

## 2. 首都圏広域地殻変動観測システム (KSP 計画) と その科学技術史的背景

高橋 富士信\*

(1995年10月16日受理)

### 2. KEY STONE PROJECT AND THE BACKGROUND ON THE SCIENTIFIC HISTORY

By

Fujinobu TAKAHASHI

The importance of technology in earthquake research and prediction should be considered from the viewpoint of the history of science and technology, because observation techniques have always depended on the advanced technology of the age. Since the 1980s space geodetic techniques, such as VLBI (Very Long Baseline Interferometer), SLR (Satellite Laser Ranging), and GPS (Global Positioning System), have played very important roles in global geodesy and in promotion of plate theory. The following papers describe the VLBI and SLR techniques used in the Key Stone Project. 1990 is considerable to be a turning point for breakthrough in technology and space techniques. The technology and networks developed will produce an extremely useful database for earthquake research and prediction.

[キーワード] VLBI, SLR.

Very long baseline interferometry, Satellite laser ranging.

#### 1. はじめに

##### 一阪神震災が宇宙測地技術に与えたインパクト

1995年1月17日早朝の阪神大震災は、これまでとかく具体的に捉えることが出来なかった大都市の直下型地震の描像を、我々の眼前にリアルタイムで明らかにした。

宇宙測地技術による直下型地震前の微小地殻変動の検出の可能性について、これまで幾つかの前提・仮定に基づいて検討を進めてきたが、今回現実はこの大きな犠牲のうえで、直下型地震が人口密集地帯に発生した状況下で、微小地殻変動検出技術の開発に携わる者として、再検討が迫られていると考える。

とくに、宇宙測地技術が日本に登場して初めての直下型地震であるため、地震学研究者の周辺に位置する宇宙測地精密計測技術の研究者にとっては、遠い先の検討ではなく、直近での事態の発生により、今進められている、

宇宙測地技術の直下型地震微小地殻変動現象測定の歴史的な位置づけ、見直し、意義について、きちんと整理をするべき時期が与えられたと考えたい。

Key Stone Projectの詳細については以下の各論文にゆずりオーバーラップを避け、ここでは、科学史的立場からKSPに至るまでの検討をしてみたい。

こうした分析のうえで、研究者・技術者自身が確信を深め、将来の方向を見据えて一層の高精度化に挑むことが、今まさに求められていると考えている。

いわゆる地震科学そのもので論文成果を出せる研究者と違い、計測技術研究者の大半は計測の確度・精度の結果が成果として端的に問われるわけである。つまり地震研究者よりも国民的立場に近い発想のなかで、研究開発を進めているわけである。従って、進めている技術開発が意義ある物かどうか、さらには確信が持てるかどうかで、研究者自身の意欲そのものに、直接的な影響を及ぼすこととなる。この点で、計測技術研究者には、地震科学研究者とは別のシビアな対応が問われているといえよう。

\* 標準計測部

今回の事態を受けて、地震調査研究体制の整備の新たな公的な提言がなされた。21世紀の我が国の地震調査研究体制の展望を切り拓きうるような内容的総点検が求められている。その一つの作業例として、73年前の関東震災から現代までの科学技術史からみた現状に対する正確な評価があると考え、ここに私論として記述してみたい。

最近展開されている地震調査研究可能・不可能または不要の議論は、多くは地震科学的な知識データによるものであると、我々計測技術研究者からは感じられる。当然、こうした専門家的ベースによる議論は必要であるが、忘れてはならないのは73年前の関東震災から今回の阪神震災までの間に、あらゆる計測の基盤となる科学技術が空前の発達を見せたという点である。

一般には、この発達を空気のごとく当然と捉える傾向がある。地震研究者が知らず知らず活用している様々な技術は、背景となる基盤的・全般的技術の発展に、幾重にも支えられているのである。そして残念ながら予知という面では、今回の阪神大震災では、この技術の進歩が殆ど活用されることがなかった。

本稿の結論の一つとなるのが、1990年までの科学技術の加速度的な発展が、今後の地震調査研究の大きな基盤を作り上げたとしている点である。こういった分析が21世紀の地震調査研究技術が、寄って立つべき研究者層の幅の広い基盤を作り上げるのに不可欠であろうと考えられる。計測技術研究者が確信を持って前進して行くかどうか、21世紀の地震調査研究技術の展望に大きく影響するであろう。

こうした議論と並行して重要なのは、我が国の地震調査研究推進の国際的地位と役割に関する認識である。全般的に科学技術の前進の中で、我が国には決定的に欠落した部分が体質的にあり、それが宇宙測地技術など基盤技術にも歴然として生じている点である。

## 2. 精密測地技術と地震調査研究

以下の各論文に述べるとおり、北米プレート、ユーラシアプレート、太平洋プレート、フィリピン海プレートという4つの巨大地殻プレートの4重会合点に位置する我が国は、宿命的に世界有数の地震国である。当然我が国は地震調査研究推進に主導的に取り組むべきである。こうした背景よりKSPを始めとする各省庁の大型広域地震調査研究観測システムの整備が進められている。

これまでリードしてきた米国の科学技術が、経済力の相対的低下により、各分野で立ち後れが目立ち始めている。特に予算措置を伴う大型のハードウェアの整備が、日本に比べて遅れてきており、相対的に日本が先進的地

位に押し出されてきているといえよう。

地震国である点、そして経済力による先進地位への押し出され、この2点により、我が国が地震調査研究推進に果たすべき国際的責務が浮き彫りになっているといえよう。この責務を果たすに当たり、また阪神大震災の事態を受けて、「温故知新」ではないが、関東震災以降の科学技術の発展と地震調査研究推進体制の歴史的関連がまず捉えられているべきと考えられる。

以下の科学的視点は私論であり偏った範囲しか描き出されていないと思えるが、少しなりとも、いわゆる「地震学者」とは異なった視点による検討・議論を展開して、今後の地震調査研究推進の一助になればと思う。

今回の阪神震災は、我が国の科学技術の発展ぶりを検証する機会が与えられたものと受けとめるべきである。この73年という歳月とその間の特に最近の科学技術の進歩が、何故もっと地震調査研究に結びつけられないのか、計測技術研究者としてこの点はおおいにこだわるべきであろうと考える。

そして来るべき首都圏直下地震<sup>(1)</sup>に、この科学技術の発展の成果と阪神震災の教訓が本当に生かされなければ、73年間の科学技術は一体何をしていたのかと国民的に問われようし、研究者自身、大きな虚脱感に襲われるであろう。

本稿が21世紀の地震調査研究の前進へ向け、科学技術が生かし得るのだという確信を生み出すために、いささかなりとも寄与することを希望したい。

## 3. 地震調査研究計画の歴史的な重要イベント

### (1) 戦前・戦争直後におけるイベント

精密計測技術の立場から関東震災から阪神震災までを、振り返って検討するに必要な最小限の必要な地震調査研究計画上の重要イベントを示したのが第1図の最上段である。余り厳密な歴史表ではないが、大枠これだけは押さえておく点を並べている<sup>(2)</sup>。

まず議論の起点としているのは関東震災である。1923年9月1日相模湾を震源とするM7.9の関東地震が発生した。地震後大火災が発生し、死者不明14万余という未曾有の人的被害が発生した。地震後、これを教訓とした地震観測・予知体制の提言が当時の有力な学識者によってなされた。しかし当時の科学技術の水準では必要な観測・予知体制を整備できる段階ではなかった。第1図の下半分の当時の基盤技術の水準を見れば一目瞭然である。

地震後、経済不況が続く中、戦時体制が一層強化され、情報管制が厳しく引かれる中で、観測・予知体制整備どころではなくなってゆく。この戦時体制下に、1933年、

三陸沖を震源とするM 8.1の「三陸地震津波」で死者不明合わせて3064人の被害が出ている。また終戦まぎわの1944年12月7日、東海道沖を震源とするM 7.9の「東南海地震」では死者・不明1223名の被害、そして翌月の1945年1月13日には、愛知県南部を震源とするM 6.8の「三河地震」がおり、直下型のため地震規模の割に被害が大きく死者2306名に達した。こうした震災は情報管制により十分知らされず、また科学技術が戦時総動員されていたなかで、これらの被害は地震観測・予知体制整備に結びつくことは殆どなかったといえよう。

戦後、まだ復興の兆しが見えない1946年12月21日、南海道沖を震源とする「南海地震」が発生し、死者1330名に及んだ。終戦時期を挟んで3度にわたり東海・中部・近畿地方を中心に1000名以上の死者を出す大被害の地震が連発したわけである。しかし疲弊した我が国では観測・予知体制の充実が困難であった。さらに1948年6月28日、福井平野を震源とするM 7.1の直下型地震「福井地震」がおり、死者3769名の大被害をもたらした。

第1図の2段目から分かるとおり、既に国外では、宇宙時代、コンピュータ時代へ向け、息吹がまさに生まれんとしていた時代であった。

### (2) 復興期から成長期におけるイベント

50年代、我が国が本格的な復興期に入った1952年3月4日、十勝沖を震源とするM 8.2という超巨大な「十勝沖地震」が起き死者不明33名などの被害が出た。これ以降はこの地震を含めて、死亡者が数百人以上にのぼるものは無く1995年の阪神震災に至って5500名を越す大被害が発生するまで、約半世紀のあいだ我が国は全体として比較的平穏な時期を経過していたといえよう。

60年代、我が国は高度成長時代に入った。これに衝撃を与えるチリ沖を震源とする超巨大地震の津波が日本列島まで及び、死者不明142名に達した。

経済の成長とともに地震調査研究に対する国民的関心も高まり、1965年からの第1次地震予知5カ年計画の開始につながった。その前の1964年6月16日、新潟県沖を震源とするM 7.5の「新潟地震」がおり、死者26名を数えた。1965年からの第1次地震予知5カ年計画の開始は、行政と地震研究者の英知を結集したものであったが、第1図に示すとおり当時の科学技術の水準からすると、本計画は超先駆的なものであったといえる。本計画は現在の第7次計画まで30年にわたり継続している。言いかえれば、65年という時点で、予知計画を企てたことの大膽さと驚くべき先見性に驚かされる。

同図から明らかなように、1965年の時点の我が国の科学技術の方向性は、欧米に追いつけ追い越せというもの

であり、精密な計測を全国規模で展開するには、あらゆる面で基盤的技術が不足していたといえよう。ちょうど、東京五輪をもって日本が先進国の仲間入りを果たすという大きな国民的意識の高揚が、地震国の宿命たる被害を最小限にしようという意気込みに連らなって、こうした超先進的な地震予知計画へ結実したものと見えるかもしれない。そして、この地震予知計画の枠組みの中で使えるリソース、ポテンシャルは可能な限り総動員しながら、第7次計画までに継続・集積してきた内容は、世界に誇るべきものといえよう。

一方、60年代当時ではどのように予算とマンパワーを注ぎ込んでも、可能な計測手段は限られていたのである。

ひるがえって、現在では飛躍的な計測技術の進歩と研究者・技術者の能力・知識の向上により、客観的に見て予算とマンパワーを注ぎ込めば、全国をくまなくネットワーク化した超精密オンライン観測・計測網が現実にも可能な時代に入っている。30年間の予知計画が当初から確信し、実際に蓄積し得たさまざまな計測技術を縦横駆使できる時代に突入しつつあるといえよう。

### (3) 70年代のイベント

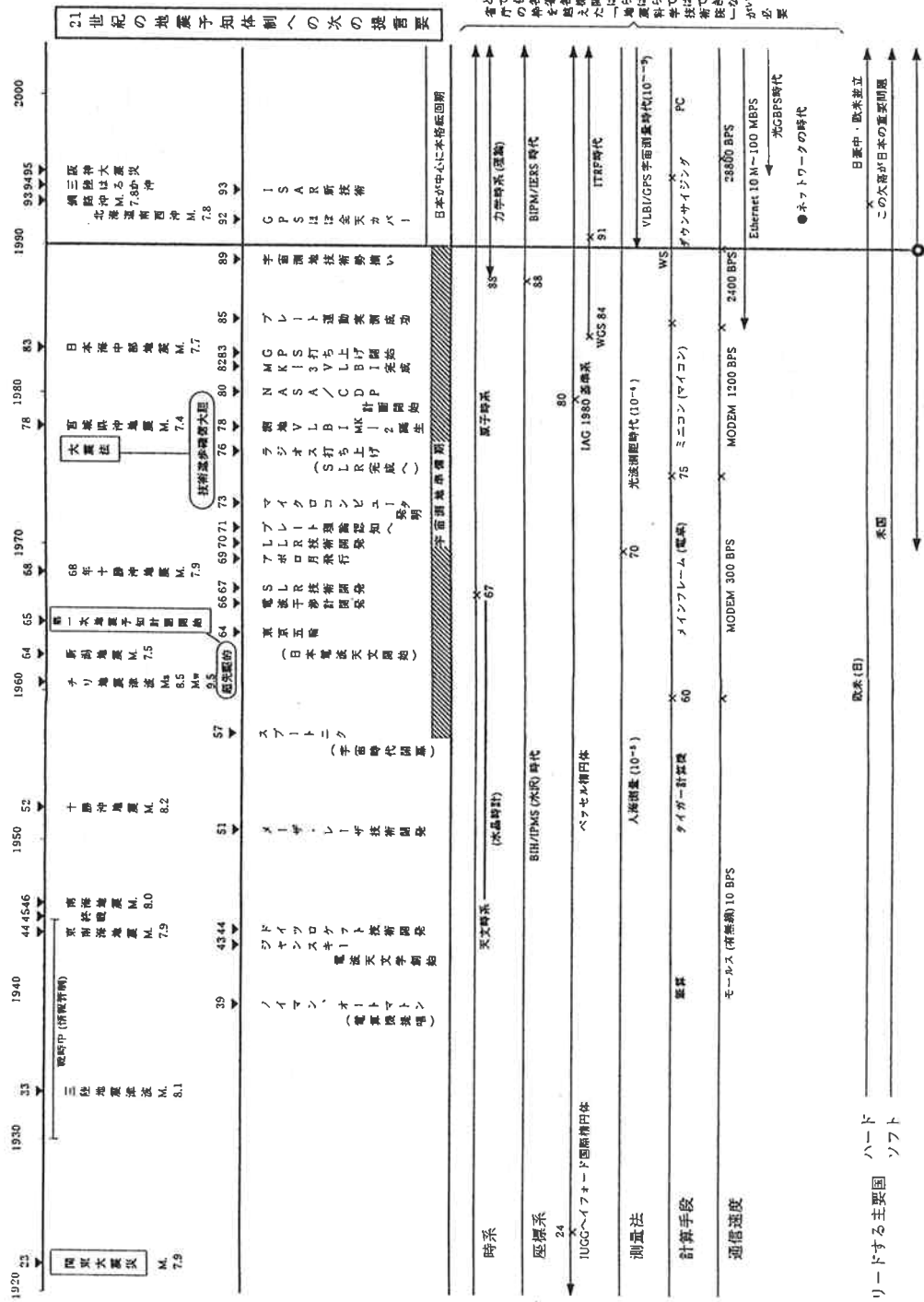
予知計画開始と同様に重要な意義を持つもう一つのエポックが、78年の大震法の制定である。70年代の比較的地震活動の穏やかであった時代に、駿河湾沖を震源とする「東海地震」の発生が切迫しつつあるとの議論のなかで、大震法が施行された。日本の地震学が初めて国の行政上に反映し、法律として、成立したのである。地震国日本として画期的な法律であった。現在の地震調査研究計画・体制の枠組みは、この大震法を中心として組み上げられて行くこととなった。

この78年という時点を経現在の計測技術から振り返ると、90年以降に主流となる新技術とその基盤インフラストラクチャーの萌芽の時期といえる。78年の時点ではごく一部の研究者により、将来人類は超精密な測量計測のポテンシャルを確立しようであろうという予測はなされていた。

たとえばプレートテクトニクスの実測などの実現性は議論されていたが、全体としては使い物になるかどうか半信半疑の試行錯誤の時期であったといえよう。

この時期に、国の法律として大震法が成立したことは、そのいきさつは、いろいろあるにしろ日本の研究者が全体として、将来の科学技術の進歩を悲観視することなく、進歩を大局的に強く確信していたからであろう。

ここに、国民と研究者・行政の関係者の大膽な楽観性を汲み取るべきであろう。この姿勢と実現への熱意が、80年代の試行錯誤の時期を経て、まさにそのものずば



〔重要イベント〕

〔技術開発イベント〕

〔基礎技術〕

測地をリードする主要国  
ハード  
ソフト

関東大震災から阪神大震災までの科学技術の進歩 (測地技術分野)

90年代目が備った これからの予知技術の歴史

各々の  
目的を  
達成す  
るため  
に必要  
な条件  
を整え  
る必要  
がある  
こと。

21世紀の地震予知体制への次の提言要

日本が中心に本格化開始

日本中・欧米並立  
この欠落が日本の重要問題

●ネットワークの時代

Ethernet 10 M~100 MBPS

28800 BPS

モデム

MOUSE (標準値) 10 BPS

300 BPS

MODEM 1200 BPS

2400 BPS

PC

ザクンサイジング

VLBI/GPS 宇宙測地時代(10<sup>-4</sup>)

91

IT/RF 時代

WS

IAG 1980 基準系

WGS 84

80

原子時計

BIPM/ERS 時代

力率時代(意識)

67

英文時代

(水島時計)

BSR/PPMS (米研) 時代

ベッセル補正

IAE 1980 基準系

80

原子時計

WS

光波測地時代(10<sup>-4</sup>)

70

光波測地時代(10<sup>-4</sup>)

75

ミニコン(マイコン)

75

マイコン(マイコン)

60

タイガー計算機

60

インフレーム(電機)

60

タイガー計算機

60

インフレーム(電機)

60

タイガー計算機

60

インフレーム(電機)

60

タイガー計算機

60

インフレーム(電機)

60

タイガー計算機

60

インフレーム(電機)

60

タイガー計算機

60

インフレーム(電機)

60

タイガー計算機

60

インフレーム(電機)

60

タイガー計算機

60

インフレーム(電機)

り、90年代の多様な新技術実用化の時期へつながったのであり、特にハードウェアの面では米国を追い越すほどに成長することにつながったといえよう。この意義は強調してしすぎることはない。

また言い換えれば、現在一部から出されている地震調査研究計画に対する批判・不要論に対しては、個々の批判に応えることも重要であるが、先人達が超先駆的にそして確信的立場で先手を打ってきたからこそ、ここまで計測技術の進歩が支えられてきたのである点をもっと強調すべきであろう。30年前には、地震学の外側・周辺に位置する研究者・技術者には地震調査研究に寄与する道筋はなかったと言って良い。しかし、国の地震調査研究計画の枠組みができたからこそ、各省庁の周辺のさまざまな分野の研究者・技術者が結集できる環境が次第に熟成されてきたのである。そしてその熟成度は国際的に見ても先進的に高いレベルであるといえよう。

いまここで、一部から出されている批判・不要論に惑わされるならば、先人達の30年にわたる先駆的な努力は水泡に帰し、21世紀へ向けての発展の道筋を見失うことになるであろう。逆に、先人達の広い視野からの先見性に目をやれば、21世紀の更に大きな飛躍につながるのであるという視点に立って、各論の批判に添えて行くべきであろう。

結論的にいえば、60年代から70年代への我が国の地震調査研究計画が大局として、現在の技術革新を結実させたといえるべきであろう。

#### (4) 80年代のイベント

1983年に秋田県沖を震源とするM7.7の「日本海中部地震」が発生し、津波などにより死者は104名に達した。この地震は日本海に新たなプレートの境界が有るとの説を裏付けるものとして注目された。後述するように、丁度この頃からVLBI技術などによってこれまで地質学的・間接的な証拠の上に展開されてきたプレートの超微速度運動が、いよいよ実測できる段階にはいった。また深井戸による微小地震の観測により、3次元的なプレート構造が見え始めたのである。興味深い偶然といえよう。

日本周辺の地震活動の活発化と計測技術の進歩がうまく噛み合い始めて、日本周辺のプレートの分布が解明され始めたといえよう。80年代後半はグローバルなプレート理論の検証を目指した疾風怒濤の時代であったといえる。この意味で「日本海中部地震」は大きなエポックの地震であったといえる。

80年代末から3年間、日本経済はバブル景気の絶頂期にはいった。阪神震災後の現時点でみれば、このバブル期に生み出されたリソースの幾分かでも、地震調査研究

に計画的にかつ効果的に回されていれば、もっと早く各種の精密計測技術の全国的整備が促進されていたのではと思われる。

地震調査研究の30年間の総予算規模1200億円が膨大だという批判に対しては、バブルで失った数百兆円の資産と比べることが効果的であろう。この損失規模から見ても日本経済は地震調査研究計画を大幅に拡充できる力を有しているといえよう。そして、将来首都圏直下地震が悲劇的規模で発生したときには、このバブル期の喪失資産と同規模ないしは、それ以上の損失が予想されていることは誠に皮肉な偶然といえよう<sup>(1)</sup>。

予算的に不十分な状況下でも日本の地震調査研究計画は、測地分野に関しても、関係機関の努力の上に90年までには、計測技術の基本的基盤を概ね整えてきたといえる。そして改めて我が国の計測技術の弱点、つまり試行錯誤が更に求められる部分が明確になってきた。いわゆるソフト部分であり、具体的にはデータベースとそのシステム化である。

#### (5) 90年代のイベント

1993年が明けると、日本周辺には大きな地震が続発する状況となった。1993年1月15日に釧路地方を襲ったM7.8の「釧路沖地震」、同年7月12日に奥尻島等を襲ったM7.8の「北海道南西沖地震」、そして1994年10月4日には、特に北方領土に甚大な被害を与えたM8.1という超巨大な「北海道東方沖地震」などが連続して発生した。さらにその翌月の12月28日、八戸地方を中心に襲ったM7.5の「三陸はるか沖地震」、そしてその3週間後には、淡路島から神戸にかけて、わが国史上初の震度7の激震を伴ったM7.2の内陸直下型地震である「兵庫県南部地震（阪神大震災）」の発生へと続いた。これは約半世紀ぶりに数千人以上の死者を出した大震災であった<sup>(2)</sup>。

これらの全ての地震が観測網の未整備なところで発生し、このことが地震予知不要・不可能論と結びつく根拠となっている。しかし以上でも概括し、以下でも述べるとおり、我が国の地震調査研究推進体制は、貧弱な予算と技術基盤のうえに先駆的に打ち立てられたものである。そしてその枠組みがあったからこそ、いまや日本全土をくまなくカバーしうる、リアルタイムに近い微小地震変動的データを集中的に取得できる科学技術基盤が90年代になってやっと整備できたのである。

今後は阪神大震災の教訓を生かした、日本の技術基盤の弱点を強力に補強した、新たな21世紀を目指した地震調査研究の新しい枠組みが求められるべきである。先人達の先駆性と歴史的蓄積を否定するのではなく、発展させるものとすべきであると考える。

#### 4. 科学技術の進展の重要なイベント

科学技術の進歩は常に相対的で、その時点で先進国の科学技術は最高の到達点にあると常に考えやすい。典型的な例が19世紀末であり、科学は頂点まで達したと考えられていた。しかし、20世紀初頭には量子論や相対論という新しい発見により、その限界は打ち破られた。基礎物理学では20世紀初頭が大きなブレークポイントであったと言われている。

地震調査研究の基盤となる科学技術ではどうであろうか。関東大震災から阪神大震災に至る73年間は、前半の戦争前後の停滞期を抜け出したあと発展が始まり、特に80年代に試行錯誤を伴いながらも大きく前進し、90年が一つのブレークポイントとなつて、その後加速度的に科学技術基盤整備が進んでいるということを第1図は示していると思われる。

本章では測地科学技術に関しては90年以前は「前史」であり、それ以降に「新史」が始まったとの結論を試みているが、その根拠となる点を以下に歴史的に検討してみたい。

##### (1) 「前史」

1923年の関東大震災の前後は、基礎物理学において相対論と量子論が理論的に確固とした地位を占めるに至った時期であるが、この両理論が実際の科学技術に多面的に応用されるためには、様々なテクノロジーのブレークスルーを経ねばならなかった。測地科学技術はこの発展に依存してきており、またその実践の場を提供してきたと言えよう。そして、80年代に入ると逆に測地精密計測が格好の最先端科学の検証の役割へと還元されるようになってくるのである。

第1図の第2段に従って、主要な科学技術の進歩を追ってみよう。1939年、ノイマンはオートマトン（現在で言う電腦）を先駆的に提唱した。また情報理論の基礎を創始した。一般に電算機などが普及を始める60年代以降の計算機のハード・ソフトの原型はここに始まると言われている。

1943年には、ジャンスキーが初めて太陽や銀河からの天体電波を捕らえることに成功し、華々しい電波天文学の進歩の火ぶたが切られた。当時の技術では光学望遠鏡の分解能に及ぶべくもなかったが、その後のエレクトロニクスの急激な進歩により、70年代には光学望遠鏡を凌駕する分解能を与え得る電波干渉計技術が出現した。天体を探る分解能の裏返しとして天体の電波を基準に、地球自体を宇宙から精密に計測することを可能とした。

1944年、ドイツのブラウンは優れたロケット技術を開発していた。終戦後、その技術はソ連や米国に移転され、

宇宙時代の幕開けにつながってゆく。

1951年、マイクロ波でのメーザ技術、そしてその後の光でのレーザー技術が、量子物理の発展の上で発明された。これまでのパワーだけを活用するスペクトラム技術から、位相まで揃えたコヒーレントな電磁波技術が展開し始めた。この両者ともにそれぞれ原子時計・電波干渉計そしてレーザー測距技術へと精密計測・測地学の分野のキーテクノロジーとして発展してゆくのである。

1957年、ソ連は人類史上はじめて人工衛星スプートニクを打ち上げるのに成功した。これは西側各国に強いショックを与え、米ソ間で宇宙開発競争が繰り広げられることになる。当時、我が国はまだこの競争に参加できる状況ではなく、初歩的なロケット試験や米国の衛星を利用した実験を繰り返していた。

我が国が本格的な宇宙時代に入るのは、1964年の東京五輪の映像を米国へ宇宙中継するために、大型のパラボラアンテナを茨城県の太平洋側に整備してからである。当所鹿島のパラボラアンテナは、東京五輪の宇宙中継に活躍した後、しばらくしてから、測地技術に大変革をもたらした超長基線電波干渉計（VLBI）用のパラボラアンテナとして、大きな使命を果たすこととなる。

70年代に入り原子時計が利用できるようになると、地球の規模で独立したパラボラアンテナ間を干渉・相関する技術が生まれ、VLBI技術へと大きなブレークスルーを勝ち取ることになる。

一方、60年代末頃からコーナレフレクタを積んだ衛星が打ち上げられ、地上と衛星間の往復距離を電波よりもはるかに高い精度で測距する衛星レーザー測距（SLR）技術が進展をしていた。我国でも海上保安庁水路部が国際的に先駆的成果を挙げてきている。国土地理院などによる地上の測量でもこれまでの尺取虫の人海測量からレーザーによる光波測距が使われるようになった。

60年代末にはアポロ宇宙船による月飛行計画が成功し、69年初めて人類が月面に降り立った。その時、月面にはレフレクタが設置され、その後のソ連による無人着陸船による設置と合わせて、地球と月の間をレーザーで測距する月レーザー測距（LLR）も開始された。

##### (2) 開発期

以上のVLBI、SLR、LLR、この3つの技術を中心とした70年代後半からの米国NASAの地殻力学プロジェクト（CDP）が準備されていった。この計画の目的の大きなものは、70年代初頭に認知され始めたプレートテクトニクス理論が予想する運動を実測により実証しようというものであった。

大陸や海洋底が年間数cmの速度で移動するというプレート運動は、地球の直径を約一万kmとして、cmの

精度を得るためには10のマイナス9乗の有効桁が必要であった。当時の地上測量法では10のマイナス5～6乗が限界であり、このプロジェクトは千倍以上の精度の改善を目指していた。一気にプレートテクトニクス理論を検証しようという野心的な目標を掲げていた。

別の方面からも精密計測・測地学を変革するイベントが待ち受けていた。70年代半ばになされたマイクロコンピュータ（プロセッサ）の発明である。これは前述のノイマンのオートマTON提唱に匹敵するイベントであるといえよう。

発明当初は特殊な応用分野を対象にしていたが、ベンチャー企業などがパーソナルなコンピュータとして発展させることに成功し、今日のパソコンへと飛躍してダウンサイジング時代の主役を務めるに至っている。

特に精密な数値計算を機動的に、時にはフィールドで実行する必要のある精密計測・測地学にとって、パソコンは重要である。後述するGPSのように多数を各所に配置し、高精度のデータを大量に取得し、それをネットワークを介してセンターに集め、データベース化するためにはパソコンが必須の役割を果たすようになってきている。

第1図の下部に計算手段と通信速度の歴史的な発展を示しているが、身近に高度の計算を誰もが出来るようになり、その結果を高速にネットワークで伝送できるようになったのは80年代の末頃からといえる。第1次予知計画の発足した65年ごろは、まだ大型計算機に触れられる人は限られており、大多数の研究者・技術者は手動のタイガー計算機を使って、高精度の計算を手間をかけてこなしていたのである。またこのころのデータ転送速度はTELEXかモルスの10 bpsのオーダーでしかなかった。まだ300 bps程度のモデムも普及していなかった時期である。このことから、いかに第1次計画の立てられた時点が超先駆的であったかが分かる。

## 5. 宇宙測地技術の前進—「新史」へ向けて

NNSSなどの航法用の衛星が打ち上がり、70年代後半から宇宙技術をいかに高精度な測地法として活用するかの研究が進展した。SLR用測地衛星スターレットやその本格派のラジオス、そして我が国の「あじさい」などの打ち上げにより、衛星測地は80年代に著しく進展し、高精度化が進んだ。衛星測地には必ず高精度の座標系モデルと地球の楕円体モデルが必要であるが、衛星測地の進展とこれらのモデルの研究の高精度化フィードバックが繰り返しおこなわれた。IAG 1980基準系がたたき台となり、GPS関係ではWGS 84基準系が使われるようになった。

そして、ついに1988年には100年以上に及んだ座標系と時系の国際的中枢である国際報時局BIH/国際極運動事業IPMS（水沢緯度観測所）の事業体制が改められ、国際度量衡局BIPM/国際地球回転事業IERS時代に入った。宇宙測地技術の進展が、時代のニーズに合った国際事業体制へと再編成されたのである。これはまさに、現在の我が国の地震調査研究推進体制の見直しにとっても、大いに参考にすべき前例を提供していると考えられる。

この新しい体制のもとで、現在は世界的にほぼ統一された高精度の座標系、地球形状として時系のモデルとその実測値との誤差が与えられようになってきている。

衛星測地の進展とオーバラップしながら、NASAのCDP計画が80年代に先導的な役割を果たした。この計画には米国の他、日本や欧米各国が当初から参加し、次第に南半球やアジアの各国も加わって一大国際プロジェクトとして、プレート運動の全地球的規模の実測など、次々と大きな成果を挙げた。

85年、ハワイが日本に接近しているとの日米VLBI実験の成果は、プレート理論検証の代名詞として、我が国の学校の主要な教科書に載るほどに大きなインパクトを与えた。従来の「地学」に宇宙測地学の仲間入りが決定的になったイベントといえよう。このとき初めて日米大陸間の2局の距離が9桁の精度で与えられた。従来の精度を一気に千倍以上改善したのである。

NASA/CDPの果たした役割の中で特に強調すべきは、ハードの開発とともに、大規模なソフトウェアの開発が平行して進められた点である。現在に至っても、日本はハードウェア偏重・ソフトウェア軽視・弱体の傾向を克服できず、逆に弱点を露呈するに至っている。これは、各論・個別的な弱点ではなく我が国の研究開発体制全般にみられる本質的な問題点である。

さらに、1983年から始まったGPS衛星の打ち上げは、これまでの巨艦巨砲の宇宙測地技術に機動性を持ち込んだ。こうしてVLBI、SLRとGPS両者の協力によって宇宙測地技術は総仕上げされて行くこととなる。

原子時計を積んだGPSは地上系と宇宙系が一体となった一大コングロマリットのプロジェクトといえる。米国国防総省の科学技術力の粋を結集したシステムである。途中スペースシャトルの打ち上げの悲劇的失敗というブランクがあったが、90年代までには、ほぼいつでも、どこでも、上空に最低3～4個の衛星が見える状態となり、目標段階に到達したといえる。

1993年12月には国防総省は航法用の1波については民生用に使用することを公認した。しかし、精密計測・測地学に必要な2波の利用については、特定メーカーにの

み製造が認められている状況である。

こうして80年代末までに宇宙測地技術は勢揃いし、予算とマンパワーが確保できれば、高精度の宇宙測地が現実に可能な状況となったといえよう。この意味で、1990年が宇宙測地技術または精密計測・測地学の「元年」と位置づけたい。(以上は宇宙測地技術に特化した科学技術史を述べてきたので、当然いくつか重要な技術ブレイクスルーを落としている可能性が高い。)

## 6. ソフトウェア・データベースの重要性

これまで我が国の科学技術は概ねキャッチアップ型であった。モデルとなる主役は米国などであった。しかし前述のように状況は大きく変化し、高額なハードウェアは日本の方がはるかに優勢になってきており、また高度な研究成果を出せるエンドユーザも多い。

つまり、観測と研究利用は盛んであるが、いわゆるデータリダクションつまり観測データを利用しやすいデータベースにするソフトウェア部分とそのマンパワーが欠落している。これは特に測地GPSのデータベース利用について端的に見られる点である。論文成果などに結びつかないためか、長期に優秀な人材を張り付けることができないためか、いろいろ理由は考えられるが、一番手間暇の掛かる公開に耐えるデータベースを目指したデータリダクションを、組織的に取り組めないという事態は、我が国の科学技術の後進性を端的に示すものである。

一般に新規のソフトウェアを、過去のソフトウェアの長所を集めてデザインすることは容易である。難しいのは、そのソフトウェアのバージョン管理を系統的に行い、それを長期にわたって発展させつつ維持して行くことである。最近の計算機の急激なダウンサイジングの傾向からも明らかなように、計算機のアーキテクチャー、OS、開発言語などの進展・変化は著しいものがある。従って新しいソフトウェアをある時点で先駆的に作っても数年で時代遅れになった例は数多くある。逆に常にあたらしい事態に受動的に追従し続ければ、一貫性のないシステムとして、いびつな状況に陥ることになる。

我が国でもソフトウェアを重視し、データベースを完備・充実させようとの議論がなされているが、こうした長期的視点が欠落している場合が多い。データベースが数年のうちにオープンに使われなくなった例は、非常に多い。逆の見方をすれば、生き残ったシステムこそが環境の変化に順応できたともいえる。

またデータフォーマットの統一・標準化を研究者・ユーザ主導で行うところに、米国の科学技術の底力を見ることができる。これはインターネットが発展して

きた過程や、パソコンがPC/ATに互換標準化されてきた過程でも見られることであるが、メーカなどの共同作業は伴いながらも、研究者・ユーザ側が標準化の労苦をいとわず精力的に取り組み、系統的にドキュメンテーションを蓄積しながら、デファクトスタンダードを確立し、それをオープンにしてきたのと同様な過程が見られる。

このような、特にソフトウェア・データベース面でのデファクトスタンダード化は、日本の研究者の不得手とするところであるが、地震国かつ先進国の日本が今後先駆的に宇宙測地技術の総合的発展を目指すので有れば、避けて通れない課題であろう。また日本のソフトウェアの弱点を真正面から克服しようとする努力と結びつくのであるから、おおいにやりがいのある課題と言えるのではないだろうか。

## 7. 我が国の宇宙測地技術ソフトウェアの現状

87年以降の補正予算の活用により、我が国の宇宙測地技術ハードウェアの整備・充実ぶりは著しいものがある。今回の阪神震災によって、ますます我が国のハードウェアの整備が進み、その規模は外国勢を断然引き離して行くであろう。しかしソフトウェア・データベース面のギャップは、強力なテコ入れ無しには、拡大する一方であろう。

我が国に期待されるのは、充実したハードウェアによる観測結果をanonymousにアクセスできるデータベースを国内外に迅速に発信して行くことである。このソフトウェアギャップを克服する仕組みを今後日本の地震調査研究推進体制が組み込まない限り、宇宙測地技術による21世紀の我が国の地震調査研究の展望は切り拓かれないのではと危惧している。

## 8. おわりに

阪神震災は地震そのものを研究する科学者に大きな衝撃を与えたが、同時に周辺の分野の研究者には未知・未体験ということも加わって、強烈なインパクトを与えている。周辺部分の研究者が、確信をもって前進できるかどうか、地震調査研究へのかかわり合いを萎縮せずにすむかどうかは、大きな分岐点であろう。

本稿により得られたと思われる重要な結論は、精密計測・測地学にとって、1990年が1つの大きなエポックであり、それを基盤とする地震調査研究技術はいまや「揺籃期」にあるということである。(地震の専門家でない研究者がまとめたものであり、的はずれで不十分な点は多々あると思われる。)

精密計測・測地学的に見て、本格的な地震調査研究観



測システムが稼働し始める基盤条件がやっと整ってきたという現状認識を持つことができた。

以上の分析は全く私的なものであるが、当所がKSP計画を進めるにあたり、地震研究者と同じ土俵で議論することは、当所内でも外部的にも望まれてはいないと考えられる。地震学者が考えつかない視点での、クールな分析・整理こそがKSP計画という前人未踏のプロジェクトを成功させる鍵であると考えている。

こうした計測技術系研究者としての視点をしっかり持

つことが、国内の地震調査研究機関との協力の必須のバックボーンであると私は考えている。

#### 参 考 文 献

- (1) 石橋克彦, “大地動乱の時代—地震学者は警告する—”, 岩波新書 350, 1994.
- (2) 理科年表, 地震の部, 国立天文台編 平成8年 第69冊 丸善, 1996.

