平成 16 年度援助金使用報告

第 1 回「地殻の能動監視に関する国際ワークショップ」開催報告

鶴我佳代子* 小川克郎** 長尾大道*
羽佐田葉子* 藤井直之*** 笠原順三*
熊澤峰夫*

A Report of the 1st International Workshop on 'Active Monitoring in the Solid Earth Geophysics'

Kayoko TSURUGA*, Katsuro OGAWA**, Hiromichi NAGAO*,
Yoko HASADA*, Naoyuki FUJII***, Junzo KASAHARA*
and Mineo KUMAZAWA*

Key words : active monitoring, stationary sinusoidal waves, ACROSS, underground state monitoring

キーワード：能動的常時監視，定常正弦波，アクロス，地下状態監視

I. はじめに

東京地学協会などから助成を受け，第 1 回「地殻の能動監視に関する国際ワークショップ」(The 1st International Workshop on 'Active Monitoring in the Solid Earth Geophysics'，略称 IWAM04)を，2004 年 6 月 30 日～7 月 2 日，岐阜県瑞浪市の瑞浪市総合文化センターにおいて開催した。本研究助成報告では，地球の能動監視研究の背景，国際ワークショップの概要や将来の研究展望について報告する。

II. 研究背景およびワークショップ開催の経緯

地殻のテクトニクス（例えば隆起，沈降，地震，火山噴火）が活発な場において地下構造や物

理状態の時間変化を連続監視することは，社会的・学問的に極めて重要な課題の一つである。近年，地震や地殻変動などの自然現象を高密度観測網で連続観測することで，地下の描像は飛躍的に明らかになりつつある。しかし，現象が発生する「その場」の物理や動態の特徴をより高い精度と解像度・信頼度で把握するためには，時々発生する地震などを活用するだけでは十分でなく，人工的に発生させた地震波や電磁波を直接「その場」に照射して行う「能動的常時監視観測」への要請が自然な流れであろう。そこで，どのような観測手法が有効であるかを検討した。その結果，それは雑音に最も強い定常的正弦波信号の長時間にわたるスタッキング（同期加算操作）に基礎を置くと考えられた。これを具体化する ACROSS（精

* 日本原子力研究開発機構
** 名古屋産業大学
*** 名古屋大学
* Japan Atomic Energy Agency (JAEA)
** Nagoya Sangyo University
*** Nagoya University

密制御定常信号システム: Accurately Controlled, Routinely Operated Signal System) が 1994 年に提案され (熊沢・武井, 1994), その技術開発が名古屋大学理学部と東京大学地震研究所で開始された。連続正弦波を使う地下探査技術としては, 1950 年代から VIBROSEIS® (Conoco 社) による地震探査法や電磁探査における CSMT (Controlled Source MagnetoTelluric) 法などがあった。ロシア (当時ソ連) では, 1976 年にはロシア科学アカデミー (RAS) のシベリア支部でこの路線の研究開発を始めていたが, 当時は定常正弦波がもつポテンシャルを最大限に活用するための精密時計や安定な計測制御技術, それを支持する理論的基礎が未成熟であった。一方, 日本が定常正弦波の活用を研究し始めた 1990 年代は, 民間用 GPS 時計が安価に普及し始めるなど非常に幸運な時期であった。さらに 1995 年兵庫県南部地震を契機に, 1996 年科学技術庁の地震フロンティア研究の一環として東濃地科学センターにおいてアクロス研究チームが発足し, 組織的な研究開発が開始された。1998 年 11 月, 岐阜県土岐市において開催した International Workshop on Frontier in Monitoring Science and Technology for Earthquake Environments (Tono Geoscience Center, 1998) に RAS の研究者を招待し, 両国間の研究交流を開始した。そして, 「定常正弦波の活用が刷新的効果をもたらす」との確信において日本とロシア両国の意見の一致をみた。2002 年には, 地震予知研究のために中国国家地震局が ACROSS を採用し, この「定常正弦波クラブ」に参入した。しかし, それぞれの歴史的背景もあり, 国際的研究交流や議論はほとんど行われなかった。これを危惧した関係者らによって 2003 年札幌で開催された IUGG (International Union of Geodesy and Geophysics) において, IASPEI (International Association of Seismology and Physics of the Earth's Interior) のもとに TGAM (Task Group for Active Monitoring, 代表者: 熊澤峰夫) を新設するに至った。その際, TGAM は, IAGA (International Association of Geomagnetism and Aeronomy) や IAV-

CEI (International Association of Volcanology and Chemistry of the Earth's Interiors) とも協調して国際ワークショップを企画実行することを求められた。これに対処する国内組織として, JCEAM (Japanese Consortium of the Earth's Active Monitoring, 代表者: 東原紘道) が結成された。このような経緯のもと, TGAM と JCEAM が主催し, 名古屋大学, 東京大学地震研究所との共催で, 能動監視研究の国際的議論の場としての第 1 回「地殻の能動監視に関する国際ワークショップ」が行われた。

III. ワークショップの概要

この研究集会には, ロシア・米国・中国・日本など 10 カ国から 100 余名が参加した。藤井直之 (IWAM04 組織委員会委員長) の開催趣旨説明で開幕し, まず, ロシア・日本・中国から各国での研究の概要が述べられた。ロシアでは, 多様な原理に基づく震源装置の試作の結果, 広大な国土の地下資源と地殻深部の構造探査を目的とした 'powerful vibrator' を開発し, バイカル湖周辺など複数の地域で地下構造決定と地震波速度の変化の監視実験を行った。大出力震源 (発生力 1000 kN) による短期間の送受信実験では, 大陸下の上部マントルを伝搬した地震波を距離 400 km で観測している。彼らは, 主に地震発生場の観測と予知に関心を持っているが, ダムや建物など人工構造物のモード解析による特性評価への適用も検討してきた。日本では, 環境を損なわないように小さな振幅の精密信号を連続的に利用する方向でこの分野を開拓し, 当面の目標として, 日本列島地下常時監視システムを提案する構想を報告した。なお本稿紙面の都合上, 日本側からの発表の内容は以下できるだけ簡略化するので, 関心のある読者は資料 (熊澤ほか, 2000; 笠原, 2004) をご覧いただきたい。また, 中国は, 小型試作装置を作成し, 北京近郊の十三陵テストサイトで行った近距離の ACROSS 信号送受信データの解析結果を報告し, さらに中国政府として ACROSS のネットワーク観測を推進する方針を説明した。

以下では、引き続き行われた7つのセッション(口頭発表58件、ポスター発表22件)の概要を報告する。発表の詳細はプロシーディングス論文集(Fujii *et al.*, 2004)をご覧ください。

1) 社会的要請と目標(口頭発表4件、ポスター発表2件)

ロシアからは、広大な国土の地下資源探査およびダムや橋梁などの構造物の動的特性診断とその解析例が紹介された。地下構造(地殻深部や上部マントルなど)の解明や地震予知、能動的地震学につながる基礎研究への強い要請を認識し、それに向けた理論的研究や地震波送信装置の開発研究が行われている。日本からは、地震発生場や火山地域での能動監視に加えて、地熱地域の貯留層や放射性廃棄物の地層処分場などでの地下構造の評価など、特に時間変化を伴う地下構造のモニタリングに主眼をおいた課題が提示された。

2) 研究戦略(口頭発表7件、ポスター発表1件)

ロシアは、‘vibration geotechnology’(地震波による地殻特性診断技術)を今世紀の課題と謳い、広範な分野への適用、大出力の送信装置の開発とその活用を提示した。‘vibro seismic monitoring’(パイプロサイスの能動監視)がその戦略のキーワードのようである。そのほか、このセッションでは、主に地震発生場解明に向けた展望、計画、アイデアなども提示された。日本からはプレート境界の現象論的監視が提案され、ロシアからは地震場のダイラタンシーや周期的応力による物性変化のモデルや効果が論じられた。特筆すべきは、キルギス共和国で過去20年にわたって行われてきた地殻深部の電気伝導度変動の監視観測である。電気伝導度変化と地震発生に対応が見られるだけでなく、その観測用の大電流(～1キロアンペア)パルスが地震活動を誘起するという結果は、これまでの研究アプローチに再検討を迫るものであろう。

3) 事例研究(口頭発表12件、ポスター発表7件)

世界各地における弾性波・電磁波・電磁拡散波・電場などを用いた観測やデータ解析などの研究事例が紹介された。ロシアからは、大出力震源

写真1 ロシアの大出力震源装置(発生力は1000 kN)(写真提供: 笠原順三氏)

写真2 土岐市にある弾性波信号送信装置(発生力は200 kN)(写真提供: 國友孝洋氏)

(発生力1000 kN: 写真1)による遠方観測(距離300～400 km)や移動観測(400～600 kN級)による地下深さ80 kmからの反射波の同定などの報告や、地球潮汐や日周変動、気象・気候変化に相関した受信信号振幅の時間変化の観測事例が示された。日本からは、ACROSS震源(200 kN級: 写真2)を用いた淡路・野島断層周辺や東海地域での長期間の連続送受信実験による信号位相

の時間変化の検出、ACROSS 信号の稠密アレイ観測での複数の到来波の分離などが報告された。米国から報告されたサンアンドレアス断層のバイプロサイスによるモニタリングでは、断層帯のガイド波（岩石割れ目を伝わる特殊な地震波）の解析、走時と減衰係数 Q の変化と地震活動度などが併せて議論された。これは、特定断層の全体像を把握しようとする組織的監視観測の先導的試行の具体例であろう。また、地下の水の分布や変動をターゲットとする電氣的・電磁気学的手法による研究では、さまざまな監視観測の具体的事例から、組織的な連続的能動的試験監視観測に期待を寄せる地域として、バイカル断裂帯、トルコ・地中海周辺、カリフォルニア、東海地域などが提案された。

4) 技術的課題（口頭発表 8 件，ポスター発表 5 件）

各研究グループ間で、能動監視の対象についてはほぼ共通した認識を持っているが、技術の開発動向には著しい違いがある。ロシアでは、巨大出力（発生力振幅 400 ～ 1000 kN）の起振装置を開発し、10 Hz 近傍帯域において 30 分以上の長い繰り返し周期で周波数掃引をおこない、300 km という遠方まで数日という短期間で信号を送信する。これとは対照的に、日本では、送信装置近傍地盤の疲労破壊を起こさない小さな振幅レベルの送信出力で長期間の精密な連続送信を目指し、ACROSS と称する計測技術体系を構築しつつある。複数の研究グループが、解析手法までを考慮にいたした計測技術や観測手法・装置技術などに精緻な工夫を積み上げている。その特色は、高い S/N 比をもち、かつ誤差評価を有する 9 つの要素をもつテンソルで記述する送受信点間の伝達関数の取得を目標にしている点にある。アルゼンチンからは、電磁駆動振動装置（50 kN）の開発の報告と、携帯電話などで利用されているデジタル通信方式の 1 つであるスペクトル拡散法によって弾性波を送信するという非常に特色ある手法が提案された。そのほか、従来の物理探査法の能動監視技術への拡張として、掘削ビット振動の活用法や、表層地盤の非線形性評価法などの紹

介もあった。

5) データ解析理論と解釈（口頭発表 6 件，ポスター発表 5 件）

物理探査からグローバル・テクトニクスまで、波動で観測し地球内部の構造と状態を逆解析するという目標は共通しており、能動監視に固有の課題が一見無いように思える。しかし、地下の微細な時間変動を検出するためには、観測データの処理方法から、周波数系列データの走時データへの変換、地下の幾何学的 3 次元構造モデリング手法、地下の物性変化の解釈や定量的評価方法まで、弾性波と電磁波の両方について多様な未開拓課題があり、新しい解析手法の開拓が必要となる。信号データ処理、解析法と理論については、もっぱら日本のグループが独自の重要な研究をしている。また、電磁データを用いた地下 3 次元イメージング法、弾性波の回折や散乱の理論に基づいたトモグラフィ法なども提案された。

6) 散乱波の解析と地殻の不均質性（口頭発表 6 件，ポスター発表 1 件）

地殻深部の物理状態の時間変動を反映する散乱波に注目したこのセッションでは、火山、地熱地帯、断層周辺での自然地震や人工地震のアレイ観測データの解析事例と基礎的な問題が紹介された。主に、伝播経路での散乱効果を反映する地震波後続部の波形包絡線（エネルギーの時間分布に関連する曲線）の解析で推定する地殻内部の散乱強度分布から微細不均質構造のイメージングを行ってきた。波形包絡線解析のための波動伝播シミュレーションとその理論や経験的散乱特性のスケールモデル実験・データの解析など、近年目覚しく発展している研究分野の紹介があった。

7) 岩石の構造敏感物性・その他（口頭発表 6 件，ポスター発表 5 件）

観測的に捕えられる地下の時間変動の情報は、多結晶集合体である岩石の構造敏感物性（わずかな塑性変形等によって結晶組織などが大きく変わるような性質）の変化と応力による変形の間の動的な相互作用を反映したものと考えられる。このセッションでは、観測データ自体やモデリングによる解釈に必要な先見の情報となる岩石物性の研

究が提示された。具体的には、含水岩石や粘土の電気伝導度や電磁波の減衰率、誘電率など電磁物性の周波数特性や温度圧力依存性の測定、弾性波伝播特性の圧力感受性、土壌の液化化指数の原位測定などである。そして最後に、非地震性すべりや深部非火山性微動の発生場の状態を能動監視する際の概念的モデルが提案された。

8) アウトリーチ活動

本研究集会と並行して、岐阜県教育委員会と瑞浪市の後援のもと、地域の科学教育や啓蒙活動・国際交流を目的としたアウトリーチ活動も行った。ポスター会場には、岐阜県内の高等学校が毎日2校ずつ研究発表のポスターを提示した。主会場で高校生らが研究課題を英語で紹介し、ポスター会場で内外の研究者からの質問に物怖じせずに応じていた姿は感動的であった。また、ロシアからの研究者が地元中学校2校を訪れ、母国での学校生活や研究者になった経緯などについて語りかける企画も行った。さらに、地震防災啓蒙の一環として一般市民向けの講座と国内研究者らの企画実演による高校生向け地球科学サマーセミナーも開催した。これらのアウトリーチは、地元から大きな歓迎を受けた。

IV. まとめと将来展望

本研究集会の最後に、地下の能動的監視について情報交換と国際協力の継続的推進を決議した。早速、AGU 2004 Fall Meeting (2004/12/12-12/16, サンフランシスコ)では能動監視に関するセッションが設けられ、米国をはじめ日本などから18件の発表が行われた (AGU, 2004)。さらに2005年9月には、ロシア・ノボシビルスクで第2回地殻の能動監視に関する国際ワークショップ、10月にはIASPEI2005 (チリ)、12月には再びAGUで、能動監視のセッションが行われる予定である。また、各国が相互に乗り入れするテストサイトを設定する提案もなされた。日本ではおそらく東海地震想定地域が適当であると考えられる。

地殻の動態を高分解能で把握するため、新しい技術を導入した能動的監視観測を組織的に行うア

プローチは、将来避けて通れないであろう。能動的監視観測の研究は開発が始まったところである。これまでの監視観測それ自体の具体的成果はまだきわめて限られているが、能動監視の持つ潜在力を実感して興奮した参加者も多かったようである。また、その推進に必要な技術確保、活用のノウハウや事例研究などに、国際協力が決定的に重要な役割を持つことを実感させる研究集会でもあった。今後の地球の能動監視研究は、さらに多様な研究分野の研究者・技術者の協力によって発展を遂げ、社会に大きな貢献をもたらす領域に成長すると確信した。

謝 辞

この国際研究集会開催には、東京地学協会より助成金を頂きました。また、IASPEI、井上科学振興財団、鹿島学術振興財団、花王芸術・科学財団、旭硝子財団、名古屋大学、東京大学の財政的支援を得ました。核燃料サイクル開発機構、日本地震学会、日本火山学会、物理探査学会、地球電磁気・地球惑星圏学会、岐阜県、瑞浪市からはご後援をいただきました。特に瑞浪市と核燃料サイクル開発機構東濃地科学センターからは会場使用と集会運営について特段のご配慮を頂きました。また株式会社日吉ハイランドの小栗栄輝氏には、市民との交流や懇親会などについて特段のご高配を賜りました。記してこれらの諸組織と関係者に深くお礼を申し上げます。

参 考 文 献

- American Geophysical Union (AGU) (2004): *Abstracts of 2004 AGU Fall Meeting*. S31C, S33B, AGU.
- Fujii, N., Kasahara, J., Higashihara H. and Ogawa K. (2004): *The Proceedings of "1st International workshop on Active Monitoring in the Solid Earth Geophysics (IWAM04)"*. Task Group for Active Monitoring, Mizunami, Japan.
- 笠原順三編 (2004): 地球内部のアクティブ・モニタリング—4D 地球内部診断を目指して—。月刊地球号外, 47, 海洋出版。
- 熊澤峰夫・武井康子 (1994): 精密制御音波放射による能動的地下構造常時モニター手法の研究—その1・目的と原理。日本地震学会秋季大会講演要旨, 158.
- 熊澤峰夫・國友孝洋・横山由紀子・中島崇裕・鶴我佳代子 (2000): アクロス・理論と技術開発, および将来展望。核燃料サイクル開発機構技報, 9, 115-129.
- Tono Geoscience Center (1998): *Abstract of Interna-*

tional Workshop on Frontiers in Monitoring Science and Technology for Earthquake Environments at Tono Geoscience Center, JNC (TW740098-001).
Tono Geoscience Center, Japan Nuclear Cycle Development Institute.

本研究集会の詳細および関連事項については、次のウェブサイトも参照いただきたい。

IWAM04 : [http : //www.activemonitoring.org](http://www.activemonitoring.org)

JCEAM : [http : //www.jceam.org](http://www.jceam.org)

IASPEI : [http : //www.iaspei.org](http://www.iaspei.org)