

## 東京湾北部の三次元マルチチャンネル音波探査<sup>†</sup>

岩淵 洋\*, 加藤 茂\*\*, 岸本 秀人\*\*\*, 楠 勝浩\*\*\*, 渡辺 一樹\*

## Three Dimensional Multi-Channel Seismic Survey in the Northern Tokyo Bay<sup>†</sup>

Yo IWABUCHI\*, Shigeru KATO\*\*, Hideto KISHIMOTO\*\*\*,  
Katsuhiko KUSUNOKI\*\*\* and Kazuki WATANABE\*

### Abstract

On the south of the Kanto plain, there is the Tokyo Bay northern fault that named after Kato (1983). The northern fault is one of the most remarkable fault in this area. In general, Fault is result of the past crustal movement. Thus it is important to predict earthquakes in the Kanto region to reveal the characteristics of the fault.

Hydrographic Department conducted multi-channel seismic survey for the purpose of clarifying the characteristics of the fault. The survey was carried out as the three-dimensional seismic method by multi-channel seismic survey with the very close line spacing.

Geological structure of the fault is summarized as follows:

- 1) General trend of the Tokyo Bay northern fault is N60W, however, it is N35W at the center of the survey area.
- 2) It is difficult to distinguish whether the fault is normal or reverse because of the high dip angle of the fault plane.
- 3) According to the horizontal geologic section (time slice), the strike of the sedimentary layer seems to be bended by left lateral movement. However, considering the dip of the sedimentary layers, the left lateral movement is not required.
- 4) The Tokyo Bay northern fault displaces the middle of the Kazusa group that is correlated with early middle Pleistocene.

### 1. はじめに

断層は過去の地殻変動により形成されたと考えられており、このうち、第四紀に活動したものは、今後も活動を行う可能性があることから、その存在度を明らかにすることは、地震発生の長期的予測を行う上で非常に重要である。また、断層の走向や傾斜

等を詳細に分析することにより、過去に発生した地震を引き起こすに至った力に関する情報を引き出すことができることから、断層の分布やその詳細な状況を明らかにすることは、地震を予知する上で重要な情報を提供するものと期待される。

関東平野は日本で最も大きな平野で、関東構造盆地と呼ばれる盆地状の構造をもち、厚い新第三系、

<sup>†</sup> Accepted 10th January 1995

\* 海洋研究室 Ocean Research Laboratory

\*\* 監理課 Administration Division

\*\*\* 沿岸調査課 Coastal Surveys and Cartography Division

第四系の堆積層が発達する。これら堆積層は、新しい時代の地層を含めて平野の中心に向かって緩く傾いていることから、堆積盆の沈降による盆地の形成が今なお続いていると考えられている。

関東平野の地殻構造については、これまで、地震探査(笠原ほか, 1993; 遠藤ほか, 1993), 重力(多田, 1983; 萩原ほか, 1986; 植田ほか, 1987), 深層ボーリング(矢島, 1981; 鈴木ほか, 1981)のほか多くの研究調査が行われている。しかしながら、首都圏では地形の人工改変が著しく、活断層等の痕跡が保存されにくい。また、厚い堆積層と人工ノイズに阻まれて、物理的探査も困難である。首都圏の主な活断層としては、綾瀬川断層、荒川断層、立川断層、伊勢原断層など周辺部にいくつか知られているが、首都圏中央部の活断層についてはあまり良く判っていない。

一方、首都圏近傍の海域について見ると、浦安沖の東京湾北部に、東京湾北部断層と呼ばれる断層が潜在していることが知られており(加藤, 1984), また、先新第三系の基盤までの構造が明らかにされている(加藤, 1984; 菊池・菊地, 1991)。しかし、東京湾北部断層はわずか1測線において確認されただけであり、その走向、断層変位の地域的差異など断層の詳細は全く判っていない。同断層の詳細な調査を行うことは、首都圏における地震の予知研究を進める上で重要であることから、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、同断層の活動時期や形状等を詳細に明らかにすることを目的として三次元マルチチャンネル音波探査を行った。本小論では、その結果について報告する。

## 2. 調査方法

今回の調査は、立体的な地下構造の解明を目的とすることから、三次元のマルチチャンネル反射法探査手法によることとした。この方法は、この種の地下構造探査には初めて導入されたものである。現地調査および資料解析処理は、株式会社地球科学総合

研究所が行った。

現地調査は、断層が指摘(加藤, 1984)された浦安沖の東京湾北部を中心とする海域について、三次元の地質構造の把握をするために、非常に密な間隔で測線を設定し、マルチチャンネル音波探査を行った。各測線の測線長は5 km, 測線間隔は250 mである。

現地調査は、500立方インチと200立方インチの2つのエアガン(合計容量11 l, 空気圧140 kg/cm<sup>2</sup>)を音源として発振間隔25 mで発音し、反射波の受信には、受信点間隔25 mの24チャンネルストリマーケーブルを、深度約5 mで曳航し使用した。測位は、浦安、海浜幕張、稲毛海岸の3地点に設置した陸上局からマイクロ波により調査船までの距離を測定することにより行った。測位の精度は3 m以内である。

現地作業は、あらかじめ設定した測線上に調査船を誘導し、測定位置25 m毎に測位機からトリガー信号を発し、エアガン及びデータ収録機を連動させて調査を行った。データはサンプリング間隔1 msec, 記録長5秒でデジタル収録した。Fig. 1に調査海域および音波探査の発音点図を示す。なお、調査海域は、千葉港や船橋港への航路や、危険物船錨地や検疫錨地を含んでおり、船舶交通が輻輳する海域であるため、調査船の前方及びケーブルの両側にそれぞれ警戒船を配備し、海上交通安全の確保に努めた。

音波探査データの解析には、通常マルチチャンネル反射法探査で行うデコンボリューション、速度解析、共通反射点重合、フィルタリング、マイグレーション処理のほか、瞬間振幅や位相、瞬間周波数等の特徴抽出処理などの高度処理を実施するとともに、測線方向以外の方向の地質断面が得られるよう、三次元のデータセットを作製して、タイムスライス処理をはじめとする三次元データ処理を行い、任意の方向の地質断面を作製した。

各測線毎の垂直方向の地質断面は、一般に作製される重合処理断面、マイグレーション断面及び深度変換断面をそれぞれ作製するとともに、深度変換断面に瞬間振幅や位相、瞬間周波数等の特徴抽出を施した断面もいくつかの測線について処理・作製した。

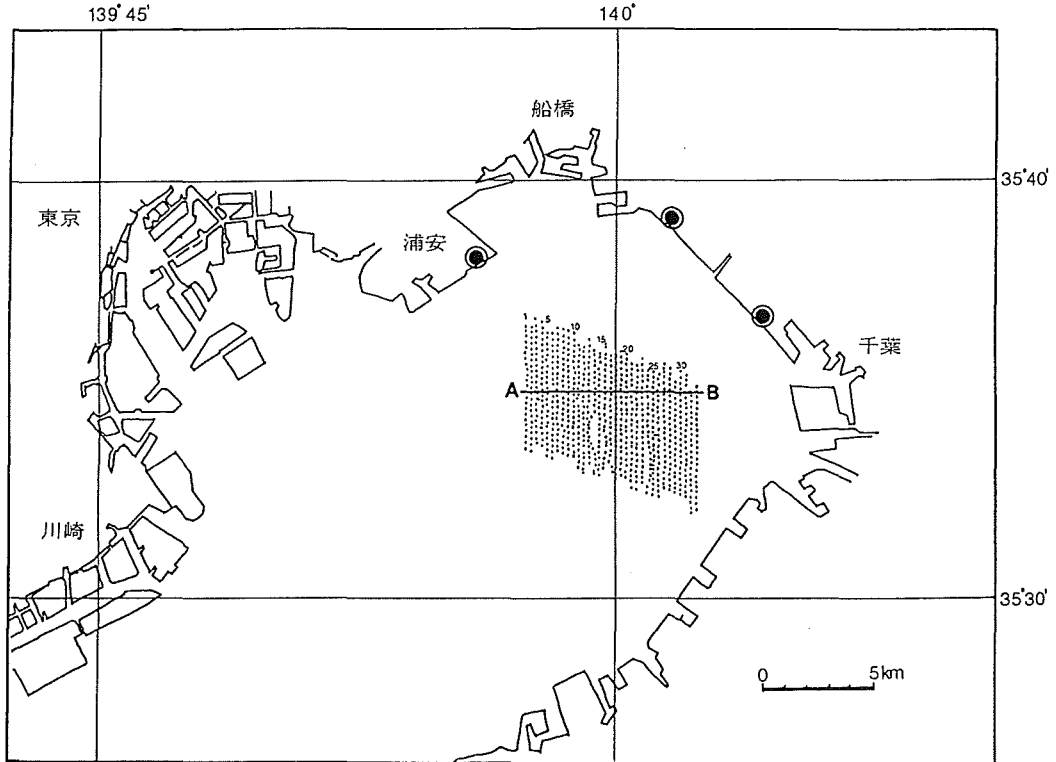


Fig. 1 Survey area and shot points of air gun. Double circle indicates the sites of slave station of electromagnetic positioning system. "A-B" indicates the cross section shown as Fig. 4.

なお、深度変換にあたっては、各測線における重合速度を適用した。

三次元処理にあたっては、測線方向だけでなくこれと交差する方向においてもほぼ等しい間隔で共通反射点を得る必要がある。しかしながら、今回の調査では、種々の制約により測線方向の共通反射点間隔は12.5m、測線と交差する方向の反射点間隔は250mと極めて不均一なデータとなったことから、このままでは三次元のデータセットとはなり得ない。このため、33の測線の間それぞれ9本の疑似測線データをコンピュータにより補間して設け、調査海域全体を25m間隔、321本の測線でカバーされた形としたデータセットを作製した。

前記処理により作製されたデータセットを用いて、タイムスライスや深度スライス等の水平方向の地質断面を作製した。タイムスライスは、海面下600 msecの面および1,308 msecから2,900 msecまでの

8 msec毎の面の201面作製した。また、深度スライスは、同じく海面下2,516mから3,700mまで、16m毎に75面作製した。この他にも、瞬間位相や瞬間振幅、瞬間周波数の複素解析タイムスライスをそれぞれ8 msec毎に各70面作製した。

さらに、三次元のデータセットを用いて、これら以外にも、東西方向や北北西-南南東方向の断面等もそれぞれいくつか作製した。

### 3. 調査結果

今回の調査により、良好な音波探査データが得られ、東京湾北部の深さ約5 kmまでの音響的な三次元構造を知ることができた。

(1) 33本の全測線の重合及び深度変換断面から明らかにされる東京湾北部断層に関する事項をまとめると以下ようになる。

#### ① 形態

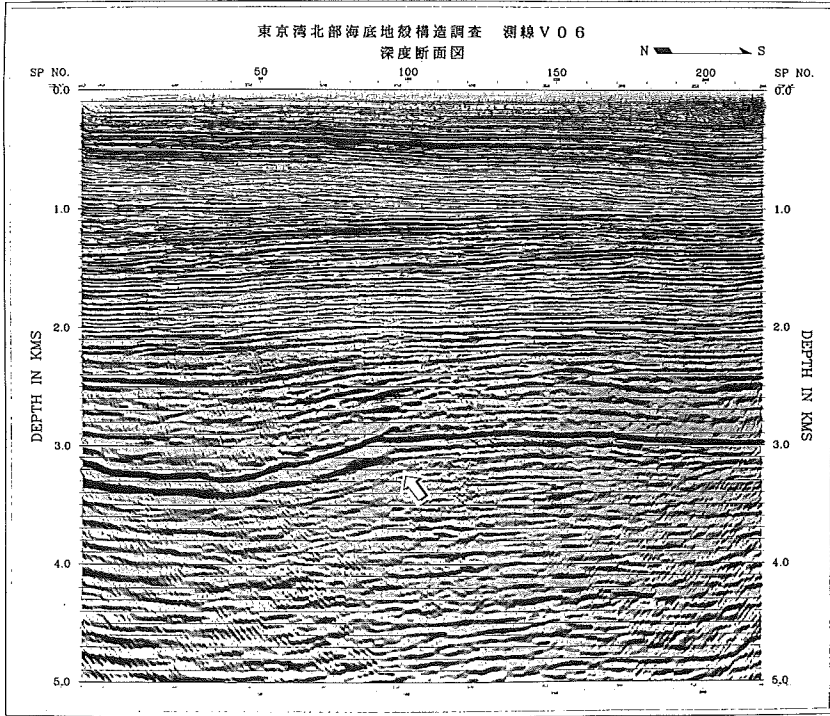


Fig. 2 The depth conversion section of the line No.6. An arrow indicates the Tokyo Bay northern fault. The scale ratio of vertical to horizontal side is 1 : 1 .

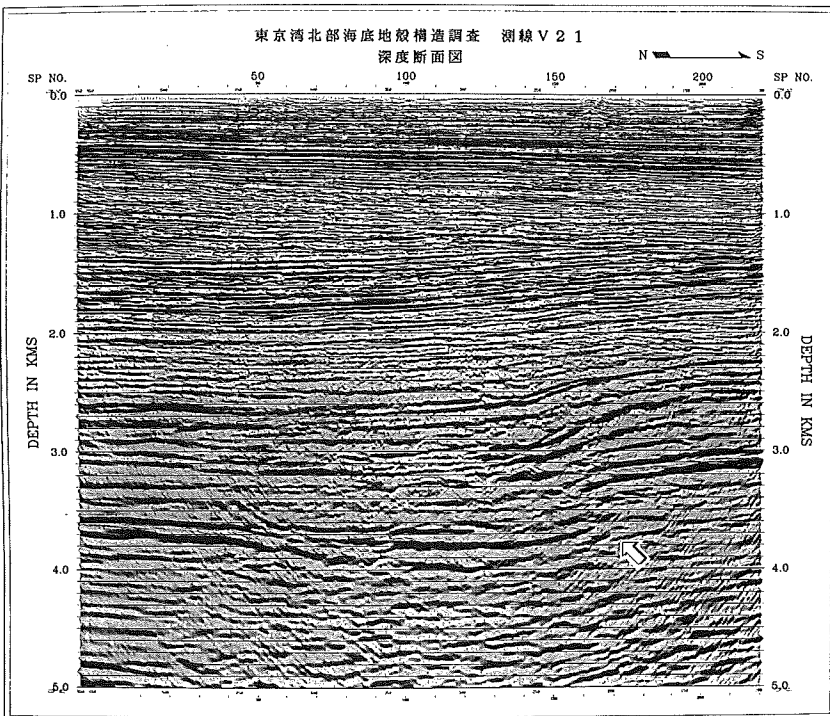


Fig. 3 The depth conversion section of the line No.21. An arrow indicates the Tokyo Bay northern fault. The scale ratio of vertical to horizontal side is 1 : 1 .

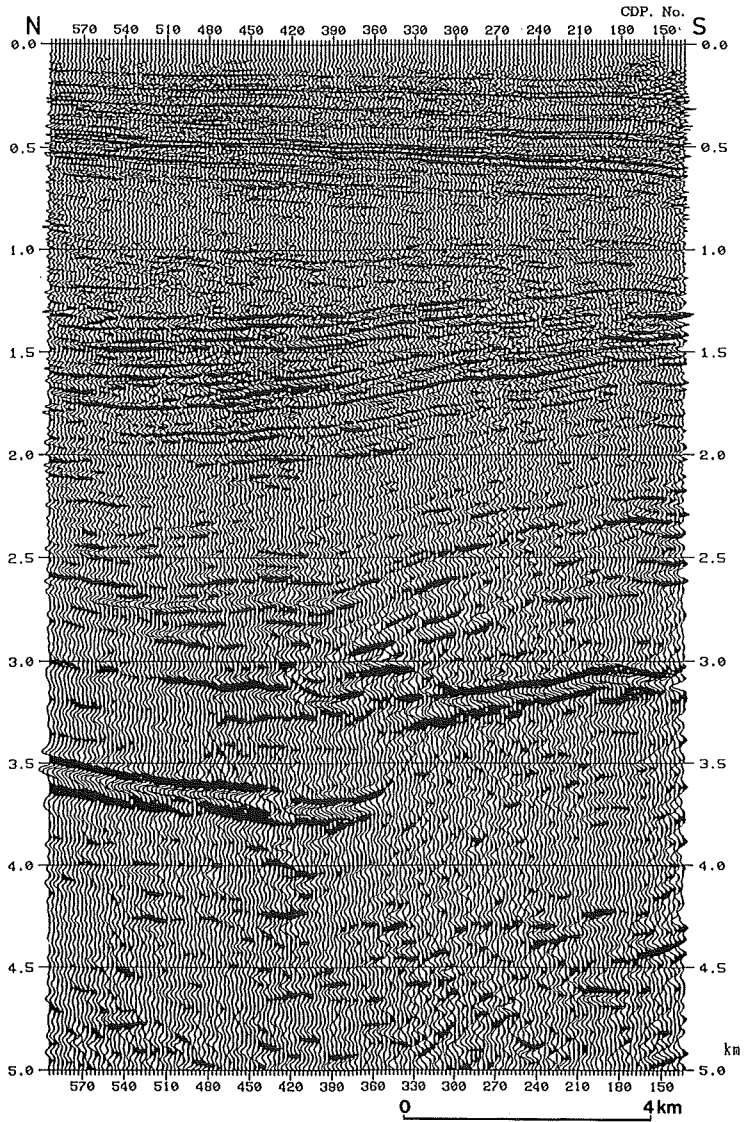


Fig. 4 The depth conversion section of the line No.16. To emphasize the deformation of sedimentary layers, vertical scale ratio is four times to horizontal side.

深さ3,000mから5,000mにある最も顕著な反射面(先新第三系の基盤と推定されている)をみると、調査海域内において、10番測線付近を境に、東(市原)側は断層、西(東京)側は撓曲構造を示している。Fig. 2に6番測線の深度変換断面を、また、Fig. 3に21番測線の深度変換断面をそれぞれ示す。

垂直方向でみると、基盤が明らかに断層により切られている地点でも、海面下約2.2秒(深さ約2,800m)より上位の層では撓曲となっているように見える。Fig. 4には、断層変位を認識しやすくするために、南北方向を圧縮した16番測線の深度変換断面を示す。

## ② 断層変位量

断層変位の大きさを、先新第三系と推定される深さ約3,000mに位置する反射面からみると、調査海域の東端で約800mともっと大きく、北西に向かうに従い小さくなる。11番測線付近では400m程度となり、西端の1番測線では200m以下となっている。

断層をはさんだ両側で比較すると、北側の地層の層厚は、南側の地層の層厚よりも厚い。ただし、反射面の追跡、対応づけが困難なところもあり、全ての反射面において、この関係が明らかとなっているわけではない。

## ③ 変位の累積

東京湾北部断層の変位は、先新第三系と推定される反射面で最も大きく、これを覆う地層では、上位層ほど変位が小さくなっている。すなわち、変位は深部に向かって累積性をもっている。変位を上位層に追っていくと、海面下約2秒(深さ約2,300m)付近から認識できなくなる。

今回得られた音波探査断面では、上総層群と考えられる地層全体が南東に緩く傾斜した単斜構造となっており、その中にいくつかの不整合面が認められる。これら不整合面のうち、海面下約1.0~1.5秒に認められる面は最も顕著であり、東京湾不整合(楡井, 1982)に対比される。上総層群中に認められる

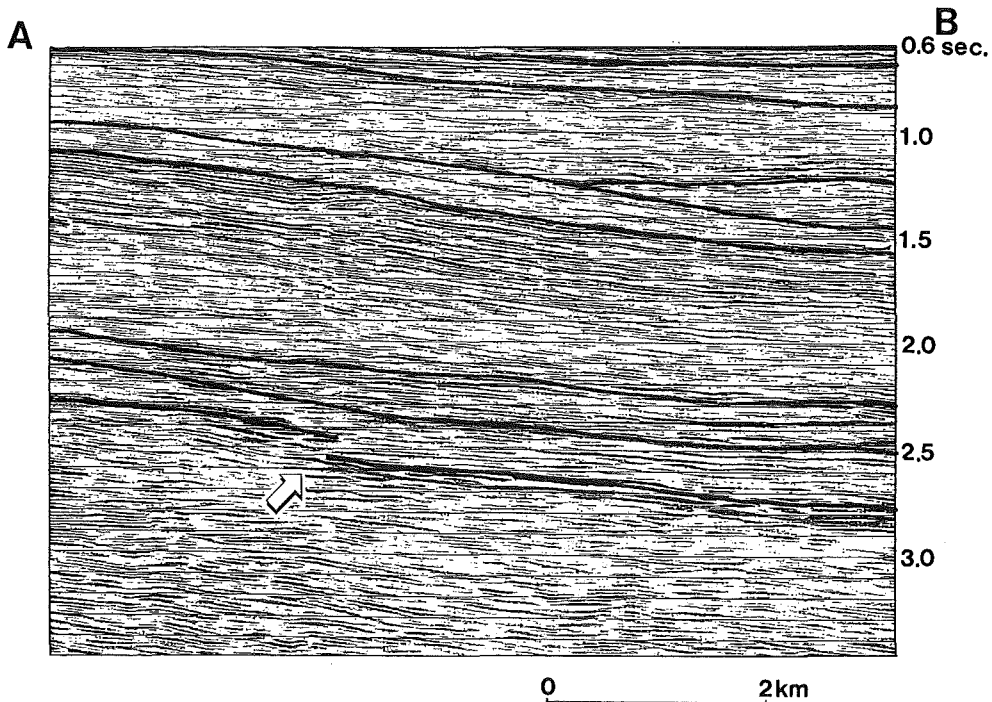


Fig. 5 The time section of East-West direction. Tick lines and arrow indicate unconformity and the Tokyo Bay northern fault respectively. This section is synthesized by computer from each survey lines on North-South direction.

不整合面のうち、最上位の深度0.6~0.9秒付近に認められる面を除き、断層による変形が及んでいるものと考えられることから、不整合面より上の断層変位の累積は、削剝により消されている可能性がある。

Fig. 5に今回の調査海域における上総層群に対比される層の東西断面と、ここに認められる不整合を示す。なお、本断面はコンピュータにより三次元的に補間して作製されたものである。

(2) 得られたデータを三次元的に展開し、水平方向の地質断面(地質スライス)を作製した。Fig. 6に本海域の立体的地質構造模型を示す。本来、地質スライスは、深度変換後のスライスが水平面を表していることから、ここに表現される地層の形状が重要であるため、深度変換断面をもとに議論を進めるべきである。しかしながら、重合に用いられた地層内の音速度(重合速度)は、必ずしも真

の音速度とは一致しないところもあるため、重合速度を用いて深度変換を行うと地層面等の形状が乱れてしまい、層理面の連続性が悪くなる結果となる。したがって本報告では、地層の走向等の形状については主にタイムスライスをもとに議論を行い、その構造の深度についてはこれに重合速度を適用し、深度変換を行ったもので論ずることとした。

地質スライスから明らかにされる本調査海域における地質構造は次のとおりである。

#### ① 断層変位が及んでいる層準

各測線毎の断面(垂直断面)において認められる、東京湾北部断層の変形が及んでいる最も上位の地層は、海面下約2秒(重合速度を用いて変換すると、海面下約2,300m)である。しかしながら、本海域における地層の傾斜は $5^{\circ}$ 以下とほとんど水平層であ

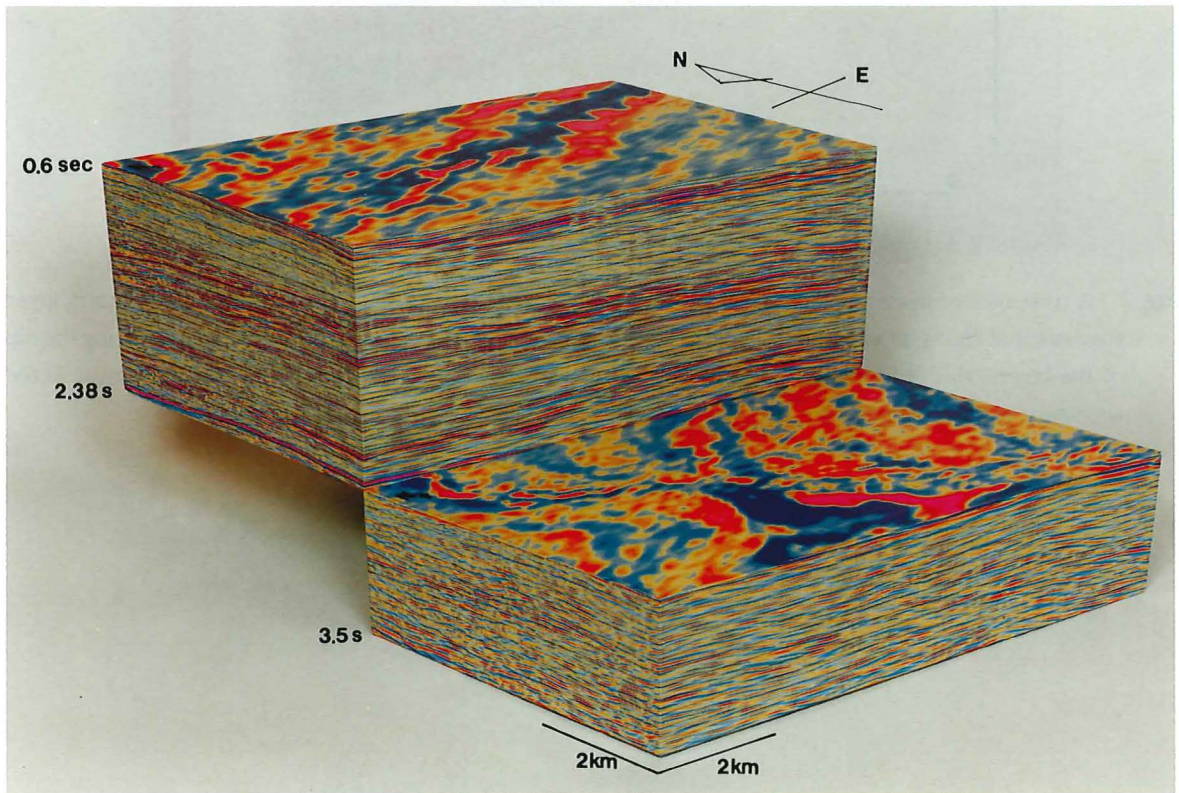


Fig. 6 Three dimensional model of geological structure of the survey area. Top surface and cut surface are time slice of instantaneous phase at 600msec, and 1,564msec, under the sea surface.

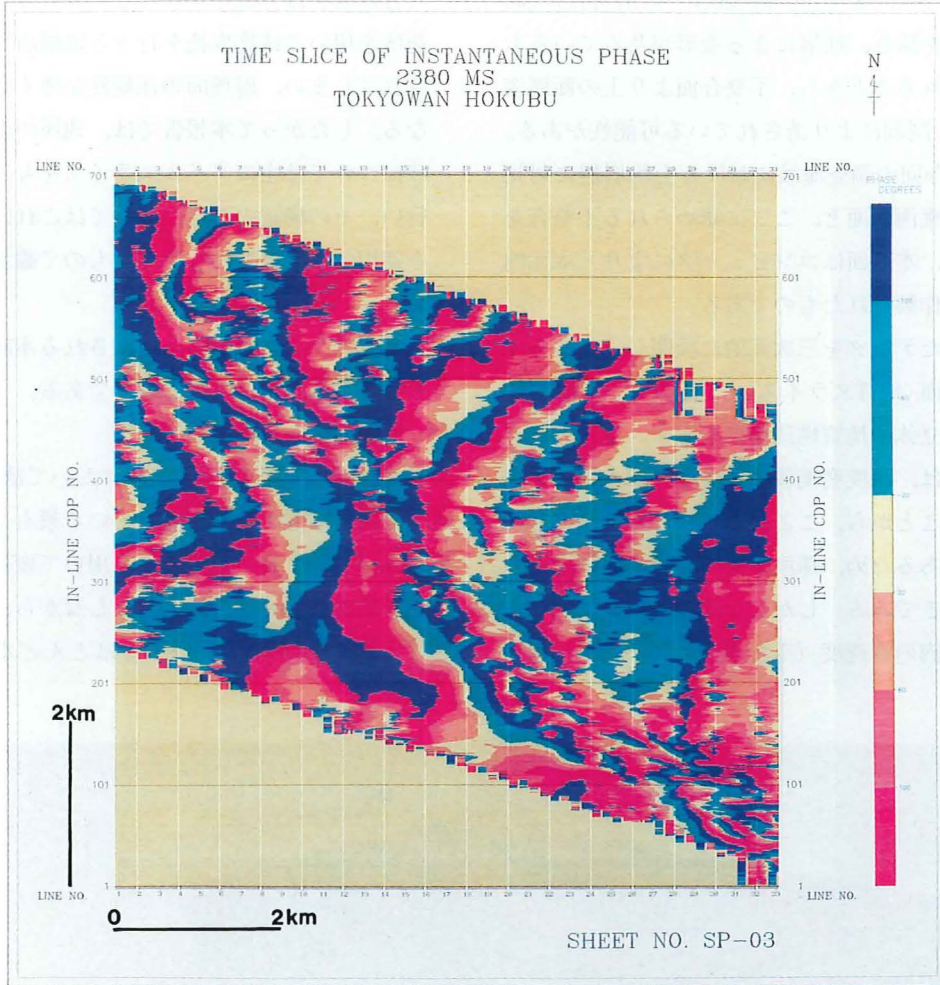


Fig. 7 A time slice of instantaneous phase at 2,380msec under the sea surface. The strike of sedimentary layer suggests that the layer were deformed as drag movement by left lateral fault. However, considering the dip of the layers, this deformation is owing to the vertical movement, and the left lateral movement is not necessary to the deformation.



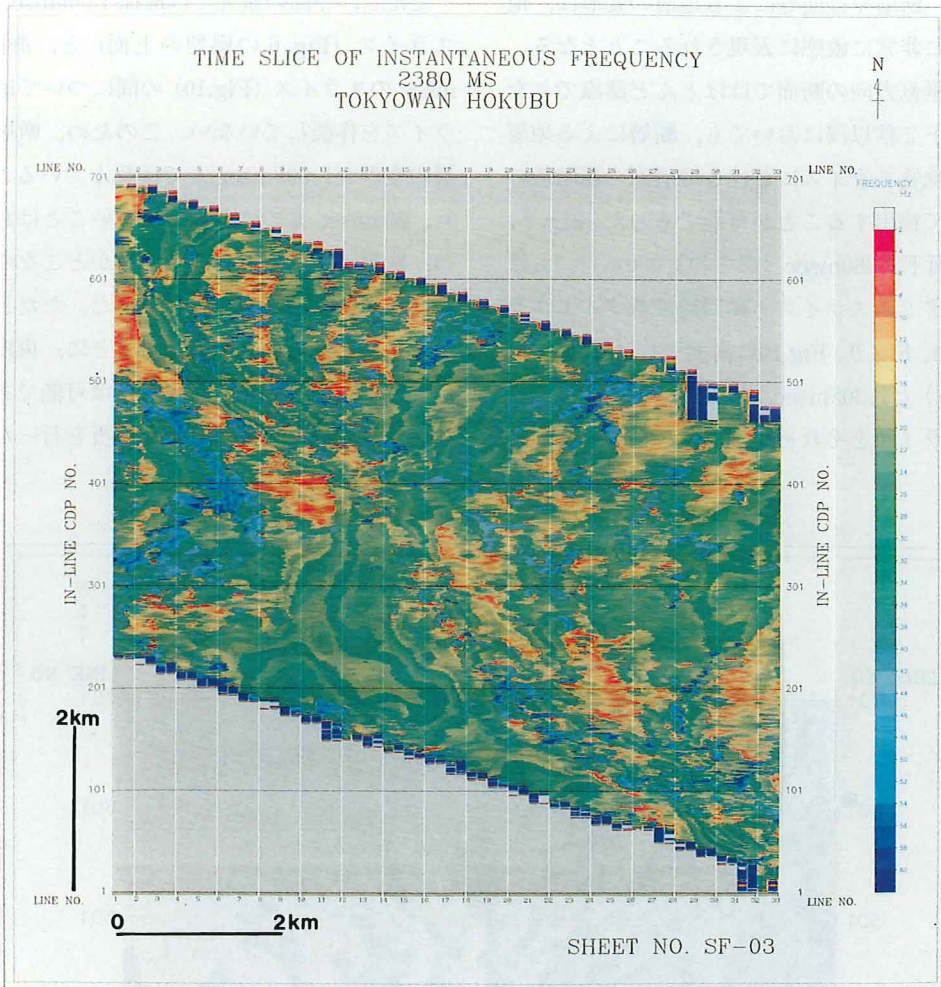


Fig. 8 A time slice of instantaneous frequency at 2,380msec. under the sea surface. The Tokyo Bay northern fault is recognized clearly as zig-zag strike.

ることから、断層や撓曲等による地層の変形は、地質スライスに非常に敏感に表現されることとなる。このため、垂直方向の断面ではほとんど認識できなかった海面下2秒以浅においても、断層による地層の変形を、地質スライスにおける地層面の露頭線の不連続として検出することが可能であった。Fig. 7, Fig. 8に海面下2,380msec(深さ約3,000m)における瞬間位相タイムスライスと瞬間周波数タイムスライスを、また、Fig. 9, Fig.10に海面下1,564msec(深さ約1,600m)と1,308msec(深さ約1,300m)におけるタイムスライスをそれぞれ示す。

ただし、今回の研究では海面下600msecにおけるスライス (Fig. 6の模型の上面) と、海面下1,308 msecのスライス (Fig.10)の間については、地質スライスを作製していない。このため、断層による地層の変形が1,308msecまでは及んでいること、しかし、600msecまでは及んでいないことはわかるものの、断層による変形の最上位層がどこなのか、地質スライスからは判定できなかった。ただし、地質スライスにより得られた情報をもとに、再度、垂直方向の地質断面の解析を行うことは可能であり、通常の音波探査断面記録だけから解析を行ったときより

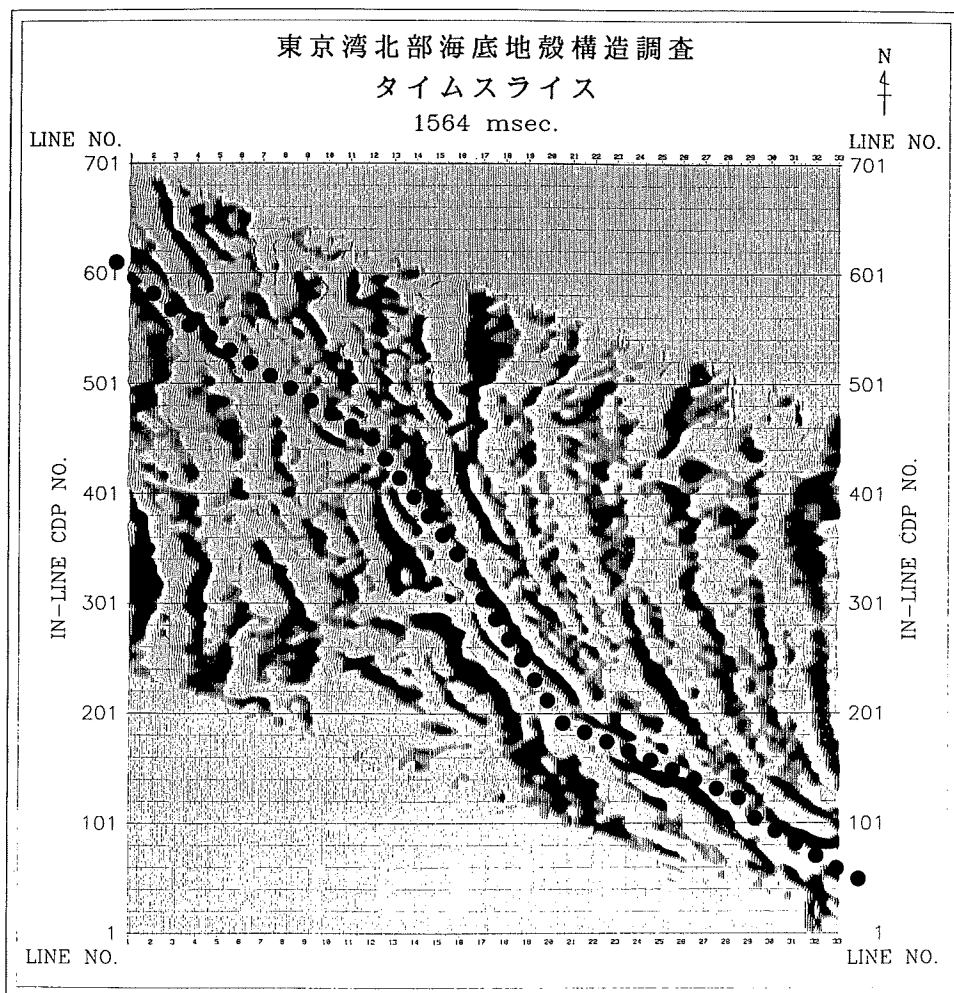


Fig. 9 A time slice at 1,560msec. under the sea surface. The Tokyo Bay northern fault is shown as a dotted line. The fault is recognizable as the strike changes of sedimentary layers.

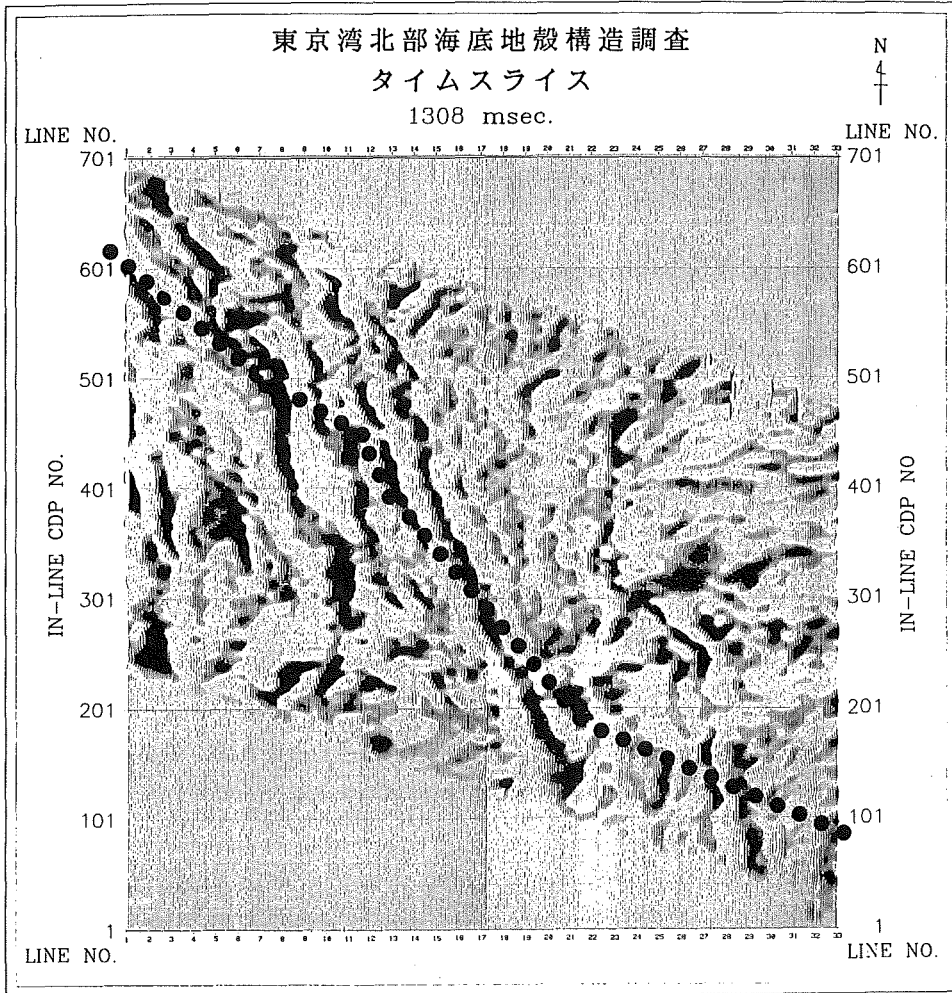


Fig.10 A time slice at 1,308msec. under the sea surface. The Tokyo Bay northern fault is shown as a dotted line.

も、はるかに上位の地層まで断層の変形が及んでいることが確認された。

この結果、東京湾北部断層による地層の変形は、海面下約1秒(深さ950m)付近まで及んでいると考えられる。

② 断層の走向および傾斜

地質スライスにより明らかにされた東京湾北部断層の走向は概ね N60°E であるが、調査海域のほぼ中央付近では屈曲し、N45°W となっている。また、東京湾北部断層の両側では、地層は東落ち、走向は概ね北東-南西のであるが、断層に近いところでは、断層に引きずられるような形で、北西-南東の走向

となっている。海面下2,380msec(深さ約3,000m)における瞬間位相タイムスライス(Fig.7)では、断層の両側の地層の走向が断層を境にして変化しているのが明瞭に認められる。

また、各層準の地質スライスを重ね合わせてみると、東京湾北部断層が認められる位置には有意な違いが認められない。したがって、東京湾北部断層は、極めて高角の断層であることはわかるものの、正断層か逆断層かは判断できなかった。

③ その他

調査海域内では、東京湾北部断層以外に、顕著な断層構造は認められない。

## 4. 考察

今回の調査の結果、東京湾北部断層は、通常の垂直方向の断面では海面下約2秒(深さ約2,300m)以浅においてはあまり認識できないものの、水平方向の地質スライスを参考とした地質断面の解析によれば、海面下約1秒(深さ950m)付近の上総層群上部までを変位させていることが明らかとなった。しかし、海面下0.6秒におけるスライス(上総層群最上部に相当)では、東京湾北部断層を示す地層の変形は全く認められなかった。

防災科学技術研究所の下総深層観測井(千葉県東葛飾郡沼南町)において、反射法音波探査が行われ(山水ほか, 1993), 孔井地質(鈴木ほか, 1981)との対比がなされている。これらの成果をもとに今回得られた音波探査断面記録との対比を行う(Fig.11)と、東京湾北部断層は上総層群上部に対比される層のうち、最上位の層は変形させていないものと結論される。

上総層群上部は中期更新世の前期(約40万年から70万年前)と考えられるので(菊地, 1986), 東京湾北部断層の活動は少なくともこの時期までは活動していることになる。

東京湾北部断層の最後の活動については、上総層群中にしばしば形成されている不整合により、変位の累積やその後の活動の歴史が消去されている可能性がある。また、堆積層が厚いので、たとえ地下では震源断層として東京湾北部断層が活動したとしても、地震断層として表層堆積物までには変形を及ぼすとは限らないとの考えもある。しかし、地層の変形が認められる上総層群相当層では撓曲(断層)をはさんだ両側で、堆積層厚の差異が認められることから、地層の変形と堆積時期はほぼ同時期であると考えられ、かつ、この上位の堆積層が変形を受けていないことから、同断層は伏在断層として上位の堆積層の堆積後は活動しなかったと考えられる。また、音波探査記録によれば、少なくとも下総層群相当層には撓曲等の変形が認められないことから、たとえ

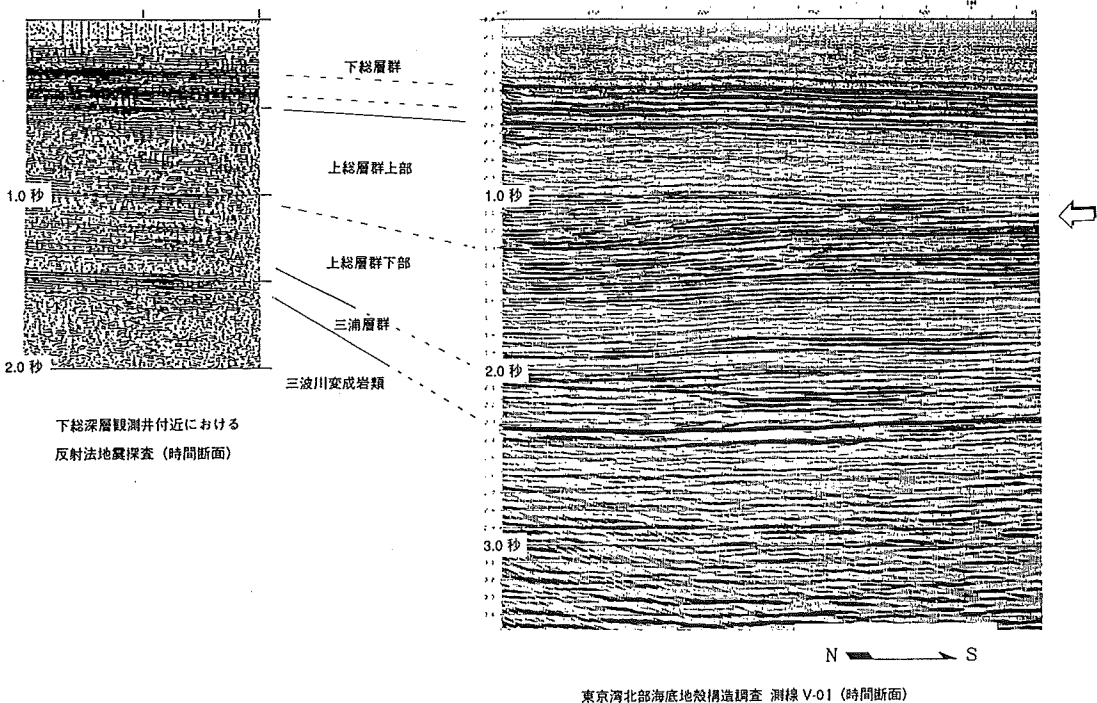


Fig.11 Correlation of the seismic records of the Tokyo Bay and the Shimousa deep drilling hole (Suzuki et al., 1981; Yamamizu et al., 1993). An arrow indicates Tokyo Bay unconformity (Nirei, 1982).

不整合により、過去の活動の歴史が消されているとしても、少なくとも後期更新世の下総層群相当層に変形が及んでいない。したがって、過去数十万年間は活動していない東京湾北部断層が、近い将来に活動する可能性は低いと考えられる。

今回の調査の結果、東京湾北部断層は、 $N30^{\circ}E$  (調査海域中央では一部  $N40^{\circ}E$ ) の走向をもつことが明らかとなった。Fig.12に重力異常から推定される関東地方の基盤と基盤上の断層 (植田ほか, 1987; 多田1983) 及び今回の結果明らかにされた東京湾北部

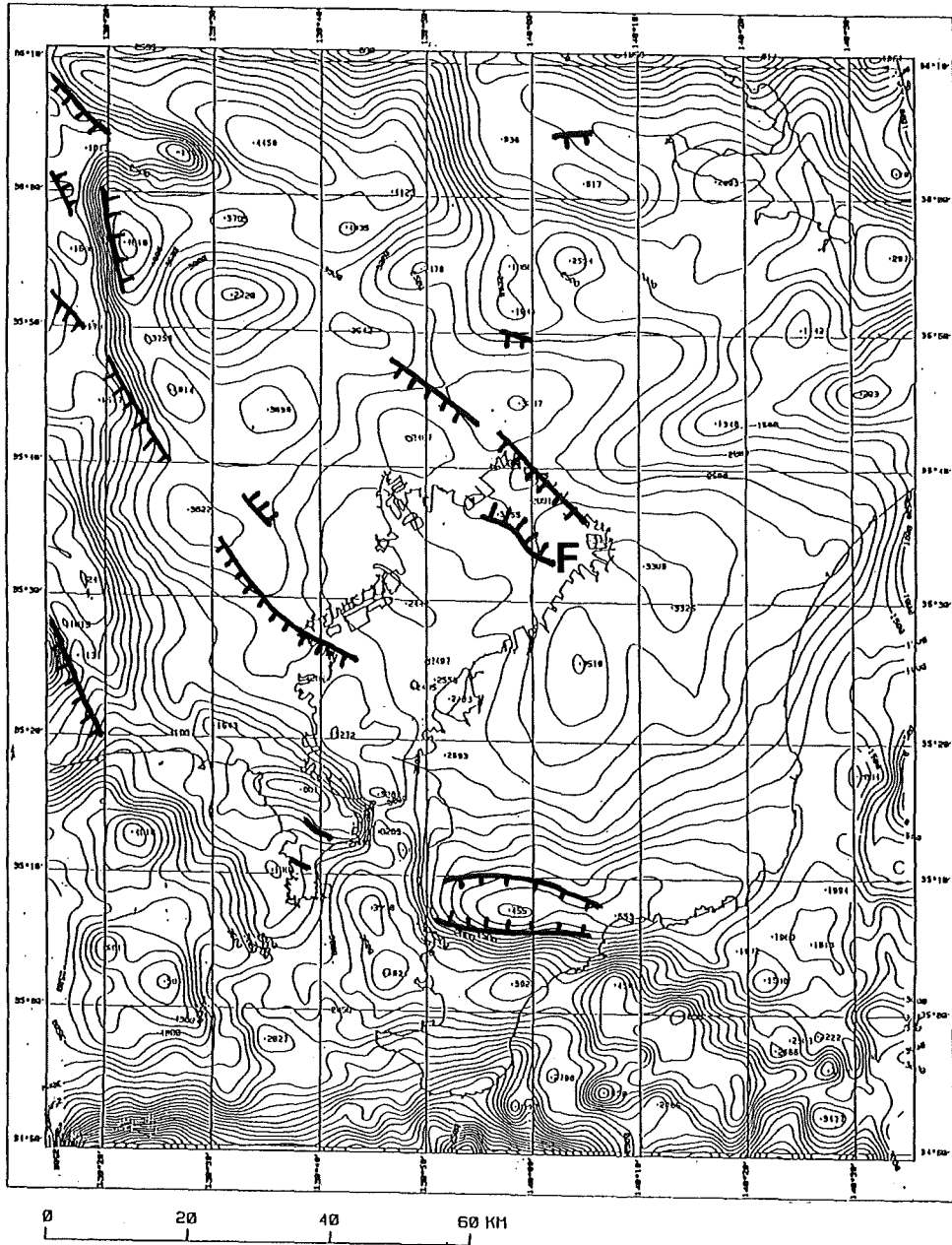


Fig.12 The basement structure of the Kanto Area (modified from Tada, 1983 and Ueda et al. 1987) and the Tokyo Bay northern fault. Gravity basement is by Ueda et al. (1987). Basement contour interval is 250m. F: The Tokyo Bay northern fault (this study)

断層を示す。東京湾北部断層は、重力異常から推定される東京湾北縁の断層と対をなしているように見える。また、同断層の傾斜が急であることは判ったものの、正断層であるか、逆断層なのかは音波探査記録からは判断できなかった。

東京湾北部における地質スライスでは、東京湾北部断層をはさんで両側の地層の走向が、断層の影響により変化し、水平的には地層が左横ずれ断層により引きずられているようにも見える。地層の走向とは、地層面が水平面と交わる線の方向である。このため、地層の傾斜が小さいときには、地層のわずかな変形も走向に大きく影響を与えることになる。本海域における地層は東に小さく傾いていることから、地層の走向の変化は断層の垂直方向の変動による地層面の変形を反映しているのであって、左横ずれの運動を示すものではないことが判る。

フィリピン海プレートの北西進に伴い、相模トラフでは右横ずれ成分を伴ったフィリピン海プレートの沈み込みが行われていると考えられている(中村・島崎, 1981)。房総半島は東北日本側から相模トラフ向かって突き出るような形となっていることから、同半島にもフィリピン海プレートの北西進による北西向きの力が働くものと予想される。従って、房総半島の付け根に相当する東京湾奥部に、左横ずれ断層が存在するとは考えにくく、地質スライスに認められる地層の走向の変化が、東京湾北部断層の左横ずれ成分によるものではないと考える方が合理的であろう。

更新世中期以降に首都圏が属する東北日本が従来からのプレートから分かれ、新たなプレート(中村, 1983; 小林, 1983によれば北米プレート, 石川・干, 1984によればオホーツクプレート)に属するようになり、フィリピン海プレートとの相対運動が変化したと考えられていることから、ちょうどこの時期に東京湾北部断層の活動が停止したのは、プレートの相対運動の変化と関係しているのかもしれない。

## 5. まとめ

顕著な断層が存在することが知られている東京湾の北部において、断層の詳細な構造を明らかにすることを目的として、三次元のデータ解析を行うために極めて密な間隔でマルチチャンネル音波探査を行った。得られたデータをもとに、通常の垂直方向の地質断面に加え、水平方向の地質断面(スライス)や測線のない方向の地質断面等を作製した。この結果、東京湾北部断層は、N30°E(調査海域中央では一部 N40°E)の走向ではほぼ垂直な断層面を持つこと、更新世中期以降は活動していないことが判った。

## 謝 辞

本研究は、現地作業および資料解析に従事された株式会社地球科学総合研究所の方々の努力によるところが大きい。また、現地作業において千葉海上保安部の方々には作業の安全について多大なご協力を頂いた。さらに、本研究の計画・推進に尽力された科学技術庁研究開発局防災科学技術推進室の方々、海上保安庁水路部企画課および沿岸調査課の方々には終始ご支援頂いた。これらの方々に深く感謝の意を表します。

## 参 考 文 献

- 遠藤秀典・渡辺史郎・牧野雅彦・長谷川功・杉山雄一; 綾瀬川断層の地質構造調査, 第四紀学会講演要旨, 23, 90-91, (1993)
- 萩原幸男・村田一郎・長沢工・大久保修平; 東京湾北部断層内陸延長部の重力調査, 測地学会第65回講演要旨, 81-82, (1986)
- 石川有三・干龍偉; 東アジアのテクトニクス, 地震学会講演予稿集, 2, 15, (1984)
- 笠原敬司・山水史生・井川猛・足立幾久; 関東平野トランセクト一川越一関宿測線における平野部活断層の地震波反射面一, 地震学会講演予稿集, 2, 262, (1993)
- 加藤茂; 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, (1984)
- 菊池真一・菊地隆男; マルチチャンネル反射法音波探査記録からみた東京湾浅部の地質構造, 水路部研究報告, 27, 59-95, (1991)
- 菊地隆男; 日本の地質 3, 関東地方(日本の地質「関東地方編集委員会」編), 共立出版, 140, (1986)
- 小林洋二; 月刊地球, 5, 510, (1983)
- 中村一明・島崎邦彦; 相模・駿河トラフとプレートの沈み込み, 科学, 51, 490-498, (1981)
- 中村一明; 地震研彙報, 58, 711, (1983)
- 楡井久; 地団研専報, 24, 79, (1982)
- 鈴木宏芳・池田隆司・御子柴正・木下繁夫・佐藤春夫・高橋博; 関東・東海地域における孔井検層資料集, 防災科学技術資料, 65, 22, (1981)
- 多田堯; 関東平野の基盤構造と重力異常(2)—活断層の地球物理学的研究, 地震 2, 36, 359-372, (1983)
- 植田義男・中川久穂・平岩恒広・朝尾紀幸・久保田隆二; 東京湾・南関東周辺の重力異常と深部構造, 水路部研究報告, 22, 179-206, (1987)
- 山水史生・笠原敬司・鈴木宏芳・井川猛・足立幾久; 下総深層観測井における反射法音波探査, 地震学会講演予稿集, 2, 261, (1993)
- 矢島敏彦; 関東平野基盤岩類の岩石学的特徴と地質構造, 地質学論集, 20, 187-206, (1981)