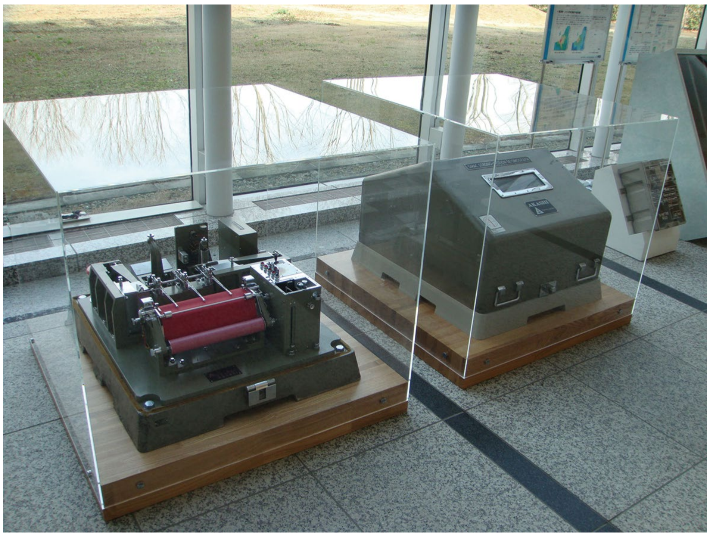
日本の強震計開発の歴史と現在

― 強震観測の黎明から現在まで ―

国立研究開発法人 防災科学技術研究所巨大地変災害研究領域地震津波火山観測研究センターセンター長代理　切　刀　　卓

1．はじめに

日本の強震観測の歴史は、SMAC型強震計の第1号機が東京大学地震研究所に設置された1953年7月29日に始まるとされる。以後、70年以上にわたり日本の強震観測は発展を続け、貴重な記録を数多く蓄積してきた。本稿では、功刀ほか（2009）[1)]に基づき日本の強震計開発の歴史を簡単に振り返る。次いで、現在の強震観測網の代表例として、全国を対象とした大規模な観測網である、㈲防災科学技術研究所（防災科研）のK-NETとKiK-netを紹介する。その他の観測網については、㈳日本地震学会強震動委員会（2020）[2)]による特集「新・強震観測の最新情報」が参考になる。



写真－1　SMAC-A型強震計（㈲防災科学技術研究所蔵）

2．日本の強震観測の発展

強震計の起源を遡ると、世界初としては米国のUSCGS標準強震計(1932年開発)に、日本初としてはSMAC型強震計（1953年開発）に行き着く。両者の背景にはともに石本巳四雄の加速度計があり、強震観測は地震国である日本が創始したといってよいものである。固有周期の短い振子と空気減衰器によって振子変位を地動加速度に比例させたことが、石本の加速度計の特徴であり、その基本的な考えは20年後のSMAC型強震計の開発に受け継がれている。それ以前にも強震計と名の付く地震計は存在したが、これらの実体は、実動大（1倍）に近い倍率をもつ変位計であった。変位計は平坦帯域において振子変位が地動変位に一致することから振り切れが起こりやすく、一定以上の強震動に対し振り切れを許容した上で使用されていた。地震動を振り切れることなく計測することが強震計の使命であろうから、今日の意味での強震計の歴史は、加速度型強震計（Strong-motion accelerometer）の開発により始まったと言ってよいだろう。なお、気象庁が長期にわたり運用していた1倍強震計と呼ばれるものは上記で述べた実動大の変位計にあたる。

SMAC型強震計は、3,769名の犠牲者を出し、震度7が新たに設定される契機となった福井地震（1948年）の甚大な被害を受け組織された「標準強震計試作試験研究会（Strong Motion Accelerometer Committee)」により開発されたものである。その後、この強震計を基本とした各種の機械式強震計が製作され全国に普及していった。写真－1は防災科研に展示されているSMAC-A型強震計（後継機と区別するために初期型のSMAC型強震計は、後年SMAC-A型強震計と称されるようになった）のものである。この機体は1958年に大阪市北区中之島に設置され、2008年に観測を終了するまでの50年間にわたり稼働していた。

1980年代に入ると、記録紙からの数値化誤差に起因する分解能不足など機械式強震計の限界が明らかとなり、負帰還型加速度計を用いたデジタル記録方式への移行が進んだ。気象庁が整備した87型強震計はその代表である。観測点配置については、都市部への偏在の解消が課題であったため、1988年に「強震計全国配置基本計画」が、国立防災科学技術研究センター（後の㈲防災科学技術研究所）に設けられていた強震観測事業推進連絡会議によって策定され、全国を均質にカバーする方針が示された。この計画は後のK-NET整備計画を検討するにあたって考え方の基盤にもなったものである。

1995年の阪神・淡路大震災を引き起こした兵庫県南部地震の際、震度7の激しい揺れに襲われたいわゆる「震災の帯」では、壊滅的な被害があったにもかかわらず、強震計による地震動の記録をほとんど得ることができなかった。これは、密度の高い全国規模の強震観測網の整備がなされていなかったことによる。この事例を教訓として、日本および周辺で起こる地震による強震動を確実に記録するために、大規模な強震観測網であるK-NET（全国1,000点規模の観測網）およびKiK-net（地中・地表に強震計を併設した観測網）が構築されることになった。また、同時期に気象庁や地方自治体により震度計の整備がなされた。これらの震度計の多くは強震計としても機能す

る。阪神・淡路大震災後に整備されたこれらの観測網は、現在でも日本の強震観測体制の根幹を成すものである。次節では、これらの近代的な強震観測網の代表的な事例としてK-NETおよびKiK-netを紹介する。

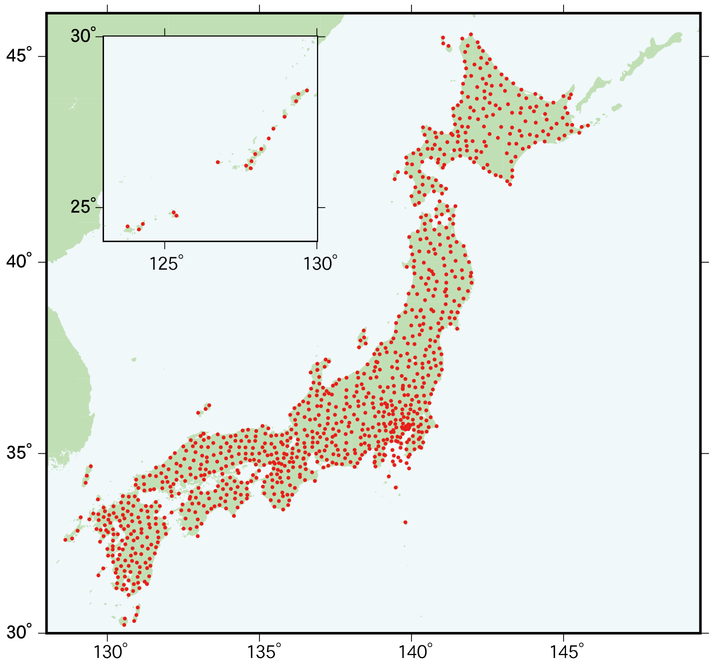
3．現在の強震観測網

（1）K-NET

K-NET（Kyoshin Network：全国強震観測網）は、防災科研が運用する、全国を約20km間隔で均質に覆う1,000箇所以上の観測点からなる強震観測網である。兵庫県南部地震では震度7に相当する激震に襲われた「震災の帯」と呼ばれる地域が出現した。しかし、当時の強震観測体制では激震に相当する強震記録をほとんど得ることができず、全国均質な強震観測網の必要性が強く認識されることとなった。この状況を受けて、K-NETは科学技術庁防災科学技術研究所（当時）により整備が開始され、わずか1年後の1996年6月から運用を開始している。発足当初のK-NETは、全国1,000観測点からなる観測網であったが、現在では、計画以前に整備されていた一部の観測点や相模湾の海底ケーブル式地震計の海底観測点等も加わり、その観測点数は、2025年3月31日の時点で1,039箇所となっている。図－1にはK-NETの観測点分布図（2025年3月31日現在）を示した。強震計は海底ケーブル式地震計を除けば、すべて地表に設置されており、市町村役場や学校などの公共施設の敷地内にあることが多い。このためK-NETは地震被害に関連した強震動の研究に特に適した観測網である。

K-NETでは均質な強震記録を得るため、可能な限り統一された観測施設と強震観測装置を用いることとしている。観測施設は3m平方の敷地からなり、中央にコンクリート製の地震計台が設置されている。建屋は軽量なFRP製であり地震計台とは独立した基礎上に設置され、強震記録に影響を与えないように配慮がなされている。観測点建設にあたって、観測点近傍で最深20mまでのN値検層、PS検層、密度検層が行われ、土質柱状図と検層データが取得されている。

K-NETでは、観測目的に適合した専用設計の強震計を使用していることが特徴の一つである。K-NET強震計は、開発順にK-NET95、K-NET02、K-NET02A、K-NET11、K-NET18の形式に大別される。K-NET95とK-NET02はすでに全数が更新されており、現在稼働している強震計はK-NET02A、K-NET11、K-NET18のいずれかである。



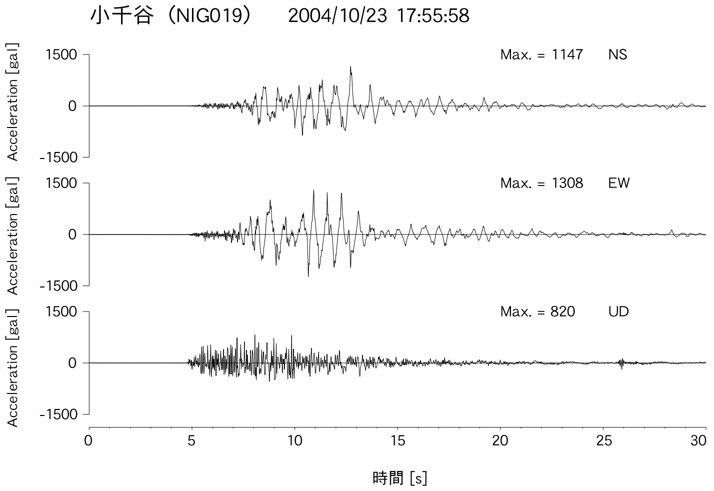
図－1　K-NETの観測点分布図

K-NET95は観測網発足に伴い開発された強震計である。開発当時はまだ採用例の少なかった24bit分解能のAD変換器を用いた強震計であり、100Hzサンプリング、実効ダイナミックレンジ114dB、最大計測レンジ2,000gal、刻時精度5msの性能を持つものであった。K-NET95は8MBのフラッシュメモリを持ち、これは2.5時間分の3成分強震記録の記録容量に相当する。また、停電時には内蔵蓄電池で20時間の動作を行うことが可能であった。強震記録の収録はトリガ方式であり、データ回収はセンターからのダイアルアップ方式によっていた。

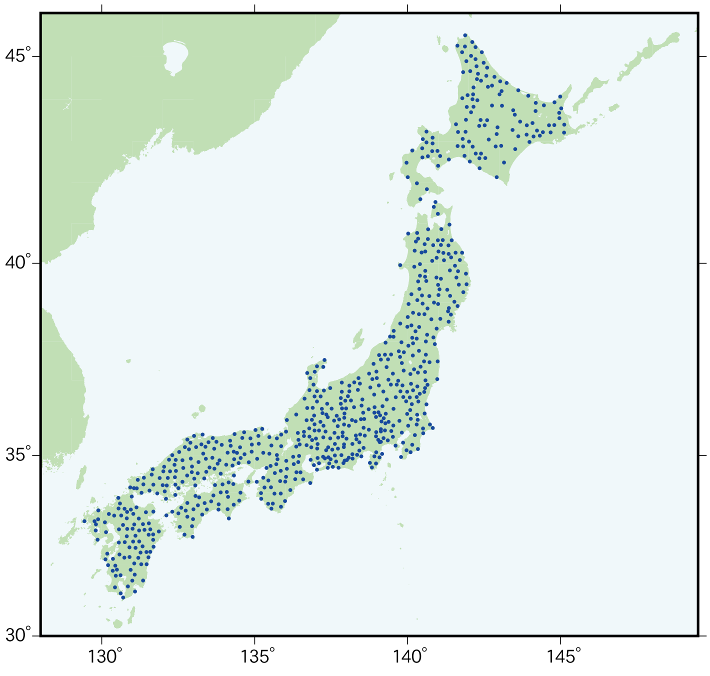
続いて開発されたK-NET02では、24bit分解能、実効ダイナミックレンジ132dB、最大計測レンジ4,000gal、刻時精度0.1ms、記録容量512MBに性能が引き上げられた。K-NET02は2003年に運用が開始されている。K-NET02以降の強震計の特徴として、OS（Linux）の搭載により強震計内での演算機能が大幅に強化されたことが挙げられる。K-NET02は強震動の発生を検知すると、自動的にセンターに接続し、強震記録を送信する機能を持つ。この機能により、規模の大きな地震後に発生する通信回線の輻輳を避け、迅速な強震記録の収集が可能になった。さらに、K-NET02以降の強震計は気象庁が行う検定に適合した震度計としての機能を有し、地震検知後2分以内に震度電文の送信が可能である。この震度電文は、気象庁が取りまとめて発表する震度情報の一部として利用され、地震後の初動対応等へ役立てられている。K-NET02は、停電時に内蔵蓄電池を用いて1日間の震度電文およびトリガ強震記録の送信が可能である。さらに停電が継続した場合にはトリガ強震記録の収録のみ7日間の動作が可能である。

K-NET02AはK-NET02の改良型であり、可動部にクオーツフレクチャ（石英ヒンジ）を使用した加速度計を採用している。この種の加速度計は金属製の可動部を使用した加速度計に比べ強震記録にしばしば見られるステップ状ノイズの発生が少ないという利点を持つ。K-NET11は、2011年に発生した東北地方太平洋沖地震（東日本大震災）後に開発され、2012年に運用が開始されている。K-NET11は最大計測レンジが8,000galに引き上げられたほか、長期間の停電に備え7日間の震度電文およびトリガ強震記録の送信が可能である等、特に計測の確実性に重点を置いて開発がなされた。K-NET18はK-NET11とほぼ同じ性能をもつ後継機種である。

K-NET95の強震記録収集は防災科研本所（茨城県つくば市）にあるセンターからダイアルアップで行っていた。この作業は完全自動化されていたものの、大規模な地震時には通信回線の輻輳の影響を受け数時間以上の遅延が発生することがあった。これを解決するために、強震計から自動的に送信される強震記録および



図－２　2004年中越地震でのK-NET小千谷（NIG019）観測点の強震波形



図－３　KiK-netの観測点分布図

震度電文を一括して受信可能なデータ収集システムが2003年に開発された。このシステムは数度の改良を受けながら現在まで運用されている。震度電文に関しては通信の頑健性のため、本所と兵庫耐震工学研究センター（兵庫県三木市）にある２か所のセンターに同時送信される。

収集された強震記録は、運用者による品質チェックを受けた後、後述するKiK-netの強震記録と合わせてWEBサイト（https://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin）から公開されている。このWEBサイトでは、地震諸元や最大加速度等を入力とした強震記録の検索が可能であり、土質柱状図等の付帯情報も利用可能となっている。なお、K-NETとKiK-netには「防災科研K-NET,KiK-net（NIED K-NET,KiK-net）」としてデータDOI（https://www.doi.org/10.17598/NIED.0004）も付与されている。全国均質な観測施設に同一の観測機器を配置し、得られたデータを迅速に公開するというK-NETの在り方は、整備当時としては先駆的な試みであり、後に整備された地震観測網のモデルともなったと言える。また、K-NETは強震動を記録するための観測網であると同時に、震度観測により地震防災に対し直接の利用がなされているという側面も持つ。

K-NETは1,000箇所の観測点が一斉に運用開始となったことや均質な観測点配置もあり、運用開始から2025年９月末までに、51万波形以上の強震記録を蓄積している。この中には、３成分合成最大加速度が1,000galを超える33記録、震度７相当となる４記録、震度６強相当となる38記録が含まれている。震度７相当の強震記録の例として、2004年中越地震時に観測された､小千谷（NIG019）観測点の強震波形を示した（図－２）。

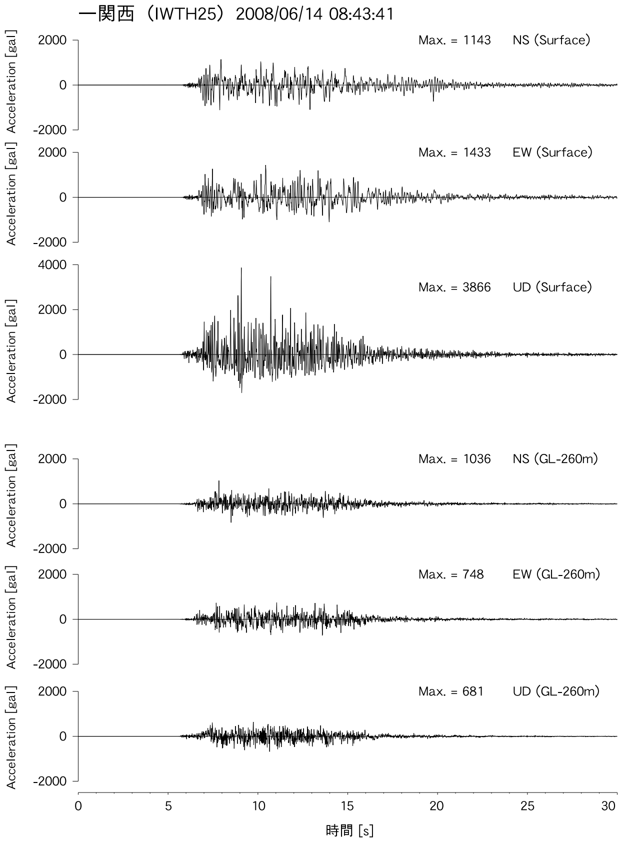
（２）KiK-net

KiK-net（Kiban-Kyoshin Network：基盤強震観測網）は、防災科研が運用する約700箇所の観測点からなる強震観測網である。KiK-netの最大の特徴は、各観測施設に観測井が掘削され、地表と地中の双方の強震計からなる鉛直アレーが構成されていることである。

兵庫県南部地震の発生を受け、全国にわたる総合的な地震防災対策を推進するために、地震防災対策特別措置法が制定された。同法に基づく地震調査研究推進本部令により1995年７月18日に地震調査研究推進本部（地震本部）が総理府に設置された（現在は文部科学省に設置）。地震本部の下では、地震に関する各種の基盤的調査観測が推進されることとなったが、KiK-netはこの一環としてHi-net（High-Sensitivity Seismograph Network：高感度地震観測網）に併設される形で防災科研により建設された強震観測網である。

KiK-netの観測施設は、2025年３月31日の時点で沖縄県や離島を除く全国695箇所に配置され、各観測施設では地表と地中の２カ所に強震計が設置されている。地中強震計はHi-netの高感度地震計と共に耐圧筐体に格納され、深さ100ｍ以上の観測井の孔底に設置されている。KiK-netの観測点分布図（2025年３月31日現在）を図－３に示した。KiK-netには地中強震計の設置深度が2,000ｍ以深に及ぶ観測施設が含まれており、大阪市此花区に設置されている１地点を除いて12地点が関東地方に分布している。最深の観測井は、さいたま市岩槻区にある岩槻深層観測施設（SIT001）であり、その深さは3,510ｍである。KiK-netでは、Hi-net観測施設の地点選定の関係から、K-NETに比べると全般的に硬質な地盤上に観測施設が設置されているのが特徴である。同様な理由から都市部にある観測施設の数は少ない。観測井の掘削にあたってはPS検層が行われボーリング柱状図が作成されている。

KiK-netでは、K-NETと同様に専用設計の強震計を使用している。KiK-net強震計は、開発順にSMAC-MDK、KiK-net06、KiK-net11、KiK-net18の形式に大別される。SMAC-MDKはすでに全数が更新されており、現在稼働している強震計はKiK-



図－４　2008年岩手・宮城内陸地震でのKiK-net一関西（IWTH25）観測点の強震波形

net06、KiK-net11、KiK-net18のいずれかである。

SMAC-MDKはK-NET95と同様に24bit分解能を持つ強震計であり、200Hzサンプリング、実効ダイナミックレンジ114dB、最大計測レンジ2,000galで、６成分（地表３成分、地中３成分）の計測を行っていた。SMAC-MDKは85MBのフラッシュメモリを持ち、これは6.5時間分の６成分強震記録の記録容量に相当する。強震記録の収録はK-NET95と同様トリガ方式であり、データ回収はセンターからのダイアルアップ方式によっていた。

KiK-net06はK-NET02Aをもとに開発された強震計である。地表加速度計としてはK-NET02Aと同じものが採用されており、計測性能もK-NET02Aと同等の実効ダイナミックレンジ132dB、最大計測レンジ4,000gal、刻時精度0.1msとなっている。OS（Linux）を搭載し各種の演算が可能であることも共通である。

KiK-net11は構成部品、ソフトウエア等のほとんどをK-NET11と共通化することにより、導入およびメンテナンスコストの低減を図るために開発された。KiK-net11ではK-NET11と同様に最大計測レンジは8,000galに引き上げられ、停電後７日間のトリガ強震記録の送信が可能である。KiK-net18はK-NET18とほぼ同じ性能をもつ後継機種である。KiK-net06、KiK-net11、KiK-net18は、リアルタイム震度、長周期地震動指標、最大加速度等の各種強震指標演算や、気象庁の定めるアルゴリズムによる地震諸元推定等の高度な機能を持つ。これらの機能はOS上で稼働するプログラムにより実現されK-NET強震計でも共通に使用可能である。

SMAC-MDKの強震記録収集は、K-NET95と同様に防災科研本所にあるセンターからダイアルアップで行っていた。KiK-netでは、K-NETの２倍の成分数であることもあり、通信の輻輳時には全データ回収までに多くの時間を要することが問題となっていた。このため、KiK-net06の導入時からは、K-NETと同様に強震計から自動的に送信される強震記録をセンターで一括受信するデータ収集システムが運用されている。

収集された強震記録は、運用者による品質チェックを受けた後、K-NETの強震記録と合わせて、WEBサイト（https://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin）から公開されている。

KiK-netでは運用開始から2025年９月末までに、47万波形以上の強震記録を蓄積している。この中には、３成分合成最大加速度が1,000galを超える25記録、震度７相当となる４記録、震度６強相当となる19記録が含まれている。なかでも、KiK-net記録中で最大の加速度となる2008年岩手・宮城内陸地震時に記録された、一関西（IWTH25）観測点の強震記録は観測史上最大の加速度（地表３成分合成で4,022gal）を示すものである（図－４）。地表と地中に加速度計を配した鉛直アレーでの大規模な強震観測は世界的にも類例がなく、KiK-netの強震記録は海外の研究者による利用も多い。特に1,000ｍを超える設置深度での強震記録については、他では代え難いものとなっている。

４．おわりに

日本の強震観測は、関東大震災、福井地震、阪神・淡路大震災、東日本大震災等の大規模な被害地震を契機に都度整備が加速されるなど、地震被害軽減の後手にまわってきたことは否めない。しかし、近年は、緊急地震速報に代表される地震早期警報の技術が発展するなど、より直接的に強震観測が地震被害軽減に役立つ環境が整ってきた。強震観測により得られる知見は地震被害軽減の基礎である。確実な観測体制を敷くことは昔も今も変わらず重要である。

【参考文献】

1）功刀卓・青井真・藤原広行,2009,強震観測－歴史と展望－,地震2,61,S19-S34.
2）日本地震学会強震動委員会,2020,新・強震観測の最新情報
https://www.zisin.jp/kyosindo/shin_kansoku/shin_kansoku.html