

音波探査により発見された 首都圏の潜在活断層

杉山雄一¹⁾・遠藤秀典¹⁾

1. はじめに

首都圏にはわが国総人口の4分の1を占める人々が居住し、政治・経済を始めとする社会活動の中枢機能が集中している。地球科学的にみた首都圏は、東から沈み込む太平洋プレートと南から沈み込むフィリピン海プレートがせめぎ合う特異な位置にあり、歴史上、大規模な直下型地震が幾つか発生している。

宇佐見(1987)及び国土地理院編(1989)によると、江戸開府以来、江戸/東京で20人以上の死者を出した直下型地震は、1649年(慶安2年)、1855年(安政2年)及び1894年(明治27年)に発生している。萩原(1991)はこれら3つの地震を検討し、安政2年と明治27年の地震は、首都圏直下に沈み込んでいるフィリピン海プレートと太平洋プレートの接触部(石田, 1990によると深さ約60~90 km)で起きたプレート間地震の可能性が高いとしている。また、慶安2年の地震は震源の深さが数10 km以浅の地殻内地震(上盤プレート内地震)であり、川越の被害が著しいことから荒川断層(第1図)との関連が気になると述べている。このように、首都圏直下で発生する地震は、深い震源(30~40 km以深)を持つプレート間地震とより浅い震源を持つ地殻内地震に大別される。後者の地震のうち、震源がとくに浅いものは活断層の活動により発生すると考えられる。

首都圏の活断層としては、武蔵野台地に立川断層が分布し、荒川や中川沿いの沖積低地には荒川断層や綾瀬川断層の存在が推定されている(第1図)。荒川断層の南方延長は、都心東部の東京低地に達すると推定されるが、厚い沖積層の存在と高度に開発

された地域であるため、同低地の活断層についてはこれまでほとんどデータが得られていない。

このような現状に鑑み、地質調査所では、科学技術振興調整費による「首都圏直下の地震の予知手法の高度化に関する総合研究」の一環として、首都圏の河川を利用した潜在活断層の音波探査を平成3年度から実施している。小論では、これまでの探査により発見された断層(その多くは活断層と考えられる)について紹介するとともに、それらについて若干の考察を加えてみたい。

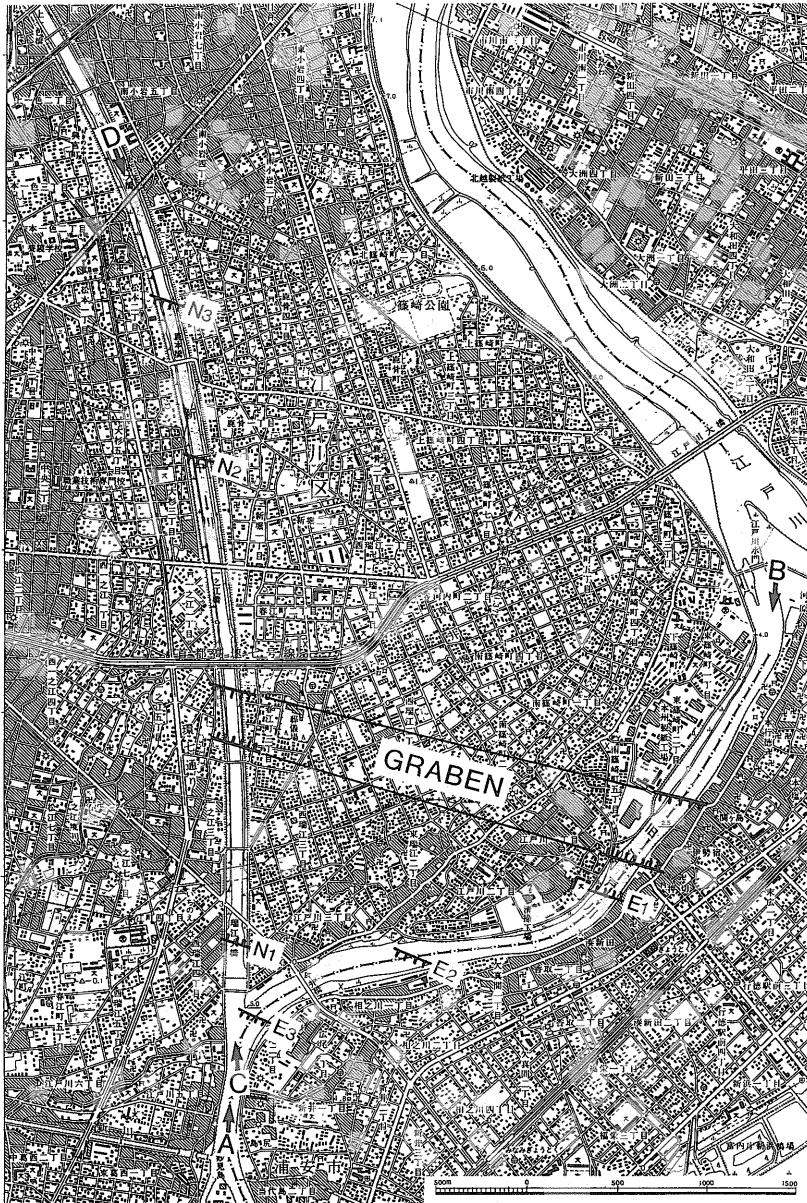
2. 音波探査の概要

平成3年度には、旧江戸川(9 km)、荒川(河口から7 km)及び隅田川(河口から12 km)の3河川において、エアガン(30立方インチ, 10000ジュール)、ウォーターガン(15立方インチ, 3500ジュール)及びユニブーム(300ジュール)の3種の音源を用いたシングルチャンネル音波探査を実施した(第1図)。エアガンとウォーターガンによる探査は、深度500~600 m程度までの地質構造の把握を目的とし、記録長はそれぞれ1秒と0.8秒に設定した。ユニブームによる探査は、沖積層を含む50 m以浅の極浅層部の構造解明を目的とし、記録長は0.1秒に設定した。探査は平成4年1月に実施され、後述するように旧江戸川において、グラーベン状構造などの幾つかの潜在活断層が発見された。しかし、荒川及び隅田川では、広い範囲で浅部堆積層中のガスが原因と推定される音波散乱層に遭遇し、地下地質構造を明らかにすることができなかった。

平成4年度には、同年11月に新中川(旧江戸川と

1) 地質調査所 環境地質部

キーワード：首都圏, 潜在活断層, 直下型地震, グラーベン, 音波探査



第2図 マルチチャンネル音波探査測線(A-B及びC-D)とグラーベン状構造の位置図。E1~E3及びN1~N3は、音波探査により発見された断層。2万5千分の1地形図「船橋」を使用。

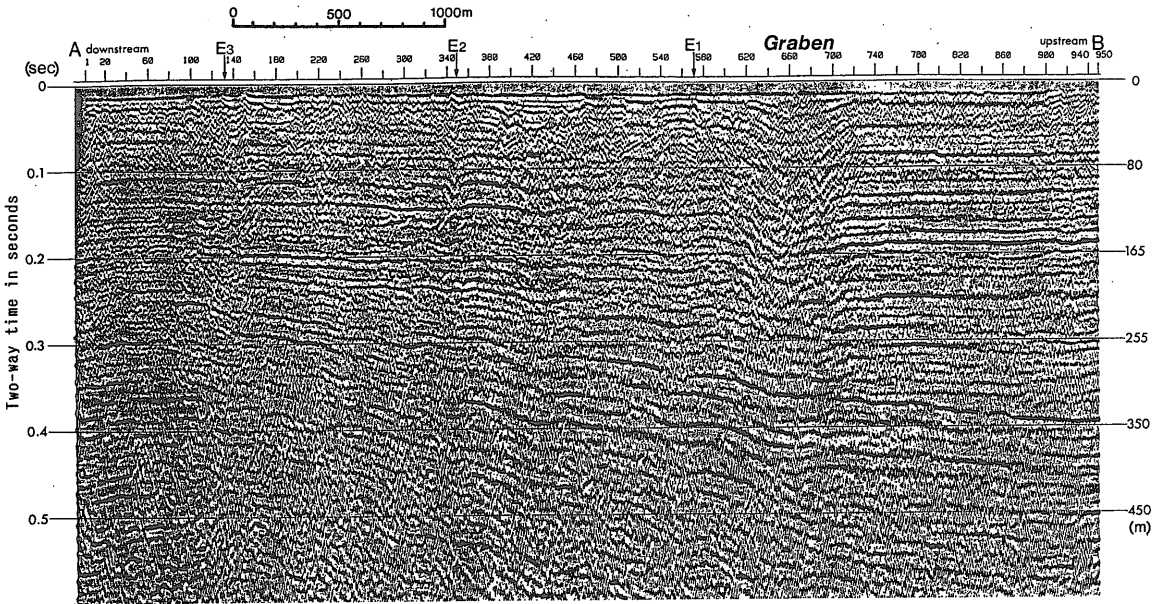
は逆に下流側(南側)へ傾斜する(第4図)。

遠藤ほか(1991)によると、旧江戸川測線南端の地点A(第1図)の南西約2kmで掘削されたGS-ED-1ボーリングでは、約73万年前のブリューネ-松山磁極期境界が深度165m(往復走時約0.2秒に相当)にある。この深度は、旧江戸川及び新中川の断面で反射面の傾斜方向が逆転する層準にほぼ相当する。

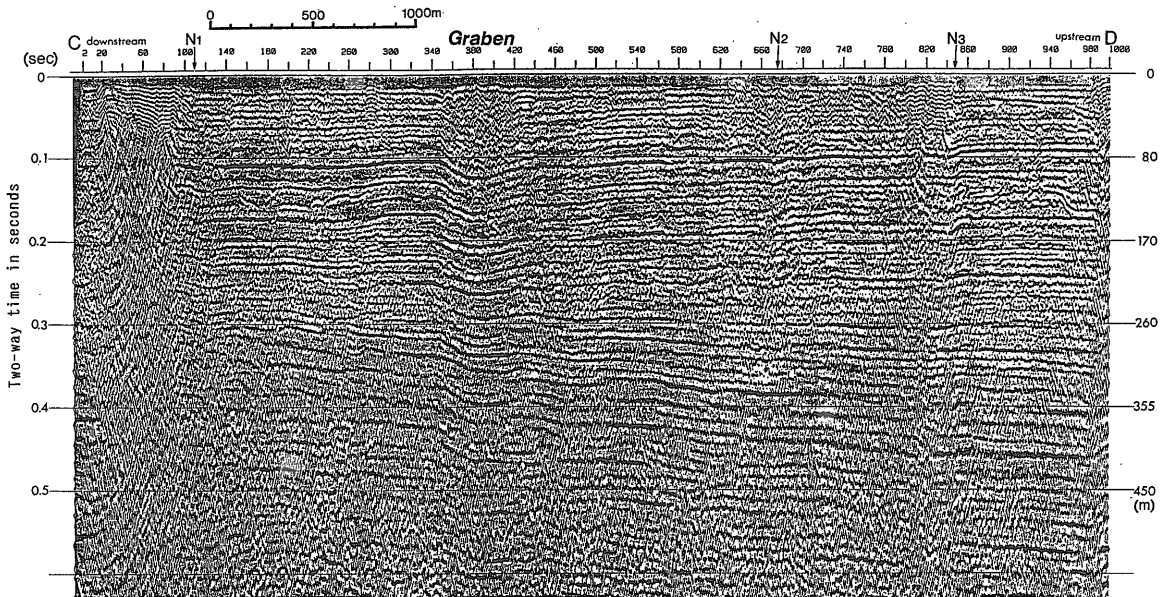
4. グラーベン状構造の断面形態

4.1 旧江戸川のグラーベン状構造

マルチチャンネル探査断面によると、旧江戸川で発見されたグラーベン状構造は、400~500mの幅がある(第3図)。南北両側からの反射面の撓み下がり以示されるグラーベン状の構造は、河床直下から0.1秒(深度約80m)付近まで明瞭に追跡される。この部分の反射面の撓み下がりには累積性が認められ、40ミリ秒(深度約30m)前後の反射面の撓み下



第3図 旧江戸川(測線 A-B)のマルチチャンネル音波探査断面図(マイグレーション処理後の断面)



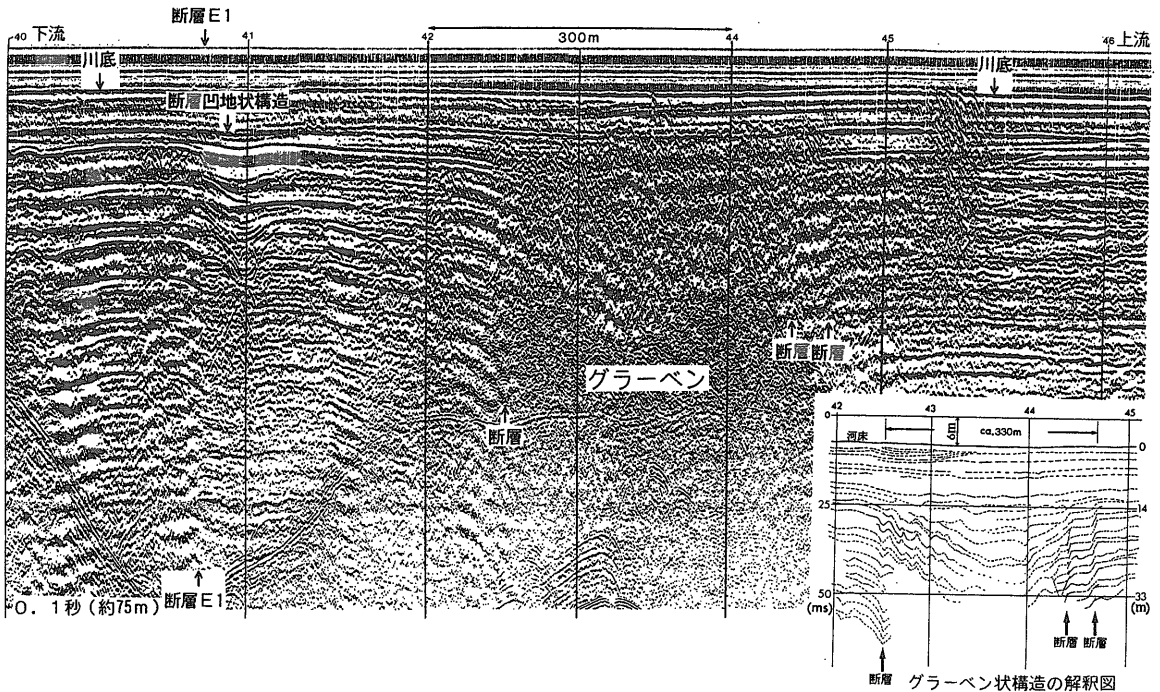
第4図 新中川(測線 C-D)のマルチチャンネル音波探査断面図(マイグレーション処理後の断面)

がりは15~20 m程度と推定される。

ユニブームによる浅層部のシングルチャンネル音波探査結果によると、グラーベン状構造の北端部には、少なくとも約25ミリ秒(河床下約14 m)の層準までを変位させると判断される断層が存在する(第5図)。この断層により、30ミリ秒前後の反射面は

南下がりに2 mほど変位していると推定される。また、この南約330 m付近のグラーベン状構造内部にも、ほぼ同じ層準までを変位させる断層が推定される。

沖積層の基底は音波探査断面では特定し難いが、既存のボーリング資料や地質断面図(東京都土木技



第5図 旧江戸川のグラーベン状構造を横切るユニブーム探査記録と解釈図(右下)

術研究所, 1969, 1977; 大嶋, 1990など)によると, グラーベン状構造内部で深さ40 m 前後, その外側(埋没谷を除く)では深さ20 m 前後にあると推定される。したがって, グラーベン状構造は, 完新世にも活動している活断層である可能性が高いと考えられる。25ミリ秒以浅の極浅層部の反射面も河床に至るまで, 下部の構造と調和的に緩く窪んだ形態を示すが, これが断層運動を反映するものなのか, 単に凹地を埋積したものなのかは, 反射記録からは断定できない。

マルチチャンネル探査記録によると, 0.15秒(約120 m)付近より深いところでは, グラーベン状構造北端の撓み下がりが小さくなり, 同構造南端を撓曲部とする撓曲状構造へ移り変わっている(第3図)。撓曲状構造に伴う垂直変位は, 各層準とも16~20 m 程度と推定され, 明瞭な変位の累積は認められない。

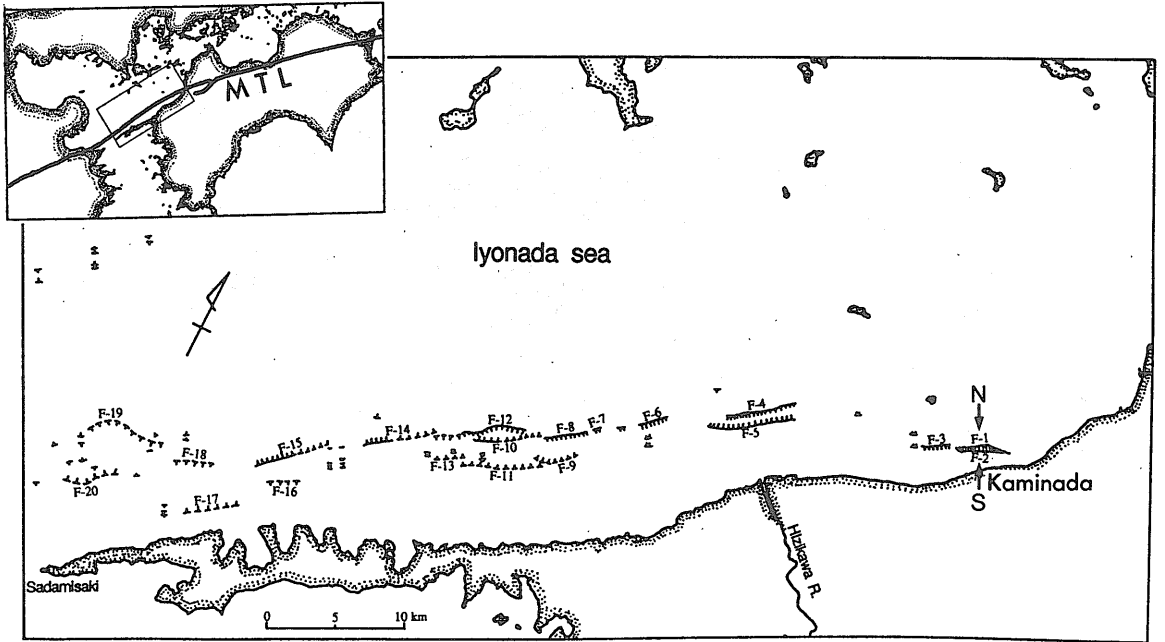
この深さでの注目すべき点として, 撓曲状構造が反射面の傾斜の急変点になっていることが挙げられる。深さ0.2秒(165 m)付近の反射面に着目すると, 撓曲状構造の南側(下流側)では緩く北へ傾斜するのに対して, 北側(上流側)ではほぼ水平である。ま

た, 深さ0.4秒(350 m)付近の数枚の強い反射面は, 撓曲状構造の南側では45/1000程度の勾配を示すのに対して, 北側では25/1000程度のより緩い勾配を示す。

4.2 新中川のグラーベン状構造

マルチチャンネル音波探査結果によると, 新中川で発見されたグラーベン状の構造は, 約350 m の幅がある(第4図)。同構造は, 河床から少なくとも深さ0.6秒(約550 m)までは追跡できる。また, 旧江戸川の場合と同様に, 両端における反射面の撓み下がりには南端で大きく, 北端で小さい非対称な形を呈し, 0.3秒付近より深いところでは, グラーベン状と言うよりは撓曲状と表現した方が適当な形態を示す。

0.1~0.4秒間の強い反射面に着目すると, これらはグラーベン~撓曲状構造により, 南側上がりの変位を被っている。垂直変位量は10~15 m と推定され, 旧江戸川と同様に明瞭な変位の累積は認められない。また, グラーベン状構造に伴う撓み下がり(グラーベンの南縁と底における同一層準の比高)は, 0.1秒付近の強い反射面で17~18 m 程度と推定される。また, 0.1~0.2秒の反射面に着目すると, グ



第6図 伊予灘の中央構造線沿いに分布するグラーベン群。
小川ほか(1992)による。(四国電力株式会社, 1984のデータを簡略化したもの)

ラーベン状構造南側(隆起側)の幅約400 mの部分はバルジ状にやや盛り上がっている(第4図)。

音波探査記録によると、グラーベン状構造はほとんど河床にまで達していると推定されるが、0.1秒以浅のグラーベン状構造内部には散乱による短周期の反射波が卓越するため、内部の詳細な構造はよく分からない。東京都土木技術研究所が実施したスパーカーによるシングルチャンネル探査結果(中山, 1992)によると、ちょうどグラーベン状構造のところで、深度15~30 mの反射面が撓み下がっている。

なお、新中川の探査断面では、旧江戸川で認められたようなグラーベン~撓曲状構造を境とする反射面の傾斜変化は明瞭でない。

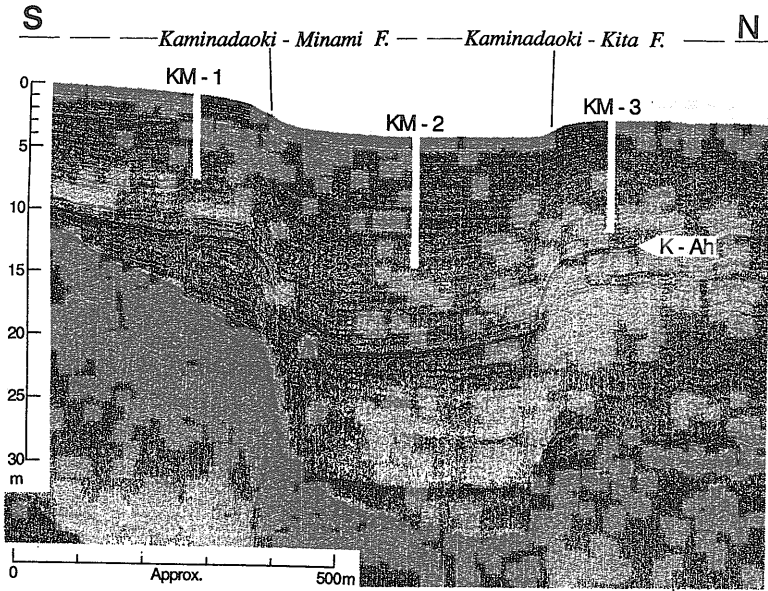
5. グラーベン状構造の形成モデル

以上に述べた探査結果から、グラーベン状構造は南側隆起の垂直成分を有する断層に伴う地表付近の変形構造と考えられる。また、断層面がほぼ鉛直であり、垂直変位に明瞭な累積が認められないこと、新中川の探査断面ではグラーベン状構造に伴って、隆起側(南側)にバルジ状の高まりが認められること

を考慮すると、この断層は横ずれ成分と逆断層成分を併せ持つ断層である可能性が高いと考えられる。

横ずれ断層に伴うグラーベン状構造の例としては、伊予灘の中央構造線活断層系が挙げられる。伊予灘の中央構造線活断層系は、雁行配列する長さ10 km以下の断層群からなり、2本の断層ペアからなるグラーベン状構造が発達する(四国電力株式会社, 1984; 第6図)。グラーベンを構成する個々の断層は東北東-西南西の走向を有し、横ずれ成分の卓越する中央構造線のトレンドと平行している。特に詳細な探査が行われている上灘沖のグラーベンは200~500 mの幅があり、約6500年前のアカホヤ火山灰層が10 m程度(最大18 m)落ち込んでいる(小川ほか, 1992; 第7図)。

このような中央構造線における例を参考にすると、今回首都圏において発見されたグラーベン状構造の形成機構として、第8図のようなモデルが考えられる。ただし、このモデルでは、断層は左横ずれ成分を持つとしてあるが、断層の横ずれセンス(左ずれか右ずれか)は解明されていない。横ずれセンスの解明は、後にも触れるように今後の重要な研究課題である。



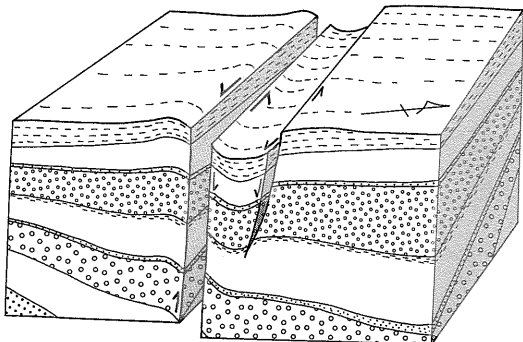
第7図 上灘沖のグラーベンを横切るソノプローブ探査記録。

小川ほか(1992)による。測線位置は第6図参照。

6. その他の潜在断層

6.1 旧江戸川の潜在断層

旧江戸川では、グラーベン状構造の南西(下流側)に、3本の潜在断層(E1, E2, E3断層)が発見された(第2図)。このうち、E1及びE2断層は、河床下10m付近に小規模なグラーベン状構造を形成しており、その直下にそれぞれ下流側隆起、上流側隆起の垂直変位を持つ断層の存在が推定される(第5, 9図)。また、E3断層は少なくとも河床下15m以深の反射面を変位させていると考えられ、上流側隆起の垂直変位は河床下15~25mで1m以下(80~90cm程度)、25~35mでは約2mあり、累積性



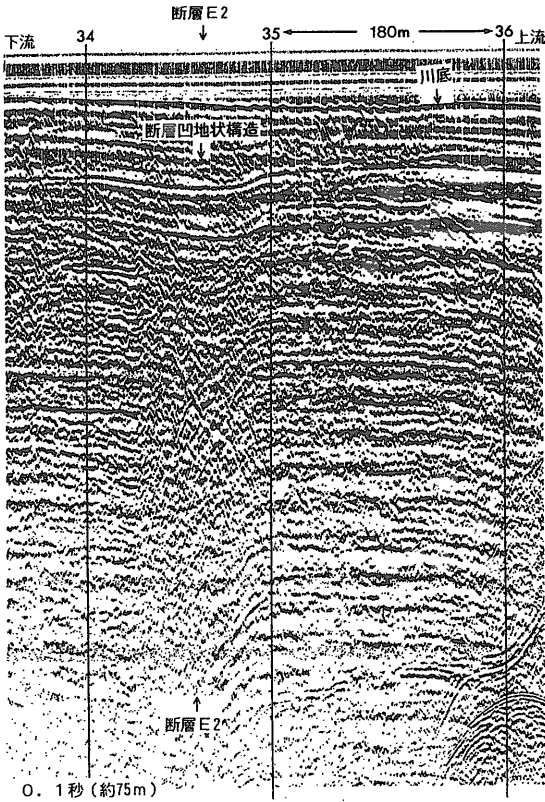
第8図 旧江戸川と新中川を横断するグラーベン状構造の形成モデル。

が認められる(第10図)。以上の事実から、これら3つの断層も活断層である可能性が高いと考えられる。

これら3つの断層は、マルチチャンネル探査断面でも反射面の不連続や落ち込み構造(特にE2断層)として認められる(第3図)。垂直変位量及び反射面の成層構造に与える影響は、上述のグラーベン状構造に比べるとはるかに小さい。落ち込み構造は横ずれ断層の特徴の一つと考えられる(小川ほか, 1992など)ことから、これらの断層も横ずれ成分を伴う断層である可能性が高い。

6.2 新中川の潜在断層

新中川のマルチチャンネル探査結果によると、グラーベン状構造の約2km北方の鹿本橋-松本橋間(松本小学校付近)に、正断層の見かけを呈するN3断層が存在する(第4図)。この断層は、少なくとも0.1秒以深を南側(下流側)落ちに変位させており、見かけ上、下流側へ60~70°傾斜する断層面を持っている。垂直変位には明瞭な累積性が認められず、50ミリ秒~0.3秒付近の反射面はいずれも5m程度の垂直変位を示す。0.45秒(約400m)付近の強い反射面やその下位の反射面を注意深く見ると、断層上盤側(下流側)の幅約500mの部分で、反射面がわずかながら断層に落ち込むような形で撓み下がっている。このような傾斜の変化は、通常の正断層に伴う引きずり(ドラッグ)による傾斜変化(この場合、



第9図 旧江戸川のユニブーム探査記録(E2断層付近)

傾斜はより緩くなる)とは逆のセンスである。これらの特徴から、N3断層も横ずれ成分を伴う断層である可能性が高いと推定される。

N3断層の約900 m南の大杉橋付近にも、同断層と類似の断面形態を示すN2断層が存在するが、垂直変位量及び断層に伴う反射面の撓み下がりにはN3断層よりも小さい(第4図)。このほか、旧江戸川との合流点に近い瑞江大橋と今井水門との間には、上流側落ちの垂直変位を示すN1断層が存在する。

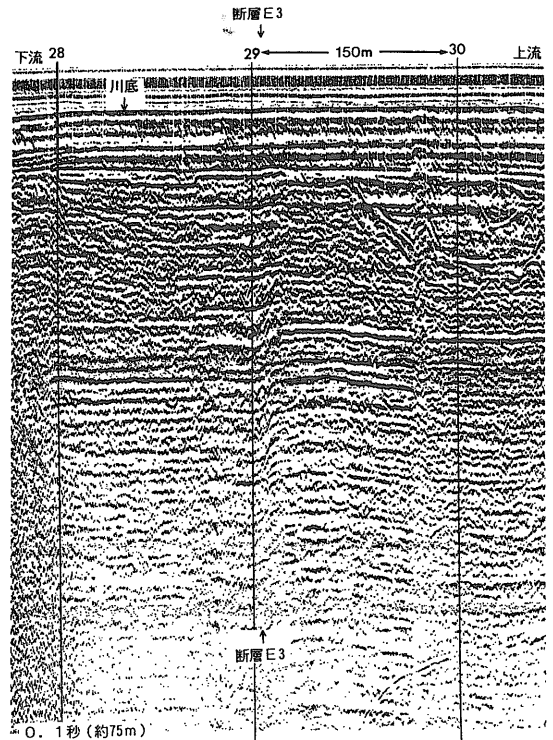
7. 首都圏の潜在活断層研究の今後の課題

7.1 横ずれセンスの解明

上述のように、旧江戸川及び新中川で発見されたグラーベン状構造及びその他の潜在活断層は、断面形態の特徴から、横ずれ成分を伴う、あるいは横ずれ成分が卓越する断層である可能性が高いと考えられる。これらの断層の横ずれセンス(左ずれか右ずれか)の解明は、首都圏の浅部地殻テクニクスを

解明する上で、極めて重要な意義を持っている。即ち、はじめにも述べたように首都圏は、太平洋プレートの沈み込みに起因するほぼ東西の圧縮とフィリピン海プレートの沈み込みに起因する北西-南東ないし南北方向の圧縮のせめぎあいの場に位置している。今回発見されたグラーベン状構造の横ずれセンスが特定できれば、都心部の浅部地殻テクニクスにおける両者の影響の大きさ(ラフに考えれば、左ずれの場合は太平洋プレート、右ずれの場合はフィリピン海プレートの影響が大きい)が明らかとなる。

音波探査断面だけから断層の横ずれセンスを特定することは困難であり、今後、この目的のために他の研究手法を適用・導入する必要がある。現時点で潜在活断層の横ずれセンスの決定に利用できる研究手法としては、高精度の重力探査が挙げられる。しかし、この手法を都心部に適用するためには、振動や構造物などに起因するノイズを正確かつ効率的に補正する必要がある。また、深度10 m以上の大規模なトレンチの掘削なども今後検討すべきであろう。



第10図 旧江戸川のユニブーム探査記録(E3断層付近)

7.2 断層の延長・走向の解明

旧江戸川と新中川の2地点で通過位置が特定できたグラーベン状構造を除いて、音波探査により発見された断層の走向や延長は明らかにされていない。これらの解明は、上に述べた断層の横ずれセンスの解明と同様に、首都圏のテクトニクスを解明する上で大きな意義がある。したがって、今後、河川に近接する陸上において浅層反射法弾性波探査や重力探査などを実施し、河川で発見された潜在活断層の走向や延長を明らかにする必要がある。

グラーベン状構造に関しては、その北西方に存在が推定されている荒川断層との連続性、並びに南東方に存在する東京湾北部断層(加藤, 1984a, b)や東京湾北東岸沿いの推定断層(楡井ほか, 1977)との関連を明らかにする必要がある。しかし、グラーベン状構造の延長が通過すると考えられる荒川や江戸川河口部では、音波散乱層のため10000ジュールのエアガンではデータが得られなかった。したがって今後は、陸上において浅層反射法弾性波探査や重力探査を試みるとともに、よりエネルギーの大きな音源を用いた音波探査を検討すべきであろう。

7.3 活動度・活動周期・最新活動時期の解明

地殻表層部に震源を持つ直下型地震の予知に資するため、今後、グラーベン状構造を始めとする潜在活断層の活動度・活動周期・最新活動時期などを解明する研究を推進する必要がある。このためには、潜在活断層のボーリング調査やトレンチ調査が不可欠である。

グラーベン状構造に関しては、その内部と外側でボーリング調査を実施し、ボーリングコアの詳細な解析と対比に基づく地震イベント層準の特定と広域火山灰層や放射年代測定に基づくイベント年代の解明が期待される。

また、グラーベン状構造は、1855年の安政江戸地震による被害が大きかった地域に位置しており、この地震との関連の有無についても今後検討すべきであると考えられる。はじめにも述べたようにこの地震は、江戸での初期微動継続時間が10秒前後と推定される(宇佐見, 1978; 萩原, 1991)ことから、震源が数10 km以深のプレート間地震である可能性が高い。しかし、地下水の湧出などの幾つかの前兆現象があったことが知られており、地下浅部においても地震前や地震時に何等かの変動が生じた可能性

がある。また、グラーベン状構造の内部にこの時の地変の跡が残されているかもしれない。

筆者らは、これらの課題解明を目標として、平成5年度にはグラーベン状構造のより詳細な調査研究を実施する予定である。

謝辞: 本研究を行うに当たり、いろいろと御協力頂いた総合地質株式会社の廉沢 宏氏、畑山富夫氏、下 泰彦氏をはじめとする調査員の方々に厚く御礼申し上げます。

文 献

- 遠藤秀典・上嶋正人・山崎俊嗣・高山俊昭(1991): 東京都江戸川区GS-ED-1 ボーリングコアの古地磁気・石灰質ナノ化石層序. 地質雑, 97, 419-430.
- 萩原尊禮(1991): 江戸-東京の直下地震. 東京直下地震(力武常次監修), 毎日新聞社, 17-33.
- 石田瑞穂(1990): 関東・東海地域の地震活動とプレート構造. 地質ニュース, no. 432, 18-26.
- 垣見俊弘・山崎晴雄・寒川 旭・杉山雄一・下川浩一・岡 重文(1982): 50万分の1 活構造図「東京」. 地質調査所.
- 加藤 茂(1984a): 東京湾におけるマルチチャンネル反射法音波探査. 水路部研究報告, 19, 1-57.
- 加藤 茂(1984b): 東京湾の海底地質構造. 地学雑誌, 93, 119-132.
- 国土地理院編(1989): 首都及びその周辺の地震予知(その2), 地震予知連絡会地域部会報告(第3巻), 日本測量協会, 170p.
- 中山俊雄(1992): 音波探査を利用した都市地盤調査(その2). 平成4年東京都土木技術研究所年報, 183-192.
- 楡井 久・樋口茂生・原 雄・古野邦雄・矢田恒晴・石井 皓・赤桐毅一(1977): 東京湾の形成に関する一考察と地盤沈下. 日本地質学会第84年学術大会講演要旨, 278.
- 小川光明・岡村 真・島崎邦彦・中田 高・千田 昇・中村俊夫・宮武 隆・前立英明・堤 浩之(1992): 伊予灘北東部における中央構造線海底活断層の完新世活動. 地質学論集, no. 40, 75-97.
- 大嶋和雄(1990): 東京湾周辺の埋立地. 地質ニュース, no. 432, 50-57.
- 四国電力株式会社(1984): 伊方発電所原子炉設置変更許可申請書(3号炉増設)本文及び添付書類(一〜十).
- 東京都土木技術研究所(1969): 東京都地盤地質図(23区内)東京都地質図集2.
- 東京都土木技術研究所(1977): 東京都総合地盤図(I)東京都地質図集3, 支持層分布図(B).
- 宇佐見龍夫(1978): 大地震. そしえて文庫34, そしえて, 238p.
- 宇佐見龍夫(1987): 新編日本被害地震総覧. 東京大学出版会, 434p.

SUGIYAMA Yuichi and ENDO Hidenori (1993): Active faults discovered by multichannel seismic reflection profiling along rivers in the Tokyo metropolitan area.

<受付: 1993年2月22日>