

地震 ジャーナル

61

2016年 6月

エッセイ 稠密地震観測網の成果と今後の期待 ●小原一成

2016年熊本地震（速報） ●岡田義光—— 1

岩石破壊実験 ●吉田真吾——11

人材育成による世界の地震・津波災害軽減への挑戦 ●古川信雄——25

臨海コンビナートの液状化・流動化対策 ●濱田政則——31

●書評——39

●新刊紹介——43

●ADEP情報——43

地震予知総合研究振興会

ASSOCIATION FOR THE DEVELOPMENT OF EARTHQUAKE PREDICTION

稠密地震観測網の成果と今後の期待 小原一成

地震学は、地震観測網とともに発展してきた。今から約 100 年前、和達清夫は中央气象台（現在の気象庁）が全国に展開した数十台の地震計のデータを用いて、1920 年代に世界に先駆けて深発地震を発見した。1970 年代には、東北大学が地震予知計画に基づいて東北地方に展開したテレメータ方式の微小地震観測網により、二重深発地震面が発見された。

防災科学技術研究所の高感度地震観測網 Hi-net は、阪神・淡路大震災以降に日本全国に展開された約 800 カ所の孔井式高感度地震計から構成される観測システムであり、連続的に収集されるデータは大学・気象庁にもリアルタイムで配信され、現在の日本の地震研究および地震監視業務を根底から支えている。気象庁における地震の検知数は、桁違いに増加した。内陸には数多くの地震の線状配列が見られ、活断層をイメージすることができる。また、ひとたび地震が発生したら即時的にその後の揺れを予測し緊急地震速報として配信したり、その地震のメカニズムや余震の発生状況を正確に把握して今後の地震活動推移を予測することが可能となっている。

Hi-net は、計画当初の期待をはるかに超える成果を数多く創出した。その成果の一つが、2002 年に西南日本で発見された深部低周波微動と呼ばれる現象である。これは、プレート境界におけるゆっくりすべりに伴って発生する地震性の現象であり、プレート間のすべりそのものを反映する。微動が発生しているときは、巨大地震発生域の深部のプレート境界がゆっくりずれ動いているため、巨大地震発生域に力を及ぼし、巨大地震のリスクを高める可能性がある。しかし、相互の関係はよくわかっていないため、今後も継続的にモニタリング等に基づく研究を続ける必要がある。

稠密観測網は、高度な技術を駆使したデータ処理により、今後さらに優れた成果を創出するであろう。そのときに最も重要なことは、得られた結果が適切にデータを反映しているかどうか、つねにデータに向き合って検証することである。そのためには、データを可能な限り集約し、そのモニタリング結果を効果的に可視化することが重要である。

今、東北地方太平洋沖地震の震源域を含む広大な海域に稠密な海底地震観測網が整備されつつあり、海域の地震活動の描像を刷新するに違いない。それ以上に、われわれの想像を超える新たな現象が見つかる可能性があり、地震学がまた格段と発展することが大いに期待される。



小原一成

[おぼら かずしげ]

略歴 東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻博士課程前期修了。理学博士。防災科学技術研究所地震研究部副部長（兼地震観測データセンター長）を経て、2010 年東京大学地震研究所・教授に異動。2015 年 4 月より東京大学地震研究所長。国土地理院「地震予知連絡会」および気象庁「地震防災対策強化地域判定会」の各委員。米国地球物理学連合フェロー

2016年熊本地震（速報）

岡田義光

1. はじめに

2016年4月14日21時26分、熊本地方で最大震度7を記録する浅発地震（M6.5）が発生した。この地域を直下型の被害地震が襲ったのは、今から127年前の1889年7月28日に発生し20名の死者を出した地震（M6.3）以来であった。また、震度7がわが国で観測されたのは、1995年兵庫県南部地震（M7.3）、2004年新潟県中越地震（M6.8）、2011年東北地方太平洋沖地震（M9.0）について、今回が4番目である。

頻繁に大きな余震が相次ぐなか、震源に近い益城町を中心として多くの家屋が倒壊し、9名の犠牲者を生じる一方、JR熊本駅近くでは時速80kmで車両基地に回送中だった九州新幹線の全車両が脱線するなど、2004年新潟県中越地震の再来を思わせるような様相を呈した。気象庁は、この地震に対し「平成28年（2016年）熊本地震」と命名した。

その余震活動が衰えを見せ始めた4月16日01時25分、今度は最初の震源のすぐ北西側で予想外の大地震（M7.3）が発生し、最大震度6強（のちに最大震度7に修正）が記録された。M7.3は阪神・淡路大震災を引き起こした1995年兵庫県南部地震と同じ規模である。気象庁は、この16日の地震を一連の地震活動の「本震」と宣言し、14日の地震は「前震」として修正することになった。

この本震によって、14日の地震では全壊を免れた家屋も含めて約8万棟の建物が倒壊または損傷するとともに、各地で大規模な土砂崩れが頻発し、新たに40人の死者と1人の行方不明者を生じたため、全体の死者・行方不明者数は50人となった。このほか、避難生活中に亡くなるいわゆ

る震災関連死も19人が報告されており、また負傷者数は1,720人となっている（5月14日現在）。なお、避難者の数は本震発生直後に20万人近く、1週間後には約9万人、地震から1カ月後でも約1万人に達し、ライフラインの途絶や物資の供給不足などによって多くの人々が困難な生活を強いられた。

本震の発生後、震源は北東側の阿蘇地方や大分県へと連鎖する一方、南西側にも余震域を拡大させ、九州を横断する別府-島原地溝帯の全体にわたって地震活動が活発化する様子を見せた。本稿では、この熊本地震の前震（M6.5）および本震（M7.3）に関連する一連の地震活動について、その概略を速報する。

2. 前震と本震

M6.5の前震は2016年4月14日21時26分、熊本市の東に隣接する益城町南部付近の深さ11kmで発生し、益城町宮園で震度7、周辺の10地点で震度6弱が記録されたほか、九州中部の広い範囲で震度5強や5弱の揺れが観測され、有感の範囲は近畿地方から中部地方の一部にまで及んだ（図1左）。

一方、M7.3の本震は前震から28時間後の4月16日01時25分、前震から北西に約7km離れた地点の深さ12kmで発生し、震源近傍の12カ所で震度6強、周辺の24カ所で震度6弱が記録されたほか、九州のほぼ全域で震度5強や5弱の揺れが観測され、有感の範囲は関東地方から東北地方の一部にまで及んだ（図1右）。なお、本震直後の時点で震度の報告がなかった益城町と西原村では、その後の調査で震度7であったことが判明し、本震による最大震度も7に修正された。

両者の震度分布を比較すれば、前震よりも本震

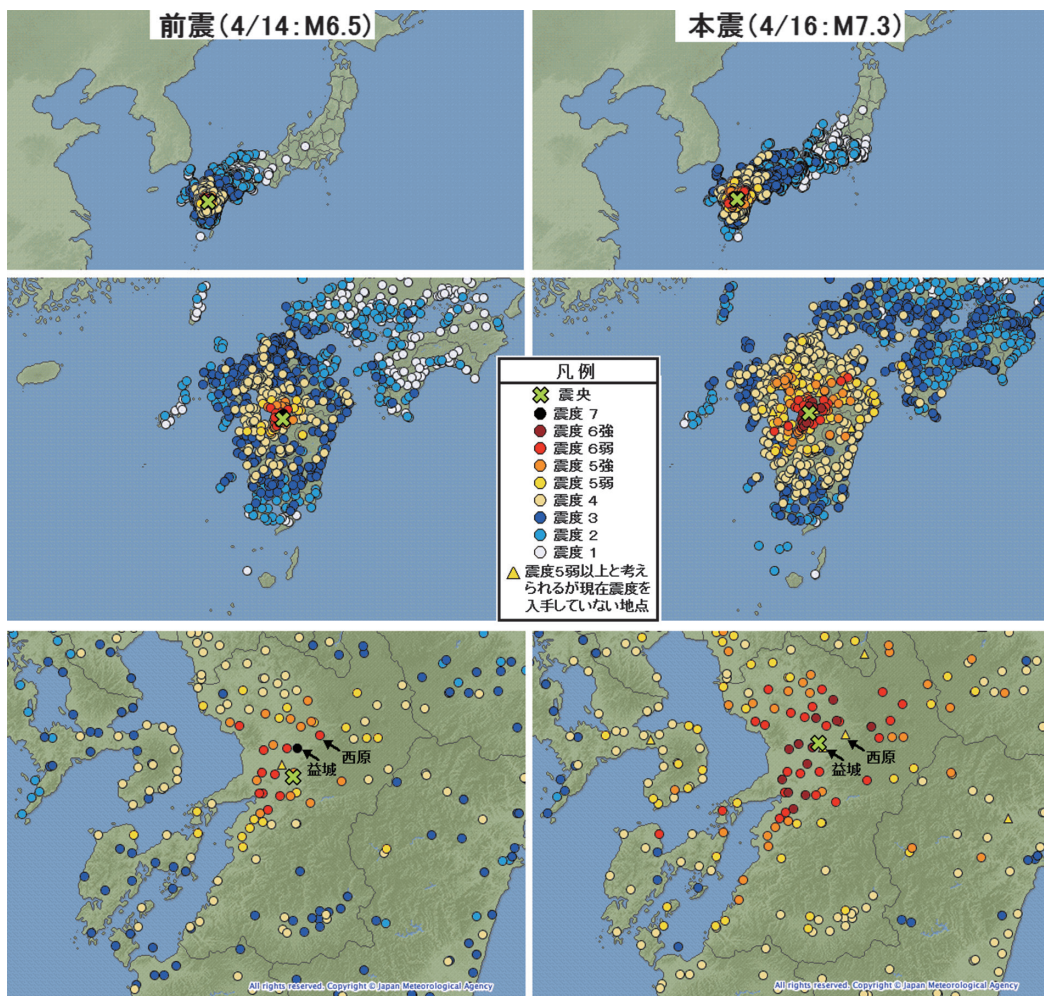


図 1 2016年熊本地震の前震・本震による震度分布 (気象庁「各地の震度に関する情報」より合成)

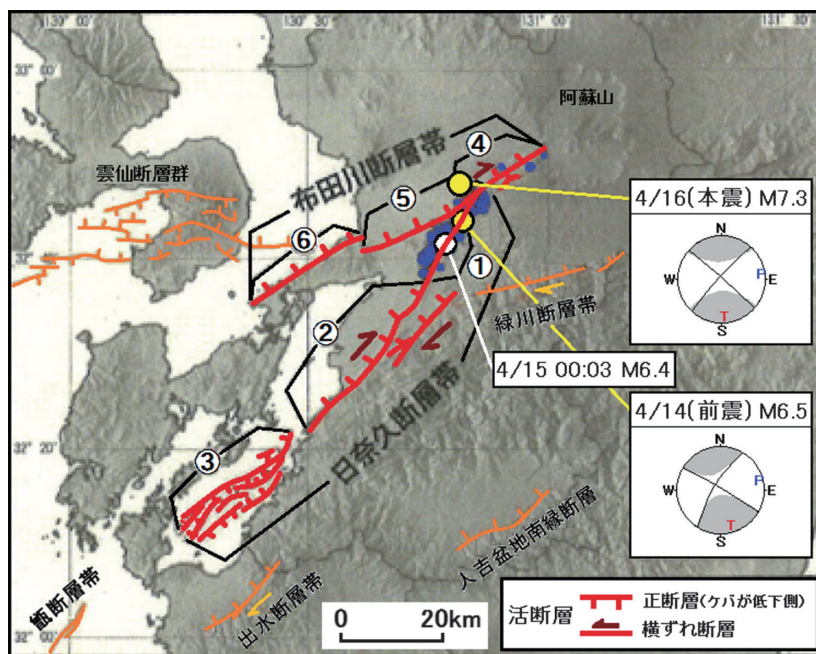
のほうが大きかったことは明らかである。前震と本震のマグニチュードの差0.8は、地震のエネルギーにすれば約16倍の違いがある。なお、防災科学技術研究所の強震観測網で捉えられた前震時の最大加速度は、熊本県内のKiK-net 益城観測点(益城町辻の城)における1,580ガル(三成分合成値)であった。また、本震時における最大の加速度は熊本県大津町の自治体震度観測点で記録されており、1,791ガル(三成分合成値)であった。

図2に、前震と本震が発生した位置とそれぞれのCMT解を、周辺の活断層分布とともに示す。両地震は布田川断層帯と日奈久断層帯が交わる付近で発生しており、発震機構としてはいずれも南

北方向に張力軸を持つ横ずれ断層型の地震であったことがわかる。

前震から本震までの間に生じた地震群(青い丸印)は北北東-南南西方向に約20kmの長さで配列し、このうちで最大のは前震から2時間半後の4月15日00時03分に発生したM6.4の地震であった。これらの震源の分布は日奈久断層帯の最北端である高野-白旗区間(図2の①)にほぼ一致し、その配列方向は前震のCMT解の一節面とも調和している。

一方、本震に伴った余震はおおむね布田川断層帯に沿って北東-南西方向に延びる長さ約30kmの領域で活発化したが、これも本震のCMT解の



①高野-白旗区間 (M6.8程度) ②日奈久区間 (M7.5程度) ③八代海区間 (M7.3程度)
 ④布田川区間 (M7.0程度) ⑤宇土区間 (M7.0程度) ⑥宇土半島北岸区間 (M7.2程度以上)

図 2 2006 年熊本地震の前震・本震の位置と CMT 解および周辺の活断層分布。
 密集する青い丸印は、前震と本震の間に発生した地震の震源を示す
 (地震調査研究推進本部「九州地域の活断層の長期評価 (第一版)」に加筆)

一節面の走向にはほぼ一致している。

3. 地殻変動と地変

4 月 14 日 21 時 26 分の前震 (M6.5), およびその直後の 4 月 15 日 00 時 03 分に発生したほぼ同規模の地震 (M6.4) に伴って, 国土地理院の電子基準点「城南」では北北東方向に約 20 cm, 「熊本」では北北西に約 12 cm 移動するなどの地殻変動が観測された。

一方, 4 月 16 日 01 時 25 分の本震 (M7.3) では, 電子基準点「長陽」で南西方向に 98 cm の移動と 28 cm の隆起, 「熊本」で東北東方向に 75 cm の移動と 20 cm の沈降など, 前震の時よりもはるかに大きな地殻変動が観測された。

GNSS (Global Navigation Satellite System : 全球衛星測位システム) 観測で捉えられたこれらの地殻変動データに基づいて, 国土地理院では図 3 に示すような前震および本震に関する暫定断層

モデルを提出した。前震については, 日奈久断層帯 (高野-白旗区間) に沿って北北東-南南西の走向を有し, 西に 78°で傾き下がる長さ 17.8 km, 幅 10 km の断層が右横ずれ的に 62 cm 滑ったとしている。

また, 本震については, 布田川断層帯に沿って東北東-西南西の走向を有し, 北に 60°で傾き下がる長さ 27.1 km, 幅 12.3 km の断層が右横ずれ的に 3.5 m 滑ったとして, 観測された地殻変動を説明している。なお, 断層の滑り量については, 前震で 22% の逆断層成分, 本震で 33% の正断層成分が, それぞれ含まれている。

一方, GNSS 観測とは別に, SAR (Synthetic Aperture Radar : 合成開口レーダー) による面的な地殻変動場の解析も行われ, 布田川断層帯の北側は東に最大 1.5 m 動き 1 m 以上の沈降, 南側は西に最大 70 cm 動き 30 cm 以上の隆起があったことが確認された。大きな地面の食い違いは, 従来知られている布田川断層帯の端からさらに数

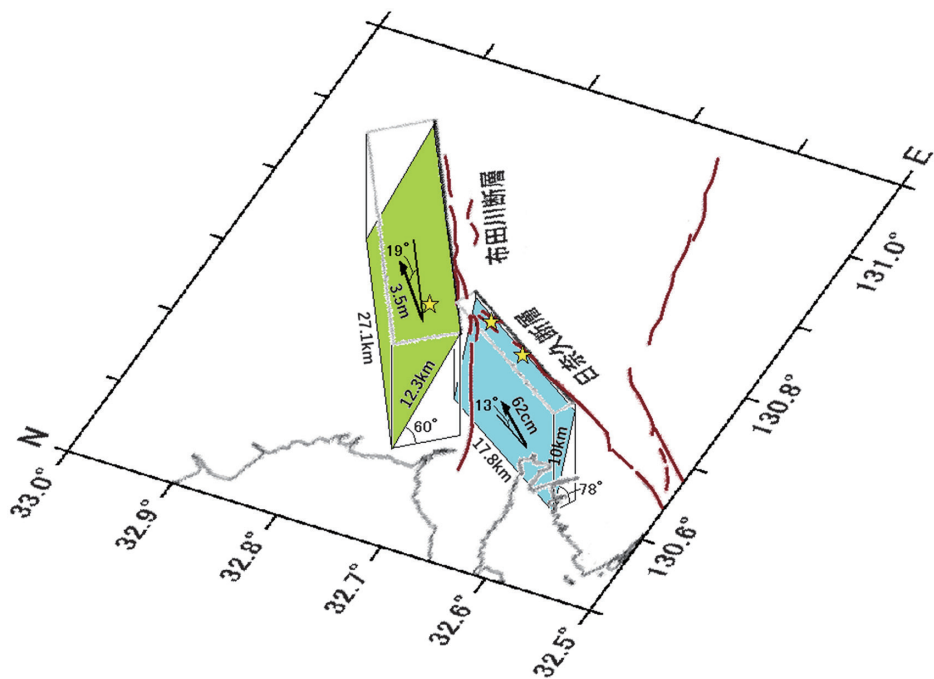


図 3 前震および本震の断層モデル。矢印は上盤の滑りベクトルを表し、星印は4月14日のM6.5、15日のM6.4、および16日のM7.3の地震の震央を示す（国土地理院資料に加筆）

km 東側の南阿蘇村付近まで、およそ 40 km にわたって続いていた。また、14日の前震を起こした日奈久断層帯の北端は16日の本震の際にも再びずれ動いたことがわかった。さらに、阿蘇山の中央火口付近が約 20 cm 沈降したことも明らかになった。

なお、現地調査の結果では、布田川断層帯の布田川区間（図2の④）沿いなどで長さ約 28 km、および日奈久断層帯の高野-白旗区間（図2の①）沿いで長さ約 6 km にわたって、右横ずれの量が最大約 2.2 m に達する地表地震断層が見つかった。また、阿蘇山のカルデラ内でも断層が地表に出現したとみられる右横ずれ約 50 cm のずれが発見され、この断層帯がカルデラの中にまで伸びていることが確認された。

4. 不均質断層モデルと震源過程

今回の地震について、地震計の記録を用いた震源像の解析も精力的に行われている。図4は、防

災科学技術研究所が近地の強震記録を用い、前震（M6.5）と本震（M7.3）のそれぞれについて、断層面上の最終すべり分布と破壊の時間進展過程をインバージョン解析により求めた結果である。星印は破壊開始点（震源）を示し、矢印は上盤のすべり方向とすべり量を表している。

前震については、破壊開始点付近で大きなすべりが見られ、全体の破壊は5~6秒で終了したと見られる。一方、本震ではすべりの大きい領域が震源の北東10 km から30 km 程度の浅い領域に広がっており、破壊は北東方向に伝播した。すべりの大きい領域での破壊は地震発生から8~16秒後に生じ、全体の破壊は20秒ほどで終了したことがわかる。

次に、図5は筑波大学の八木准教授が世界で観測された遠地P波記録を用いて求めた本震（M7.3）のすべり量分布を示す。地表付近に大きな断層すべりが見られ、破壊は主に北東方向に伝播したと考えられる。解析からは、右横ずれ断層の大きさが50 km×20 km、最大のすべり量は1.8

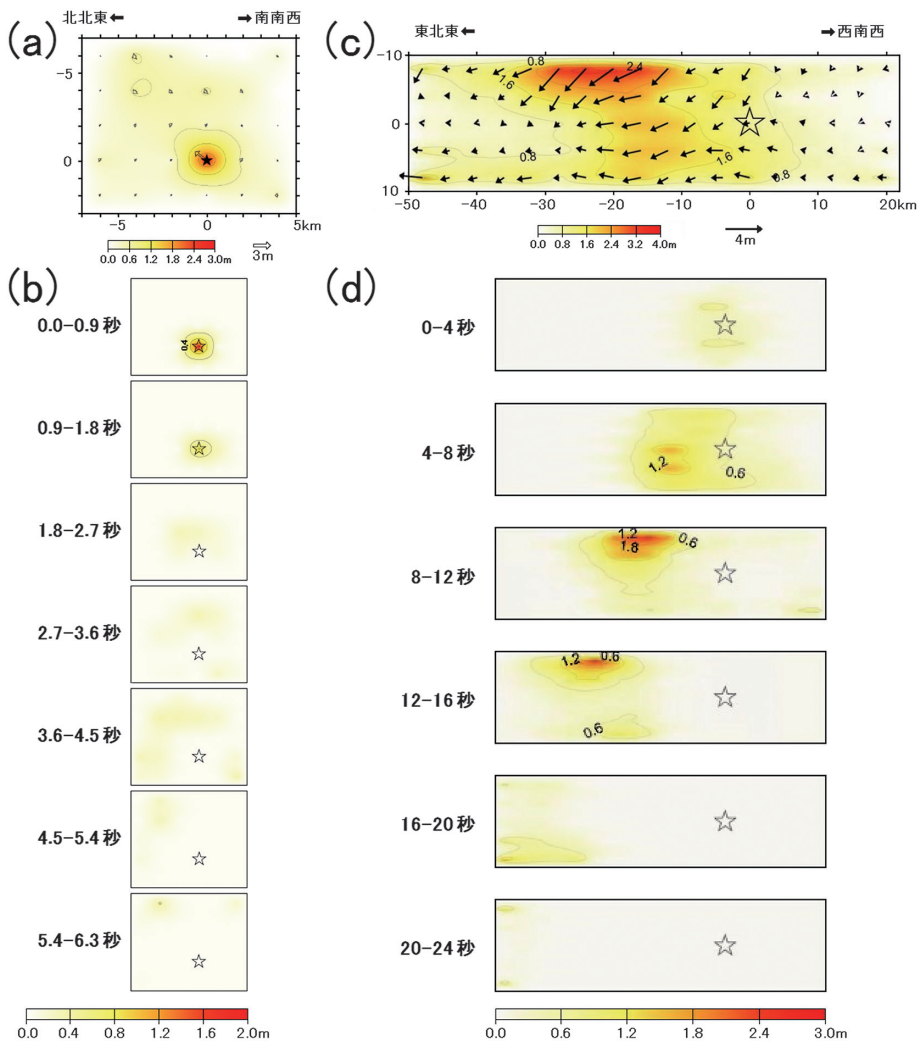


図 4 近地強震記録による断層面上の最終すべり分布と破壊の時間進展過程。(a) (b) は前震, (c) (d) は本震についての解析結果を示す (防災科学技術研究所資料に加筆)

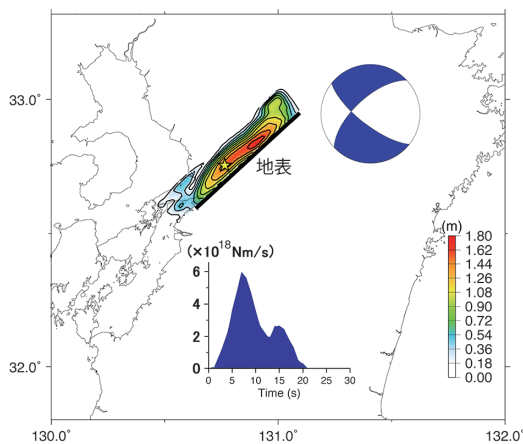


図 5 遠地 P 波記録による本震の断層すべり分布と震源時間関数 (筑波大学資料に加筆)

mで、破壊の継続時間は約20秒という結果が得られている。

5. 余震活動と誘発地震

今回の地震では、4月14日の前震（M6.5）のち、規模が大きく震度も大きな地震が長く続いたことが特徴である。また16日には想定していなかった本震（M7.3）が発生したことに加え、本震後は地震活動が北東側の阿蘇地方や大分県に飛び火する一方、南西側にも地震活動域を拡大させるなど、異例な経過をたどった。

図6は、今回の一連の地震活動が始まる前日（4月13日）からの1週間における地震の最大震度とマグニチュードの時系列を示したものである。4月14日21時26分の前震（M6.5）のち、余震は順調に減少するようには見えなかったが、16日01時25分に本震（M7.3）が発生した後は粒の大きな余震がほぼ横ばい状態が続いており、この図の範囲では終息に向かう様子が見られない。

震度1以上の有感地震の発生回数は、最初の地震から10日後の4月24日21時現在で872回に達しており、そのうち震度7は2回、震度6強は2回、震度6弱は3回、震度5強は3回、震度5

弱は7回、震度4は76回となっている。

また、地震から1カ月後の5月14日20時現在では、震度5強が4回、震度4が88回に増え、全体の有感地震数は1441回に達した。

一方、マグニチュードで見ると、4月14日の前震が発生してから10日間におけるM3.5以上の地震の積算回数は図7のように推移している。本震が発生するまでの地震回数は73回であり、その経過は1995年兵庫県南部地震（M7.3）を若干上回る程度であったが、16日の本震発生後は急激に地震回数が増大し、前震から1週間後には積算回数が200回をこえた。また、1カ月後の5月14日08時現在では238回に達している。これまでに国内の内陸および沿岸で発生した地震のなかでは2004年新潟県中越地震（M6.8）がもっとも激しい余震活動を伴っていたが、今回はその記録を上回ったことになる。

次に、前震発生後のほぼ1週間（4月14日21時～22日08時30分）における一連の地震活動の震央分布を図8に示す。同図では、M5.0以上の地震を濃く表示すると同時に、最大震度5強以上となった地震には吹き出しがつけられている。ただし、最大震度5弱であっても、16日07時11分の大分県湯布院町付近の地震、および19日20

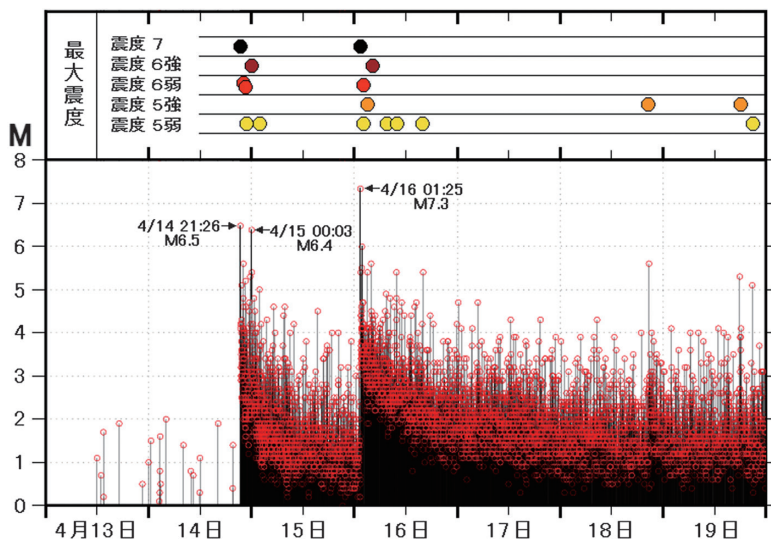


図6 2016年4月13日からの1週間における熊本地震の最大震度とマグニチュードの時系列（防災科学技術研究所資料に加筆）

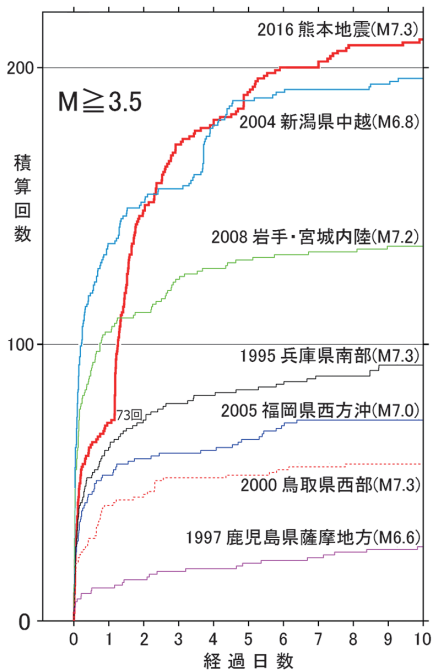


図7 前震発生後10日間のM3.5以上の地震の積算回数と、過去に内陸および沿岸で発生した地震との比較（気象庁資料に加筆）

時47分の熊本県八代市付近の地震の2件については、特別に吹き出しが付されている。

同図には北東-南西方向の四角形領域ABが示されているが、この中で発生した地震を発生時刻順に並べた時空間分布図が図9である。これを見ると、前震から本震に至る28時間は熊本市周辺に地震活動が限られていたが、本震の発生とほぼ同時に北東側の阿蘇地方と大分県中部地域でも新たに地震活動が始まったことがよく分かる。

熊本市周辺で継続している地震群は、前震や本震の断層面付近を震源とする「狭義の余震」の活動であるが、それらの発生位置は時間の経過とともに徐々に南西方向（B方向）へと拡大する様子が見られる。4月19日17時52分には本震の南西に位置する熊本県八代市付近でM5.5の地震があり、震度5強が観測された。

一方、北東側に飛び火した2地域の地震活動は「広義の余震」と言えるもので、これらは本震の影響で誘発された地震群であると考えられる。とくに、本震の発生した16日01時25分05秒の

32秒後には、約80km離れた大分県由布市でM5.7の地震が誘発され、同県別府市や由布市では2つの地震による揺れが重なり合った結果、震度6弱の激しい揺れになったことが注目された。

2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震（M9.0）の際にも、本震翌日（3/12）の03:59に長野県北部（M6.7）、同04:47に秋田県沖（M6.4）、3/15の22:31に静岡県東部（M6.4）など、非常に広い範囲で強い地震が誘発されたことが知られている。

なお、本震発生から7時間後の4月16日08時30分、阿蘇山の中岳第一火口でごく小規模な噴火が発生し、噴煙が最高で100mまで上がった。この火口では2014年11月以降、活発な火山活動が継続しており、規模の小さな噴火が繰り返されてきた。今回の噴火は3月4日以来だが、熊本地震による何らかの影響を受けたものと考えられる。ただし、火山性微動や地殻変動などには特段の変化が見られず、16日の噴火活動は同日18時15分に終息した。

6. 布田川断層帯・日奈久断層帯の長期評価

九州地域については、国の地震調査研究推進本部によって「活断層の地域評価」が行われ、その結果が2013年2月に公表されている。それによれば、M6.8以上の地震が30年以内に発生する確率は、九州北部で7~13%、九州中部で18~27%、九州南部で7~18%と見積もられており、九州中部の危険性をもっとも高いと評価されていた。

熊本・大分地方を襲った今回の地震は、その九州中部における第一級の活断層帯である布田川断層帯と日奈久断層帯が活動したものと考えられている。この両断層帯に関しては、表1のような長期評価が個別になされていた。

一般に、活断層型の地震の平均発生間隔は非常に長いことから、今後30年以内の地震発生確率などの数値は非常に小さな値になってしまう。このため、地震調査研究推進本部では、活断層型地震の発生確率の高さを相対的に表す手段として、30年以内の最大発生確率が3%以上のものに「わ

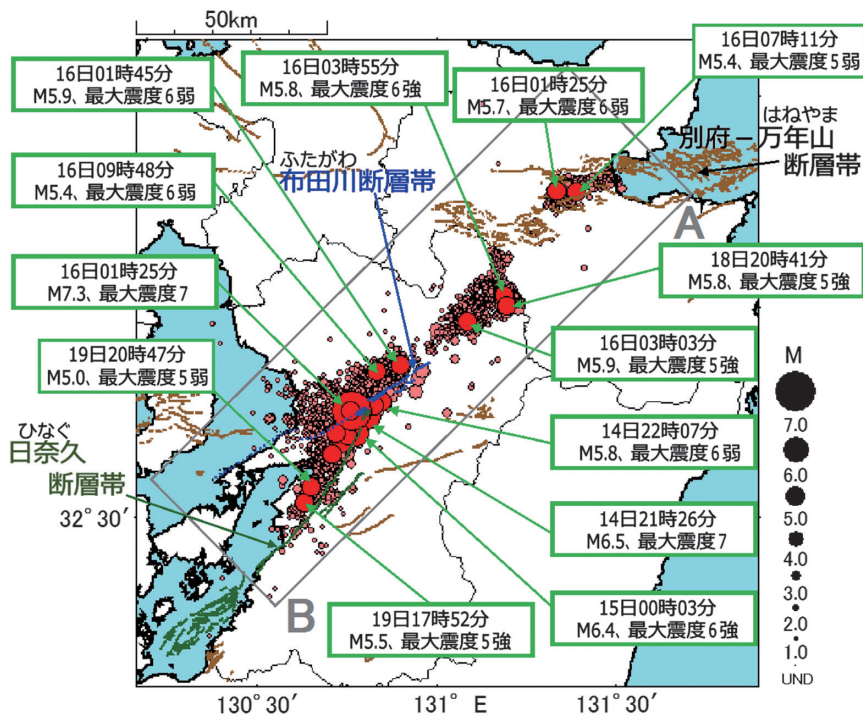


図 8 4月14日21時～22日08時30分に発生した地震の震央分布（気象庁資料に加筆）

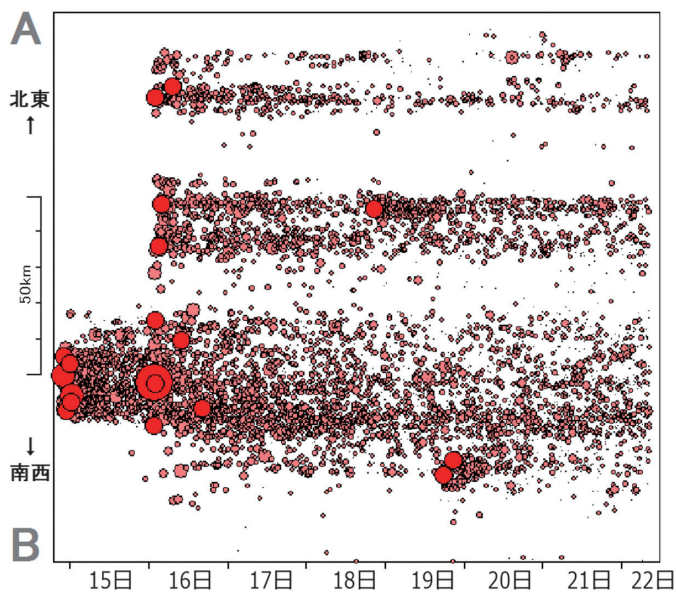


図 9 図 8 の四角形領域 AB 内の地震の時空間分布（気象庁資料に加筆）

が国の主な活断層のなかでは、高いグループに属する」、0.1%以上3%未満のものに「わが国の主な活断層のなかでは、やや高いグループに属する」

という評価文を付している。

これによれば、日奈久断層帯の、②日奈久区間と、③八代海区間は発生確率が「高い」、布田川

表 1 布田川断層帯・日奈久断層帯の長期評価（地震調査研究推進本部による）

断層帯		長さ	予想されるマグニチュード		平均活動間隔	最新活動時期	今後30年内の地震発生確率	
日奈久断層帯	① 高野-白旗区間	16 km	6.8程度	連動時 7.7~8.0	連動時 7.8~8.2	不明	1,600~1,200年前	不明
	② 日奈久区間	40 km	7.5程度			3,600~11,000年	8,400~2,000年前	ほぼ0~6%
	③ 八代海区間	30 km	7.3程度			1,100~6,400年	1,700~900年前	ほぼ0~16%
布田川断層帯	④ 布田川区間	19 km	7.0程度			8,100~26,000年	6,900~2,200年前	ほぼ0~0.9%
	⑤ 宇土区間	20 km	7.0程度	連動時 7.5~7.8	不明	不明	不明	
	⑥ 宇土半島北岸区間	27 km以上	7.2以上		不明	不明	不明	

断層帯の各区間に付された①~⑥は図2に対応している。

断層帯の、④布田川区間は「やや高い」という評価になる。今回の熊本地震では、地震発生確率が「不明」であった日奈久断層帯の、①高野-白旗区間で4月14日の前震（M6.5）がまず発生し、ついで16日の本震（M7.3）は発生確率が「やや高い」とされた布田川断層帯の、④布田川区間で発生した。

前震の発生以降、日奈久断層帯での地震活動は南西に拡大する傾向にあり、発生確率が「高い」と評価されている同断層帯の、②日奈久区間や、③八代海区間での大地震につながらないかということが懸念されている。

一方、図8に見られるとおり、地震活動は北東側の阿蘇地方や大分県にも拡がり、九州を横断する別府-島原地溝帯の全域にわたって地震活動が活発化しているように見られる。別府-島原地溝帯には九重山、阿蘇山、雲仙普賢岳などの名立たる活火山が連なり、活断層も密集していて、普段から地震活動度が高い地域である。わが国では珍しく南北方向の張力場が卓越しており、正断層性の地震が多いという特徴ももっている。

より視野を広げると、この地溝帯の東は別府-万年山断層帯を経由して四国の中央構造線断層帯へとつながり、一方、西方は沖縄トラフへと連続

している。今回の地震の5カ月前、2015年11月14日には薩摩半島西方沖でM7.1の浅発地震が発生し、鹿児島県中之島で30cmの津波を観測するという出来事があった。この地震は陸のプレートの地殻内で発生し、発震機構は北西-南東方向に張力軸を持つ横ずれ断層型であった。長期的には、このような広い範囲での地震活動に対しても注意深く見守ることが必要であろう。

7. おわりに

今回の熊本地震では、最初のM6.5の地震が「前震」から「本震」に変更されたことや、本震発生後に広域で地震活動が同時に活発化して強い余震が数多く発生するなど、異例な事態が続いた。これまでの経験則が適用できないとして、気象庁が最近の大地震のたびに発表してきた余震活動の確率予測も、今回は取り止められた。

Mogi (1963) は、地震の時系列を、(a) 本震-余震型、(b) 前震-本震-余震型、(c) 群発地震型、と分類し、岩石破壊実験の結果などから、地殻が比較的均質な地域では (a) のタイプ、逆に不均質な地域では (c) のタイプになりやすく、(b) はその中間的なものであるとした。（このほか、

前震も余震も伴わない (d) 単独型もある。) このうち、前震を伴う地震はかなり稀であり、全体の数%程度と言われている。

本震の発生前に、それが前震であることを判断することはきわめて難しい。今回の場合、4月14日21時26分にM6.5の地震(当初はM6.4と発表された)が発生し、その2時間半後の15日00時03分にM6.4の余震があった。これは双子地震という形であり、本震-余震型はあてはまらないとも考えられたが、この時点でM7.3の本震が続くと確実に予測できた人はいなかったであろう。最近の顕著な前震の例としては、2011年東北地方太平洋沖地震(M9.0)の2日前に震源近傍で発生したM7.3の地震があるが、この時もやはり、前震であることを事前に察知することはできなかった。

わが国の内陸地殻内で起きたM7級の地震でM6以上の前震を伴ったものは、これまでに1896年8月31日陸羽地震(M7.2)と1943年9月10日鳥取地震(M7.2)の2例しかない。ただし鳥取地震では、M6.2の地震が半年前の3月3日と4日の2回、本震の震源域付近で起きていたというものであり、前震というにはやや疑問が残る。陸羽地震については、本震発生の8日前から前震活動があったのち、本震当日の6時間半前にM6.8、30分前にM6.4の大きな前震が発生した。すなわち、今回のようにM6以上の前震を伴ったM7級内陸地震の発生は、100年に1度くらいのきわめて稀な事例であるということができよう。

なお、M5級の前震を伴ったM7級地震としては、1930年北伊豆地震(M7.3)、1945年三河地震(M6.8)、1978年伊豆大島近海地震(M7.0)などが知られているが、これらの前震は群発的な起こり方をした点が特徴である。

一方、大きな地震のあとにその余震域が断層面の延長方向に拡大していく現象は、それほど珍し

いことではない。また、既存の断層帯に沿って連鎖的に地震が誘発される現象も時折見受けられる。トルコの北アナトリア断層では、1939年から1944年にかけてM7.8、M6.9、M6.3、M7.6の大地震が次つぎと震源域を移動させながら発生した例があり、また2010年9月ニュージーランドのカンタベリー地震(M7.3)は、6カ月後の2011年2月、本震の断層面の東方延長部でクライストチャーチ地震(M6.3)を引き起こした。ただし、今回の熊本地震では、4月16日の本震発生とほぼ同時に阿蘇地方や大分県へと地震活動が一気に広域化しており、このような前例はあまりないように思われる。

参考文献

Mogi, K. 1963. The fracture of a semi-infinite body caused by an inner stress origin and its relation to the earthquake phenomena (second paper), *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **41**: 595-614.

岡田義光

[おかだ よしみつ]

略歴 東京大学大学院理学系研究科地球物理学専門課程博士課程中退。東京大学地震研究所助手(富士川地殻変動観測所勤務)、科学技術庁国立防災科学技術センター(現 防災科学技術研究所)地殻力学研究室長、地震前兆解析研究室長、地震活動研究室長、地震・噴火予知研究調整官、地震予知研究センター長、地震調査研究センター長、企画部長、同研究所理事長を歴任

研究分野 地震学、地殻変動論

著書 「日本の地震断層パラメーター・ハンドブック」(共著、鹿島出版会)、「現代測地学」(共著、日本測地学会)、「自然災害の事典」(共著、朝倉書店)、「日本の地震地図 南海トラフ・首都直下地震対応版」(東京書籍)他



岩石破壊実験

吉田真吾

1. 前書き

地震の発生の物理を理解することを目的として、東京大学地震研究所で実施されてきた岩石破壊実験および摩擦すべり実験について述べる。地震研には2軸圧縮試験機、3軸圧縮試験機、回転式せん断試験機等が設置されている。2軸圧縮試験機は、直交する2方向のピストンを用いて2方向に圧縮できる試験機であり、岩石の角柱ブロック3つをサンドウィッチ状に並べて摩擦すべり実験を行うことが多い。3軸圧縮試験機は、压力容器の中に高圧の流体を封じ込め、静水圧のもとに円柱形の岩石試料を鉛直方向にピストンで圧縮する試験機である。最近、回転式せん断試験機も開発され、2軸・3軸試験機では調べるできない大きなすべり変位の実験が行われている。

2. 2軸試験機での実験

2.1 破壊核成長モデル

2軸圧縮試験機(図1)では、岩石の直方体ブロック3つをサンドウィッチ状に並べて、水平方向のピストンで一定の法線応力を加えておき、鉛直方向のピストンで一定の速度でゆっくりとせん断応力を加え、ブロックの境界面を模擬断層面に見立てた摩擦すべり実験が行われている。このようなすべり実験を行うと、面の状態や法線応力などの条件によって、ほぼ一定のすべり速度で模擬断層面に沿って安定にすべりが起こる場合と、固着すべりが繰り返し起こる場合とがある。固着すべりとは、断層面が固着してせん断応力が増加していくステージのあと、高くなった応力を摩擦抵抗でさええられなくなって動的な応力降下を伴う不安定すべりが発生する現象である。これは、プ

レート境界面での地震サイクルなどと類似点が多く、地震サイクルの基本的モデルになりうる。

固着すべりが生ずる条件で行った実験の結果を示す。Opaka and Shen (1999) は、図2に示したように、断層面に沿った多点でせん断応力と2つのブロック間の相対すべりを測定した。図3は動的すべりが起こる25秒ほど前からのせん断応力変化を示す。矢印で示した時点で、全点で急に応力が下がっているが、このとき断層面全体で動的すべりが発生した。動的すべりが起こる前に、▼で示したときから断層面上のそれぞれの位置でせん断応力がゆっくり下がり始めている。同時に測定していた変位の記録は、このとき前駆的ゆっくりすべりが起こっていることを示していた。このように、ゆっくりとした前駆的すべりを伴って応力が低下している領域を破壊核と呼んでおり、その成長していく様子が図4に示されている。破壊核がゆっくりと成長し、ある臨界長に達すると地震に対応する動的すべりが起こり、その破壊領域が高速で拡がっていくモデルは破壊核成長モデルと呼ばれている。実際の地震の前にも破壊核が成長している可能性が高いと考えられているが、大きな地震ほどその前に大きな前駆的すべりが起こるかどうかはわかっていない。

2.2 大型2軸試験機

プレート境界面上には、アスペリティが分布しており、そこではいつも面がしっかりとくっついていて歪を蓄え、あるとき動的すべりが生じて地震が発生するというモデルがある。アスペリティ以外の領域では、ゆっくりとすべて歪がたまらず、隣接するアスペリティで地震が起こったとき余効すべりが起こると考えられている。

Mogi and Mochizuki (1990) が開発した長さ1mの岩石ブロックで実験できる大型2軸せん断試験機は現在も稼働している。この装置では3つ



図 1 東大地震研究所に設置されている2軸圧縮試験機. 鉛直方向と水平方向のピストンにより2方向から圧縮できる

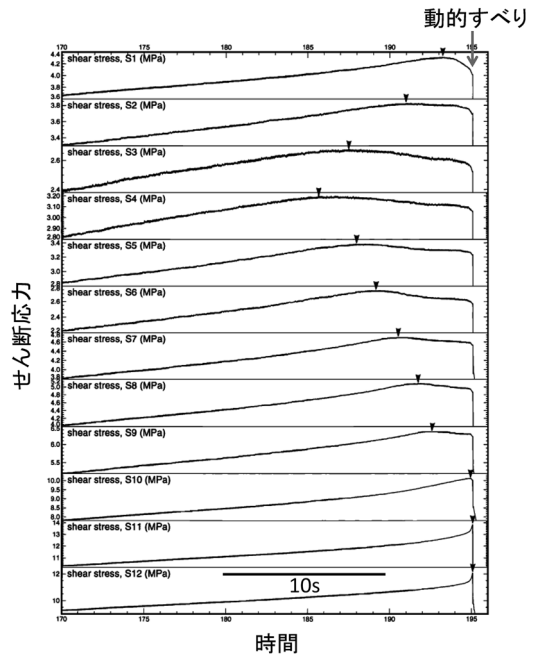


図 3 局所的せん断応力の時間変化. 矢印の時刻に断層面全体で動的すべりが発生した. その前からせん断応力がゆっくりと低下している領域が広がっている (OPaka and Shen, 1999)

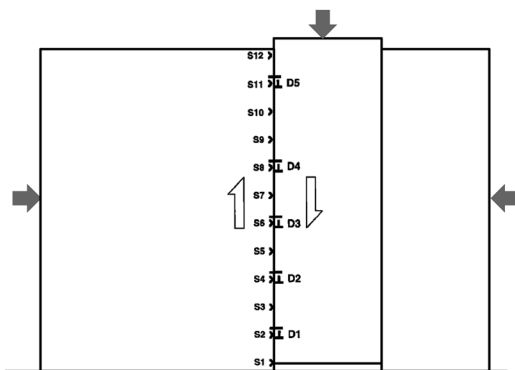


図 2 岩石の直方体ブロック3つをサンドウィッチ状に並べて、水平方向のピストンで一定の法線応力を加えておき、垂直方向のピストンで一定の速度でゆっくりとせん断応力を加え、ブロックの境界面を模擬断層面に見立てた摩擦すべり実験. 断層面に沿った多点でせん断応力と2つのブロック間の相対すべりを測定した (OPaka and Shen (1999) に加筆)

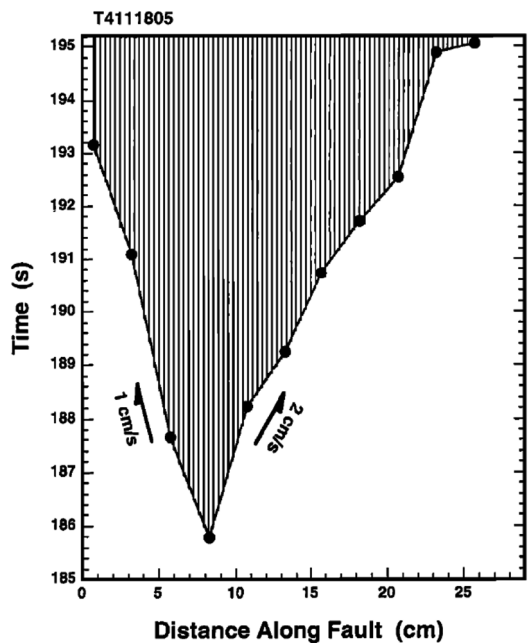


図 4 破壊核成長過程. ハッチのついた領域では、ゆっくりとした前駆的すべりを起こしながら応力が低下している (OPaka and Shen, 1999)

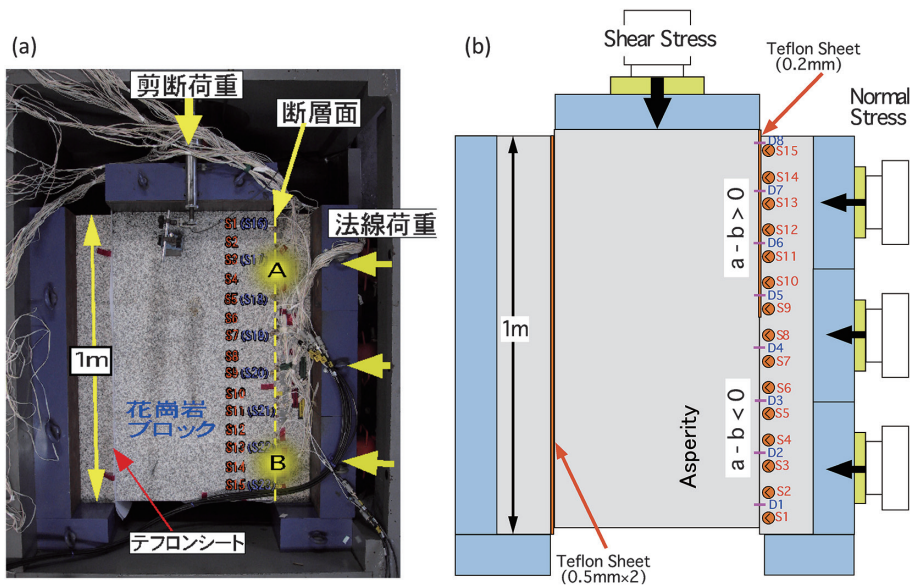


図 5 (a) 大型せん断試験機の写真. (b) アスぺリティと非地震性すべり領域を作り出して行った実験における応力の測定点(S)と変位の測定点(D) (Yoshida *et al.*, 2004).

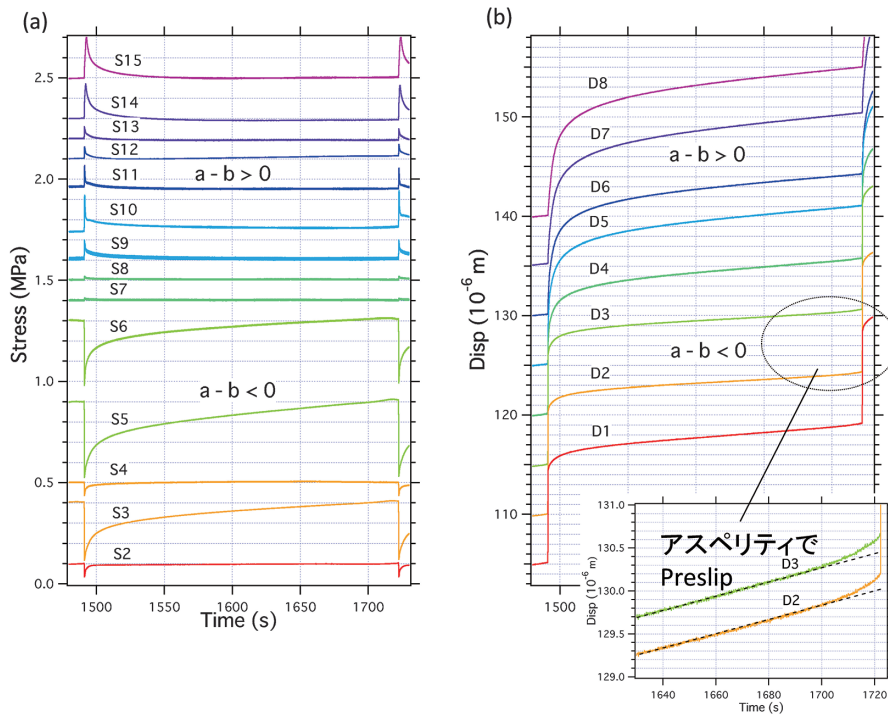


図 6 せん断応力(a)と変位(b)の時間変化. S2-S6 (アスぺリティ) では前駆的すべりのあと動的すべりが発生し, S9-S15 ではすべり間に応力は増加せずアスぺリティで動的破壊が生じたあと余効すべりが発生する (Yoshida *et al.*, 2004)

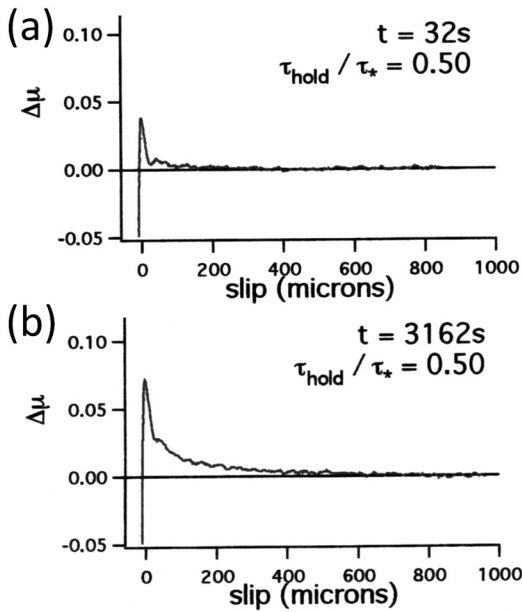
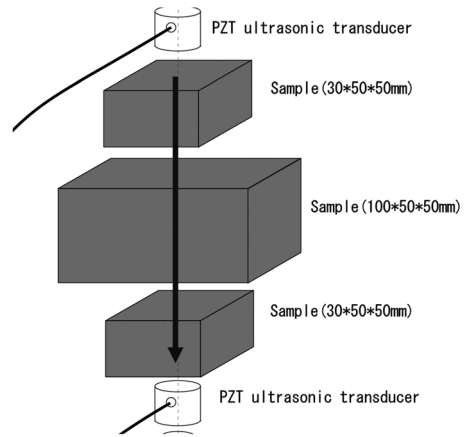


図7 800度で32秒 (a), 3,162秒 (b) 静的に接触させてから、すべらせたときの摩擦の変化。最大静摩擦力は高温ほど、また接触時間が長いほど増加する (Nakatani, 1997)

の岩石ブロックを水平に設置する。図5 (a) は上から撮影した写真である。その装置を用い、長さ1m、幅10cmの花崗岩の模擬断層に摩擦特性の異なる領域を分布させ、すべり実験を行った例を示す (Yoshida *et al.*, 2004)。模擬断層面のうち、半分の50cmの領域に薄いテフロンシートをはさんで安定すべりが起こるようにし、残りの半分の領域は花崗岩どうしを直接接触させ動的すべりが生ずるようにした (図5 (b))。断層に沿った多数の点で局所的な変位とせん断応力を測定した。

岩石が直接接触している領域はアスペリティ的に振る舞う。そこでの変位は図6 (b) のD1~D4に示されているが、固着すべりを起こしている。テフロンをはさんだ領域では、図6 (a) が示すようにアスペリティでの動的すべりにより応力が急激に上がりそれを緩和しながら顕著な余効すべりが起こっている (D5~D8)。アスペリティ内部で前駆的すべりが起こり、破壊核が成長して動的すべりに至る現象はこの実験でも観測された。



透過波

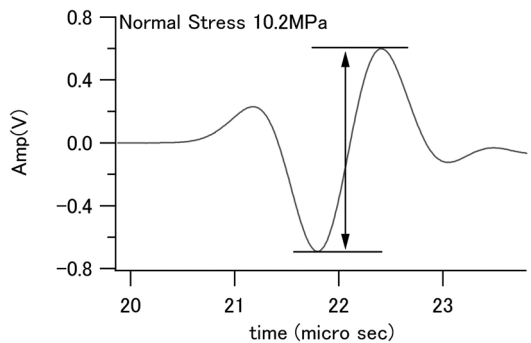


図8 すべり面を透過した弾性波振幅の測定

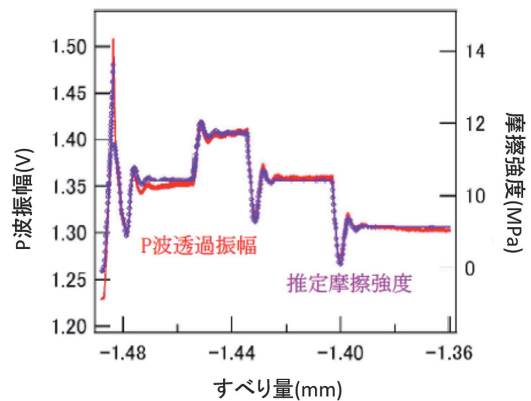


図9 ほとんど同じように変化する透過波振幅と摩擦強度 (Nagata *et al.*, 2008)

この装置は、法線応力を加えるピストンが3本あり、法線応力に不均質な分布を与えることもできる。模擬断層面の表面に凹凸を与え2つのアス

ペリティを造り、1つには大きな法線応力、もう1つには小さな法線応力を加えることにより、強さの異なるアスペリティの相互作用を調べる実験なども行われた (Yoshida and Kato, 2001).

2.3 高温における強度回復

地震は同じ断層面で繰り返し発生しているから、次の地震までの期間に断層面の強度は増加しているはずである。その増加のしかたは温度によって変わることが予想される。そこで、2.1に記した2軸圧縮試験機を用い、セラミックスブロックの間に長石の粉末をはさみ、試料全体に電気炉をかぶせて温度800度までの条件で実験がなされた (Nakatani, 1997)。法線応力を一定にしてある時間、静的に接触させておいてから、せん断応力を加えて一定のすべり速度ですべらせ、最大静摩擦力がどのくらい増加するか調べた。図7に32秒、3.162秒接触させてからすべらせた実験結果を示すが、最大静摩擦力は接触時間が長いほど大きくなっている。また、温度を変えた実験により、高温ほど最大静摩擦力が増加することもわかった。すべり始めるときに、最初は最大静摩擦力まで上がり、その後すべり変位とともに摩擦力が下がっていく。図7(b)では、短いすべり変位量で一度急に低下したあと、だんだらとゆっくりと下がっているのが見てとれる。多くの条件で実験した結果、高温で長時間の接触時間の場合にのみ、そのような落ち方が見られることがわかった。それまでの常温の実験で知られてきた強度回復とは別種の強度回復機構が働いており、その強度が落ちるのに必要なすべり変位量が長いことを示している。

2.4 透過波振幅と摩擦強度

断層面の摩擦強度は面の接触状態によって決まると考えられている。よく接触しているほど強度は高い。面を透過した弾性波の透過率も面の接触状態に依存すると予想されるので、透過波を測定することにより強度を推定できる可能性がある。そこで、Nagata *et al.* (2008) はすべり面を透過した弾性波の振幅を連続測定しながら摩擦すべり実験を行い、弾性波の透過波振幅と摩擦強度との関係を調べた。2軸試験機に岩石のブロックを3

つ並べ、上下のブロックに超音波トランスデューサを取り付け、弾性波を送受信しながら、法線応力一定ですべらせる。すべり面を透過した弾性波の振幅と、せん断応力とすべり速度のデータから計算した摩擦強度を図9に示す。予想どおり、透過波振幅と摩擦強度がほとんど同じように変化することを明らかにした。

2.5 新しい摩擦構成則

摩擦は面の接触状態とすべり速度に依存するという速度・状態依存摩擦構成則が1980年頃に室内実験の結果に基づいて提案され、コンピュータによる地震サイクルのシミュレーションなどでも頻繁に使われている。定式化が少し異なる2つのバージョンがあるが、実は両者とも室内実験の結果と明らかにずれている点があることが知られていた。Nagata *et al.* (2012) は透過振幅を測定することにより、断層面の接触状態の変化をより詳しくモニタリングしながらすべり実験を行い、従来の構成則よりも実験データをよく説明できる新しい断層摩擦構成則を開発した。その新たな構成則を利用することにより、より精度のよい地震発生の数値シミュレーションが可能になることが期待される。

2.6 すべりに伴う電位変化

花崗岩のブロック試料3つを用いた固着すべり実験において、岩石表面の2カ所に貼付けた電極とグラウンドとの電位差、および断層面沿いの多点でせん断応力を測定した (Yoshida *et al.*, 1997)。岩石試料の周りに絶縁体のアルミナを置くことにより、岩石試料を周囲から絶縁してある。図10に動的すべりに伴う応力変化および電位変化を示す。動的すべりと同時にスパイク的に立ち上がり、その後指数関数的に減衰する電位変化が観測された。圧力変化による石英の圧電効果とその後の緩和で説明できる。また、電極EL1で明瞭な前駆のシグナルが検出されているが、同時に記録していた応力の記録から、この動的すべりの前にはEL1に近い断層面で破壊核が成長していたことがわかった。もう一方の電極EL3に大きなシグナルが現れることがあるが、その場合はそちらに近い場所で破壊核が成長していた。この実験で

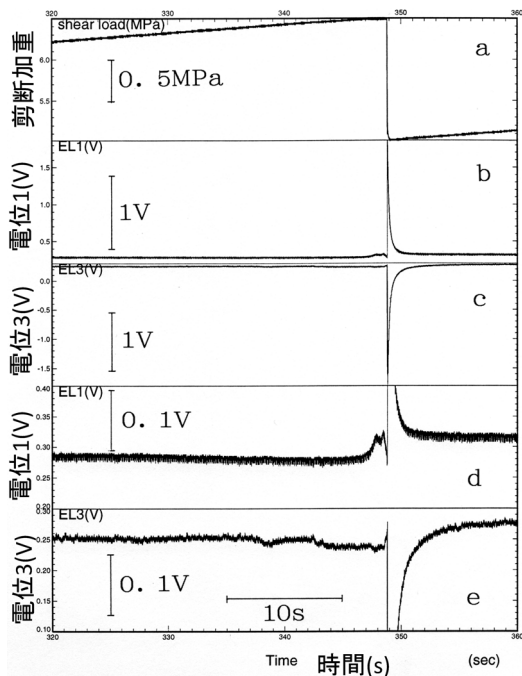


図 10 花崗岩を用いた固着すべり実験における、せん断応力と電位の時間変化。電位は、動的すべりと同時にスパイク的に立ち上がり、その後指数関数的に減衰する。また、動的すべり前にもシグナルが検出された (Yoshida *et al.*, 1997)

は、電位を測定することにより、破壊時刻だけでなく、左右のどちらの面で破壊核が成長しているかがある程度推察できた。

安定すべりを起こさせた実験の例を示す。巨視的には安定すべりであるが、すべっている間に断層面の小さな凸部で微小破壊が起り、アコースティックエミッション (AE) が生ずる。大きな AE が発生したとき、アンテナで電磁放射 (EME) も検出された。AE センサーを多数セットしておいて、EME を伴った微小破壊の震源分布を求めた結果、図 11 に示すように、石英上、またはその縁に求まっており、EME のソースは石英の圧電効果であることがわかる (Yoshida *et al.*, 1994)。また、実験中、同じ震源 A, B で繰り返し大きな AE が発生しており、EME も検出されている。EME の波形も図 11 に示した。EME 波形の極性が震源によって異なるのは、石英の結晶軸の向き

が異なるためである。また、EME 波形は高周波数成分が卓越しているように見えているが、計測システムの周波数特性の影響であり、実際は数 10 Hz 程度までの低周波数成分ももつ。

3. 3 軸圧縮試験での実験

3.1 高温高压下での岩石破壊実験

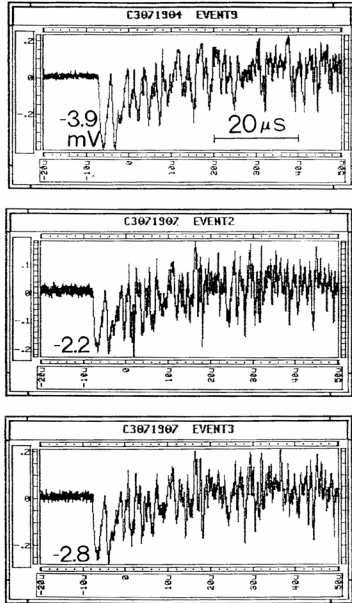
地震は、地下深くの高温高压下で発生しており、岩石中には高压の間隙水も存在している。前節で述べたように、2 軸試験機でも高温での実験は可能であるが、3 方向から圧縮された条件を作ることにはできない。高温高压下での実験は、3 軸圧縮試験機で行われる。

3 軸圧縮試験では、高压容器の中に円柱形の岩石試料をセットしてから、高压の流体を封じ込んで、1 対のピストンを使い岩石試料を鉛直方向に圧縮していく。それぞれ互いに直交する圧縮応力は、大きいほうから最大主応力、中間主応力、最小主応力とよばれ、通常の 3 軸圧縮試験では中間主応力と最小主応力は等しく流体の静水圧 (封圧) で与えられる。3 方向から圧縮力を加えているので 3 軸試験というが、特に、3 方向の圧縮力を異なる値に設定できるものは真の三軸試験とよんでいる。鉛直方向と水平方向の 2 組のピストンで最大主応力と中間主応力が与えられる。地震研に設置されている 3 軸圧縮試験機 (図 12) は真の 3 軸試験が可能であり、最大封圧 500 MPa、最大間隙水圧 400 MPa、最高温度 500 度までの条件を作り出せる (Opaka *et al.*, 1997)。温度の上限は、圧力媒体として使っているオイルが変質する温度で決まる。

水平方向のピストンを使わず、通常の 3 軸試験を行うときは、円柱形の岩石試料を用いることが多い。あらかじめ斜めに切断してその破断面に沿った摩擦を調べる場合と、そのような破断面のない岩石試料を破壊させる場合とがある。後者の場合、軸方向の圧縮によって脆性破壊が起こると斜めにせん断破壊面ができ、その後その面に沿って摩擦すべりが起こる。

試料は図 12(b)のようにセットする。直径 16 mm、

EME from A



EME from B

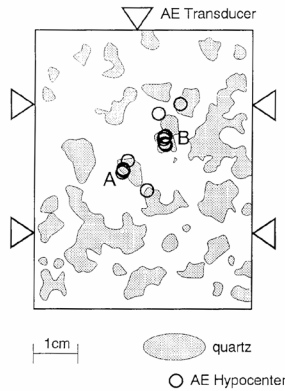
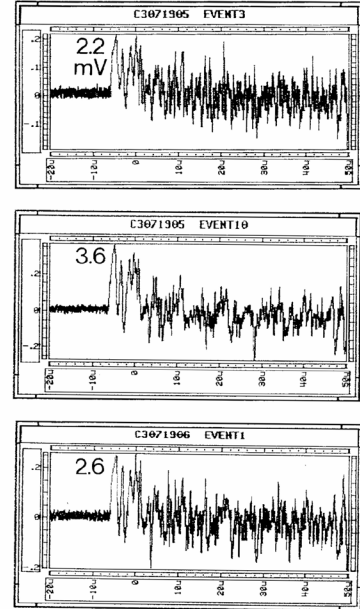
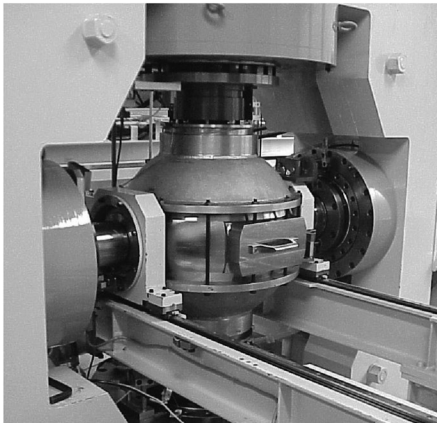


図 11 電磁放射 (EME) を伴った AE の震源 (中央図). 石英の結晶の縁に求まった. 震源 A からの EME の波形 (左図) と B からの EME (右図). 極性は結晶軸の向きで決まる (Yoshida *et al.*, 1994).

(a)



(b)

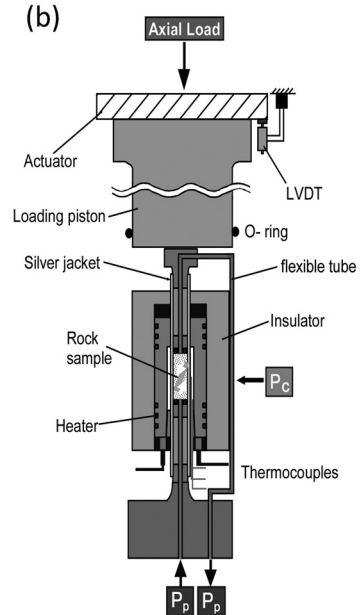


図 12 (a) 3 軸圧縮試験機の外観. (b) 岩石試料のセット. 高温高圧下で間隙水圧を制御しながら 3 軸圧縮試験を行うことができる.

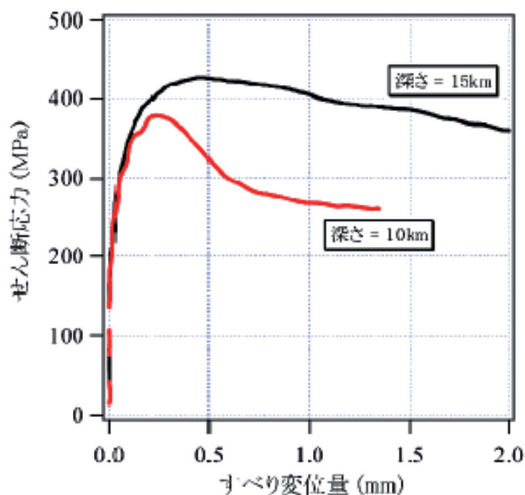


図 13 深さ 10km の条件 (封圧 300MPa, 間隙水圧 200MPa, 温度 300度), および深さ 15km の条件 (封圧 450MPa, 間隙水圧 150MPa, 温度 450度) でのすべり変位に対するせん断応力の変化 (Kato *et al.*, 2003)

長さ 40mm の円柱形試料を銀ジャケットで被い、オイルが試料に入らないようにし、外側に円筒形のヒーターを被せ試料部分を高温に保つ。压力容器内部のヒーター線、熱電対は下側ピストンを通して容器外へ取り出されており、取り出し口は高压のオイルが容器外へ漏れ出さないように特殊構造になっている。封圧、間隙水圧用の増圧機、上下左右ピストンは、おのおの独立にサーボ制御され、荷重はロードセルで測定され、軸方向の変位量はピストンの変位から求める。

せん断面をもたない花崗岩試料を用い、地下深さ 2~16km に相当する封圧、間隙水圧、温度を与え、封圧、間隙水圧、温度によって岩石の破壊過程がどのように変わるか調べる実験が行われた (Kato *et al.*, 2003)。図 13 の赤線は、深さ 10km の条件 (封圧 300MPa, 間隙水圧 200MPa, 温度 300度) で行った実験結果であり、せん断応力をすべり変位の関数としてプロットしてある。せん断応力が破壊強度に達したあと、せん断破壊面に沿って摩擦すべりが生じ、ある変位だけすべるとほぼ一定の摩擦になる。一定の摩擦になるまでのすべり量を臨界すべり量 (Dc) と呼んでおり、

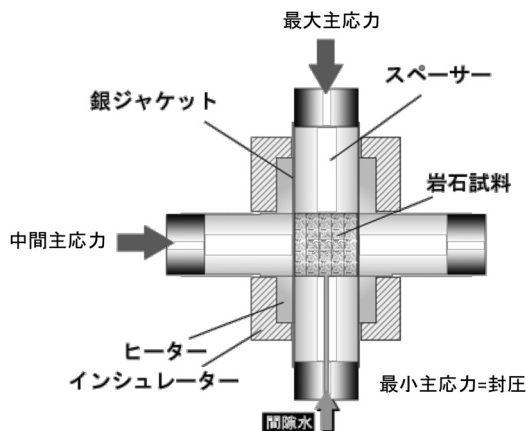


図 14 真の三軸試験を行うときの試料のセット

破壊強度が同じであっても、Dc が小さいほど地震時のすべりのような高速すべりが生じやすいことがわかっている。黒線は深さ 15km の条件 (封圧 450MPa, 間隙水圧 150MPa, 温度 450度) で行った実験のデータである。これらの実験により、破壊強度や Dc などが深さの関数として求められ、深さ 10km より深くなるあたりから、臨界すべり変位量 Dc が増加するなど、破壊の安定性が増すことがわかった。

3.2 真の 3 軸実験

実際の地球内部の岩石は 3 方向の主応力が互いに異なる真の 3 軸圧縮応力下にあるのだから、そのような応力状態の圧縮試験を行うことが重要である。そこで、Mogi (1971) は 3 つの主応力が異なる試験機を開発し、中間主応力の影響は無視できないものであることを示した。また、Mogi (1972) は大理石が延性変形するときの強度を調べるために最大封圧 100MPa、室温で真の 3 軸実験を行ったが、現在地震研に設置されている装置はそれよりも高い封圧下で、かつ高温で真の 3 軸実験ができる。高封圧、高温になるほど封圧依存性が弱くなると考えられているが、それを確かめることも目的として真の 3 軸圧縮実験がなされた。

大理石の角柱試料を用い、図 14 に示すように、鉛直と水平方向のピストンによって最大主応力と中間主応力を与える (仲山, 2007; 新谷, 2008)。水平方向のピストンをゆっくりと岩石試料に接触

させたあと動かないようにサーボコントロールし、鉛直方向のピストンを一定の速さで押し込んで圧縮する。

図 15 の青線と橙色線は水平方向のピストンを用いない通常の 3 軸試験を、温度 300°C、乾燥状態（封圧=220 MPa）と間隙水を含む条件（封圧=260 MPa、間隙水圧=40 MPa）で行った実験の結果である。両者の変形のしかたに違いが見られないが、封圧から間隙水圧を引いた実効封圧が同じためと思われる。最大主応力から封圧を引いた差応力は、最初は歪の増加とともに増加していくが、歪が 1~2% より大きくなると変形が進行してもほぼ一定の値のまま延性変形している。一方、真の三軸圧縮試験の結果を示す赤線を見ると、より高い差応力で定常状態に達しており、中間主応力によって、岩石の変形挙動に顕著な違いが生じることがわかる。最大封圧 350 MPa、最高温度 300 度のさまざまな条件下で実験を行ったが、少なくともその条件範囲では大理石の延性強度は中間応力に依存し続けることがわかった。

3.3 岩石物性の同時測定

3 軸圧縮試験機は破壊実験だけではなく、高温高压下での岩石の物性測定にも使われている。最近、種々の構造探査により、P 波速度 (V_p)、S 波速度 (V_s)、電気比抵抗などが同一断面上にマッピングされるようになってきた。それら観測可能な V_p 、 V_s 、比抵抗などから、どのような物質がどのような状態にあり、どのような破壊・摩擦特性をもっているのか推定できるようになることを目指した実験を実施している。そのためには、震源域に存在しそうな物質を用い、室内実験により V_p 、 V_s 、比抵抗などと、破壊・摩擦特性をさまざまな条件下で同時測定することが必要である。同時測定が必要なのは、間隙の形状や連結性に依存する物性パラメータは、温度・圧力だけで一意に定まるとは限らないからである。3 軸圧縮試験機はもともと破壊特性を調べる目的で設置されたのだが、高温高压下における透水率、比抵抗および弾性波速度測定ができるように装置の改造をしてきた。

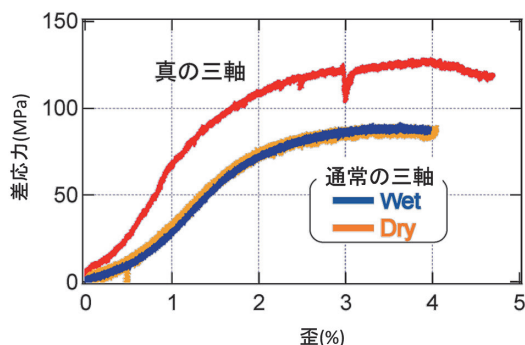


図 15 温度 300 度での大理石の変形過程。通常の 3 軸圧縮試験と真の 3 軸圧縮試験との比較からわかるように、中間主応力の影響を受けている（仲山, 2007）

a) 透水率

透水率を測定するには、試料の上面と下面に一定の圧力差を与えて流れる流体の量から求める方法、試料の片側の圧力を瞬時に少量変化させて、その後、間隙圧が平衡状態になるまでの時間から求める方法がある。最近になって、試料の片側の間隙圧を正弦関数状に振動させて、試料の反対側でその応答として現れる間隙水圧振動の振幅の変化と位相遅れを測定して求める方法も用いられるようになった。水が浸透しにくいほど、試料の反対側では間隙圧振動の振幅が小さくなり、変化が遅れるので、透水率が計算できるのである。本装置はどの方法も利用できるようになっている。地震発生にはたす水の役割は大きいと考えられている。Kato *et al.* (2004) は現在地表に露出する付加体の岩石の透水率を測定し、付加体の透水率構造を推定し、その結果に基づき、沈み込み帯の間隙水圧分布に一定の拘束を与えた。

b) 弾性波速度

高温高压条件下での岩石の弾性波速度測定は 1950 年代頃から行われているが、他物性との同時測定が行われた例は少ない。図 16 に示すように、P 波と S 波両方の受信と送信が可能な 2 つのトランスデューサ A、B をセットする。岩石試料部は高温高压のため、試料に直接貼付けずに、スペーサを介してセットする。トランスデューサ A から弾性波を送信し、トランスデューサ B で

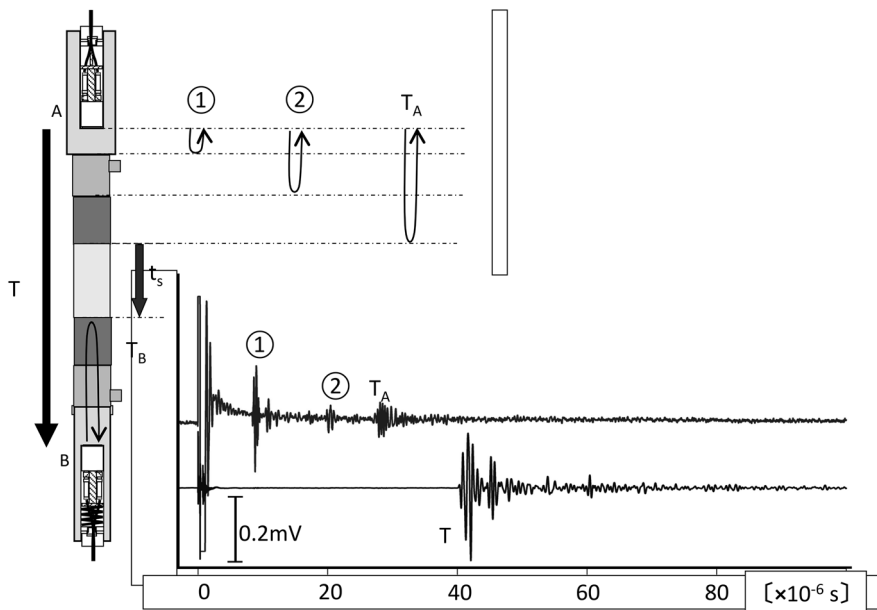


図 16 高温高圧下での花崗岩の弾性波測定. 直達波の走時と、スペーサとの境界からの反射波の走時から試料内の走時が求まる (秋葉, 2008)

受信した直達波の走時を T 、試料と A 側のスペーサとの境界からの反射波の走時を T_A とする。またトランスデューサ B から弾性波を送信したときのスペーサからの反射波の走時を T_B とすると、試料内の走時 t_s は $t_s = T - (T_A + T_B) / 2$ から求めることができる。図 16 に花崗岩を用いた実験で測定された P 波の波形の例を示す (秋葉, 2008)。直達波、およびスペーサとの境界面からの反射波 (T_A) がはっきりと見えているのがわかる。このような実験によりさまざまな温度圧力条件下での弾性波速度が求められている。

c) 電気比抵抗

高温高圧下での実験では、金属ジャケットで岩石試料を覆っている。そのような状態で岩石試料の比抵抗を求めるのに、金属ジャケットを主に流れてきた電流と試料中心部を流れてきた電流を分離して測定するガードリング法が用いられた (図 17)。変成岩の一種のホルンフェルス試料を用い、さまざまな周波数の交流電圧を与え、温度、圧力を変えて比抵抗を求めた (長谷川, 2008)。ガードリングに流れ込む電流と中央電極に流れ込む電流を計算し、その結果に基づき補正を行った。電

圧と電流の位相差も測定しているの、周波数ごとの複素インピーダンスを求め、岩石試料の等価回路を推定することも可能である。

このように、透水率、弾性波速度、電気比抵抗を原理的には同時に測定できるように改造済みである。ただし、個別には測定はしたが、解決すべき問題が残っており同時測定の実施には至っていない。また、同時測定をしながら圧縮実験を行い、岩石の変形に伴ってこれらの物性がどのように変化するかを明らかにすることも重要であると考えている。電気比抵抗も透水率も水の連結度によって決まり、主破壊の前の微小破壊によって、変化することはわかっている。それらを観測することにより、どのくらい破壊が切迫しているか推定できるようになる可能性もある。

3.4 破壊前に岩石中に流れる電流

地震研には破壊に関する電磁気現象を調べるための、岩石試料部と間隙水部が周囲から電氣的に絶縁されている特別仕様の 3 軸試験機が設置されている。真の 3 軸ではない通常の 3 軸試験のみ可能である。この装置を用いて行った実験結果の 1 例を図 18 に示す (Yoshida, 2001)。一定封圧、

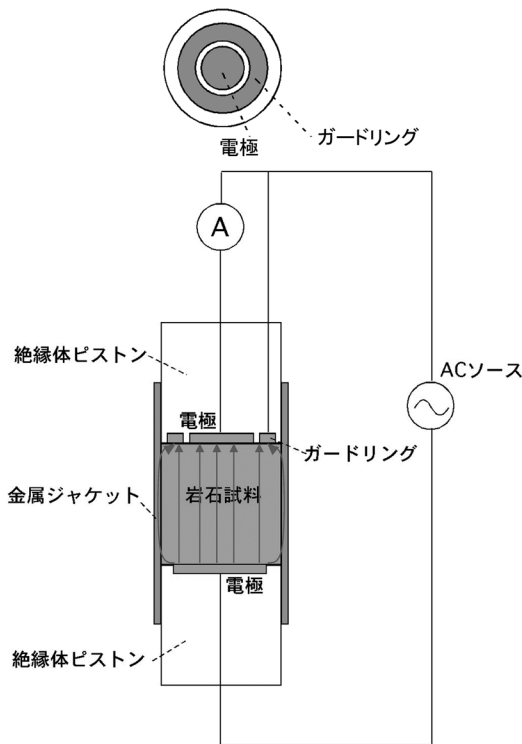


図 17 ガードリング法による岩石試料の電気抵抗測定. 金属ジャケットを流れる電流をガードリングで分離し、試料内部を流れる電流を中央の電極で測定する (長谷川, 2008)

間隙水圧のもとで花崗岩の円柱試料を、一定速度で軸方向に圧縮する。試料上面と下面からのリード線を電流計に接続し、試料内を流れる電流を測定する。常温での実験のため、ジャケットは金属ではなく絶縁体のテフロンを使用したので、前節のようなガードリング法は用いずに電流を測定できる。岩石試料の体積変化、間隙水の流量レートがプロットされているが、いずれも電流とよい相関を示している。主破壊前に岩石内に微小破壊（クラック）が生じて試料の体積が膨張し、クラックへ間隙水が流れ込んで、電流が流れたのである。間隙水は全体としては電気的に中性であるが、岩石の水との境界にはりついて移動しにくいイオンと、比較的移動しやすいイオンがあり、岩石中で水が流れると後者のイオンが水とともに移動し電流も生じるのである。

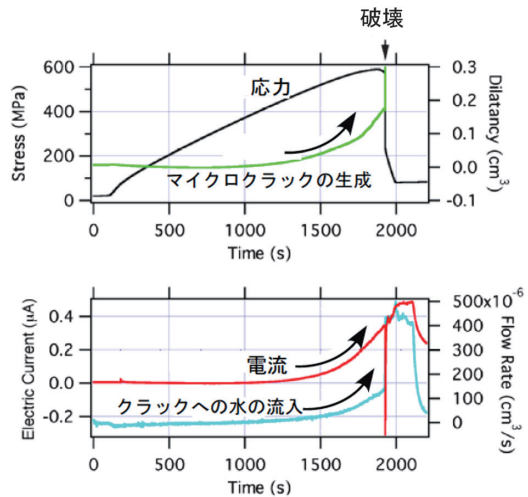


図 18 電流を測定しながら行った岩石の圧縮破壊試験. 主破壊前に岩石内に微小破壊（クラック）が生じて試料の体積が膨張し、クラックへ間隙水が流れ込んで電流が流れた (Yoshida, 2001)

3.5 間隙水を含む岩石における AE に伴う電磁放射

2.6 で述べたように、石英を含む岩石内で微小破壊（AE）が生ずると、圧電効果により電磁放射（EME）が起こる。2.6 では乾いた岩石での安定すべりの実験例を紹介したが、ここでは円柱形の花崗岩試料を用いて 3.4 と同じ 3 軸圧縮試験機により間隙水を含む花崗岩を用いて、AE と EME を測定しながら破壊実験を行った例を示す (Yoshida and Ogawa, 2004)。EME の伝播速度は弾性波に比べるとはるかに速いため、図 19 (a) が示すように AE より先に観測されている。実際の地震が発生する領域には水が存在していると考えられているが、湿潤状態での EME は高い周波数成分のみもつ。水の存在下では乾燥した場合に比べ電気比抵抗が何桁も小さいため、圧電効果で分極しても瞬間的に緩和されてしまうからである。主破壊が近づくと、AE も EME も発生数が多くなり、また振幅が大きい事象が多くなっている (図 19 (b))。実際の地震の前にも電磁放射が起こっているかもしれないが、石英の結晶軸の方向がランダムな場合は、検出できるような強いシグナルは期待できないと考えている。

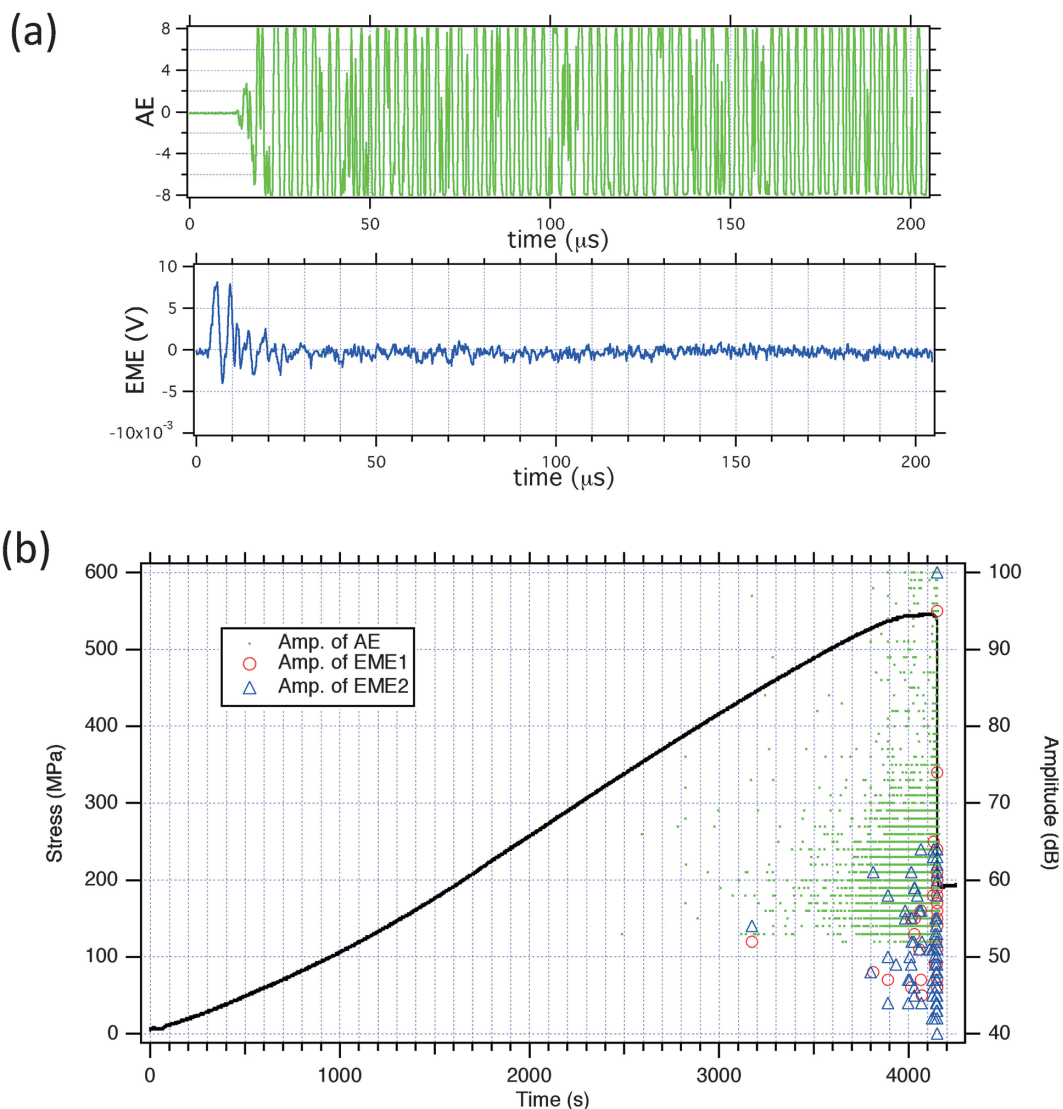


図 19 電磁放射 (EME) を測定しながら行った岩石の圧縮破壊試験. (a) AE 波形と EME 波形. (b) 主破壊前に AE が増加し、それらの一部からは EME が検出された (Yoshida and Ogawa, 2004).

4. 回転式せん断試験機での実験

図 20 は回転式せん断試験機である。円筒状の岩石試料などを接触させて滑らせる。2 軸試験機、3 軸試験機に比べ、はるかに大変位の実験が行えるという特徴をもつ。高速で長時間滑らせることもできる。

室内実験と実際の地震では、スケールの違いが

つねに問題になる。室内実験では、ミクロンオーダーの微小破壊から、大型 2 軸試験機での 1 m 程度の破壊面まで調べられるが、それを自然地震のスケールまで外挿できるかは明らかでない。回転式試験機を使えば、すべり変位に関しては、自然地震と同等のスケールまで調べることができる。また、2 軸や 3 軸試験機ではわからない、摩擦による発熱ですべり面の温度が上昇する影響を調べるため、IR (赤外線) センサーで温度を測定し

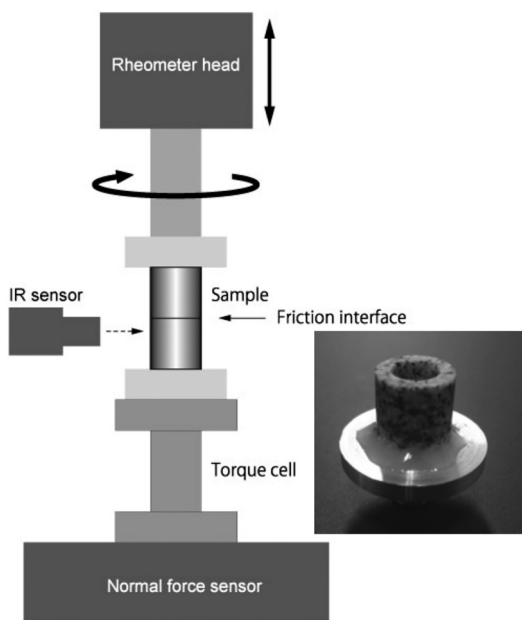


図 20 回転式せん断試験機。IR（赤外線）センサで温度を測定しながら、円筒形の2つ試料を接触させてすべらせる

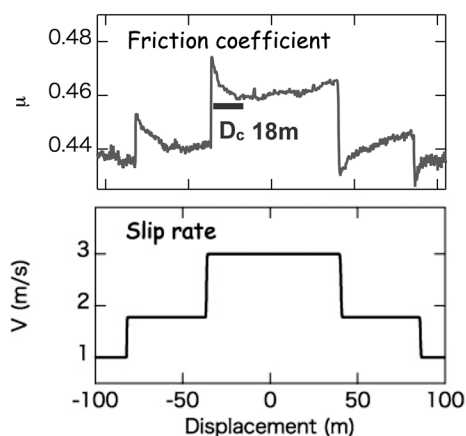


図 21 回転式せん断試験で得られた、すべり速度を変えたときの摩擦の変化。10mを超える臨界すべり量 (D_c) を示した (Kuвано *et al.*, 2013)

ながら実験を行っている (Kuвано and Hatano, 2011)。図 21 はこの装置で、岩石試料ではなくガラスビーズを用いた実験で得られたデータの例である (Kuвано *et al.*, 2013)。すべり速度を上げると瞬間的に摩擦が上がり、その後すべりととも

に減少していく。臨界すべり量 D_c は、動的すべりが起こるのか、あるいは、どのようなスロースリップが起こるのか考えるうえで重要なパラメータであるが、本研究では 10m を超す大きな値が得られた。

5. おわりに

実際に地震が起こっている領域にできるだけ近い条件下で実験を行いたい、1つのタイプの試験機ですべての条件を満たすことはできない。それぞれの試験機で実現できる条件を相補的に作り出して実験を行い、地震発生の物理について理解を深めようとしてきた。ただし、温度、圧力などは実際の地震に近い条件を作り出せるが、破壊のサイズを実際のサイズに近づけるのは不可能である。室内実験と実際の地震のサイズのギャップを埋めるため、われわれの研究室は、立命館大学、東北大学など多くの大学と共同で、南アフリカ金鉱山の地下1~3kmにおいて半制御実験を行っている。採掘による応力の変化が前もってわかるので、地震が起こりそうな場所に歪み計、AEセンサーなどを設置して震源のごく近傍で観測している。室内実験で見られるような現象も観測されるが、予想されない現象も観測されており、地震の物理に関して新たな知見が得られている。

参考文献

- 秋葉麻実. 2008. 東京大学大学院, 修士論文.
 長谷川悟. 2008. 千葉大学大学院, 修士論文.
 Kato, A., Ohnaka, M. and Mochizuki, H. 2003. *J. Geophys. Res.* DOI:10.1029/2001JB000791
 Kato, A., Sakaguchi, A., Yoshida, S., Yamaguchi, H. and Kaneda, Y. 2004. *Geophys. Res. Lett.*, **31**, L06602. doi:10.1029/2003GL019183
 Kuвано, O. and Hatano, H. 2011. *Geophys. Res. Lett.*, **38**. doi:10.1029/2011GL048530
 Kuвано, O., Nakatani, N., Hatano, T. and Sakaguchi, H. 2013. AGU Fall Meeting.
 Mogi, K. 1971. *Tectonophysics*, **11**, 111-127.
 Mogi, K. 1972. *Phys. Earth Planet.*, **5**, 318-324.
 Mogi, K. and Mochizuki, H. 1990. International Sympto-

- sium on Earthquake Source Physics and Earthquake Precursors, Tokyo, 43-47.
- Nagata, K., Nakatani, M. and Yoshida, S. 2008. *Geophys. Res. Lett.*, **35**, L06310. doi:10.1029/2007GL033146
- Nagata, K., Nakatani, M. and Yoshida, S. 2012. *J. Geophys. Res.*, **117**, B2. doi:10.1029/2011JB008818
- Nakatani, M. 1997. Doctor Thesis, Univ. of Tokyo.
- 仲山太郎. 2007. 東京大学大学院, 修士論文.
- Ohnaka, M., Akatsu, M., Mochizuki, H., Odera, A., Tagashira, F. and Yamamoto, Y. 1997. *Tectonophysics*, **277**, 1-27.
- Ohnaka, M. and Shen, L. 1999. *J. Geophys. Res.*, **104**, 817-844.
- 新谷陽一郎. 2008. 東京大学大学院, 修士論文.
- Yoshida, S., Manjgaladze, P., Zilpimiani, D., Ořaka, M. and Nakatani, M. 1994. Electromagnetic Phenomena Related to Earthquake Prediction. TERRA Pub., Tokyo, 307-322.
- Yoshida, S., Uyeshima, M. and Nakatani, M. 1997. *J. Geophys. Res.*, **102**, 14883-14897.
- Yoshida, S. 2001. *J. Geophys. Res.*, **106**, B2, 2103-2120.
- Yoshida, S. and Kato, A. 2001. *Geophys. Res. Lett.*, **28**, 3, 451-454.
- Yoshida, S. and Ogawa, T. 2004. *J. Geophys. Res.*, **109**, B09204. doi:10.1029/2004JB003092
- Yoshida, S., Kato, A., Kato, N. and Nakatani, M. 2004. *Earth Planets Space*, **56**, 795-801.

吉田真吾

[よしだ しんご]

現職 東京大学地震研究所教授

略歴 東京大学大学院理学系研究科博士課程修了。東京学芸大学助手、東京大学地震研究所助手、助教授を経て現職

研究分野 実験地震学

著書 「地殻ダイナミクスと地震発生」(朝倉書店, 共著)



人材育成による世界の地震・津波災害軽減への挑戦

古川信雄

1. はじめに

地球上では、毎年大規模な地震・津波災害が発生し、多大な犠牲者と経済的損害をだしている。最近の例では、アジアにおいては、2004年スマトラ北部地震・インド洋大津波（インドネシア、マグニチュードM9.1、死者227,898名）と2005年ムザファラバード地震（パキスタン、M7.6、死者86,000名）、2008年四川地震（中国、M7.9、死者87,587名）が、太平洋では2009年サモア諸島沖地震（サモア、M8.1、死者192名）が、中南米では2010年ハイチ地震（ハイチ、M7.0、死者316,000名）が発生しており、開発途上国の発展の障害になっている（以上、Mと死者数は米国地質調査所による）。このような地震・津波災害を軽減するためには、「地震学」と「地震工学」の両方からのアプローチが必要である（図1）。すなわち、「地震学」により、地震と津波そのものを正しく理解し、正しい情報を迅速に行政や市民に伝達すること。同時に、「地震工学」により、耐震設計された地震に強い建物を造り、既存の脆弱な建物は耐震補修・補強をすることである。

国立研究開発法人建築研究所国際地震工学センターは独立行政法人国際協力機構（JICA）と協力して、世界の地震・津波災害軽減のために開発途上国の研究者・技術者に対して地震学および地震工学に関する研修を実施している（写真1）。1960年に開始した国際地震工学研修のこれまでの修了生は、2015年末現在で100カ国・地域から1,703名におよび（図2）、この研修は国内外から高い評価を受けている。

2. 研修の経緯

2.1 創 設

1960年7月に東京で開催される第2回世界地震工学会議に際して、地震学・地震工学を学ぶ途上国の若手研究者に対する地震工学研修の必要性が議論・認識された。これを受けて、本会議参加も含めて、第1回の国際地震工学研修が1960年7月1日から翌年3月24日まで、「地震学コース」（参加者5名）と「地震工学コース」（同7名）に分けて東京大学で実施された。この研修成果は国際的な反響を呼び、政府は1962年1月に建設省建築研究所（当時）の中に国際地震工学部（現在の国際地震工学センター：International Institute of Seismology and Earthquake Engineering, IISEE）を設置し、この研修を継続的に実施することにした。翌年の第2回研修（1961～1962年）は、前半は早稲田大学で実施されたが、その後半から本研修専用の建物も整備したIISEEが引き継いだ。

2.2 ユネスコとの協力

本研修は開始直後からユネスコ（国際連合教育科学文化機関）と協力して実施しており、現在でもその協力関係は続いている。

モロッコ（1960年、M5.7、死者13,100名）やチリ（1960年、M9.5、死者5,700名）などで被害地震が頻発した1960年頃、国連（国際連合）は震災防護のための国際的な協力を各国に求めた。これを受けて、ユネスコは日本独自の研修事業である「国際地震工学研修」を日本政府とユネスコとの共同事業として継続実施することを決め、国際地震工学研修所を設立した。それにより、本研修は1963年9月から1972年8月までの9年間は、両者の共同事業として実施され、研修にか

かる費用を分担した。その後、1972～1973年コースからは日本政府の単独事業になったが、1985～1986年コースから10年間ユネスコは専門家を講師として派遣し続けた。この講師派遣は「津波防災コース」開始に伴い、2006～2007年コースに再開し、2012～2013年コースまで続いた。さらに、2007年からは、研修修了生のネットワークを活用する建築・住宅分野における地震防災研究・研修に関する共同プロジェクトを実施している。

2.3 JICA との協力

第1回研修（1960～1961年）から、海外技術

協力事業団（OTCA）が研修生に奨学金を提供した。1974年のJICA（当時の国際協力事業団、現国際協力機構）発足以降は、JICAが費用の一部を負担し、JICA研修の一環として実施している。研修生の渡航費・生活費・教材費等はJICAが負担し、IISEEの筑波移転以降、研修生はJICAの筑波センターに宿泊している。一方、建築研究所は研修講師旅費・謝金等を負担している。

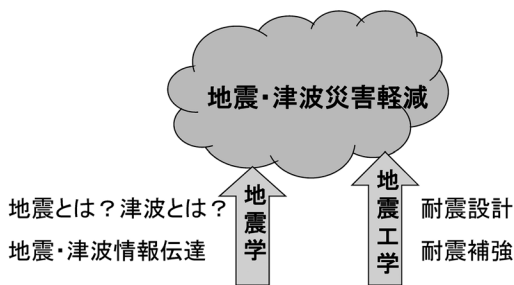


図1 地震・津波災害軽減へのアプローチ



写真1 研修風景

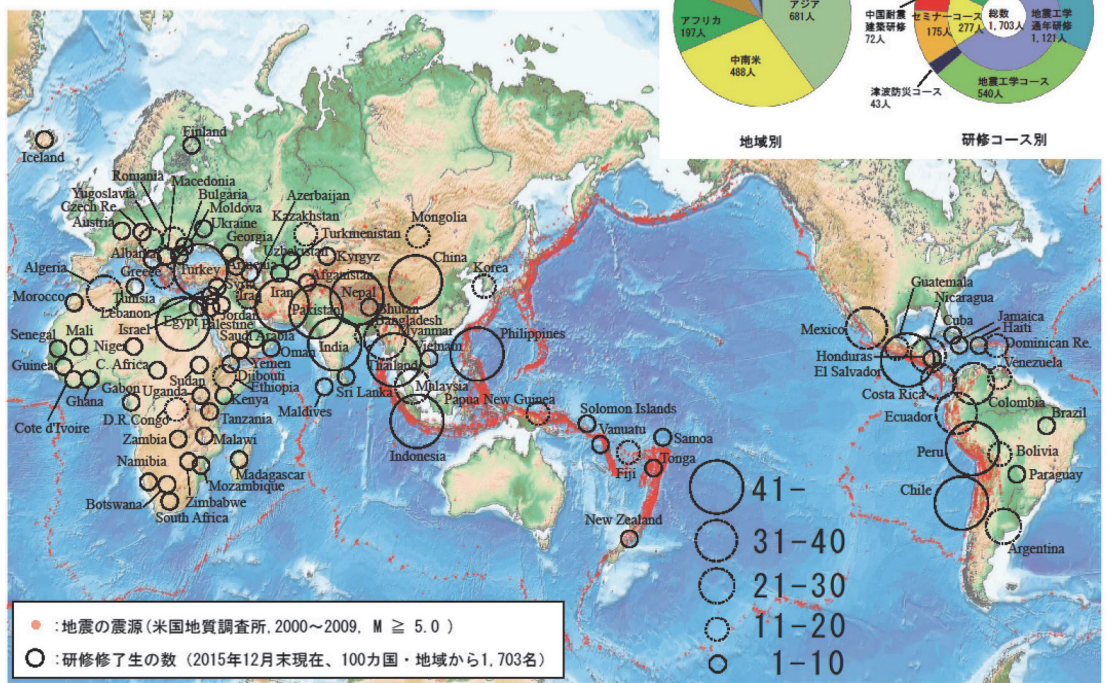


図2 研修修了生の数と出身国

2.4 修士号学位の授与

次項で詳しく説明する「地震工学通年研修」の内容は大学の修士課程相当であったが、建築研究所は大学ではないので、修士号を出すことができなかった。インドネシアとパキスタンのように、国によっては本研修を修士号相当と認定し、昇進等にかかれていたが、多くではなかった。また、日本国内の大学は本研修を高く評価しており、本研修修了生を修士修了者相当と認定し、博士後期課程への入学を認める大学もある。しかし、研修生からは名実ともに修士号がほしいという要望がつねに寄せられていた。それゆえ、研修生への修士の学位授与は長年の課題であった。

2005年10月開講の「地震工学通年研修」から、政策研究大学院大学（政研大）との連携により、研修講義の一部が政研大の講義として認められるようになった。研修生は政研大の修士課程に入学し、所定の単位を取得すれば、政研大と建築研究所が認定する修士号（修士：防災政策）を取得することが可能になり、2006年9月に修了した研修生の全員19名が初めての修士号を取得した（写真2）。これにより、研修生が帰国後、母国で地震学・地震工学の専門家として活躍するための基盤を従来以上に確保・充実させることができた。さらに、2006年に新設した「津波防災コース」も修士課程コースとして実施している。

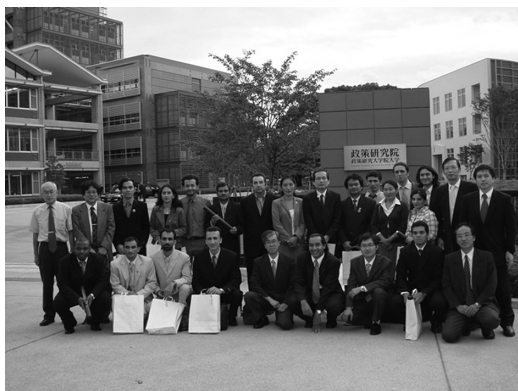


写真2 初めての修士号学位記を授与された研修生19名と関係者（東京）

3. 各研修コースの紹介

現在、「地震工学通年研修」と「グローバル地震観測研修」、「中南米地震工学研修」、「個別研修」の4研修を行っている。以下、概要を紹介する。

3.1 地震工学通年研修

1960年から開催されている研修で、「地震学コース」と「地震工学コース」、「津波防災コース」の3コースがあり、「レギュラーコース」と総称する。ほぼ1年間の研修は、前半約8カ月間の集団指導を主とする期間と後半約4カ月間の個別指導期間に大別される。集団指導期間にはそれぞれの学問分野を基礎から最先端分野まで学び、個別指導期間には各自テーマを定めて、指導者の下で修士論文をまとめる。2015年末現在の修了生は82カ国から1,121名である。

3.1.1 地震学コース

「地震学コース」では、開発途上国の地震観測・地震防災担当機関・大学から招かれた研究者・技術者等が、地震現象や地震災害に関する総合的で高度な知識と技術を学び、母国において中核人材として地震観測業務、地震ハザード・リスク評価、地震防災政策等に携わりうる能力を習得することを目的としている。

開発途上国では、地震学を系統的に学べる学部や学科がない国が多く、そうでない国でも応用物理等他の専門知識を学んだ後に地震観測・地震防災担当機関配属になる職員も少なくない。この研修コースに参加する研修生の何割かは地震に関わるのは初めて、他のある程度関わりのあった方でも、いくつかの例外的な国を除いて、系統だった学習は初めてという状態である。

研修受講者と研修内容も時代とともに変化する。1960年代には、核実験探知のために全世界に設置された世界標準地震計を維持する技術者が受講していた。一方、1990年代以降は、テレメータ化されたデジタル地震観測網が整備され始め、そこでえられた地震記録を解析する研究者・技術者が増えてきた。また実習や見学、国際会議への参加も積極的に実施している（写真3）。

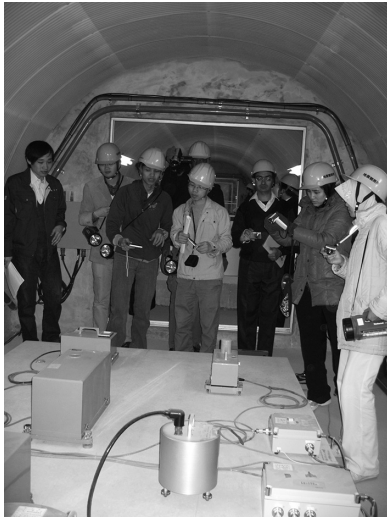


写真 3 気象庁松代精密地震観測室（長野市）の見学

一方、国や組織、研修生個人により事情が大きく異なるので、個別指導（個人研修）においては、研修生は自分で問題を抽出し、指導者の助言に従って、それを自力で最終レポート（修士論文）にまとめる。2014～2015年地震学コース研修生7名の論文のテーマと出身国は以下である。

- ・稠密余震観測データを用いた2010年 Beni Illmene 地震の震源再決定（アルジェリア）
- ・Emeelt 群発地震およびウランバートル市周辺の地震の震源メカニズム決定（モンゴル）
- ・高密度広帯域地震観測記録に基づく Hangay 地域の震源・伝播経路・サイト増幅の推定（モンゴル）
- ・レシーバ関数解析によるウランバートル市周辺の地殻構造推定（モンゴル）
- ・地震データセンターの震源決定精度向上（ミャンマー）
- ・経験的グリーン関数法による2007年 Pisco 地震の強震動発生域特定（ペルー）
- ・ローカルマグニチュード決定（フィリピン）

このように、各国にとって基礎的な課題から最新の研究テーマまで多岐にわたっている。なお、論文のアブストラクトは IISEE のウェブサイト (<http://iisee.kenken.go.jp/>) において、他コース分とともに公開されている。



写真 4 免震化耐震改修工事現場（つくば市）の視察

3.1.2 地震工学コース

「地震工学コース」は、地震工学・耐震工学にかかわる大学・研究機関の研究者、構造物の実設計・施工にかかる民間技術者、構造物耐震化規定の施行や地震防災政策にかかる行政担当者等に対し、耐震工学や地震防災に関する高度な知識や新しい技術に関する情報を提供し、母国において中核人材として構造物の耐震化を推進し、地震による構造物被害およびそれに起因する人的被害を減らすための能力を習得してもらうことを目的としている。

また、技術進歩にあわせて新しい講義科目を教えている。たとえば、免震・制震関係の講義は1986年から開始し、1992年からは耐震診断の講義が始まった。さらに、講義と並行して実体験がえられる実習・見学を実施している（写真4）。

2014～2015年地震工学コース研修生10名の論文のテーマと出身国は以下である。

- ・強震を受ける鉄筋コンクリート造超高層建物の応答解析と耐震性能評価（バングラデシュ）
- ・枠組ブロック組積壁の効果に着目した既存鉄筋コンクリート造の耐震性能に関する研究（バングラデシュ）
- ・鉄筋コンクリート造建物および組積造建物の地震後診断手法の提案（エルサルバドル）
- ・代表的橋梁の耐震性能評価と耐震性向上（エルサルバドル）
- ・建物の地震後応急診断システム（ネパール）
- ・建築基準運用の有効性（ネパール）
- ・補強コンクリートブロック壁構造の性能（ニカ

ラグア)

- ・ノンエンジニアリング組積造住宅の被害曲線(ペルー)
- ・既存鉄筋コンクリート造建物への耐震診断のための靱性と耐震指標に関する研究(フィリピン)
- ・プレストレストコンクリート梁の地震時挙動を再現するための解析ツールの開発(タイ)

なお、ネパールからの研修生2名は、研修期間中にネパールで大地震が発生したため、この地震をテーマに修士論文を執筆した。

3.1.3 津波防災コース

2004年12月のインド洋大津波惨事を受けて、2006年秋に「津波防災コース」を新設した。津波災害を軽減するためには、地震および津波に関する最新の知見に基づいた防災対策が必要である。開発途上国は先進国から地震・津波に関する技術を取り入れる努力をしたにもかかわらず、各国の津波防災への対応状況に変化は見られない。開発途上国の津波災害を軽減するためには、各国地域の実情や制度に即した地震・津波対策技術を応用し発展させることが重要である。この目的を達成するためには、津波防災に関連した津波ハザード評価や津波早期警報システム等に係わる解析技術とそれらの技術を利用・普及させるための管理能力を組み合わせることにより、津波被害軽減対策の立案と指導、発展に貢献できる高度な能力を持った人材の育成が必要不可欠である。

研修生は気象庁で日本の津波早期警報システムを学ぶとともに、東海地域や和歌山県広川町、東北三陸地方でさまざまな津波対策や地方における津波防災行政を実地で学んでいる(写真5)。

2014~2015年津波防災コース研修生6名の論文のテーマと出身国は以下である。

- ・津波浸水モデリングとハザードマッピング(エクアドル)
- ・フラジリティ関数を用いた津波被害評価(エクアドル)
- ・1797年と1833年メンタワイ地震の津波モデリング(インドネシア)
- ・西ジャワにおける津波ハザード評価のための津波浸水予測(インドネシア)



写真5 東北三陸地方での津波対策施設見学(2008年、岩手県宮古市田老地区大堤防。その後2011年東北地方太平洋沖地震で破壊された。)

- ・1992年ニカラグア地震に対する津波シミュレーション(ニカラグア)
- ・中部ルソン西岸における津波ハザード評価(フィリピン)

3.2 グローバル地震観測研修

あらゆる空間において「核兵器の実験的爆発又は他の核爆発」を禁止する国際条約「包括的核実験禁止条約」発効に向けた取り組みが、現在、国内外で進められている。これと並行して、核兵器の実験的爆発または他の核爆発が実施されたか否かを監視する制度の整備が進められている。地震学的手法を用いた監視技術はその重要な柱の一つである。

国際地震工学センターは外務省から依頼を受け、1995年から「グローバル地震観測研修」を気象庁およびJICAと協力して毎年実施している。研修の目的は、全地球的(グローバル)な地震観測・解析分野における技術および知識を習得させることと、習得した技術と知識を核実験探知観測網において活用することができる人材を育成することである。研修期間は約2カ月である。2015年末現在で、70カ国から197人の研修生が参加している。

3.3 中南米地震工学研修

2014年に開始した、中南米諸国の共通言語であるスペイン語を指導言語として使う耐震工学分野の研修である。構造実験を在外補完研修として約2週間エルサルバドルで行うことにより、現地での耐震建築普及の促進をめざしている。2015年

末までに2回実施し、6カ国から30人の研修生が参加している。

3.4 個別研修

高い学力と能力を持つ研修生を対象に、各国のニーズに応じた特定分野において個別に行う研修を1968年以来随時実施している。

4. 研修生の帰国後の活躍

研修修了生は各国の行政機関、国立研究所、大学などから派遣されており、帰国後は各国の地震防災のために貢献している。また、大臣、研究所長、大学学長になって地震学・地震工学分野の指導者として活躍している人もいる。何人か例を紹介する。

インドのHarsh Gupta氏(1966~1967年地震学コース)はインド海洋開発部政府長官、インド国立地球物理研究所所長を歴任し、アジア地震学会初代会長になった(写真6)。

エジプトの国立天文地球物理研究所からは多数



写真6 上) 研修参加時のHarsh Gupta氏(最前列左から2人目)。下) 2008年アジア地震学会の折に開催したISEE同窓会におけるGupta氏(右)。

来日している。Rashad Kebeasy氏(1965~1966年地震学コース)は元所長で包括的核実験禁止条約機関(CTBTO)暫定技術事務局国際データセンター長も勤めた。Salah Mohamed氏(1982~1983年地震学コース)も前所長である。

ペルーは最も多くの研修生が来ている国の一つである。Julio Kuroiwa氏(1961~1962年地震工学コース)はペルー地震工学界の重鎮である。また、Robert Morales氏(1970~1971年地震工学コース)はペルー工科大学学長であった。

5. おわりに

学問と技術がいくら発展しても、また耐震基準が整備されても地震・津波災害はなくなる。1995年の兵庫県南部地震と2011年の東北地方太平洋沖地震で日本人も再認識したように、先進国の日本でさえ震災は繰り返す。しかし、震災の程度は、大正以前から昭和、平成と時代を追って軽減されてきている。それは経済発展とともに、震災のたびに地震から学び、耐震基準を強化し、それを的確に守ってきたからである。

開発途上国は、経済力の低さから建物は地震に対して非常に脆弱である。また、たとえ耐震基準があったとしても、それを忠実に守って建物を建築しないこともある。しかし、地震に関する知識と技術を伝えれば、いつか災害は軽減されるはずである。それが国際地震工学研修である。さらに、研修生が帰国後、精一杯、発言力を持って働ける環境整備もIISEEの重要な役割の一つである。その一例が、「地震工学通年研修」の修士プログラム化であった。

古川信雄

[ふるかわ のぶお]

現職 (研)建築研究所国際地震工学センター シニアフェロー

略歴 京都大学大学院理学研究科博士後期課程修了、(独)建築研究所国際地震工学センター センター長、理学博士

研究分野 地震学



臨海コンビナートの液状化・流動化対策

濱田政則

1. はじめに

地盤の液状化現象が、はじめて工学的観点より認識されたのは1964年新潟地震である¹⁾。地震の揺れによって砂質地盤の強度と剛性が著しく低下し、液体のような挙動をすること、および、i) 地盤支持力の減少による構築物の沈下・傾斜、ii) 液状化土の浮力による地中構築物の浮上、iii) 土圧の増大による護岸の傾斜・倒壊、iv) 盛土など土構造物の崩壊やすべり、などの液状化による被害が発生することが新潟地震によって知られるようになった。新潟地震以前の多くの既往地震でも、噴砂・噴水・地割れの記録は数多く残されており、液状化がしばしば発生していたことがうかがえる。

しかし、新潟地震による液状化被害の調査には一つの重大な見落としがあった。それは液状化した地盤が水平方向に数mのオーダーで移動する、いわゆる側方流動と、これに起因した構築物の被害である。側方流動による地盤変位が定量的に測定され、構築物に及ぼす被害が注目されたのは、新潟地震より19年後の1983年日本海中部地震である^{2,3)}。

この側方流動現象が液状化とともに、臨海部コンビナートの安全性を脅かしている。本文では、はじめに側方流動研究の経緯を紹介し、次に液状化と側方流動に対する臨海部コンビナートのリスクと、現在進められている国による強靱化の現状と課題を述べる。

2. 側方流動研究のはじまりと経緯

液状化地盤の側方流動に関する研究の契機となったのが、図1に示すガス管の被害である。能

代市ガス水道局の報告によれば、日本海中部地震でガス漏れが発生した地点を掘削したところ、ガス管の45°の曲がり部が破断し、2つの破断面が70cmも離れていたということである⁴⁾。筆者は当時この地震によるライフラインの埋設管路の被害原因の調査を行っていたが、能代市の職員から、「どうしてこのような被害が発生するのか」という質問を逆に受けて、明確に答えられなかったことを記憶している。地震動による動的な地盤変位の大きさは数cmから大きくても10数cmと考えていたので、破断面の70cmの離れの原因がよく分からなかったのである。

その後、地震予知総合研究振興会に組織された研究委員会による調査の一環として、液状化によるガス管の被害の実体と被害原因の調査が本格的に行われることになった。液状化による噴砂・噴水・地割れ・道路の曲がり・地盤の陥没などが住民の協力も得て調査された。これらの調査の結果、液状化した地盤全体が、広範囲にわたって数mのオーダーで水平変位したのではないかということが推測された。

地盤の水平変位を定量的に明らかにするため、三角測量や平板測量を行い、この結果を地震前の市街地図と比較して地盤の水平移動を求めようと試みた。いずれの測量も精度が十分でなく、数mに及ぶ地盤変位を説明しうる結果は得られなかった。ところが、ある測量会社の技術者より航空写真測量であれば測量が可能かもしれないというアドバイスをもらった。地震の発生前後の一組の航空写真を用いて、それぞれ航空写真測量を行い、その差をとることによって、地震によって発生した永久変位（当時は地震による振動変位と区別する意味でこのような呼び方をしていた）を求めようとするものである。

早速、地震の2年前に能代市を撮影した航空写

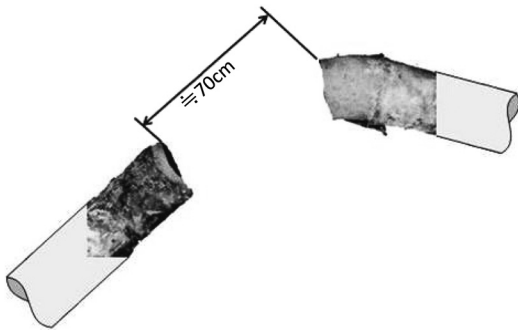


図 1 側方流動研究の契機となったガス管の被害
(1883年日本海中部地震, 能代市)

真と地震直後に撮影された航空写真を用いて地表の変位を測定した結果、緩やかな砂丘斜面の住宅地で最大5mもの水平変位が発生していることが分かった。前述のガス管の破断点付近の地盤変位も詳細に測量され、地盤変位によってガス管の破断と破断面の70cmの離れが説明されることが示された。

新潟地震発生2年前に撮影された航空写真と地震直後の航空写真による同様な測量の結果、信濃川と阿賀野川の河口沿岸の広い領域で、地盤の側方流動が発生していることが判明した。なかでも信濃川沿岸の川岸町では護岸が完全に崩壊したことにより、護岸背後の地盤が10m以上も信濃川に向かって水平移動していることが示された⁵⁾。

「はじめに」で述べたように、新潟地震では4種類の液状化による被害が目され、地震後これらの液状化被害に対する対策の調査・研究が行われてきていたが、側方流動については現象そのものへの認識がなかったことから、研究課題として取り上げられることはなかった。

しかしながら、新潟地震後の市民座談会の記録や小中学校の作文集のなかには、「自宅の敷地が信濃川の方へ移動し、敷地面積が増えた」、「地震前真っ直ぐであった道路が曲がり、見通しが悪くなった」という証言が数多く残されている⁶⁾。これらの住民による証言を専門家が見過したことで、側方流動に関する研究の開始が約20年後の1983年日本海中部地震まで遅れることになった。

筆者の研究グループが、能代市や新潟市の測量

結果を学会で報告したときも、地盤工学分野の研究者の多くは半信半疑であった。地盤が水平方向に数mのオーダーで動くはずがないという先入観念があり、「測定の誤りでないか」という指摘もでるほどだった。その後、徐々に側方流動現象に対する理解も広がり、側方流動の発生メカニズムと変位量の予測方法、対策工法に関する研究がはじめられた。また、地震予知総合研究振興会が日本側の主催者となって、この課題に関する日米共同研究が実施され、国際シンポジウムも何回かにわたって開催された。日米共同研究の目標は、地盤変位の予測手法や効果的な側方流動対策工法の開発にあったが、これらの目標が十分に達せられないうちに1995年兵庫県南部地震が発生した。阪神地区の埋立地で7mを超える地盤変位が発生し、臨海部の構造物やライフライン施設に甚大な被害を発生させた。図2は神戸市の埋立地のタンクヤードの地盤の水平変位と鉛直変位を示している。護岸が3mから4m移動し、その背後の埋立地が約400m四方にわたって海方向に変位している。これらの地盤変位によってLPG配管が損傷し、大量のLPGが流出した。付近の住民を一昼夜避難させる事態となったが、幸いにも爆発には至らなかった。

2011年東北地方太平洋沖地震によっても、東京湾沿岸の住宅地および産業施設敷地で液状化が発生し、多くの被害が発生したことは記憶に新しい。一部地域において護岸の移動が発生したが、数mに及ぶ地盤変位は報告されていない。東北地方太平洋沖地震では地震動の継続時間が長かったものの、地震動加速度そのものは東京湾の沿岸部で100~150cm/s²で、地盤の液状化の度合も兵庫県南部地震に比較して小さかったことが大規模な側方流動が発生しなかった要因と考えられる。東北地方太平洋沖地震により、東北地方の沿岸部で津波襲来前に液状化が発生していたとの報告もあるが、側方流動の発生の有無は津波による影響によって明らかでない。

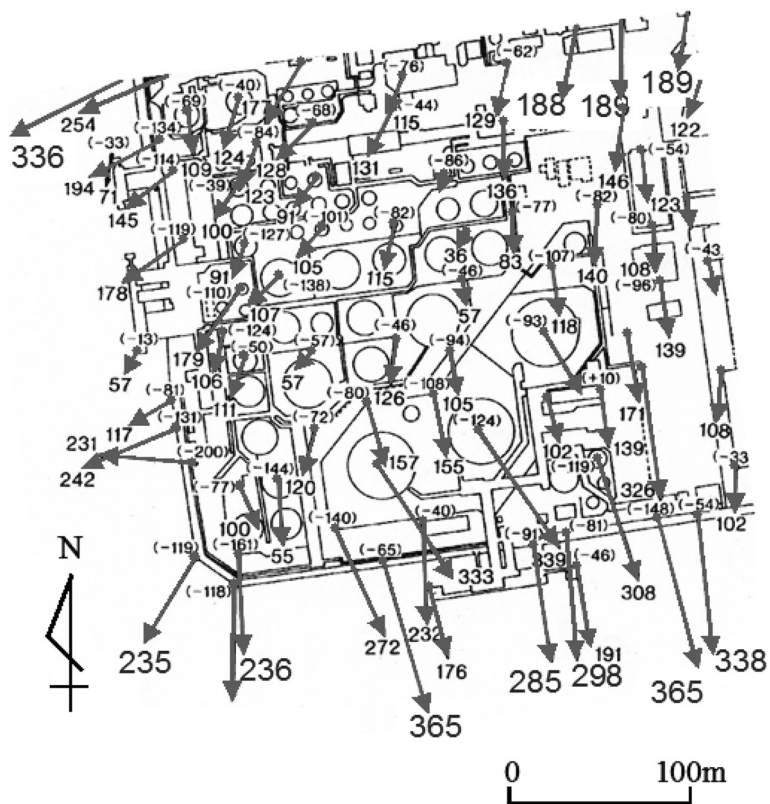


図 2 タンクヤードの側方流動による地盤変位
 (() 内は鉛直変位, 変位はいずれも cm, 1995 年兵庫県南部地震, 神戸市)

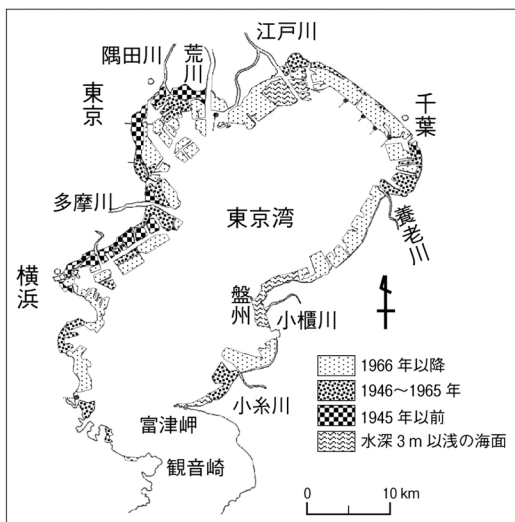


図 3 東京湾の埋立の歴史
 (貝塚爽平 編⁷⁾, 「東京湾の地形・地質と水」, 築地書館, に加筆, 1993 年)

3. 臨海部埋立地の液状化・側方流動リスク

臨海部埋立地に建設されているコンビナート施設の地震・津波リスクの要因として, i) 液状化と側方流動による危険物施設, 高圧ガス施設の被害, ii) 長周期地震動によるタンク内容物の溢出と火災, iii) 津波の波力と浮力によるタンクの浮上流出および海上火災, などが考えられる。

図 3 は東京湾の埋立の歴史を示している⁷⁾。東京湾の埋立は江戸年間より始められたとされているが, その多くは戦後の復興期から現在にかけて造成されている。液状化の危険性が最も危惧されるのは, 1964 年(昭和 39 年)以前に造成された埋立地である。前述したように液状化現象とそれによる被害がはじめて工学的な観点より認識されたのは 1964 年の新潟地震である。新潟地震後,

数年経って、ようやく埋立地と護岸および重要構造物の液状化対策が行われるようになった。このような経緯から、昭和30年代までに造成された埋立地とそこに建設されてきた構造物やコンビナート施設の多くは液状化対策がされていない。さらに、液状化地盤の側方流動が認識されたのは1983年の日本海中部地震である。側方流動の影響を考慮しないで設計・施工された護岸や構造物が数多く存在し、現在でも補強されないまま残されている。

大都市圏臨海部の埋立地盤に、数多くの重油・原油等の危険物施設、LNG、LPG等の高圧ガス施設さらには劇物タンク等が建設されている。東京湾臨海部の埋立地にあるこれらのタンクの総数は5,000基以上になると言われている。これらのタンクや危険物、高圧ガスの製造施設および輸送用の配管などの液状化および側方流動対策を急がなければならない。

4. 臨海部コンビナートの強靱化

2013年12月に成立した国土強靱化基本法には強靱化の基本方針として、i) 人命の保護が最大限に図られること、ii) 国家および社会の重要な機能が致命的な障害を受けないこと、iii) 国民の財産および公共施設の被害を最小化すること、iv) 迅速な復旧・復興を図ること、の4点が掲げられている。臨海部コンビナートの強靱化は、まさに強靱化基本法の2番目の基本方針に直接的に関わる問題である。地震による臨海部コンビナート施設の被災はわが国の経済活動や国民生活にも重大な影響を与える。

わが国の経済力に臨海部施設の地震被害が影響を及ぼした事例として、1995年兵庫県南部地震による神戸港の被災があげられる。神戸港の荷役施設(クレーン)61基のすべてが、地震動、液状化および側方流動によって破壊された。護岸と荷役施設などの被害が原因となって、地震前世界5位であった神戸港のコンテナ取扱量は地震後23位に、さらに地震後の復旧事業、整備事業に10年以上を要したこともあって、2011年時点で49

位にまで落ち込んだ。神戸港での荷役は釜山や香港などアジアの主要港湾に移っている。

国土交通省が2009年に組織した「臨海部の地震被災影響検討委員会」は、地震動や液状化・側方流動および長周期地震動によって重油が東京湾に流出した場合の海上拡散のシミュレーション結果を公表している⁸⁾。重油12,000klが京浜臨海地区から海上に流出し、風速5m/sの風により海上に拡散する場合を想定している。これによれば、図4に示したように、夏季は南西の風によって3日間で対岸の京葉地区にまで拡散するとしている。また冬季の場合は北西の風によって横須賀市沖にまで到達するとしている。図中の細線は船舶の航跡を示している。東京湾では平均的に1日約200隻の中型・大型船舶が航行しているが、図示したように航路に重油が拡散すれば、すべて船舶の航行を止めざるを得なくなるというのが委員会の報告である。

全国に12隻の油回収船があるとされているが、これを東京湾に集結して油の回収を行っても、作業が終わるまでに約2カ月を要するだろうというのも委員会の見解である。

このような状況になれば、わが国の経済、社会に与える影響はきわめて深刻となる。東京湾の臨海部には石油、化学、鉄鋼、ガス、電力、自動車などわが国の主要産業施設が建設されている。そのうち多くの産業は原材料や燃料を海外から輸入している。東京湾の海上交通機能が失われれば、原材料と燃料の供給停止により操業が不能になる。特に深刻なのは東京湾臨海部の火力発電所である。燃料であるLNG、重油、石炭等の供給が止まれば発電能力が大幅に低下し、首都圏の電力供給は危機的状況に陥ると予想される。また原油の輸入が長期間にわたって止まれば、石油製品の供給が停止し、他産業に大きな影響を与える。さらにガソリン等の不足と電力の供給停止による国民生活への影響は深刻である。

以上述べたような事態は、東京湾のみならず伊勢湾、大阪湾、瀬戸内海および大分県臨海部などにおいても共通して予測されることである。

経済産業省は、2013年度(平成25年度)に「産

業・エネルギー基盤強靱性確保調査事業」を実施した。この事業では、南海トラフ沿いの巨大海溝型地震および首都圏直下地震の影響を受けると考えられる地域のコンビナート25カ所が選定され、強靱性確保のための調査が行われた。石油精製工業、石油・化学工業、鉄鋼業が主な対象である。調査費用を全額国庫負担として事業が行われた。図5に示す東京湾、伊勢湾、大阪湾、瀬戸内海、九州北部地区および沖縄地区が対象である。調査項目は、i) 液状化・側方流動の推定のための地盤調査、ii) 事業所全域にわたる液状化度合の判定、iii) 地震動と液状化に対する護岸の安定性の検討、iv) 護岸近傍地盤の側方流動変位の推定、およびv) コンビナート施設の被害推定、である。

経済産業省資源エネルギー庁は平成25年度の調査事業の結果に基づき、平成26年度より「石油供給インフラ強化事業」を開始している。この事業では、護岸、栈橋、配管系およびタンク基礎等の耐震補強工事が行われており、総工事費に対して2/3の国庫補助がなされている。本事業は今後6~7年間継続される予定であり、経済産業省は、この間毎年150億円程度の補助金を用意する考えだが、補強を必要とする施設と構造物が膨大な数になることから、けっして十分な資金とは言えない。

5. 臨海部強靱化の課題

以上述べたように、臨海部の石油精製事業所をはじめとして国土強靱化事業が進められているが、国土強靱化をより効果的に推進するためには以下の課題を解決することが必要である。

1. 民有施設への公的資金の投入と国・自治体のリーダーシップの強化

国や自治体が保有する護岸などは、これまでもすでに公的資金が投入されて、強靱化事業が進められている。しかしながら民有であるコンビナート施設の強靱化は、前述した経済産業省資源エネルギー庁の例はあるものの十分には進められていない。民有護岸の補強を含めて強靱化を進めなければ航路の安全性は確保されない。図6に示す京

浜運河は東京湾の重要航路の一つで、災害発生時に海上輸送のための重要な航路としての役割を果たす。しかしながらこの航路には国・県・市が管理する公有護岸と石油事業者等が所有する民有護岸が混在する。地震時に公有護岸が無被害であっても民有護岸が被害を受けて、原油等の危険物が海上に流出すれば航路は使用不能となる。公有護岸と併せて民有護岸の被害を防ぐことが重要となる。このために、民有護岸の強靱化に公的資金を投入することが必要である。前述したように、経済産業省は石油会社等の護岸の補強を補助する制度を整備し、強靱化を進めている。また国土交通省も民有護岸の立ち入り検査と、検査の結果、強靱化が必要と認められれば国として支援する制度を整備している。しかしながらこの制度が十分に活用されている状況にはない。

東北地方太平洋沖地震における東京湾での隣接コンビナート事業所への火災の延焼でも明らかのように、臨海部コンビナート地区の強靱化は一つの事業所のみが進めてもその効果は小さい。一事業所の被災が隣接する事業所に次々と波及し、埋立地全体に広がる。さらには湾全体に拡大することになる。臨海部コンビナートの強靱化対策は地域全体として推進することが必要である。このためには、国、自治体のリーダーシップの強化と地域住民も含めた情報の共有化が不可欠であるが、現状はそのための社会的枠組の構築がなされていない。

2. コンビナートを含めた周辺地域の防災対策

コンビナートが立地する地域の住宅地・商業地域を含めた防災対策を推進するためにはコンビナート事業者の積極的参画が欠かせない。東北地方太平洋沖地震では、東京湾のLPGタンクが爆発し、その爆発の破片が数km離れた住宅地にまで飛散した。臨海部のコンビナート近隣の住宅・商業地域の防災計画立案のためには、コンビナートが抱える地震・津波リスクの評価と公開が必要であり、これらの情報を地域と共有することが求められている。しかし、多くの場合、情報の公開は企業側に不利益をもたらすことがあるとの判断から進んでいない。このため、コンビナートが立

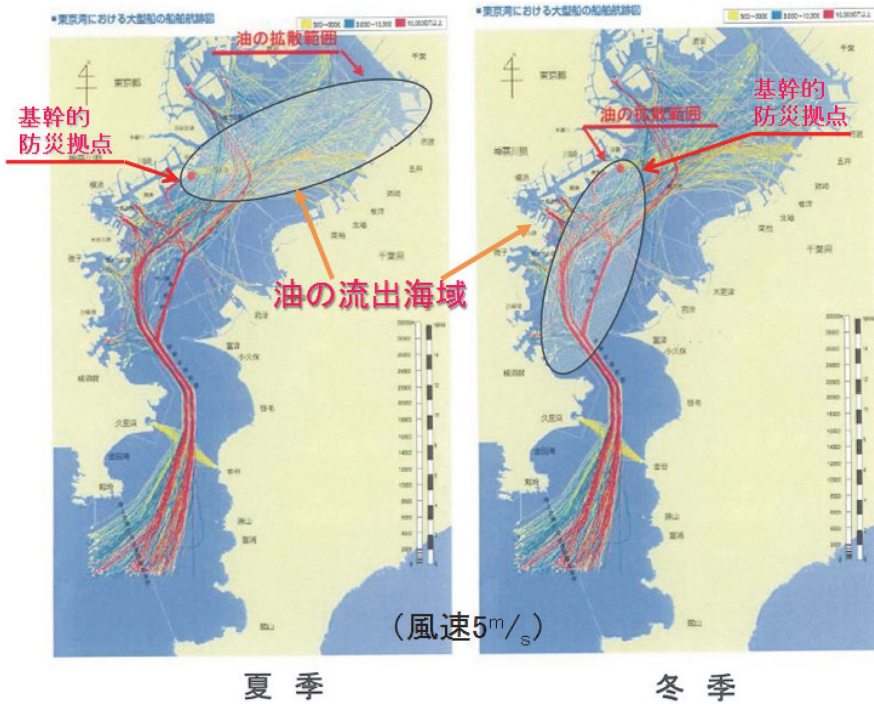
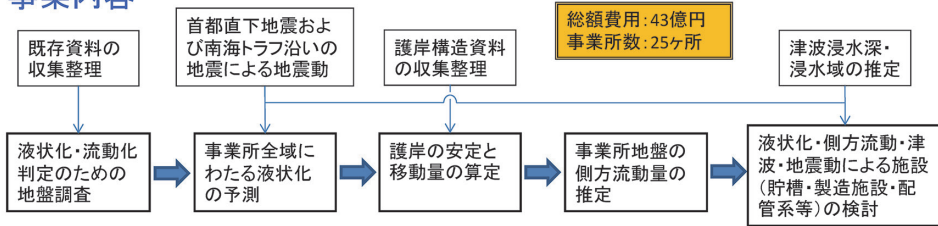


図4 東京湾への原油の溢出と拡散⁸⁾
 (国土交通省臨海部の地震被災影響検討委員会, 2009)

事業内容



実施地域

南海トラフ沿いの4地域および九州地区、沖縄地区

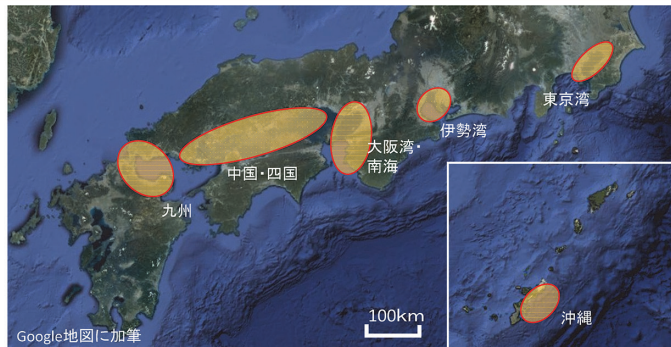


図5 産業・エネルギー基盤強靱性確保調査事業
 (2013年度, 経済産業省)



図 6 東京湾京浜コンビナート京浜運河と開述の状況 (Google Earth)

地する地域の自治体もリスクに関する十分な情報なしに地域防災計画を作成することになる。危険物施設や高圧ガス施設を保有する産業が地域住民の多くと対立関係になっている場合もある。しかしながら、コンビナートの従業員が発災時に地域住民の避難行動を助けるとともに、コンビナートに貯蔵されている資機材を救急活動、応急復旧活動に活用することも考えられる。一部の事業所では積極的に地域との連携のために協定を結び、地域の防災活動に参画している例も見られる。

産・官・地域住民の連携を進めるためにはそのための社会的枠組を創ることが必要である。早稲田大学東京安全研究所ではコンビナート地域の防災対策を推進する調査・研究の一環として、産・官・学・地域住民による「臨海部の地震・津波防災性向上に関する懇談会」を組織して活動を行ってきた。この懇談会には経済産業省や国土交通省、東京湾に面する東京都、神奈川県、千葉県、石油等の事業者、建設業、コンサルタンツ、大学等の研究機関に加え、地域住民が参加し、お互いに立場を離れ自由な立場に立って、臨海部コンビナートの防災性向上に向けての話し合いを行っている。批難し合うばかりでなく、互いの立場を理解し、信頼感を高めることにより、連携を図ることが目標である。現在までに15回を超える会合

を開いている。参加は自由で職業・身分は関係なしに参加者を募っている⁹⁾。

6. あとがき

液状化地盤の側方流動の研究は公益財団法人地震予知総合研究振興会が組織した研究委員会（委員長：故 久保慶三郎東京大学名誉教授）によって行われた。大学の研究者のみならず、建設業・コンサルタンツ、測量会社より多くの技術者が参画した。これら参加者の努力によって数mに達する液状化地盤の変位と被害が調査された。さらにコーネル大学のトーマス・オルーク教授を中心とした米国研究グループとの共同研究が行われ、流動発生メカニズム、流動量の予測手法および流動を防止するための対策工法の開発が進められた。

早稲田大学東京安全研究所は、臨海部産業施設の強靱化促進を技術面より支援するため、「一般財団法人産業施設防災技術調査会」および「特定非営利活動法人国境なき技師団」の協力のもとに、「臨海部コンビナート施設の地震リスクマネジメントガイドライン」および「臨海部コンビナート施設の強靱化工法ガイドライン」を発行している⁹⁾。これらのガイドラインは経済産業省に

よる「石油供給インフラ強靱化事業」に活用されている。

側方流動の研究をはじめて30年以上が経過しているが、ようやくコンビナート施設の強靱化の実践にまで到達したという感がある。東京湾北部地震や南海トラフ沿いの巨大地震の発生が逼迫しているとされている現在、臨海部コンビナートの強靱化を図ることは、国民の生命と生活を護り、安全・安心社会を構築するためにきわめて重要かつ緊急を要する課題である。今後とも産・官・学と地域住民が情報を共有化し、連携してこの課題に取り組むことを期待している。

参考文献

- 1) 土木学会新潟地震調査委員会 編. 1966. 昭和39年新潟地震震害調査報告.
- 2) 濱田政則. 1988. 大地は動く. 地震ジャーナル, 6.
- 3) 濱田政則・安田 進・磯山龍二・恵本克利. 1986. 液状化による地盤の永久変位と地盤被害に関する研究. 土木学会論文集, 376 (III-6), 221-229.
- 4) 能代市. 1985. 昭和58年(1983年)5月28日日本海中部地震, 能代市の災害記録.
- 5) Hamada, M., Yasuda, S., Isoyama, R. and Emoto, K. 1986. Study on Liquefaction Induced Permanent Ground Displacement. Association for the Development of Earthquake Prediction (ADEP), Tokyo.
- 6) 新潟郷土史研究会. 1964. 新潟地震を語る住民座談会要旨, 郷土新潟 第5号新潟地震特集.
- 7) 貝塚爽平 編. 1993. 東京湾の地形・地質と水, 築地書館.
- 8) 臨海部の地震被災影響度検討委員会. 2009. 臨海部の被災影響度検討委員会報告書.
- 9) 一般財団法人 産業施設防災技術調査会のホームページ. <http://idmc.or.jp/>

濱田政則

[はまだ まさのり]

現職 早稲田大学名誉教授, アジア防災センターセンター長, 一般財団法人産業施設防災技術調査会代表理事

略歴 東京大学大学院工学研究科修士課程修了, 大成建設株式会社入社, 東海大学海洋学部教授, 日本学術会議会員等を経て現職

研究分野 地震防災工学, 地盤工学

著書 「地盤耐震工学」(丸善出版), 「液状化の脅威」(岩波書店), 「Engineering for Earthquake Disaster Mitigation」(Springer)



■ 書 評 ■

● 津波堆積物研究 格好の教科書

藤原 治 著

津波堆積物の科学

評者 後藤和久

2011年の東日本大震災後に津波堆積物研究は広く一般に知られるようになった。869年貞観津波堆積物等の研究から、巨大津波が仙台周辺の沿岸部に過去に繰り返し襲っていた可能性が指摘されていたからである。過去の津波の履歴や規模は、将来の災害に備えるための基礎情報である。歴史記録が存在しない時代に遡って津波の履歴や規模の評価ができる津波堆積物は、過去の津波の確かな物証である。“最大クラスの地震と津波”を想定するためにも、日本の沿岸各地で調査を実施する必要があり、その社会的要求も高い。

津波堆積物研究は歴史が浅く、現在も研究の途上段階にある。堆積学だけでなく地震学、津波工学等の多様な知識も必要とするため、全体像をつかみにくい。そのため、新たに研究に取り組もうと思ったときに、いくつもの障壁にあたる。まず津波堆積物を地層中から認定する作業が実に難しい。台風の高波や高潮、洪水などでも似た堆積物ができるからである。津波堆積物と認定できれば、津波の履歴や規模を議論できるようになる。しかし、どの程度の精度で津波発生年代を議論できるのか、数値計算をどのように活用して規模を議論するかなど、高度な専門知識が必要となる。私も十数年前に研究を始めた際に、どのように研究を行えばよいか理解するのに苦労した経験があり、参考書があればと感じたものである。そして、待望の教科書とも言える本書が出版された。著者は、約20年にわたり最先端で研究を行ってきた専門家である。

本書は全10章で構成されている。1章と2章では、津波堆積物の概説と研究史がまとめられている。3章では、津波の発生メカニズムや伝播特性、被害について解説されており、4章以降を理解するための基礎知識を得ることができる。4章から8章までは、津波による侵食・堆積過程や津波堆積物の堆積構造、調査地の選定方法、認定方法、古生物学的特徴、さまざまな地形条件化での

堆積過程等が多角的な視点から詳しく解説されている。特に、ベッドフォームに着目して3次元的な堆積構造が紹介されている点は興味深く、新たな切り口だと言える。9章と10章では、震災後の社会状況を踏まえ、過去の津波の規模をどのように復元するのか、津波堆積物研究をさらに進展させるためにどのような検討が必要なのか等について述べられている。

全体を通して、津波堆積物に関する膨大な知識がよく整理されており、これから研究に取り組もうとする学生や研究者の入門書として適している。また、行政等においても研究成果をどのように理解し政策に活用すればよいかを考える上で、本書は大いに参考になるであろう。社会的な重要性が高まる一方で、この分野の研究者は圧倒的に数が少ない。本書がきっかけとなって、より多くの研究が行われるようになり、将来の減災に役立つ成果が生まれることを切に願う。

<東京大学出版会、2015年11月、A5判、296頁、4,300円+税>

● 南海トラフ地震発生 の仕組みから防災まで

山岡耕春 著

南海トラフ地震

評者 吉田明夫

南海トラフ沿いのプレート境界地震は、1944年東南海地震、1946年南海地震以来70年経過し、過去の繰り返し履歴からみて次の巨大地震の発生もそう遠くない将来に迫っていると危惧される。また、2011年東北地方太平洋沖地震は、日本の周辺海域でもM9クラスの地震が発生しうることを衝撃的に知らしめ、これを受けて内閣府は、来るべく南海トラフ巨大地震に関して、あらゆる可能性を考慮した最大クラスの地震モデルに基づいた被害想定を発表している。こうしたときに、はじめにの中で著者が述べているように“南海トラフで発生する巨大地震について、その仕組みから防災までの全体像を網羅的に解説した本”の発行は時宜を得たものと言える。

本書では、フィリピン海プレートが沈み込む南海トラフ周辺の海底および沿岸の地形・地質の特徴から、そこで発生してきた巨大地震の履歴、それに基づいた次の地

震発生に関する長期予測、太平洋プレートが沈み込む日本海溝沿いの地震発生様式との違い、そして、内閣府の専門調査会が検討しまとめた、最大クラスの震源モデルによる死者数と建物被害、各地の津波の規模や被害の特徴、電気・ガス・水道・通信・交通等のインフラ災害の概要に加えて、政府や地方自治体が発表している東京、名古屋、大阪の三大都市圏での被害想定、さらに、内陸部での誘発地震のことや南海トラフ地震に連動して富士山噴火はあるかなどまで、確かに、多くの人が気に懸けていると思われる、南海トラフの巨大地震に関わるさまざまな問題が取り上げられている。近年の稠密な地震・地殻変動観測網によって明らかにされたプレート境界で起きているカップリングの様相やそれについてのシミュレーション結果、直前予知の可能性とそれに関わる問題点についても触れられている。

さて、本書を手にとってみようとするのは、著者も想定しているように、東日本大震災以後、注目が集まり、各種メディアでもしばしば目にするようになった南海トラフ地震について、日頃、いろいろと疑問を感じている“一般の方々”であろう。その他、各地で防災の仕事に携わっていられる方や、地震に関心を持つ学生、なかには研究者もいるかもしれない。しかし、恐らく後者の人々にとっては、本書は十分な内容になってはいないと思われる。実際、このような小冊子でそこまで求めるのは無理というものであろう。では、一般の方が、著者の言う「宿命の巨大地震」を迎え撃つ際に役立つ基本的な知識をこの本によって身に付けることはできるだろうか。たぶん、いざという時に人々が身を守るうえでもっとも役立つのは、自分がどのような災厄に襲われる可能性があるか、それを防ぐにはどう対処したらよいだろうかをあらかじめ知っておくことである。そのような観点であらためて本書を見ると、南海トラフ巨大地震についての全体像が網羅的に解説されているものの、さて、自分はどうすべきかについては、具体的なイメージを持ちにくい感じを受ける。それは、恐らく、本書の構成にもよるものと思われる。地震や津波による災害に関しては、第1章の「繰り返す南海トラフ地震」から、第2章の「最大クラス地震とは」、第3章の「津波、連動地震、誘発地震」、第4章の「被害予測と震災対策」までのすべての章にわたって散在して記述されており、それぞれの章は、いわば、読み切りのトピックス的な語り口になっている。それはそれで読者の興味をつなぐが、一方では、そのことが、自分に引き寄せて災害の実相を具体的に把握するのをいくらか妨げているように思われる。たとえば、前半を、過去の南海トラフ地震による災害の記録と、内閣府による最大クラス地震の被害想定およびそれから危惧される各地域における被害の内容とそれら

の特徴についてまとめ、後半で、その背景知識としての南海トラフ地震についての“地震学的な”説明を記述するようにすれば、いざという時に慌てなくてすむような基礎知識を提供したいという著者の意図がもっと生かされたのではなかろうか。

第4章では、著者が座長を務めた、内閣府の「南海トラフ沿いの大規模地震の予測可能性に関する調査部会」において、確度の高い予測は困難であるとの報告が行われたことについて触れ、その後で不確定さを伴う地震の発生予測が災害の軽減に有効か否かという検討が費用対効果の観点からなされている。このところの記述で、評者がやや違和感を持ったのは、地震の「予知」と「予測」の区別は、地震学等の専門家には重要な問題であるが、この二つの言葉を厳密に区別して使っている人はそういないと記述されている箇所である。著者は、この違いを明確に述べていないが、たぶん、「予知」は地域、時間およびマグニチュードを限定しての、地震が起きるか起きないかの決定論的予測を言い、地震が起きる可能性の大きさを確率として示すのが「予測」ということなのであろう。しかし、こうした、“専門家”が気にする「予知」と「予測」の言葉づかいの違いは、恐らく一般の人にとっては、さして興味が無いのではなかろうか。一般の人が多大な関心を寄せる“予知”は、自分のところで災害が生じるような地震が起きるかどうかということと、そうした“予知”あるいは“予測”が、たとえば降水予報に対して傘を用意するように、何らかの準備をすべきか否かを判断する際に有効な情報であることのように思われる。評者は、地震の専門家は、地震“予測”に関して、情報の受け取り側のこのような素朴な期待にもっと寄り添った見方を取り入れてもいいのではないかと考えている。その関連で言えば、例としてあげられている、日本列島とその周辺の地震活動がグーテンベルグ-リヒター則に従うとすれば、マグニチュード7以上の地震は1年に平均2つくらい起きることになるので、「明日から1カ月間に日本列島とその周辺でマグニチュード7以上の地震が起きる確率は6分の1である」という“確率予測”は、専門家は有意な予測というかもしれないが、これによって誰も何の準備もうながされないという意味で、一般の人にとっては、日本周辺域の地震活動度を知ることにはなっても、防災情報としては意味を持たない予測と言ってよいだろう。また、政府の地震調査研究推進本部が発表している、今後30年間での南海トラフ巨大地震の発生確率70%という予測も、今後1週間の巨大地震発生確率に引き戻したときには0.04%という小さな数値になって、こうした長期予測は、防災に責任を負う公的機関にとっては対策を講じるうえでそれなりに役立つとは思われるが、個人レベルではそれほど有効では

ないとみられる。

さて、南海トラフ巨大地震の予測が、現時点で多大な不確定さを伴うとして、起きるという情報をだしたときに、それが当たる的中率がどの程度であれば、その予測情報の発表が実用的に有意義とみなされるのだろうか、本書ではこれについて、想定東海地震を例にとって費用対効果の観点から検討がなされている。それによると、内閣府が2003年に行った、予測的中した場合の被害軽減額は6兆円という見積もりを使い、予測がだされた時の1日あたりの応急対応の費用を1,700億円として、警戒宣言の解除までに1週間かかるとすれば、予測をだしてはずれたときのコストは1回につき約1兆円なので、6回に1回当たれば、当たった時の利益とはずれた時のコストがトントンとなって、これからの中率が17%以上あれば利益がコストに勝ると推算している。しかし、5回続けてはずれた場合、的中率は約2割あるから次は当たると言われても、その予測は真剣に受け取られるであろうか。

評者は、南海トラフ沿いの巨大地震発生の短期的な予知は、今後どれほど地震学が進歩したとしても、きわめて困難だろうと考えている。ただし、地震発生の可能性が高まっていることを示す予兆あるいは前駆的現象は、過去の南海トラフ沿いの地震や東北地方太平洋沖地震の場合を見ても、あると考える。たとえば、地震活動の静穏化やb値の低下、地球潮汐応答の敏感化、地下水位変化、プレート間カップリングの弱化、さらには、長期的および短期的スロースリップの頻度の増加や低周波地震活動の活発化なども観測されるかもしれない。こうした現象が観測された時には、多くの研究者は、地震発生の確率が高まっていると判断するのではなかろうか。ただ、その場合でも、たとえば、今後1週間以内に巨大地震が発生するというような予測情報を出すことはできないと思われる。発生時期は1年後かもしれないし、2年後かもしれない、また、震源域の拡がりも確定的に言うことはむずかしい。しかし、今のところはまだ何も言えませんという以上の情報を発信して、こうした“観測成果”を災害の低減に結び付けることはできないのだろうか。評者は、そのためには、情報をだす側と受け取る側の間で、情報の中身についての意思の疎通が緊密になされていることが不可欠と考えている。想定東海地震の予知情報がだされた時に想定されているようなハードな対応は、实际的でない。情報が内々に含意する地震発生までのタイムスパンの幅に応じた準備の仕方を、国や自治体、企業、個人のさまざまなレベルでつくっていく必要がある。そのためには、いざ、地震が発生した時に驚天動地の事態が出現しないように、日常の生活そのもののあり方まで含めて、見直していかなければならない

のではないかと評者は考えている。

なお、津波は通常の波浪にくらべてはるかに周期が長いために、最高潮位の前後では潮位がゆっくり変化し、内陸にまで浸水する原因となる。図3-1は、そのことを示しているが、津波が押し寄せる時や、引いてゆく時には、潮位が急激に上昇、下降することもある。「津波は海岸における潮位の上昇と下降の速度が非常に遅い」という説明文は、誤解される恐れがあるのではなかろうか。

＜岩波書店、2016年1月、新書判、210頁、780円＋税＞

● 富士山宝永大噴火と砂降り

永原慶二 著

富士山宝永大爆発

評者 天野賢一

今から約300年前の宝永4年（1707年）の富士山宝永大噴火は、当時「砂降り」と呼ばれた降灰により静岡県駿東郡から神奈川県西部を主体にきわめて甚大な被害を及ぼし、南関東のほぼ全域にわたりその影響を与えた。現在、その宝永大噴火と降灰は、長い年月の経過によって人々の記憶から遠ざかり、各地域に残る史料がその一端を示すにすぎず、現代社会においては、それを意識できるものはほとんど残されていない。

本書は、その噴火当日の様子から降灰した地域での人々の動き、その後の幕府や藩による救済策と復興に関連した地域の動向が克明に捉えられている。

元禄16年と宝永4年の連続する二つの大地震による太平洋沿岸を襲った大津波、そしてその49日後に起こった宝永大噴火と、度重なる江戸時代屈指の自然災害に当時の人々は翻弄された。特に宝永大噴火では、集落の壊滅的な打撃を受けた富士山の裾野にあたる須走地区、多量の火山灰に埋もれ耕作地が壊滅し、亡所（荒廃地）やむなしとされた現在の静岡県駿東郡および御殿場市周辺である御厨地方、富士山東麓域を流れる鮎沢川と神奈川県西部の西丹沢を流れる河内川が合流する酒匂川下流域では、流入した火山灰の影響で河川の大洪水が繰り返され、大規模で長期的な二次災害が引き起こされている。

著者は、「従来の宝永大噴火に関する研究は、概して視点が噴火時の状況、降砂の深さなどに集中されがちであった。しかしこの噴火は（中略）山麓地域の村々を深い砂で埋め尽くし生活基盤を根こそぎ破壊するとともに、降砂の酒匂川流入により、穀倉地帯の足柄平野に大洪水を反復的にもたらすなど、二次災害をふくめた被害の範囲がきわめて広く、かつ長期にわたったところに特

徴がある。そうした災害のトータル的な解明はまだ決して十分とはいえない」と言及しているように、本書はその視点を基軸に構成されている。

人々は噴火による降灰で生活・生産基盤の壊滅により避難・離村を余儀なくされた。幕府の救済措置により、被災地は藩領から幕領に切り変えられたが、あわせて全国から臨時徴収した高100石につき金二両の高役金は、被災地には十分に行き渡らない。さらに主要な穀倉地帯であり東海道・足柄道の経路となる足柄平野で重点的に行われた酒匂川治水に関しても度重なる築堤の損壊を繰り返す有様で、現代社会の危機管理体制にも通ずる教訓が随所で垣間見られる。

このような藩と幕府による被災状況の把握から復旧・復興にいたるまでの動向は、各自治体史などで地域ごとに、個別に取り扱われてきたが、本書は、関係史料の研究成果からそれら地域を相互に結び付け、困窮する地域農民の動きと藩と幕府の対応を体系的に捉えるもので、本書が目指した「巨大災害をめぐる社会史」の到達点と言えよう。「天災から人災へ」と締めくくられているように地域共同体機能の崩壊、長期化する復興と社会的矛盾が深刻化するなかで、農民の生き抜く力と心も浮かびあがらせてくれる。

今回、これら文献史料を実証する宝永大噴火に関する



よこの さんのうはらい せき
横野山王原遺跡で発見された宝永火山灰が廃棄された溝
(写真提供：(公財)かながわ考古学財団)

考古学による発掘調査成果の一つ加えておきたい。神奈川県西部にあたる秦野地方においても宝永噴火に関する文献史料は多数が残されている。秦野市内の文献では、「一尺四・五寸降積、田畑野山一面砂場罷成」と記載され、一帯は約45cmの降灰により火山灰に覆われた状況が把握できる。噴火の翌年にあたる「宝永五年閏一月砂降りに付き横野村訴え」では、1703年の元禄大地震などの立て続けに見舞われた自然災害から宝永噴火による被害の窮状が表現されている。

さらに「宝永五年閏一月横野村砂除け書上」では、田はすべて埋まり、畑地も壊滅状態であるが、「砂うなへくるミ又はほりうつミ」＝(砂を鋤き包みまたは掘り埋め)により秋作を仕付けるとあり、田畑をいち早く復旧している様子が記載されている。

2014年10月から新東名高速道路建設に伴う埋蔵文化財の発掘調査が、秦野市に所在する横野山王原遺跡^{よこの さんのうはらい せき}で実施されている。文献史料に記された横野村にあたる地域で、調査地点は、丹沢山地裾部に広がる標高250mの台地平坦面である。地表面下約50cmの厚さで堆積する表土層を除去すると、わずかに間隔をあけて併走するよう規則的に掘り込まれた幅約50cmの溝状を呈する掘り込みが調査区一帯に連綿と続いていることが確認できる。この溝には宝永火山灰が埋められており、文献に記載された土壌改良・天地返しの方法の一つである「ほりうつミ」であると捉えられる。また周辺地域での発掘調査でも、「うなへくるミ」にあたる宝永火山灰を土壌に鋤き込んでいた状況も捉えられている。

文献に記述されたとおりに、土壌の天地返しによって畑地を復旧している様子が、考古学的な発掘調査によって実証されたことが特筆される。さらに発掘によって平面的な広がりや規模が具体的に捉えられ、当時の人々が広大な農地一帯に、途方もない時間と膨大な労力を費やしたこともあわせて実感できる。

宝永火山灰は、本書に代表される文献史学と考古学をはじめ関連分野が協同することにより、研究がより進展することも教えてくれる。

<吉川弘文館、2015年8月、四六判、246頁、2,200円+税>

●新刊紹介

島村英紀 著

地震と火山の基礎知識—生死を分ける 60 話

花伝社, 2015 年 11 月, B6 判, 201 頁, 1,620 円

八木勇治・大澤義明 編著

巨大地震による複合災害—発生メカニズム・被害・都市や地域の復興

筑波大学出版会, 2015 年 11 月, A5 判, 210 頁, 3,132 円

寺田寅彦 著

災害と人間—地震・津波・台風・火災の科学と教育

仮説社, 2015 年 12 月, A5 判, 79 頁, 864 円

織原義明・長尾年恭 著

地震前兆現象を科学する

祥伝社, 2015 年 12 月, 新書判, 226 頁, 864 円

鎌田和宏 監修

第 1 巻 地震<1>いのちと未来を守る防災

学研プラス, 2016 年 2 月, A4 判, 47 頁, 3,240 円

高橋和雄 著

玄界島の震災復興に学ぶ—2005 年福岡県西方沖地震

古今書院, 2016 年 1 月, A5 判, 200 頁, 4,860 円

平田 直 著

首都直下地震 (岩波新書)

岩波書店, 2016 年 2 月, 新書判, 191 頁, 820 円

NHK「学ぼう BOSAI」制作班 編

学ぼう BOSAI 命を守る防災の知恵 (地震・津波はどうして起きるのか)

金の星社, 2016 年 3 月, A4 判, 39 頁, 3,240 円

ADEP情報

公益財団法人 地震予知総合研究振興会 (ADEP) の人事異動について

採用

櫻井 清人	本部 事務局 参事	28. 4. 1
石辺 岳男	地震調査研究センター 解析部 副主任研究員	28. 4. 1
村上 理	東濃地震科学研究所 副主任研究員	27.11.16
山田 聡治	つくば観測技術センター 主任研究員	28. 4. 1
犬塚 直樹	つくば観測技術センター 主任研究員	28. 4. 1
長谷川世里子	つくば観測技術センター 副主任研究員	28. 4. 1

退職

山本 明	つくば観測技術センター 主任研究員	28. 3.31
片桐 一美	つくば観測技術センター 参事	28. 3.31
村上 寛史	つくば観測技術センター 主任研究員	28. 3.31
川端 博文	つくば観測技術センター 主任研究員	28. 3.31

編集後記

前号の編集後記に本誌30年の歴史の一端を紹介した。刷り上がり2ページにもわたる記事であったが、今になってみると、新編集会議への引き継ぎに際して述べるべき重要な事項が欠落していることに気づく。本財団の創立者である萩原尊禮初代会長や本誌発行に情熱を傾けた力武常次初代編集長が意図された「刊行の目的」についてまず紹介しておこうと思う。

第1回の編集会議に筆者はオブザーバーとして出席した。その折、力武編集長は「地震関連科学における『岩波の科学』を目指す」と明言されたのを憶えている。「現在地震関連科学は多くの分野に細分化され、研究分野間の意志疎通が失われつつある。このような傾向は地震関連科学の総合性から離れ、ひいては『地震の予知』という究極の目標から遠ざかる結果を生む。このような傾向の食い止め策として本誌が役立ちたい」といった主旨を述べられた。

一方、萩原会長は地震学という理学面と地震災害科学という工学面との融合について存念を語られた。「将来本誌が地震防災知識の普及に努めることになろうが、その際あくまでも理学面を主に工学面を従にするように」と申され、本誌の内容が工学に偏ることがないように「理系対工系の比率は51対49が限度である」と具体的な数字をあげられた。本誌が将来防災専門誌にならないようにと釘を刺されたのである。

東大地震研究所を経て（旧科技厅）防災科学技術研究所を退官した筆者はその後日本大学に職を得ることになり、公務員住宅から埼玉県の上里に住居を移した。その頃阪神淡路大震災が発生したため、大学では学生の意向に応じて地震の話なるべく平易に語るように努めた。一方で埼玉県から東京都に至る関東山地周辺の市町村の要望で、山間部の地震防災講演会に講師としてしばしば引っ張り出された。

講演会の出席者のなかには中学高校の理科担当の現役または退職された先生方が必ずといってよほど参加されていて、かなり高度な質問を

浴びせてきた。このような背景もあって、力武先生から編集長を引き継いだ筆者は、地震ジャーナルを研究者だけではなく、そうかといって専門知識がまったくない人を対象にするのではなく、中学高校の理科担当の先生方の質問に答えられる「やや専門的」レベルの雑誌にするべきではと考えるに至った。

たまたま中学高校時代の同級生に受験雑誌で有名な某出版社の編集長を務めた友人がいた。この友人に本誌を批判してもらうことにした。友人は編集技術の細かい指摘だけではなく、一つ一つの論文を丁寧に目を通して意見を言ってくれた。これによれば一般に理系の論文は難解だという。一方工学や社会学関連の論文は理解しやすく「ためになる話題」が多いともいう。たしかに引用文献に英文が並ぶような専門的な論文は早大理工学部出身の友人にしても敬遠したくなるのであろう。

本財団の定款には、本誌刊行の目的として研究者間の知識の交流促進とともに地震防災知識の普及があげられている。この両者を車の両輪として「地震ジャーナル」を快適に走らせなければならない。おそらく財団の創立者萩原先生がこの定款の文言を草したのであろうから、「51対49」は理系工系の区別というよりむしろ理工系全体の研究者間の知識の交流に対する地震防災知識の普及の比率と考えたほうがよいのかもしれない。

近年研究分野が細分化し分野間の意志疎通が薄れたのも事実であるが、その反面従来の研究分野そのものが変質し、時には思いもよらぬ他分野との融合が生じることもある。そこでは理系工系はもとより生物系との壁もなくなる。研究者は従来の分野に固執することなく、広く他分野の研究者と交流して新分野を開拓することも求められる。地震関連分野にも近年このような傾向が見られるようになった。地震ジャーナルはこういった新しい分野の動向をいち早く捉え、発信することもまた重大な使命ではなからうか。

5年前東北地方を襲った巨大地震津波、そしてまた今回の熊本地震、

地震学界には予知は不可能と発言する研究者も現れ、地震関連研究者を取り巻く雰囲気は厳しくなった。このような状況の下に地震ジャーナルを世に問うことは辛い仕事ではあるが、とにかく何事か学界に社会に貢献する雑誌にしてほしい。新編集委員の手による62号は来るべき東海南海地震に焦点を定めた編集と聞く。想定される東海南海地震はわが国の命運を左右するほどの大災害をもたらす可能性が高いとも考えられる。地震ジャーナルの提言が災害軽減に向けて力強く働きかけるよう期待したい。

編集長を交代するに当たり、編集15年を支えてくださった2人の編集委員、岡田義光防災科学技術研究所前理事長と伯野元彦東京大学地震研究所名誉教授に深い感謝を捧げたい。本財団側からは須田事務局長、澤田専務理事、笠原副主任研究員が編集会議ごとに出席され、貴重な意見を述べられた。丸毛美子氏は編集業務一切を担当され刊行に尽力された。また学会誌刊行センターは30年にわたり本誌を刊行し、学会誌としての質を高めるべく助力を惜しまなかった。これらの方々なくしては、現在61号を数える「地震ジャーナル」はただの一号も刊行できなかったであろう。ここに改めて深甚なる謝意を表したい。（Y.H.）

地震ジャーナル 第61号

平成28年6月20日 発行

発行所 ☎101-0064
東京都千代田区猿樂町1-5-18
☎03-3295-1966
公益財団法人

地震予知総合研究振興会

発行人 阿部勝征

編集人 萩原幸男

本誌に掲載の論説・記事の一部を引用される場合には、必ず出典を明記して下さい。また、長文にわたり引用される場合は、事前に当編集部へご連絡下さい。

●製作/一般財団法人学会誌刊行センター