

地震 ジャーナル

35

2003年6月

エッセイ 新しい地震確率情報 ●阿部勝征

都市ガス供給網における

超高密度地震防災システム ●清水善久——1

災害時の情報流通の課題 ●鈴木崇伸——10

ITを活用した次世代型地震防災

情報システムの開発 ●後藤洋三——15

地震災害被害を軽減するためのRT

(ロボットテクノロジー) ●田所 諭——28

砂山崩しの実験—SOCと固有地震 ●吉岡直人——36

南ア金鉱山での震源過程直接観察 ●小笠原 宏

/飯尾能久——42

地震予知連絡会情報 ●岡田義光——54

●書評——60

●執筆者紹介——66

●ADEP情報——68

地震の基礎知識 震源決定と観測網最適配置／発震機構解とその表現

困み記事 全壊家屋と倒壊家屋は違う？／地震基盤(工学基盤)の訂正

速報 2003年5月26日宮城県沖の地震

地震予知総合研究振興会

ASSOCIATION FOR THE DEVELOPMENT OF EARTHQUAKE PREDICTION

新しい地震確率情報

阿部勝征

地震学が社会科学の側面をもつという認識は、阪神・淡路大震災を経てそれまで以上に強まった。「関西には大地震は起こらない」という一般の人がもっていた誤解と「関西にも大地震は起こる」という地震研究者がもっていた常識との間に大きな落差があり、科学的な知見がほとんど世間に伝わっていなかったことに気づかされたからである。大震災を契機に設置された国の地震調査研究推進本部はそれを強く意識した組織である。

推進本部の地震調査委員会は国として地震活動を評価する機関である。そこでの活動の一つに活断層の確率評価がある。全国に2000あるといわれる活断層から選ばれた98断層のうち、「A断層では、マグニチュード8程度の地震が今後30年以内に発生する確率は1%である」という発表である。これに対して、防災関係者や一般市民からはこの情報をどう受け取ってどのような対応をすればいいのか、地震の起こる危険性は高いのか低いのかの色を付けてもらえないか、と問われている。発表当初は、「現在を含めた今後数百年以内に地震が発生する可能性がある」といった定性的な表現であった。これに対する反応は、数値で言ってもらわないと起こるのか起こらないのか分からないということだった。そこで様々な検討を重ねた結果、上述のように定量的な確率情報を発表することになった。さらに現在では、確率をあからさまに出さずに、「今後30年の間に地震が発生する可能性は我が国の活断層の中ではやや高いグループに属する」といった表現で発表を行っている。それでもなぜか一部のマスコミは安直に確率を見出しに用いる。

自然現象である地震の繰り返し間隔には、ばらつきがつきものである。たとえば、数千年で繰り返す活断層の活動の場合にばらつきは数100年に達する。このような誤差をもつ現象については、決定論的に次の次期を予測できず、確率論的にしか予測できない。実際の計算では、活断層活動の平均繰り返し間隔、そのばらつき、最新の活動時期を統計モデルにあてはめて、今後何年以内のといった発生確率が計算される。求められた確率の値は時間的にいつ起こるかを示唆するものではない。さらに、値の大きなものが小さなものより先に必ず発生するというものでもない。

そこで、「確率は科学的な手法で調査した証に過ぎない」と割り切って、確率の数値そのものを「防災上無視できない値」に置き換え、確率に合わせて詳しく発表された活断層の形状評価（断層の位置や長さ、ずれの大きさ、地震の規模）や過去の活動履歴を優先的に活用するのが適切であると考えている。地震の発生確率は、降水確率にしばしばたとえられるが、それとは違って多数の人の生死に関わる問題である。確率の値で防災対策推進の可否を判断することは論外である。調査委員会に課せられた目下の課題は、確率情報を有効に活用して地震によるゆれの強さを示す全国マップを作成することである。

都市ガス供給網における超高密度地震防災システム

—SUPREME—

清水善久

1. はじめに

1995年の阪神・淡路大震災以降、多くの機関で高密度地震動モニタリングシステムの構築やリアルタイム被害推定システムの整備が実施されている。東京ガスでも今後の防災レベルのより一層の向上を図るため、供給区域約3,100 km²に対して約3,700基の地震計（新SIセンサー）を設置しモニタリングする、世界一超高密度な地震防災システム—Super-dense Realtime Monitoring of Earthquakes—（SUPREME）の構築を開始した。図1に新SIセンサー全数設置後のセンサー配置図を示す。

このシステムは、地震時に迅速に情報収集する

ために新たに開発された防災テレメータ装置（防災DCX）を利用して地震発生に際してほぼリアルタイムに新SIセンサーで測定される地震動強さ（SI値、加速度）や液状化発生に関するデータを収集し、それらをあらかじめ防災GIS上に50 m×50 mの大きさの140万個のメッシュに対して整備された地盤増幅特性や液状化層厚推定情報、導管情報等のデータベースと組み合わせて高精度に地震動空間補間、液状化空間補間を行い被害推定を実施する。また、低圧導管網からの漏洩ガスによる二次災害を防止するための新SIセンサーによる地区ガバナ感震遮断状況を監視し、必要場合は遠隔で遮断する等の制御を実施することで災害の軽減を狙い、防災レベルを大幅に向上させるものである。本稿では2001年7月に稼働

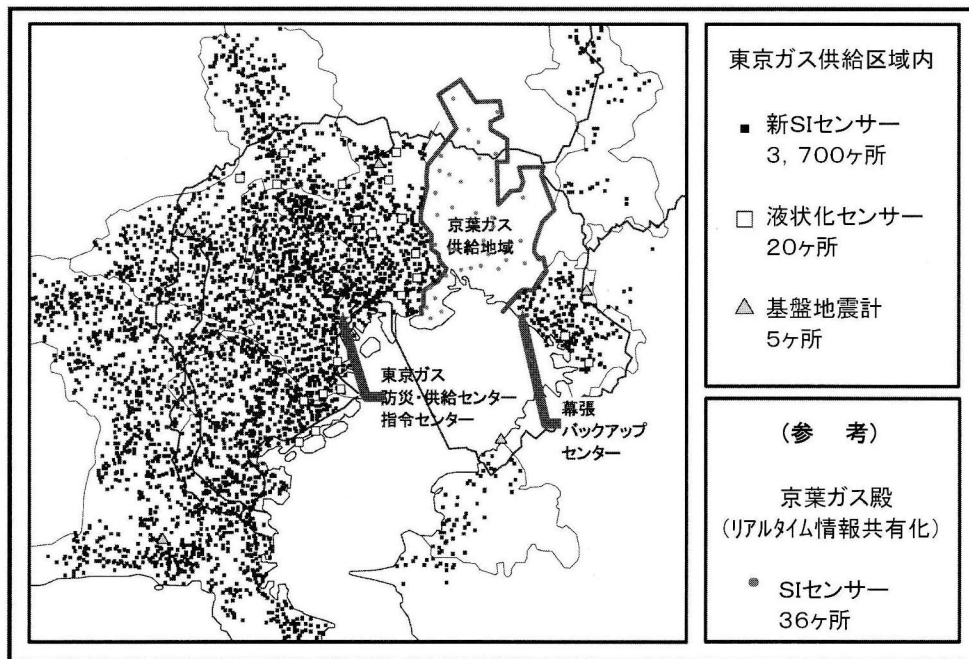


図1 SUPREME/地震センサー配置図

を開始したこのシステムの中核となる新 SI センサー及び SUPREME の迅速情報収集・遠隔遮断技術を中心に詳しく述べることとする。

2. 新 SI センサーの開発

2-1 新 SI センサー開発の背景

阪神・淡路大震災を契機として、地震時に破損

した低圧導管から漏洩した都市ガスが原因となる二次災害の発生を防止するために、ガス地震対策検討会¹⁾において、SI 値²⁾を用いた即時ならびに緊急供給停止の判断や供給停止の方法が提案された。(表 1 参照)

東京ガスでは、図 2 に示すように既に阪神・淡路大震災以前より即時もしくは緊急供給停止に対応できる低圧ブロックを 101 ヶ整備してきた。図

表 1 都市ガスの供給停止判断と実行(ガス地震対策検討会報告書¹⁾より)

	即時供給停止	緊急供給停止
1. 供給停止判断	①地震計の SI 値が 60 カイン以上の場合 又は②工場及び供給所ホルダー送出力の大変動や、主要ガバナ等、圧力の大変動により供給継続が困難な場合	①地震計の SI 値が 30 カイン以上 60 カイン未満程度で状況に応じる。
2. ブロック形成の方法	・二次災害防止を最重要視し、より安全側に立った供給停止が行えるブロック ・大きさ：200 km ² 程度	・二次災害防止を基本に、供給停止地域の極小化を考慮したブロック ・大きさ 50 km ² 程度
3. 供給停止方法	複数のブロックを有する場合、ブロック毎に遠隔遮断、又は感震自動遮断による即時遮断システムを整備する。	・手動停止を含めた遮断システムを整備する。 ・大規模事業者においては、遠隔遮断又は感震自動遮断による遮断システムの整備を検討する。

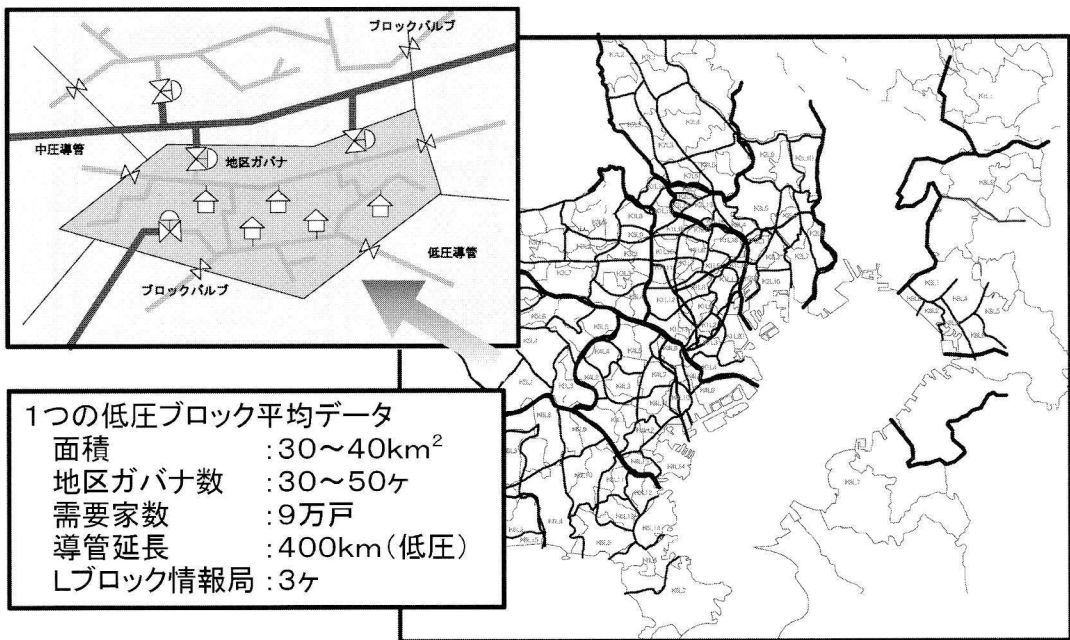


図 2 東京ガスにおける低圧導管ブロック概念図(計 101 ブロック)

2に示すように各ブロックの面積は30~40 km²であり、その中にガスの圧力を中圧(0.1 MPa~1.0 MPa)から低圧(約2.5 kPa)に制御する地区ガバナが30~50個配置されている。大地震時に被害が生じる可能性の高い低圧導管網の供給停止は、この地区ガバナ全てを遮断することで各ブロック毎に実現する。そこで、地震発生時に被害が甚大となる地域への供給停止を容易にするため、各地区ガバナには事前に設定したSI値以上の地震動が検知された場合に供給を遮断する「感震自動遮断装置」が取り付けられている。

また各低圧ブロック内にはSI値を計測する3ヶの地震計(Lブロック情報局)が設置され、地震発生直後にそのセンサーが計測したSI値が無線で指令センターに送信される。つまり、指令センターはこのSI値を用いて低圧ブロック毎に供給停止判断を行うことになる。このようにSI値は即時・緊急供給停止地域(ブロック)を決める指標またはガバナの供給停止を実行させるために使われることになり、供給停止は経営的課題でもあるから、地震計を含む地震監視システムの信頼性、SI値計算の高精度化がこれまで以上に望まれることとなった。

さて、東京ガスでは1986年より約3,700基の地区ガバナに遮断用SIセンサーと自動感震遮断装置を設置してきた。しかし、従来の遮断用センサーは電磁ノイズ等による誤遮断を防止するために、振り子の揺れ幅設定によって遮断を行う機械式センサーでON/OFFのみを出力する型式となっており大幅な誤差を含むものである。またLブロック情報局に用いている計測用のSIセンサーも高価であったにもかかわらず、当時のCPU能力が限定されていたため簡易的な計算アルゴリズムしか導入しておらず精度に問題があった。さらに、計測用SIセンサーは、電磁ノイズによる誤計測の問題から遮断等の制御用では使われていない。そこで、上述したSI値計算の高精度化、適切な遮断の実行を行うため、また従来のセンサーが設置して10年以上経過し更新時期になっていること、また近年のマイクロシニング技術等の進歩により安価で高性能な新しいセン

サーを作れる環境が揃ったこと、さらに阪神・淡路大震災以降のリアルタイム地震防災レベルの向上を図る必要があったことも背景として、ガバナ遮断、耐環境性に強い地震動計測も可能な高機能地震計、新SIセンサーの開発を行うこととなった。

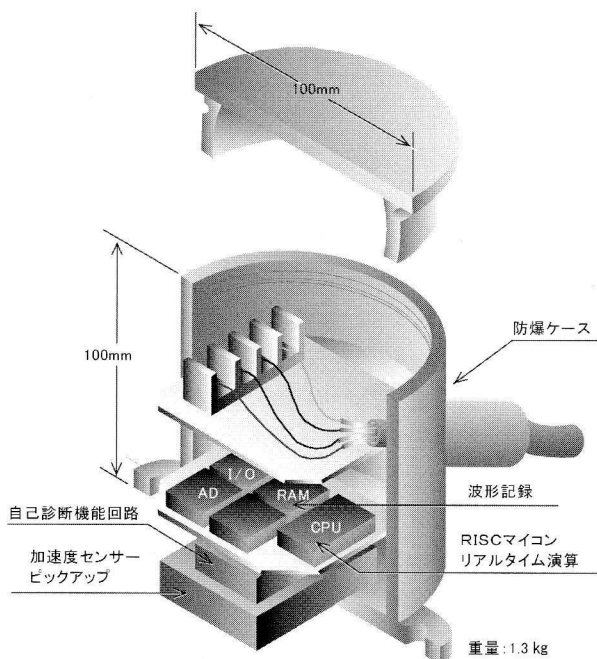
2-2 新SIセンサーの概要とコンセプト

新SIセンサーは、単機能・高価な既存センサーの欠点を克服するため、SI値演算、加速度波形記録保存、感震遮断信号出力、液化化検知等の多機能を1つのセンサーに集約すべく設計を行った。新SIセンサーの内部構成概要と主な機能を図3に示す。加速度センサーには3軸シリコンマイクロシニング容量型加速度センサー³⁾を採用している。シリコン加速度センサーは、サーボ型加速度センサーには分解能等の項目では性能的に及ばないものの、体感地震の計測制御用としては十分な性能を持ち、超小型軽量の特長を有している。地震センサー内部の加速度計測部においては、加速度センサーと温度センサーの出力を同時に取得し、キャラクターゼーション演算を行うことで温度特性の向上を図っている。加速度計測範囲はノースリッジ地震や阪神・淡路大震災にも充分対応可能なように±2,000 Galとし、計測精度は±5%以内を確保している。また、新SIセンサーは温度補正された加速度データを1波あたり3軸、10 ms サンプリング、分解能1/8 Gal、SI最大値を中心に120秒の記録としてSI値の大きな順に10地震分を内部SRAM上に記録保存することが可能である。その他、地区ガバナの制御のため無電圧リレー設定出力をもつ。さらに制御するにあたってのSI値/加速度/液化化警報の設定を自由に行うことができる。また、従来の計測型地震計では、センサー部と演算部が別ユニットとして構成されるのが通常であったが、今回開発の地震センサーにおいてはSI値演算アルゴリズムの最適化の結果、全演算を地震センサー内で行うことが可能となった。従って、防爆ケース内に小型シリコン加速度センサーを搭載するとともに制御用出力を含む全ての機能を集約し、小型、低価格

化を実現するとともに耐電磁ノイズ性を向上させた。また、新 SI センサーは加速度波形の変化からリアルタイムに液状化を判定するアルゴリズム⁴⁾を搭載しており、従来の土木工事を必要とする液状化検知方法と比べて、安価にかつ簡便に液状化発生を把握することを可能としている。新 SI センサーの主な機能について図 3 に付記する。

3. SUPREME の構成

SUPREME の構成を図 4 に示す。現在、東京ガスでは、従来の地区ガバナ SI 遮断センサーの更新の機会を利用して新 SI センサー、地区ガバナ遠隔監視用防災テレメータ装置（以下防災 DCX と略す）を約 3,700 個の地区ガバナ（ガスの圧力を 2.5 kPa 程度の低圧に制御する機器）に設置中



- ★小型・軽量・低価格
- ★高機能・高精度
- SI、加速度を計算／出力
高精度・リアルタイムSI演算
- 警報出力（SI値／加速度任意設定可）
- 遠隔監視／制御装置対応可
- 地震波形保存可（XYZ3軸10地震）
- 液状化検知
- 計測範囲：±2,000Gal
- 精度：±5%FSG
- 常時自己診断
- 耐久性（耐水、耐ノイズetc）
- 防爆性
- 誤遮断防止ロジック搭載（2種類）
- リアルタイム液状化検知

図 3 新 SI センサー内部構成概要及び主な機能

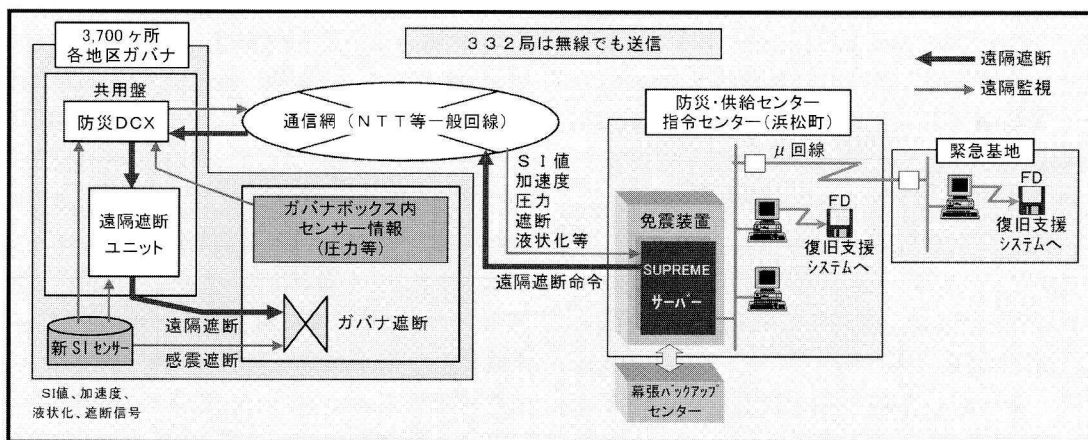


図 4 超高密度リアルタイム防災システム（SUPREME）の構成

であり、これらの機器と指令センターを通信で結ぶことにより、約 3,100 km² の供給区域の約 3,700 点 (0.9 km² に 1 個) での SI 値、PGA、圧力、ガバナ遮断、液状化警報状況等の観測および指令センターからの遠隔監視・制御が可能となる。

SUPREME はこれまでのリアルタイム地震防災システム SIGNAL⁵⁾ を包含して拡張したシステムである。例えば 3,700 個ある地区ガバナ等の地震時の情報のうち、新 SI センサーで測定される SI 値・加速度については 332 局は自営無線と一般回線、その他の約 3,400 局は NTT 等の一般回線のみを使用して送信される仕組みになっている。また、液状化警報については、20 ヶ所の液状化センサー⁶⁾ と 300 局の新 SI センサーからの警報は自営無線と一般回線、その他約 3,400 局は一般回線で送られる。地震時の通信の信頼性を考慮すれば、全ての情報を自営無線で送信することが望ましいが、コスト面で実現性が乏しい。そこで無線と一般回線を併用することとし、一般回線では必要な情報の 8 割を 20 分以内に収集することを目指した。まず NTT 等との折衝の結果、個々の地区ガバナと指令センターの一般回線は災害優先指定回線とし、地震時の通信の輻輳に対処している。また、より迅速に情報送信を行うために防災 DCX を開発して 3,700 地点全ての地区ガバナに設置している。SUPREME における新 SI センサーは 2003 年 3 月までに 2,300 基設置されており、最終的に 3,700 基の設置が完了するのは 2006 年度の予定である。ホストシステムは 2001 年 7 月に完成し、これまでにない超高密度リアルタイム地震防災システムが稼働を開始している。

4. SUPREME による地震時迅速情報収集

東京ガスでは、遠隔監視装置 (DCX200)⁷⁾ を、通常時の圧力管理業務を目的として 1994 年より全地区ガバナへの設置を行ってきた。地区ガバナのうち設置の困難な個所を除けば 2000 年度中に 3,700 ヶ所全数に設置され、全地区ガバナの圧力センサー等のガバナ情報や保安管理情報の把握が可能となってきた。

この遠隔監視装置からの情報を地震時にも用いることが SUPREME の構築の重要なポイントである。地震時だけで使うシステムは非効率的であるばかりか、通常時操作を行わないために地震時に的確に操作される確率は低くなる。通常時も使用されていれば、メンテナンスも行き届いているばかりか操作も習熟されていて、地震時に不安を残さない。しかし、現在の DCX200 を地震時に用いるには、“大地震時に多発する警報収集に時間がかかる” といった課題があり、これを解決するべく、「通常時の警報収集機能に支障をきたさない」という条件で地震時迅速情報収集機能を強化しソフトウェアを改良した「防災 DCX」を開発した。新機能の開発の結果、たとえば阪神・淡路大震災と同様な電話の輻輳条件で、20 分以内に必要な地震情報の 8 割を収集することが可能となった。3,700 基の地区ガバナのバッテリー仕様は 1 時間であり、この防災 DCX の設置により、地区ガバナの監視・遠隔遮断、高精度被害推定を SUPREME で実現することが可能となった。防災 DCX は 1999 年度に開発を完了し、2001 年 3 月までに地区ガバナ全数に設置を完了している。

5. SUPREME による地震時地区ガバナ遠隔遮断技術

5-1 背景

都市ガスの低圧供給網が阪神・淡路大震災で大きな被害を受けたが¹⁾、東京首都圏エリアでも大地震が発生した際は同様の事象が起これと考えている。都市ガス漏洩による二次災害防止のためには、即時にガス供給を停止しなければならない。このため、これまで我々は地区ガバナに感震自動遮断装置を取り付けてきた。しかし、現実的には地震時の低圧供給網の供給停止は低圧ブロック毎に行われ、そのブロックの全ての地区ガバナを閉止しなければ実現できない。しかし地盤条件の違いなどにより地震動は大きく変わるため、供給停止条件を満たしたブロック内の全ての地区ガバナが感震遮断をするとは限らない。また、新 SI センサーの機器故障があれば、そのガバナは当然感震

遮断しない。そのため地震後供給停止を行うブロックについてはガバナの停止巡回を行う必要があり、供給停止には時間・人手がかかる。また中圧導管網は高い耐震性を保持しており、地震時に被害の多い低圧導管を健全中圧導管網から迅速に切り離すことは中圧の供給継続及び復旧時の時間の短縮のために非常に重要である。SUPREMEにより地区ガバナを遠隔遮断することができればこの課題を克服できるが、無線を用いることはコスト面で不可能でありまた一般回線を用いる遠隔遮断に対しては信頼性（機器故障・ハッカー等）の確保が課題となっていた。

5-2 対策

今回、一般回線を用いて遠隔遮断を行う際に誤遮断に対する信頼性を向上させるため“遠隔遮断ユニット（以下TCユニット）”を開発し、SUPREMEから遠隔で一般回線を用いてガバナを遮断できるようにした。また、地震時以外に地区ガバナを遠隔遮断するニーズが100年以上にわたるガス供給の歴史の中でも全くないため、TCユニットによる遠隔遮断は、地震時のみ実行可能な機能とし、新SIセンサーと機械式感震器の双方のデータからTCユニットで地震の有無を判断することとした。また誤操作や機器故障・ハッカーの侵入による誤遮断を防止するため、防災DCXで通信チェック及びTCユニットで遮断命令の正誤判断を行い十分な信頼性を確保することとした。遠隔遮断の実施結果は即ホストにフィード

バックされる。この一般回線を用いた安全・安価かつ確実な地区ガバナ遠隔遮断の仕組みを図5に示す。

5-3 遠隔遮断の効果

地区ガバナ遠隔遮断を行うことにより人員を地区ガバナに巡回させることなく供給停止を極めて短時間で実施できるため、被害箇所からのガス漏洩を大幅に減少でき二次災害の発生を最小限に抑えることが可能となる。ここでは阪神・淡路大震災のデータに基づいて東京地区でシミュレーションを実施し、遠隔遮断技術を導入することで、どの程度危険度が低下できるかを検証した。

危険度を「供給停止すべき地域（SI値が高く供給停止基準に適した地域）における開ガバナ数と地震発災後の経過時間の積」と定義する。図6に示されたシミュレーションでは供給停止すべき地域に1,200基の地区ガバナが存在し、現状の感震自動遮断システムではそのうち850基が感震自動遮断するが350基が遮断しないままの状況として残ることになる。これを参集した人員で地区ガバナの停止巡回を実施すれば約39時間かかる。これが遠隔遮断を用いれば1時間以内に通信の断線した箇所等を除いてほぼ全ての地区ガバナの閉止が完了するため表2に示すように危険度は97%削減され、大幅な地震防災レベルの向上が図れることがわかる。なお、ここでは激震地区の一般回線の断線率を阪神・淡路大震災を参考として5%としている。また、動員状況や巡回歩掛かりにつ

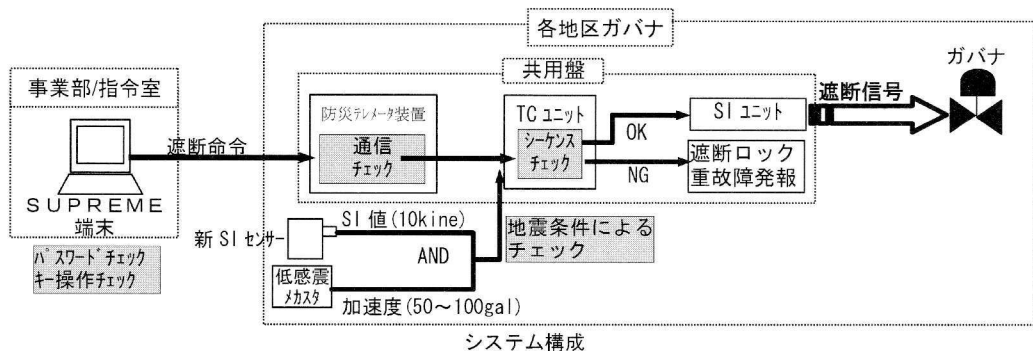


図5 SUPREMEにおける地区ガバナ遠隔遮断安全性確保の仕組み

いては、阪神・淡路大震災時の大阪ガス(株)の実績を基に想定した¹⁾。

6. SUPREME で実現されるその他の機能

6-1 高精度低圧供給網漏洩推定機能

SUPREME では、ほぼリアルタイムに最大 3,700 点からの地震動 (SI 値, PGA) 及び液状化情報が収集される。これを SUPREME に即した地理情報システムに蓄積されたデータと組み合わせることで地震動面の分布推定⁸⁾、液状化層圧面的推定⁹⁾、低圧供給網の被害推定¹⁰⁾ を高精度に実施する。低圧供給網の被害推定結果は、地震直後の被害全体像の把握及び低圧ブロックの供給停止又は継続の判断に利用される。蓄積データベースのうち、供給施設情報として 3,700 基の地区ガバナ及び中圧供給網は線情報として、低圧供給網については 50 m 単位のメッシュに集約して管種・口径毎の延長を整備している。また、地盤情報として微地形情報や供給エリア内に約 60,000 本の

ボーリングデータを収納している。図 7 に、2001 年 7 月 20 日に発生した小規模地震で SUPREME が捉えた超高密度 SI 値分布を、図 8 にそれを 50 m メッシュに補間した分布図を例示する。

6-2 超高密度加速度波形データによる事前防災

SUPREME はリアルタイム緊急措置だけでなく、事前地震防災にも利用が可能である。中小地震時に最大 3,700 点の新 SI センサーに蓄積される加速度波形データは、これまでにない超高密度データベースとなり、地盤増幅度の研究、地震動空間補間技術やゾーニング技術の検討に大きく寄与することになる。

7. ま と め

阪神・淡路大震災を教訓として都市ガス供給網、特に低圧供給網に対する緊急措置レベルの大幅な向上を目的として超高密度防災システム SU-

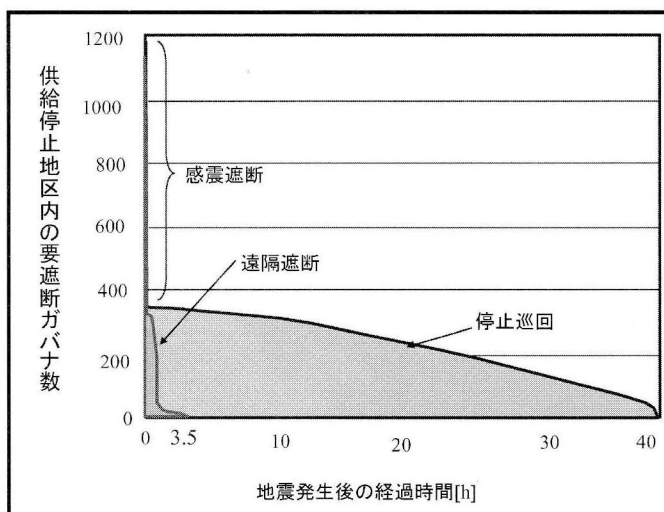


図 6 供給停止に要する時間の比較

表 2 危険度シミュレーション結果

	供給停止完了時間	危険度比
現状 (感震遮断のみ)	39 時間	1.0
遠隔遮断 (遠隔監視含む)	1 時間	0.03

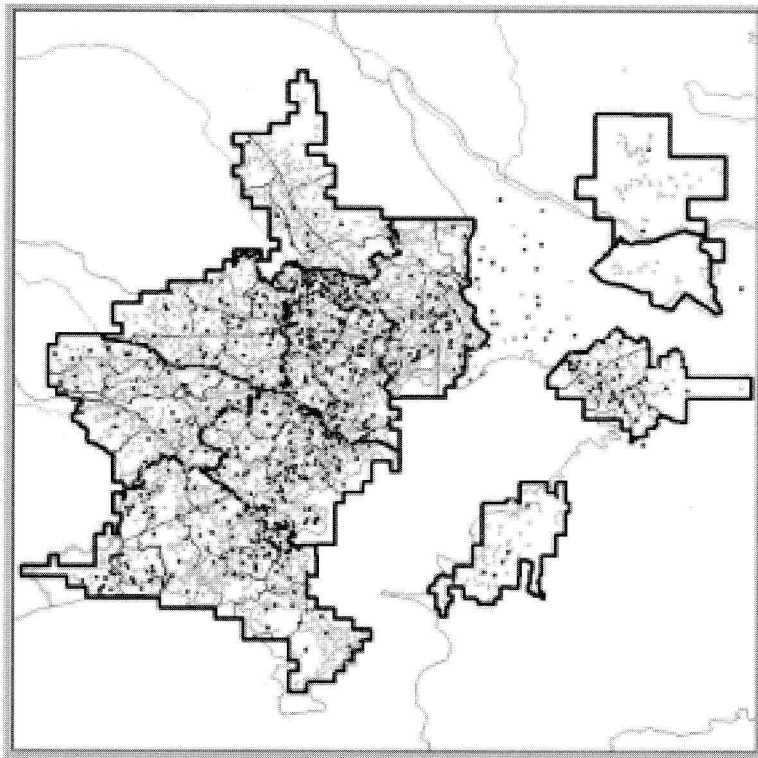


図 7 SUPREME 実稼働状況 (01.07.20 地震 SI 値分布)

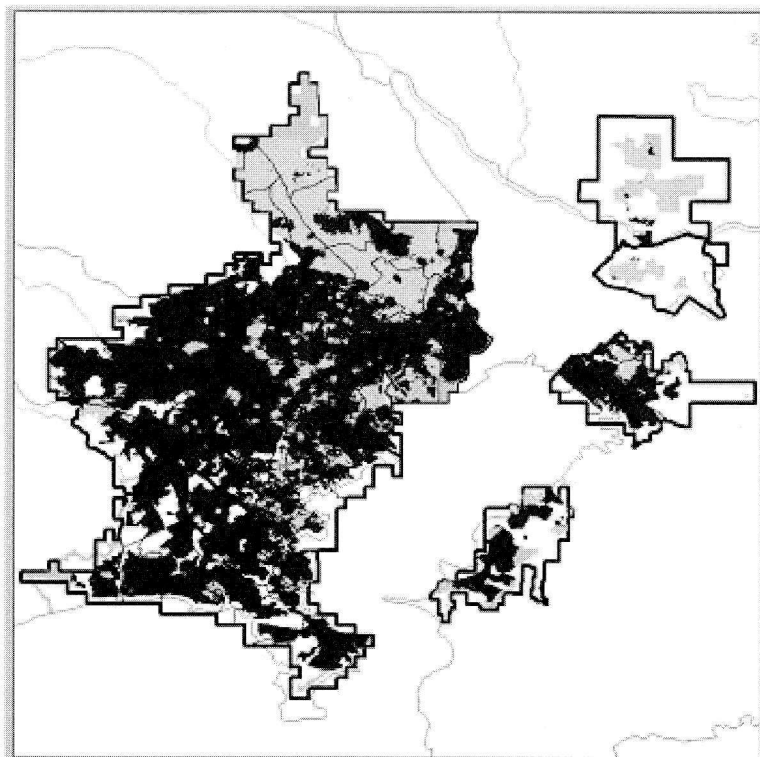


図 8 SUPREME 実稼働状況 (01.07.20 地震 50m メッシュ単位補間後 SI 値分布)

PREME の構築を開始した。SUPREME は約 3,100 km² のエリアに約 3,700 基の地震計（新 SI センサー）を設置し、双方向通信でモニタリング・コントロールする世界一超高密度リアルタイム地震防災システムである。SUPREME は、2001 年 7 月に一部稼働を開始した。これにより、都市ガス供給網の大地震時の防災レベルを大きく向上させると確信している。

参考文献

- 1) ガス地震対策検討会, 1996, ガス地震対策検討会報告書.
- 2) Housner, G.W., 1965, Intensity of earthquake ground shaking near the causative fault, Proc. 3rd WCEE, Vol. III, pp. 94-115.
- 3) Torabayashi, O., Takahashi, A., Tokue, R., 1996, 3-axis accelerometer, Trans. IEE of JAPAN, Vol. 116-E, No. 7, pp. 272-275.
- 4) 鈴木崇伸, 清水善久, 小金丸健一, 中山 渉, 2001, ゼロクロス周期を用いた液状化判定法の検知精度, 土木学会地震工学研究発表会, pp. 1413-1416.
- 5) 清水善久, 1997, 早期地震時被害推定システム— SIGNAL—, 計測と制御, Vol. 36, pp. 41-44.
- 6) 清水善久, 安田 進, 森本 巖, 1991, 液状化センサー, センサー技術, Vol. 11, No. 11, pp. 42-46.
- 7) (株)山武バンフレット, 2001, 簡易テレメータ装置 DCX200.
- 8) 石田栄介, 磯山龍二, 山崎文雄, 清水善久, 中山 渉, 2001, 防災 GIS を用いた地盤増幅度の面的整備と地震動面の分布推定に関する検討, 土木学会地震工学研究発表会, pp. 421-424.
- 9) 磯山龍二, 石田栄介, 安田 進, 東畑郁生, 清水善久, 小金丸健一, 2001, 超高密度地震計ネットワークを用いたリアルタイム液状化空間分布推定方法, 土木学会地震工学研究発表会, pp. 409-412.
- 10) 細川直行, 渡辺孝仁, 清水善久, 小金丸健一, 小川安雄, 北野哲司, 磯山龍二, 2001, 地盤条件を考慮した低圧ガスねじ継手鋼管の被害率予測式の検討, 土木学会地震工学研究発表会, pp. 1333-1336.

災害時の情報流通の課題

鈴木崇伸

1. はじめに

災害情報の流通に関する社会環境が変化しつつある。災害時の情報途絶の防止を目標にしていた時代から、積極的に情報収集して災害の減災に活用する動きに変わりつつある。その契機はやはり1995年の兵庫県南部地震であり、日本有数の大都市が壊滅的被害を受け、さらに全国民がテレビ報道を注視する中で、情報流通の不具合を知ったことによると思われる。

高度経済成長期に日本全国の電話による通信網やテレビやラジオによる放送網の拡充が進むにつれて、災害情報の中身は大きく変化し、行政、企業、市民それぞれ、災害情報の対応策を要求されるようになった。通信事業者は災害対応に関係する緊急通信を確保する要請を受けて「災害時優先電話」の制度をつくり、指定公共機関などに発信規制を受けないダイヤル番号を割り振り、必要最低限の通話を確保するシステムを確立した。また放送事業者は災害報道として、被害情報をすみやかに放映する体制をつくりあげ、テロップ放送などによる震度情報・津波情報は市民がいち早く災害を知る手段として、日常生活に定着した。東海地震を想定した大規模地震対策特別措置法によってこれらの情報伝達システムは、日本国内の標準となっているともいえる。

1995年1月に発生した兵庫県南部地震は近代的な大都市をおそった日本では初めての地震となった。発災直後、被災した住民においては、安否確認、避難、2次災害への対応などの情報が必要とされるのに対して、十分な対応がなされなかった結果、電話の輻輳、交通渋滞が引き起こされ、防災関連機関の対応をより遅らせることと

なった。防災関連機関においても、大規模な停電も加わって、電話、テレビ、ラジオに頼った旧来の情報システムは十分に機能せず、被害の状況を把握し、災害対応の体制を整えるまでに時間を要する結果となった。

本論文は、電気通信システムの兵庫県南部地震時の耐震性能に注目して、新しい通信メディアの防災性能の評価と、望ましいシステムについて報告する。

2. 通信設備の耐震性能

日本の電気通信を担ってきたNTTの防災設計思想と阪神・淡路大震災の被災状況をもとに通信設備の耐震性能を考える。電気通信設備は、大きく分けて屋外設備とビル内設備に分類できる。さらに通信端末機器が必要となるが、これは利用する側の設備である。屋外設備は通信ビルどうし、あるいは通信ビルと利用者をつなぐ設備であり、無線方式と有線方式に分けられる。主に用いられている有線方式の通信ケーブルは、太さによって配線方式が異なり、太いものは地下に、細いものは電柱上に配線される。それぞれ地下ケーブル、架空ケーブルと呼ばれる。通信ケーブルは古くは銅線が用いられていたが、ネットワークのデジタル化の進展にあわせて、高速・大容量の通信が可能な光ケーブルに置き換えられている。大量の地下ケーブルを効率よく収容するために、管路、マンホール設備が使われている。ケーブル条数が特に多い場合には、とう道とよばれるケーブル収容トンネルや共同溝が用いられる。通信ビル内には回線の接続を行う交換機や伝送装置のほか、停電にそなえたバックアップ電源、空調機器、無線アンテナなどが設置される。

屋外設備が現在の設備形態に変わったきっかけは、1964年の新潟地震であったと考えられる。新潟地震以前は、鉛被ケーブルと呼ばれる紙絶縁の銅線を鉛の外皮でまとめたケーブルを地中に直接埋設する方式か、地盤の運動に追従できない金属管で防護する方式であったが、強い地震動や液状化に伴う地盤変位によって、新潟市内の屋外施設が壊滅する結果となった。その後は、ケーブルは防水性、可とう性に優れたプラスチック被覆のケーブルに変わり、地下ケーブルはすべて伸縮性能をもたせた管に収容する方式となり、兵庫県南部地震に至っている。またネットワークとしての信頼性向上策を徹底し始めたのは1968年の十勝沖地震で本州と北海道の通信回線が途絶した教訓からである。兵庫県南部地震以前の通信確保の指針を図1に示す。震度階V、VI、VIIの段階に応じて、施設の耐震性能を決めて、ネットワーク全体で所定の機能は果たすという思想である¹⁾。

こうした状況で兵庫県南部地震が起こったが、屋外設備の被害状況を図2に示している^{2),3)}。新潟地震では、新潟市内で90%以上の回線が不通となるほどの壊滅状態であったが、設備の強化を進めたことによって、図1に示した被災規模の想定程度に収まっている。図中に19万回線が不通とあるが、図に示した8支店の回線数は約200万回線であり、約10%が断線等の影響で不通になったことになる。地下ケーブルの被災率が

0.2%程度、架空ケーブルの被災率が2%程度であることから、架空ケーブルの被害が電話不通の主な原因であった。石川の報告⁴⁾によれば、神戸地区にあった約3万回線の専用線のうち、3,500回線が不通になっており、一般回線の率とほぼ一致する。改善されたとはいえ、阪神クラスの大地震では10%程度の電話回線が使用不能になることが判明した。

3. 電話の輻輳と対策

通信設備の耐震強化、信頼性向上策と同時に通話が殺到することでつながりにくくなる輻輳の問題もでてきた。1970年代の後半に電話が日本全体に普及し、日常の一部になり、見舞い電話が風習化した影響である。その対策として、防災関係機関の重要通信を確保する目的で、災害時優先電話の制度が導入され、現在も続いている。電話システム自体、すべての利用者が一斉に通話することは想定しておらず、統計データにもとづいて、つながらぬ確率をみこした設計を行っている。設計容量を超える状態では、発信・接続規制をしてトラフィックを制限することになり、その救済策として災害時優先電話を取り扱うことが電気通信事業法で定められている。規制された区域からの区域から発信する、あるいはそこへ接続する際に優先権をもたせることにより、重要通信を確保す

通信確保の指針

- 震度7（激震）——— 通信網の大幅な機能低下は防げる
- 震度6（烈震）——— 通信の質の劣化はあっても途絶はない
- 震度5（強震）——— 運用上、まったく支障はない

被災規模の想定（参考）

震度階	局舎及び鉄塔	局内設備	局外設備
7（激震）	一部の被害は発生するが倒壊はない	機能上の損傷を受けるが大部分は修理可能	とう道を除く地下、架空設備は随所で大きな被害
6（烈震）	機能上の影響はない	軽微な損傷はあるが機能上は影響ない	とう道を除く地下、架空設備は被害を受ける
5（強震）	ほとんど損傷なし	同左	若干の被害は受ける（架空、宅内）

図1 NTTの地震対応方針（兵庫県南部地震前）

(被災8支店：神戸、神戸西、西宮、尼崎、明石、洲本、加古川、豊中)

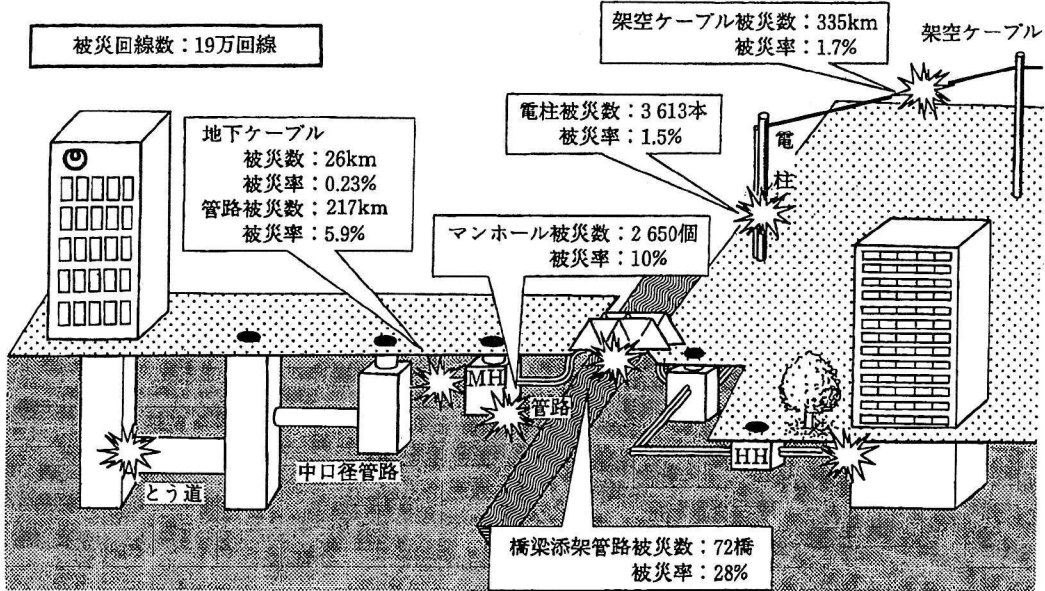


図2 NTT設備の被害状況(被災8支店)¹⁾
(参考文献2)中の図7.7を転載)

る制度は、防災関係機関の情報流通の基盤となっている。

兵庫県南部地震では、地震発生直後から爆発的なトラフィックが発生した²⁾。中でも大阪エリアについては発生10分後から急激な一斉発呼となったと言われている。その後、全国からの安否確認等の通信のため、神戸エリアでは1日のトラフィックで通常の10倍、ピーク時では約50倍のコールがあった。このようなトラフィックの増大はもちろん安否確認などが主であるが、地震直後の多量の受話器外れや一部の救急機関などへの電話の集中が輻輳を増幅したと言われている。

NTTではこのような状況で通信規制を行い、電話のかかりにくい状況が続くこととなった。このような混乱は3~4日続き、回線の緊急増設などにより、21日頃にはほぼ平常に戻ったといわれている。

回線被害は10%程度であるにもかかわらず、電話がかからない状態は防災上、大きな問題であり、NTTでは「災害時伝言ダイヤル」と呼ばれるボイスメールシステムを導入しているが、その効果は未知数といえる。

4. 新しい通信メディアと災害時の性能

20世紀末は情報通信分野において新しいメディアがいろいろと登場して、社会的にも普及した時期であった。携帯電話、インターネットなども、兵庫県南部地震当時は普及率が低く一部の人のメディアであったが、現在では大半の人が利用する普通のメディアとなっている。電話とテレビ・ラジオが災害情報の流通基盤であったが、急速に様変わりしてきている。

携帯電話も神戸地区ではサービスが開始されており、地震直後は固定電話よりもつながりやすかったが、報道関係、復旧関係の人々が阪神地区に集まるにつれて、発信できなくなったと聞く。携帯電話も一般の電話網の設計と同じように、一定の回線容量で設計されており、容量をオーバーすればかけられなくなるのは同じである。地震直後にかかりやすかったのは、設備の先行投資による余裕があったためと考えられる。固定電話よりも回線数が増えた現在では、日常の一定の使用量にもとづいた経済設計が行われており、輻輳に関

して固定電話との差異はないと予想される。

インターネットは交換機と電話機のように閉じたネットワークではなく、標準のプロトコルを用いているネットワークが相互に接続されていく仕組みである。このオープン性がインターネットを急速に普及させた要因であり、IP電話が普及し始めるなど、従来の電話網を吸収する勢いで拡大している。閉じたネットワークでないことから輻輳の影響も小さいと考えられ、災害時には有利な通信媒体である。反面、相互接続性を高めるためにセキュリティが弱くなるのは避けられず、利用する側で対策を取る必要が出てくる。

インターネット通信で課題となるのは、最寄りのサーバーにアクセスするまでの通信の確保であり、音声回線を使ったFAXモデム、ADSL、FTTH、無線LANなどさまざまなサービスが開発されているが、基本は電話と同じ、架空ケーブルと地下ケーブルによる有線方式か、アンテナどうしの無線通信になる。阪神クラスの地震災害を考えた場合、ハード的な耐震性能は電話と同等と考えられ、この区間においては10%程度の回線断が想定される。インターネット基幹網は冗長度の非常に高いネットワークであり、ほとんど問題はないと考えられる。

放送系のサービスでもデジタル放送基盤の整備で、双方向の情報伝達が可能になりつつあり、通信と放送の垣根がなくなろうとしている。次々にでてくる新しい通信メディアを災害情報の流通基盤に活用する必要があるが、当面の間は、さらに新しいメディアが登場し、めまぐるしく変わることが予想される。その際、災害時の性能評価数値が必要と考える。

ハード的な性能では、兵庫県南部地震のNTTの被害率である10%をどの程度下回るかが目安になる。地下ケーブルのみで構成されたネットワークであれば10%を大きく下回ることが予想され、さらにとう道内ケーブルだけで構成されていれば、配線区間の被害率は0%となる。利用者が要望するのなら、信頼性の高い屋外施設は準備されている。

またソフト的には、通信が成功する確率と伝送

の実効速度があげられる。先に述べた平常時の50倍の輻輳状態で、確実に通信できる公衆サービスは実現が難しいが、専用網であれば可能となる。後は経済性だけの問題となる。情報流通基盤が多様化する現在、災害時の性能評価基準を明確にする必要があると考える。

5. 災害情報ハイウェイ

災害時に情報途絶がないような仕組みを考えていた時代から、災害関連の情報を積極的に流通させて、減災を目指すリアルタイム地震防災のシステムづくりが各所で進められている⁹⁾。その際、平常時とは異なる通信事情に十分に配慮する必要があるのはいうまでもない。前項で述べた災害時の性能評価基準で不備があるならば、代替策を準備して災害に備える必要が出てくる。

いろいろな企業体が災害時の通信機能に不安を抱えながらシステム整備をするのなら、災害時優先電話の設定や防災無線の整備が制度的に行われたように、情報化時代の新たな伝達手段として災害情報ハイウェイの構築を提案したい。防災関係機関の場合、災害時に飛躍的に通信量が増大すると考えられるが、信頼性の高い大容量の共通ネットワークをインフラとして準備しておくのが望ましいと考える。災害発生直後の情報収集と伝達は多くの対策マニュアルで優先課題とされており、また関連機関との情報交流も盛り込まれている。地震のような広域で複合型の災害では流通する情報量は飛躍的に増加するものと考えられる。

コンピュータを介して大量のデータを流通させるようになると、先に述べたように、災害時に機能が保証される優先電話や防災無線では十分とはいえず、また公衆網は輻輳によって機能低下による影響が大きい。そこで防災関連機関で共同してプライベートネットワークである「災害情報ハイウェイ」を構築する案が考えられる。図3にイメージ図を示す。大容量で地震など災害時にも十分な信頼性をもつネットワークをインフラに、情報の流通チャンネルやフォーマットをルール化して、情報の発信と受信を効率よく行えるシステム

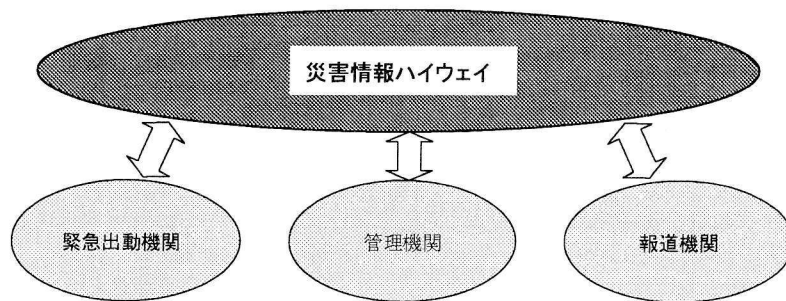


図 3 災害情報ハイウェイのイメージ

の実現は、現在の先端技術の組み合わせで十分可能であろう。同一機関内の情報流通と外部との流通などセキュリティの問題が解決されれば、各機関の防災システムを統合する総合ネットワークに発展させられる。実現に向けては課題も多いが、「災害情報ハイウェイ」というインフラができれば、情報流通のルール化も連動して進展すると考えられる。

6. おわりに

電話とFAX、防災無線が情報のやり取りの中心であった時代から、さまざまな通信メディアが登場して選択肢が多い時代となった。災害時に大量のデータを流通させる基盤を築くためには、ハード的あるいはソフト的につながるのかという性能評価を行って、情報システムを考える必要がある。商用の通信メディアの場合、不特定多数の利用者を対象にするために、その信頼性は共通的な水準にならざるをえず、それ以上の水準を必要とする利用者は、自らの責任において信頼性向上対策をとることが基本となる。

防災関係機関ごとに、災害時に如何に通信を確

保して、即座に対応するかという対応策を検討しているが、関係する機関が共有する、信頼性の高い流通基盤があれば、通信を確保する検討は不要となり、災害時の対応に専念できる。災害時有線電話や防災無線が制度的に整えられたように、災害情報ハイウェイを整備することが望ましいと考える。

参考文献

- 1) 情報流通インフラ研究会, 2000, 情報流通インフラを支える通信土木技術, 電気通信協会.
- 2) 阪神・淡路大震災調査報告編集委員会, 1997, 阪神・淡路大震災調査報告, ライフライン施設の被害と復旧, 土木学会・地盤工学会・日本機化学会・日本建築学会・日本地震学会, 土木学会, 丸善.
- 3) 武井 務, 牧 春久, 1995, 阪神・淡路大震災の被害及び復旧取組み状況, NTT 技術ジャーナル, 6月号.
- 4) 石川 宏, 1996, 情報通信ネットワークの危機管理, オペレーションズリサーチ 2月号.
- 5) リアルタイム地震防災研究小委員会, 2000, リアルタイム地震防災シンポジウム論文集, 土木学会.

ITを活用した次世代型地震防災情報システムの開発

後藤洋三

1. はじめに

文部科学省は平成14年度から5カ年計画で「大都市大震災軽減化特別プロジェクト」を開始した。この報告ではまずプロジェクトの全体像を概説し、次いで、プロジェクトの中の研究課題の一つで、ITを活用した次世代型地震防災情報システムの開発である「震災総合シミュレーションシステムの開発」について、その開発計画と技術課題を紹介する。

2. 大都市大震災軽減化特別プロジェクト (大大特)について

(1) 大大特の背景

文部科学省は「ライフサイエンス」, 「情報通信」, 「環境」, 「ナノテクノロジー・材料」, 「防災」の5分野について、あらかじめ課題と方法を絞り込み、コアとなって実施する機関もあらかじめ選定して研究開発を委託する事業を2002年度から開始した。これらの委託事業は「新世紀重点研究創世プラン～リサーチ・レボリューション・2002(RR2002)～」と呼ばれており、その「防災」分野の研究開発委託事業が「大都市大震災軽減化特別プロジェクト」である。

このプロジェクトの目的は、東京首都圏などの大都市圏において、阪神・淡路大震災級の被害をもたらす大地震が発生した際の人的・物的被害を半減化するための技術基盤を確立することである。

(2) 大大特の構成

プロジェクトは次のI～IVの大課題で構成されている。

I. 地震動(強い揺れ)の予測

「大都市圏地殻構造調査研究」

地震発生源の特定が難しい関東平野南部や近畿圏などの大都市圏において、大地震を発生させる仕組みを解明するため、大深度弾性波探査等による大規模な地殻構造の調査研究を行い、これに基づき、高精度の地震動予測を行うための断層モデルと地層構造モデルなどを構築する。

II. 耐震性の向上

「震動台活用による耐震性向上研究」

建造物の耐震性向上による被害軽減を合理的に実現するためには、大地震により損傷しても人的被害や崩壊が避けられる建造物とすることが望ましい。そのためには、実大の建造物が大地震により損傷する過程を実験的に再現して設計を改善する研究が必要である。ここでは、平成17年に兵庫県三木市に完成予定の実大三次元震動破壊実験装置を活用した実験が行われる。具体的には、高精度加振制御技術の開発と震動台に入力する三次元地震動データベースの構築などの利用環境整備、実大鉄筋コンクリート建物の震動実験、地盤・基礎建造物の大型土槽震動実験、木造建物の震動実験が進められる。

III. 被害者救助等の災害対応戦略の最適化

「災害対応戦略研究」

大地震が発生した場合にある程度の被害が発生するのは避けられない。その影響を最小限に留めるためには、地震災害発生後の様々な災害対応行動を最適化していくことが必要である。この課題の第一項目は、ITを活用した次世代型地震防災情報システム「震災総合シミュレーションシステム」の開発である。第二項目は、高層ビル、地下空間、臨海部の津波、密集空間、帰宅難民など、大都市特有の環境下で発生する地震災害の分析と

シミュレーション技術の開発、第三項目は、東海・南海・東南海地震などの巨大地震・津波の影響を受ける沿岸部連担都市圏の総合的な地震防災対策技術の開発である。第四項目は、レスキューロボット等次世代防災基盤技術の開発で、倒壊建物に閉じこめられている被災者の探索や危険域に入って被災状況を調査するための情報収集ロボット、多数分散した携帯端末やセンサからの情報を統合し被災地状況を推定するセンシング技術、ヒューマンインターフェース等の研究開発が行われる。

IV. 地震防災対策への反映

ここでは、上記Ⅰ．～Ⅲ．で述べた研究開発の成果等を地震防災対策の現場に反映するための政策・制度のあり方の研究を行う。具体的には、木造個人住宅を中心に耐震診断と耐震補強などに関わる取組を促進させる方策、災害情報の適切な伝達方法と伝達体制、復旧・復興を円滑に推進するための政策・制度のあり方に関する研究開発が進められる。

(3) 研究開発組織

研究開発の中核となるコア機関と、コア機関との連携のもとで研究を分担するサブ研究チームにより全体の研究が実施される。コア機関は次の諸機関である。

研究大項目	コア機関
Ⅰ. 地震動(強い揺れ)の予測	東京大学地震研究所 京都大学防災研究所 独立行政法人防災科学技術研究所
Ⅱ. 耐震性の向上	独立行政法人防災科学技術研究所
Ⅲ. 被害者救助等の災害対応戦略の最適化	独立行政法人防災科学技術研究所 地震防災フロンティア研究センター NPO法人国際レスキューシステム研究機構 京都大学防災研究所
Ⅳ. 地震防災対策への反映	独立行政法人防災科学技術研究所

サブ研究チームにはおよそ60の研究機関が参加している。

3. ITを活用した次世代型地震防災情報システム「震災総合シミュレーションシステムの開発」について

著者が所属する独立行政法人防災科学技術研究所地震防災研究フロンティアセンター川崎ラボラトリーがコア機関として担当する「震災総合シミュレーションシステムの開発」の開発構想と技術課題を以下に細述する。ここで述べる開発構想の多くは川崎ラボラトリーの竹内郁雄、角本繁、両氏と研究参加者の貢献によるものである。

(1) 研究開発のコンセプト

1995年の阪神淡路大震災では被災直後から情報収集・伝達が遅延し、被災状況の把握、支援要請、救急救命活動などが混乱した。復旧の過程においても、無秩序な工事の輻輳や交通渋滞が頻発した。さらに、避難所や仮設住宅の運営、メンタルケア、瓦礫撤去などの被災者支援、生活復旧支援の面においても課題を残す結果となった。

これらの反省から、政府諸機関と多くの自治体が突発的な自然災害の発生を想定した防災情報システムの整備・改善を進めてきた。システム整備は継続的に進められており、その中で、大大特の「震災総合シミュレーションシステムの開発」は、急速に発展してきたITを活用した次世代型の地震防災情報システムを研究し、自治体での使用を想定したプロトタイプを開発しようとするものである。

研究開発のコンセプトは以下に要約される。

- ・先端的なITの災害現場と連携した活用
- ・安価で導入が容易なシステムの実現
- ・災害情報収集と情報通信の高度化
- ・平常時業務とのシームレスな連携を実現するリスク対応型地域管理情報システムの適用
- ・災害現象の予測を高度化する災害分析・推定シミュレーションの実現
- ・災害現象と災害対応行動の時間変化を予測する災害予測・対応シミュレーションの実現
- ・最適な災害対応行動を選択する意志決定の支援

の高度化

- ・ 発災直後から復旧復興に至る地域の変化情報を記録し、直後の対応だけでなく長期にわたる生活再建や町作り計画を支援するシステム
- ・ 緊急時にも高信頼・高性能に作動するシステムの実現

(2) 震災総合シミュレーションシステムの構成とリスク対応型地域管理情報システム

図1は震災総合シミュレーションシステムの構成を概括的に示したものである。リスク対応型地域管理情報システム概念にもとづいており、破線で囲われた範囲が自治体の平常時システムである。図中の時空間データベースは、時間軸と空間座標軸で決まる領域に地域情報を収納したものである。このデータベースは自治体の平常時の業務で扱われる住民、建物、ライフラインなどの変化情報によって常に最新なものに書き換えられる。

点線の範囲が災害時システムである。地震発生時にシステム全体が平常時モードから災害時モードにシームレスに切り替えられ、災害分析・推定シミュレータ群と災害予測・対応シミュレータ群が起動される。同時に、実世界の災害情報が取り込まれ、シミュレータからの推計情報と統合処理されて、災害対応に必要な情報が分かり易く表示

される。さらに、国の各省庁や都道府県、周辺自治体、自衛隊、ガス・電気・通信などのライフライン企業、交通関係企業などと防災情報の共有を実現する。

後述の(9)で述べるように、自治体内に比較的簡便な災害時システムを置き、自治体内の堅固な場所か自治体から離れた場所に高度な災害時システムを置くことが考えられる。この高度なシステムでは、多量な画像データの解析や多数の並列シミュレーションを高速で処理する必要がある。そのような機能を安価な機材で実現するためPCクラスタを導入する。

さらに、このシステムは時空間データベースに発災直後から復旧復興に至る地域の変化情報を記録するので、災害時システムから平常時システムにシームレスに回帰しつつ長期にわたる生活再建や町作り計画を支援する情報システムとなる。

(3) 自治体の平常時システムと時空間標準データ構造

平常時における自治体の地域管理情報業務とは、地域の住民、建物、ライフライン施設、養護施設、医療施設、消防、学校等にかかわる情報を、窓口業務や内部業務を通じて常に最新の情報にアップデートしながら蓄積する業務といえる。例

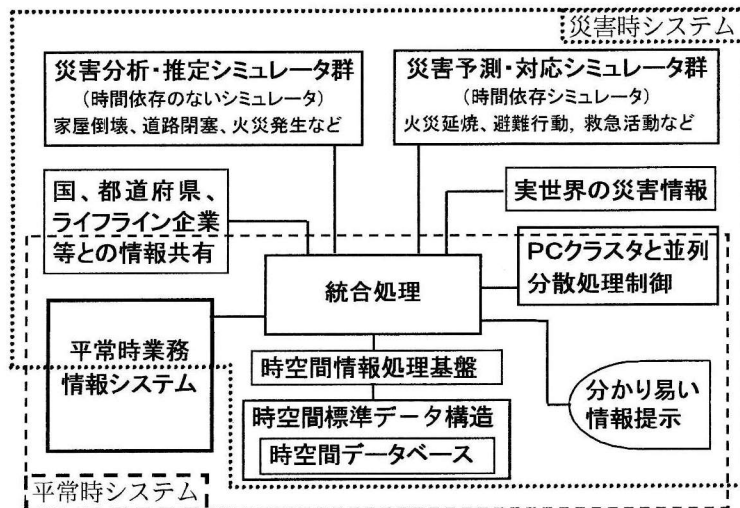


図1 震災総合シミュレーションシステムの構成

例えば、住民の情報は住民台帳、建物の情報は固定資産台帳等に窓口業務を通じて記載される。従来のシステムは、これらの情報を町丁目と氏名を検索キーとした帳票ファイルで管理するのが一般的である。それに対しリスク対応型地域管理情報システムは、自治体情報全般を町丁目ではなく時間軸と空間座標軸を検索キーとする時空間標準データ構造で管理する。図2がそのデータ構造の概念を示している。例えば、世帯ごとの所得を見たい場合、従来型のデータ構造では住所コードや世帯主コードを検索キーとしたいくつかの帳票からデータを検索して作表することになるが、時空間標準データ構造では地図上で定義される領域に住所、世帯主、所得、生成と消滅の時間が貼り付けられる構造となっているので、地図上の領域を検索することにより目的の集計表が完成する。

世帯主や所得は時間と共に変化する。住所表示も変化することがあるが、それらは空間座標軸上で位置が決定され時間軸上で時刻が決定される領域の形状と属性の変化として記述される。図3は時空間データベースの概念を示したものである。時間軸をある点に固定すればデータベースから属性データの空間分布が抽出され、空間座標軸をある

点に固定すれば形状データと属性データの時間変化が抽出される。

時空間標準データ構造は自治体業務のほとんど総ての情報を収納できる構造であることから、自治体内の様々な局部で行われている業務の情報共有化に大変有効なツールとなる。さらに、地震災害の勃発とその後の復旧復興の過程は形状データと属性データの急激な時間変化の過程であり、時空間標準データ構造はその記録、抽出、分析に適したデータ構造であるといえる。

(4) 災害分析・推定シミュレータ群

このシミュレータ群は時空間データベースの構造物に関するデータと地震計などからの観測情報を用いて、発災後の時間的変化を実用上考慮する必要のない災害現象のシミュレーションを行う。次世代システムにおいてこのシミュレータ群の持つべき要件は、段階性、更新性、個別性である。

段階性とは、要求される速報性と入手できるデータの精細度に応じたシミュレーションができることである。例えば、第1段階のシミュレータは、震源近傍の地震計の情報を活用し、当該自治体の地域にS波主要動が到達するまでに地震強

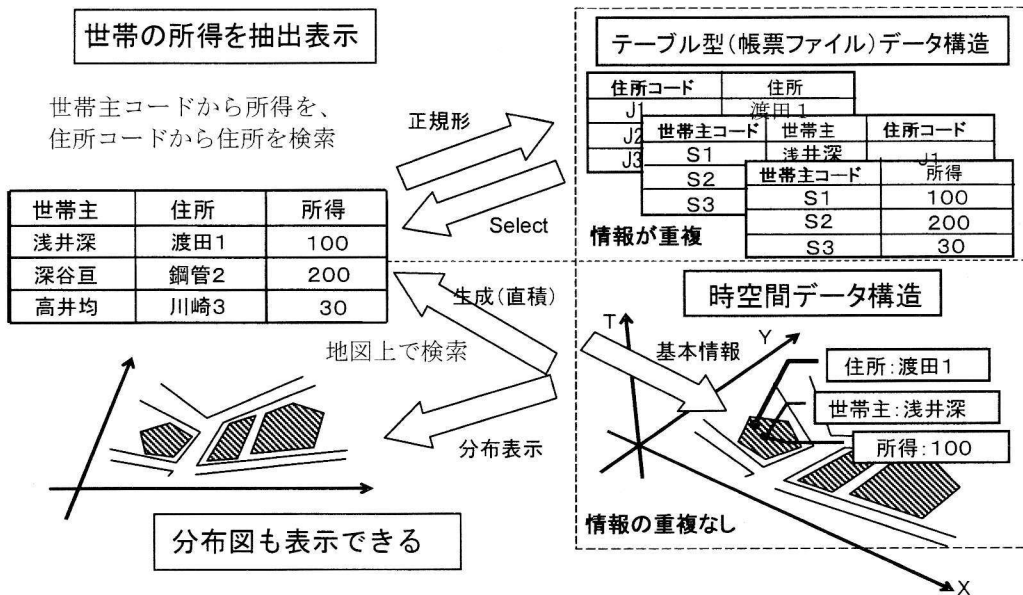


図2 時空間データ構造と従来のテーブル型データ構造

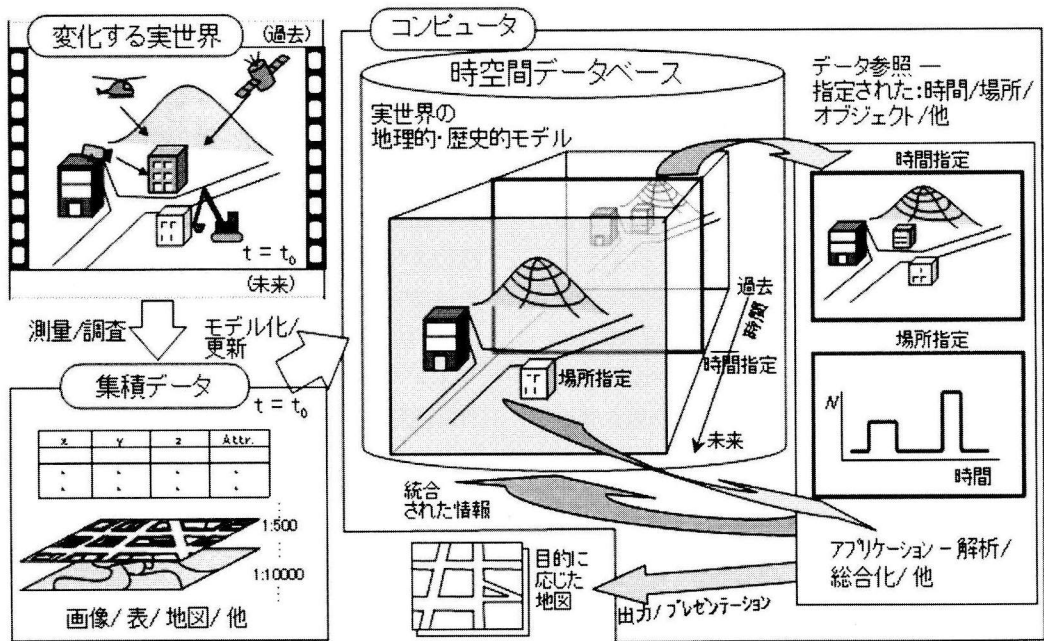


図3 時空間データベースの概念

度を推定し警報を発する。この段階では速報性が特に重要であるから、当該地域の予測震度が表示されれば十分である。この予測震度をトリガーとして、リスク対応型地域管理情報システムの日常モードから災害モードへの切り替え、自治体防災部門の緊急対応体制の立ち上げ、学校、病院などへの警報発信などを行うことができる。第2段階のシミュレータは、地震発生後数分で入手される計測震度情報を使い、比較的簡便な震度と被害率の経験則によって、行政区画ごとに被害戸数、火災発生件数、死者・負傷者数などを推計し表示する。これらの情報は、自治体の初動体制の構築に役立てられる。第3段階は、地域に配置されている地震計、K-NET、公益企業体の地震計などから観測波形が収集され、地震動のスペクトル特性や強度分布を詳細に決定できるようになった段階である。シミュレータは、建物の基本構造、築年、高さなどのデータを用いて建物1軒1軒の被害確率を推計し、道路施設、河川堤防、ライフライン施設についても場所ごと、施設ごとに被害確率を推計する。これらの情報は、自治体の対応戦略、支援要請、緊急復旧計画などの決定に役立てられ

る。

更新性とは、上述の推計結果を部分的な実災害情報により適時キャリブレーションし修正できることである。地震発生後、住民や地域の防災機関からの通報、リモートセンシングなどにより実被害情報が収集される。情報は時間と共に増えていくが、得られた情報により全体の被害推計を更新し、逐次真値に修正していく機能が必要である。

個別性とは、ある区域の被害率、例えば住宅1,000棟の内で、倒壊50棟、半壊150棟などと推計するだけでなく、個々の建物、個々の構造物について被害確率を推計し、家屋の被災箇所や道路の閉塞箇所などを個別に推定できることである。個別的な被災箇所の推定は災害対応戦略を支援するだけでなく、事前対策の推進にも効果的である。

(5) 災害予測・対応シミュレータ群

地震直後から復旧復興期に至る様々な局面で多数の候補の中から最適な対応行動を選択することが要求される。そのような選択の際に、例えば火災延焼に対する消火、避難に対する広報などの効

果を、実時間より早く推定するシミュレータがあれば大変助かる。しかし、地震災害の進展は社会全体の多様な事象の相互作用の過程であり、地震ごと、地域ごとに個別的な様相を持つ。そのため、対応行動の効果を確定関数的なモデルで推計することは困難である。したがって、対応行動が影響する災害の予測では、物理的な災害シミュレータと、コンピュータ上に構築される仮想災害空間において個々の行動単位が目的意識を持ち自律的に周辺状況を認識して行動するエージェントモデルによるシミュレータを、時系列で相互作用させる方が見通しを持てる。これは、究極には人間1人1人、車両1台1台をモデル化する大規模なマルチエージェントシミュレーションを実時間より相当に速く行うという挑戦的な開発となる。地震発生後の24時間程度を対象とすると、避難行動、消火活動、救命活動、救援資材運搬、などのエージェントモデルが考えられる。

(6) PC クラスタと日常業務用パソコンの活用

以上に述べた情報処理、特に大規模なマルチエージェントシミュレーションを高速で実行するために、多数のパソコンを結合した大規模並列分

散処理システムを開発する。システムの心臓部にPCクラスタを置き、その周辺にネットワークを介して日常業務用のパソコンを結合（災害時に動員）するシステムである。図4がその概念図で、このようなシステムには次のメリットがある。

- ・比較的安価で高い演算処理能力が実現できる。
- ・自治体の規模の大小に対応してシステムの規模を伸縮できるスケラビリティを有する。
- ・部分的な被災に対して機能が大幅に低下しないシステムが構成される。
- ・日常業務用のパソコンは適時更新されるので、パソコンの経時的な陳腐化が回避される。
- ・日常業務で使い慣れたパソコンを災害時にも使用することにより緊急時の対応能力が向上する。

(7) 大規模分散シミュレーションアーキテクチャ

上記(6)のハードシステムの能力を引き出すためには、災害対応に適した大規模分散シミュレーションアーキテクチャを開発していく必要がある。図5が分散シミュレーションアーキテクチャの概念である。以下の開発課題があげられる。

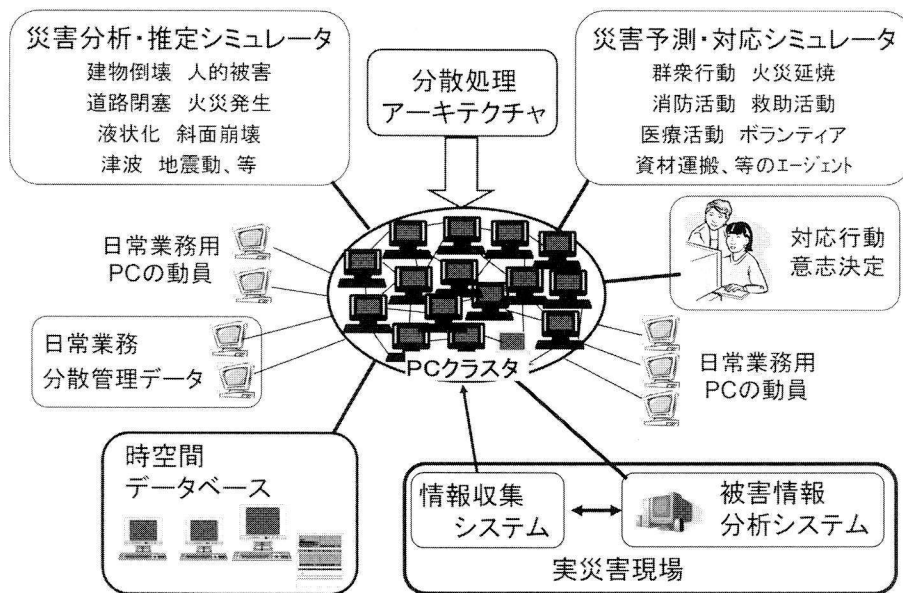


図4 PC クラスタと日常業務用パソコンを活用するハードシステムの概念図

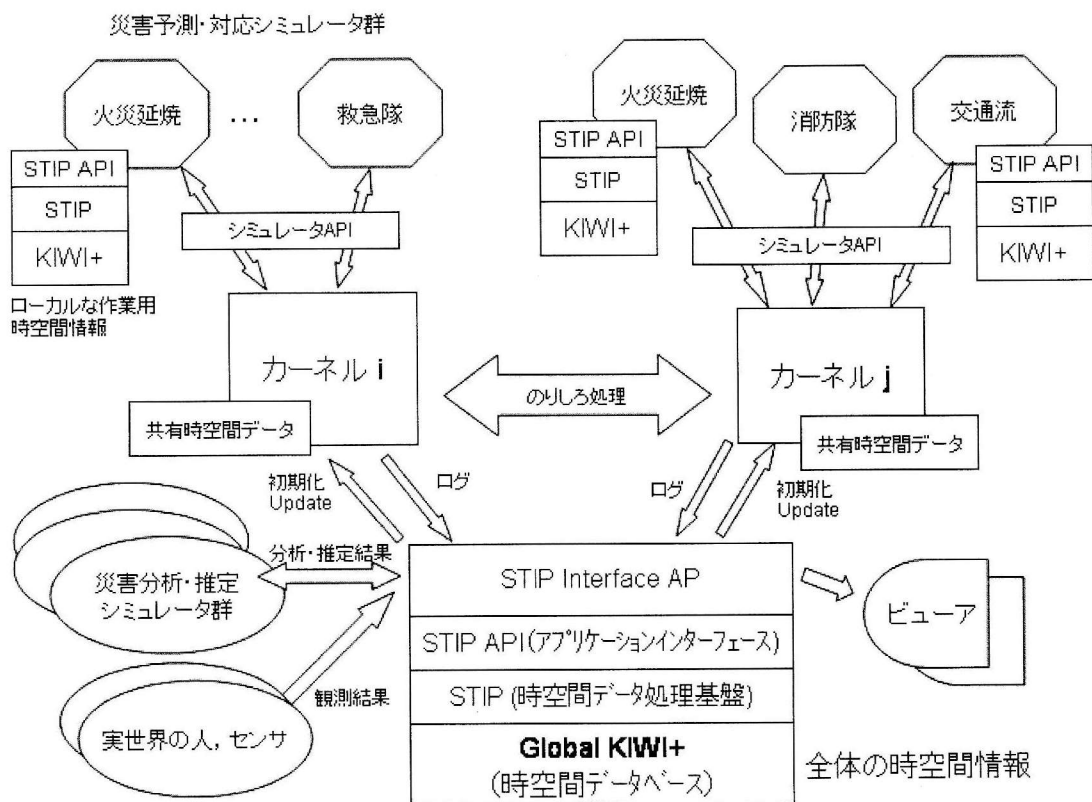


図 5 分散シミュレーションアーキテクチャの概念

- ・シミュレーションプロトコル
建物崩壊、火災延焼、自動車交通など、多種多様で異なる時間・空間解像度を持つシミュレータ同士が情報交換するためのプロトコルの開発である。様々なリソースの活用と日常システムとの統合を考慮すると、異なった OS 上のシミュレータの情報交換にも対応できる必要がある。
- ・分散シミュレーションカーネル
シミュレーションカーネルは各シミュレータ間の情報交換を制御し、シミュレーション時間の進行を制御する。大規模な震災で広い領域を対象にシミュレーションする場合は、広さに応じた数のコンピュータを用意しシミュレーションカーネルも分散化するが、性能劣化を招かないよう協調制御する必要が生じる。領域分散にともなう「のりしろ」処理方法も開発課題である。
- ・ロールバック機能とロバスト性
災害予測・対応シミュレーションが地震発生後

の対応の意志決定支援に実効性を持つためには、実時間より早くシミュレーションすることに加え、時々刻々追加される災害現場の情報を取り入れてシミュレーションをやり直すロールバック機能が必要である。また、大地震が発生した際にはハードシステムが或る程度の被害を受けることを想定する必要がある。そのような状況においても信頼性の大幅な低下を招かないシステムとすることがシミュレーションアーキテクチャには要求される。

(8) 災害モニタリングと情報統合ならびに通信システム

図 6 は実災害現場から発信される情報を時系列的に示したものである。一般の自治体は震度情報に応じて全職員の自動参集や災害対策本部設置などのマニュアルを用意しており、おおよそ 20~30 分で組織的な対応行動が開始される。この時点で



図 6 時系列的な情報発生状況

なると電話やメールなどによる市民からの被災通報・救援要請が殺到し、自治体、消防、警察等の現場機関や参集途上の職員からの被災通報も殺到する。また、庁舎屋上の固定カメラ等からの画像情報も入信する。災害対策本部にはこれらの情報に加え、広域の行政機関や周辺自治体、ライフライン企業、交通機関などからの情報が入信し、やがて被災現場に到着した防災関係者からの具体的な被災情報、ヘリコプターやバルーン搭載カメラからの画像情報もたらされる。数時間から1日後には航空機や衛星からの空撮情報による広域の被災分析も提供される。近未来的にはGPSとカメラの付いた携帯電話が普及し質と量が一段とステップアップした災害情報が発信されるであろうし、未来的には、あらかじめ全戸に配置されているセンサが人や家屋の被災状況を自動発信することも考えられる。

震災総合シミュレーションシステムは、様々な情報源からのモニタリング情報を迅速にデータベース化し、シミュレーションと統合処理して意志決定を支援するよう判り易く表示する必要がある。同時に統合処理された災害情報を上下位の行政機関や関係機関に共有化インターフェースを介して発信することも必要である。

以上のような情報統合を実現するのに通信システムが重要であることは自明である。災害時の基

幹通信は、現存の無線通信網、有線回線、光通信、マイクロウェーブ回線、衛星通信など、信頼性が高く画像通信も可能な通信システムで多重化することが基本となる。一方、各個人、各戸からの同時多発情報発信に耐えられる信頼性の高い通信システムの開発と普及が次世代型防災情報システムの有り様を左右するとも言える。

(9) 防災情報センター構想

震度7に相当するような強烈な地震動が作用し被害が広範囲に及んだ場合には、被災地の自治体内に置かれた地震防災情報システムは機能しない可能性がある。そのような想定をもって、同一地震では被災しない遠隔地にバックアップとしての地震防災情報センターを置くことも考えられる。また、中小の自治体が希にしか起きない大地震に備えてそれぞれ高度な地震防災情報システムを保有し維持することは効率的でないので、共同利用の防災情報センターを持つことも考えられる。

このような防災情報センターは自治体の平常時業務システムとオンラインで結ばれ、いったん地震災害が発生すると自治体内に置かれた比較的小規模な防災情報システムと協働して高度なシミュレーションと被災情報統合を行い自治体に必要な情報を提供する。防災情報センターにおけるシミュレーションに必要なデータベースは、セキユ

リティ面を考慮して、自治体で日常的に運用されている時空間データベースのバックアップデータベースから、シミュレーションに必要な部分のみをオンデマンドでコピーすればよい。

中小の自治体に震災総合シミュレーションシステムを普及させていくためには、このような防災情報センターのプロトタイプを構築し、技術的課題を解決しておく必要がある。

4. 震災総合シミュレーションシステムの普及に関わる課題

(1) 自治体との連携

自治体が新しい防災情報システムを導入することは、財政的にも自治体の行政システムのことも容易でなく、技術的に良いものを提示すれば導入が進むという平坦な環境ではない。開発の段階から自治体と連携し、防災行政の現場のニーズを反映した導入しやすいシステムのあり方を分析していくことも重要な技術課題である。

(2) 国ならびに都道府県の防災情報システムとの連携

内閣府は、中央防災会議に防災情報の共有化に関する専門調査会を設け、防災情報システム整備の基本方針案をとりまとめている。その中で国と地方公共団体との情報の共有化に資する防災情報共通プラットフォーム構想を提示しており、その構想との連携が必要である。

(3) 自治体のデータベース構築に関する課題

データベースがなければいかなる災害シミュレーションシステムも機能しない。シミュレーションに必要なデータの多くは自治体が保有する

が、それを震災総合シミュレーションシステムに有効に結びつけることが容易でない。個人情報保護による制約、自治体内の既存の情報管理体制の制約、使用されている情報システムの閉鎖性、電子情報化の遅れなどが障害となる。

リスク対応型地域管理情報システムの適用がその実践的解決策であるが、情報システムの空白域のような小規模自治体への適用は比較的容易でも、大都市では既存システムとのコンフリクトから導入に対する障害が大きくなる。大都市におけるデータベースの構築が重要な技術課題である。

5. むすび

大都市大震災軽減化特別プロジェクトを概説し、同プロジェクトの一部である震災総合シミュレーションの開発構想と技術的課題を紹介した。この研究開発は独立行政法人防災科学技術研究所地震防災研究フロンティアセンター川崎ラボラトリーがコアとなって実施しているものである。開発構想の多くは竹内郁雄、角本繁、両氏と研究参加者の貢献によるものであり謝意を表す。

この報告では具体的な開発成果を紹介できなかったが、プロジェクトはスタートして実質9カ月を経過したところで、4年後のプロトタイプ完成を目指して進行中である。

参考文献

文部科学省 研究開発局、独立行政法人 防災科学技術研究所；大都市大震災軽減化特別プロジェクト III. 被害者救助等の災害対応戦略の最適化 1. 震災総合シミュレーションシステムの開発（平成14年度）成果報告書 平成15年5月

震源決定と観測網最適配置

地震がどこで起きたか（正確には、地震による破壊の開始点がどこであったのか）を知るためには、まず、観測される地震波が地球の中をどのように伝わってきたかを知る必要がある。地震波には、媒質の振動方向が波の進む方向と平行な「縦波」と、媒質の振動方向が波の進む方向に垂直な「横波」がある（図1）。縦波は、媒質が局所的に体積を膨張させたり収縮させたりする状態を次々と伝えるもので、「粗密波」とも呼ばれ、音波の伝播もこれと同じである。一方、横波は、媒質が局所的に横ずれする状態が次々と伝わっていくもので、「捩れ波」とも呼ばれる。流体はこのような動きを隣りに伝える能力がないため、横波は存在しない。

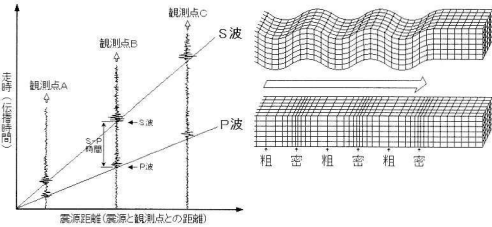


図1 縦波（P波）、横波（S波）とS-P時間

地震波の伝わる速度は縦波の方が速く、横波の伝播速度は縦波の60~70%程度である。地震波を観測していると、縦波が1番目（Primary）にやってきて、横波は2番目（Secondary）に到着するため、両者は通常「P波」、「S波」と呼ばれる。また、P波が到着してからS波がやって来るまでの時間をS-P時間という。S波の遅れ具合は距離が遠くなるほど大きくなるが、これは、始発駅を同時に出発した急行列車と鈍行列車の到着時刻が段々ずれていくのと同じことである。

(1) 地球内部を均質とした場合の震源決定

震源決定の原理を説明するため、まず簡単のために地中のP波速度 V_p 、およびS波速度 V_s がともに一定な媒質（均質媒質）を考える。この場合、震源から観測点までの直距離（震源距離）を r とすれば、P波およびS波が震源を出てから観測点に到達するまでの時間（走時）はそれぞれ r/V_p 、 r/V_s なので、S-P時間は、

$t_{S-P} = r/V_s - r/V_p = (1/V_s - 1/V_p) r$ となる。いま $(1/V_s - 1/V_p)$ は定数なので、S-P時間は震源距離 r に比例することになる。

これを逆に解けば、震源距離は $r = kt_{S-P}$ （ここで、 $k = 1/(1/V_s - 1/V_p)$ ）となり、この係数 k は、日本の地震学創成期の地震学者大森房吉の名にちなんで「大森定数」と呼ばれている。たとえば $V_p = 5 \text{ km/sec}$ 、 $V_s = 3 \text{ km/sec}$ の場合には $k = 7.5 \text{ km/sec}$ となるので、S-P時間の秒数に7ないし8を掛ければ、震源までのおおよその距離（km）を見積もることができる。

このようにして、3つの観測点A、B、CでS-P時間が測定されると、各観測点から震源までの距離 r_A 、 r_B 、 r_C が定まるので、あとは各点から半径 r_A 、 r_B 、 r_C の球面の交点として幾何学的に震源位置が決定できる。具体的には、3点A、B、Cから長さ r_A 、 r_B 、 r_C のひもをぶらさげ、その先端をひとつにまとめた位置が震源ということになる。これを図式で行うには、図2に示すように3点A、B、Cを中心として半径 r_A 、 r_B 、 r_C の円を描き、その共通弦の交点として震央位置Oを定める。球面同士之交線は円となるので、共通弦（どれでもよい）を直径とする断面円を描いてOの位置から垂線を立てれば、この垂線と断面円との交点Pが震源位置となり、長さOPが震源の深さとなる。

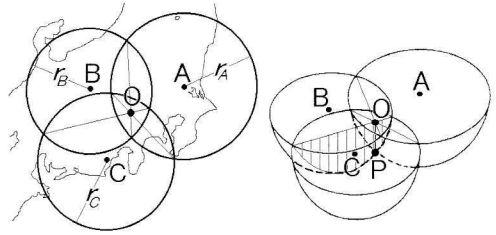


図2 震源位置の図式解法（均質媒質の場合）

(2) 地球内部が不均質な場合の震源決定

現実の地球内部は複雑であり、場所によって地震波速度が異なる不均質状態となっている。とくに地球深部は高圧の状態となっているため、一般に、地震波速度は深くなるほど大きくなることが知られている。図3上段に示す通り、媒質内部の地震波速度が一定（均質）な場合、震源から出た地震波の波面は同心円状とな

る。また、波面に垂直で、波の進む方向を表わす「波線」は単純な放射状の直線となる。しかし、同図下段のように、地震波速度が深さ方向に増大している場合、波線はもはや直線ではなく、曲線となる。このような場合、震源を発した地震波が観測点に到達するまでの時間（走時）は、均質媒質のときのように単純な式で表わすことはできない。しかし、垂直方向の地震波速度の分布が与えられれば、走時は計算によって求めることができる。

実際の震源決定では、震源の深さと震央距離を与えると P 波および S 波の走時が得られるプログラムを電子計算機の内部に組み込み、地震の発震時と震源の位置を少しずつ変えながら、観測された P 波および S 波の到着時刻と理論的な走時がもっとも良く適合する組合せを探すと作業が行われる。

このように、精密な震源決定を行うには、地下の詳細な地震波速度構造があらかじめわかっている必要があるが、この地下構造は、震源決定から得られる震源位置と発震時、および観測された着震時に基づいて推定がなされている。すなわち両者はにわとりと卵のような関係にあるが、様々な工夫をこらすことによって、両者を逐次精密化していく作業が続けられている。

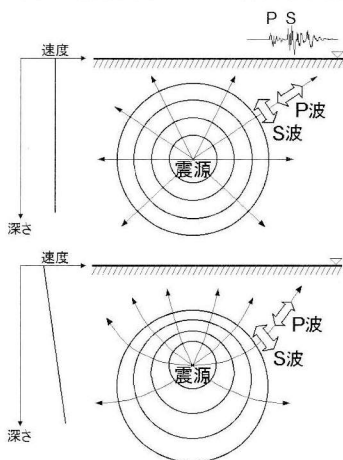


図 3 地震波の伝播（上段：均質媒質の場合、下段：地震波速度が深さ方向に増大する場合）

(3) 地震観測網の最適配置

図 4 は、均質媒質における、S-P 時間を用いた鉛直面内での震源決定を示している。あらゆる測定には必ず一定の誤差がつきまとい、上記の S-P 時間についても、P 波および S 波の到着時刻の読取りの曖昧さに起因する誤差が含まれている。とくに S 波の到着時については、P 波による揺れが続いている中での判定となるため、確かな読取りは一般に困難である。このため、両

観測点からの震源距離も、現実にはある一定の誤差範囲内という形でしか推定ができない。

このような状況下で、震源の位置を震央、深さともに最小限の誤差範囲で推定できるのは、図の B で示すように、震源の深さが観測点間距離とほぼ同程度の場合に限られる。A のように震源がごく浅い場合には、震央は精度良く求まるものの、深さが良く決まらず、逆に C のように震源が深い場合は、深さが求まっても震央の位置が曖昧になる。すなわち、浅い地震の震源を高精度で決めるためには、観測点間距離をもっと縮める必要があり、逆に深い地震に対しては、観測点間距離をもっと広げる必要がある。なお、D のように観測網の外で発生した地震については、震央、深さともに誤差範囲が大きくなるため、震源決定結果の信頼性はかなり低いものとなる。

以上のことから、観測点は震源を取り囲むように配置し、その間隔は対象とする地震の震源の深さと同程度にすることが望ましいとの結論が得られる。このため、たとえば火山地帯のように、非常に浅いところで地震が頻発するような場所では、特別に高密度の観測網を火山体近くに展開せねばならない。なお、震源を取り囲むという原則に関しては、我々の観測が地表付近に限られるという制約があるため、東西・南北方向に観測網を広げることではできても、深さ方向については地表から一方的に見下ろすことしかできない。このため、震央位置の決定精度に較べて、震源の深さの決定精度は本質的に劣ることになる。同様の原理により、GPS 観測においても、人工衛星は上空にあるものしか使えないため、水平位置に較べて高さの決定精度はどうしても劣ってしまう。（岡田義光）

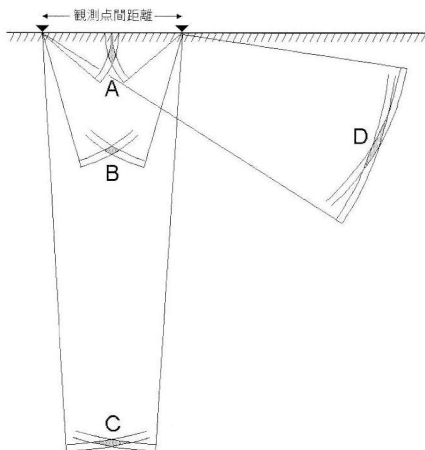


図 4 2 観測点による鉛直面内での震源決定

発震機構解とその表現

地震が発生すると、地下ではまずある1点で岩盤の食い違いが生じ、それが周囲に伝播して、ある広がりをもった断層面が形成される(図1)。このような断層運動を記述するためには、断層面の位置(緯度、経度、深さ)、大きさ(長さ L 、幅 W)、向き(走行 θ 、傾斜角 δ)、および断層面上での食い違い量(U)と向き(スリップ角 λ)の、計9つのパラメータが必要となる。

これらのうち、断層面の向きとその面上での食い違い方向を表わす3つのパラメータ(θ 、 δ 、 λ)を求める作業が発震機構解決定である。

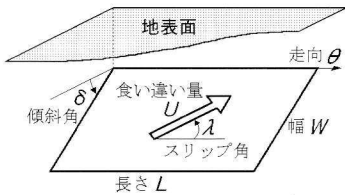


図1 断層モデル

(1) 発震機構解の決定

発震機構解を求めるには、各観測点で記録された地動の初動方向、すなわち最初に地面が上がったか下がったかという情報を用いる。図2で示すように、震源を取り囲む仮想的な小球面(震源球)を考え、観測された初動極性データを波線に沿って震源球まで戻してやると、震源球面上に「押し」(初動up)と「引き」(初動down)の分布ができる。同図右に示されているように、断層運動によって周囲の媒質は4象限型に動くことが期待されるため、直交する2枚の平面(節面)によって震源球面上の押し引き分布を上手に分離することができれば、そのうちの一方が断層面であり、他方の面に直交する向きに食い違いを生じたことになる。

実際の発震機構解決定では、震源球を平面上に投影して、押し引き分布をもっとも良く分離するように、直交する大円の組み合わせを図上でさがし求めるか、または、電子計算機の内部で2枚の直交面の組み合わせをしらみつぶしに試して、その中から、観測された押し引き分布をもっとも矛盾なく説明できるものを選ぶ。

発震機構解の解析では最終結果として2つの直交する節面が得られるが、そのどちらが断層

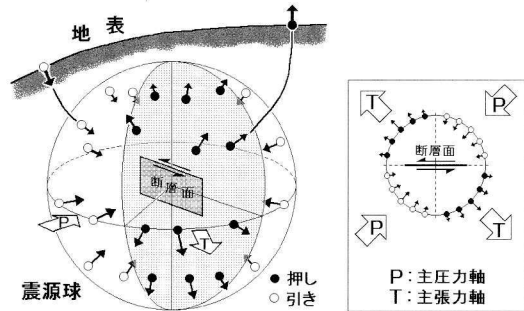


図2 震源球と押し引き分布. 右側は赤道面で切った断面を示す。

面であるかは特定できない。断層面の決定は、ある程度大きな地震であれば余震の配列や地表の変形状況等から判断できるが、そうでない場合は、地震波形を詳細に調べて推定したり、または、テクトニクス的な考察に基づいて妥当な方を選択するなどの手段がとられる。

以上に述べた発震機構解決定は地震波初動(P波)の押し引き分布に基づいているため、厳密に言えば、その結果は、地下の震源で破壊が始まった瞬間における断層運動の様子を表わしているにすぎない。近年では広帯域地震計等による良質の記録が得られるようになったため、初動極性だけでなく、観測された地震波形全体をデータとして用い、理論的に予測される波形と比較することによって、断層運動全体の様子を調べることが盛んになった。

この場合、最終的な断層面の広がり比べて十分遠方の場所に置かれた地震計の記録を用い、断層面全体をその重心で代表されるひとつの点とみなした発震機構の解析がなされ、その結果はCMT (Centroid Moment Tensor) 解と呼ばれている。

(2) 発震機構解の表示法

断層運動は空間における3次元的な動きであるため、これを平面的な図で表現することはなかなか困難である。

図3では、発震機構解を表わすために通常用いられる表現法とその意味を図解している。同図左端は震源球が静水圧平衡の状態にある場合

で、あらゆる方向に同じ圧力が働いている。この平衡状態が破れて力が不均衡になると、やがて様々なモードの破壊が生じ、震源球は4つまたは2つに割れることになる。慣習上、周囲から働く圧力が最大である方向を主圧力軸またはP軸、最小である方向を主張力軸またはT軸と呼ぶが、図2の右側にあるように、断層面とP軸またはT軸は45度の角度をなす。

なお、図2ではT軸方向の力が震源から外の方向に向かう引っ張り力のように描かれているが、これはあくまで全体としてかかる平均的な

ずれとなる。

以上のすべての場合について、黒く描かれた四半球部分（T軸部分）は押しが弱いために外側へ押し出され、一方、白く描かれた四半球部分（P軸部分）は強い押しのために内側へ引きずり込まれる動きを生じる。このような震源での動きは隣りから隣りへと伝播し、地表の地震観測点に対してそれぞれ「押し」と「引き」の初動を与えることになる。

このような断層運動の状況を模式的に表わすため、通常、図3の右端にあるような表現方式がとられており、これを発震機構解図と呼ぶ。これは、震源球を水平面で切断して、その下半球を上からのぞいた図となっている。黒い部分が押し（T軸）の領域、白い部分が引き（P軸）の領域に相当し、2つある両者の境界（節面）のいずれかが断層面に対応する。

現実の断層運動では、図3のようにP軸やT軸がちょうど鉛直や水平方向にあるとは限らず、したがって、震源球の割れ方も同図を空間的に回転させたような状態で生じることが一般的である。このため、発震機構解図も、図3に示された基本的パターンが組み合わせられたような中間的なものとなる。

たとえば、図4に示す実際例では、節面AA'をとると、南へ傾く面上の右横ずれ断層に若干の逆断層成分が含まれていることになり、節面BB'をとれば、西へほとんど鉛直に傾く面上の逆断層に左横ずれ成分が含まれていることになる。このような図を見る場合、卵や果物を詰めるのに使われる直角の仕切り板がお椀の中にセットされている状態を想像すれば、多少とも空間的なイメージをつかめるかもしれない。

(岡田義光)

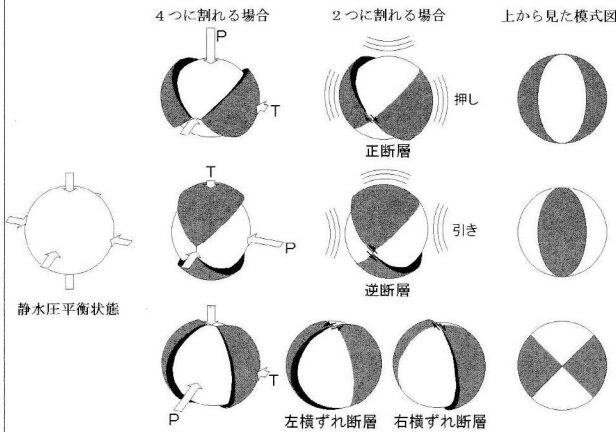


図3 発震機構解の表示法

圧力を基準とした場合の相対的な表現であって、現実には働いている力は、図3に見られるとおり、すべて圧縮力の状態である。

さて図3には、このP軸とT軸の組み合わせの違いによって、3通りの破壊様式が示されている。上段は、P軸が鉛直方向、T軸が水平方向にある場合で、このときは断層面上の盤側がずり落ちる「正断層」と呼ばれる割れ方を生じ、4つに割れる場合は、両節面とも正断層運動を示すことになる。次に中段は、T軸が鉛直方向、P軸が水平方向にある場合で、このときは上盤側がのし上がる「逆断層」という割れ方になり、これも4つに割れる場合の両節面はともに逆断層運動を示す。

下段は、P軸、T軸がともに水平面内にある場合で、このときは垂直な断層面を境として両側の岩盤が横にずれるタイプの断層を生じる。断層面に向かって立った時、相手側のブロックが右に動く場合を「右横ずれ断層」、左に動く場合を「左横ずれ断層」と呼ぶが、震源球が4つに割れる場合は、片方が右横ずれ、他方が左横

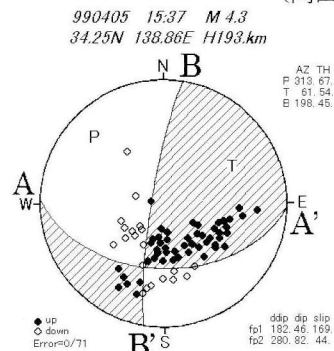


図4 実際の発震機構解の例

地震災害被害を軽減するためのRT(ロボットテクノロジー)

田所 諭

1. 阪神淡路大震災とロボティクス

阪神淡路大震災はロボット等の分野の研究者にとってもきわめて重大な出来事であった。それまで災害対応ロボットの研究は原子力のような特定の分野に限定されており、消防ロボットの研究開発もきわめて少数の研究者層に限られ、たとえばロボット学会などの場でその研究開発が話題にされることがなかった。大震災は、多くの研究者に対し、この問題の重要性に加えて、これまでロボットの分野からの防災に対する貢献があまりにも小さかったことを気付かせた。しかしながら、当時は研究者にとって、何をすればいいのか、何が解決を与えることができるのかが皆目わからず、その模索から開始する必要があった。

神戸を中心とする有志によって始められた日本機械学会ロボティクスメカトロニクス部門の救助ロボット機器の研究開発に資することを目的とした阪神淡路大震災における人命救助の実態調査研究会(略称:レスキューロボット機器研究会)がその研究開始の端緒となった^{1),2)}。そこでは、阪神淡路大震災において、人命救助がどのように行われたかのエスノロジー調査、それに基づくレスキューロボットの必要要件・仕様の洗い出し、活用できる要素技術の調査、その周辺の体制やシステムに関するディスカッション、が行われた。その報告書に書かれたこともさることながら、多数のロボット等の研究者がこの問題に対して考え、情報を共有したことの意義は大きかった。少なくとも地震災害を対象とする限り、世界で最初のロボット研究であったと考えられる。

その中で指摘された、今後ロボット関連技術の貢献が期待される点は、次の項目である。

1) 情報収集伝達能力

(災害状況把握, 人体検索など)

2) 被害軽減能力

人的被害軽減(人体確保, 救急医療など)

物的被害(消火など)

この中でも、情報収集は現在のロボット関連技術で可能なことがいくつもあり、まず最初にロボット等の有効性が示される分野であると考えられる。被害軽減に関しては、経済性も含めて検討した場合には、他のソリューションに対する優位性が現在のところは大きくない。

調査研究の中で重要だと考えられた項目をまとめると次のようになる。

- 1) 災害環境に適合して運用可能であること。
- 2) 十分な可搬性,あるいは、モビリティを有すること。
- 3) 人間作業者との協調・共同を有効に行う機能を持つこと。
- 4) 人間の肉体的精神的活動を補助・補完する機能をもつこと。
- 5) 平時から災害時に至るまで連続的に運用されること。
- 6) 大規模災害に対応するために、分散性を持つとともに、数量が用意されること。
- 7) さまざまな災害や被害の形態に対して、多様な解を提供すること。
- 8) 標準化によってインターオペラビリティを確保すること。
- 9) 標準化によってコスト低減をはかること。
- 10) 最新技術が継続的に維持できるような、スケーラビリティ,発展性,拡張容易性を持つこと。
- 11) 効果を最大化する運用システムを持つこと。

2. 研究開発されるべきロボット関連技術

前節で述べたような機能は、もちろん単体のロボット等で実現される必要はなく、ロボットが複数台でもよく、ロボット以外の機器を併用してもよく、最終的には人間も含めた社会システム全体で目的を果たすことができればよい。その意味で、この問題は、新しい社会インフラを整備することが目的であり、そのためにロボット関連技術がどのように貢献できるか、という観点から議論されるべき性質のものである。

その立脚点から見れば、開発されるべきシステムは、決して消防などの災害対応専門家のための、高度な人命救助能力を有したロボットだけではないことがわかる。

専門家用の特殊機器の問題点は、価格が高価であり、大量配備が不可能であり、平時からの利用が難しいことである。阪神淡路大震災で人命救助された多くのケースは一般住民の働きであったということは歴然とした事実である¹⁾。また、混乱期から復旧期に至るまでボランティアの果たした役割はきわめて大きい²⁾。大規模災害で大きな効果を上げるためには「数」が必要であり、いかにして大量に動員できるメカニズムを創り出すかがきわめて重要である。

以上のことから、社会インフラとして機能できる、平時にも使え、一般的な経済原理によって世の中に広く配備される、多数の、分散的なシステムが必要である。それは、情報収集や救助や通信や情報処理などにおいて、人間の有効な道具となり、既存の防災システムや平時用システムと協力しながら効果的なソリューションをもたらすものでなければならない。それは、手足を持ったロボットである必要は全くなく、気の利いた道具やソフトウェアであってもかまわない。仮に、使いやすいジャッキやITツールがロボット関連技術の副次産物として開発されたとすれば、それはロボット等の研究開発の重要な成果であるとも考えられる。

たとえば、AIBOのようなロボット、あるいは、センサとインテリジェンスを持つ家電品などが

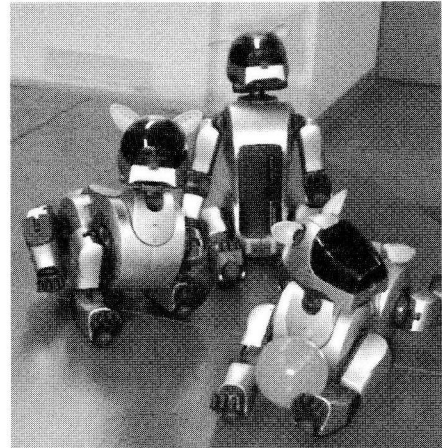


図1 AIBO (SONY)

ホームネットワークで結ばれて広く使われる時代は近いと考えられている。それらの民生品それぞれが、小さな防災機能を少しずつ内蔵するならば、情報収集や配信に関しては大きな威力を発揮できると考えられる。たとえば、番犬 AIBO は飼い主である老人を日頃から観察し、生活行動のパターンを知っている。建物倒壊直前の状況や周囲の人の様子を認識・記憶している。災害発生直後にそれらの情報を無線で取り出すことができれば、救助効率の大きな向上につながる。クーラーなどの家電品は、場合によっては非常に多数の火災探知機として機能することが可能であり、性能は劣悪でも数量という観点からこれまでの機器を補完しうる可能性が高い。

このように、民生品を最大限に活用する考え方が、今後の防災インフラ整備においては、非常に重要な方向性のひとつである。

そのためには、防災の研究成果を産業化し、誰でもが防災技術を商品の一部の機能として知らずのうちに購入しているという仕組みを作ることが必要であろう。単なる科学技術として終わらせるのではなく、研究成果をどのように社会のすみずみに展開していくかの戦略は、今後特に重要であると考えられる。

これまでの、防災や人命で「儲ける」ことは倫理的罪悪であるという考え方が支配的だったように見受けられる。そのため、いい技術の種が研究されても、製品にまでたどりつかず、したがって、

誰も買えないままで終わってしまうというケースが多かったのではなかろうか。しかし、最近の流れとして、たとえば内閣府中央防災会議の資料⁴⁾などを子細に検討してみると、民間の力を活用したり、いいソリューションを購入できるようにすることが重要であり、そのためには防災技術をどんどんと産業化していくべきだ、という方向転換がなされつつあるように感じられる。また、防災研究の副次産物として新たな民生品や産業機器が生み出された場合、それらが普及するにつれ、安価に購入できるようになるとともに、性能の飛躍的な向上が見込まれる。その結果として、防災機器の価格が下がり、性能が向上する。このような正の相乗効果を生み出すループをいかにして形成するかは、重要で本質的な議論である。

3. ニューヨーク世界貿易センタービルでの 検索・情報収集ロボット

2001年9月11日に発生した米国同時多発テロでは、ロボットによる人体検索、情報収集活動が行われた。現場に出勤したのは図2のようなクローラタイプの遠隔操縦ロボットである。その結果、9月12日から10月2日までに約11名の被災者が遺体で発見された⁵⁾。

これらのロボットはいずれも情報収集を目的としたロボットであり、現場で収集された情報の種類は次の通りであった。

- 1) 生存者の有無、可能性の有無の判断材料
- 2) 被災者、生存者の位置、状態、その推定のための情報

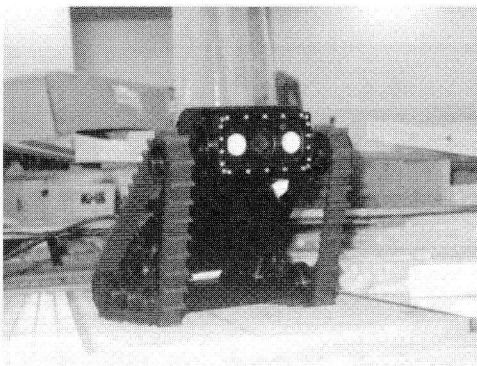


図2 Inukutun MicroVGTV

- 3) 検索場所の優先付け、トリアージ
- 4) 救助者、作業者にとっての安全情報
- 5) 構造物の被害状況の情報（構造の崩壊、安定性、水漏れなど）
- 6) がれき内の環境情報（温度、ガス、煤塵、床面状態、水の有無、がれき散乱状態など）

このように、人命に関するデータ収集のみならず、救助や災害対応活動の判断材料とするための多くのデータが収集された。

この活動について次のことが報告された⁶⁾。

- 1) ロボットは人間や犬のセンシング能力、運動能力にははるかに劣るものの、人間が危険で入ることができない、あるいは危険が予測される場所での情報収集に有効である可能性が高い。
- 2) Search Cam（通称、棒カメラ）と比較して、到達距離が長く、曲がりくねった狭窄箇所への進入が可能、搭載できるセンサの種類と自由度が多い、ということがロボットの利点である。
- 3) 自律機能やインテリジェント機能の適用は困難であった。
- 4) ロボットはあくまで人間のための道具であり、便利な道具としての性能が重要である。利用するためには訓練が不可欠であり、利用者に使われるための努力が必要である。
- 5) 消防など災害対応の専門家と、ロボット技術者・研究者との連携が重要である。また、災害対応組織やプログラムの中に組み込まれることが必要である。
- 6) ロボット自身の状態（位置、姿勢、方向、転倒、衝突、障害物に挟まっている、ひっかかっている、乗り上げている、スタック、スリップ、その他地面や周辺障害物との関係、機能障害、故障、など）を知るためのセンシングが重要である。世界貿易センタービルの場合には音響情報が役立った。
- 7) 現場での迅速なセットアップと修理が必要であった。
- 8) 通信の確保が無線では困難であり、有線が確実だった。
- 9) 有線ケーブルはロボットがスタックしたときに引き上げるためにも役だった。ただし、もつれ、からみ、ひっかかりが問題だった。

10) ロボットの外界のセンシングとしては、被災者認識、距離計測、環境マップ生成、通路・入口認識、環境情報、などが重要だった。

11) 多様なセンシング要求に応えるためには、多様なセンサが着脱式で用意されることが必要である。

12) 運動のためには、ロボットの大きさ、条件に合わせた可変性、が重要であった。

13) 終了後の洗浄とメンテナンスが問題だった。

ここで得られた知見は、阪神淡路大震災の調査結果と酷似していることが注目された。すなわち、この問題と地震災害の問題の共通性、および、地震災害においても同種のロボットが有効である可能性が高いということが明らかになった。

4. 文部科学省大都市大震災軽減化特別プロジェクト

平成14年度より、文部科学省大都市大震災軽減化特別プロジェクト（略称：大大特）が開始された。その中の、Ⅲ. 被害者救助等の災害対応戦略の最適化のうちの、4. レスキューロボット等次世代防災基盤技術の開発、として、レスキューロボット等の研究開発が開始された^{7),8)}。

本プロジェクトは、人間のアクセスが困難な被災地の調査および情報収集能力の拡大を目的とした情報収集ロボットの移動技術と情報マッピングの研究、災害被害情報を収集統合するためのインテリジェントセンサと携帯端末の研究、人間の便利な道具とするためのヒューマンインタフェース（遠隔操作技術と情報提示技術）の研究、さらに、それらをネットワークなどによって統合し、システムとして有効に機能させ、その発展した形として次世代の防災社会基盤システムの一部として組み込むための研究開発を行うことを目的としている。また、システムの性能評価の方法（テストフィールドなど）や標準化（分散統合のためのネットワークプロトコルなど）について研究する。これによって、他の研究開発と連携して総合防災に貢献することを目指している。

そのコンセプトは、前に述べたように、いわゆるロボットの研究開発に限定されることなく、関連する様々な技術の開発、およびそれらのネット

ワーク統合を通して、災害対応能力の向上に貢献していこうというものである。

このプロジェクトの特徴は、屋内外に大規模地震災害の倒壊構造物等の被災地モデルを設計・設置し、これを活用して実証試験と改良開発を繰り返すことにある。この目的のために、川崎ラボラトリー（川崎市川崎区南渡田、旧NKK体育館）および神戸ラボラトリー（神戸市中央区港島南町、神戸キメックセンタービル）の2箇所に研究拠点を開設した。

その中心となっているのは特定非営利活動法人国際レスキューシステム研究機構である。このNPOは、先端的な災害対応技術を開発し、それを世の中に普及させることを目的として、平成14年4月に設立された。

5年間の研究開発を通じて、さまざまなロボット関連技術が災害対応に適用され、有効なソリューションが多数創り出されることが期待される。

5. ヘビ型ロボット

地震災害の倒壊建造物での人体検索や情報収集には、狭隘部に進入が可能なヘビ型ロボットが特に有効であると考えられている。ここでは、そのうちの代表的ないくつかを紹介しよう。

広瀬（東工大）らは図3のような受動車輪をもつユニットを結合したヘビ型ロボットを開発した⁹⁾。

塚越（東工大）らは能動ホースと称して図4のようなヘビ型ロボットを試作した。空気圧により3方向に屈曲するユニットの運動を切り替え、インチョーム型の運動を生成できる¹⁰⁾。

広瀬らは図5のような連結クローラによるヘビ

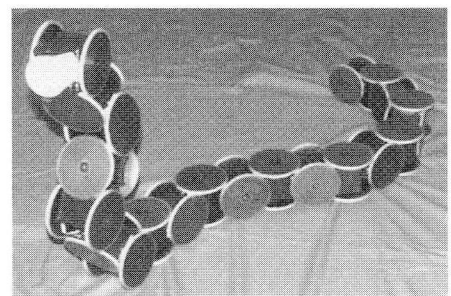


図3 ヘビ型ロボット（広瀬）

型ロボットを開発した。3つのクローラ部の屈曲がひとつのモータで制御され、コンパクトにがれき内移動機構を実現している¹¹⁾。

高森（神戸大）らは、図6のように複数台が協調してがれき内探査を行うクローラ型ロボットUVSを開発した。

大須賀（京都大）らは、図7のような、全面にクローラ機構を持つがれき内探査ロボットMOIRAを開発した⁸⁾。

これらは現在はいずれも研究段階であるが、今後の実用化が期待される。

6. ロボカップレスキューロボットリーグ

災害対応ロボットの必要性を訴え、その研究開発や社会的な認知を得ることを目的として、いくつかのロボットコンテストが開始された。

ロボカップレスキューロボットリーグの目的

は、現実に近い災害環境下でレスキューロボットのパフォーマンスを競い、それによって有効なロボット技術の研究開発を促進することを目的としている。大規模地震災害やビル爆破事件のような倒壊建物において、「いかに効率よく、精度高く、人体を検索できるか」という問題を対象として競技会が行われている¹²⁾。

ここで特筆すべきポイントは図8に示す実物大の倒壊建物を模擬した競技フィールドである¹³⁾。

このフィールドはNIST（米国商務省標準化研究所）との協力の下に開発され、性能評価試験の標準を作ることによってレスキューロボットの技術開発を促進することをその目的としている。全体のサイズは20×20 m、その難易度に合わせて次の3つのエリアが届けられ、その中に技術的にクリアすべき課題が意図的に散りばめられている。

1) Yellow Area：通常の家屋内に、ブラインド、カーテン、壁の突起、窓、ドアなどロボット

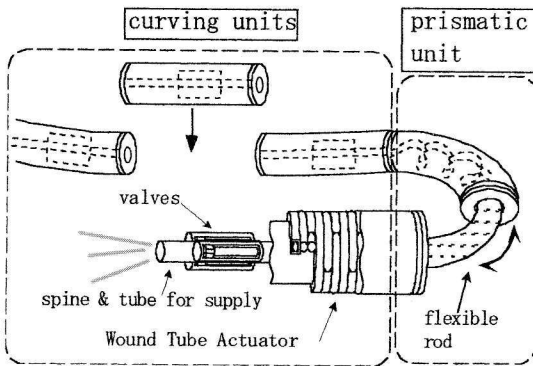


図4 能動ホースII（塚越）

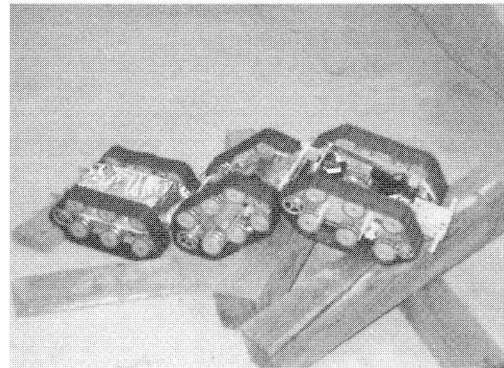


図6 UVS（高森，小林）

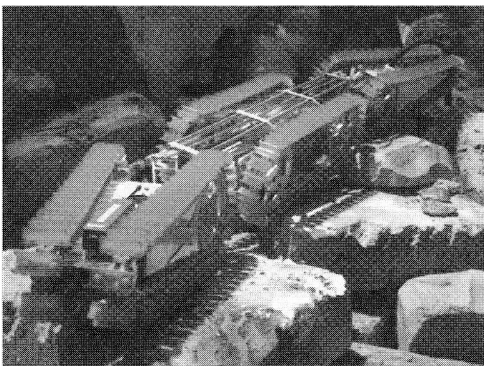


図5 蒼龍I（広瀬）

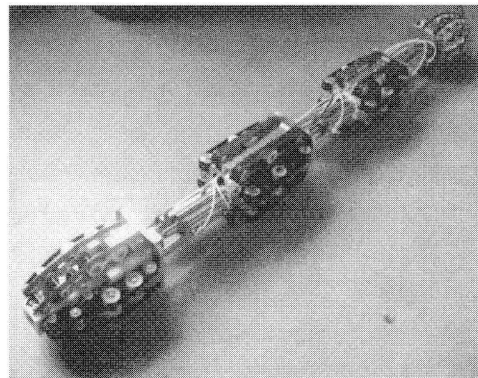


図7 MOIRA（大須賀）

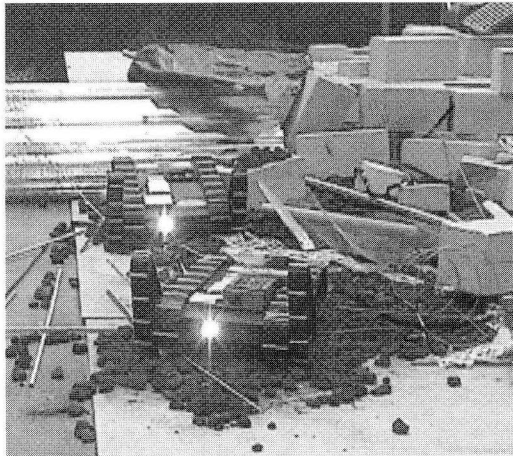


図 8 ロボカップレスキューロボットリーグ提案の標準テストフィールド (Red Arena)

のセンサが誤認識しやすい状況、ベッドの下など人体を発見しづらい状況を配置。

- 2) Orange Area : 階段, 段差, スロープ, はしごなど, ロボットの運動性能が試される状況。
- 3) Red Area : がれきや, パンケーキ崩壊の現場を模擬した状況。

この競技では次の技術課題が重要的に取り上げられており, これらはいずれも現実のレスキューロボットに必要な不可欠な問題である。

- 1) Shared Autonomy : オペレータとの協調によって最終的に高いパフォーマンスを実現。
- 2) Multiagent Collaboration : 複数台ロボットの協調。
- 3) Mobility : 瓦礫内の移動。
- 4) Sensing : 人体及び環境の認識。
- 5) Localization : 現在位置と方向の認識。
- 6) Integration : IT インフラとのシステムインテグレーション。

米国同時多発テロに投入されたロボットのいくつかは 2001 年にシアトルで開催された RoboCup 世界大会に出場したロボットであり, この方法論の有効性がある程度示されたとも考えられる。

7. ロボカップレスキューシミュレーションプロジェクト

図 9 は, ロボカップレスキューシミュレーションプロジェクトの概要を示している。その方法論

は, 多様な災害シミュレータとその中で防災活動を行う自律エージェントを分散計算によって統合し, 仮想的な災害空間を創り出すことである。シミュレーションに基づく災害被害予測に加えて, 防災活動の戦略の検討を行うところに, 通常の災害シミュレーションの研究と比べての独自性がある^{12),14)}。

このシステムを地震計・リモートセンシング・ヘリコプタ画像などと接続するならば, リアルタイムに災害情報収集モニタリングを行うだけでなく, リアルタイムに被害予測を行うことが可能であろう。その上, 仮想的に災害対応活動をシミュレーション上で試行できるため, リアルタイム対応の有効性を事前に検討することができる。したがって, たとえば, エージェントによってたてられた行動戦略を, 緊急対策本部や, ウェアラブルコンピュータや PDA を持った救助隊などに配信することによって, 現場での意思決定を支援することが可能であると考えられる。また, 自動的に支援依頼などの連絡を行うことはもちろんのこと, 水門や交通信号や将来においてはロボットなど, 災害被害を軽減する行動体を統括制御することも可能であろう。

以上のように, このプロジェクトは, これまでの自然現象の予測, 被害予測を中心としたシミュレーションから一歩進んで, ロボティクスやマルチエージェントにおける「行動」の概念を導入することによって, リアルタイム防災の概念を拡張しようとする研究である。

図 10 は開発されたプロトタイプシミュレータの画像である。ここでは, 4 種類の災害シミュレータ (建物倒壊, 街路閉塞, 火災延焼, 交通流), 3 種類の知能行動エージェント (消防隊, 救助隊, 道路啓開隊), 地理情報システム (GIS), 2D/3D ビューア, を結合することにより, 総合的な災害を取り扱える可能性を示した。プロトタイプシミュレータを使った研究の過程で, 火災に関する知識が全くない学生が, 消防力を集中させる戦略や, 延焼防止線を張る戦略を, 自らの工夫のみによって創り出したことは, 驚くべき事実であり, このような戦略シミュレーションの有効性を示し

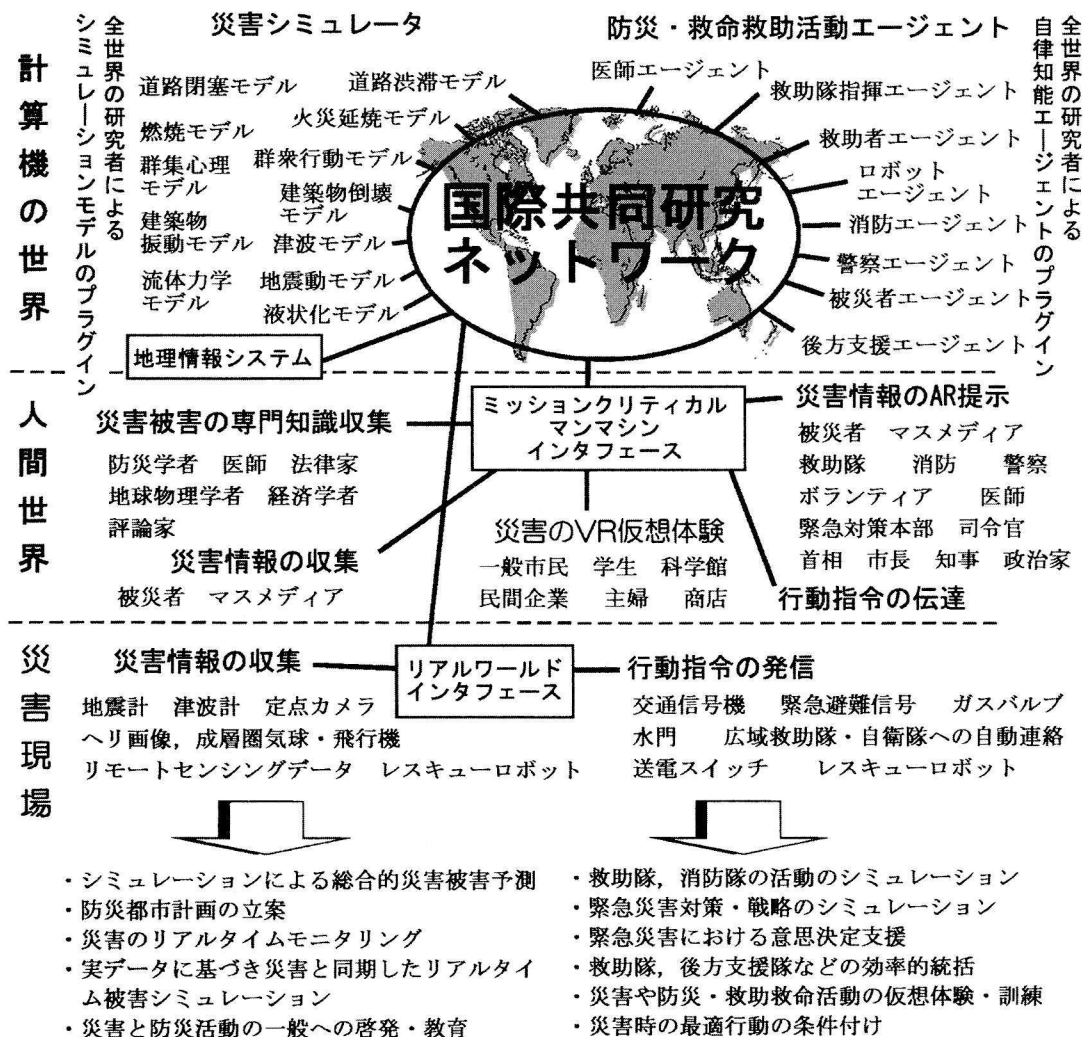


図9 ロボカップレスキューシミュレーションプロジェクトの概要

た成果ではないかと考えられる。

現在、いくつかの自治体との協力の下に、住民が事前に災害を体験することを目的とした共同研究が進められつつある。リアルタイム防災への適用には数多くの課題が残されており、実用化にはまだまだ多くの研究開発が必要である。

8. おわりに

以上述べてきたように、阪神淡路大震災を契機として、ロボット関連分野での地震防災に対する研究開発が徐々に行われるようになってきた。

これまで、土木・建築・地震学などの研究開発は着実に安全で安心して暮らせる社会基盤を提供してきた。計算機ネットワークをはじめとする昨今の社会インフラの大きな変化に伴い、防災のためにどうやってこれらの新しいインフラを活用できるかが重要である。今後、ロボットそのものが社会にどの程度普及するかに関わらず、ロボットを構成する関連要素技術は、我々の生活のさまざまな場面に着実に活用されている。従来からのアプローチと連携させて、これらの新しい方法論をどう防災に活用していくかの議論を、専門分野の垣根を越えて、広く進めていく必要があると考える。

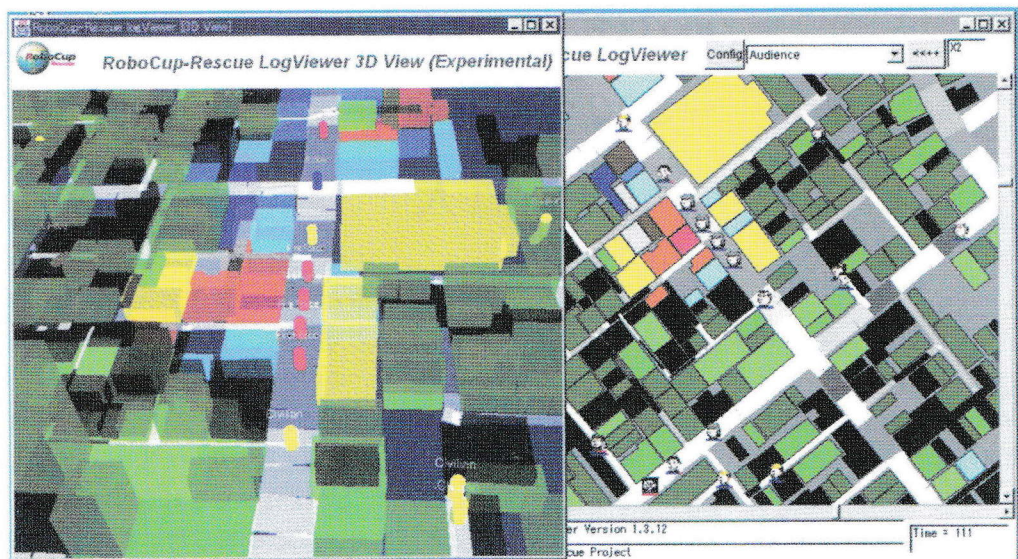


図 10 災害救助シミュレーション

参考文献

- 1) 高森 年, 田所 諭, 大須賀公一, 鶴谷三郎他, 1997, 救助ロボット機器の研究開発に資することを目的とした阪神淡路大震災における人命救助の実態調査研究会(略称:レスキューロボット機器研究会)報告書, 日本機械学会ロボティクスメカトロニクス部門.
- 2) S. Tadokoro, T. Takamori, S. Tsurutani, K. Osuka, 1997, On robotic rescue facilities for disastrous earthquakes —from the Great Hanshin-Awaji (Kobe) Earthquake—, J. of Robotics and Mechatronics, Vol. 9, No. 1, pp. 46-56.
- 3) 林 春男, 2001, 率先市民主義, 晃洋書房.
- 4) 今後の地震対策のあり方に関する専門調査会報告書, 2002, 内閣府中央防災会議.
- 5) R. Murphy, J. Blitch, J. Casper, 2002, AAI/RoboCup-2001 urban search and rescue events: reality and competition, AI Magazine, Vol. 23, No. 1, pp. 37-42.
- 6) J. Casper, 2002, Human-robot interactions during the robot-assisted urban search and rescue response at the World Trade Center, MS Thesis, Computer Science and Engineering, Univ. of South Florida.
- 7) 文部科学省大都市大震災軽減化特別プロジェクト, 被害者救助等の災害対応戦略の最適化, レスキューロボット等次世代防災基盤技術の開発, 2002, 公開シンポジウム論文集, 国際レスキューシステム研究機構.
- 8) 大都市大震災軽減化特別プロジェクト, III 被害者救助等の災害対応戦略の最適化, 4. レスキューロボット等次世代防災基盤技術の開発, 2003, 平成14年度成果報告書, 国際レスキューシステム研究機構.
- 9) M. Mori, S. Hirose, 2001, Development of active cord mechanism ACM-R3 with Agile 3D mobility, Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp. 1552-1557.
- 10) H. Tsukagoshi, A. Kitagawa, M. Segawa, 2001, Active Hose: an artificial elephant's nose with maneuverability for rescue operation, Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 2454-2459.
- 11) T. Takayama, S. Hirose, 2001, Development of "Souryu-I & II", Proc. TITech COE/Super Mechano-Systems Symp., pp. HRS-1.
- 12) H. Kitano, S. Tadokoro, 2001, RoboCup-Rescue: A grand challenge for multi-agent and intelligent systems, AI Magazine, Vol. 22, No. 1, pp. 39-52.
- 13) A. Jacoff, E. Messina, J. Evans, 2000, A standard test course for urban search and rescue robots, Proc. Performance Metrics for Intelligent Systems Workshop.
- 14) 田所 諭, 北野宏明編, 2000, ロボカップレスキュー—緊急大規模災害救助への挑戦, 共立出版.

砂山崩しの実験

—SOC と固有地震—

吉岡直人

1. はじめに

Bak, Tang and Wiesenfeld¹⁾が「自己組織化臨界現象 (SOC)」の概念を提案して以来、地震は自然界における SOC の典型的な例であるとされてきた。すなわち、Gutenberg-Richter (G-R) 則はべき乗で記述され、特徴的な長さ (大きさ) を持たない。一方、Schwartz and Coppersmith²⁾は地震断層の調査結果に基づいて「固有地震」の考えを提唱し、これが G-R 則にはなじまないことを示した (図1 参照)。

さて SOC の概念の登場以来、多くの数値実験

が行われてきた³⁾。セルラーオートマトンと呼ばれるこれらのモデルによるシミュレーションの結果はほとんどの場合、規模別頻度分布がべき乗則にしたがう SOC 的な振る舞いを示すことが示された。一方、実際の砂を用いた室内実験も数多く行われた⁴⁾。しかしながらこれらの結果は数値実験とは異なり、SOC 的な振る舞いを示すものはむしろ稀で、スパイク状のナダレが周期的に発生することが多い。とくに半円状のドラムに砂を詰め込み、ドラムをゆっくり回転させてナダレを発生させ、ドラムの端からこぼれ落ちる砂の量と頻度を観察するというタイプの実験では、ナダレはほぼ完全な周期性をもって発生することが報告され

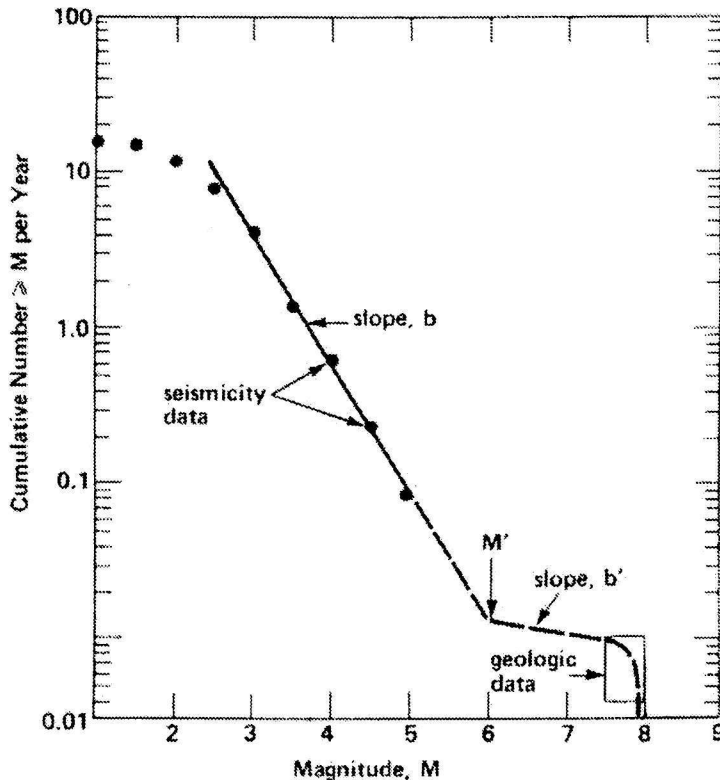


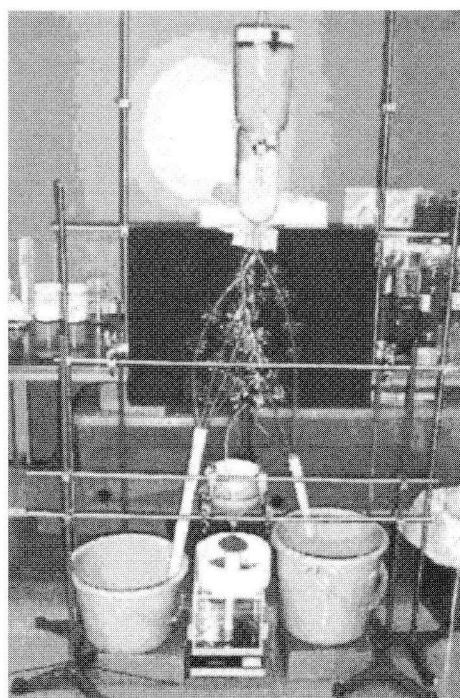
図1 地震の規模別頻度分布. 大きな地震の頻度は G-R 則の直線からはずれる (文献2より).

ている。しかし、面白いのは円盤の上に円錐形の砂山を作り、円錐の頂上付近にゆっくりと砂を落下させるという実験である。この場合、砂山の大きさが小さいときには、ナダレの規模別頻度分布はべき乗則にしたがいが、SOC 的な振る舞いを示すが、砂山のサイズが大きくなると大きなナダレがやや周期性をもって発生することが報告されている。このことを確かめるために、われわれも独自に砂山崩しの実験を行った。以下に実験方法とその結果を紹介する。

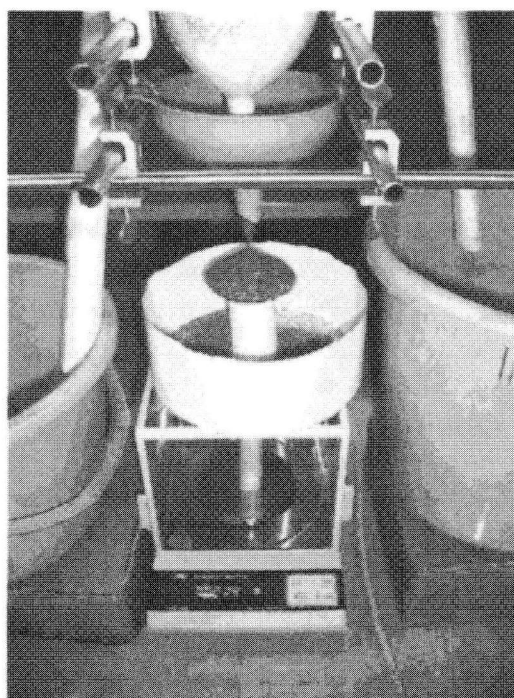
2. 実験とその結果

実験はいたって簡単な装置で実現できる。図2に装置の概要をしめす。まずホッパーに砂を入れ、管を通して落下させる。それを直接円盤の上に注いだのでは流量が大きすぎて、砂山はできない。美しい円錐形の砂山を作るには、砂の流量を著しく小さくする必要がある。そこで7回にわたって流路を分岐させた。ホッパーの砂の1/128が円盤に落下することになる。さらに最終的な落

下速度を2個の漏斗によって減少させ、細い出口を通して円盤の上に落下させた。流量はおよそ10 mg/s である。砂は海岸の砂浜から採取してきたものを洗い、自然乾燥させたものを使った。市販の粒のそろったガラスビーズではうまく砂山ができない。砂をフルイにかけ、2種類のものを用意した。粒径が0.5~1.0 mm のものを sand 1, 0.25~0.5 mm のものを sand 2 と呼ぶことにする。砂を落下させながら、砂山の重量を電子天秤で測定し、2.5 Hz のサンプリング周波数でコンピュータに取り込み、これを解析した。図3に、観測された砂山の重量変化を示す。それぞれの図の上に、円盤の直径 D と、使用した砂の種類が示されている。図3 (a) は粒径が0.5~1.0 mm であり、円盤の大きさが4 cm である。下の図は上の四角で示された部分の拡大図である。これを見ると、砂山では頻繁にナダレが発生し、全体としてほぼ一定の重量を支えていることが分かる。(ここでナダレとは円盤からこぼれ落ちる砂をさす。) 図3 (b) は同じ砂を使って、大きい円盤(径8 cm)の上に注いだ場合の結果である。この場合、(a) とはが



(a)



(b)

図2 実験装置の概要。砂はホッパーから7回の分岐を経て、漏斗を介して円盤上に落ちる。

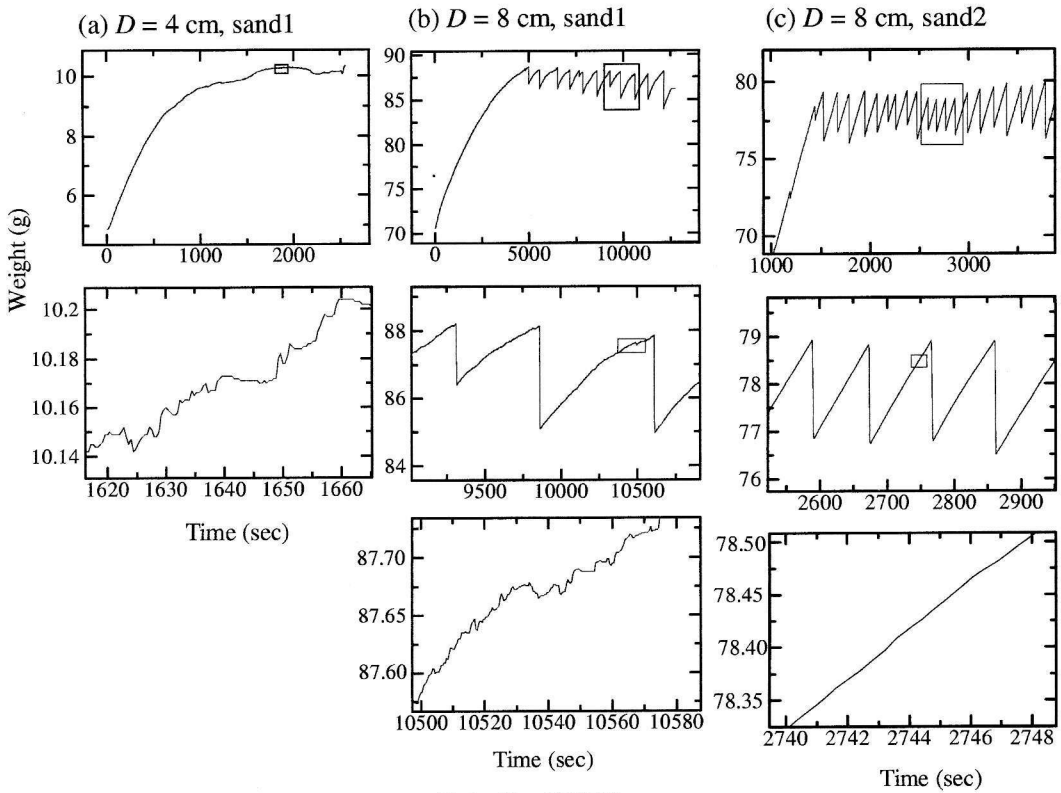


図3 砂の重量変化.

らっと様子が変わっているのが分かるであろう。すなわち、数グラムに達する大きなナダレがほぼ周期的に発生するようになる。一番下の拡大図を見ると、しかし、小さなナダレも上昇過程で頻発していることが分かる。図3(c)は粒径の小さなsand2を用いて8cmの円盤に落下させたときのものである。この場合も大きなナダレが周期的に発生するが、(b)と異なるのは、最下図に示されているように、上昇過程での小さなナダレが消滅している、という点である。(b)および(c)に見られるこのような、やや周期的な大きなナダレをここでは固有地震(characteristic earthquake, 以下CEと略)的なナダレと呼ぶことにする。

図4に、ナダレの規模別頻度分布を示す。地震学の慣例に倣い、積算頻度分布で示した。ここで規模 M (magnitude)は1つのナダレで落下する砂の重さを W としたとき、 $M = \log W$ で定義する。sand1の場合(図4(a)), 円盤の径が2cmから6cmのときには頻度分布はほぼ直線的になり、SOC的振る舞いであるが、径が8cmになる

と、大きなナダレが起き、その部分は直線からずれるようになる。さらにsand2の場合(図4(b)), そのズレは円盤の径が5cm付近で起き、径が8cmとなると、もはや大きなナダレしか起きていないことが分かる。これらの実験結果は、ナダレの挙動が粒径と円盤の径の比によって決定されることを強く示唆するものであろう。円盤の半径を R 、粒径の平均を d とすると、SOCからCE的振る舞いに遷移する時の比 $\eta_c = d/R$ は、sand1の場合、8cmの円盤で遷移が起きているから、平均粒径を0.75mmと仮定して、 $\eta_c \approx 0.02$ と求まる。sand2の場合も同様に平均粒径を0.4mmと仮定して $\eta_c \approx 0.02$ となる。図5にこの関係を模式的に示す。この図が図1と酷似していることに注意されたい。

3. 議 論

砂の粒径と円盤の径の比によってナダレの挙動がSOCからCE的振る舞いに遷移することが分

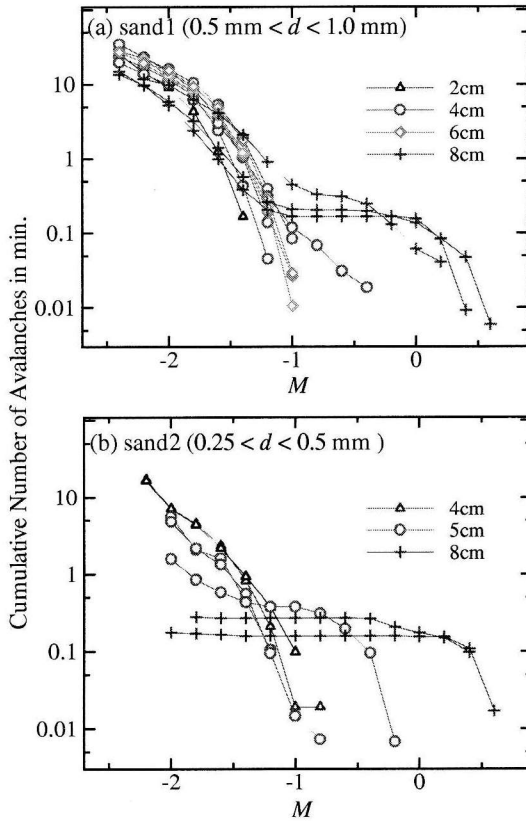


図4 ナダレの規模別頻度分布。

かった。この事実はこれまでの実験結果と調和的である。しかも、この遷移は極めてドラスティックに起きる。そしてさらにこの比が小さくなると、CE 的振る舞いのみが卓越するようになる。

問題はこの原因は何か、ということである。筆者らは一次元のセルラーオートマトンモデルによるシミュレーションを行い、セルの数によってナダレの挙動に違いが現れるかを調べた。ここでその方法、結果を詳しく述べる余裕はないが、セルの数を増やすと最大ナダレの大きさは大きくなるものの、変化は連続して起こり、実験で見られたようなドラスティックな変化は見られなかった。このことは逆に、単純なモデルシミュレーションでは再現できない複雑な物理が背後に潜んでいることを示唆するものである。

砂山崩しを行ったシカゴ大学のグループは、自らの実験結果をもとに、この遷移について次のような説明を行っている⁵⁾。砂山の斜面の角度には

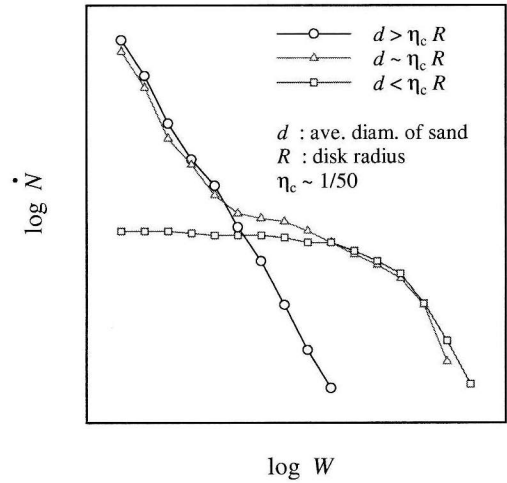


図5 規模別頻度分布のまとめ。

2つの特徴的な角度、すなわち、安息角 θ_r と最大角 θ_m がある。前者は大きなナダレが起きたあとの角度、後者は大きなナダレが起きる直前の角度である(図6参照)。この2つの角度の間にある斜面は超安定状態(metastable)である。彼らの実験によればこの角度の差は約2度である。もし、粒径の大きな粒子がこの斜面上に来ると、その粒子の頭は常に最大角度を上回るので不安定となり、斜面は崩壊する。しかし小さな粒子の場合にはこの角度の中に納まってしまいうので斜面は安定である。2度という角度をもとに η_c を計算してみると0.03となり、実験結果とほぼ一致する。これが彼らの説明である。しかしこの解釈は物理的に納得できない。なぜならば斜面上の粒子は、自分の下に斜面がどこまで続いているかを知らないからである。

この問題に対する1つの解は、次の実験事実で隠されているかもしれない。すなわち、円錐形の砂山の底面で砂山が作り出す圧力を測定してみたところ、砂山の頂上直下では周りより圧力が低い stress dip と呼ばれる部分が存在するというのである⁶⁾。この dip の存在は砂山の生成過程によっても影響を受ける。われわれの実験のように細い出口から砂を注ぐと dip ができ、雨のように一様に注ぐと dip はできないことが確認されている。この dip の原因は、粉粒体に固有の性質、すなわち内部のアーチングによるものと考えられてい

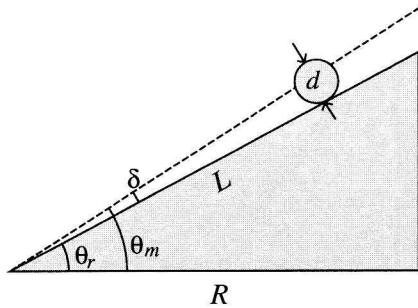


図6 砂山の斜面の2つの特徴的な角度、安息角 θ_r と最大角 θ_m . 粒径が大きいと θ_m を常に超えて不安定となる (文献5の説明より).

る. 砂山の内部では応力は一様ではなく、複雑に応力が分布しており、力を伝達している粒子は全体の粒子のごく一部であるという見方もある、もしそうだとすれば、砂山の斜面の表面付近も複雑な応力状態になっていると考えられる. 砂山崩しの観察によると、大きなナダレはかなり表面をえぐるように発生するので、砂山内部の応力構造がナダレの挙動に影響をあたえることは十分考えられることである. 残念ながら、これまでの dip の研究では、大きな砂山 (すなわち、 η_c が十分小さい) でしか行われていないので、小さい砂山と大きな砂山で内部構造に違いがあるかどうかは定かではない (ある二次元のシミュレーションでは、小さい砂山では dip ができない、と報告されている⁷⁾). 現時点ではこれ以上詳しいことは分からないが、CE タイプの地震が周期性をもつことを考えにいと、砂山崩しにおけるナダレの挙動がSOCタイプからCEタイプに移る原因をつきとめ、これを地殻の応力場に当てはめて考えることは、地震予知を研究する上で大変重要なことではないかと思われる.

最後に断層の成熟度について考えてみたい. 図5に示されるように、ナダレ (あるいは地震) の振る舞いは3つのタイプに分類できる. すなわち、(1)SOC 的な振る舞い、(2)遷移状態、(3)CE 的な振る舞い、である. これらをそれぞれ断層の成熟段階とみなすことはできないだろうか. Stirling *et al.*⁸⁾ は世界の横ズレ断層の調査から、断層のトレースの複雑性は、時間とともに発展する (減少する)、と述べている. 地震が繰り返されることにより、

離れていた断層が繋がり、表面は削られて滑らかになり、大きな1本の断層に次第に成長してゆく、という考えである. Shimazaki⁹⁾ はこの考え方をさらに進めて、「全知全能の地震 (The Almighty Earthquake)」を思弁している. われわれが現在見ている地震は、断層の発展段階の途中であるものの混合物であり、たとえば海溝沿いの固有地震的な巨大地震はかなり成熟度が高い、と見ることもできよう.

単純な砂山崩しの実験から学ぶことは多い.

参考文献

- 1) Bak, P., C. Tang, and K. Wiesenfeld, 1987, Self-organized criticality: An explanation of $1/f$ noise, *Phys. Rev. Lett.*, 59, 381-384; Bak, P., C., Tang, and K., Wiesenfeld, 1988, Self-organized criticality, *Phys. Rev. A*, 38, 364-374.
- 2) 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.
- 3) Kadanoff, L.P., S.R. Nagel, L. Wu, and S-m. Zhou, 1989, Scaling and universality in avalanches, *Phys. Rev. A*, 39, 6524-6537; Nakanishi, H., 1990, Cellular-automaton model of earthquakes with deterministic dynamics, *Phys. Rev. A*, 41, 7086-7089; Ito, K., and M. Matsuzaki, 1990, Earthquakes as self-organized critical phenomena, *J. Geophys. Res.*, 95, 6853-6860 など.
- 4) Jaeger, H.M., C-h. Liu, and S.R. Nagel, 1989, Relaxation at the angle of repose, *Phys. Rev. Lett.*, 62, 40-43; Held, G.A., D.H. Solina, D.T. Keane, W.J. Haag, P.M. Horn, and G. Grinstein, 1990, Experimental study of critical-mass fluctuations in an evolving sandpile, *Physical Rev. Lett.*, 65, 1120-1123 など.
- 5) Nagel, S.R., 1992, Instabilities in a sandpile, *Rev. Modern Phys.*, 64, 321-325.
- 6) Jotaki, T. and R. Moriyama, 1979, On the bottom pressure distribution of the bulk materials piled with the angle of repose, *J. Soc. Powder Technol. Japan*, 60, 184-191; Vanel, L., D. Howell, D. Clark, R.P. Behringer, and E. Clement, 1999, Memories in sand: Experimental tests of con-

struction history on stress distributions under sandpile, Phys. Rev. E, 60, R5040-R5043.

- 7) Schinner, A., H-G. Matuttis, T. Akiyama, J. Aoki, S. Takahashi, K.M. Aoki, and K. Kassner, 2001, History-dependent structure in granular piles, in Powder and Grains 2001 Kishino (ed.), Swets & Zeitlinger, Lisse, 499-502.
- 8) Stirling, M.W., S.G. Wesnousky and K. Shima-

zaki, 1996, Fault trace complexity, cumulative slip, and shape of the magnitude-frequency distribution for stick-slip faults: a global survey, Geophys. J. Int., 124, 833-868.

- 9) Shimazaki, K., 1999, The almighty earthquake, Seism. Res. Lett., 70, 147-148; 島崎邦彦, 2000, 地震はどのように繰り返すか, 科学, 70, 51-57.

2003年5月26日宮城県沖の地震 (速報)

2003年5月26日18時24分頃に宮城県沖の深さ約70kmでM7.0の地震が発生し、岩手県と宮城県で最大震度6弱が観測された。発震機構解は太平洋プレートの沈み込む方向に圧力軸を有し、プレート内部をほぼ鉛直に切る断層面の海側が下方方向に、陸側が上方方向に動いたものと推定される。

この地震に伴って、陸域では最大約1.5cm程度の水平地殻変動が震央から遠ざかる向きに生じたことがGPS観測から確認され、これは上記の発震機構解と整合している。

宮城県沖では、M7.5前後の地震が牡鹿半島のプレート境界を震源として、これまでに6回、平均間隔37年で発生しており、国の地震調査委員会では2000年11月27日に次の地震の発生可能性について評価結果を発表している。それによれば、次の地震が2010年末までに発生する確率は約30%、2020年末までに発生する確率は約80%とされている。

今回の地震は、1978年6月12日宮城県沖地震(M7.4)の震央からは北北西に約80km離れており、深さや発震機構も異なっていることから、地震調査委員会で想定している宮城県沖地震とは別のものである。ただ、1978年宮城県沖地震の約4カ月前の2月20日には、今回の地震よりやや沖合いの深さ56kmでプレート内地震が発生している事実があり、今後の推移が注目される。

なお地震予知連絡会では、この地震に関する詳細な検討を行うため、6月6日に特定部会を開催することとなった。(岡田義光)

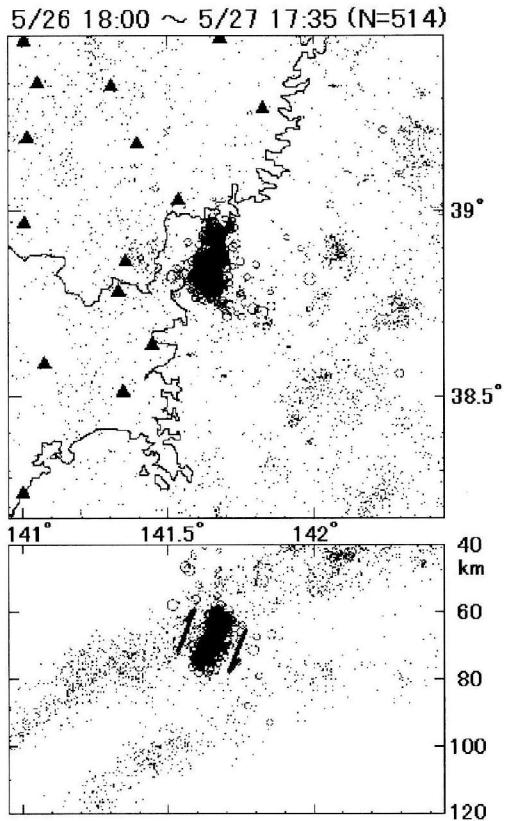


図 2003/5/26 宮城県沖の地震後約23時間の余震分布. 上段は震央分布, 下段は深さ40-120 kmの範囲の東西断面図であり, 背景には過去の震源分布を示す. 上段の▲印はHi-net観測点, 下段の矢印は断層運動の向きを示す.(防災科学技術研究所ウェブページの図に加筆)

南ア金鉱山での震源過程直接観察

小笠原 宏 飯尾能久

南ア金鉱山半制御地震発生実験国際共同研究グループ

はじめに

小サイズの岩石試料を用いた室内実験では、地震前駆現象が何度も再現されるが、それが、巨大地震の震源域ではどのように起こっているのか？ 再現性はあるのか？ これらの答を自然の巨大地震で得ようとしても、内陸では千年、プレート境界でも百年待たねばならない。

最近 GPS 稠密観測網によって大きなスローイベントが明らかになりつつある。では、小さなスローイベントはあるのだろうか？ 巨大地震が、大きな時間遅れを伴って隣接地点で連続して発生することもある。震源では何が起きているのだろうか？

より頻発する小地震を研究してこれらの答えを得ようにも、自然地震の震源は地表から遠く、震源像を詳細に知ることができない。しかし、南アフリカの金鉱山では、自然地震の地表観測では決してできない地震の一生を至近距離で直接観測することが可能であり、短期間に多くの経験を積むことが可能である。そこで、我々は、最近約 10 年間南アフリカの鉱山会社や大学との国際共同研究として半制御地震発生実験を行い、マグニチュード (M) が 2~3 の地震の一生を至近距離で完全収録する試みを行っている^{1)~4)}。本稿ではその概略をごく簡単に紹介する。

日本で M が 2 や 3 の地震と言え、10 km よりも浅いところで発生したときに、その真上でのみ有感となるような小さな地震である。一年間に一万個から十万個も発生し、取るに足らない地震でもある。しかし、世界では、そのような地震で

も犠牲者が出る。例えば、南アフリカ金鉱山では地表下 2~3 km で盛んに採掘が行われ、M3 の地震が毎年数十個発生する。鉱山街に 1 週間も滞在すれば、有感地震を地表で体験することができる。実際に、我々の研究グループの大倉敬宏らは坑内で震源距離 800 m の M2.6 の地震を体験している⁵⁾。震源は、採掘域や坑道から百 m 以内であることが多いため、10 G を超える地震動に見舞われることもある。同グループの南ア共同研究者の R. Green は震源域の極近傍で M3~4 級に遭遇し、足下がすくわれたという。坑道が崩壊したり、薄板状採掘域がペシャンコにつぶれたりすることもある。金を採掘する限り、地震被害から逃れることができないが、南アフリカでは採掘による地震発生を大前提とし、採掘に伴う応力変化をコンピュータで予測しながら地震発生を監視することによって、被害を最小にして生産を最大にするノウハウが蓄積されている。本稿ではその概略も紹介する。

南アフリカ金鉱山と採掘

南アフリカの中央やや北東寄りに位置する Witwatersrand 盆地は、20 億年前の巨大隕石の衝突によってできた地質構造が、その後の浸食によって地表に露出した世界最大級の隕石衝突痕である (図 1)⁶⁾。Dome を中心とする楕円状地質構造の外縁部 (図 1 の粗い砂目) が金鉱床を含む地層である。地層は珪岩、玄武岩質溶岩、頁岩などからなり、Dome の中央部に向かって傾斜し、何枚かの薄板状の金鉱脈 (厚さ 1 m 以下) をはさんでいる。現在盛んに採掘が行われている地域は、

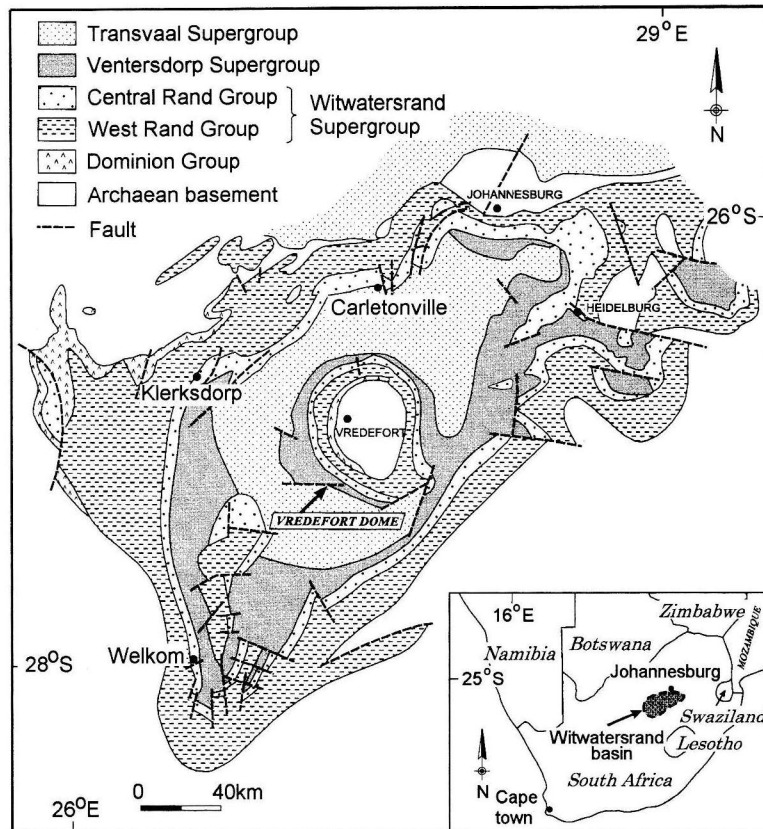


図1 南アフリカ金鉱床地帯の地質 (after Gibson & Reimold⁹⁾)

北から反時計まわりに、Carletonville、Klerksdorp、および、Welkomである。図2は、図1のCarletonville地区にあるWestern Deep Levels金鉱山の金鉱床の様子を模式的に示したものであり、南東に約20度で傾斜する2枚の薄板状の金鉱床が、1カ月あたり10 mほどの速度で採掘され、前線の背後に広くて薄い板状の空洞が残る様子が描き出されている⁷⁾。この鉱山は、現在、Mponeng 鉱山と改名されており、2003年以降は地下3 km以深で10年間にわたる採掘が計画されている。

南ア金鉱山の採掘と地震発生

大深度における採掘前線の背後の薄板状の採掘跡は、大きな岩圧を支えきれずに閉塞する。一方、前線の前方では応力が集中する(図3⁸⁾)。薄板状金鉱床よりも上の岩盤の重力エネルギーが解放さ

れることが、南アフリカの地震発生の原因であるため⁹⁾、採掘を続ける限り地震発生は避けられない。図4は、図1とほぼ同じ範囲の最近11年間の地震活動を示す(データはUSGS/NEIC¹⁰⁾)。地震発生が、金の採掘域に集中している様子がわかる。図に示した期間で平均すると、毎年どこかの鉱山でM5に近い地震が発生していることになる。

このような比較的規模の大きな地震が発生するのは、採掘済みの領域の周囲に、断層やダイクなど、強度にコントラストのある領域が広く分布している場合であり、発生する地震の規模は、応力集中した領域の面積に比例する。

図5は、断層によって200 m弱上下にずれている金鉱脈を採掘したために発生したM4.5の地震のスリップ量分布と応力の関係を解析した例である。1999年にWelkomで発生したM4.6の地震の場合は、人工衛星の合成開口レーダーで検出で

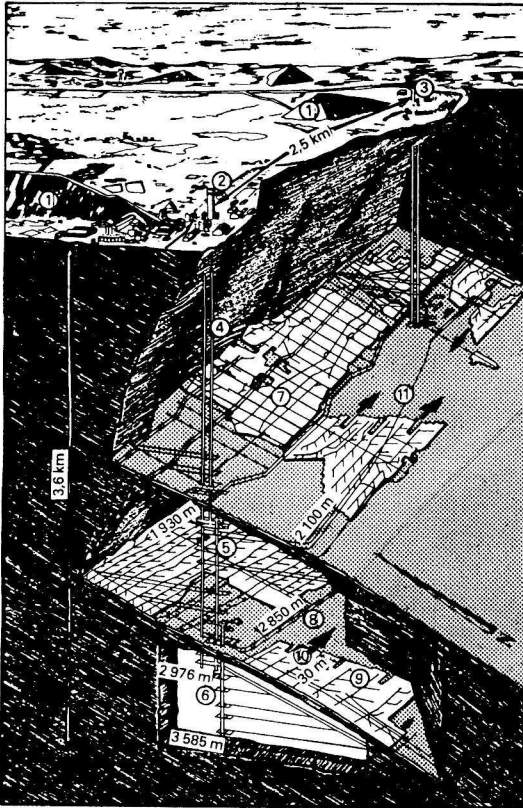


図2 Western Deep Levels 金鉱山（現 Mponeng 鉱山）の金鉱床と採掘（after Tanton et al.^{7)）}

きるほどの地表の上下変化が、約2km×2kmの範囲で観測された¹¹⁾。この規模の地震が発生すると、坑内で多くの犠牲者が出たり、地表の建造物に地震動の被害が発生したりすることもある。過去に発生した最大級の地震は、M5である¹²⁾。最近、多くの鉱山では採掘可能な領域が徐々に狭まり、応力の集中度も高まる傾向にある。断層があるために未採掘である区域も多く、閉山が近い鉱山でもM4クラスの地震が多く発生する傾向にある。後述する、ARM5 鉱山での観察例はこのようにして発生したM4.2の地震断層である。

鉱山地震の制御と予知

地震発生必至の状況にありながら、最小限の被害で最大限の利益が得られるようなノウハウが、南アフリカ金鉱山では蓄積されている^{8),13),14)}。

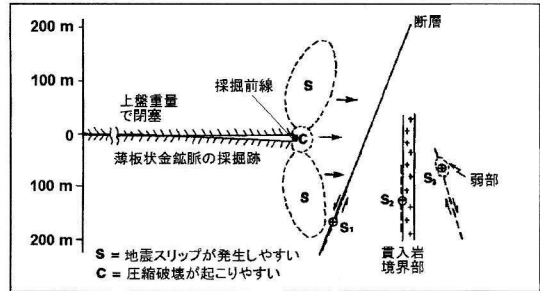


図3 採掘の前進(→)に伴って採掘前線の背後の板状空洞が閉塞し、前方のC域とS域に応力が集中する様子(採掘前線に垂直な鉛直断面図; after COMRO⁸⁾)。前方に、断層やダイク等、強度コントラストがあるとM>2の地震が発生する様子も模式的に示されている。

まず、既存弱面の広域に応力が集中することがないように、採掘域の空間配置を工夫するのが基本である。例えば、断層の近くを掘削する場合、まず断層隣接域を採掘し、その後、断層から遠ざかるように掘削する。そうすれば、たとえば、断層に応力が蓄積して地震が発生しても、そのときには、採掘前線は震源から十分に離れている。逆に、断層隣接域付近を採掘せずに残し、最後にそれに手をつける場合は、非常に危険である。約3kmよりも深い地点では、断層を中心にした幅数十mの隣接域に手をつけない。採掘域の空間配置が複雑な場合は、パソコン上で実行できる境界要素法のプログラムで応力変化を予測する。

採掘レイアウトと並んで重要なのはサポートである。採掘跡の薄板状空洞では1~2mおきに、キャンプファイヤーのような木枠を組み上げて支えたり、人の出入りの無い領域に泥を充填したりして、坑壁や採掘前線近傍に応力を集中させないようにしている(バックフィルと呼ばれる)。バックフィルは、薄板状空洞表面での表面波発生を抑制する効果もあり、地震動被害が軽減されると考えられている。未採掘の領域を計画的に残してサポートさせる方法もある。

応力を抜く方法もいくつかある。南アフリカ金鉱山の最大主圧縮応力軸は鉛直であるため、坑道の側壁に応力が集中しやすい。大深度の坑道では、それを防ぐために、横幅数十m、上下幅約1

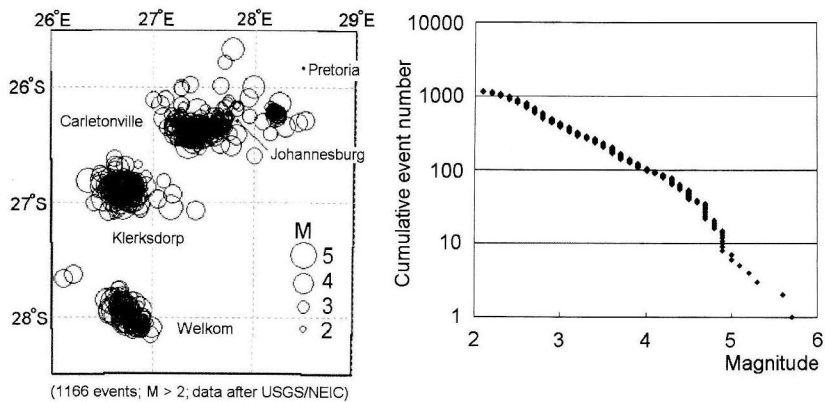


図 4 南アフリカ金採掘地域の地震活動 (左: 図 1 とほぼ同じ範囲の震央図, 右: 規模別頻度分布). データは USGS/NEIC¹⁰⁾ による.

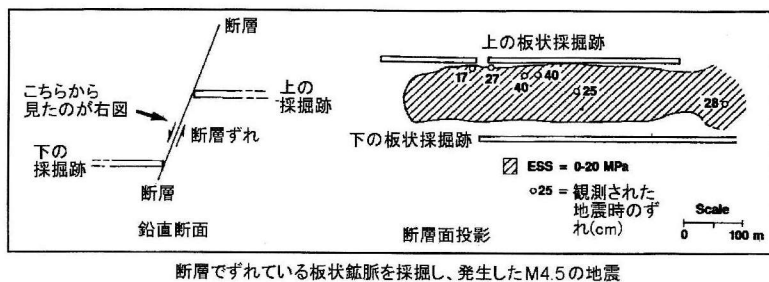


図 5 地質断層によって上下に 200 m 弱ずれた薄板状金鉱床が採掘された際に発生した M4.5 の地震の例 (after COMRO[®]). (左): 鉱脈と断層・地震スリップの関係 (断層走向に垂直な鉛直断面図). (右): 断層露出部で確認された地震滑り量 (cm) と, 採掘領域配置と弾性論から推定された過剰剪断応力力の分布の関係 (断層走向に平行な鉛直断面図).

m 前後の薄い短冊状の空洞を, 坑道の数十 m 上に坑道沿いに掘削する.

また, 強度が高いと応力が集中し, 破壊時に突然岩盤が坑道や採掘前線に飛び出して (山はね) 被害が生ずる. このため, 坑道や採掘前線近傍を発破によって破碎し, 応力集中域を岩盤の奥へ追いやることもある.

このような策を施してもなお地震は発生するため, 多くの金鉱山では地下の地震計観測網による 24 時間監視が行われている. 坑道周辺の破碎域を避けるために坑道から約 10 m のボアホールが掘削され, 固有周波数数 Hz の 3 成分 Geophone が, 数 km × 数 km の範囲に約 500 m 間隔で設置されるのが標準である. そして, 単に震源とマグニチュードを決定するだけでなく, 地震発生の時

間空間パターンや, 地震モーメントと地震波エネルギーから震源域のみかけ応力の変化にも注目し, 毎朝異常地域がないかをチェックしている. 異常地域で異常が進行した場合は, 待避等の指示を行い, 成功した例もある.

南アフリカの大深度金鉱山では, 以上に述べたような鉱山地震被害の Prevention, Protection, Prediction を行っている.

半制御地震発生実験

上記からもわかるように, 南アフリカ金鉱山では, 予想震源域とその応力状態が予め推定できる. しかも, 震源域が採掘域や坑道から近いため, 地震発生前に各種計測器を埋設することが可能で

ある。このような試みのなかでパイオニア的なものは、1970～1980年代にかけて McGarr らによって行われたものである¹⁵⁾。これに対して、我々の半制御実験は、最近の高分解能な観測システムによる地震の一生を完全に収録しようとする試みである³⁾。我々は、これまでに、ISS International 社の協力の下、Anglo Gold 社の4つの金鉱山における地下1,700～3,000 mで観測を行っている^{16),17)}。第一実験フィールド (Western Deep Levels, South 金鉱山, 地下2,650 m) では、10 Gでも振りきれない3成分ボアホール加速度計を、約200 mの区間の9地点に埋設し、距離100 m～200 m以内で、採掘に伴う地震を3万個弱収録した。伝播経路の岩盤は堅固でQは300前後である。多数の地震が距離100 m前後で収録され、減衰の影響がほとんどない震源像をみることができた¹⁶⁾。モーメント (M_0) が $10^8 < M_0 < 10^{12}$ Nm の範囲では、 M_0 とコーナー周波数は基本的に3乗則を満たした¹⁸⁾。震源距離100 m前後のM1～2級の地震にも初期フェーズが見られた¹⁹⁾。震源距離約100 mのM2の地震前後では、時間に伴う地震パラメータ (b値やenergy indexなど) の変化が見られた。石井式歪計は4台埋設され10 MPaに相当する歪変化も振りきれることなく記

録できることが実証された²⁰⁾。しかし、データ収録が15分おきであったり、分解能が12 bitであったりしたため、詳細は議論できなかった。

第二実験フィールド (Bambanani 鉱山, 地下約2,400 m) では、1999年に石井式歪計1台をM>3が予想される断層から10 m前後の地点に埋設し、24 bit/25 Hz歪連続観測を行っている²¹⁾。そして、2002年の2月には、震源距離100 m前後でM2.6とM3.5が発生した (図6)。非常に残念なことに、収録システムが動作していなかったために、地震の直前直後の記録がない。しかし、再開された観測でとらえられた余効変動を外挿すると、地震時に10のマイナス4乗級の歪変化があったであろうことが推察され、歪計が震源域内に設置されていたことが伺われる (図7²²⁾)。図6の矢印の地点では、鉱脈沿いにかき落としてきた鉱石を、80Lの水平坑道で待ち受けるトロッコに落とし込む穴口があり、その鉄格子のふたが約10 cmの右横ずれが見られた (写真1)。ずれの向きは地震の発震機構と調和的だが滑り量は地震の規模に比してかなり大きい。地震後の非地震性滑りが少なくなく、それが余効変動として記録された可能性もある。2001年の9月には、震源距離約20 mでM0の地震が発生し、10のマイナス5乗級

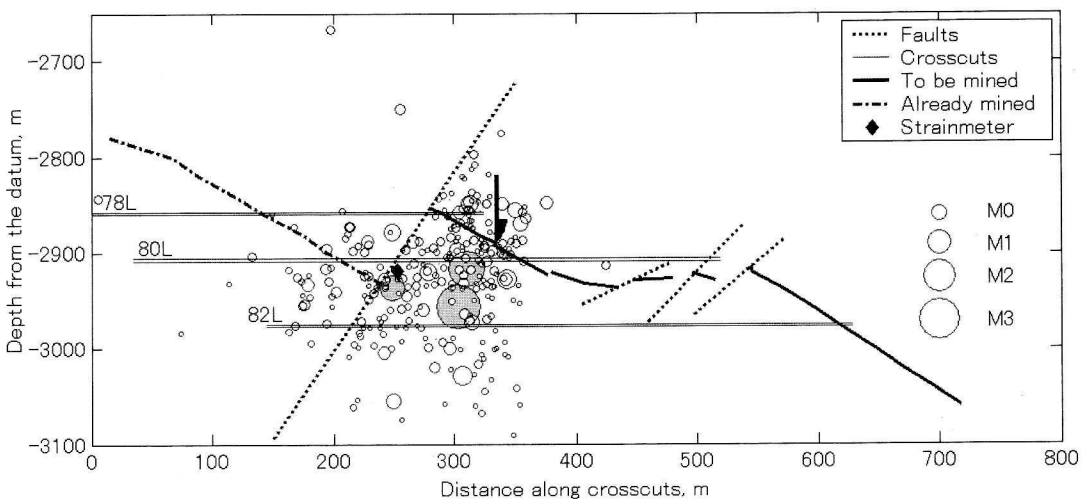


図6 Bambanani 鉱山において、石井式歪計 (ダイヤモンド印) から約100 m以内に発生した地震群 (2002年2月末～3月; 最大M3.5; after 森山, 他²²⁾)。下向き矢印は、顕著な水平横ずれが確認された場所 (写真1参照)。

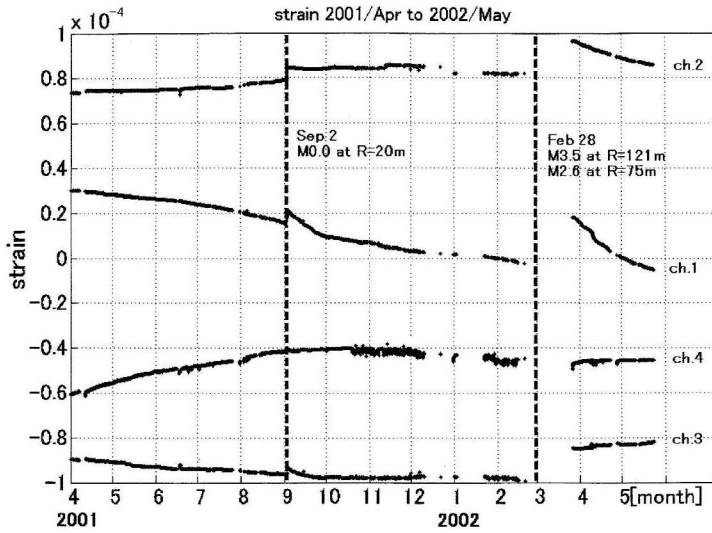


図 7 石井式歪計で観測された約 1 年間の歪記録。縦軸が 10 のマイナス 4 乗であることに注目 (after 森山, 他²²⁾)。Ch.1~Ch.3 は, 図 6 の鉛直断面にほぼ等しい面内の伸縮三成分。Ch.1 が鉛直方向で, 他はそれぞれ 120 度ずつ角度が異なる。伸びが正。



写真 1 図 6 の矢印の地点で見られた水平右横ずれ。中央手前の岩の上のボールペンがスケール。断層が画面のほぼ中央を、上下に走る断層 (点線) が右横ずれを起こしたために、右から 3 番目の鉄格子が平行四辺形に変形した。壁面には新鮮な亀裂も確認できた (写真省略)。

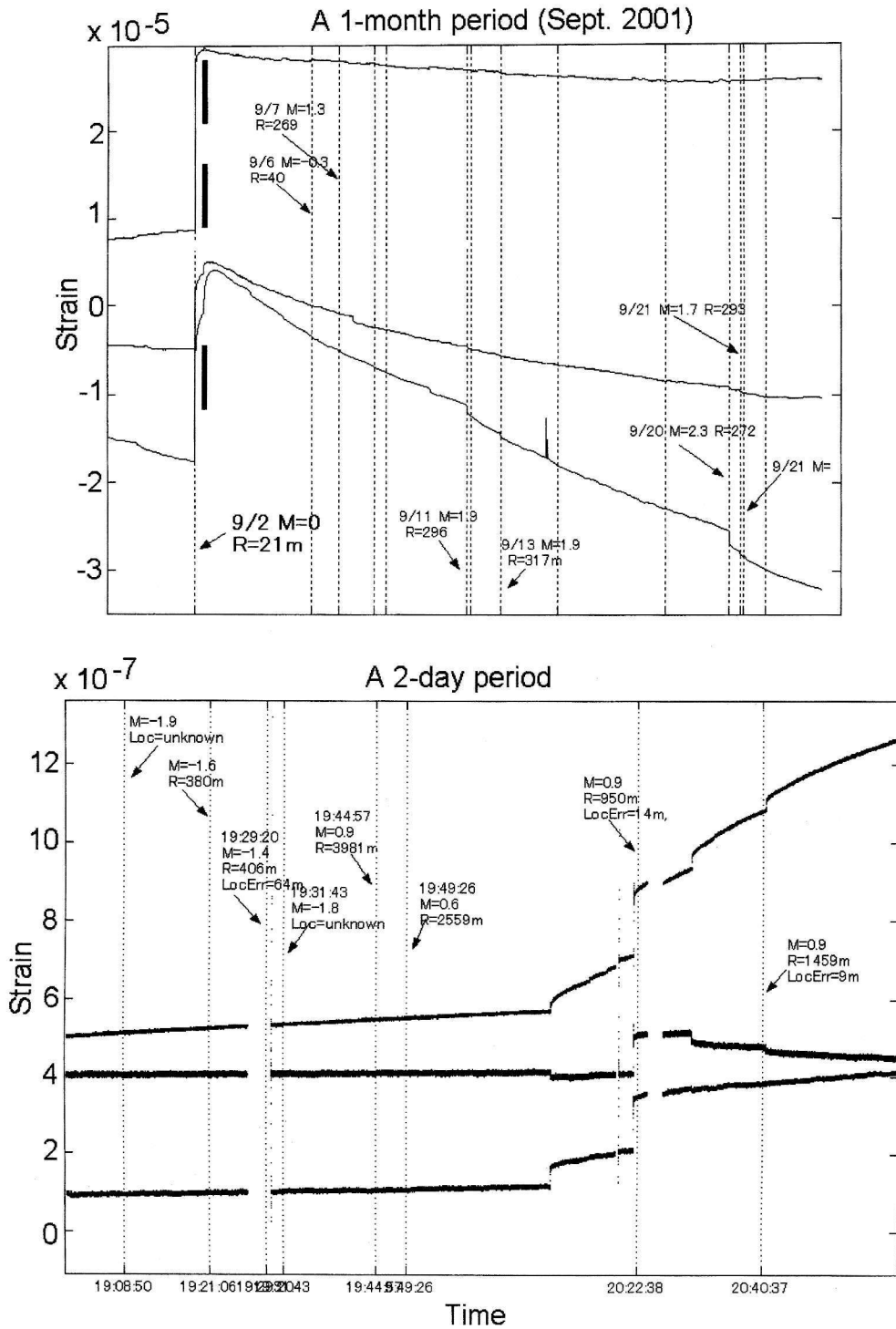


図 8 Bamanani 鉱山において、2001 年 9 月 2 日に石井式歪計から約 20 m で発生した M0.0 の地震後の余効変動 (after 竹内, 他²³⁾)。 (上) 地震後約 1 カ月間、縦の点線はカタログされている地震の発生日時。 (下) 上図の黒太線の部分の拡大。地震が検知されていない 20 時前後から、大きな余効変動群が始まっている。

の Coseismic step とその前後の歪変化が完全に収録された。地震発生 0.1 秒前までは、Coseismic step 量の 1/1,000 を超える前駆的な歪変化は観測されなかったが、地震発生後には様々なタイミングとセンスで対数的な歪変化が重畳し、時間とともに終息して行く様などが観測された (図 8²³⁾)。他の地震で余効変動が見られたのは、Coseismic step が見られた 80 弱の地震のうち約 1 割のみであり、その多くが震源距離の近い地震 (距離 200~300 m 以下) であった²⁴⁾。またその際には、余効変動量が Coseismic step 量に匹敵するか、それよりも大きいこともあったことが特徴である。この余効変動が歪計や埋設セメントの変化でなく、震源域やその近傍に限定された岩盤の変動であることを証明することが第一の課題である。地球潮汐が M0 の地震の前でも後でも記録されている²⁵⁾；また、他の数十個の地震のステップ量が、距離と地震モーメントから予想されるものと調和的である²⁴⁾。したがって、歪計そのものは、正常に動作し続けているものと思われる。前震にも余効変動があるであろうし、Umeda²⁶⁾ の言う初期フェーズも小地震であるから、やはり、余効変動を伴うであろう。今回得られた余効変動が、地震の誘発プロセスを考えるヒントになるかも知れない。

今後の方針の一つは、より多くの実験サイトでより多くのチャンスを持ち、多くの経験を積むことである。もう一つは、複数の歪計からなる array を構築して変動源の位置を確認することである。石井式歪計 1 台による断層近傍の歪の連続モニタリングは、2002 年から Mponeng 鉱山の地下約 2.8 km の Trough Dyke/Fault でも行われている²⁷⁾。この観測からも、Bambanani 鉱山と同様な経験を積むことができると期待される。また、Tau Tona 鉱山の地下約 2.9 km でも同様な試みが開始される予定であるが、Tau Tona 鉱山では事前に応力測定 (応力解放法・ASR 法・DSCA 法) も行われ、震源域の応力が既知の状況で地震発生を待ち、地震発生時の断層強度が観測できる予定である²⁸⁾。さらに、ボアホール強震計を、断層をはさむ 2 点に埋設し 15 kHz のイベントトリガー方式でモニターすることによって、地

震スリップ中の仔細像を記録する。

さらに、Mponeng 鉱山の地下約 3.1 km の Pretrius 断層付近で採掘が予定されている、4 台の石井式歪計による array を展開する²⁹⁾。Tau Tona 鉱山と同様に、歪計の埋設前には応力測定 (応力解放法・ASR 法・DSCA 法) が行われ、ボアホール強震計が断層をはさむ 2 点に埋設され、地震スリップ中の仔細像を記録する。また、断層変位の 24 bit 25 Hz 連続観測も行う³⁰⁾。

地震震源の地下直接観測

上記の、地震発生至近距離モニタリングと同時に、地震震源の地下直接観測も開始した。地震の震源に直接赴いて岩石試料を回収して、断層岩や周囲の岩盤の物性や応力状態などの地震発生の場合を実地に調査しようというものである^{31),32)}。2002 年は、M4.6 (1999 年 Matjhabeng 鉱山で発生)、M4.2 (2001 年 ARM5 鉱山で発生)、M3.5 (2002 年 Bambanani 鉱山で発生)、M>6? (多分太古代に Mponeng 鉱山で発生) の現地調査を行った。M3~4 級の主地震断層では、数 cm~10 cm 前後の正断層すべりが見られただけでなく、断層末端部では、局所的な圧縮応力場特有の盤膨れや副断層 (逆断層) も見られた。特徴的であったのは、同程度の地震滑りが観測された地点でも、地震動被害が著しい場合とほとんどない場合とがあることである。断層すべりと末端部の変形のほとんどが、地震発生時に起こったのであろうが、地震発生後の非地震性の変形も少なからずあるのではなからうか? Bambanani 鉱山については、石井式歪計の余効変動記録と、比較検討を進めたい。

北・大槻・川方³³⁾ は、Matjhabeng 鉱山や Arm 5 鉱山で断層岩を採取し溶融の痕跡の調査を行ったが、現在のところ、その証拠は確認されていない。

おわりに

以上は、1992 年以来続いている日本と南アフリカの国際共同観測である。これまでに、科研費

(代表者：住友)，同(安藤)，同(飯尾)，同(小笠原)，ならびに，立命館大学，東京大学共同利用，東京海上各務記念財団地震予知助成金，地震予知総合研究振興会，地質調査所，Anglo Gold 社，Mponeng 鉱山，Bambanani 鉱山，Tau Tona 鉱山，Witwatersrand 大，ISS International 社によってサポートされている。

2003 年度からは，米欧各国とも協力して，地震発生モニタリングと地震断層ドリリング計画を行うべく，国際陸上科学掘削計画(ICDP)に，2003 年 1 月，Proposal を提出した。日本の研究グループが同計画の重要な役割を果たす予定である。

これらの取り組みを通じて，地表からの自然地震観測では得られない，地震像を明らかにしてゆきたいと考えている。

参考文献

- 1) Nicolaysen, L.O., 1992, International Semi-controlled experiment on seismic events: a review of the background and proposal, 地震学会ニュースレター, 3, No. 6, 9-27.
- 2) 飯尾能久, 深尾良夫, 1992, 南アフリカ金鉱山における国際共同実験参加の呼びかけ, 地震学会ニュースレター, 3, No. 6, 8-9.
- 3) 飯尾能久, 1995, 南アフリカ金鉱山での地震予知, 岩波科学, 65, 279-281.
- 4) 住友則彦, 1998, 国際共同研究; 地震発生の半制御実験, 月刊地球, 229, 391-394.
- 5) 大倉敬宏, 1996, 地震に迫る—南アフリカの金鉱山にて—, 地震学会ニュースレター, 8, No. 1, 9-11.
- 6) Gibson, R.L., W.U. Reimold, 2001, *The Vredefort Impact Structure, South Africa. The Scientific Evidence and a Two-day Excursion Guide*, Council for Geosciences, South Africa, pp. 111.
- 7) Tanton, J.H., T.F. McCarthy and T.O. Hagan, 1984, The introduction of stabilizing pillars to reduce rockbursts at Western Deep Levels, Limited, In *Rockbursts and Seismicity in Mines, South African National Group on Rock Mechanics*, 245-252.
- 8) Chamber of Mines Research Organization (COMRO), 1988, *An Industry Guide to Methods of*

Ameliorating the Hazards of Rockfalls and Rockbursts, COMRO, South Africa, pp. 114.

- 9) McGarr, A, 1976, Seismic moments and volume changes, *J. Geophys. Res.*, 81, 1487-1494.
- 10) USGS/NEIC (http://www.neic.cr.usgs.gov/neis/epic/epic_rect.html)
- 11) Doyle, G. (<http://rrsg.ee.yct.ac.za/~gdoyle>)
- 12) Ortlepp, W.D., 1997, *Rock Fracture and Rockburst an Illustrative Study*, South Afr. Inst. Mining Metallurgy, pp. 98.
- 13) 長 秋雄, 1996, 南アフリカ金鉱山における地震観測, 地質ニュース, No. 507, 62-67.
- 14) 長 秋雄, 他, 1998, 南アフリカ金鉱山の掘削と地震, 月刊地球, 229, 398-403.
- 15) e.g. McGarr, A., et al., 1975, Relationship of mine tremors to induced stresses and to rock properties in the focal region, *Bull. Siseism. Soc. Am.*, 65, 981-993.
- 16) Ogasawara, H., et al., 2002, Review of the semi-controlled earthquake-generation experiments in South African deep gold mines (1992-2001), In *Seismogenic Process Monitoring* (Ogasawara, H. et al. eds.), Balkema, 119-150.
- 17) Ogasawara, H. et al., 2002, Semi-controlled seismogenic experiments in South African deep gold mines, *J. South African Inst. Mining Metallurgy*, 102, 243-250.
- 18) Ogasawara, H., et al., 2002, Scaling relationship of earthquake monitored at the distance on the order of 100 m with wide dynamic range, In *Seismogenic Process Monitoring* (Ogasawara, H. et al. eds.), Balkema, 165-171.
- 19) Satoh, T. et al., 2002, Near source observation of small initial phase generated by earthquakes in a deep gold mine in South Africa. In *Seismogenic Process Monitoring* (Ogasawara, H. et al. eds.), Balkema, 165-171.
- 20) 南アフリカ金鉱山における国際共同実験グループ(発表者 石井 紘), 1997, 地震発生の制御実験(10)—南アフリカ金鉱山におけるボアホール歪み観測—坑道掘削に伴う長期的歪み変化, 地球惑星科学関連学会 1997 年合同大会講演予稿集, 168.
- 21) 石井 紘, 他, 2000, M3 予想震源断層上での石井式ボアホール歪計による 25 Hz 24 bit 連続観測—南アフリカ金鉱山における—(25), 日本地震学会講演予稿集, A58.
- 22) 森山慎也, 他, 2002, 南ア Bambanani 金鉱山の

- 石井式歪計の百 m 前後の M2~3 地震群と 10^{-4} 級歪変化—南ア金鉱山半制御地震発生実験 (32), 地震学会講演予稿集, P 160.
- 23) 竹内淳一, 他, 2002, 南ア金鉱山石井式歪計の地震直前記録の non-causal artifact の除去と対数的余効変動—南ア金鉱山半制御地震発生実験 (33), 地震学会講演予稿集, P 161.
- 24) 竹内淳一, 2003, 距離 20~数 100 m での地震の Preseismic, coseismic, postseismic 歪変化に関する予備解析, 立命館大学固体地球物理学研究室卒業論文集, 180-195.
- 25) 安達俊仁, 2003, 応力の変化にともなう歪の変化と 10^{-4} 級歪変動—南アフリカ Bambanani 金鉱山における半制御地震発生実験, 立命館大学固体地球物理学研究室卒業論文集, 197-214.
- 26) Umeda, Y., 1990, High-amplitude seismic waves radiated from the bright spot of an earthquake. *Tectonophysics*, 175, 81-92.
- 27) 小笠原宏, 他, 2002, Mponeng 鉱山 M3 予想震源断層上での石井式歪計による 25 Hz 24 bit 連続観測—南アフリカ金鉱山における半制御地震発生実験 (29), 地球惑星科学関連学会 2002 年合同大会, S040-P010.
- 28) 川方裕則, 他, 2002, 南アフリカ Tau Tona 金鉱山 Spotted Dick Dyke : 地震・ひずみ観測・応力測定—南アフリカ金鉱山における半制御地震発生実験 (31-1), 地震学会講演予稿集, P 158.
- 29) 飯尾能久, 他, 2002, 南アフリカ金鉱山における半制御地震予知実験 (2002-2006 年度) (31), 地震学会講演予稿集, A84.
- 30) 加藤愛太郎, 他, 2002, 南ア Mponeng 金鉱山—Pretrius 断層 : 地震, 歪アレイ・断層変位観測計画—南ア金鉱山における半制御地震発生実験 (31-2), 地震学会講演予稿集, P 159.
- 31) Ogasawara, H., 2002, A key point of potential future hypocenter fault studies in deep mines : a report on a scientific tour of RaSiM5, *Proc. Internat. Workshop Phys. Active Fault, Tech. Note Nat. Res. Inst. Earth Sci. Disast. Prev.*, No. 234, 294-298.
- 32) 小笠原宏, 他, 2002, 南ア 4 金鉱山での M>3 震源地下直接観察—南ア金鉱山における半制御地震発生実験 (30), 地震学会講演予稿集, A83.
- 33) 北 佐枝子, 大槻憲四郎, 川方裕則, 2002, 私信.

全壊家屋と倒壊家屋は違う？

全壊家屋の定義は修復不能の家屋である。つまり建てなおさなければ駄目だというものである。それに対して、倒壊家屋の定義は文字通り倒れてしまった家屋である。倒壊家屋は、修復不能であるから全壊家屋に含まれる。両者とも建て替えなければならないから経済的損失としては余り違いは無い。そうすると全壊家屋のうち、特に被害のひどいのが倒壊家屋なのだから、そう目くじら立てて違う違うということはないということになるかもしれない。倒壊家屋を他の全壊家屋と区別したいのは、家屋が曲がりなりにも立っているのと、潰れてしまっているのとの被害の余りの差である。その違いを以下に述べてみよう。

1. 倒壊家屋が地震死者のほとんどの原因となっている。家が潰れなければ、倒れた家具の下敷きになっても怪我はするかもしれないが、死ぬことは稀である。
2. 地震大火の原因もそのほとんどは、木造家屋の倒壊である。家が潰れなければ、例え出火しても、人々は消し止めることが出来る。潰れた場合は、脱出が先である。消火にまでは手が回らない。折角駆けつけた消防も、家の下敷きになった人の『助けてくれ』の声で救出に時間をとられ消火が遅れ消し止められなかった例も



全壊家屋は多いが倒壊家屋は見えない街並み、日野町、2000年鳥取県西部地震

ある。過去の地震でも、倒壊家屋が少ない場合は、出火はしても大火となった例は無い。

3. 全壊家屋の中で倒壊家屋の割合は少ない。例えば、2000年鳥取県西部地震の場合、震源域の日野町では、全壊家屋130棟中倒壊家屋は僅か1棟であった。
4. 自治体などでまとめられる被害統計は全壊家屋数であり、倒壊家屋数は集計されない。死者と直結する倒壊家屋数は、大火災の際は焼失してしまって把握できない場合もあると思うが、基礎資料として残しておくべきである。
5. 計測震度以前の気象庁震度階級の説明文の、例えば震度階級7：激震では「家屋の倒壊が30%以上に及び…」とあるが、この文中の倒壊は全壊ではなくて上述の意味での倒壊である。ところが、1995年以降、各地で地震の被害予測が行われるようになったが、その中では、全壊家屋〇〇〇〇棟、死者〇〇〇人が予想されるなどのようにになっている。このような記述では、全壊家屋数と死者数が密接な関係があるように思われてしまう。
6. 古い文献では、全壊家屋ではなくて全潰家屋が用いられている場合がある。この場合の全潰家屋は倒壊家屋の意味である。

(伯野元彦)



典型的な倒壊家屋、神戸市東灘区1995年兵庫県南部地震

地震基盤（工学基盤）の訂正

地震ジャーナル 34号（2002年12月）の39頁の囲み記事「地震基盤（工学基盤）」について吉田 望氏（応用地質(株)）よりご指摘がありましたので、次のように訂正いたします。

地震基盤

地盤振動を解析する際、地震動を入力する基盤となる岩盤あるいは硬い地盤を言う。その地域で一定の空間的広がりを持ち、それより下方でS波速度の顕著な変化が見られないことを条件として設定される。通常、S波速度毎秒3km以上の固い岩盤の上面を地震基盤とする。ただ実際には、この地盤は数kmと非常に深いので、その深さまでの地盤情報が得られていることは殆ど無いため、地震入力地盤として用いられることは殆ど無かった。地震基盤より下の岩盤は地震波に対してほぼ均一とみなす。均一な岩盤中を地震波が進む場合は、距離に応じて地震波は減衰する。そこで地震波発生場所からの距離が同じならば、地震基盤面に下から入射する波はどこでもほぼ同じと考えられる。

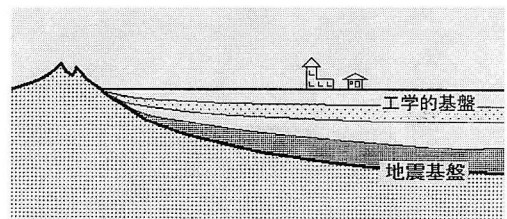
工学的基盤

日本では古くから地震被害と表層地盤に関係があることが知られ、多くの研究がなされてきた。そして、表層地盤において、下方からきた地震波は大きく増幅されることが地中地震観測結果からも知られるようになり、工学的要請から地表における地震動を計算する必要が出てきた。この場合、浅い層ではS波速度などの地盤情報が解明されていることが多いことなどのため、深さ数百m、S波速度が300~700m/秒のやや硬い堆積層を地震入力基盤として採用することが多い。この地震入力基盤を一般的には工

学的基盤と称するが、実際には、分野ごとに、建築では解放工学的基盤 ($V_s=400$ m/秒)、原子力発電関係では解放基盤 ($V_s=700$ m/秒) などのように名称からS波速度まで異なった用い方がなされている。この基盤は深さ数百mと浅いためボーリング資料など地盤情報なども多く、工学的な入力地震動解析には有用なものであり、これを基盤とした地震動解析によって過去の地震被害をほぼ説明することが出来る。又、1秒程度以下の地震動成分の増幅は、この工学的基盤による振動解析によってほぼ説明可能であった。しかしながら、1995年の兵庫県南部地震では被害の激甚な地域が帯状に現れ、それが表層地盤の影響のみでは説明できず、地震基盤に達するような深い地盤構造の影響が無視できないことが明らかにされた。なお地震基盤と工学的基盤の位置関係は図に示したようである。

したがって、大地震の地震動を評価する際、工学的基盤に基づいた表層地盤の影響を考慮することが必要不可欠であり、精度向上のためには、さらに深い地震基盤に達するような地盤構造の影響も考慮することが望ましい。

（伯野元彦）



地震基盤と工学的基盤の説明

■地震予知連絡会情報■岡田義光■

定例の地震予知連絡会は、第150回が2003/2/17に、また第152回が2003/5/19に開催され、2002年11月～2003年4月における全国の地震活動・地殻変動を中心として報告と検討がなされた。また、この間に臨時の第151回連絡会が2003/4/14に開催され、第18期会長の選出、副会長の指名、部会メンバーの指名などが行われたほか、三ヶ日における体積ひずみ計の異常記録に関する検討がなされた。会長には大竹政和、副会長には島崎邦彦（強化部会長兼務）・岡田義光（特定部会長、トピックス部会長兼務）の各氏が、それぞれ就任した。

毎回テーマを変えて集中的な議論を行うトピックスとしては、第150回に「活断層の深部構造と地震・地殻活動（その1）」（世話人：佃 栄吉委員）、第152回に「低周波微動・低周波地震」（世話人：長谷川昭委員）が取り上げられた。

なお、世の中の情報公開の流れに沿って、第152回連絡会からは本会議の様子が隣接する小会議室のテレビモニターにより公開されることとなった。予知連事務局に事前登録を行うことによって、誰でも本会議を傍聴することが可能である。

1. 北海道地方

2002年11月17日、北海道北東沖のオホーツク海で深さ496km、M7.0の地震が発生した。この地震は、この半年間に日本付近で発生した最大の地震である（気象庁）。

2002年12月1日、十勝沖の深さ103kmでM5.4の地震があった。この地震の震源は二重深発面の下面に位置し、余震はほぼ水平に分布すること、発震機構解は太平洋プレートの沈み込み方向に張力軸を有することなど、多くの点で1993年釧路沖地震（深さ101km、M7.8）と類似している（気象庁）。

2003年2月上旬から摩周湖の直下でごく浅い地震が群発し始め、2月13日には最大となるM3.8の地震が発生した。この地震に伴って、近傍に設置された体積ひずみ計には明瞭なひずみ波形が記録された（北大）。

2003年2月19日、留萌支庁南部の深さ222kmでM6.1の地震があった。M6を超えるやや深発地震がこの地域に発生するのは、やや珍しい現象である。発震機構解は北東-南西方向に張力軸を有する型であり、沈み込

む太平洋プレートの内部で発生したものと思われる（気象庁）。

2. 東北地方

宮城県沖では、2002年11月3日にM6.1、同12月5日にM5.2、2003年1月7日にM4.6と、中規模の地震が連発している（図1：気象庁）。2002年11月3日のM6.1の地震に引き続き、周辺のGPS観測点では最大1

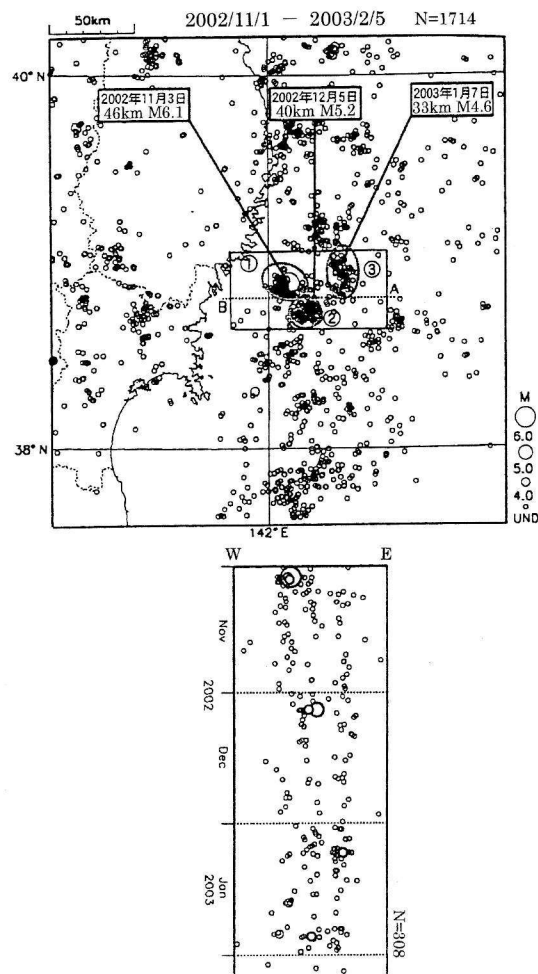


図1 2002年11月1日～2003年2月5日における宮城県沖の地震活動。50km以浅の地震の震央分布、および矩形領域内の時空間分布（東西方向）を示す。〔第150回：気象庁資料に加筆〕

cm 程度のゆっくりとした余効変動が記録された。地震時および地震後を合わせた断層すべりの規模は M 6.5 程度と見積もられ、本震と同程度の余効的すべりを生じたものと推定される (図 2: 地理院)。GPS 観測によって、このようなゆっくり滑りを検出した事例は着実に増えてきている。

2003 年 2 月 16 日、福島県沿岸近くの深さ 63 km で M 5.0、また 3 月 3 日にこの地震の北東約 80 km の地点の深さ 41 km で M 5.8 の地震があった。発震機構解等から、前者は太平洋プレート内部 (二重深発地震面上面) の地震、後者はプレート境界の地震と考えられる。一方、2003 年 4 月 17 日には、青森県東方沖の深さ約 40 km で M 5.4 の地震があった。発震機構解は西北西-東南東方向に圧力軸を有する逆断層型であり、プレート境界の地震と考えられる (気象庁)。

3. 関東・中部地方

茨城県の沖合いは、太平洋プレートの境界付近で地震が多発する地域であるが、この半年の期間にも、M 4.5 以上のものとして、2002 年 12 月 14 日 M 4.5、2003 年 1 月 9 日 M 4.7、1 月 21 日 M 5.0、4 月 8 日 M 5.8、4 月 21 日 M 4.6、4 月 25 日 M 4.7 などの地震が発生した。また、内陸の茨城県南西部もプレートの相互作用によって活発な地震活動が見られる地域であり、この半年間に発生し

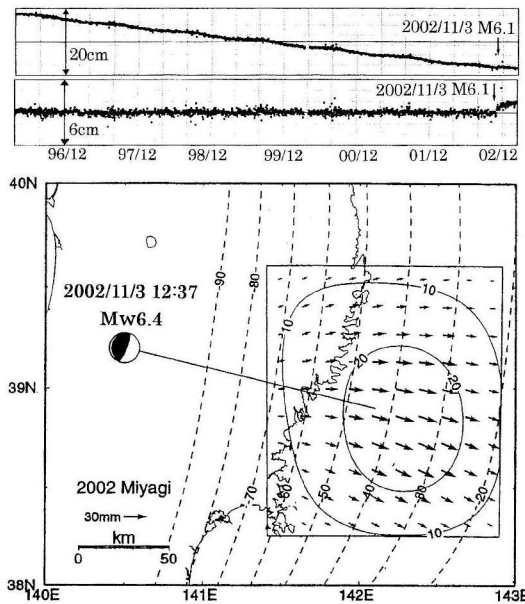


図 2 2002 年 11 月 3 日宮城県沖の地震 (M6.1) に伴った余効的地殻変動。上から、GPS による飛島-気仙沼間 (178 km) の基線長変化、原データから直線の変化・年周成分等を除いた基線長変化、推定された太平洋プレート上面でのすべり量分布を示す。[第 150 回: 地理院資料より合成]

た M 4 を超える地震としては、2002 年 12 月 23 日 M 4.1 (深さ 55 km)、2003 年 1 月 31 日 M 4.4 (深さ 66 km)、3 月 13 日 M 4.8 (深さ 47 km)、4 月 8 日 M 4.6 (深さ 47 km) があり、また 5 月 6 日にも M 4.3 (深さ 46 km) の地震があった。これらの地震は、そのほとんどがフィリピン海プレートの上面付近で発生したものであるが、1 月 31 日のやや深い地震はフィリピン海プレートの下面が太平洋プレートと接する境界付近で発生している (気象庁)。

一方、愛知県内では、2003 年 2 月 7 日に M 4.2 (深さ 38 km)、3 月 4 日に M 4.1 (深さ 34 km)、3 月 27 日に M 4.0 (深さ 42 km)、4 月 26 日に M 3.9 (深さ 41 km) と、中規模地震が続発した。これらの地震はいずれも沈み込んだフィリピン海プレートの内部で発生したものであるが、愛知県付近では 2000 年頃から M 4 以上の地震の発生回数が増えているとの報告があった (気象庁)。ただし、M 3 以上の地震数で見るとほぼ一定の割合で地震が発生しており、このような傾向は読み取れない。なお、4 月には、愛知県東部の深さ 30 km 前後で発生している低周波地震の活動も活発化している。

4. 東海地方

2003 年 1 月 19 日に東海道沖で M 5.3 の地震が発生し、同 23 日には M 4.5 の最大余震が発生した。震央位置は 1944 年東南海地震の余震域の東端に位置しており、この海域における M 5 以上の地震の発生は、1968 年以来 35 年ぶりである。震源の深さは当初約 40 km とされたが、地震規模の割に大きな表面波が励起されていること、直達 P 波の約 7 秒後に顕著な反射波が見られること等から、深さ 10 km 程度の浅発地震であった可能性が高い (図 3: 気象庁)。この場合、発震機構解は約 10 度の傾きをもった低角逆断層型となり、この付近の海底地殻構造探査結果によるプレート境界面の深さや傾きとよく一致する。

掛川~御前崎間の水準測量結果は、2002 年 10 月の測量で御前崎付近における沈降の不足が報告されたが、2003 年 1 月の測量では従来の傾向通りの沈降が確認された。一方、東海地域の地震活動静穏化や浜名湖付近のスローイベントに見られる異常地殻活動は、依然として継続している。GPS 観測結果から推定されるプレート境界面における断層すべりによるイベント開始以来のモーメント解放量は Mw 6.8 を上回り、さらに成長を続けている (地理院)。また、微小地震活動静穏化のパターン変化からは、GPS でスローイベントが検出される以前から固着域内部でのすべりが始まったこと、現在も固着域内部でのすべりの進行に伴ってアスペリティーの顕在化が生じていることが推測されるとしている (防災科

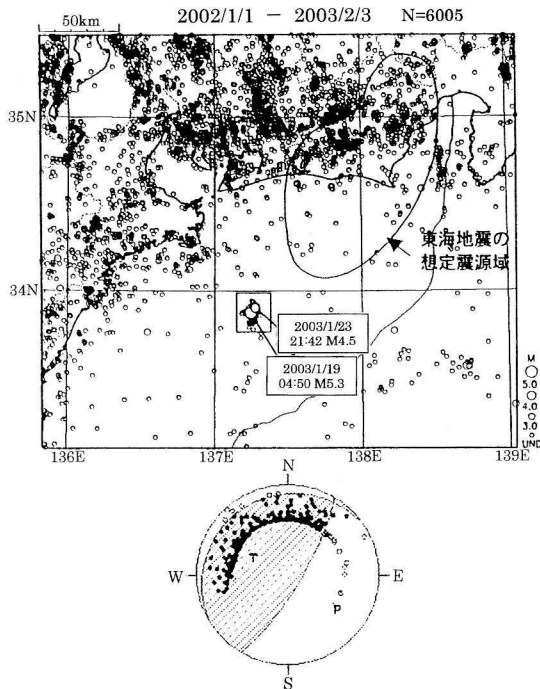


図3 2003年1月19日東海道沖の地震、および震源の深さを10 kmとした場合の発震機構解。背景は、2002年1月1日～2003年2月3日における東海・東南海地域の深さ60 km以浅の地震の震央分布を示す。〔第150回：気象庁資料に加筆〕

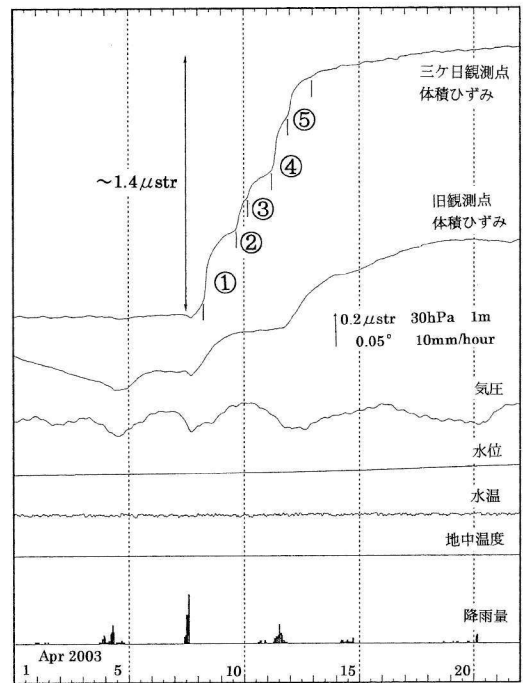


図4 2003年4月1日～22日に三ヶ日で観測された体積ひずみ変化、および関連データ。ひずみ記録には気圧・潮汐の補正を施し、トレンド成分を除いてある。〔第152回：気象庁資料に加筆〕

研). なお、このスローイベントをモデル化した断層面における1 mほどのスリップによって、1944年東南海地震の直前に掛川付近での水準測量から検出された前兆的地殻変動を説明できるとの紹介がなされた(名大)。

2003年4月8日夕刻、三ヶ日(静岡県)に設置された体積ひずみ計により異常な変化が捉えられた。翌9日午前3時頃には警戒レベルを超えた後、5段階の変化によって1週間で約 $1.4 \mu\text{str}$ の膨張が観測された(図4: 気象庁)。この体積ひずみ計は216 mの深さに設置されているが、80 m離れた旧観測点(深さ50 m)の体積ひずみ計にも同様の変化が見られた。このような現象が同時に3地点以上の体積ひずみ計で捉えられると判定会の招集という事態になるが、三ヶ日以外の体積ひずみ計には特別の変化が見られなかった。また、西方へ4 km離れた地点に設置された防災科研の傾斜計や、地理院による周辺のGPS観測網にも特段の異常は見られなかったことから、気象庁では9日16時に「解説情報」を発令し、東海地震とは直接の関係がないとの判断を示した。異常記録の原因は不明であるが、三ヶ日観測点付近におけるごくローカルな現象であったと思われる、近傍に存在する割れ目のクリープや多孔質媒質中の間隙水圧変化などが要因として推察されている(気象庁)。

5. 中国・四国地方

安芸市と室戸岬の間で実施されている水準測量結果が報告され、1946年南海地震をはさむ1896年以来約110年間における上下変動の経年変化が明らかにされた(図5: 地理院)。室戸岬は南海地震の発生に伴って、安芸市に対し約1 m隆起したが、それ以外の期間は5～6 mm/年の速度で沈降している。この結果からすると、南海地震の再来周期(90～120年)の間の沈降量は0.5～0.7 mとなり、地震発生後の1サイクルが終わった時点でかなりの残留隆起が残ることになる。この結果は地質学的な知見とは整合的でないことから議論となったが、結論は得られず、さらなる検討が必要ということになった。

なお、1946年南海地震の前には多くの井戸で水位の低下が見られたとの報告があるが、そのメカニズムに関してひとつの仮説が提唱された。海岸近くでは海水が陸部の下に斜めに浸透しており、淡水はその上に浮力で浮いた状態となっている。井戸水はここから汲み上げられているが、プレスリップによる地表隆起が生じて海水面が下がると、浮力の釣り合いによって淡水のレベルは隆起量の約40倍ほど下がることになる。ここでもし淡水の供給がなければ、これがそのまま井戸水位の低下になるが、淡水の供給が十分にある場合には、あまり変化が現

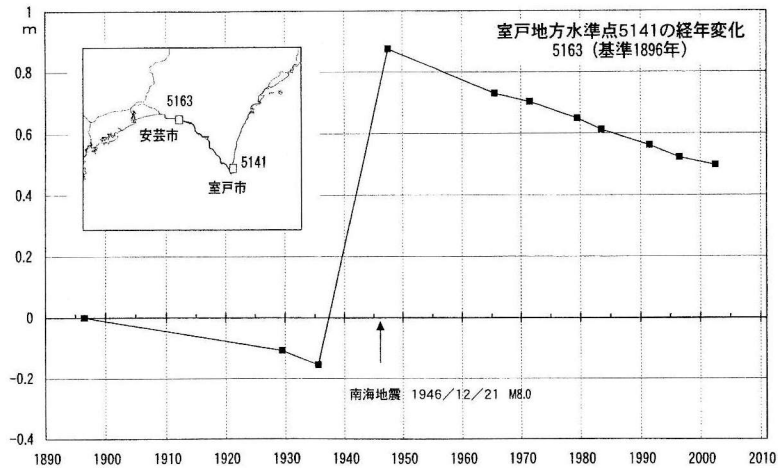


図5 最近110年間における安芸市に対する室戸岬の上下変動の経年変化 [第150回: 地理院資料]

れないということになる(京大防災研)。このような仮説は、地下水観測データの解釈にひとつの光をあてるものとなろう。

2003年3月27日、島根県西部の深さ13kmでM4.2の地震が発生した。翌3月28日には島根県東部でM3.9(深さ12km)の地震が発生し、続いてほぼ同じ場所で4月2日にはM4.2(深さ11km)、5月3日にはM3.9(深さ7km)の地震が発生するなど、地震活動が活発化した。また、これに合わせて、4月22~23日にかけては島根・鳥取県境付近で低周波地震が多発する現象が見られ、これまでで最大となるM2.5の低周波地震が観測された(気象庁)。

6. 九州地方

2002年11月4日、日向灘の深さ35kmでM5.7の地震があった。発震機構解の張力軸はフィリピン海プレートの沈み込み方向に一致しており、同プレートの内部で発生した地震と推測された。この地震の余震域を過去の震源分布と比較してみると、プレート内部を破断するような地震であったことが伺われる(気象庁)。

2003年4月12日、鹿児島県北西部の深さ10kmでM4.8の地震が発生した。この付近では、1997年3月にM6.5、5月にM6.3の地震が発生しており、今回の地震はその余震域の西隣りに位置している。この地震の余震域は北北東-南南西走向のほぼ垂直な面上に分布し、本震の発震機構解は1997年に発生した2つの地震とほぼ同じであった(図6: 鹿児島大)。

7. トピックス

7-1. 活断層の深部構造と地震・地殻活動(その1)

第150回連絡会では、トピックスとして「活断層の深

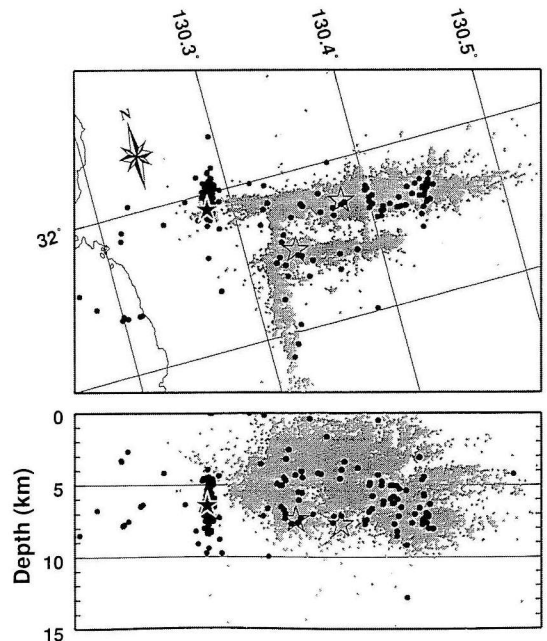


図6 2003年4月12日鹿児島県北西部の地震の本震(★印)とその余震分布(●印)。背景の☆印は1997年3月および5月の鹿児島県北西部地震、薄い丸印はその余震活動を示す。[第152回: 鹿児島大資料]

部構造と地震・地殻活動(その1)」(世話人: 佃 栄吉委員)が取り上げられ、陸域震源断層の深部すべり過程のモデル化に関する総合研究プロジェクト総論(京大防災研: 飯尾能久)、糸静線と長町-利府断層での観測(産総研: 伊藤久男)、陸域深部の物質科学と地震発生(産総研: 藤本光一郎)、陸域地震の発生過程のモデル化(地理院: 鷺谷 威)の各テーマについて、レビューと意見交換がなされた。

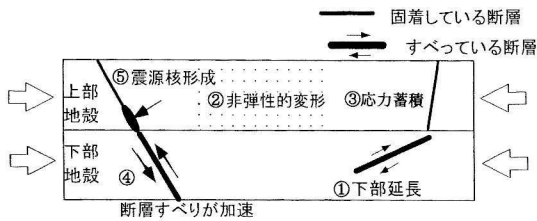


図7 内陸地震の発生過程の作業仮説。①全体的に流動していると思われていた下部地殻内に断層の延長部が存在する。②上部地殻全体が弾性体ではなく、非弾性的に変形する地域も存在する。③断層延長部におけるゆっくりとしたすべりが、上部地殻の非弾性的に変形しない部分に応力を蓄積する。④下部地殻内の断層延長部におけるゆっくりとしたすべりは、地震発生に向かって加速する。⑤上部地殻の応力が増大し、震源核形成が加速してついに地震発生に至る。[第150回：京大防災研資料]

スロースリップやアスぺリティー分布などが明らかにされつつあるプレート境界の地震と異なり、内陸地震の発生過程を説明する物理モデルは未だに確立していない。内陸地震の発生は上部地殻内に限られていることから、これまで、上部地殻は脆性的で強く、下部地殻は流動的で弱い性質を持つものと考えられてきた。しかし、このような考え方では説明しにくい観測事実も多いことから、下部地殻は強く、断層の深部延長付近がゆっくりすべることによって局所的な変形が生じ、それが上部地殻への応力集中を引き起こして地震を発生させるという新しい仮説が提唱されている(図7:京大防災研)。

この仮説を検証すべく、科学技術振興調整費による「陸域震源断層の深部すべり過程のモデル化に関する総合研究」が実施されており、糸魚川-静岡構造線北部およ

び長町-利府断層をテストフィールドとした地震学および電磁気学的な構造探査、GPS稠密観測による地殻変動の分布調査がなされた。また、地震発生域の下限付近が現在では地表に露出している福島県東部の畑川破砕帯において、断層岩の詳細な観察から、脆性破壊と塑性変形が複雑に競合する変形様式や水平方向の顕著な不均質性などが見出されている。このほか、高温高压下での岩石実験や、地震発生に関する数値シミュレーションなど、多くの知見を総合化することによって、内陸地震を発生させる物理モデルが構築されるものと期待される。

7-2. 低周波微動・低周波地震

第152回連絡会では、トピックスとして「低周波微動・低周波地震」(世話人:長谷川昭委員)が取り上げられた。阪神淡路大震災ののち急速に整備された稠密・高精度な高感度地震観測網によって、西南日本の広い範囲にわたって深部低周波微動が発生していることが発見され、また従来より、火山や活断層の周辺では低周波微動や低周波地震の存在が知られている。これらの現象は何を意味するのかを議論するため、西南日本の沈み込み帯で発生する低周波微動の特徴(防災科研:小原一成)、西日本における低周波微動・地震の発生位置と発生要因(気象庁:勝間田明男)、西南日本内陸の活断層に発生する深部低周波地震(京大防災研:大見士朗)、東北地方地殻深部に発生する低周波微小地震と地殻変形過程(東北大:岡田知己)、深部低周波地震の発震機構解と波動特性(東大震研:武尾 実)の各テーマについて報告があり、意見交換がなされた。

まず、観測される地震波形の特徴として、火山や活断層の周辺で見られる低周波地震は孤立的な波動が多く、

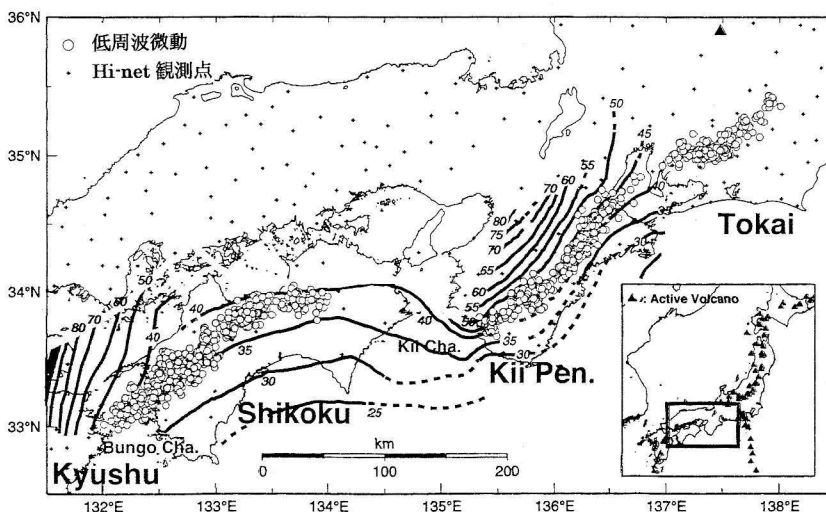


図8 西南日本で発見された帯状の低周波微動源(○印)。コンターはフィリピン海プレート内に発生する通常の地震の深さ分布、+印は地震観測点、▲印は活火山を示す。[第152回:防災科研資料]

時として連続的になってもその継続時間は短いのに対し、沈み込み帯で見られる低周波微動はランダム的な連続波動が優勢であり、時として孤立的波動が混じっている。これらの現象の原因は地下深部における流体の動きであると推察されているが、供給される流体の量の違いによって、低周波地震と低周波微動とに分かれるとの考え方があ

る。地理的分布について見ると、東日本では、歪速度が大きく V_p/V_s も大きな脊梁山脈（火山フロント）付近とその背弧側に低周波地震が分布するのに対し、西日本では第四期火山の前弧側で低周波地震が発生している。また西日本では、低周波微動源が東海地方から四国にかけて 600 km に及ぶ帯状の分布をなし、その位置は沈み込むフィリピン海プレートの等深線に平行している。発生している深さは約 30 km であり、M 3 を超える大きさのものは観測されていない（図 8：防災科研）。

低周波微動は自然発生的に活発化するようであり、場

所によっては 3 カ月や 6 カ月の周期で繰り返し発生する例が見られる。北米のカスケード地方では、13~16 カ月ごとに繰り返すエピソードなスリップに同期して 1~2 週間継続する微動が見られるとの報告があり、我が国でもスロースリップとの関連が注目される。また、微動源の移動現象が発見されているほか、周辺で発生した地震の直後に微動が誘発される例も数多く見出されている。さらに紀伊半島南部では、奈良・和歌山県境付近の群発地震活動に 1~7 日先行して微動が発生する例も、繰り返し観測されている。

地震の発生には深部における水の存在が大きく関わっているとされ、その源は海洋性地殻内の含水鉱物による脱水分解反応であると考えられている。低周波微動や低周波地震はまだ謎の多い現象であるが、今後、大きな地震との関係についての研究が進むことによって、地震の発生過程の解明や地震予知への手がかりに結びつくことが期待される。

■ 書 評 ■

● 地震学・地震工学の集大成

William H.K. Lee, Hiroo Kanamori,
Paul C. Jennings and Carl Kisslinger 編

International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology Part A

評者 力武常次

International Association of Seismology and the Earth's Interior (IASPEI, 国際地震学・地球内部物理学協会) 設立 100 周年を記念して刊行された地震学および地震工学の発展と現状を記述した膨大な本である。Part A だけでも A4 判 933 ページにおよび片手で持つには重過ぎるほどである。図や表を除いて、2 段組みの各ページは 10 ポイント活字でぎっしりと印刷され読破するのは容易ではない。

この Part A は

- I. History and Prefatory Essays
- II. Theoretical Seismology
- III. Observational Seismology
- IV. Earthquake Geology and Mechanics
- V. Seismicity of the Earth
- VI. Earth's Structure

の 6 篇からなり、各篇はそれぞれ 6~12 章を包含し、全部で 56 章にも達している。Part B をも含めると合計 89 章にもなるようだ。各章はそれぞれの分野の専門家が分担執筆している。

このように分厚い本なので、通常の書評を逸脱して長文となり、しかもやや断片的な各章ごとの紹介・感想・コメントになってしまったがご容赦願いたい。

I 篇 1 章 (I. 1) は D.C. Agnew による地震学の歴史で、評者が数十年前の学生時代馴れ親しんだ研究者の名前が数多く出てくる。地震学を総括する好個の文献だと言えよう。つぎに R.W. Housner (I. 2) の地震工学の

歴史があるが、どういう訳か 1986 年の他誌に掲載された報文の再録でいささか古いのではなからうか。続いて A. Udías & W. Stauder (I. 3) による Jesuit 教会の寄与 (主として地震観測) が述べられているが、このような宗教と科学との関連はなかなか理解し難い点もある。

(I. 4) は R.D. Adams (元 IASPEI 総幹事) の IASPEI の活動史でよくまとめられている。(I. 5) と (I. 6) は日本人の代表的学者安芸敬一と上田誠也による報文で、前者は大正年代の東京大地震を巡るいわゆる大森・今村論争にふれ、Southern California Earthquake Center の業績を例として地震情報の重要性を強調している。後者はプレートテクトニクスの発展と現状についての手馴れたレビューで著者の筆力がなみなみならぬことを示す。(I. 7) の S. Stein & E. Klosko の報文は各種プレート境界に於ける発震メカニズムの一覧である。

II 篇は「理論地震学」のレビューで、(II. 8) は A. Udías による理論地震学概観で体波・表面波・震源からの伝播などのレビューがある。ついで C. Chapman (II. 9) が幾何光学的地震波伝播理論を展開しているが、非等方性媒質中伝播理論は評者のようなオールドボーイには新知識 (やや難解) である。P. Lognonné & E. Clévéde (II. 10) は地球振動理論の纏めを述べている。特に 1960 年のチリ地震以来の発展が強調されている。(II. 11) は B. Romanowicz の表面波によるインバージョンで震源メカニズムと地殻構造およびマントル内の非等方性にふれている。続いていわゆる地殻破壊動力学が R. Madariaga & K.B. Olsen (II. 12) によってレビューされている。最近発展した震源断層における摩擦構成則などが記述されている。これらの各章の説明はなかなか難解で、ちゃんと理解するためにはリファされている多くの原論文を読破しなければならないと思われる。佐藤春夫, M. Fehler & R.S. Wu (II. 13) はリソスフェア内の地震波散乱と減衰とを論じ、減衰係数 Q^{-1} を導入して、減衰機構を本質的吸収と散乱ロスに分けた。特にこの問題を coda と呼ばれる地震波尾部に適用している。非常に多くの文献は付録の CD に収録されている。つぎの D.L. Turcotte & B.D. Malamud (II. 14) は複雑系としての地震問題を調べている。地殻には無数

の断層があるが、主断層にのみ注目するならばその間欠的活動といわゆる地震活動静穏期を理解することができる。しかし実際には無数に存在する大小の断層系をカオスの、フラクタル的、つまりいわゆる複雑系として取り扱うことが適当と考えられる場合がある。この場合には、地震のマグニチュードと発生頻度についての Gutenberg-Richter 則や自己組織臨界現象（地震予知不可能論につながる）さらにはパターン認識による中長期の確率論的予知に関連させることができるとしている。このような議論は評者のようにオールド・ファッションな者にはなかなか難解である。続いて R. Teisseyre & E. Majewski (II. 15) は、地震の物理と題して巨視的断層生成メカニズムを理解するために微視的ディスロケーション、割れ目、……などを導入する理論を概観している。これがどの程度実用的であるかは評者にはよく分からない。結局は複雑系の取扱いに帰するようだ。II 篇の最終章は K. Mosegaard & A. Tarantola (II. 16) によるインバージョン問題への確率論的アプローチで実に 28 ページをさいている。結局はモンテカルロ法が有力のようであるが、この章の内容はなかなか難解である。

以上が II 篇理論地震学の概要であるが、評者が学生だった頃に較べるとその進歩には目を見張るものがある。その反面現代の若手地震学者は極めて多岐にわたる高度な理論に取り組みねばならないことになるので、なかなか大変なことであろう。

III 篇は観測的地震学の総括で、地震計、地震観測法、地震記録の解釈、火山地震観測、海底地震観測、津波観測など、最新の技術を駆使した観測方法ならびにその成果が述べられている。

III. 17 章には本書の筆頭編集者である W.H.K. Lee が「観測地震学への挑戦」と題して総論的解説を述べている。地震観測網の変遷（例えば WWSSN）、リアルタイム地震学、強震観測ネットなどにふれている。E. Wielandt (III. 18) は新しい地震計測学（広帯域地震計を含む）、S.C. Webb (III. 19) は陸上および海底に於ける地震波ノイズ、さらに C.R. Hutt, H.F. Bolton & G. Holcomb (III. 20) がデジタル地震計国際観測網（特にアメリカの寄与）とその意義について書いている。このあたりの記述は数十年前に煤書きの大森式地震計などをいじったことのある評者にとっては、地震計測技術の呆れる程の進歩を感じさせる。つぎの O. Kulháněk (III. 21) による「地震記録の構成と解釈」には地球内部を伝播する各種波群の解釈が古典的解釈とあまり変わらずに述べられている。F. Scherbaum (III. 22) のデジタル地震記録の解析の章はフィルターの議論が主であるが、評者のようなオールド・タイマーには分かりにくい。続いて

A. Douglas (III. 23) が地震波群列観測（地下爆発探知を含む）、また P.G. Richards (III. 24) がいわゆる Comprehensive Test Ban Treaty（包括的核実験禁止条約、CTBT）のための地震学的方法について解説している。このあたりはまさに現代的分野であろう。このあとの 4 章は火山地震（顕著噴火時のケースヒストリーを含む）、ハワイ島火山の地震学、海底地震計測とデータ解析、ならびに津波（著名津波のケースヒストリーを含む）であり、それぞれ S.C. McNutt, H.M. Benz, P. Okubo & A. Villaseñor, 末廣潔 & 望月友廣および佐竹健治が分担執筆している。要するに 11 の章から成る本篇は地震計測学とその周辺の諸問題の詳細なレビューであり、この分野の発展と現状を認識するためには絶好の文献であると言えよう。

IV 篇は 12 章 193 ページに及び「地震地質学および地震力学」と題して非常に盛り沢山な内容である。しかし、いささか玉石混濁の感があり、分かり易い章、くどい章…などいろいろである。紙面の都合もあり十分な解説はできないが、ご勘弁願いたい。IV29 章は R.H. Sibon による地殻内地震の震源に関する地質学であるが、記述散漫で読み難い。つぎは L.B. Grant (IV. 30) の古地震学で液状化・津波痕跡…なども含まれている。構造地質学およびテクトニクスへの地震学の寄与は J.A. Jackson (IV. 31) によって纏められ、震源分布の重要性のほか近時発達した地震波解析による震源パラメーター決定の役割が強調されている。分かり易い記述である。IV32 章 (D.A. Lockner & N.M. Beeler) では岩石破壊と地震発生メカニズムについて、最近の震源核生成の実験と理論や摩擦構成則などが紹介され、記述は詳細を極めてなかなか有用な議論である。また深発地震のメカニズム解釈は不完全であるとしている。L.J. Ruff (IV. 33) は地球内部のストレス状態を総括し、プレート駆動力などにもふれている。つぎの M.D. Zoback & M.L. Zoback (IV. 34) は特にリソスフェア内のストレス状態（脆性などを含む）を論じ、カラープレート 11&12 に示すような世界的ストレスマップを求めている。(IV. 35) は J.N. Brune & W. Thatcher の活断層系の強さとエネルギー収支で、プレート境界ストレスをもカバーする。つぎの 5 章は M.J.S. Johnston & A.T. Linde (IV. 36), M.L. Feigl (IV. 37), M.J.S. Johnston (IV. 38), C.Y. King & G. Igarashi (IV. 39) および A. McGarr, D. Simpson & L. Seeber (IV. 40) によるレビューでそれぞれ地殻歪と地震 (slow および silent 地震を含む) との関係、測地学的方法による震源パラメーターの決定（特に INSAR {Synthetic Aperture Radar Interferometry}、合成開口レーダー干渉）、地震に伴う電磁場（いわゆる VAN 法

などにもふれる), 地震に伴う陸水学的および地球化学的变化, および誘発地震のケースヒストリーについて解説している. いずれも最新の発展と事例をカバーしているので, 評者のように新しい進歩についていささか勉強不足な者にとっては大いに役に立つ.

地球の地震活動全般を論じているのがV篇であり, 現在および歴史上の活動をカバーする. E.R. Engdahl & A. Villaseñor (V. 41) は主として International Seismological Center (ISC), および National Earthquake Information Center (NEIC) のデータによって, 20世紀の汎地球的地震活動度を求めた. 例えばカラブプレート15と16には $M \geq 7$ の地震について1900~2000年の期間の震央分布が見事に示されている. なかなかの労作と言えよう. V42~44章は宇津徳治による被害地震のカタログ(V. 42, 1500~2000年, 死者50以上), 余震, 前震, 群発地震などの統計(V. 43, Gutenberg-Richter法則, b値…その他を含む) および各種マグニチュードの比較(V. 44)である. このへんの議論は, 宇津氏のもっとも得意な分野で日本の読者にはよく知られているのではなからうか. V. 45章は歴史地震に詳しいN.N. Ambrasseys, J.A. Jackson & C.P.M. Melvilleの地中海周辺および中東地域の歴史的地震活動である. 続いてA. Nur (V. 46)の地震と考古学に関するレビューがある. 歴史時代以前の大地震の証拠が分かるとしている. E. Guidoboni (V. 47)は歴史地震特にイタリアの事例を論じている. V. 48は歴史的地震の総括で, W.H.H. Lee (V. 48.1)の序文に続いて, T. Toppozad & D. Branum (V. 48.2)による $M \geq 5.5$ のカリフォルニア地震があり, $M \geq 6.5$ の地震の1812年以降のカタログが示される. つぎの章はインドの大地震(V. 48.3, S.P. Satyabala)である. 日本の歴史地震は宇佐美龍夫(V. 48.4)によって解説され, 「大日本地震史料」などが編纂されたいきさつが述べられている. ついでR.M.W. Musson (V. 48.5)のイギリスの歴史地震があり, イギリスは地震国ではないが, たまには破壊的地震があることを述べている. V. 49章はR.M.W. Musson & I. Cčićがいわゆるマクロ地震学と称して計測器によらない震度決定や野外調査法について詳しく述べている. 本篇の詳しいデータはすべて付録のCDに収録されている. 本篇を通読すると, 歴史的地震活動と現在の活動が極めて深くかかわりあっていることが分かる. つぎにUSGSのS.A. Sipkin (V. 50)による1981~2000年のめばしい地震のモーメント・テンソルのカタログがある. これは専ら付録のCDに記載してある.

VI篇は地震学によって明らかになった地球内部構造で

ある. まずT. Lay (VI. 51)の球対称仮定の第一近似から出発して, 地殻の厚さ分布, モホ面直下の P_n 波速度分布, マントル低速度層(部分熔融問題を含む), 410~660kmのオリビンスピネル相転移の可能性, 地震波トモグラフィーによるマントル物性の水平方向変化. 下部マントルならびに地球核の物性と構造など極めて盛り沢山な労作があり, 現在の地球内部構造論を知るには絶好の著作であろう. A. Curtis & R. Snieder (VI. 52)の地震波トモグラフィーの解説では, 概念の説明に重きが置かれていささか消化不良気味である. VI. 53章(M. Cara)は地殻やマントル内の非等方性について述べ, 水で飽和したクラックの重要性を指摘しているが, この議論はまだ発展途上である. W.D. Mooney, C. Prodehl & N.I. Palenkova (VI. 54)は大陸リソスフェアの人工地震による地震波速度構造をレビューし地殻の厚さ分布図などを示す. VI. 55章(T. Minshull)では海洋および大陸周辺の地殻構造が詳しく纏められている. VI. 56章(X. Song)は地球核の構造について解説し, 自らの遠地地震記録の解析結果を用いて内核の非等方性を示す.

以上が本書各章の概略の解説および評者のコメント(感想?)である. なにぶん分厚い本なので, 精読したわけではなく, 評者の意見に的外れなところがあるかもしれないが, ご容赦願いたい. それにしてもこのように立派な書物を刊行できるようになったのは, 前世紀に地震学が驚くべき進歩を遂げたことを明示するものと言えよう. 本書の編集者の一人であるC. Kisslingerさんからの近着の私信によれば, この“マンモス”ハンドブックのために大いに働いたとのことである. しかもPart Aに続いてPart Bが近日中に出版されるとのことであるので, たただ恐れ入るばかりである.

本書は地震学の各分野の大家から気鋭の若手までを含む専門家が分担執筆しているので, 現時点で最高の専門書である. ただし非常に分かり易い章と, やや難解または冗長な章が混在しているので, 簡単にふところ手して読むというわけにはいかない. これから地震学の研究を志す若手研究者にとっては, この“マンモス”ハンドブックと取り組まねばならないから, なかなか大変なことであろう. いずれにしても地震関係諸機関では必ず備えて置くべき書籍である.

終わりに付録のCD-ROMを開いてみると細かな活字がぎっしり詰まっています. 評者所有のノートパソコンでは甚だ読み難いことを指摘しておきたい.

<Academic Press, 2001年, 983頁, ¥28,350>

● 地震発生機構のモデル化

大中康譽, 松浦充宏 著
地震発生の物理学

評者 加藤尚之

近年の地震発生物理研究の進展にはめざましいものがある。地震波をもちいた震源過程の研究やGPSによる非地震性すべり過程の研究から、プレート境界面でのすべりの多様性、不均一性が明らかになり、岩石実験から断層の破壊・摩擦を支配する法則が明らかになりつつある。このような研究に基づいて、地震発生の予測という目標を視野に入れた地震発生サイクルの数値モデルの開発が始められている。このような状況のなかで岩石実験研究、断層運動の理論研究をリードしてきた2人による地震発生物理に関する著書が出版された。時宜を得た企画といえる。

地震発生の物理を理解しモデル化するためには、(1)プレート運動に起因する断層へのローディング機構、(2)断層の破壊・摩擦すべりを支配する物理法則、(3)媒質の粘弾性変形による応力の伝達を理解する必要があると著者らは指摘する。この考えに基づいて本書は構成されており、なかでも(2)については大部があげられている。第1章では地震発生の原因であるプレート運動や地震・断層についての一般的な解説がなされ、第2章では弾性体力学、食い違い弾性論、破壊力学の基礎が与えられる。第3章から第6章までが著者らの研究を中心に最近の地震発生物理の進展が解説される本書の主要部分である。第3章では岩石実験に基づいて断層破壊の構成則が導出され、断層面での微視的な摩擦と凝着による断層構成則のメカニズムが議論される。さらに、断層構成則パラメータの環境依存性に関する最新の実験結果が紹介される。第4章では、著者らの業績の中でも最もよく知られていると思われる、実験室の不安定すべりや地震破壊の核形成から高速伝播に至る過程が取り上げられる。断層構成則を利用した数値シミュレーションにより、実験室での破壊および地震破壊が本質的には同じように説明できることが示される。第5章では実験室の不安定すべりから巨大地震までを統一的に理解する目的で断層破壊のスケーリングの問題が扱われている。スケーリングの問題が単独の章で扱われているのは大変ユニークで、著者らのこの問題への強い意識がうかがえる。著者らはすべり弱化過程の破損変位量 D_c や破壊核形成域の臨界長 L_c は地震の規模に依存するとしている。これは地震先駆現象の検知可能性とも関連する重要な問題であるが、 D_c や

L_c を地震データから精度よく推定するのは容易ではなく、これらの信頼できる推定値はまだ多くないと思われる。ここでの議論は今後さらに検証が必要であるように評者には思える。第6章では大地震の発生サイクルについて議論される。ここでは最初に断層へのローディング機構の重要性が強調される。比較的簡単な力学的モデルを用いて、地震のモーメントと断層長に関するスケーリング則やプレート内の応力蓄積が明快に説明されるのは見事である。さらに、第3章で導かれた断層構成則を用いて地震発生サイクルシミュレーションがどのように行われるかが説明される。シミュレーションで用いるパラメータと実験室で得られる摩擦構成則パラメータの環境依存性との関係は必ずしも明瞭ではないが、これは今後解決しなければならない重要な課題だろう。最後に、地震サイクル内での地震活動の変化や地震の先駆現象が議論されるが、これらについては地震発生サイクルのシミュレーションとあわせて定量的に議論されるには至っていない。これを目指してシミュレーションモデルは高度化されていくことだろう。

本書は地震発生に関わる様々な要素について、その物理的機構をモデル化し、それを再構成することによって地震サイクル全体を理解することを試みている。同様の試みは近年多くの研究者によってなされており、これからの地震研究の大きな流れになっていくと思われる。これについて一通り理解するには本書は最適な書物であろう。本書と同様に、岩石実験から得られた知見に基づき地震発生物理の理解を試みた定評のある書物としてC.H. ScholzのThe Mechanics of Earthquakes and Faultingがある。Scholzの著書では、岩石力学を基礎として、多くの具体的事例を引用してかなり幅広い現象の理解を試みている。本書ではテーマを比較的狭くしぼり、著者らの独自のモデルを深く丁寧に解説するところに特徴がある。両者を読み比べてみるのも興味深いであろう。

<東大出版会, 2002年9月, A5判, 390頁, 4,800円>

● 日本海東縁地震テクトニクス のまとめ

大竹政和・平 朝彦・太田陽子 編
日本海東縁の活断層と地震テクトニクス

評者 笠原 稔

230人の犠牲者を出した1993年北海道南西沖地震か

ら10年目を迎え、この本の生まれた意義と必然性をあらためて認識させられる。この地震発生の原因を探るために、1994年から5年間、科学技術振興調整費による「日本海東縁部における地震発生ポテンシャル評価に関する総合研究」が海・陸において精力的に実施された。本書は、その成果をより広く公開するために編まれているが、執筆者たちはその途上において議論を重ねて、日本海東縁部変動帯を説明する統一した新しい考え方、「歪み集中帯の形成」に到達し、その概念を明確にするようにまとめられている。諸事にわたって日本列島では、太平洋側の表日本と日本海側の裏日本という見方が強く、裏日本が副次的イメージで見られることが多い。過去においては、やはり日本海東縁で起きる地震活動・テクトニクスの主たる原因は、太平洋側の日本海溝で進行する太平洋プレートの沈み込みによる応力を背弧の特徴的な構造が変形として現しているという、受身的な考え方であった。1983年日本海中部地震以降、この地域はより本質的な構造境界としての意義を持つことが提唱された。1994年から展開された日本国内外でのGPS観測による地殻変動観測はそれを見事に証明し、この地域はアムールプレートと日本列島の衝突境界になっていることを明らかにした。これらを背景に、合計13人の執筆者らは、5年間の総合調査とそれに引き続く議論・研究の成果として、日本海東縁の地震テクトニクスが東北日本のローカルな問題にとどまらず、東北アジアのテクトニクスと深く結びつくものであることを見事に描き出している。

本書の構成は、4部12章からなる。第I部では、日本海東縁のテクトニクスの大局的な枠組みが、構造発達史、プレート運動、地殻構造と地震活動の観点から述べられている。第II部では、地質・地形学的方法により海域・陸域の活構造および活断層の詳細なマッピングの成果が述べられている。日本海東縁部の地質構造は、3,000万年前から1,500万年前までの日本海拡大により作られた伸張場での大局的な構造が基にはなっているが、それに加えて、300万年前から東西圧縮応力による新たな短縮変動が始まったことを明らかにしている。さらに、津波堆積物・海底のタービダイト調査、陸域活断層のトレンチ調査を通じて、この地域の古地震の繰り返しを明らかにしている。第III部では、「歪み集中帯」の概念を提出して、地質構造から見る百万年オーダーの変動、活断層から見る数万年から千年オーダーの変動、測地測量・GPSから見る百年～数年オーダーの時間スケールでの変動が統一的に解釈できることを示している。その結果として現在の地震活動が集中的に見られる地震帯とも一致することが明瞭に示された。日本海東縁という共通のフィールドを通して、関係分野間の共同研究の重要性を

認識した著者らの努力が見事に示されている章といえよう。第IV部では、以上の成果を集成した日本海東縁の総合的なテクトニックマップが提示されている。口絵カラー図としても掲載されているが、この図の中に、種々の時間スケールでのひずみ集中帯の分布、重力異常に基づく基盤構造、歴史地震の震央分布、海域の火山、主要な地震の破壊域まで示されている。最後に、日本海東縁での超長期および近未来の大地震の発生ポテンシャルの評価を行っている。

本書は、地震テクトニクスに関連するあらゆる分野の研究者および日本海東縁の近未来の地震発生を対象とする防災関係者にとって格好な教科書となろう。この本をきっかけに、日本海東縁歪み集中帯の北方延長・西方延長の調査研究への刺激となり、より統一的な東アジアの地震テクトニクスの研究が進展することを期待したい。

<東大出版会、2002年5月、A4判、204頁、5,800円>

●新刊紹介

本誌の書評はこれまで専門書に片寄る傾向にありました。読者から題名だけでもよいかから一般書を取り上げて欲しいとの要望もあり、26号以来途絶えてきた新刊紹介の欄を復活することにしました。今年に関東大地震80周年にあたるため、地震関連の本の出版が増加するものと予想されます。新刊紹介欄が読者のご要望に応えるものとなることを期待します。

小野徹郎 著

地震と建築防災工学

理工図書、2001年1月、A5判、323頁、3,400円。

島村英紀 著

地震と火山の島国 [ジュニア新書]

岩波書店、2001年3月、新書判、195頁、780円。

鎌谷秀男、三枝省三 著

地震の基礎知識

修成学園出版局、2001年6月、B5判、99頁、1,900円。

国崎信江、内野 真 著

地震からわが子を守る防災の本

編集工房一社、2001年6月、四六判、279頁、1,700円。

寒川 旭 著

地震 日本を知る“なまずの活動史”

大巧社、2001年9月、小B6判、173頁、1,200円。

木村政昭 監修, 安恒 理ほか 著

富士山噴火と東海大地震

イースト・プレス, 2001年9月, 四六判, 217頁, 1,300円.

尾池和夫 著

地震

ナツメ社, 2001年12月, B6判, 223頁, 1,200円.

鈴木康弘 著

活断層大地震に備える [ちくま新書]

筑摩書房, 2001年12月, 新書判, 200頁, 680円.

ソーン・レイ, テリー・C. ウォレス 著

地震学 上巻

古今書院, 2002年1月, A5変形判, 431頁, 9,500円.

ソーン・レイ, テリー・C. ウォレス 著

地震学 下巻

古今書院, 2002年1月, A5変形判, 755頁, 7,500円.

村松郁栄, 松田時彦 著

濃尾地震と根尾谷断層帯

古今書院, 2002年3月, B5ハード判, 340頁, 7,500円.

土 隆一, 榛村純一 著

東海地震いつ来るなぜ来るどう備える

清文社, 2002年7月, A5判, 305頁, 1,800円.

静岡県総合研究機構 著

東海地震に備える企業の地震防災対策

近代消防社, 2002年7月, B5判, 296頁, 2,500円.

伊藤和明 著

地震と噴火の日本史 [岩波新書]

岩波書店, 2002年8月, 新書判, 212頁, 700円.

島村英紀 著

地震学がよくわかる

彰国社, 2002年9月, 四六判, 254頁, 1,800円.

竹内 均 著

せまり来る巨大地震 [Newton 別冊]

ニュートンプレス, 2002年10月, A4判, 91頁, 1,500円.

片山恒雄 著

東京大地震は必ず起きる [文春新書]

文藝春秋, 2002年10月, 新書判, 205頁, 680円.

朝日新聞社 編

地震がわかる

朝日新聞社, 2002年11月, B5判, 176頁, 1,200円.

小長井一男 著

地盤と構造物の地震工学

東京大学出版会, 2002年12月, A5判, 193頁, 4,200円.

執筆紹介

<掲載順>

氏名 阿部勝征

[あべ かつゆき]



現職 東京大学地震研究所教授，地震予知センター長
理学博士

略歴 東京大学理学部地球物理学科卒業，同大学院博士課程修了，北海道大学理学部講師，同助教授，東京大学地震研究所助教授を経て現職

研究分野 地震学，津波発生論
著書 『巨大地震』『地震は必ずくる』（読売新聞社），『地震の物理』『図説地球科学』（分担執筆，岩波書店），『社会地球科学』（共著，岩波書店），『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），『地震予知』（共著，学会出版センター），『地震と断層』（分担執筆，東大出版会），『地震と活断層』（共著，ISU），『地球環境の変容』（分担執筆，朝倉書店），他

氏名 清水善久

[しみず よしひさ]



現職 東京ガス(株) 防災・供給センター 防災担当部長
博士(工学)

略歴 東京大学工学部土木工学科卒業，東京ガス(株)中央導管管理事業所，米国スタンフォード大学大学院工学部修士課程，東京ガス(株)導管技術開発センター，ガスマレーシア社出向，東京ガス(株)防災・供給センター防災チームを経て現職

氏名 鈴木崇伸

[すずき たかのぶ]



現職 東洋大学工学部助教授
博士(工学)

略歴 東京大学工学部土木工学科卒業，同大学院工学系研究科土木工学専攻修士課程修了，日本電信電話株式会社，東洋大学工学部講師を経て現職

研究分野 地震工学，構造工学
著書 『情報流通インフラを支える通信土木技術』（共著，電気通信協会）

氏名 後藤洋三

[ごとう ようぞう]



現職 独立行政法人防災科学技術研究所地震防災フロンティア研究センター川崎ラボラトリー所長

略歴 京都大学大学院工学研究科修士課程修了，(株)大林組技術研究所室長，西日本工業大学工学部教授を経て現職

研究分野 地震工学
著書 『耐震構造設計論』（共著，京都大学出版会）

氏名 岡田義光

[おかだ よしみつ]



現職 独立行政法人防災科学技術研究所企画部長
理学博士

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を経て現職

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）他

氏名 田所 諭

[たどころ さとし]



現職 神戸大学工学部情報知能工学科助教
教授
博士(工学)

略歴 東京大学大学院工学系研究科精密機械工学専攻修士課程修了，ロボカップレスキュー技術委員会設立，委員長，IEEE RAS 安全警備救助ロボティクス技術委員会設立，Co-Chair. 特定非営利活動法人国際レスキューシステム研究機構設立，会長，日本バーチャルリアリティ学会論文賞など受賞。

研究分野 知能ロボット，ニューアークチュエータ

氏名 吉岡直人

[よしか なおと]

現職 横浜市立大学
大学院総合理工学
研究科教授
理学博士



略歴 東京大学理学部地球物理学
科卒業，同大学院理学系研究科
修士課程修了，財団法人電力中
央研究所研究員，横浜市立大
学文理学部助手，助教授，同
大学院理学部教授を経て現職

研究分野 地震学，岩石理学

氏名 小笠原 宏

[おがさわら ひろし]

現職 立命館大学理
工学部教授
京都大学理学博士



略歴 京都大学大学院理学研究科
博士課程単位取得退学，立命
館大学理工学部助教授を経て
現職。1994年 USGS 客員研究
員・南アフリカ共和国 Witwaters
rand 大学客員研究員

研究分野 震源の物理学

著書 *Seismogenic Process Monitoring* (共編, Balkema)

氏名 飯尾能久

[いい よしひさ]

現職 京都大学防災
研究所助教授
理学博士



略歴 京都大学大学院理学研究科
地球物理学博士後期課程中途
退学，京都大学理学部助手，
防災研究所助手，防災科学技
術研究所地圏地球科学技術研
究部主任研究官，地球化学研
究室長，東京大学地震研究所
助教授を経て現職

研究分野 地震学

氏名 伯野元彦

[はくの もとひこ]

現職 攻玉社工科短
期大学学長
工学博士



略歴 東京大学工学部，土木工
学科卒業，同大学院博士課程
修了，東京大学生産技術研究
所助手，東京工業大学理工学
部助教授，東京大学地震研究
所助教授，同教授，同所長，
東洋大学工学部教授を経て現
職

研究分野 地震工学

著書 『被害から学ぶ地震工学』
(鹿島出版会)，『破壊のシミュ
レーション』(森北出版)等

氏名 力武常次

[りきたけ つねじ]

現職 (財)地震予知
総合研究振興会顧
問，東京大学・東京
工業大学名誉教授
理学博士



略歴 東京帝国大学理学部地球物
理学科卒業，東京大学地震研
究所助教授，同教授，同所長，
東京工業大学理学部教授，日
本大学文理学部教授を歴任，
現在に至る

研究分野 地球物理学(地球電磁
気学，地震予知論)専攻

著書 *Electromagnetism and the
Earth's Interior, Earthquake Pre-
diction* (いずれも, Elsevier)，
『地球電磁気学』(岩波書店)，
『なぜ磁石は北をさす』(講談社)，
『地震予知』(中央公論社)，
『地震前兆現象』(東京大学出版
会)，『固体地球科学入門』(共
立出版社)他

氏名 加藤尚之

[かとう なおゆき]

現職 東京大学地震
研究所助教授
博士(理学)



略歴 東北大学理学部天文及び地
球物理学科第二卒業，東北大
学大学院理学研究科博士課程
中退，東北大学理学部助手，
工業技術院地質調査所主任研
究員を経て現職

研究分野 地震学

氏名 笠原 稔

[かさはら みのる]

現職 北海道大学
大学院理学研究科教授
理学博士



略歴 東北大学大学院理学研究科
博士課程中退，北海道大学理
学部助手，助教授を経て現職

研究分野 地震テクトニクス・地
殻変動

ADEP情報

(財)地震予知総合研究振興会 (ADEP) の人事異動について

就任

理事・東濃地震科学研究所長 青木 治三 14. 7. 1
 理事・事務局長 鎮守 芳久 14. 7. 1

職員

退職

主任研究員 大木 丹 14.11.29

嘱託

採用

研究員 岡上 幸嗣 14.10. 1
 主任研究員 大木 丹 14.12. 1
 主任研究員 大井田 徹 15. 4. 1

退職

主任研究員 岡 正治郎 15. 3.31
 研究員 山本 俊六 15. 3.31
 研究員 山田 知治 15. 3.31

以上

編集後記

振興会では、委託研究等の関連で、理学・工学関係の数多くの委員会や報告会が開催されてきた。その都度、学界の大御所から若手に至る迄、幾多の研究者が委員として参集された。このような会合は本誌の原稿執筆依頼にとって絶好の機会である。しかし畑違いということもあって、工学系の会合に関する情報は流れてこない。これではいけないと、当振興会工学担当の池田潤一氏に相談を持ちかけたところ快諾され、その幅広い人脈を通して本号の編集に積極的に協力して頂くこととなった。

とくに今年は関東大地震 80 周年にあたる。この節目の年を活かして、本号では大都市圏の災害軽減・情報システムの紹介に重点をおくこととした。池田氏の協力の成果とも言えるべき最初の 4 論文がそれである。しかし工学一色というのもバランス上よくない。「砂山崩し実験」と「南ア金鉱山」の 2 論文を加えることで理・工境界領域へ踏み込んだ積もりである。

国立大学の法人化に伴い、第三者による評価制度が実現すると、幅広い周辺領域の研究者が「感覚的に理解できる」理・工境界領域が評価さ

れる傾向になろう。この傾向は歓迎すべきもので、それにより基礎的研究は刺激を受け、展望が開ける。かつて理学から工学への転換が物理探査技術を完成に導いたように、地震予知技術もまた工学への歩み寄りが必要となる。理・工の橋渡しへの何らかの貢献は本誌の重大な責務の一つと考えている。

本誌の編集に 10 年以上携わってきたが、初めてのケースとして、掲載記事に関するコメントが編集部宛に届いた。前号の囲み記事「地震基盤(工学基盤)」の説明に不備な点があるとの指摘である。本号ではその修正記事を掲載することとした。このようなコメントがあったということは、とりも直さず多くの読者が本誌を丁寧に読んで下さっている証拠でもある。今後も思慮あるコメントを大いに歓迎したい。

関東大地震 80 周年はまた出版界にも影響するらしい。今年は地震予知・防災関連の出版も多くなると予想される。そこで本誌では「新刊紹介」を拡充することで、この状況に対処することとした。とくに書評するわけではなく、著者名、題名、出版社名、サイズ、価格等を羅列するだけのコーナーであるが、いかに多くの地震関連出版物が出回っている

かを知ることができる。本誌編集事務の丸毛美子さんが神田神保町の書店に足繁く通って調査した成果である。今後もこのような調査により、最新の出版物の紹介を続けたいと考えている。

なお今年はまた元禄大地震 300 周年でもある。次号は関東大地震とともに元禄大地震も含めて、首都圏の大地震関連の記事を全面的に掲載したいと考えている。

(Y. H.)

地震ジャーナル 第 35 号

平成 15 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
 財団法人
地震予知総合研究振興会

発行人 高木章雄

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/ (財)学会誌刊行センター