

Intense foreshocks and a slow slip event preceded the 2014 Iquique Mw 8.1 earthquake

Ruiz et al.(2014)

06/20 地震発生論

発表者 : 小森 純希(安藤研M1)

背景

対象地域

南米 チリ北部 S19° ~S23°

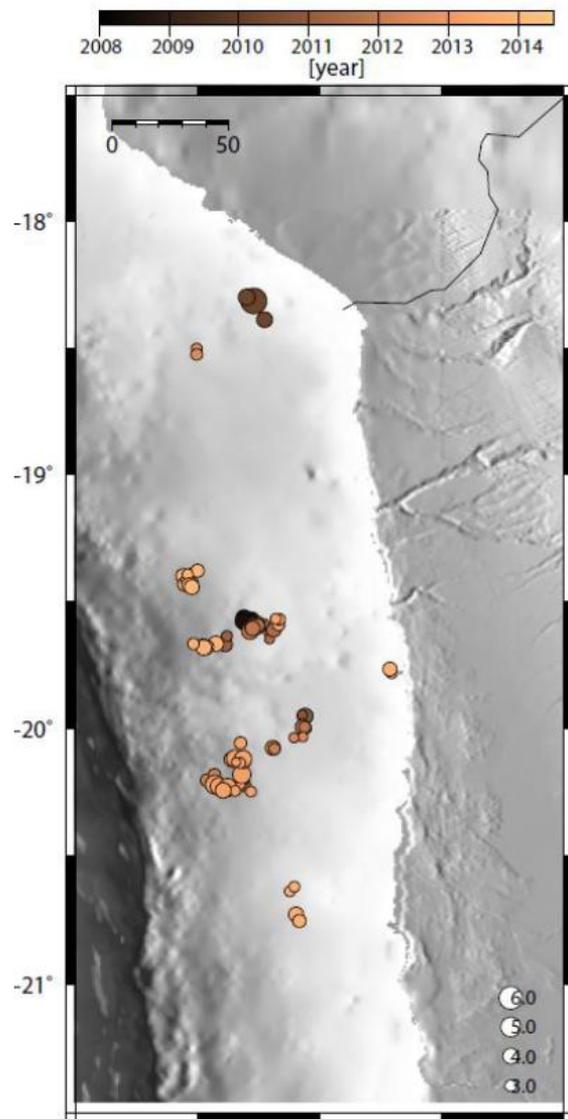
ナスカプレートが陸側の南米プレート下に沈み込むプレート収束境界

2014年4月1日にS19° -S20° の領域で Mw8.1の海溝型地震が発生

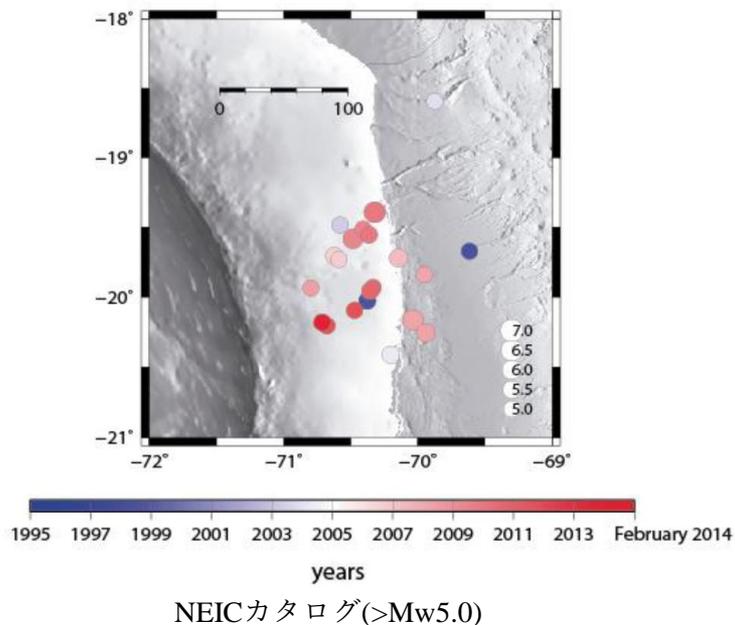
この地震の発生シーケンスを観測・議論



2014年以前の地震活動



CSN(チリ国立地震センター)カタログ(2008~)



NEICカタログ(>Mw5.0)

2014年以前から、 $<M4$ 規模の逆断層イベントが定常的に発生していた

2005年以降、Iquique付近での地震活動が、それ以前と比べて活発化(NEICカタログ)

Iquique沖のプレート間固着

地震間のプレート間固着による、
地表面の変動を観測(GPS)

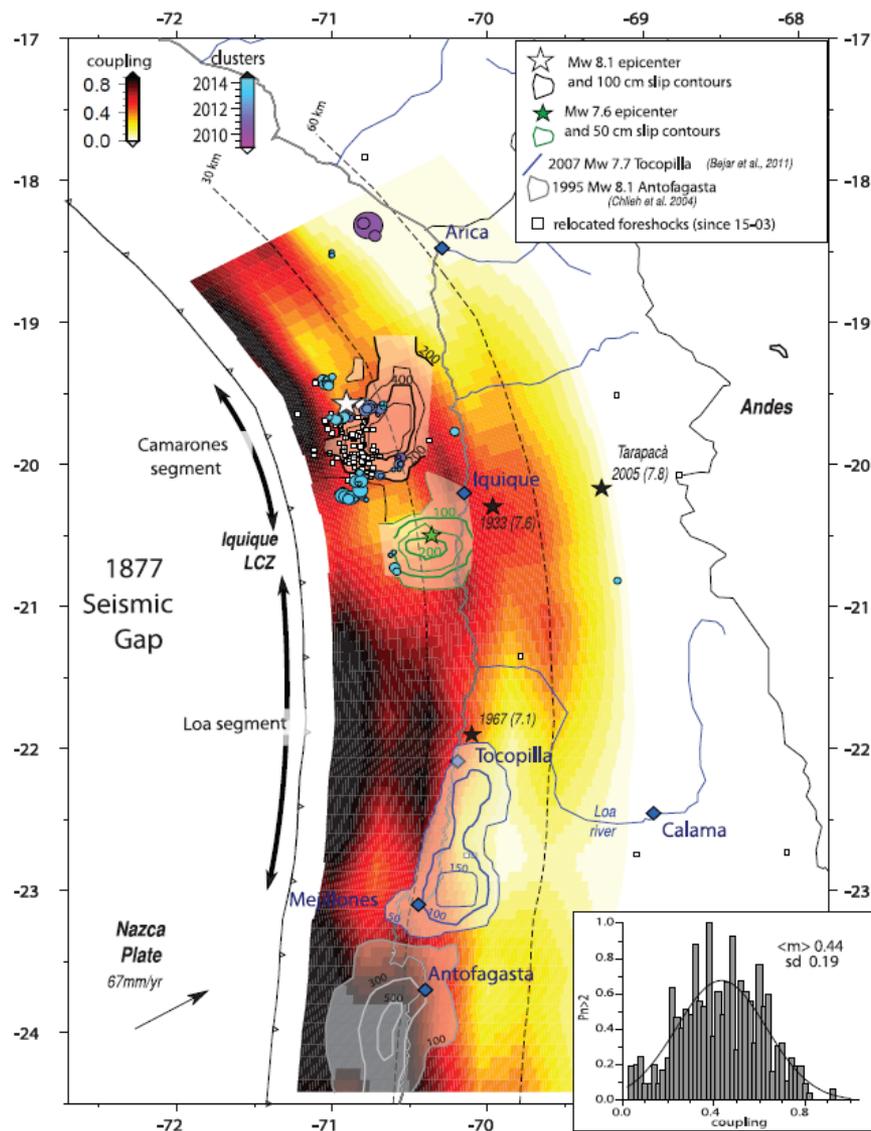
インバージョン解析により、
プレート間の固着分布を推定



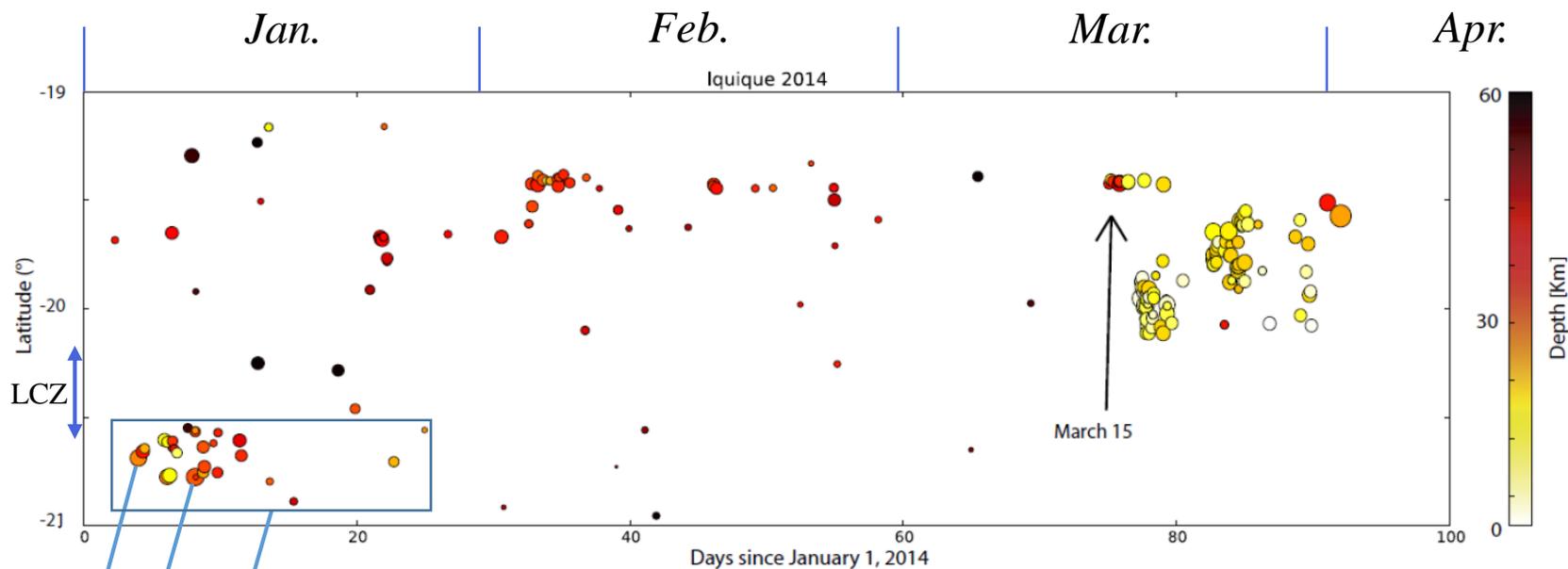
- 沖合に高い固着域
- Iquique沖に固着率の低いパッチが存在(Iquique LCZ)

2014年1月から、北チリで地震活動が
活発化

4月1日の本震発生まで、断続的に
イベントが発生



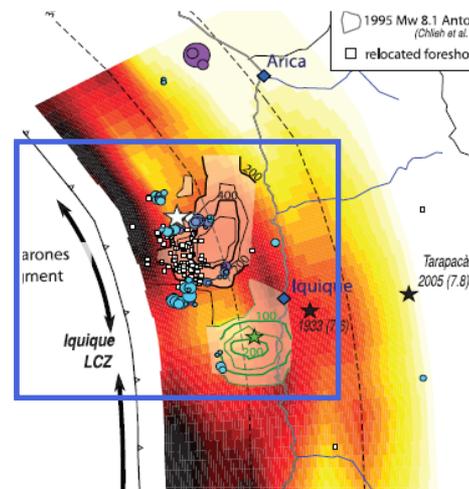
2014年1-3月の前震活動



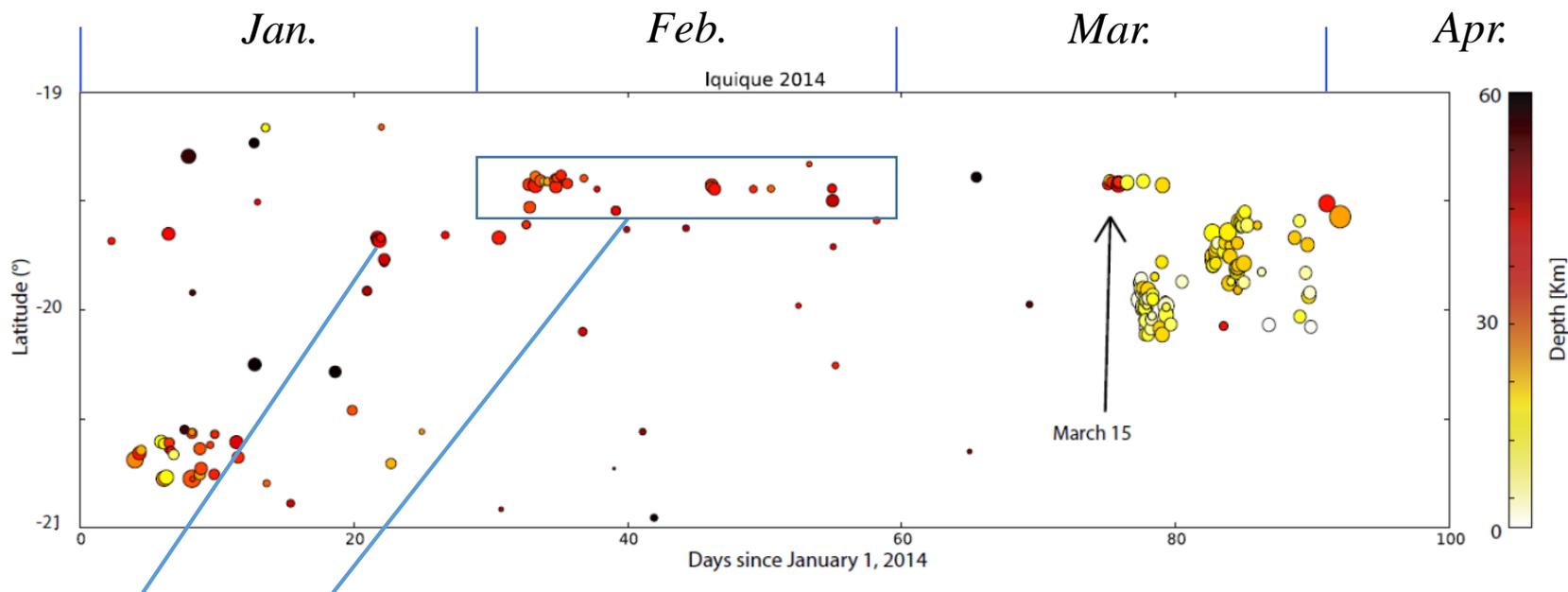
1月4日
LCZ南端部でMw5.7スラスト地震

1月8日
ほぼ同じ領域でMw5.7

1/4-1/24の期間 15km四方で30のイベント



2014年1-3月の前震活動



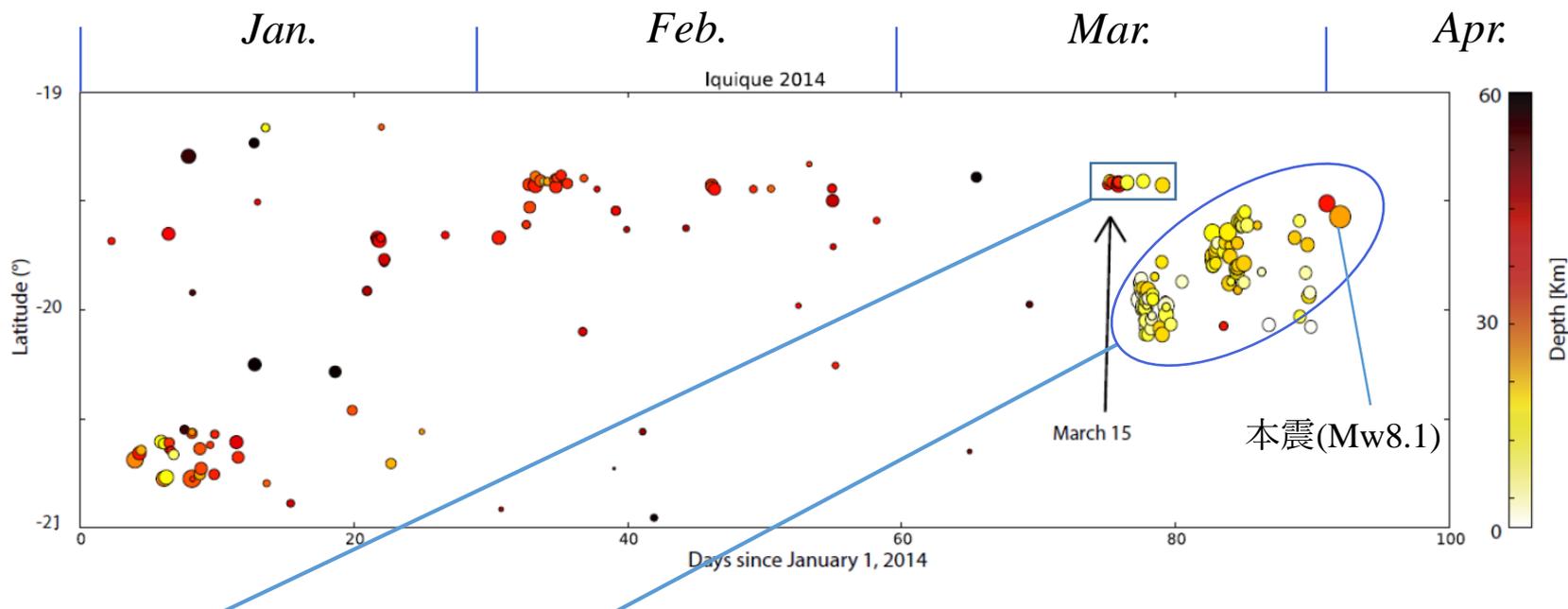
1/21

LCZの北側で、6個のイベントからなるクラスター

2月中

ML2.4-4.0の、少なくとも16のイベントからなるクラスター

2014年1-3月の前震活動



3/15

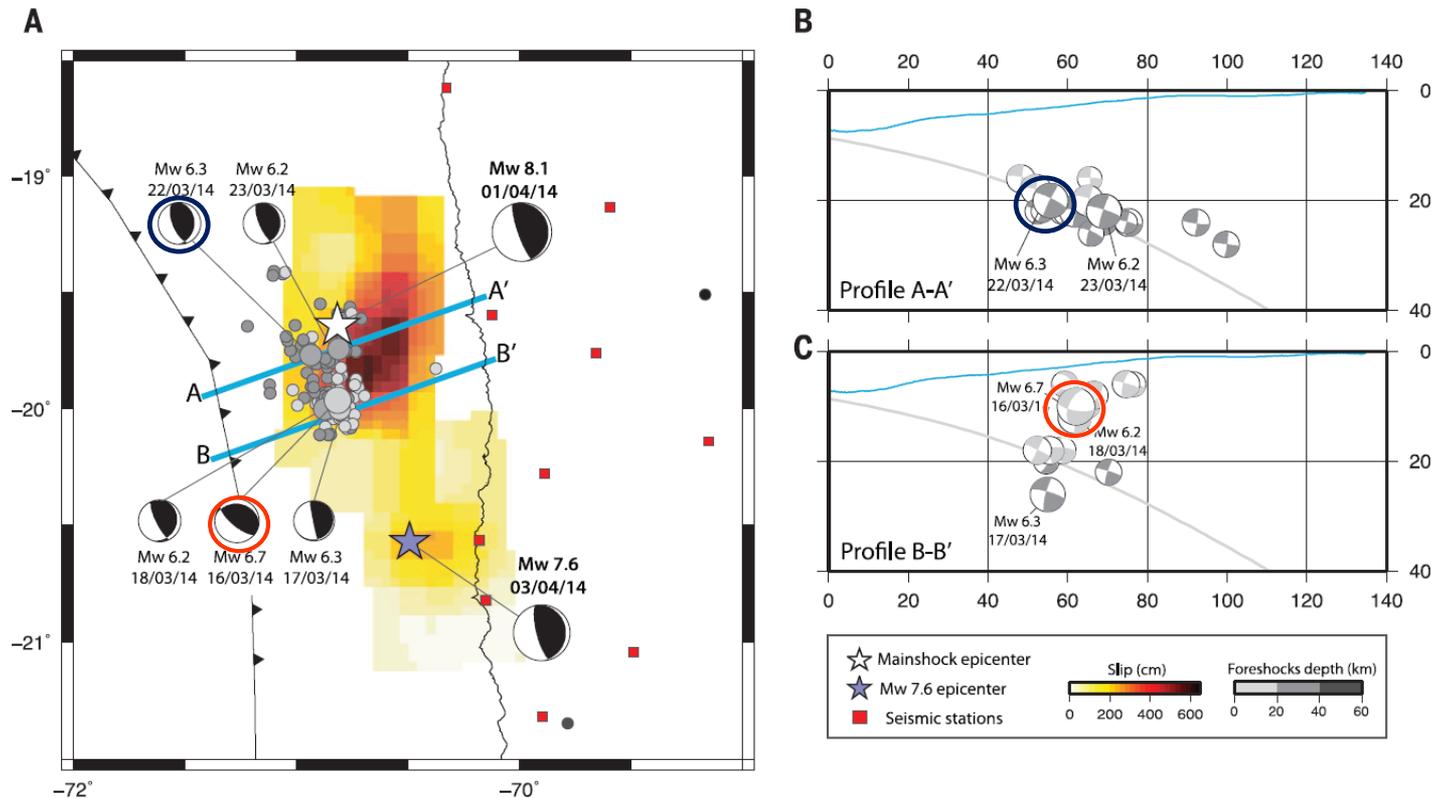
2月と同じ領域で、再びML2.6-4.6の11のイベント

3/16

南側でMw6.7の前震

以降4/1の本震まで震源を北に移動させながら連続的に活動

3月前震の震源



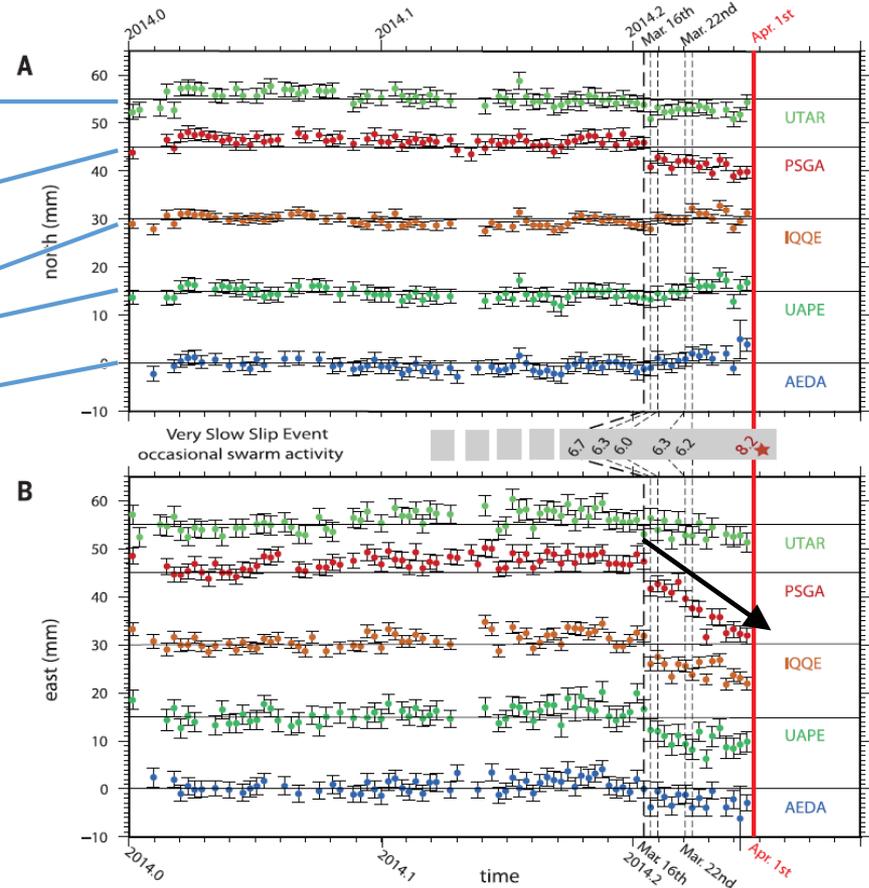
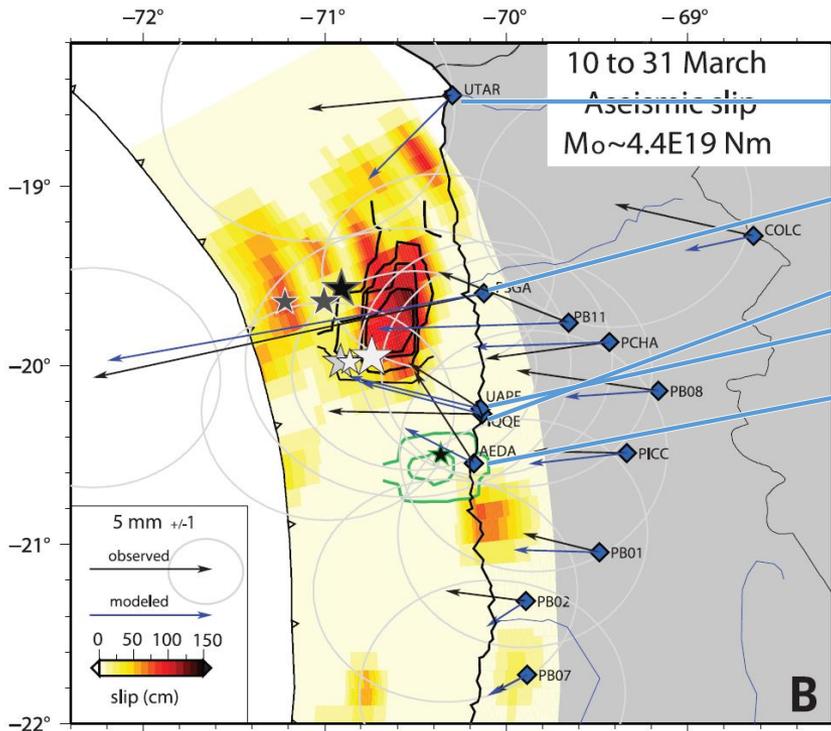
プレート沈み込みの走向沿い150kmの領域で前震が発生

3/16の震源(赤丸)はプレート境界面上ではなかった

3/16後、上盤プレート(南米プレート)内で地殻内地震が連続して発生

3/22の震源(青丸)はプレート境界地震

本震前のスロースリップ



3/16の余震以降、Iquique付近のGPS観測点が、西向きの変位を示す
(平常時は東向きの変動)

3/16の余震による変位量は、この変位の20%未満

▶ 前震活動と同時に非地震性のゆっくりすべりが発生

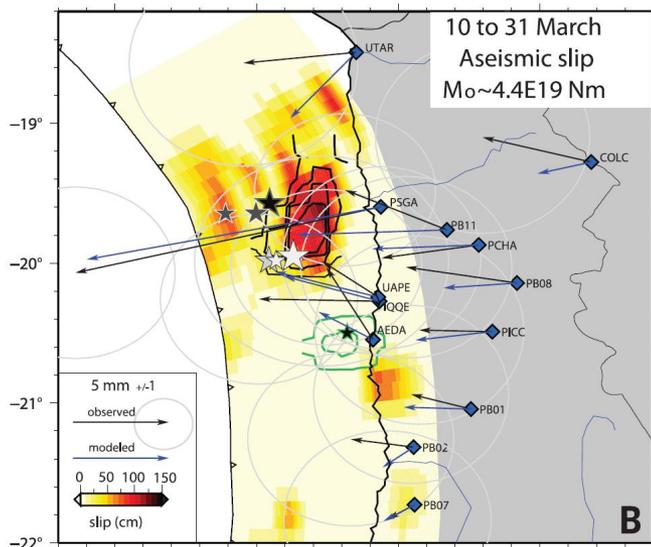
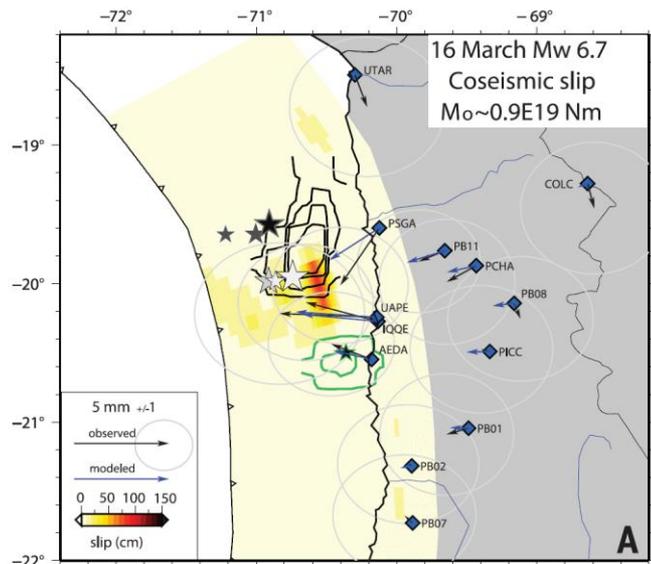
本震前のスロースリップ

3/16前震とSSEのすべり分布を逆解析

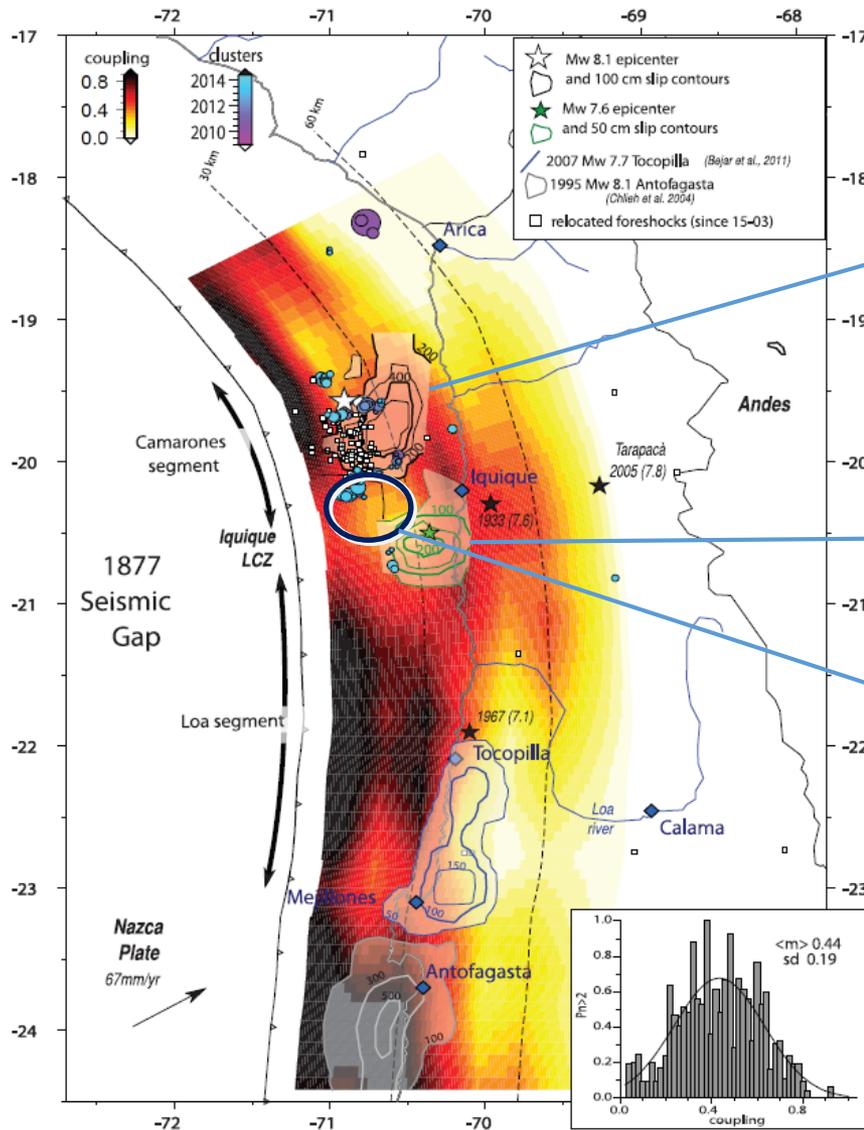
3/16の前震は，震源付近でおよそ0.8mのすべり

SSEは，前震のやや北側

4/1の本震の破壊領域にほぼ重なるようにすべり
(~1m)



本震のすべり分布



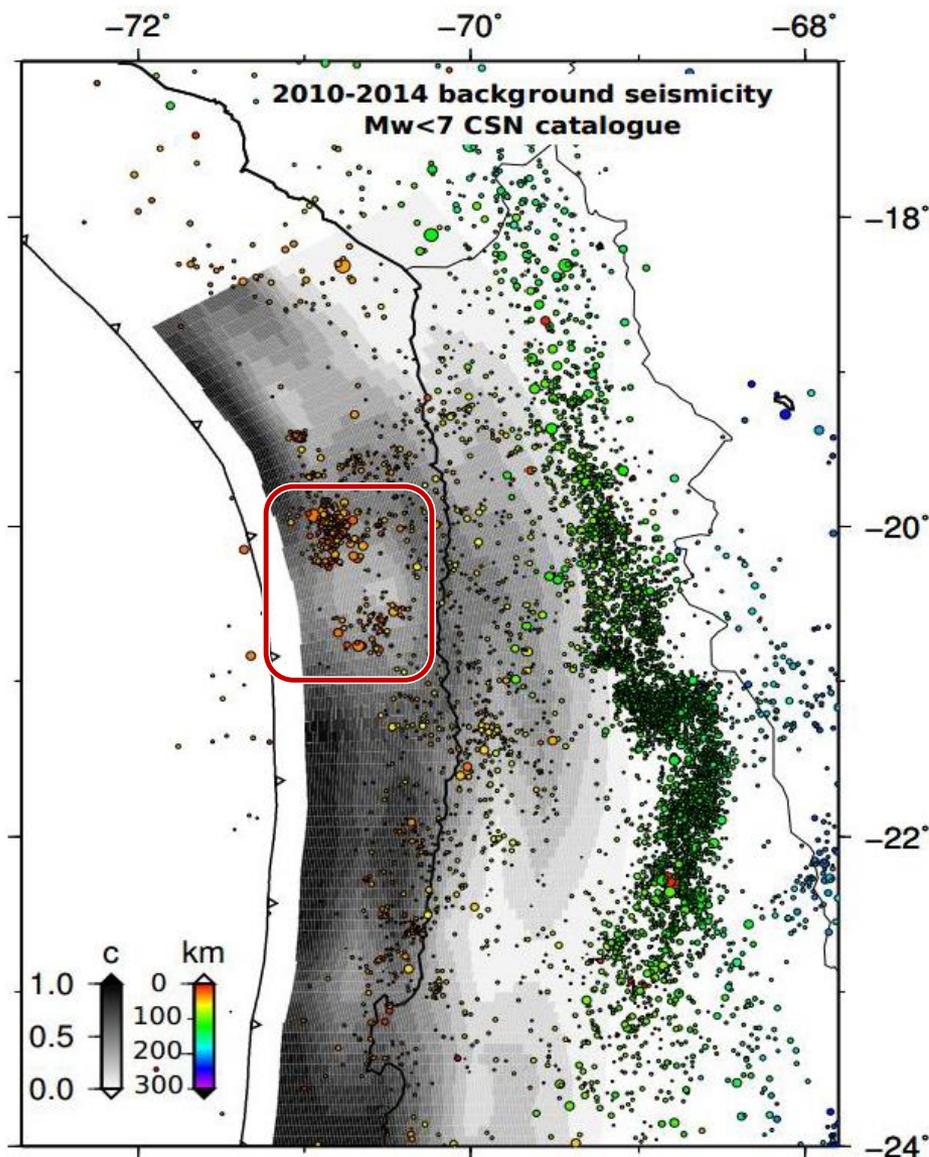
地震波解析により，4/1本震と4/3の余震のすべり分布を推定

本震は北側から破壊開始
 最大すべりは前震発生域よりも深く
 水平方向におよそ20km陸側
 高固着域(>0.6)で発生

余震はLCZをはさんで南側で破壊

本震破壊領域は，直前のSSE領域と重なっていたが，
 LCZでは地震性すべりは起こらなかった

地震シーケンスとLCZ



2007-2014の小規模地震の震源

LCZ端で群発地震が発生

中間的な固着率(~ 0.5)の領域で
中規模地震が多く発生



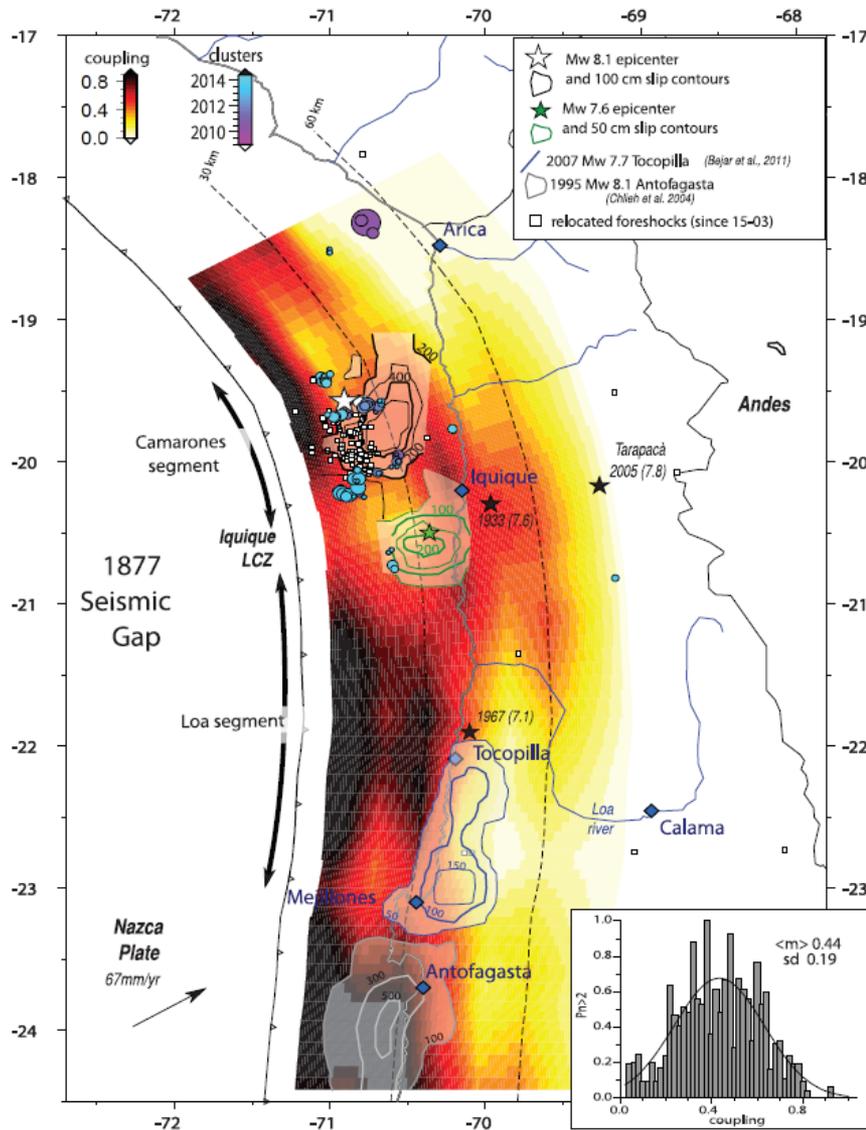
LCZでの非地震性クリープが周辺での
地震活動を誘発している可能性



地震を誘発するにはSSEの
マグニチュードが小さすぎる

沖合で発生するため、陸上の観測(GPS)
では解像度が足りない

本震とSSE



Mw8.1の本震とMw7.6の余震はLCZを通過しなかった

本震前の前震活動とスロースリップはLCZでクリープが起こっていることを支持する

本震直前のSSEや前震は、理論モデルや多くの室内実験で示されている、動的破壊の先行現象としての nucleation が観測されたもの

他のプレート沈み込み域でも、同様にプレスリップやスロースリップといった前駆的地震活動が観測されている

e.g.)1985Valparaiso地震Mw8.0, 2010Maule地震Mw8.8, 2011東北沖地震Mw9.0



巨大地震直前のSSEは、プレート沈み込み域で普遍的な現象であり巨大海溝型地震を引き起こすメカニズムである可能性

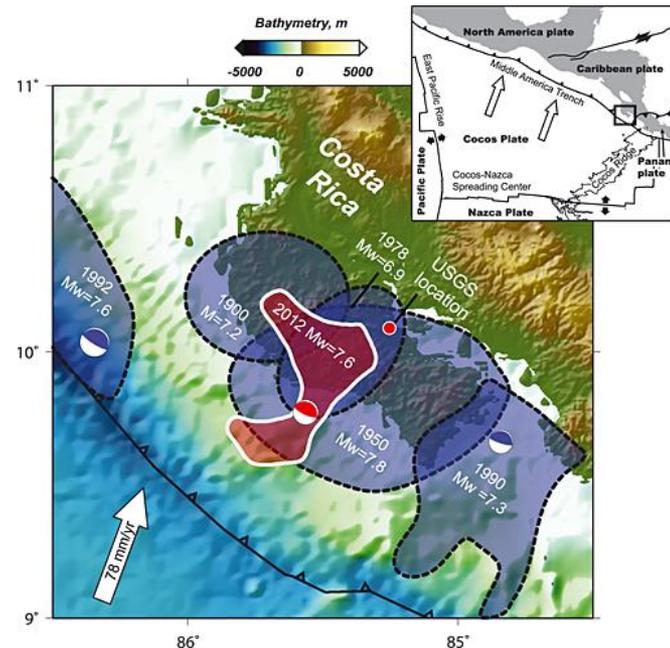
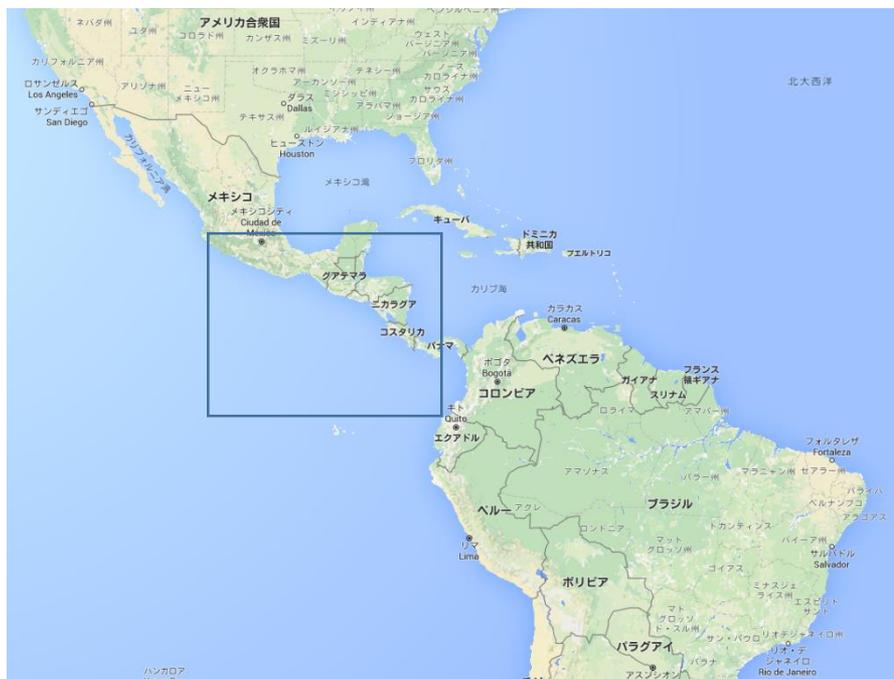
Earthquake and tsunami forecasts: Relation of slow slip events to subsequent earthquake rupture

Dixon et al.(2014)

06/20 地震発生論

発表者 : 小森 純希(安藤研M1)

2012年コスタリカ・ニコヤ地震



(Yue et al., 2013)

2012年9月5日

北西部の太平洋沿岸を震源とするMw7.6の海溝型地震が発生
津波被害は発生しなかった

2007年よりGPS連続観測網が展開 + 破壊領域が陸域の直下

▶この地震とそれ以前のスロースリップ活動との比較・議論が可能に

背景・繰返しSSE

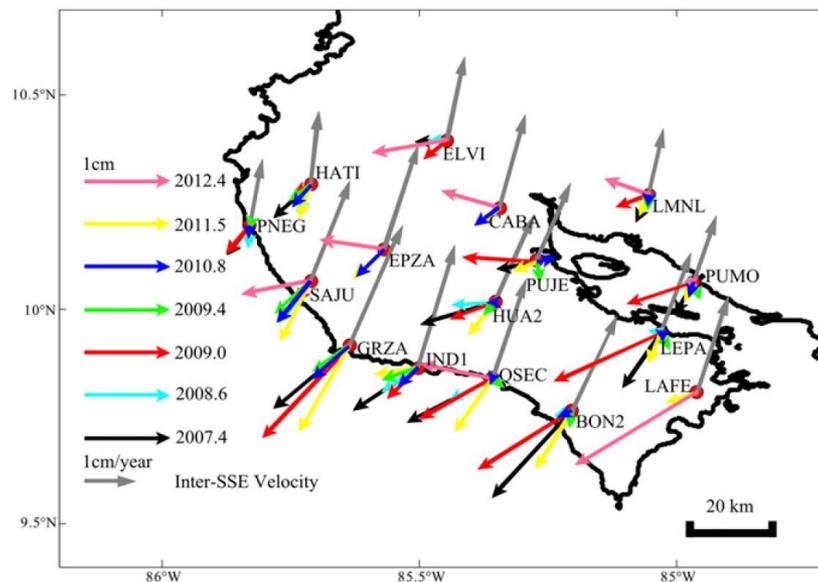
観測地域 ニコヤ半島
カリブプレートの下側に
ココスプレートが沈み込む
プレート収束境界

M7以上のプレート間地震が
1853,1900,1950に発生

2012年の地震と合わせて、
およそ50-60年に一回の間隔

大きな津波の報告は無い

ニコヤ半島の下で、頻繁に
SSEが観測されている



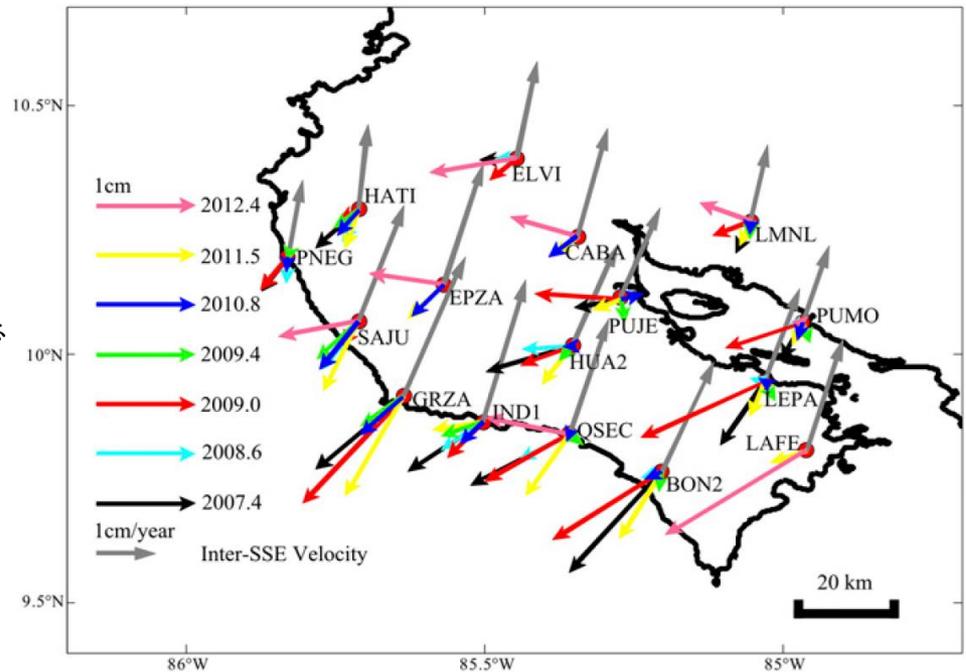
メソッド

2007年から、ニコヤ半島で運用されている高精度GPS観測網

2007-2012年の間に7回のSSE

GPSデータからのインバージョンで各SSEでのすべり量およびSSE間でのプレート間固着を解析

空間解像度 30km
時間解像度 5-10日



SSE観測の時間解像度

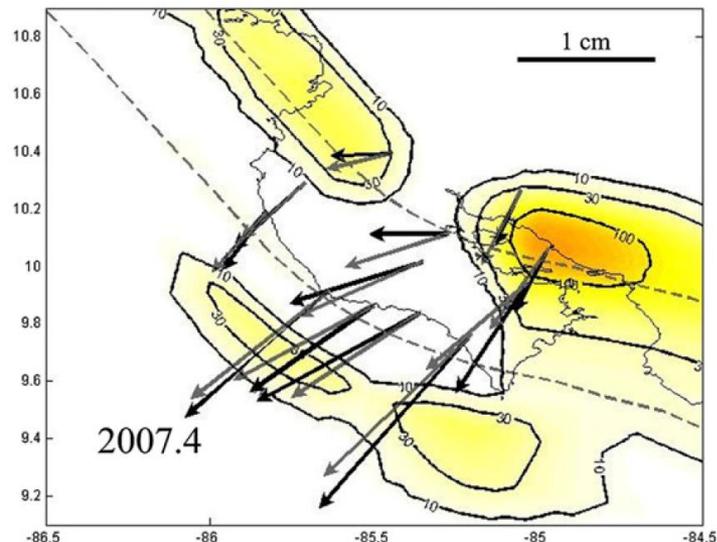
一般的に、SSEは一度に全体がすべるのではなく、ある一点ですべりが始まり、移動(migration)していく

マイグレーション速度

Cascadiaにおける観測例 10km/日

コスタリカでの水圧の観測

による推定 <20km/日



今回の観測網内で起こるSSEが移動するのにかかる時間は最大でも5-10日

→データの時間解像度未満

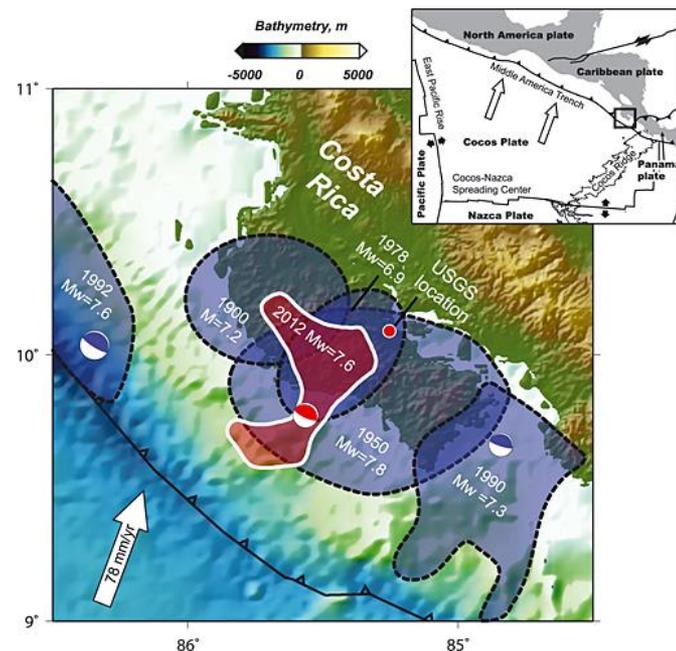
▶ 同じ30日区間に発生したイベントは、一つのグループとしてまとめる

地震破壊と地震間固着

2012 Mw7.6地震の破壊分布を
地震波記録から解析



- 沖合の深さ15kmで破壊開始
→ 下方へ伝播
- 最大すべりは深さ25kmで4.4m
- 破壊下端は上盤プレートのモホ付近
深さ30-35km



(Yue et al., 2013)

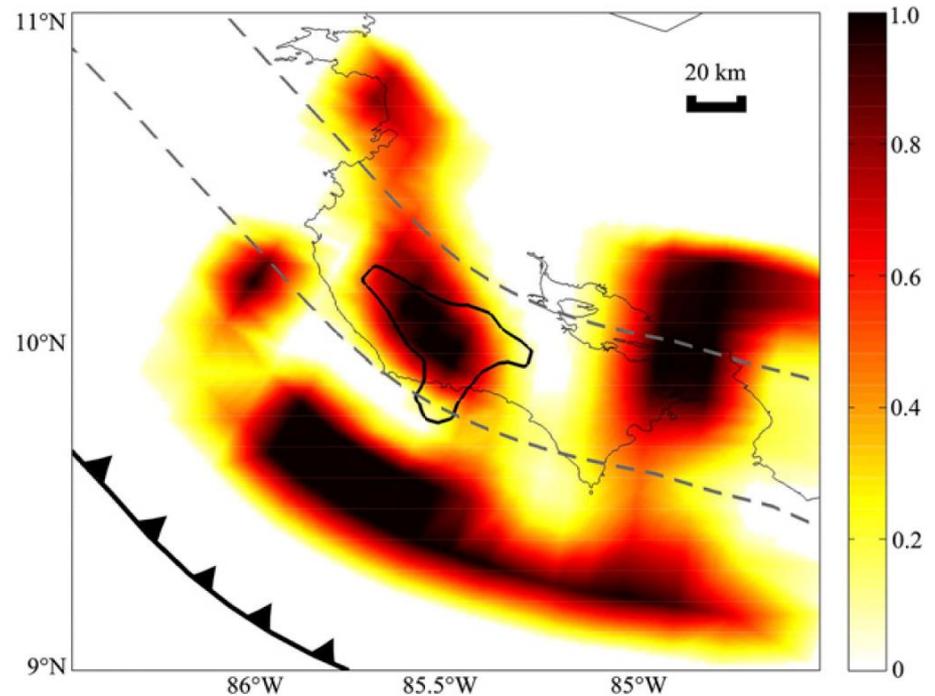
地震破壊と地震間固着

GPS記録から推定された
プレート間固着分布(カラー)

2012地震の破壊領域(黒枠)



地震破壊領域と
地震間固着の中央のパッチが
ほぼ一致している

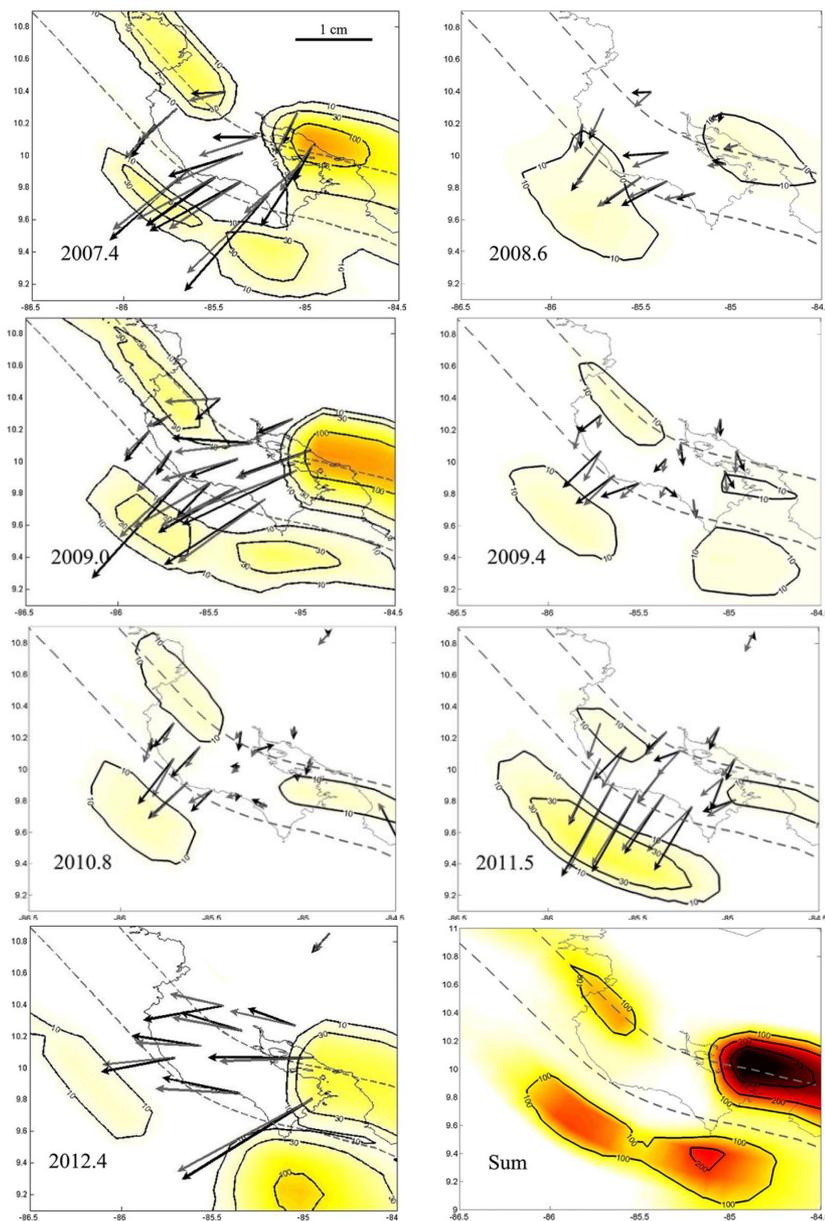


SSEの分布

2007-2012間の7回のSSEの
すべり分布を解析

基本的に、下側のすべりが大きい
いずれのSSEも多少の浅部側の
すべりを伴っていた

浅部SSEは、陸上の観測点から
離れた領域で発生するため、
これまで他のプレート沈み込み
地域でも観測の報告は少なかった



SSEの2種類の分類

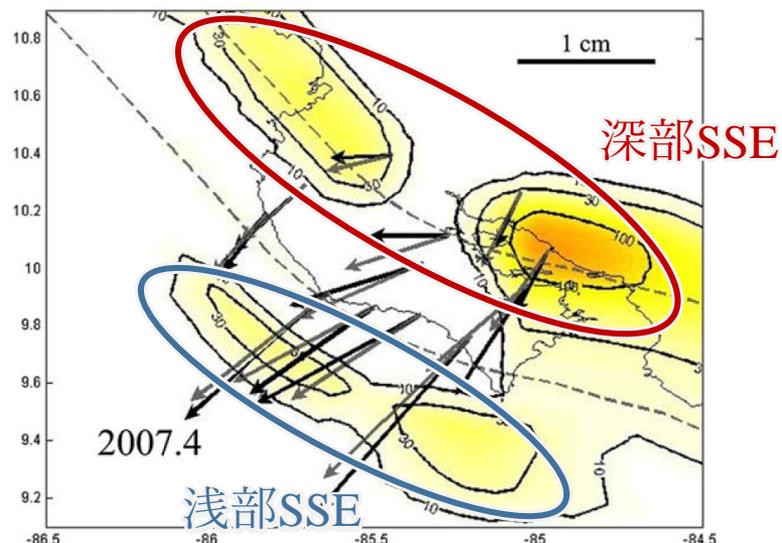
地震時の破壊に対する位置や規模から
ニコヤ半島下のスロースリップを
二つの種類に分類

1) 深部SSE

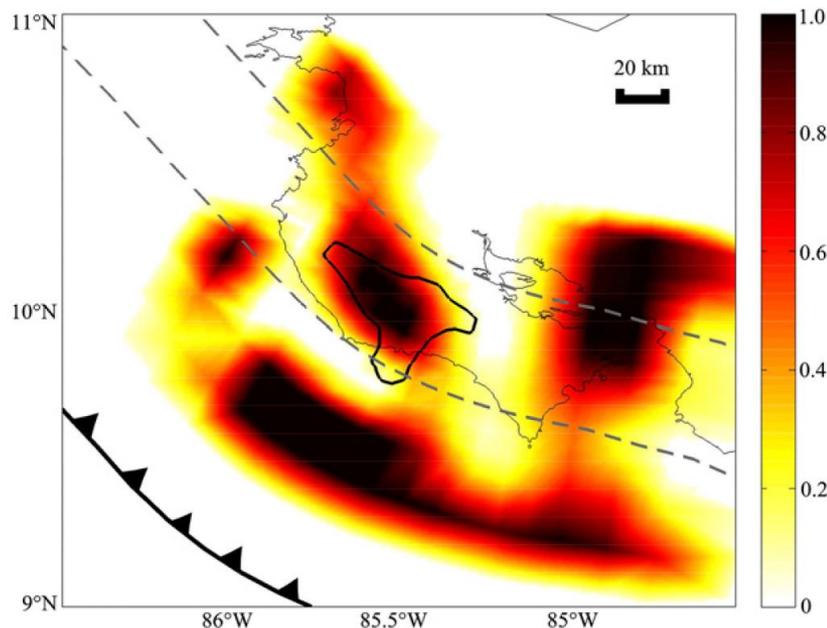
地震破壊の主領域の下側で発生
主に東側で大きなすべり
沈み込みスラブが上盤のモホ面に
交差する深度
特に沖合のFisher海山列の延長線上

2) 浅部SSE

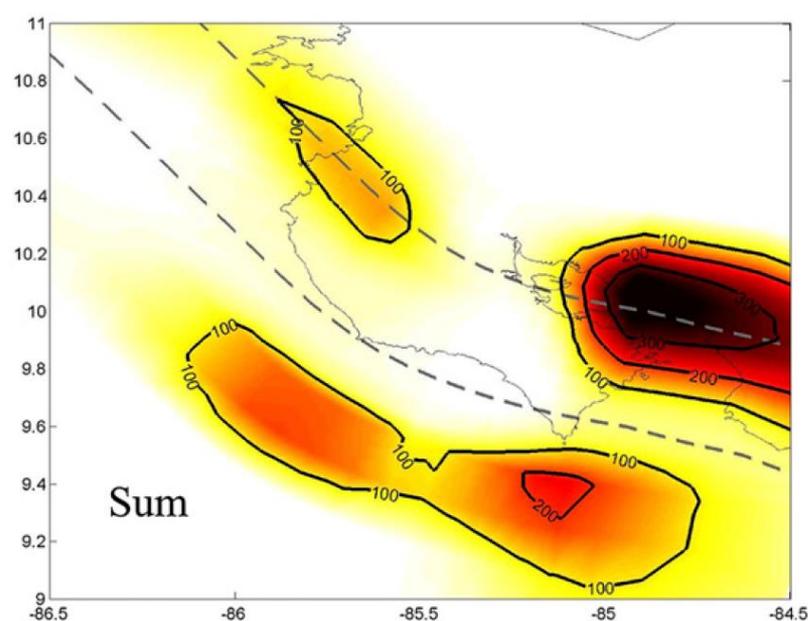
沖合で発生する、地震破壊領域の
上側の小さなイベント
観測範囲外であるさらに沖合の領域まで続いているかもしれない



総合的なSSEのパターン



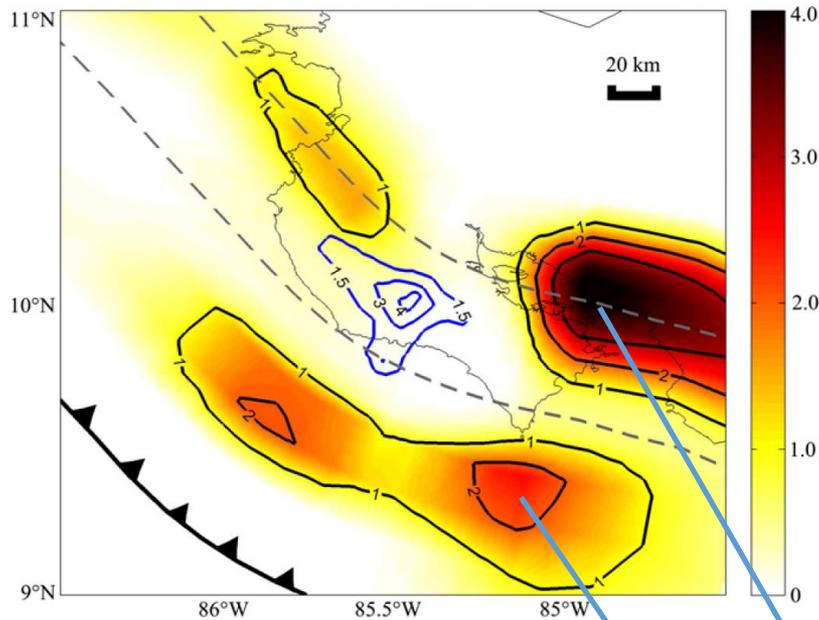
SSE間固着



SSEの合計すべり量

- 地震時の破壊領域を取り囲むようにSSEが発生している
- 地震破壊領域を除いたプレート間固着域のほとんどが、SSEでもすべっている
- SSEで放出されたモーメントの合計はMw7.5相当(2007-2012)

1950年以降の固着 - SSEパターン



62年間のSSEによる推定すべり量

前回のプレート間地震(1950年 Mw7.8)以降, 歪み蓄積の速度と空間パターンが常に一定であったと仮定



完全に固着したパッチは, 合計のすべり欠損~5m

2012年地震の最大すべりと適合(4.4m)

同様に, SSEに関しても2007-2012の観測量が過去60年間でも同様であると仮定

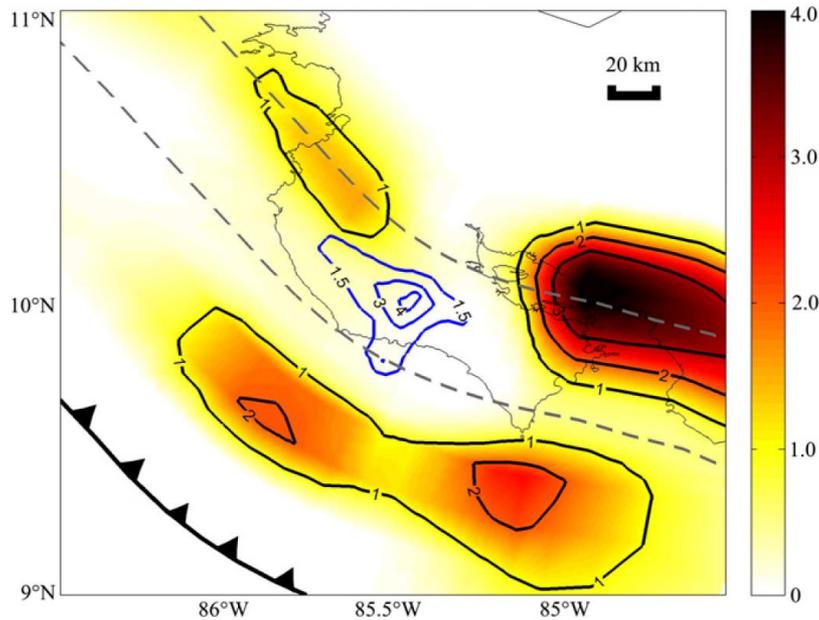


下側SSEによる解放量は約4mで, 蓄積されるすべり欠損量に近い

▶ 下側SSEは地震間の歪み蓄積を解放

上側SSEの解放量は地震間固着の半分未満

1950年以降の固着－SSEパターン



62年間のSSEによる推定すべり量

1950年以降の、SSEによるモーメント解放量は、Mw8.2相当
2012地震のモーメントよりも1桁大きい

- SSEはプレート運動による歪みの80-90%を解放
- SSE発生領域は、歴史的に巨大地震活動の少ない地域と対応



中央アメリカで巨大地震の発生が比較的少ないのは、このSSEによる歪みの解放が影響していると考えられる

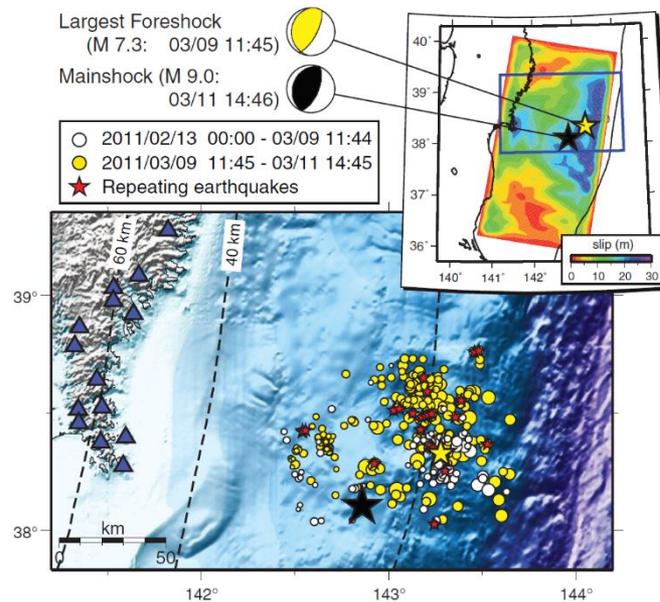
既存データの問題点

2011東北地震のGPS観測データは、
浅部SSEを検出するには遠すぎる

東北沖SSEは、微小地震活動の移動
から推定されている

コスタリカでの観測から、
SSEとトレマー、群発地震が常に
同じ場所で起こるとは限らないこと
が指摘された(Outerbridge et al., 2010)

地震活動データのみからSSEの
発生を推定することは適切でない

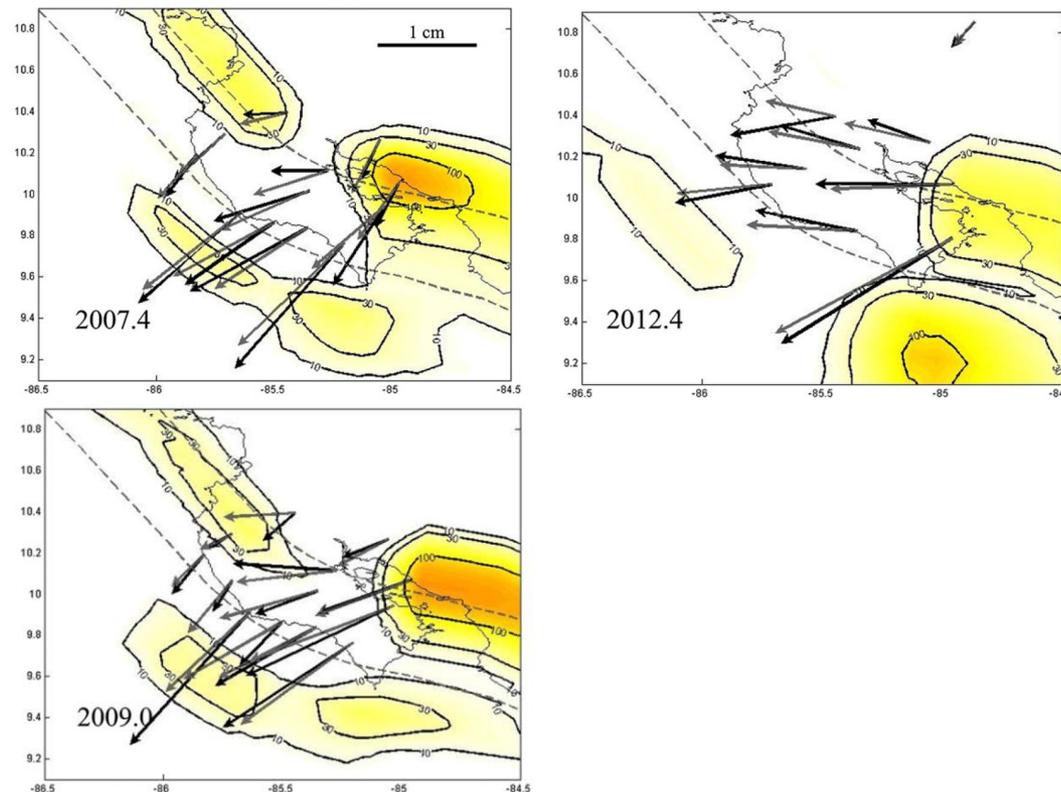


2012地震とSSE

今回コスタリカ ニコヤ半島で得られたデータは、近傍のGPS観測から繰返しのSSEをとらえ、直後の地震破壊と比較可能な、誘発仮説を議論する上で非常に良質な結果

▶ 今回のデータは、この誘発仮説を裏付ける結果とはならなかった

1)
2012地震直前のSSE分布と、非常によく似たSSEが2007年と2009年にも起こっているが、これらはプレート間地震を引き起こさなかった



2)

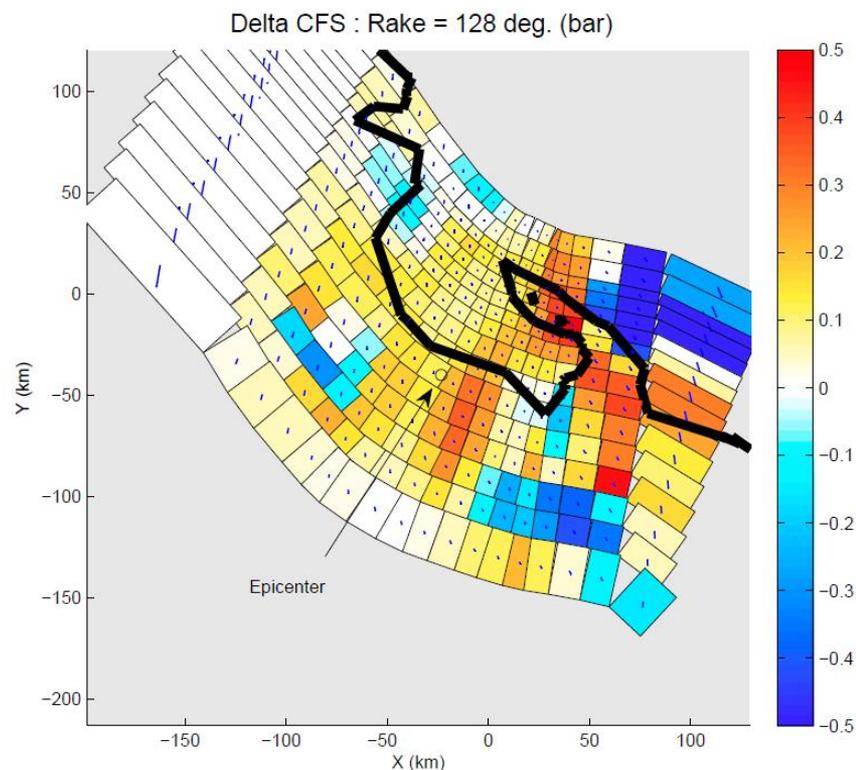
2012年SSEによる、プレート境界面上の Δ CFSを計算

一般的に、沈み込み境界では、巨大地震の誘発には Δ CFS1-25bar必要

- 最大の Δ CFSは地震破壊の下端付近でおよそ0.5bar
- 破壊の開始点と考えられる沖合の Δ CFSは、 <0.2 bar



直前のSSEが、直接的にMw7.6の地震を引き起こしたとは考え難い



2012SSEによるプレート境界面上の Δ CFS

RSFモデルとコスタリカのSSE

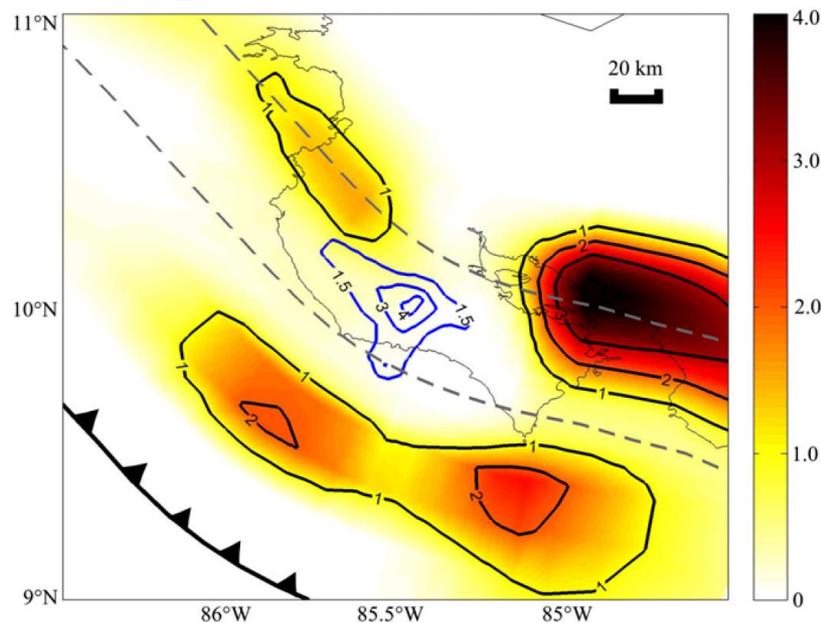
地震破壊やSSEの振る舞いはRSFモデルによって記述できる
速度弱化 → 地震破壊
速度強化 → スロースリップ・アフタースリップ

今回の観測結果は、このモデルと大まかに一致している

SSEが頻繁に発生している領域では、
地震破壊は発生しなかった(速度強化パッチ)

上側と下側でそれぞれSSEが発生していることから、
応力、温度、間隙水圧といった様々な環境の違いで
異なった種類の速度強化の振る舞いが起こっていると考えられる

地震領域下側のSSE

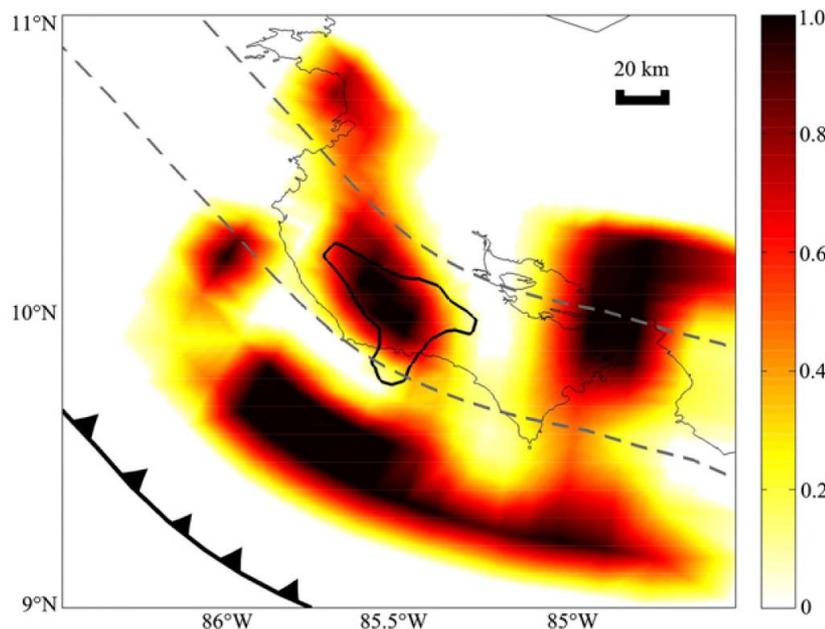


地震破壊領域の下側で起こるSSEは地震間固着の大部分を解消していた

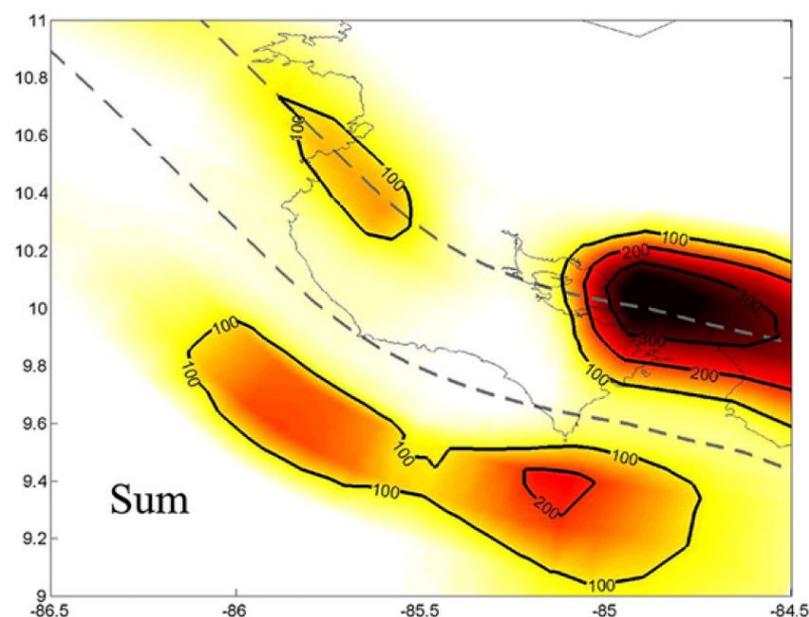
これと同じ深さ領域で発生するSSEはアラスカ、カスケード、日本といった他の多くの沈み込み域でも観測

沈み込み境界での巨大地震の深部方向への破壊の広がりを制約

地震領域上側のSSE



SSE間固着



SSEの合計すべり量

破壊領域の上側では、SSEは地震間の歪み蓄積のすべては解放していなかった

▶しかし、地震時の破壊は沖合の固着パッチには到達しなかった

残った歪みは、次のサイクルの地震で解放されるか、今回の地震のアフタースリップで解消されるかのどちらか

・浅部SSEは、地震の津波ポテンシャルに影響を与える

浅部SSE発生域と深部SSE発生域では、
圧力、温度、間隙水圧といった物理的環境が大きく異なる

そのため、2種類のSSEに対しては、それぞれ別の物理プロセスが働いていると考えるべきである

e.g.) 浅部では間隙水圧に大きな変動が見られるが、
深部側では大部分が脱水されてしまうため、
空間的な変化はあまりない

また、プレート境界の摩擦特性は時間によっても変化する

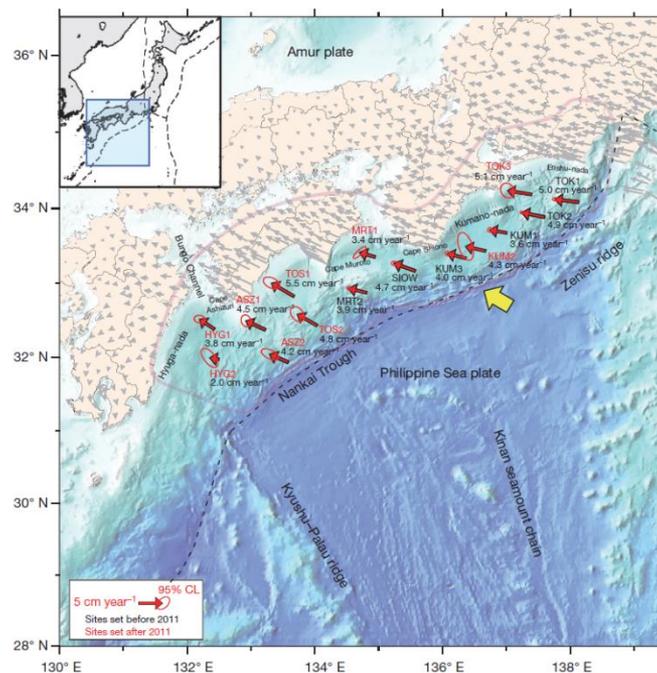
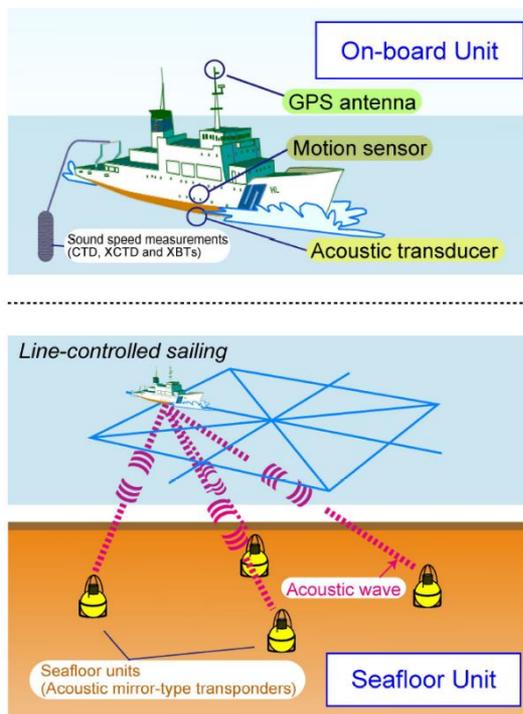
e.g.) 普通は速度強化の領域で発生するアフタースリップが、
かつて地震が発生した(速度弱化)領域で観測されることがある

- コスタリカでの観測結果からは、SSEが地震発生予測のポテンシャルを持っているというアイデアは、支持できなかつた
- 一方で、繰返しSSEは地震の破壊領域を拘束する可能性が高いことが推定された。

これは、将来的な地震の規模を予測する上で重要な情報となる。

浅部SSEの観測は、陸上からの測地観測では不十分であり、海底測地技術の発展が必要である

まとめと将来のSSE観測



震発生予測
 データは、支
 束する可能
 で重要な情報

(Yokota et al., 2016)

浅部SSEの観測は、陸上からの測地観測では不十分であり、海底測地技術の発展が必要である