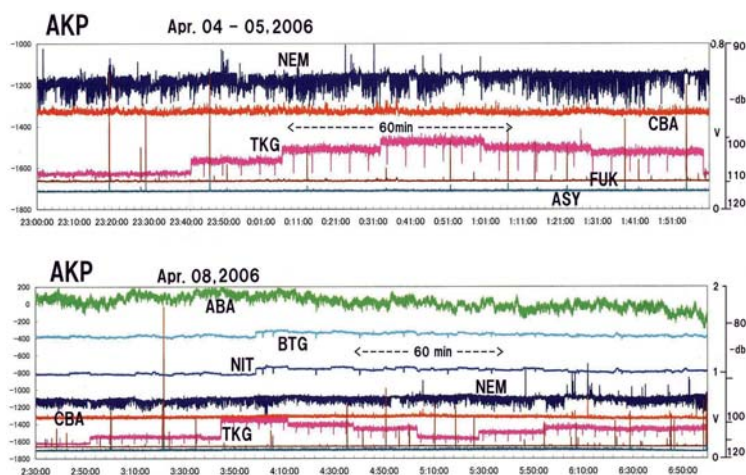


Fig. 12. Example records of EQ echoes from TKG FM radio station recorded at AKP before the earthquake in Nemuro sub-prefecture.

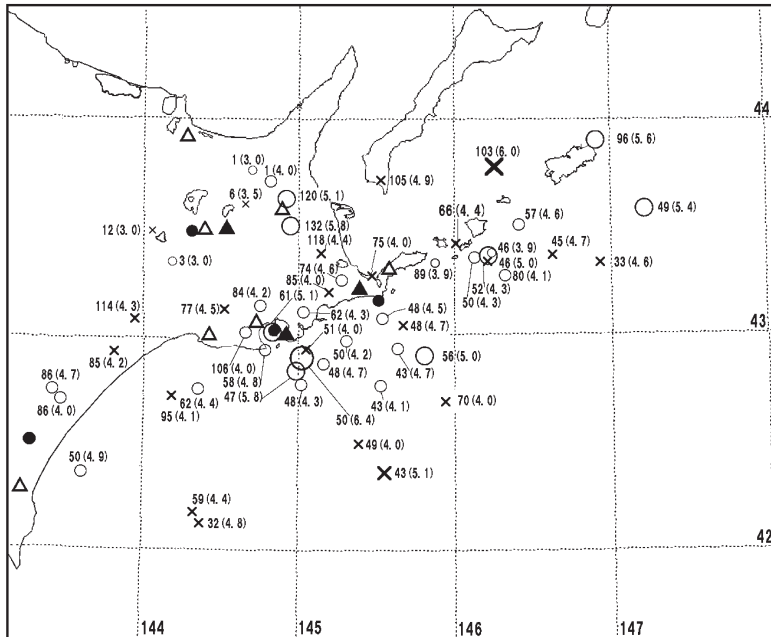


Fig. 13. Location of earthquake epicenters in the eastern Hokkaido. Open circles (O) denote epicenters of earthquakes associated with EQ echoes. Crosses (X) denote epicenters of earthquakes ($M > 4$) without EQ echoes. The focal depth and magnitude of each earthquake are shown near its symbol.

と NIT の 64 MHz 帯発信点と NEM の FM 局からの散乱波の記録である。12 月 31 日 07 時 34 分に根室半島沖で $M5.0$ が発生し、予想どおり最大震度 4 を記録した。OCI で観測された散乱波の Te と M および I とのプロットを Fig. 15 と Fig. 16 に示す。ここは陸域と海域の地震があり、また異なる深さの地震も混在しているので日高山脈の地震群で見られたような整った分布にはならないが $\log(Te)$ と M および I に対する定量的な関係は成立しているように考えられる。発信点と観測点が北海道の陸上にあるという制約された条件で陸からどこまで離れた海域の大地震が検知できるのかがこれからの課題である。検知可能な領域を千島列島に広げるためには色丹島や国後島に発信点を設けていくことが望まれる。

IV. 結 語

2008 年 3 月現在で VHF 観測点は 10 ヶ所となり、スプラディック E 層の擾乱 (Smith and Matsushita, 1962)、雷の発生、および原因不明の雑音などの識別が容易となり散乱波の検知精度が向上してきた。ERM の近くに HOO だけを目標局とした観測点を 2 ヶ所設置して偏波特性を調査した結果少なくとも約 90 度回転していることが判明した。Fukumoto et al., (2002) は偏波の回転はないので地震に関する VHF 散乱波は電離層の擾乱とは関係がないと主張したが、彼らの観測では仙台 FM 局だけを目標としており、さらに毎日の観測時間がわずかに 0 時から 4

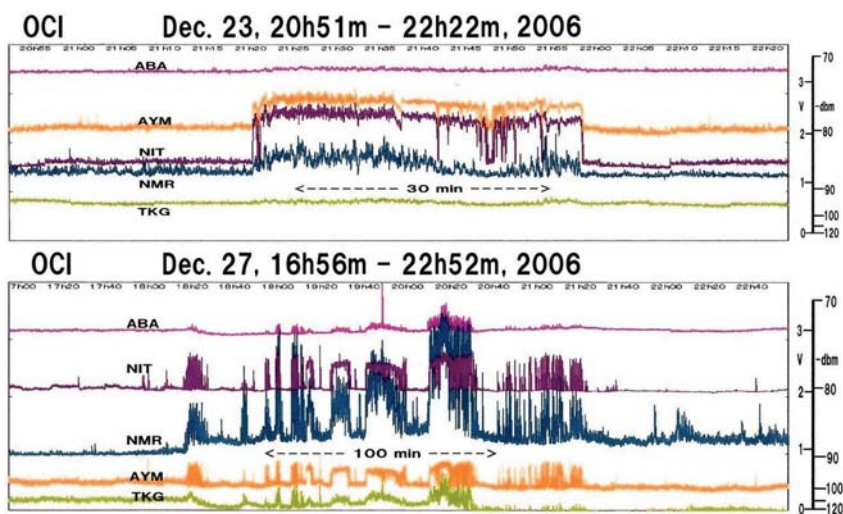


Fig. 14. Example records of EQ echoes from NIT and AYM 64MHz stations and NEM FM radio station recorded at OCI before the earthquake of the Nemuro sub-prefecture.

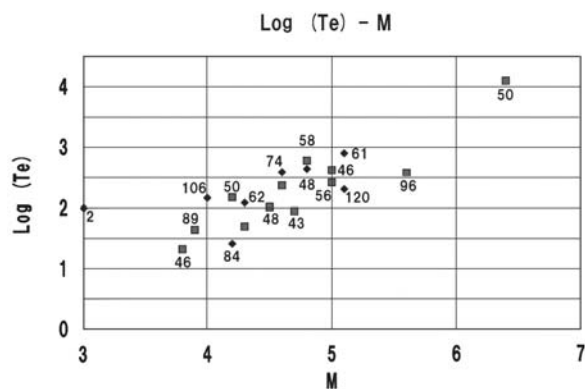


Fig. 15. Log (Te) for EQ echoes from NEM and TKG recorded at OCI versus magnitude (M) of associated earthquakes beneath Kushiro and Nemuro sub-prefectures and coastal region. Numerals represent the focal depths in kilometers: $\blacklozenge$ = inland, and $\blacksquare$ = coastal region.

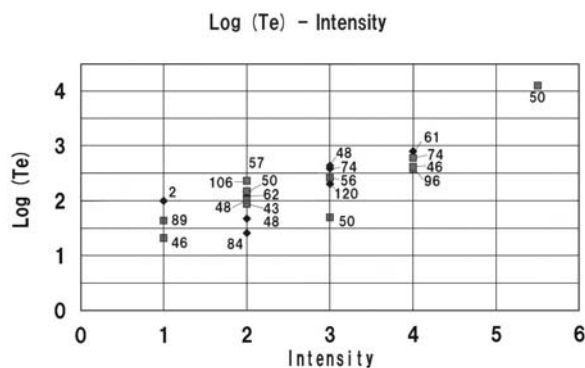


Fig. 16. Log (Te) versus the maximum seismic intensity (I). Between Log (Te) and I quantitative linear relationship can be seen. Numerals represent the focal depths in kilometers: $\blacklozenge$ = inland, and $\blacksquare$ = coastal region.

時までであった．我々の観測結果からは彼らが観測したのは地震に関係した散乱波ではないと断定しても不自然ではないだろう．電磁氣的にコントラスト持つ物質に透過・反射を繰り返すとファラデー効果や磁気カー効果により偏波角が変化するのはむしろ当然ではないかと考えられる．地震に関係する散乱波はきわめて局所的な現象であって、もし高さ 200 – 300 km の電離層が関与する現象ならば (Pilipenko et al., 2001), 少なくとも半径 100 – 150 km 程度の広がりですれが観測されなければならない．これはスポラディック E 層の擾乱 (Smith and Matsushita, 1962) と同じくらいの広がりを持つことになり、我々の観測と大きく矛盾する．我々の観測では、地表面付近に散乱体が存在すると考えると都合が良い．ひとつの可能性として、Freund (2000, 2007a, 2007b) および Freund et al. (2006) が主張するように、震源付近の応力集中と増加により岩石中に自然に存在する正孔 (Positive Hole) が価電子帯を通過し地上まで移動して蓄積し、震央付近にある地面・崖、植物あるいは建造物などの物体が正に帯電し震央付近が巨大な電池となるような現象が起こっているのかもしれない．このような場所では周辺よりも電磁氣的にコントラストの大きい状態となり、そこで VHF 波が散乱する際に磁気カー効果によって偏波角が変化するのであろう．しかし、散乱波がなぜ山の尾根を越えたり、減衰せずに伝播するのか、そのメカニズムは不明である．

前報に引き続き観測を継続した結果、地震に先行する VHF 散乱波は時間的、空間的に相関があるばかりでなく、その総継続時間がこれから発生する地震の I , M および h にも定量的な関係があることがますます明確になってきた．Hayakawa (1996) によるレビュー、Fujiwara et al. (2004), Sakai et al. (2001) および Kushida and Kushida (2002) による従来の VHF 電波観測では、なんら定量的な関係は示されていない．我々の観測では、VHF 電波が散乱体を通過する際には偏波角度が回転していることも明らかになった．観測網の充実により精度の高い実学的地震予報の実現が目前になっていると言っても過言ではないだろう．しかし、電波源を FM 放送のみに頼るのは問題がある．全国的にサテライト局が急激に増加して周波数が重複しているからである．そこで地方自治体を持つ防災無線 (周波数は 50~70 MHz, 出力は 10 W 程度) を利用できないか検討中である．緊急時のみならず通常時にも常時無変調で発信すればその地点付近の地震予報が可能になり、正に一石二鳥であろう．

謝辞 北海道大学大学院理学院附属地震火山研究観測センター・西脇琴美さんにはデータを可視化する作業を行っていただいた．東海大学・上田誠也教授には日ごろから強い励ましと支援をいただいている．以上の方々に感謝いたします．

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.
- Freund, F., 2000. Time-resolved study of charge generation and propagation in igneous rocks, *J. Geophys. Res.*, **105**, 11, 001-11,019.
- Freund, F. T., A. Takeuchi and B. W. Lau, 2006. Electric currents streaming out of stressed igneous rocks — A step towards understanding pre-earthquake low frequency EM emissions, *Phys. Chem. Earth*, **31**, 389-396.
- Freund, F. T., 2007a. Pre-earthquake signals — Part I: Deviatoric stresses turn rocks into a source of electric currents, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, **7**, 535-541.
- Freund, F. T., 2007b. Pre-earthquake signals — Part II: Flow of battery currents in the crust, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, **7**, 543-548.
- 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.
- Kushida, K. and R. Kushida, 2002. Possibility of earthquake forecast by radio observation in the VHF band, *J. Atmos. Electr.*, **22**, 3, 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.
- 森谷武男・茂木 透・高田真秀・笠原 稔, 2005. 地震に先行する VHF (FM 放送波) 散乱波の観測的研究, 地球物理学研究報告, **68**, 161-178.