資 料

岐阜測候所で観測された 1923 年関東地震の 本震・余震の記録

鹿島小堀研究室* 武 村 雅 之

鹿島技術研究所** 池 浦 友 則

東大地震研究所*** 工 藤 一 嘉

岐阜地方気象台**** 大 沼 啓 人

Strong Motion Records from the 1923 Kanto Earthquake Observed at the Gifu Observatory

Masayuki TAKEMURA

Kobori Research Complex, Kajima Corporation, 6-5-30, Akasaka, Minato-ku, Tokyo 107, Japan

Tomonori IKEURA

Kajima Technical Research Institute, Kajima Corporation, 2-19-1, Tobitakyu, Chofu-shi, Tokyo 182, Japan

Kazuyoshi KUDO

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

Hirohito OHNUMA

Gifu Local Meteorological Observatory, 6, Ninomaru, Kanou, Gifu-shi 500, Japan

(Received February 2, 1994; Accepted May 23, 1994)

§ 1. ま え が き

1891 年濃尾地震と 1923 年関東地震とは、日本の近代地震学の大きな節目となった地震である。特に地震観測においては、1891 年の濃尾地震後、それまで観測の中心であった体感観測や黎明期の地震計による旧式の観測から本格的な計器観測の時代に入り、今日でも通用するような計測ができる大森式や今村式等のすぐれた地震計が開発された [浜松 (1966)]。このため、関東地震の際には全国各地で多くの観測記録が得られている。しかしながら、計器特性がそろった地震計による全国的な地震

観測網の整備は関東地震後のウィーヘルト型地震計の展開を待つことになり、関東地震の際には、現在の気象庁による様な統一的な観測が行われていたわけではない。

関東地震の際の記録の一部は現在気象庁でマイクロフィルム化されて [例えば、気象庁 (1957)] 保管されている。当時の記録はドラムにすず書きで記録されているものが多く、ダイナミックレンジが狭いため大地震に対しては多くが振り切れている。また記録が不鮮明なもの、ドラムの送り速度や記録の始まり終わり等基本的なことが分からない記録も多い。このような中であって今村式二倍強震計は、大学や測候所に設置され、比較的良好な記録を得ている。この中でよく知られているものとして東大本郷の記録がある。この記録は水平動 2 成分上下動 1 成分よりなり、NS 成分と上下動成分は P 波初動から約 10 秒後に針がドラムからはずれ記録が欠落している

* 〒107 東京都港区赤坂 6-5-30

** 〒182 東京都調布市飛田給 2-19-1

*** 〒113 東京都文京区弥生 1-1-1

**** 〒500 岐阜市加納二の丸 6

Fig. 1. An example of seismograms, which includes the record for the main shock. Numerals indicate records of large aftershocks.

が、EW 成分は途中長時間の飽和した状態が続いているものの連続した記録が得られている [今村 (1925)]. 横田・他 (1989) はこの飽和した記録を再現し主要動部が5分にも及ぶ記録を得ている。一方本震の際に振り切れていない記録としては仙台の東北大向山観測所の記録 [SHIRATORI (1925)], 徳島測候所の記録 [気象庁 (1957)] 等がある。前者は工藤 (1981), 後者は片岡・他 (1993) が検討しているがいずれも計器特性等に不明な点がある。一方今村式強震計以外の記録としては本郷でのユーイングの強震計による記録がある。この記録は円盤に記録されたもので当時すでに正規の観測から除外され参考品とされていた旧式のものである。水平動1成分についてはほぼ完全に本震による地震動を記録しており、森岡 (1976) はこの記録から地動を推定しているが、先に述べた横田・他 (1989) による復元記録はこの結果と整合しない部分が多い。近年、TAKEO and KANAMORI (1992) はユーイング強震計の記録の解釈をしその結果を基に関東地震の震源特性を検討しているが今村式二倍強震計記録との不整合についての疑問は未だ解決されていない。

本稿で紹介する岐阜測候所の今村式二倍強震計の記録は、4枚の記象紙よりなり (武村 (1994) に従い時間順に A, B, C, D と呼ぶ)、本震の記録を含む A の記象紙は気象庁のマイクロフィルム [気象庁 (年代不明)] にあるが、他の3枚は今回岐阜地方気象台で見つけたものである。いずれも水平動2成分と上下動1成分よりなり、上下動には一部刻時マークが入っている。これらの記録について計器特性を調べ、比較的振幅の大きいものは数値化したので報告する。

§ 2. 記録の概要

岐阜地方気象台 (1981) によれば、同気象台の前身である岐阜測候所は明治14年 (1881年) に創立され、大正6年 (1917年) 現在地に移転している。その間、明治43年 (1910年) に大森式簡単微動計、大正4年 (1915年) に今村式二倍強震計による観測を開始している。両地震計はそれぞれ昭和28年 (1953) 年および昭和27年 (1952年) まで使用されていた。

今村式二倍強震計による4枚の記象紙は武村 (1994) によると、1923年9月1日午前6時45分ころより9月3日午前9時36分頃まで、途中約2分程度の記録紙交換時間をはさんで連続している。この間本震余震合わせて35の地震に対する記録が書かれている。Fig. 1に記象紙Aの本震の波形 (白黒反転したもの) を示す。本震に対しNS成分は振り切れているが、EW成分と上下動成分はほぼ完全な記録が得られている。図には主な余震の波形が拡大して示されている。①はUD成分、他はNS成分である。一見して分かるように上下動成分は水平動成分に比べより短周期の波を記録している。これは後で示すように計器特性の差によると思われる。水平動においてはやや長周期成分が卓越し本震直後の余震の波形が本震の後続波によってマスクされているが、上下動成分では明瞭に本震と区別できる (例えば①参照)。武村 (1994) は上下動振幅をもとにこれら本震直後の余震の規模を $M=7.2, 7.3, 5.1$ と評価しており、今までほとんど分かっていない本震直後の余震活動を知る上で重要な手がかりとなる。

上下動には、所々に分を刻む刻時マークが入っている。これによれば記録の送りは約37 mm/minである。武村 (1994) は時計の精度について詳しく検討し13時

Fig. 2. Records of the free oscillation test for the horizontal components.

間で約2分程度の誤差があるとしているが、1つ1つの波形を議論する上でこの程度の誤差はそれほど問題にならない。

§ 3. 計器特性

今村式二倍強震計には減衰器付きのものそうでないものがあり、計器の定数については、今村(1925)が減衰器付きの本郷の計器について水平動は周期10秒、上下動は周期5秒と記し、SHIRATORI(1925)は減衰器のない仙台南山観測所のものについて水平動の周期を5秒と記している。横田・他(1989)は近年、本郷にあった地震計を調整し水平動について周期9.3秒、減衰定数21%という値を得ている。また、浜松(1966)は大阪測候所年報(地震之部)を引用し、減衰器付きのものについて水平動の固有周期8秒、制振度2(減衰定数22%)、上下動の固有周期3秒、制振度4(減衰定数40%)、また、大正2年の厳原測候所の値として減衰器のない水平動の固有周期を7秒と記している。これらの値が物語るように今村式二倍強震計は必ずしも統一的な定数で稼働していたわけではない。また減衰定数に関する情報は少

Table 1. Natural period T_0 , damping ratio ν , and damping factor h for the old Imamura-type strong motion seismograph and recent strong motion seismograph (52-type) by the Japan Meteorological Agency.

	Imamura-type			52-type		
	To(sec)	ν	$h(\%)$	To(sec)	ν	$h(\%)$
NS EW	4.5	1.7	17	6	8	55
UD	1.0	1.2	5	5	8	55

Fig. 3. Results of the free oscillation test for the vertical components. Solid circles show the data used for evaluating a natural period and damping factor of the pendulum.

Table 2. List of the digitized records of the main shock and aftershocks.

No.	DATE	P-TIME*	M*
1	Sep.1,1923	11:59:02.0	7.9
2	Sep.1,1923	13:31:46.1	6.1
3	Sep.1,1923	14:23:11.0	6.6
4	Sep.1,1923	15:20:05.8	6.2
5	Sep.1,1923	16:38:48.5	6.8
6	Sep.2,1923	11:46:48.7	7.5
7	Sep.2,1923	18:27:29.2	7.0
8	Sep.2,1923	22:09:44.7	6.7
9	Sep.2,1923	23:17:18.6	6.2

* Takemura (1994)

Fig. 4. Digitized records of EW-component for the main shock. The upper and the lower traces are the records before and after an instrument correction, respectively. A bar indicates a part of the record used for calculating the Fourier amplitude spectrum in Fig. 6.

ない。岐阜測候所の計器は減衰器なしのものである〔浜松 (1980)〕が、Fig. 1 の水平動記録の様子からも分かるように相当減衰効果が働いていたと考えられる。

幸い、今回見つかった記録紙 C, D の水平動の記録の始まりに Fig. 2 に示すような自由振動波形が記録されており、これに基づいて固有周期ならびに減衰定数を評価することができる。C, D の結果を総合すると水平動 2 成分で特性の差は小さい。Table 1 に結果を示す。一方、上下動についてはそのような情報がないので岐阜県立博物館に残る当時の地震計〔浜松 (1980)〕を調べた。その結果減衰器が付いていない点を除くと地震計の外見は横田・他 (1989) が調査した本郷のもの（現在国立科学博物館蔵）とほとんど同じものであることが分かった。博物館での保存状態が大変良かったため、上下動の特性については振り子を自由振動させその様子から定数を決定した。Fig. 3 は自由振動した際の山、谷の位置をグラフにしたものである。振幅によって特性が変動している可能性も考えられなくないため、比較的振幅が大きい黒丸

のデータのみから固有周期と減衰定数を定め、白丸のデータと比較したが、特性に差はあまり認められず、固有周期は 1 秒、減衰定数は 5% と評価される。Table 1 に水平動の結果とともに求められた上下動成分の計器特性を示す。表には比較のために現在気象庁で用いられている一倍強震計 (52 型) の定数も示す。水平動は比較的減衰定数が大きく一倍強震計とそれほど大きな差がない。これに対して上下動は比較的固有周期が短く、減衰定数が小さい特徴がある。Fig. 1 の波形の様子はこれらの結果と調和的である。また振り子とペン先の動きを調べた結果倍率は水平、上下ともほぼ 2 倍であること、円弧を書く水平動のペンのアーム長は 398 mm であることも確認した。

§ 4. 記録の数値化と補正処理

記録の数値化は本震記録の EW 成分および $M=6$ 程度以上で波形が明瞭に記録されている余震記録の水平動成分について行なった。数値化の対象とした記録を

Fig. 5. Digitized records of NS- and EW-components for the largest aftershock. Both the records before and after instrument corrections are shown. A bar indicates a part of the record used for calculating the Fourier amplitude spectrum in Fig. 6.

Table 2 に示す. No. 1 が本震, No. 6 が最大余震に対応する. 数値化に際しては江藤電気(株)製の XY デジタイザー (SM-3) を用い, 記録のトレースに従って時刻を追いつながら時間軸方向 0.1 mm, 振幅方向 10^{-3} mm の分解能でデータを読み取った. 読み取りによる時刻歴の分解能は本震記録が約 0.12 s, 余震記録が約 0.16 s である.

本震記録の後半部には, ドラムの回転駆動系の不調によると思われる記録速度のむらが数箇所に認められる. これらは局部的なものではあるが, この範囲には本震直後の 3 つの余震が記録されていることもあり, フェーズの復元は簡単ではない. このため今回はそれらの修復は行わず記録紙のとおり読み取った.

読み取りデータの補正処理としては, まず円弧補正を行なった上で線形補間により間隔 0.1 s の等時間間隔データを作成し, これに基準線補正と地震計の計器特性の補正を加え, 周期 2~20 s の帯域通過処理を施した.

なお, 本震記録の UD 成分の例 (Fig. 1 参照) のように今回数値化した余震記録の水平動のいくつかは記録中

に基準線のシフトが見られる. このような現象は気象庁で現在用いている一倍強震計でも生じることがある. この理由には, 振り子の支点や記録ペン先等における摩擦の影響や地震計自体の傾斜などによって記録中の振り子が記録開始時の中立位置まで戻らなくなることが考えられる. しかしながら, 本震当時の地震計の状態が明かでないので現状ではこれを厳密に検討することは難しい. 今回の処理では基準線のシフトが著しいものに対しては便宜的に次式で基準線 $f_0(t)$ を仮定し基準線の歪みを補正した.

$$f_0(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 / \{1 + (t/t_p)^n\}$$

ここに, t_p は基準線がシフトしはじめる時刻, n はその折れ曲がりの角度を調節するパラメータであり $a_0 \sim a_3$ は未定定数である. 処理に際しては, n を仮定して補正前の記録に $f_0(t)$ を当てはめ, 最小二乗法で各係数を求めた.

以上の処理の例として, 本震による EW 成分の計器特性補正前後の波形を Fig. 4 に示す. なお, Fig. 4 の補正前の記録の 300 秒より後に不自然な波形の動きが認め

Fig. 6. Fourier amplitude spectra of the records in EW-component for the main shock and for the largest aftershock. These spectra are calculated from the records after the instrument correction.

られるがこれは先に指摘した記録速度のむらによる波形の歪の影響である。Fig. 4より計器補正後の最大変位は約 15 cm, ピーク付近の周期は約 10 s であることが分かる。次に余震記録の処理の例として, 最大余震 (1923. 9/2 11:46, M 7.5) による NS 成分, EW 成分の計器特性補正前後の波形を Fig. 5 に示す。通常気象庁の十倍強震計の記録のデータ処理の例 (例えば, 山田・他 (1987)) から分かるように固有周期 5 秒程度の機械式変位計では長周期側は 20 秒程度まで信頼して用いることが多い。このためここでもそれらに習い, 先に述べたようにデータ処理に関しては原則として 2 から 20 秒のフィルターを用いた。しかしながら, 最大余震による NS 成分では原記録ですでにみかけの周期が 20 秒程度のフェーズが現われており, この点を考慮してフィルターの通過帯域を NS, EW 両成分とも例外的に 2~30 s とした。計器補正後の最大変位は NS 成分が 14.5 cm, EW 成分が約 1.7 cm になる。

計器特性補正によって NS 成分の振幅が EW 成分に比べ非常に大きくなる点が注目される。先に述べたように最大余震の NS 成分の卓越周期は地震計の固有周期に比べかなり長く, このような長周期領域まで地震計が理

論と一致した挙動をしていたかどうかについてはいささか疑問が残る。Fig. 4 の NS 成分の結果を見る際にはこのような点にも注意が必要である。

なお, 参考として今回数値化した記録の計器特性補正前の波形を全て Appendix 示す。

§ 5. 本震および最大余震の波形とスペクトル

本震と最大余震の地震動特性を比較する。両者の EW 成分の波形はすでに Figs. 4, 5 に示されている。本震記録では先に指摘したように直後に余震がいくつか捉えられており, 最も本震に近い余震の S 波初動は本震の S 波初動から 165.5 秒後である [武村 (1994)]。このため, フーリエ振幅スペクトルの計算に際してはこれらの余震の影響をできるだけ避けるため両地震とも横棒で示すように S 波初動の 35 秒前から 170 秒間のデータを用いた。結果を Fig. 6 に示す。いずれも計器補正後の記録に対する結果である。

波形の最大振幅とスペクトルレベルのいずれについても両者の間にはほぼ 1 オーダの差が見られる。ただし, 本震の波形は S 波の到達時刻から約 30 s 後を中心に大きな振幅を有する比較的単純な形であるが, 最大余震ではパルス状のフェーズがいくつか並ぶやや複雑な様相を呈している。このため, 全体的な継続時間の点では最大余震の方が本震よりもむしろやや長い印象を受ける。

本震波形の包絡形状が単純なものであったことはその破壊過程の一部に短時間の大きなエネルギー解放があったことを示唆している。TAKEO and KANAMORI (1992) は, 神奈川県直下のごく浅い位置で局部的に大きな破壊を想定すれば, 本郷における本震記録のスペクトルレベルが説明できると指摘している。岐阜の本震記録に見られる特徴はそれに対応したものなのかも知れない。また, 最大余震については長周期成分の励起がやや大きめであったことが指摘されている [宇津, 1979]。従ってその破壊過程は比較的ゆっくりとしたものであり, 先に指摘した継続時間の長さとの関連が注目される。

§ 6. ま と め

1923 年関東地震の岐阜測候所の記録について調査した。その結果, 本震の NS 成分を除き本震発生後約 2 日間の余震についてはほぼ完全な 3 成分の波形が記録されており, しかも記録紙上に残る自由振動波形や当時の地震計の調査によって計器特性も明らかになった。Table 1 に計器特性を, Appendix に数値化した記録の全てを示す。関東地震に関しては現存するデータについても不明な点が多い。このため, 今後本記録が本震の震源過程や余震活動等の解明に非常に役立つものと考えられる。

謝 辞

本記録の調査にあたり、岐阜地方気象台の藤沢台長および防災業務課の奥村氏、気象庁地震津波監視課の内池課長、地震予知情報資料課の川原田氏、岐阜県立博物館の国光、遠藤の両氏、元気象庁の浜松音蔵氏に大変お世話になりました。また、記録の数値化に際しては(株)明豊エンジニアリングの斉藤 勤氏にお世話になりました。記して感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 岐阜地方気象台, 1981, 創立 100 年誌—4. 地震・火山業務, 45-47.
- 浜松音蔵, 1966, 気象官署における地震計観測の履歴表, 地震 2, **19**, 286-305.
- 浜松音蔵, 1980, 地震観測史, 日本の地震学百年の歩み, 地震 2 特別号, **34**, 73-92.
- 今村明恒, 1925, 関東地震調査報告, 震災予防調査会報告, **100 甲**, 21-66.
- 片岡俊一・横田治彦・佐藤俊明, 1993, 徳島測候所における 1923 年関東地震の本震・余震記録の数値化, 地球惑星科学関連学会 1993 年合同大会予稿集, 255.
- 気象庁, 1957, 日本における大地震の記録, 験震時報, **22**, 1-139.
- 気象庁, 年代不明, 永久保存の地震記録用紙 1923 年 9 月 1 日関東大地震 (C-63) (マイクロフィルム).
- 工藤一嘉, 1981, 1923 年関東地震による東京・本郷の地動について—仙台・向山観象所 (東北大学) の記録から, 地震学会講演予稿集, **2**, 232.
- 森岡敬樹, 1976, 1923 年関東地震の地動, 第 4 回地震震動シンポジウム, 39-50.
- SHIRATORI, K., 1925, Notes on the destructive earthquake in Sagami bay on the first of September, 1923, Jpn. J. Astr. Geophys., **2**, 173-192.
- 武村雅之, 1994, 1923 年関東地震の本震直後の余震活動—岐阜測候所の今村式二倍強震計記録の解析, 地震 2, **46**, 439-455.
- TAKEO, M. and H. KANAMORI, 1992, Simulation of long-period ground motions for the 1923 Kanto earthquake ($M=8$), Bull. Earthq. Res. Inst., **67**, 389-436, 1992.
- 山田善一・野田 茂・広瀬鉄夫, 1987, 日本海中部地震時のやや長周期の速度応答スペクトルの統計解析モデル, 構造工学論文集, **33A**, 645-658.
- 横田治彦・片岡俊一・田中貞二・吉沢静代, 1989, 1923 年関東地震のやや長周期地震動—今村式 2 倍強震計記録による推定, 日本建築学会論文報告集, **401**, 35-45.
- 宇津徳治, 1979, 1885 年~1925 年の日本の地震活動— $M 6$ 以上の地震および被害地震の再調査, 地震研報, **54**, 253-308.

Appendix, 数値化した本震および余震の記録

今回数値化した本震および余震の記録を全て示す。リストは Table 2 に示す通りである。本震の NS 成分は振り切れているため含まれていない。いずれも計器特性補正前のものである。波形は S 波の到達時刻を基準に並べられている。S 波到達時刻は武村 (1994) による。

(before instrument correction)