

# 京都大学における強震動研究

入倉孝次郎 (1963 年理学部物理学科卒, 1968 年院地物専攻博士課程中退)

## 1. はじめに

京都大学における強震動研究は、1934 年佐々憲三による大震計(変位型強震計)の開発から始まった。この大震計は、それ以前に開発された今村式強震計よりも周期が長く、倍率も低い、という特徴を有しており、1943 年鳥取地震 (Mj 7.2) や 1948 年福井地震 (M 7.1) のときに、震央から約 100 km 離れた阿武山地震観測所で長周期強震動を飽和することなく記録した。それ以前の地震記録からは P 波や S 波の到達時刻やその最大振幅に関する情報しか得られなかったが、大震計の記録は、震源断層から生成される P 波や S 波の時刻歴を鮮明に示し、断層破壊の進行過程の情報抽出を可能とするものであった。しかしながら、それらの記録にもとづく断層破壊のメカニズムの研究は、東京大学地震研究所 (後にカリフォルニア工科大学) の金森博雄により大地震の震源モデルに関する一連の研究がおこなわれるまで (Kanamori, 1972, 1973)、手つかずのままとなっていた。

京都大学の強震動研究の第 2 のブレイクスルーは、1948 年福井地震の被災地において、弾性波探査により地震被害が軟弱地盤に集中することを明らかにしたことである (吉川, 1949)。この地震の 4 年後の 1952 年に、京都大学の付置研究所として 3 つの部門からなる防災研究所が設置され、強震動の研究は第 1 部門の「災害の理工学的研究」の 1 つとして続けられことになった。その後、防災研究所は、地震、火山、気象、地盤、水災害など、種々の自然災害を対象とする研究部門・研究センターを拡充していった。その 1 つとして、1963 年に第 1 部門を改称して、地震動部門を設置し、そこでは地震による地震動の生成・伝播および地震動による災害を中心とした研究が行われることになった。部門の名称として、「地震動」という新たな用語を用いたことで、「地震」とは区別して「地震による地面の揺れ」を「地震動」で表現することが地震学の Terminology として定着することとなった。1964 年新潟地震では、地震動部門の吉川宗治教授が中心となって、地震の被害地域で弾性波探査、人為加振機、余震観測により地盤の震動特性の調査を実施した。この地震の調査では、表層の S 波速度が遅い地域と被害の集中域と相関があることが明らかにされた。

京都大学の強震動研究の第 3 のブレイクスルーは、1983 年の地震動部門助教授であった入倉孝次郎による小地震の記録から大地震の強震動を評価する経験的グリーン関数法の開発にある。入倉は 1978 年に岐阜大学の村松郁栄教授を代表とする科学研究費「東海地方における大地震の被害予測に関する研究 (1978-1980)」に加わり、村松の開発した速度型強震計を用いて東海地域 (清水、静岡、御前崎) で強震動観測を行った。この研究の最終年度の 1980 年に、伊豆半島東方沖地震 (Mj 6.7) が起こり、震源から 100 km 以内の 3 つの観測点で本震だけでなく、前震と余震の精度良い強震速度記録が得られた。経験的グリーン関数法は、大地震の震源域で発生した小地震の地震動が大地震と同じ伝播経路特性やサイト特性を持つことを利用して、小地震の記録を経験的グリーン関数として大地震の強震動を推定する手法である。通常、強震観測に用いられる加速度型地震計では、小地震の記録は短周期成分の振幅が卓越するため、長周期成分の SN 比が悪く、大地震の強震動の合成する上で重要な長周期成分がノイズに埋もれてしまって、大地震時の強震動の計算は容易ではなかった。入倉の研究では、自ら観測した速度型強震計による小地震の記録を用いたことにより、記録自体が 1 秒よりも長い周期帯域で十分な SN 比を持っていたために、小地震の記録により大地震の強震動の合成が可能となった。

京都大学の強震動研究の第 4 のブレイクスルーは、1991 年に発足した関震協 (関西地震観測協議会) の設立と同協議会による京阪神地域における速度型強震計による強震動観測網の設置にある。その直後の 1995 年 1 月 17 日に阪神・淡路地域に大きな被害をもたらした兵庫県南部地震 (Mj 7.3, Mw 6.9) が発生した。この地震の際、震源となった六甲断層系の活断層の極近傍に設置されていた神戸大学や神戸市本山を含む 10 地点で、極めて貴重な強震動記録が得られた。関震協の記録は、強震動記録を用いた波形インバージョンによる破壊過程の研究をはじめとして、建築構造物の耐震性のみならず、ライフラ

イン、インフラストラクチャなど土木構造物の耐震性、さらに避難の在り方など、社会科学的な防災研究の振興などにも役立てられた。

京都大学の強震動研究の第 5 のブレークスルーは、2001 年に入倉を中心とした京都大学の強震動の研究グループによる「強震動予測レシピ」の開発および 2005 年に日本ではじめて策定された「地震動予測地図」の作成への貢献である。「強震動予測レシピ」は、活断層に発生する地震や海溝域に発生する地震による強震動予測を目的として、地形・地質調査データ、歴史地震、地球物理学的調査に基づき、対象とする地震の震源断層モデルおよび強震動評価に必要な断層パラメーターを推定する手続きを系統的にまとめたものである。この「レシピ」は、同一の情報が得られれば誰がやっても同じ答えが得られるように、強震動予測の標準的な方法論の確立を目指したものである。現状では、いまだ開発途上であり、今後の地震関連データの蓄積と動力学的断層破壊過程に関する理論および実験的研究の発展により、修正を加え、改訂されていくことを前提としている。このレシピは地震調査推進本部の地震動予測地図や中央防災会議の東海・東南海・南海地震などの被害予測に用いられている。

ここでは、紙数の関係から、大震計の開発、関震協による強震観測網、および強震動予測レシピに関して、以下に多少詳しく紹介する。

## 2. 1934 年大震計の開発

強震計（変位型）の開発は、東京大学において 1900 年ごろ大森房吉により初めて行われた。その後 1910 年に今村明恒によりより精度良いものが製作され、大森式にとって代わって中央気象台の各地に配備された。1923 年関東地震のとき、東京大学の本郷に設置された今村式強震計はスケールオーバーしたが、強震動がどのようなものかがある程度明らかになった。佐々憲三による大震計の開発はやや遅れた 1934 年ではあるが、今村式（固有周期 10 秒、倍率 2 倍）に比べて、周期が長く、倍率も低い（固有周期 25 秒、倍率 1.1 倍）という変位型強震計として有利な特徴を有していた。大震計による最初の記録は、1936（昭和 11）年 2 月 21 日に発生した、河内大和地震（Mj 6.4）で、その波形記録と観測の様子が記された自筆の手紙があることが京都大学の防災研究所の技術報告（浅田,1993）に報告されている。1943 年 9 月 10 日 鳥取地震（Mj 7.2）や 1948 年 6 月 28 日 福井地震（Mj 7.1）のとき、震央から約 100 km 離れた阿武山地震観測所で飽和することなく貴重な記録が得られた。これらの大震計の記録を用いて東京大学地震研究所の金森博雄が大地震の震源モデルに関する一連の研究を行った（Kanamori, 1972; Kanamori,1973）。

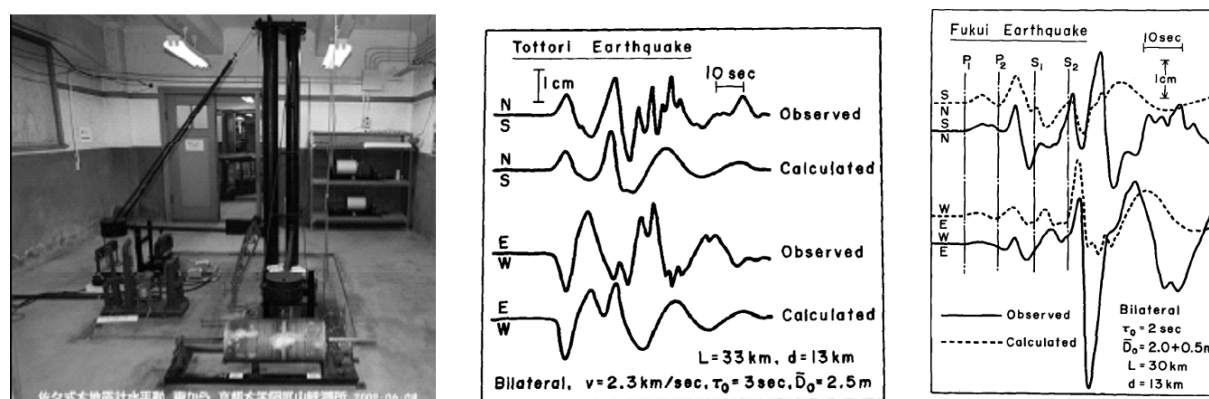


図 1. 左図：佐々式大震計（川崎一朗氏提供）。中図および右図：阿武山地震観測所で得られた 1943 年鳥取地震(Mj 7.2)および 1948 年福井地震(Mj 7.1)の大震計の記録と推定された震源モデルによる合成記録の比較（Kanamori, 1972,1973）。

## 3. 1994 年関震協による大阪盆地周辺地域における強震観測網の構築

関震協（関西地震観測研究協議会）は、1990 年代の初頭の時点で、京阪神地域では強震動観測体制が極めて貧弱で、大地震に対する地震被害軽減対策がほとんど行われていないことを憂えた大学等の研究

者が中心となって、地方公共団体の防災担当者、電気・ガス、ジェネコン、コンサルタントなど民間会社の関係者に呼び掛け、民間レベルで京阪神地域に強震観測網の構築し、強震観測とそれを利用した研究を推進するために、1991 年 12 月に発足した任意団体である（座長は京都大学工学研究科の土岐憲三教授）。関震協の結成のための呼び掛けや民間会社からの資金協力依頼で中心的役割を果たしたのは、京都大学の地球物理学教室出身で財団法人大阪土質試験所の岩崎好規氏であった。関震協は、民間会社の協力で集められた資金で強震計購入の費用を工面し、観測点の構築や強震計の設置をボランティアで行い、1994 年から大阪盆地内に 11 地点の観測点を設置し、速度型強震計によるデジタル観測を開始した。強震観測システムは、速度サーボ型強震計とデジタル収録器を組み合わせ、広周波数帯域および広動帯域の地震観測に適するようにした。また、電話回線を利用した事務局における自動観測およびポケット・ベルを用いた震源位置・規模・最大速度・計測震度情報の伝達など、地震直後の準即時的な情報伝達を狙った自動観測ソフトを運用した。2010 年 10 月現在では、20 地点で観測を継続している（図 2 左図）。

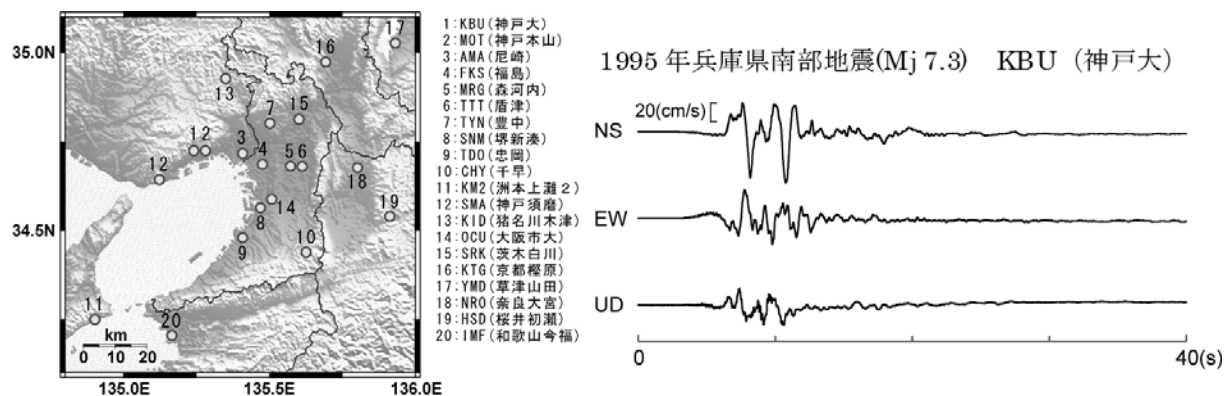


図 2. 左図：関西地震観測協議会の構築した速度型強震計による強震動観測網（20 点）（2010 年 10 月現在）。  
右図：1995 年兵庫県南部地震のとき、震源断層の極近傍の KBU(神戸大)で得られた速度記録。

1995 年兵庫県南部地震のとき、関震協の自動観測システムは良好に動作し、震源断層の極近傍に位置する神戸大学（KBU）を含む 10 地点で精度良い速度記録が得られた（図 2 右図参照）。関震協ではこれらの観測波形情報を速やかに公表し [Toki et al.(1995)], 国内・海外の研究者にはデジタル・データの提供を行った。それまでの日本における強震動観測記録は一般に観測点の設置者である研究者しか使用できなかったが、関震協が震源近傍域を含む貴重な記録を公表したことはその後の強震動記録のオープン化の先駆けとなった。

#### 4. 強震動予測レシピ

近年、大地震が発生すると、干渉 SAR 画像、遠地地震記録、強震動記録など、coseismic な記録を用いて、大地震の破壊過程の推定が先を競うように数多くなされるようになった。それらの研究成果を将来の大地震の災害予測に役立てるには、地震発生の可能性の高い活断層や海溝型地震を対象として、将来地震が起こったときどこでどんな揺れが生じるかという「強震動予測」に活用する必要がある。

活断層の調査などによる過去の地震の歴史データをもとに、将来発生する地震の震源断層モデルを合理的に予測し、震源から対象地域までの地下構造や表層の地盤構造を考慮して、地震による揺れを正しく予測するための方法として「レシピ」が考案された。この「レシピ」のもととなる考えは入倉・三宅 (2001) の論文で発表されているが、「レシピ」のバックグラウンドとなる動力学震源モデルによる震源過程のシミュレーションや震源断層と 3 次元地下構造を考慮した地震動のシミュレーションの研究は防災研究所地震災害部門の強震地震学分野の岩田知孝、関口春子、Arben Pitarka、Luis Dalguer、などスタッフや大学院生を総動員してなされたものである。1995 年に発生した阪神・淡路大震災を受けて、全国にわたる総合的な地震防災対策を推進するため政府の特別機関として設置された地震調査推進本部は、

この「レシピ」を改良発展させて、「全国を概観する地震動予測地図」を作成し、2005年に公表している(図3参照)。中央防災会議により主要な被害地震に対する揺れの予測も同様の考えに基づきなされている。

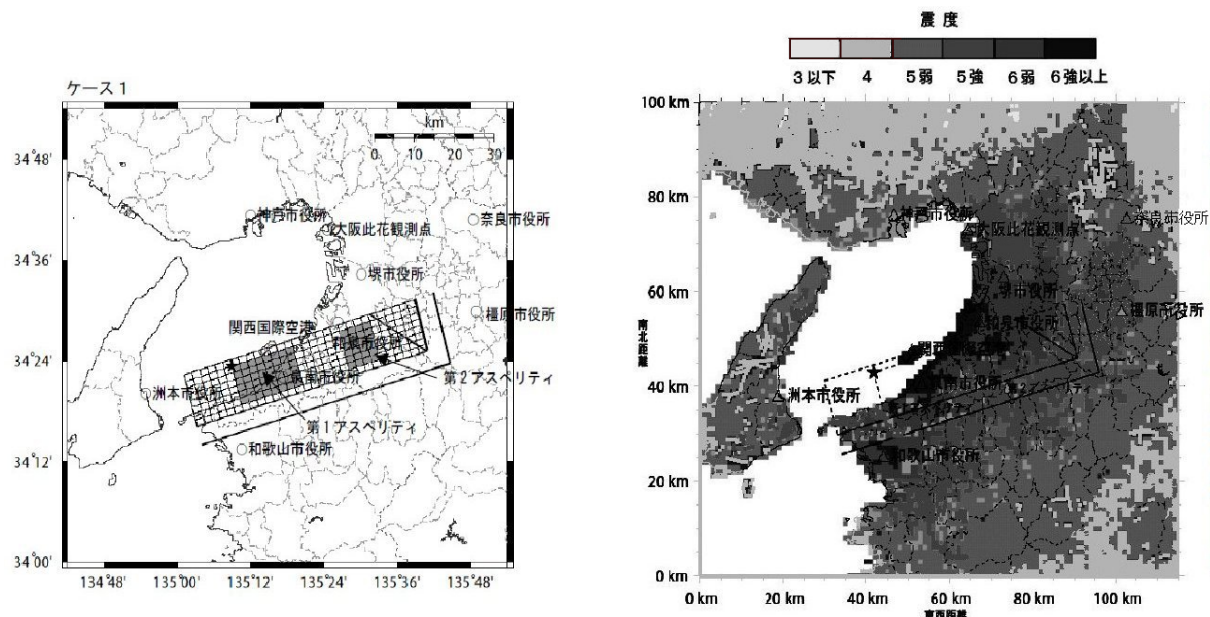


図3. 強震動予測レシピによる強震動評価例 —中央構造線断層帯(金剛山地東縁—和泉山脈南縁)の地震を想定した強震動評価—. (a) 震源断層モデル, (b) 震度分布(地震調査委員会, 2005)。

## 5. おわりに

京都大学の強震動研究は、佐々式大震計の開発にはじまり、その後、独自開発した探鉞機を用いた弾性波探査、板たたき法など浅層S波探査手法や地盤加振機の開発など、計器開発や独自の強震動観測網の構築による実験および観測的研究を中心として行われてきた。しかしながら、1995年兵庫県南部地震による大災害を契機として、国による地震防災のための基盤的観測網の中で強震動観測網の整備や地下構造調査などがなされ、研究者は既存のデータ解析の研究に重点を移さざるを得なくなってきた。より精度の高い強震動予測や被害軽減対策策定のための次世代型の強震動研究を進めるためには、実験、観測の在り方についての新たな戦略が必要となっている。

(文献)

浅田照行(1993): POST CARD, 京都大学防災研究所技術部通信, No.18(1993.11.23), 2.

入倉孝次郎・三宅弘恵(2001): シナリオ地震の強震動予測, 地学雑誌, 特集号「地震災害を考える—予測と対策」, 第110巻, 849-875.

地震調査委員会(2005): 中央構造線断層帯(金剛山地東縁—和泉山脈南縁)の地震を想定した強震動評価について, [http://www.jishin.go.jp/main/kyoshindo/05jul\\_chuokozosen/index.htm](http://www.jishin.go.jp/main/kyoshindo/05jul_chuokozosen/index.htm)

Kanamori, Hiroo(1972): Determination of effective tectonic stress associated with earthquake faulting. The Tottori earthquake of 1943: Phys. Earth Planet. Int., Vol. 5, p. 426-434. .

Kanamori, Hiroo(1973): Mode of strain release associated with major earthquakes in Japan: An. Earth Planet Sci., Vol. 1, p. 213-239.

Toki, K., K. Irikura and T. Kagawa, Strong Motion Records in the Source Area of the Hyogo-Ken-Nanbu Earthquake, January 17, 1995, Japan, J. Natural Disaster Science, 16, 23-30, 1995..

吉川宗治(1949): 福井地震の震害と地盤, 防災研究協会報告, 2, 12-16.