

地震情報の直前検知・伝達システムの開発

ーシステムの構築と課題ー

○ 宮村正光（鹿島、小堀研）

大保直人（鹿島、技研）

諸井孝文（鹿島、小堀研）

概説

地震発生メカニズムの複雑さ等に起因する短期的な地震予知が難しい現状を踏まえ、地震発生後できるだけ早く、震源近傍で検知し地震情報を瞬時に推定して地震波が対象地点に到達する前に伝達し、地震被害の予測に役立てようとする考え方が以前より提案されている。このような考え方に沿って国内外では防災上の観点から、システムが一部実用化され、さらに精度と伝達速度の向上を目指して研究開発が進められている。

本論文では、このような考え方にそうシステムとして、パケット通信を利用したリアルタイム観測システムを実際に構築して、地震防災システムとしての適用化や実用上の課題や問題点を整理した。

このようなシステムを具体的に地震被害低減に向けて活用する場合には、観測システム自身に関与するハードな面と、情報の利用目的に応じた伝達方法やその影響評価に関するソフトな問題を含んでいる。ここでは第一段階として、小規模地震ではあるが、観測されたデータをもとにマグニチュードや予測震度などの地震情報に関する精度の検討や、情報伝達手段として音声出力装置やポケベルを用いた場合の活用方法や抽出された問題点や今後の課題などを抽出した。

内容は3編より構成される。

システムの概要

構築した観測システムの概要：地震検知点、通報センター、エンドユーザー
特徴

評価手法、稼動例

震源パラメーターの評価手法：震源距離、方向、マグニチュード、震度予測手法
稼動例

観測記録と評価精度

観測データに基づく震源パラメーターの精度評価：震度予測、今後の課題、問題点の整理

地震情報直前検知・伝達システムの開発

(その1) システムの概要

○ 正会員 宮村正光*1
同 金山弘雄*1
同 高橋克也*2
同 越田 洋*2

1. はじめに

震源近傍で地震の発生を検知し、地震被害予測に有用な地震情報を瞬時に推定して地震波が到達する以前に伝達できれば、震害の防止・低減に極めて有効である。地震波とデータ伝送の速度差を利用した地震早期警報システムの考え方はEarthquake Alarm Group¹⁾により提案され、このような考え方に沿うシステムとして「ユレダス」²⁾や「CUBE」³⁾等が実際に運用されている。筆者らはパケット通信によるリアルタイム強震観測システムを構築し⁴⁾、地震防災システムとしての実用化を検討したので報告する。本報は3編から成り、(その1)では開発目的とシステム概要および今後の課題、(その2)では地震情報の評価手法とシステムの稼働例、(その3)では観測記録の分析による評価手法の精度について述べる。

2. 開発目的

本システムは以下に示す活用方法を開発目的とし、適用上の問題点や解決すべき課題について検討した。

2.1 個別建物への地震情報伝達

地震情報の伝達方法は、その対象、使用目的等により決定されるが、第一段階では以下のように特定建物・施設に限定する。

①建物・施設へ地震の情報を即座に伝達することにより、居住者の身の安全を確保する。また建設現場や危険物施設等において、作業員の避難を促す。

②エレベーターの運転制御や各種機器・装置のシャットダウンにより二次災害を防ぐ。

③制震建物への入力地震動を予測し、制震装置の起動ならびに制御方針の特定や制御規模・範囲の設定を行う。

2.2 地域防災体制への貢献

本研究の最終的な目標は、各種構造物、輸送機関、ライフラインを含めた地域全体の被害の低減を図る防災技術としての地震検知・伝達システムの開発にある。

①地震の早期警報・情報伝達に関する広域ネットワークの開発技術への協力。

②地震被害の防止・低減体制、早期復旧体制の構築に対する寄与。

3. システムの概要

図1に本システムの機器構成を示し、以下にその概要について述べる。

3.1 地震検知点

対象地震を伊豆・東海地方に限定し、図2に示すとおり無人の地震検知点を伊豆半島先端の下田から東京に沿

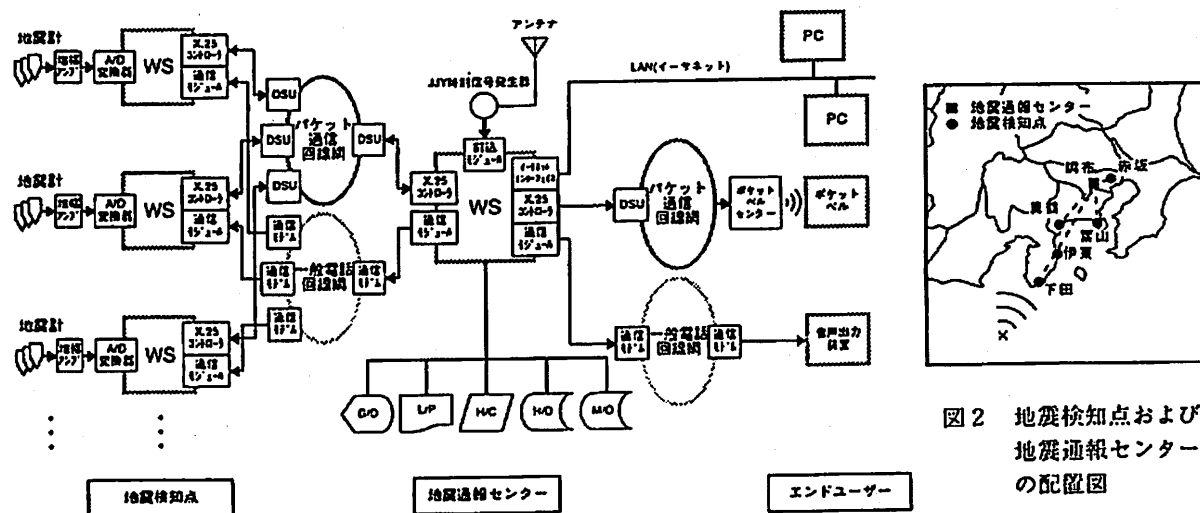


図1 システムの機器構成

図2 地震検知点および地震通報センターの配置図

A Pre-arrival Earthquake Detection and Information Transmission System
(Part1) Outline of the System

MIYAMURA Masamitsu et al.

う5地点の比較的堅固な地盤上に配置した。各検知点には長周期サーボ型速度計、ワークステーション (WS) および通信機器を設置した。下田検知点の状況を写真1に示す。WSは100Hzサンプリングでデジタル化された地盤震動値が(その2)で示す自動検測の条件を満たした時点で地震の発生を判定し、検知情報を地震通報センターに即座に伝送する。同時に震源情報を算定し、その計算結果および地震動波形を送信する。

3.2 地震通報センター

写真2の地震通報センターでは各検知点から送信される震源情報をまとめ、エンドユーザーへの伝達機器に通報する。また地震発生情報を受信すると、最初の検知点以外の地点に対してWSへの波形の取り込みを命令する。これにより全検知点でほぼ同時刻の地震動波形が記録され、波形の走時や距離減衰等が検討できる。

3.3 エンドユーザー

エンドユーザーへは、音声出力装置および文章表示型ポケットベルで地震を検知した地点名と時刻、震源位置、地震規模、震度などを伝える。

4. システムの特徴

本システムの特徴は次のとおりである。

- ①体感的地震動強さである震度を早期警報用情報とし、検知点と対象地点の地震動伝播特性から震度を瞬時に予測する機能を開発した。
- ②リアルタイム地震観測を経済的に実施するため、検知点と通報センターの間のデータ通信手段としてパケット通信を利用した。
- ③地震動波形のリアルタイム解析によって制震システムへ適用することを念頭におき、地震検知と同時に地震動波形の伝送が開始できるシステムとした。

5. 今後の課題

本システムの構築により、本格的な実用化を目指す上での課題として次のことがわかった。

- ①誤動作に対する処置としてハード・ソフト両面からのシステム強化は重要であるが、これらと共にデータ処理上の対策および誤報のフォロー処置が必要である。
- ②地震情報の精度と伝達の即時性は相反する傾向にあり、ユーザーの種類や利用目的に応じた情報提供を考えるべきである。
- ③情報の質に関し、地震防災の観点からは震源情報等の伝達のみでは不十分で、有効な被害予測や対策を含めた情報の伝達を瞬時に行うシステムの開発が必要となる。
- ④直下型地震など震源が検知点網内の地震に対しては、地震直後の情報伝達により二次災害の防止および早期の復旧活動を支援できることが要求される。

*1) 鹿島 小堀研究室、工博

*2) 鹿島 技術研究所



写真1 下田検知点の状況



写真2 地震通報センター

6. まとめ

地震情報を可能な限り短時間で処理し伝達するシステムを構築し、その実用化検討を通じて抽出した現状の問題点および今後の課題を示した。

謝辞：本研究を進めるにあたり、京都大学名誉教授、小堀鐸二博士に終始御指導頂いた。また、東京大学名誉教授、嶋悦三博士、足利工業大学教授、太田外気晴博士には貴重な御意見および御示唆を頂いた。記して感謝致します。

参考文献

- 1) Earthquake Alarm Group : A Plan for Strong Earthquake Alarm System 10 Seconds before It Attacks the City of Tokyo, Proceedings of 5th WCEE, 1973.
- 2) 中村豊, 上野真 : 地震早期検知警報システムUrEDASの開発, 第7回日本地震工学シンポジウム, 1986.
- 3) Kanamori, H., Hauksson, E., Heaton, T. : TERRAScope and CUBE project at Caltech, Eos, 72, 1991.
- 4) 諸井, 金山, 高橋, 宮村他 : パケット通信を利用した新しい強震観測ネットワーク(その1)システムの概要, 日本地震学会講演予稿集, 1993.

*1) Kobori Research Complex, Kajima Corporation, Dr. Eng.

*2) Kajima Technical Research Institute

地震情報直前検知・伝達システムの開発
(その2) 評価手法及び稼働例正会員○山谷 博愛¹⁾
同 諸井 孝文²⁾
同 山中 浩明³⁾

1. はじめに

前報(その1)で地震情報直前検知・伝達システムの全体概要を述べた。本報では、自動検出及び震源パラメータ評価手法と稼働例を示す。

2. 自動検出及び震源パラメータ評価手法

前報で示した通り、ある検知点で地震が検知されると地震通報センターにP波検知点名と到達時刻の情報が送られる。この際、他地点には通報センターから地震波取り込み命令が送られる。ここでは第1検知点の処理を示す。図1に検知プログラムの処理概要を示す。これらの処理は即時性を優先するため回帰式を用いて推定することとした。震源パラメータを推定するためには、まず、観測された記録からP波初動、S波初動の到達時刻を決定する必要がある。

2.1 P波、S波初動の自動検出

P波初動部分は一般に上下動成分が卓越するので上下動成分の観測値 z_i を用いて、(1)式のような上下動成分に関する特性関数を用いた¹⁾。また、上下動(z_i)と水平動(x_i, y_i)を用いて(2)式の比を採用した²⁾。

S波初動部分はP波初動とは逆に水平動成分が卓越するので、(1)式と同様な水平動に関する特性関数として(3)式を用いた。

これらの特性関数及び比を用いて表1のような条件でP波及びS波初動の検出を行った。表中の σ_1 、 ϵ_1 、 σ_2 、 ϵ_2 の閾値はその観測点の微動レベルを考慮し、各検知点固有のものとした。

2.2 震源距離の決定

震源距離は大森公式³⁾に基づき(4)式より決定した。ここに、 α は検知点周辺の地下構造などにより変化するため、回帰式から決定した。またTs-plはP波初動とS波初動の到達時間差である。

2.3 震央方向の決定

震央方向はP波初動部分の震動方向から(5)式のように求めることができる⁴⁾。

表1 P波、S波初動の決定条件

	P波初動	S波初動
V/H	$> \sigma_1$	$< \sigma_2$
CFV	$> \epsilon_1$	
CFH		$> \epsilon_2$

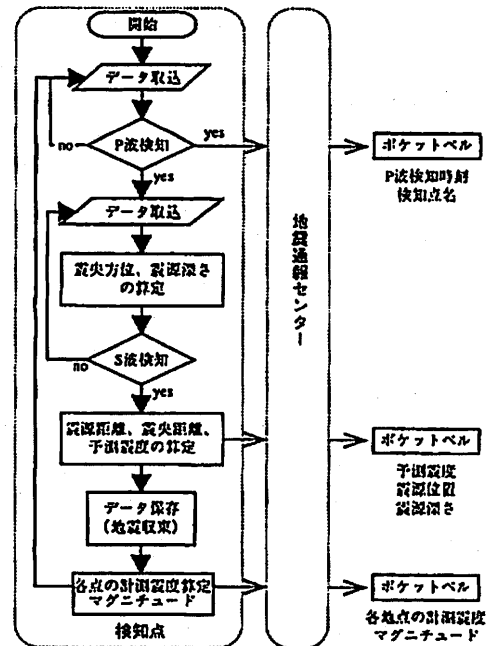


図1 検知プログラムの処理概要

$$CFV = z_i^2 + k(z_i - z_{i-1})^2 \quad (1)$$

where; $k = \text{constant}$

$$(V/H)_i = \sqrt{v_i/h_i} \quad (2)$$

where; $v_i = z_i z_i + a v_{i-1}$, $h_i = x_i x_i + y_i y_i + a h_{i-1}$, $a = \text{constant}$

$$CFH = \sqrt{CFX_i \cdot CFY_i} \quad (3)$$

where; $CFX_i = x_i^2 + \beta(x_i - x_{i-1})^2$, $CFY_i = y_i^2 + \beta(y_i - y_{i-1})^2$, $\beta = \text{constant}$

$$R = \alpha T_{s-pl} \quad (4)$$

where; $\alpha = \text{constant}$

$$\theta_{cp} = \tan^{-1}(X_i/Y_i) \quad (5)$$

where; $X_i = x_i x_i + a X_{i-1}$, $Y_i = y_i y_i + a Y_{i-1}$, $a = \text{constant}$

$$M = c_1 \log(V_{\max}) + c_2 \log(R) + c_3 \quad (6)$$

where; $c_1, c_2, c_3 = \text{constant}$

$$\Delta/h = b_1 (V/H)_{\text{ave}} + b_2 \quad (7)$$

where; $b_1, b_2 = \text{constant}$

$$I_i = I_p + S_1 + S_2 \log(R_p) + S_3 \log(R_i) \quad (8)$$

where; $S_1, S_2, S_3 = \text{constant}$

A Pre-arrival Earthquake Detection and Information Transmission System

(Part 2) Evaluation Method and Examples

YAMAYA Hiroyoshi et. al

2.4 マグニチュードの決定

マグニチュードMは気象庁の決定式に従い、震源距離と、最大水平速度 V_{max} の回帰式(6)から求められる。

この値は1秒毎に更新される。

2.5 震源深さの決定

震源深さ h は地下構造に依存する量 $(V/H)_{ave}$ を用いて(7)式のような回帰式から求めた^{*)}。ここで $(V/H)_{ave}$ は(2)式で定義した比のP波初動部分1秒間の平均値、 Δ は震央距離である。

2.6 震度予測手法

検知点の初動の最大速度から求められる初動震度 I_p を用いて(8)式によって任意地点の震度を予測する。 R_i 、 R_p はそれぞれ検知点、予測点の震源距離であり、震度の距離減衰を回帰分析により考慮している。この手法により、検知点でS波を判定した時点で震度予測が行われ、S波伝播速度と震度情報伝達速度の差が時間的余裕になる。

3. 稼働例

本システムの稼働例として、1993年7月11日6時54分、M(マグニチュード)=4.9、東海道はるか沖を震源とする地震に関し、図2に速度波形を、図3に本システムで算定した震央位置図を示す。

この地震では下田検知点が最初にP波を検知し、他の検知点へ収録命令が送られた。下田のP波検知時刻と赤坂への主要動到達時刻には約60秒の時間差があった。この間にポケットベルへの通報も行われ、東京へ主要動が到達する前に地震波の到来を知ることができた。

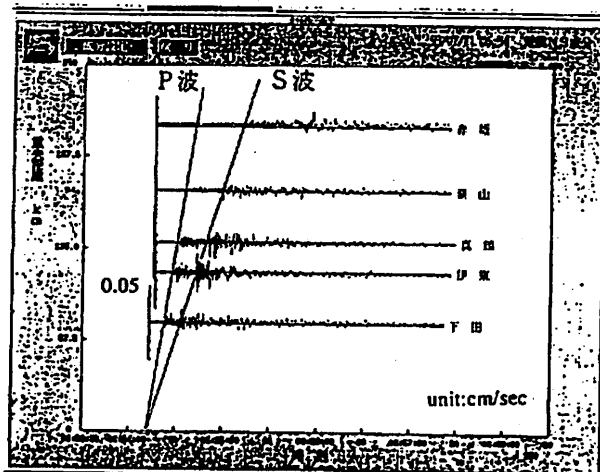


図2 1993年7月11日(M=4.9)の地震の速度波形

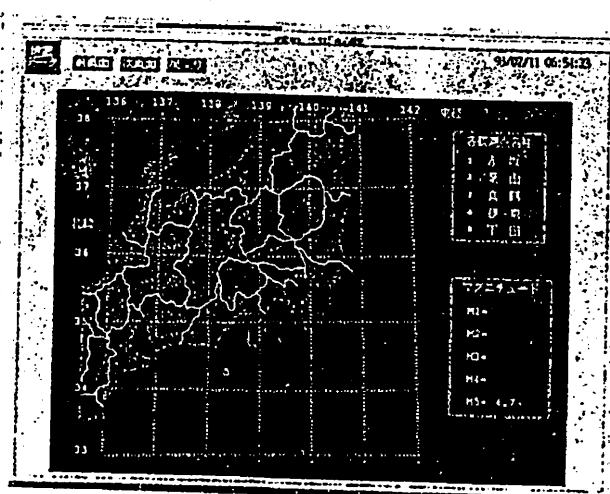


図3 1993年7月11日(M=4.9)の地震の震央位置図

参考文献 1) Allen, R.V.: Automatic Recognition and Timing From Single Trace, Bull. Seis. Soc. Am., 68, 1978

2) 中村、斉藤: 地震波動検知の認識と単一観測点のデータに基づく震央方位の推定、第17回地震工学研究発表会講演要旨、1983

3) 中村: 地震学、共立出版、1979

4) 中村: 地震(津波)警報のための地震早期検知を行う1点検知システムの考え方とパソコンによる実装例、第18回地震工学研究発表会講演要旨、1984

*1 鹿島 技術研究所

*2 鹿島 小堀研究室

*3 鹿島 小堀研究室、工博

*1 Kajima Technical Research Institute

*2 Kobori Research Complex, Kajima Corporation

*3 Kobori Research Complex, Kajima Corporation, Dr. Eng.

地震情報直前検知・伝達システムの開発
(その3) 観測記録と評価精度○ 正会員 神田克久^{*1}
同 中原光春^{*2}
同 菅 知史^{*3}

1. はじめに

本地震情報検知システムは93年3月より稼働し、関東近辺の地震を観測している。本システムでは、これらの記録を分析して得られた回帰式を用いて震源パラメータを評価し、距離減衰式に基づいて東京の震度予測を行っている。ここでは、評価の精度を検証してみる。

2. 観測記録

記録の内、約半数が93年5月末から6月初旬に発生した伊豆半島東方沖群発地震である。その大部分が震央距離約10km以下の伊東検知点以外で微動レベルの地震であり、本評価から除いた。また、震央距離400kmを越える遠い地震、微動レベル以下の記録、P波とS波の位相が明確でない記録も評価から除き、最終的に28地震を分析した。

3. 震源パラメータ分析

(その2)で示したように震源距離、マグニチュード、震源深さは観測記録を分析して得られたそれぞれの回帰式によって評価する。震央方向を含めて各震源パラメータの評価値と気象庁発表のデータとを比較し、評価の精度を検証する。

3.1 震源距離

震源距離は大森式(その2、(4)式)により評価する。回帰分析より得られた各検知点の係数 α を文献1,2と比較して表-1に示す。評価された震源距離と気象庁発表の震源位置に基づく震源距離を図-1に比較して示す。震源距離200kmを越えた地震で、S波の位相を正確に捉えきれず震源距離を短く評価している例がみられるが、ほぼ正確に評価されている。

3.2 マグニチュード

マグニチュードは最大速度の距離減衰式(その2、(6)式)により評価する。回帰分析より得られた係数 c_1, c_2, c_3 を文献3と比較して表-2に示す。 c_1, c_2 は共通であるが、 c_3 は検知点の特徴を表す係数で、表層地盤の増幅度と逆の相関があり、下田が最も大きく赤坂が最も小さい。全ての検知点記録から評価したマグニチュードを気象庁発表のものと比較して図-2に示す。気象庁と比べると、最大±1程度の差程度で一致している。

3.3 震源深さ

全検知点の記録の分析より、回帰式(その2、(7)式)

の係数は $b_1=-1.855, b_2=8.926$ とした。伊東での記録から評価した震源深さを気象庁発表の震源深さと比較して図-3に示す。東京湾と茨城南側で発生した震源深さ約80kmの2つの地震を除くと概ね対応をしている。

3.4 震央方向

気象庁発表の震央位置から算定した検知点からの方向角(真北から時計回りの角度)と評価値(その2、(5)式)を比較して図-4に示す。一部は±90°程度の差があるが、原因としては、初動部分のS/N比の悪さ、P波検知時刻の遅れ、地下構造の影響などが考えられる。

4. 震度予測

評価された震源位置を用いて東京からの震源距離を求め、検知点の初動の震度から東京の震度を予測する(その2、(8)式)。伊東より予測した東京の震度を気象庁発表の東京震度と比較して図-5に示す。大きな地震はまだ観測されていないものの、四捨五入した予測震度(矢印の範囲)を気象庁震度と比較すると、17地震中13地震が一致しており、揺れの程度の予測としては有用である。

5. まとめおよび今後の課題

本システムの震源パラメータ評価や震度予測の評価結果を気象庁発表のものと比較した。結果のまとめおよび今後の課題を以下に述べる。

- ①震源距離、マグニチュードは、気象庁のデータとほぼ一致しており、かなりの精度の評価ができる。
- ②震源深さ、震央方向は、1検知点による評価という1次近似としては十分な精度と考えられる。一部気象庁データとの差がみられる点については、短周期成分のカットするなどの処理によって改善される可能性があり、今後検討する。
- ③震度は、大半は気象庁震度と一致しており、1点での評価でも震度のように被害レベルや揺れの程度を直前に予測することは可能である。
- ④今後、観測データの蓄積により精度を向上していくと考えられるが、さらに処理の高速化を含めてアルゴリズムの改良を行う。
- ⑤現在は1検知点のみデータによる評価法を用いているが、多点のデータを用いた評価法による精度向上を今後検討する予定である。

A Pre-arrival Earthquake Detection and Information Transmission System
(Part 3) Observed Data and Evaluation Accuracy

KANDA Katsuhisa, NAKAHARA Mitsuharu and KAN Satoshi

参考文献

- (1) 宇津徳治、地震学、共立出版 1977
 (2) 武村雅之、1923年関東地震の本震直後の余震活動、地震、46、1994
 (3) 渡辺晃、近地地震のマグニチュード、地震、24、1971

表-1 大森式(震源距離)

	α
赤坂	8.694
葉山	8.066
真鶴	7.640
伊東	8.566
下田	8.651
文献1	7.420
文献2	8.790

$$R = \alpha \cdot T_{s-p}$$

表-2 マグニチュード回帰式

	c_1	c_2	c_3
赤坂			1.585
葉山			2.250
真鶴	1.318	2.155	1.889
伊東			2.033
下田			2.456
文献3	1.180	2.040	2.940

$$M = c_1 \log(V_{\max}) + c_2 \log(R) + c_3$$

マグニチュード(評価)

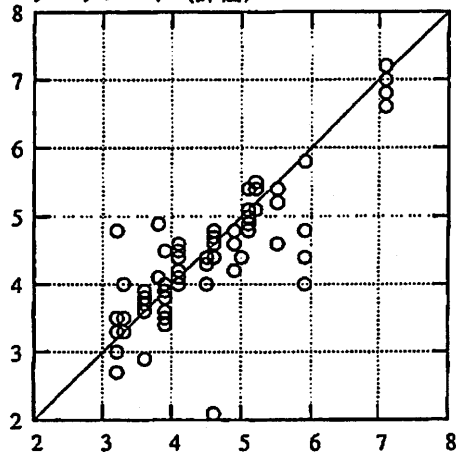


図-2 マグニチュード比較

震央方向(評価)

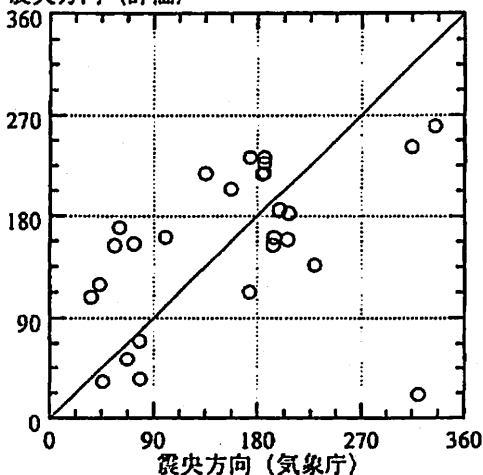


図-4 震央方向角比較

震源距離(評価)(km)

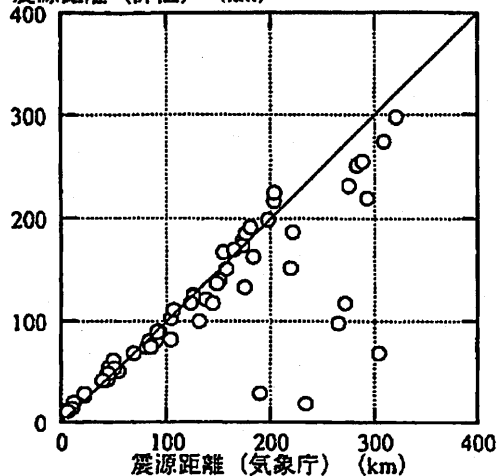


図-1 震源距離比較

震源深さ(伊東より評価)(km)

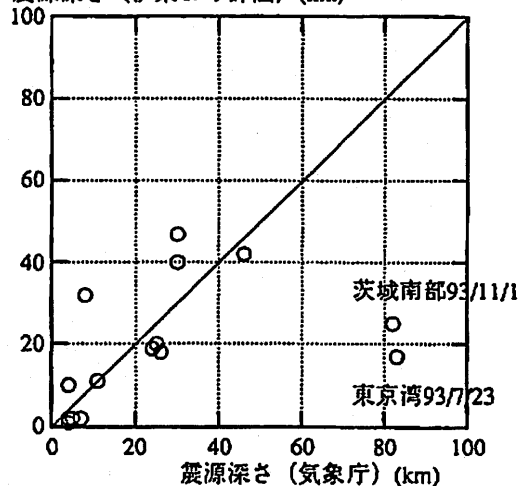


図-3 震源深さ比較

予測震度(伊東より評価)

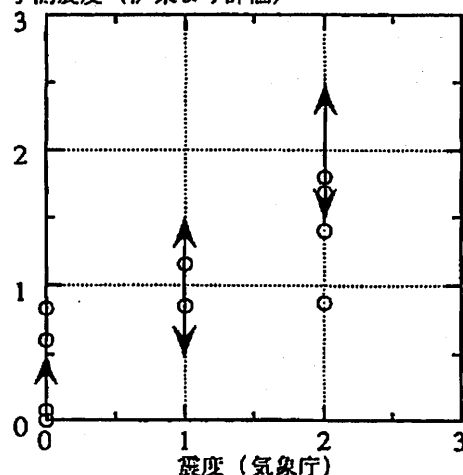


図-5 東京震度比較

*1) 鹿島 小堀研究室

*2) 鹿島 小堀研究室、工博

*3) 鹿島 建築技術本部

Kobori Research Complex, Kajima Corporation

Kobori Research Complex, Kajima Corporation, Dr. Eng.

Architecture Technology Division, Kajima Corporation