

温故知新

1923年関東地震の地震動再現シミュレーションの研究を振り返りながら

株式会社 大崎総合研究所 代表取締役社長・所長 佐藤 俊明

1. はじめに

1923年9月1日11時58分頃、我が国を揺るがす未曾有の震災が首都圏で発生した。この関東大震災を引き起こした1923年関東地震(M7.9)の発生から来年で100年の時を迎える。100周年という節目の年が近づき、今年から来年にかけて学界では同地震を対象とした論文の特集号の発行や記念シンポジウム等の催しが多数企画されている。このような動きを契機として、この数年、研究対象として同地震が再びクローズアップされ、これまでに蓄積された知見を振り返りながら、未解明な課題・社会の変化に応じて新たに顕在化した課題に対して、様々な視点から研究活動が精力的に行われている。そして、地震発生から100年経とうという今でも過去のデータと進歩した科学技術とを組み合わせながら新たな知見が生み出され続けている。

この事実に鑑み、我が国の震災復興対策や建物耐震化の一大契機となった重要な地震であるにもかかわらず、学術的に謎や未解明なことが多かった同地震の重要性・特異性を改めて認識することとなった。同時に、100年、1000年オーダーで発生する被害地震に対する知的財産・学術的知見を世代を超えて伝承していく意義、過去のデータ・知見をその時々最新の科学技術と結びつけて新たな知見を積み上げていく研究の意義、また研究成果から先の時代を見据えた教訓を得ていく重要性も再認識することとなった。そして併せて、これらの活動を繰り返して継続して行っていく契機としての周年行事の意義も感じずにはいられない。

私も、清水建設大崎研究室・和泉研究室に在籍していた1990年代の7~8年間、同地震の過去のデータ・知見と当時の最新の科学技術とを結びつけて、同地震の地震動の謎を解き明かすための推理小説的な研究に、プロデューサー、ディレクター、プレイヤーとして挑戦したことがある。当時の最先端の科学技術を駆使して可能な限りのリアリティを追求したいとの思いを実現するために、米国の第一線で活躍する研究者とのコラボレーションを行い、その研究成果は何本かの論文となっている。今となってはそれらの研究成果の内容自体は陳腐化している部分も多い。ただ、研究動機、個々の論文では書き切れなかった一連の論文を通して大切に思っていた思いや考え方、同地震の特異性・重要性と今後の課題などは、これから地震動に関わる研究に携わろうとする人々や研究成果を活用しようとする人々にとって多少は参考となる部分があるかもしれない。そのような思いを抱きつつ、私が関係した一連の論文の論理構成・ストーリー展開の解説を含めて、以下に寄稿する次第である。

なお、関東地震という呼称は、1923年関東地震に対して使用する場合と、同地震を含めた相模トラフ沿いで発生するM8クラスの巨大地震の一般的総称として使用する場合があります。また、1923年関東地震も関東地震という呼称以外に関東大地震、大正関東地震、大正関東大地震などいくつかの呼称がある。以下では、1923年関東地震と関東地震は区別し、後者は相模トラフ沿いで発生するM8クラスの巨大地震の一般的総称として使用するものとする。

2. 私の1990年代の関連研究論文

私が多少なりとも関与した一連の研究の成果は、計5本の英文論文として米国地震学会(Seismological Society of America)の論文集(Bulletin of Seismological Society of America)に掲載されている。

2022年9月20日付けの米国地震学会のニュースレターで、今月振り返る歴史地震として1923年関東地震が取り上げられ、米国地震学会の論文集に過去に掲載された論文の中から同地震を研究する際のキー論文として論文がリストアップされ、9月20日から10月3日までの2週間、これらの論文全文をフリーでダウンロードして読めるという企画があった。結果的に、1923年から2016年までの9本の論文がピックアップされた¹⁾⁹⁾。このような企画は、重要な歴史地震を節目ごとに振り返り、科学技術の進歩とともに新たな知見や教訓を得る動きを促進する契機となり得るものである。

この9本の論文のうち私が関与したのは、Wald and Somerville (1995)⁴⁾、Sato et al. (1998a)⁶⁾、Sato et al.

(1998b)⁷⁾、Sato et al. (1999)⁸⁾の4本の論文である。さらに、上記9本の論文には入っていなかったが、Dan and Sato (1999)¹⁰⁾も1923年関東地震の強震動再現シミュレーションに関する論文である。なお、最初のWald and Somerville (1995)⁴⁾の論文では私は共著者には入っていない。ただし、この論文は、謝辞にあるように、研究の動機、最終目的に照らした研究の狙い・位置づけを共同研究者間で十分に議論した上で研究遂行支援を行った、いわば、プロデューサー的役割を果たした論文である。

これらの論文は一連の研究としての最終目的を有する。そして、一連の研究を貫く基本的な考え方や論理構成・ストーリーがある。これらのことは、個々の論文を単独で読んだだけでは十分に理解できない側面があるのも事実である。この機会にそのようなことを中心に書き残しておきたい。研究対象が日本の重要な地震にもかかわらず、これまで和文ではこれら一連の研究に関する詳しい内容を解説した論説やレポートは書いていなかった。反省点の一つである。上記の論文を読む機会があれば、本寄稿文も合わせて読んで参考にしていただければ幸いである。

なお、一連の研究の結論の概要を和文で記述したものとしては、日本建築学会第26回地盤震動シンポジウム(1998)の「堆積盆地とやや長周期地震動評価：1923年関東地震の首都圏の地震動シミュレーション」¹¹⁾、地震予知総合研究会地震調査研究センター発行の「SEISMO」(1999)のトピックス「関東地震の強震動の再現を目指して—予測手法を駆使するシミュレーションが実用域へ—」¹²⁾や分担執筆した出版物「地震の揺れを科学する みえてきた強震動の姿」(山中浩明編著、武村雅之・岩田知孝・香川敬生・佐藤俊明著、東京大学出版会、2006)の「第5章 強震動を予測する」の一節¹³⁾がある。また、関連研究の成果を発表した論文として、片岡・佐藤(1994)¹⁴⁾、武村ほか(1995)¹⁵⁾、片岡ほか(1995)¹⁶⁾、壇・佐藤(1998)¹⁷⁾、佐藤ほか(1998)¹⁸⁾、壇ほか(2000)¹⁹⁾、早川ほか(2010)²⁰⁾がある。

3. 東京の地震動の不確かさ・謎と研究動機

1923年関東地震の東京での揺れは、震源域である首都圏の地震動の中で必ずしも最大レベルでなかったことは明らかである。それでも東京の地震動に注目が集まる理由は、東京が首都であり国や社会の中核機能が集中していることと並んで、以下に述べるような不明な点が多い地震動レベルにもかかわらず、その後の我が国の耐震設計や地震防災対策の礎となり、日本の基準的性格を有する地震動として、時空を超えて実社会に大きな影響を与えてきたことによる。

当時は地震動の短周期成分の強さを精度よく測れる強震計はまだ存在していなかったため、東京都文京区本郷（以下、略して東京本郷と呼ぶ）で最大加速度300 Gal(cm/s², sは秒)程度という推定値や山の手台地で震度5強、下町で震度6以上などの推定値は、被害状況等を踏まえた間接的な評価結果である。

一方、超高層建物に大きな影響を及ぼす地震動の長周期成分(いわゆる長周期地震動)に着目すると、東京本郷の東京帝国大学地震学教室に設置されていた固有周期の長い5種類の変位型機械式地震計の記録が残されている。揺れが大きかったため、いずれの記録も計測範囲を逸脱して振り切れた不完全なものである。それらの中から不完全ながらも主要動部が記録された二つの記録(図-1)に対して、地震動の復元が試みられている。一つはユーイング円盤記録式強震計の記録から復元された地震動、もう一つは今村式二倍強震計の記録から復元された地震動である。

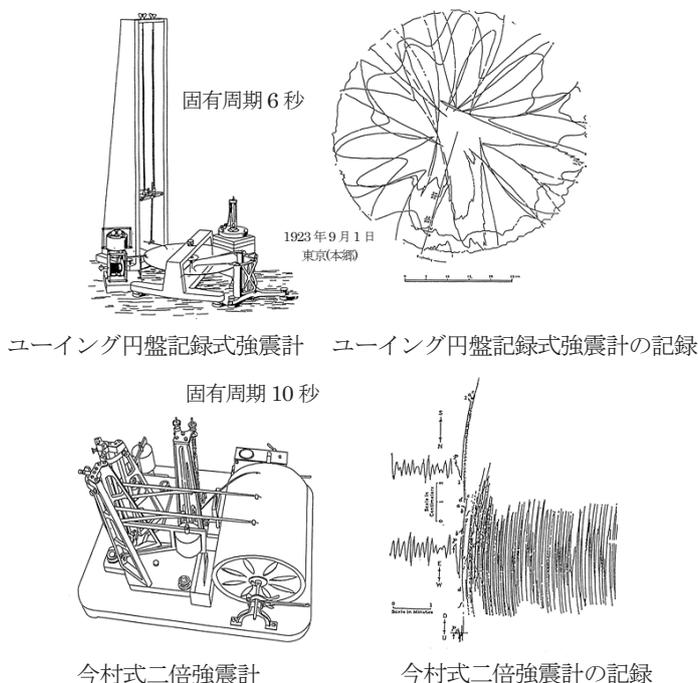


図-1 東京本郷で1923年関東地震を記録した二つの強震計と強震記録(Sato et al., 1999)
上段：ユーイング円盤記録式強震計とその強震記録
下段：今村式二倍強震計とその強震記録

ユーイング円盤記録式強震計記録の修復・復元は、1970年代に早稲田大学的那須・森岡・山田の研究グループが行っている。地震計が保存されていなかったため、地震計の動きを再現できるモデルを制作して記録の数値化と振り切れ部分がある円盤記録の修復・補正を行い、主要動約2分間の揺れが再現されている(Morioka(1980)²¹⁾。

一方、今村式二倍強震計記録の修復・復元は、1980年代に清水建設技術研究所の横田・片岡・田中の研究グループが行っている。国立科学博物館に保管されていた地震計を借り出して地震計の図面を新たに書き起こし²²⁾、振動実験を行って地震計の計器特性や振り切れの復元精度を調べた上で、本震・余震の地震動記録の数値化・修復・補正を行っている。本震の記録に対しては、著しい振り切れによる欠落部分がある主要動部の一部を除いて、約20分間の揺れが再現されている(横田ほか(1989)²³⁾、横田ほか(1990)²⁴⁾。なお、この調査研究の内容は清水建設技術研究所の報告書^{25)・27)}に詳しく記述されている。

この両者の復元地震動を比較すると、ほぼ同じ場所に設置されていたにもかかわらず、波形形状・振幅・周期特性に見逃せない大きな差異がみられた。この差異は、振り切れやその修復・復元の際に用いられた地震計の計器特性に不明な点が多々あるという問題とともに、その後、1923年関東地震による長周期地震動を検討する上で大きな課題となって残ることになった。

この課題・謎に着目した最初の研究がTakeo and Kanamori (1992)²⁸⁾によって行われている。まず、主要動部に著しい振り切れがある今村式二倍強震計記録に比べて振り切れが少ないユーイング円盤記録式強震計の復元地震動の方が真の地震動を反映している可能性が高いと先験的に判断し、地震計の針の固体摩擦の影響を考慮すれば復元波にみられる特異な事象、すなわち地震計の固有周期の6秒の波がみられずに13秒の波が卓越する特異な事象の説明が可能との仮説を提案している。さらに、断層面上の不均質なすべり分布パターンや破壊伝播性状を変えた多数ケースに対する地震動を、堆積層を考慮した水平成層の地下構造を仮定して理論的に計算し、復元地震動の特徴を再現できる最適な断層破壊シナリオを推定している。また、断層破壊シナリオを変えた場合には、東京の長周期地震動のばらつき幅がかなり大きくなることを示し、将来起こる関東地震の断層破壊シナリオが1923年の地震のそれと同様であるとは限らないことに留意しなければならないと指摘している。その後、この論文の内容は、大地震の震源断層の考えられ得る破壊過程シナリオと震源近傍の長周期地震動との関係を定量的に論じたTakeo and Kanamori (1997)²⁹⁾の論文に発展的に展開されている。

しかし、依然として両者の復元地震動の大きな差異に関しては課題・謎として残ったままであった。超高層建物に大きく影響し日本の基準的な長周期地震動としての性格を有する1923年関東地震の東京の長周期地震動の真の姿を別の角度から明らかにする必要性を強く感じたことが、私の大きな研究動機となった。

4. 1923年関東地震の長周期地震動の再現シミュレーション

(1) 研究全体を通して大切にしたこと

私が新たな研究を行うに際し、まず以下のようなことを考えた。不明な点が多い二つの復元地震動に対してどちらが真に近いかを先験的に判断するのは難しい。近年の地震学・地震工学・計算工学の目覚ましい発展、データの蓄積を踏まえれば、1923年関東地震の震源と地下構造のモデルに対して、できる限りの拘束をかけて理論的にリアリティを追求した数値シミュレーションを行い、そのシミュレーション結果と二つの復元地震動を比較した上で、改めて二つの復元地震動を再評価し、東京の長周期地震動の真実に迫ること、さらに東京だけでなく首都圏全域の強震動の真実に迫ることが可能なのではないかと。

周知の通り、地震動は地下の震源(地球内部の断層すべり)から放射された地震波(弾性波であるP波やS波)が地球内部(弾性体)を伝わる間に反射・屈折等を繰り返しながら地面に到達して地面を揺らすことによって生じる。すなわち、震源断層のすべりの動きを入力として地下構造を介して出力されたものが地震動である。通常地震動シミュレーションでは、まず震源断層の場所やすべりの動きのモデル(震源断層モデル)を作成し、それを入力として弾性波動論が表現できる計算手法を用いて、仮定した地下構造モデルの中を伝播する地震波の挙動を計算すれば、出力結果として理論的に地震動(理論地震動)が求まる。これは入力情報を与えて出力結果を求める問題、すなわち順問題である。地震学や地震工学の分野では、これを地震動のフォワードシミュレーション(あるいは単に地震動シミュレーション)という。

さて、ここで地震学の本質的問題、すなわち地下の震源断層の場所やすべりの動きを直接見て確認できない、極浅い部分は別として地下構造も直接見ることができないという問題にどう向き合うかが問われることになる。入力情報となる震源断層の場所やすべりの動きの推定には、出力結果である地震動等の地表の動きを表す各種の記録から地下構造モデルを介して問題を解く、すなわち逆問題を解く必要がある。地震学の分野ではこれを震源インバージョン解析という。この震源断層モデルを推定するための解析手法は1970年代後半以降大いに発展を遂げ、今ではかなり一般的な手法となっている。ただし、結果の精度は用いる記録の質・量ならびに地下構造モデルの信頼性・精度に大きく左右される。この相互依存関係・循環論的關係にある震源・地下構造・地表の記録の関係を研究の最終目的に照らしてどう考えてどう処理するかによって、研究のアプローチが大きく異なることになる。

1995年兵庫県南部地震以降に高精度の地震記録が多数得られるようになった今日では、一般的には、震源インバージョン解析では震源に近い記録を使うほど解像度が上がり、信頼性が高く、高精度な震源断層モデルの推定が可能となる。1923年関東地震の場合には、震源断層に最も近い地震動記録は東京本郷の記録である。研究の最終目的を関東地震の震源断層モデルの推定だけに絞れば、東京本郷の記録も使った震源断層のインバージョン解析を行う研究アプローチもありえる。ただ、この場合は、東京本郷の記録の信頼性・精度の程度が震源断層モデルの推定結果に影響を及ぼすことが考えられる。東京本郷の復元地震動の信頼性・精度が謎のままでは推定断層モデルの評価に課題が残る。一方、研究の最終目的を、東京本郷を含む首都圏各地の地震動の推定に置いた場合には、循環論的關係にある震源・地下構造・記録の関係を考えると、東京本郷の記録を使用できないのは自明である。

このようなことから、これから研究を行う上で、「最終的に順問題として行う地震動シミュレーションの結果の信頼性・精度を高めるには、震源・地下構造・記録の相互依存関係・循環論的關係をどこかで断ち切って、震源断層モデルと地下構造モデルを各々独立に作成してそれらの適用性・妥当性の検証を行うことが極めて重要となる」と考えた。

そして、研究全体を通して以下の基本方針を掲げることとした。

1. 研究の最終目的は、1923年関東地震による東京本郷を含む首都圏各地の周期数秒から十数秒の長周期帯域の理論地震動をできる限りの信頼性と高い精度をもって算定することである。
2. 震源・地下構造・記録の循環論的關係・相互依存関係を断ち切るために、順問題として関東地震の長周期地震動の波形シミュレーションに用いる震源断層モデルと地下構造モデルの作成は各々独立に行う。このため、1923年関東地震の東京本郷の復元地震動の使用・援用は行わない。
3. 対象周期帯域での精度を確保するために、周期が短くなればなるほど細かなスケールの不均質性の考慮が必要なことを踏まえ、震源断層モデルと地下構造モデルの作成に際しては、適切なスケールの不均質性を導入する。
4. 作成された震源断層モデル・地下構造モデルの適用性(周期範囲と精度)の検証は、各々独立に行う。
5. 特に、長周期地震動の波形シミュレーションに耐える地下構造モデルの作成・較正・補正・適用性の検証には、1923年関東地震の震源域で起こった点震源仮定が成り立つ単純な中小地震(Path Calibration Event)⁶⁾の理論波形と観測波形との比較を介した波形モデリング(Waveform Modeling)を行う。
6. 対象周期帯域・震源距離・地下構造の複雑さに応じて、各種の理論的な地震動シミュレーション手法の中から最適な方法を使い分ける。具体的には、水平成層の地下構造モデルに対しては波数積分法や波線理論などの解析的方法、複雑な地下構造モデルに対しては有限差分法などの数値的方法を用いる。

これらの基本方針から導き出される研究の論理構成・ストーリーは、「上記1～6の基本方針にしたがって、各々独立に作成して適用性・解析精度を検証・確認した震源断層モデルと地下構造モデルとを組み合わせる適切な計算手法で計算された地震動のシミュレーション結果は、信頼性・精度が担保されるのが自明である」ということである。

以下、上記の基本方針に絡む特徴的な二つのポイントについて補足説明を行う。

一つ目のポイントは上記3の不均質性の導入である。対象周期が短くなればなるほど、細かなスケールの不均質性の考慮が必要なことは前述したとおりである。例えば、周期十数秒の波長の長い波では無視できる数kmのサイズの不均質性も周期数秒のより短い波長の波では無視できない。そこで、震源断層モデルでは断層面上のすべりの時空間変化を、地下構造モデルではS波速度やP波速度などの物性値の空間不均質性を、バランスよく導入する必

要性を感じていた。特に首都圏の地下構造のモデル化に際しては、周期数秒以上の長周期地震動に大きく影響する厚い堆積層(厚さ2~3km)が丹沢山地、秩父山地、足尾山地、筑波山などの岩盤に取り囲まれる形で存在する百数十km四方の三次元堆積盆地構造を適切にモデル化する必要性を強く感じていた。

なお、このようなことを考えた背景には以下のような当時の研究レベルもあった。地震学の方野で逆問題を解いて得られる断層の不均質な破壊過程の研究では結果として得られる震源断層の不均質破壊の大局的な物理的解釈の方に注目が集まっていたが、地下構造モデルの不均質性への配慮不足・精度不足が断層破壊過程の見掛けの複雑さに転換される影響はほとんど検討されていなかった。また、順問題として行われていた地震動シミュレーションでは、断層面上の不均質破壊を考慮して長周期地震動シミュレーションを試みたのは Takeo and Kanamori (1992)²⁸⁾ が初めてであり、それまでは単純な一様均質の断層モデルを用いたものがほとんどであった。このような状況の中、コンピュータ能力と数値計算技術の目覚ましい進歩が震源断層や地下構造の細かな不均質性のモデル化の可能性を高めていたことは明らかな材料だった。

二つ目のポイントは上記4の波形モデリング(Waveform Modeling)と Path Calibration Event[®]である。波形モデリングとは、仮定した地下構造モデルに対して計算された理論波形と観測波形とを比較考察しながら、観測波形にみられる主要な各種の波の異なる伝播経路を理論(波線理論、弾性波動論、数値シミュレーション)や様々な波の分析手法を活用して物理的に解釈・推定の上、地下構造の地層境界や地層の物性値(P波速度やS波速度等)を理論波形と観測波形が合うように補正する方法をいう。

そして、大地震の地震動シミュレーションに用いる震源と計算地点間の地下構造モデルの較正・補正・適用性の検証を、大地震と同じ震源付近で発生した点震源と近似できる中小地震によって観測された、対象周期帯域と同じ帯域の地震波形の波形モデリングで行う方法論を提案した。そのような役割を担う中小地震を Path Calibration Event[®]と位置づけ、その考え方や条件を整理した(図-2)。ここで Path は地震波の伝播経路(となる地下構造)、Calibration は較正・調整、Event とは地震(Earthquake)という意味である。地下構造の初期モデルは、地質データや各種の物理探査(屈折法・反射法・重力探査・微動探査など)データ等をコンパイルして作成されるのが一般的であるが、これらのデータは一長一短があり、対象問題に対する地下構造のモデル化の精度が担保されている保証はない。そこで、対象とする大地震の震源から放射された地震波経路と同じ経路を辿る地震波を精度良く再現するためにこのような考え方が有効であると考えた。

その後、この Path Calibration Event[®]の考え方は地下構造モデルの適用性の検証などに広く使われるようになった(例えば Asano and Iwata (2009)²⁹⁾)。ただし、観測波形と理論波形がただ合えばよいというだけでなく、その背後にある波形モデリングのベースとなる波の物理的解釈を含めた基本的考え方が重要なことをここで改めて強調しておきたい。

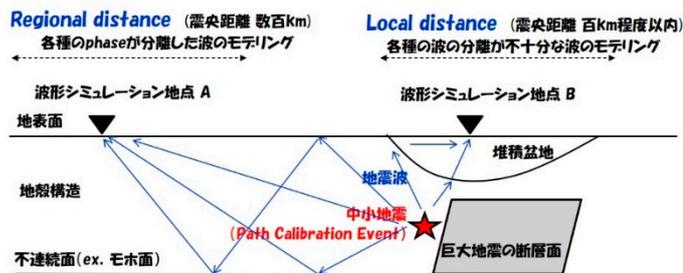


図-2 Path Calibration Event[®]の概念と模式図

(2)研究の論理構成・ストーリー

上記の基本方針のもと、1年以上の準備期間を経て1993年関東地震の長周期地震動再現の研究プロジェクトを本格的に開始したのが1993年頃のことである。当初考えていた研究プロジェクトの論理構成・ストーリーを以下に示す。

「ステップ1」

逆問題として、1993年関東地震の断層モデルの推定を行う。具体的には、関東地方の地殻変動データと海外の遠地実体波データを用いた震源インバージョン解析によって、数秒から十数秒の対象周期帯域の解像度・分解能を有する断層すべりの時空間変化を推定する。

「ステップ2」

順問題として、ステップ1で求めた1923年関東地震の断層モデルの適用性(適用周期範囲と精度)の検証を行う。具体的には、国内の岐阜・仙台の振り切れていない同地震の強震記録の地震波シミュレーションによって、ステップ1で求めた断層モデルの適用性(適用周期範囲と精度)の検証を行う。その際に用いる同地震の震源域と岐阜・仙台間の水平成層の地下構造モデルの作成・較正・補正・適用性の検証を、同地震の破壊開始点付近で起こったM5.1の1990年神奈川県西部地震(以下、小田原地震)をPath Calibration Event[®]とした波形モデリングにより実施する。

「ステップ3」

次のステップ4の準備として、1923年関東地震の震源域全体(東西170km、南北210km、深さ44km)を対象とした首都圏の厚い堆積盆地を含む三次元地下構造モデルの作成・較正・補正・適用性(周期範囲と精度)の検証を、小田原地震をPath Calibration Event[®]として三次元有限差分法を用いた波形モデリングにより実施する。

「ステップ4」

順問題として、ステップ1で作成しステップ2で適用性(周期範囲と精度)を検証した1923年関東地震の断層モデルと、ステップ3で作成し適用性(周期範囲と精度)を検証した首都圏の三次元地下構造モデルを用いて同地震の東京を含む各地の長周期地震動シミュレーションを行う。東京のシミュレーション結果と二つの復元地震動との比較を行い、二つの復元地震動の差異について考察する。さらに、東京と東京以外の首都圏各地の長周期地震動を比較し、基準地震動的な東京の長周期地震動の位置づけを定量的に明らかにする。

ところが、初期段階で早くも当初のストーリーの変更を余儀なくされた。Path Calibration Event[®]として用いようとした小田原地震の震源解(震源位置や震源メカニズム)に関する既往の知見を用いると、どう頑張っても首都圏のいくつかの地点の波形の再現が上手くいかない問題に直面した。既往の震源解は少数の観測点のデータと整合するように推定されたものであった。

そこで、急遽、「ステップ2」に以下のステップを追加することにした。

「追加ステップA」 逆問題として、Path Calibration Event[®]として用いる中小地震の震源インバージョン解析を行い、既往の震源解の見直しを行う。

震源インバージョン解析を行うには、最初に地下構造モデルを用意する必要がある。そこで、まず、1990年代当時利用可能だった首都圏のあらゆる地下構造探査(屈折法探査、反射法探査、深井戸のボーリング調査、微動探査、重力探査)の結果と地質モデルをコンパイルして作成した首都圏の三次元地下構造の初期モデルから、小田原地震の震源と首都圏の各観測点とを結ぶ二次元断面を切り出し、観測点毎の水平成層構造モデルを作成した。この水平成層構造モデルと小田原地震の震源解が変化することによる波形への影響を順問題として感度解析し、水平成層構造モデルでも波形の再現性がよい岩盤上の観測点と一部堆積平野上の観測点を選択して、観測点毎に異なる水平成層の地下構造モデルを作成し、試行錯誤的に較正・補正・適用性の検証を行った。そして、この水平成層の地下構造モデルと1990年小田原地震(M5.1)の強震記録の波形を用いて、逆問題を解く、すなわち同地震の震源インバージョン解析を行い、最適な震源解(震源位置、震源メカニズム、震源時間関数)を最終決定した。これが追加されたステップの作業手順である。

この廻り道が当初の研究ストーリーに付け加わることとなり、改めて、地震学の抱える本質的な問題、すなわち、地下の震源は地下構造を介して間接的にしかみることができない、震源と用いる地下構造モデルの相互依存関係・循環論的關係の問題からは逃れられないことを強く再認識することとなった。また、この過程を通じて、地下構造モデルの精度の重要性や逆問題を解く前に順問題で主要パラメータの感度解析を行っておく重要性も実感することとなり、既往の知見に対する見る目も大分異なるものとなった。そして、この実感と経験がその後の「ステップ3」の研究に大きく影響することとなった。

(3)一連の4本の論文とそのポイント

1 本目の論文である Wald and Somerville (1995)⁴⁾は「ステップ1」に対応する。これは1923年関東地震の断層面上のすべりの時空間変化を推定した最初の論文である(図-3)。相模トラフから関東平野直下に沈み込むフィリピン海プレートに沿って長さ130km、幅70km四方に広がる断層面(Kanamori (1971)³⁰⁾、Matsu'ura et al. (1980)³¹⁾上で、破壊開始点(震源)付近の小田原直下と三浦半島直下にそれぞれ数mから10m程度の大きなすべり(アスペリティ)の存在が推定された。最終モデルは遠地実体波と地殻変動データの同時インバージョン解析の結果であるが、すべりの空間分布の不均質性は主に同地震の前後数十年の間に行った関東平野の地殻変動データで拘束がかけられており、すべりの時空間進展は海外の周期数秒以上の遠地実体波の記録で拘束がかけられている。このうち、すべりの空間分布の方に注目が集まる傾向があるが、ここでは断層面上の各点がすべり始める時刻や数秒かけて最終すべり量に達するまでのすべりの時間進展の具合が断層面上の各点で異なるという結果(例えば、破壊開始点付近の小田原直下の深いアスペリティと比べて三浦半島直下の浅いアスペリティではゆっくりすべり始めるという結果)も重要な情報であることを強調しておきたい。なぜならば、一連の研究の最終目的に照らしてこの震源断層モデルが使用可能なこと、すなわち、同地震の東京本郷の長周期地震動シミュレーションにとって重要な周期数秒から十数秒の解像度・分解能を有することが研究の狙いの1つだったからである。

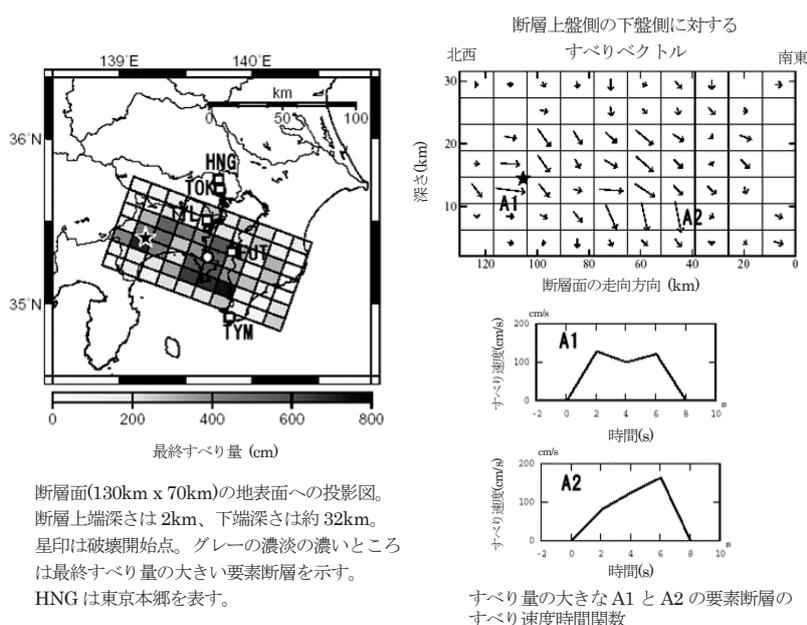


図-3 1923年関東地震の震源断層モデル(Wald and Somerville (1995))

2 本目の論文である Sato et al. (1998a)⁶⁾は「追加ステップA」と「ステップ2、3」の一部の内容を併せたものである。この論文のポイントは、まず震源インバージョン解析によって Path Calibration Event⁶⁾となる1990年小田原地震(M5.1)の最適な震源解(震源メカニズムと震源時間関数)を求め直したことにある。そして、その震源解を用いて地殻内を反射屈折する各種の波を同定しながら波形モデリングで作成した1923年関東地震の震源域から岐阜・仙台との間の水平成層構造モデルを用いれば、震源から200~300kmとかなり離れた地点(岐阜、仙台)であっても、周期3秒以上の強震観測波形をかなり細かな特徴まで理論的に適切に再現可能なことを示したことである。日本列島の成り立ちを考えれば、島弧に平行する地下構造をモデル化する上で水平成層構造モデルが条件さえ整えば使用可能であるという結果は納得がいくものであった。

3 本目の論文である Sato et al. (1998b)⁷⁾は「ステップ2」の結果をまとめたものである。この論文の一つ目のポイントは、Wald and Somerville (1995)⁴⁾の震源断層モデルが周期4~5秒以上の長周期帯域で関東地震の国内の岐阜・仙台の記録波形の特徴を再現できること、岐阜・仙台のような震源域から離れたところでも、断層面上の破壊開始点とアスペリティとの位置関係で決まる破壊伝播効果が地震動に及ぼす影響が大きいことを示したことである。また、二つ目のポイントは、首都圏の地震動評価において、東京本郷では堆積盆地の三次元構造を考慮しない水平成層構造モデルでは破壊伝播効果により増幅された周期8~10秒程度の長周期パルスの出現は再現可能であるが後続動の複雑な波形までは再現できないこと、さらに長周期パルスの卓越場所は断層面上の破壊開始点とアスペリティとの位置関係によって大きく影響を受け、千葉県房総半島南部では東京本郷より数倍以上大きい長周期パルスがみられることを示したことにある。

4本目の論文である Sato et al. (1999)⁸⁾は、「ステップ3」と「ステップ4」を併せたものであり、一連の研究の特徴的ポイントと結論的な内容を含むものである。この論文のポイントは二つある。一つ目のポイントは、「ステップ3」で構築した首都圏の広大な堆積盆地を含む 200km 四方の三次元地下構造モデル(図-4)が、小田原地震の首都圏各地で実際に観測された周期約3秒以上の長周期地震動の主要動から後続動に至る複雑な波形形状を定量的に精度よく再現できることを示した点にある(図-5)。これは、このような理論的な方法による長周期地震動シミュレーションが、それまで実現象の定性的あるいは部分的説明に留まっていたレベルから実用域の精度を有するレベルまでに高度化できることを示した最初の事例となった。この結果は、2003年に Academic Press から出版された「International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology」でも三次元堆積盆地の複雑な観測波形のシミュレーション事例として紹介されている³⁰⁾。また、盆地生成表面波などが卓越する複雑な波形の波形モデリングにおいて、地震計アレー観測等の観測波の分析技術の理論波形への適用や波動場の可視化の有効性を示すことにより、波線理論などの適用性が難しい波の分離が十分でない複雑な波動場の波形モデリングの可能性も明らかにすることができた。

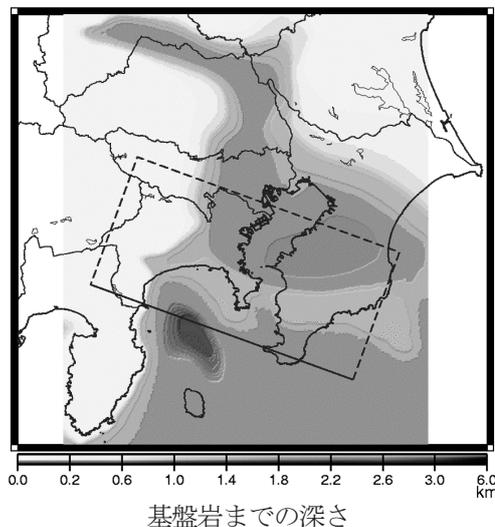
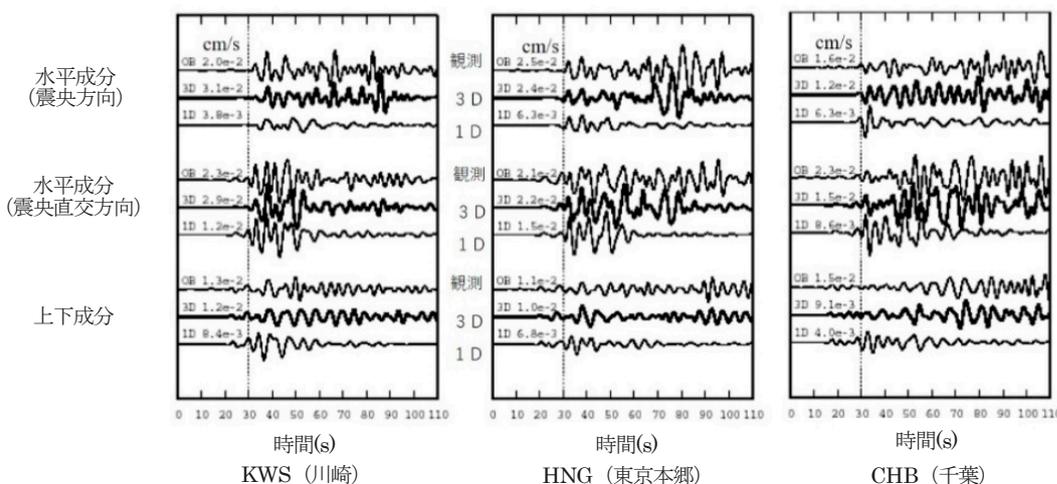


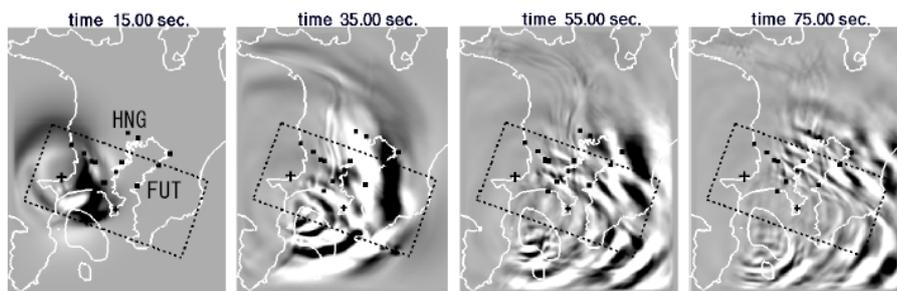
図-4 首都圏の3次元堆積盆地構造モデルの基盤岩までの深さ分布 (Sato et al. (1999))



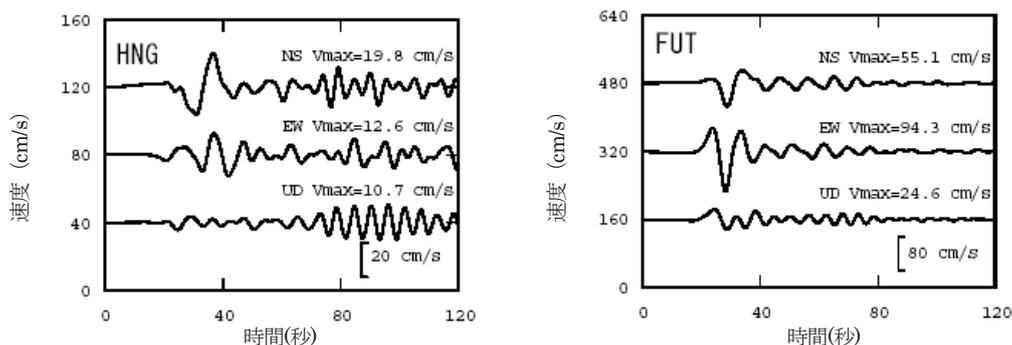
上段3波：震央方向の水平成分、中段3波：震央直交方向の水平成分、下段3波：上下成分の速度波形を表す。それぞれの3波は、上が観測、中が三次元堆積盆地構造モデルによるシミュレーション結果、下が水平成層構造モデルによるシミュレーション結果(周期帯域3.3~10秒)。

図-5 Path Calibration Event⁹⁾(1990年小田原地震、M5.1)と首都圏の地下構造モデルを用いた波形モデリング (Sato et al. (1999))

二つ目のポイントは、Wald and Somerville (1995)⁴⁾のすべりの時空間変化を考慮した震源断層モデルと上記の首都圏の三次元地下構造モデルを組み合わせることで有限差分法で計算することにより、1923年関東地震の東京を含む首都圏各地の周期約4秒以上のリアリスティックな180秒間の理論地震動の全体像を初めて示したことである(図-6)。計算された東京本郷の長周期地震動は三次元堆積盆地の影響を強く受け、その複雑な波(位相)の特徴は全体的には今村式二倍強震計の復元地震動に近い傾向となっている(図-7)。ただし、理論地震動の主要動の最初の部分は、振り切れが激しく欠落部分もある今村式二倍強震計の復元地震動よりも大きくなっている。一方、ユーイング円盤記録式地震計記録の復元地震動にみられる周期13秒の波の繰返しはみられない。また、首都圏各地の地震動を比較すると、横浜では東京よりも2~3倍程度大きな地震動となっている。さらに、断層破壊の進

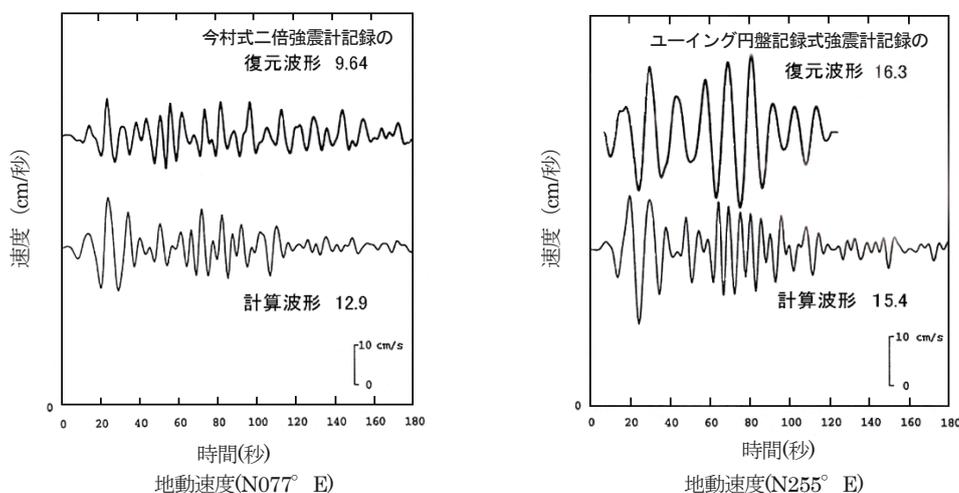


Wald and Somerville (1995)の震源断層モデルと Sato et al. (1999)の首都圏の三次元堆積盆地構造モデルを用いて有限差分法で計算した1923年関東地震の速度波(南北成分)の伝播のスナップショット。左の図から順に、破壊開始時刻から15、35、55、75秒後の様子。破線で示された矩形は断層面の地表への投影面、 \times は破壊開始点、HNGは東京本郷、FUTは千葉県富津を表す。



Wald and Somerville (1995)の震源断層モデルと Sato et al. (1999)の首都圏の三次元堆積盆地構造モデルを用いて有限差分法で計算した1923年関東地震の東京本郷(左)および千葉県富津(右)における速度波形(周期4~50秒の帯域波)。NS、EW、UDは、それぞれ南北、東西、上下成分を表す。

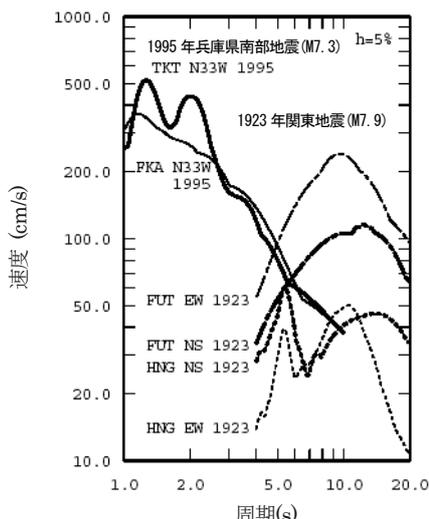
図-6 首都圏における1923年関東地震の長周期地震動シミュレーション (Sato et al.(1999))



Wald and Somerville (1995)の震源断層モデルと Sato et al. (1999)の首都圏の三次元堆積盆地構造モデルを用いて有限差分法で計算した1923年関東地震の速度波形と復元速度波形との比較(周期4~15秒)。左が今村式二倍強震計の記録の復元波との比較、右がユーイング円盤記録式強震計の復元波との比較の結果。

図-7 東京本郷における1923年関東地震の長周期地震動のシミュレーション (Sato et al.(1999))

行方向に位置する千葉県の房総半島中央部から南端部にかけては、堆積盆地の影響に比べて破壊伝播効果の影響が大きく上回り、周期約10秒の大振幅の長周期パルスが生じる結果となっている。このような長周期パルスが卓越する千葉県富津(図-6)では、周期5~十数秒の速度応答スペクトルの値が100~200 cm/sとなり、30~50 cm/s程度の東京本郷の2~4倍の大きさとなっている(図-8)ことに留意する必要がある(佐藤,1998)¹¹⁾。これは、場所によっては東京の長周期地震動を基準地震動的に用いるだけでは不十分であり、Takeo and Kanamori (1992)²⁸⁾、Takeo and Kanamori (1997)⁵⁾が指摘したように、断層破壊過程のシナリオが変わったときの地震動の変動幅を考慮する必要性を強く示唆するものである。



Wald and Somerville (1995)の震源断層モデルと Sato et al. (1999)の首都圏の三次元堆積盆地構造モデルを用いて有限差分法で計算した M8 クラスの 1923 年関東地震の東京本郷(HNG)および千葉県富津(FUT)での速度波形の減衰定数 5%の擬似速度応答スペクトルと、同地震より M が約 1 小さい M7 クラスの 1995 年兵庫県南部地震の震源域の JR 鷹取駅(TKT)と大阪ガス管合(FKA)で得られた強震記録の擬似速度応答スペクトルの比較。
 図中、NS、EW は、それぞれ、水平動の南北成分、東西成分、N33W は、北から西へ 33 度回転した成分(兵庫県南部地震の断層に直交する成分)を表す。

図-8 M8 クラスの 1923 年関東地震の首都圏の長周期地震動のスペクトル特性と
 M7 クラスの 1995 年兵庫県南部地震の震源域の地震動のスペクトル特性との比較(佐藤 (1998))

5. 短周期帯域を含む広帯域地震動の再現シミュレーションへの拡張

(1)短周期地震動シミュレーション

前述した長周期地震動シミュレーションに用いた震源断層モデルの短周期側の適用限界は 4 秒程度、首都圏の地下構造モデルのそれは 3 秒程度である。それよりも短周期帯域のシミュレーションを理論的に行おうとすると、断層震源モデル、地下構造モデルともに、より小さなスケールの不均質性を考慮する必要があるが、これは現実的ではない。

そこで、壇・佐藤(1998)¹⁷⁾、Dan and Sato (1999)¹⁰⁾は、理論的な方法に経験的な方法を組み合わせて、東京を含む首都圏の各地の短周期地震動シミュレーションを行っている。まず、震源断層モデルに関しては、断層破壊の不均質性の影響が反映された一般的な経験則、すなわち、震源から放射される地震波のスペクトルが高周波数側(短周期側)で周波数 ω^2 乗に比例して減衰するという経験則を、短周期側の適用限界周期 4 秒である Wald and Somerville (1995)⁴⁾の断層面上各点のすべり時間関数に援用して評価している。また、複雑な地下構造が短周期地震波に及ぼす影響は、そのような影響が含まれている中小地震の地震観測記録を要素地震記録として直接利用することにより評価している。このように震源と地下構造の影響を中小地震の観測記録によって補う半経験的な方法を経験的グリーン関数法(Irikura (1986)³³⁾)と呼ぶ。具体的には、この中小地震の地震観測記録として、前述した長周期地震動シミュレーションで Path Calibration Event[®]として用いた小田原地震(M=5.1)の観測記録を用い、記録が得られている東京、横浜、館山、小田原、網代の短周期地震動のシミュレーションを行っている。計算された東京の短周期地震動の最大加速度 300 Gal 前後であり、当時、物体の転倒や建物の倒壊率等から間接的に推定された値とよく整合している。また、計測震度も、東京、横浜、網代で震度 5 強から 6 弱、館山、小田原の沖積地盤上の地点では震度 7、小田原の山地部の岩盤上の地点では震度 6 弱となり、これらの値も被害から推定された震度とほぼ対応する結果となっている。

上記の経験的グリーン関数法は要素地震記録として用いる適切な小地震記録が得られていない地点では適用できない。そこで、壇ほか(2000)¹⁹⁾は、記録がない地点の地震動を評価するために、実際に観測された小地震記録の代わりに多数の強震記録を統計処理して作成した小地震の模擬地震波を用いる統計的グリーン関数法と呼ばれる手法(釜江ほか(1991)³⁴⁾)を用いて、周期 4 秒以下の短周期地震動シミュレーションを行い、首都圏全域の広域強震動評価を行っている。計算された地震動を計測震度に換算した結果は、木造住家の全壊率分布とよい対応を示している。

(2)広帯域地震動シミュレーション

さらに、佐藤ほか(1999)¹⁸⁾は、Wald and Somerville (1995)⁴⁾の震源断層モデルを用いて計算した Sato et al. (1999)⁸⁾の長周期地震動と壇・佐藤(1998)¹⁷⁾の短周期地震動を、周期 5 秒を境にして交差するローパスフィルターとハイパスフィルターを用いて重ね合わせて、1923 年関東地震の東京本郷における広帯域強震動を評価している。得られた合成地震動の最大加速度は NS、EW 成分で各々 244 Gal、332 Gal、最大速度は NS、EW 成分でともに 34 cm/s の値である。また、その減衰定数 5% の擬似速度応答スペクトルは大局的には周期約 0.2 秒から十数秒の広い範囲で速度一定の傾向を示し、その平均値は約 50 cm/s となっている。

6. 関東地震の特異性と今後の課題

1923 年関東地震をはじめとする相模トラフ沿いで発生する巨大地震（通称、関東地震）は日本周辺で発生する他の海溝型巨大地震と比べて多くの特異性を有している。以下では、関東地震の概要をその特異性と合わせて振り返りながら、今後の課題についても述べてみたい。

(1)断層面

関東地震は、フィリピン海プレートの上面に沿って繰り返し起こる M8 クラスの海溝型巨大地震といわれている³⁵⁾。関東地方では、フィリピン海プレートが相模湾を横切る相模トラフから北西方向に年間約 3 cm の速度で関東平野がのる北米プレートの下に向かって沈み、その下を太平洋プレートが日本海溝・伊豆小笠原海溝から西北西方向に年間約 8 cm の速度で沈みこんでいる。関東地方はこのような 3 枚のプレートがせめぎ合っている世界唯一の特異なプレートテクトニクスのある場にある³⁶⁾。また、フィリピン海プレートの沈み込み自体も単純ではない。神奈川県西部から山梨県東部ではフィリピン海プレートにのった伊豆半島が軽いために北米プレートの下になかなか沈み込めない状況で、この地域に衝突帯を形成するとともにプレートにゆがみを生じさせている。1923 年関東地震の破壊断層面がフィリピン海プレートのスラブ形状や相模トラフ周辺の海底地形と必ずしも整合的でないという議論もあるのも³⁷⁾、このようなプレートの沈み込みに伴う地下構造や地下の力学性状の複雑性・特異性と関係していると考えられる。

1923 年関東地震の断層面は、相模湾から神奈川県、千葉県、東京都の下まで、長さ 130 km、幅 70 km の領域に広がっている^{30), 31), 35)}。陸域での断層面までの深さは数 km から 30 km 程度である^{30), 31), 35)}。この海域から陸域にまたがる断層面は、被害の様相が海溝型プレート境界巨大地震と内陸直下地震の両者の特徴を合わせ持つことを意味する。このような特徴を有する海溝型プレート境界巨大地震は日本では関東地震と東海地震のみである。首都圏では東京の揺れが目撃されがちであるが、当然のことながら内陸部では地面の揺れが、沿岸域では非常に大きな揺れとともに津波も重要となる。1923 年関東地震では、特に沿岸域の強い揺れや津波の励起に大きく影響する浅い部分の断層面やその断層破壊過程に関してまだ不明な点が多いことも指摘しておきたい。

1703 年元禄関東地震と 1923 年関東地震（1923 年大正関東地震）の地殻変動や津波被害の様相が異なっていることから、フィリピン海プレートの同じ場所が毎回同じようにすべる固有地震的な破壊よりはプレートの固着状況や地下の応力場の変化に応じて不規則な破壊が起こる可能性が指摘されている^{例えば 37)}。また、関東地震の何回かに一回は、神奈川県西部の足柄平野と大磯丘陵との地形境界に位置する活断層(国府津-松田断層、平均活動間隔 800~1,300 年)が同時にすべった可能性も指摘されている³⁵⁾。このような起こる地震の多様性の問題にも留意する必要がある。

(2)余震

地震活動として触れなければならない特異性の一つが、被害をもたらす大きな規模の余震活動の異常な活発さである³⁷⁾⁻⁴⁰⁾。1923 年関東地震の本震発生後 1 年以内に M6 以上の余震が 31 回発生している³⁷⁾。この数は日本周辺で起こった M8 クラスの他の巨大地震のそれと比べて 2 倍以上の多さである。ちなみに、同じフィリピン海プレートの沈み込みに伴って発生した 1944 年東南海地震や 1946 年南海地震はそれぞれ 5 個であり、この点でも 1923 年関東地震の特異性が際立つ³⁷⁾。この要因も関東地方におけるプレートテクトニクス環境の特異性・複雑性が大きく関係していると考えられる。

余震活動は本震直後が最も活発である^{38) 40)}。1923年関東地震では、本震直後2日間でM6以上の余震が16回、M7以上の余震が5回発生している³⁹⁾。本震直後の数分間では、本震の3分後にM7.2、4.5分後にM7.3の大きな余震の発生が岐阜の今村式二倍強震計の記録から確認され³⁹⁾、東京ではそれに対応する揺れの体験談も報告されている⁴⁰⁾。横田ほか(1990)²⁴⁾も東京本郷の今村式二倍強震計記録の10分という長い振り切れ部の中に複数の大きな余震によると思われる揺れの存在を指摘している。

一方、短周期地震動シミュレーション結果(壇・佐藤(1998)¹⁷⁾、Dan and Sato (1999)¹⁰⁾)によれば、本震による東京の強震動の継続時間はたかだか1分程度である。また、長周期地震動シミュレーション結果(Sato et al. (1999)⁸⁾)をみても、東京本郷の長周期地震動の継続時間は3分程度である。これらの地震動シミュレーション結果も、東京本郷の今村式二倍強震計記録の振り切れが10分もの長い時間続いた理由が本震だけでは説明できず余震の存在を示唆するものである。

地震防災上は本震も余震も区別なく一連の大きな揺れがどの程度継続するかが重要である。本震よりも余震による揺れの方が大きかった場所があっても不思議ではない。このような観点から1923年関東地震の東京を含む首都圏各地の地震動の再現シミュレーションを完成させるには、今後、本震直後に立て続けに起こった大きな余震による地震動シミュレーションも必要である。ただ、そのような検討を行う際、余震の震源情報が位置も含めて不明な点や不確実な点が多いことが課題の一つとなっている。

1923年関東地震の最大余震とみなされる丹沢地震(M7.3)が起こったのは、本震発生から4か月後の翌1924年1月14日のことで、山崩れが多数発生したといわれている。この地震の震源や地震動の特性にも不明な点が多かった。そこで、佐藤・片岡(1997)⁴¹⁾は、震源域から離れた岐阜の丹沢地震の今村式二倍強震計記録と同地震の震源周辺で起こった1990年小田原地震(前述したPath Calibration Event⁶⁾)で適用性が検証済の水平成層構造モデル⁸⁾を用いた波形モデリングを行いながら、丹沢地震の震源深さ、地震規模、震源メカニズムを推定している。また、菊地・佐藤(1998)⁴²⁾は遠地実体波による震源の推定を行っている。さらに、早川ほか(2010)⁴³⁾は、佐藤・片岡(1997)⁴¹⁾の震源の推定結果をベースに、東京本郷で観測された、同地震のユーイング円盤記録式強震計記録の復元地震動が再現可能な震源断層モデルを作成した上で、首都圏各地の広帯域地震動の再現シミュレーションを試み、震源直上では本震と同レベルの揺れになった可能性を指摘している。

政府の中央防災会議が被害予想・地震防災対策用に想定している首都直下地震と同じようなM7クラスの地震が1923年関東地震直後に多数発生したという過去の事実は、今後、首都圏の都市機能、企業活動、生活基盤の維持・復旧戦略を検討する上では、単発の地震を考えるだけで不十分なことを示している。

(3)地震の繰り返し発生間隔

相模トラフ沿いで発生したM8クラスの歴史地震として1923年大正関東地震と1703年元禄関東地震(M8.2)が知られている。また、同様な地震であった可能性のある地震として1495年明応鎌倉地震、1293年永仁関東地震がある³⁵⁾。歴史地震よりも以前の情報が得られる地形・地質データや測地測量データも踏まえれば、これまでのM8クラスの巨大地震の繰り返し発生間隔は一定ではなく200~600年程度とかなりばらつきが大きいと考えられている³⁵⁾。また、M8クラスの巨大地震の発生が2回含まれる過去400年の歴史地震の活動履歴から、巨大地震の繰り返し発生間隔の前半は地震活動の静穏期が続き、後半に入ると活動期となりM7クラスの地震の発生が高まるとの考え方が提起されている⁴⁴⁾。この考え方にしたがえば、M8クラスの関東地震の繰り返し発生間隔を200年とした場合、1923年から100年経過した今頃からは地震活動の活発化に留意しておく必要がある。

7. 関東地震の東京本郷の記録の復元に関する新たな最近の研究

1923年関東地震100周年の節目の年が近づく中、当時の記録や復元地震動の再解析、再評価の研究が再び始められている。

ユーイング円盤記録式強震計の記録に関しては、翠川ほか(2021)⁴⁵⁾、翠川ほか(2022)⁴⁶⁾が、Takeo and Kanamori(1992)²⁸⁾が指摘したMorioka(1980)²¹⁾の復元地震動の謎、すなわち地震計の固有周期である6秒の波が見られずに13秒の波の繰り返しがみられた事象に関して、新たな知見を得ている。まず、翠川ほか(2021)⁴⁴⁾では、地震計のメカニズムや当時の稼働状況を調査し、記録の周期特性に大きく影響する地震計の回転速度の不安定

性・不確定性と変動範囲を指摘するとともに、記録の復元を行っている。さらに、翠川ほか(2022)⁴⁶⁾では、同じ地点にあった一倍強震計記録の振り切れていない初動部や今村式二倍強震計の記録との比較から、記録円盤の回転時間が Morioka(1980)²¹⁾の採用した 120 秒ではなくもっと短くなる可能性を指摘し、それに対応する計器特性の補正を行って主要動部 70 秒から 100 秒間の復元地震動の再評価を行っている。回転時間を 70 秒とした場合、周期 2~10 秒での速度応答スペクトルの振幅は南西-北東成分で 30~80cm/s、南東-北西成分で 60~100cm/s となり、Morioka(1980)²¹⁾や横田ほか(1989)²³⁾による復元地震動に比べて全般的に大きくなったと述べている。

一方、今村式二倍強震計の記録に関しては、片岡ほか(2020)⁴⁷⁾が地震計の固有周期の問題を検討し、横田ほか(1989)²³⁾が用いた地震計の固有周期(公称値 10 秒)よりも短い 7~8 秒だった可能性を指摘している。地震計の固有周期の値は、復元地震動を評価する際の計器特性補正だけでなく記録の振り切れ補正に使われており、再評価された固有周期を用いた 20 分間の復元地震動の再評価も今後必要となると考えられる。

今後さらに、関東地震の東京の地震動の全体像に記録から迫っていくためには、ユーイング円盤記録式強震計の記録から再評価される復元地震動と、今村式二倍強震計の記録から再評価される復元地震動とを合わせて、本震による主要動とそれに引き続く直後の余震を含んだ長い後続動から構成される地震動の特徴を評価していく必要があると考えられる。

このような記録の再評価や新たな知見の獲得が可能なのは、原記録や関連情報が残され、伝承されてきたからである。被害地震の繰り返し間隔が 100 年、1000 年オーダーであることを考えると、器械を用いた近代的な地震観測が 1880 年代半ばに開始されて以降現在に至る 100 年あまりの短い期間で得られた記録は大変貴重である。これら原記録や画像データの保存、観測地点や地震計などの関連情報の収集、それらのデータベース化の意義は大きい(Murotani et al. (2020)⁴⁸⁾)。

8. おわりに

ここで述べた話はすべて、1923 年関東地震の際に東京本郷の同じ場所で主要な揺れを捉えた二つの不完全な強震記録から始まった。地震後、これらの記録に関わる研究の潮流が二つ生まれた。一つは不完全な記録の復元に挑戦する研究である。もう一つは物理モデルを介した地震・地震動の現象解明に挑戦する研究である。

前者の研究においては、同地震 50 周年を経た 1970 年代後半から 1980 年代後半にかけて、二つの記録の復元地震動の評価が試みられた。1923 年の地震当時は存在しなかった超高層ビル建設の気運が高まった時代であった。その過程で、二つの復元地震動の間に見過ごせない大きな矛盾がみられるという新たな謎が発生した。さらにそれから 50 年、同地震 100 周年を迎えようとするこの時期に、復元地震動の研究が再び活発化し、謎の解明に向けて今も新たな知見が生み出され続けている。

後者の研究においては、1990 年頃、Takeo and Kanamori (1992)²⁸⁾によってこの謎の一端を解釈する試みが行われた。そして間もなくして、この論文に触発されて私が関与した一連の研究が始まり、1990 年代半ばから後半にかけて Wald and Somerville (1995)⁴⁾、Sato et al. (1998a)⁶⁾、Sato et al. (1998b)⁷⁾、Sato et al. (1999)⁸⁾の論文に繋がった。その成果の一部は、2000 年代に Kobayashi and Koketsu (2005)⁴⁹⁾、2010 年代に Yun et al. (2016)⁹⁾の比較考察の対象となり、新たな知見の積み上げに貢献している。

地震は直接見ることができない、手に取って確認できない、地下構造を介してしか推定できない現象である。それに加えて、被害を引き起こすような地震は稀にしか起こらない。このような地震の真の姿を理解するには、科学技術の進歩や地下構造モデルの精度向上に合わせて、逆問題と順問題を組み合わせながら、歴史地震の貴重な原データからできる限りの知見を繰り返し学び取る以外に道はない。温故知新の繰り返しである。そして、不明な点が多いほど、その繰り返しが必要である。

様々な不明な点や特異性を有する M8 クラスの関東地震の予測には、多くの厄介な問題を伴う。次に同規模の地震が 100 年後に起きるのか 500 年後に起きるのかわからない。また、次に起こる地震の断層破壊過程が 1923 年関東地震と同様なものとなるのか、あるいは同地震の影響を受けて異なったものとなるのかもわからない。さらに、関東地震の前後には、M7 クラスの地震が単独で起きる可能性だけでなく、同規模の余震の続発の可能性もある。

このような状況を考えるならば、まず、相模トラフ沿いの M8 クラスの巨大地震の中で、唯一、近代的な地震

観測データや関連情報が残されている1923年関東地震の本震と余震の現象の理解をできる限り深めておくことは、将来への備えの第一歩である。その上で関東地震の特異性や社会的変化に関わる本質的な問題を見失うことなく、得られた知見・教訓を変換・翻訳して100年先を見据えた地震防災減災対策に役立てる知恵と工夫が肝要である。

1923年関東地震の本震・余震の謎解きは道半ばである。これからも学ばなければならないことは沢山ある。本寄稿が学術的知見の伝承と新たな研究の活性化に少しでも貢献できるならば望外の喜びである。

謝辞

私が関与した1923年関東地震に関する1990年代の一連の研究は、多くの卓越した研究者や支援者との出会いがなければ実施できなかった。特に、当時、米国の建設エンジニアリング会社であるWoodward-Clyde ConsultantsのPasadena事務所を率いていたPaul Somerville氏には、私の思いの実現に向けて、研究の企画構想段階から研究実施、論文作成に至るまで、多大な指導・支援をいただくとともに、本研究を行うために1994年半ばから1996年春までの1年半ほどカリフォルニア工科大学地震研究所に訪問研究員として滞在した際には公私ともに大変お世話になった。ここに深謝の意を表す。Paul Somerville氏の研究グループのメンバーだったDavid Wald氏、Robert Graves氏、Chandan Saikia氏には、それぞれ震源断層の破壊過程のインバージョン解析、三次元有限差分法、波動理論に関して実質的な支援をいただいた。ここに感謝の意を表す。また、カリフォルニア工科大学地震研究所の所長であった近代地震学の世界的権威である金森博雄先生には、関東地震の復元地震動に関する見解の相違や研究アプローチの相違があったにもかかわらず、私を訪問研究員として快く迎え入れていただき、先生の講義や議論を通じて研究の素晴らしさ、楽しさ、地震学と工学の連携の大切さを教えていただいた。同研究所のDon Helmberger先生には、私の受け入れ先となっていただくとともに、専門の複雑な地震波形の物理的解釈と波形モデリングに関して示唆に富んだ多くの助言をいただいた。ここに両先生に深謝の意を表す。

国内では、清水建設技術研究所顧問であった田中貞二先生には、先生が東京大学地震研究所在職中に研究された歴史地震の記録や地震計に関する様々な知見や課題、強震動地震学を教えていただくとともに、研究を行う上で様々な支援をいただいた。ここに深謝の意を表す。また、清水建設技術研究所の片岡俊一氏(現弘前大学大学院教授)には1923年関東地震の記録や地震波の分析手法について、同大崎研究室・和泉研究室の壇一男氏(現熊本大学大学院教授)には半経験的強震動予測手法について、共同研究者として有意義な議論と協力・支援をいただいた。その後、片岡俊一氏とともに清水建設技術研究所の横田治彦氏(前大崎総合研究所社長・所長)、早川崇氏、宮腰淳一氏、岡田敬一氏とは、今村式地震計の検討や丹沢地震等の余震を含む関東地震の記録を用いた解析を共同で実施した。ここに感謝の意を表す。

当時から鹿島建設で関東地震の研究を精力的に行っていた武村雅之氏(現名古屋大学教授)の学術成果や学会での議論は大変参考となるものであり、共著論文では大変お世話になった。また、横浜市立大学教授だった菊地正幸先生(後に東京大学地震研究所教授)には、震源インバージョン解析の考え方や広帯域地震計記録の取り扱い方を懇切丁寧に教えていただくとともに、丹沢地震の震源解析の一部を指導・支援いただいた。ここに感謝の意を表す。

当時、清水建設副社長で大崎総合研究所の初代社長・所長であった大崎順彦先生(東京大学名誉教授)、清水建設大崎研究室の室長の山原浩氏(清水建設技術研究所の第5代所長、大崎総合研究所の第2代社長・所長)、小柳義雄氏、渡辺孝英氏、後に清水建設常任顧問として和泉研究室を主宰し大崎総合研究所の取締役、顧問ともなった和泉正哲先生(東北大学名誉教授)には、一連の研究を行う機会や環境を与えていただいた。ここに感謝の意を表す。

なお、本原稿の作成に際しては、大崎総合研究所の宮腰淳一氏、島津奈緒未氏には首都圏の地震活動について教えていただき、宮腰研氏、吉田一博氏には原稿を読んでいただき参考となるコメントをいただいた。また、弘前大学の片岡俊一先生には参考文献を教えていただいた。

<参考文献>

- 1) Jaggard, T.A. : The Yokohama-Tokyo earthquake of September 1, 1923, Bulletin of the Seismological Society of America, pp. 124-146, 1923
- 2) Hadley, H.M. : Earthquake-proof Building Construction As Revealed by the Japanese Earthquake, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. XIV, pp. 6-8, 1924
- 3) Imamura, A. : Diary on The Great Earthquake: September 1-3 Inclusive, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. XIV, pp. 1-5, 1924
- 4) Wald, D.J. and P. G. Somerville : Variable-Slip Rupture Model of the Great 1923 Kanto, Japan, Earthquake: Geodetic and Body-Waveform Analysis, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 85, No. 1, pp. 159-177, 1995
- 5) Takeo, M. and H. Kanamori : Simulation of Long-Period Ground Motion near a Large Earthquake, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 87, No. 1, pp. 140-156, 1997
- 6) Sato, T., D. V. Helmberger, P. G. Somerville, R. W. Graves, and C. K. Saikia : Estimates of Regional and Local Strong Motions during the Great 1923 Kanto, Japan, Earthquake (Ms 8.2). Part 1: Source Estimation of a Calibration Event and Modeling of Wave Propagation Paths, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 88, No. 1, pp. 183-205, 1998a
- 7) Sato, T., R. W. Graves, P. G. Somerville, and S. Kataoka : Estimates of Regional and Local Strong Motions during the Great 1923 Kanto, Japan, Earthquake (Ms 8.2). Part 2: Forward Simulation of Seismograms Using Variable-Slip Rupture Models and Estimation of Near-Fault Long-Period Ground Motions, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 88, No. 1, pp. 206-227, 1998b
- 8) Sato, T., R. W. Graves, and P. G. Somerville : Three-Dimensional Finite-Difference Simulations of Long-Period Strong Motions in the Tokyo Metropolitan Area during the 1990 Odawara Earthquake (M_J 5.1) and the Great 1923 Kanto Earthquake (Ms 8.2) in Japan, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol 89, No.3, pp. 579-607, 1999
- 9) Yun, S., K. Koketsu, and R. Kobayashi : Source Process of the 1923 Kanto Earthquake Considering Subduction Interface Geometry and Amplification Effects Caused by the Large - Scale and 3D Complex Sedimentary Basin, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 106, No. 6, pp. 2817-2830, 2016
- 10) Dan, K. and T. Sato : A Semi-empirical Method for Simulating Strong Ground Motions Based on Variable-Slip Rupture Models for Large Earthquakes, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 89, No. 1, pp. 36-53, 1999
- 11) 佐藤俊明 : 堆積盆地とやや長周期地震動評価: 1923年関東地震の首都圏の地震動シミュレーション, 第26回地盤地震動シンポジウム, 日本建築学会, 1998.10.22, pp. 55-63, 1998
- 12) 佐藤俊明, 壇一男, 渡辺基史: 関東地震の強震動の再現を目指して—予測手法を駆使するシミュレーションが実用域へ—, SEISMO, (財)地震予知総合研究振興会 地震調査研究センター, 1999年9月号(第3巻第9号 通巻32号), pp. 6-7., 1999
- 13) 佐藤俊明: 第5章2節 1923年関東地震の強震動の再現, 「地震の揺れを科学する—みえてきた強震動の姿—」, 山中浩明編著, 武村雅之/岩田知孝/香川敬生/佐藤俊明著, 東京大学出版会, pp.156-163, 2006.
- 14) 片岡俊一, 佐藤俊明: 1923年関東地震の徳島, 仙台における記録に見られる顕著な位相と多重震源との関係, 第9回日本地震工学シンポジウム, pp. 583-588, 1994
- 15) 片岡俊一, 佐藤俊明, 村松郁栄: 徳島地方気象台における1923年関東地震の本震・余震記録の数値化, 地震2, Vol.48, pp. 235-246, 1995
- 16) 武村雅之, 工藤一嘉, 野澤 貴, 佐藤俊明, 片岡俊一: 東北帝国大学向山観象所(仙台)で観測された1923年関東地震の本震・余震の記録, 地震2, Vol.48, pp. 297-306, 1995
- 17) 壇一男, 佐藤俊明: 断層の非一様すべり破壊を考慮した半経験的波形合成法による強震動予測, 日本建築学会構造系論文集, 第509号, pp. 49-60, 1998
- 18) 佐藤俊明, 壇一男, R.W. Graves, P.G. Somerville: 1923年関東大地震(Ms 8.2)の断層の非一様すべり破壊を考慮した三次元有限差分法と半経験的方法のハイブリッドによる東京の広帯域強震動シミュレーション, 第10回日本地震工学シンポジウム論文集, 第一分冊, pp. 679-684, 1998
- 19) 壇一男, 渡辺基史, 佐藤俊明, 宮腰淳一, 佐藤智美: 統計的グリーン関数法による1923年関東地震(M_{JMA}7.9)の広域強震動評価, 日本建築学会構造系論文集, 第530号, pp. 53-62, 2000
- 20) 早川 崇, 片岡俊一, 宮腰淳一, 佐藤俊明, 横田治彦: 1924年丹沢地震(M_J7.3)の震源断層モデルの推定と首都圏の強震動評価, 日本建築学会構造系論文集 第75巻 第650号, pp. 723-730, 2010
- 21) Morioka, T. : The ground motion of the great Kwanto earthquake of 1923, Transaction of Architectural Institute of Japan, Vo. 289, pp. 79-91, 1980
- 22) 田中貞二・横田治彦・岩田孝行: 今村式二倍強震計の構造図, 地震2, Vol.41, pp. 283-285, 1988
- 23) 横田治彦, 片岡俊一, 田中貞二, 吉沢静代: 1923年関東地震のやや長周期地震動 今村式二倍強震計記録の推定, 日本建築学会構造系論文集, 第401号, pp. 35-45, 1989
- 24) 横田治彦, 片岡俊一, 田中貞二: 東京における1923年関東地震のやや長周期地震動, 第8回日本地震工学シンポジウム, pp. 637-641, 1990
- 25) 田中貞二: 1923年関東地震のやや長周期地震動(今村式二倍強震計の振動特性と飽和波形の修復), 清水建設株式会社技術研究所研究報告書, 1988
- 26) 横田治彦, 片岡俊一, 田中貞二: 1923年関東地震のやや長周期地震動(余震の特性・余震記録を用いた本震地動の推定・本震記録の復元), 清水建設株式会社技術研究所研究報告書, 1988
- 27) 片岡俊一: 1923年関東地震のやや長周期地震動(余震記録の数値化について(その2)), 清水建設株式会社技術研究所研究報告書, 1990

- 28) Takeo, M. and H. Kanamori : Simulation of Long-Period Ground Motions for the 1923 Kanto Earthquake (M=8), Bulletin of the Earthquake Research Institute, University of Tokyo, Vol. 67, pp. 389-436, 1992
- 29) Asano, K. and T. Iwata : Source Rupture Process of the 2004 Chuetsu, Mid-Niigata Prefecture, Japan, Earthquake Inferred from Waveform Inversion with Dense Strong-Motion Data, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.99, pp.123-140, 2009
- 30) Kanamori, H. : Faulting of the great Kanto earthquake of 1923 as revealed by seismological data, Bulletin of the Earthquake Research Institute, University of Tokyo, Vol. 49, pp. 13-18, 1971
- 31) Mats'u'ura, M., T. Iwasaki, Y. Suzuki, and R. Sato : Statical and dynamical study on fault mechanism of the 1923 Kanto earthquake, Journal of Physics of the Earth, Vo. 28, pp.119-143, 1980
- 32) Anderson, J.G. : 57 Strong-Motion Seismology, International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology, Part B, Academic Press, pp.937-965, 2003
- 33) Irikura, K. : Prediction of strong acceleration motions using empirical Green's function, Proceedings of the Seventh Japan Earthquake Engineering Symposium, pp. 151-156, 1986
- 34) 釜江克宏, 入倉孝次郎, 福知保長 : 地震のスケーリング則に基づいた大地震時の強震動予測, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 430 号, pp. 1-9, 1991
- 35) 地震調査研究推進本部地震調査委員会 : 相模トラフ沿いの地震活動の長期評価(第二版),平成 26 年 4 月 25 日,2014
- 36) 長谷川昭, 中島淳一, 内田直希, 海野徳仁 : 東京直下に沈み込む 2 枚のプレートと首都圏下の特異な地震活動, 地学雑誌, 122 巻, 3 号, pp. 398-417, 2013
- 37) 宮岡一樹, 吉田明夫 : 日本周辺の巨大地震に伴った大きな余震, 神奈川県温泉地学研究所報告, 第 45 巻, pp. 9-16, 2013
- 38) 濱田信生, 吉川一光, 西脇誠, 阿部正雄, 草野富二雄 : 1923 年関東地震の余震活動の総合的調査, 地震 2, Vol.54, pp. 251-265, 2004
- 39) 武村雅之 : 1923 年関東地震の本震直後の余震活動—岐阜測候所の今村式二倍強震計記録の解析—, Vol.46, pp. 439-455, 1994
- 40) 武村雅之 : 1923 年関東地震の本震・余震の強震動に関する最近の研究 : 強震記録・住家被害・体験談の解析, 地震研究所彙報, Vol.73, pp. 125-149, 1998
- 41) 佐藤俊明, 片岡俊一 : 1924 年 1 月 15 日丹沢地震(M7.3)の震源パラメータの推定, 地震学会講演予稿集, B14, 972-1127, 1997
- 42) 菊地正幸, 佐藤俊明 : 遠地実体波による 1994 年丹沢地震(M7)の震源パラメータ, 1998 年地球惑星科学系合同学会予稿, Sc-024, 1998
- 43) 早川 崇, 片岡俊一, 宮腰淳一, 佐藤俊明, 横田治彦 : 1924 年丹沢地震(Mj7.3)の震源断層モデルの推定と首都圏の強震動評価, 日本建築学会構造系論文集 第 75 巻 第 650 号, pp. 723-730, 2010
- 44) 岡田義光 : 南関東直下地震の切迫性, 月刊地球, 号外 34, pp. 94-104, 2001
- 45) 翠川三郎, 三浦弘之, 山田 眞 : ユーイング円盤記録式強震計による 1923 年関東地震の記象の解析 その 1 那須による原象のトレース図の再解釈, 日本地震工学会論文集, 第 21 巻, 第 4 号, pp. 49-64, 2021
- 46) 翠川三郎, 三浦弘之, 山田 眞 : ユーイング円盤記録式強震計による 1923 年関東地震の記象の解析 その 2 地震計の特性の検討に基づく地動の推定, 日本地震工学会論文集, 第 22 巻, 第 1 号, pp. 16-34, 2022
- 47) 片岡俊一, 佐藤俊明, 早川崇, 宮腰淳一 : 東京本郷において 1923 年関東地震を記録した今村式二倍強震計の固有周期について, 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), 21016, pp. 31-32, 2020 年 9 月
- 48) Murotani, S., K. Satake, H. Tsuruoka, H. Miyake, T. Sato, T. Hashimoto, and H. Kanamori : A Database of Digitized and Analog Seismograms of Historical Earthquakes in Japan, Seismological Research Letters Vol. 91, No.3, pp.1459-1468, 2020
- 49) Kobayashi, R. and K. Koketsu : Source process of the 1923 Kanto earthquake inferred from historical geodetic, teleseismic, and strong motion data, Earth Planets Space, Vol. 57, pp.261-270, 2005