

近代地震学から地震予知工学へ（その 2） （その 1）¹⁾より続く
 南カルフォルニア大学 名誉教授 安芸敬一

コーダ波：リソスフェアにおける確率過程

地震コーダ波は自然界の驚きです。なぜなら、コーダ波はリソスフェアにある無数の不均質体によるの散乱波であるため、地球の大きな領域内で平均化され、その結果、を震源・伝播・サイトの各特性に地震動の分離を可能にするなど、自然現象を見事なまで単純化することができるからです。現在では地震波の散乱と減衰に関する Sato and Fehler²⁾ というすばらしい教科書がありますが、私のコーダ波に関する論文³⁾もぜひ一度ご覧になって頂きたいと思います。

先日、私は宮沢賢治との関連で、どのようにコーダ波について考えるようになったかを述べました。より正確な経緯は、1956 年の“Correlogram analyses of seismograms by means of a simple automatic computer”という論文⁴⁾に述べています。私は局地地震波のスペクトルが震源位置やマグニチュードに系統的に依存するのに対して、コーダ波のスペクトルは震源位置には依存しないことを発見したのです。一例をあげると、水沢緯度観測所の東側の地震は西側の地震に比べ、P 波・S 波部分では短周期成分が卓越するのですが、コーダ波では周期依存性が消え、卓越周期はマグニチュードだけに依存していました。しかも卓越周期とマグニチュードの関係は日本の様々な場所で同じであるばかりでなく、何とカルフォルニアでも同じだったのです！

私が 1958 年にカルフォルニアを訪問した際、私が真っ先に興味を持ったのは、日本とカルフォルニアにおける局地地震波の比較でした。私は天文台で有名なパロマ山で、機械的な遅延トリガー装置を用いて小規模ながらアレー観測を行いました。この初めてのカリフォルニア訪問で行った研究に関する論文は書かなかったのですが、私は日本とカルフォルニアでの局地地震波の時空間のスペクトル特性が基本的には同じであることを確認できて喜びました。このことでも南カルフォルニアは私にとって特別な場所になったのです。

コーダ波が後方散乱波であることを私がはっきりと認識するようになったのはずっと後で、1967 年に Menlo Park の USGS（米国地質調査所）を訪問したときです。そこで私は、Jerry Eaton と彼の共同研究者が収集した 1966 年 Parkfield 地震の余震記録を調べていました。コーダ波のスペクトルは異なる震源位置で類似であるばかりでなく、異なる観測点位置でも類似していました。その結果を Jerry に見せた時、彼の納得したような微笑みを私は今でも覚えています。同時に彼は、そんな誰も関心を持っていないことに、なぜ私が研究しているのか不思議がりました。私の 1969 年の論文⁵⁾の査読者も同様に次のコメントを書いてきました。「この論文を JGR (Journal of Geophysical Research) に載せても構わないが、きっと誰も読まないでしょう・・・」。その当時、私にとってコーダ波の研究は、MIT での多くの学生たちとの共同研究の中では非常に小さな部分でした。私は Clint Frasier と Jerry Ware と散乱波の逆解析問題、Raul Madariaga と Jorge Mendiguren と地球自由振動の問題、Paul Reasenberg、Amos Nur、Tom DeFazio と地震波速度を精確に現場で連続観測する問題、Dave Boore と差分法による地震波計算の問題、Ken Larnier と非成層境界の地震波伝播の問題、Yi-Ben Tsai と長周期表面波のスペクトルの問題、などに取り組んでいたのです。これら全ての研究は決定論的であり、1969 年のコーダ波に関する論文⁵⁾は、私の研究生活における初期の 10 年を占めた局地地震波に関する確率論的研究からの一種の引退論文だと考えていました。

ところが予想に反し、1970 年代前半に私は確率論的研究へ興味が復活しました。まず私は LASA (large aperture seismic network) で観測した局地地震の P 波のカオス的な性状に興味を持ちました。その波は伝播しているのですが、波形のようではなく、まるで雲のように位相がバラバラなグループをなしているのです。その結果、1973 年には LASA の記録に Chernov 理論を適用しました（この理論や他の難解な理論を理解するために、私が主催した数多くのセミナーを通じて MIT の学生の助けが必要だったことを、私は別な機会に述べたいと思います）。次に私は 1972 年にチリや日本、カリフォルニアを訪問し、局地地震による様々な地震記録を見る機会がありました。チリではカリフォルニアより長い継続時間のコーダ波を見て驚きました。この経験が後にコーダ波を地震波の減衰の研究に利用することに結びついたのでした。

もっと重要なことは、東大地震研究所で辻浦さんのスペクトル分析地震計 (spectral analyzing seismograph) の記録を見たことです。私が 1969 年の論文⁵⁾で提案したコーダ波の

理論、しかも周波数依存を採用して拡張された理論、が目の前で繰り広げられていたのです。MIT では Bernard Chouet が専攻を航空学から地球物理学に変更し、私の学生となったことも幸運でした。彼はすぐに地震学におけるコーダ波の意味を理解し、私たちは共著で論文”Origin of coda waves: Source, attenuation, and scattering effects”⁶⁾を 1975 年に書きました。

興味あることに決定論的な私の研究論文、例えば 1966 年の地震モーメント⁷⁾や、Eystein Husebye と Anders Christoffson との 1977 年の遠地地震トモグラフィ (teleseismic tomography) の論文⁸⁾、Willie Lee との 1976 年の局地地震トモグラフィ (local earthquake tomography) の論文⁹⁾などは、最近では私は殆ど参照することは無いのですが、確率論的な研究論文、例えば 1965 年の b 値の最尤推定法¹⁰⁾や 1969 年、1975 年のコーダ波の論文⁵⁾、⁶⁾などは自分の参考文献リストに未だに生き残っているのです。自分の論文を参照しないということは、人類の知識の恒久的な遺産として広く受け入れられたことを意味しているのだと思います。私は自分の確率論的な研究論文が自分の参考文献リストからまもなく消えることを望んでいます。

久田さんへ

私はこの寄稿文を最近引っ越したばかりの新しい家で書いています。この家は前の家より大きく、自分の全ての出版物、日記、スケッチ (1990 年にカラーペンで書いた自画像をそちらに送ろうかと考えています。ここから日本まで航空便で 10 日ほどかかるでしょう) などが書棚に整理され、快適な書斎となっています。したがって久田さんによる自伝への誘いはちょうど良いタイミングでした。実は私は今秋に AGU (American Geological Union) の Bowie medal を頂く予定なのですが、その際、Willie Lee がシンポジウムの刊行物のために同様の記事を私に求めています。しかしながら、なぜかあまり気乗りがしないのです。久田さんが提案したこの寄稿文のフォーマットと、久田さんが書いた私の引退記念シンポジウムに関する報告文¹¹⁾の中で述べられている私と私の研究への賛辞が、この寄稿文への私の急場の回答への重要な要素になっています。もしかしたら、これは久田さんがはじめに意図したものより、何かずっと発展したものになるかもしれません。Aki and Richards や SCEC (Southern California Earthquake Center) を始める前に似た興奮を感じているのです。私が何かやり遂げるには常に誰か協力者が必要なのですが、これから一体何が起こるのか見てみましょう。

La Reunion 島に持ってきた本

私の本棚にある何冊かの本は水戸高校時代からのものです。昭和 16 年に青磁社から出版されたフランス詩集は戦争間際にも拘わらず紙も上等で定価 5 円とあります。当時の私に自分で買えるわけもなく、ひとから借りて返す機会を無くしたまま今でも私の手元にあるようです。小林秀雄の「ランボオの酪酐船」、堀辰雄の「リルケの窓」、菱山修三の「ヴァレリイの海辺の墓地」、三好達治の「ボオドレールの信天翁」など、ずらりと名訳の並んだ素晴らしい本で、編集は村上菊一郎です。フランス領の島に 10 年近く住んだ今、それぞれの詩の原文と訳詩とを並べて、正しく (?) 発音しながら書き込めるのが楽しみとなっています。

もうひとつ長いこと楽しんでいるのは、昭和 26 年の河出書房発行による「原典による世界文学史」という本です。定価は 650 円で、その時はアルバイトをして自分で買えるようになっていたと思います。当時の百人近い日本の代表的外国文学者が、ギリシャ以来の西欧の詩人と作家の作品を紹介したもので、何度読み返しても飽きません。編集は中島健蔵です。最近 Aki and Richards 2nd Edition が日本語に訳されることになり^{12),13)}、その序文に翻訳という作業が高度に知的なものであると書いたのですが、それは私の若い頃読んだ素晴らしい翻訳文学の影響だと思っています。

私は若いときには長編小説を好んで読んだのですが、その後は短編小説を読み、結局、研究が忙しくなるともっぱら詩を読むようになりました。詩はその国をより良く深く知るのに大変役に立つことが分かりました。日本の好きな詩人は石川啄木、室生犀星、金子光春、草野心平、宮沢賢治などで、井伏鱒二の厄除け詩集も愛読していました。ボストンに移った後、私は二人の詩人を知り、それで New England の土地柄や人々を好きになりました。それは Robert Frost と Emily Dickinson です。後者との初めての出会いは、私が MIT の廊下を歩いているとき、壁に貼られた彼女の次の詩を見つけたときです。

I'm Nobody! Who are you?
Are you – Nobody – too?
Then there's a pair of us!
Don't tell! They'd advertise – you know!

How dreary – to be – Somebody!
How public – like a frog –
To tell one's name – the livelong June –
To an admiring Bog!

彼女と Frost の全集に加え、私の本棚には Robert Service と Robinson Jeffers の選集があります。私は 1980 年代の初期に何度か夏をアラスカで過ごしたのですが、私は Service から本当のアラスカを感じます。Jeffers との出会いは、USC でのあるパーティーでカルフォルニアでの最上の詩人を聞き当てたときです。Service は偉大な詩人とは言えないかもしれませんが、Jeffers は Frost や Dickinson と同様に深い感性を持つ最も偉大な詩人の一人です。La Reunion 島では 1818 年にここで生まれた Leconte de Lisle を除いて地元の詩人を知りません。彼は Baudelaire や Verlaine、Rimbaud と同時代人であり、最も偉大な「先駆者 (initiateurs)」の一人と考えられていますが、私の好みではありません。私は読みやすさから本棚でなく、机の上にフランスの詩を統合した Larousse 社の選集を置いています。私は "Brise Marine (海の微風)" という題の Mallarmé による詩がこの島を良く表していると思います。その第 2 行で「逃れむ、彼処に逃れむ 未知の泡沫 (みなわ) と天空の央 (さなか) に在りて 百千鳥 酔ひ痴れたるを、われは悟 (し) る」と、鈴木信太郎の訳にある「彼処」とは、このことに違いないと思います。

日本からボストンに移る時、宮沢賢治と葛西善蔵の二人の全集を運びましたが、カリフォルニアに移ってから風景に合わないせいか、賢治のものは読まなくなり、この島にも持って来ませんでした。一方、善蔵の短編、「子をつれて」、「椎の若葉」、「湖畔手記」、「海岸にて」などは、なんと読み返しても厭きません。善蔵の他にも繰り返し読んで厭きない本が 2 つあります。Andre Gide の Paludes、と William Faulkner の Wild Palm です。Gide の Paludes は堀口大学の訳で 50 年以上前に読み始め、今では原文で楽に読めるようになりました。どうして厭きないのか判らないのですが、強いていえば、これらに共通して限られた能力しかない個人がその貧しさと困難にも拘わらず、妙に明るく静かな世界を感じさせていることかもしれません。地震学という狭く限られた貧しい分野で暮らしを立てながら、なお明るく、広く、深く、大きな世界を感じていたいという私の願いに沿うものだったと思います。

地震予知とコーダ Q

前に述べたように私のコーダとの付き合いは古く、学生のとき訪れた水沢緯度観測所に始まります。しかしコーダを地震波減衰の測定に使うという考えは 1969 年の JGR 論文⁵⁾にも無く、1972 年の夏に、ボストンからチリ、日本、カリフォルニアを訪れ、それぞれの局地地震の記録を較べた時に初めてその可能性に気が付きました。コーダ Q (コーダから求まる Q 値) という概念を初めて発表したのは 1975 年の Aki and Chouet の JGR 論文 "Origin of coda waves: source, attenuation, and scattering effects⁶⁾" ですが、1973 年にアメリカの地震予知研究計画が発足した時には、それに基いたプロポーザルを書くくらいに発展していました。しかし当時のアメリカ地震予知はダイラタンシー理論 (dilatancy theory) と Vp/Vs の時間変化が中心で、私のプロポーザルは通りませんでした。Menlo Park の USGS で最初の地震予知プロポーザル審査会が 1973 年の 12 月に開かれた際、私も審査員の一人でしたが、会の初めに私のプロポーザルが地震予知に関係ないとして、program manager が除外した Box F という箱にはいつているのを知り、がっかりしました。その頃の記事に「私の一生は失敗でした。地震予知のためには先ず複雑な地殻の微細構造を理解せねばと MIT で 8 年無駄にし、遠まわりをし過ぎた」と書いています。43 歳の時でした。しかしこの時のプロポーザルに提出されたアイデアで生き残っているのは、コーダ Q くらいではないかと、74 歳の今思います。

前に述べたように 1972 年に日本を訪れた時、地震研究所の辻浦さんの集めたスペクトル分析

地震計 (spectrum analyzing seismograph) の記録を見てコーダの研究に最適であると思いました。MIT に帰って研究費の工面をして、翌年の夏、辻浦さんを彼のスペクトル分析地震計と招待し、サンアンドレアス断層帯の真中に設置して頂きました。コーダのスペクトル特性が場所によって著しく変わることが直ぐにわかり、断層帯の物理的性質を調べるのに有効であると思われました。審査に落第した私のプロポーザルはこの予備調査の結果を中心にしたものでした。

この時点で私にはコーダ Q を大地震の前兆現象と見る考えは全く無かったと思います。サンアンドレアス断層に設置した辻浦さんのスペクトル分析地震計は 1973 年の夏から 1 年間働き、その記録を調べた Bernard Chouet(1979)¹⁴⁾ は、コーダ Q が時間的に変化をするを見つけただけですが、前兆現象の可能性は考えていませんでした。その可能性を私が意識し始めたのは 1980 年代の初めに中国、カムチャッカ、ハワイの大地震についてコーダ Q の前兆的变化を見つけた例のあることを知ってからで、1985 年にその可能性を通称力武ジャーナルに発表しました (Aki, 1985 を参照¹⁵⁾)。

USC に移った頃から、コーダ Q の時間的変化を集中的に調べ始めましたが、なかなか一筋縄ではいきませんでした。10 年程頑張りましたが、プロポーザルも論文も何処へ出しても通らなくなってしまい、1995 年にレユニオン島に移ってからに 2002 年までコーダ Q を地震予知に使うことは完全に諦めてしまいました。しかし、この USC での 10 年間に行った色々な観測から、コーダ Q の時間的変化の源がリソスフェアの脆性部分 (brittle part) でなく延性部分 (ductile part) にあり、簡単にいえばコーダ Q は延性部分における微小破壊の密度 (the density of small-scale fracture in the ductile part of lithosphere) を表わすと考えるようになりました。このことは私が最近提唱している地震予知の方法の基礎となっているので、やや専門的ですが、詳しく書いておきます。

Chouet¹⁴⁾ によって報告されたコーダ Q の変化は、地域の雨量や地震の発生には無関係でしたが、 b 値と呼ばれる地震活動度の時間的な変化には、強くはないものの負の相関を示していました (Aki, 1985¹⁵⁾)。 b 値とは Gutenberg-Richter 式、 $\log N = a - bM$ 、で定義される係数です (ここで N はマグニチュード M より大きな地震の年発生頻度です)。世界の多くの研究が、コーダ Q^{-1} (コーダ Q の逆数値、減衰を意味する) と地震活動度の時間的な相関は、空間的な相関ほど単純でないことを示しています。多くの場合、コーダ Q^{-1} は主要な地震が発生する 1-3 年前にピーク値を示します (Gusev and Lemzikov, 1984¹⁶⁾; Novelo-Casanova et al., 1985¹⁷⁾; Jin and Aki, 1986¹⁸⁾; Sato, 1986¹⁹⁾; Faulkner, 1988²⁰⁾; Su and Aki, 1990²¹⁾)。同様な前兆現象が Jin and Aki (1993)²¹⁾ によってカリフォルニア中部の 1989 年 Loma Prieta 地震や、南カリフォルニアの 1993 年 Landers 地震の前にも発見されています。しかしながら、ある地震に先行する特徴的なパターンは他の地震では起こらず、主要な地震の前に常に同様なパターンが現れる訳でも無いため、彼らはコーダ Q による前兆現象は信頼性に乏しいと結論しています²¹⁾。このコーダ Q による前兆現象の信頼性に関する判断は、「前兆現象を支配する物理システムは時間的に定常でなければならない」という先入観に基づいています。私は IASPEI (International Association for Seismology and Physics of Earth's Interior) による地震の前兆現象を評価した地震予知小委員会でも、この考えが基礎にあったと信じています (Wyss, 1991²³⁾)。

一方、私たちはコーダ Q の時間的な変化に関して様々な現象を観測しました。まずコーダ Q^{-1} は余震活動が活発な期間で最小値となる、という驚くべき傾向に気が付きました (Gusev and Lemzikov, 1984¹⁶⁾, Novelo-Casanova 他, 1987¹⁷⁾, Faulkner, 1988²⁰⁾)。さらに Tsukuda (1988) は 1983 年三朝地震の震源域において、1977 年から 1980 年までのコーダ Q^{-1} が大きい値を示す期間は、地震活動が不活発な期間 (静穏期) に対応することを発見しました。また 1976 年唐山地震の前の 1973 年から 1976 年まで、コーダ Q^{-1} が大きな値を示した期間もまた、震源域では静穏期であり、さらに驚くべきは余震のコーダ Q^{-1} は、1973 年より前の地震で求められた値よりも 20% も低い値を示しました (Jin and Aki, 1986¹⁸⁾)。これらの観測が示唆しているのは、コーダ Q^{-1} の時間的な変化は、余震が起こるリソスフェアの脆性部分の破壊ではなく、延性部分か、脆性部分から延性部分に移る遷移帯における破壊に恐らく関係しているということです。このことは実際、Sato (1988)²⁵⁾ がコーダ Q の前兆現象に関する批評レビューの中で取り上げた疑問に対する満足すべき回答となっています。すなわち彼は、1984 年長野県西部地震や 1976 年唐山地震によるコーダ Q や P 波による Q の値の時間的な変化を見ると (Sato (1987)²⁶⁾, Ohtake (1987)²⁷⁾, Jin and Aki (1986)¹⁸⁾ and Zhu et al. (1977)²⁸⁾)、微小破壊か

ら期待されるように、本震や余震で生じるP波から計算されるQの値は小さくなるのに対して、なぜ本震の後ではコードQは増大するのか、と疑問を呈しています。彼は本震による地殻内の散乱体の増大がコードの継続時間を増大させ、コードQが大きくなった可能性があると述べています。しかしながらこの仮定では、いくつかのケースで観測されたように本震の前にコードQが増大することも、主要な地震が無い期間でもコードQが明瞭に時間的に変化することも説明できません。私たちは、リソスフェアの延性部分、または脆性部分から延性部分に移る遷移帯における減衰の時間的な変化は、脆性部分におけるそれよりもずっと大きいを信じています。なぜならば、その部分は高い温度と、増加する液体の寄与によって高い流動性を持つために、観測されるコードQの時間的な変化を支配しているためです。コードQと地震活動度との関係に戻ると、b値とコードQ⁻¹の時間的な相関関係にはより説得力ある説明が可能ですが、はじめに得られた結果はパズルのようでした。というのも、ある場合にはコードQ⁻¹とb値は負の相関を示し(Aki, 1985¹⁵⁾, Jin and Aki, 1986¹⁸⁾, Robinson, 1987²⁸⁾、他の場合は正の相関を示したためです(Tsukuda, 1988²⁴⁾, Jin and Aki, 1989³⁰⁾。このパズルを解くためにJin and Aki(1989)³⁰⁾はクリープモデルを提案し、リソスフェアの延性部分でのクリープによる微小破壊には、ある特徴的なサイズがあると仮定しました。クリープ活動が増大するとコードQ⁻¹も増大し、同時に隣の脆性部分に応力が集中し、クリープ破壊の特徴的なサイズに対応するマグニチュード(M_c)の地震活動を活発にするのです。もしM_cがb値から得られるマグニチュードの範囲の下限値であれば、b値とコードQ⁻¹とは正の相関を示すでしょうし、逆にM_cが上限値であれば負の相関を示すでしょう。別な方面からコードQの変化の原因が地殻下部にあることを支持する研究に、Madden他(1993)³¹⁾があります。彼らは南カリフォルニアにおいてJin and Aki(1989)³⁰⁾が発見したコードQの減少が、地殻下部における伝導率の増大に対応することを見出したのです。

以上がコードQについてレユニオン島に来る寸前の頃の私の考えで、そこには大地震の予知に結びつく可能性は殆どありませんでした。その可能性に初めて気が付いたのは、火山の噴火予知の仕事をしてからです。そのきっかけは上に述べた「前兆現象を支配する物理システムは時間的に定常でなければならない」という先入観が、間違った噴火予知に導くことに気が付いたことです。その間の事情は日本語では地震ジャーナル 33号³²⁾と月刊地球292号³³⁾に、英語ではEPS³⁴⁾に書いたもので、ここでは第2の論文の結論だけを引用します。第1論文では、地震予知のためにはデータの蓄積と同時に物理モデルを造ることが大事であることを強調しましたが、第2論文では現在モニターしている諸データのうち、モデル造りに役立つものと余り役に立たないもののあることを示しました。大雑把に言って地殻の脆性部分に起こっている現象は、例えば前震のように経験法則として予知には役立ちますが、簡単な物理モデルを規定することはできません。一方、経験則から見ると一見出鱈目に起こっているような現象がかえって地域的地震サイクルのモデル造りに役立つ場合があり、それはリソスフェアの延性部分か、脆性-延性遷移帯の部分に起こっているようです。コードQ⁻¹とN(M_c)の関係はまさにその例です。

このデータの区別は物理的にみても当然なことで、脆性部分におこる現象は基本的に自己相似的なフラクタルなものであり、特定な構造と結びつけられないので、それから決定論的物理モデルをつくることは元来無理です。一方、脆性-延性遷移帯の領域に起こっている現象にはM_cの存在のような自己相似性からの乖離があり、物理モデルを造ることができる可能性があります。そういう眼でカリフォルニアで観測されたコードQ⁻¹とN(M_c)の関係を見直してみると、地震サイクルの静穏期には正の相関を示し、大地震の前の数年間はその関係が乱されていることがわかったのです。

地球規模のテクトニック応力(Global tectonic stress)の観測結果をまとめたZoback-Zoback(2002)³⁵⁾の結論では、地震のない地域は延性部分の変形速度が遅いので脆性部分に地殻応力が溜まらず安定していますが、地震の起こる地域は延性部分の変形速度が速いので脆性部分に地殻応力が溜まって地震となるといっています。これを言い換えれば延性部分の変形速度と脆性部分の地殻応力とは正の相関になるということで、まさに上述したコードQ⁻¹の時間変化とM_cの大きさの地震の頻度の時間変化N(M_c)との間の正相関の説明と一致します。一方、Keilis-Borok(2003)³⁶⁾は非線形力学の立場から見た研究結果をまとめ、将来の地震予知研究の方向として地球動力学(Geodynamics)との境界領域をあげています。コードQ⁻¹とN(M_c)の間の相関関係はM_cというフラクタルの概念とQ⁻¹という連続体の概念とを結ぶもので、まさに非線形力学と地球動力学との接点を表わすと見なせます。従って地震予知のための物理モデルを造る出発点に相応しいものと思えます。

以上地震予知とコーダ Q についての半世紀におよぶ私の考えの変遷を述べました。現在の考えを思いついてから 2 年一寸ですが、この間いろいろ踏み固めを経ながら健全な成長を続けているので、これが決定版ではないかと思えます。

久田さんへ

今年 (2004 年) で、私たちがレユニオンに来て 9 周年になります。時々、もしあのまま SCEC (南カリフォルニア地震センター) の所長としてロサンゼルスに留まっていたら今ごろどうなっていたら、と考えることがあります。私は多くのことを失ったかもしれませんが、恐らく先のメールに書いたように、「コーダ Q についての半世紀におよぶ私の考えの変遷を述べました。現在の考えを思いついてから 2 年一寸ですが、この間いろいろ踏み固めを経ながら健全な成長を続けているのでこれが決定版ではないかと思えます」、とは決して書けなかったと思えます。実際、過去 2 年間、私のライフワークが完結に向かっているという、すばらしい感覚を愉しんでいます。私はこれまで世界中の多くの会議で地震や火山の予知に関する私の新しいアイデアについて語っているのですが、反応は奇妙なほど静かです。例外は私の旧友である Keilis-Borok からの熱狂的な反応と、昨秋、彼が組織したトリエステでのワークショップでの反応です。最近知り合った広島でコンサルタントとして成功され 4 年前から地震予知に手をつけられた武田さんという物理学者が同じ考えを全く独立にだされ、意気投合した他、私のかつての教え子や研究仲間達ですら、コメントを述べるのをためらっているようです。唯一のはっきりとしたコメントは 2002 年エリスでのワークショップで私が新しいアイデアをはじめて発表した後のもので、Michel Bouchon の友人の興味ある若いフランス人は、「あなたは有名人なので、何でも言えますね」、とコメントしました。私が Michel にこのことを告げると彼は愉快そうに笑いましたが、私の新しいアイデアへはコメントはありませんでした。

久田さんからこの寄稿文への依頼を頂いた時に、急場の返答として添付した仙台の SEGJ (日本物理探査学会の国際シンポジウム) への論文³⁷⁾の中で、私は地震学の工学的な応用への主要な目標として地震予知を提案しました。主要な地震による人類社会に対する経済的なインパクトは巨大油田の発見に匹敵します。それは近未来への応用地震学の最も重要な課題の一つとすべきであり、その新しい研究分野は**地震予知工学**と呼ばれるかもしれません。私の最後に送ったいくつかのメールは SEGJ で発表した論文の背景を説明しました。

私は久田さんからの要望である「私の研究生活」に関して、既に多くの物語を書いたことに気が付きました。私の物語を久田さんに語るのはなぜか容易で、もし気にならないようでしたら、これからも続けたいと思えます。それは私の内面のリズムから自然と出てくるので、久田さんがそれを出版するかどうかは気にしないで結構です。私のアイデアを久田さんに吹き込んでるのは、あなたが地震予知工学を創めるのに最も相応しいから人だからかもしれません。あなたのスーパーコンピュータや FEM の経験 (ピッツバーグへは今でも行っていますか? 米国での最後の数年間にピッツバーグへ何回か訪問したことは良い思い出です) や、あなたの研究背景や人間に関する幅広い興味(あなたが LA の危険地域に住んでいた頃の話も覚えています)などは、あなたがそれを行うのに相応しいと思えます。どう思えますか?

訳者のあとがき

以上が訳者 (久田) からの寄稿文の依頼に対して、2004 年 7 月から 8 月にかけて安芸先生から送られてきた一連のメール文の翻訳である。稚拙な訳によって不正確な内容になっているかもしれないが、安芸先生の波乱に富んだ偉大な研究人生の一端を窺い知ることができ、不肖の弟子としてはうれしい限りである (私は 1992 年に当時 SCEC の所長であった USC の安芸先生のところへ押しかけ、ポストドクターとして好きな研究を 3 年間もやらせて頂きました)。メールを読み返してみると、それまで経験則に頼っていた古典的地震学から、断層震源モデルに代表される物理モデルの導入による近代地震学の構築に対する安芸先生の貢献の大きさに改めて驚かされる。しかしもっと驚いたのは、先生の研究における究極の目標は地震予知であり、74 歳を過ぎた現在でも飽くなき探究心を持って新しい学問である地震予知学、地震予知工学を構築しようとしていることである。地震予知の研究と言え米国では 80 年代には廃れ、日本でも 1995 年兵庫県南部地震の無力感を契機に、それに触れることすらタブー視された観

がある。私にとっても地震予知と言えば何やらナマズの観測をしているような怪しげな研究者のイメージがあり、地震学の王道を歩んでいる安芸先生が地震予知の研究を行っていると聞き、意外であった。しかしながら、本文を読むと安芸先生の言う地震予知とは直前予知ではなく、確率論的な長期予測に物理法則に裏打ちされた理論モデルを構築しようとしていることが分かる。考えてみれば現在、文部科学省の地震調査推進本部で発表されている確率論的地震動予測地図なども、元を辿ればそのアイデアは20年以上も前の安芸先生のマスターモデルにあり、しかも地震発生の長期評価には経験則に頼った古典的地震学が使われている。鳥取県西部地震や新潟県中越地震、福岡県西方沖地震など、近年の被害地震の多くが予想できなかった地域で発生していることを見ても、物理モデルのない予測が困難なことは明らかである。安芸先生のモデルでは地震の前兆現象には地殻下部の延性部分の運動があり、それはコーダQをモニターすることによって捕らえられる可能性があると言う。決定論的な地震予知は困難かもしれないが、確率論的な長期評価の精度を向上させるには十分役立つ可能性があると思う。気象をモニターして、物理モデルのシミュレーションによって長期的な天気予報を行うように、恐らく将来的にはコーダをモニターして地震の長期予報が行われるかもしれない。やはり安芸先生は我々より20~30年は先に進んでいる。

なお、先生はこの寄稿文に触発され、自伝の出版の準備をされている。書名は「可能性の地震予知学(仮)」で、古今書院から発行を予定している。これも大いに楽しみである

参考文献

- 1) 安芸敬一, 近代地震学から地震予知工学へ(その1)、震災予防、連載「私の研究人生」、199号、pp19-22, 2004
- 2) Sato, H. and M. Fehler, *Seismic Wave Propagation and Scattering in the Heterogeneous Earth*, Series: Modern Acoustics and Signal Processing, Springer-Verlag and American Institute of Physics Press, 1998
- 3) Aki, K., Interaction between fault-zone structure and earthquake process, *PAGEOPH*, Vol. 145, 647-676. 1995
- 4) Aki, K., Correlogram analyses of seismograms by means of a simple automatic computer. *J. Phys. Earth*. Vol. 4. pp. 71-79, 1956
- 5) Aki, K., Analysis of the seismic coda of local earthquakes as scattered waves, *Journal of Geophysical Research*, 74, 1969, 615-631.
- 6) Aki, K. and B. Chouet, Origin of coda waves: Source, attenuation and scattering effects, *J. Geophys. Res.* 80, 3322-3342, 1975
- 7) Aki, K., Generation and propagation of G waves from the Niigata earthquake of June 16, 1964, Part 2. Estimation of earthquake moment, released energy, and stress-strain drop from the G wave spectrum, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, 44, p.73-88, 1966
- 8) Aki, K., Christofferson, A., and Husebye, ES, Determination of the three-dimensional seismic structure of the lithosphere, *J. Geophys. Res.*, 82, 277-296. 1977
- 9) Aki, K. and WHK Lee, Determination of three-dimensional velocity anomalies under a seismic array using first P arrival times from local earthquakes, *J. Geophys. Res.*, 81, 4381-4399, 1976.
- 10) Aki, K., Maximum likelihood estimate of b in the formula $\log N = a - b/m$ and its confidence limits, *Bull. Earthquake Res. Inst. Univ. Tokyo*, 43, 237-239, 1965
- 11) 久田嘉章, Keiiti Aki Retirement Symposium に参加して, 日本地震学会ニュースレター, Vol.12, No.1, pp.16-17, 2000
- 12) Aki, K. and P. Richards, *Quantitative Seismology*, 2nd Edition, Freeman, 2003
- 13) 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
- 14) Chouet, B., Temporal variation in the attenuation of earthquake coda near Stone Canyon, California, *Geophys. Res. Lett.*, 6, 143-146 1979
- 15) Aki, K., Theory of earthquake prediction with special reference to monitoring of the quality factor of lithosphere by the coda method, *Earthquake. Prediction Research*, 3, 219-230, 1985
- 16) Gusev, A. A. and V. K. Lemzikov, The anomalies of small earthquake coda wave

- characteristics before the three large earthquakes in the Kuril-Kamchatka zone (in Russian), *Vulk. Seism.*, 4, 76-90, 1984.
- 17) Novelo-Casanova, D. A., E. Berg, Y. Hsu, and C. E. Helsley, Time-space variation seismic S-wave coda attenuation (Q^{-1}) and magnitude distribution (b-values) for the Petatlan earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, 12, 789-792, 1985.
 - 18) Jin, A. and K. Aki, Temporal changes in coda Q before the Tangshan earthquake of 1976 and the Haicheng earthquake of 1975, *J. Geophys. Res.*, 91, 665-673, 1986.
 - 19) Sato, H., Temporal change in attenuation intensity before and after Eastern Yamanashi earthquake of 1983, in central Japan, *J. Geophys. Res.*, 91, 2049-2061, 1986.
 - 20) Faulkner, J., Temporal variation of coda Q, MS Thesis, University of Southern California, Los Angeles, 1988.
 - 21) Su, F., and K. Aki, Spatial and temporal variation in coda Q^{-1} associated with the North Palm Springs earthquake of 1986, *PAGEOPH*, 133, 23-52, 1990.
 - 22) Jin, A. and K. Aki, Temporal correlation between coda Q^{-1} and seismicity - evidence for a structural unit in the brittle-ductile transition zone, *J. Geodynamics*, 17, 95-120, 1993.
 - 23) Wyss, M., 1991, Evaluation of proposed earthquake precursors, *Geophys. Monogr. Am. Geophys. Union*, pp. 94. Washington, D.C..
 - 24) Tsukuda, T., Coda Q before and after the 1983 Misasa earthquake of M6.2, Tottori Pref., Japan, 1988, *PAGEOPH*, 128, 261-280, 1988.
 - 25) Sato, H., , Temporal change in scattering and attenuation associated with the earthquake occurrence - a review of recent studies on coda waves, *PAGEOPH*, 126, 465-498 1988
 - 26) Sato, H.: A precursorlike change in coda excitation before the western Nagano earth-quake ($M_s=6.8$) of 1984 in central Japan. *J. Geophys. Res.*, 92, 1356-1360, 1987
 - 27) Ohtake, M., 1987, Temporal change of Q_p in the focal area of the 1984 western Nagano, Japan earthquake as derived from the pulse width analysis, *J. Geophys. Res.*, 92, 4846-4852.
 - 28) Zhu, C., C. Fu, Z. Jung and S. Luo, 1977, Source parameters for small earthquakes and the quality factor of the medium before and after the Haicheng earthquake, *Acta Geophys. Sinica* (in Chinese) 20, 222-231.
 - 29) Robinson, R., Temporal variations in coda duration of local earthquakes in the Wellington region, New Zealand, *Pure Appl. Geophys.*, 125, 579-596, 1987
 - 30) Jin A, and Aki K., Spatial and temporal correlation between coda Q^{-1} and seismicity and its physical mechanism. *J. Geophys. Res.* 94:14041-59, 1989.
 - 31) Madden, T. R., G. A. LaTorraca and S.K. Park, Electrical conductivity variations around the Palmdale section of the San Andreas fault zone, *J. Geophys. Res.*, 98, 795-808, 1993.
 - 32) 安芸敬一、地震予知のための物理モデル序説、地震ジャーナル、33、1-8、2002
 - 33) 安芸敬一、地震予知のための物理モデル、地球、Vol. 25、730-737、2003
 - 34) Aki, K., A new look at the earthquake and volcano precursors, A Special issue of *Earth, Planets and Space* : the IUGG Hagiwara symposium, in press, 2004.
 - 35) Zoback, M. D. and M. L. Zoback, State of stress in the Earth's lithosphere, in *International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology*, Academic Press, Amsterdam, 559-568, 2002.
 - 36) Keilis-Borok, V.I., Fundamentals of earthquake prediction: Four paradigms, in *Nonlinear dynamics of the lithosphere and earthquake prediction*, edit. By V.I.Keilis-Borok and A.A.Soloviev, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1-36, 2003.
 - 37) Aki, K., A perspective on the engineering application of Seismology, SEGJ International Symposium, The 7th International Symposium - Imaging Technology, SEGJ symposium, 2004