

日本地震学会 2014年秋季大会 新潟 2014年11月14日

11月24日(月)A会場 14:30 – 15:00

S21.新潟地震50周年・新潟県中越地震10周年：
これからの地震研究と災害軽減

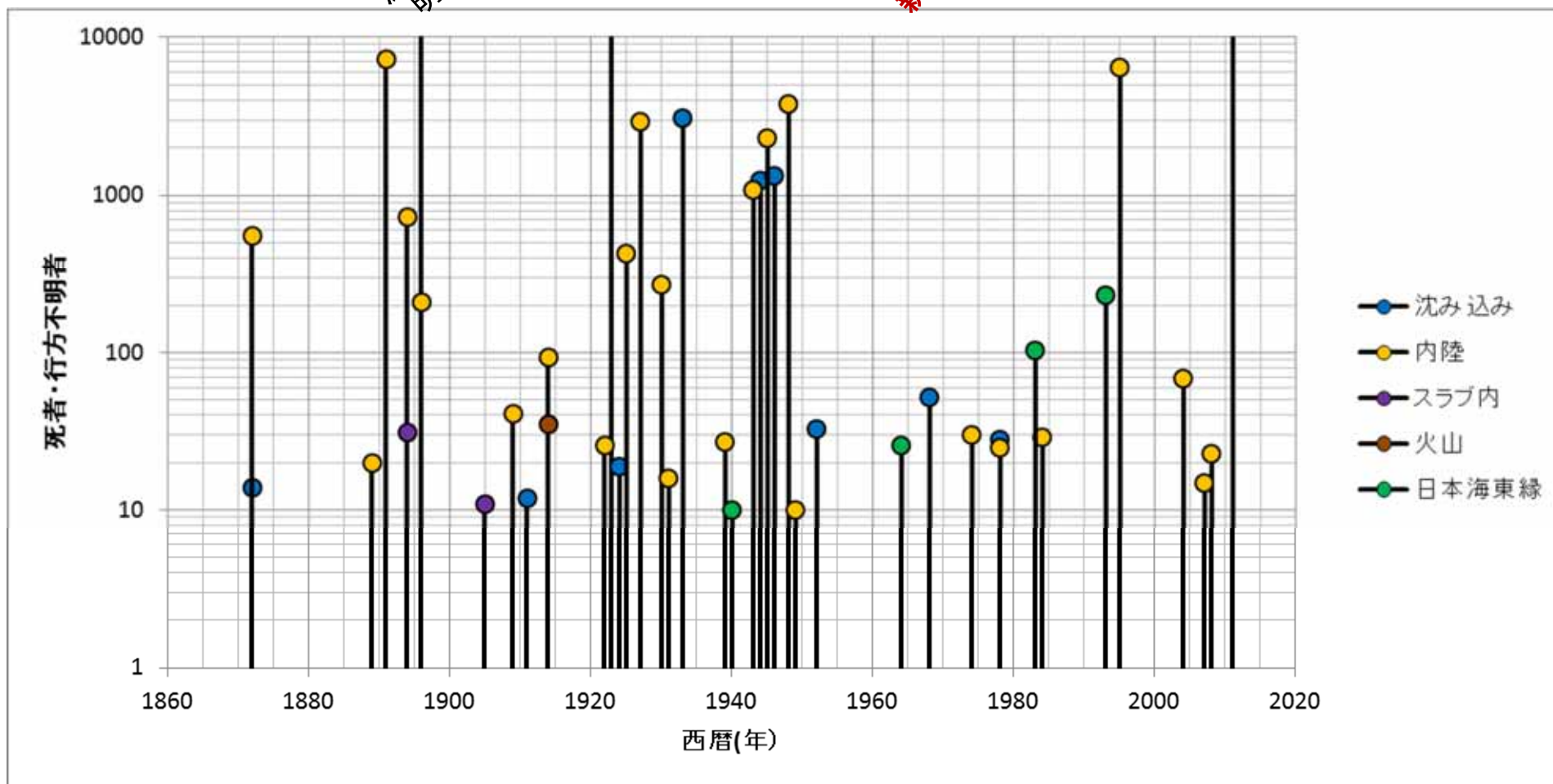
1964年新潟地震と安芸敬一

入倉孝次郎(愛知工業大学)

日本周辺で発生する大地震

1860 - 2014

濃尾地震 7273
明治三陸地震 22000
関東地震 142807
南海地震 1330
福井地震 3769
新潟地震 26
神戸地震 6432
東北地震 21613



1964年新潟地震(新潟地方気象台ホームページ)

1964年(昭和39年)6月16日13時01分40.7秒、
震央: $38^{\circ} 22.2'N$ 、 $139^{\circ} 12.7'E$ (新潟県下越沖)、震源の深さ: 34km、
地震の規模(M): 7.5

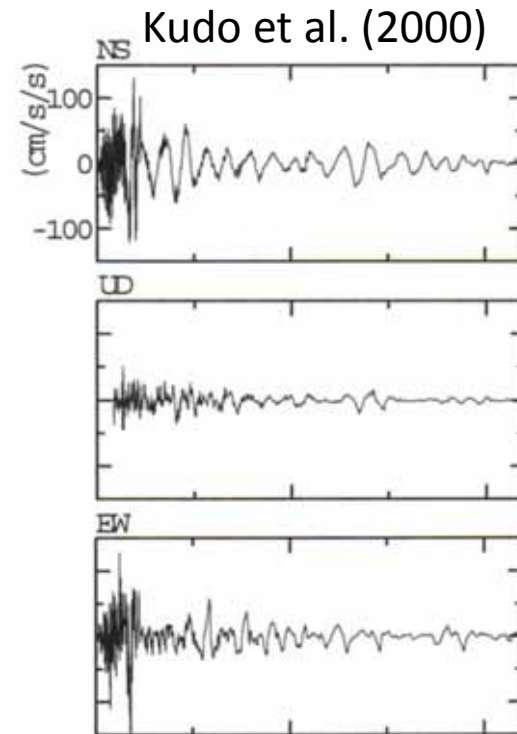
最大震度: 5

被害: 死者26、住家全壊1,960、半壊6,640、浸水15,297

土木学会(1966)



液状化した地盤と川岸町県営アパート

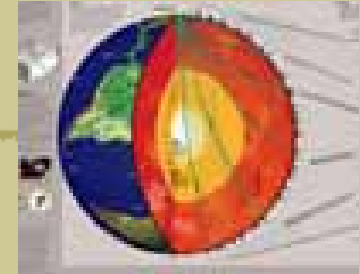


川岸町県営アパートで取れた加速度記録

被害状況（新潟地方気象台ホームページ）

被害は新潟・山形県を中心として9県に及びました。特に住家全壊は新潟市、村上市、山形県の酒田市、鶴岡市等で多数ありました。地震の約15分後位から津波が日本海沿岸各地を襲い、新潟市でも信濃川沿いなどの低地帯で浸水したほか、島根県隠岐島でも水田が冠水しました。震源に近い粟島は約1m隆起しました。新潟市では火災により昭和石油の石油タンクに引火し、約2週間後に鎮火しました。

この地震の特徴として、新潟市や酒田市等の低湿地帯から砂と水を噴き出す「液状化現象」があり、新潟市川岸町の鉄筋コンクリート4階建のアパートがそのまま傾いて倒れました。また、新潟市内では鉄筋コンクリートの建物の多くが傾いたり沈んだりしました。さらに、竣工間もない昭和大橋の橋桁が落ちた他、道路の沈下や亀裂等の破損が多数ありました。その他港や飛行場、河川の堤防等も被害がありました。



SeismoArchives

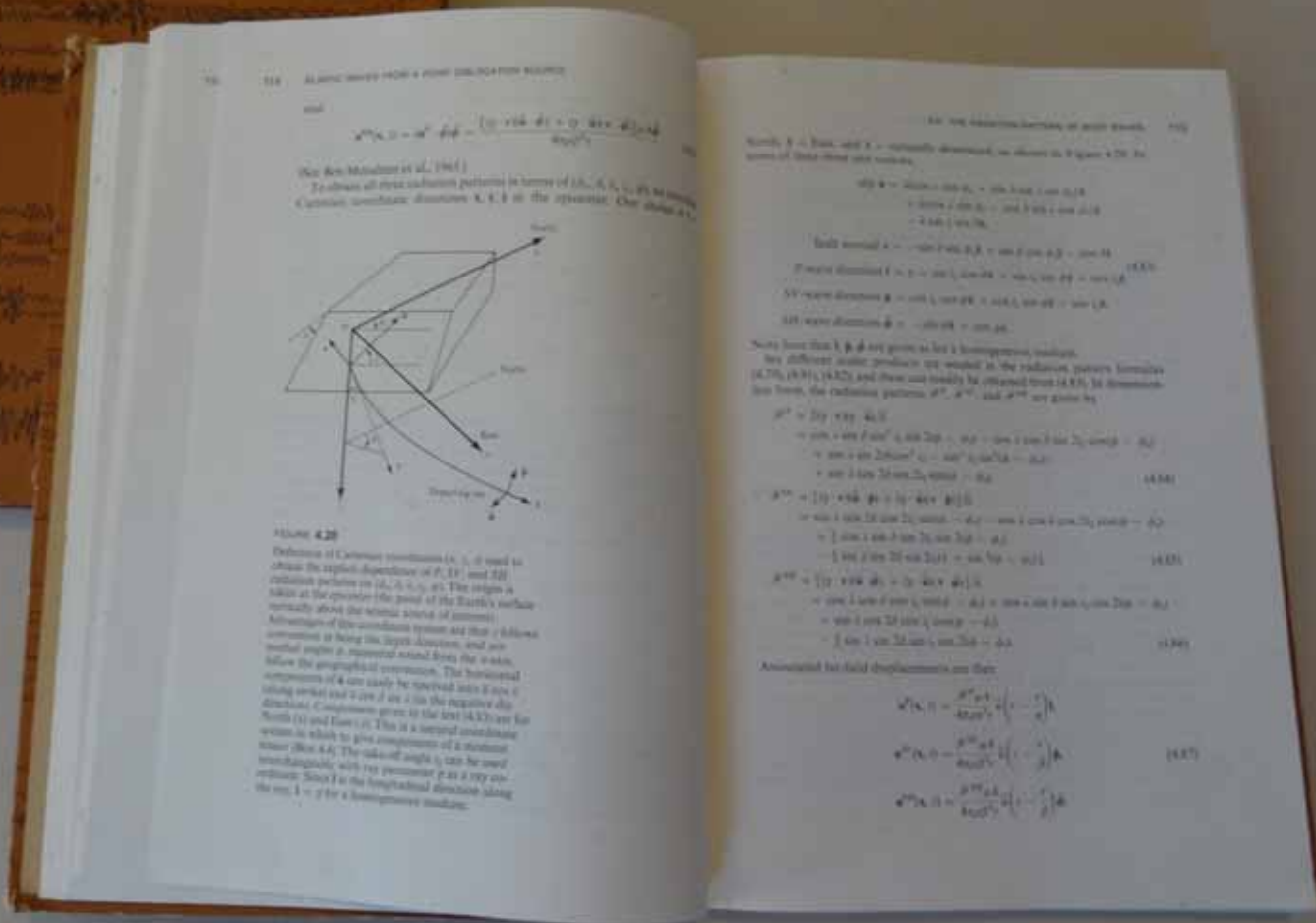
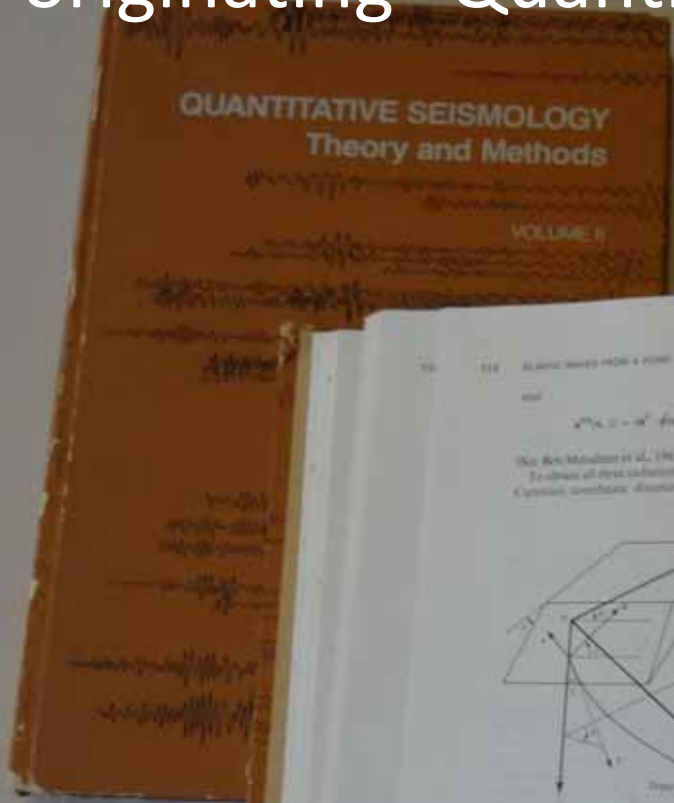
1964 Niigata (Japan) Earthquake Archive: In Memory of Professor Keiiti Aki (1930-2005)

1964 6/16 04:01 UTC 38.43N 139.22E 10km deep Mw=7.6, Niigata, Japan

The death toll of this earthquake was over 200. The Niigata earthquake has been extensively studied by Japanese seismologists, and in particular, by **Keiiti Aki** who introduced the concept of seismic moment, estimated its value for the Niigata earthquake based on spectral analysis of its seismic waves, and discussed the significance of seismic moment as a source parameter. This earthquake archive is created to honor **Prof. Keiiti Aki** for his many pioneering contributions in seismology.

We welcome contributions of digital files of materials relating to the Niigata Earthquake and financial donations to the endowment fund so that more seismograms can be scanned and made available online. In addition, - - - .

Kei Aki is one of the greatest Earth scientists for originating "Quantitative Seismology".

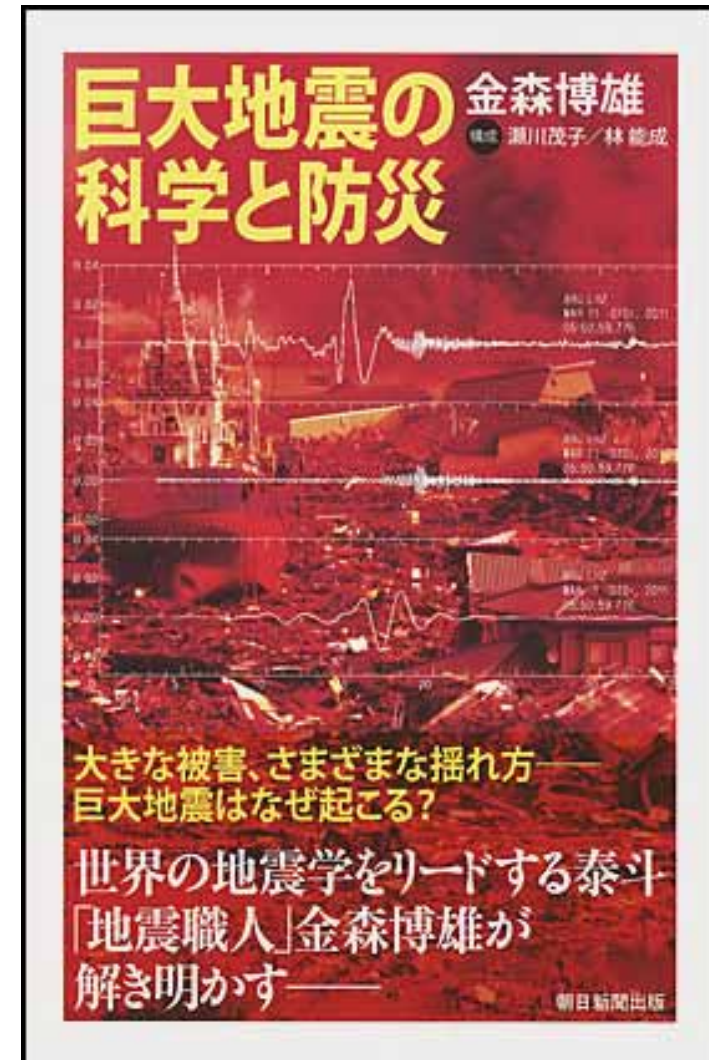


「巨大地震の科学と防災」金森博雄著における記述

安芸敬一

安芸さんは地球内部の構造をシステムティックに決める「トモグラフィー法」の開発など、新しい地震学の理論的枠組みを作った偉大な研究者です。五章で触れる「地震モーメント」という地震学にとって重要な量を、地震波形や地殻変動から計算して求めるという研究もしました。(中略)

30代で日本から米国に渡り、その後はずっと海外で研究していたこともあり、日本国内では安芸さんのことを知らない人が多いかもしれません。しかし、地震学の世界では世界的に著名な研究者で、新しい地震学を切り開いた地震学者の一人として尊敬されています。

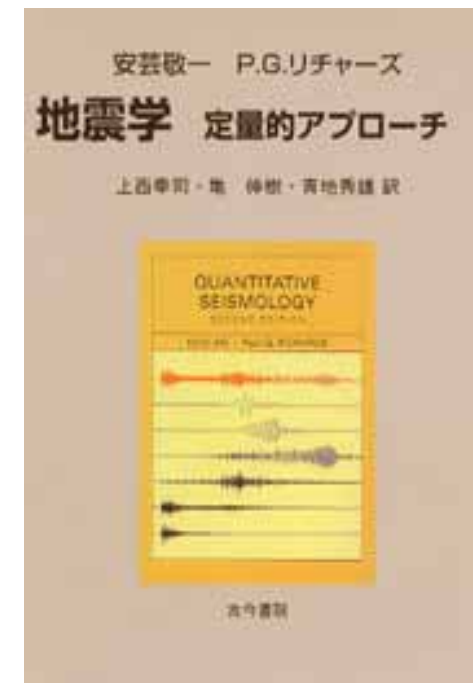
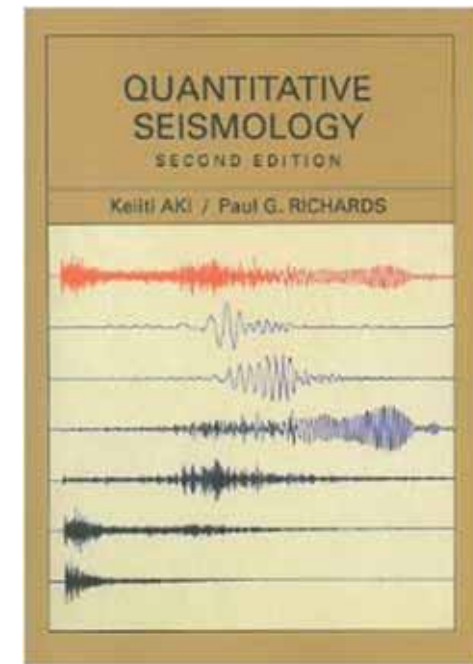


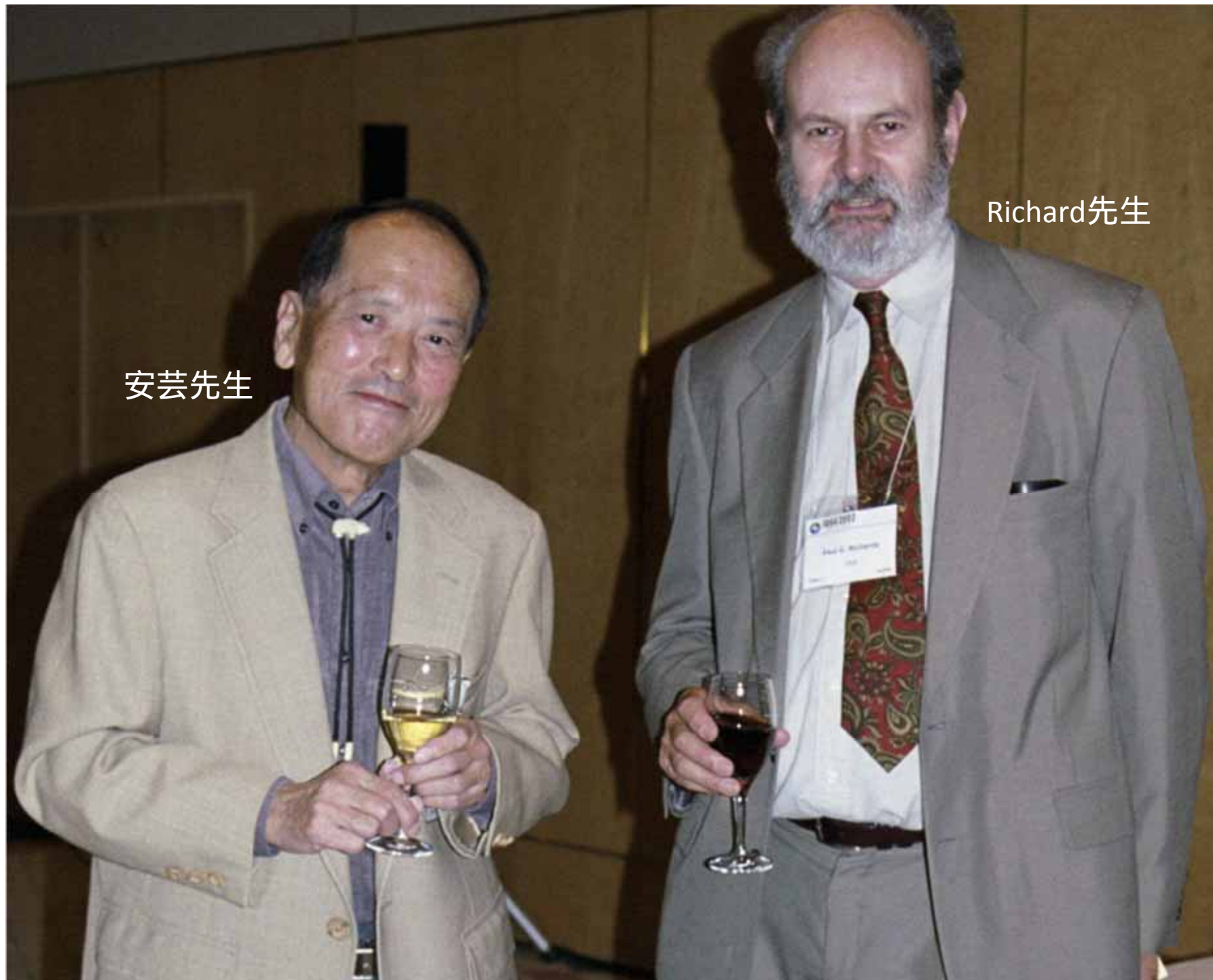
2014年科学ジャーナリスト協会賞
受賞

Quantitative Seismology: Theory and Methods,
Volumes I and II by Keiiti Aki and Paul G.
Richards. W. H. Freeman and Co., San
Francisco, 1980

Chapter 1 Introduction

Seismology is a science based on data called seismogram, which are records of mechanical vibrations of the Earth. These vibrations may be caused artificially by man-made explosions, or they may be caused naturally by earthquakes and volcanic eruptions. Both natural phenomena have strongly attracted the attention of mankind for centuries, even today arousing feelings of fear and mystery as well as our intellectual curiosity.





安芸先生

Richard先生

「地震学は地震波形記録に基づく科学である。」

この言葉は、安芸敬一の定量的地震学のIntroductionのはじめに出てくる。

同じような考えが、金森博雄の最近の著書に「新しい地震学」として書かれている。

1965年ごろに始まった**「新しい地震学」とは「波形全体を使うこと」**。それ以前の地震学は、地震波形を使っても、そのほんの一部しか使っていなかった。

つづいて以下のことが書かれている。

波形を使って地震研究をするためには、三つの技術革新が不可欠。

1. **高性能の地震計を用いた観測網の整備。** WWSSN (世界標準地震観測網) が1962年開始。
2. **物理学的理論に基づいた理論的地震波形のシミュレーション手法の開発。**
3. **理論理論的波形を計算し、また観測波形を信号処理を行うための大型高速計算機の整備。**

安芸敬一の1964年新潟地震のG wavesの研究は、まさにその先駆けとなるものであった。

1964年新潟地震の研究の地震学史上の位置づけ

地震は断層運動であることが立証された！

- 地震が断層運動であることは、今では当たり前のように考えられているが、1964年新潟地震以前は、地震学の専門家の間でも必ずしも共通に理解にはなっていなかった。
- 1891年濃尾地震で、80kmにも及ぶ根尾谷断層が出現し、1905年サンフランシスコ大地震で、400kmに渡ってサンアンドレアス断層が現れるなど、地震が断層運動に関係していることは知られていたが、これらの断層の動きは地震の原因かあるいは結果であるかをめぐって意見が分かれていた。
- また断層運動の直感的な理解から、地震の震源に作用する力がsingle coupleと考えられていたのに対し、実際の地震観測ではP波とS波の位相は4象限型で、double coupleの性質を示しており、地震が断層運動であるという考えが受け入れにくい状況があった。
- この問題を一気に解決したのが、丸山によるせん断型食い違いとdouble coupleの等価性に関する理論的な章性である(Maruyama, 1963)。Burridge and Knopoff(1964)は、より一般化して非等方不均質媒質において等価性が成り立つこと証明した。

参考:三雲 健 「地震のメカニズムを追って」、京大防災研年報, No.35A, 1992



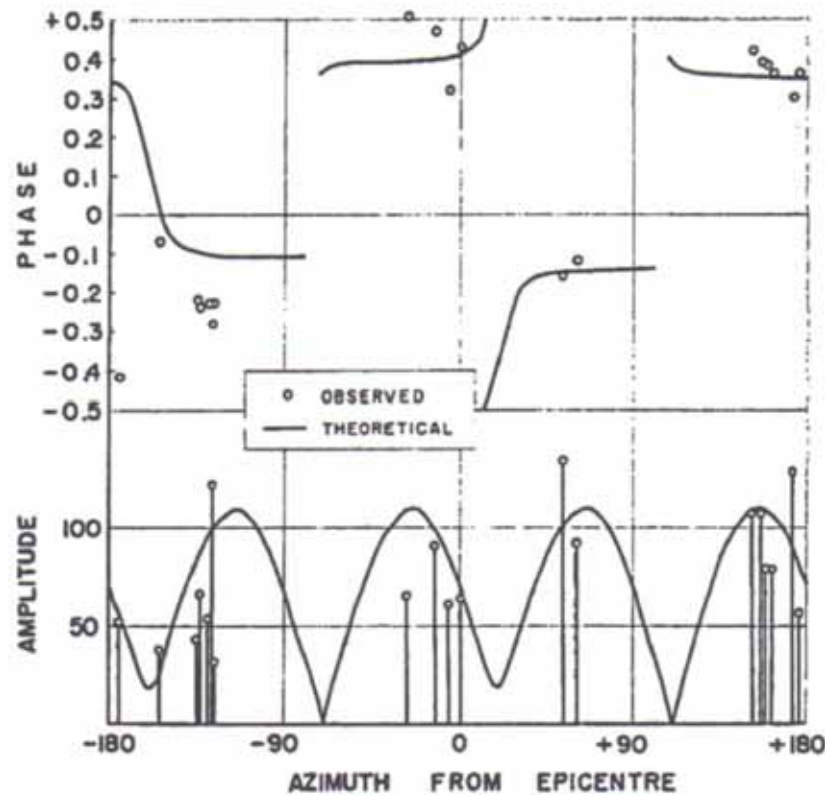
石田先生

三雲先生

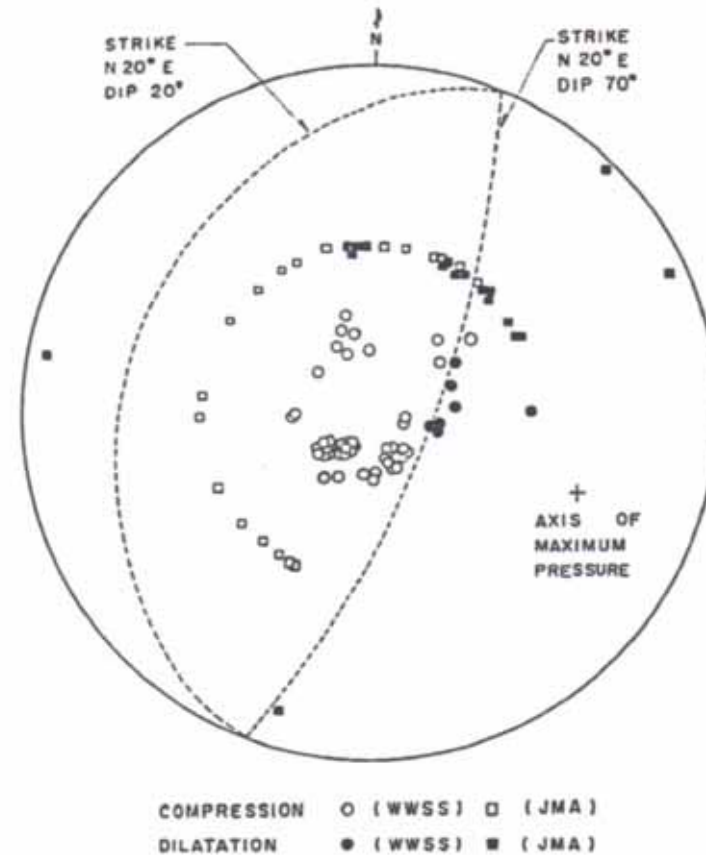
丸山先生

安芸敬一による1964年新潟地震のG wavesの発生と伝播の研究 (1)

[Aki, K. \(1966a\)](#): “Generation and propagation of G waves from the Niigata earthquake of June 16, 1964: Part 1. A statistical analysis”, *Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo*, **44**, 23-72.



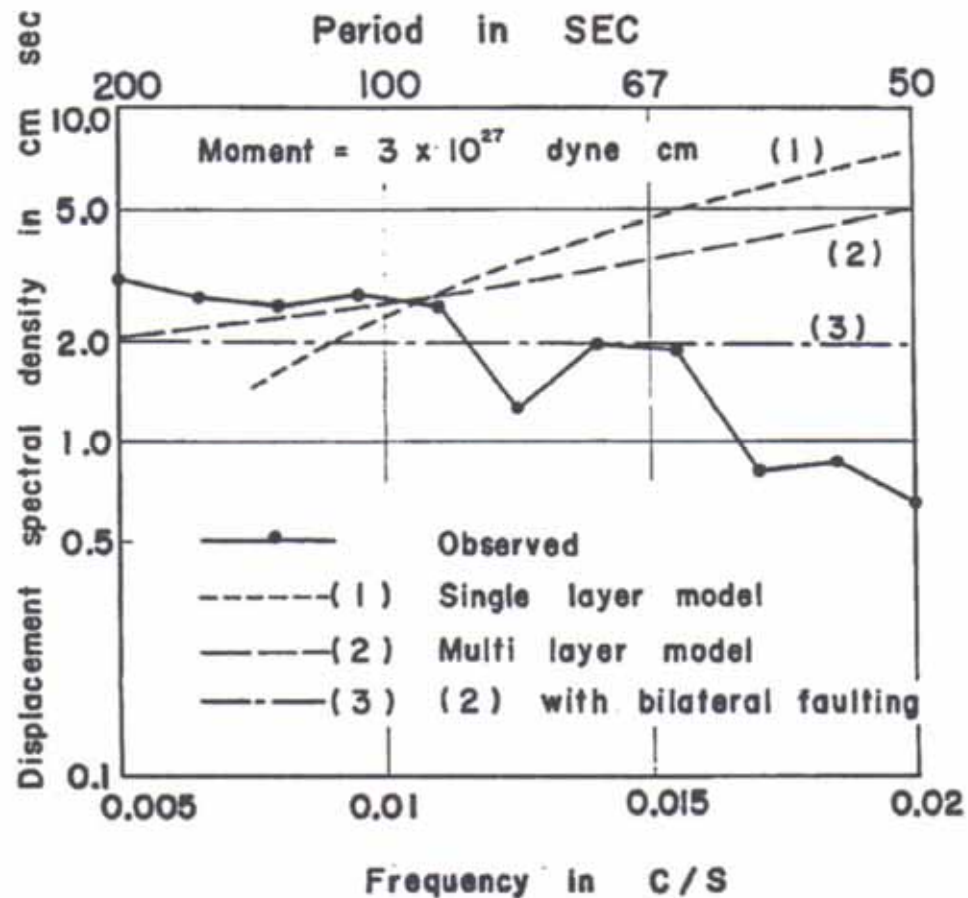
200秒のG wavesの震源位相と振幅に関する観測 (WWSSN) と理論の比較。



P波初動方向の震源急への投影 (上半部)

安芸敬一による1964年新潟地震のG wavesの発生と伝播の研究 (2)

[Aki, K. \(1966a\)](#): “Generation and propagation of G waves from the Niigata earthquake of June 16, 1964: Part 2. Estimation of earthquake moment, released energy and stress drop from the G wave spectra”, *Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo*, **44**, 73-88.



10,000 km の距離に基準化したG wavesの変位スペクトル密度の観測と理論の比較

安芸敬一による1964年新潟地震のG wavesの発生と伝播の研究

(3)断層すべり運動とダブル・カップル震源の動的等価性

Burridge and Knopoff (1964)に従って、 x_3 の上の媒質が下に対して接線方向の変位を仮定する。

$$[U_1] = \delta(x_1)\delta(x_2)H(t)$$

$$[U_2] = 0$$

$$[U_3] = 0$$

上のdislocationに等価なbody forcesは以下で表される

$$e_1(x_1, x_2, x_3, t) = -\mu\delta(x_1)\delta(x_2)\delta(x_3)H(t)$$

$$e_2(x_1, x_2, x_3, t) = 0$$

$$e_3(x_1, x_2, x_3, t) = -\mu\delta(x_1)\delta(x_2)\delta(x_3)H(t)$$

(3)断層すべり運動とダブル・カップル震源の動的等価性(続)

ダブル・カップル震源のモーメントは以下で表される。

$$\begin{aligned}M_0 &= \iiint e_1(x_1, x_2, x_3, t) x_3 dx_1 dx_2 dx_3 \\ &= -\mu \int [U_1] dx_1 dx_2 \int x_3 \delta(x_3) dx_3 \\ &= \mu \int [U_1] dx_1 dx_2\end{aligned}$$

上の積分は断層面積と平均断層変位の籍で表される。

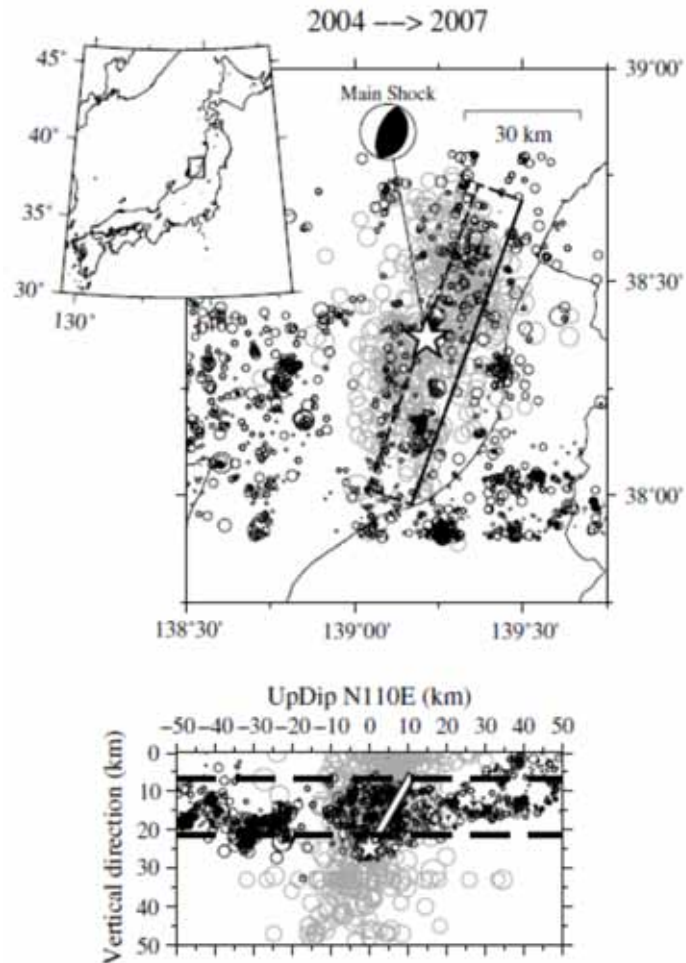
$$M_0 = \mu \bar{u} S$$

従って、平均断層変位は上の式から得られる。

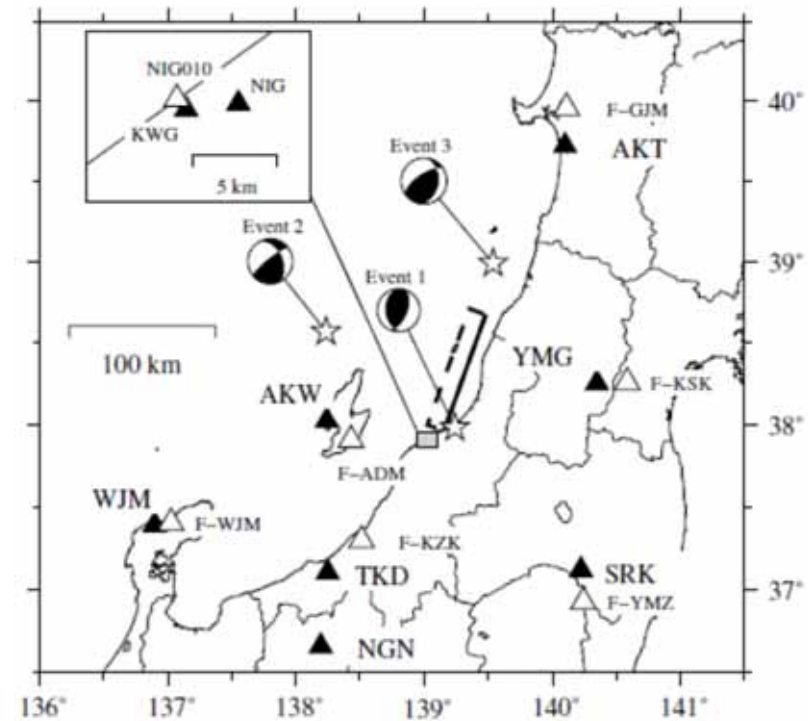
$$\begin{aligned}\bar{u} &= \frac{3 \times 10^{20} (Nm)}{3.7 \times 10^{10} (Pa) \times 20 \times 100 \times 10^6 (m^2)} \\ &= 4.0(m)\end{aligned}$$

1994年新潟地震の破壊過程 (Shiba and Uetake, 2011)

近地で得られた気象庁の機械式変位計(JMA-50/51/52-type)の記録をデジタル化したものを用いる。

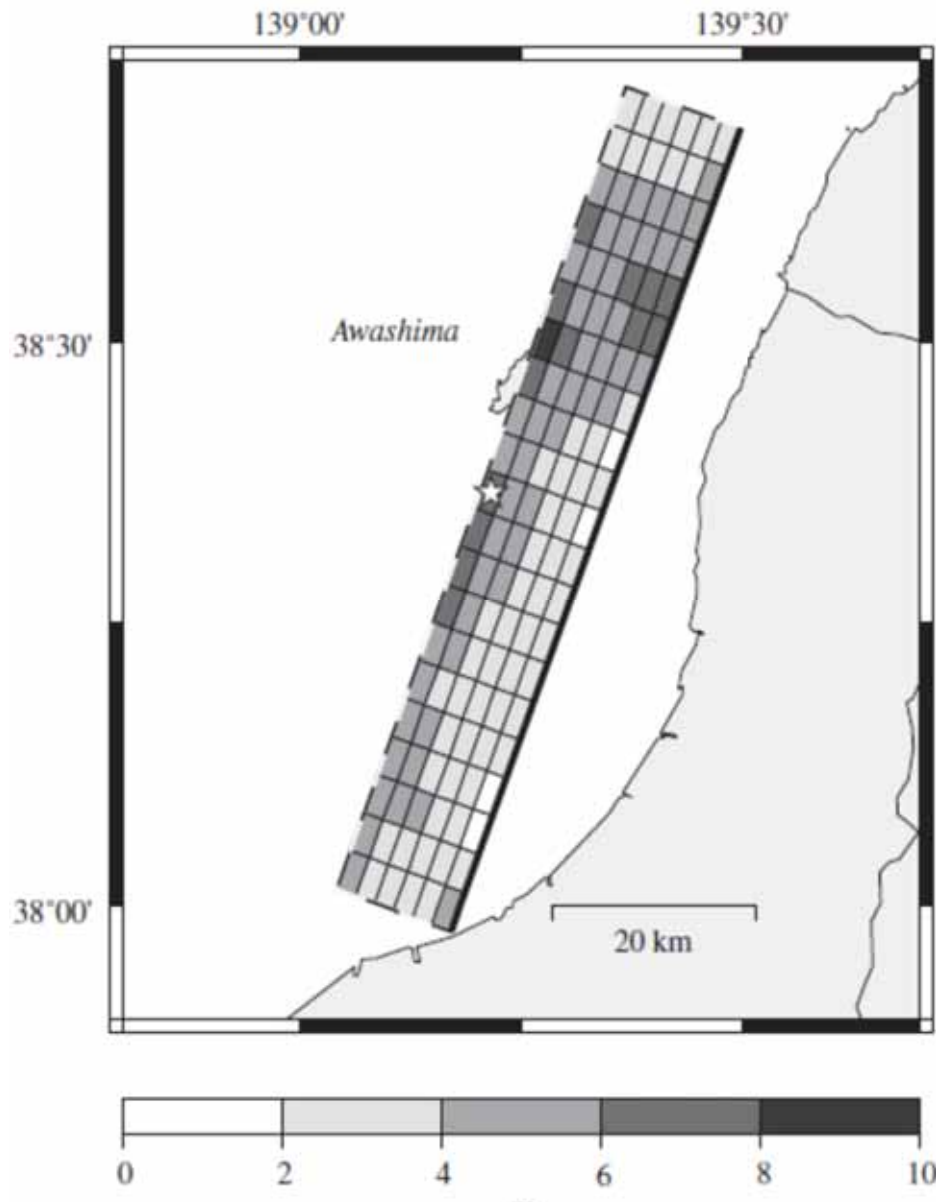


1964年新潟地震の余震の震源の再決定結果と最近の地震の震源分布の比較



インバージョンに用いた観測点()と想定断層面(長方形)

1964新潟地震のときの推定されたたすべり分布



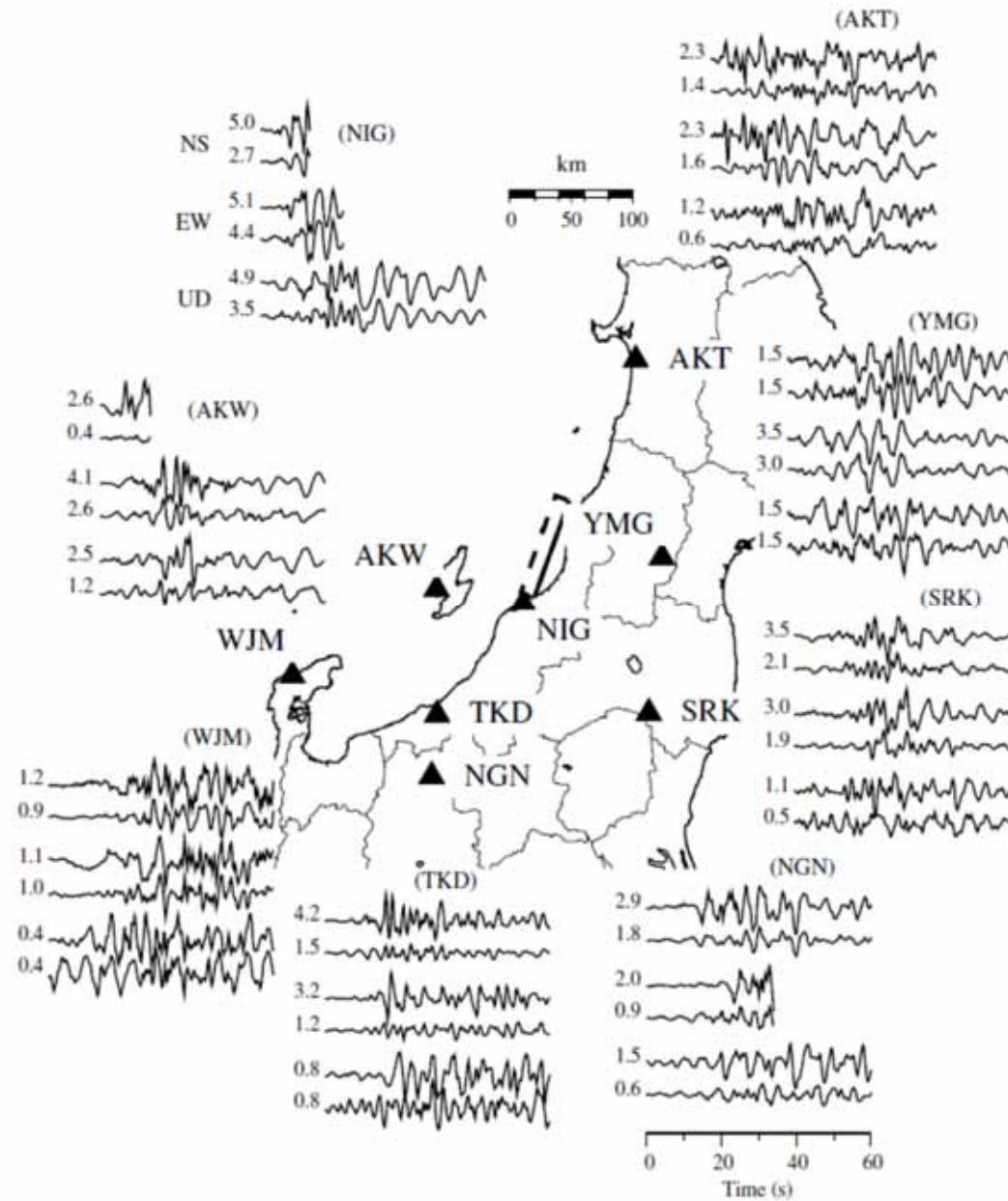
Shiba and Uetake (2011)

地震モーメント: 3.32×10^{20} Nm
(Aki: 3.0×10^{20} Nm)

断層面積: 84×24 km²
(Aki: 100×20 km²)

平均断層変位: 4.1 m
(Aki: 4.0 m)

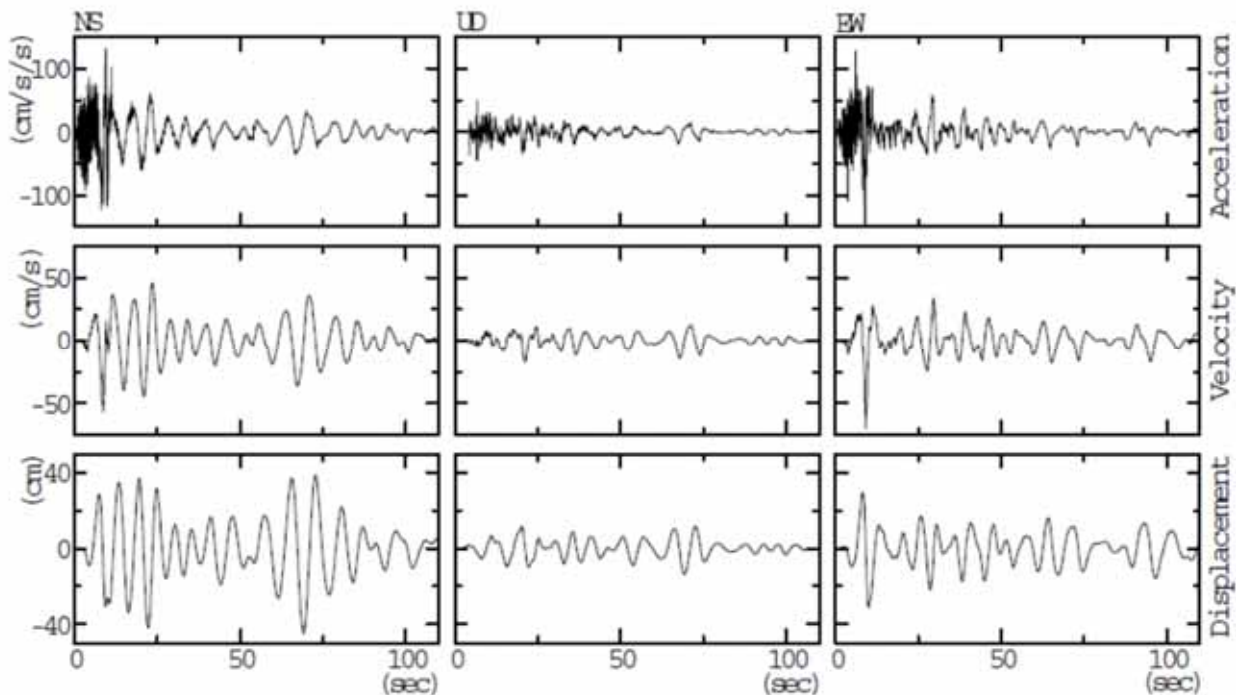
合成波形と観測波形の比較



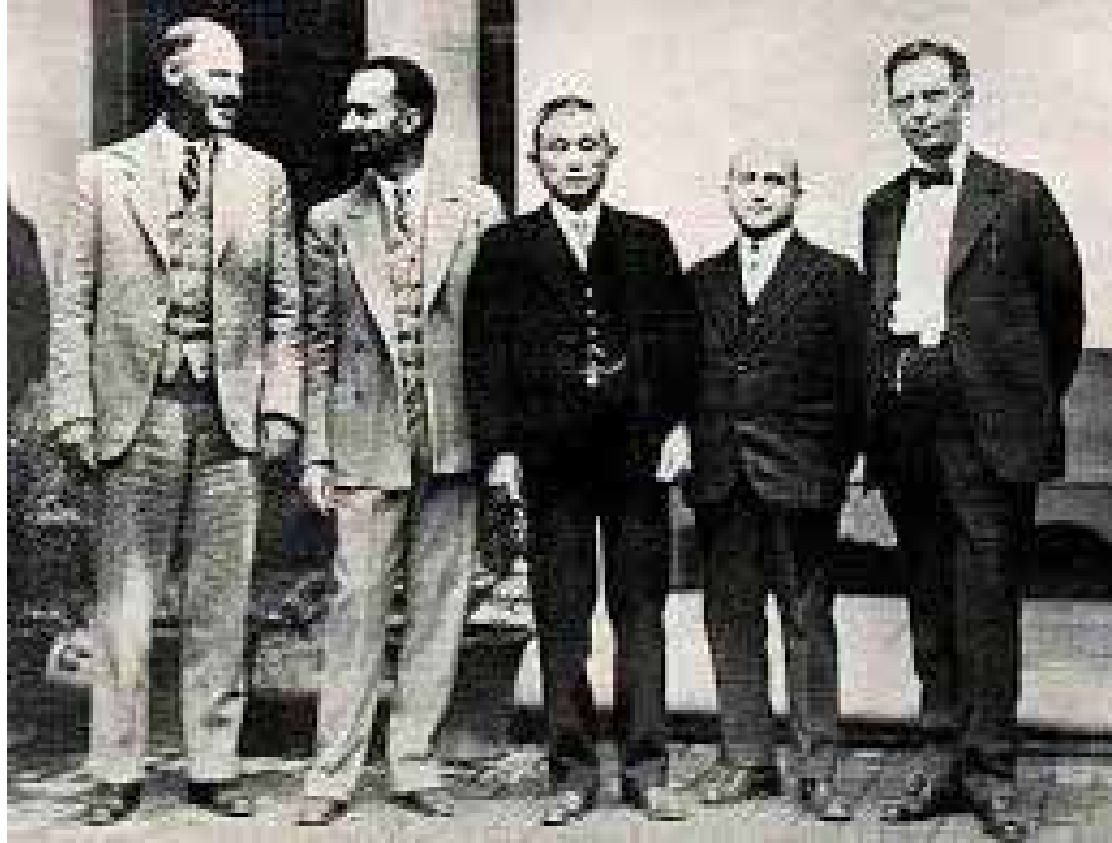
各観測点で成分毎
上が観測波形
下が合成波形
数値はピーク値。

1994年新潟地震のとき新潟市川岸町で得られた強震動 (工藤, 2014)

- 日本ではじめて震源近傍において強震動加速度計 (SMAC) による強震動記録が得られた。それまでは機械式の低感度変位形で強震動記録が得られていたが、大振幅で飽和してしまい、地震動の全体像はわからなかった。
- 得られた波形は、短周期の波から地盤が液状化することにより急速に長周期化しており、液状化の研究に大きな貢献をした。
- この貴重な強震加速度記録は、工藤によりデジタル化され、地震工学のみならず地震学の研究にも重要なデータとなっている。
- 川岸町の強震動記録は2014年東京大学地震研究所から数値データとして公開されている。



**強震計の生みの親：
末広恭二
(東大震研初代所長)**



末広は、1932年、アメリカの土木学会から講演依頼を受け、「地震工学 (Engineering Seismology)」の演題で、「日本における地震学の歴史」「地震工学」「地震時の建物の振動」という内容で講演し、地震動加速度の直接記録に基づいた耐震設計の資料作りを強調。その提言はアメリカではさっそく生かされ、数十台の強震加速度地震計が配置され、翌年のロング・ビーチ地震の記録を取ることに成功。一方日本において全国に配置されるのは、第二次大戦後。「地震研究所の歩み」より。

Kei Aki's SSA presidential address in 1980

- Our goal of strong motion seismology is to compute seismic motion expected at a specific site of an engineering structure when the fault mapped by geologists breaks.
- This problem is fundamentally important for understanding a basic tectonic process, and its solution will be useful for society.
- I believe that this goal will be accomplished in the 1980's.
- Being a seismologist now is really satisfying. You can enjoy fundamental science, while contributing to society.

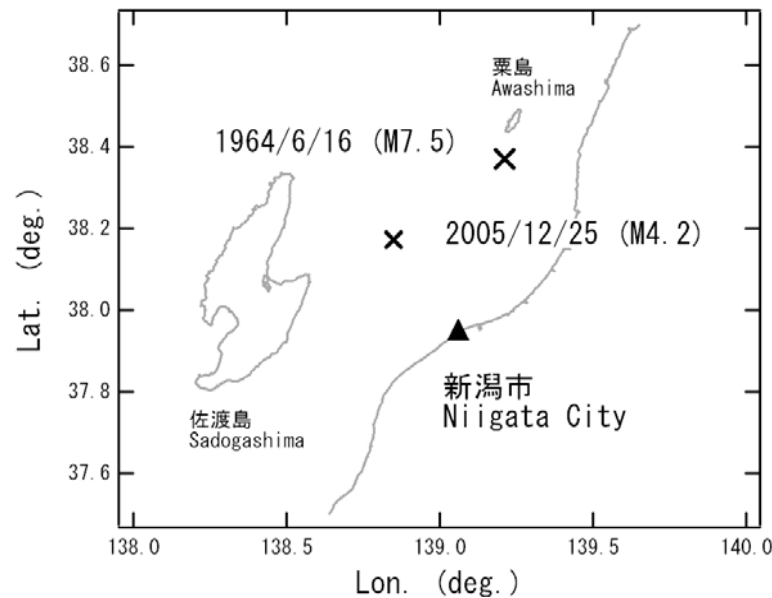


After Geotime March 2005.

This picture is Kei Aki at 2004 AGU fall meeting, when he was awarded the William Bowie medal by the American Geophysical Union (AGU).

1994年新潟地震のとき新潟市川岸町で得られた強震動波形の再現 (野津・安田・石本・山田, 2014)

	設定値	設定理由
サイト増幅特性G(f)	新潟港の強震観測地点「新潟-G」でのG(f)	<ul style="list-style-type: none"> ・新潟-GとK-NET新潟でサイト増幅特性に大きな違いはない ・工学的基盤までの土質データが利用可能
位相特性	2005/12/25, M4.2 K-NET新潟	・震源位置の観点から最も適切
多重非線形効果	$v_1=0.5, v_2=0.00$	川岸町の記録の再現性



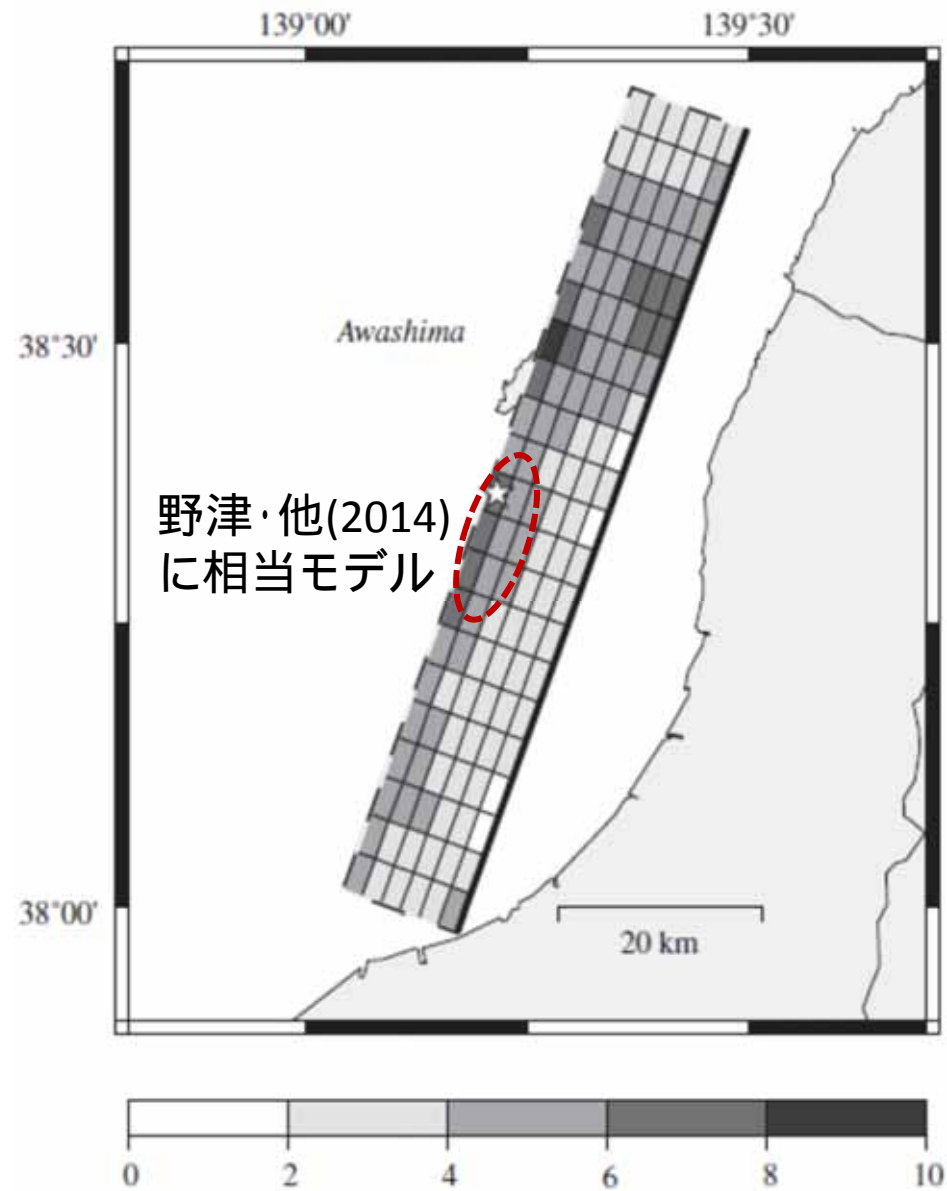
野津・他 (2014)の疑似点震源モデル

	設定値	設定理由
サブイベントの数	1個	川岸町の記録に見られる顕著なパルスの数
サブイベントの位置	= 破壊開始点とした 東経: 139.212 ° 北緯: 38.370 ° 深さ: 34km	他に根拠がないため, やむを得ずこのようにした.
地震モーメント	1.0×10^{26} dyne-cm	川岸町の記録の再現性
コーナー周波数	0.2Hz	川岸町の記録の再現性

野津・他 (2014)の疑似点震源モデルに対する入倉メモ

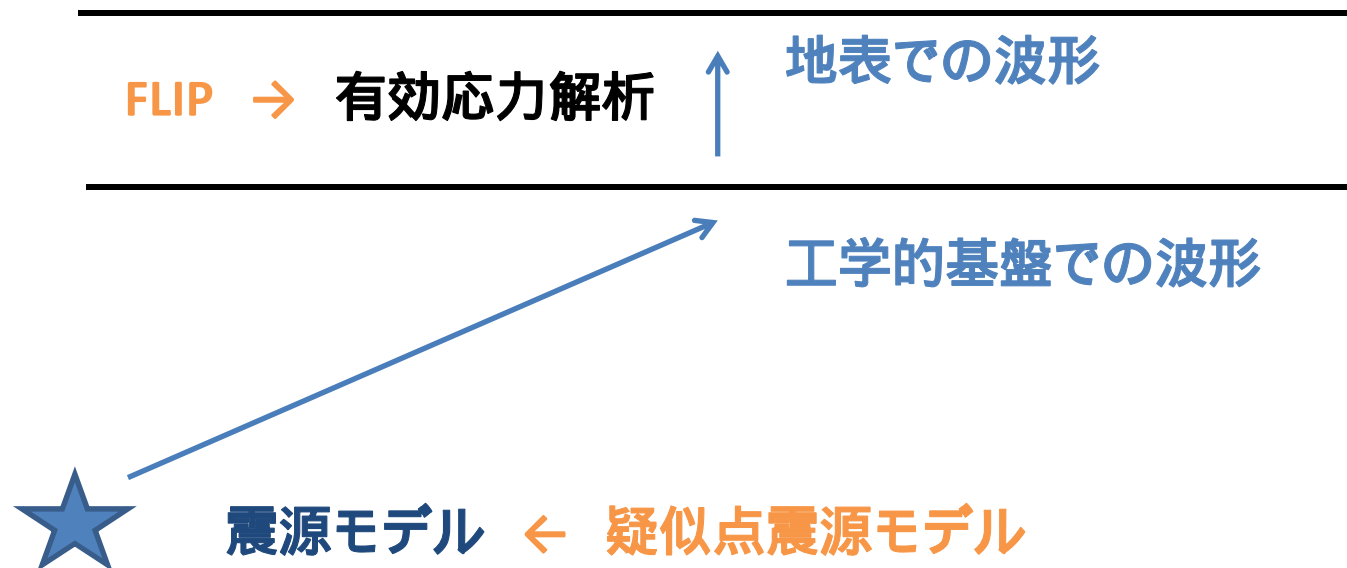
- ここでは、 M_0 1.0×10^{29} Nm, $f_c = 0.2$ Hzの特性を持つ ω^2 スケーリングに従う震源モデルを仮定。この点震源の M_0 はShiba and Uetake (2011)による震源断層全域の M_0 の約1/30に過ぎない。
- このモデルの震源半径は、Brune (1971)式を仮定すると、約7 km、震源面積は約150 km²。
- 応力降下量は、Eshelby (1957)の円形クラックのための式を用いると、約13MPa。この応力降下量の値は、内陸の活断層地震の強震動生成域での値とほぼ同じ。
- この震源モデルは、1964年新潟地震のときの新潟市川岸町での強震動再現に有効であるが、広域の強震動の再現には適していない。

野津・他 (2014)の震源モデル相当の破壊域

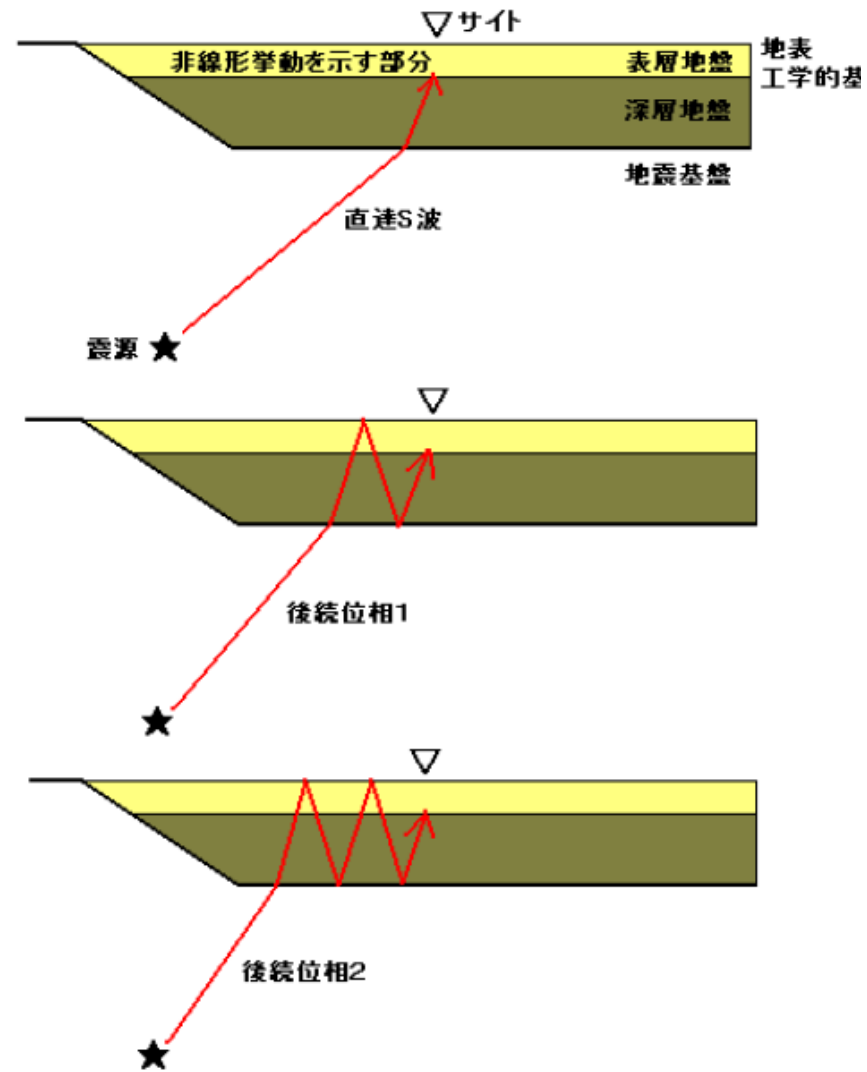


表層地盤のモデル化 (野津・他, 2014)

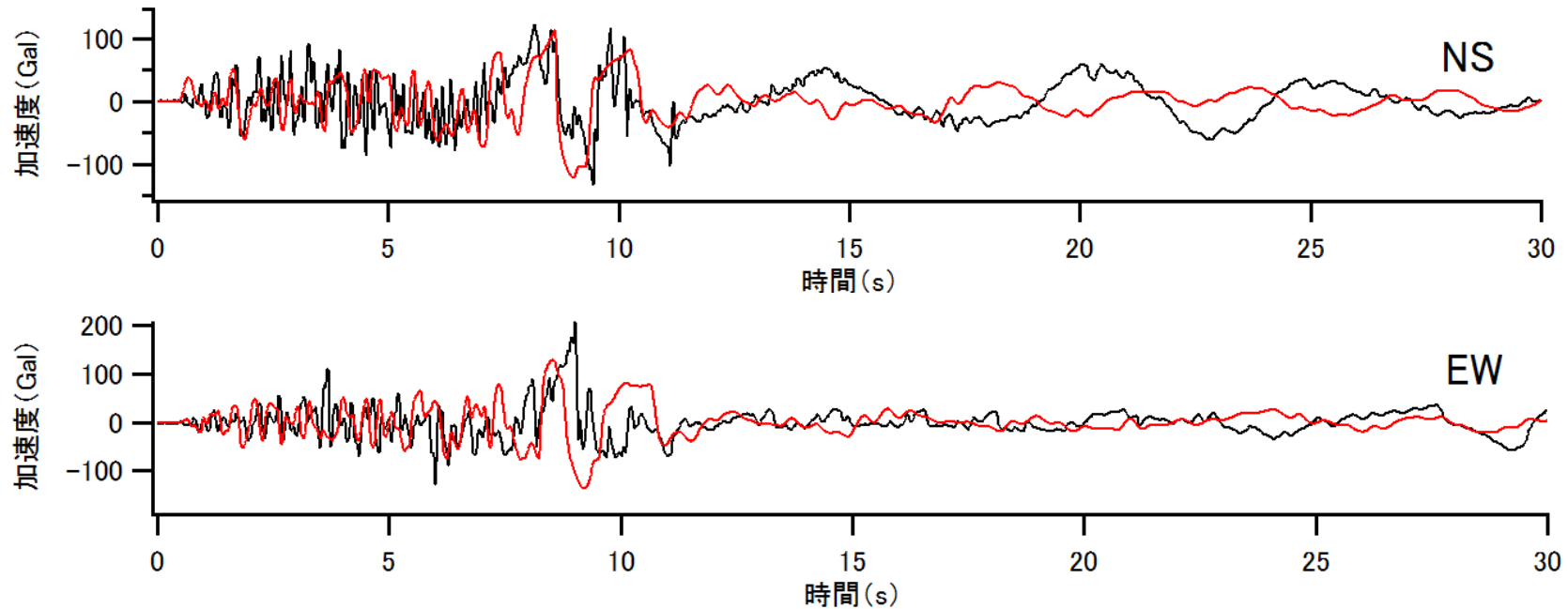
そこで、本研究では、震源モデルに基づいて工学的基盤での地震動を計算し、これをもとに有効応力解析を行った結果の地表での地震動が強震記録と整合していれば、工学的基盤での地震動には信頼性があるとの立場から、工学的基盤での地震動の推定を行った。



多重非線形効果(野津・盛川, 2003)



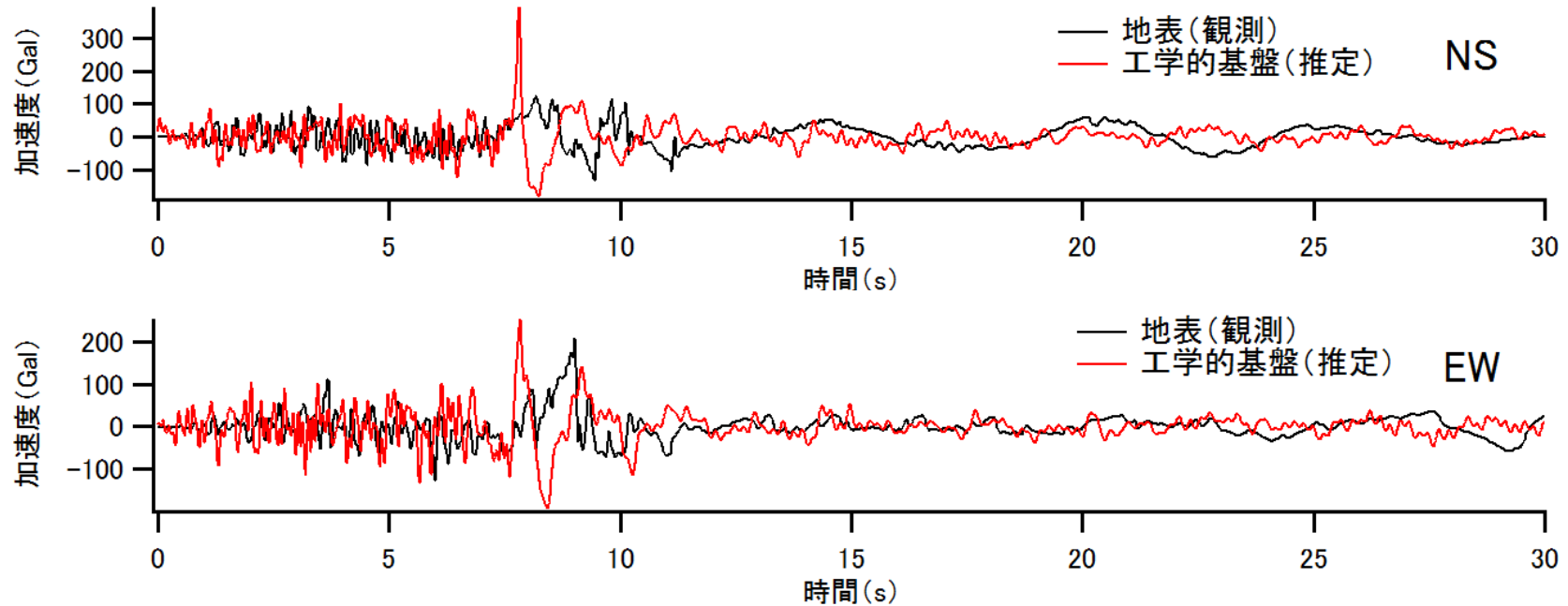
解析結果



黒：観測 赤：計算

- ・最初から7秒付近までは短周期成分が卓越
 - ・その後、8秒付近で大振幅のパルス状の地震波が到来
 - ・その後は長周期に転ずる
- という観測波の基本的な特徴は概ね再現できている。

工学的基盤波



黒：観測(地表, 厳密には地階) 赤：計算(工学的基盤)

・工学的基盤での地震動は, 地表よりも最大加速度は大きく周期は短かったと推定される

まとめ 1

- 1964年新潟地震は、震源近傍域ではじめて強震動が振り切れずに記録される(強震計は1953年に開発された)とともに、1962に設置された世界標準地震観測網(WWSNN)で長周期の地震波形が記録された。
- 新潟市川岸町で液状化被害を受けたアパートの地下1階に置かれた強震計で得られた強震加速度記録は、世界で最初の液状化サイトの記録で、地盤の液状化のメカニズムの研究に大きく寄与した。
- 世界標準地震観測網で得られたラブ波記録を用いて、安芸敬一は地震の規模を物理量である「地震モーメント」を計算した。
- この「地震モーメント」から推定される断層変位量が、震源近傍域で確認された地殻変動の量と一致することで、それまで仮説とされていた「地震が断層運動である」ことが定量的に立証された。

まとめ 2

- 最近になって、近地域で観測された強震変位記録を用いて、波形インバージョンにより断層すべり分布の評価がなされた。推定された「地震モーメント」や「平均断層変位量」は、安芸により計算されたものとほぼ一致している (Shiba and Uetake, 2011)。
- また、新潟市川岸町の強震加速度記録は、 ω^2 モデルを仮定した疑似点震源モデルによる基盤入力波と表層震動の多重非線形効果の解析で、液状化の影響を受けた記録が再現可能とされる(野津・他, 2014)。
- 長周期の強震動記録を用いて推定された不均質震源断層モデルの断層パラメータと短周期の強震動記録から推定された断層モデルは、現時点では必ずしも整合的ではない。さらなる検討が必要とされている。