

(FM電波)

VHF帯電波伝搬モニターによる 地震活動予測観測研究

地震予報への試み

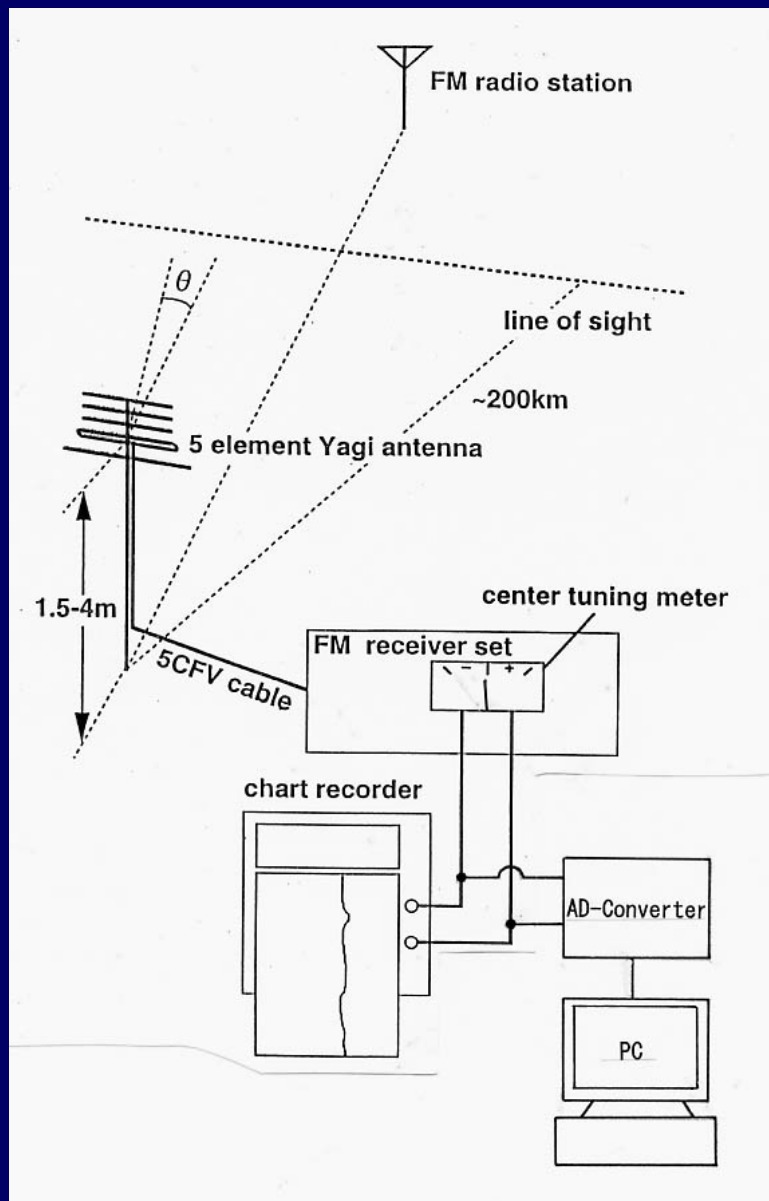


八ヶ岳南麓天文台 串田嘉男

Yoshio Kushida / Yatsugatake South Base Observatory

〒409-1502 山梨県北杜市大泉町谷戸 8697-1 TEL 0551-38-3987 FAX 0551-38-4254 e-mail y.kushi@nifty.com

観測システム



FM用5素子八木アンテナ群



センターチューニングメータ
搭載のFM受信機



記録用ペンレコーダ一群

八ヶ岳南麓天文台研究室



空を向いたFMアンテナ群



受信機からの信号を記録する
ペンレコーダー群



地震前兆を解析する観測研究室

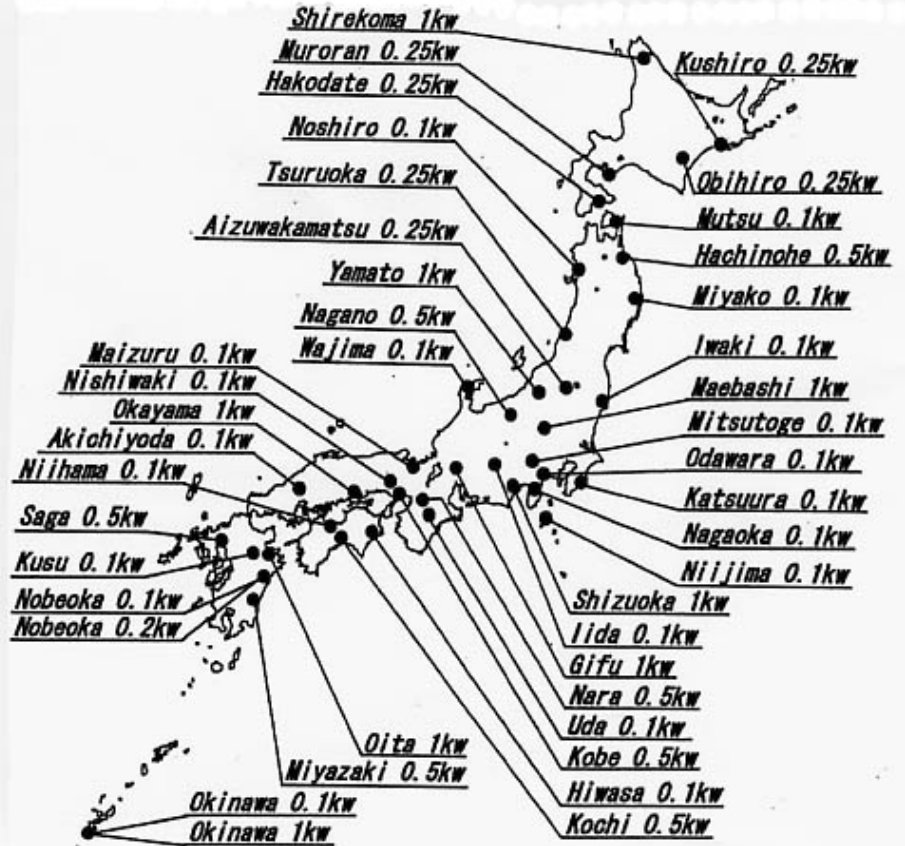


1995年からの膨大な観測チャート

受信観測所

主な目標FM放送局

計32基で観測中



受信機の設定周波数に対し300kHz以内に見通し距離内の直接波が受信されない周波数で、しかも設定周波数に対し300kHz内に見通し距離を越えた100w~250w出力局があるように設定する

出力=100w 以上 1kw 以下 が良好目標局電波となる

Remote Stations



2002.Jun.

Hokkaido Station



1999.Dec.

Akita Station
Akita Station

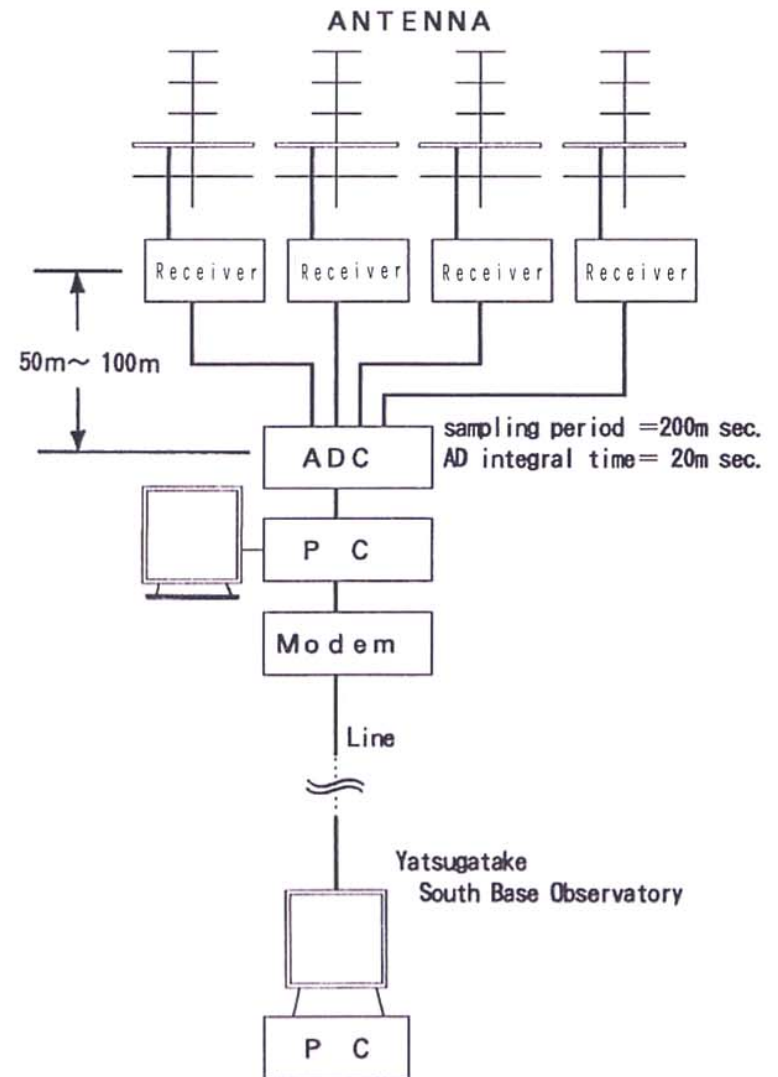


Kochi Station

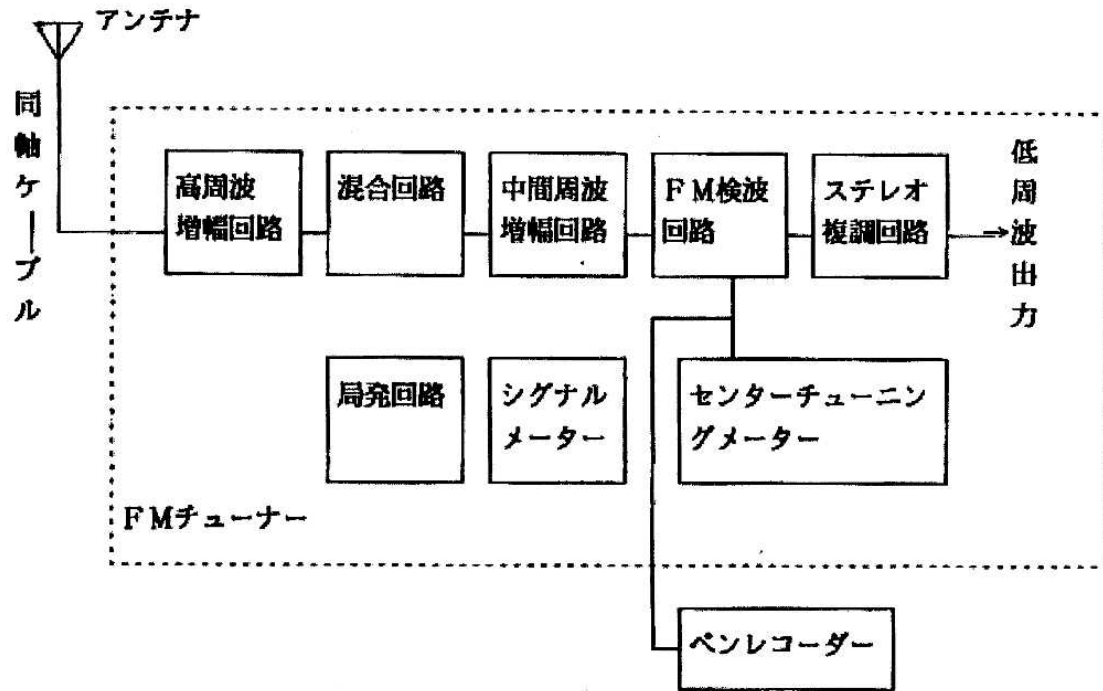
2000.Dec.

2000. Dec. OPEN

Kochi Station



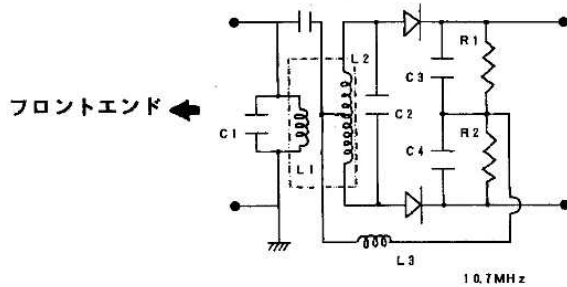
センターチューニングメータ ブロック図

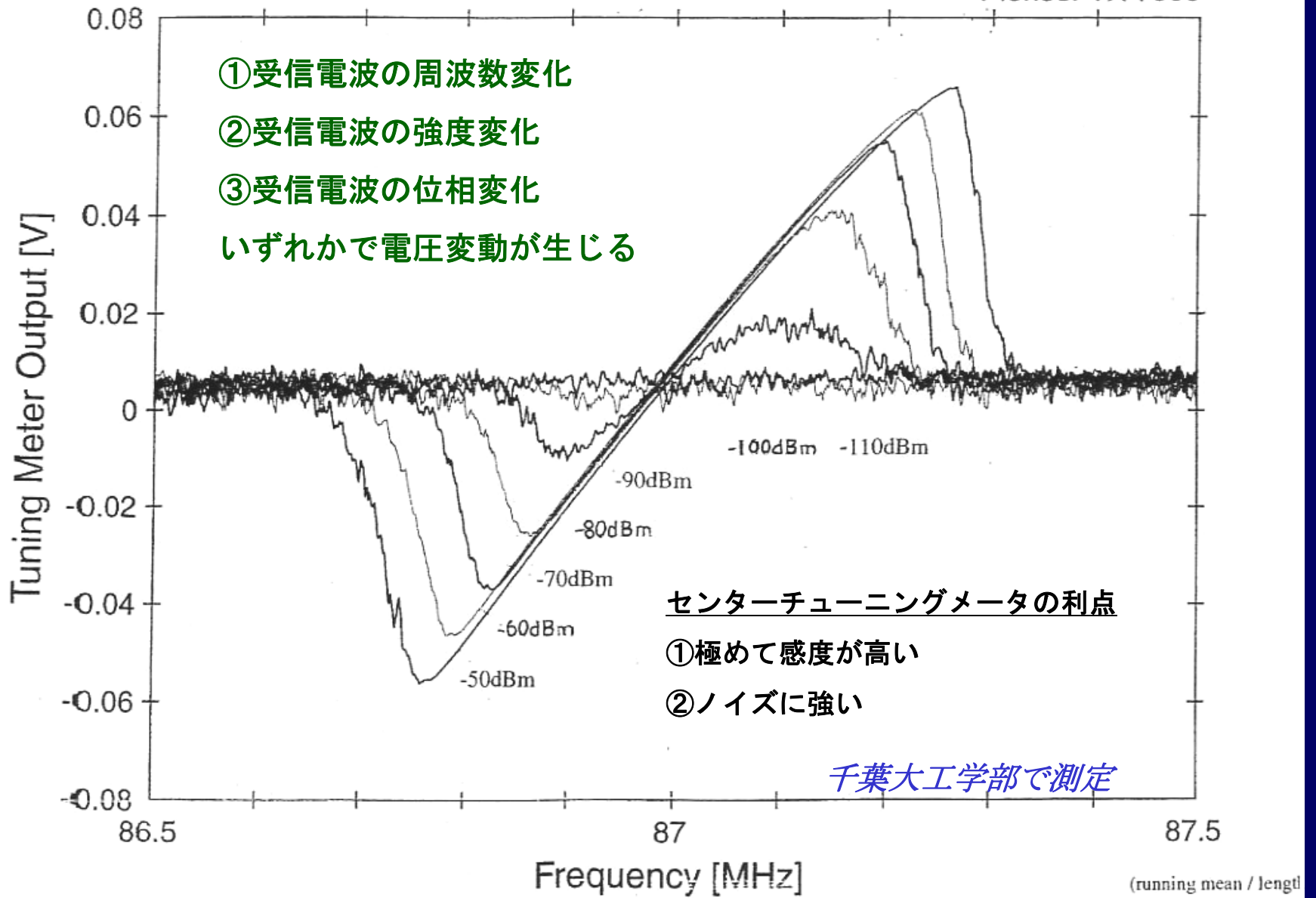


受信電波を10.7MHzに変換し、受信機内部の発信回路の10.7MHzとリファレンスする

センターチューニングメータ回路出力電圧が変動する要因

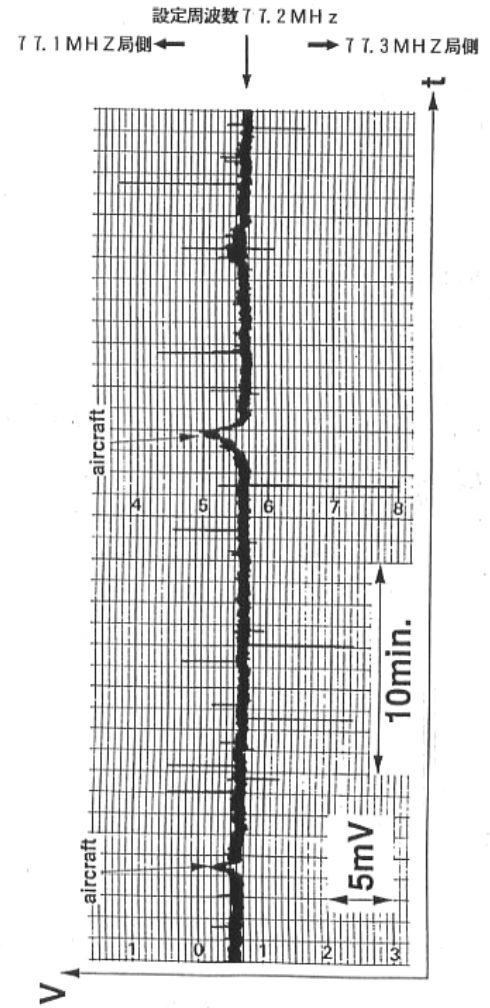
- ①受信電波の強度変化
- ②受信電波の周波数変化
- ③受信電波の位相差変化





センターチューニング回路のS字特性

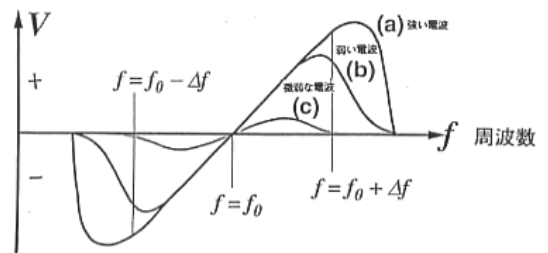
- (77.1MHz)
- (77.2MHz)
- (77.4MHz)
- ・東京放大 10kW
- ・和歌山0.5kW
- ・飯田 0.1kW
- ・FM仙台 5kW
- ・用瀬 0.1kW
- ・松江 0.5kW
- ・熊本 1kW

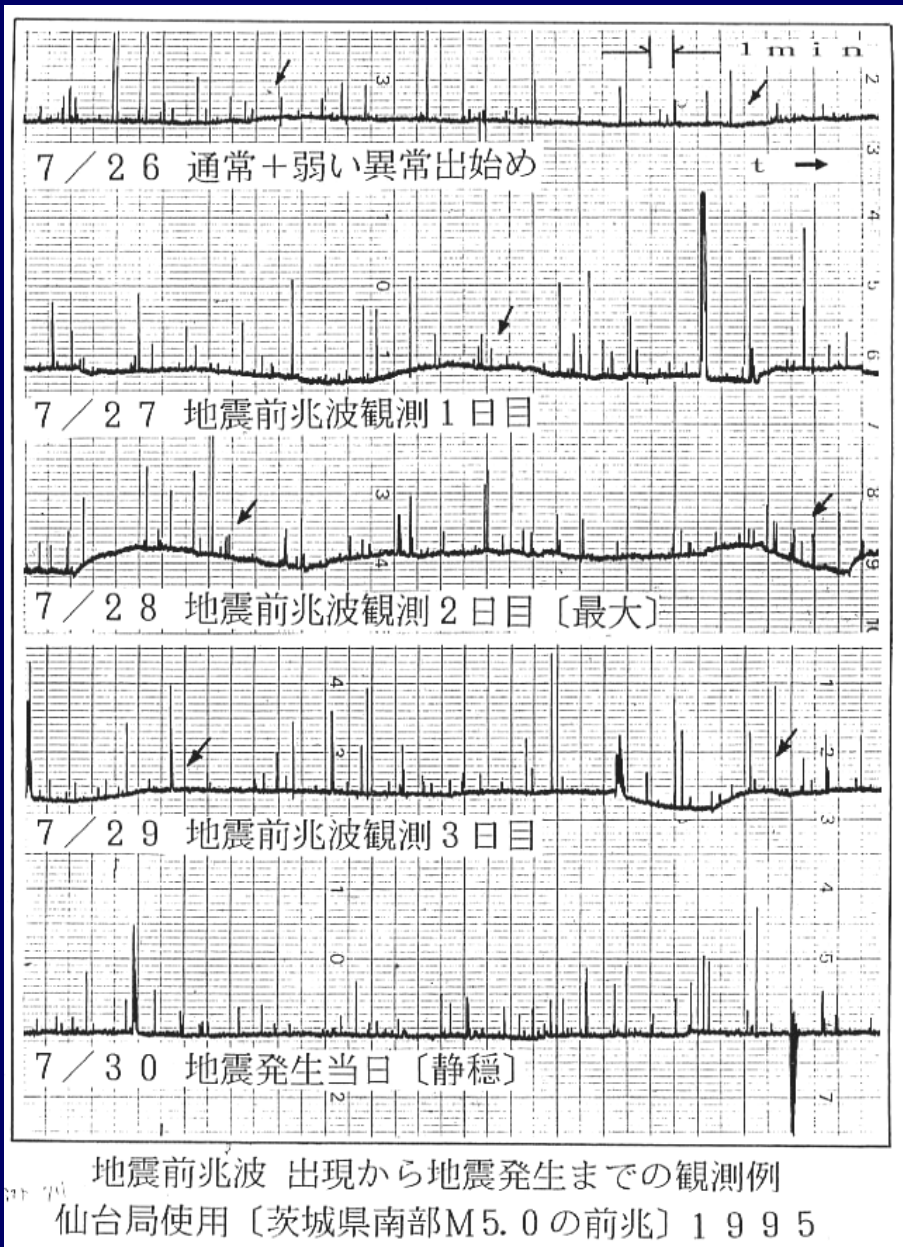


設定周波数の電波が受信されても 反応しない

通常基線と流星エコー、飛行機エコー

設定周波数に対し低い側高い側の局の電波を受信して反応している





地震前兆波 出現から地震発生までの観測例
 仙台局使用 [茨城県南部M5.0の前兆] 1995

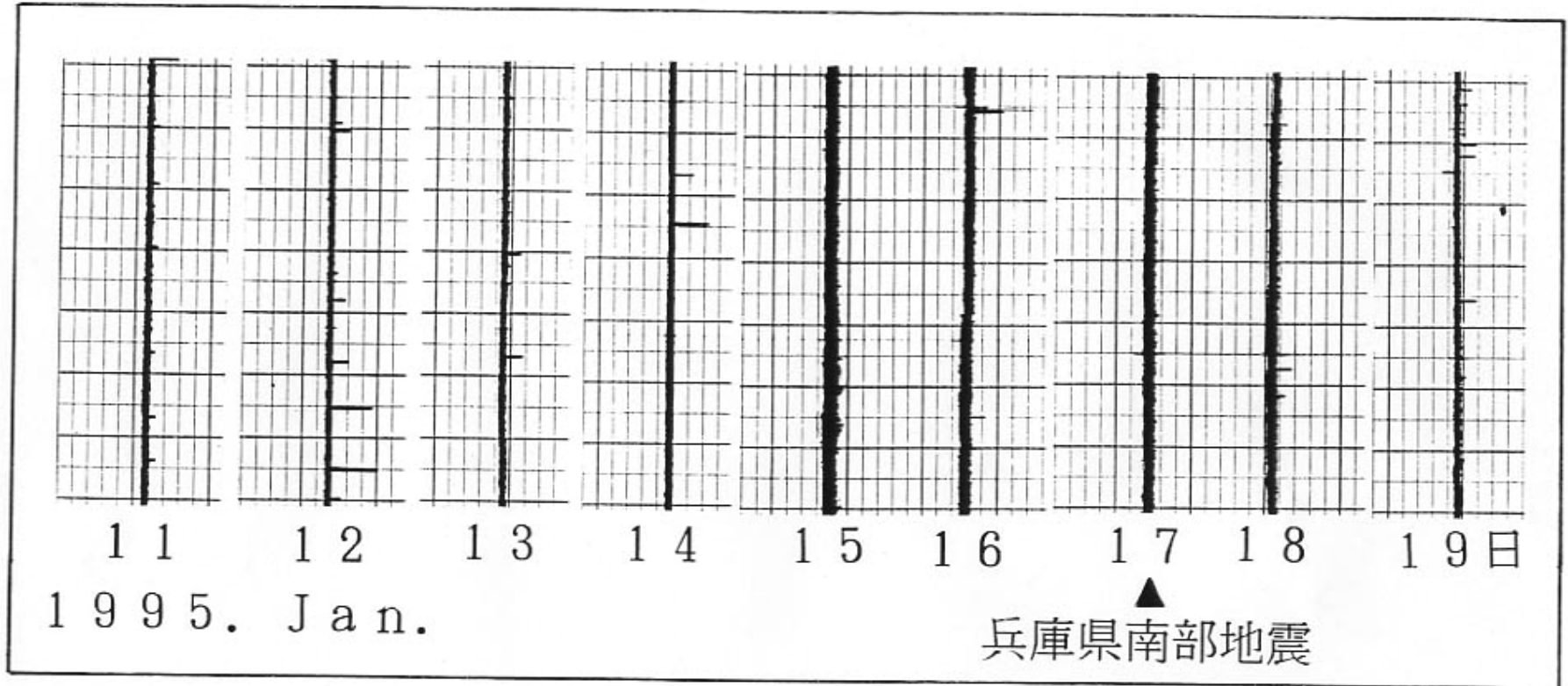
初めは基線が太くなる現象と
 奥尻島地震の相関を直感した
 が、その後観測を続けていると
 うねり変動に気づいた

発端は単なる直感 1993年8月

観測初期の頃は仙台局影響と認識して
 いたが、鶴岡局250w影響の可能性

通常真直ぐな基線が揺らぐ変動と地震との相関に気づいた

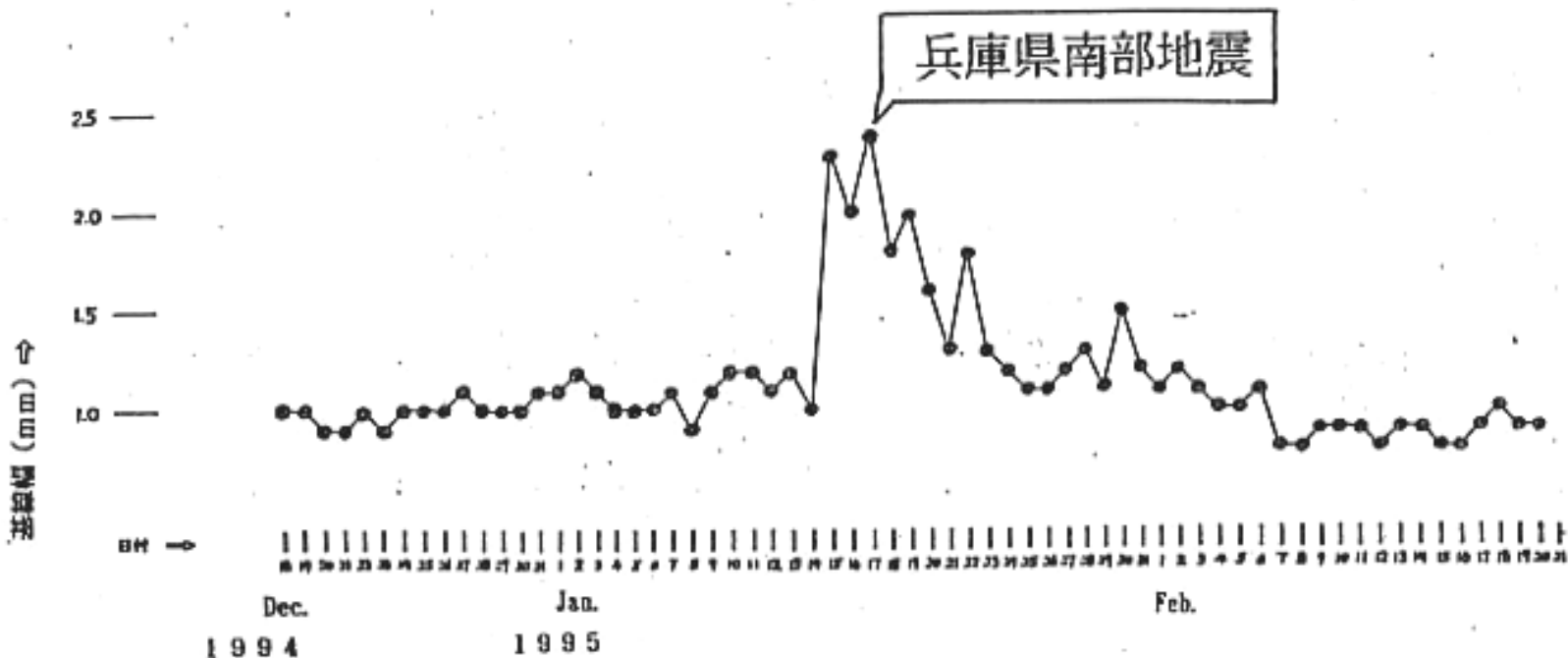
0時からの観測のため、15日は14日の夜のこと



兵庫県南部地震発生前後の

F M流星電波観測基線幅変化

兵庫県南部地震発生3日前から基線が異常に太くなった！



兵庫県南部地震前後の基線幅変化

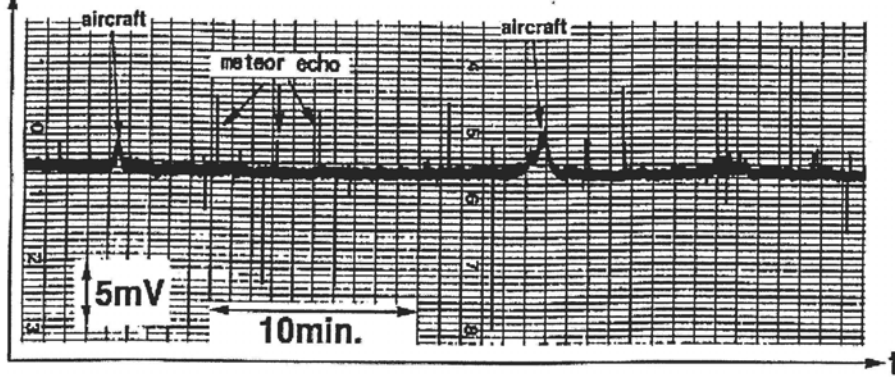
F M電波観測における基線幅異常

基線幅増大ピークの2～3日後に大型地震（余震も）発生

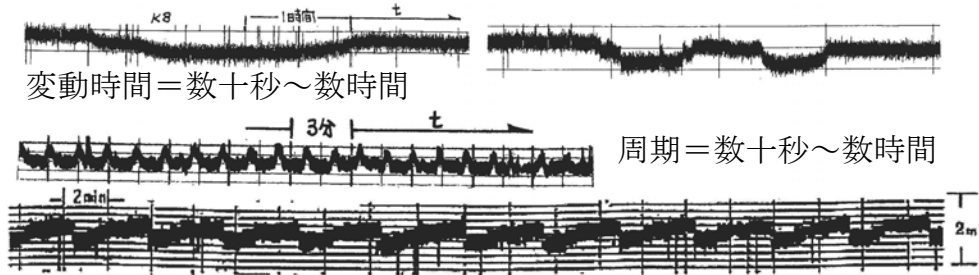
兵庫県南部地震活動を2～3日先行してモニターしていた事実！

前兆変動典型例

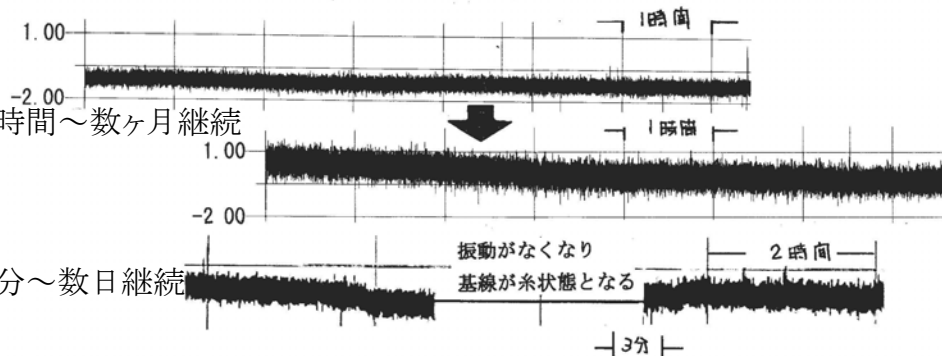
→ 通常基線
流星エコーと航空機エコー



→ ウネリ変動 = B F



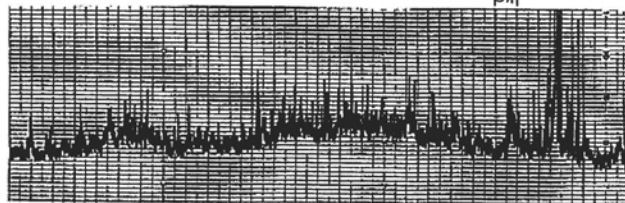
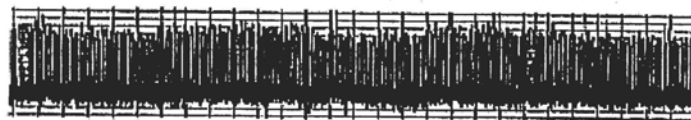
→ 連続周期的BF変動 = P B F



→ 基線幅増大変動 = B T
M5以上地震前兆

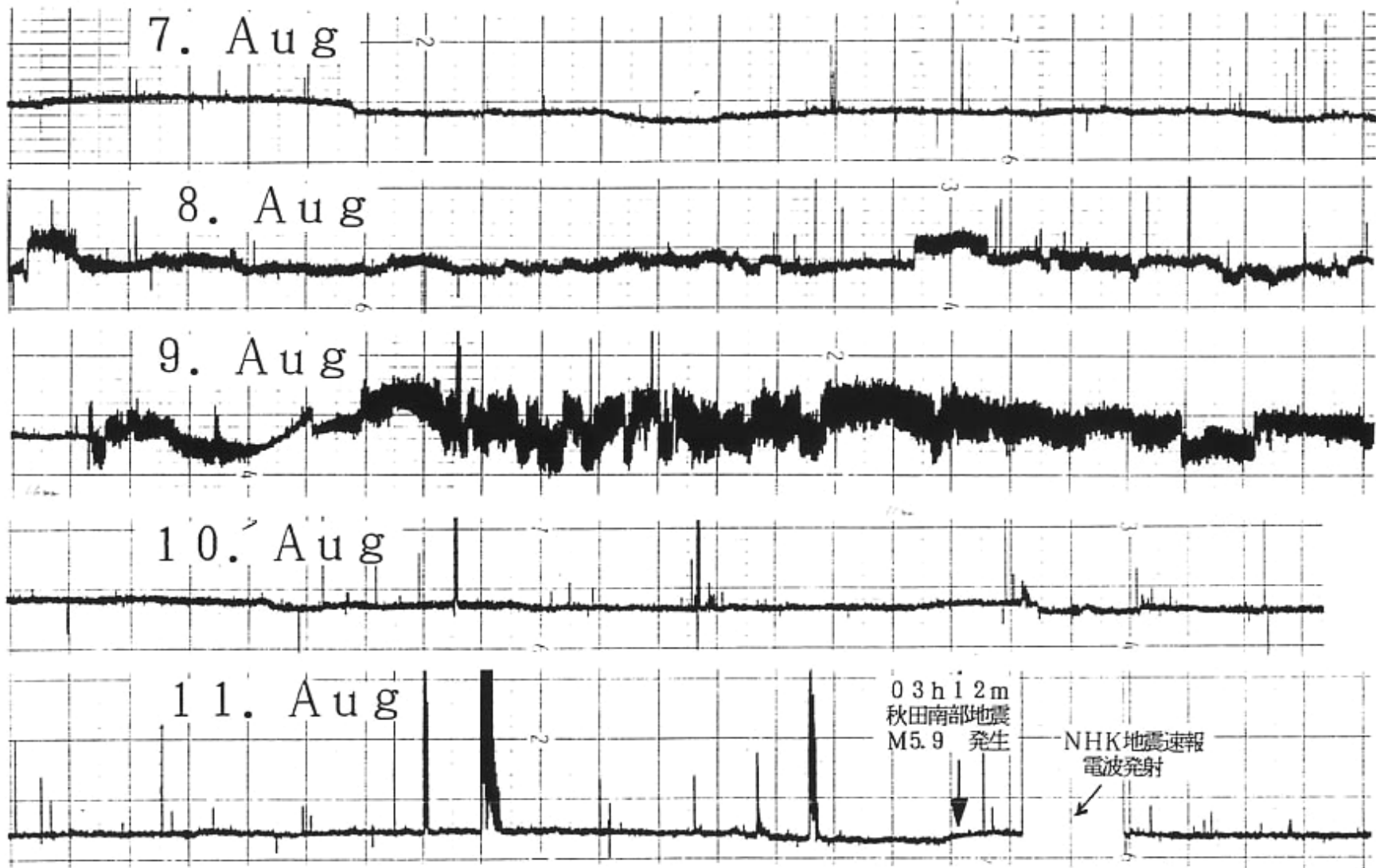
→ 基線が糸状態 = 特異状態
M6±以上規模地震前兆

→ 櫛の歯状変動
地殻地震・群発地震・火山性活動



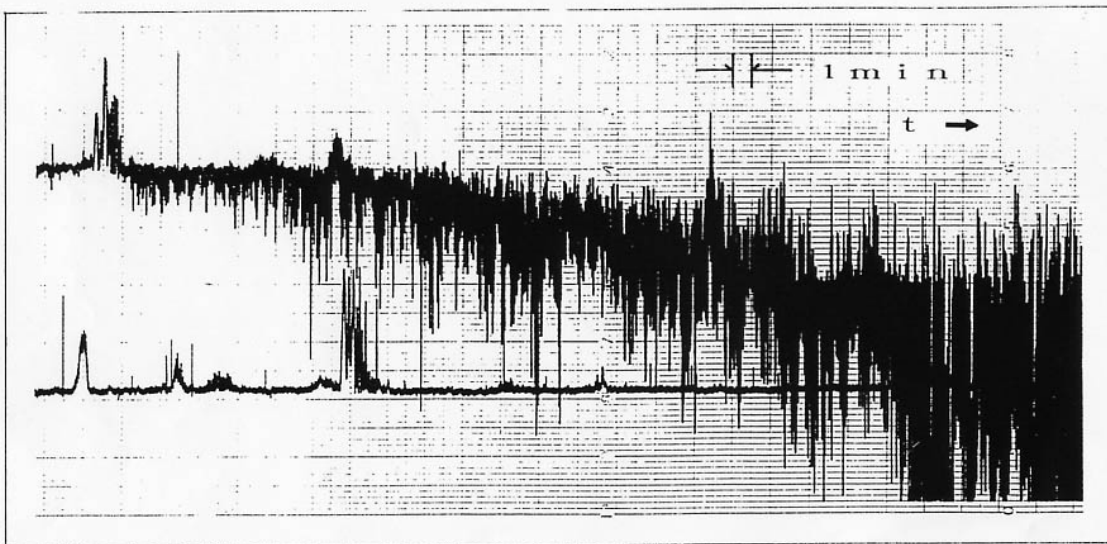
⇒ Miyakejima
2000/Jul./08
Eruption

→ 火山関連前兆変動



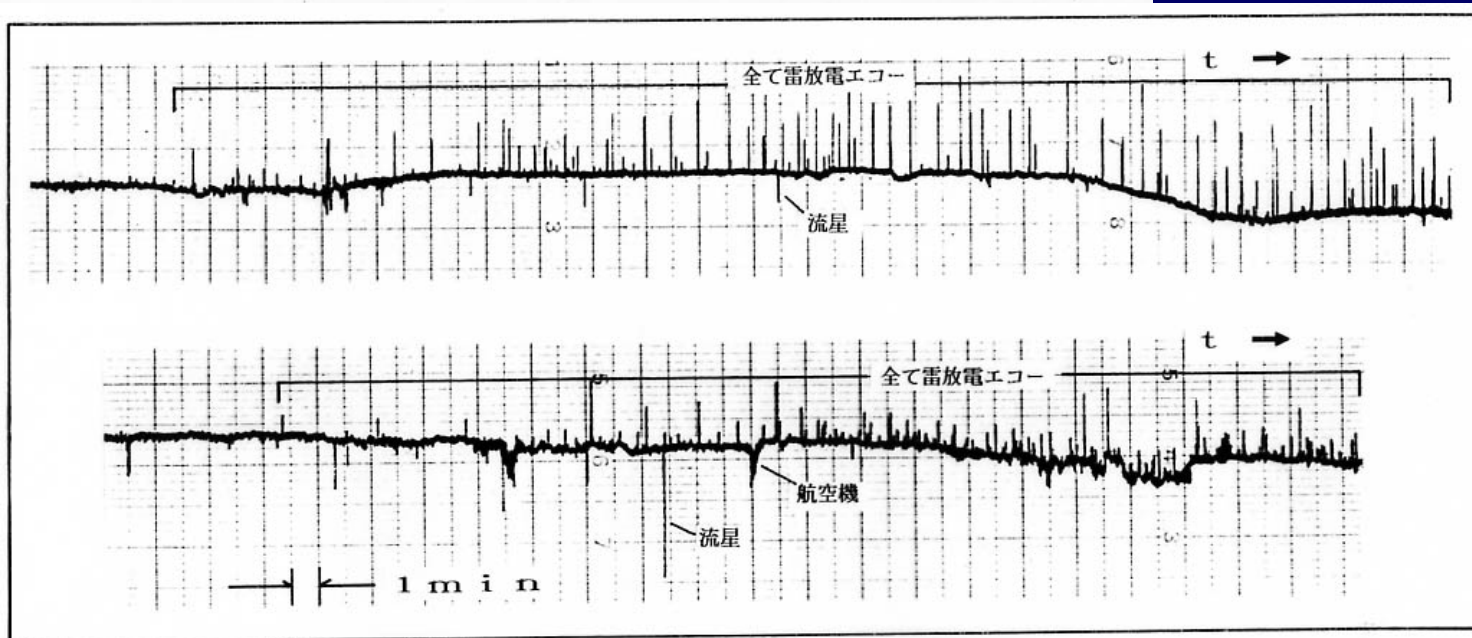
秋田南部地震M5.9 地震前兆

秋田内陸南部 1996.8/11 M5.9



地震前兆以外の変動

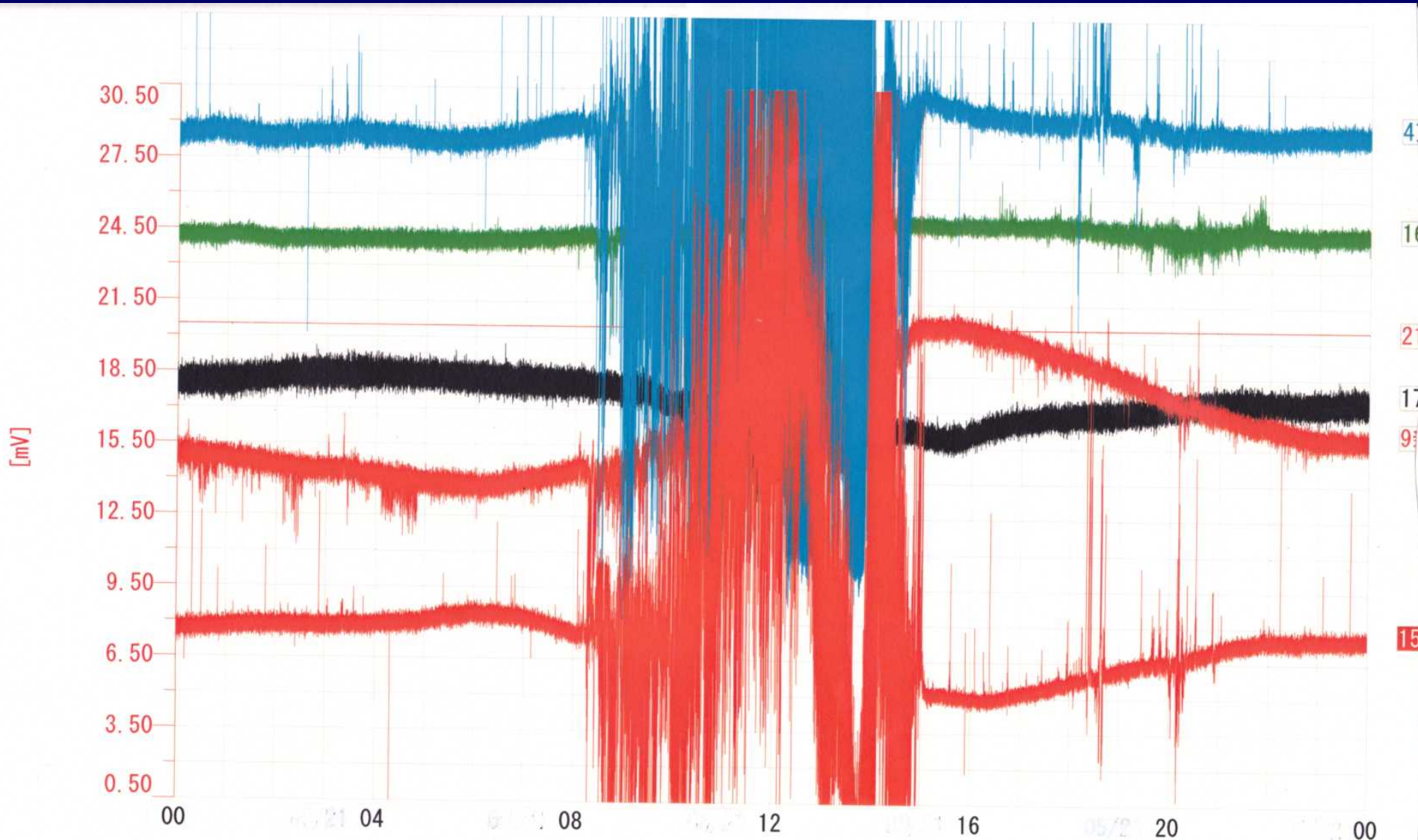
スプラディックEによる異常伝播



雷雲による基線変化

スプラディックE（Eスポ）が顕著な時間帯は地震前兆検出困難なモニターもある

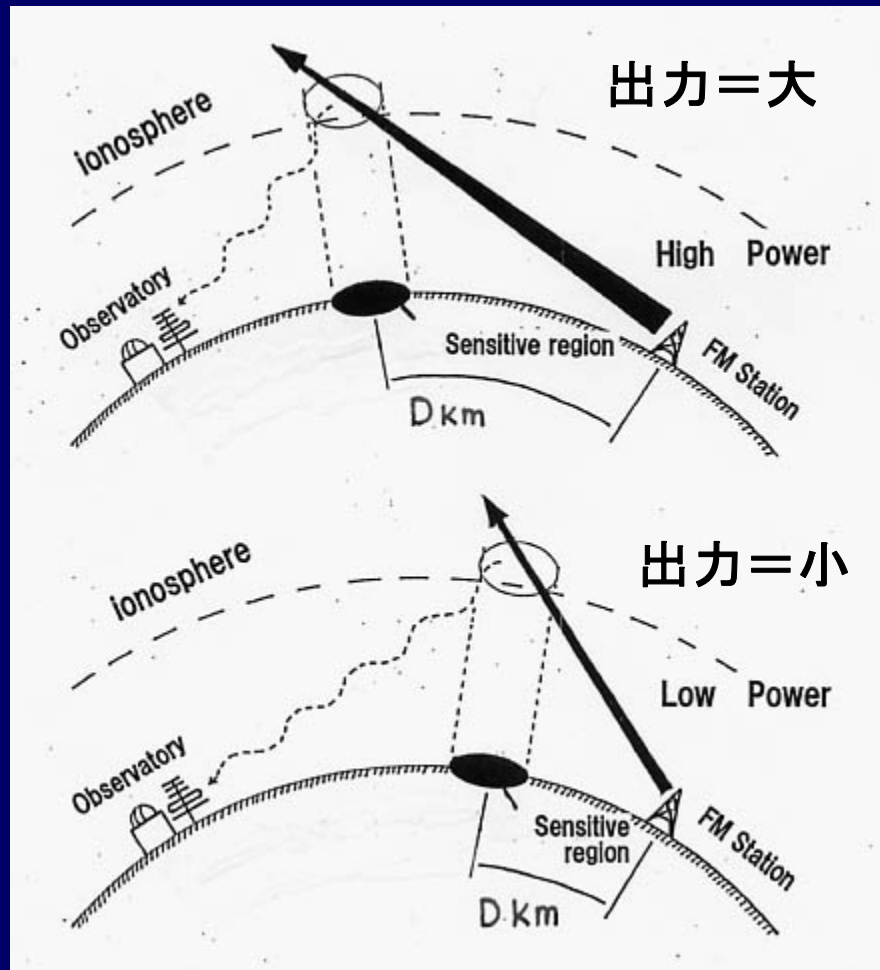
約6時間継続したEスポ





震源域の推定

検知領域と放送局出力の関係



ドーナツ円帯の片側の模式図

局から検知領域までの距離 = D km

局の出力 = P kw とき

$(D/R)^2 = \sqrt{P}$ の関係が見出せる

$$\underline{D = R \times P^{0.25}}$$

R値

連続BF変動(PBF) = 240 ~ 680

近傍検知限界

遠方検知限界

検知領域

(地震前兆が検知可能な領域)は
放送局位置からのドーナツ円帯となる

放送局電波がある程度減衰した領域 (ドーナツ円帯) が検知領域となっている

散乱体における電波強度の計算

簡易モデル計算

$$E = k(P^{0.5} / r)$$

$$k = 1 / 4\pi$$

$$\times \phi \times \psi \times \text{Cos } \theta \times C$$

P : 放送局出力[kW] (3kW以下)

r : 散乱体までの距離[km]

ψ : 視線方向視角[rad]

ϕ : 水平方向視角[rad]

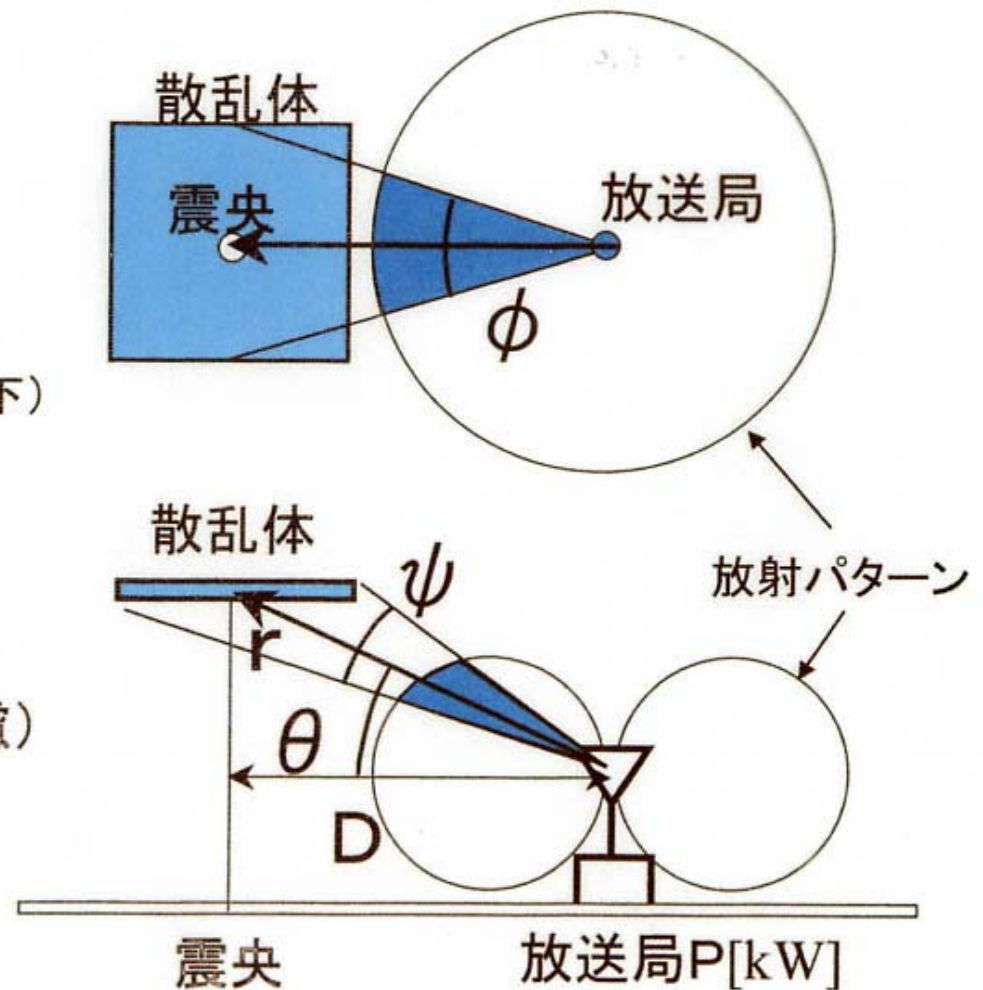
θ : 仰角[rad]

C : 定数(散乱体面積等を考慮)

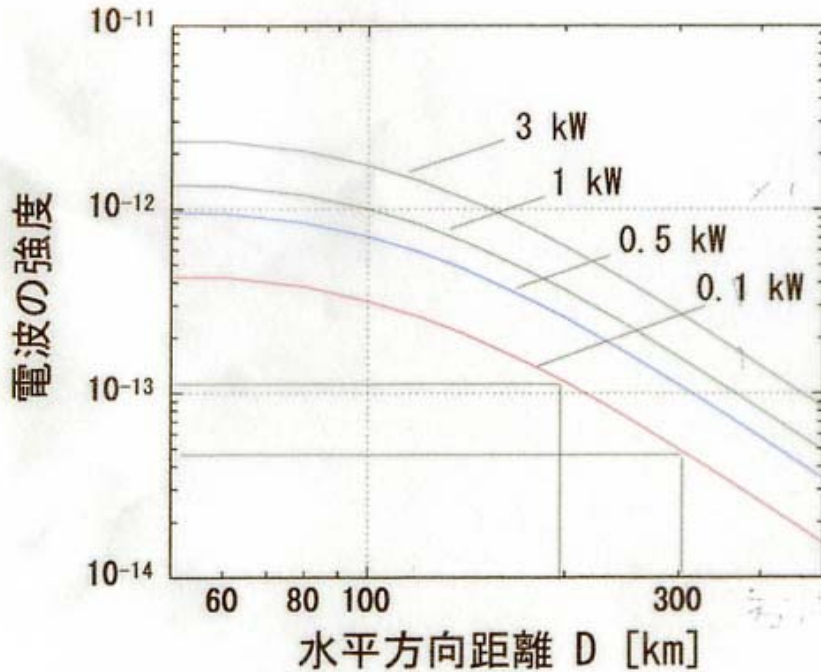
散乱体の仮定

100km四方

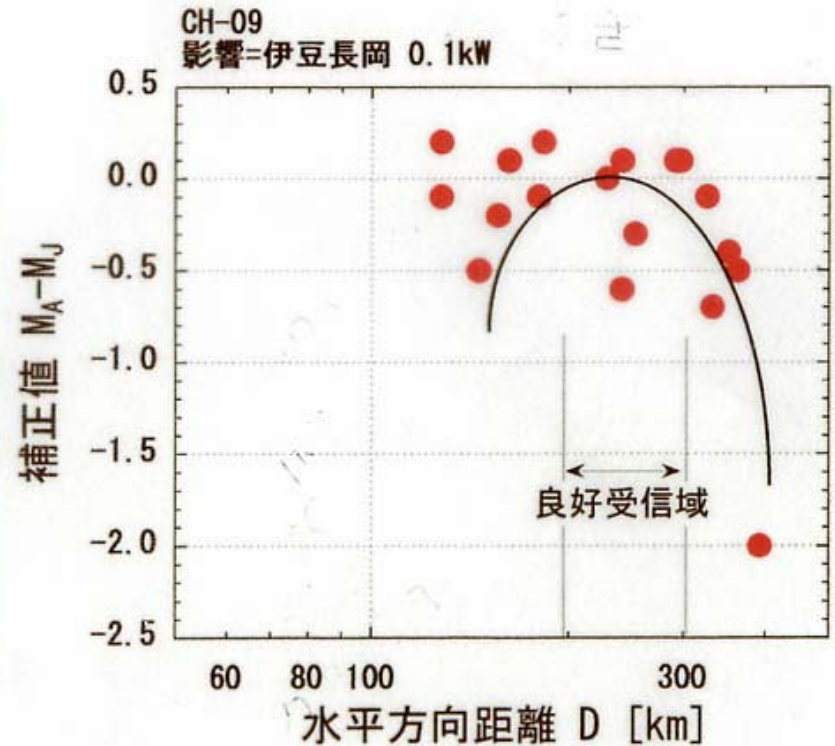
高さ100km



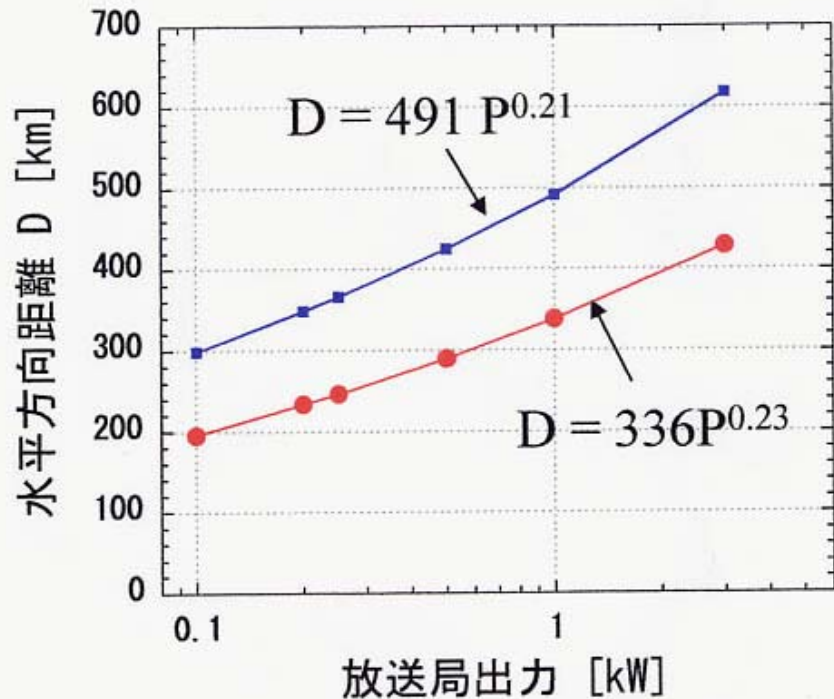
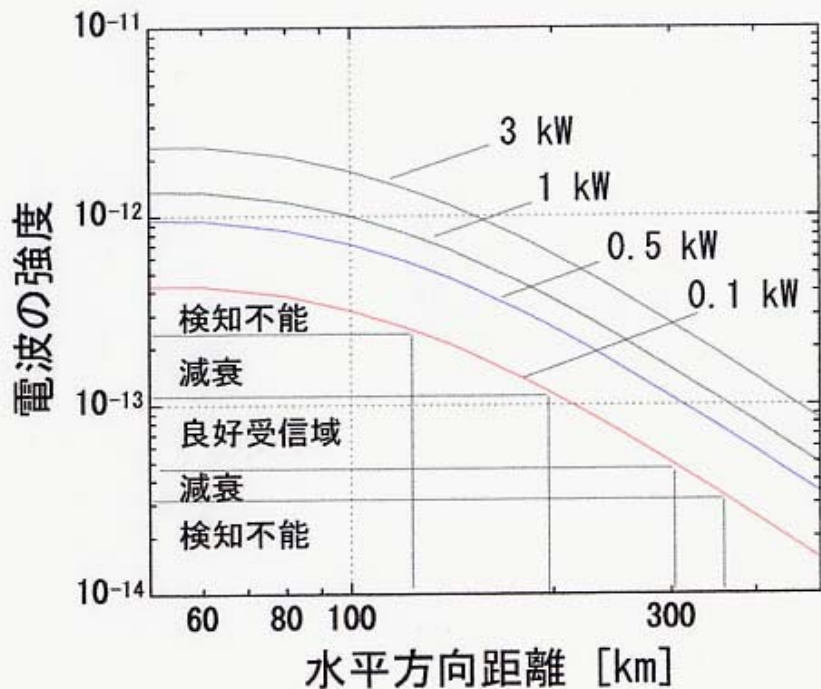
電波強度の計算結果



実測値



目標放送局から、出力に関係した距離範囲内で
良好に現象が観測されることがわかった



連続BF検知領域D[km]は次式で与えられる

$$(D/R)^2 = \sqrt{P} \Leftrightarrow D = RP^{0.25}$$

R=330~480 前後値は減衰

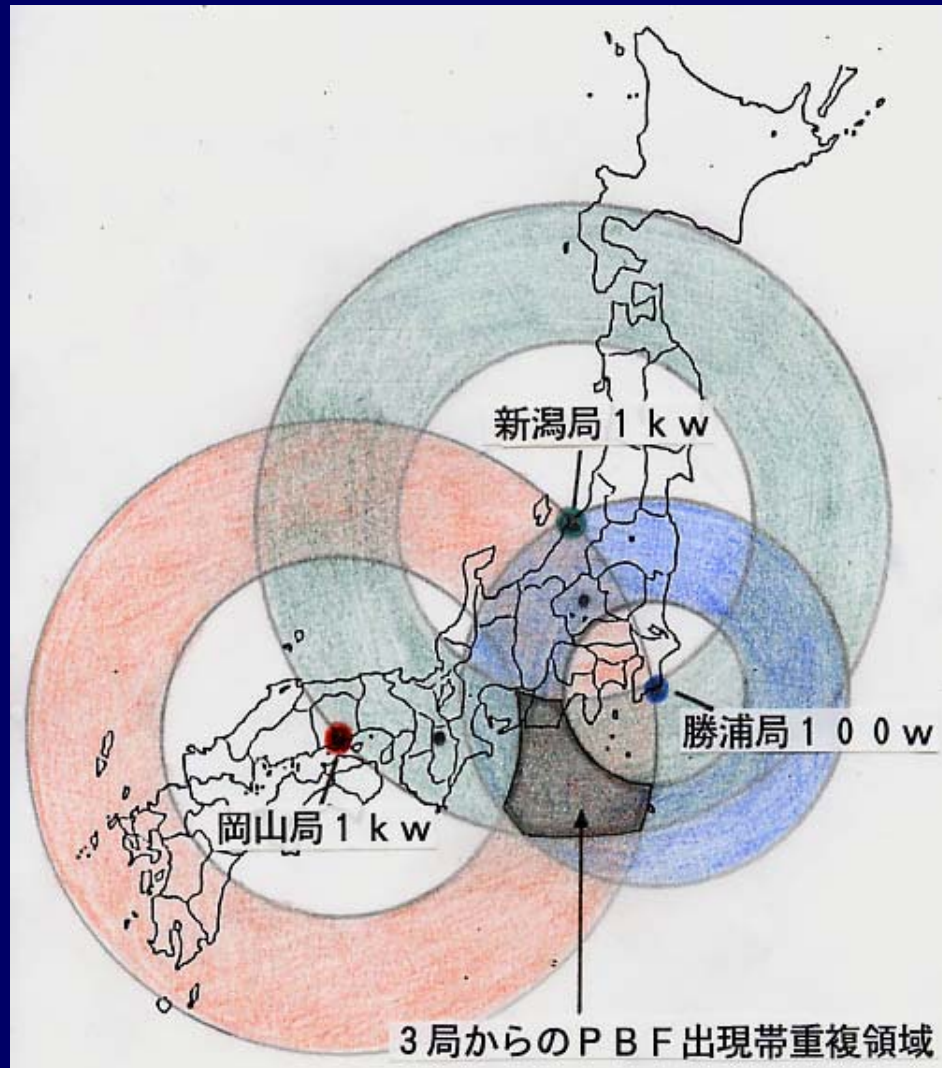
連続BF(PBF)の検知領域

同様に特異状態やBTについても観測事実から求めた

領域を推定する作業 モデル例

PBFが3局で出現観測された場合

日本のどこで受信観測しても構わない＝観測点位置や数は重要ではない



各放送局からのPBF出現帯ドーナツ円を描く。全てのドーナツ円の重複領域内に震央がある可能性が示唆される。

放送局の出力によってドーナツ円の半径は決まる

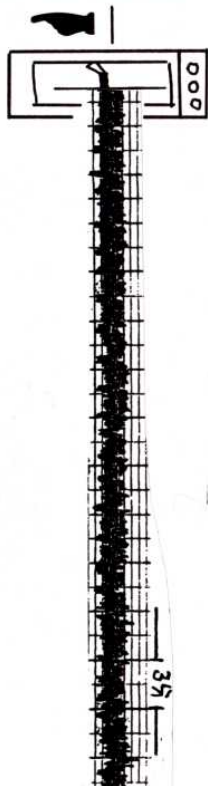
例えば、CH23 CH26 K8 に前兆が観測された場合 推定領域は？

23

P TX-7600 325° 5el 2001/1/24~

	北海道・東北	関東・中部	近畿・四国・中国	九州・南西
86.6		伊豆0.1P	浜田1P	
86.7	秋田3			
86.8				
86.9				
87.0	函館0.25		新居浜0.1	延岡0.1・石垣0.1
87.1				
87.2			舞鶴0.1P	

→
●
←

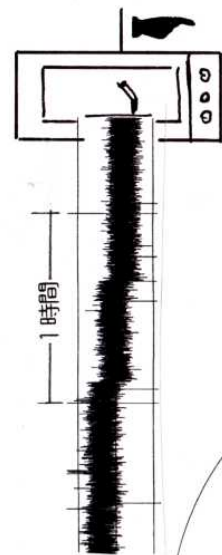


K8

設定 86.2MHz P TX-7900 70° 5el 2002/7/29~

85.9	金津若松0.25			
86.0	北見0.25 北松山0.1 鶴岡0.25・青森3	三つ峠0.1	高松1	佐世保0.25
86.1		いわき0.1		
86.2				宮崎0.5
86.3		前橋1	安芸千代田0.1	沖縄0.1
86.4	銅路0.25			
86.5		大和1	神戸0.5	

←
●
→

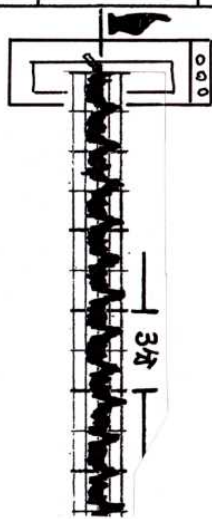


26

V JT-V31 260° 5el 2002/7/9~

	北海道・東北	関東・中部	近畿・四国・中国	九州・南西
86.5		大和1P	神戸0.5	
86.6		伊豆0.1P	浜田1P	
86.7	秋田3			
86.8				
86.9				
87.0	函館0.25		新居浜0.1	延岡0.1・石垣0.1
87.1				

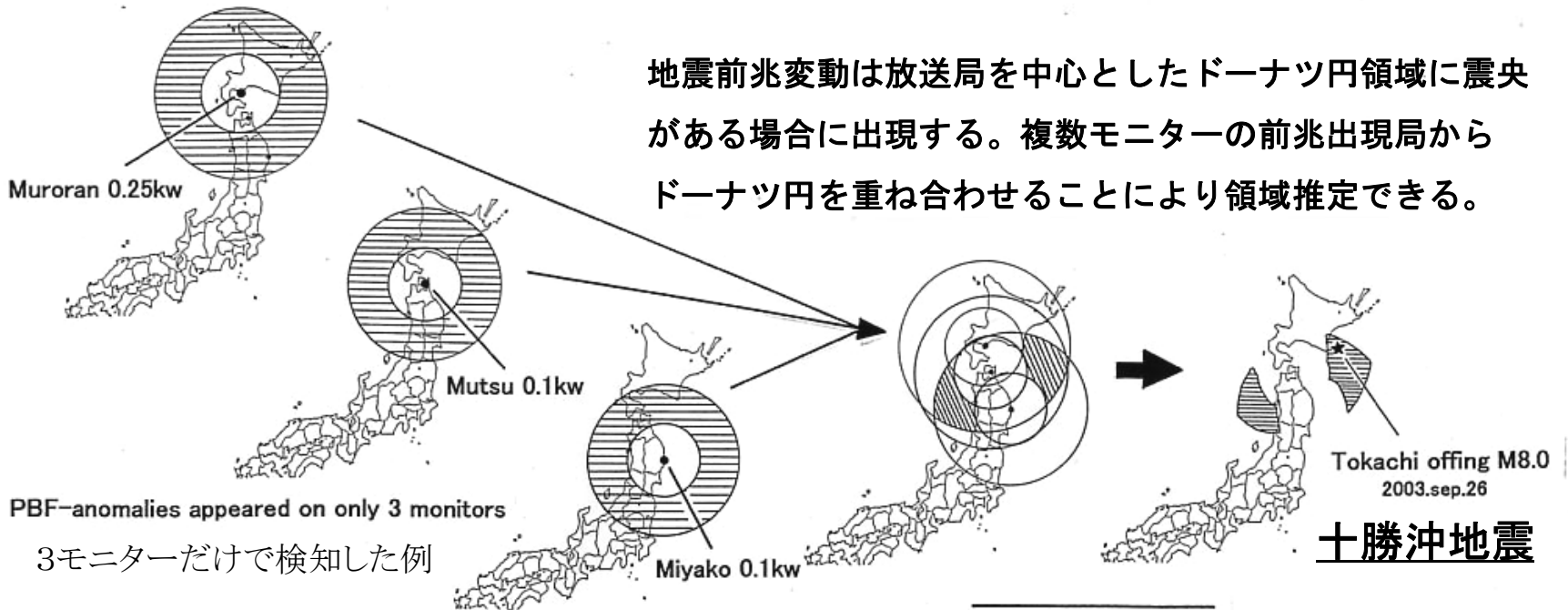
→
●
←



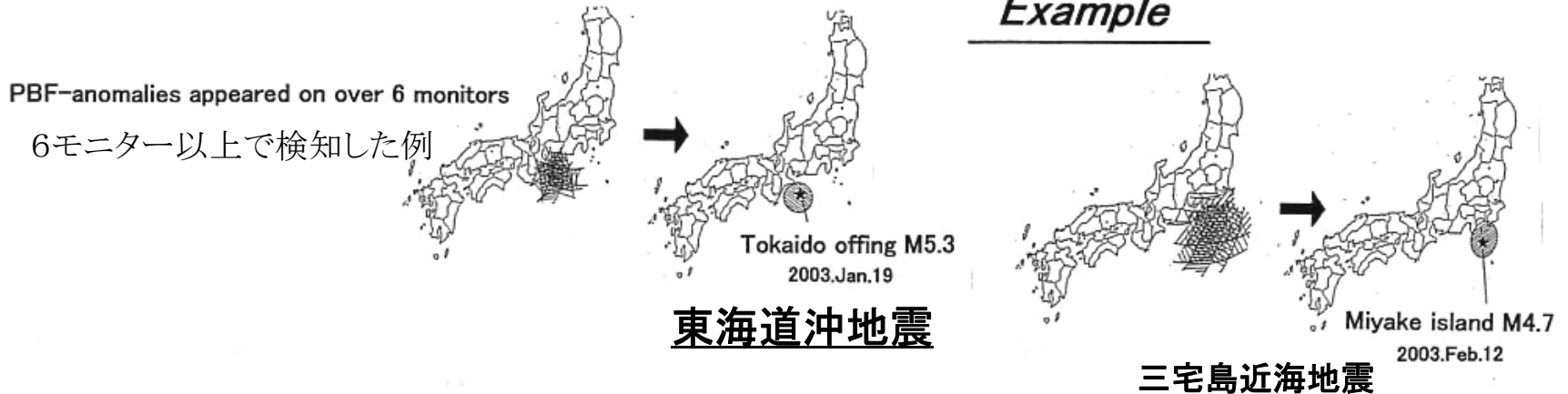
- ①波形から局の向きを確認
- ②辻褄の合う局選定
- ③各局から前兆検知ドーナツ円描く
- ④重複領域と過去例、波形情報等加味

地震前兆変動から地震の震央領域を推定する

地震前兆変動は放送局を中心としたドーナツ円領域に震央がある場合に出現する。複数モニターの前兆出現局からドーナツ円を重ね合わせることで領域推定できる。



Example



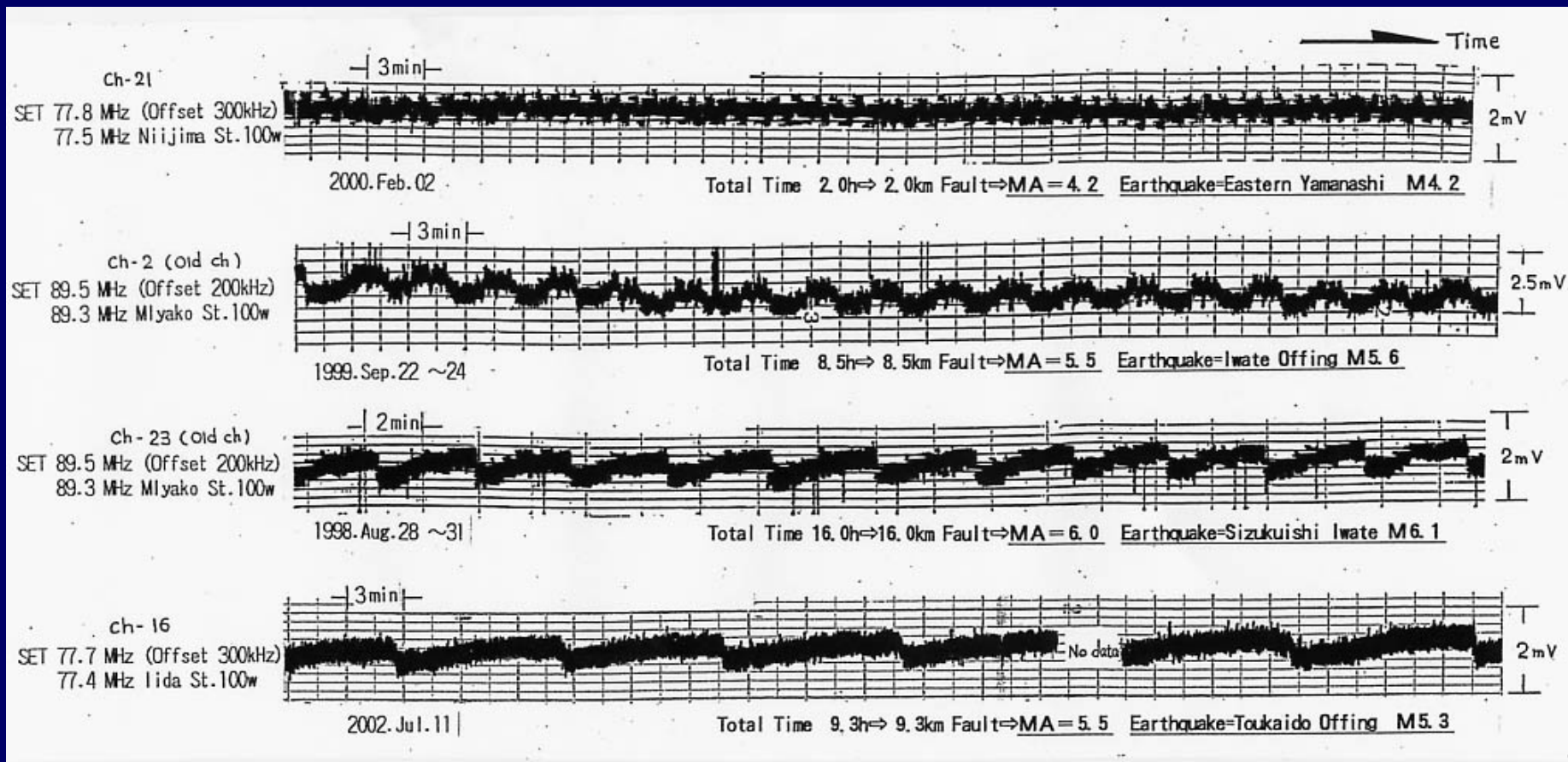


規模を推定する

連続BF変動 PBF継続時間計⇒規模を表わす

(正断層地震や海域震源地震では減衰して継続時間減少)

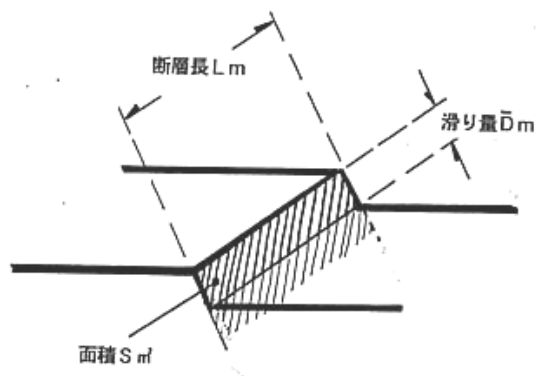
100kHz離調や300kHz離調局による場合や、PBF出現領域帯ボーダー付近では連続的ではない基線変動 (BF)となる。



連続BF変動継続時間計(h) ÷ 発生する地震の主震断層長(km)

但し、断層長L kmと規模Mとの関係は右式使用 $\text{Log } L = 0.5M - 1.8$ (e.g. Utsu.1999)

地震学での経験則 M : 断層長



地震の「規模」を表す3つのパラメータ

①断層長 L_m ②断層面積 S_m ③滑り量 \bar{D}_m

- 断層面積 S_m と断層長 L_m との関係

$$S = L \times L / 2 = L^2 / 2$$

- 滑り量 D_m と断層長 L_m との関係

$$\bar{D} = L \times 5 \times 10^{-5}$$



- 断層長 L_{km} とマグニチュード M との関係

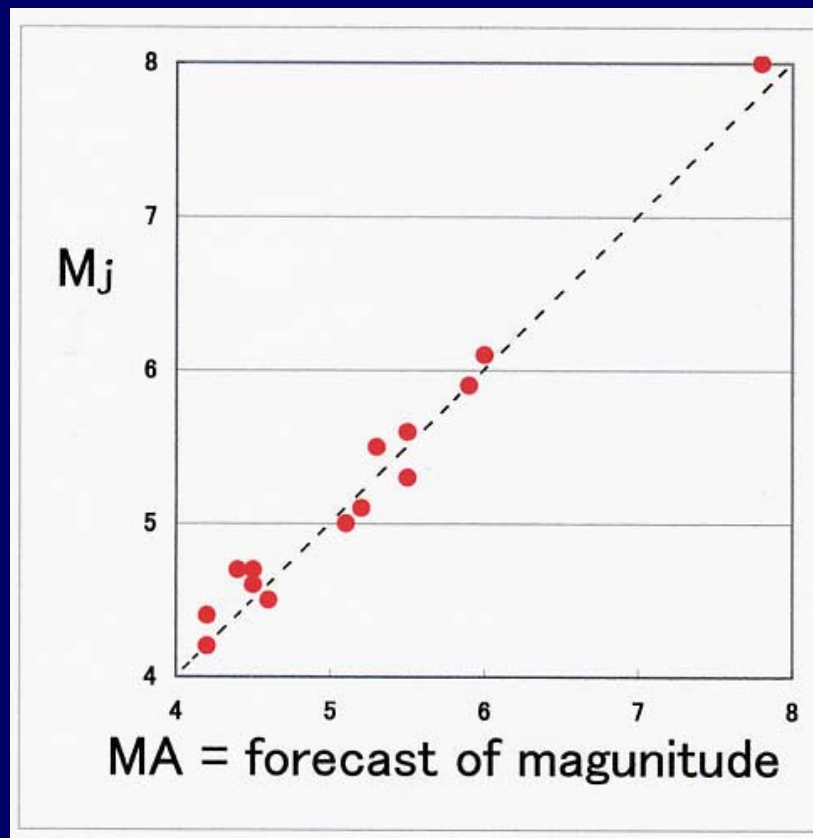
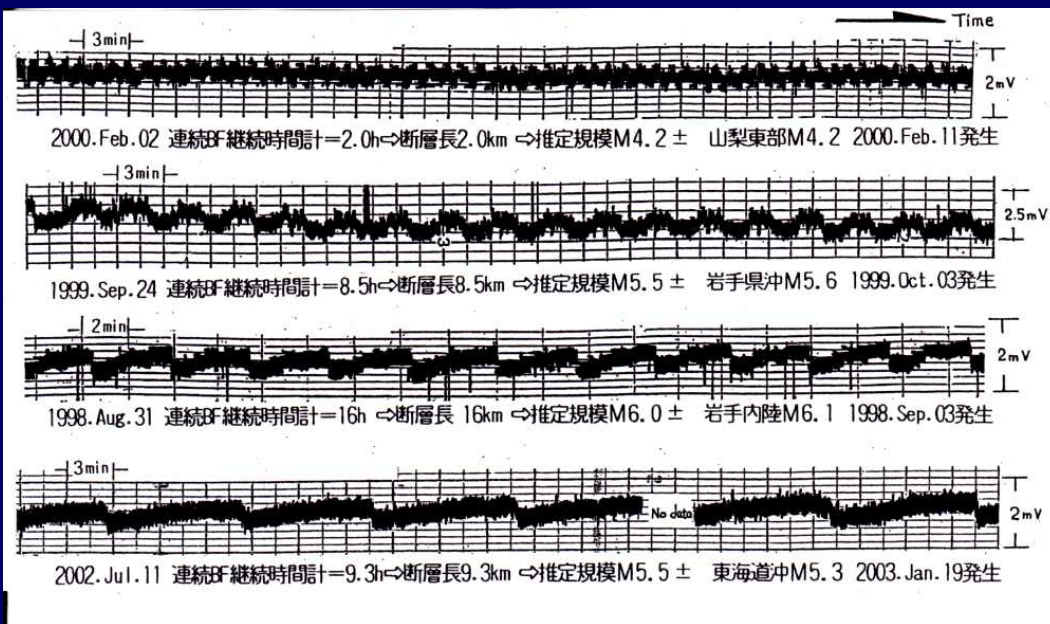
$$\log L = 0.5 \times M - 1.8$$

マグニチュード	断層の長さ (km)
2.6	0.32
2.7	0.35
2.8	0.40
2.9	0.45
3.0	0.50
3.1	0.56
3.2	0.63
3.3	0.71
3.4	0.79
3.5	0.89
3.6	1.00
3.7	1.12
3.8	1.26
3.9	1.41
4.0	1.58
4.1	1.78
4.2	2.00
4.3	2.24
4.4	2.51
4.5	2.82
4.6	3.16
4.7	3.55
4.8	3.98
4.9	4.47
5.0	5.01
5.1	5.62
5.2	6.31
5.3	7.08
5.4	7.94
5.5	8.91
5.6	10.00
5.7	11.22
5.8	12.59
5.9	14.13
6.0	15.85
6.1	17.78
6.2	19.95
6.3	22.39
6.4	25.12
6.5	28.18
6.6	31.62
6.7	35.48
6.8	39.81
6.9	44.67
7.0	50.12

PBF変動出現継続時間計から予測される規模は、

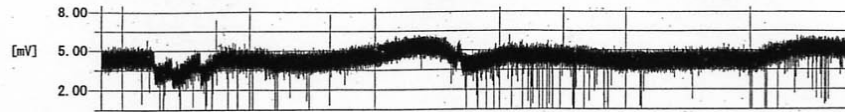


実際の発地震の主震規模と調和



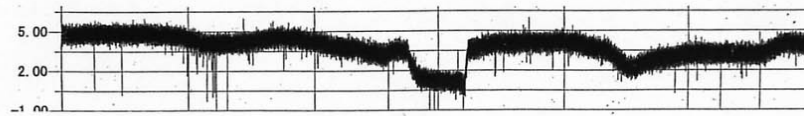
同観測装置の過去例から「比例法」相対値比較で規模推定 (誤差大きい)

過去例



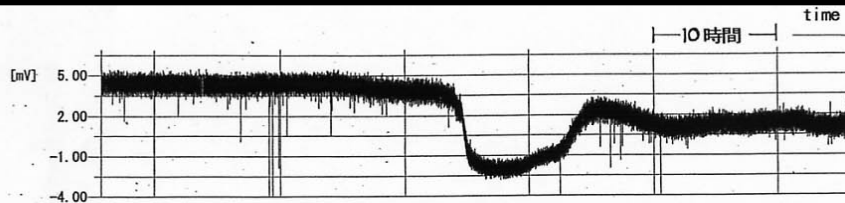
82系奥

過去例 千葉北西M4.7前兆
2005.5/16出現⇒2005.5/30発生



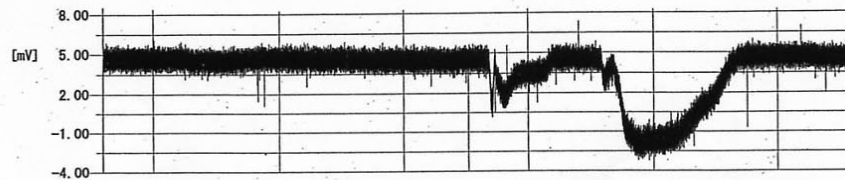
82系奥

過去例 千葉北西M6.0前兆
2005.3/30出現⇒2005.7/23発生



82

No. 1491前兆



82

PBFからはM7.1±推定

CH6-PBF 継続時間計 = 欠測時間多数あるが欠測時間を除いても5.5時間程あり、
PBF継続時間計(h) = 主震断層長(km) 経験則より
M7.1 ± 0.5以上の可能性を支持

推定規模 = M7.4 ± 0.5

BF前兆だけで規模推定は可能か

© copyright 2006 YSBO 八ヶ岳南麓天文台

No1491前兆 = 2008年6月14日発生 岩手宮城内陸地震 M7.2

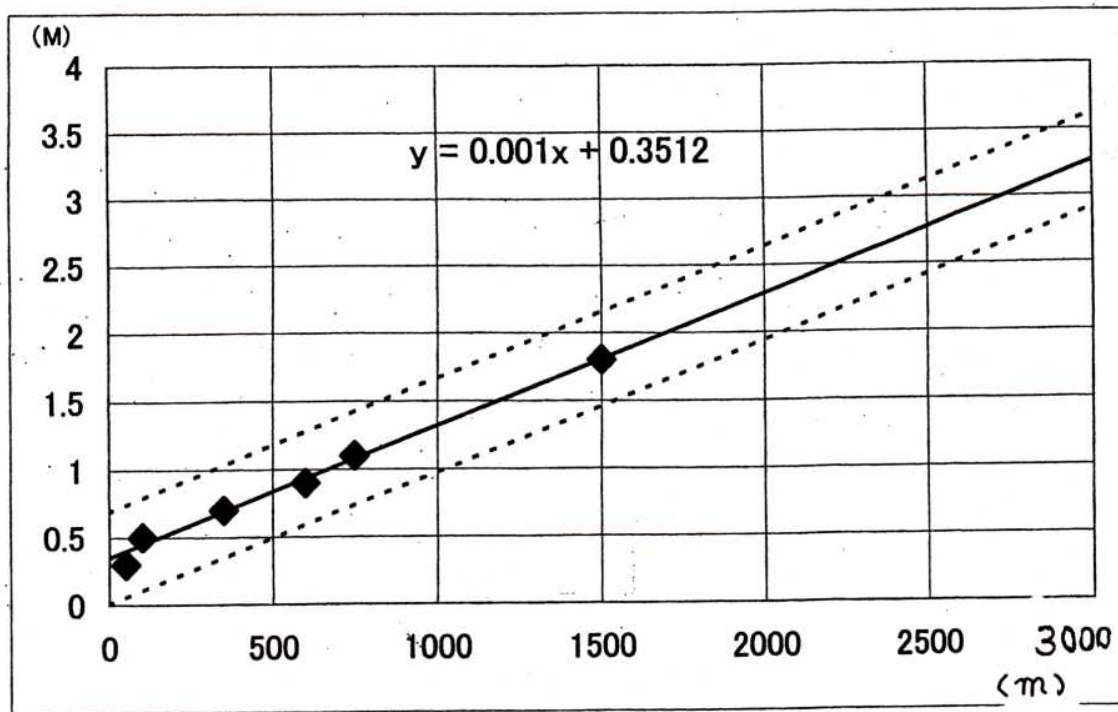
- その他 :
- ① 基線幅増大BT変動出現 = M5以上
 - ② 基線糸状態特異変動出現 = M6±以上

M6.5以上規模地震ではPBFが観測されている

海深減衰

震源が海域にある場合、明らかな前兆が減衰が認められる

陸から離れた沖海域下震源地震では、M7を大きく超える規模でないと前兆検知困難な場合がある



Water Depth Correction

海域規模大の地震の場合
=明確なPBF出現
しかし前兆検知モニター数
=少
前兆からの推定規模に海
深減衰による補正必要

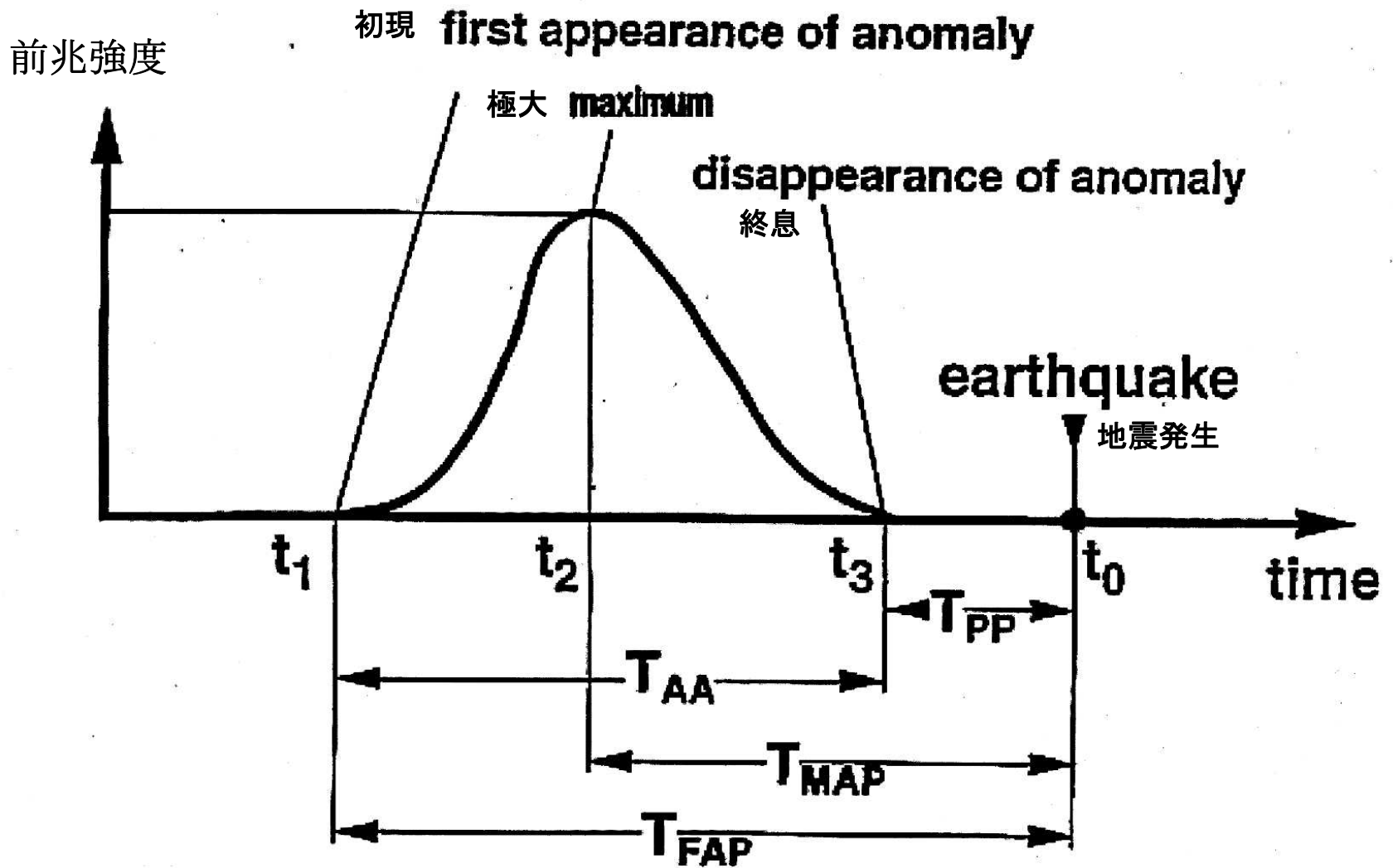
500m±=M 0.8±0.3
1000m±=M 1.3±0.3
2000m±=M 2.3±0.3
3000m±=M 3.3±0.3

プラス補正必要



発生時期の推定

地震前兆の時間変化基本形態



時間変化比率経験則

$T_{fap}:T_{map}=20:13$

$T_{fap}:T_{pp}=6:1$

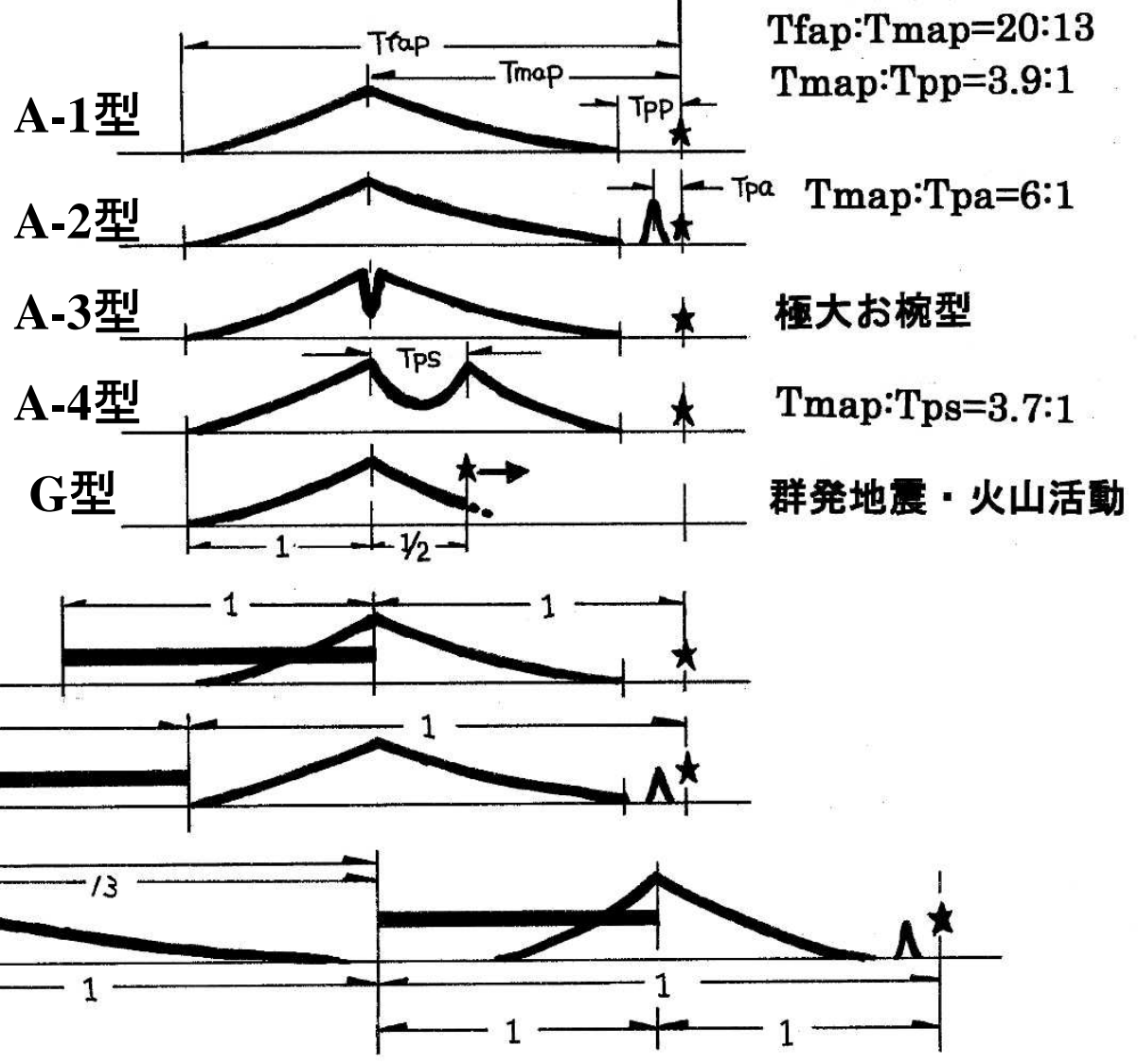
$T_{map}:T_{pp}=3.9:1$

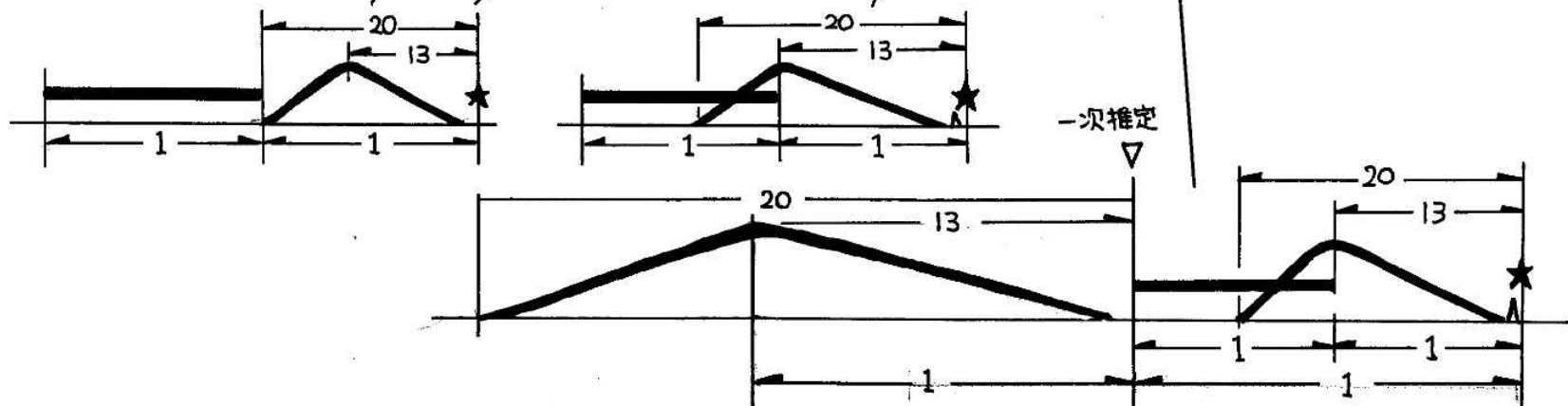
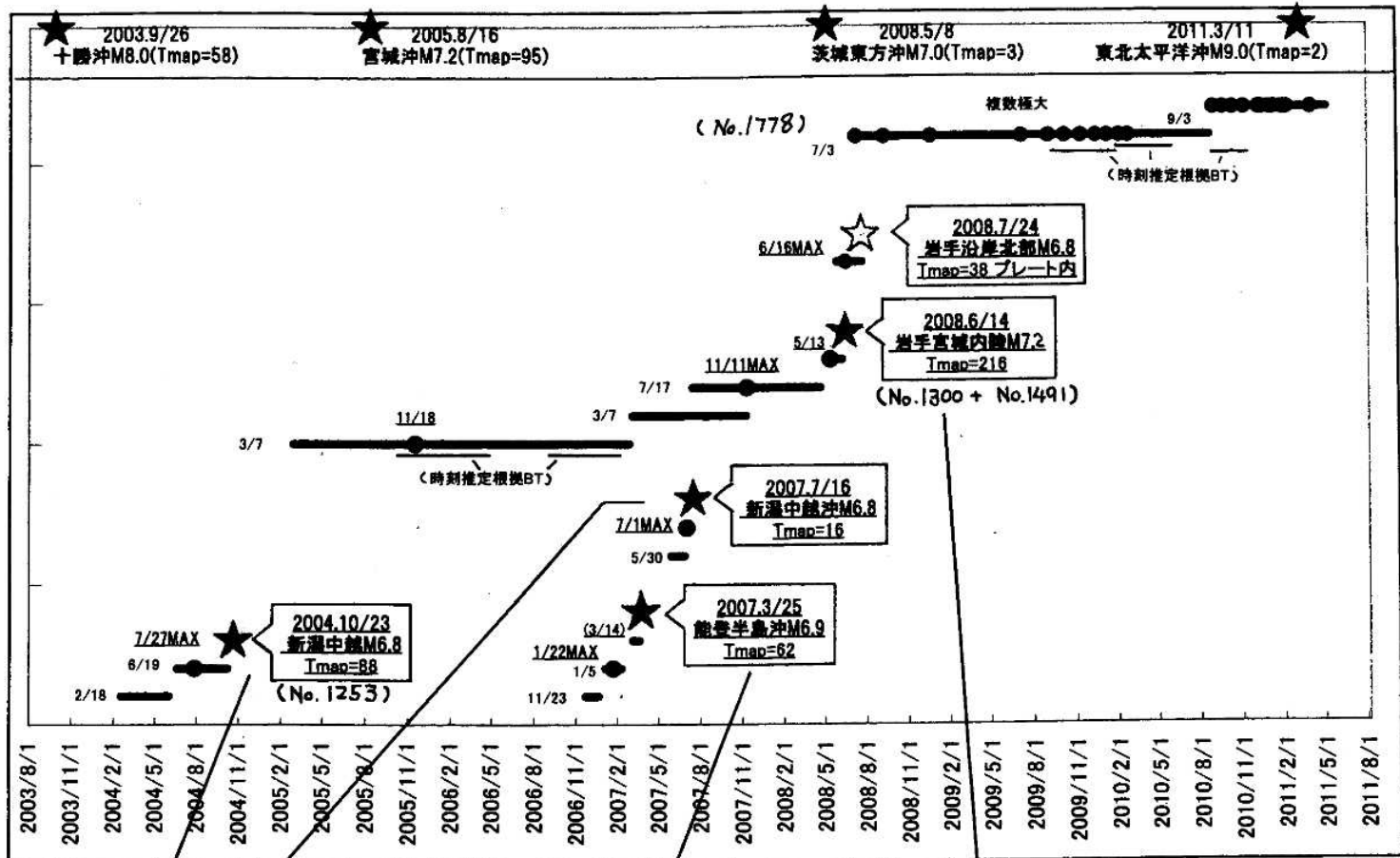
主な地震前兆形態

バリエーション模式図

A型は基本形のバリエーション
 P型はA型に特異状態が先行出現

地震発生





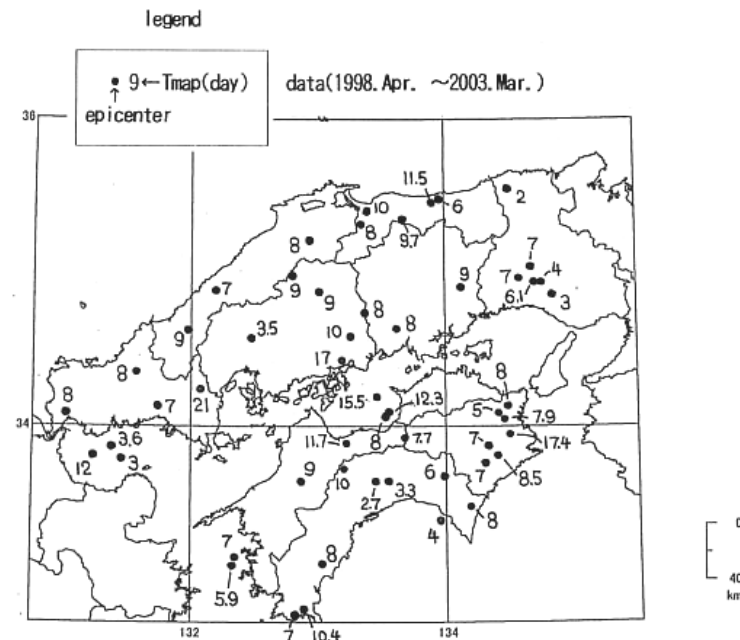
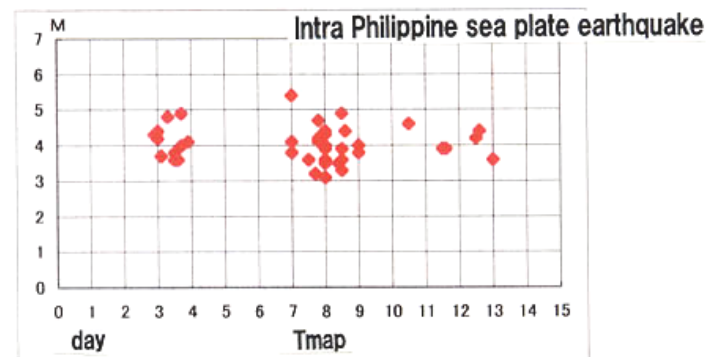
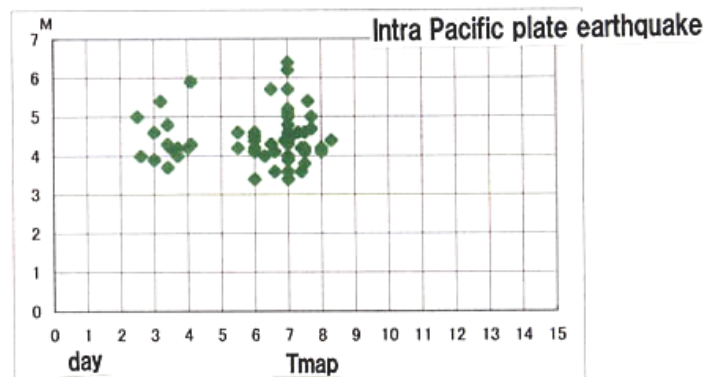
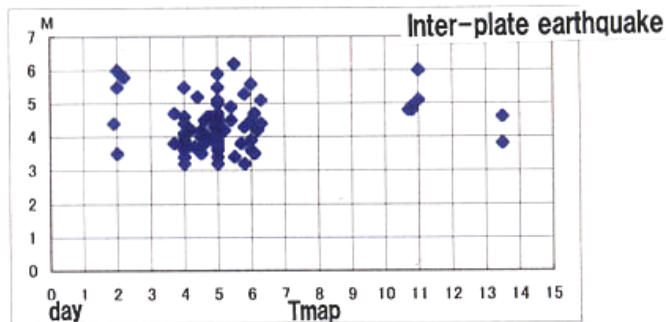
Tmap of Oceanic plate earthquake

1999.Jan ~ 2001.Sep

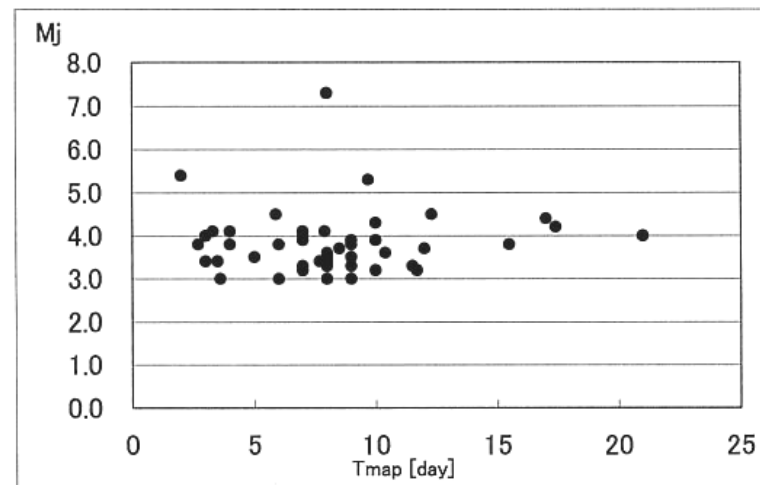
Inter-plate earthquake = 86

Intra Pacific plate earthquake = 61

Intra Philippine sea plate earthquake = 45



Tmapは歪み速度に依存している可能性







Example TMAP of Crustal Earthquake
 Tyuugoku & Shikoku Region in Japan

参考：日本列島陸域歪み速度分布と地震前兆期間の長さの関係

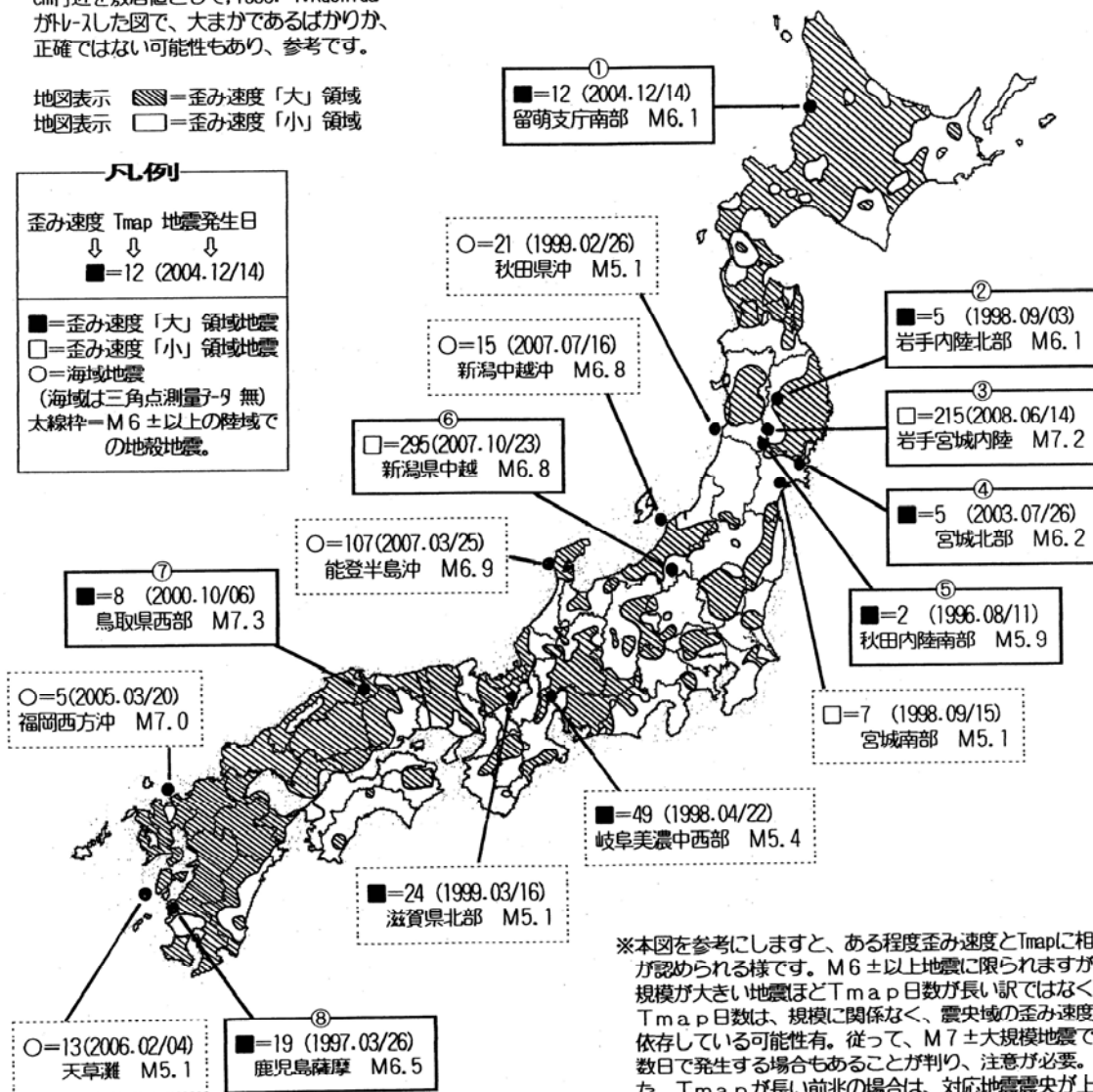
各地の主な地殻地震のTmap日数と歪み速度分布比較図

本地図は大まかな陸域歪み速度を二段階に大別表示した図。国土地理院三角点矢印表示より1985-1995から、移動量 10^{-7} cm付近を数値として、1996. Y.Kushidaが採入れた図で、大まかであるばかりか、正確ではない可能性もあり、参考です。

地図表示  =歪み速度「大」領域
 地図表示  =歪み速度「小」領域

凡例		
歪み速度	Tmap	地震発生日
	↓	↓
	↓	↓
■	=12	(2004.12/14)
■	=歪み速度「大」領域地震	
□	=歪み速度「小」領域地震	
○	=海域地震	
(海域は三角点測量より無)		
太線枠=M6以上の陸域での地殻地震。		

※本観測本格化以降発生した各地の主な浅い地殻地震と認識される地震を表示。1995年兵庫県南部地震は全前兆期間を捉えていない可能性があるため省いてあります。太線枠で囲った地震はM6±以上規模地震。



※本図を参考にしますと、ある程度歪み速度とTmapに相関が認められる様です。M6±以上地震に限られますが、規模が大きい地震ほどTmap日数が長い訳ではなく、Tmap日数は、規模に関係なく、震央域の歪み速度に依存している可能性有。従って、M7±大規模地震でも数日で発生する場合もあることが判り、注意が必要。また、Tmapが長い前兆の場合は、対応地震震央が上図の白い領域内にある可能性が高いことが示唆される。
 (解説とまとめは次頁参照)

2002.7/24~11/1

基線幅増大 (BT) 周期的変化から発生時期を推定する

●BT-2の日々出現の中で長時間出現（変動値よりも継続時間重視）が認められる ⇒ 小ピークとする。



●周期的小ピーク平均間隔の6倍値または9倍値を周期性のない小ピーク日に加算

←周期性の無い小ピーク (9/14)

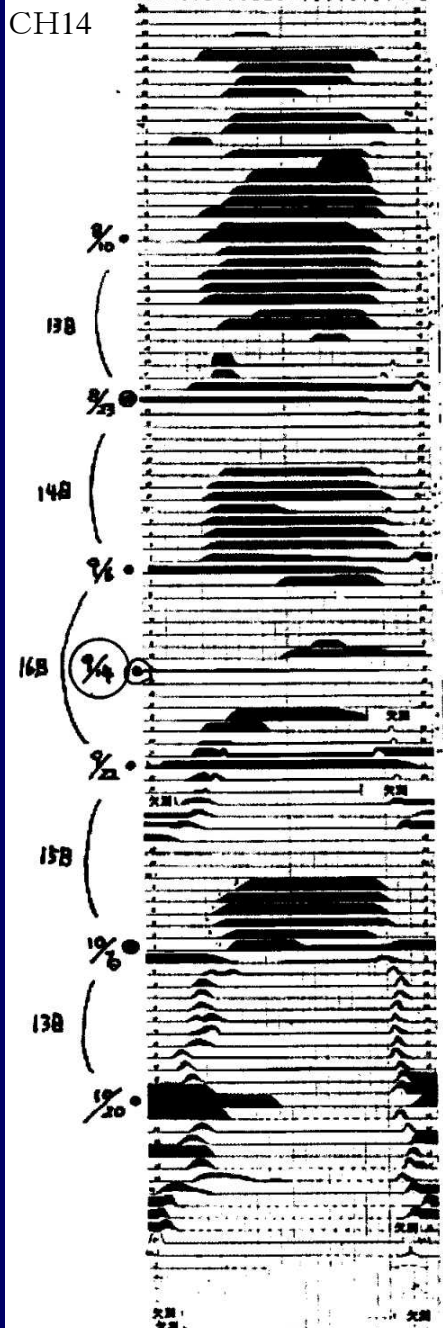
平均周期=14日

この時は他モニターにもBTが観測され、6倍値では調和しないことがわかった

$$\text{周期性ない小ピーク } 9/14 + (14 \times 9) = 2003.1/18 \pm$$

BT周期的変化から推定発生日 = 2003年 1月18日 ±

実際：東海道沖M5.3 発生日 = 2003年 1月19日



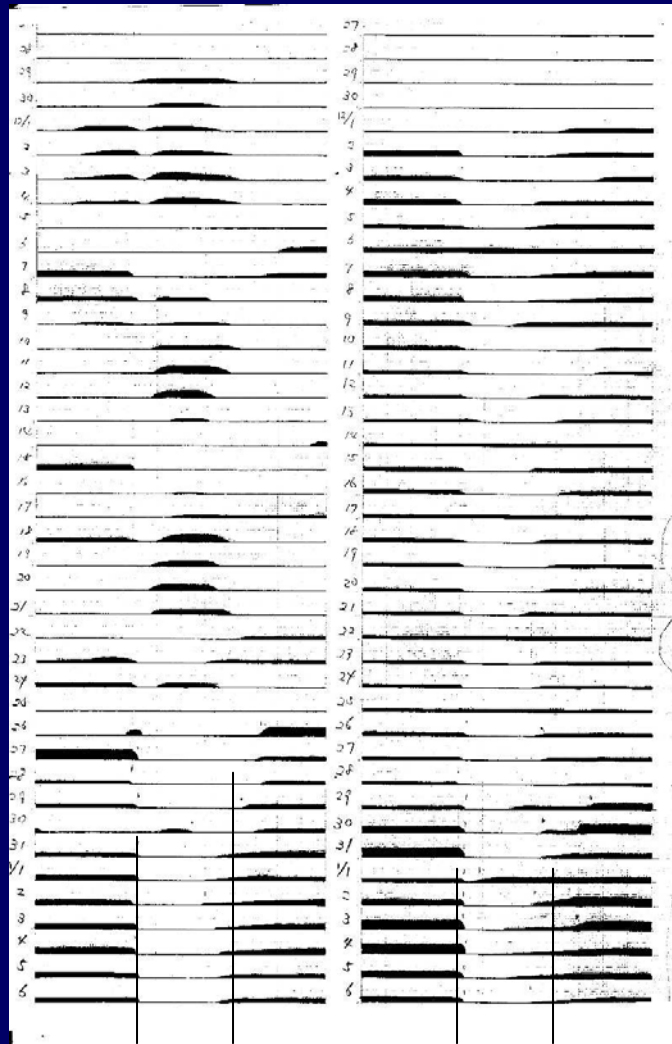
発生時刻を推定できる地震がある

CH-8

CH-2

2007

2008



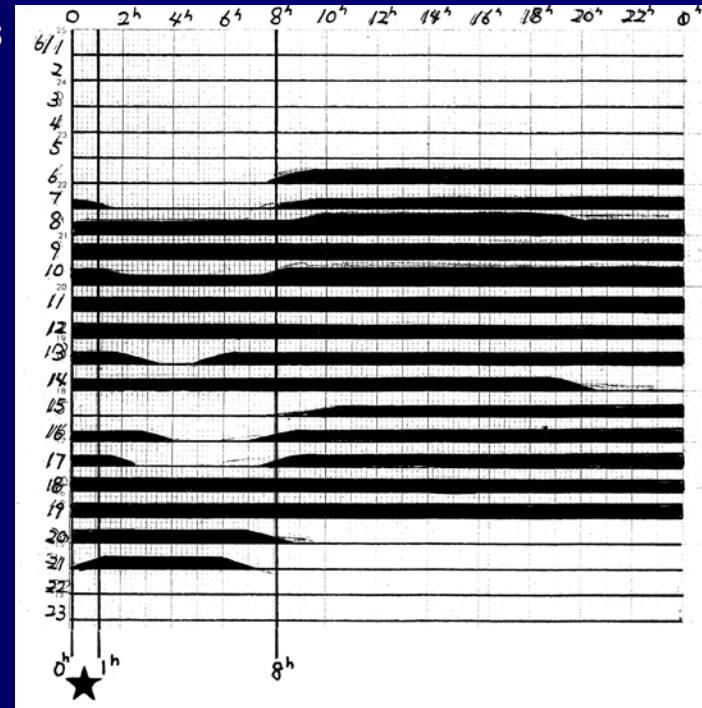
8:30 15:00 8:30 15:00

発生時刻=8:43

2008.6/14 岩手宮城内陸M7.2

CH-7

2008



1:00 8:00

発生時刻=0:26

2008.7/24 岩手沿岸北部M6.8

BTの日々出現、終息時刻
と地震発生時刻の相関



まとめと整理

前兆変動から地震の三要素を推定する

地震発生までに数週間以上を要する場合には

①場所 ②規模 ③時期 の順に推定が可能となる

領域の推定⇒ 複数のPBF出現ドーナツ円を重ね合わせる

局からのドーナツ円半径 $D \text{ km} = R \times P^{0.25}$

$P = \text{FM放送局出力(kw)}$ $0.1 \text{ kw} \leq P \leq 1 \text{ kw}$

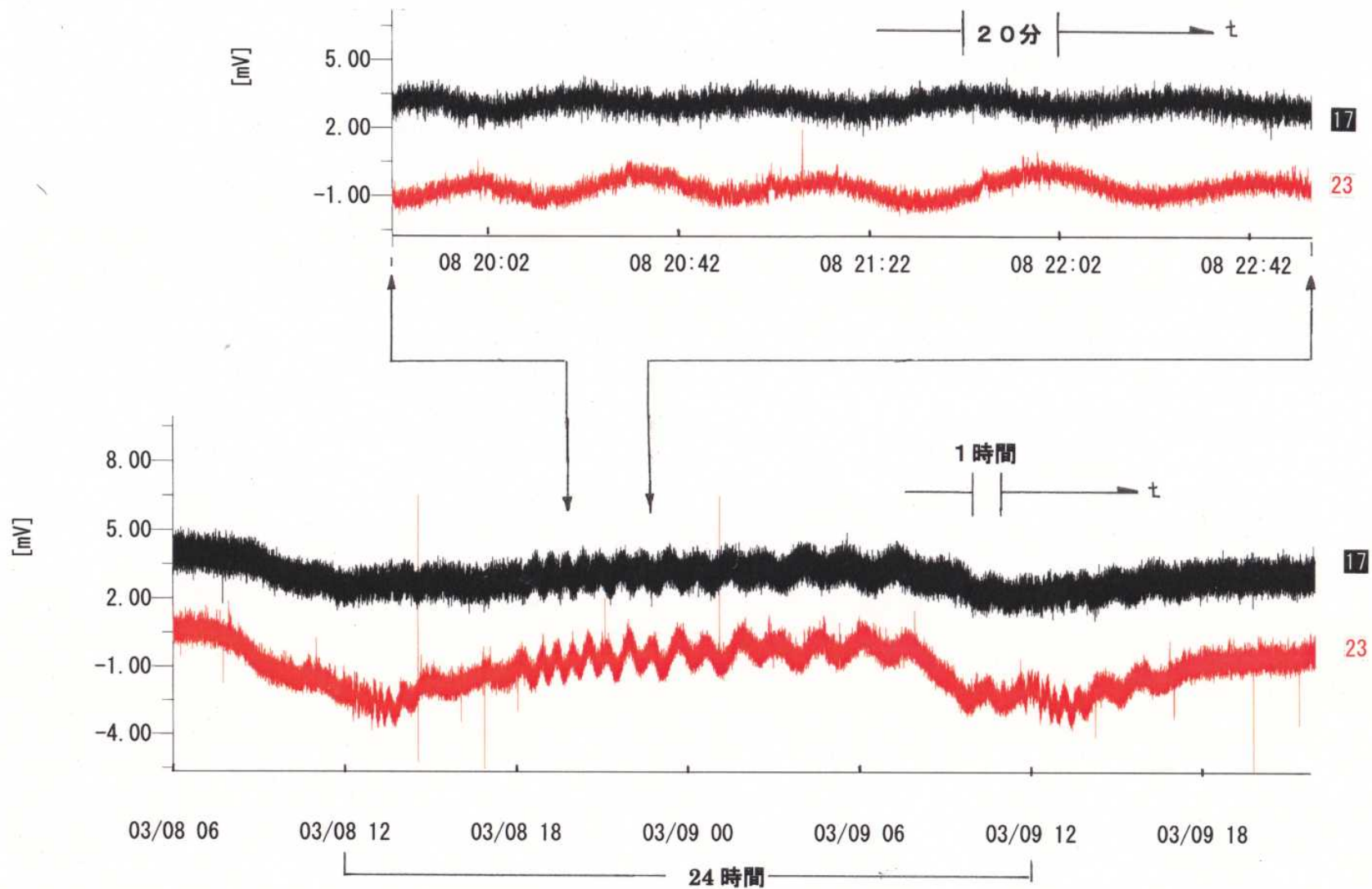
規模の推定⇒ PBF変動の継続時間計(h)を測定する

PBF継続時間計(h) \div 主震断層長(km)

断層長Lkmと規模Mとの関係 $\log L = 0.5M - 1.8$ (e.g,Utsu.1999)

時期の推定⇒ $T_{\text{map}} : T_{\text{pp}} = 3.9 : 1$ 等の発生時期推定

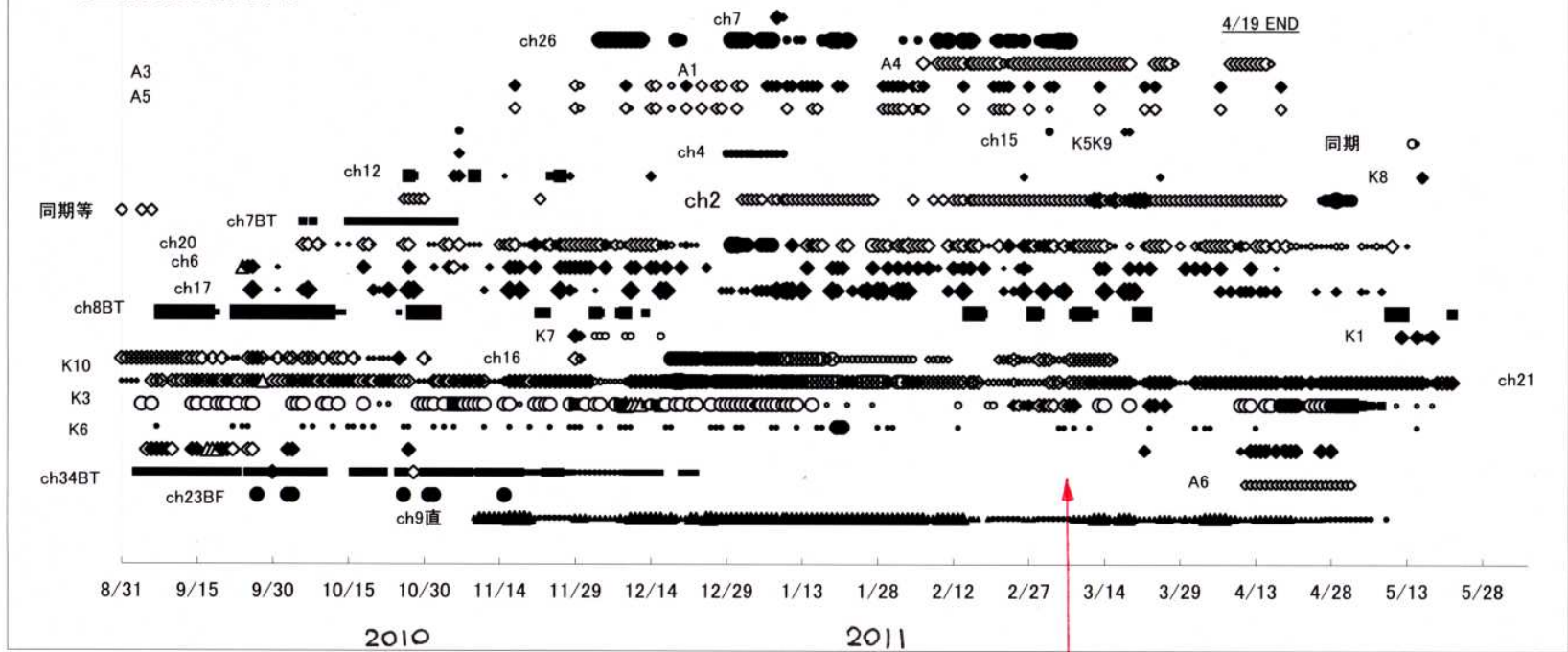
時間変化経験則を使用



2011.3/11 発生 東北太平洋沖地震M9.0

前兆 2011.3/8-9 出現

No1778 直前前兆認識



2011.3/8-9

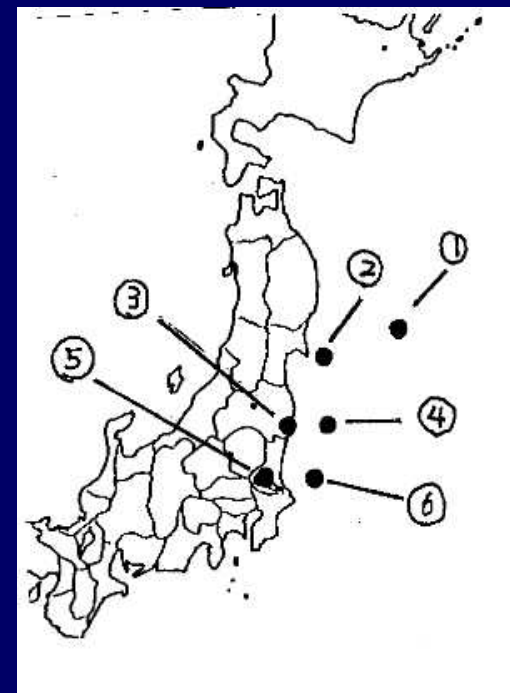
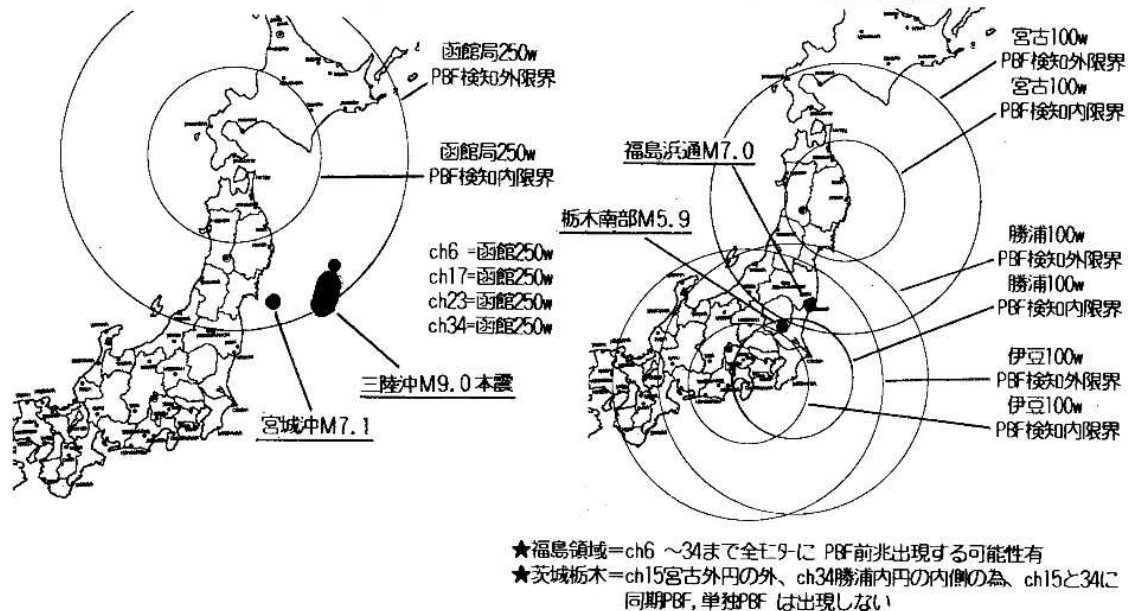
CH17・CH23 同期BF変動出現観測

東北太平洋沖巨大地震の前兆出現時期前後の前兆出現状況

長期継続前兆群を観測解析中で別地震前兆と即座に識別しなかった

東北太平洋沖地震大型余震 領域推定識別可能実績

東関東～東北太平洋側地震の前兆 領域識別可能

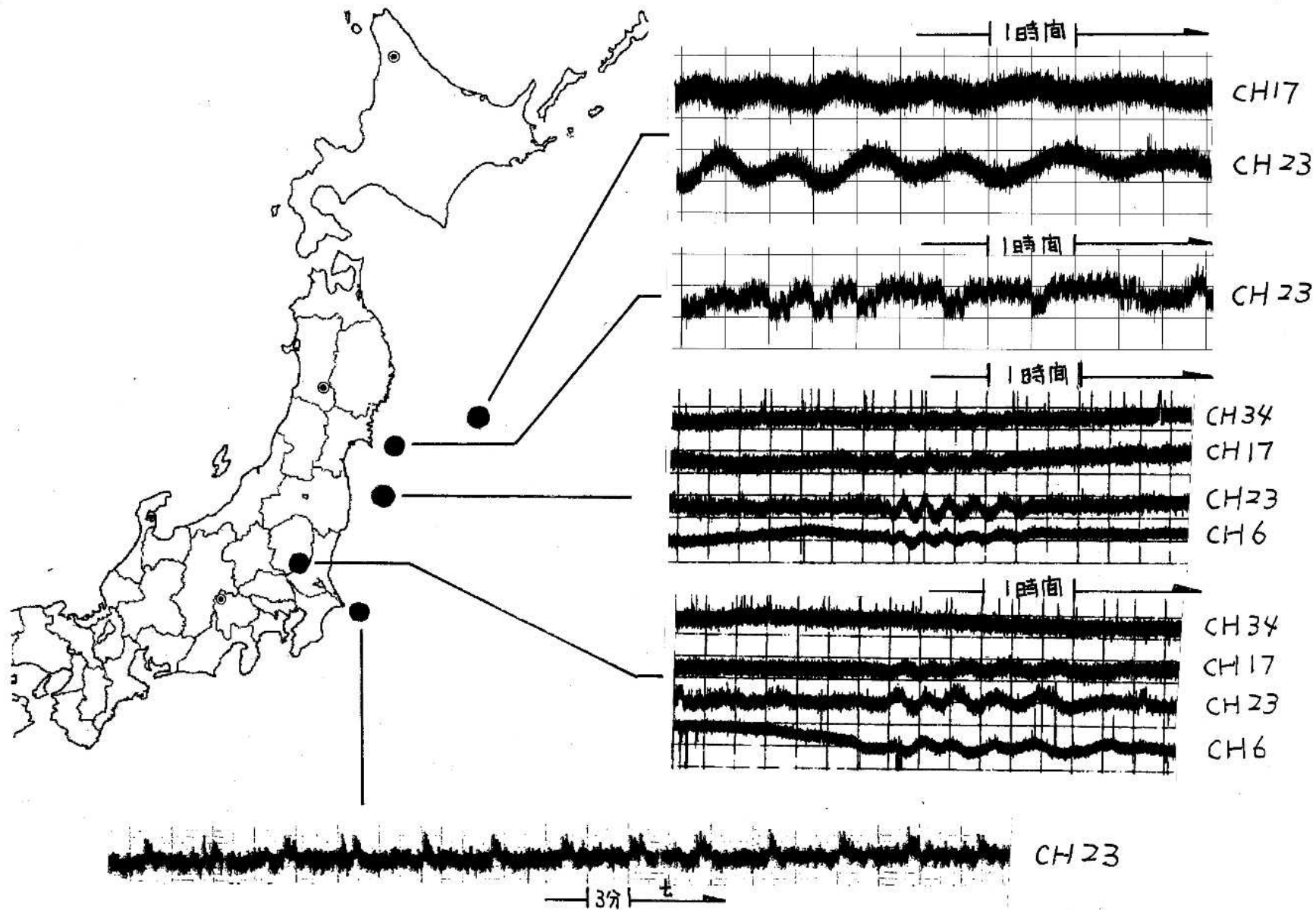


発生地震	規模	発生日	推定発生日	推定規模	(極大日・Tmap)
宮城県沖	M6.5	3/28	3/27 or 3/30±	M7.5±0.5	(3/25 Tmap=3)
宮城県沖	M7.1	4/7	4/6±	M7.0±0.5	(3/21.5 Tmap=17)
福島浜通り	M7.0	4/11	4/8 or 4/11±	M7.0±0.5	(4/5.5 Tmap=5.5)
栃木南部	M5.9	4/16	4/11 or 4/14±	M6±0.5	(4/9 Tmap=7)
千葉東方沖	M6.0	4/21	4/21±	M5.9±0.5	(4/16 Tmap=5)
福島県沖	M5.7	4/28	4/28 or 5/1±	M5.8±0.5	(4/26 Tmap=2)

E9-CH 前兆	同期PBF					ch23 PBF	ch	北側局■	南側局●
	6	15	17	23	34				
① 三陸沖			■	■			06	函館250w	伊豆100w
② 宮城沖	■		■	■	■	■	15	宮古100w	室蘭100w
③ 福島陸	●	■	●	●	●	●	17	函館250w	伊豆100w
④ 福島沖	●	■	●	●	●	●	23	函館250w	伊豆100w
⑤ 茨城栃木	●		●			●	34	函館250w	勝浦100w
⑥ 茨城沖	●		●	●		●			

※各E9-設定周波数に対し300kHz内にある影響局表左表では南北局マ-ク識別
 (空白部は前兆無し)

※最初の宮城沖は同期BF継続時間計から規模推定し、失敗。
 次の宮城沖は初現～極大から発生日推定。



東北太平洋沖地震余震前兆波形

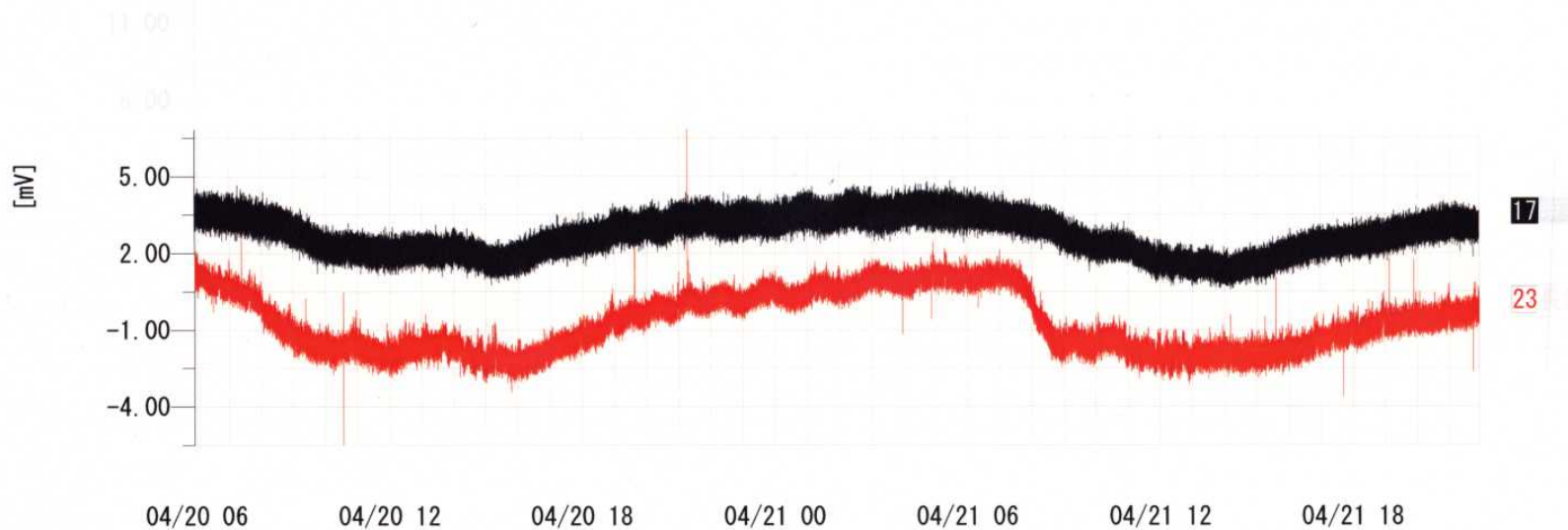
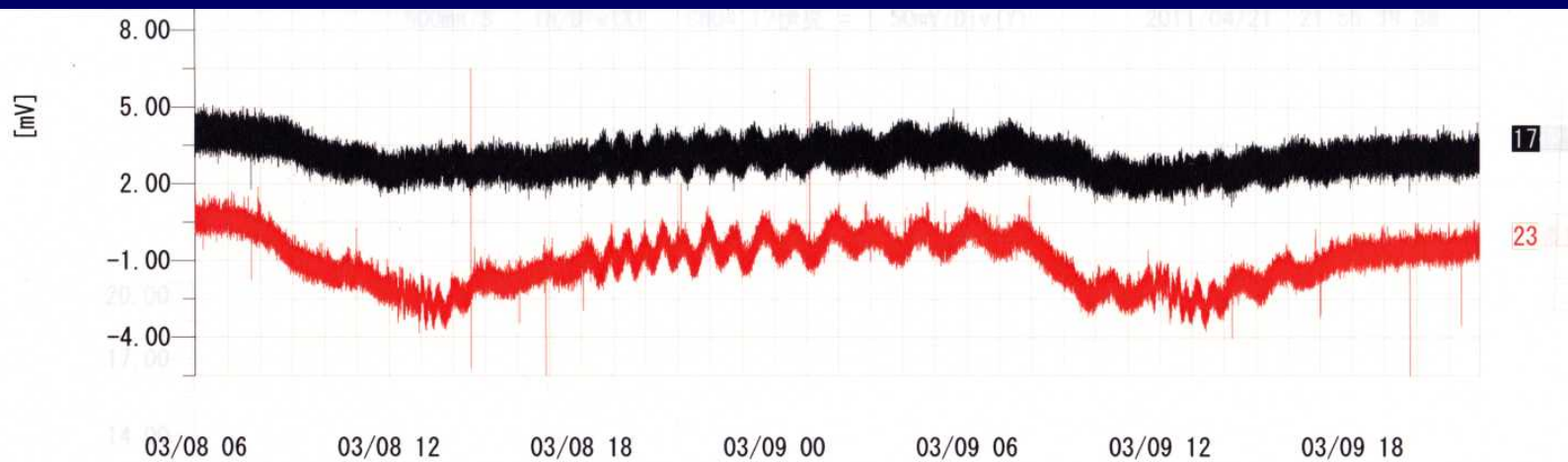
3/12発生 長野県北部M6.7 = 前兆変動識別検出できず

(陸域M6以上規模地震で前兆が検知できなかった地震は初めて)

3/15発生 静岡東部M6.4 = 3/11 東北太平洋地震発生
前にK8特異状態南麓
ch26火山関連前兆を
観測



伊豆付近を含む南関東付近でM6.0±0.5 3/16± 地震発生を推定

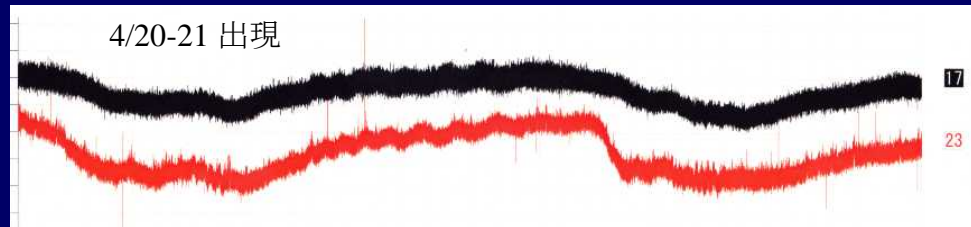
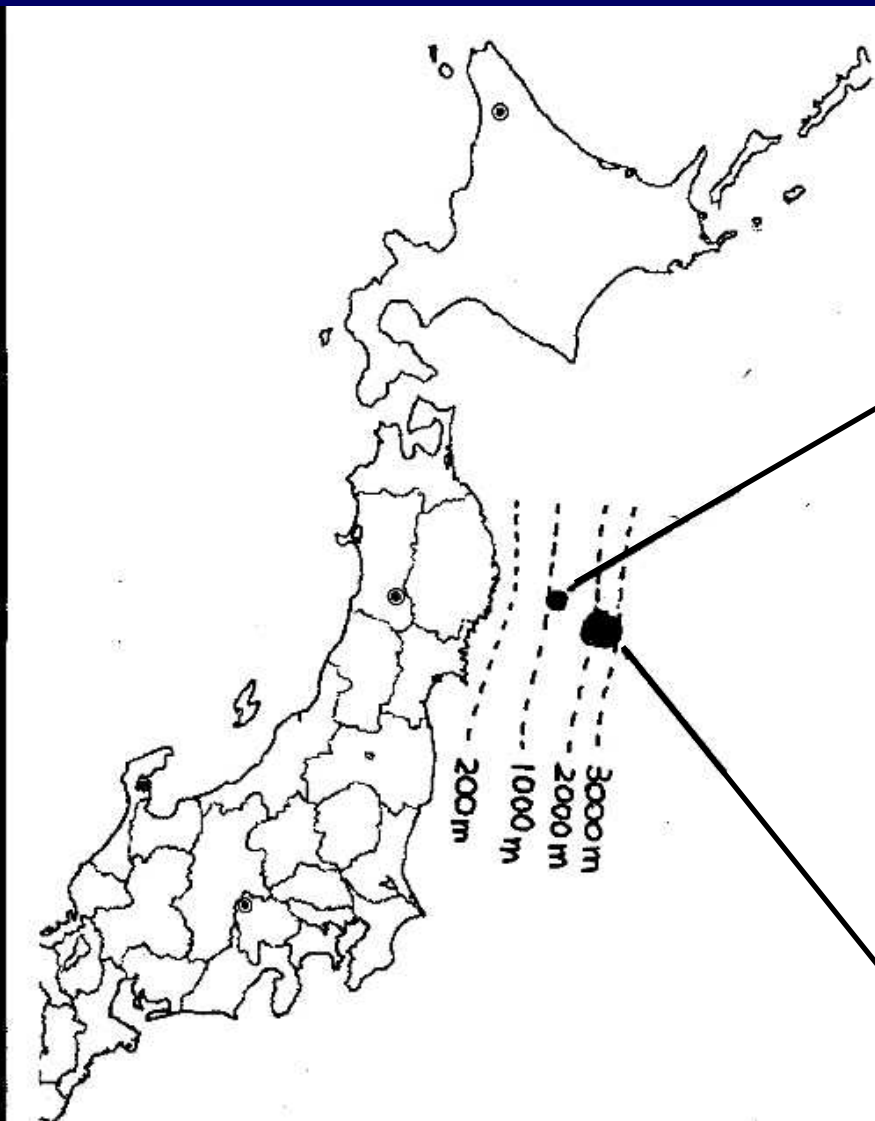


2011.3/8-9

2011.4/20-21

上M9.0前兆と比較し、継続時間=0.7倍 変動値=0.4~0.5倍 と評価→総合で0.3~0.4倍と評価

再び主震M9.0前兆と同じCH17とCH23同期変動を観測



2011.4/23 三陸沖M6.0

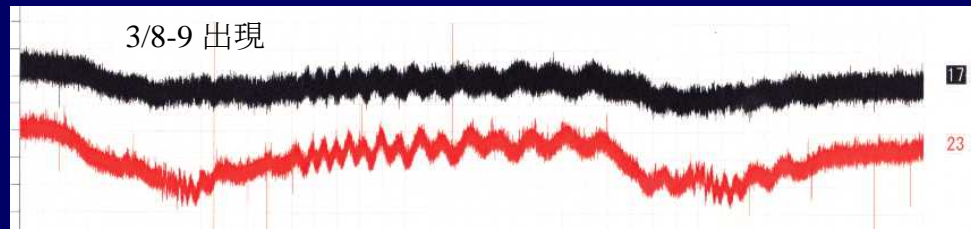
海深=約1000m付近 補正=M1~M1.5 必要

両地震の海深減衰の差=M1.5~M2

主震と同じ海深領域の場合=M7.5~8 が推定されるが、
1000m付近の場合=M6~6.5が推定されることになる

2011.3/11 三陸沖M9.0

海深=約2000m±以深 補正=M2.5~M3.5 必要



★ 2003.9/26
十勝沖M8.0(Tmap=58)

★ 2005.8/16
宮城沖M7.2(Tmap=95)

★ 2008.5/8
茨城東方沖M7.0(Tmap=3)

★ 2011.3/11
東北太平洋沖M9.0(Tmap=2)

初めて正式に地方自治体に地震予報報告

岩手県庁・宮城県庁 あて報告

7月23日又は24日 岩手付近でM6.5±0.5地震



2008.7/24
岩手沿岸北部M6.8
Tmap=38 プレート内

2008.6/14
岩手宮城内陸M7.3
Tmap=216

(No.1300 + No.1491)

2007.7/16
新潟中越沖M6.8
Tmap=16

2007.3/25
能登半島沖M6.9
Tmap=62

2004.10/23
新潟中越M6.8
Tmap=88
(No.1253)



7/27MAX
6/19



7/1MAX
5/30

(3/14)
1/22MAX
1/5
11/23

11/11MAX
7/17

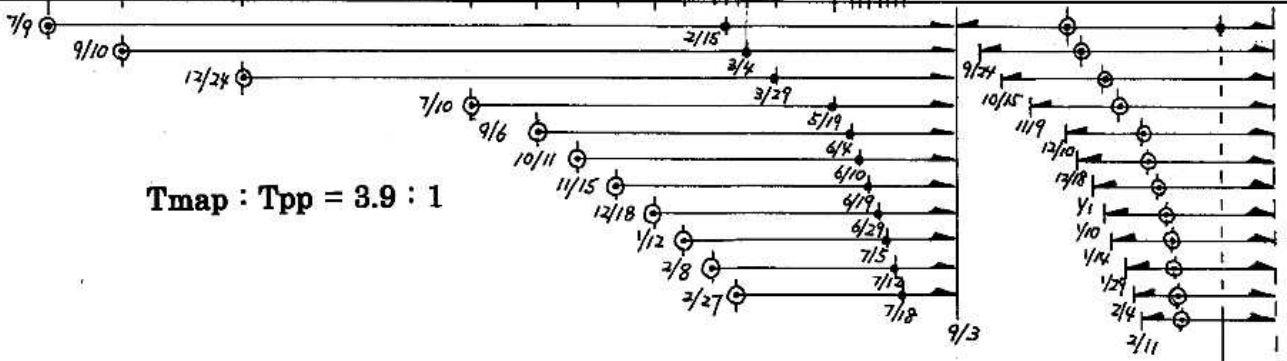
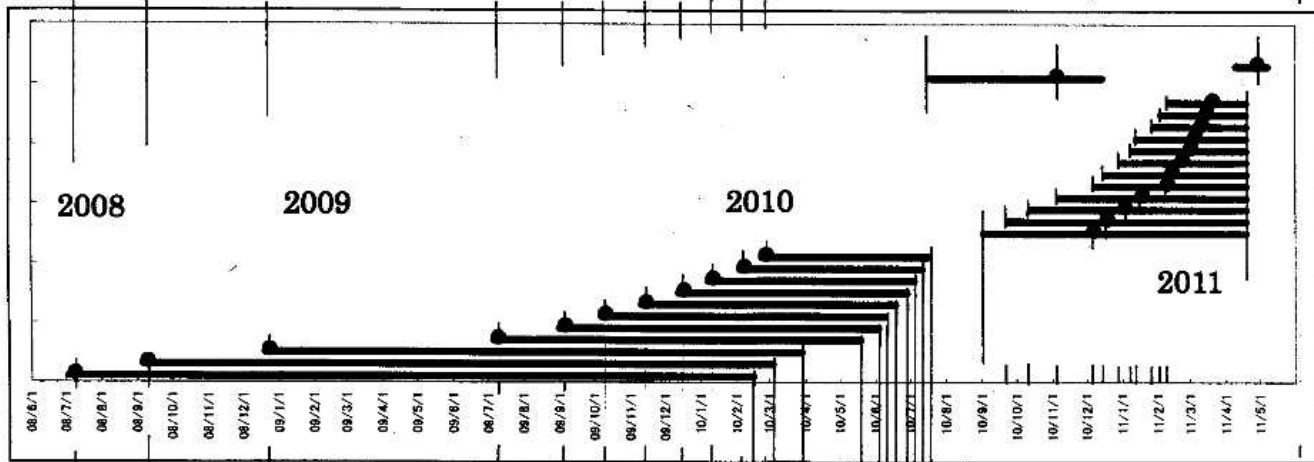
5/13

6/16MAX

$T_{map} : T_{pa} = 6 : 1$

$T_{fap} : T_{map} = 20 : 13$

$T_{map} : T_{pa} = 6 : 1$

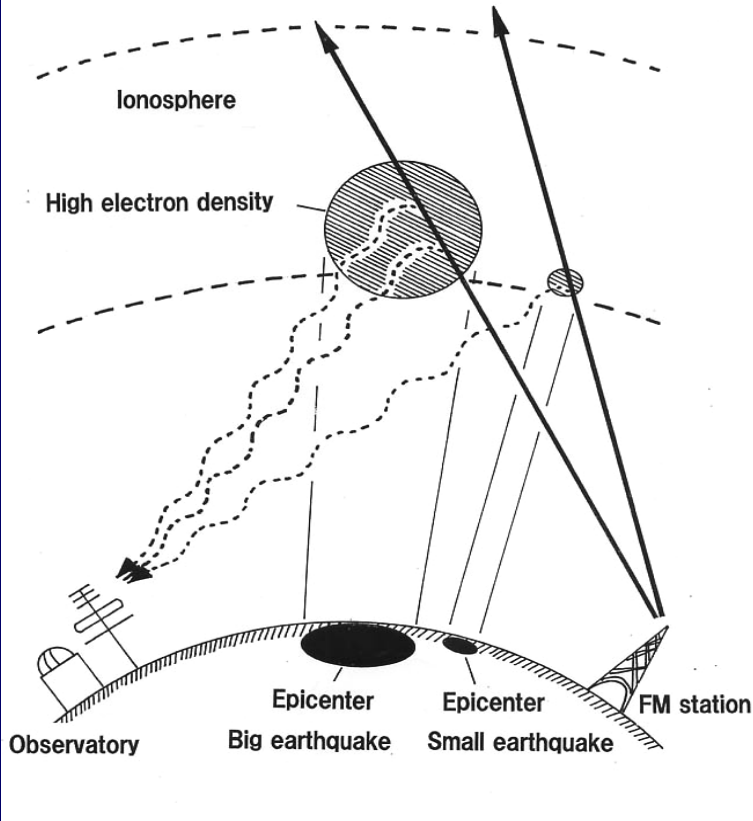


$T_{map} : T_{pp} = 3.9 : 1$

$T_{fap} : T_{map} = 20 : 13$

Discussion

震源上空での電子密度変化



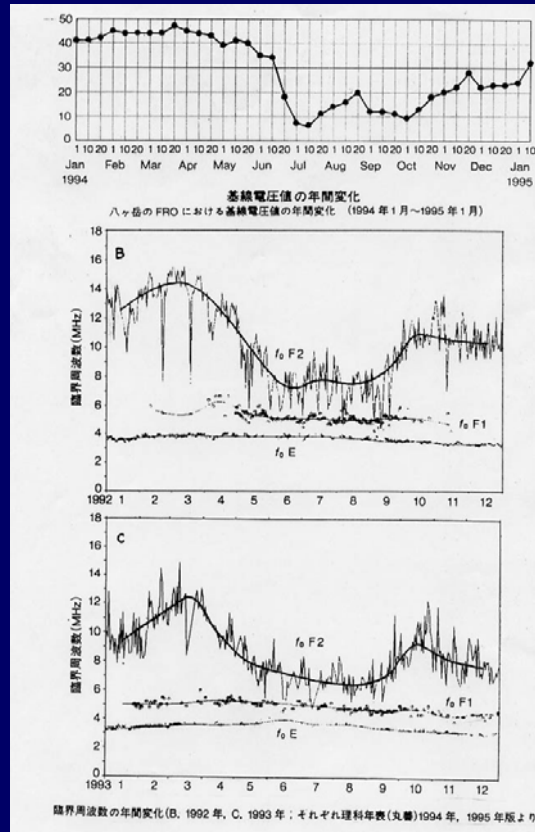
- ・地震毎に異なる前兆形態
- ・PBFの継続時間と規模の調和原因

メカニズムの解明が期待される

●地震発生の前に将来の断層付近で、応力変動や微小破壊等によってその上空の電離層の電子密度が変化していることが考えやすい。



●見通し距離を越えたFM放送局電波が、地震発生前に震源上空の電子密度変化によって、散乱状況に変化が生じ、通常との違いとして観測される。

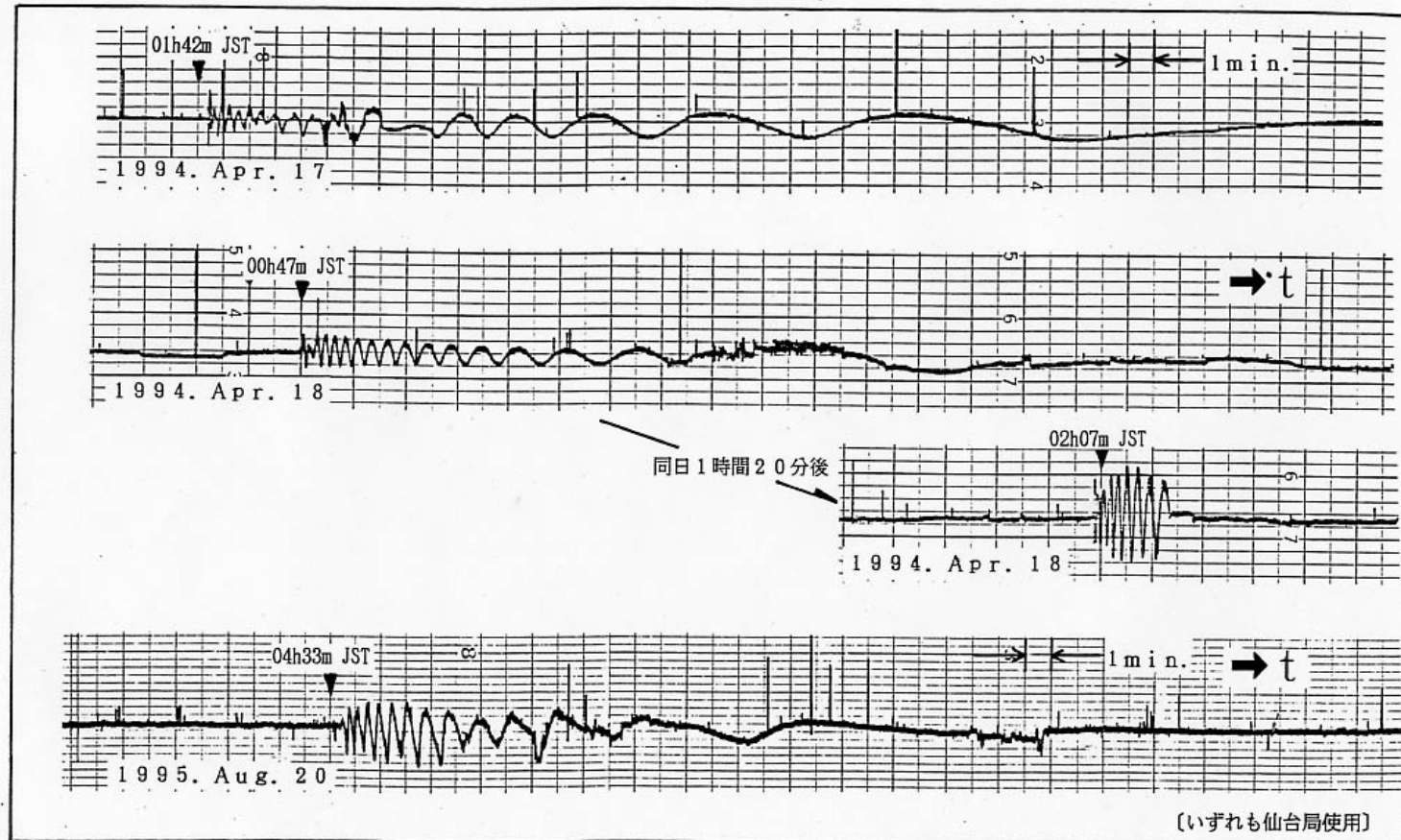


FM仙台の電離層散乱受信強度と直接波の受信強度の差

電離層F層の電子密度年変化

電離層の電子密度変化が基線変化に現れていることから、通常も見通し距離以遠の放送局電波が散乱され微弱に受信されている可能性が考えられる。従って、地震前兆変動は、通常との散乱状況との変化を捉えていると考えられる。

地震とは相関が認められない特殊な変動 ランダウ減衰波形 地球接近小天体（小彗星）との相関の可能性があるようだ



Landou Damping ランダウ減衰波形

今までなされてこなかった後方散乱式での電離層のプラズマ密度観測は興味深い！