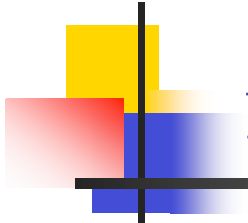


2007/10/15 地震発生論

The Strength of the San Andreas Fault: A Critical Analysis

Scholz (2006), Geophysical Monograph, 170, 301-311

担当：渡邊 太樹
固体 M 1



1. INTRODUCTION

- San Andreas断層 (SAF) では, narrowなheat flow anomalyがないため, 地温勾配が低く, 剪断応力は約10Mpaと見積もられる. これは実験値の100MPaと大きく異なる. (San Andreas heat flow paradox)
- 従来の2つの作業
 - 断層が弱くてもよいメカニズムを探す
 - 応力場の観測から仮説を検証する.
- 従来の議論を再吟味し新しいモデルを提唱

2. BACKGROUND (1)

- SAFの熱流量の観測結果 (Figure 1) には断層を中心とした narrowなheat flow anomalyがなく、摩擦係数は0.2 (実験値の1/3) 以下であることが求められる。
- そのようなメカニズムは難しい (San Andreas heat flow paradox)

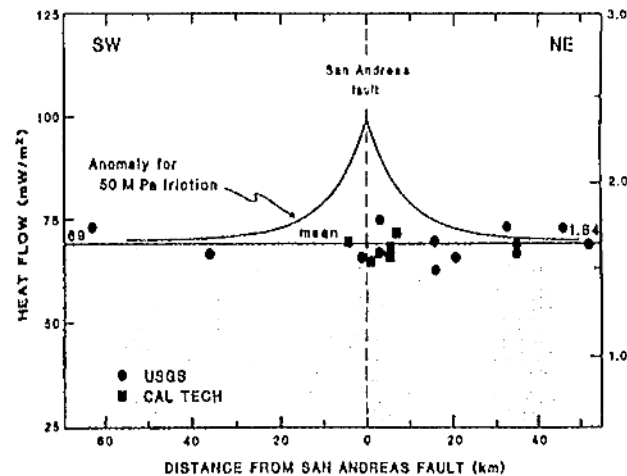


Figure 1. Heat flow measurements in a profile across the Mojave section of the San Andreas fault. (after [Lachenbruch and Sass, 1988]).

2. BACKGROUND (2)

- boreholeの観測結果から,
pore pressureは
hydrostaticで, 剪断応力の
変化は $\mu=0.6$ or 0.7 に相当.

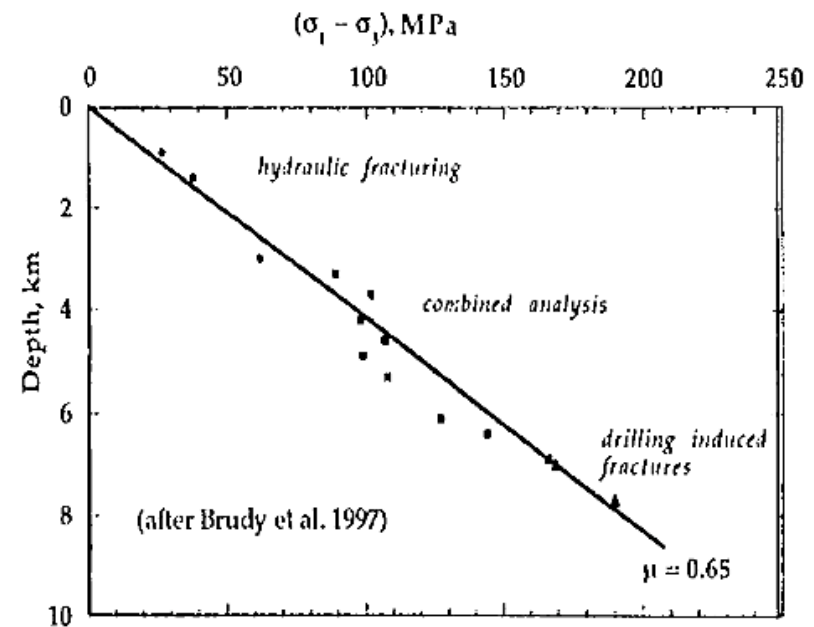
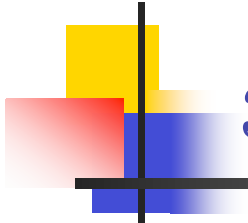


Figure 2. Stress measurements from the KTB borehole, Germany. After Brudy et al. (1997).



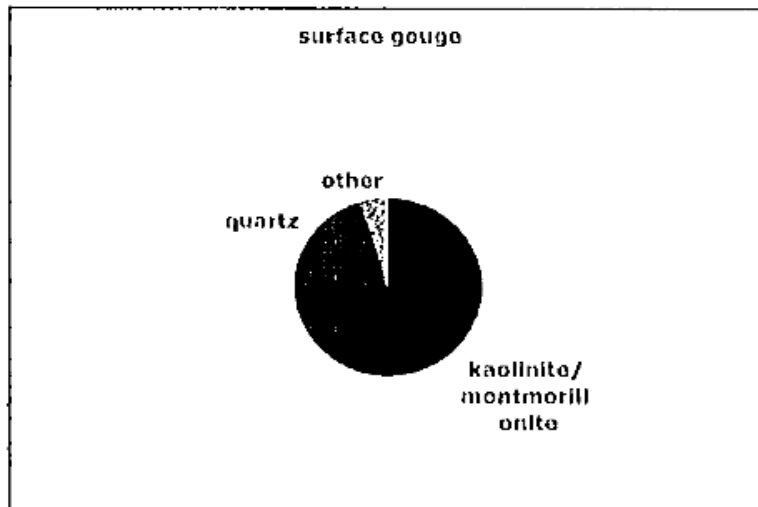
3. MECHANISM FOR A WEAK FAULT

- 摩擦は，組成，塑性変形が始まる温度，スケールに依存しない
- 実験室の結果が使える.

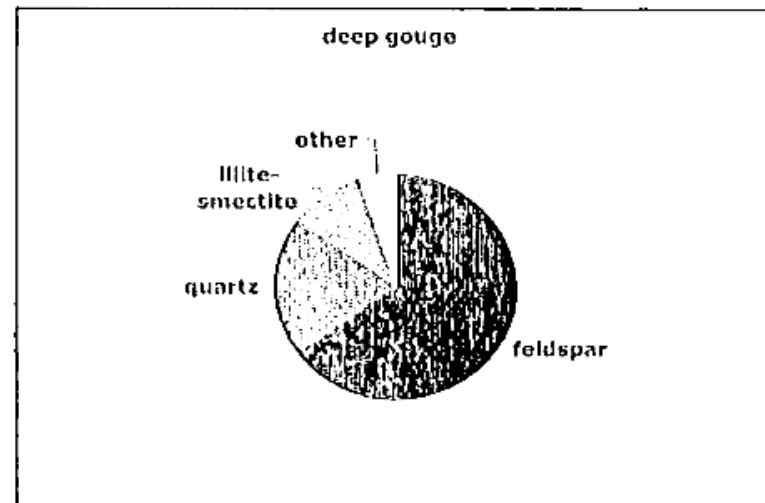
3.1 Solid Lubrication (1)

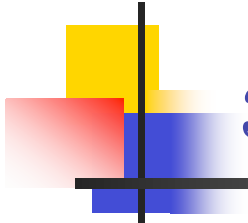
- kaolinite, montmorillonite, chrysotile form of serpentinite 等 ($\mu = 0.2$) が断層にあれば, 熱流量と十分整合性がとれる.
- SAF 表面にはあるが, 深いところ (SGF, 2-5km) にはない (Figure 3) .

A



B

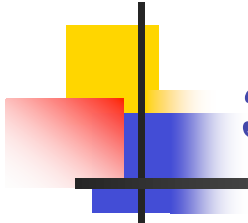




3.1 Solid Lubrication (2)

- 野島断層深部の断層ガウジ： $\mu=0.55$.
- 表層のclayは風化によるもののようである.
- またたとえ全体がclayで出来ていても、温度上昇に伴う相転移でsweling（膨潤性）からnon-sweling（非膨潤性）になるため、全体の μ は0.4になり、高すぎる[Morrow, et al. 1992].
- chrysotile form of serpentiniteは高温でも安定[Reinen, et al. 1991]だが、SAFには（あまり）ない. creeping sectionにはよくある. creeping sectionについては後述

⇒（creeping sectionを除くと）clayによる低 μ の可能性は低い

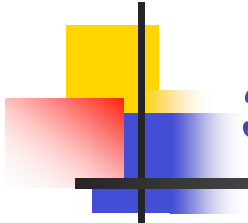


3.2 Elevated Pore Pressure

- pore pressureで説明するにはlithostaticに近い必要がある.
- pore pressureは、水圧破砕（hydrofracturing）の場合を除き、最小主応力を超えられない.
→（最小主応力の小さい）横ずれや正断層で問題になる.
- Lapusta and Rice [1992]によるモデル
 - low permeabilityの物質のlayerが断層を形成していて、外部はhydrostaticだが、内部はlithostaticなpore pressure
 - high pore pressureはマントルでチャージされたもの条件を実際に満たすのは難しい.
- 大陸地殻でのboreholeのデータから、pore pressureは常にhydrostaticで、地殻のhigh permeabilityを示唆.

※一般にboreholeは深くても10km未満（Fig.2参照）

⇒elevated pore pressureでは説明できなさそう.



3.3 Dynamic Weakening Mechanisms (1)

- seismic slip中の動摩擦係数を下げるようなメカニズムが多く提唱されている.
 - shear melting
 - dynamic thermal pore pressure enhancement
 - acoustic fluidization
 - opening mode displacements
 - dynamic lubrication
 - silica gel lubrication
- slip中の剪断応力を少なくできるので、摩擦熱も少なくできる.
- Shear meltingやclastic dikeは、レアケース.
- silica gel lubricationは、slip速度が速い時に摩擦が小さくなるという実験結果を説明するために提唱された.
- 他のものは、理論的に考えられたもの.

3.3 Dynamic Weakening Mechanisms (2)

- どの理論でも，静止摩擦は減らない。
- 静止摩擦がByerlee's law等に従うとすると，100MPaの圧力降下が見られるはずだが，SAFでは10MPa以下。
- Dynamic weakening mechanismは，開始に十分な熱あるいは高slip速度を要する。地震の規模が大きくなると，突然（メカニズムが働くようになり）応力降下量が増えるはずだが，実際はそうになっていない（Figure 4）。

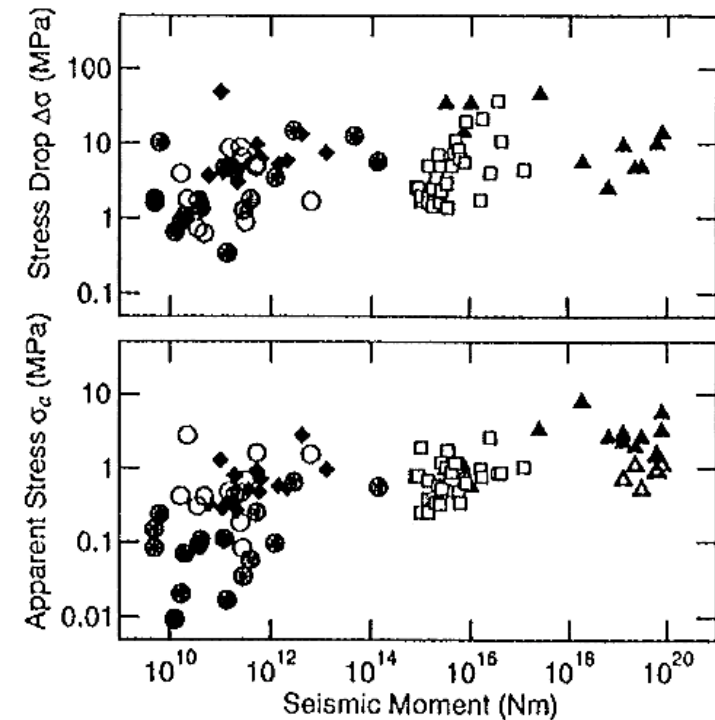
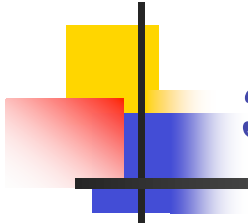


Figure 4. Earthquake stress drop as a function of seismic moment, from [Abercrombie and Rice, 2005]

※応力降下量のsimilarityという主張は，出典と異なる

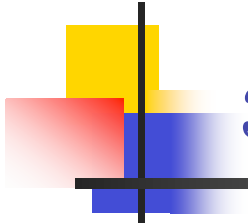


3.3 Dynamic Weakening Mechanisms (3)

- 静止時の応力が小さければFigure 4と辻褄を合わせられる.
- Lapusta and Rice [2004]は、運動時に大きく弱まる Byerlee frictionを仮定し、地震の核となる弱い部分があり、クラック先端の応力集中で強度の高い部分に広がっていくモデルを提唱した.
- 強度の高い部分での剪断応力は静止摩擦より小さいままなので、応力降下が少なくすすむ.
- dynamic weakening mechanismにもLapusta-Riceモデルにもwell developed faultに限定する要素がなく、応力の観測事実と矛盾する.

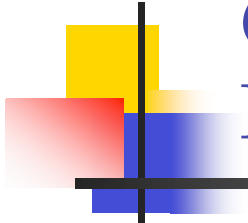
※後者は成熟した断層限定、前者にも大抵スケールに制限がある、とのこと

- どんなに小さな地震でも対応するweak patchがあるのか？



3.3 Dynamic Weakening Mechanisms (4)

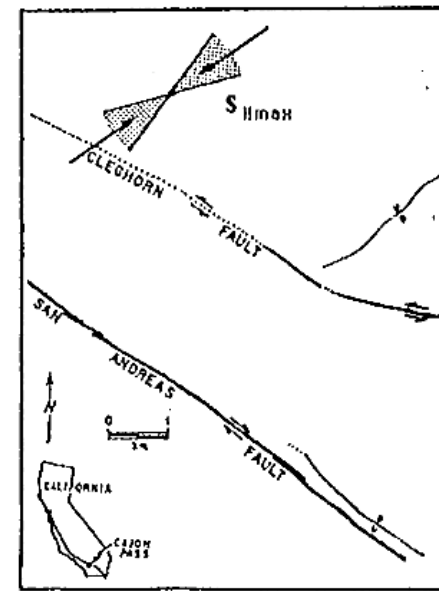
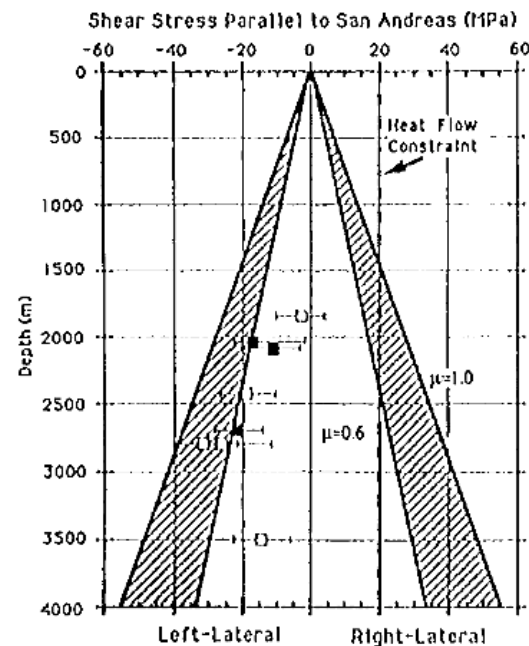
- thermal weakeningモデルでは、剪断応力が狭い領域に限定されている必要がある.
- 断層のroughnessはフラクタル.
※roughnessの意味が出典と異なっているとの指摘があった
- meltはパッチ状に分布するはずで、強度はあまり下がらないであろう.
- roughnessから、fault slip時のdilatancyが予想される.



4. ARE STRESS MEASUREMENTS ON CONSISTENT WITH THE WEAK SAF HYPOTHESIS?

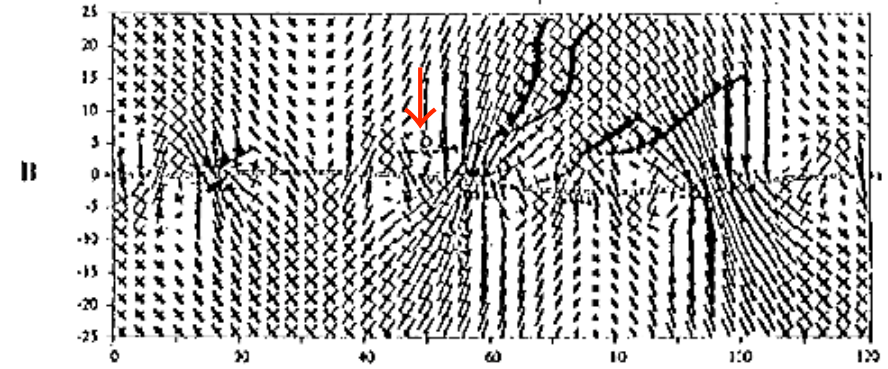
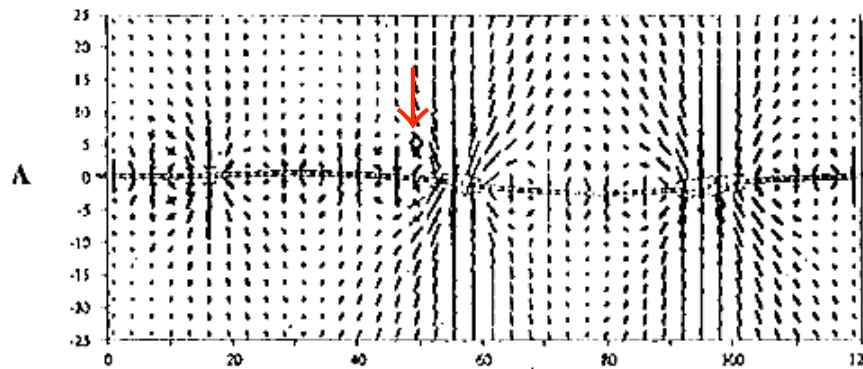
4.1 Absolute Stress Measurements from Boreholes (1)

- Cajon Pass boreholeでの応力の観測
 - $\mu \sim 0.6$
 - 左横ずれの応力場 (SAFは右横ずれ)
- 観測されたのはCleghorn fault (SAFの支断層) の応力場



4.1 Absolute Stress Measurements from Boreholes (2)

- SAFはCajon Pass付近で曲がっており，これにより複雑な応力場が生まれる.
- SAFの摩擦が0の時 (Fig6a) と，Byerlee frictionの時 (Fig6b) について応力場を計算すると，Cajon Pass (○) では向きも強さも同じ.



※この図では，横ずれのみの運動を仮定していて収束成分を無視しており，実際の応力場と異なるであろう，との指摘があった.

⇒SAFの強度は観測結果と関係ない.

4.2 Stress Orientation Data (1)

- weakな断層では、断層面～主応力面であり， strongな断層では σ_1 となす角度 ψ が小さくなる． $\mu=0.6$ の時， ψ は 60° 以下である． (Figure 7)
- 南カリフォルニアでは， SAFから20km以内は $\psi \leq 60^\circ$ である (Figure 8) ． $\rightarrow$ strong faultを示唆

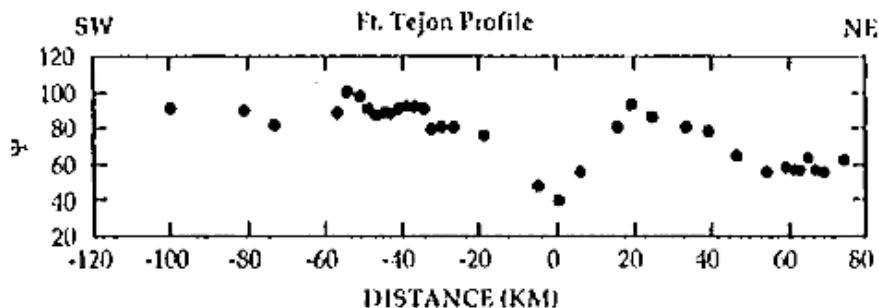
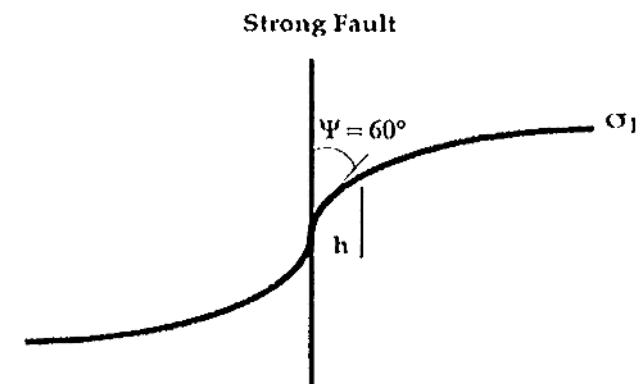
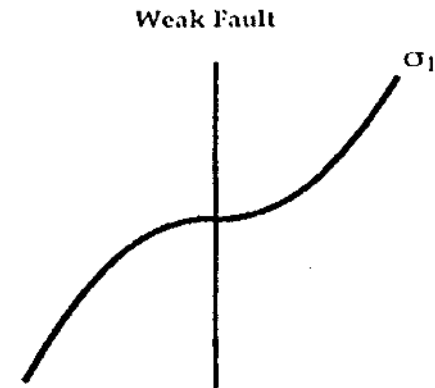


Figure 8. Stress rotation adjacent to the SAF in the Mojave sector. Data from Hardebeck and Hauksson (1999).



4.2 Stress Orientation Data (2)

- 北カリフォルニアでは, locked faultについては $\psi \leq 60^\circ$ (平均 56°) で, creeping faultでは $\psi > 60^\circ$

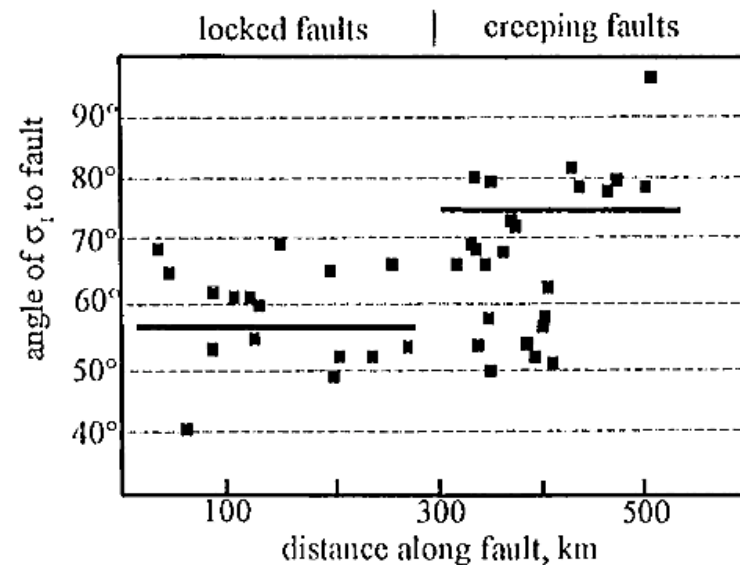
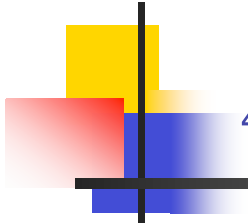
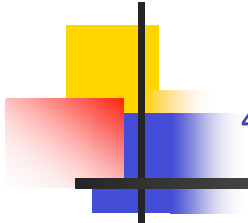


Figure 9. Orientations of σ_1 in Northern California (data from Provost and Houston (2003)). Solid lines are the means of the data for the region of locked faults and of creeping faults.



4.2 Stress Orientation Data (3)

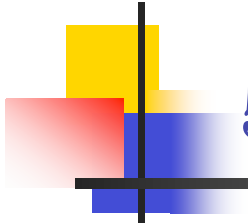
- creeping fault : あまり例がない
- トンガ・ケルマディックやマリアナ弧のようなdecoupled subduction zoneでは確認されている.
- 断層が定常滑り状態になりうる2つの場合
 - A) 垂直応力が十分に小さい
 - B) velocity strengtheningかvelocity neutralな物質で覆われている
- 上述のsubduction zoneでは, 沈み込むスラブにlocalな力が作用する結果, 垂直応力が小さくなり, decouplingが起きたと説明されている.



4.2 Stress Orientation Data (4)

- SAFでは両方の可能性が指摘されている
 - A) Irwin & Banes [1975]
 - SAFの北東部ではGreat Valley formationによりフランシスカンが形成されており, impermeable capとして機能.
 - これによりpore pressureがlithosphericに近くなっている.
 - 水圧破碎を避ける方法は提案なし
 - B) Allen [1968]など
 - 蛇紋岩 (velocity stableな摩擦特性を持つ) の存在
 - 特にchrysotileが多ければ μ は0.2に
- いずれもcreeping faultがweakであることを示している.
- ただしそれはlocalな地質によるものである

⇒SAFは, weakなcreeping fault sectionを除き概ねstrong



5. THE HEAT FLOW DATA REVISITED

- 熱流量データの解釈は正しいか？
- 従来の熱流量の解釈は定常滑りを前提としているが、実際の熱生成はepisodic.

5.1 The Broad SAF Heat Flow Anomaly (1)

- SAF沿いの熱流量データ (Figure 10, 11) では, anomalyが narrowではなくbroadで, Mendicino triple junction (MTJ) を越えるとなくなる.

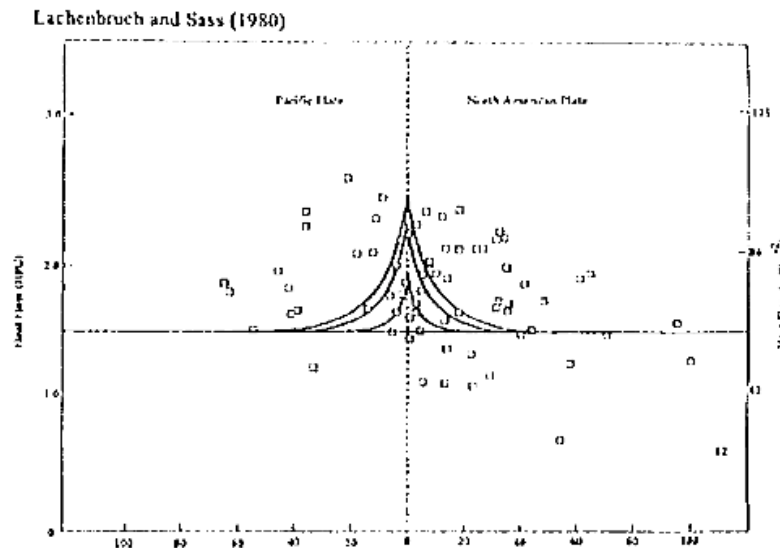


Figure 10. All heat flow data in coastal California, plotted in a profile across the San Andreas fault. After Lachenbruch and Sass (1980).

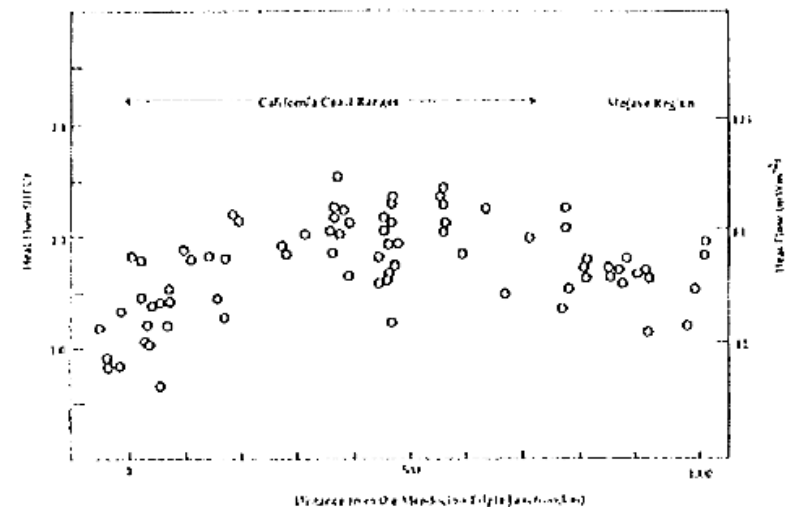
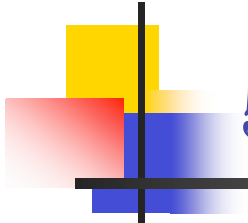


Figure 11. The same data as Figure 10, plotted along strike of the SAF. The origin is at the Mendicino Triple Junction.

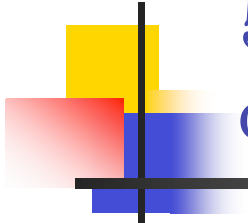


5.1 The Broad SAF Heat Flow Anomaly (2)

- Lachenbruch and Sass [1980] (LS80) : 2つの可能性
 - slab-windowモデル
MTJの南方にone-sided spreading centerがあり, アセノスフェアから物質が上昇. 深さ20kmで1100°Cなら, 熱流量データとあう.
 - brittleモデル
detachment上で熱が発生. SAF上で剪断応力小だが, SAFから離れると大きくならなければならない.

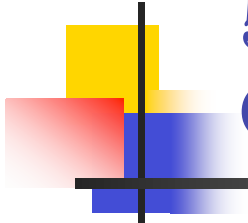
どちらも検証段階.

- broad anomalyはSAF自体に起源か



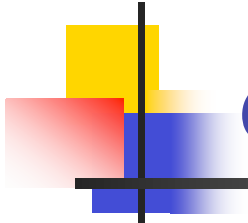
5.2 Is Conduction the Primary Mechanism of Heat Transfer?

- 地下水の流れも熱輸送に寄与しうる.
- 海洋地殻では熱水循環の例.
- hot springの存在→地下水による熱輸送の可能性
- 熱流量の解釈では定常モデルが使われているが、実際の熱の生成はパルス的であり、発熱量は 10^9 倍. 水平方向の温度勾配が高くなり、深部では間隙水の対流が発生しうる. 表層の4~5kmでは温度勾配が小さくなり熱伝導で伝わるであろう.
- Hegben Lake earthquake (1959, M7.3) では、地震後2ヶ月間に 0.5km^3 の水が震央域から押し出された. この10倍の量の水が地震動による仕事 $7 \times 10^{16}\text{J}$ で温められたとすると、 3°C の温度上昇.
- 地震直後の水による熱輸送は十分起こりうる.



5.3 Deep Fault Structure, Heat Generation, And Fluid Circulation

- SAFの過去の活動域は深さ2～5kmまであって、ウルトラカタクレーサイトの構造が微細であることから、少なくとも最近の活動期におけるビッグイベントによるものではないことが示唆される。
- より深い場所にある横ずれ断層では様子が異なる。南スペインのCarneras faultやチベットのDamxung-Jiali faultでは、幅3～5kmのいたるところでシュードタキライトのveinが見られ、熱水循環の証拠となっている。



6. CONCLUSIONS

- 熱流量の解釈に沿うような弱い断層をつくるメカニズムはない.
- 応力のデータからカリフォルニアの地殻, 及びcreeping sectionを除くSAFの強度が高いことがわかった.
- creeping sectionにあるSAFOD boreholeのデータから, broadなanomalyが認められ, 強度の高い断層による摩擦熱が熱源であることを示唆.
- LS80によるモデルはまだ十分に検証されていない.
- 定常状態を仮定した従来の熱流量の解釈は誤りである. ビッグイベントのみで熱が発生すると仮定すると, 深部における水平方向の水による熱輸送が示唆され, broadなanomalyとも整合的である.

ご清聴ありがとうございました