

(36) 断層震源研究のための強震観測点の最適配置

OPTIMUM STRONG-MOTION STATION-ARRAY GEOMETRY FOR EARTHQUAKE SOURCE STUDIES

飯田昌弘*

Masahiro IIDA

We come to understand that near-source strong-motion records are heavily controlled by source effects even in the high-frequency range of primary concern in the earthquake engineering community. Source inversion is the most effective way to evaluate source effects. But the biggest problem associated with source inversion is that the solution cannot be uniquely determined. The true solution is not recovered, and the goodness of recovery is greatly dependent upon the strong-motion station array. The resolving power of the station array is defined as the accuracy of a source inversion, and it is measured using our method. This is helpful for understanding the limitations of source inversion and future strong-motion array development for source studies.

Key Words: Strong motion, Earthquake source inversion, Station array, Resolving power

1. 序

地震の最大被害は震央地域で起こる。震央で記録される強震動は、主に震源と観測点付近の地盤条件で決まる。この2つの要因のうち、地震工学で重要な高周波成分に対応する震源の効果については、これまではっきりと実証されてこなかったが、Hartzellと飯田¹⁾は、震源インバージョン法を、1987年にカリフォルニア州で発生したWhittier Narrows地震に適用して、その効果を実証した。強震動に及ぼす震源の効果を明確に評価していくうえで、震源インバージョンは最も有効な手段であろう。

一方で我々は、同一の地震に対して適用された震源インバージョンの結果が、かなり矛盾することがあることにすでに気づいている²⁾⁻⁴⁾。この問題の本質は、インバージョンの解の一意性が保障されないので、真の解を復元できないところにあると思われる。OlsonとAnderson(1988)⁵⁾は、彼らのインバージョン法において解の一意性を得るための拘束条件を加えたが、真の解を復元できないこと、復元の程度は観測点アレイの形状におおいに依存することを示した(図-1)。他方、飯田ら(1988)⁶⁾は、1986年に開発した方法⁷⁾を使って、アレイ形状の効果を、インバージョンの精度という1つのパラメータで表現した。これら2つの研究で使用されたグリーン関数はともに単純すぎるので、十分に実際の状態を反映していないかもしれないが、とにかくアレイ形状の効果がたいへん大きいことが明確になった。

* 工博 東京大学地震研究所助手

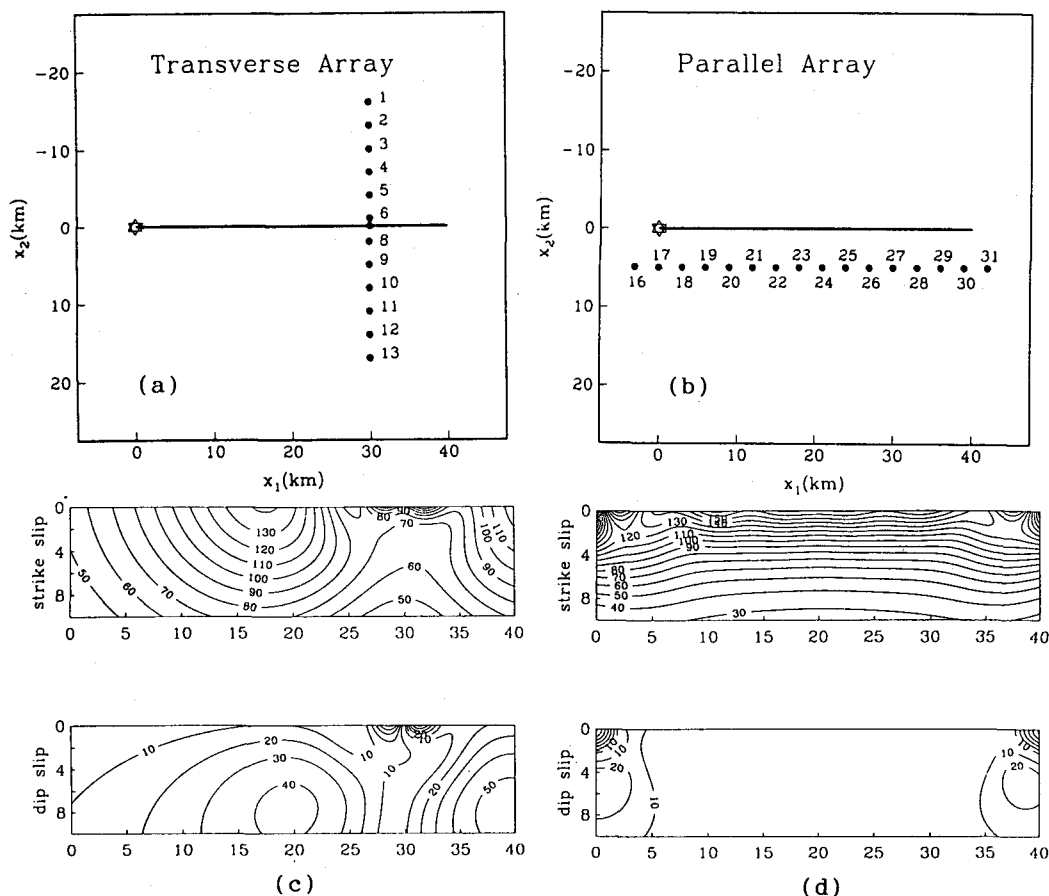


図-1 効果がテストされる2つのアレイ：(a)断層に直交するアレイと (b)断層に平行なアレイ。星印は震央であり、破壊は伝播速度一定(2.9km/sec) で進行し、くいちがい量は断層面上で一様(Strike-slip成分100cm,Dip-slip成分0cm)と仮定する。断層上端は深さ 2kmである。(c)断層面に直交するアレイの理論記録を使って復元されたすべり量と (d)断層に平行なアレイを使って復元されたすべり量。復元の程度はアレイ形状に大きく依存することがわかる(Olson とAndersonによる⁵⁾)。

2. 強震計アレイの解像力の評価

震源インバージョンにおける解の一意性は、すぐに解決できる問題ではない。現段階でなすべきことは、強震計アレイの解像力をほぼ正確に測定することである。このことは2つの目的に役立つ。1つは震源インバージョンの限界を評価できることであり、もう1つは震源の研究のためのアレイ観測網の、将来に向けての展開や既存のものの改良に有効であることである。

解像力評価の方法は別の論文で⁸⁾ 詳しく述べられているので、ここではごく概要を述べるにとどめたい。アレイの解像力を、インバージョンの精度と定義し、Wolberg の予測理論⁹⁾ を使って、断層パラメータの値を求めるための計算なしに効率的に評価する。断層を小断層に分割し、各小断層に対して半無限媒質に対する厳密解(変位)を計算する。各小断層に対し、単純で共通な震源時間関数を仮定する。未知パラメータは、一般の震源インバージョンの研究と同様、各小断層の地震モーメントと破壊開始時刻であり、最小二乗法を

使って評価を試みる。その際、独立な既知パラメータに不確定性を仮定し、すべての小断層で地震モーメントを評価する際の誤差の標準偏差を求め（その値は地震モーメントで規格化される）、その最大値をインパージョンの精度とする。

3. 強震観測点の最適配置¹⁰⁾

1978年に開催された強震計アレイに関する国際ワークショップにおいて、典型的な3種類の地震断層に対して、経験的な判断に基づき、望ましいと思われるアレイ形状が初めて提案された(図-2)¹¹⁾。しかしながら今日まで、アレイ形状の効果に関する定量的な議論はほとんどなされてこなかった。1988年までにな

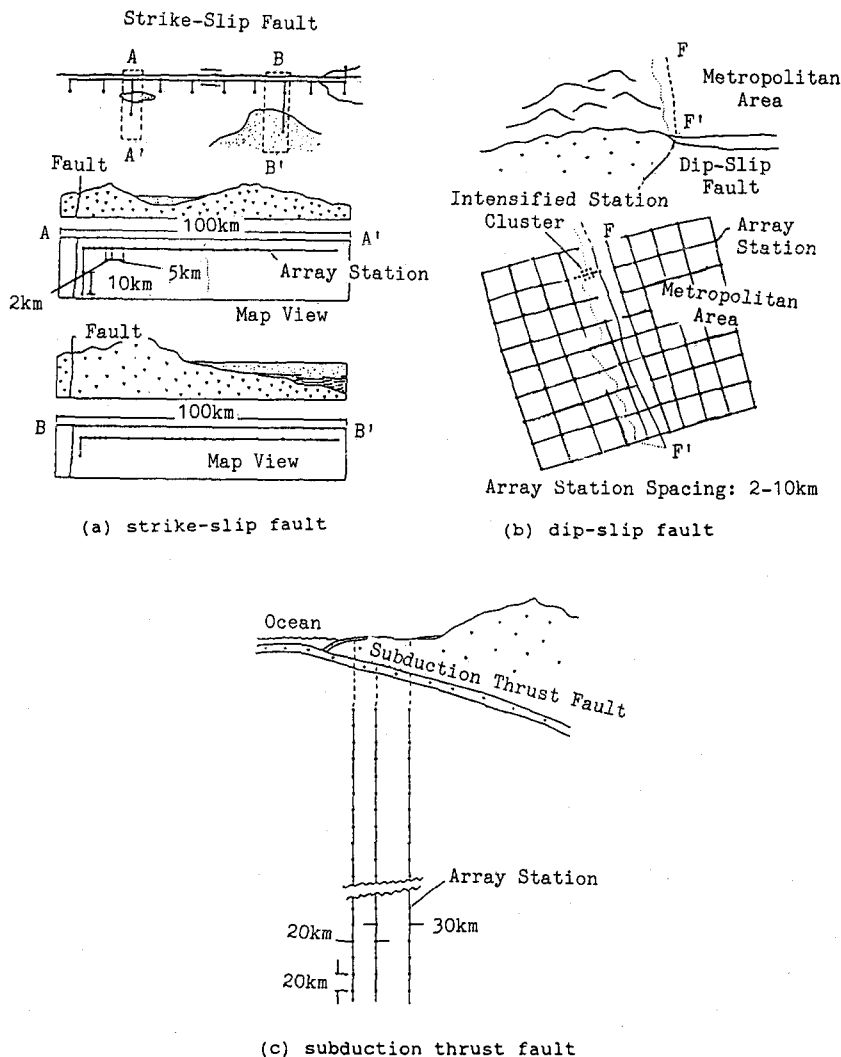


図-2 1978年の強震計アレイに関する国際ワークショップ¹⁰⁾において提案された、震源メカニズムと波動伝播の研究に望ましいアレイ形状。(a)Strike-slip断層。(b)Dip-slip断層。(c)Subduction thrust断層。

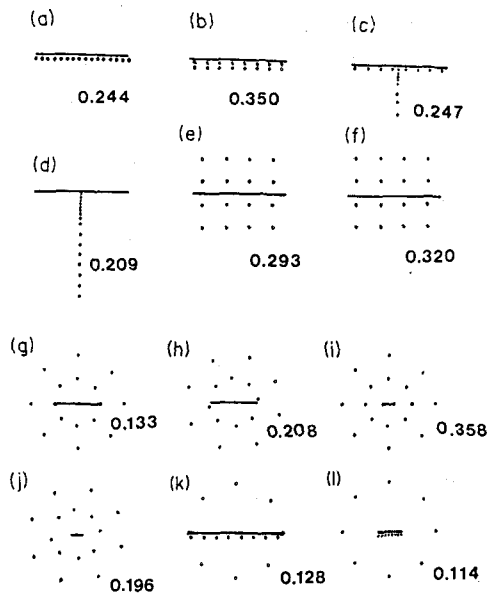


図-3 Strike-slip 断層に対する最適アレイ形状を得るために試されたアレイ形状。水平な線分は断層を、点は観測点を示す。数字は、インバージョンの精度を表わす。例えば、0.244 は24.4%の誤差である。

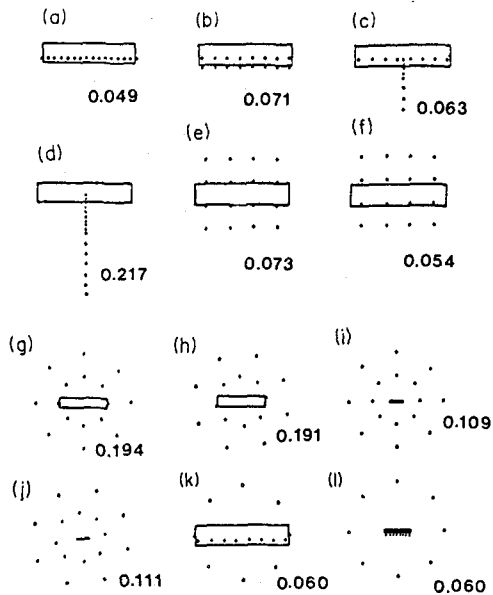


図-4 Dip-slip断層に対する最適アレイ形状を得るために試されたアレイ形状。長方形は断層を、点は観測点を示す。数字は、インバージョンの精度を表わす。

された例外的な研究は、すでに紹介したOlson とAndersonの研究(1988)⁵⁾と、飯田らの研究(1988)⁶⁾である。ただし、これらの研究では、実用的なグリーン関数を使用されなかった(いずれも無限媒質を使用)ので、結果の信頼性に問題が残る。今回は、半無限一様媒質の厳密解を使用するが、これが実用的なグリーン関数であることを、物理波のシミュレーションで確認した⁸⁾。

観測点の最適配置を評価する際に使用される3種類の断層は、国際ワークショップで使用され、飯田らの研究(1988)⁶⁾でも使用されたものである(図-5)。アレイ観測点の数を16に固定して、最適配置を試行錯誤で評価した。「最適」という言葉の意味は、同一の観測点数、同一の破壊様式に対して、インバージョンの解が最も精度よく求められることを意味する。各断層に対してさまざまなアレイ形状がテストされた。St

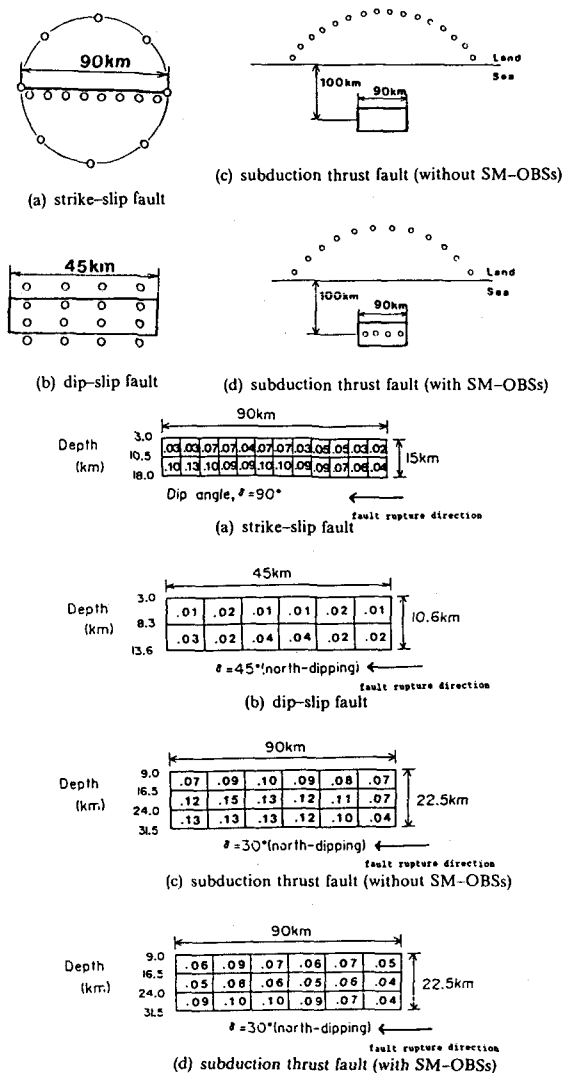


図-5 Strike-slip 断層、Dip-slip断層、Subduction thrust 断層(海底強震計がある場合とない場合の両方を検討)に対する最適アレイ形状とそのアレイを使用した際の断層面上での不確定性(地震モーメントを評価する際の誤差の標準偏差)の分布。不確定性は断層面上で比較的一様であることがわかる。

rike-slip 断層に対するものを図-3に、Dip-slip断層に対するものを図-4に示す（海岸から離れたSubduction thrust 断層に対するアレイ形状の効果は小さいので、試された形状及びその結果は省略する）。図-3、図-4に示された数字は、得られたインバージョンの精度である。さらにシミュレーションを追加したのち、これら3種類の断層に対する最適アレイ形状を図-5にまとめた。これによると、Strike-slip 断層に対する観測点配置としては、断層近傍に観測点をもちながら方位カバーのよいものが望ましく、Dip-slip断層では格子状の配置がよいようである。Subduction thrust 断層では工夫の余地が少ない。

参考文献

- 1) Hartzell, S. and Iida, M.: Source complexity of the 1987 Whittier Narrows, California, earthquake from the inversion of strong motion records, J. Geophys. Res., Vol.95B, pp.12475-12485, 1990.
- 2) Olson, A.H. and Apsel, R.J.: Finite faults and inverse theory with applications to the 1979 Imperial Valley earthquake, Bull. Seism. Soc. Am., Vol.72, pp.1969-2001, 1982.
- 3) Hartzell, S.H. and Heaton, T.H.: Inversion of strong motion and teleseismic waveform for the fault rupture history of the 1979 Imperial Valley, California, earthquake, Bull. Seism. Soc. Am., Vol.73, pp.1553-1583, 1983.
- 4) Archuleta, R.J.: A faulting model for the 1979 Imperial Valley earthquake, J. Geophys. Res., Vol.89, pp.4559-4584, 1984.
- 5) Olson, A.H. and Anderson, J.G.: Implications of frequency-domain inversion of earthquake ground motions for resolving the space-time dependence of slip on an extended fault, Geophysical Journal, Vol.94, pp.443-455, 1988.
- 6) Iida, M., Miyatake, T. and Shimazaki, K.: Optimum strong-motion array geometry for source inversion, Earthq. Eng. Struct. Dyn., Vol.16, pp.1213-1225, 1988.
- 7) Miyatake, T., Iida, M. and Shimazaki, K.: The effects of strong-motion array configuration on source inversion, Bull. Seism. Soc. Am., Vol.76, pp.1173-1185, 1986.
- 8) Iida, M., Miyatake, T. and Shimazaki, K.: Relationship between strong-motion array parameters and the accuracy of source inversion, and physical waves, Bull. Seism. Soc. Am., Vol.80, pp.1533-1552, 1990.
- 9) Wolberg, J.R.: Prediction Analysis, D. Van Nostrand, Princeton, New Jersey, 1967.
- 10) Iida, M.: Optimum strong-motion array geometry for source inversion -- II, Earthq. Eng. Struct. Dyn., Vol.19, pp.35-44, 1990.
- 11) Iwan, W.D. (Editor): Strong-motion Earthquake Instrument Array, Proc. Int. Workshop Strong-motion Earthquake Instrument Arrays, Honolulu, Hawaii, 1978.