

強震動予測とアスペリティ

入倉孝次郎（愛知工業大学）

1. はじめに

地震は地殻やマントル上部に先在する固着した亀裂面、すなわち断層面、の近傍に蓄えられた応力が急激に解放され、それにより波動（地震波）が地球内部を伝わり、地表面に揺れ（地震動）をもたらす現象である。断層面で応力が解放される結果として断層面を境にずれ（食い違い）が引き起こされる。地震時の断層面でのずれ、断層すべり、は広帯域地震計で観測された遠地地震記録や強震計による近地記録を用いてインバージョン問題として推定される。これらのインバージョンによる推定された断層面のすべりの分布は一様ではないことがわかってきた。このことは断層面に応力降下が大きいところと小さいところがあることに意味している。応力降下が大きいところは歪みエネルギーの蓄積が大きい、すなわち地震発生前に断層面が強く固着しているところ、すなわちアスペリティ、に対応している。逆にみると、応力降下が大きい結果として、大きなすべりを生じ、そして大きな加速度をもつ強震動を発生させる、と考えられる。しかしながら、強震動の生成域はアスペリティと全く同じと扱っていいかどうかはより詳細な検討が必要となる。ここでは、アスペリティから生成される地震波の周期特性がどのような性質をもつか、観測事実と理論モデルの比較により議論する。

強震動とは、一般に建築・土木構造物、機械設備に被害をもたらす破壊力ある地震動を意味する。地震のモニターリングのために開発された地震計は、できる限り小さな揺れを記録する必要から高感度に作られているため、強震動に対しては飽和して観測出来ない。そのために、強震動の観測を目的とした低倍率の地震計、強震計が開発された。強震計には、加速度で平坦な周期特性をもつ加速度型強震計と速度で平坦な周期特性をもつ速度型強震計などいくつかの種類があるが、いずれも破壊力ある強い揺れの観測を目的とするため、人間が感じないような弱い揺れは精度良い観測はできない場合がある。建築・土木構造物、機械設備の固有周期は一般に 10 秒から 0.05 秒の範囲にあり、地震学で取り扱う地震波の周期範囲では比較的短周期の領域にある。したがって、強震動予測では、震源域から生成される 10 秒から 0.05 秒の短周期域の強い揺れの生成の研究が重要となる。

2. アスペリティから生成される地震波

断層面から生成される地震波は、一般に長周期では変位スペクトルが平坦、すなわち ω^0 の周波数特性をもち、短周期では加速度スペクトルが平坦、すなわち ω^{-2} の周波数特性をもつ。これは ω^2 モデルとしてよく知られている性質である。断層面のすべりが不均質であっても、地震波は、長周期で ω^0 、短周期で ω^{-2} 、の周期特性を有していることは観測事実として知られている。一様な断層運動（例えば、円形クラックモデル）から生成される地震波

スペクトルは単純な ω^2 モデルの形状を示し、変位スペクトル平坦からの加速度スペクトル平坦に変わるコーナー周期は断層面の広がりに関係する。不均質な断層すべりから生成される地震波の加速度スペクトルは短周期域で平坦となり、その長周期側の限界はすべりの不均質性、すなわちアスペリティに関係する。すなわち、アスペリティから生成される地震波は短周期域で ω^{-2} の周期特性（加速度スペクトルが平坦）を有していることになる。

生成される短周期地震波が ω^{-2} の周期特性をもつモデルとしてはクラック・モデルがよく知られている (Madariaga, 1976; 1977)。クラック・モデルは破壊域の周囲が強い強度をもつバリアに囲まれており、破壊の伝播はバリアにぶつかりストップする。破壊がストップするところで破壊速度の不連続（ Δv がステップ関数）が生じ、そこから ω^{-2} の短周期地震波が生成される。しかしながら、応力降下が一様な単純なクラック・モデルからは、短周期地震波はクラックの周縁部からのいわゆるストップピング・フェーズしか生成されない。その場合、観測される地震動は観測点に最短と最遠のクラック端部から生成される2つのパルス波となり、実際の震源近傍での加速度震動の波形と大きく異なる。強震動観測記録に見られる複雑な地震動が生成されるには、クラックの中での破壊の伝播が不均質であることが必要である (Irikura and Kamae, 1994)。

つぎにアスペリティ・モデルから生成される地震波の周期特性について考察する。アスペリティを単に応力降下が大い領域と考えただけでは、そこから振幅の大きい地震動が生成されても ω^{-2} の周期特性をもつ短周期の強震動は生成されるかどうかは明確ではない。アスペリティと背景領域の境界で応力降下が不連続（ $\Delta \sigma$ がステップ関数）の場合、そこから生成される地震波は $\omega^{-2.5}$ の周期特性を持つ (Madariaga, 1983) ことが知られている。この場合には、加速度スペクトルは $\omega^{-0.5}$ となり短周期帯域で減衰してしまう。従って、アスペリティとして応力降下が高い一様な領域を想定しても短周期地震波は生成されないことになる。しかしながら、アスペリティの周囲がすでに破壊されていると考え、破壊の先端部にあたるアスペリティ内部では応力集中が起こり、応力の不連続は単にステップ上ではなく、破壊の先端から距離を x とすると x^{-1} の不連続となり、そこから生成される地震波は ω^0 で、加速度スペクトルが平坦な特性をもつ (Madariaga, 1983)。

Das and Kostrov (1986) は円形の断層面を考え、その内部に応力降下の大きい円形のアスペリティと応力降下がほぼゼロの背景領域をもつ単一アスペリティ・モデルを想定し、そこから生成される地震波の性質を議論した。彼らのモデルでは、長周期で ω^0 、短周期で ω^{-2} の地震波が生成されることを示した。Das and Kostrov (1986) による単一アスペリティ・モデルから生成される地震波の特性について Boatwright and Quin (1986) により数値シミュレーションと比較で確かめられている。しかしながら、この Das and Kostrov (1986) モデルでも、アスペリティ内部を一様と考える限り、円形クラック・モデルと同様に単純な2つのパルスしか生成されない。Boatwright (1988) はアスペリティ内部をさらに小さなアスペリティを想定することによりクラック・モデルと同様に短周期で ω^{-2} の地震波が生成されることを示している。

アスペリティの中にサイズの小さいアスペリティを想定するモデルは瀬野(2003)の提案するフラクタル・アスペリティ・モデルとほぼ同じ考えに対応する。

3. アスペリティ・モデルによる強震動のシミュレーション

強震動の予測のための震源モデルはこれまで運動学的手法で先見的に与え、地震動シミュレーションがなされてきた。この方法で与えられる断層面のすべり分布や破壊速度は物理的条件から検証されたものにはなっていない。そのため、予測結果の有効性は物理的には保証されないことになる。最近強震動観測ネットワークの充実に伴いより強震動記録を用いた波形インバージョンにより精度の高い断層破壊過程が推定されるようになった(例えば, Wald *et al.* 1991; Sekiguchi *et al.*, 2000)。さらに運動学的インバージョンで得られた断層すべり分布から震源断層における破壊強度や臨界すべりなどの動学的パラメータの推定が可能となってきた(例えば, Ide and Takeo, 1997; Bouchon *et al.*, 1998; Day *et al.*, 1998)。それにより断層面に動学的パラメータを与えて破壊の自発的な生成・伝播の動的シミュレーションも可能となりつつある。しかしながら、強震動予測として重要な短周期成分を含む広帯域の強震動をシミュレーションするに十分な動学的震源パラメータの推定は未だ困難である。そこで動学的震源モデルを近似する運動学的震源モデルを用いた強震動シミュレーションが試みられるようになった。

強震動記録を用いた震源インバージョンの解析結果に基づいて、震源断層面の中ですべりの大きい領域からアスペリティの抽出がなされた(Somerville *et al.*, 1999)。すべりの大きいところを一定基準で切り出すことで、アスペリティ領域を定義し、アスペリティの総面積 S_a が地震モーメント M_0 に対して一定の相似則に従っていることを、明らかになってきた。ここでのアスペリティ抽出の有効性は Dalguer *et al.*(2004)により動力学震源モデルで確かめられている。

このことは、震源断層パラメータが地震モーメントに関して2つのスケーリング則によって支配されていることを意味している。スケーリング則の1つは震源断層の全破壊域の面積と地震モーメントの関係を与えるもので、これらのパラメータを巨視的断層パラメータと呼ぶ。もう1つは震源断層内のアスペリティの総面積を地震モーメントの関数として与えるもので、この関係から震源断層内のアスペリティの分布およびそこでの応力降下(あるいは実効応力)が与えられる。これらのパラメータを微視的震源パラメータと呼ぶ。これらの2つのスケーリング則に基づいて、強震動の計算に必要なとされる震源断層の面積、地震モーメント、さらに震源断層内の不均質な応力やすべり分布のモデル化が可能となる。我々は、上記の考えを整理して、特定の活断層や海溝域に発生する地震を想定したとき、誰でも同じ答えが得られるように震源断層のモデル化の手続きをレシピとしてまとめた。

参考文献

Boatwright, J. (1988). The seismic radiation from composite models of faulting, *Bull. Seism. Soc.*

Am., **78**, 489-508.

- Boatwright, J. and Quin (1986). The seismic radiation from a 3D dynamic model of a complex rupture process, In Das, S., Boatwright, J., and Scholz, C.H. eds.: *Earthquake Source Mechanics*, AGU, Washington, D.C., 97-109.
- Bouchon, M., Sekiguchi, H., Irikura, K., and Iwata, T. (1998). Some characteristics of the stress field of the 1995 Hyogo-ken Nanbu (Kobe) earthquake, *J. Geophys. Res.*, **103**, 24271-24282.
- Das, S. and B. V. Kostrov (1986). Fracture of a single asperity on a finite fault: A model for weak earthquakes?, In Das, S., J. Boatwright, and C.H. Scholz, eds.: *Earthquake Source Mechanics*, AGU., Washington D.C., 91-96.
- Dalguer, L. A., H. Miyake, and K. Irikura (2004): Characterization of dynamic asperity source models for simulating strong ground motion, *Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering*, No. 3286.
- Day, S. M., Y. Guang, D. J. Wald (1998). Dynamic Stress Changes During Earthquake Rupture, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **88**, 512-522.
- Ide, S. and M. Takeo, Determination of constitutive relations of fault slip based on seismic wave analysis, *J. Geophys. Res.*, *102*, 27379-27391, 1997.
- Irikura, K. and K. Kamae (1994): Estimation of strong ground motion in broad-frequency band based on a seismic source scaling model and an empirical Green's function technique, *Annali di Geofisica*, Vol. 37, pp. 1721-1743.
- Madariaga, R. (1976). Dynamics of an expanding circular fault, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **66**, 639-666.
- Madariaga, R (1977). High-frequency radiation from crack (stress drop) models of earthquake faulting, *Geophys. J. R. Astron. Soc.*, **51**, 625-651.
- Madariaga, R (1979). On the relation between seismic moment and stress drop in the presence of stress and strength heterogeneity, *J. Geophys. Res.*, **84**, 2243-2250.
- Sekiguchi, H., Irikura, K., and Iwata, T. (2000). Fault geometry at the rupture termination of the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **90**, 974-1002.
- 瀬野徹三 (2002). フラクタルアスペリティ／バリアー浸食モデルと地震予知, *地震ジャーナル*, 34, 50-58.
- Somerville, P.G., Irikura, K., Graves, R., Sawada, S., Wald, D., Abrahamson, N., Iwasaki, Y., Kagawa, T., Smith, N., and Kowada, A. (1999). Characterizing crustal earthquake slip models for the prediction of strong ground motion, *Seism. Res. Lett.*, **70**, 59-80.
- Wald, D.J., Helmberger, D.V., and Heaton, T.H. (1991). Rupture model of the 1989 Loma Prieta earthquake from the inversion of strong motion and broadband teleseismic data, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **81**, 1540-1572.