

## 14. 2004年パークフィールド地震

長谷川 昭（東北大学大学院理学研究科 地震・噴火予知研究観測センター）

### 1. はじめに

カリフォルニア州のサンフランシスコとロスアンジェルスほぼ真中に位置するパークフィールドでは、M6程度の地震が繰り返し発生してきた。カリフォルニア州を北西-南東方向に走るサンアンドレアス断層は、パークフィールドのすぐ北西からサンファンバティスタまでの約120kmの区間でクリープしている。一方、すぐ南東側では1857年にフォートデホン地震（M7.9）で大きく滑った後、現在まで固着したままである（図1）。すなわち、パークフィールドは、その南東側の固着している区間と北西側のクリープしている区間との遷移域に当たり、そこでM6程度の地震が繰り返し発生してきたというわけである。



図1 サンアンドレアス断層とパークフィールドの位置（USGS homepage）<sup>20)</sup>。パークフィールド・セクションは、その北西側のクリープ区間と南東側の固着区間との遷移域となっている。

1979年にBakun and McEvilly (1979)<sup>1)</sup>は、パークフィールドで発生した1922年、1934年、1966年の地震（M～6）の波形が互いに良く似ており、それらはサンアンドレアス断層の同一のセグメントの破壊により生じたものであると指摘した。Bakun and McEvilly (1984)<sup>2)</sup>は、さらに、1857年、1881年、1901年の3つのM～6の地震を加え、計6回の地震が、サンアンドレアス断層に沿うほぼ同一のセグメントの破壊により同程度の規模の地震として、繰り返し発生したものであると指摘した。

つまり、パークフィールドではM6程度の地震がおよ

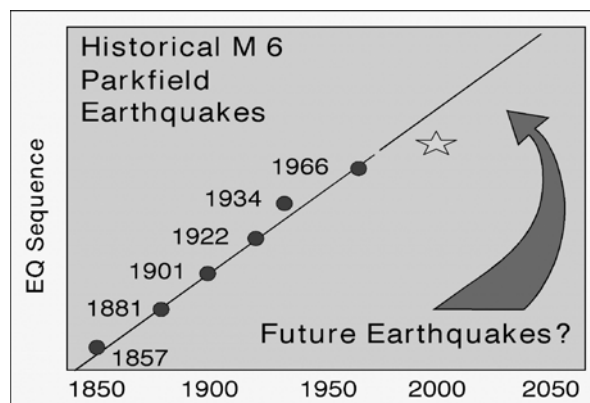


図2 パークフィールド地震の発生履歴（CISN homepage）<sup>19)</sup>。縦軸は地震の順番、横軸は時間を示す。

そ20年間隔で規則的に再来するというわけである（図2）。これらの研究結果に基づいて、次のパークフィールド地震の発生時期が（1988年±7年）と予測され、米国地質調査所、カリフォルニア州地質調査所、大学等による地震予知のための実験（Parkfield Earthquake Prediction Experiment）が始まった<sup>3)</sup>。

この実験により、高感度地震計・広帯域地震計・強震計・歪み計・GPS・クリープメータ・地下水観測計器等、多項目にわたる集中的な観測網が展開された。震源域は人口も疎らであり種々の観測計器を設置する上でも適した地域であることから、パークフィールド地震は、地震予知研究の成果を試す格好の実験場を提供することになった。

しかし、発生が予測された期間が過ぎても、パークフィールド地震は一向に発生しなかった。このため、地震予知の実験場としての意味は次第に薄れていった。

その後、いずれは起こるであろう次の地震を直上の稠密な観測網で詳細に捕捉し地震現象の理解を深めるための実験場として新たな注目が集まるようになった。Earth Scope計画の一環として、1966年パークフィールド地震の震源域でサンアンドレアス断層を掘り抜くSAFOD（San Andreas Fault Observatory at Depth）プロジェクトが進められているのもその一つの現れである。

そのような中で、予測されていた次のパークフィールド地震が2004年9月28日に発生した。本震及び余震の震源分布を図3、4に示す。陸地直下の浅いM6.0の地震であったものの、既に述べたように震源域及びその周辺は人口の疎らな地域であり、大した被害は生じなかった。

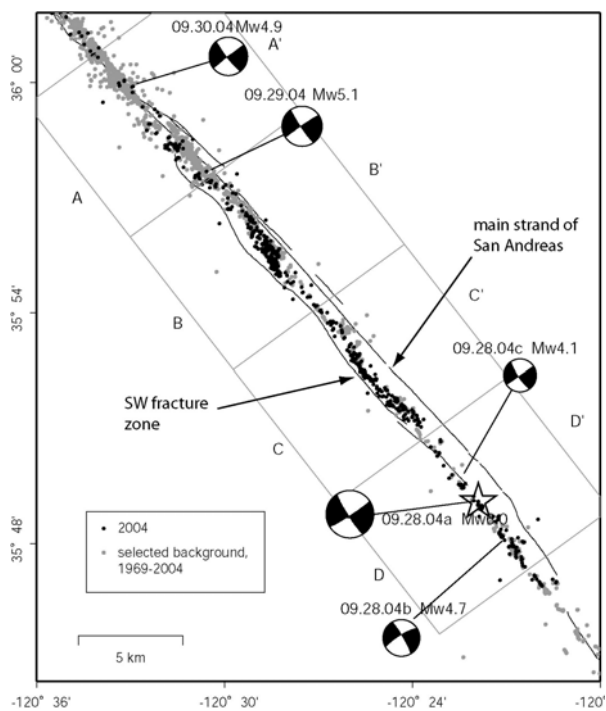


図 3. 2004 年パークフィールド地震の本震 (☆印) および余震 (黒丸) の震央分布<sup>4)</sup>. 本震及び大きな余震のメカニズム解も合わせて示す. 灰色の丸は 1969 年–2004 年の期間のバックグラウンドの地震.

しかし、各種の極めて稠密な観測網を敷いていた場所で発生した地震であるため、2004 年パークフィールド地震はこれまでにない詳細さで観測された、特筆すべき地震である。得られた観測データの詳細な解析により、地震発生について我々がこれまでわからなかった多くの疑問に答えることができると期待される (Harris and Arrowsmith, 2006)。

なお、この地震の特集号が Bulletin of Seismological Society of America の 96 巻, No. 4B (2006) に組まれている。本稿では、主にそこに掲載されている論文を基に、上記の疑問への答えの幾つかを紹介することとする。詳細は上記特集号を参照されたい。

## 2. 前駆現象

近年の室内実験の研究成果に基く地震発生モデルによれば、地震発生前にすべり破壊核が形成されることが期待される<sup>5)</sup>。上記のように、パークフィールドでは次の地震が予測されたことから、すべり破壊核形成過程を検出することを目的として、震源域周辺に歪計の観測網が展開されていた。当初の予測から発生時期が遅れたため、観測網のうち一部の観測点は廃止されていたが、それでも震源域およびその極く近傍に 5 点の孔井式歪計 (5 点の体積歪計、そのうち 2 点では 3 成分歪計も併設) が稼動していた。さらに、間隙水圧計が 2 ヶ所に、水位計が 1 ヶ所に設置されていた。高感度の地殻変動観測計器がこのような震源域の直上に設置してあったケースは稀で

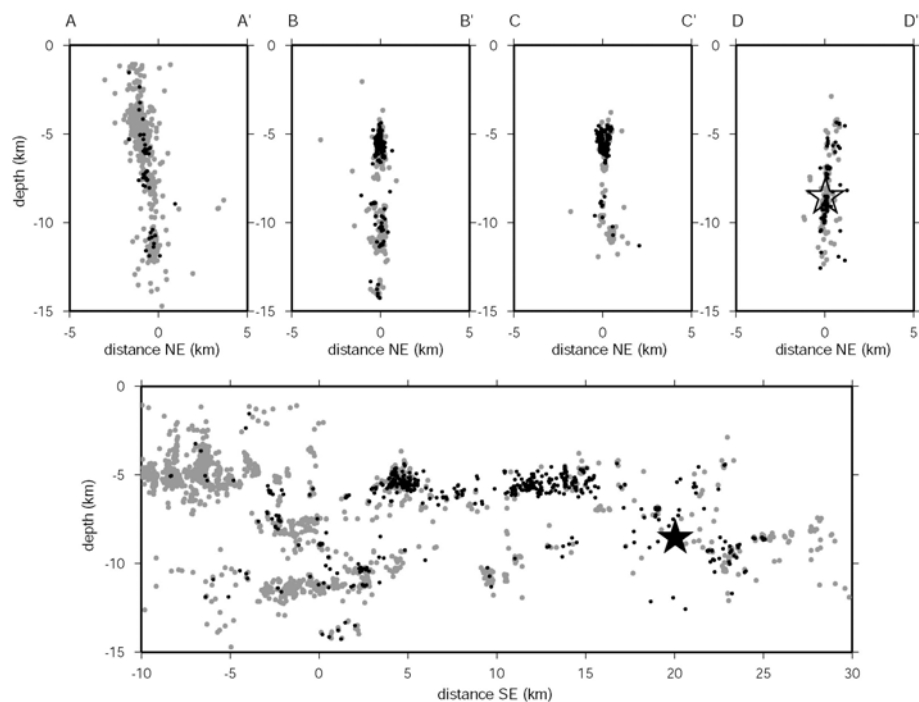


図 4 本震 (☆印), 余震 (黒丸) およびバックグラウンドの地震の鉛直断面<sup>4)</sup>. 上図は図 3 に示す A-A', B-B', C-C', D-D' に沿う断層に直交する断面. 下図は断層に沿った断面.

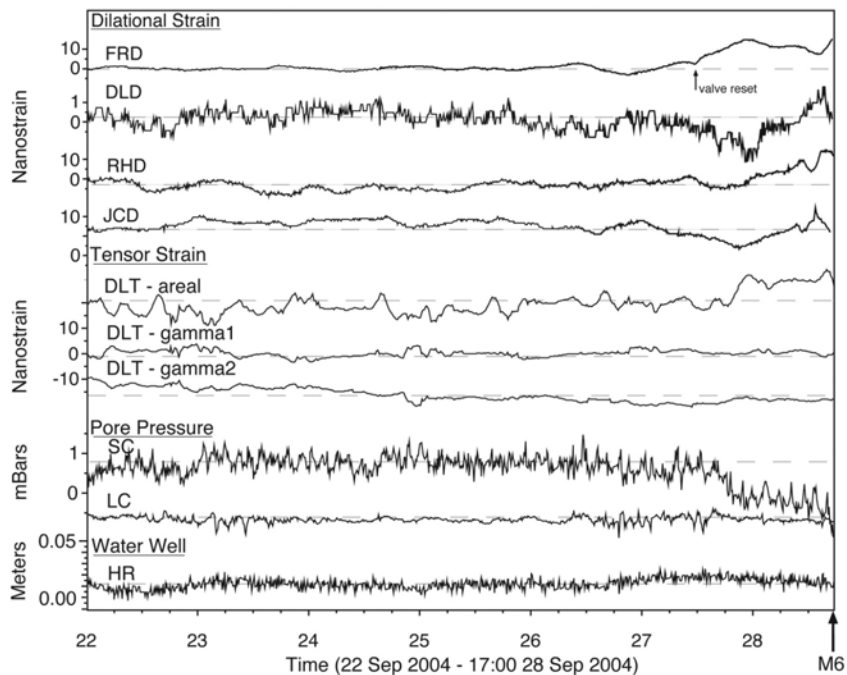


図 5. 2004 年パークフィールド地震発生前一週間の体積歪, 歪み, 間隙水圧, 水位の変化 (Johnston et al., 2006a). 潮汐及び気圧補正済み. 震源域直上に設置された幾つかの観測点の記録を示す.

あり, 前駆的なすべりが実際に検出されたか否かは, 地震の直前予測にとって極めて重大な問題である.

震源域に設置された孔井式歪計と間隙水圧計のデータの解析の結果, 数週間前から地震発生直前までにわたって, 歪や間隙水圧の加速など, 有意な変化は一つも得られなかった<sup>6)</sup>.

図 5 に地震発生前 1 週間における歪計, 間隙水圧計, 水位計の記録の例を示す. 図から幾つかの観測点で, 地震の 24 時間程度前から歪速度に微小な変化がみてとれる. しかし, このような時間スケールでこの程度の振幅変化は他の時期にもみられるものであり, 必ずしも有意とは云えないし, 系統性もない<sup>4)6)</sup>.

さらに, 地震直前数 10 秒~数秒間のデータを詳細にみると, 歪は  $10^{-11}$  レベルで顕著な変化はなく安定であった. これは地震モーメント  $2 \times 10^{12} \text{Nm}$  (あるいは M2.2), 滑り域の広がり 30m 以上の前駆滑りがなかったことを意味する<sup>6)</sup>.

本震とのマグニチュード差は実に 3.8 であり, プレスリップに依拠する短期予測の困難さを強く示す観測事例である. 東海地震のような大きな地震でも同じであるとは思わないが, もしもこの結果を単純に当てはめると, M4.2 程度以上のプレスリップは期待できないということになってしまう.

震源域直上には 7 観測点で構成されるプロトン磁力計観測網も設置されていた. この観測網の 5 ヶ所の観測点

で, 地震に伴う 0.2~0.5nT 程度の磁場変化を検出した<sup>7)</sup>.

明瞭な coseismic な変化を検出する一方で, 地震前数ヶ月, 数週間, 数日の時間スケールでも, ノイズレベルを超えるような有意な変化は認められなかった<sup>7)</sup>. 0.01~20Hz の周波数帯で電場と磁場の連続観測も 1 ヶ所で行われていた.

このデータからは, 1989 年 M7.1 ロマプリエタ地震の前に先行してあらわれたとされる<sup>8)</sup> ULF 帯 (0.01~20 Hz) の, 異常なノイズのような変化は認められなかった<sup>7)</sup>.

さらに, ギリシアでこの規模の地震の前にあらわれるとされる (Varostos et al., 1993) 同様の電場の変化も認められなかった<sup>7)</sup>. これらの観測事実は, このような電磁気観測データによる短期予測の困難さを示している<sup>7)</sup>.

### 3. 滑り域は毎回同じか?

今回の地震による滑り分布は, 稠密に展開された強震観測網及び GPS 観測網, さらに地表での滑りの計測, InSAR などのデータを用いて推定されている<sup>9)10)11)12)13)</sup>.

Custodio and Archuleta (2007)<sup>13)</sup> は, 近地の強震計データを用いて 1966 年と 2004 年の地震による滑り分布を推定し, 両者を比較した. その結果, 2 つの地震で滑り量の大きい領域 (アスペリティ) は必ずしも重ならず, むしろ相補的な分布をすると指摘した. 彼らは, 確認のため 1966 年と 2004 年の地震でほぼ同じ観測点の波形データを用いた滑り分布のインバージョンも行い, 両者を

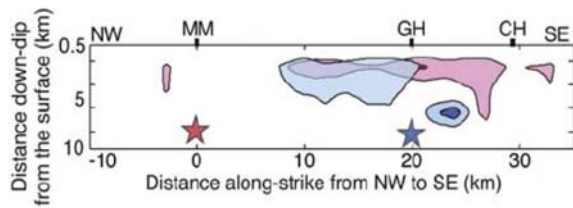


図 6 近地強震計データから推定された 1966 年の地震と 2004 年の地震の滑り域の比較 (Custodio and Archuleta, 2007). 1966 年の地震と 2004 年の地震の震源と大きく滑った領域を赤色と青色の星印及び影を付けて示す. 薄い影と濃い影部はそれぞれ 0.3m, 0.5m 以上. MM, GH, CH は Middle Mountain, Gold Hill, Cholame の位置.

比較した. それを図 6 に示す. 確かに二つの地震で滑り量の大きい領域は重ならず, むしろ相補的な分布をしているようにみえる.

図 6 では, 1966 年の地震の方が滑り域がより南東まで及んでいる. すなわち, 1966 年の地震ではゴールドヒル (図で GH) より南東側にまで滑り域が及んでいるが, 2004 年の地震ではゴールドヒルの南東側にはあまり及んでいないようにみえる. 近地強震計データにより推定されたこの傾向は, GPS 等の測地データにより推定された結果でも同様に認められる (図 7<sup>11)</sup>).

なお図 7 に示すように, 測地データを用いて推定された 1934 年の地震の滑り域は, 2004 年の地震と似た分布をしている<sup>11)</sup>.

#### 4. 地震波速度不均質構造, 滑り域, 余震分布の関係

Thurber et al. (2006) による地震波トモグラフィは, サンアンドレアス断層を境として, 地表から 20km 程度の深さ範囲でその北東側が地震波低速度, 南西側が高速度であることを明瞭に示す. さらに, 全域で低速度の北東側であっても, パークフィールド直下の深さ 5~12km の範囲には, 厚さ 5km 程度の局所的に高速度の body がサンアンドレアス断層に沿って 15km 程度の長さで広がっている.

また, 二重走時差震源決定法による余震の震源分布は 2004 年の地震が発生する以前のバックグラウンドの地震活動の分布と同じような分布をするという, 顕著な傾向が認められる<sup>14) 15)</sup>. 一方, この地域では, バックグラウンドの地震活動の約 4 割が, 相似地震, すなわち同一の小さなアスペリティパッチの繰り返しすべりによる地震 (繰り返し小地震) であることがわかっている<sup>16)</sup>.

このことから, 余震の中には繰り返し小地震の再活動が多数含まれていることになる.

なお, SAFOD プロジェクトでは, この地域に発生している, M2 クラスの隣り合う 2 つの繰り返し小地震の震源断層を掘り抜くことを計画していた<sup>17)</sup>.

約 2.2km の深さにある径約 100m 程度という小さなアスペリティパッチを掘り抜くことを目指して, 第 1 期工事

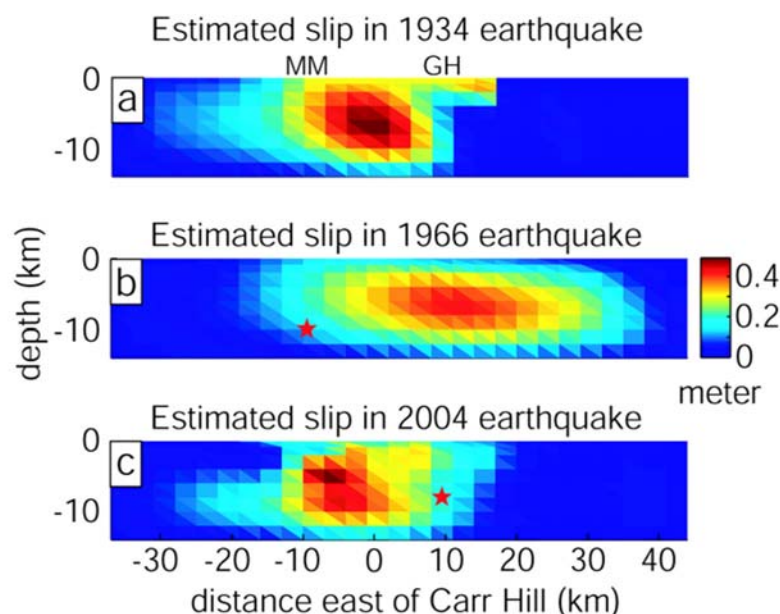


図 7. 測地データから推定された 1934 年, 1966 年, 2004 年の地震の滑り (coseismic + post seismic) 分布 (Murray and Langbein, (2006)<sup>11)</sup>. 断層面に平行な鉛直断面に示す. 赤星は本震の震源位置. MM, GH はそれぞれ Middle Mountain, Gold Hill の位置.

で予定通り深さ 1.8km の掘削が終了したところで、9 月 28 日の地震が発生した。SAFOD で掘削のターゲットとされた 2 つの繰り返し小地震は、次の活動が 2006 年のはずであったが、2004 年のパークフィールド地震の大きな滑りにより、その 2 日後に時期を早めて発生した。これは M6 の地震の断層面の端部に位置する 100m ほどの小さなアスペリティパッチが、M6 の地震が発生しても保存されていることを示している。このことは、アスペリティの振舞いを理解する上で重要である。

図 8 に、2004 年パークフィールド地震による滑り分布、

本震及び余震の震源分布、P 波速度分布を示す<sup>9)</sup>、

図 8 (c) に示すように、全域が低速度であるサンアンドレアス断層の北東側でも、パークフィールド付近には深さ 5km 以深で顕著な高速度体が認められる。図 8 (a) に示す滑り量の大きな領域 (図 8 (c) の A と B の領域) は、この高速度体と一部重なっていることがわかる。

図 8 (b) には、2 重走時差震源決定法による 1966 年の地震、バックグラウンドの地震、2004 年の地震とその余震がプロットされている。既に述べたように、多くの余震の震源がバックグラウンドの地震活動のそれと同じ位置に

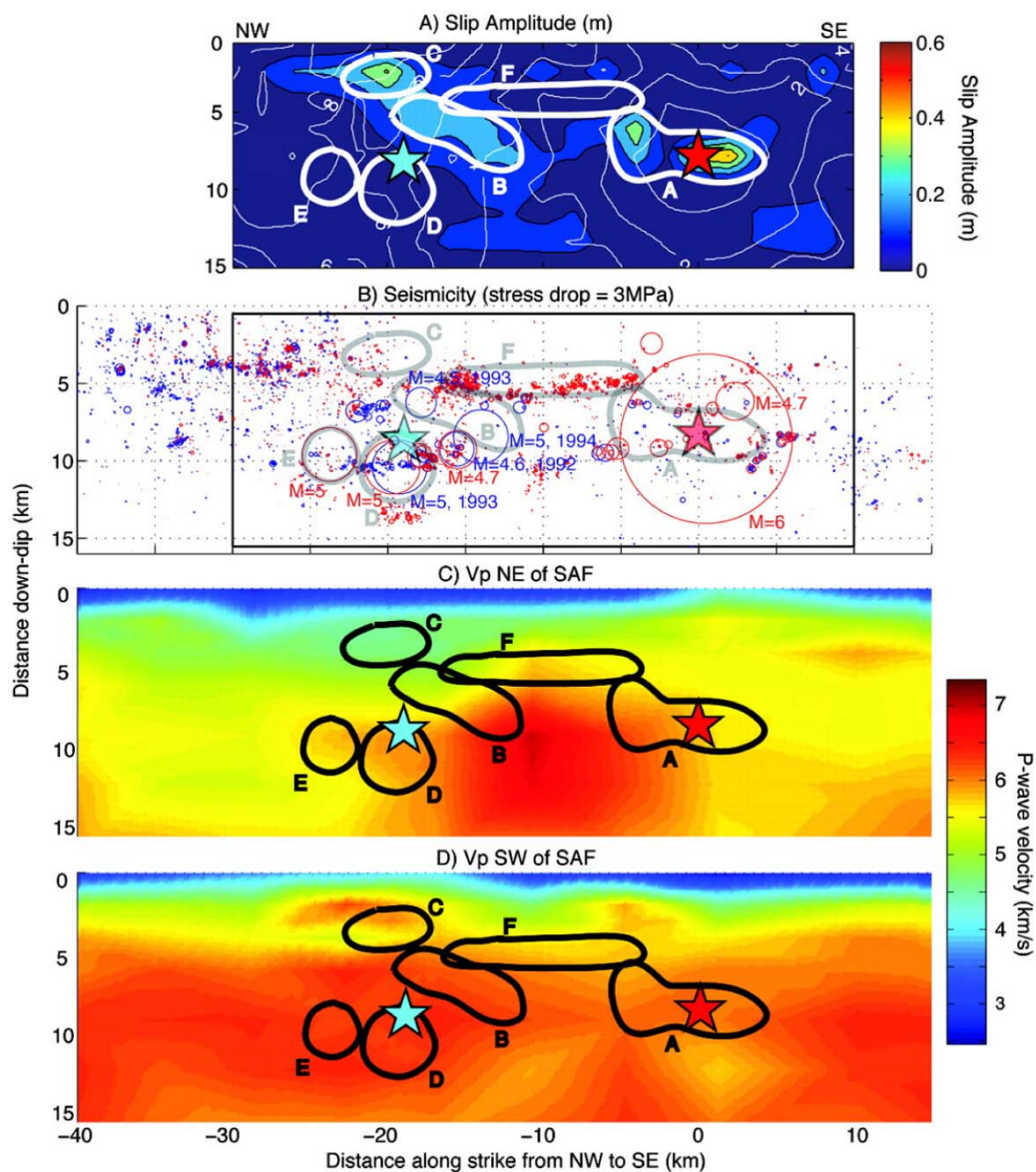


図 8. 滑り分布、本震・余震とバックグラウンドの地震の分布、P 波速度分布 (Liu et al., 2006). (a) 2004 年の地震の滑り分布と 1 秒毎の rupture time. (b) 2004 年の地震 (赤星) と余震 (赤丸)、バックグラウンドの地震 (青丸) 及び 1966 年の地震 (青星) の震源 (Thurber et al., 2006). シンボルの大きさは応力降下量 3MPa としたときの円形の断層サイズ. (c) 断層の北東側, (d) 南西側の P 波速度分布 (Thurber et al., 2006).



## Slip at Specific Times or Time Intervals

## Cumulative Slip

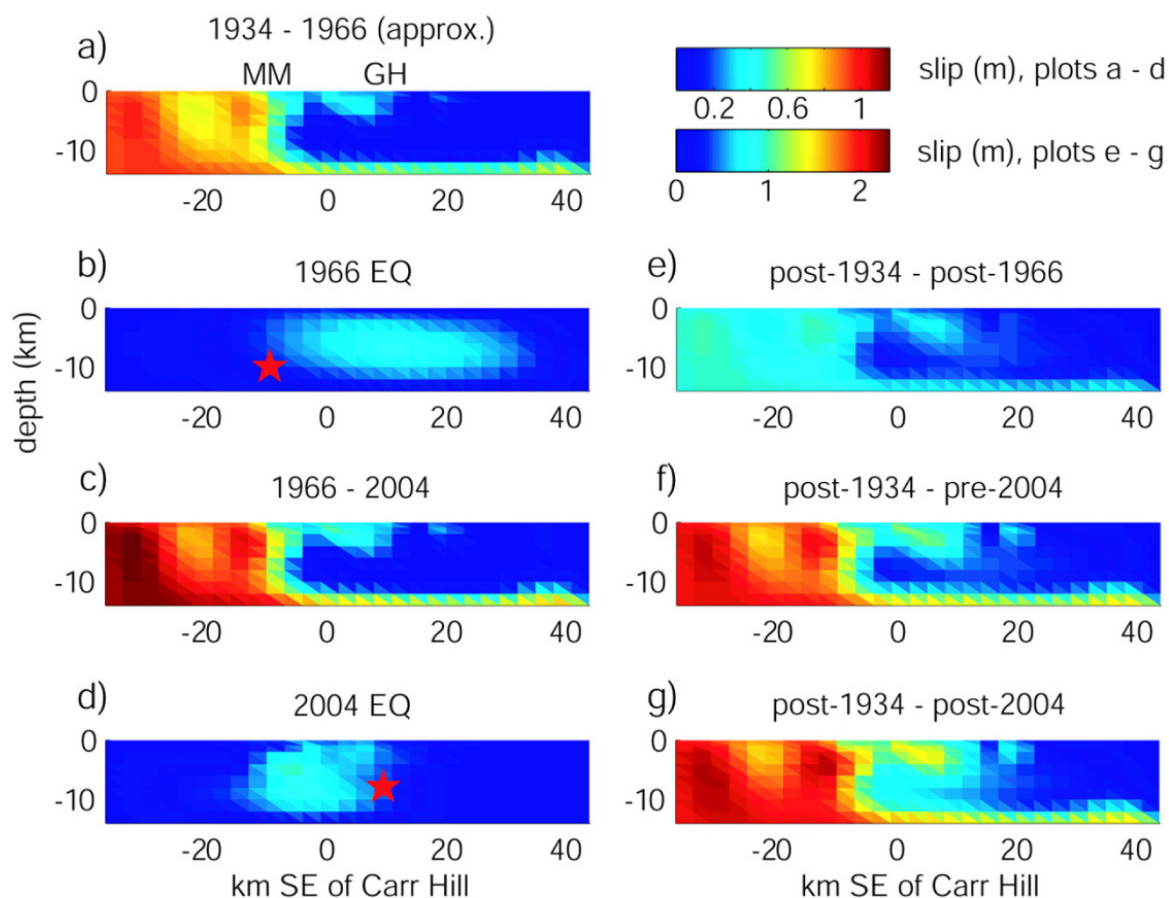


図9 サンアンドレアス断層に沿う滑りの空間分布<sup>11)</sup>. 1934年地震以降の滑りの時間発展を断層に平行な鉛直断面上に示す. (a) 1934年地震後から1966年地震前, (b) 1966年地震, (c) 1966年地震後から2004年地震前, (d) 2004年地震の滑りの分布. 1934年地震後から(e) 1966年地震後まで, (f) 2004年地震前まで, (g) 2004年地震後までの積算滑りの分布. MM, GHはMiddle Mountain, Gold Hillの位置. 滑り量は右上に示すように(a)~(d)と(e)~(g)で別々のカラスケールで示す. (e)~(g)のカラスケールはサンアンドレアス断層の長期間の滑りレート33mm/年を最大値にして示す.

分布することがわかる. さらに, 深さ5kmと10~11kmに水平方向に筋状に並ぶ地震群(streak)が認められる. 図から, 大きな滑りはこの上下二つのstreakの間で生じたようにみえる. それは, GPSデータを用いて推定された滑り分布からも支持される<sup>11)</sup>.

GPSデータのインバージョン解析は, それより浅部では余効滑りが主として生じたことも明らかにした<sup>11)</sup>.

### 5. 滑りの収支

1934年, 1966年, 2004年とM6の地震を経験したパークフィールドでは, 三角測量・三辺測量・光波測距・GPS等の測地測量が地震サイクルを越える期間にわたって行われてきた. このため, 通常は不可能なプレート境界(この場合サンアンドレアス断層)における滑りの収支が実際はどうなっているか, その状況をかなりの精度で把握

することを可能とした.

図9に, Murray and Langbein (2006)<sup>11)</sup>により推定された1934年の地震以降のサンアンドレアス断層に沿う滑り分布の推移を示す. (a)~(d)はそれぞれ, 1934年の地震後から1966年の地震前までの期間, 1966年の地震, 1966年の地震後から2004年の地震前までの期間, 2004年の地震による滑りの分布を示す. (e)~(f)はそれぞれ1934年の地震後から1966年の地震後までの期間の積算滑り((a)と(b)の滑りの和), 1934年の地震後から2004年の地震前までの期間の積算滑り((a)~(c)の滑りの和), 1934年の地震後から2004年の地震後までの期間の積算滑り((a)~(d)の滑りの和)の分布を示す.

図9から, 1966年, 2004年の地震のいずれの場合も, 地震前の滑り欠損のほんの一部しか地震によって解消さ

れていないことがわかる。つまり、1966 年、2004 年の地震の発生は、どちらも震源域に蓄積された歪エネルギーのほんの一部だけを解放したものであるということになる。地震サイクルを越える期間にわたってさえも、このような現象が起こるということは、単純な地震発生サイクルの考え方が適用できないことを意味する<sup>11)</sup>。

図 9 に示す結果は、少なくともパークフィールドでは、滑り欠損の分布からだけでは、次の地震の「時期」も「規模」もどちらも予測できないということを示している。このことから、パークフィールドでは、時間予測モデルも規模予測モデル<sup>18)</sup>もどちらも成り立たないとした<sup>11)</sup>。

図 9 のような、詳細な滑り分布の時間発展を、地震サイクルを超える期間にわたって把握できる場所は、地球上でパークフィールド以外にはない。その意味でこの結果は極めて重要な意味を持つ。しかし、上記の議論は、以下に述べるように、「地震サイクルを越える期間」と考える点に問題があると思われる。パークフィールドはその南東側にある大きな固着域（アスペリティ）と北西側のクリープ域との遷移域に位置し、従って、そこでの地震発生は当然固着域の影響を強く受けるはずである。つまり、M6 程度のパークフィールド地震の繰り返しが、この地域の地震サイクルに対応しているのではなく、それは 1857 年 M7.9 フォートデホン地震タイプの地震の繰り返しであると考えられるべきであろう。そうであるとする、パークフィールド地震の一回の繰り返しは、この地域の地震サイクルのほんの一部の期間にしか対応していないことになり、そもそもそのような短い期間で時間予測モデルや規模予測モデルが成り立つのか否かを議論すること自体、無意味のように思われる。同じ理由で、2004 年の地震が何故当初予測された時期から大きく遅れたのかも理解できる。予測があまりにも単純過ぎるモデルに基づいて行われたからである。

## 6. おわりに

過去の規則的な発生の仕方から次の地震の発生が予測されていたパークフィールドで、当初の予測時期から大きく遅れて 2004 年 9 月 28 日に M6.0 の地震が発生した。地震現象を理解するために、震源域直上に設置された多種の稠密な観測網が捉えたこの地震の観測データは、我々に極めて重要な情報を提供してくれる。本稿では 2006 年に出版された Bulletin of Seismological Society of America の特集号に掲載された論文等を基に、現在までに得られた成果を簡単に紹介した。今後この地震の調査解析がさらに進展し、地震発生過程の理解が深まることが期待される。

## 参考文献

- 1) Bakun, W.H., and T.V. McEvilly, 1979. Earthquakes near Parkfield. California: Comparing the 1934 and 1966 sequences. *Science*, **205**, 1375-1377.
- 2) Bakun, W.H., and T.V. McEvilly, 1984. Recurrence models and Parkfield, California, earthquakes. *J. Geophys. Res.*, **89**, 3051-3058.
- 3) Bakun, W.H., and A.G. Lindh, 1985. The Parkfield California earthquake prediction experiment. *Science*, **229**, 619-624.
- 4) Langbein, J., R. Borchardt, D. Dreger, J. Fletcher, J. L. Hardebeck, M. Hellweg, C. Ji, M. Johnston, J. R. Murray, R. Nadeau, M. J. Rymer, and J. A. Treiman, 2005. Preliminary Report on the 28 September 2004, M 6.0 Parkfield, California Earthquake. *Seism. Res. Lett.*, **76**, 10-26.  
The Kuril trench deduced from ocean bottom seismographic refraction studies. *Tectonophysics*, **165**, 315-336.
- 5) 大中康馨・松浦充宏, 2002. 地震発生の物理学, 東京大学出版会, pp378.
- 6) Johnston, M. J. S., R. D. Borchardt, A. T. Linde, and M. T. Gladwin 2006. Continuous borehole strain and pore pressure in the nearfield of the 28 September 2004, M 6.0 Parkfield, California, earthquake: implications for nucleation, fault response, earthquake prediction, and tremor, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **96(4B)**, S56-S72.
- 7) Johnston, M. J. S., Y. Sasai, G. D. Egbert, and R. J. Mueller, 2006. Seismomagnetic effects from the long-awaited 28 September 2004, M 6.0 Parkfield earthquake. *Bull. Seism. Soc. Am.*, **96(4B)**, S206-S220.
- 8) Fraser-Smith, A. C., A. Bernardi, P. R. McGill, M. E. Ladd, R. A. Helliwell, and O. G. Villard, Jr, 1990. Low-frequency magnetic field measurements near the epicenter of the ML 7.1 Loma Prieta earthquake. *Geophys. Res. Lett.*, **17**, 1465-1468.
- 9) Liu, P., S. Custodio, and R. J. Archuleta, 2006. Kinematic inversion of the 2004 M 6.0 Parkfield earthquake including an approximation to site effects. *Bull. Seism. Soc. Am.*, **96(4B)**, S143-S158.
- 10) Johanson, I. A., E. J. Fielding, F. Rolandone, and R. Bürgmann, 2006. Coseismic and postseismic slip of the 2004 Parkfield earthquake from space-geodetic data. *Bull. Seism. Soc. Am.*, **96(4B)**, S269-S282.
- 11) Murray, J., and J. Langbein, 2006. Slip on the San Andreas fault at Parkfield, California, over two earthquake cycles and the implications for seismic

- hazard. *Bull. Seism. Soc. Am.*, **96(4B)**, S283–S303.
- 12) Langbein, J., J. R. Murray, and H. A. Snyder, 2006. Coseismic and initial postseismic deformation from the 2004 Parkfield, California, earthquake, observed by Global Positioning System, Electronic Distance Meter, creepmeters, and borehole strainmeters. *Bull. Seism. Soc. Am.*, **96(4B)**, S304–S320.
  - 13) Custodio, S., and R. J. Archuleta, 2007. Parkfield earthquakes: Characteristic or complementary? . *J. Geophys. Res.*, **112**, B05310, doi:10.1029/2006JB004617.
  - 14) Waldhauser, F., W. L. Ellsworth, D. P. Schaff, and A. Cole, 2004. Streaks, multiplets, and holes: high-resolution spatio-temporal behavior of Parkfield seismicity . *Geophys. Res. Lett.* **31**, L18608, doi:10.1029/2004GL020649.
  - 15) Thurber, C., H. Zhang, F. Waldhauser, J. Hardebeck, A. Michael, and D. Eberhart-Phillips, 2006. Three-dimensional compressional wavespeed model, earthquake relocations, and focal mechanisms for the Parkfield, California, region. *Bull. Seism. Soc. Am.*, **96(4B)**, S38–S49.
  - 16) Nadeau, R. M., W. Foxall, and T.V. McEvilly, 1995. Clustering and periodic recurrence of microearthquakes on the San Andreas Fault at Parkfield, California. *Science*, **267**, 503-507.
  - 17) Hickman, S., M. Zoback, and W. Ellsworth, 2004. Introduction to special section: Preparing for the San Andreas Fault Observatory at depth. *Geophys. Res. Lett.*, **31**, L12501, doi:10.1029/2004GL020688.
  - 18) Shimazaki, K., and T. Nakata, 1980. Time-predictable recurrence model for large earthquakes. *Geophys. Res. Lett.*, **7**, 279–282.
  - 19) CISN homepage: <http://www.cisn.org/>
  - 20) USGS homepage: <http://www.usgs.gov/>