

## 近代地震学から地震予知工学へ（その1）

安芸敬一

### はじめに

この「私の研究人生」への安芸先生の寄稿文はインド洋マダガスカル島に近い火山島であるフランス領 La Union にいる安芸先生と編集担当である久田とのメールによる対話によって構成されている。このメール対話は、久田が安芸先生に本シリーズ「私の研究人生」の寄稿文を依頼したことに始まる。安芸先生のメールは英語であるため、久田が日本語に訳している。従って稚拙な日本語はすべて訳者の責任である（編集担当 工学院大学 久田嘉章）。

### 久田さんへ

最近火山観測所へはeメールをチェックするために週一回ほど行きます。その際、日本から輸入されたと思われるヒノキの森にある近くの小さな公園に行って、メールの返事を考えます。今もこの小さな公園で久田さんからの寄稿依頼への返事を考えています。寄稿依頼への提案（何語でも可、締切日無し、分量も無制限）が格別に寛大な申し出であることを思い出しています。1968年から書き続けている日記のように、寄稿は英語とフランス語とを混ぜた日本語で書きましようか？ 恐らく自分がこれまで行って来た研究に加え、これからやりたい内容も交えて書くでしょう。久田さんの提案は、最近、私が出会った学術誌や本の出版社のそれとはあまりにも対照的です。例えば、私は地震と火山噴火の予知に関して約2年前にある新しいアイデアを思い付きました。そこで本のための原稿を書き、ケンブリッジ大学出版に送りました。しかしながら、まだ議論の余地が大きいということで出版は見送られてしまいました。また要点をまとめて雑誌SCIENCEにも送ったのですが、十分に競合的でないと言われました。私はあるシンポジウム（Sapporo IUGG での Hagiwara symposium）を企画しましたが、そこで私の新しいアイデアを盛り込んだ論文<sup>1)</sup>を書きました（これは日本地震学会の欧文誌 Earth, Planets and Space から発行予定です）。また「Seismology of Earthquake and Volcano Prediction」というタイトルで、講義ノート形式の本として出版しています（独立行政法人 防災科学技術研究所の鶴川元雄さんが原稿をお持ちだと思います）。私の新しいアイデアを久田さんに知って頂こうと、今年の秋に仙台で行われる日本物理探査学会の国際シンポジウムで話す内容の原稿<sup>2)</sup>を添付しているので、参考ください。

この小さな公園は、知恵遅れの少年について書かれた宮沢賢治の物語を思い起こさせます。その少年は母親に頼んで原っぱに杉苗を植えてもらったのですが、それが後に子供のためのりっぱな遊び場になったのです。度十（けんじゅう）公園林と呼ばれているのがそれなのですが、私もこの小さな公園をそう呼んでいます。ふと私が20歳前半に地震波形を収集に訪問した水沢緯度観測所を思い出します。私は今世紀の初めに自己相関解析のために特別に作られた富士通のコンピュータを使って、その波形の解析していました。この解析から得られた経験が常に私の背景にあり、それが1969年にJGR（Journal of Geophysical Research）で発表した coda 波に関する論文<sup>3)</sup>として結実したのです。コンピュータとは富士通の FACOM 100 というリレー式計算機で20メモリーしかないものなのですが、火山観測所に近い安食堂にある富士通製のレジスターを見ると、10x10の線形方程式を解いた私のプログラムのことや、コンピュータの製作者である池田敏雄さんにお会いしたことなどを懐かしく思い出します。

### 木と宮沢賢治と地球物理学

私は先のメールで松と宮沢賢治について書きました。私は高校時代から宮沢賢治の物語や詩が好きでしたが、当時の彼は今ほど人気がありませんでした。私は40歳半ばにニューメキシコの Los Alamos 国立研究所の科学者達と地熱の研究を始めたのですが、その時から木が好きになりました。ある観光客用の休息所で見つけた「木の発見」という小冊子に、その地域の木の見分け方が書いてありました。その地域は乾燥地帯なので木の種類はあまり多くなく、その小冊子に載っていたルールに従えば簡単に全ての木を見分けることができるようになりました。それ以来、私は旅行した際に訪問した地域の木に関する本を探ることが習慣になりました。私の50、60歳台は世界中を何度も旅行した時期ですので、それはちょうど良いタイミングでした。

以前、岩波の科学「地球物理学は役に立つか？」という論文を書きました<sup>4)</sup>。その中で私は、宮

澤賢治のグスコブドリの物語にある役立つ地球物理学の理想と 1986 年当時の地球物理学の現実を対比しました。特に断層モデルを基礎とした強震動地震学の発展と、Los Alamos での高温岩体研究 (hot dry rock project)、および中国での地震予知研究を強調しました。地球物理学は物理学からの派生なのですが、歴史上初めて数学が物理学の研究道具として役立つことを発見したガリレオの伝統に従って、地球物理学にも物理法則が適用できる単純なモデルが必要だと思えます。私はさらに地震学に関する私のアイデアを拡張させ、「Impact of earthquake seismology on the geological community since the Benioff zone」という論文も書きました<sup>5)</sup>。この 2 つの論文は地震学に関する 20 年前の私の哲学を要約しているのですが、当時書いたことを今でも妥当だと思っています。私の最新の SEGJ symposium での論文<sup>2)</sup>も、基本的には同じ哲学で書かれています。

これらの論文から、このインタビューのハイライトとなる主題が見つかることを願っています。もっと前に書いたものですが、地震学一般に関する私の考えを述べた一般向けの論文が 2 つあります。一つは岩波講座・地球科学の第 8 巻「地震の物理」に書いた地震学序説<sup>6)</sup>で、もう一つは米国地震学会論文集に書いた「SSA presidential address: Possibility of seismology in the 1980's」<sup>7)</sup>です。私は過去 30 年にわたるこれら 5 編の論文で私の哲学を全て述べていると思えます。

### 私の人生における 3 回の飛躍

私にはこれまでの人生で 3 回の飛躍がありました。初めの飛躍は 1966 年に東大地震研究所から MIT に移ったことです。当時、Frank Press がカルフォルニア工科大から MIT に地球物理学部の主任教授として移籍しており、彼が私を正教授として招いたのです。当時、私は 36 歳でちょうど日本を離れる機会を待っていたところでした。地震予知研究プログラムがちょうど始まった時でもありました。いまはすっかり有名となった地震予知の「ブルー・プリント」を準備するワークショップにも参加していたのですが、その野心的なプログラムを始めるには少し時期尚早だと感じていました。同時に、松代群発地震などで私たちは絶えず余震観測やデータの解析に追われており、地震についてじっくりと考える時間が欲しかったのです。ボストンには地震がないため、そんなプレッシャーも無く、地震について熟考する場所としては最適でした。その成果として Aki and Richards の Quantitative Seismology が 1980 年に刊行されました<sup>8)</sup>。

その後、得られた結果を応用して社会の役に立てたいと徐々に考えるようになりました。同時にボストンのような地震に縁遠い場所は、社会と効果的に協力し合うのに必要な重要なものが欠けていると思えました。私はカリフォルニアに移る機会を待っていたのですが、その希望は 1984 年に南カリフォルニア大学 (USC) が私を地質学部の W. M. Keck 基金の初めての主任教授として招いたことで実現されました。この飛躍の成果として、米国科学基金 (National Science Foundation) による科学技術センターである南カリフォルニア地震センター (SCEC, Southern California Earthquake Center) が 1991 年に誕生しました。所長として私が 5 年間勤めたセンターは、10 年以上経た今も存続しています。

USC 時代、学生やポストドクター、SCEC の研究者、世界中からの訪問者など素晴らしい共同研究者たちと過ごしました。しかしながら、私は自然と直接触れ合う機会が無くなっているとも感じていました。というのも私は共同研究者の研究成果に大きく依存していたのですが、成果に対する私の希望的な考えが、彼らに影響を与えていると思えたのです。直接自然に触れたいという私の希望は、La Reunion にある IGP (Institute of Physics of Globe, Paris) の観測所の所長 Albert Tarantola に招かれることで、1995 年に叶えられました。La Reunion はインド洋に浮かぶフランス領の島で、そこにある火山 Piton de la Fournaise は私の目的にちょうど良いことが分かりました。というのもその火山は地質構造的に孤立し、噴火もしばしば起きているため、世界のどの火山よりも噴火の予測モデルを作り、テストしやすいからです。私は噴火の科学から多くを学びましたが、それは地震予測にも応用可能でした。私は 1998 年から一年に一度は日本に訪問し、この成果を報告しています。私が地震について考えるために日本を離れ、ボストンに向かってから実に 40 年近くも経ちました。その成果が 2003 年の札幌での IUGG の Hagiwara symposium であり、そのプロシーディングはもうすぐ発刊予定です<sup>9)</sup>。

Piton de la Fournaise は私の研究目的のためにちょうど良い大きさの火山です。このことは

私の博士論文として 1957 年に地震研究所彙報に発表した、ちょうど良い大きさの研究テーマを思い出させます<sup>9)</sup>。そのテーマとは東京大学の裏庭で観測した交通振動で発生した微動に関するもので、タイトルは「Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtremors」です。基本的なアイデアは Norbert Wiener の Cybernetics にあり、これは私が真剣に読んだ初めて科学書なのですが、そこに述べられている時間シリーズの概念を波動に拡張したのです。博士論文のまえがきで述べているように、私は古典的地震学の「位相」の概念を超えたいと考えていました。この博士論文で一番気に入っているのは、「科学すること」の全ての側面が凝縮されていることです。すなわち、基本となるアイデアを出し、定式化し、ある特定の問題への適用し、研究計画をたて、研究道具の作成し(私はアルバイトで蓄えた \$ 100、当時のレートは 1 ドル=360 円ですが、それで秋葉原で買ったパーツから相関係数を計算するためのコンピュータを作りました)、観測波から表層地盤の構造を決定し、そして最後に自分で穴を掘って結果の確認を行いました。私の博士論文で述べられた方法は、その後、工学的な応用分野に拡張され、その成果は岡田 広博士によって教科書となり、最近では英訳され、「The Microtremor Survey Method」というタイトルで米国物理探査学会から出版されています<sup>10)</sup>。

博士論文を制作中に、私はしばしばその方法を不可思議な火山性微動に応用することを夢見ていました。その夢は 30 年後の 1988 年にハワイでの野外実験で実現し、成果が「Characteristics of seismic waves composing Hawaiian volcanic tremors and gas-piston events observed by a near-source array」として JGR で発表されました<sup>11)</sup>。ちょうど良い大きさの研究対象を選ぶことが重要なのです。小さすぎると帰結がなく、大きすぎると完結が無くなります。それに地球科学の分野で帰結と完結の喜びを味わうには長生きしなければなりません。なにしろ天地長久なのですから。

SCEC の所長して多くの科学者やお偉方とやりあった多忙な生活の後だけに、La Reunionde で経験する静けさは新鮮でした。それから 9 年間で過ぎましたが、私は火山とともにいることに幸福を感じ、2002 年に作った私のモデルによると静かなる噴火の後、2011 年に起こるであろう大噴火を待っているのです。加えて、様々なワークショップやシンポジウムで講演をするために年に数回はこの島を出ます。私はこの島が私の人生最後の場所だと考えています。しかしながら振り返ってみると、日本やポストンやロサンゼルスにいた時、私はいつもそう思っていたのです。1962 年から 1 年間、カルフォルニア工科大に滞在した帰国の途中、私は米国と日本を何度も往復することに疲れ、これからは日本に落ち着こうと考えていたことを思い出します。同様にポストンにいた時は、そこ離れることなどは、本当にそうなる 1, 2 年前まで考えたことも無かったのです。ロサンゼルスでも同じでした。最近、私の中でゆっくりと何かが次のジャンプの準備をしているような気がしています。どこかは分かりませんが、それは「あの世」ではなく、私の人生でどこかまた画期的な場所であることを願っています。

### 確率論的地震学 (Statistical Seismology)

昨日は私の博士論文に対する Norbert Wiener の影響について書きました。世界の全てを確率過程で見るという彼のアイデアは、私に一種の安らぎを与えてくれました。人生は所詮ポアソン過程なのだから、未来を心配することなど意味は無いと、私は自分に言い聞かせましたのです。当時、私は Jeffreys と Gutenberg によって築かれた古典的地震学の完璧さに圧倒され、もう地震学で残された仕事は何も無い、と考えていたのです。私のたった一つの希望は、彼らの地震学における「位相」の概念の制約で、基本となるデータは到着時間と振幅だけにあったのです。博士論文のまえがきに述べているように、私は波形とスペクトルを用いて、その概念を超えたいと思っていました。それができるたった一つの可能性は Wiener の見解の沿った確率論的手法にあることは分かっていました。そのため大学院での私の地震研究は、完全に確率論的手法によるものになったのです。私は震源から発生し、地球内部を伝わる地震波は決定論的手法を用いるにはあまりにも複雑だと考えていました。ここで 1950 年代に出会った GAG (Geophysical Analysis Group) を始めた Enders Robinson について話したいと思います。GAG は物理探査地震学にデジタル革命を起こしたと知られているのですが、Robinson は私が 1966 年から 1984 年まで MIT で働いていた時、同じ学部にも所属していました。振り返ってみると、彼は Wiener のアイデアを天然資源の探査に応用しようとし、私は全く同じ時期に自然災害の軽減に役立てようとしていたのです。

1987年に米国地震学会賞のメダルへの謝辞として書いたのですが、私が地震動研究に決定論的手法が適用できる可能性に気が付いたのは、Caltechの南カリフォルニア地震観測網で観測された Samoa 地震の美しいレイリー波群を Frank Press が私に見せてくれた時です。私が初めての決定論的手法を使ったのは、長周期表面波を用いた震源メカニズムに関するものです。1952年のカリフォルニアの Kern County 地震の余震で得られた Love 波と Rayleigh 波に関する私の研究成果は、本多弘吉教授が提唱した、いわゆる double couple 震源モデルを裏付けるものでした。私はある国際会議（1950年代後半に、恐らくカナダで開催された IASPEI 会議だったと、おぼろげながら記憶しています）で、本多先生にお会いする機会がありました。先生は微笑んで、君はようやく「本当の地震学」を始めたね、とおっしゃいました。それまで数年間かけて地震の様々な現象を確率論的に扱った私の研究は、先生の基準を満たしていないことを悟ったのです。しかしながら、20代と30代に行った確率論的および決定論的手法を用いて得られた経験は、その後私に地震研究者として発展するための基礎となりました。

決定論的手法による私の地震学研究での最も重要な成果は、恐らく地震モーメントの導入だと思います。それは WWSSN (World-Wide Standardized Seismic Network ; 地下核実験を発見するために政治的目的で世界中に展開された地震計ネットワーク) で観測された 1964年新潟地震の波形記録に長周期地震学を適用する際に、必然的に導かれたものです。遠地の波形記録から計算された地震モーメントと、地質・測地・地震学を用いた近地データから評価されたモーメントとが定量的に一致したことにより、地震が断層運動によって生じることを確信しました。私たちはついに地震の数学的モデルを得て、地震学を工学に応用し、地震ハザードを低減するための基礎を得たのだと考えました。私は正しかったと思います。

断層モデルそのものは小藤文次郎や H.F. Reid などの研究から良く知られていましたが、動力学による定量的な証明は全く新しいことでした。Gutenberg と Jeffreys による古典的地震学では、断層モデルは全く用いられませんでした。それに引き続く重要な成果として私は 1967年に震源スペクトルのスケール則を導きました。そして異なったマグニチュード・スケール間の不整合に関する長年のパズルを解いたのです。スケール則は決定論的・確率論的手法の組み合わせの成果ですので、それ以降、私は古典的地震学へ劣等感を感じることは無くなりました。

興味あることに、明らかに決定論的な方法である地震モーメントの概念はすぐさま受け入れられ、金森、Brune、Kostrov のような当時の聡明な若手研究者によって拡張されて行きました。一方、確率論的な方法は受け入れられるまでずっと長い時間がかかっています。実際、古典的地震学では全く扱われなかったコーダ波は、1969年に発表した私の JGR の論文<sup>3)</sup>の後、四半世紀にわたり数多くの研究が行われていますが、未だその存在は地震学会で一般に受け入れられていないと感じています。次にはコーダ波について書きたいと思います（その2に続く）。

## 参考文献

- 1) Aki, K., Opening remarks on the importance of both monitoring and modeling for prediction research, Hagiwara Symposium on Monitoring and Modeling of Earthquake and Volcanic Processes for Prediction, 23rd General Assembly of IUGG and 32nd General Assembly of IASPEI, Sapporo, Japan, 30 June – 11 July, 2003
- 2) Aki, K., A perspective on the engineering application of Seismology, SEGJ International Symposium, The 7th International Symposium - Imaging Technology SEGJ symposium, 2004
- 3) Aki, K., Analysis of the seismic coda of local earthquakes as scattered waves, Journal of Geophysical Research, 74, 1969, 615-631.
- 4) 安芸敬一、地球物理学は役に立つか？ 岩波の科学 Vol.56、1986
- 5) Aki, K., Impact of earthquake seismology on the geological community since the Benioff zone, Geological Society of America Bulletin, Vol 100, 625-629, 1988
- 6) 安芸敬一、地震学序説、地球科学・第8巻「地震の物理」、岩波講座、1978
- 7) Aki, K., SSA presidential address “Possibility of seismology in the 1980’s, Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 70、1969-1976、1980
- 8) Aki, K. and P. Richards, Quantitative Seismology, Freeman, 1980

- 安芸敬一・P.G.リチャーズ著（上西幸司・亀 伸樹・青地秀雄訳）、地震学・定量的アプローチ（日本語版）、古今書院、2004
- 9) Aki, K., Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtremors, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, 35, pp415-456, 1957
  - 10) Okada, H., *The Microtremor Survey Method*, Geophysical Monograph Series, No. 12, Society of Exploration Geophysicists (USA), 2003.
  - 11) Ferrazzini, V., K. Aki, and B. Chouet, Characteristics of seismic waves composing Hawaiian volcanic tremors and gas-piston events observed by a near-source array, *Journal of Geophysical Research*, Vol.96, pp6199-6214, 1991