

地震及び地殻変動のデジタル観測システム に関する 2~3 の考察

古 沢 保

SOME CONSIDERATIONS ON DIGITAL DATA ACQUISITION SYSTEMS FOR SEISMIC RECORDING AND OBSERVATION OF CRUSTAL DEFORMATION

By Tamotsu FURUZAWA

Synopsis

The digital data acquisition systems for seismic waves and crustal deformations set up at both the Amagase and Donzurubo Observatories, described in the previous paper, are compared with the various observational systems described by the others. And the features and some results of operation of our systems are described.

1. は じ め に

地震データのデータを集録する段階すなわち観測から始まって、データ処理の段階、種々の解析の段階へと続く過程を1つの data processing system として確立しようとする場合、システム全体の能率は最も低い能率を有する段階によって規定されるということを考えるならば、システムの全体として最大能率が得られるようにそれぞれの段階が総合的に発展させられなければならない。しかしながら data processing の問題が主として情報理論の分野から発展してきたため、ともすれば解析に際しての電子計算機利用による計算処理のための数値計算のテクニックのみが重要視され、観測システムおよびそれに続くデータ処理システムの発展を data processing の問題と結びつけて考えることはあまりなされていない。特に digital 化の過程の低能率がシステム全体の実際上の有効性を減じていると考えられる。さらにまた、新しい解析法を地震学の分野で十二分に活用するためには、適用されるデータの質的向上と量への変換並びに処理システムの確立によるデータ処理の高能率化が同時に果たされなければならないであろう。これらのことはデジタル化を伴う観測システムの発展を必要とするであろう。

このような観点から天ヶ瀬・屯鶴峯両観測所で得られた地震及び地殻変動システムについて前に述べられた (Furuzawa (1974); 以後 paper I と記す)¹⁾。しかしながら多少説明不足の点があり、理解され難い部分もあると思われるのでここにそれぞれのシステムの特長と結果について若干の補足をする。

2. 短周期地震計システム

最近では短周期の地震の MT 記録化が広く普及しているが、MT 上に記録されたデータを解析時に可視記録化して利用するだけでは MT 記録 (即ち電気信号化された記録) の本当の意味での有効性を生かしているとは言えない。したがって新しい解析システムの開発と結びついた観測システムを考える必要がある。解析処理の方式としては analog に対して digital の有利さは改めて言うまでもないが、そのためには digital 化を考慮に入れたシステムが必要となる。

数十サイクルの周波数成分を含む短周期地震波観測の場合、かなり高速度の AD 変換器を必要とし、大量

の磁気テープ等の記録媒体を要する事や、digital data の処理システムの不確立等のために、直接デジタル方式はあまり採用されていない。その例としては短時間の記録で十分な爆破実験用に開発されたもの²⁾、大型計算機に直結させて data 処理を ON-LINE で行なわせる大規模 ARRAY システムの LASA³⁾、NOR-SAR⁴⁾ 等がある。現在最も普通に行なわれている方式は Bogert⁵⁾ に始まる analog MT に記録して解析時に必要に応じて digital 化する方法である。

MT による routine 観測は tape 交換が必要なことと、tape の費用が高つくことが問題となる。そのため連続記録には低速・長時間記録 MT の開発が種々なされている⁶⁾⁻¹²⁾。しかしながら長時間記録された tape を再生する作業は再生速度を高速に変換したとしても非常に煩わしく簡単ではない。大規模 ARRAY システムの場合には大容量計算機と直結して、再生時に digital しながら地震を判定させ、digital 記録として編集する方式がとられている⁶⁾ が、方法としては一般的でない。これらの欠点を補うため記録時に地震を判定して地震のみを記録する方式が主として日本で開発されている。この方式は観測時の省力化の点では低速 MT の利用と同等であるが記録時に既に編集された tape が得られるので再生時の能率は数倍優る。この方式には遅延装置と地震判定の問題が生じる。遅延装置については paper I に比較検討されているが、装置の手軽さ、信頼性、また将来直接デジタル記録化する場合でもそのまま利用できる等の点から、我々のシステムで採用されている IC メモリーが優れていると思われる。このメモリーを用いたシステムは他でも採用されている^{13), 14)}。地震判定の問題は計算機直結の ARRAY システムでは相関法が用いられる^{3), 15), 16)}。最近我が国で行なわれている微小地震の集中記録システムでは多点観測とは言え、地震計の配列は完全な ARRAY 方式ではないので、相関法をそのまま適用することはできない。基本的には一点のデータでより確実な判定法を確立する必要があると思われるが、複数点のレベル判定によって誤りを少なくする方式も用いられている¹⁴⁾。しかしながらこのような大規模な観測システムは未だ一般的ではなく、臨時観測や衛星観測点での一点観測等も行なわれる必要がある。このような場合我々が paper I で用いた周波数を分けて SN 比を高めてレベル判定を行なう方法は有効であり、周波数の相異によりある程度の地震の遠近、大小を判定させ、記録時間を可変にできる等の利点も合わせ持つ。

digital 化の装置として我々が使用した DATAC-1030 は我々国で最も早く開発された高速数値化装置であり⁷⁾、その後のこの種の装置のヒナ型となったものである。それまで MT に記録しながら解析はペン・レコーダー等に再生した可視 analog 記録によるという MT 記録の機能を十分生かし切れなかったものを、digital 解析への道を開いた画期的な装置と言える。現在でも紙テープ出力の低速性を除けば性能的には十分通用するものである。専用計算機による ON-LINE 処理の場合 digital 化装置は簡易なもので良いが OFF-LINE 処理の方が未だ一般的である現在ではこのような digital 化の装置が必要である。

paper I で述べたシステムは1974年より天ヶ瀬観測所の短周期地震波観測の routine system として使用されている。初期に遅延装置のメモリー素子の製品不良がありそのための noise により記録が乱されたが、メモリー素子の種類を変更することによって解決された。1975年 夏期に制御回路の改良を行い一時観測を休止したが、その後は連続稼働している。制御回路の改良の主な点は 1) 空電及び電源異常による trigger を減らすため、noise filter を挿入し、最初の 10msec は level を超えても trigger しないようにした、2) J. J. Y. による時計校正回路の挿入、3) システムの特性を調べるための校正用ブリッジの挿入、4) system check の端子をとり出し保守を容易にすること等である。

このシステムの稼働状況を示す例として1975年11月のデータを Table 1 に示す。この期間の trigger level は 6mkine に設定されたが、冬期は脈動による trigger を防ぐため低周波の trigger level のみ 8mkine に設定される。総計154の地震及び砕石発破が記録されているが、この期間の録音モニターより地震と判定された数は244あった。しかしながら trigger level の振巾を有するもので記録できなかったものは1つもなかった。S-P time が10秒以内の local earthquakes で低周波成分による trigger は有感地震である。Table 1 で括弧内の数字は S-P time が15秒以上の地震の S 波部分によって trigger した場合、遅延装置の遅延時間を超えてしまい P 波初動が記録できなかったものを内数として示す。この期間は天候が安定していたため

Table 1. Numbers of Events Recorded in Nov. of 1975.

S-P Times sec	Numbers Triggered by High Freq. Comp.	Numbers Triggered by Low Freq. Comp.
Quarry Blast	29	
0-10	51	2
10-30	19 (7)	1
30-	7	45 (7)

The number in the bracket means numbers of events of which the P initial portion is missed due to the S trigger.

雷等による地震以外の原因での trigger は1回もなかった。transducer の特性を含むシステム全体の特性は較正用ブリッジから与える impulse response を定期的に記録することによってチェックされる。その1例として Fig. 1 に波形とフーリエ解析の結果を示す。

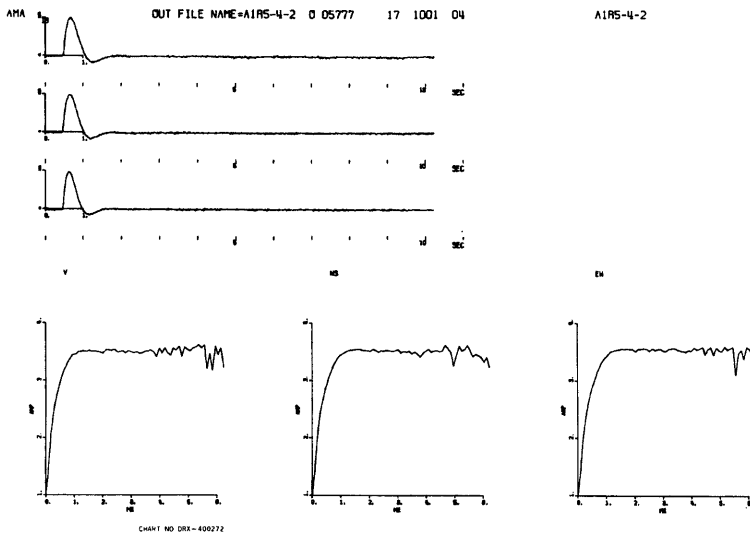


Fig. 1. Step (up) and frequency (down) responses of the Amagase short-period seismograph system.

ここに述べた観測システムによってそれまで MT による観測では1日3～4回の tape の交換を要し、人手と tape の必要量が膨大で連続観測は1カ月が限度であったが、15/16 IPS の記録速度で 1800' の tape 1巻に15～20日間の記録が可能となり、routine 化することができた。現在観測は6日に1回のモニター用煤書記録の記録紙交換と時計の較正を行なうだけで済み、3成分の煤書き記録による routine 観測以上に容易になっている。また従来1カ月の連続観測を行なうと、その記録の編集作業に1週間以上を要していたが、2～4倍の高速再生と高速 AD を併用する事により3カ月のデータを1日で digital tape の形に集録できるようになった。

3. 長周期デジタル観測システム

現在最も標準的な長周期地震計のシステムである galvanometer 利用の光学記録方式から、電気量として

信号を取り出し可視記録したりデジタル記録したりする方式へ変換する種々の方法については、paper I に述べた以外は passive RC 回路利用の直視記録方式^{(8),(19)}、analog MT 記録方式⁽¹⁰⁾ が主である。

長周期システムに於ける直接デジタル方式の利用性についても paper I に述べてある。また paper I に述べたデジタルシステム及び短周期システムで述べた LASA・NORSAR 等の大規模 ARRAY システムに於ける長周期成分の記録は全て連続 MT 記録方式である。digital MT の場合は computer による処理を経なければデータとしての意味をなさない。したがって専用の computer を保有する場合でも解析システムの確立を必要とする。専用の computer がない場合には MT と computer の matching が必要となり、コード変換等の D-D 変換を行なう装置等で記録装置が大掛りになり、一般の観測所には不向きである。このため我々のシステムでは最も実用性の高いプリンター記録にとどめた。

さらに MT の連続記録は短周期システムで述べたと同様の再生時の非能率が問題となる。我々のプリンター記録では記録紙の記録容量の制限から實際上連続記録は不可能である。したがって地震判定を行なう trigger 方式にする必要がある。長周期観測に於ける trigger の問題は短周期以上に難しく ARRAY SYSTEM に於ても未解決である。これは P 波初動の振巾が小さいことと、P 波初動と同じ周波数領域に脈動が存在するためである。長周期地震波観測ではこの脈動の振巾を如何に押さえて記録するかに努力がなされたため、P 波初動の振巾も小さくしてしまう結果になっている。もう1つは長周期地震計の不安定さのため noise, drift が生じ、単なる1成分のレベル判定では誤りが多くなることにある。このような trigger の困難さが長周期観測に有効な遅延装置が使用されていない大きな原因となっている。我々のシステムに於ても遅延装置は将来の問題として残されている。この問題を解く1つの approach として我々は短周期システムの信号を利用する方法を採用した。最近短周期地震計をコンデンサー・シャントして見かけの周期を延ばしたり^{(19),(20)}、IC-active filter により地震計感度の減少分を補償^{(21),(22)}したりして、10秒程度までの長周期成分を取り出すことが実用化されている。さらに遠地震の場合でも P 波について脈動のピークよりやや短周期側にある2〜4秒の周期を含むことが報告されている^{(23),(24)}。我々はこれらのことを利用して、短周期システムより信号を分けて、IC-active-filter によって2〜10秒の範囲の信号を増巾して P 波の判定に用いた。Table 2 に '73 July〜'74 Mar. の期間に記録された地震について Trigger の時刻と P 波初動の時刻の

Table 2. Frequency Distribution of Differences between P-onset Time and Triggered Time for events recorded during the period from July, 1973, to Mar., 1974.

$T_{\text{trigger}} - T_P$ sec	1-10	10-20	20-30	30-40	60-70	70-80	90-100	100-	Total
Numbers	54	11	3	2	2	4	1	13 (9)	89

差の頻度分布を示す。短周期成分を判定に利用することによって、記録された地震の85%以上が P 波初動の到来後100秒以内に trigger されていることがわかる。この結果100秒程度の遅延時間を有する遅延装置によりかなりの程度の成果が期待される。Table 2 の括弧内の数は長周期成分のみによる trigger を示す。長周期成分の trigger は水平2成分の AND を用いているため震源の方向によっては Love 波・Rayleigh 波が分離してうまく trigger しないことがある。これは各成分の trigger level を超えた後の trigger pulse に時定数をもたせ、ある時間範囲の中で AND をとるようにすればかなりの程度改善されると思われる。短周期側の trigger は長周期成分を含まない近地地震の際にも作動するので、地震の終りを判定することも必要となる。しかしながら遠地震の場合 body wave は殆ど見られないのに、P 波初動から30秒位後れて急に長周期の大振巾の表面波が到来することもあり、その他大地震の際の自由振動等の問題もあり、この問題の解決には今後の研究によるより多くの情報を必要とするであろう。

現在のシステムの検知率を示すものとして Fig. 2 に記録された地震の震央距離とマグニチュードの関係を示す。白丸は短周期成分による trigger、黒丸はモニター記録は得られているが、trigger しなかった地震、

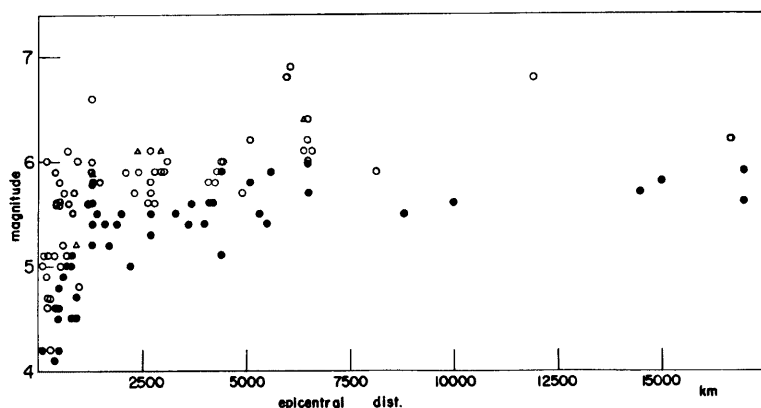


Fig. 2. Relation of magnitudes to epicentral distances for events recorded from the Amagase long-period seismograph system.

open circles: events triggered by the short-period component.

open triangles: events triggered only by the long-period component.

closed circles: events not triggered and recorded only on monitoring recorder.

三角は長周期成分のみによる trigger を示す。長周期成分により trigger された地震のマグニチュードは表面波マグニチュードによる。図より 3000km 以上の震央距離でマグニチュードが6以上の地震が記録されることがわかる。

4. 地殻変動システム

地殻の傾斜・伸縮等の変動を観測するのに従来からの光学記録方式に変わって、主として遠隔記録化を目的とする種々の方法が実用化されつつある。その方法としては従来の Super-Invar 棒伸縮計・石英管伸縮計・水平振子型傾斜計・水管傾斜計等をそのまま用いて、換子器の部分のみを電気信号として取り出せるものに変える方法と、基準尺の部分から新しくする方法の2つがある。後者の方法は主に外国で採用されているもので、ガス・レーザーの単色性、coherency の良さを利用して干渉距離の長い干渉計を作り伸縮計として用いるレーザー伸縮計³⁸⁾⁻³¹⁾、レベルの気泡の動きを電気的に取り出す傾斜計³²⁾、水銀傾斜計^{33), 34)}などがある。これらの方法は従来の計器の欠点を原理的に克服できるものとして将来期待されるものであるが、未だ開発段階にある上、何よりもその高価なことで一般的でない。したがって我が国では前者の方法によるのが主である。この場合換振器としては容量変化型³⁵⁾⁻³⁸⁾、差動トランス型^{39), 40), 41)}が用いられ、他にマグネセンサー⁴²⁾等もある。可変容量型換振器が Benioff³⁵⁾ によって歪地震計の換振器として開発されたように、これらの方法は地殻変動だけでなく同時に地震波動の観測もできる上、高感度を期待できる等の利点をもつ。記録はアナログで打点式、インク書き等の記録計に書かせる他 AD 変換して digital 記録されている場合もある⁴⁰⁾。しかしながら換振器の本質的な部分に発振器その他の電気回路が含まれるため、長期間のドリフトと同じ周波数領域の観測を行なうには安定性等未だ開発を要する問題が残っていると考えられる。

もう1つの方法は従来の光学記録の系までをそのまま残して、ミラーからの光点を光電変換する方法である。この方式は高田⁴³⁾により開発されたが、光点をホト・トランジスターで追跡させ、その位置をポテンショメーターで電圧量に変換するため、ポテンショメーターの摩擦等の問題で長期間の観測には適さなかった。我々の方法はこれを改良して長期間の観測に適するように非接触型にしたものである。最近レーザーによる

感度校正が正確に行なえるようになった^{44)~47)}ことを考えると、水平振子型傾斜計の不安定を除けば、伸縮計・水管傾斜計等に関しては tide より長い周期の変動の連続観測には従来の光学的記録系で十分である。また長期間の変動を問題にする地殻変動観測では以前の記録とそのまま継続した記録を得ることが重要であり、観測系を乱さない形でそのまま遠隔デジタル記録できる利点をもつ。

観測結果の解析の点から見れば、アナログ記録よりデジタル記録の方が利点が多いのは言うまでもない^{48), 49)}。デジタル化については地殻変動のように高々数分間隔のデータで十分な緩慢な変動の場合一旦アナログ量にしてからデジタル化するより、直接サンプル化してデジタル量とした方が装置・取扱共に簡単で有利である。

paper I に述べられた観測システムは 1969 年 Sep. より屯鶴峯観測所の伸縮計記録システムとして連続使用されている。初期に接点切替回路のリレーの接触不良、誘導によるモーター駆動の誤動作、リード線の固定不良による断線等のトラブルがあったが、手直しにより現在では良好な連続記録が得られている。

5. お わ り に

以上 paper I に述べられた天ヶ瀬・屯鶴峯両観測所に設置されているデジタル観測システムを記録すべき信号の周波数帯域に応じてそれぞれのシステムの特長と若干の結果について述べた。いずれも従来の観測システムに比べれば格段の進歩を遂げたものと考えられるが、さらに今後改良を加え、発展させる必要があるのは言うまでもないであろう。

終りに御指導下さった高田理夫教授及び有益な御助言をいただいた三雲健教授、御協力頂いた竹本修三、尾上謙介両氏をはじめとする地かく変動部門の方々に厚く御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) Furuzawa, T.: Some Problems of Seismic Data Processing, Part 1, Observational Systems and Instrumentation, Bull. Disast. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ., Vol. 24, No. 1, 1974, pp. 49-66.
- 2) Allsopp, D. F., M. D. Burke and G. L. Camming: A Digital Seismic Recording System, Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 62, 1972, pp. 1641-1647.
- 3) Green, P. E., R. A. Frosch and C. F. Romney: Principles of an Experimental Large Aperture Seismic Array (LASA), Proc. IEEE, Vol. 53, 1965, pp. 1821-1833.
- 4) Bungum, H., E. S. Husebye and F. Ringdal: The NORSAR Array and Preliminary Results of Data Analysis, Geophys. J., Vol. 25, 1971, pp. 115-126.
- 5) Bogert, B. P.: Seismic Data Collection, Reduction, and Digitization, Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 51, 1961, pp. 515-525.
- 6) Weichert, D. H., E. B. Manchee and K. Whitham: Digital Experiments at Twice Real-Time Speed on the Capabilities of the Yellowknife Seismic Array, Geophys. J., Vol. 13, 1967, pp. 277-295.
- 7) Truscott, J. R.: Eskdalemuir Seismological Station, Geophys. J., Vol. 9, 1964, pp. 59-68.
- 8) Stauder, W. and A. Ryall: Spatial Distribution and Source Mechanism of Microearthquakes in Central Nevada, Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 57, 1967, 1317-1345.
- 9) Muirhead, K. J. and D. W. Simpson: A Three-Quarter Watt Seismic Station, Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 62, 1972, pp. 985-990.
- 10) Green, R.: A Portable Multi-channel Seismic Recorder and a Data Processing System, Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 63, 1973, pp. 423-431.
- 11) 森谷武男: 地震観測用長時間データ・レコーダーの試作, 北海道大学地球物理学研究報告, 第 23 号, 1970, pp. 91-97.
- 12) 伊神 輝, 青木治三: 微小地震観測のための長時間データ・レコーダー, 地震, 第 25 巻, 1972, pp.

- 187-189.
- 13) 石桁征夫：トリガー方式地震計による観測，地震学会予稿集，1974，No. 1.
 - 14) 三木晴男・渡辺 晃・黒磯章夫：阿武山地震観測所のテレメーターシステムについて，地震学会予稿集，1975，No. 2.
 - 15) Birtill, J. W. and F. E. Whiteway: The Application of Phased Arrays to the Analysis of Seismic Body Waves, Phil. Trans. Roy. Soc., London A, Vol. 258, 1965, pp. 421-493.
 - 16) 宮村 撰三：群列方式地震観測へのあゆみ，地震，特集号 Vol. 20, 1967, pp. 107-115.
 - 17) Yoshikawa, S., T. Wada and T. Furuzawa: Application of Analog-digital Converter for Seismic Data, Special Contr. Geophys. Inst., Kyoto Univ., No. 4, 1964, pp. 105-110.
 - 18) 辻浦 賢：直視記録方式による長周期地震計，震研彙報，Vol. 43, 1965, pp. 429-440.
 - 19) 三雲 健：RC 回路を用いた長周期地震計の特性，京都大学防災研究所年報，第13号 A, 1970, pp. 121-132.
 - 20) 鈴木次郎・長谷川武司：コンデンサーでシャントされた地震計の動きについて (I)，地震，第23巻，1970，pp. 198-204.
 - 21) Burke, M. D., E. R. Kanasewich, J. D. Malinsky and J. F. Moutalbeti: A Wide-band Digital Seismograph System, Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 60, 1970, pp. 1417-1426.
 - 22) 梅田康弘：短周期振子を用いた可搬型長周期地震計，地震学会予稿集，1971，No. 1.
 - 23) Nuttli, O. W.: The Amplitudes of Teleseismic P Waves, Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 62, 1972, pp. 343-356.
 - 24) Choudhury, M. A. and A. Hourii: A Low-cost Observatory Tape Recorder, Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 63, 1973, pp. 877-884.
 - 25) Vali, V., R. S. Krogstad and R. W. Moss: Observation of Earth Tides using a Laser Interferometer, Jour. Appl. Phys., Vol. 37, 1966, pp. 580-582.
 - 26) van Veen, H. J. and J. Savino: An Optical Maser Strainmeter, Jour. Geophys. Res., Vol. 71, 1966, pp. 5478-5479.
 - 27) King, G. C. P. and V. B. Gerard: Earth Tides Recorded by the 55-m Cambridge Laser Interferometer, Geophys. J., Vol. 18, 1969, pp. 437-438.
 - 28) Berger, J. and R. H. Lovberg: A Laser Earth Strain Meter, Rev. Scientific Instr., Vol. 40, 1969 pp. 1569-1575.
 - 29) Vali, V., R. S. Krogstad, R. W. Moss and R. Engel: One Thousand Meter Laser Interferometer, Rev. Sci. Instr., Vol. 39, 1968, pp. 1304-1306.
 - 30) Levine, J. and J. L. Hall: Design and Operation of a Methan Absorption Stabilized Laser Strainmeter, Jour. Geophys. Res., Vol. 77, 1972, pp. 2595-2609.
 - 31) Coultly, N. R., G. C. P. King and A. J. Wallard: Iodine Stabilized Laser Strain Meter, Geophys. J., Vol. 39, 1974, pp. 269-282.
 - 32) Endo, E. T., P. L. Ward, D. H. Harlow, R. V. Allen and J. P. Eaton: A Prototype Global Volcano Surveillance System Monitoring Seismic Activity and Tilt, Bull. Volcanologique, Vol. 38, 1974, pp. 315-344.
 - 33) Wood, M. D. and R. V. Allen: Anomalous Microtilt Preceding a Local Earthquake. Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 61, 1971, pp. 1801-1809.
 - 34) Gile, W. W.: A Mercury Pendulum Seismometer, Geophys. J., Vol. 36, 1974, pp. 153-165.
 - 35) Benioff, H.: Fused-Quartz Extensometer for Secular, Tidal and Seismic Strains, Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 49, 1959, pp. 1019-1032.
 - 36) Tanaka, T.: On the Extensometer of a Variable Capacitor Type, Bull. Disast. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ., Vol. 15, 1966, pp. 49-59.
 - 37) 尾池和夫・小泉 誠・平野憲雄・松尾成光：可変容量型傾斜計の試作，京都大学防災研究所年報，第11号 A, 1968, pp. 53-58.

- 38) Allen, R. V.: A Borehole Tiltmeter for Measurements at Tidal Sensitivity, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 62, 1972, pp. 815-821.
- 39) 坪川家恒・長沢 工・柳沢道夫・村田一郎・田島広一・佐藤忠弘・電磁型傾斜計とそれによる観測, *測地学会誌*, 16巻, 1970, pp. 209-231.
- 40) 飯田汲事・志知竜一・松浦 宏: 犬山における地殻変動の連続観測, *測地学会誌*, 14 巻, 1969, pp. 144-155.
- 41) 加藤正明・津島吉男: 差動トランス型水管傾斜計の試作, *京都大学防災研究所年報*, 第16号 B, 1973, pp. 55-63.
- 42) 若杉忠雄・笠原慶一: 自記水管傾斜計と標準型水管傾斜計の併用方式, *測地学会誌*, 20巻, 1974, pp. 221-224.
- 43) Takada, M.: On the Observing Instruments and Tele-metrical Devices of Extensometers and Tiltmeters at Ide Observatory, *Bull. Disast. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ.*, Vol. 8, 1959, pp. 1-46.
- 44) Blayney, J. L. and R. Gilman: A Portable Strainmeter with Continuous Interferometric Calibration, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 55, 1965, pp. 955-970.
- 45) Hade, G., M. Conner and J. T. Kuo: Laser Interferometer Calibration System for Extensometers, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 58, 1968, pp. 1379-1383.
- 46) Smookler, S. and J. V. Kline: Interferometric Calibration of a Strainmeter Transducer *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 61, 1971, pp. 937-955.
- 47) 竹本修三: ローラー型伸縮計のレーザーを用いた Calibration について, *測地学会誌*, 21巻, 1975, pp. 81-90.
- 48) Tanaka, T.: Study on the Relation between Local Earthquakes and Minute Ground Deformation, Part 2, An Application of the Digital Filtering to the Tiltgram for the Detection of the Minute Anomalous Tilting of the Ground, *Bull. Disast. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ.*, Vol. 16, 1966, pp. 57-67.
- 49) 志知竜一・飯田汲事: 犬山における地殻変動の連続観測 (III), *測地学会誌*, 19巻, 1973, pp. 8-21.