「地震予知」再考 —これまでの歴史と個人的総括—

吉岡直人

深田地質研究所

A reconsideration of "Earthquake Prediction" A historical review and a personal reflection

YOSHIOKA Naoto

Fukada Geological Institute

要旨:2011年3月11日に発生した、マグニチュード(Mw)9.1の東北地方太平洋沖地震(以後、「3.11大地震」と略)は、これまでの日本の地震予知体制を含め、多くの問題を提起した。本稿では、これまでの主に日本における地震予知体制の歴史を概括し、3.11大地震以降、地震学会が行ってきた様々な試みや反省点も踏まえ、多少とも「地震予知」に関わってきたものの一人として、またこれに関連した実験的研究を行ってきたものとして、現時点での総括を行ってみたいと思う。「地震予知」に関しては、1990年代以来、「できる」、「できない」論争が繰り返されてきた歴史があるが、これも概括した上で私の個人的な考えを纏めておきたいと思う。

キーワード:地震予知,地震予測,東北地方太平洋沖地震

Abstract: The Tohoku Earthquake which occurred at March 11, 2011 with a moment magnitude Mw9.1 brought a lot of problems to us including the organization of earthquake prediction of Japan. In this short note, I will try to summarize the history of earthquake prediction project of Japan, and make a personal reflection about these problems as a researcher who has at least committed earthquake prediction and made many experimental studies concerning the forecasting earthquakes. Some people have argued that the earthquake prediction is intrinsically impossible and others have claimed that the earthquake prediction should be a scientific aim to be realized. The history of this argument will be reviewed and I will show my personal consideration.

Keywords: earthquake prediction, earthquake foreseeing, Tohoku earthquake

1. はじめに

2011年3月11日に発生した,モーメントマグニチュード (Mw) 9.1 (理科年表による,以下同)の東北地方太平洋沖地震(以下,「3.11大地震」と略)は,東北地方の広い範囲に甚大な人的,物的被害を及ぼし,原子力発電所にも被害を与えた.5年を経過した現在でも,多くの被災者の帰還の目途もたっておらず、廃炉に向けた作業も今後長

期にわたるとされている. そればかりでなく,これまでの地震学のあり方,とりわけ,日本が国家的プロジェクトとして行ってきた「地震予知」のあり方も,根本的に見直すことを余儀なくされた.

日本地震学会では、地震後すぐに「東北地方太平洋沖地震対応臨時委員会(委員長 鷺谷威氏)」を立ち上げ、学会の取るべき対応策について議論を始め、提言を纏めることとした。同年秋に静岡市で行われた地震学会は、日程を一日延長し、こ

の問題に関するシンポジウムを静岡大学で開催した. さらにこのシンポジウムで発表された内容に加え,さらなる意見を公募し,「地震学の今を問う」と題する地震学会モノグラフ(日本地震学会,2012)を2012年5月に刊行した.

1995 年 1 月の兵庫県南部地震 (M7.3, Mw6.9) も, 6千名を超える死者を出し, 甚大な被害をも たらしたが、「想定外」という言葉は発せられなか ったように記憶する. 3.11 大地震では、地震の揺 れによる被害よりも、津波による被害が大きかっ たことと, 何よりも震源域が 500×200 km²とい うとてつもなく大きいものであり、Mwが9を超 えるという、まさに「想定外」のものであった. 後で詳しく述べるが、政府の地震調査研究推進本 部が公表していた海溝型長期地震評価図でも、宮 城県沖地震は、2009年1月1日現在の値として、 30 年以内に M7.5 の地震が起こる確率が 99%と されていたのであるが、エネルギーにしてその 200 倍も大きい地震がその領域を含む地震として 発生するとは誰一人として考えてはいなかったの である.

「地震予知」は、大きい被害を何回も蒙ってきた日本人の悲願とも言うべきものであり、一般社会からの期待は大きいものがある。しかし、3.11大地震では全く「予知」は出来なかったし、期待は裏切られたと受け取った人も多いと思う。

本稿では、まずこれまでの「地震予知(研究) 計画」はどのように進められてきたかを概括し、 それを踏まえ、地震予知(予測)に関わる実験的 研究をしてきた者の一人として、私個人の考えて きた「地震予知」を総括してみたいと思い、本稿 を認める次第である。

なお、日本の地震予知に関する集大成とも言うべき大著が最近、泊次郎氏によって刊行された(泊, 2015).本小論で述べる歴史の部分はこれに詳しい

ので、興味ある読者は参照していただきたい.

2. 日本における「地震予知計画」

2.1 明治からブループリントまで

地震学は、明治初期、お雇外国人教師の一人であるジョン・ミルン (1850-1913) によって始められたと言われる. 1880年 (明治13年)、横浜でM6程度の地震が発生し、これに驚いたお雇外国人教師たちがミルンを中心として地震学会を創設した。そのミルンは「地震学創設以来、その主目的の一つは地震到来の予知であった」と言ったと伝えられている (上田、2001).

以後,地震学の発展に寄与した関谷清景(1854-1896),菊池大麓(1855-1917),中村左衛門太郎(1891-1974)らも「予知」を地震学の目標の一つに考えていたようである。今村明恒(1870-1948)と大森房吉(1868-1923)の関東地震に関する論争は有名であるが紙面の都合上ここでは触れない(興味ある読者は、「地震学百年」(萩原、1982)や上述の泊氏の著作などを参照されたい)。また設立当初の地震研究所教授(兼務)であった寺田寅彦(1878-1935)は、地震予知に関してはかなり否定的な感触を持っていたようである(上田、2001;小林、2003)。

濃尾地震(1891, M8.0, 死7273)後,震災予防 調査会ができ,関東地震(1923, M7.9, 死10万人 以上)後,地震研究所ができるなど,大地震,大 被害のたびに地震学は予算を獲得し,進歩をとげ るという,やや「焼け太り」の感があるが,これ も致し方のない事であろうか.

第2次世界大戦後, GHQ は日本の地震学に興味を示し、1947年にはグーテンベルグを来日させ、日本の地震学について調査させた(力武、2001).

2.2 ブループリントから兵庫県南部地震まで

1960年代初頭,坪井忠二(東大教授,地震学), 和達清夫 (気象庁長官), 萩原尊禮 (東大地震研究 所教授)の3名が中心となり、約80名の研究者を 交えて地震予知研究グループを結成し、 具体的な 計画の検討を開始した. 1962年, 上記3名が世話 人となり、「地震予知―現状とその推進計画」(い わゆる「ブループリント」) が公表された. これは 当時の技術レベルで最大限の観測・調査(地殻変 動, 地震, 地震波速度, 地磁気·地電流, 活断層 調査)を提唱するものであり、緒言には「地震予 知問題に関して、我々が現在持っている見解の一 応の総決算というべきものである」とある. そし て最終章である「期待される成果」の最後には、 「地震予知がいつ実用化するか、すなわち、いつ 業務として地震警報が出されるようになるかにつ いては、現在では答えられない。しかし、本計画 のすべてが今日スタートすれば、10年後にはこの 問いに十分な信頼性を持って答えることが出来る であろう (傍点筆者)」と述べられている. この部 分が、後々、予知不可能論者の攻撃の標的となる のである.

1964年6月16日には新潟地震 (M7.5) が発生したこともあり、同年7月測地学審議会は「地震予知研究計画の実施について」を建議するに至る.これが認められて「(第1次) 地震予知研究計画」が1965~1969 (昭和40~44) 年度の5カ年計画として発足するのである.

折しも 1965 年には松代群発地震が発生し, 1968 年には十勝沖地震(M7.9)が発生した。このため計画を4年(昭和43年度)で打ち切り「国家的事業」としての「第2次地震予知計画」が 1969~1973(昭和44~48)年度の5ヵ年計画としてスタートすることになる。第1次にあった「研究」の2文字は無くなっている。

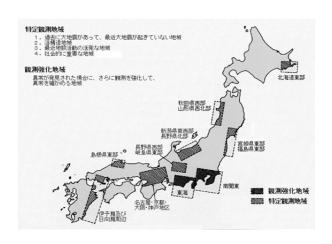


図1 予知連によって指定された特定観測地域(ハッチの部分)と観測強化地域(黒色の部分).

1969 (昭和 44) 年には「地震予知連絡会」(以下,「予知連」と略)が建設省国土地理院長の私的諮問機関として設置される. 予知連は全国の9箇所(後に10箇所)を特定観測地域に指定し、後に更にこの内2箇所を観測強化地域に指定した(図1;この図は後の改定を含んだもの).

1973 年には宇津(1972)が指摘していた根室半島沖の,いわゆる「空白域」に M7.4 の根室半島沖地震が発生した.さらに,アメリカのショルツたちが, Dilatancy-Diffusion モデルを提唱し(Scholz et al., 1973),P波とS波の速度比, V_p/V_s の変化を観測すれば,地震予知が出来ると主張した.日本でも多くの観測が行われ,このモデルは一世を風靡した感があるが,観測と合わない地震も次々に見出され,現在ではこれを主張する人はいない.

第3次地震予知計画は1974~1978(昭和49~53) 年度の5ヵ年計画で行われた.この間,中国では1975年に海城地震(M7.3)が予知されたとの報が入り,多くの研究者が中国を訪れ,その詳細を確認した.実際,地震の直前に臨震警報が出され,多くの人が戸外に避難したため,多くの人命が救われたことは事実である.この頃は「地震予知」 の展望が最も開けたと思われた時代であった.

ところが、1976年に同じ中国で唐山地震(M7.8)が発生し、数十万人の死者が出たと伝えられた. しかし中国は文化革命の最中でもあり、詳しい内容は分かっていない.

1977年に石橋克彦氏(当時東大助手)が、駿河 湾地震説を予知連および地震学会で発表した. こ れは, 1944年の東南海地震, 1946年の南海地震を 詳しく調べると、破壊は駿河湾奥までは達してお らず、駿河湾は1854年の安政東海地震以来、120 年以上歪が開放されていない、というものである. したがって「明日地震が起こっても不思議ではな い」という警句とともに、「東海地震説」は広がっ ていった. 1977 年には、「東海地震判定会(当初 は予知連に付置、現在は気象庁長官の諮問機関で、 地震防災対策強化地域判定会,以下「判定会」と 略)」が発足した. 東海地震の予知の可能性は国会 でも取り上げられ、多くの地震学者が参考人とし て証言台に立った. 茂木清夫氏によれば, 証言し た地震学者の多くは、地震予知ができるかどうか については非常に慎重な意見を表明していたにも 拘らず、政府側(国土庁、気象庁)の証言、すな わち「それなりの観測体制をとれば予知は可能で ある」という意見に流されるかのように、1978年 6月7日に「大規模地震対策特別措置法」(以下, 「大震法」と略)が成立したのであった(茂木、 1998). これは、「判定会」が観測事実にもとづき、 「黒」と判断した場合、気象庁長官から内閣総理 大臣に報告され、「警戒宣言」が発令される、とい う法律である. 一旦「警戒宣言」が発令されると、 鉄道、高速道路はストップ・遮断、病院の外来は 閉鎖、商店・学校なども閉鎖など、「戒厳令」並み の社会的影響をもつものであり、経済的損失も一 日当り少なくとも 7200 億円との試算 (1994 年当 時) もある (茂木, 1998).

その後,第4次(1979~1983 [昭和54~58] 年度),第5次(1984~1988 [昭和59~63] 年度),第6次(1989~1993 [平成1~5] 年度)と続くが,この間のコンピュータやデータ転送技術(テレメータ化)などの技術の進歩は目覚しく,地震観測網も次第に充実してきた. GPS などの技術も導入され,水準測量,三角測量など,多大の時間を要する地殻変動観測技術も,大きく変貌を遂げようとしていた.

第7次地震予知計画(1994~1998[平成6~10] 年度)が始まって1年度目の1995年1月17日, 兵庫県南部地震(M7.3)が発生した.死者・不明 者 6437名,全壊家屋10万棟以上,被害総額10 兆円以上と言われる,いわゆる直下型地震の典型 であった.前年10月の北海道東方沖地震(M8.1), 12月の三陸はるか沖地震(M7.5)に比べると規模 は小さいが,都市の直下で起きたため,被害が甚 大になったものと思われる.

この地震も「予知」は全く行われなかった. もともと「予知」が可能なのは、「東海地震」だけだと学界では考えられていたが、一般社会はそうは捉えていない面もあり、地震学界に対する風当たりは相当なものがあった. それまで政府の「地震予知推進本部」はその名称から「予知」をはずして「地震調査研究推進本部」と変更し、防災科学技術研究所の「地震予知研究センター」も「地震調査研究センター」と名称変更した.

1997年、文部科学省・測地学審議会は「地震予知計画のレビュー」を公表し、「(ブループリント) 30年後の今日なお予知の実用化の見通しが立っていない」と、地震予知研究の実情を公表するに至った.「幻想だった『直前予知』、国の地震予知計画、やっと転換」(朝日新聞)など、新聞各社も大々的にこれを報じた.

2.3 兵庫県南部地震から3.11 大地震まで

しかしながら、兵庫県南部地震をもって「地震予知可能論」は完全に影を潜めたわけではない。 その後に発行された書物をみるとこれがよく分かる。先ほどから引用をしている茂木清夫氏の「地震予知を考える」は1998年発行であるし、上田誠也氏の「地震は予知できる」、長尾年恭氏の「地震予知研究の新展開」、力武常次氏の大著「地震予知一発展と展望」はいずれも2001年の発行である。また、海洋出版(株)の「月刊地球」では、「『東海地震』とその予知問題」(1996)、「新地震予知研究」(1998)、「地震予知のための科学情報の統合化」(2003)などの"総特集"号が発刊されている。

地震学会では2004年4月に、比較的若手の研究者をメンバーとして「地震予知検討委員会」が組織され、地震予知の議論を開始した.この内容をまとめたのが、「地震予知の科学」(日本地震学会・地震予知検討委員会、2005)である.この中で「そもそも地震予知は可能か」という問いについて纏めた部分がある.その中から少し引用してみよう.

「『いつ起きてもおかしくない』状態を予測する中期予知も、少なくともプレート境界の地震については原理的に可能と言えるところまできており、実現に必要な観測データやシミュレーションの手法の研究が進められている。一方、前兆に基づく直前予知は、前兆すべりの発生が理論的に期待されるが、それが観測可能な規模の場合に限り可能と言えるというのが、現時点での答えである。(中略)このように、『そもそも地震予知は可能か』という問いには、プレート境界の大地震の長・中期予知や内陸活断層での長期予知等、予知の対象や期間を限定すれば、『かなりの程度は可能である』と答えられるところまできた。地震が発生する場がら規模に関しては、ほぼ実用的な予測はできている。(傍点筆者)」かなり玉虫色の部分もあるが、

それなりの自信が伺える文章である. これが 3.11 大地震後, 問題になるのである.

兵庫県南部地震の後の1997年に出された,上述の「地震予知計画のレビュー」を受けて,「地震予知のための新たな観測研究計画(以下,新地震予知研究計画)」が,1999~2003(平成11~15)年度の5ヵ年計画として発足した.新地震予知計画では「前兆把握への偏重を改める」,「地震そのものだけでなく、地震に至る過程(準備過程)も含めて予測する」などがスローガンとして盛り込まれた.

また,観測網の整備は一段と進み,Hi-net(高感度地震観測網),K-net(強震観測網)など,それぞれ全国約1000点の地震観測網(いずれも防災科学技術研究所),また GEO-NET(GPS を利用した地殻変動観測システム,全国約1300地点,国土地理院)が整備された.

その後,第2次新地震予知研究計画(2004~2008 [平成 16~20] 年度),第3次新地震及び火山噴 火予知のための観測研究計画(2009~2013 [平成 21~25] 年度)と続く.(第3次からは,火山噴火 予知と統合された.)この間,国内では2004年10 月に新潟県中越地震(M6.8,死者68),2005年3 月,福岡県西方沖地震(M7.0,死1),2007年3 月,能登半島沖地震(M6.9,死1),2007年7月, 新潟県中越沖地震(M6.8,死者15),2008年6月 岩手・宮城内陸地震(M7.2,死・不明23)などの M7クラスの地震が全国各地で発生している.

また海外では、2004年12月26日、スマトラ地 震(Mw9.0、大津波、死者22万人以上)、2008年 5月12日、四川地震(Mw7.9、死者約7万人以上) などが発生した。中でも2004年のスマトラ地震は モーメントマグニチュードが9を超える最大級の 地震であり、起きた場所もこれまでの常識を覆す ものであった。

この間の出来事として触れておかねばならない のは、1978年6月7日に制定された「大震法」の 見直しである. そもそも大震法では判定会の判断 は「黒(地震発生)」か「白(地震なし)」しかな い. もし「黒」の判定をした場合、警戒宣言の社 会的な影響は大きく, 万一「空振り」だった場合, 判定会を構成する地震学者には大きな責任が問わ れることになるかもしれない. この点を懸念した 茂木清夫氏(当時判定会会長)は「灰色」の注意 報を出すことを提言した.しかし結果的に政府(気 象庁) に受け入れてもらえず、同氏は1996年同会 長を辞任した (茂木, 1998). その後, 2003 年に 「東海地震対策大綱」(不意打ちだった場合の対策 を纏めたもの)を中央防災会議が発表し、2004年 になって、ようやく「東海地震観測情報」、「東海 地震注意情報」、「東海地震予知情報」の3種類の 情報(順に、白、灰色、黒)が出されることにな り、今日に至っている。(なお、「大震法」そのも のは残されたままである.)

しかしながら、第3次新予知計画が進行中の 2011年3月11日に、注目されていた東海地方で はなく、東北地方に3.11大地震が発生したのであった。

2.4 3.11 大地震以降の動き

図2に,3.11大地震以前の時点で,地震調査研究推進本部が公表していた,海溝型地震の評価図を示す.原図はカラーなので,白黒にした分,見にくい部分もあるがお許しいただきたい.図中破線で囲んだ部分は,今回の地震の大まかな震源域を表している.ただし,震源域は日本海溝付近まで及んでいたことは確かである.

この図の中で、宮城県沖地震と書かれた部分は、 今後30年以内に地震が起きる確率が99%で、最 も高いとされていた部分である。しかし想定され ていたマグニチュードは7.5 前後,「三陸沖南部海溝よりの領域と同時発生の場合」はマグニチュードが8.0 前後とされていた. しかし実際に起きた地震はMw9.1 であり,エネルギーは想定より30~200 倍も大きかったのである. というより,全く別の(想定外の)地震が起きたと言ったほうが事実に近いだろう.

日本地震学会ではこの地震の発生を受けて,以 下の対応をとった。

- (1) 「東北地方太平洋沖地震対応臨時委員会」の 設置
- (2)2011 年 10 月 15 日(土) 特別シンポジウム 「地震学の今を問う―東北地方太平洋沖地震 の発生を受けて―」の開催
- (3) 日本地震学会モノグラフの発行
 - 1号「地震学の今を問う」 2011年5月
 - 2号「『ブループリント』50周年 地震研究の歩 みと今後」2013年10月
 - 3号「日本の原子力発電と地球科学」2015年3月
- (4)「地震予知の科学」に関するアンケートの実 行 2012 年 10 月
- (5) 「行動計画 2012」の公表 2012 年 10 月
- (2)の特別シンポジウムは、「はじめに」の部分で書いたように、(1)の「東北地方太平洋沖地震対応臨時委員会」が企画し、静岡市で開かれていた地震学会を1日延長して開催されたものであり、このシンポジウムの内容に加え、さらなる意見を一般から公募して編集・刊行されたのが(3)のモノグラフ1号である.
- (4)の「地震予知の科学」に関するアンケートは、 前節で書いたように、同書は日本地震学会・地震 予知検討委員会の手になるものであり、さらに「地 震予知」にかなりな"自信"を持っているような 書き方がされていたこともあったためか、地震学 会員にアンケートがとられたのであった。また、

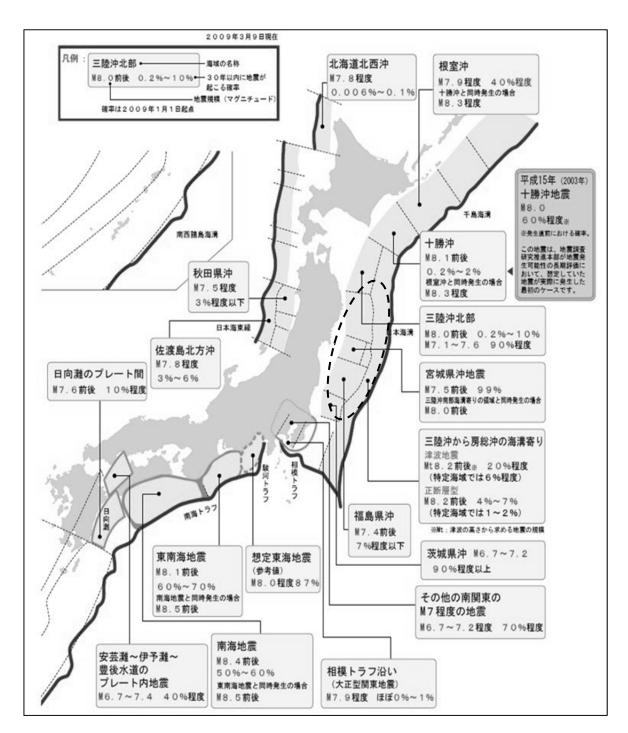


図 2 3.11 大地震前に地震調査研究推進本部が公表していた, 海溝型地震の評価図. 点線部は 3.11 大地震の大まかな震源域.

3.11 大地震後に得られた知見をもとに、「改訂版」を出すべきかどうかについての判断をする意味もこめられていた。このアンケートには極めて多く

の意見が寄せられたが(地震予知検討委員会, 2013a, 2013b), 検討の結果, 改訂版は出さないこ とになった. その後,「地震予知検討委員会」は地震学を社会に伝える連絡会議内に設けられる地震予測・予知問題担当委員の活動として発展的解消することとなったようである.

(5)の「行動計画2012」は正確には「日本地震学会の改革に向けて:行動計画 2012」と称されるものであり、日本地震学会理事会が、学会員からの意見も踏まえとりまとめたものである。その「はじめに」の部分に次のような文章がある。

「2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震は、地震学ばかりでなく、日本地震学会のあり方に対しても大きな問題をつきつけることとなった。学会では今後の地震学の歩むべき道、地震学会のあるべき姿について臨時委員会を設置して議論を重ね、同年10月の地震学会秋季大会において『特別シンポジウム』を開催するとともに、会員から意見を公募し、それらの意見をとりまとめて『日本地震学会モノグラフ』として公表した。(中略)この意見集にみられる最近の地震学のあり方に対する反省としては、一言でいえば、『地震学会が扱ってきた地震学が最近は学理探求としての地震学にややもすれば集中しすぎ、災害科学としての地震学にややもすれば集中しすぎ、災害科学としての地震学の側面が軽視されてきた傾向がある』、ということではないだろうか。(傍点筆者)」

地震学会が3.11大地震によって,相当深刻な打撃を蒙ったことが分かる文章である.この文章への私個人の感想と意見は後ほど述べることにする.

「行動計画 2012」の内容は以下の通りである.

- (1)会員間の議論の場や機会を設けること
- (2) 地震・津波防災に関連する他学会との連携の枠 組み作り
- (3) 国家によるプロジェクトに関する学会における議論の場の提供
- (4)"地震予知"への取り組みを見直すこと
- (5)社会に対して"等身大"の地震学の現状を伝

えていくこと

- (6) 学術情報発信のあり方の検討
- (7) その他

以下, 簡潔にそれぞれの内容を述べる. (1)はす でに開いたシンポジウムや「地震学会モノグラフ」 で、学会のあり方や、研究のあり方などを議論す る場を多くするということであろう.(2)は地震学 を「災害科学」として捉えなおした場合, 地震防 災に関連する幅広い研究テーマや研究分野(地震 工学, 防災教育, 災害情報, 災害心理等) とどの ように連携をとっていくかということだと思われ る. (3)の「国家によるプロジェクト」とは、地震 調査研究推進本部による活断層の長期評価や強震 動予測、中央防災会議による地震被害の想定など のことを指す、これらのプロジェクトには地震学 会員が個人として参加しているが、地震学会とし てもこのプロジェクトの結果を共有し、議論に参 加する場を設けるということだろう. (4)は"地震 予知"(場所、大きさ、時間を特定して地震の発 生を事前に予測すること) は現状では非常に困難 であることを認識することであろう. そして(5) ではこのこと(地震学の実力の現状)を正確に社 会に伝えることの重要性の指摘だろう.(6),(7) については省略する.

なお、(4)に関連して、「地震予知」という言葉の捉えなおしが議論されている。この言葉の定義に関しては、国際的な地震研究者のコンセンサスといえる文章が、2011 年 IASPEI (International Association of Seismology and Physics of Earth's Interior、IUGGの下部組織の一つ)の総会で採択された (Jordan et al., 2011). このレポートでは地震の予測について、(1)警報につながる確度の高いもの(deterministic prediction)と(2)確率で表現され日常的に公表可能なもの(probabilistic forecast)を明確に区別している。前者は社会的に期待の大きい

直前の「地震予知」であり、後者は確率的な長期 予測を含む、より一般的な地震の予測である。そ の上で、(1)は現在では不可能であり、当面社会に 役立つのは(2)であるとしている。日本地震学会も この結論を支持し、(2)の意味で「予知」と言う言 葉は用いないよう努めるべきである、としている。 これらに対しては、forecast に対応する「予測」 と言う言葉を用いるべきであろう。

以上, 3.11 大地震後の動きを, 地震学会の対応 を中心に見てきた.

以下に私自身が行ってきた研究を振り返り、 3.11 大地震後に感じたことなどをまとめてみた いと思う.

3. 私が行ってきた地震学

私は「実験地震学」とも言うべき、実験を中心 とした研究を行ってきた.このために必要な資金 は主に科学研究費から獲得した.以下に実験に関 連した科学研究費の課題と年度を示す.

- (1) 『アスペリティ接触の力学にもとづく, 断層の すべり予測に関する研究』(基盤(B), 平成9~ 12年度)
- (2) 『透過弾性波による,破砕物質を挟んだ断層 のすべり予測に関する研究』(基盤(B),平成 14~17年度)
- (3) 『砂山崩しの実験における、自己組織化臨界 現象と固有地震的振舞いの物理的解明』(基盤 (B), 平成18~19 年度)
- (4) 『砂山の臨界状態の解明から地震の予測法を探る試み』(基盤(C), 平成21~23年度) この他の競争的外部資金として
- (1) 『断層のすべり予測に関する実験的研究』(東大地震研・一般共同研究,平成10年度)
- (2) 『動的破壊(地震)に先立つ準静的すべりの検

出手法の開発』(各務記念財団地震研究助成金、 平成 12~13 年度)

(3) 『透過弾性波による、断層のすべり予測手法の確立 — 実験およびシミュレーション — 』(三菱財団研究助成金,平成18~19年度)などである.

これらの資金による研究成果はいくつかの論文 や報告書として公表してきた(Iwasa and Yoshioka, 1998; Funahashi and Yoshioka, 2001; 吉岡, 舟橋, 2001; Yoshioka, 2003; Iwasa and Yoshioka, 2004; Yoshioka and Iwasa, 2006; Yoshioka and Sakaguchi, 2006; Hori, et al., 2006; Yoshioka and Sakaguchi, 2009; 吉岡, 阪口, 2009; 吉岡, 2011; 吉岡他, 2011; 吉岡, 2013; 吉岡, 2014, など) 獲得した外部資金の研究題目名や, 公表した論文, 報告書などの表題には,「すべり予測」や,「detect nucleation process」など, すべり, すなわち実験における模擬的な地震を予測(予知)しようというような表現が多い.

私は、「地震予知」は現在では困難であるとして も、将来、いつかは実現すべき課題ではないか、 という意識のもとに取り組んできた.

実験は主に二つの主題をテーマにした.一つは「能動的手法」による前兆すべりの検出,すなわち,断層面に波動を透過させ,その変化を観察する方法である.これは次のような考えに基づいている.すなわち「これまで考えられてきた地震予知法の多くは,自然の側から発せられる情報(たとえば,前兆的地殻変動,電磁気学的変化,地球化学的変化,地震活動の変化など)を何らかの方法でキャッチしようという試みであったように思われる.しかしこれは非常に困難であるという見解も強い(例えば,Kanamori (1996)).動的破壊に至るプロセスが物理的に明らかにされてきた現在では、より能動的に断層の場の状態変化を検出

しようという試みが可能となっているのではない かと筆者には思われる」(吉岡, 1998).

二つ目は、「砂山崩し実験」を利用した、予知の手がかりを探ろうとする試みである。この砂山崩し実験と、地震がどのように関係しているかは、深田研ニュースに解説した記事(吉岡、2009a、2009b)や引用した文献にも書かれているので、この小論では概要を述べるに留める。

以下に、上記二つの研究の概要と結果を述べる.

3.1 断層面波動透過実験

図3に実験装置の概要を示す. リニアモーター (LM) で板バネ (LS) を介して上盤 (UB) を非常にゆっくり押す. 上盤 (長さ 130 mm) は破砕帯を模したガウジ層 (GL, 粒径 150~250µmの石英砂) の上に置かれている. 下盤 (LB) に取り付けられた圧電素子 (PZT) からP波を発信し,これがガウジ層を透過して上盤に取り付けられたピックアップ (PU) で計測され,その波形が記録される.なお,上盤,下盤は真鍮製である.

図 4(a) は変位計の記録で、実線は水平変位 (2,3ch, 左目盛)、破線は垂直方向の変位である (4-6ch,右目盛). 水平変位は1300 秒当りで前兆的な変位を始め、1500 秒を超えたところで大きな変位 (スティックスリップ) を起こす. 変位量は約3.5mmである.

また3つの垂直変位計によって捉えられた上向きの変位は、1100 秒辺りから約 0.2mm上昇している. ここでは3つの変位計の平均を示しているが、3つの記録はほぼ重なっており、上盤は下盤と平行を保ったまま、持ち上げられていることが分かる.

これらを総合すると、リニアモーターによって 上盤に水平方向のせん断力が加わると、しばらく の間目に見えるほどの変位はないが、およそ1100

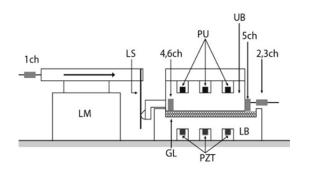


図 3 断層面波動透過実験装置の模式図. LM:リニアモーター, LS:板バネ, GL:ガウジ層, PZT:ピエゾ振動子, PU:ピックアップ, LB:下盤, UB:上盤, 1~3ch:水平変位計, 4~6ch:垂直変位計.

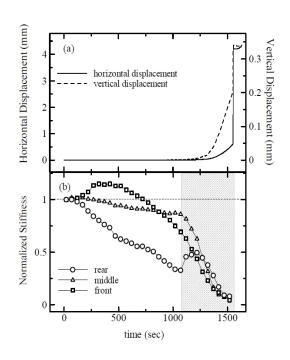


図 4 断層面波動透過実験の結果. (a) 水平変位と 垂直変位の記録. (b) 観測された波動振幅から計 算した断層スティフネス (規格化後).

秒を経過した頃から前兆的すべりが始まり、これ と軌を一にして上盤は持ち上げられ、最終的なす べりに至る事が分かる.

ここには示さないが、断層を透過した波動は、 目に見えるほどの変位がない時点から変化を始め る. これを元に、断層のスティッフネスを計算し たものが図 4(b)に示されている. ガウジ層内部では早くから変化が生じていることが示唆される. ガウジ層内部では, せん断力の増加によって, これに抵抗する方向に柱状の構造(応力鎖)が自然に形成され, これが透過波動に影響を与えるものと考えられる. この応力鎖の形成過程は, 光弾性物質を用いた 2 次元の断層模型実験で明瞭に観察された(Yoshioka and Sakaguchi, 2006). この応力鎖の強度が断層の強度を決定するものと考えられる. 図でハッチをかけた部分が急激な前兆的変化を示す部分である.

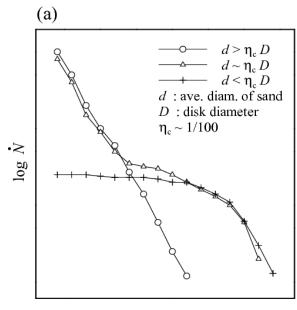
このような実験では、ある程度、すべり予測は 可能である. 透過波動の減衰が著しく大きくなっ た時点で最終的なすべりが生じるからである.

しかしながら、実際の断層でこのような試みが行われた例はない. ACROSS (Accurately Controlled Routine-Operated Seismic Source) によって、断層を対象に透過波動が観察された例としては、野島断層があるが、これは兵庫県南部地震(1995)の後のことであった(Yamaoka et al., 2001; Ikuta et al., 2002; Ikuta and Yamaoka, 2004). しかも、波形変化というより、速度変化の観察で、地震後の断層強度回復を観察するものであった.

実際の内陸の断層で、継続的に透過波動の変化を追跡し続け、「予知」に結びつけるのは実際問題として相当困難であろうが、いつの日か、このような能動的手法で地震予知が実現することを切望して止まない。

3.2 砂山崩しの実験

二つ目は「砂山崩し」の実験である.砂を円形や多角形の受け皿の上に落とし、砂山を作り、それが臨界状態になると、砂は皿からこぼれ落ちる(ナダレが起きる)が、その崩れ方を観察するのである.砂が一度にこぼれ落ちる量を地震のマグ



log W

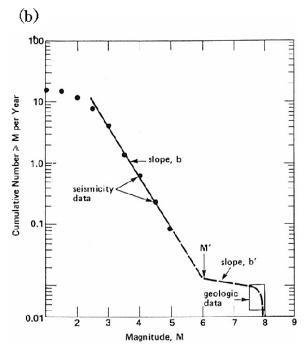


図 5 (a) 砂山実験で得られたナダレの規模別頻度分布. (b) Schwartz and Coppersmith (1984) による, 地震の規模別頻度分布. 両者は非常によく似た形をしている.

ニチュード (規模) に対応させると, 通常はその 規模別頻度分布がべき乗則に沿うものとなり, グ ーテンベルグ・リヒター則 (G-R則) に従う. と ころが、砂の粒径が受け皿の直径のおよそ 1/100 を越えると、大きな規模のナダレが周期的に現れるようになり、固有地震的な地震が現れる. 横軸にこぼれ落ちる砂の重さ (W) の対数を取り、縦軸に一定時間内に起きるナダレの回数を対数軸で表すと図 5(a) のようになる.

ところで、Schwartz and Coppersmith(1984)に よると、古い断層のトレンチ調査から、大きい地 震は G-R 則には従わず、G-R 則で期待される数よ り多く発生することが分かった。図 5(b) にこれを 示す.彼らはこの大きい地震を「固有地震 (characteristic earthquake)」と名付けた.

図 5(a) と(b) は非常によく似た形をしている. この現象の背後にある物理に共通している何かがあるのであれば、砂山崩しの実験からその発生予測への手がかりが得られるのではないか、というのがこの研究の出発点であった.

その後,これも光弾性物質を用いた,2次元の砂山を作り,その内部構造を調べ,応力鎖が砂山内部でどのように発達しているかを調べた(Yoshioka N. and Sakaguchi, 2009; 吉岡,阪口, 2009).

また、単にナダレの大きさのみを問題にするのではなく、ナダレの起きる場所を知るために、WEBカメラで写真を撮り、連続する2枚の写真の「差」から供給された砂やこぼれ落ちた砂の位置を特定する試みを行った。また受け皿を8角形のものにして角錐の砂山を作り、各斜面の崩れが連動する様子を観察した(吉岡,2013;吉岡,2014).

それらの結果について,詳しく報告するのは本稿の目的ではないので,ここでは述べないが,興味ある読者は上記文献を参照していただきたい.

これらの実験をとおして,このような簡単なシステムの実験であっても,ナダレの発生の仕方はかなり複雑であり,発生場所と発生時刻を正確に

予測することは非常に難しい、ということを強く感じさせられた.

4. 「地震学」は「災害科学」か?

「2.4 3.11 大地震以降の動き」の部分で,「日本地震学会の改革に向けて:行動計画 2012」の前文に次のような文章があることを紹介した. すなわち,「地震学会が扱ってきた地震学が最近は学理探求としての地震学にややもすれば集中しすぎ, 災害科学としての地震学の側面が軽視されてきた傾向がある」

この文章を読んで、正直なところ初め、私は多 少の違和感を覚えざるを得なかった. 私は地震学 を「災害科学」として捉えたことはほとんど無か ったような気がするからである. 私は私の恩師か ら、「役に立つ研究はするな」と教えられ、堅くそ れを信じて研究に勤しんできた.「役に立つ研究を するな」というのは、もちろん逆説的な意味であ って、今日の役に立つ研究を目指すのではなく、 将来役に立つかもしれない研究を目指せ、という ことではないかと思う.

これも私が尊敬する寺田寅彦の言葉であるが, 「科学も目前の応用ばかりに眼がくれて百年後の 応用の基礎になるような根本の研究は御留守にな れば結局永久に西洋人の尻ばかり追いかける事と 存じ候.誠に困った事に御座候(大正8年神木健 介あて書簡,寺田,1950)」,「目前の利用のみを目 当てにするような,いわゆる職業的の科学教育は 結局基礎科学の根を枯死させる事になりはしない か(寺田,1960)」.また次のような文章も書き残 している.「その当代の流行問題とはなんの関係も なくて,物理学の圏外にあるように見える事がら の研究でも,将来意外に重要な第一線の問題への 最初の歩みとなりえないとは限らない.それでそ ういう意味で、現在の物理学ではあまり問題にならないような物理現象にどんなものがあるかを物色してみるのも、あながち無用のわざではないかもしれない。」

子どもの遊びの延長のような、砂山崩しの実験 などは、このことを念頭において行ってきたつも りであった.

しかし、3.11大地震で、大きな被害を受けられた人々や、多くの死者を生んでしまったことを考えると、そういう呑気なことは言ってはいられない気もする.「地震学を専門としています」と言い、また地震の予測(予知)を目標として研究を進めてきた者としては、しかも公金を使って実験をさせてもらった者としては、誠に申し訳ないという気持ちが拭い去れないのも事実である.「災害科学としての地震学の側面が軽視されてきた傾向がある」という指摘は、残念ながら少なくとも私には当っていたのだろう.

しかし、それでも今日の役には立たないかもしれないが、将来を目指して、今日やっておかなければならない基礎的な研究が重要であることも決して忘れてはならないことだろうと、あらためて思う.

まことに歯切れが悪い文章になってしまったが、ここら辺りが私の現在の偽らざる心境である.

5. あとがき

「地震予知は不可能だ」と声高に主張する人がいる(たとえば、Geller, 1991; Geller et al., 1997; 島村, 2004; 島村, 2008; ゲラー, 2011). 彼らの主張は「原理的に不可能」という意味で不可能と言っているのである. 3.11大地震以後, 彼らの主張は大手をふってまかり通るようになったようにも見える(ゲラー氏は、2011年10月15日に行われ

た特別シンポジウム「地震学の今を問う」の筆頭 招待講演者である). これとは対照的に、多くの地 震学者は混迷の極に追い込まれているようにさえ 見える (たとえば、黒沢、2014). 東北大学の松沢 暢氏は「M9を想定するために何が欠けていたの か?今後どうすればよいのか?」(松沢, 2012)と いう題の論文でいくつかの原因を挙げている. そ して次のように述べている. 「結局, 我々は短い期 間のデータから考え出したことに縛られて、間違 った前提条件のもとに将来を推定していたのであ る. そのことについて深い反省を行わなければな らない」と、地震に限らず、地学現象は長い時間 を対象として見なければ理解できないものである ことは十分承知していた積りであった.しかし, 高々100年程度の観測をもとに、地震現象を理解し ていたと、知らず知らずのうちに考えていたとし たら、それは大きな誤りであろうと改めて思わざ るを得ない。「やっかいなのは、知らないことでは ない. 実際は知らないのに知っていると思い込ん でいることだ (It ain't what you don't know that gets you into trouble — it's what you know for sure that just ain't so.) 」というマーク・トゥェインの言葉 を, Stein and Okal (2011) が3.11大地震直後のEOS で引用していたのが思い出される.

それにしても、ゲラー氏たちが言うように、本当に地震予知は原理的に不可能なのだろうか?3.11 大地震後、私自身も、「地震予知はこれまで考えてきた以上に困難な問題である」という認識を深くしたことは否めない。あれだけ大きな地震でありながら、また、ブループリントの時代とは比べ物にならないほどの観測網(地震、地殻変動など)の充実があったにも拘わらず、全くといっていいほど前兆を把握する事ができなかったからだ。全国1300点に及ぶGPSの記録を、地震後、精査したらしいが、前兆らしきものは何一つ見出

されていないと聞く.

しかし科学は必ず進歩するものである.「地震予知は困難だが、困難と不可能を混同してはいけない.ありとあらゆる努力をすべきだ」は、元予知連会長であった大竹政和氏の言葉である(小林、2003).ましてや、ゲラー氏の述べているように、『予知はできない』と知っているのに(予算獲得のために)知らん顔の御用学者たち」とか、「多くの地震学者は、予知が不可能だとわかっていながら、そのことを黙っている.(中略)それはひとえに、保身と予算獲得のためだったのだ」(ゲラー、2011)というのは、余りにも偏狭な、ひねくれた見方ではないかと思う.また島村氏(2008)の『地震予知』はウソだらけ」という言い方も、品格ある批判とはとうてい言い難い.

「地震予知」という、この困難な課題に向って、 今後ともあらゆる可能性を探ってゆくことは、今 後地震学を担って行く者に課せられた重要な課題 の一つではないかと思う.

文献

- Funahashi, F. and N. Yoshioka (2001): Effects of contact geometry of faults on transmission waves, *Pure Appl. Geophys.*, 158, 717-739.
- 月刊地球編集部編(1996):総特集 「東海地震」 とその予知問題,海洋出版株式会社,pp.167.
- 月刊地球編集部編 (1998): 総特集 新地震予知研究,海洋出版株式会社,pp.229.
- 月刊地球編集部編(2003): 総特集 地震予知のための科学情報の統合化, Vol.25, 725-817, 海洋出版株式会社.
- Geller, R. J. (1991): Shake-up for earthquake prediction., *Nature*, 352, 275-276.
- Geller, R. J, D. D. Jackson, Y. Y. Kagan and F. Mu-

- largia, (1997): Earthquake cannot be predicted, *Science*, 275, 1616-1617.
- ゲラー・ロバート (2011): 日本人は知らない「地 震予知の正体, 双葉社, pp.185.
- 萩原尊禮(1982): 地震学百年,東京大学出版会,pp.233.
- Hori, T., H. Sakaguchi, N. Yoshioka, and Y. Kaneda (2006): Shear resistance reduction due to vibration in simulated fault gouge, in *Geophysical Mon*ograph 170, Radiated Energy and the Physics of Earthquake Faulting, American Geophysical Union, 135-142.
- Ikuta, R., K. Yamaoka, K. Miyakawa, T. Kunitomo and M. Kumazawa (2002): Continuous monitoring of propagation velocity of seismic wave using ACROSS, *Geophy. Res. Lett.*, 29, 1627, doi:10.1029/2001GL013974.
- Ikuta, R. and K. Yamaoka (2004): Temporal variation in the shear wave anisotropy detected using the Accurately Cintrolled Routinely Operated Signal System (ACROSS), *J. Geophys. Res.*, 109, B09305, doi:10.1029/2003JB002901.
- Iwasa, K., and N. Yoshioka (1998): An experimental trial to detect precursory slips by transmission waves across a fault, *Geophys. Res. Lett.*, 25, 3907-3910.
- Iwasa, K. and N. Yoshioka (2004): Observation of transmission waves across a simulated fault in the whole loading process up to a dynamic rupture, Proc. 1st International Workshop on active monitoring in the solid Earth geophysics, Mizunami, Japan, 343-346, 2004.
- Jordan, T. H., Y-T. Chen, P. Gasparini, R. Madariaga, I. Main, W. Marzocchi, G. Papadopoulos, G. Sobolev, K. Yamaoka, J. Zschau (2011): Operational

- earth-quake forecasting, State of knowledge and guideline for utilization, *Annals of Geophysics*, 54, 315-391, doi:104401/ag-5350.
- Kanamori, H. (1996): Initiation process of earthquakes and its implications for seismic hazard reduction strategy, *Proc. Natl. Acad. Sci.*, *USA*, 93, 3726-3731.
- 小林惟司(2003): 寺田寅彦と地震予知, 東京図書, pp.296.
- 黒沢大陸 (2014): 「地震予知」の幻想 地震学者 たちが語る反省と限界,新潮社,pp.255.
- 松沢暢 (2012): M9を想定するために何が欠けていたのか?今後どうすればよいのか?」, 地震学会モノグラフ1号「地震学の今を問う」,9-13.
- 茂木清夫(1998): 地震予知を考える, 岩波新書, pp.254.
- 長尾年恭 (2001): 地震予知研究の新展開, 近未来 社, pp.208.
- 日本地震学会(2012): 地震学の今を問う(東北地方太平洋沖地震対応臨時委員会報告),日本地震学会モノグラフ1号,pp.171.
- 日本地震学会・地震予知検討委員会編(2005):地震予知の科学,東京大学出版会,pp.218.
- 力武常次(2001): 地震予知―発展と展望,日本専門図書出版,pp.617.
- Scholz, C. H., L. R. Sykes, and Y. P. Aggarwal (1973): Earthquake Prediction: A Physical Basis, *Science*, 181, 803-810.
- Schwartz, D. P. and K. J. Coppersmith (1984): Fault behavior and characteristic earthquakes: Examples from the Wasatch and San Andreas fault zones, *J. Geophys. Res.*, 89, 5681–5698.
- 島村英紀 (2004): 公認「地震予知」を疑う, 柏書 房, pp.238.
- 島村英紀(2008):「地震予知」はウソだらけ、講

- 談社文庫, pp.387.
- Stein, S. and E. A. Okal (2011): The Size of the 2011 Tohoku Earthquake need not have been a surprise, *EOS*, 92, 227-228.
- 寺田寅彦(1950): 寺田寅彦全集昭和 25 年版 15 巻, p.242
- 寺田寅彦(1960): 寺田寅彦全集昭和 35 年新書版 4 巻, p.66.
- 泊次郎 (2015):日本の地震予知研究130年史:明 治期から東日本大震災まで,東京大学出版会, pp.686.
- 宇津徳治 (1973), 地震予知連絡会会報, 7, 7. 上田誠也 (2001): 地震は予知できる, 岩波書店, pp.120.
- Yamaoka, K., T. Kunitomo, K. Miyakawa, K. Koba-yashi and M. Kumazawa (2001): A trial for monitoring temporal variation of seismic velocity using an ACROSS system, *The Island Arc*, 10, 336-347.
- 吉岡直人(1989): 震源域における前兆的すべりを 能動的に検出するための研究の必要性とその 可能性, 地震 II, 50, 189-190.
- Yoshioka, N. (2003): A sandpile experiment and its implication for self-organized criticality and characteristic earthquake, *Earth, Planet and Space*, *55*} 283-289.
- 吉岡直人(2009a):砂山崩しと地震—その1—, 深田地質研究所ニュース, 101, 5-8.
- 吉岡直人(2009b): 砂山崩しと地震—その2—, 深田地質研究所ニュース, 103, 9-16.
- 吉岡直人(2011):砂山の臨界状態と大崩壊の予測の試み― 光弾性物質を用いた内部構造の解明ー,深田地質研究所年報,12,95-103.
- 吉岡直人(2013):砂山崩し実験における連動性の 観察,深田地質研究所年報,14,147-156.

- 吉岡直人(2014):砂山崩し実験における連動性の 観察(2),深田地質研究所年報,15,83-90.
- 吉岡直人, 舟橋史考 (2001): 単一断層面による透過波動の変化 --- 断層面の幾何形状が透過波動に及ぼす影響 --- 地震 II, 54, 215-223.
- 吉岡直人, 堀高峰, 阪口秀 (2011): ガウジ層のせん 断強度に関する実験結果について, JAMSTEC Report of Research and Development, 13,75-87.
- Yoshioka, N. and K. Iwasa (2006): A laboratory experiment to monitor the contact state of a fault by transmission waves, *Tectonophys.*, 413, 221-238.
- Yoshioka, N. and H. Sakaguchi (2006): An experimental trial to detect nucleation processes by transmission waves across a simulated faults with a gouge layer, in *Advances in Geosciences*, *1* Solid Earth, World Scientific, 105-116.
- Yoshioka N. and H. Sakaguchi (2009): Looking into a sandpile by photo-elasticity and discrete element method, in *Advances in Geosciences*, 13, Solid Earth, World Scientific, 281-290.
- 吉岡直人,阪口秀(2009):せん断応力下にあるガウジ層の内部構造解析とすべり予測の試み,深田地質研究所年報,10,109-121.
- 地震予知検討委員会 (2013a):「地震予知の科学」 に関するアンケート結果報告,日本地震学会ニュースレター,24,No.6,7-9.
- 地震予知検討委員会 (2013b): 「地震予知の科学」 に関するアンケート結果報告 その2, 日本地 震学会ニュースレター, 25, No.1, 13-16.

なお,本文で引用した文献以外に,本小論を書 くために筆者が参考として読み返したものを以下 に掲載しておく. (発行年代順)

- 萩原尊禮 (1970): 地震の予知, 地学出版社, pp.187. 萩原尊禮 (1972): 地震への挑戦, 予知のための基 礎知識, 講談社ブルーバックス, pp.273.
- 浅田敏(1972): 地震, 発生・災害・予知, 東京大 学出版会, pp.242.
- 力武常次(1974): 地震予知,中公新書, pp.216. 力武常次(1976): 地震予知論入門,共立全書, pp.212.
- 浅田敏編著(1978): 地震予知の方法, 東京大学出版会, pp.264.
- 地震予知連絡会編(1979): 地震予知連絡会 10 年 の歩み,日本測量協会,pp.261.
- 力武常次,乗富一雄,藤田尚美,水野浩雄,山崎 良雄,木下肇,浜野洋三,本蔵義守(1980): 地震予知 I, 学会出版センター,pp.186.
- 茂木清夫(1982):日本の地震予知,サイエンス社, pp.357.
- 阿部勝征,安藤雅孝,宇津徳治,金森博雄,末広重二,鈴木次郎,田中寅夫,壇原毅,浜田和郎,藤田尚美,力武常次(1985):地震予知II,学会出版センター,pp.439.
- Mogi, K. (1985): Earthquake Prediction, Academic Press, pp.353.
- 浜田和郎 (1986): 地震予知, どこまで可能か, 森 北出版, pp.238.
- 串田嘉男 (2000): 地震予報に挑む, PHP 新書, pp.254.
- 上大岡トメ,上大岡アネ (2011): 生き延びるため の地震学入門, 幻冬舎, pp.177.
- 日本地震学会(2013):「ブループリント」50周年 地震研究の歩みと今後,日本地震学会モノグラ フ2号,pp.75.
- 日本地震学会(2015):日本の原子力発電と地球科学,日本地震学会モノグラフ3号,pp.95.