

地震活動の評価に基づく地震発生予測：世界と日本の動向

楠城一嘉¹, 遠田晋次², 鶴岡弘³, 平田直³

¹ スイス連邦工科大学, ² 産業総合技術研究所, ³ 東京大学

1. はじめに

地震国日本では地震予知に対する社会からの要請は大きいため、信頼できる地震予測の実施は重要です。このために、提案された地震予知・予測手法が本当に有効か、あるいは、どんな条件で有効か等について科学的に厳密な検討をすることが必要です。一方、防災情報としての地震予知・予測では、限られた科学的情報から社会に役立つ防災・減災情報を選別し、行政的な総合的判断を行った上で、情報を発信して利用しなければなりません。日本では、政府の地震調査研究推進本部や気象庁がこうした行政的な地震発生予知・予測を行っています。例えば、1995年兵庫県南部地震以降の調査研究データの蓄積を基に「全国を概観した地震動予測地図」（地震調査研究推進本部）が公表され、2005年以来毎年更新されています。

科学的な地震予知の実現を目指したこれまでの研究では、地震発生メカニズムの解明と、物理モデルによる予測シミュレーションの開発が強調され、科学的に厳密な予測システムの構築は、必ずしも中心課題ではありませんでした。しかし、来年度から始まる次期予知研究計画「地震及び火山噴火予知のための観測研究計画」では、その予測システムの開発が主要課題となり、その課題を担う“地震活動評価に基づく地震発生予測”が、地殻活動予測シミュレーションと並んで新しく研究項目となりました。この研究では、予測手法の妥当性の検証が大変重要であるため、そのためのルール作りから始める必要があります。

このような地震発生予測とその結果を評価する世界的な研究計画として、“Collaboratory for the Study of Earthquake Predictability” (CSEP: <http://www.cseptesting.org/>) が、2006年から T.H. Jordan 教授（南カルフォルニア地震センター: SCEC）をリーダーとして進行中です (Jordan 2006)。CSEP の目的は、客観的かつ透明性のある地震予測実験が実行できる研究環境作りであり、その過程において地震の予測可能性を探ることです。本稿では、この CSEP を紹介しつつ、地震予測に関する根本的な課題をまとめ、今後検討される日本の取り組みについて触れます。

2. 問題点と解決のための組織構造

地震予測学では、二つの主要問題を解決する必要があります。一つは、“どのように予測実験を遂行したらよいか？”という実施環境の問題です。現在、それに応じられる研究環境の整備は行われていません。例えば、これまでの地震予測実験は再現性や客観性に乏しいため、標準化がなされていません (Jordan *et al.* 2008)。CSEP ではこの標準化を行っています。また、その標準化をより厳密にする為、本当の将来の地震を予測し、その妥当性を検証する“プロスペクティブテスト” (prospective test) を実施します。これは、予測した時点で結果が原理的に分からないことで、予測手法が厳密に評価されうるとの認識からです。

もう一つは、追試・検証（テスト）の実現性についてです。問題は、大地震は小さい地震に比べて非常に稀なので、比較的短時間にプロスペクティブテストを実施することができないことです。1つの解決策は時間を稼ぐ代わりに研究対象域を拡げることです。そのために個々の地震活動域を一つの実験室 (laboratory) とみなし、多数の大地震を研究対象に出来る世界規模の共同実験室（研究体制: Collaboratory）を作ることに CSEP は活路を見いだしました。これにより、予測における地域間の共通性や地域ごとの独自性といった特徴を抽出できる可能性が見込まれています。それを基に、予測モデルの高度化と地震予測の精度向上も目指せます。

カルフォルニア限定で先行実施された Regional Likelihood Models (RELM) プロジェクト (*Seismol. Res. Lett.*, **78**(1), 2007 の特集号を参照) を基にする CSEP は、RELM から受け継いだ予測研究環境整備のアイデアを世界の地震多発域に拡張しました。また CSEP では、以下の主要構成要素を独立させることで、公平な客観的テストを実現します (図 1: Jordan *et al.* 2008)。

- 地震予測に必要なデータを供給するテスト地域 (Natural Laboratory)

- データや予測モデル、テストルールを準備する委員会 (Working Group)
- プロスペクティブテストを遂行する機関 (Testing Center)
- 地震予測研究に関する公開討論の場 (CSEP Forum)

その一方、ITテクノロジーによるインフラストラクチャ (CSEP Grid) を活用してテスト地域・機関を互いに連携させ、組織の円滑運営を目指します。

3. 具体的な活動

主要機関は、SCEC・スイス連邦工科大学 (ETH)・GNS Science (ニュージーランド)・イタリア国立地球物理火山研究所 (INGV) ですが、他機関の研究者も CSEP に参加しています。

2007年1月に開かれたチューリッヒのキックオフミーティングをはじめ、同年5月のシシリイ島 (イタリア)、今年2月のウエリントンでワークショップを重ねてきました。

2008年1月現在 (図2: Jordan *et al.* 2008)、カルフォルニアをテスト地域とした検証を SCEC が担当しています。また、INGV と協力関係を結ぶ ETH がイタリアでのテストを、そして GNS Science がニュージーランドでのテストを準備しています。最近加えられた環太平洋西側の北地域と南地域の予測実験は SCEC が担当しています。

今後、CSEP 関連の国際ワークショップが二つ行われます。一つは 10月18-23日にオーストリアで開かれる ESF-FWF Conference on New Challenges in Earthquake Dynamics で、もう一つは同月27-28日に INGV で開催される Italian Testing Region for Earthquake Prediction/Forecasting Experiments です。また、日本や欧州を実験地域とする検証テストが開始予定です。

先行するカルフォルニアでは、地震統計又は物理に基づく16個の5年予測モデル、7個の3ヶ月予測モデル、そして2個の1日予測モデルがテストされています。モデルの作成者 (モデラー) はモデルのプログラムコードをテストセンターに提出し、テスト開始後は、モデラーから独立したセンターがモデルを管理します。使用データは、ANSS (Advanced National Seismic System) の地震カタログの中からテストセンターが品質を確認した部分だけに限定されています。評価手法は、モデル間の性能比較において統計的優位性を示せる最尤法を用います。評価結果はウェブ上で公開される予定です。

一日予測モデルの性能評価は、いわば地震の“天気予報”を目指す検証実験です。統計数理研究所の尾形良彦教授が開発した ETAS (Epidemic-type Aftershock Sequence) を基にしたモデルと、ETHが開発した STEP (Short Term Earthquake Probability) モデルが現在テスト中です。共に余震の統計的性質を考慮しているので、本震の予測より、余震を予測するのが得意と考えられています。

STEP モデルを基にした一日以内に起きる地震動の予測はカリフォルニアで既に稼働しており、米国地質調査所のウェブサイト上で“現在”の予測を閲覧できます (<http://pasadena.wr.usgs.gov/step/>)。一例として、2008年7月29日にロスアンゼルスで起きたマグニチュード5.6の地震 (34.0°N、117.8°W、深さ12km) の直後(a)と約三日後(b)の結果を図3に示します。本震の震央付近で余震活動を反映した高い確率を示す一方で、他地域は地震のバックグラウンドレベルを反映した確率のままです。図3のaとbの比較から、余震活動の減衰を反映した確率の減少が見られます。CSEPの一日予測の検証実験では、このようなSTEPモデルの結果を日々評価し予測の有効性を検証しています。

4. 日本の検証実験構想

大森房吉以来の日本の得意分野である地震統計はプロスペクティブテストの主要部分を支えます。実際、そのようなテスト研究は日本でも行われてきました。しかし、次期予知研究計画では、より厳密な検証とそれに耐える予測モデルを作ることが重要な研究テーマとなります。このために、2007年11月に統計数理研究所と2008年7月に地震研究所で共同利用の研究集会が開催され、活発に議論されました。さらに、CSEP と国際連携して、新しい予測科学の潮流を開拓して行きます。SCEC と ETH との協力により、日本の CSEP テストセンター設立へ向けた準備を始めました。地震研究所内に SCEC や ETH と同じ機能を持つデータ処理・活動予測・検証の計算機システムを用いたプロトタイプを構築して、地震活動予測の試験を開始しました (Tsuruoka *et al.* 2008)。

CSEP の基準 (良質で、政府機関等の公的機関による長期的に安定した震源データ) に適合するデータセットは、気象庁の一元化カタログです。そこで、その地震データの品質を評価する研究を

始めました。同様な研究をカリフォルニアのデータ等で行った SCEC の D. Schorlemmer 博士は、一元化カタログが、これまでの中で最も優れていると驚いていました。彼の手法 (Schorlemmer & Woessner, 2008 in press) は、地震発生の頻度分布の Gutenberg-Richter 則を仮定せずに、地震観測網の検知可能最小マグニチュードを評価するもので、CSEP で標準的に使われています。本番の検証実験では、プロスペクティブテストを行いますが、現在は、1年前のデータを処理して「後予知」(retrospective prediction)実験を行っています。

この研究で重要なのは、言うまでもなく予測能力の高い優れた地震活動予測モデルです。現在は、システムが正しく機能するかテストする為に、簡単なモデルを用いています。来年度からの本格運用のために、地震活動予測モデルを広く公募する予定です。また、予測結果を評価する手法も公募する予定です。これは、CSEP の標準的な検定法以外に、日本独自の手法が開発できれば、国際貢献できるという認識からです。予測モデルと検証手法の公募を通じて、日本における「検証可能なモデル」を用いた地震予知実験を進めていきたいと思っています。

本稿では、T. H. Jordan 教授の資料及び EC-Project NERIES contract 026130 と首都直下地震防災・減災特別プロジェクトの研究費を用いました。また、SCEC の D. Schorlemmer 博士と ETH の F. Euchner 博士の協力により、日本 CSEP テストセンターの計算機システムを構築しました。さらに、本稿の執筆にあたって ETH の S. Wiemer 教授から貴重なコメントを頂きました。ここに記して謝意を表します。

5. 参考文献

- Jordan, T. H. (2006). Earthquake predictability, brick by brick. *Seismol Res. Lett.* **77**, 3–6.
- Jordan, T. H. et al. (2008). Collaboratory for the study of earthquake predictability (CSEP). In *Proceeding of the 2008 RMS Science Symposium “Advances in Earthquake Forecasting”* January 23, 2008, pp. 31-33.
- Schorlemmer, D. & Woessner, J. (2008 in press). Probability of detecting an earthquake. *Bull. Seismol. Soc. Am.*
- Tsuruoka, H. et al. (2008). The collaboratory for the study of earthquake predictability: Establishing a testing center in Japan, In *2008 SCEC Annual Meeting*, September 6-11, 2008, Palm Springs, CA, Proc. & Abs., p.110.

図の説明

- 図 1. CSEP の組織概念図 (Jordan *et al.* 2008 より引用)。
- 図 2. 2008 年 1 月現在の CSEP のテストセンターと実験地域 (Jordan *et al.* 2008 より引用)。
- 図 3. STEP モデルを基にした地震動予測図。(a) と (b) の予測期間は、それぞれ、2008 年 7 月 29 ~30 日と同年 8 月 1~2 日。詳細は第 3 章を参照。

Collaboratory for the Study of Earthquake Predictability

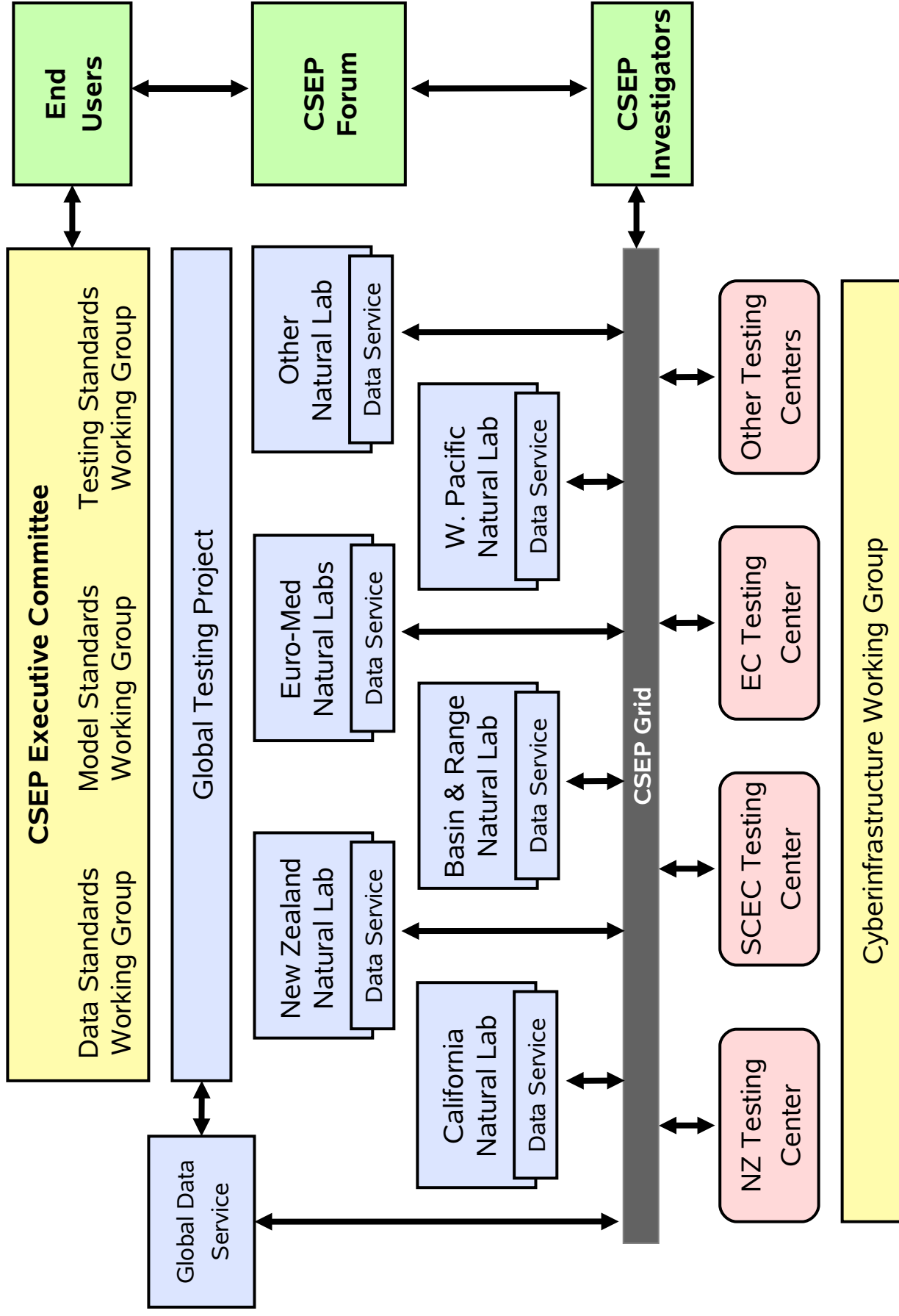


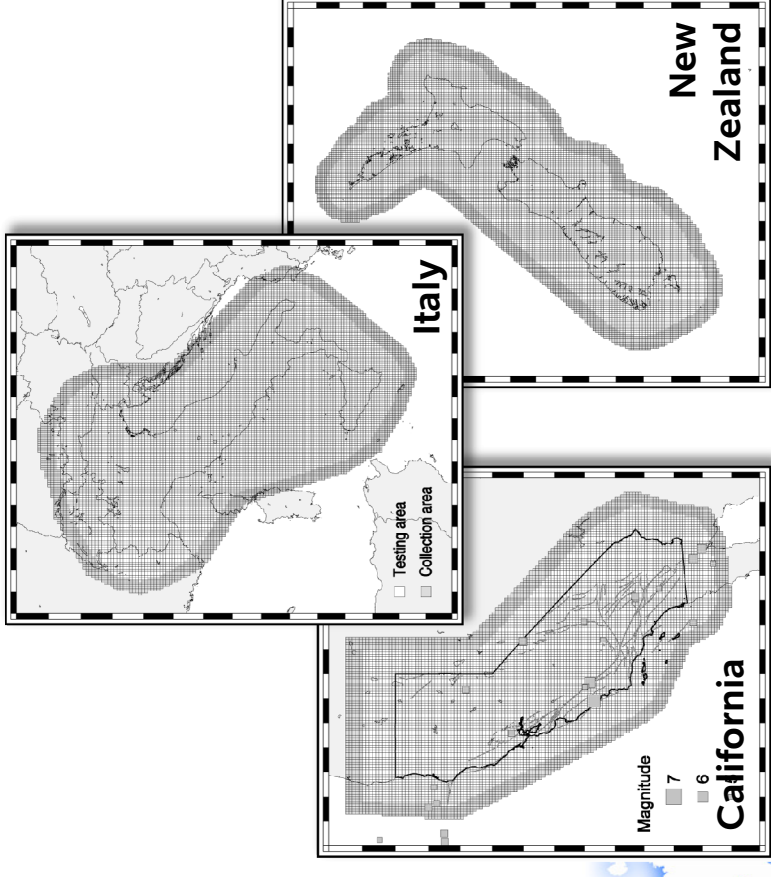
Fig. 1



CSEP Development

(January 1, 2008)

CSEP V1.0 is being installed at the ETHZ and GNS testing centers and testing is beginning in New Zealand and Italy



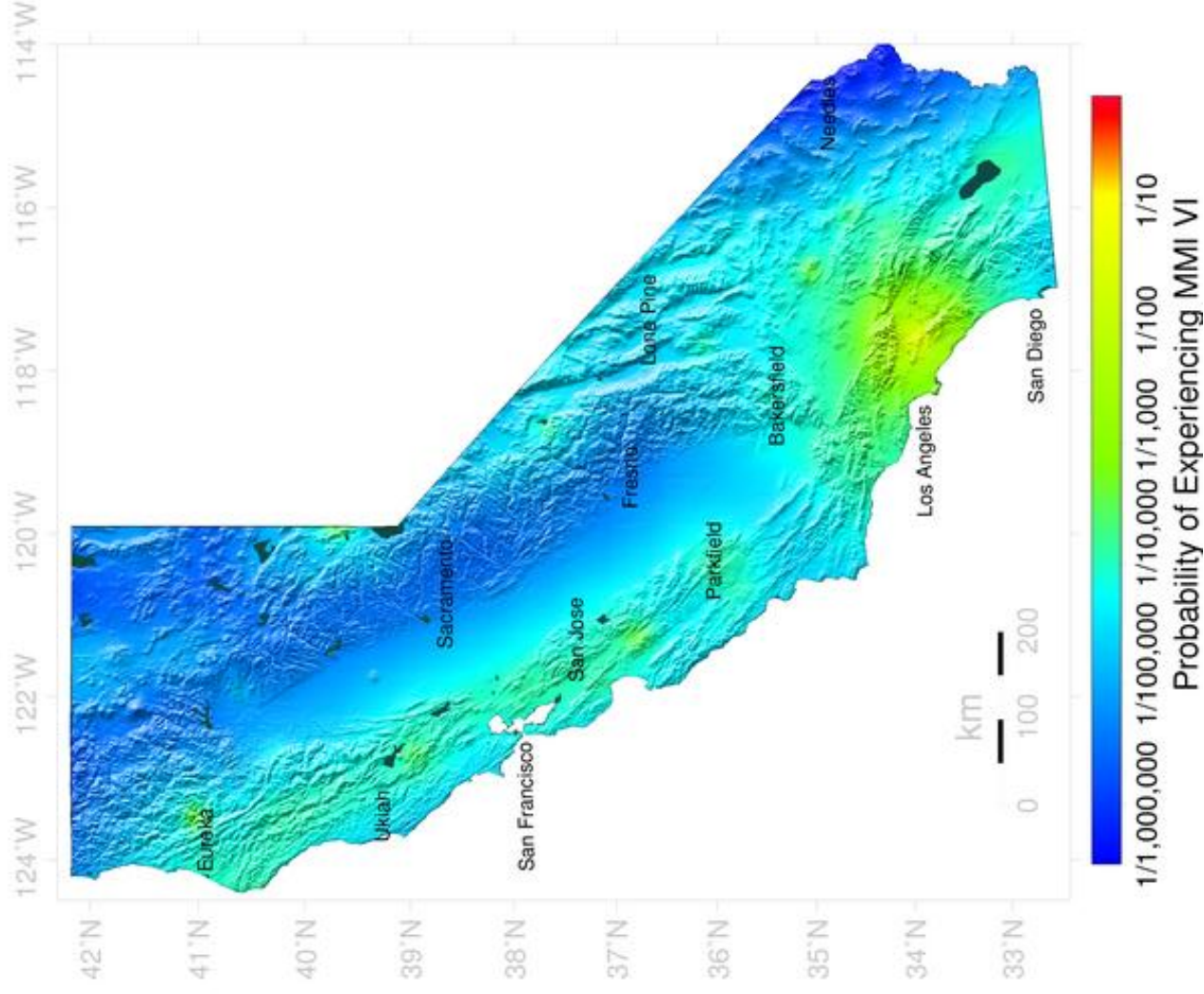
Testing Regions

Testing Centers

Fig.2

(a)

Forecast for 07/29/2008 08:30 PM PDT
through 7/30/2008 08:30 PM PDT



(b)

Forecast for 08/01/2008 04:30 AM PDT
through 8/2/2008 04:30 AM PDT

