

最近の海外における地震予知研究の動向（報告） － 米国における地震予知研究の体制について －

科学技術・学術審議会 測地学分科会 平田直

（1）はじめに

米国では、「国家地震災害軽減計画：National Earthquake Hazards Reduction Program (NEHRP)」の基に、地震災害の軽減に取り組んでいる。この計画には、合衆国連邦緊急事態管理庁(FEMA)^{注1}、国立標準技術研究所(NIST)^{注2}、国立科学財団(NSF)^{注3}、合衆国地質調査所(USGS)^{注4}の4つの米国政府機関が参画している。

このうち、USGSは全世界で大きな地震が起きるとリアルタイムで情報をホームページで公開しており、著名な地震研究者も多く所属するなど、地震学の世界の研究者にはよく知られている組織である。USGSは「地球に関する科学情報に基づき、自然災害の軽減に資する科学的情報」を国家に提供することを目的として設立され、研究者に対して研究費の配分をするほか、自らも調査研究を行っている。なお、NSFは資金配分機関であり研究は行っていない。また、FEMAは緊急事態を管理し、NISTは国の基準を作る機関である。

1980年に「国家地震災害軽減計画(NEHRP)」の一環として、「National Earthquake Prediction Evaluation Council：国家地震予知評価審議会(NEPEC)」が組織され、USGSの長官に対して随時、地震予知とそれに関連した研究についての助言と勧告を行っている。

米国の地震予知に関する研究は、これまで Park field Earthquake Prediction Experiment に関連したものがほとんどであったが、NEPECは、近年の調査によって、「地震予知可能性についての国際共同実験：Collaboratory for the Study of Earthquake Predictability (CSEP)」の活動を高く評価した。

（2）地震予知可能性についての国際共同実験：Collaboratory for the Study of Earthquake Predictability (CSEP)

CSEPの実験は、2006年に南カリフォルニア地震センター(SCEC)^{注5}の主導によりカリフォルニアで国際共同実験として始められた。現在では、ヨーロッパ（スイスの本部で、イタリアを対象とした実験）、ニュージーランドなどでも行われている。日本も2009年にCSEPに参加し、現在は「地

^{注1} [Federal Emergency Management Agency \(FEMA\)](#) アメリカ合衆国連邦緊急事態管理庁：有事に米国民の生命・財産を守るために対応する組織。今日では災害時の“緊急支援機関”として知られる。

^{注2} [National Institute of Standards and Technology \(NIST\)](#) アメリカ国立標準技術研究所：米国の技術革新や産業競争力を強化するために、経済保障を強化して生活の質を高めるように計測学、規格、産業技術を促進する目的で設立された。

^{注3} [National Science Foundation \(NSF\)](#) アメリカ国立科学財団：米国の科学・技術を振興する目的で1950年に設立された連邦機関。医学分野を除く幅広い科学・工学分野に対して資金（グラント）を交付している。

^{注4} [United States Geological Survey \(USGS\)](#) アメリカ合衆国地質調査所：水文学、生物学、地質学、地理学の4つの主要な学問分野について、合衆国領内を中心に、自然景観、天然資源、及び同国を脅かし得るナチュラル・ハザード（自然現象）を対象とする調査・研究を行っている。また、同国の地形図及び地質図の作成業務も担当している。

^{注5} [Southern California Earthquake Center \(SCEC\)](#) 南カリフォルニア地震センター：南カリフォルニア大学に本部がある研究所。全米および世界で60以上の研究機関の600名以上の研究者と学生が参加している。NSFとUSGSによって財政的に支援され、南カリフォルニアおよびその他の地域の地震の包括的な理解と、地震による災害の削減のための研究を行っている。現在の所長はThomas Jordan 教授。

震及び火山噴火予知のための観測研究計画」の枠組みの中で実施されている。

この研究は2000年に、カリフォルニアにおける「地震発生予測モデル：Regional Earthquake Likelihood Models (RELM)」を作るワーキンググループの活動として始められた^{注6}。まず、発生予測を行う色々なモデルの中から最善のモデルを選ぶために、モデルの善し悪しを判断する厳密な基準を作る研究が行われた。次に、RELMワーキンググループの活動のうち、予測の検証を行う研究がCSEPに引き継がれた。^{注7}

RELMとCSEPは、主として過去の地震活動を基に将来の地震活動を確率で表わす手法で、地震の発生予測実験を行なっている。この実験の特徴は、算出された予測の確率と実際に発生した地震を比較検証することで、どのような予測モデルが適切かについて厳密に検定することを重視している点である。

CSEPは定期的に研究集会を開催しており、本年6月には米国カリフォルニア州パームスプリングで開催された。今回、筆者はCSEPの研究集会に参加^{注8}して、「日本における地震予知可能性についての国際共同実験(CSEP)」と「2011年東北地方太平洋沖地震後の南関東での地震発生予測」の二つの講演を行い、2011年東北地方太平洋沖地震発生後の日本の地震活動の変化について議論を行った。

なお、今回の研究集会で重要なテーマとなったのは、「業務的地震予測：Operational Earthquake Forecasting (OEF)」である。

(3) 業務的地震予測：Operational Earthquake Forecasting (OEF)

「業務的地震予測：Operational Earthquake Forecasting (OEF)」の目的は、ある地域の地震災害誘因(地震ハザード)の時間推移を“当局の情報”として一般社会に伝えることとされている。ここでいう「地震ハザード」とは「地震発生確率」とほぼ同義である。現在は、地震活動の変化から地震ハザード変化を予測する手法が用いられており、例えば、USGSはカリフォルニア州の余震について、STEPモデル(短期的地震確率モデル：short-term earthquake probability model)を基に予測を行い、2005年からWEBで試験的に公開している。

USGSでは今年中にはOEFとして「一日予測」を業務的に行う予定であり、現在CSEPの研究グループと議論を進めている。6月に開催されたCSEPの研究集会でも、国家地震予知評価審議会(NEPEC)の議長であるTerry Tullis Brown教授は講演^{注9}で、USGSが進めようとしているOEFについては、CSEPとの共同研究とすることが重要であると強調した。つまり、国家地震予知評価審議会としても、厳密な予測検証を行うCSEPの学術的な活動と業務的なOEFとが連携することが重要だとの認識を示した。

なお、米国での「地震予測」あるいは「地震予知」は、現在はすべて「確率予測」である。例えば、震源断層を特定した破壊予測Uniform California Earthquake Rupture Forecast (UCERF3)においても、確率予測を用いて短期的予測を行う検証がなされており、地震予知についても確率で表現されるべきであると考えられている。

(4) 日本における地震及び火山噴火予知のための研究との比較

^{注6} 2000年に、SCECとUSGSの資金によって、カリフォルニア州の地震ハザードを評価するために始められた。※論文参照。

Field, E. H. (2007); Overview of the Working Group for the Development of Regional Earthquake Likelihood Models (RELM), Seismological Research Letters, 78, 7-16.

^{注7} Jordan, T. H. (2006); Earthquake predictability, brick by brick, Seismological Research Letters 77, 3-6.

^{注8} 「CSEP Activity in Japan: Prospective Earthquake Forecast Experiments」や「Earthquake Statistics and Probabilistic Forecasting for the Southern Kanto After the 2011 Mw9.0 Tohoku-Oki Earthquake」※プログラム参照。

^{注9} 「Using Earthquake Simulators for Earthquake Forecasting and Their Testing in CSEP」や「The Value of CSEP for the National Earthquake Prediction Evaluation Council (NEPEC)」※プログラム参照。

米国では、火山災害に対する研究についても USGS が主体で実施しているが、日本のように、必ずしも地震予知と火山噴火予知の観測研究が連携しては行われてはいない。一方で、イタリアなどのヨーロッパ諸国の一部やニュージーランドのように地震や火山噴火活動が活発な地域では、日本と同様に地震と火山の研究の連携が盛んである。

米国におけるこれまでの地震予知に関する研究は、主として、1985年からカリフォルニア州パークフィールドで行われている地震予知実験（Parkfield Earthquake Prediction Experiment^{注10}）として進められていた。ここでは、1857年から1966年までに6回、平均22年間隔でM6の地震が発生してきたために、固有地震（周期的に発生する地震）の典型と考えられ、次の地震は1988年頃に発生すると予想され、各種観測が続けられていた。ところが、実際には2004年に発生し、各種観測データに前兆現象は見いだされなかった。また、その発生様式（破壊伝播の向きなど）についてもこれまでとは異なるものであった。このため、2004年に発生した地震については、予知に失敗したと評価され、地震の発生予測を決定論的に行う方法について「70年代から膨らんだ予知への『希望』をしぼませる転換点」という見解も生まれた^{注11}。

しかしながら、この地震予知実験では、観測井を用いた断層近傍での精密な観測データなどによって、地震発生に関する多くの知見が得られ、地震発生の多様性など、多くの知見が得られた。このため、パークフィールドでの実験・観測研究は、地震防災と地震予知を目指した研究として、現在でも国家主導で継続されている。例えば、2004年から「サンアンドレアス断層深部観測所計画：San Andreas Fault Observatory at Depth (SAFOD)」が始められ、2～3kmの掘削孔の底に各種の観測装置を設置して観測研究を行う計画が進められている^{注12}。つまり、震源断層の至近距離で観測することによって、地震予知に関する科学的な基礎データを得ることを目指している。SAFODを含むパークフィールド地震予知実験は、現在も進行中でその観測データはUSGSのWEBで公開されており、これらの実験は地震予知を目指した基礎研究の段階と位置づけられる。なお、先に述べた「確率論的な地震活動予測の実験」については、同じフィールドにおいてもCSEPのシステムを活用して研究が行われている。

日本では、基盤的な全国規模の観測は気象庁・国土地理院などの業務官庁が行い、地震調査研究推進本部・地震調査委員会が「地震活動の現状把握」と「長期予測」を行っている。さらに、将来的な予知を目指した観測・研究については測地学分科会が「学術研究」として基礎研究を実施している。

注10 <http://earthquake.usgs.gov/research/parkfield/index.php>のThe Parkfield, California, Earthquake Experiment の項目を参照。

注11 <http://globe.asahi.com/feature/article/2012062800008.html>を参照。

注12 http://earthquake.usgs.gov/research/parkfield/safod_pbo.phpを参照。

※「By observing quakes "up close," SAFOD will mark a major advance in the pursuit of a rigorous scientific basis for assessing earthquake hazards and predicting earthquakes.」「サンアンドレアス断層深部観測所計画(SAFOD)は、地震を至近距離で観測することによって、地震ハザードを評価することと地震を予知することに関する厳密な科学的基礎を与えることに多大に貢献する。」

WEDNESDAY, JUNE 6, 2012

07:30	<i>Group Breakfast</i>	<i>Salon A</i>
08:30	Introduction and Meeting Objectives [pdf]	M. Werner / T. Jordan
	Session 1: First-Order Results from the RELM Experiment	J. Hardebeck, <i>moderator</i>
08:40	The RELM Experiment: Purpose and Overview [pdf]	N. Field
08:50	Review of Experiment Design and Results from Likelihood Tests [pdf]	J. Zechar
09:20	An Evaluation of RELM Test Results [pdf]	D. Turcotte
09:40	Group Discussion <ul style="list-style-type: none">- What can we conclude from these results about the models?- How and why do the two views differ?- Are the tests adequate?- How can we ensure broader participation?	
10:00	<i>Break</i>	
	Session 2: Further Results from the RELM Experiment	Bruce Shaw, <i>moderator</i>
10:15	Accounting for Catalog Uncertainties: Western Pacific and RELM [pdf]	D. Eberhard
10:30	How Much Information is There in Any Five-Year Forecast? [pdf]	M. Gerstenberger
10:45	Earthquake Occurrence Hypotheses and the RELM Results [pdf]	M. Werner
11:00	Bayesian Approach to Evaluating Forecasts and Constructing Ensemble Forecasts and Also a Peer-to-Peer Gambling Score for Evaluating Forecasts [pdf]	J. Zechar for W. Marzocchi
11:15	Group Discussion <ul style="list-style-type: none">- How representative are the RELM results?- How important are data uncertainties?- Which performance metrics reveal which forecast characteristics?- What can we conclude about the forecasts' underlying hypotheses?- How do we construct reference models for other experiments?- How should model development be encouraged?	
12:00	<i>Group Lunch</i>	<i>Salon A</i>

	Session 3: Reports on Regional CSEP Activities	P. Maechling, <i>moderator</i>
13:00	California [pdf]	T. Jordan
13:15	Current Status and Future Plans of the CSEP-New Zealand Testing Center [pdf]	M. Gerstenberger
13:30	CSEP Activity in Japan: Prospective Earthquake Forecast Experiments [pdf]	N. Hirata
13:45	CSEP-China and Europe [pdf]	D. Eberhard for A. Mignan
14:00	Global Earthquake Forecasting Based on Smoothed Seismicity and Tectonic Strain [pdf]	D. Jackson
14:15	CSEP Software Development: Status, Priorities, Practices [pdf]	M. Liukis
14:30	Group Discussion - How should the regional CSEP nodes collaborate? - How can we attract funding? - How should global experiments be conducted?	
14:45	<i>Break</i>	
	Session 4: Beyond RELM - The Future of Forecasting	J. Rundle, <i>moderator</i>
15:00	Some Residual Analysis Methods for Space-Time Point Processes [pdf]	R. Schoenberg
15:15	CSEP Results from Time-Dependent Earthquake Forecasts for the M9 Tohoku Sequence [pdf]	K. Nanjo
15:30	Some Issues and Proposals for Operational Space-Time Forecasting and Their Evaluations [pdf]	Y. Ogata
15:45	Group Discussion - Fixed-interval versus event-based forecasting and testing	
16:15	Stochastic Approach to Faults, Earthquakes, and Forecasting in California [pdf]	D. Jackson for S. Hiemer
16:30	Statistical Seismology: Rogue earthquakes that are not ROGUE [pdf]	Y. Kagan
16:35	Group Discussion - How can finite-size ruptures forecasts be cast and tested?	
17:00	<i>Adjourn</i>	
19:00	<i>Group Dinner</i>	<i>Sunrise Terrace</i>

THURSDAY, JUNE 7, 2012

07:30	<i>Group Breakfast</i>	<i>Salon A</i>
	Session 5: Beyond RELM - The Future of Forecasting (continued)	S. Ward, <i>moderator</i>
08:30	What About Coulomb? [pdf]	A. Michael for T. Parsons
08:45	Using Earthquake Simulators for Earthquake Forecasting and Their Testing in CSEP [pdf]	T. Tullis
09:00	Challenges/Opportunities to Improve CSEP Scoring and Classes [pdf]	P. Bird
09:15	Scoring Annual Earthquake Predictions in China [pdf]	J. Zhuang
09:30	Group Discussion - External registration and testing of forecasts and predictions in CSEP - How can simulators be validated? - How should future forecast evaluations be designed?	
10:00	<i>Break</i>	
	Session 6: Overview, Purpose, and Scope of Operational Earthquake Forecasting (OEF)	M. Page, <i>moderator</i>
10:15	CSEP Plans and OEF Requirements [pdf]	T. Jordan
10:30	Making Earthquake Forecasting in California Actually Operational [a.pdf a.pdf]	L. Jones and N. Field
10:45	Time-Dependent Modeling and OEF for the Canterbury Earthquake Sequence [pdf]	M. Gerstenberger
11:00	Earthquake Statistics and Probabilistic Forecasting for the Southern Kanto After the 2011 Mw9.0 Tohoku-Oki Earthquake [pdf]	N. Hirata
11:15	Group Discussion - What is CSEP's role in OEF? - How important are data uncertainties? - Is forecasting before validation valid? - After clustering, what is next for OEF?	
12:00	<i>Group Lunch</i>	<i>Salon A</i>
	Session 7: Next Steps for OEF - Sooner Rather Than Later	P. Powers, <i>moderator</i>

13:00	STEP versus ETAS and OEF Testing Strategies [pdf]	J. Zechar
13:15	Strategies for Retrospective Testing Including STEP-Variants [pdf]	A. Michael
13:30	SCSN/CISN Real-Time and Post-Processing Magnitudes [pdf]	E. Hauksson
13:45	Group Discussion - How can we reduce catalog latency in OEF? - How will ComCat affect CSEP operations? - Do we want to test OEF in real-time or with the final catalog? - Can retrospective tests matter?	
14:15	<i>Break</i>	
	Session 8: When Models and Data Keep Changing	M. Blanpied, <i>moderator</i>
14:30	The Value of CSEP for the National Earthquake Prediction Evaluation Council (NEPEC) [pdf]	T. Tullis
14:45	R-Test [pdf]	D. Jackson
15:00	What Can and Can't CSEP do for the WGCEP and NSHMP? [pdf]	N. Field
15:15	Group Discussion - What have we learned? - What should we change? - Who picks the tests? - The lifetime of models versus the lifetime of tests - The promise and limits of global testing	
15:30	Session 9: Wrap-Up and Recommendations	
16:30	<i>Adjourn</i>	