

1944年東南海地震記録の復元と関東の長周期地震動

古村 孝志*・中村 操**

要 旨

1944年東南海地震 (Mw8.1) において、関東平野で強く生成した長周期地震動の特性を詳しく調査するために、東金、大手町、そして横浜地点に設置されていた今村式2倍強震計と中央気象台式1倍強震計の波形記録の解析を行った。煤書き記録を読み取り、地震計の計器特性を補正することにより、3地点の強震波形を得た。確認のために、2004年紀伊半島南東沖の地震 (Mw7.4) で観測された3地点の強震記録から経験的グリーン関数法を用いて合成した東南海地震のフーリエスペクトルとの比較を行い、周期2秒以上の長周期地震動の振幅レベルがよく一致することを確認した。

復元された東南海地震の強震波形から、関東平野では周期7~12秒の長周期地震動が、最大10cmの大きさで10分以上にわたって長く続いたことが明らかになった。速度応答スペクトル (減衰5%) を求めると、東金と横浜では固有周期12秒においてそれぞれ最大60 cm/sと30 cm/sの応答が、そして大手町では固有周期9秒において25 cm/sの強い応答が得られた。この応答レベルは2004年紀伊半島南東沖 (Mw7.4) の2-2.5倍の大きさになることがわかった。

キーワード：1944年東南海地震、強震動、長周期地震動

1. はじめに

大地震において平野で強く生成する、周期3秒以上の長周期地震動 (やや長周期地震動) の問題は、1964年新潟地震における石油タンクのスロッシング火災事故以来、これまでに繰り返し議論されてきている (たとえば、座間1993; 工藤2005)。

関東では、1983年日本海中部地震や1984年長野県西部地震において、当時建設が開始された超高層ビルのエレベータが大きく揺れたことが問題となったほかは、これまで20年にわたって長周期地震動を強く生成するような、規模が大きく ($M > 7$) かつ震源の浅い ($H \sim 10$ km) 大地震は周辺で起きてこなかった。

ところが、2004年に9月5日の深夜に発生した紀伊半島南東沖の地震 (Mw7.4) では、千葉県市原市において石油タンクの浮屋根がスロッシングにより破損、これに引き続き2004年10月23日の新潟県中越地震 (Mw6.6) では、都心の超高層ビルのエレベータケーブルが損傷する事故が立て続けに起きたことから、長周期地震動の問題が大きく浮上することになった。

紀伊半島南東沖の地震が発生した南海トラフでは、今

後30年以内には東南海地震 (M8.1) の発生が心配されており、その巨大地震により生成する長周期地震動の特性を正確に予測することは、巨大人工構造物を多く抱える関東地域の地震防災のための急務の課題である。

幸い、1944年東南海地震時には千葉県東金、東京本郷・大手町、横浜において今村式2倍強震計と中央気象台式1倍強震計による強震観測が実施されており、その記録紙がほぼ良好な状態で現存することが判明した。大手町の強震記録は、これまで秋場・ほか (2005)、正月・ほか (2005)、座間 (2005) によって波形が読み取られ、地震計の計器補整を施すことにより地震動の復元が行われている。これらの研究では応答スペクトルや非定常スペクトルの計算により、東南海地震時の大手町の長周期地震動の特性とその時間変化が詳しく評価されており、周期約8秒の長周期地震動が、最大10cmを越える大きさで10分以上にわたって長く続いたことが明らかにされている。

本研究では、これまでに解析が進められた大手町観測点の強震記録に加えて、東金、本郷、横浜地点における東南海地震の強震記録を復元することにより、関東平野の主要部における長周期地震動の特性を詳しく評価す

2006年6月5日原稿受付; 2006年9月15日受理

* 東京大学地震研究所
〒113-0032 文京区弥生 1-1-1

** 防災情報サービス
〒285-0038 千葉県佐倉市弥勒町30-7

第2回地震防災シンポジウム「首都圏の地下構造と地震防災」にて一部発表

る。ここでは、大手町と横浜地点の強震計の計器特性が不明のため、東南海地震の震源域の近傍で発生した2004年9月5日の紀伊半島南東沖の地震 (Mw7.4) の記録を使い、東金観測点付近での観測波形のスペクトル特性との共通性を利用して計器特性の推定と復元を行う。また、復元波形は、紀伊半島半島沖の地震から経験的グリーン関数法によって合成した強震波形と比較することによりその確からしさを検討する。

2. 1944年東南海地震と関東平野の長周期地震動

紀伊半島南東部から静岡県西部にかけての南海-駿河トラフでは、これまで約100年の間隔でM8級の東南海地震と東海地震が繰り返し発生しており、前回の1944年東南海地震 (Mw8.1) では、震源域に近い愛知、静岡、三重、岐阜の各県を中心に、死者・行方不明者1251人を含む大きな被害が引き起こされた (宇佐美, 1996)。主な被害は震源域近傍の強震動と津波によるものであり、震源から400 km以上離れた関東平野の最大震度は4程度にすぎず、きわだった被害報告はない。しかし、2004年紀伊半島南東沖の地震 (Mw7.4) では、関東の震度は1~2程度にすぎなかったが、この地震により東京湾沿岸において石油タンクのスロッシング被害が報告されており (畑山・座間, 2005)、これより地震モーメントが約8倍大きい東南海地震では、関東平野

においてこれを大きく上回る長周期地震動が生成したことは疑いない。

2.1 1944年東南海地震の強震観測

1944年の東南海地震当時には、東京帝国大学により本郷と東金において今村式2倍強震計による強震観測が、また中央气象台により大手町の中央気象台式1倍強震計による強震観測と、横浜において今村式2倍強震計による強震観測が行われていた (Figs. 1, 2)。

東京大学地震研究所では、1920年代に開始された大森式強震計と今村式強震計等による強震記録がマイクロフィルム化され (岩田・野口, 2003)、Webを用いたデータ検索システムが整備されている (野口ほか, 2001; 野口・岩田, 2001)。データベースを検索し、本郷観測点 (N35.710, E139.766) と東金観測点 (N35.557, E140.372) における今村式2倍強震計による地動記録と記録原紙の存在を確認した (Figs. 3a, b)。

また、気象庁では大手町における1927年からの強震観測記録が整理されるとともに (気象庁, 1990)、全国の气象台と測候所における強震観測記録のマイクロフィルム化が進められている。これらの記録の中から東南海地震における大手町観測点 (N35.687, E139.758) と横浜観測点 (N35.437, E139.657) の強震記録を得ることができた (Figs. 3c, d)。

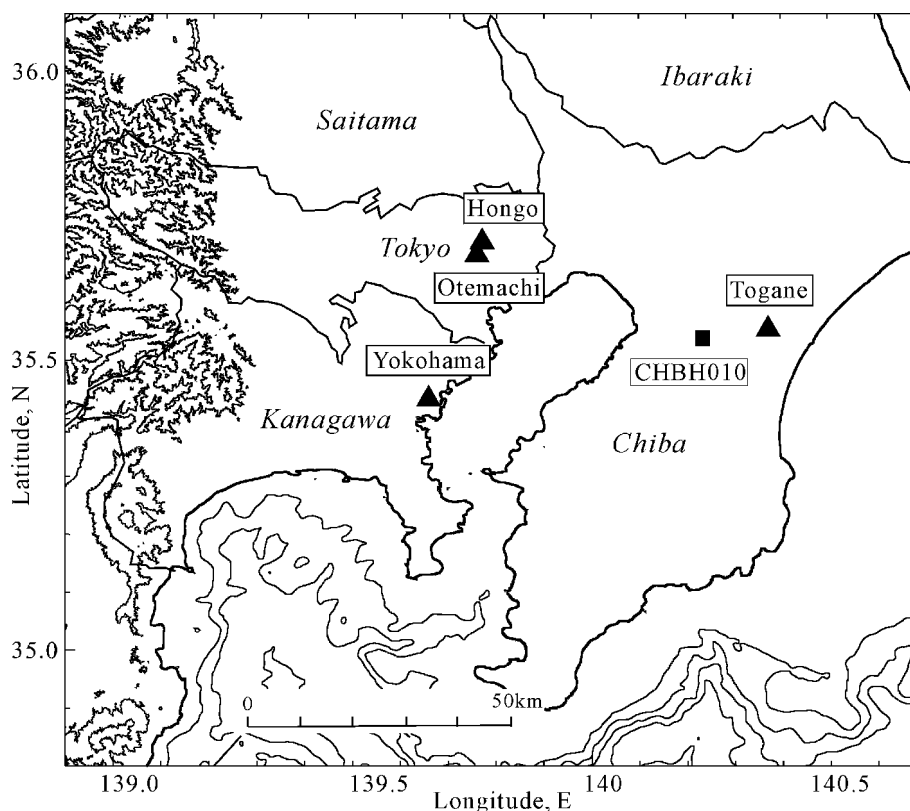


Fig. 1 Map showing the location of strong motions stations at Togane, Hongo, Otemachi, and Yokohama that recorded ground motion of the Tonankai earthquake in 1944. The KiK-net station (CHBH010) that recorded ground motion of the SE Off Kii-Peninsula earthquake of 5 September 2004 is also shown.

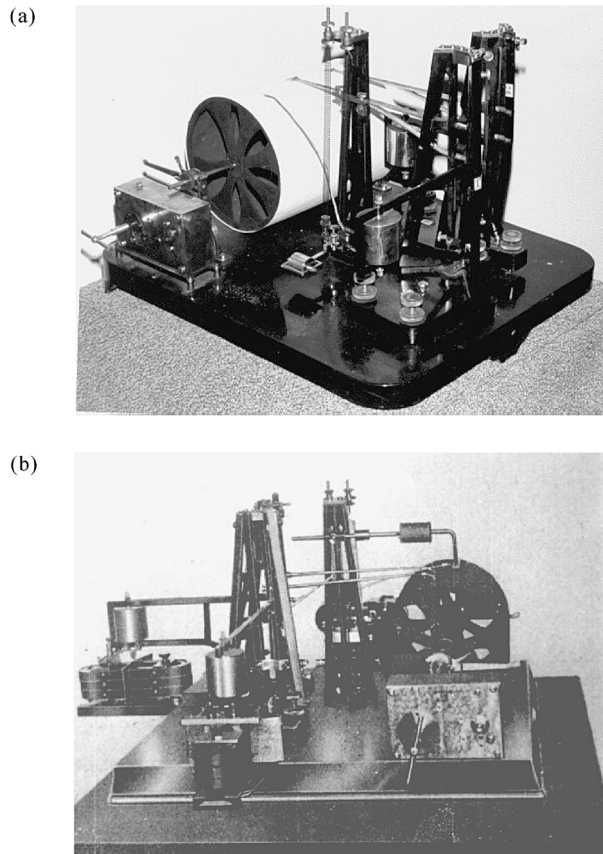


Fig. 2 Strong motion instruments of low-gain displacement seismographs of (a) Imamura-type seismograph and (b) Central Meteorological Observatory-type seismograph. Specifications of the seismographs are listed in Table 1.

東金地点での強震記録は、S波の到達直後の数十秒間にはペンの振り切れが断続的に見られるものの、それ以降は大震幅の長周期地震動が明瞭に記録されている (Fig. 3a)。なお、東金地点の記録紙には、水平動2成分の方位が明記されていないため、本郷や横浜観測点における今村式2倍強震計の観測と同様に、記録紙の上から順に南北 (NS) と東西 (EW) 動の記録と考えて以降の解析を進める。ただし、これには不確実性が残るため、2つの成分に対してそれぞれ Ch1 と Ch2 という表記を併記することにする。

本郷地点での強震記録は、S波の到着直後から2分以上にわたって完全に振り切れた後に、ペンが外れて記録が途絶えている。このため、本郷地点の記録の解析は断念せざるをえなかった。

本郷に近い大手町地点では中央気象台式1倍強震計による記録があり、これもS波到着後から3分以上にわたって一部が振り切れているものの、それ以降は長周期の地動は明瞭に記録されている。大手町と本郷は2.5 kmしか離れておらず、2地点の長周期地震動の特性はほぼ同一であったと考えられるが、強震計の感度や周期特性の違いにより大手町の記録は大きく振り切れることが

なかったものと思われる。なお、先に述べたように大手町の強震記録は秋場ほか (2005; 2006)、正月 (2005)、座間 (2005) により解析が行われており、計器特性の補正による地動への復元と長周期地震動特性の考察が進められている。

中央気象台の横浜測候所では、今村式2倍強震計による強震観測が行われていた。戦時中の社会情勢を反映してか、煤書き記録の品質が悪く、ペンの軌跡が薄い上に、記録紙のところどころに皺や欠損が生じているためにペン軌跡の追跡が難しかったが、550秒間の記録を読み取ることができた。記録された長周期地震動の卓越周期はWE成分よりもNS成分が長く、またNS成分の振幅が小さいことから、おそらく2成分の振子の固有周期が異なっている (WE成分の固有周期が長い) ものと思われる。

今村式2倍強震計と中央気象台式1倍強震計の標準的な計器特性 (田中ほか, 1988; 中央気象台地震課, 1946) を Table 1 に示す。どちらの機器も水平動振子の固有周期は比較的長周期 ($T_0=3\sim5$ 秒) に設計されているのに対し、上下動振子の固有周期はこれよりずっと短い ($T_0=2$ 秒程度) 値を持つ。このため、本研究で着目する関東平野の長周期地震動 (周期6~12秒以上) の記録感度は1/10~1/50以下と小さく、たとえ適切な計器補正を行っても長周期成分はS/N比が悪く復元は難しいと考えられる。そこで、本研究では水平動に限って観測記録の解析と復元を行うことにした。

2.2 煤書き記録の読み取り

東金および横浜観測点での煤書き記録紙を、イメージスキャナー装置により解像度800 dpi, 読み取り階調24 bit カラーの分解能でPCに取り込んだ。また、大手町については原記録が入手できなかったため、マイクロフィルムを印画紙に焼き付け、これをスキャナー装置で読み取った。これらの煤書き記録はモノクロ階調であるが、ペンのかすれなどの記録状態を忠実に記録するために、非圧縮のカラー画像で保存して以下の読み取り作業を行った。

まず、座標読み取り (デジタイズ) ソフトウェア (KURABO 社 KS/KL) を用いて、ペン軌跡を忠実に読み取った。この後の作業において、読み取った波形を時間微分により速度や加速度波形へと変換することを考慮して、波形が急変する時刻の前後では読み取りの間隔を細かく選ぶなど、波形の振幅と変化を忠実に記録できるように読み取り精度の保持に注意を払った。

円弧補正や基準点補正は佐々木・ほか (1988) の手順を参考にして進めた。円弧補正に必要な記録ペンの長さは、地震計の写真や設計図によると、今村式2倍強震計は約385 mm (田中ほか, 1988)、そして中央気象台式1倍強震計は約300 mm (中央気象台地震課, 1946) であることがわかっている (Table 1)。わずか

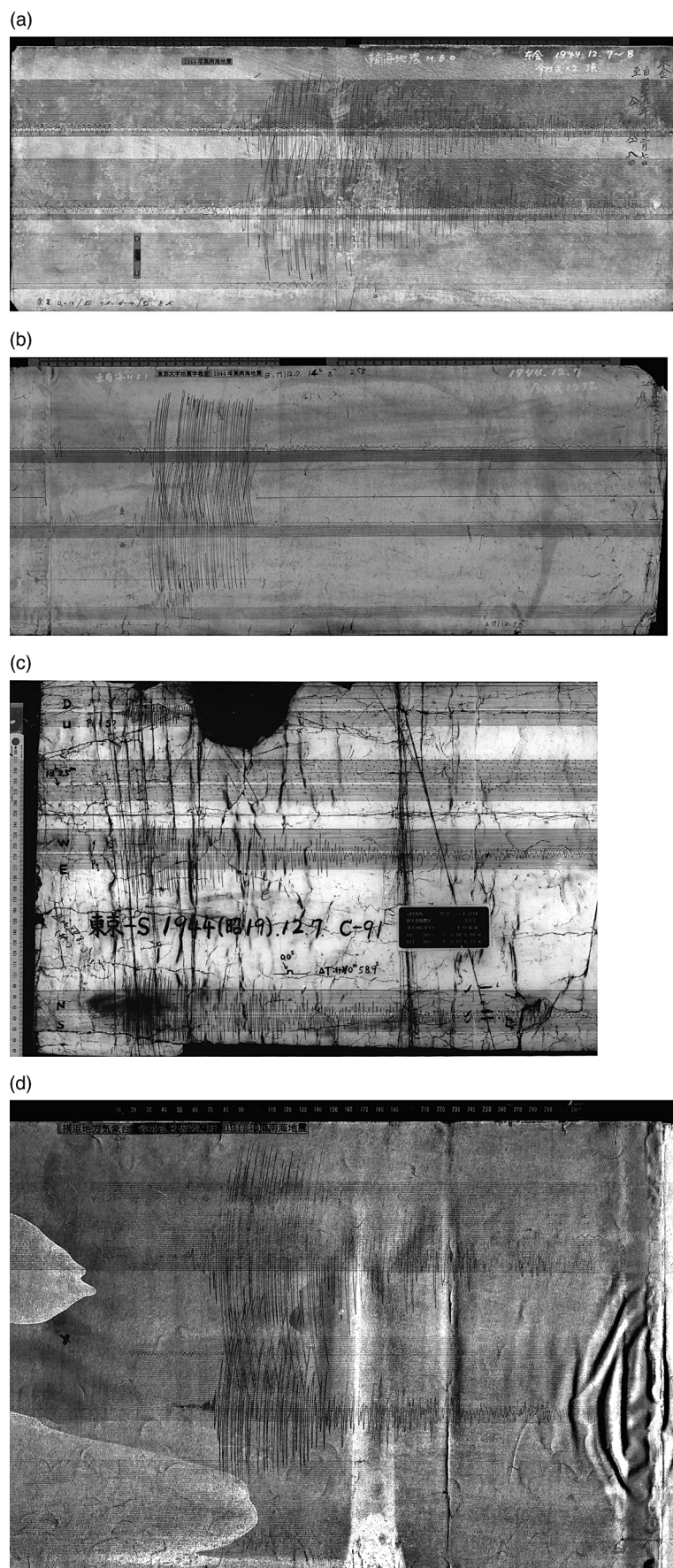


Fig. 3 Three-component strong motion seismograms of the 1944 Tonankai Earthquake recorded at (a) Togane, (b) Hongo, (c) Otemachi, and (d) Yokohama.

Table 1 Specifications of Imamura type and Central Meteorological Observatory (CMO) type strong motion instruments for horizontal (H) and vertical (V) components.

Strong Motion Instruments	Natural Period (T_0)	Damping coefficients (h)	Magnification	Pen Length (mm)	Paper speed (mm/s)
Imamura type strong motion instruments	H: 3~5 s V: 2 s	H: 0.22 V: 0.22	H: 2.0 V: 2.0	385	40
CMO type strong motion instruments	H: 3~5 s V: 2 s	H: 0.33 V: 0.33	H: 1.0 V: 1.0	480	25

Table 2 Estimated instrumental characteristics of horizontal components of the Imamura type strong motion instruments in Togane, Hongo and Yokohama, and Central Meteorological Observatory (CMO) type strong motion instruments in Otemachi during the 1944 Tonankai earthquake.

Station	Instrument and magnification	Natural Period (T_0)	Damping coefficients (h)	Pen length (mm)	Paper Speed (mm/s)
Togane	Imamura type ×2	NS (Ch1): 5.1 s EW (Ch2): 4.1 s	NS (Ch1): 0.35 EW (Ch2): 0.33	395	40 mm
Hongo	Imamura type ×2	NS: 8.0 s EW: 6.4 s	NS: 0.30 EW: 0.33	—	42 mm
Otemachi	CMO type ×1	NS: 4.6 s WE: 5.2 s	NS: 0.33 WE: 0.33	480	25.6 mm
Yokohama	Imamura type ×2	NS: 5.4 s WE: 4.0 s	NS: 0.22 WE: 0.22	400	29 mm

なペン長さのばらつきが復元波形のゼロ点変動に大きく影響を与えるため、ペン長さを5 mm単位で微調整しながら波形復元を行い、最適なペン長としてTable 2に示す値を採用した。

大手町の中央気象台式1倍強震計の記録では、振幅が大きくなると端部が鍵爪のように折れ曲がる問題が見られたため、デジタルソフトウエアの画像修正機能を用いて目視により修正を行った。

今村式2倍強震計は、紙送り装置のタイムマークが1分間隔で上下動のトレースに重ねて記録される機構になっており、また中央気象台式1倍強震計ではタイムマークが記録紙上に独立のトレースとして記録されるようになっている。これらを読み取ることで、Table 2に示される紙送り速度を確認した。

読み取られた不等間隔の読み取りデータは直線補完により0.05 sの等間隔データにリサンプリングした。またペンの摩擦などの影響による基準線のずれを取り除くために、最後にカットオフ周期20秒のローカットフィルタを施した (Fig. 4)。

3. 地震計の計器特性と地動の復元

ここで得られた地震計記録は、地動に対して地震計の計器特性が掛かったものになっている。東南海地震の実地動の復元には、計器特性を適切に求め、記録から取り除く必要がある。

今村式2倍強震計と中央気象台式1倍強震計の固有

周期 (T_0) と減衰定数 h (制震度 v) の標準値はTable 1に示されるとおりである。しかし、これらの強震計の固有周期や減衰定数は設置環境に敏感であり、経年変化が大きいことが予想される。固有周期は地震計台の傾斜を調節することにより、設計値よりもずっと長周期に設定することも可能である。したがって、記録の補正に用いる計器特性は、できるだけ地震の前後に測定されたものが必要である。

3.1 計器特性と復元波形

Fig. 5は、地震計の固有周期と減衰定数を変えて、地震計感度の周期特性を示したものである。強震計の固有周期 ($T_0=3\sim5$ 秒) が、ここで着目する関東平野の長周期地震動 ($T=6\sim12$ 秒) よりも短い場合には、計器補正によって長周期地震動のレベルが大きく変動することに注意する必要がある。たとえば、周期7秒の地動は、固有周期が $T_0=3, 4, 5$ 秒の地震計では、それぞれ約0.21, 0.45, 0.9倍の震幅で記録されることがわかる (Fig. 5a; $h=0.2$ の場合)。また、減衰定数 (h) が小さい ($h<0.3$) 場合には、地震計の固有周期の前後において、 h の減少とともに最大2~5倍の振幅で記録されることもわかる (Fig. 5b)。ただし、地震計の固有周期から離れた周期帯では、 h が変化してもほとんど感度に違いは見れない (Fig. 5b)。

地震計の計器特性の仮定が復元される地動に与える影響をもう少し詳しく見るために、大手町の強震計記録

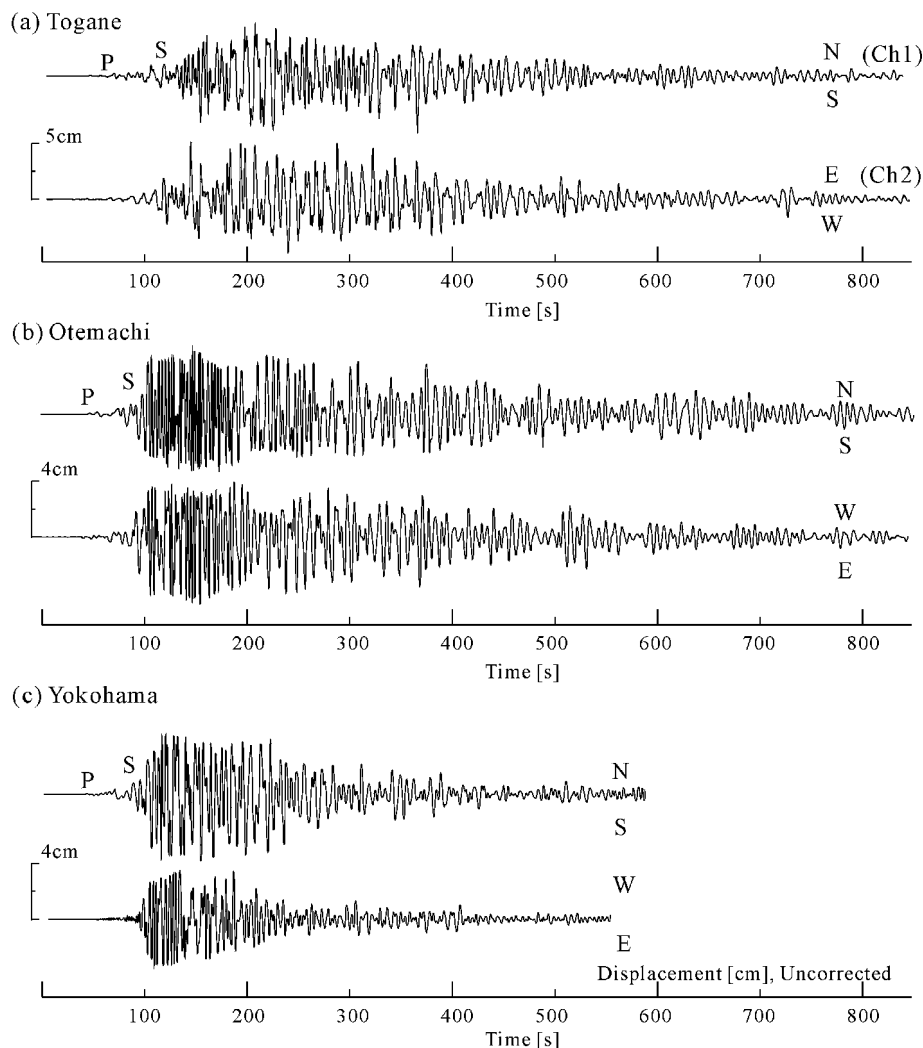


Fig. 4 Record section of horizontal ground motions for the 1944 Tonankai earthquake observed at (a) Togane, (b) Otemachi, and (c) Yokohama. Corrections of the instrumental response of strong motion seismographs are not applied.

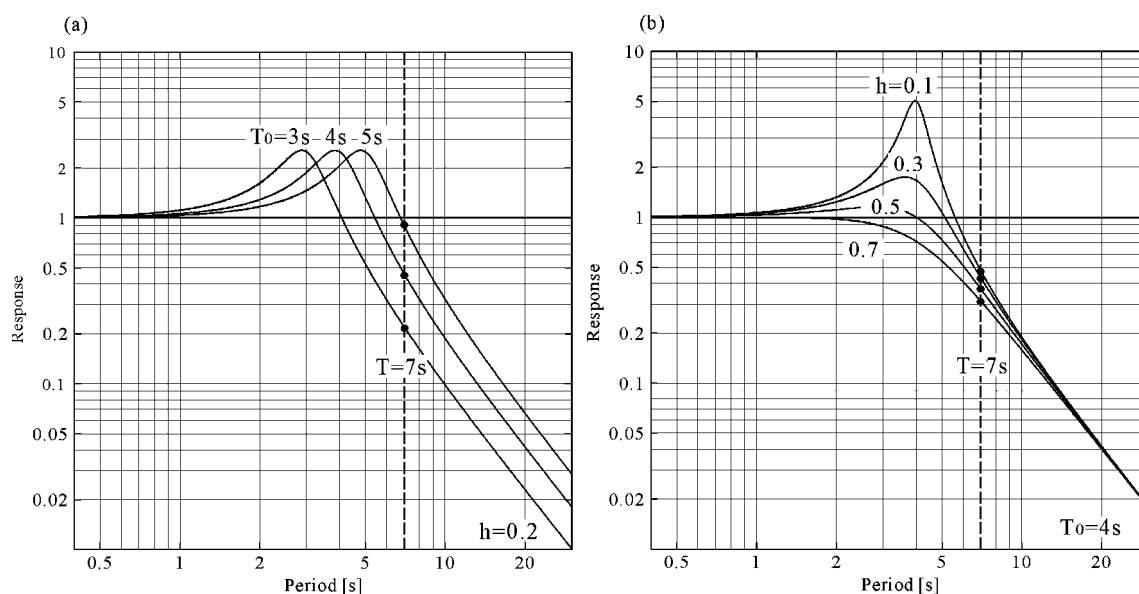


Fig. 5 Response function of seismograph with a (a) natural period of $T_0=3, 4$, and 5 s and common attenuation coefficients of $h=0.2$, and with a (b) attenuation coefficients of $h=0.1, 0.3, 0.5$ and 0.7 and common natural period of $T_0=4\text{ s}$.

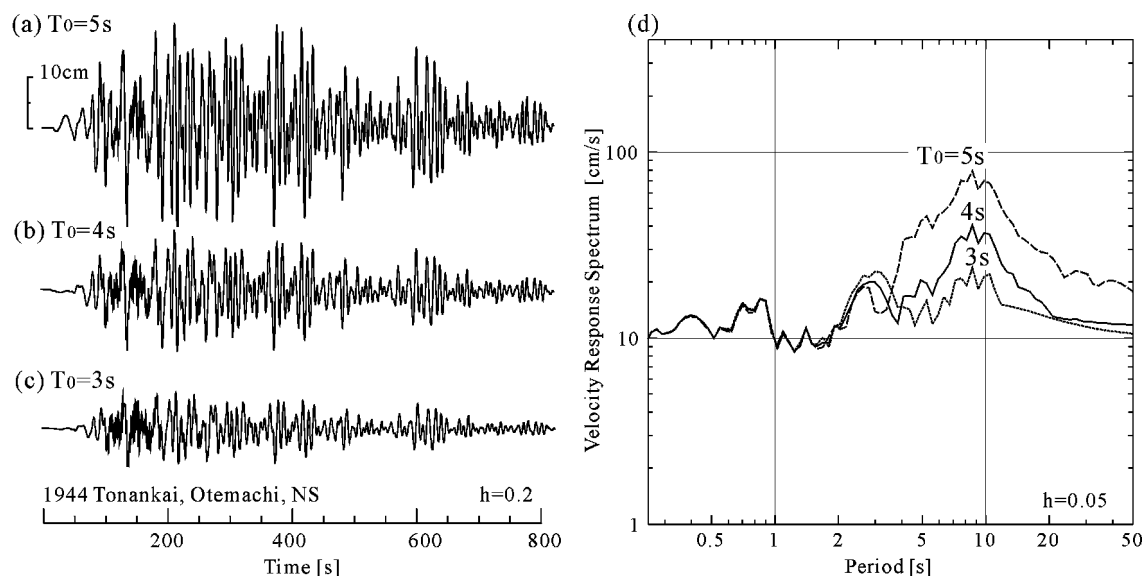


Fig. 6 Experimental test for the correction of instrumental response assuming (a) $T_0=5$ s, (b) 4 s, and (c) 3 s and a common attenuation coefficients $h=0.2$, and (d) corresponding velocity response spectrum for (a)–(c) assuming a damping factor of $h=0.05$.

NS 成分に対して、固有周期 $T_0=3, 4, 5$ 秒を仮定した計器補正を行い（減衰定数 $h=0.2$ に固定）、復元された地動とその応答スペクトルを比較した（Fig. 6）。これを見ると、 $T_0=3\sim 5$ 秒の範囲で地動の振幅が3倍以上も大きく変動するほか、 T_0 よりも長周期側の応答スペクトルは4倍以上も大きく違ってくるのがわかる。

いっぽう、減衰定数 h の仮定が復元波形の長周期成分（ $T>7$ 秒）に与える影響は小さいことが Fig. 5b からわかる。事実、 $h=0.1\sim 0.4$ の範囲で h を変化させ、復元波形の違いを調査したが、地動波形とその応答レベルの違いはほとんど区別できなかった。

3.2 計器特性の推定と地動の復元

3.2.1 東金・本郷観測点記録の解析

本郷と東金観測点における今村式2倍強震計による観測では、記録紙の交換直後に地震計の検定が行われており、記録紙には振子の自由振動（インパルス応答）が記されている。これを読み取り、宇津（1977）の手順に従い振子の固有周期と減衰定数を求めた。

まず、自由振動の軌跡の数周期分の振幅 a_n を読み取り、半周期毎に振幅が減少する割合から制震率 $v_n=a_{n-1}/a_n$ を求め、これを4周期分平均することにより v を決定した。なお、制震率 v と減衰定数 h には以下の関係がある：

$$v = \exp [h * \pi / (1 - h^2)^{0.5}].$$

つぎに、振子の自由振動がゼロ点を切る時間間隔を読み取り、これを同様に半周期毎に4周期分平均して、振子の“見かけ”の固有周期 T_0' を求めた。この振動周期は地震計の摩擦や減衰の影響により、“真の”固有周

期よりも長くなっているため、以下の式から減衰の影響を取り除いた：

$$T_0 = T_0' * (1 - h^2)^{0.5}.$$

求められた、東金と本郷観測点の今村式2倍強震計の計器特性を Table 2 に示す。東金観測点の水平動振子2成分の固有周期（ $T_0=5.1$ 秒と4.1秒）は Table 1 に示した今村式2倍強震計の標準的な特性の範囲（ $T_0=3\sim 5$ 秒）に収まっている。また減衰定数（ $h=0.35$ と0.33）も設計値（ $h=0.33$ ）と大きな食い違いはない。

これに対して、大きく振り切れた本郷地点の今村式2倍強震計は、固有周期の設定（ $T_0=8.0$ 秒と6.4秒）が、標準値よりずっと長周期側に調整されていたことがわかる。そしてこの強震計の固有周期が都心部の表面波（長周期地震動）の卓越周期（約6～8秒）にちょうど一致（共振）してしまったことが、記録ペンがはずれるほどに大きく振り切れてしまった原因であると考えられる。いっぽう、その他の地点に置かれた強震計の固有周期の設定は、各地点の長周期地震動の卓越周期（7～12秒）よりも短かったために、東南海地震の長周期地震動に対して大きく振り切れずにすんだものと思われる。

3.2.2 大手町・横浜観測点記録の解析

中央気象台による大手町と横浜観測点の強震観測では、記録紙上に地震計の検定結果が記されておらず、また東南海地震前後の地震計の計器特性を示した資料はまだ見つかっていない。

これまでの研究では、たとえば座間（2005）は強震計の中間的な特性値（ $T_0=4$ s, $v=2.5$ ）を用いた計器補正により地動への復元を行っている。しかし、前述のよ

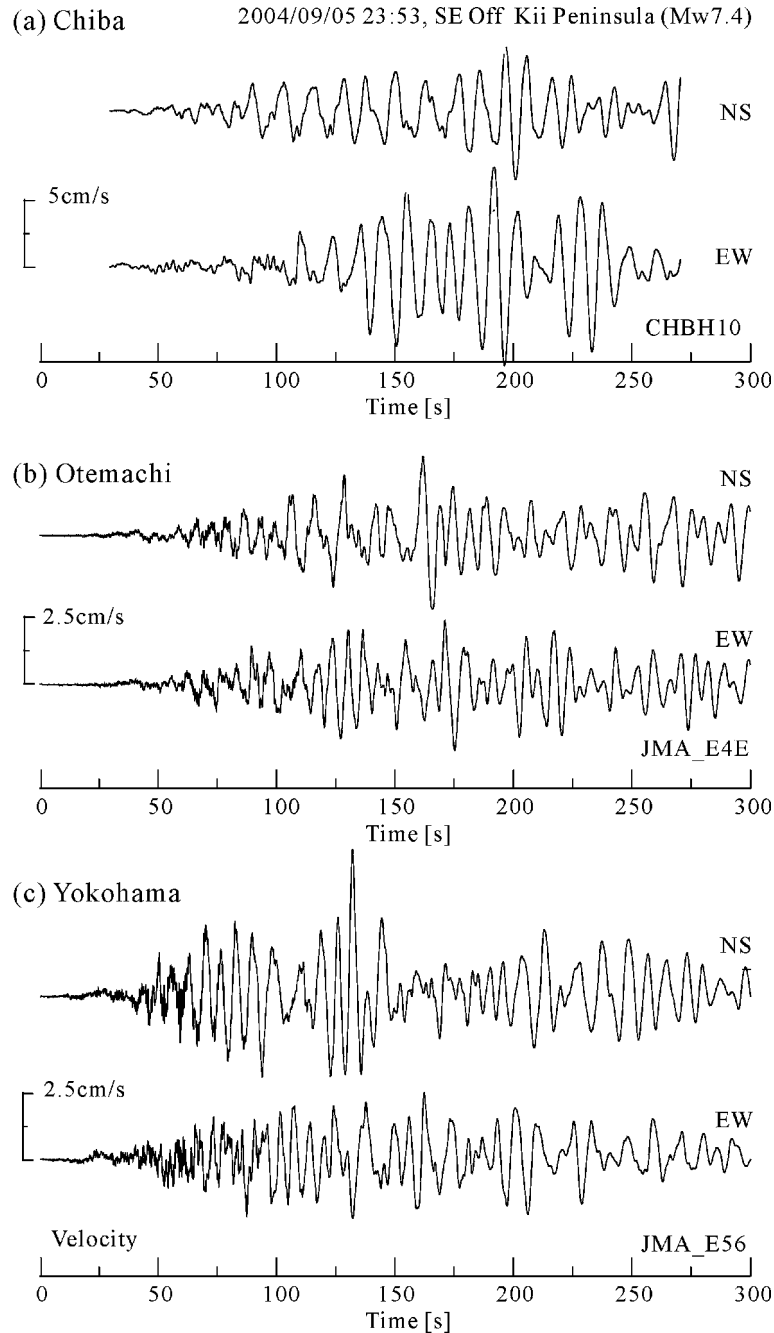


Fig. 7 Horizontal ground velocities records at (a) Chiba (CHBH10), (b) Otemachi (JMA_E4E), and (c) Yokohama (JMA_E56) during the 2004 SE Off Kii Peninsula earthquake (Mw7.4).

うに機械式地震計の特性にはばらつきが大きく、また本郷地点のように、地震計の周期を標準値より大きく延ばした観測が行われた可能性もある。また、秋場ほか(2006)は記録紙を精査することによりWE成分のトレースの中にペンの飛びを発見し、これを振子の自由振動とみなして解析することにより、 $T_0=5.1$ s, $v=0.2$ の計器特性を得ている。ただし、このときの振動には地震計自体の自由振動特性に加えて地震時の地動の影響が含まれる可能性がある。また、NS成分にはペンの飛びはなく、その計器特性については手がかりがない。

本研究ではこれらの既往の研究結果を参考にするとともに、新たな視点から東京と横浜地観測点の計器特性と東南海地震の地動を探ることとした。

東南海地震と同様に熊野灘で発生した2004年紀伊半島南東沖の地震(Mw7.4)の地動が大手町気象台と横浜測候所の震度計で記録されている(Fig. 7b, c)。東金地点にも千葉県と気象庁の震度計、そしてK-NET強震計が設置されているが、この地震の震度は小さく(震度1以下)地震計は可動していなかったが、ここから15 km離れたKiK-net千葉(CHBH10; Fig. 1)で地動

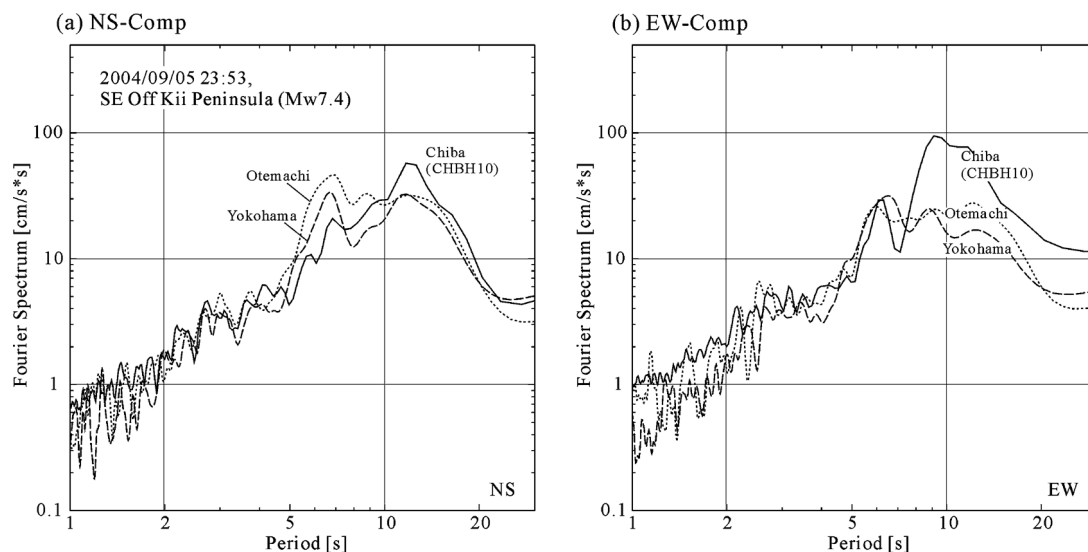


Fig. 8 Fourier spectra of (a) NS and (b) EW-component ground velocities during the 2004 SE Off Kii Peninsula earthquake at Chiba, Otemachi, and Yokohama.

記録が得られている。

これら大手町、横浜および千葉地点における地動速度のフーリエスペクトルを求めると、NS成分は周期2～5秒の範囲で、またEW成分は周期3～6.5秒の範囲で3地点の振幅レベルがほぼ一致することがわかった (Fig. 8)。これよりも長周期側では、表面波が卓越するため、3地点でのスペクトル振幅は大きく異なっている。また、短周期側のスペクトル特性には、深部堆積構造に加えて表層地盤による局所的な増幅特性の違いも現れるため、3地点の地域性が再び大きくなる。

この結果を踏まえて、大手町と横浜での東南海地震の記録に対し、いろいろな地震計の固有周期 (T_0) を仮定して地動に変換し、そのフーリエスペクトルと東金地点のものとの一致を調べた (Fig. 9)。先に述べたように、減衰定数 (h) の変化が復元波形に与える影響は小さいことから、大手町観測点 (中央気象台式1倍強震計) では $h=0.33$ ($v=3$)、そして横浜観測点 (今村式2倍強震計) では、 $h=0.22$ ($v=2$) の標準値に固定した。

紀伊半島南東沖の地震の観測記録に見られた、NS成分の周期2～5秒 (EW成分は3～6.5秒) のフーリエスペクトルの一致とよく対応するように、最終的に大手町と横浜観測点の強震計の計器特性として Table 2 に示す値を採用した。ただし、スペクトル曲線に示されるように、固有周期のわずかな変化に対するスペクトルの変化量は小さく、ここで決定した固有周期の分解能は必ずしも高いものではない。

求められた大手町の中央気象台式1倍強震計の特性 [$T_0=4.6$ s (NS), 5.2 s (WE), $v=2$] は、秋場ほか (2006) により求められた特性値 ($T_0=5.1$ s, $v=2$) や、座間 (2005) が用いた値 ($T_0=4$ s, $v=2.5$) に近いものになった。また、横浜観測点の今村式2倍強震計の計

器特性 [$T_0=5.4$ s (NS), 4.0 s (WE)] は、東金観測点の今村式2倍強震計のもの [$T_0=5.1$ s (NS), 4.1 s (WE)] に近い。

3.3 経験的グリーン関数法による東南海地震の強震動合成と強震復元波形の検証

Table 2 の計器特性を用いて復元された、東金、大手町、横浜地点における東南海地震の地動をさらに別の観点から検証するために、2004年紀伊半島南東沖の地震の地動をもとに経験的グリーン関数法 (たとえば、Irikura, 1986) により東南海地震の地動を合成し、2つの比較を行った。

紀伊半島南東沖の地震は、海溝付近で起きた浅い ($H=10$ km) プレート内地震であり、プレート境界地震である東南海地震とは震源の位置や断層の走行・傾斜など震源パラメータがいくらか異なっている。しかし、震源から関東まで400 kmも離れていることから、2つの地震の伝播経路はほぼ共通と考えることができ、また周期6秒以上の長周期地震動の特性に与える2つの地震メカニズムの違いは小さいものと考えられる。

1944年東南海地震の震源モデル (山中, 2004a) と2004年紀伊半島南東沖の地震 (山中, 2004b) の震源解析結果によると、2つの地震の応力降下量はほぼ同程度になることから、ここでは Irikura (1986) の簡便な手順に従って、2つの大・小地震のマグニチュード (断層面積) と、震源時間関数の違い (Table 3) を考慮した東南海地震の強震動波形の合成を行った。

大地震 (東南海地震) の波形合成に用いる小地震 (紀伊半島南東沖の地震) の重ね合わせ数は、大地震と小地震のモーメント比の1/3乗から2個と求められる。小地震の断層面を断層の走行・傾斜方向に対してそれぞれ2

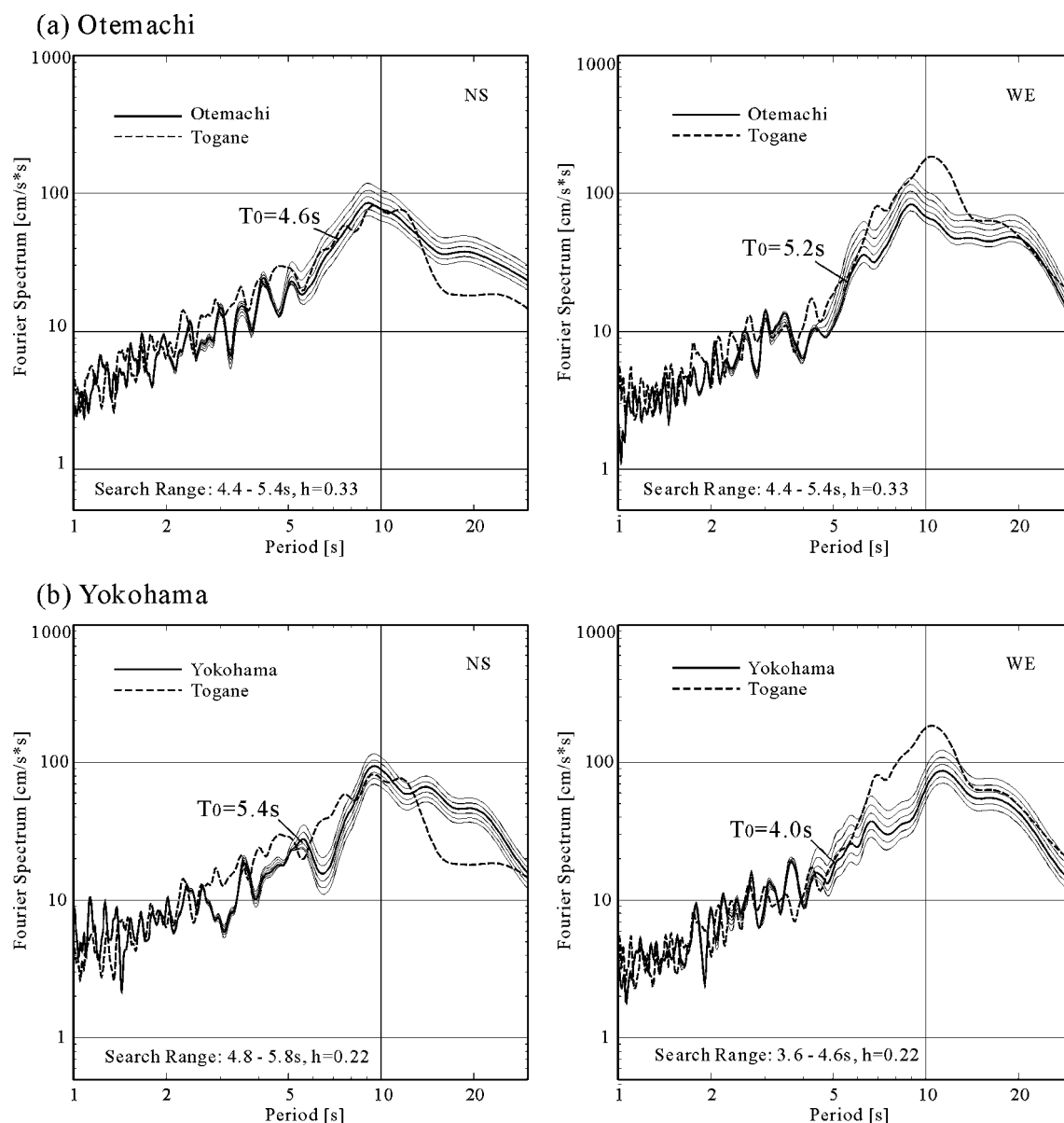


Fig. 9 Comparison of the Fourier spectra of NS and EW component ground motions during the 1944 Tonankai earthquake observed at Togane (dashed line) and (a) Otemachi and (b) Yokohama assuming different natural period (thin lines) and that for adopted natural period (thick line)

Table 3 Fault parameters of the 2004 SE Off Kii Peninsula earthquake and 1944 Tonankai earthquake.

Earthquake	Mw	Fault Size (L*W)	Rise Time (=0.5*W/Vr)
2004 SE Off Kii Peninsula Earthquake	7.4	60 km*30 km	2.5 s
1944 Tonankai Earthquake	8.1	120 km*60 km	5.1 s

個、そして時間方向に2波形分並べ、断層破壊速度の時間遅れを考慮して重ね合わせを行うことにより大地震の強震動を合成した。断層破壊は震源から北東方向に向かって $V_r=2.95$ km/s の速度で進行するものとした。

経験的グリーン関数法により合成された、東金、大手

町、横浜地点における東南海地震の強震動の速度フーリエスペクトルと、東南海地震の復元波形から計算したスペクトルを Fig. 10 に比較する。なお、2つのフーリエスペクトルの計算は、東南海地震の観測波形が振り切れていない、S波の後半から200秒間の記録に対して行った。

東金地点の復元波形のスペクトルはNS, EW成分ともに、7~15秒程度の長周期側で経験的グリーン関数法による合成波形のものとの良い一致が確認できた。また、復元波形と合成波形ともに長周期側(7~15秒)でEW成分がNS成分よりも1.5倍程度大きくなっており、この共通した特徴により、仮定した水平動成分の関係(Ch1=NS, Ch2=EW)が適当であると考えられること

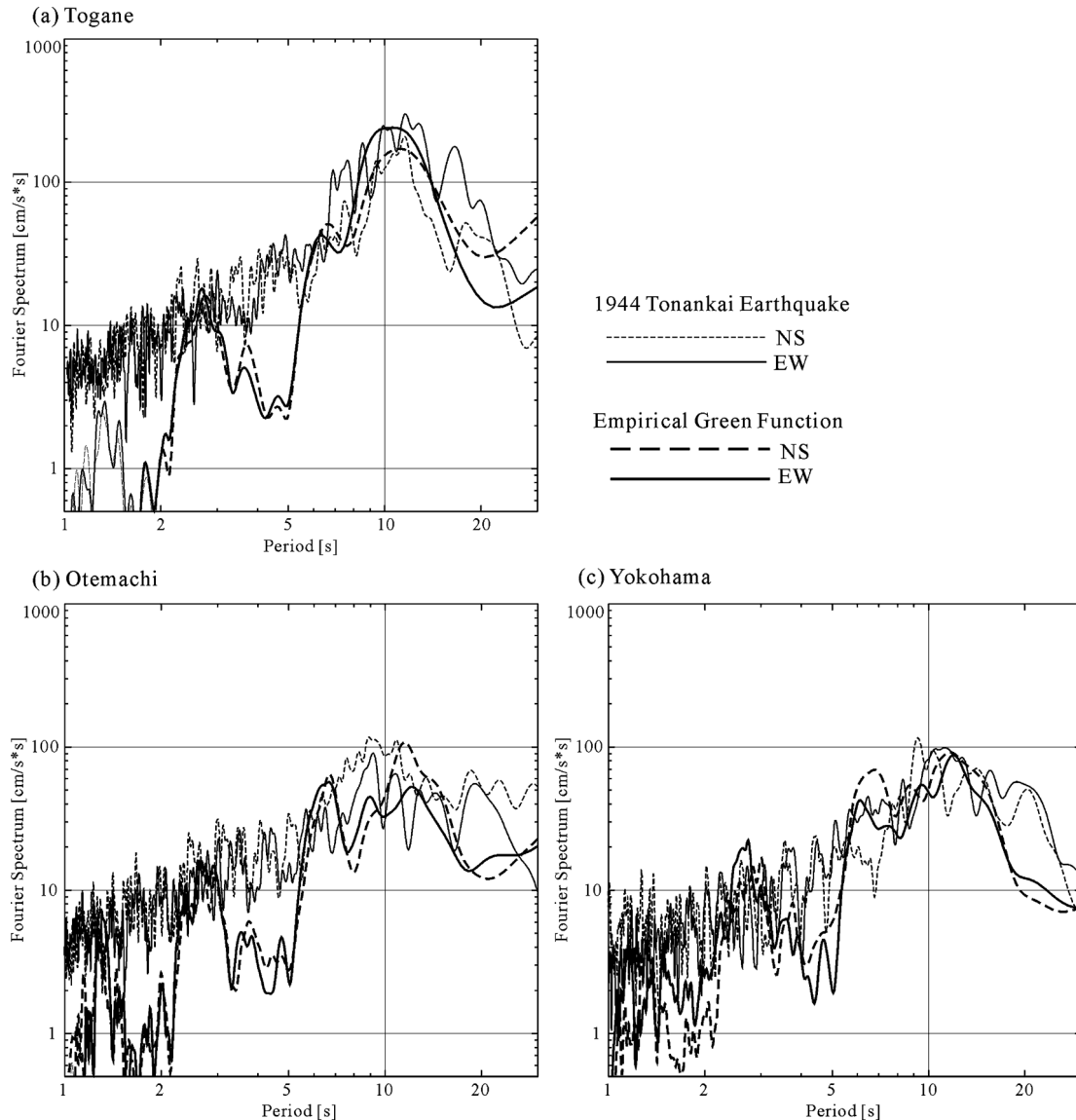


Fig. 10 Comparison of Fourier spectra for the reconstructed waveform of the 1944 Tonankai earthquake and those estimated from the 2004 SE Off Kii Peninsula earthquake by using an empirical green function technique (thin lines) for (a) Togane, (b) Otemachi, and (c) Yokohama.

ができる。

横浜地点の復元波形についてはNS成分の卓越周期に合成波形とのずれが少し見られるものの、周期6～15秒の長周期帯でほぼ良い一致が確認できた。

大手町地点では、復元波形の卓越周期がやや短周期側に現れるなど、合成波形とのスペクトル特性の若干の違いが見られるが、長周期地震動の卓越周期帯（周期8～10秒）では両者はほぼ一致している。この周期帯の前後でのスペクトル特性の一致をさらに高めるために、計器特性の仮定に微調整をはかったが、スペクトル振幅と卓越周期の両方ともに一致をこれ以上に大きく改善させることは難しかった。おそらく、紀伊半島南東沖の地震と東南海地震の震源特性（震源の位置、メカニズム、応力降下量）の違いや、2つの観測波形の品質（データ記録長さ、振り切れなど）の影響が、合成波形と復元波形

の特性の違いに現れているのかもしれない。

4. 1944東南海地震による関東の長周期地震動の特性

最終的に得られた1944年東南海地震における関東平野の3地点（東金、大手町、横浜）の強震動をFig. 11に示す。

4.1 関東平野の長周期地震動

東南海地震において、関東平野ではS波の到着直後から最大10 cmを越える強い揺れが発生し、その後5 cmを越える大きな地動が10分以上にわたって長く続いたことがわかる。長周期地震動の卓越周期は東金では約12秒、そして大手町と横浜では約9秒であり、単色の地震動がS波到着以降、一貫して継続している。大

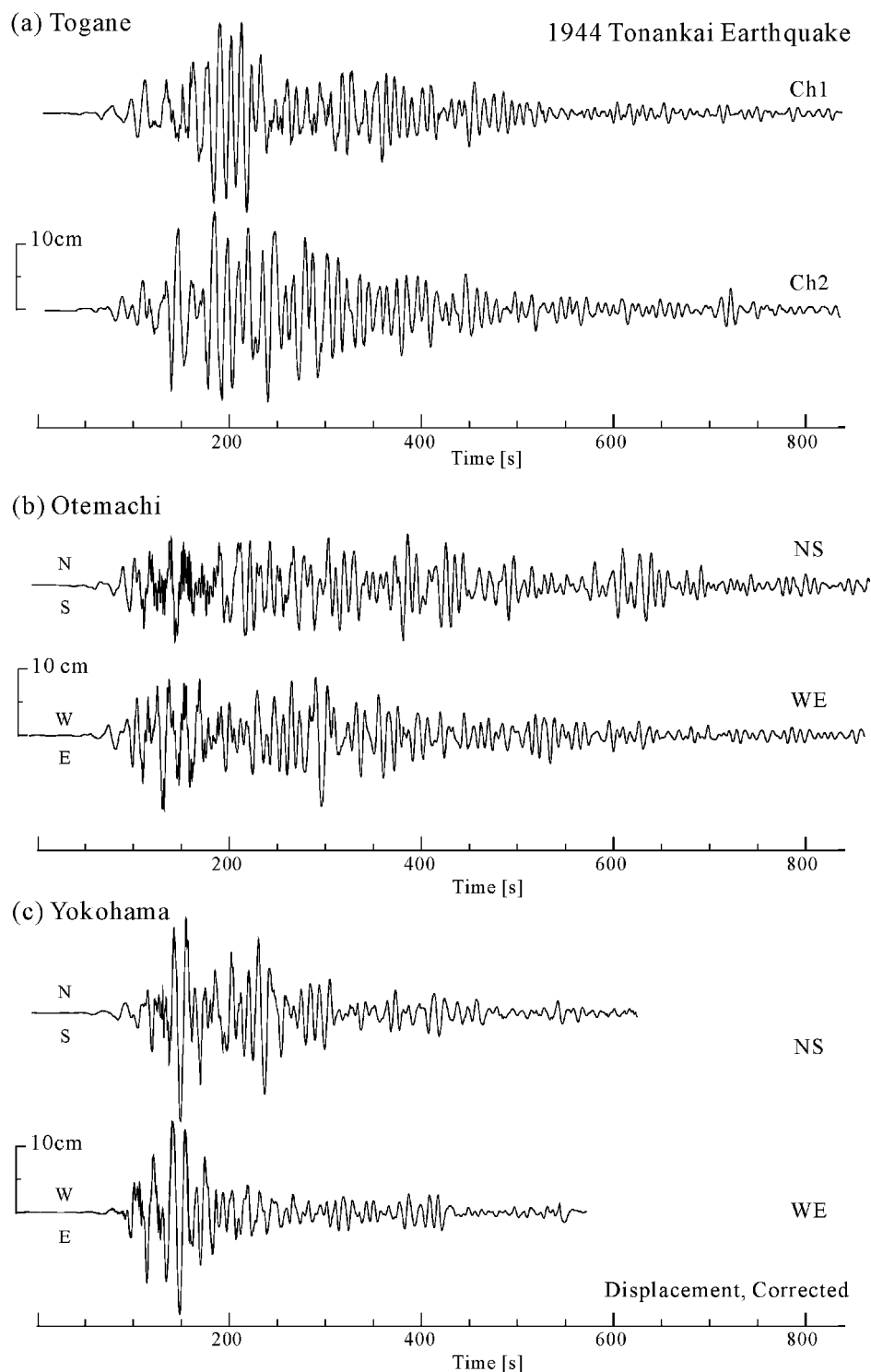


Fig. 11 Reconstructed ground motions of two horizontal components at (a) Togane, (b) Otemachi, and (c) Yokohama during the 1944 Tonankai earthquake.

手町地点のS波の最大振幅は東金や横浜よりも小さくなっているが、これは地震計が振り切れたために、大振幅のS波が正しく復元されていないためである。

大手町地点の復元波形から本郷地点の今村式2倍強震計の動きを推察すると、地震計の感度(2倍)に加えて、固有周期の一致した振子が共震により地動をさらに

大きく増幅(2倍程度)したことにより、最終的に記録ペンは優に20~40cmを越える幅で動いたと推察され、これによりFig. 3aに示されるようにペンが大きく外れてしまったものと思われる。

東金と横浜地点の地動は時間とともに単調に減衰していくのに対し、大手町地点では大振幅の波群が継続し、

揺れが10分間以上にわたって弱まらず長く続いているのが特長的である。大手町の強震記録はS波の主要動が振り切れているため、大震幅のS波部分が正しく復元できていない可能性があり、後続相が相対的に大きな振幅を持つように見えているのかもしれない。いっぽう、1998年伊豆半島東方沖の地震 (Koketsu and Kikuchi, 2000) の高密度強震観測データの解析によると、都心部には平野の深部基盤構造の影響により表面波が複数の経路を通して焦点を結ぶように集まることが報告されており、このような表面波のマルチパス効果が大手町地点での大きく長い地動を作っている可能性もある。

3地点ともにS波到着の約30秒後から1分間程度にわたって、短周期 ($T \sim 1.5$ 秒) 地震動が見られる。この一部には強震計が振り切れたことによる、見かけの短周期地震動も含まれているが、紀伊半島南東沖の地震

(Fig. 7) でも同様に見られることから、伝播経路で生成した波であると考えるのが適当である。この短周期地震動の伝播速度 (群速度) を求めるとおよそ $V = 3.5 \sim 2.8$ km/s になることから、地殻内を全反射しながら伝わるS波群 (Lg波) と考えるのが適当である。すなわち、浅いプレート地震から放射されたS波が地表面とモホ面、あるいはフィリピン海プレート上面との間で何度も全反射を繰り返しながら関東平野まで良く伝わってきたものと考えられる (たとえば Kennett and Furumura, 2002)。

4.2 速度応答スペクトル

1944年東南海地震 ($M_w 8.1$) による関東平野の3地点での速度応答スペクトル ($h=0.05$, 水平動2成分の相乗平均) を Fig. 12 に示す。東金と横浜地点ではそれ

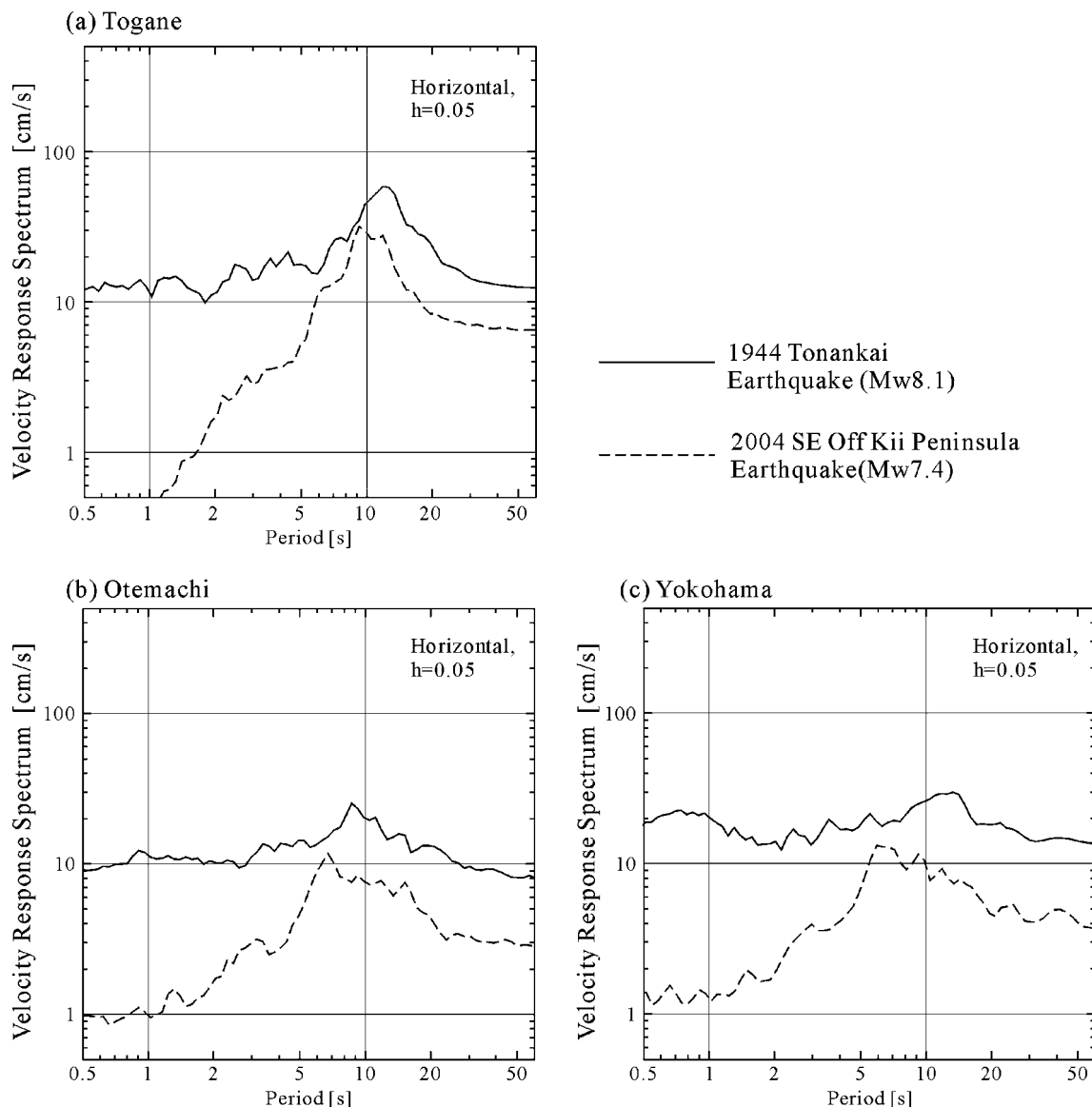


Fig. 12 Velocity response spectra of horizontal ground motions at (a) Togane, (b) Otemachi and (c) Yokohama during the 1944 Tonankai earthquake (solid lines) and the 2004 SE Off Kii Peninsula earthquake (broken lines).

ぞれ周期12秒前後に60 cm/sと30 cm/sの強い応答が、また大手町では周期9秒前後に25 cm/sの応答が起きることが確認できる (Fig. 12)。これらの応答レベルは、2004年紀伊半島南東沖の地震 (Mw7.4) の約2~2.5倍の大きさになる。

地震動特性は、堆積層構造により規定される地震動の応答特性と震源スペクトル特性の2つの影響を受けたものである。東南海地震は、紀伊半島南東沖の地震 (Mw7.4) に比べて断層面積がずっと大きく、震源スペクトルのコーナー周期が長周期側に現れる。この結果、震源 (速度) スペクトルの卓越周期がずっと長周期化することにより、速度応答スペクトルの最大応答が長周期側に移動したと考えられる。卓越周期の長周期化が、東金と横浜において大手町よりも顕著に認められたのは、これら2地点の基盤深度が大手町よりやや深く (たとえば、田中・ほか, 2006)、長周期帯に強い地震動応答が生まれやすいのかもしれない。

5. まとめ

1944年東南海地震において東金、大手町、および横浜地点で観測された、今村式2倍強震計と中央気象台式1倍強震計の煤書き記録を読み取り、各強震計の計器特性を適切に補正することにより、関東平野の3地点における強震動の復元を行なった。これにより、東南海地震における関東平野の代表的な3地点の長周期地震動の特性を詳しく評価することができた。

これら機械式地震計の利用は、波形のデジタイズ技術や円弧補正などの処理と計器特性の正確な把握にかかっている。多くの古い強震計は計器特性が正確にわかっていないことが多く、複数の情報をもとに計器特性を適切に推定することが重要である。本研究では、2004年紀伊半島南東沖の地震の観測データにより、はじめて東南海地震の強震動の復元が可能になった。

1995年兵庫県南部地震以降、高密度の強震観測網 (K-NET, KiK-net) と自治体震度計ネットワークが整備され、日本各地における高精度の強震データが蓄積しつつある。しかし、海溝型巨大地震の再来間隔 (50~200年) を考えると、近年の高密度強震観測の歴史はわずか10年にすぎず、機械式地震計による過去80年以上にわたる強震記録はこれを補う貴重な財産である。

本研究により求められた東南海地震の復元記録は、大型構造物の耐震設計のための基礎データとして活用が期待される。同時に、東南海地震の計算機シミュレーション結果の検証にも用いられ (古村・ほか, 2006)、その結果をもとに地下構造モデルの物性値の調整と高精度化が今後進められる。これにより、東南海地震の強震記録の得られていない関東の他地点と、他の平野における強震動波形を計算から求めたり、さらに別のシナリオ地震の強震動をシミュレーションすることが可能になる。

謝 辞

本研究には、防災科学技術研究所のK-NET, KiK-net 強震観測データを使用しました。また、東京大学地震研究所首都圏強震動総合ネットワークSK-netの観測データを使用しました。紀伊半島南東沖地震の大手町および横浜での震度計波形データは気象庁強震波形CD-ROM (財気象業務支援センター) より入手しました。強震計 (Fig. 2) の写真は気象庁地震火山部地震予知情報課が管理する「濱松コレクション」より提供を受けました。機械式強震計の波形復元にあたり、早稲田大学理工学部山田眞教授には有益な助言をいただきました。東京工業大学総合理工学部翠川三郎教授には大手町の強震記録の復元に関して議論していただきました。また、東京大学地震研究所三宅弘恵博士には経験的グリーン関数法の適用に関してご指導いただきました。2名の匿名査読者には丁寧な原稿を読んでいただき、論文を改善するための重大なご指摘を多数いただきました。ここに記して皆様に感謝申し上げます。本研究は大都市圏大災害軽減化特別プロジェクトI「地震動 (強い揺れ) の予測」の一環として行われました。

参 考 文 献

- 秋場俊一・正月俊之・三浦弘之・翠川三郎 (2005): 1944年東南海地震における東京での変位記録 その2 スペクトル特性と時刻歴特性, 日本地震工学会梗概集, 442-443.
- ・翠川三郎・三浦弘之 (2006): 東京における1944年東南海地震記録の補正と修復, 第30回地震工学・応用地球に関するシンポジウム, 慶應義塾大学・東京工業大学・早稲田大学, 3-4.
- 中央気象台地震課 (1946): 新型気象台式強震計の紹介, 測候時報, 13, 161-163.
- 古村孝志・早川俊彦・頼瀬一起・馬場俊孝・中村 操 (2006): 1944年東南海地震と関東平野の長周期地震動, 月刊地球, 号外 No 55, 130-137.
- 畑山 健・座間信作 (2005): 2004年9月5日記伊半島南東沖の地震による石油タンクのスロッシングと長周期地震動, 消防研究所報告, 99号, 52-67.
- Irikura, K. (1986): Prediction of strong acceleration motions using empirical Green's function, Proc. 7th JEES Symposium, 151-156.
- 岩田孝行・野口和子 (2003): 東京大学における機械式地震計の地震気象, 東京大学地震研究所技術研究報告, No 9, 31-55.
- 気象庁地震火山部地震津波監視課 (1990): 気象庁 (東京) で観測された強震記録 (1927年~1989年).
- Kennett, B. L. N. and T. Furumura (2002): The influence of 3-D structure on the propagation of seismic waves away from earthquakes, Pure Appl. Geophys., 159, 2134-2145, 2002.
- Koketsu, K. and M. Kikuchi (2000): Propagation of seismic ground motion in the Kanto basin, Japan, Science, 288, 19, 1237-1239.
- 工藤一嘉 (2005): 長周期地震動について, 配管技術, 47, 11, 4-11.
- 野口和子・岩田孝行 (2001): 歴史地震気象のフィルム化—第3報, 東京大学地震研究所技術研究報告, No 7, 72-95.
- ・山中佳子・田辺由美子・岩田孝行 (2001): 歴史地震気象データを Web 上で検索する, 東京大学地震研究所

- 技術研究報告, No 7, 64-71.
- 佐々木康・田村敬一・相沢 興 (1988) : 気象庁 1 倍強震計記録に基づく長周期地震動特性の解析 (その 5) —1978年宮城県沖地震記録の解析—, 土木研究所資料, 第2664号.
- 正月俊之・秋場俊一・三浦弘之・翠川三郎 (2005) : 1944年東南海地震における東京での変位記録 その 1 波形の読み取りとその補正, 日本地震工学会梗概集, 440-441.
- 田中貞二・横田治彦・岩田孝行 (1988) : 今村式 2 倍強震計の構造図, 地震 2, 41, 283-285.
- 田中康久・三宅弘恵・瀬織一起・古村孝志・早川俊彦・馬場俊孝・鈴木晴彦・増田 徹 (2006) : 首都圏下の速度構造の大大特統合モデル (2), 日本地球惑星科学連合大会講演予稿集, S116-P014.
- 宇佐美龍夫 (1996) : 新編日本被害地震総覧 [増補改訂版], 東京大学出版会, 294-295.
- 宇津徳治 (1977) : 地震学, 第 2 版, 第 2 章, 共立出版.
- 山中佳子 (2004a) : 1944年東南海地震と1945年三河地震の震源過程, 月刊地球, 305, 739-745, 2004a.
- (2004b) : 9 月 5 日の紀伊半島南東沖地震 (本震 : Mj7.4) の再解析, EIC 地震学ノート, No. 153.
- 座間信作 (1993) : やや長周期の地震動, 地震 2, 46, 329-342.
- (2005) : 東京における1944年東南海地震および1946年南海地震の記録, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 2, 91-92.

Recovering of strong motion record of the 1944 Tonankai earthquake and long period ground motion in Kanto region

Takashi Furumura* and Misao Nakamura**

ABSTRACT

Strong ground motions observed in the Kanto basin during the Tonankai Mw8.1 earthquake in 1944 have been estimated from historical seismographs at Togane, Otemachi (Tokyo) and Yokohama. The reproduced seismograms demonstrate large (>10 cm) and long-time (>600 s) shaking of long-period ground motions at a dominant period of about 7 to 12 s in the center of Tokyo during the Tonankai earthquake. Such long-period signals are strongly radiating from large earthquake and then amplified significantly in thick sediments of the Kanto basin overlying rigid bedrock. The velocity response spectrum of strong ground motions shows large and sharp peaks at a dominant period of about 12 s and amplitude of about 60 cm/s at Togane and about 30 cm/s at Yokohama. A large velocity response is found at Otemachi in the period of 8 s with amplitude of about 25 cm/s. These amplitude levels are roughly 2-2.5 times larger than those observed in Tokyo during the SE Off Kii Peninsula (Mw7.4) earthquake in 2004.

Key words: 1944 Tonankai Earthquake, Long period ground motion, 2004 SE Off Kii Peninsula earthquake, Kanto basin

Manuscript received June 5, 2006; Accepted September 15, 2006

* Earthquake Research Institute, University of Tokyo
1-1-1 Yayoi Bunkyo-ku, Tokyo 113-0032 Japan

** Information Service for Disaster Prevention
203-7 Miroku, Sakura, Chiba 285-0038, Japan

A part of the present paper was presented at the 2nd Symposium on the Earthquake Disaster Mitigation of January 20, 2006.