HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	強震動の測定小史における機動観測
Author(s)	工藤, 一嘉
Citation	北海道大学地球物理学研究報告, 73, 207-215
Issue Date	2010-03-19
DOI	https://doi.org/10.14943/gbhu.73.207
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/44475
Type	departmental bulletin paper
File Information	73_19_p207-215.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

北海道大学地球物理学研究報告
Geophysical Bulletin of Hokkaido University, Sapporo, Japan
No. 73, March 2010, pp. 207－215

強震動の測定小史における機動観測

工藤　一嘉
日本大学総合科学研究所生産工学部

（2010 年 1 月 8 日受理）

Mobile Observation in a History of Strong-Motion Measurement

Kazuyoshi　KUDO
College of Industrial Technology, University Research Center, Nihon University

（Received January 8, 2010）

A historical sketch of mobile strong-motion observations is illustrated with a brief review of standard measurements of strong earthquake ground motion in Japan. A mobile strong-motion observation has generally been carried out for aftershocks and/or earthquake swarms as initiated by Kanai et al. (1966). Great advantages of mobile array observation by organizing plural groups were found in the aftershocks of two large Hokkaido earthquakes of 1993, Hokkaido-Nansei oki, and Kushiro oki. A significance of mobile strong-motion observation is also described. A potable strong-motion instrument is a key factor for mobile observation and recent developments by continuous recordings will give us new-findings.

Ⅰ．は　じ　め　に

わが国での強震計の開発は 1948 年福井地震を契機としており，“烈震”，“激震”地域において構造物が受ける地震動はどのようなものであるかという，極めて素朴な疑問・要請に基づいていたようである（金井清，1975）．我が国初の SMAC 型強震計が開発（高橋，1953）されてから半世紀経ったことを記念するシンポジウムが 2004 年に開催された．そのシンポジウムでは田中（2006）による我が国の強震観測のレビューが行われ，また観測に携わってきた多くの機関からもそれぞれの歴史を含めた報告がなされ，K-NET が設立されるまで，あるいはそれ以降の観測体制を含む詳細がまとめられている（防災科技研，2006）．また，日本地震学会強震動委員会がまとめた各機関の強震観測が地震学会ニュースレターにシリーズで紹介された．従って強震観測小史は屋上屋を重ねる観があるが，機動的観測の歴史とのかかわりの中で重要であることから，少し横断的に眺めてみた．

機動強震観測は，震源近傍での余震や群発地震を対象とする場合が一般的であり，観測点配置は狙いを絞り密度が高くなる．後述するように，1994 年北海道東方沖地震（M 8.1）を高密度で観測出来た経験もあるが，一方で機動観測は，例えば余震活動が低い時などは目的を達成できないまま，撤収せざるを得ないこともあり，ある種の‘空振り覚悟’も必要な手法である．しかし，定常観測では準備し難い面を補うメリットは今後とも重視される．

Ⅱ．強震観測史概観

世界で最初に開発された強震計は，U. S. Coast Geodetic Survey Standard accelerograph－詳細は Brady（2009）を参照－であるが，良く知られているように，末広恭二初代地震研究所長が米国での招待講演（Suyehiro，1932）において，強震動の測定には加速度計が有用であることを説き，それに触発されて開発されたものである．我が国では SMAC 型強震計の開発が 1950 年代前半であったので米国から 20 年遅れたことになる．以来，半世紀にわたり観測が続けられてきたが，1995 年兵庫県南部地震の発生までは震源域あるいは破壊的地震動の観測記録が極めて少なく，1964 年新潟地震，1968 年十勝沖地震，1978 年宮城県沖地震，1983 年日本海中部地震，1993 年釧路沖地震，1994 年三陸はるか沖地震などで，それぞれ単一かあっても数箇所以下での記録が得られたことに留まっている．周知のごとく，1995 年の兵庫県南部地震の教訓から，K-NET・KiK-net（防災科技研），震度観測網（気象庁，自治体）などが実現し，旧来の強震観測が大きく様変わりした．新体制の強震観測，特に K-NET の実現（Kinoshita, 1998）は，1) 全国の地表（建物ではなく）にほぼ均等に，2) データの高精度化とオンライン化（一部では実現していたが），3) データの即時公開（流通）などを提供し，強震記録の利用が工学に留まらず，地震学・地震工学者にそして世界の研究者に広がった．また，当初は Hi-net への付加的観測として実現した KiK-net は，多くは地震基盤あるいはそれに順ずる地下深部での観測のため，さらに普遍性のあるデータが得られるようになった．また，気象庁・自治体の震度観測網は，緊急応急対策の第一義的な情報把握として，行政・社会的ニーズに応える機能を担っている．このような体制が整ってきたが故に，近年の内陸・沿岸の中・大地震の震源近傍での記録が相当数得られるようになった．

強震観測の発展の歴史は前掲の田中（2006）に詳細に記されているが，初期から SMAC 型強震計の開発に至るまでを第 1 期（1930～1950 年代），SMAC 型，米国製の RFT-250 型・SMA-1 型などのアナログ式強震計の開発・展開期を第 2 期（1960～1970 年代後半），デジタル強震計やアレー観測で特徴付けられる第 3 期（1970 年代後半～1995 年）と現在（1996 年以降）の 4 期に分け，第 3 期以降の強震観測と関連する地震や記事を，Table 1 とTable 2 に年表として記してみた．なお，僅かな代表的事柄に限定されていることに注意いただきたい．第 3 期の諸事情（1995 年兵庫県南部地震以前）については工藤（1994）にやや詳細に記述してある．

定常あるいは固定的強震観測の基本要素は Fig. 1 に示すように，大きく 4 項目からなるであ

Table 1. Outline of the third stage in strong-motion observation

Year	Remarkable earthquakes	Strong-motion instruments	Topics in Japan	Oversea affairs
1977		Velocity-type sensor		
1978	Near Izu Oshima M7.0, Off Miyagi M7.4	DSA-1	Act on Special Measures Concerning Countermeasures for Large-Scale Earthquake. Recommendation for Strong-Motion Observation (Science Council of Japan Strong-motion array observation by joint research of electric companies	Workshop on Strong Motion Instrument Arrays (1978, Hawaii; NSF, UNESCO)
1979	Imperial Valley, California M6.5			Near-field array data, Very high vertical acceleration
1983	Central Japan Sea M7.7	Development of Digital recorder made in Japan ADC of 12 bits	Near-field strong-motion records (Furofushi, Ohgata mura) Long-period strong motion (Niigata, Tomakomai)	
1984	West Nagano M6.8	SMAD	Utilize the deep borehole strong-motion data	
1985	Mexico (Michoacan) M8.0			Near source, Site effects, Long-period strong motion records
1987	Off East Chiba M6.7	JMA87	Distribution of instruments with ADC of 16 bits	
1989	Earthquake swarms near Ito City		Submarine volcanic eruption and earthquake swarm near Ito City, Shizuoka Pref. Near-field records by mobile observation.	
1992		SMAC-MD	ESG International Symposium (Odawara)	
1993	Off Kushiro M7.4 Off Southwest Hokkaido M7.8		Cooperative mobile strong-motion observation by university groups, High acceleration record of 1.6g at Otobe-cho, Hokkaido	CUBE (Caltech-USGS Broadcast of Earthquake)
1994	Off East Hokkaido M8.4 Far Off Sanriku M7.5 Northridge, M6.7		Highly dense strong-motion observation in Kushiro City, Hokkaido by the ESG group	Tarzana (1.8g)
1995	Southern Hyogo M7.3		Historically heavy damage in Kobe and vicinities, Strong-motion records in the area of intensity 7, Cooperative strong-motion observation for aftershocks Establishment of the Headquarters for Earthquake Research Promotion	TriNet (CIT, USGS, CSMIP)

Table 2. Outline of the forth stage (present) in strong-motion observation

Year	Remarkable earthquakes	Strong-motion instruments	Topics in Japan	Oversea affairs
1996		K-NET95, Intensity meters (ADC:24bits)	Establishment of new observation networks: K-NET (1000 sites), KiK-net by NIED, intensity by JMA (600 sites) and local governments (3255 sites)	
1997	Northwest Kagoshima M6.6	New instrument for mobile observation		
1998			ESG International Symposium (Yokohama)	
1999	Kocaeli Turkey M7.6, ChiChi Taiwan M7.7		Mobile observations for two large earthquakes by Japanese group	Many near-field records (Large velocity, large displacement, fling step) were obtained and released
2000	West Tottori M7.3 Near Miyakejima M6.5		Establishment of Metropolitan Strong Motion Observation Network by university groups	
2001	Geiyo M6.7			
2003	Off Tokachi, M8.0 Off Miyagi M7.1 North Miyagi		Long-period strong motion from large earthquakes. Damage of large storage oil tanks	
2004	Niigata Chuetsu M6.8 Sumatra M9.0		High acceleration records of 2g and exceeding 1g at many sites Symposium "The 50th Anniversary of Strong-Motion Earthq. Obs. in Japan"	Parkfield M6.0 (Very dense array records near the fault) No strong motion records from the Sumatra earthq.?
2005	Off West Fukuoka M7.0 Off Miyagi M7.2			Kashimir, Pakistan M7.7, (heavily damaged), no strong motion record?
2006		Revision of K-NET instrument	Quasi real time data release by K-NET	
2007	Noto Peninsula M6.9 Off Niigata Chuetsu M6.8		Strong earthquake immediately beneath the nuclear power plant Began the service of earthquake early warning by JMA through media outlets (10/01)	
2008	Iwate・Miyagi M7.2		Very high acceleration record of 4 g (KiK-net)	Sichuan China M7.9

ろう．4 項目がバランスよく発展するのが望ましく，どれか一つ突出しても，功多しとは言い難い．但し，計測器の質や量，利便性などはやや例外的に強震観測の発展に大きな影響を与えてきた．1970 年代後半から 1990 年ころまではディジタル強震計への発展過程つまりは移行期にあったと言えよう．12 ビットの AD 変換から始まり，数年もたたずに 16 ビットが一般化していった

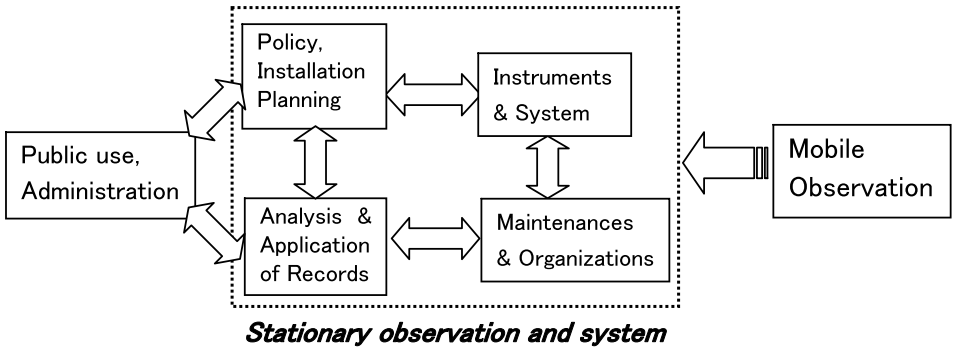


Fig. 1. Major requirements for strong-motion observation and their reciprocal relationship.

が，12 ビット器では，見かけのダイナミックレンジを補うために指数部と仮数部に分ける試みなども行われた（Kudo et al., 1984）．また，記録媒体もカセットテープから IC メモリー，バブルメモリーなどに発展はしたものの，当時のメモリー容量は少なく，誤動作や工事などで記録媒体が満杯になることもしばしばであった．言い方は悪いが，不具合改善のためのモデルチェンジが日常的になり，極めて不安定な状況が続いた（担当者泣かせ）のは，我々だけではなかった筈である．また，刻時は NHK 時報を利用する場合が多く，その保守には多くの労を必要とした．データ伝送はごく試験的に行われていたが，これにも各種の試みがあった．これらの問題は，技術的発展期の故であったことは確かであろうが，大口利用あるいは強震観測関係者の共同開発という場（機運，受け入れ態勢）がなかったこともその要因の一つと考える．K-NET まで待たざるを得なかったのは，関係者の一人として残念なことと言わざるを得ない．

昨今の技術的発展と多目的化には目覚しいものがある．技術的な発展は，AD 変換機の高精度化を始めとして，記録媒体の大容量化，GPS による時刻管理，高速のデータ伝送などの実現が強震観測の大変貌を可能にしたといっても過言ではない．伝送系を含む技術革新が強震観測を多目的化（震度観測もその一例），多様化を促している．一方で，低価格化，簡便化，制御系への利用も進んでいる．

Ⅲ．機動観測の意義と経緯

１．80 年代の高密度観測

1978 年に開催された国際ワークショップ「Strong Motion Instrument Arrays」（Iwan, 1978）は強震観測の世界に大きなインパクトを与えた．やや長期的な地震発生予測に基づき，震源近傍での強震アレー観測をする提案であったが，これに基づき設立された Guerrero（Mexico）アレーにより 1985 年のメキシコ地震（M 8.1）の貴重なデータが得られたことは特筆される．我が国でもワークショップの提言を受けて，東海地震，宮城県沖地震などをターゲットとした高密度観測網

が設立された（今では高密度とは言えないが）．宮城県沖は2003年の地震があり，微妙ではあるが，東海地震は未発生であり目的は未達成と言えよう．現在のK-NET，震度観測網が整備されている状況では，設立当初の意義は大きく変化しているが，当時設立した駿河湾での観測網は2009年8月の駿河湾沖の地震で成果が問われるところかもしれない．狙った場所以外でも大地震が起きることは，現段階では‘当然’と言わざるを得ないし，アンチテーゼ的な均等配置のK-NETが成功しているのは，狙いを定める観測の難しさを証明しているともいえる．しかし，内陸の被害地震（M６～７クラス）の震源やサイトの問題を明らかに出来るほど密な観測点配置ではない場合が多く，余震観測などによる補助観測から問題解明を探ることもしばしば実施されてきた．

このワークショップから，IAEE（International Association for Earthquake Engineering）のもとにISMAC（International Strong-Motion Array Council）が結成され，暫くは世界地震工学会議等での会合はあったが，その後はさしたる進展が見られなかった．このISMACの一つの機能として，機動アレイ観測の委員会も作られたが，具体的活動は全く無いまま雲散霧消したことは残念である．自国内でも実現していない共同・支援の機動観測の実現に目的があったようであるが，国際的には国内以上に難しい問題が含まれ，機動観測用の機器の開発が不十分であったことなど，機が熟していなかったと言えよう．

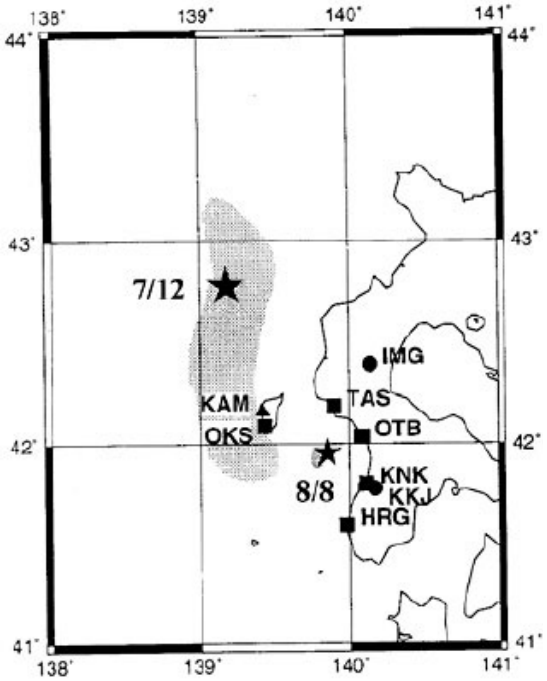


Fig. 2. A Map showing the stations of the first cooperative strong-motion observation by university group for aftershocks of the 1993 Off Coast of Southwest Hokkaido (Hokkaido Nansei oki) earthquake (Sasatani, 1996).

２．機動観測の経緯

我が国での強震計による機動観測は，Kanai et al.（1966）による松代群発地震（1965 年に始まる）の観測を端緒としており，田中・他（1981）による 1980 年の伊豆半島近海の地震群の観測へとつながる．1980 年の観測では SMAC-B 型のほか当時の最新機種であったディジタル強震計 DSA-1 が用いられている．最近事情が変わりつつあるが，当時は一機関での自由になる強震計台数は限られ，また保守点検にも限界があり，多機関による共同観測が志向されたことは当然のことである．大学間の共同観測が最初に実現したのは北大理学部，京大防災研，東大地震研による 1993 年北海道南西沖地震の余震観測である．当時，震源域に近い日本海側での強震観測点は寿都測候所と泊原子力発電所を除けば皆無であった．そのため，現在の K-NET よりも粗い配置ではあるが Fig. 2 の臨時観測網が実現した．東京・京都の遠方から観測に参加するためには，北海道大学による受け入れ・調整が不可欠であった．この観測網の実現により，広義の余震と言うべきかも知れないが，８月８日に震源域からやや内陸よりの江差沖で発生した M 6.3 の地震により，乙部町で当時水平動では世界最大の 1.6 g が観測された（工藤・他，1994）．これがきっかけとなり，更なる詳細観測・解析が進められた（笹谷，1996）．なお，1994 年１月の Northridge 地震で Tarzana での記録（1.8 g）によってこの世界一は塗り替えられた．

㈶震災予防協会 ESG 研究委員会の呼びかけで，1993 年８月後半から釧路市での共同強震観測が開始された．1993 年釧路沖地震で台地（JMA，BRI）と低地（PHRI）での地震動の差（最大加速度に約２倍の差）に着目して実施されたもので，5 km× 6 km 程度の市街地に 23 箇所の高密度観測が実現し，偶然ではあろうが，当初１年間の計測期間でであったが延長したお陰で 1994 年北海道東方沖（M 8.1）の巨大地震を観測した（ESG 研究委員会，1995）．大学や建設会社研究所などの協同により実現したものであるが，観測点の許可や準備は岡田廣北海道大学名誉教授・笹谷努助教授（当時）のご尽力の賜物であることを記しておきたい．これらの観測記録の整理を始めた時機に 1995 年兵庫県南部地震が発生した．京都大学防災研究所の岩田知孝博士がまとめ役を担い，参加者は被害の全様を知らぬままに共同観測に参加し，割り振られた地域で観測を開始した．釧路市での経験があったために比較的迅速に観測網が設営されたと考える．被災地での観測は未経験でもあり，現有の移動観測機器に大きな限界を感じたのは筆者だけではないであろう．商用電源が無くても観測できる小型軽量の計器開発に触発された，科学研究費補助金により省電力の可搬型強震計を共同で開発できた（工藤，1998）ことも，機動的強震観測の経験の中から生まれたものと言えよう．その後，可搬型の強震計は 1999 年トルコ地震，1999 年台湾地震，2000 年鳥取県西部地震，2004 年中越地震などで活躍した．

機動観測は労多くして得られることが少ない場合も多々あるが，我が国が世界一高密度の観測網を有していても，なお特定課題の解明には欠かすことの出来ない手段ではなかろうか．これまでは，機動強震観測も記録媒体の制限から，トリガー方式によることが多かった．しかし，最近の記録媒体の大容量化に伴い，連続観測が可能となっており，例えば，東・他（2009）の高密度の連続観測は新しい知見をもたらすことを期待させる．

Ⅳ. 課題と要望 ーまとめに代えて

1996 年以降に強震（震度）観測は極めて高密度になった．しかし，震源の複雑さを理解するに十分な配置と言えるであろうか．2004 年 Parkfield 地震では，震源域における最も高密度の観測記録が得られた（例えば，Shakal et al., 2006）．震源域での地震動の複雑さの理解にはこの程度密度な観測が望ましいとは言え，現実的な計画は難しい．また，2007 年新潟県中越沖地震で，柏崎刈羽での東京電力の観測記録がなかった場合に，震源像は違ったものになっていた可能性があろう．盆地内の地震動伝播特性を強震観測から把握することが，地震動予測の高精度化の一役を担っているが，基幹的強震観測に依存度が大きすぎて，観測主体の欠如と観測予算への不反映，あるいは予算化の難しさになってはいないだろうか．さらに観測点（網）を増やすことには行政予算的には極めて抵抗が大きいであろうが，多機関による相互乗り入れ的観測計画など，まだまだ課題が多い．社会的寄与が明瞭な観測でなければ新規の予算化は難しくなっており，特にリアルタイム地震防災情報や機器制御などへの期待は大きい．この種の情報が大いに役立つためには，即時的であり，かつ信頼性が高い強震動情報とは何かを，機器の信頼性確保などの検討とともにさらに研究と理解を深めていく必要があるのではないか．新しい課題とともに連続観測が必然となるが，テレメータ費用を忘れれば，機動観測も含めて連続観測が推奨実現され，テータ利用・保守管理などにも歓迎される．

謝辞　本論は 2009 年度　自然災害研究協議会北海道地区フォーラム「強震動研究シンポジウム　ー来るべき大地震を睨み発展する強震動研究ー」での発表に少し手直ししたものです．機会を与えていただいた，高井伸雄・古村孝志両先生に御礼申し上げる．また，本論提出に当たり，小山順二先生には多くの寛大なご配慮を頂きました．厚く御礼申し上げます．

共同機動強震観測は，北海道大学に笹谷努先生が居られたからこそ実現したものです．改めて笹谷努先生のご功績とご尽力に敬意を表します．

文　献

Brady, A. G., 2009. Strong-motion accelerographs: Early history, *Earthq. Eng. & Struct. Dynamics*, **38**, 1121-1134.

ESG 研究委員会, 1995. 釧路市における共同強震観測ー1994 年北海道東方沖地震ー，震災予防協会，88.

東　貞成・佐藤浩章・植竹富一, 2009. 柏崎刈羽原子力発電所における高密度強震観測記録のセンブランス解析，日本地震工学会大会 2009 梗概集，186-187.

Iwan, W. D.（ed），1978. *Proceedings of the International Workshop on Strong-Motion Instrument Arrays*, Hawaii, NSF and UNESCO.

Kanai, K., K. Hirano, S. Yoshizawa and T. Asada, 1966. Observation of strong earthquake motions in Matsushiro area，Part 1, *Bull. Earthq. Res. Institute*, **44**, 1269-1296.

金井　清, 1975. 地震研究所創立五十年の歩み, 東京大学地震研究所, 104-107.

Kinoshita, S., 1998. Kyoshin Net（K-NET），*Seism. Res. Lett.*, **69**, 309-332.

工藤一嘉・笹谷努・斎藤誠治・南雲秀樹・坂上実・高橋正義, 1994. 1993 年北海道南西沖地震の余震群の強震記録, 月刊海洋, 号外 No. 7, 95-101.

工藤一嘉（研究代表者）, 1998. 機動強震アレイ観測のための軽量小型強震計の製作と観測・解析マニュアルの作製, 平成 7 ～ 9 年度科学研究費補助金「基盤研究(A)」研究成果報告書, 176 pp.

笹谷　努（研究代表者）, 1996. 北海道南西沖地震群によって観測された特異な強震動記録の要因に関する研究, 平成 7 年度科学研究費補助金「一般研究(B)」研究成果報告書, 196 pp.

Shakal A., H. Haddadi, V. Graizer, K. Lin and M. Huang, 2006. Some key features of the strong-motion data from the M 6.0 Parkfield, California, earthquake of 28 September 2004 *Bull. Seis. Soc. Am.*, **96**：S 90-S 118.

Suyehiro K., 1932. Engineering Seismology, Notes on American Lectures., *Proc. Amer. Soc. Civil Engs*., **58**-4, 45-110.

高橋龍太郎, 1953. SMAC 型強震計, 地震 II, **6**, 117-121.

田中貞二・坂上 実・大沢 胖・吉沢 静代, 1981. 1980 年伊豆半島東方沖地震および同群発地震の加速度強震記録と最大加速度データ, 東京大学地震研究所彙報, **55**, 1043-1064

田中貞二, 2006. わが国の強震観測事始めを振り返って－加速度強震計の開発と初期および発展期の強震観測－, 記念シンポジウム「日本の強震観測 50 年」－歴史と展望―講演集, 防災科学技術研究所研究資料 264 号, 7-16.