

ことがあります」と地図に書く、あるいは背景にシナリオという文字を入れる方法が国内外で実施されているが、示されていないシナリオ地震や予測地震動を想像するのは、シナリオを作成したことがある筆者であっても困難と感じる。

シナリオ地震の強震動予測の使い方の正解は存在しないが、「シナリオ A やシナリオ B では、このような震度の広がりとなっているが、実際に震度が 1 あるいは 2 ずれた場合に、どのような対応をすれば良いか」という、ずれ補正のオペレーションの訓練に使う方法も有効とされている。

2017 年 8 月 25 日に内閣府から公表された南海トラフ沿いの大規模地震の予測可能性について（報告）では、防災対応を検討する 4 つのケースが示されると共に、ケースが独り歩きしないよう「将来、ここで検討したケース以外の現象が発生する可能性がある」「様々なケースを対象として検討を深めることが必要」と記載されている。高頻度から低頻度に応じたシナリオ、確率表現が困難な不確定性の高いシナリオ、それぞれに応じた震源モデルと強震動予測を今後作成し、整理していくことが必要である。

5. おわりに

地震の震源には、類似性と相違性があるが、現在の強震動予測の震源モデルは、主に類似性に重きを置いたモデル化が行われている。そのため、パラメータのパラツキや不確定性だけではカバーできない Kanamori (2014) 等でも指摘されているアウトライヤー現象（平均値から特異に大きく、あるいは特異に小さく外れてしまう現象）を、震源物理に基づいてモデル化できるかどうかは、今後の研究課題であろう。

断層面の数 km スケールの強震動予測のための震源モデルは、おおむね構築されてきた。断層破壊の成長過程や停止過程に関わるサブ km スケールの超微細構造を見出すべく、超高密度観測や実験からその道が開けることを期待したい。

文献

- 泉谷, 1997, 日本地震学会ニュースレター, **9** (1), 9-10.
http://www.zisin.jp/publications/document02_02.html
Kanamori, 2014, Annu. Rev. Earth Planet. Sci., **42**, 7-26.
内閣府, 2017, 南海トラフ沿いの大規模地震の予測可能性について（報告）. http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/tyosabukai_wg/index.html

（第 15 回）震源近傍の強震動～指向性パルスとフリングステップ～

強震動委員会 久田嘉章（工学院大学）

震源近傍の強震動として、ここでは指向性パルスとフリングステップと呼ばれる 2 種類の特徴的なパルス波を紹介したい。例として図 1 は、横ずれ断層の 1992 年米国・ランダース地震で出現した地表地震断層の近傍の Lucerne Valley 観測点における速度・変位波形である。左側は断層走向に直交する成分であり、上図の速度波形では正・負両振幅、下図の変位波形には片振幅のパルス波が、それぞれ記録されている。一方、右側の断層走向平行成分では、速度波形では片振幅のパルス波が、変位波形には地表地震断層のすべり変位に起因する約 2m の振幅のステップ関数状の波形が現れている（なお、記録は震源断層全体からの地震動の寄与で構成されていることから、変位波形がすべり変位そのものを表しているわけではない）。前者と後者のパルス波形の主要な成因が、それぞれ指向性パルスとフリングステップと解釈されている。以下に両者の成因や特徴を紹介する。

指向性パルス：震源断層の近傍の観測点において、断層面を伝播するすべり破壊が近づいて来る場合、断層各点から発生するパルス状の強震動（以下、要素パルス）が建設

的に重なり合うことによって、指向性パルスは発生する。1995 年兵庫県南部地震の際、神戸市では六甲断層帯の走向に直交する北北西-南南東方向に多くの建物をなぎ倒すような強烈な強震動が観測されたが、指向性パルスがその成因のひとつと考えられている（その破壊力からキラパルスとも呼ばれた）。

図 2 と図 3 に示す単純な横ずれ断層のモデルで、指向性パルスの成因を説明する。まず図 2 は最も単純な点震源（ダブルカップル震源）による S 波の放射特性であり、図 2 (1) は断層を上から見た平面図である。断層面の線上とそれに直交する線上で、それぞれの線に直交する方向に最大振幅が生じるが、45°傾斜する線上では振幅が 0 になる。一方、図 2 (2) は、図 2 (1) の A-A' 断面における断層面の平行成分（紙面に垂直な成分）の放射特性である。断層面に直交する線上で最大振幅となるが、断層面の延長線上（地表面の①点）では振幅が 0 であり、地表面の②点など断層の延長面からある程度離れないと振幅が現れない。

現実の震源断層は点ではなく面であり、断層破壊が移動する。このため放射特性にはドップラー効果のような指向

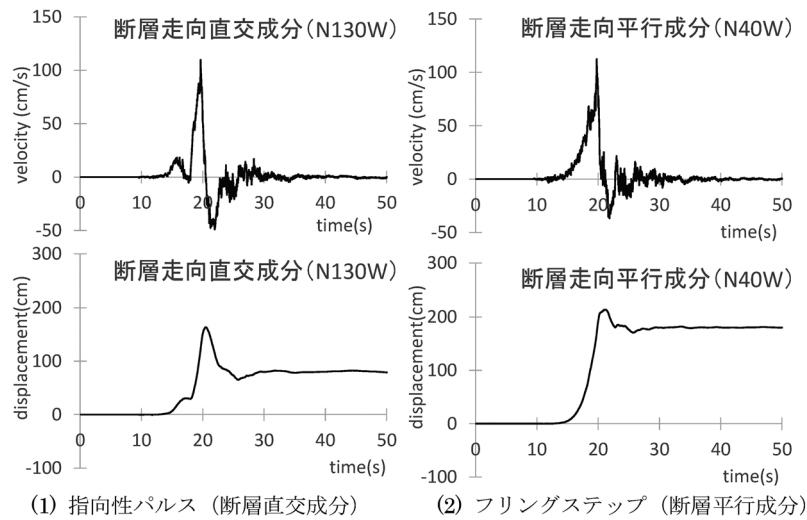


図 1 1992 年ランダース地震の Lucerne 観測点の指向性パルスとフリングステップ
(速度波形 (上) と変位波形 (下), 提供: Strong-Motion Virtual Data Center)

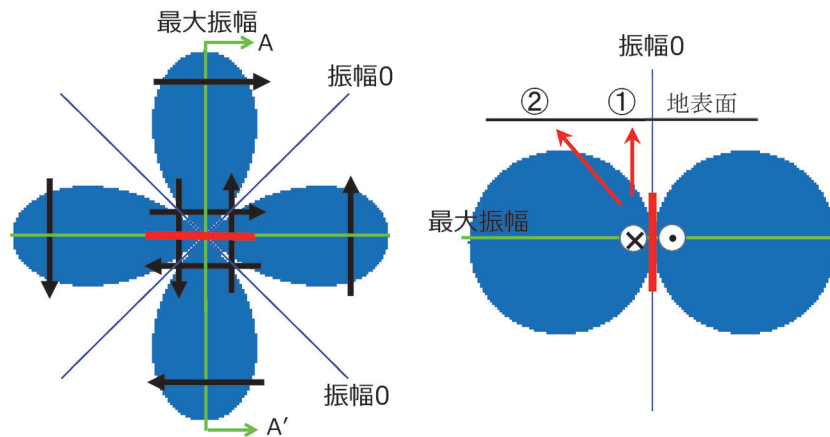


図 2 点震源の S 波放射特性 (右横ずれ断層の例)

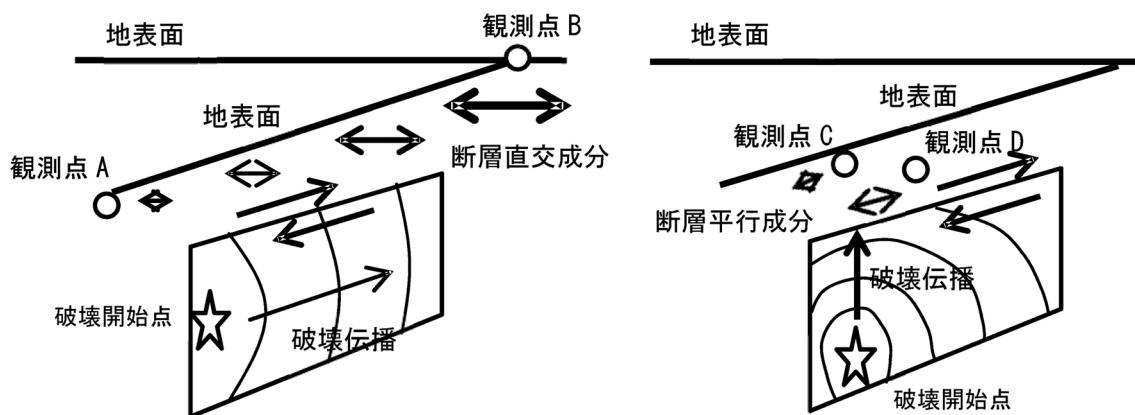
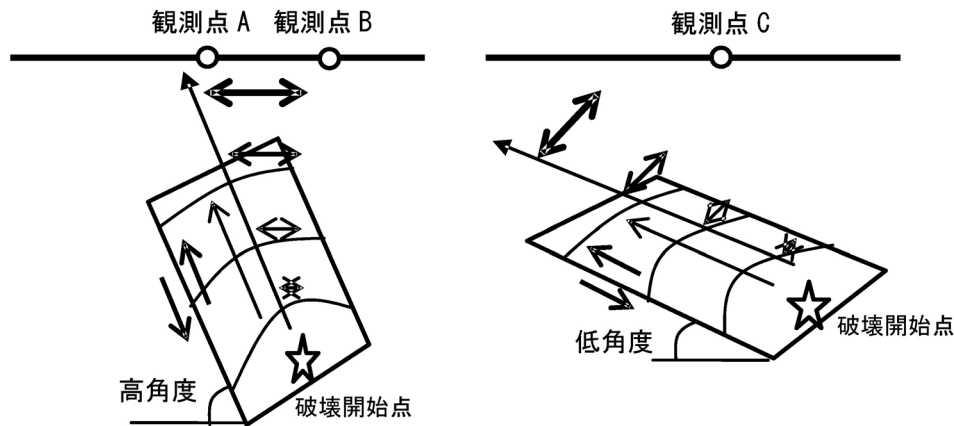


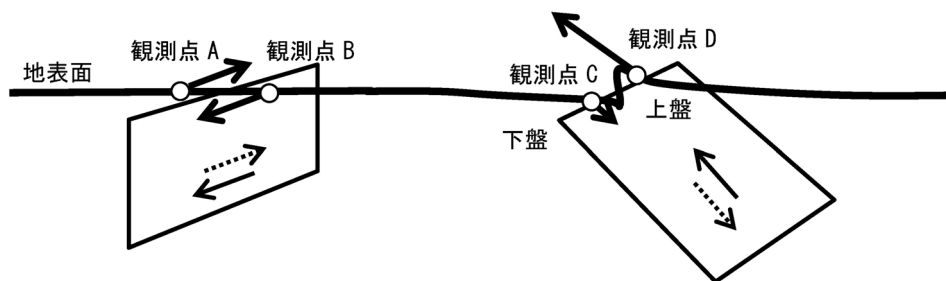
図 3 破壊伝播効果によるランダム波と指向性パルス波の成因の説明図



(1) 高角逆断層の場合

(2) 低角逆断層の場合

図 4 逆断層による指向性パルス波の成因の説明図



(a) 横ずれ断層の場合

(b) 逆断層の場合

図 5 地表地震断層のすべりによるフリングステップの説明図

性が生じる。図 3 (1) の右横ずれ断層で破壊が左から右に伝播するとして、断層に近い地表の観測点 A, B の強震動特性の違いを考察する。図 2 (1) の放射特性より断層面の近傍では断層走向に直交する成分と平行する成分の振幅が大きくなるが、ここではまず断層走向直交成分に着目する。一般に断層破壊の伝播速度は S 波の伝播速度に近い値であるため、断層破壊が近づく方向にある観測点 B では、断層面の各点から発生する要素パルスが短時間で建設的（同位相で）に重なり、大振幅のパルス（指向性パルス）に成長する。一方、破壊伝播が遠ざかる方向にある観測点 A では、要素パルスは時間的にはばらばらに到着するため、結果的に継続時間が長く、相対的に振幅が小さなランダム性状の波形となる。

次に断層走向平行成分を考察する。まず図 2 の放射特性から分かるように点震源の直近では要素パルスの平行成分も最大振幅となるが、図 3 (1) のように断層破壊が水平に移動する場合は、点震源が通り過ぎた瞬間に振幅が小さくなり、指向性パルスに成長することはない。一方、図 3 (2) のように、横ずれ断層で断層破壊が下から上に伝播する場

合は、断層走向平行成分にも要素パルスが建設的に重なり、指向性パルスとなる（宮武，1999）。但し、図 2 (2) の放射特性に示すように断層の延長面上では振幅が 0 であるため、図 3 (2) の断層面直上に近い観測点 C では振幅は小さく、観測点 D のように断層の延長面上から程度離れないと振幅が大きくなる。従って、指向性パルスは、一般に断層走向の平行成分より直交成分に顕著に現れる。

同様に、縦ずれ断層（逆断層・正断層）の場合も、断層面に近い観測点で指向性パルスが現れるが、その発生には断層面の傾斜角と断層破壊の伝播の向きが重要になる。図 4 (1) は高角の逆断層で、断層破壊が下から上に伝播する場合である。この場合、断層の延長面上に近い観測点 A では断層走向の直交方向に指向性パルスが生じるが、延長面から離れた観測点 B では、放射特性の最大振幅方向から外れるため指向性パルスは生じない。一方、図 4 (2) は低角逆断層の場合は、断層の延長面は遠方に外れるため、例えば断層面の直上（観測点 C）でも指向性パルスは生じない。

以上のことから指向性パルスは、断層の破壊が一様な伝

播であること、その破壊伝播が観測点に向かうこと、観測点が断層面に近いこと、が発生する条件になる。観測点が断層面から離れている、破壊伝播が遠ざかる、さらには破壊伝播が単純ではなくギクシャクと複雑である場合は、要素パルスに建設的干渉が起こらず、ランダム性に富んだ波形になる。

フリングステップ：断層面のごく近傍において断層すべりに起因する永久変位を伴うステップ関数状の変位波形はフリングステップと呼ばれている。フリング (fling) とは「放り投げる・急に動かす」という意味であり、地震の原因となる断層面の弾性反発 (Elastic Rebound) によるイメージから命名されている (例えば, Bolt and Abrahamson, 2003)。その速度波形は片振幅が卓越する長周期のパルス波となるため、フリングパルス、あるいは長周期パルスと呼ばれることがある。フリングステップが最も顕著に観測されるのは大規模な地表地震断層のごく近傍であり、断層を横切るライフラインや建物・土木施設に甚大な影響を与えるため、近年、工学分野で特に注目されている。近年の強震観測網の充実により、図 1 のランダース地震のほか、1999 年台湾・集集地震、1999 年トルコ・コジャエリ地震、2002 年アラスカ・デナリ地震、我が国では 2014 年長野県神城断層地震 (K-NET 白馬)、2016 年熊本地震 (西原村など) でもフリングステップが主要な成因と思われる長周期パルスが観測されている。

フリングステップの卓越する方向は断層のすべり方向であり、図 5 (a) に示す横ずれ断層であれば断層走向平行成分 (観測点 A と B) に、図 5 (b) のような縦ずれ断層であれば断層走向の直交成分と上下成分に現れる。断層面が傾斜している場合は、上盤側の方 (観測点 D) が下盤側

(観測点 C) より大きな変位が生じる。

断層面のごく近傍では、グリーン関数は永久変位に相当する静的グリーン関数の寄与が支配的になる。このため、フリングステップは表現定理 (香川 (2017) の図 2 の【詳細法】を参照) における静的グリーン関数の寄与として定義が可能であり、これを用いると厳密かつ効率的にフリングステップが計算できる (Hisada and Bielak, 2003)。静的グリーン関数は震源距離の 2 乗に反比例し、実体波や表面波に比べて距離とともに急激に減衰する。このため、フリングステップは地表地震断層から離れたり、地表に断層が現れない場合は振幅が小さく、指向性パルスなどに比べて殆ど目立たなくなる。なお、著者は半無限成層地盤においてフリングステップを含む理論的な強震動計算用のコードや計算例を公開しているので、興味ある読者で試して頂きたい (<http://kouzou.cc.kogakuin.ac.jp/Open/Green/>)。

謝辞

編集担当の干場充之委員、岩田知孝委員からは非常に有益なご指摘をいただきました。記して感謝いたします。

参考文献

- Bolt and Abrahamson, 2003, International Handbook of Earthquake & Engineering Seismology, Part B, IASPEI, 983-1012.
- Hisada and Bielak, 2003, Bull. Seism. Soc. Am., **93**, 1154-1168.
- 香川, 2017, 日本地震学会ニュースレター, NL-3-25-27.
- 宮武, 1999, 地震 II, **52**, 151-161.