

名古屋市における既往地震の被害と震動特性に関する研究

正 木 和 明

Earthquake Damage and Seismic Characteristics in Nagoya Area, Japan

Kazuaki MASAKI

S wave velocity, density and attenuation factor Q of the ground in Nagoya City were measured by S wave velocity loggings and seismic explosions. Utilizing these data seismic transfer functions at 400 mesh points in Nagoya City were calculated.

Peak accelerations at 400 mesh points on the three destructive earthquakes, Nobi (1891), Tonankai (1944) and Mikawa (1945) Earthquake, were estimated using these seismic transfer functions, and related to earthquake damages.

Damages to wooden houses in these earthquakes were caused by strong motions of the ground, as a whole, however some damages were conjectured due to liquefaction of sandy ground.

1. はじめに

名古屋市は過去、1891年濃尾地震、1944年東南海地震、1945年三河地震の各地震において大きな被害を受けた地域であり、また将来発生が予想されている東海地震においても被害が危惧されている地域でもある。このような観点から名古屋地盤の有する震動特性に関しては強い関心を持たれ、多くの研究がなされてきた。上記の3つの地震における被害の実態については飯田^{1)~9)}が詳細な報告をしているが、これによればそれぞれの地震における被害分布には特徴的な地域差がみられる。被害分布に地域差がみられることに関しては主として表層地盤の構造との関連でこれまで追究されている。表・宮村⁵⁾⁶⁾は東南海地震における被害率と表土層厚との関係を、また横尾・桑原・堀内⁷⁾⁸⁾は濃尾・東南海地震における被害率と表層地盤の平均N値との関係を、また飯田¹⁾は濃尾・東南海地震における被害率と沖積層厚との関係をそれぞれ追究しているが、これらの研究で明らかになったことは表土層厚あるいは沖積層厚が厚いほど、またN値が小さい地盤ほど地震における被害率は大きいことである。

その後、名古屋地盤のS波速度が明らかにされるにつれて^{9)~15)}、地盤の地震時における動的挙動の追究が為されるようになった。多賀・安東・宮崎¹⁶⁾は、十勝沖地震における八戸港強震記録(1968, EW)を入射波として与えた場合の加速度増幅率分布をS波多重反射法により求められている。また、正木・坪井・飯田¹⁷⁾は調和波に対するS波

最大増幅度をS波多重反射法により求め、被害率との関連を追究している。しかし、これらの研究は、地震波増幅率で震動特性を評価したことにとどまっており、加速度絶対値を求めるに至っていない。被害率と震動特性との関係を定量的に取扱うためには、またそれぞれの地震における震動特性を比較するためには、単に増幅率の議論を行うだけでなく、地震動の絶対値、例えば最大加速度値等を求めることが必要である。このためには、それぞれの地震において地震基盤から表層地盤に入射する地震波特性を知ることが必要であり、また地震基盤もS波速度で約3 km/sの層に設定することが必要である。

本研究はこのような観点にたち

- (1) 濃尾・東南海・三河の各地震における入射波速度応答スペクトルを断層モデルに基づく理論的解析から推定し、
- (2) 岩盤を地震基盤に設定した場合の地震波伝達特性をS波多重反射法により求め、
- (3) 地表面における速度応答スペクトル、加速度応答スペクトル、最大加速度を算定し、
- (4) 上述の3つの地震における最大加速度と被害率との関係を追究するものである。

2. 浅部地盤モデルの作成

2.1 S波速度検層の実施

S波伝達関数を求めるに際し必要な定数は、地盤各層の層厚H(m)、S波速度Vs(m/s)、密度 ρ (g/cm³)お

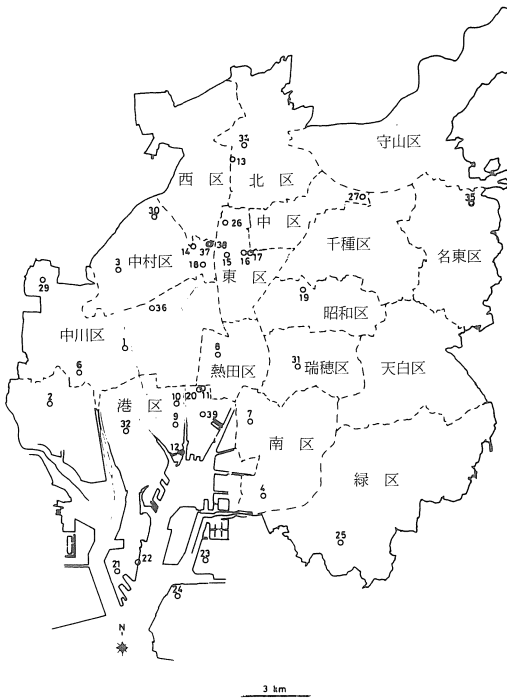


図1 PS検層実施地点

よびQ値(地震波のもつエネルギーの総量/1周期間に失うエネルギー)の4つであり、このうちVs, ρ, Qについては名古屋地盤における測定例が少なく不明な点が多

い。そこでまずS波速度検層を実施しこれらの定数を原位置において測定することとした。本研究における測定点および他機関における測定点を図1に示す。総計39地点における測定結果を得ることができた。

2.2 推定式の作成

測定点数39は解析対象とする約380の1 km メッシュの10%弱にすぎず残るメッシュにおける定数については何等かの手段により推定してやる必要がある。また測定地点においても調査深度以深については同様に推定してやる必要がある。推定するに際し既知の地盤に関する情報として、地質図¹⁸⁾、ボーリング柱状図¹⁹⁾等が考えられる。これらの図には、各深度におけるN値、地層年代、土質区分が通常記載されている。従ってこれらの土質的指標とS波速度、密度、Q値とが何等かの関係を持つとすればこの関係を求め既知の土質的指標から3つの定数を推定することができる。

図2、図3にS波速度とN値、深度との関係を示す。S波速度Vs (m/s)、N値N、深度H (m)に対し、

$$V_s \propto N^a, V_s \propto H^b \tag{1}$$

なる関係があること、この関係は地層年代、土質区分毎に得られることがわかる。定性的分類である地層年代、土質区分を数量化し、数量化理論²⁰⁾を用いて(1)式を求め

$$V_s = 98.0 N^{0.170} H^{0.14} \begin{pmatrix} 1.00(\text{沖}) \\ 1.29(\text{洪}) \\ 1.66(\text{三}) \end{pmatrix} E \begin{pmatrix} 1.00(\text{粘}) \\ 0.87(\text{シ}) \\ 0.84(\text{砂}) \\ 0.98(\text{レ}) \end{pmatrix} F \tag{2}$$

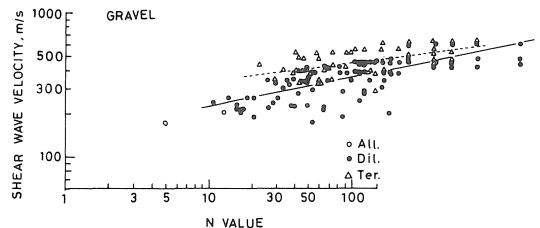
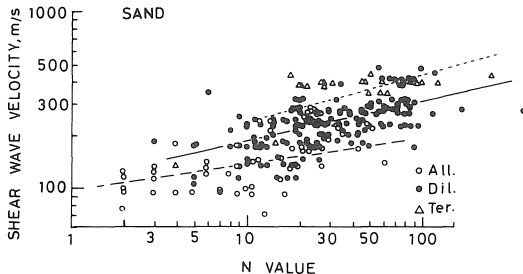
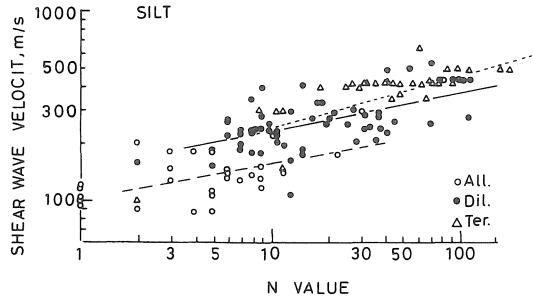
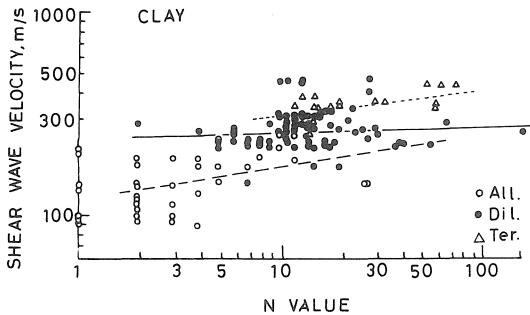


図2 土質区分別、地層年代別にみたS波速度とN値との関係

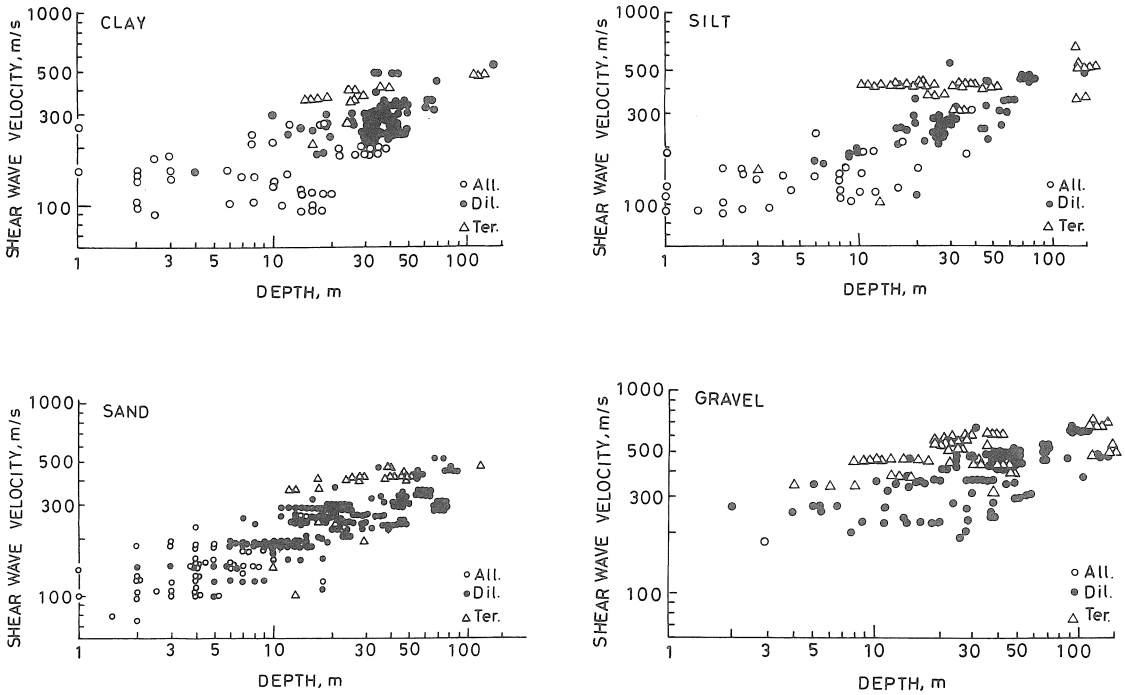


図3 土質区分別，地層年代別にみたS波速度と深度との関係

を得た。密度 ρ (g/cm³) についても同様の式

$$\rho = 1.70N^{0.027}H^{-0.018} \begin{pmatrix} 1.00(\text{沖}) \\ 1.04(\text{洪}) \\ 1.03(\text{三}) \end{pmatrix} E \begin{pmatrix} 1.00(\text{粘}) \\ 1.01(\text{シ}) \\ 1.06(\text{砂}) \\ 1.12(\text{レ}) \end{pmatrix} F \quad (3)$$

を得た。Vs, ρ はN, H, E, F各項の積として得られる。(2), (3)式によって推定されたVs, ρ と実測されたVs, ρ との相関係数はそれぞれ0.87, 0.67であった。Q値については測定値が少なく上述の式に対応する経験式は得られていない。S波速度Vs (m/s) とQ値との関係を図4

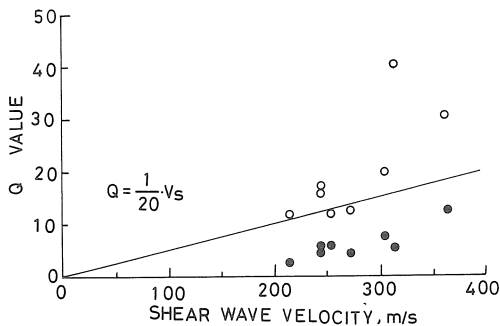


図4 Q値とS波速度との関係。板たたき法によって発生した波を球面波とした場合(白丸), 平面波とした場合(黒丸)

に示すが点のばらつきは大きい。実用的に両者の関係は

$$Q = Vs/20 \quad (4)$$

で与えられる。

2.3 浅部地盤モデル

第四系の沖積，洪積地盤については桑原¹⁸⁾が詳細な地質図を作成しており，また深度数10mまでの地盤については名古屋市で約400本のボーリングが実施されている¹⁹⁾。そこで，第四系の浅部地盤についてはこれらの資料を基にN値，地層年代，土質区分を決定し，(2), (3), (4)式を用いてVs, ρ , Qを推定した。具体的には，名古屋市域を1辺約1 kmの標準メッシュに分割し，各メッシュについてボーリング柱状図1個を上述の資料から抽出し，ボーリング実施深度以深については地質図を参考にN値を除く3つの土質指標からVs, ρ , Qを推定した。

3. 深部地盤モデルの作成

3.1 爆破実験による深部地盤探査

弥富町鍋田および田原町波瀬を爆破点とする爆破実験を実施し，濃尾平野・伊勢湾周辺域の深部地盤構造を探査した。観測線は鍋田爆破点から岐阜に至るA測線，田原に至るB測線，湯の山に至るC測線を設定し，それぞれの測線における深度5 km程度までのP波速度構造を決定した。各測線において得られたP波速度構造を図5，図6に示す。P波速度が約2.0km/s, 3.0km/s, 5.0

km/s の層はそれぞれ第三系鮮新統以新, 第三系中新統, 岩盤に対応していると推察される。

S 波伝達関数を求めるためには S 波速度 V_s , 密度 ρ , Q 値が必要であるが爆破実験からはこれらの定数は得られておらず P 波速度 V_p を得たのみである。そこで, 首都圏において得られている V_p, V_s, ρ の値を参考に, 今回得られた V_p から V_s, ρ を推定した。首都圏および名古屋地域における V_p, V_s, ρ を表 1 に示す。

3.2 微動・地震動の周期特性に基づく地盤構造の推定

爆破実験により濃尾平野, 伊勢湾周辺域の深部地盤構造を決定したが名古屋市域については測線が設定されなかったために明らかにできなかった。そこで, A 測線近傍の弥富中学, 名古屋大学, 猿投山麓の愛知工大の 3 地点において 1 秒から 10 秒の周期域で微動ならびに地震動

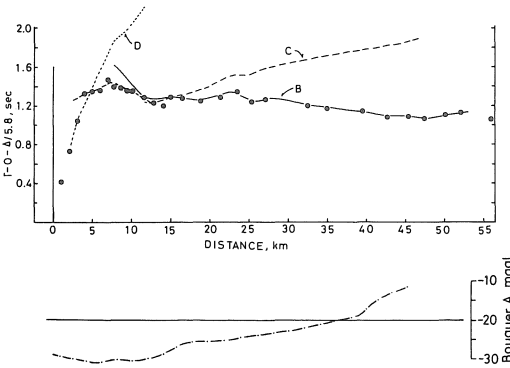
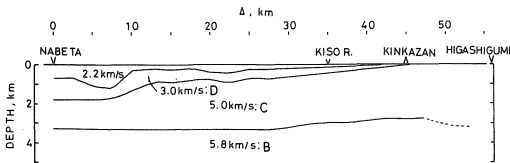


図 5 第 1 回鍋田爆破解析結果
A 測線における速度構造 (上), B, C, D 各層を伝播する波の理論走時と観測初動走時 (中), ブーゲー異常との対応 (下)

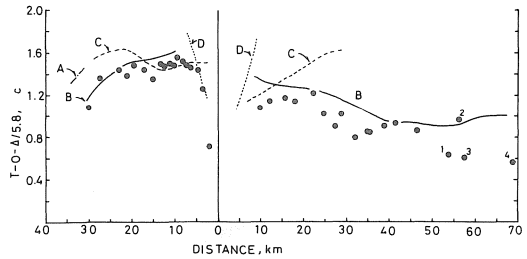
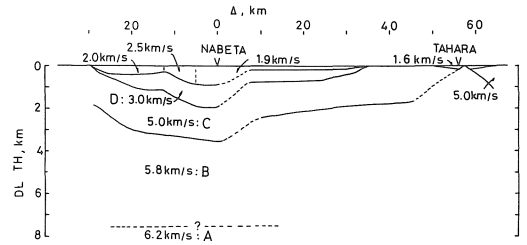


図 6 第 2 回鍋田爆破解析結果, B, C 測線における速度構造 (上), A, B, C, D 各層を伝播する波の理論走時と観測初動走時 (下), 記号 1 (観測点 B16), 記号 2 (同 SPT), 記号 3 (同 T21), 記号 4 (同 103)

表 1 爆破実験から求められた深部地盤の地震波速度

	P 波速度 (km/s)	S 波速度 (km/s)
首都圏第 1 層 (鮮新統)	1.8~2.2	0.4~0.8
第 2 層 (中新統)	2.9~3.2	1.2~1.3
	(岩槻では 1.6 km/s も存在)	
第 3 層 (岩盤)	4.7~5.0	2.5~2.6
名古屋 E 層 (鮮新統)	1.9~2.5	0.5~0.9
D 層 (中新統)	3.0	1.3 ないし 1.6
C 層 (岩盤)	5.0	2.6

の観測を実施し, その周期特性から地盤構造を推定することにした。

微動およびいくつかの地震動のスペクトルを図 7(1)に示す。ただし, 震源特性を除去するために岩盤上の愛知工大におけるスペクトルと名古屋大学, 弥富中学におけ

表 2 深部地盤構造モデル。層厚 (H), S 波速度 (V_s), 密度 (ρ)

		名古屋大学		弥富中学		ρ (g/cm ³)
		モデル 1	モデル 2	モデル 1	モデル 2	
		V_s (m/s)	H (m)	V_s (m/s)	H (m)	
A	沖積層					
D	洪積層					
P	鮮新統	680	500	800	500	2.10
M	中新統	1600	330	1600	250	2.30
B	岩盤	2800	2800	2800	2800	2.60

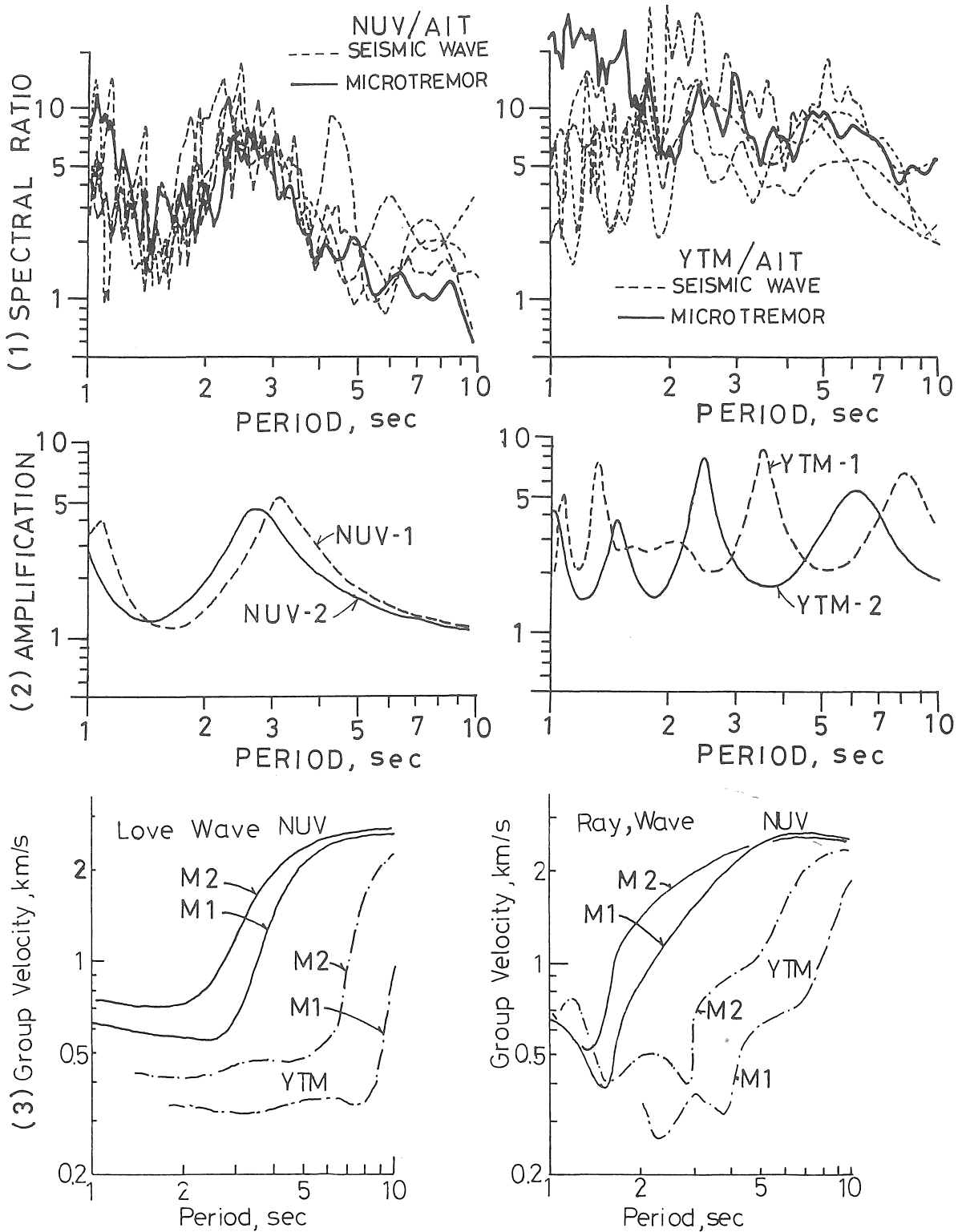


図7 弥富中学(YTM), 名古屋大学(NUV), 愛知工大(AIT)における微動, 地震動観測結果
 (1)微動(実線)および地震動(破線)のスペクトル比, (2)S波伝達関数, (3)表面波分散曲線

るスペクトルの比で示してある。名古屋大学においては2.5秒、弥富中学においては5～6秒のスペクトルピークがみられる。このスペクトルピークを説明するために表2に示す地盤モデルを考えた。このモデルを用いて求めたS波伝達関数を図7(2)に、表面波分散曲線を図7(3)に示す。弥富中学における5～6秒のピーク周期、名古屋大学における2.5秒のピーク周期はS波の多重反射、あるいはラブ波の分散によって説明される。表2に示した弥富中学の地盤モデルは近傍で得られた爆破実験によるモデルとほぼ一致しており、このことは微動・地震動の周

期特性から地盤構造を推定できることを説明すると同時に、今回得られた名古屋大学における地盤モデルの有用性を示している。

3.3 深部地盤構造モデル

Iida and Aoki²¹⁾は重力のブーゲー異常を用いて図8に示すような基盤深度を推定している。図8に示された基盤は前節までの考察から明らかにされた岩盤に対応しているが、その深度に若干の差がみられる。そこで、3.1、3.2節で得られた深部地盤各層の深度を用いて図8の深度を修正し、名古屋地盤の深部構造モデルを作成した。その東西断面の1例を図9に示す。

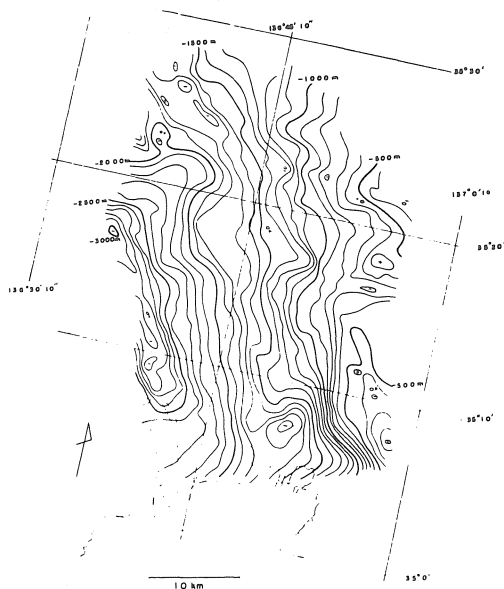


図8 ブーゲー異常から求めた基盤深度 (Iida and Aoki, 1958)

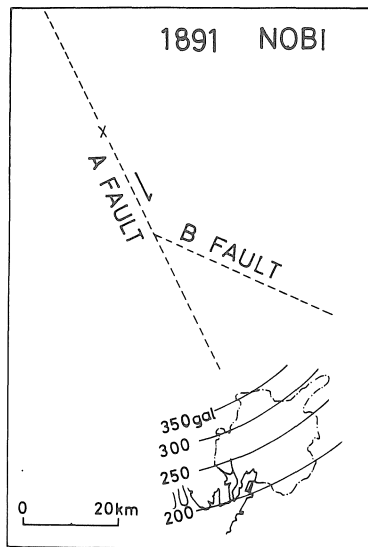


図10 濃尾地震断層モデル

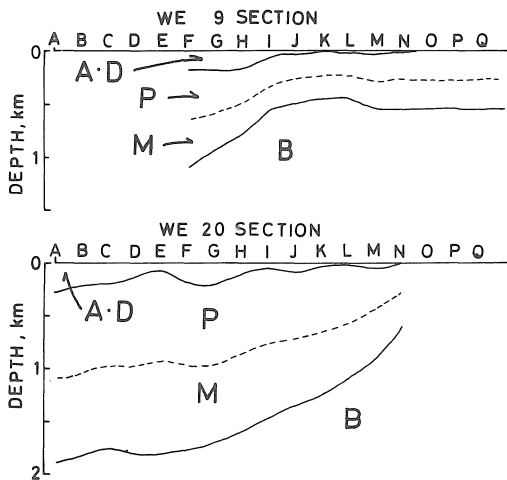


図9 深部地盤モデルの東西断面。沖・洪積層(A・D)、鮮新統(P)、中新統(M)、岩盤(B)

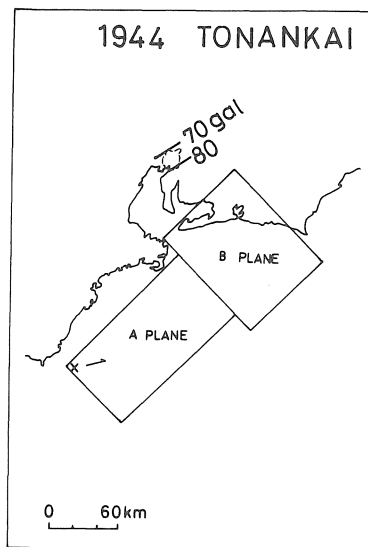


図11 東南海地震断層モデル

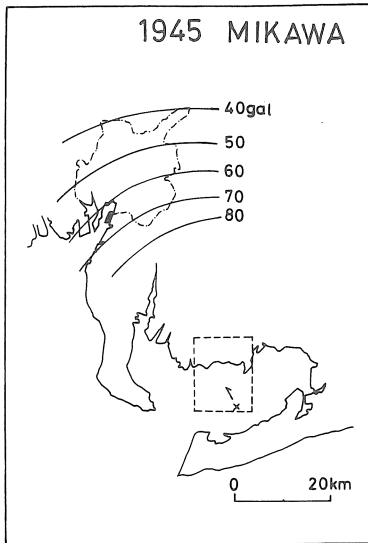


図12 三河地震断層モデル

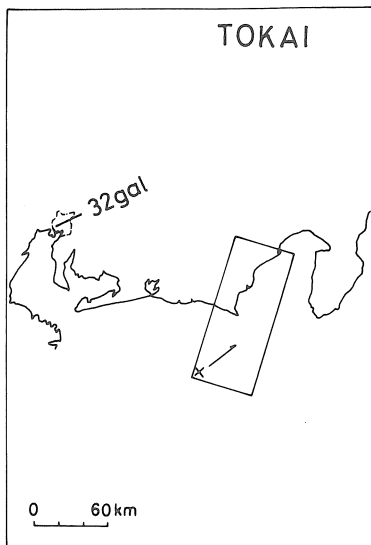


図13 東海地震断層モデル

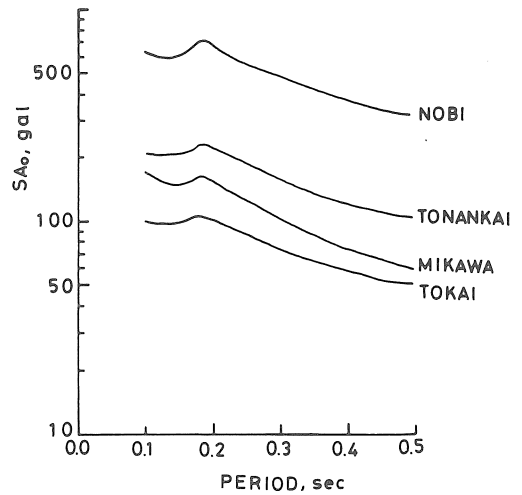


図14 名古屋市中心部(I15メッシュ)における入射波加速度応答スペクトル

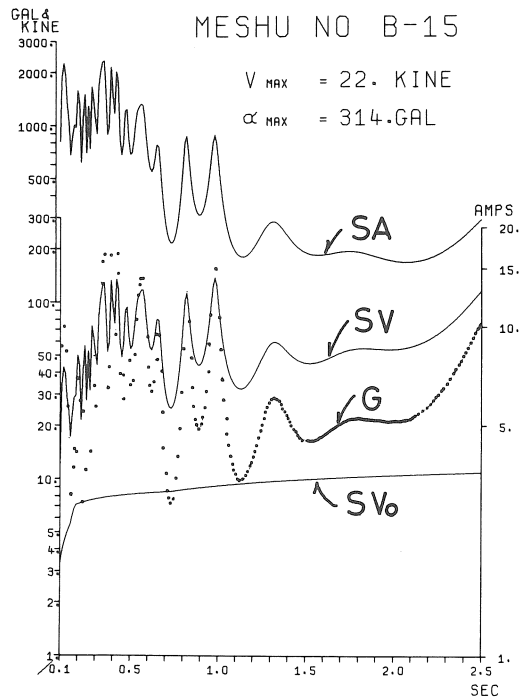


図15 東南海地震における地震基盤への入射波速度応答スペクトル(SVo), S波伝達関数(G), 地表における速度応答スペクトル(SV) および加速度応答スペクトル(SA)

4. 既往の地震における地表面最大加速度の推定

4.1 翠川・小林の方法

翠川・小林²²⁾は本震の際生ずる断層面を小分割し、この小分割が破壊される際に発生する地震波パルスのそれぞれの小分割からの総和として本震の入射波速度応答スペクトルSVoを計算する手法を提案した。このSVoに表層地盤のもつ地震波伝達特性Gを乗ずることにより地表における速度応答スペクトルSVを得る。速度応答スペクトルSVo, SVから加速度応答スペクトルSAo, SAを求め

$$\alpha_{maxo} = 1.2 \int_{0.1}^{0.5} SA_o(T) dT \quad (5)$$

$$\alpha_{max} = 1.2 \int_{0.1}^{0.5} SA(T) dT \quad (6)$$

を求める。Tは周期(秒)であり、 α_{maxo} , α_{max} はそれぞれ地震基盤, 地表面における最大加速度(gal)である。

4.2 断層モデルと基盤入射波加速度応答スペクトル・最大加速度

図10～図13に濃尾、東南海、三河、想定東海の各地震における断層モデルと基盤入射波最大加速度を示す。图中的×印は破壊出発点を、矢印は破壊の方向を示している。濃尾、東南海地震については2つの断層面を仮定している。図14に名古屋市(I15メッシュ)における入射波加速度応答スペクトルを示す。(5)式に基づいてこのスペクトルを積分することにより最大加速度が得られる。

4.3 メッシュ別最大加速度分布

名古屋市域を1辺約1 kmの標準メッシュに分割し各メッシュにおける地表面での水平最大加速度を求め

た。解析の1例を図15に示す。4.2節で求めた入射波速度応答スペクトル $SV_0(\omega)$ に2.3および3.3節で作成した地盤モデルから計算されたS波伝達関数 $G(\omega)$ を乗じ地表面における速度応答スペクトル $SV(\omega)$ 、振動数を乗じて加速度応答スペクトル $SA(\omega)$ を求め、(6)式から最大加速度 α_{max} を算定した。

図16から図19に濃尾、東南海、三河、想定東海の各地震における推定最大加速度分布を示す。図16に示された濃尾地震における最大加速度には1000galを越えるものもあるがこれは地盤を弾性体として取扱ったためである。このように大きな加速度においては地盤の地震波応答は非線型を示すことが知られており実際の最大加速度

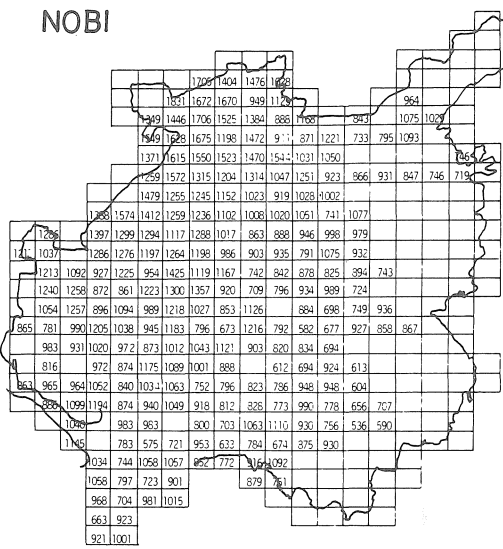


図16 濃尾地震最大加速度 (gal)

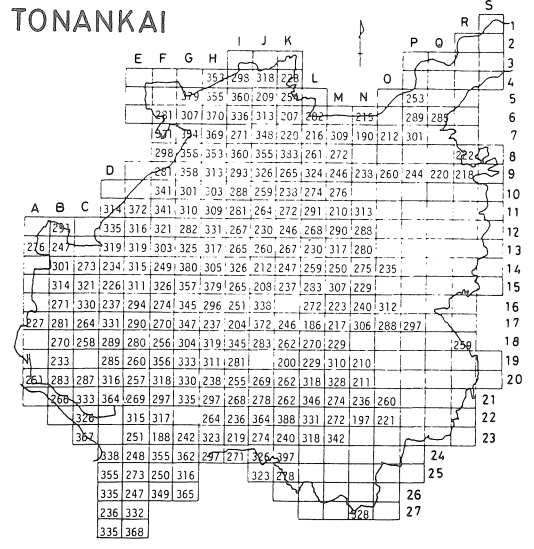


図17 東南海地震最大加速度 (gal)

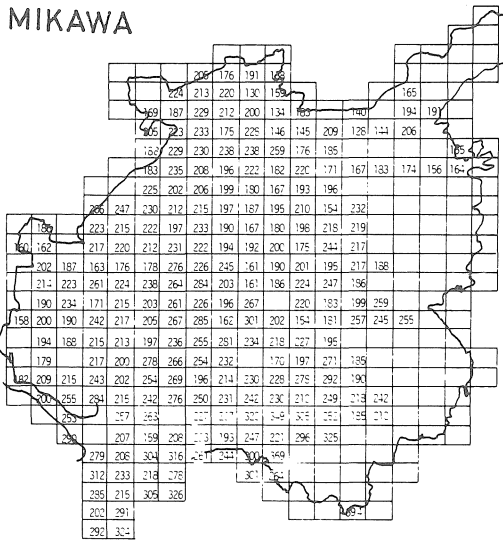


図18 三河地震最大加速度 (gal)

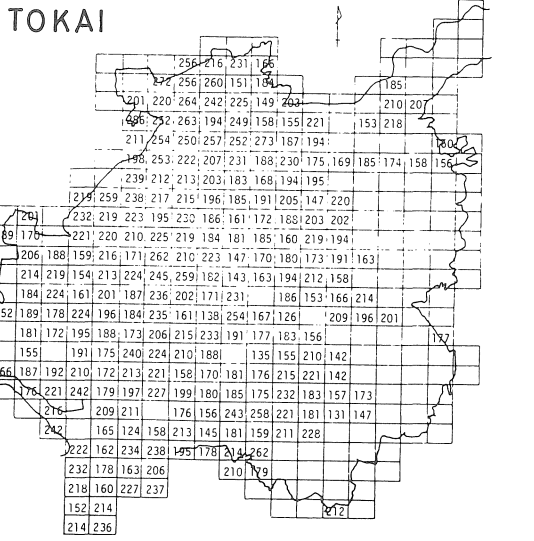


図19 東海地震最大加速度 (gal)

は弾性計算によって得られた値より小さい。

5. 既往の地震における住家被害率と最大加速度との関係

5.1 メッシュ別住家被害率

飯田¹¹⁻¹⁴⁾は濃尾、東南海、三河の各地震における区別、連区別、町別の住家被害率を詳細に報告している。飯田が求めた被害率を1 km メッシュの被害率に直したものを図20に示す。メッシュ別の被害率に直すに当たっては元の区別、連区別、町別の被害率をメッシュに含まれる面積に応じて比例配分している。

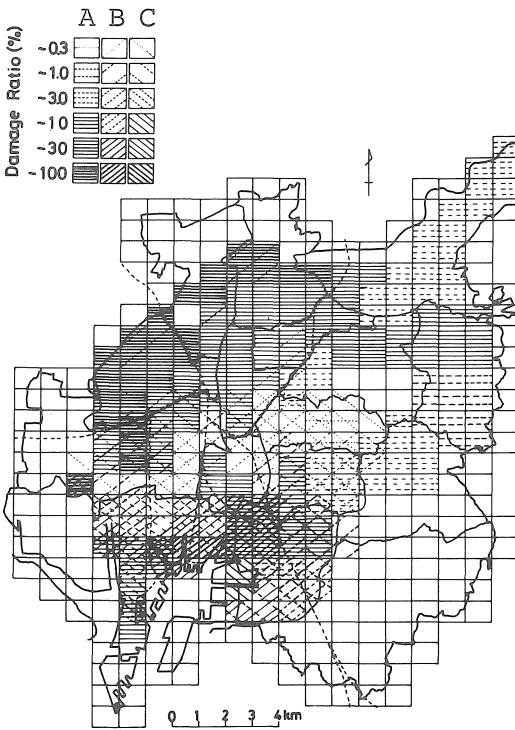


図20 濃尾地震(A)、東南海地震(B)、三河地震(C)における住家被害率

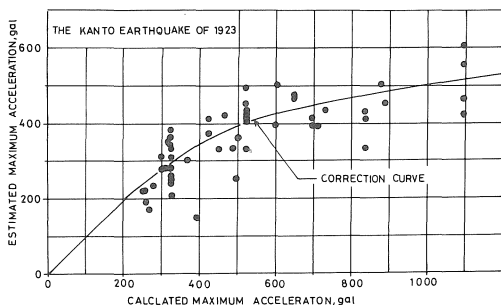


図21 関東地震における算定最大加速度と墓石転倒等から推定された最大加速度との関係

5.2 最大加速度の補正

翠川・小林²²⁾は本研究と同手法によって関東地震における最大加速度を算定する一方、実際の最大加速度を墓石転倒等から推定し両者の関係を求めている。図21にその結果を示す。加速度が200gal程度までは両者は等しいが、加速度が大きくなるにつれて実際の最大加速度は計算による値に比べ小さくなる。そこで図中の実線を補正曲線として4節で算定した最大加速度を補正することとした。

5.3 最大加速度と住家被害率

補正された地表面水平最大加速度と住家被害率との関係を図22に示す。三河地震における最大加速度は160gal~300galであり被害率も10%以下である。これに対し、濃尾地震における最大加速度は400gal~600galと大きく被害率も最大80%に達している。一方、東南海地震における最大加速度は220gal~330galであるが被害率は30%に達しているメッシュもある。最大加速度が大きくなるに従い被害率が增大することは良く知られている。このような観点から図22をながめると三河地震における大部分の、東南海地震における一部の、また濃尾地震における全ての被害率を結ぶ包絡線はこのような傾向を示している。即ち、これらの被害率は地震動そのものに原因する被害を示していると言えよう。これに対し、東南海地震における10%を越す被害率はこのような傾向とはやや異なっており、また220gal~330galという最大加速度に対しては被害率が大きすぎる。即ち、これらの被害率は地震動以外の原因による被害を示唆していると言えよう。三河地震における一部の被害率もこのような被害による可能性もありそうである。

5.4 液状化による被害の可能性

図22において包絡線よりずれている被害率は東南海地震における港区一帯のメッシュの被害率である。東南海地震において港区一帯に液状化現象がみられたことはいくつかの報告¹²⁾¹⁹⁾で明らかであるが、被害との関係を明らかにするために東南海地震当時港区に住んでいた人に対しアンケート調査を実施した。アンケートは地変(噴砂、噴水等)と被害程度(全壊、半壊、大破、小破、無被害)に関する項目からなっている。図23は噴砂・噴水のみられた地域(液状化が発生したと推定される)とみられない地域に分けて被害程度の頻度、割合を示したものである。前者の地域では明らかに被害が大きい。このことから港区一帯における被害の多くは液状化に原因するものと考えられる。即ち、図22の包絡線からずれる大きな被害率は液状化による被害と推定される。

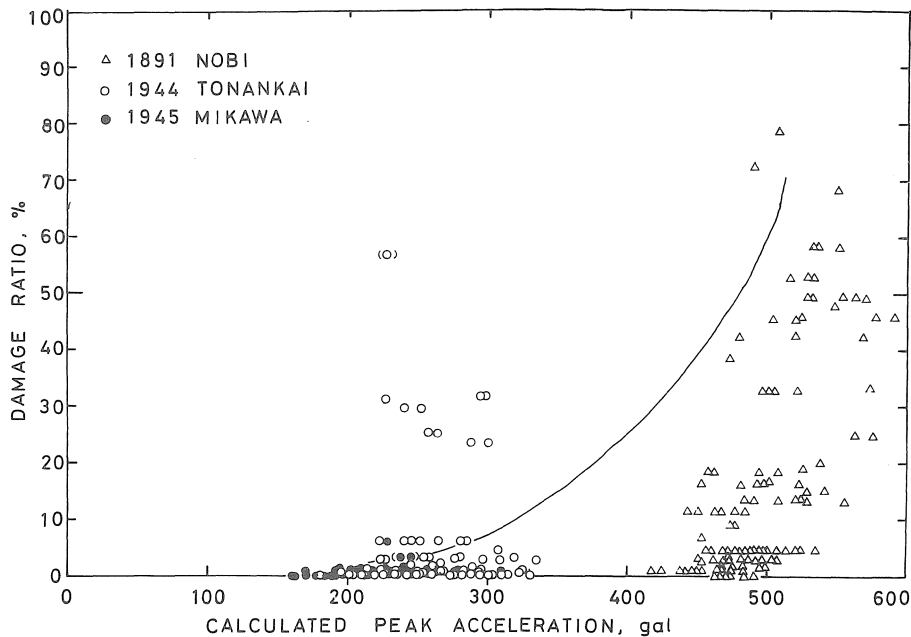


図22 住家被害率と最大加速度との関係

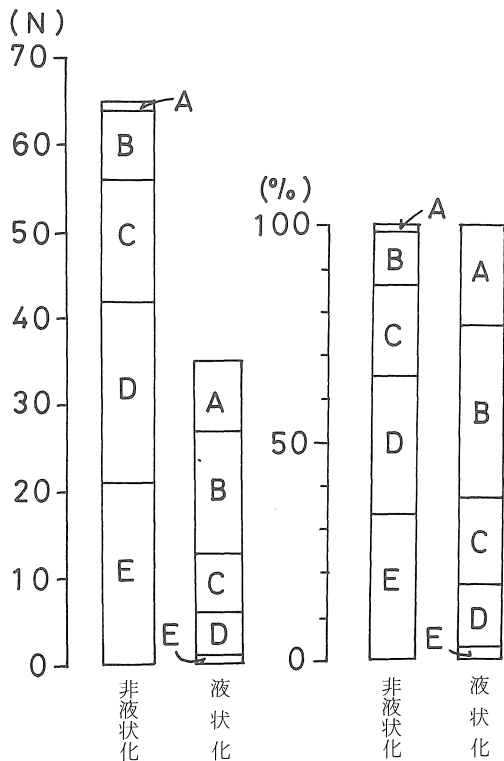


図23 東南海地震における港区一帯の住家被害頻度(N)と被害百分率(%).全壊(A),半壊(B),大破(C),小破(D),無被害(E)

6. まとめ

本研究は既往の地震における最大加速度を断層モデルに基づく推定基盤入射波と表層地盤の地震波伝達関数から求め、住家被害率との関係を追究したものである。

表層地盤の地震波伝達関数を求めるためには地盤各層のS波速度、密度、Q値が必要である。深度数10m~数100mの浅部地盤のこれらの定数については、まずPS検層を実施してこれら定数と土質の指標との関係式を求め、次に既存の土質の指標に関する資料(ボーリング柱状図等)から上述の関係式を用いて推定した。深度数100m~数kmの深部地盤に関しては、爆破実験、微動・地震動観測から岩盤および第三紀層のS波速度構造を推定した。

既往の地震における基盤入射波速度応答スペクトルを地震断層モデルに基づいて推定し、地震波伝達関数を乗じて地表における速度・加速度応答スペクトルを求め、そのスペクトル強度から最大加速度を算定した。

濃尾・東南海・三河の各地震における住家被害率と上述の最大加速度との関係を調べた結果次の結論を得た。

(1) 住家被害率は最大加速度とともに増加することが認められ、従来知られている被害率と最大加速度との関係を確認した。

(2) しかし、東南海・三河地震における一部の被害率は最大加速度が小さいにもかかわらず数10%に達する大きな値となっており、地震動以外に原因する被害である

ことが推察された。

(3) 上述の被害率は港区一帯における値であることから、東南海地震当時に港区に住んでいた人に対して地変・被害に関するアンケート調査をした結果、港区一帯で噴砂・噴水がみられたこと、そのような地点で被害が著しいことが判明し、上述の被害率は地盤の液状化に原因することが明らかとなった。

参考文献

- 1) 飯田汲事；名古屋市中における既往の地震とその災害，名古屋市防災会議，1-78，1974.
- 2) 飯田汲事；昭和19年12月7日東南海地震の震害と震度分布，愛知県防災会議，1-120，1977.
- 3) 飯田汲事；昭和20年1月13日三河地震の震害と震度分布，愛知県防災会議，1-96，1978.
- 4) 飯田汲事；昭和24年10月28日濃尾地震の震害と震度分布，愛知県防災会議，1-304，1979.
- 5) 表俊一郎，宮村撰三；横浜市並びに名古屋市の震害分布と地盤との関係，建築雑誌，773号，17-23，1951.
- 6) Omote, S. and Miyamura, S.; Relations between the Earthquake Damage and Structure of Ground in Nagoya City, Bull. Earthq. Res. Inst., Vol. 29, 183-196, 1950.
- 7) 横尾義貫，桑原徹，堀内孝英；名古屋付近の地盤と震害に関する研究（その1）および（その2），建築学会論文報告集号外，166-167，1965.
- 8) 横尾義貫，桑原徹，堀内孝英；名古屋付近の地盤と震害に関する研究（その3），建築学会東海支部研，57-61，1965.
- 9) 飯田汲事；名古屋市内地盤各層中のS波速度測定調査報告（第1報），名古屋市防災会議，1-58，1974.
- 10) 飯田汲事，正木和明；同上（第2報），1-37，1975.
- 11) 飯田汲事，正木和明；同上（第3報），1-86，1976.
- 12) 飯田汲事，正木和明，楓重彦；同上（第4報），1-35，1977.
- 13) 飯田汲事，正木和明，楓重彦，坪井利弘；同上（第5報），1-50，1978.
- 14) 飯田汲事，正木和明，谷口仁士，坪井利弘，宮永良一；名古屋地盤の地震波増幅度および地震危険度，名古屋市防災会議，1-143，1979.
- 15) 飯田汲事，正木和明，谷口仁士，坪井利弘；名古屋地盤の概要，名古屋市防災会議，1-106，1980.
- 16) 多賀直恒，安東直，宮崎正；地盤・構造物の地震動による加害性の推定，建築学会論文報告集，第272号，63-72，1978.
- 17) 正木和明，坪井利弘，飯田汲事；名古屋地盤メッシュ別S波増幅度分布，地震，第2輯，第34巻，135-144，1981.
- 18) 桑原徹；濃尾傾動盆地の発生と地下水の第四系，地盤沈下の実態とその方策に関する調査研究報告，愛知県環境部，109-182，1975.
- 19) 建築学会東海支部編；名古屋地盤図，コロナ社，東京，1969.
- 20) 林知己夫；数量化理論とその応用(V)，統計数理研究イ報，第8巻，149-151，1961.
- 21) Iida, K. and Aoki, H.; Gravity anomalies and the corresponding subterranean mass distribution, with special reference to the Nobi plain and its vicinity, Japan, J. Earth Sci., Nagoya Univ., Vol. 6, No. 2, 113-142, 1958.
- 22) 翠川三郎，小林啓美；地震断層を考慮した地震動スベクトルの推定，建築学会論文報告集，第282号，71-79，1979.

（受理 昭和59年1月17日）