

# 関東平野沿岸域の地震動特性と 広域地下水流動系の解明に関する地質学的総合研究

## Integrated Research of geology to contribute to clarification of seismic ground motion and regional movement of underground water in the Kanto Plain

木村克己<sup>1</sup>・水野清秀<sup>1</sup>・山口和雄<sup>1</sup>・安原正也<sup>1</sup>・駒澤正夫<sup>1</sup>・関口春子<sup>2</sup>・宮越昭暢<sup>3</sup>・田辺 晋<sup>1</sup>・  
小松原純子<sup>1</sup>・竹村貴人<sup>4</sup>・石原与四郎<sup>5</sup>・加野直巳<sup>1</sup>・大滝壽樹<sup>1</sup>・住田達哉<sup>1</sup>・伊藤 忍<sup>1</sup>・  
横倉隆伸<sup>1</sup>・稲村明彦<sup>1</sup>・森川徳敏<sup>1</sup>・中澤 努<sup>1</sup>・山口正秋<sup>1</sup>・吉田邦一<sup>2</sup>・小田匡寛<sup>6</sup>  
K. Kimura<sup>1</sup>, K. Mizuno<sup>1</sup>, K. Yamaguchi<sup>1</sup>, M. Yasuhara<sup>1</sup>, M. Komazawa<sup>1</sup>, H. Sekiguchi<sup>2</sup>,  
S. Miyakoshi<sup>2</sup>, S. Tanabe<sup>1</sup>, J. Komatsubara<sup>1</sup>, T. Takemura<sup>4</sup>, Y. Ishihara<sup>5</sup>, N. Kano<sup>1</sup>,  
T. Ohtaki<sup>1</sup>, T. Sumita<sup>1</sup>, S. Ito<sup>1</sup>, T. Yokokura<sup>1</sup>, A. Inamura<sup>1</sup>, T. Morikawa<sup>1</sup>, T. Nakazawa<sup>1</sup>,  
M. Yamaguchi<sup>1</sup>, K. Yoshida<sup>2</sup> and N. Oda<sup>6</sup>

**keywords** : Kanto plain, seismic wave, underground water, Chuseki-so, Holocene, Pleistocene, borehole survey, seismic reflection survey, gravity, engineering geology,

### 1 はじめに

研究調査データが蓄積された関東平野臨海部の浅層地盤（支持層以浅；70m 以浅）と中層地盤（1km 以浅）の地下地質構造を対象として、沿岸域の地質・活断層調査研究に不可欠な研究手法の開発を進める。そして、首都圏の安全と環境保全に資する研究成果を得ることを目的にして、中層地盤課題では、更新統の堆積・年代層序、地質構造、地質・物性対比の標準を構築するとともに、地下水の水質分布特性と地質・水理地質構造モデルを明らかにし、地下水の水質形成・広域流動機構をモデル化すること、浅層地盤課題では、沖積層の堆積・年代層序と地質・物性対比の標準を整備するとともに、ボーリングデータベースと3次元地質モデルを構築し、軟弱地盤の土質力学特性と地震動応答特性を解明することをそれぞれ目標に設定し、研究を行った。

### 2 中層地盤課題の内容と成果

#### 2.1 ボーリングコア解析による地下地質層序及び地質構造の確立

関東平野中央部における地下地質について、基準となる層序、地質・物性の対比標準を構築するために、ボーリング調査とコア解析を行った。平成 18-19 年度において、関東平野中央部の埼玉県菖蒲町で実施した 350m 長のオールコアボーリング調査（菖蒲コア）と PS 検層を実施した。今年度は、その菖蒲コアの解析の結果に関して、関東平野中央部の模式層序として、層相区分、珪藻分析による海成・非海成層区分などをとりまとめ公表した（山口ほか、印刷中）。このコアの層序と P 波速度は、つぎで紹介する反射法探査断面においてすぐれたリファンレンスとなることが判明した。すなわち、反射断面の主要な反射面が菖蒲コアの地質柱状図における礫層の上面にほぼ対比できた。この礫層は海進・海退サ

<sup>1</sup> 産業技術総合研究所 地質調査総合センター 地質情報研究部門 (AIST, Geological Survey of Japan, Institute of Geology and Geoinformation)

<sup>2</sup> 産業技術総合研究所 地質調査総合センター 活断層センター (AIST, Geological Survey of Japan, Active Fault Research Center)

<sup>3</sup> 産業技術総合研究所 地質調査総合センター 地圏資源環境研究部門 (AIST, Geological Survey of Japan, Institute for Geo-Resources and Environment)

<sup>4</sup> 日本大学文理学部 (Nihon University of Humanities and Science)

<sup>5</sup> 福岡大学理学部 (Faculty of Science, Fukuoka University)

<sup>6</sup> 埼玉大学大学院理工学研究科 (Graduate School of Science and Engineering, Saitama University)

イクルで形成される地層の基底をなすことから、地層対比の有効な鍵層として利用できる。

また、広域テフラ及び特徴的な花粉群集・珪藻群集による特定層準の認定をもとに、埼玉県下の 300～500m 級コア間の概略的な対比を行い、海進・海退サイクルによる地層対比が下総層群に限定されること、50 万年程度の期間にわたって局所的に厚い扇状地礫層が発達すること、上総層群中に広域的な不整合が存在する可能性があることが明らかとなった。

115 万年前の上越テフラの層準を反射法探査断面に投影することによって、その綾瀬川断層による上下変位は 150m 程度に及び、また久喜断層による変位はほとんどないと推定された。

## 2.2 反射法探査と地下地質構造

基準となる地下地質構造を得るために、北西-南東方向に延びる堆積盆を横断する北東-南西方向の探査測線、すなわち、加須低地-大宮台地-荒川低地-入間台地を横断する 30km 長の測線に沿って、反射法探地震査を実施してきた（山口ほか、2006、2007、2008）。今年度はそれらを統合した解析を行い、1km 深度まで極めて明瞭な反射断面を得た。そして、菖蒲コアの地質柱状図と対比することで、層序・構造の解釈を行い、綾瀬川断層以外の元荒川構造帯（久喜断層やそれに並行な線状構造）の地下では活断層であることを示す地層変形がほとんど認められないこと、荒川低地から大宮台地にかけて深度 1km 付近に累積変形を示す向斜構造が存在することが明らかになった（山口ほか、2008）。

## 2.3 重力探査と地下地質構造

埼玉県の草加地域について、測点間隔 50～300m の精密測定による 470 点程のデータを編集し 3 次元解析を行った。その結果、中川に沿って南北に低重力異常が伸びており、河床堆積物の分布と整合するが、調査域の南側でも中川の西側に広がっているのが判明した。これはかつての河川の痕跡を表しているものと考えられる。

東西方向については東側へ（中川に向かって）数 10m から 100m 程度に深くなっていく構造が得られ、地震探査の結果と整合する。

埼玉県の鴻巣-菖蒲地域でも測点間隔 300～500m の 540 点程の重力データを編集し、3 次元解

析を行った。その結果、鴻巣一行田の深度数 km の盆状構造による低重力異常が鮮明になった。しかし、久喜断層が想定されているところでは北東方向に単純に重力異常の増加はみられるが明瞭な密度変化を伴う構造は検出されなかった。この結果は、上記の反射法探査の結果と調和的である。

## 2.4 地下水の地球化学的特性分布の把握と水文プロセスの解明

本課題では、地下水システムを再現する上で鍵となる地下水の地球化学的特性とその詳細な空間分布を明らかにし、地下水の水文科学的特性と層序・地質構造との関係を検討している。地下水研究のポイントは、関東平野中央部において、北西-南東に延びる綾瀬川断層と想定久喜断層との間に胚胎する停滞した地下水塊の実態とその原因解明である。

これまでに、関東平野中央部全域の地下水の水質調査を進めてきている。今年度は、荒川右岸地域、埼玉県熊谷地域、茨城県南部地域、千葉県北西地域、東京都区部における水源井から採取した水試料に基づき、関東平野中央部における地下水の水質と同位体組成の空間分布を詳細に検討した。また、春日部オールコアボーリング試料から抽出した間隙水について同様の分析を行い、地下水の地球化学的鉛直構造の解明を進めた。その結果、綾瀬川断層と想定久喜断層とに挟まれた、いわゆる“元荒川構造帯”の内部とその外部においては、両者の地下水システムには著しい違いが存在することがさらに明確になった。この地下水システムを再現する目的で、シミュレーションモデルの構築に着手した。

一方で、今後の都市地下水研究に資する目的で、本調査の過程で明らかとなった関東平野全般（林・安原、2008）と東京都区部（稲村・安原、2008）の地下水の性状や起源、水理構造に関する新たな知見を纏めて公表した。

## 3 浅層地盤課題の内容と成果

### 3.1 沖積層地質モデルの構築

首都圏東部地域の沖積低地において、標準となる層序・堆積相、地質・物性対比の標準を構築することを目的にして、オールコアボーリング調査とコア解析、PS 検層を行う（木村、2004）。これまでに 10 地点においてオールコアボーリング調査（50-70m 長）、20 地点のオールコアの高精度解析を実

施し、それらの解析結果を論文にしてまとめてきた（宮地ほか，2004；木村ほか，2006；木村・石原，2009；田辺ほか，2008，2009b）。今年度は、荒川低地中流域での検討を新規に進めるために、埼玉県さいたま市桜区においてオールコアボーリング調査（GS-SSS-1）とPS検層を実施し（第7図）、コア試料の堆積相，物理特性，化学元素含有量，放射性年代を解析した。

それらの結果から，下位から礫質河川堆積物（深度40-31 m），砂質河川流路堆積物（深度31-28 m），氾濫原堆積物（深度28-20 m），内湾堆積物（深度20-16 m），デルタフロント堆積物（深度16-7m），氾濫原堆積物（深度7-1m）からなることを明らかにし，これまで荒川低地で掘削された標準層序ボーリングコアの解析結果に基づき，埋没谷の埋積過程を復元した。

GS-MUS-1 コア（埼玉県三郷市采女新田地区，42m長，H18.12月掘削）については27点，GS-ISH-1 コア（千葉県市川市塩浜4-5-1塩浜小学校内，60m長，H19.2-3月掘削）については25点，GS-KSM-1 コア（東京都江東区潮見1-1-1潮見運動，85m長，H19.8-9月掘削）については24点の放射性炭素年代値を測定し，それらの年代・深度分布を明らかにした（第8図）。

こうした層序・堆積相の解明により，東京低地，中川低地，荒川低地における沖積層の形成過程とその堆積環境の違いをより明らかにすることができた。

### 3.2 ボーリングデータベースと3次元地質モデルの構築

地下地質情報のデータベース構築を目的に，国・自治体・公益法人から地質調査報告書ならびにボーリング柱状図資料を借用し，そのアーカイブ化と電子化によるボーリングデータベースの整備を進めている。今年度は，データ収集では，荒川低地付近の鳩ヶ谷市・戸田市の市役所，国交省の荒川河川事務所等からボーリング調査報告書を借用し，昨年度と合わせて計1232地点のボーリングデータをデータベースに追加した。このボーリングデータベースに基づき，臨海部を除く，首都圏東部の沖積層低地における沖積層基底等高線図を作成した（田辺ほか，2009a）。第7図は，荒川低地付近の沖積層基底等高線図を示す。3次元モデルについては，N値・土質のグリッドモデルの作成手法（江藤ほか，2008）の改良を行い，土質の最頻値に依存したN値の分布

モデルと各グリッドのデータ精度を評価する手法を検討した。そして，東京低地北部から中川低地中・南部の東西13×22kmの範囲において，ボーリングデータベースを利用して，土質と土質依存型のN値分布のグリッドモデルを作成した。このグリッドモデルに基づいて，地震動応答評価で用いるS波速度の地盤物性モデルを検討した。

### 3.3 浅層地盤における沖積粘性土の地盤工学的特性

地震動特性評価に必要な動土質特性値の解明を目的に，軟弱地盤をなす沖積粘性土の動土質特性を室内試験で検討している。実験手法は今年度までにほぼ確立できた。

昨年度は，超鋭敏粘性土が卓越する春日部地域のボーリングコア（GS-KBH-1；中西ほか，投稿中）について動土質特性の試験を行った。埼玉県春日部地域は，大正関東大地震において震度7に相当する被害が発生しているので，超鋭敏粘性土との因果関係に注目している。今年度は超鋭敏粘性土と通常の粘性土との比較を行うために，埼玉県の上戸田地域のボーリングコア（GS-TKT-1；小松原ほか，投稿中）を対象として，基礎物理試験、圧密試験、ベンダーエレメントによる弾性波速度の測定、繰返し非排水圧三軸圧縮試験（第9図）を実施した。同地点の土質特性は東京低地・荒川低地の典型的なものである。春日部地域の実験結果との比較によって，つぎのことが明らかになった（小田ほか，2009）。①ベンダーエレメントとPS検層とによる弾性波速度 $V_s$ には両地域ともにより相関性が認められ，せん断剛性率 $G_0$ が含水比と深度でつぎのように表現できる。 $G_0 = a \sqrt{z/w}$  (MPa) ただし， $a=441$  春日部地域， $334$  上戸田地域。②繰返し非排水三軸圧縮試験結果は，両地域の沖積粘性土に関する繰返し剪断応力-剪断歪関係は，Hardin-Drnevichモデルで表現でき，その妥当性が確認された。そして，そのモデルのパラメーターである初期接線剛性，基準歪，最大減衰定数は補正含水比を使って表せる。③春日部地域の粘性土は上戸田地域に比べて，剪断剛性が低く歪依存性が小さい。

以上の結果は，地震動評価において主要な土質定数である動土質特性が，深度と含水比，あるいはコンシステンシー指数を用いて表現できることを示している。

今後はその普遍性を確かにするために，他の地域

にて同様の実験を行うとともに、既存のボーリング調査地点における粘性土の含水比・コンシステンシー指数と、PS 検層データとの比較検討を行う。そして、引き続き、超鋭敏粘性土の形成機構とその堆積環境との関係について、粘性土の組成・化学特性・粘土の構造から、検討を進める。

### 3.4 地震動の応答特性評価に関する研究

沖積層の地盤物性モデルを用いて大正関東地震の地震動の再現シミュレーションを実施した。また、中川低地観測網の地震記録、および、同地域で実施した微動アレイ観測の記録を用いて表面波の位相速度を求め、地質構造の推定を行った。

#### 大正関東地震の地震動の再現シミュレーション

シミュレーションの結果は、最大速度の増幅率において、大正関東地震の被害から推定された震度分布との相関性が高く、沖積層の厚さよりも、軟弱な粘性土の厚い地域で増幅度が大きい傾向が得られた。しかし、必ずしも一致しない点も少なくなく、溺れ谷など狭い範囲に厚い沖積層が細長く分布しているところ、沖積層の基盤をなす更新統において谷埋め粘性土が厚く分布する地域、沼地などの埋め立て地などの悪い地盤の土地利用である地域では、最大速度の増幅度が震度分布よりも明らかに低めに出ている。来年度はこうした条件を地盤物性モデルに組み込めるように研究を進める予定である。

#### 表面波位相速度の推定

防災科学技術研究所との共同研究のもと、平成 15 年度から、埼玉県東部の中川低地帯内外で自然地震の観測を行っている。この観測網の中心部は 1km 四方ほどの範囲に 9 地点が配されたアレイとなっている（第 10 図）。ここでこれまで得られた記録を用いてアレイ解析により表面波の位相速度を推定した。また、観測網の中心付近で微動アレイ観測を行い、位相速度を推定し、両者を比較した。

微動アレイ観測による位相速度と、地震動記録の解析による位相速度を比較する（第 11 図）。ここには、松岡・白石（2002）の速度構造モデルを参考に我々のサイトの速度構造モデルを作成し 2nd higher mode までの理論分散曲線を計算したのもも示す。微動の位相速度は、調整の余地は大きいものの、理論位相速度の基本モードと概ね一致する。よって、微動記録の表面波には、基本モードが卓越していると言える。地震動の位相速度は、0.8 ~ 1 Hz 付近で

は、理論位相速度の基本モードと 1st higher mode の周辺に分布し、それぞれ対応していることが伺える。一方、0.4 ~ 0.8 Hz では、微動から求められた位相速度よりもかなり速く、理論位相速度の 2nd higher mode より少し低い値で連なっている。この地震記録に見られる 0.4 ~ 0.8 Hz の正分散を示す位相速度は、検討の余地は大きいものの、2nd higher mode のレイリー波の存在を示唆している。この解析では、基本モードに対応する表面波の位相速度はまばらにしか見られなかった。

今のところ、解析に適切な記録が少なく、この波が 2nd higher mode のレイリー波であるとは断定できないが、微動と地震動で異なるモードが卓越していることが示唆されたことは興味深い。

来年度には、これまでに開発してきた各種の研究手法とそれらの手法を使って得た高精度な探査・分析データ、地質モデルについて、全体を統合し、高精度な地質モデル、地質形成プロセスに関する研究成果を基礎に、地震動評価、地下水の広域流動評価に関する総合的な研究成果の創出に向けて取り組む。

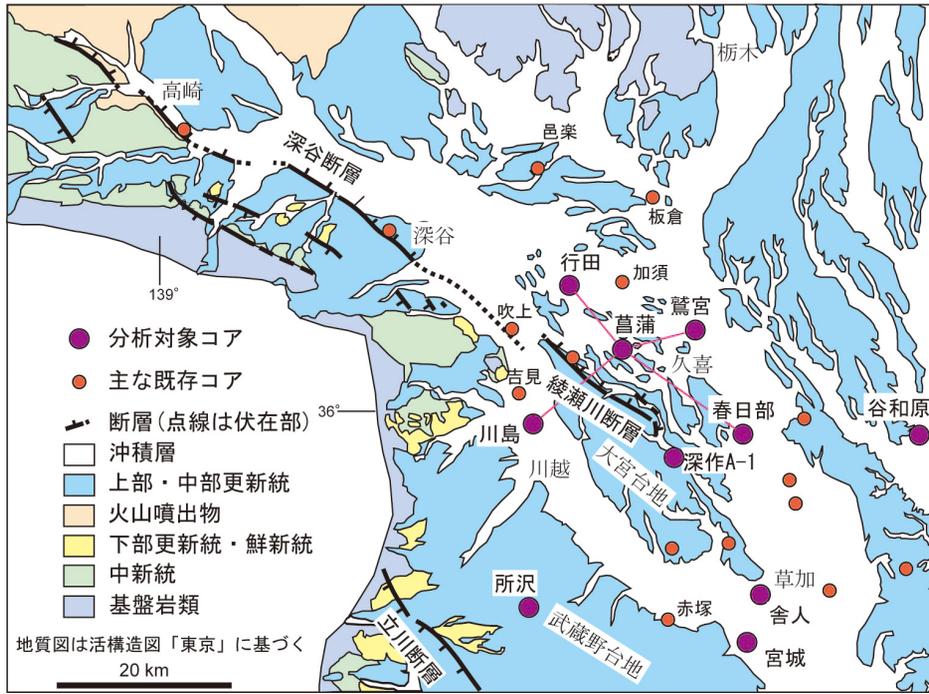
本研究は、下記の方々の研究協力を得て実施した。深く感謝します。

八戸昭一(埼玉県環境科学国際センター)、林 宏一(応用地質(株))、林 武司(秋田大)、稲崎富士(土木研)、川本 健(埼玉大)、宮下雄次(神奈川県温泉地学研)、中里裕臣(農村工学研究所)、中尾有利子(日本大学)、中山俊雄(都土木技術センター)、須貝俊彦(東京大学)、網田和宏(秋田大)、藪崎志穂(立正大)、の各氏。

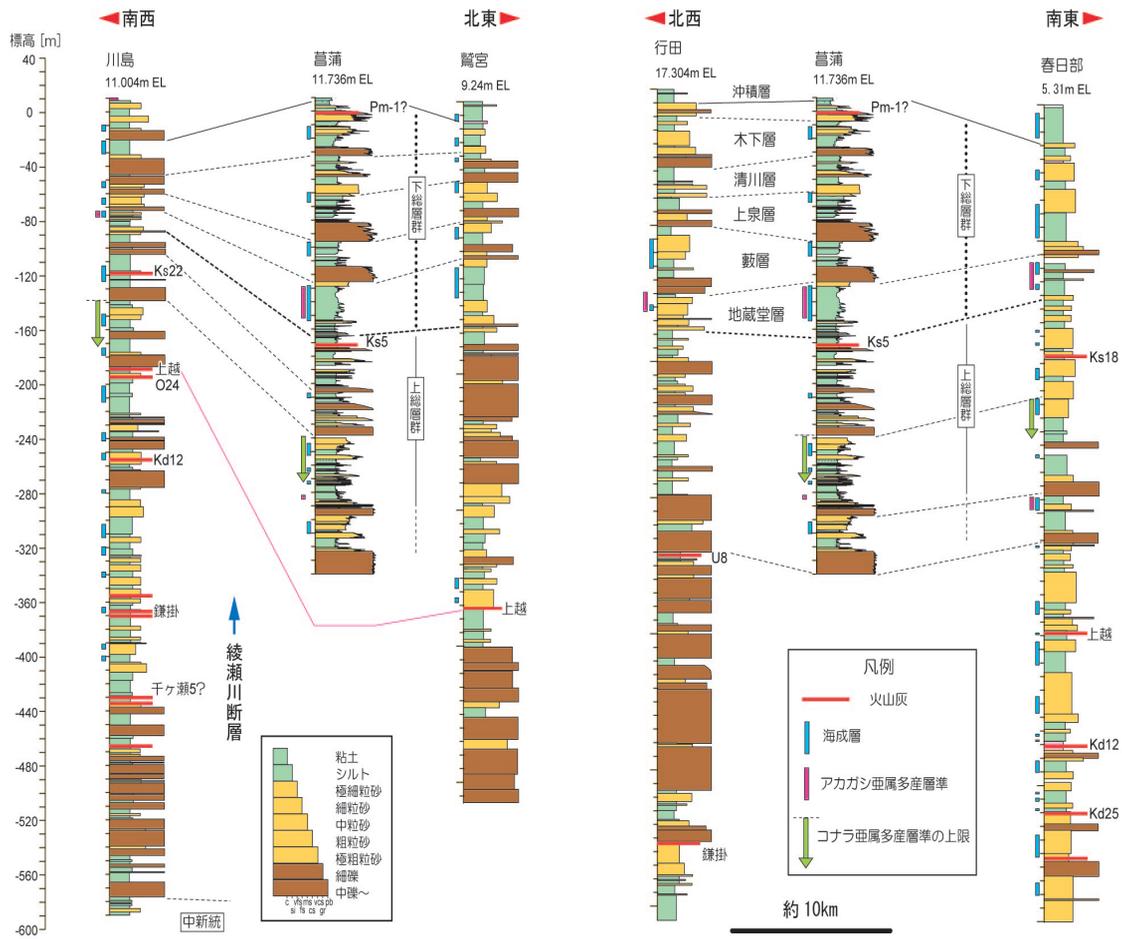
### 文献

- 江藤稚雅子・石原与四郎・田辺 晋・木村克己・中山俊雄：ボーリング柱状図資料を用いた N 値と岩相の 3 次元分布モデル—東京低地北部における沖積層の例—、地質学雑誌、114、187-199。
- 林 武司・安原正也、2008、地下水からみた関東平野の地下環境。第四紀研究、47、no.3、203-216。
- 稲村明彦・安原正也、2008、都市域における浅層地下水涵養源の同位体水文学的考察。日本水文学会誌、38、35-42。
- 関東平野中央部地質研究会編、1994、関東平野中央部の地下地質—ボーリングコアによる解析—、地団研専報、no.42、地学団体研究会、180p。

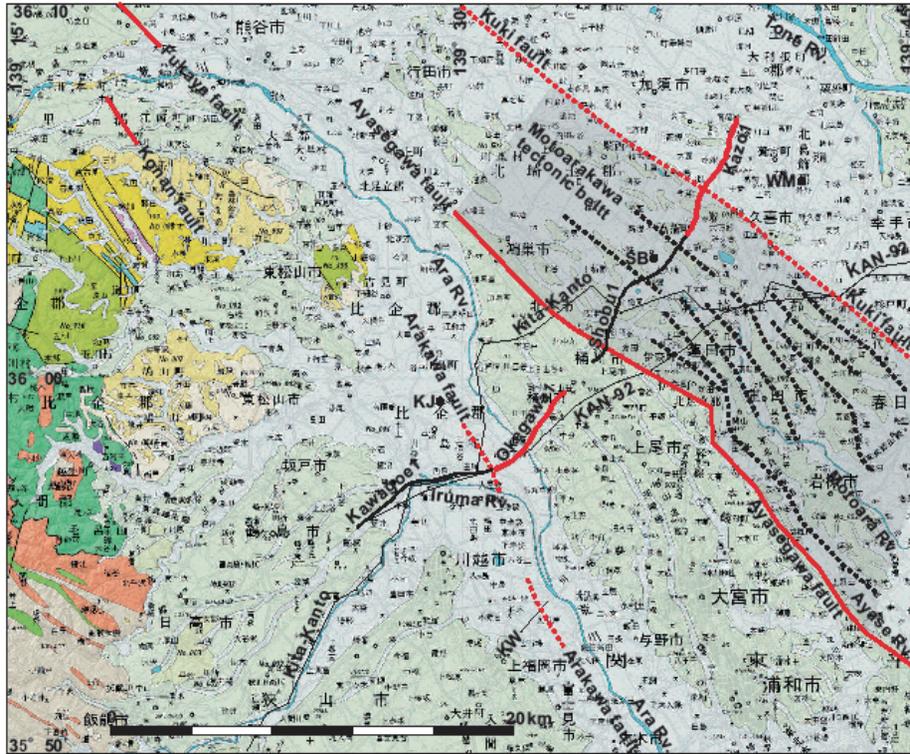
- 木村克己, 2004, 巻頭言: 都市地質研究の展開, 地質調査研究報告, 55, 181-182.
- 木村克己・石原与四郎・宮地良典・中島 礼・中西利典・中山俊雄・八戸昭一, 2006, 東京低地から中川低地に分布する沖積層のシーケンス層序, 地質学論集, no.59, 1-18.
- 木村克己・石原与四郎, 2009, 東京低地付近の沖積層を例とした沖積層研究の新展開, 土と基礎, 57,no.2,4-7.
- 宮地良典・木村克己・石原与四郎・田辺 晋・中島 礼・堀 和明・中山俊雄・斎藤文紀: 東京都江戸川区小松川地区で掘削された沖積層ボーリングコア (GS-KM-1) の堆積相・堆積物物性と放射性炭素年代. 地質調査研究報告, 55, 201-219.
- 納谷友規・山口正秋・水野清秀, 2009, 関東平野中央部埼玉県菖蒲町で掘削された 350m ボーリングコア (GS-SB-1) の珪藻化石産出層準と淡水成層準及び海成層準の識別. 地質調査研究報告, 印刷中.
- 小田匡寛・赤間友哉・田井秀迪・竹村貴人・木村克己・川本 健, 2009, 動土質から見た関東平野沖積地盤の特性, 都市問題研究シンポジウム「沖積平野の地盤・環境特性」講演論文集, 45-50, 大阪市立大学複合先端研究機構, 大阪市立大学都市研究プラザ.
- 田辺 晋・石原与四郎・中島 礼・木村克己・中山俊雄, 2008, 東京低地東縁における 2 本のボーリングコア堆積物の堆積相と放射性炭素年代: MZ コア (葛飾区水元公園), SZ コア (江戸川区篠崎公園), 地質調査研究報告, 59, 135-149.
- 田辺 晋・中西利典・木村克己・八戸昭一・中山俊雄, 2009a, 東京低地北部から中川低地にかけての沖積層の基盤地形, 地質調査研究報告, 59, 497-508.
- 田辺 晋・石原与四郎・中島 礼, 2009b, 東京低地北部における沖積層のシーケンス層序と古地理, 地質調査研究報告, 59, 509-547.
- 山口和雄・加野直巳・横倉隆伸・大滝壽樹・伊藤 忍, 2006, 荒川低地北部の浅部地盤地下構造, 活断層・古地震研究報告, no.6, p11-20.
- 山口和雄・加野直巳・住田達哉・大滝壽樹・牧野雅彦・横倉隆伸, 2007, 綾瀬川断層から加須低地に至る浅部地下構造, 活断層・古地震研究報告, no.7, 81-90.
- 山口和雄・加野直巳・大滝壽樹・住田達哉・横倉隆伸・牧野雅彦・伊藤 忍・横田俊之・木村治夫, 2008, 関東平野中部, 加須低地・荒川低地の浅部地下構造, 活断層・古地震研究報告, no.8, 119-131.
- 山口正秋・水野清秀・納谷友規・本郷美佐緒・中里裕臣・中澤 努, 2009, 関東平野中央部, 埼玉県菖蒲町で掘削された 350m ボーリングコア (GS-SB-1) の層相と堆積物物性. 地質調査研究報告, 印刷中.



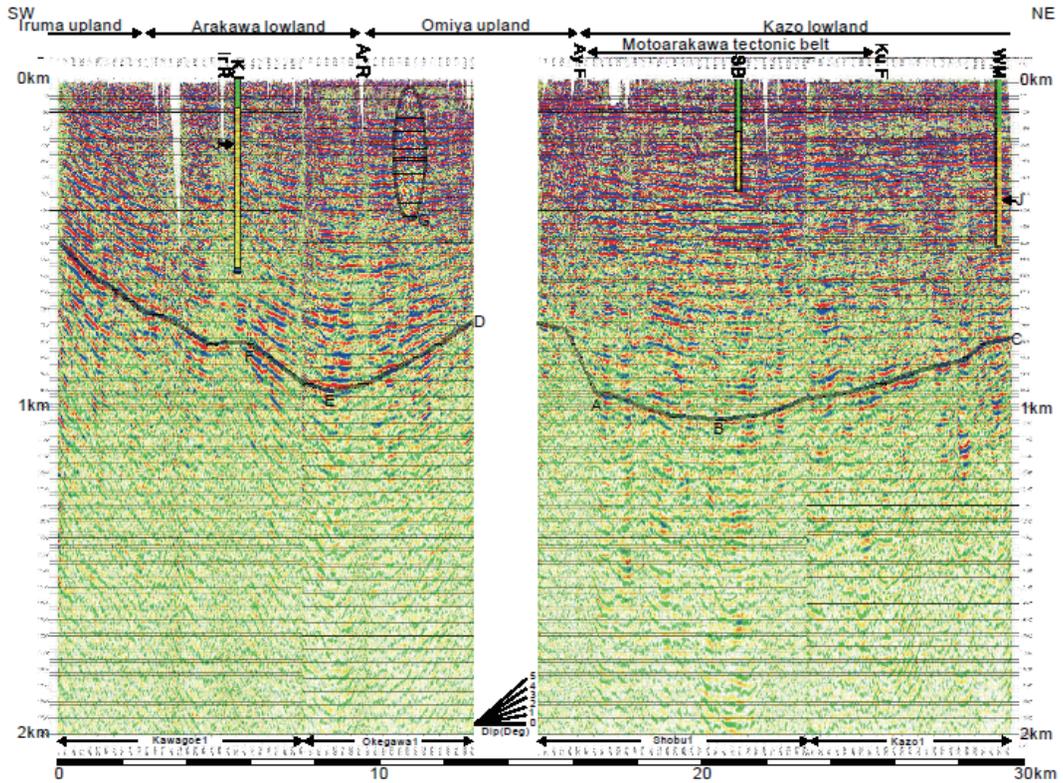
第 1 図 関東平野中央部の地質概略図。主要なオールコアの掘削地点の分布を示す。



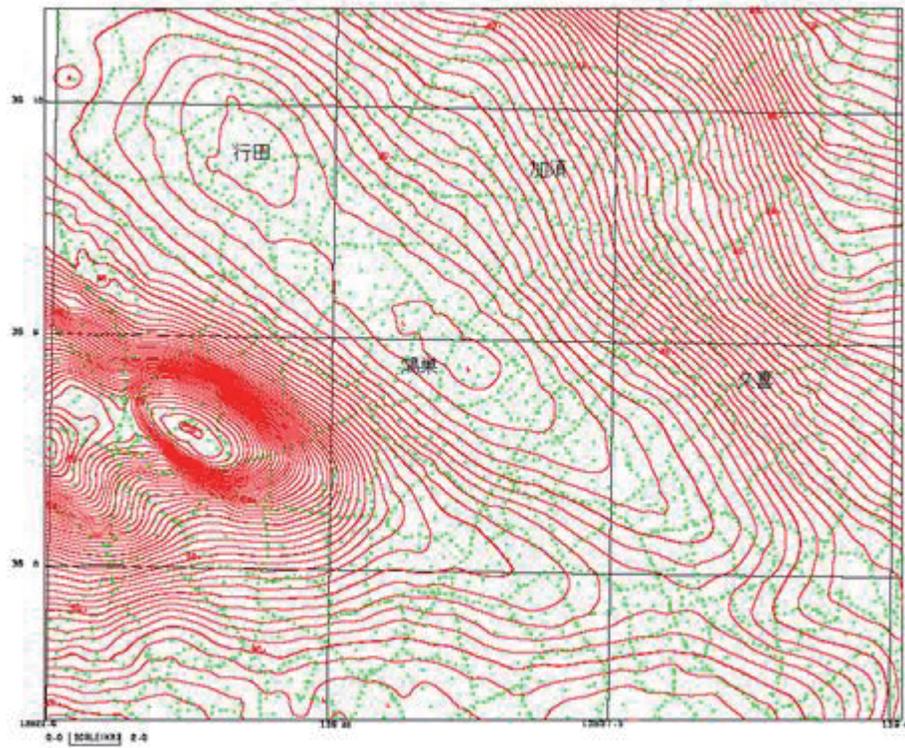
第 2 図 解析した主な既存コアの地質柱状図と様々な基準面による地層の対比：左から右へ、川島、菖蒲、鷺宮、行田、菖蒲、春日部の各コア。海成層認定や花粉分析結果などの一部は、関東中央部地質研究会編（1994）による。



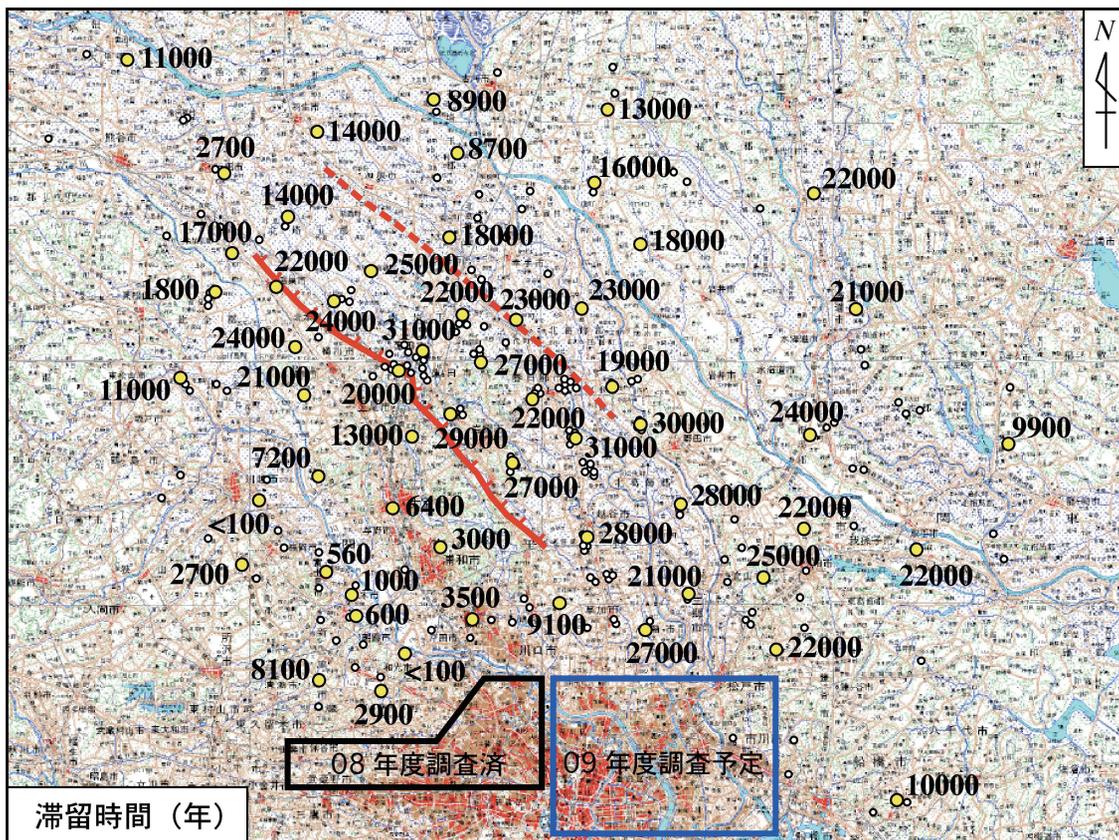
第3図 関東平野中央部における活断層と反射法探査測線の位置。  
基図として20万分の1日本シームレス地質図データベース2007年5月12日版を使用。(山口ほか, 2008)



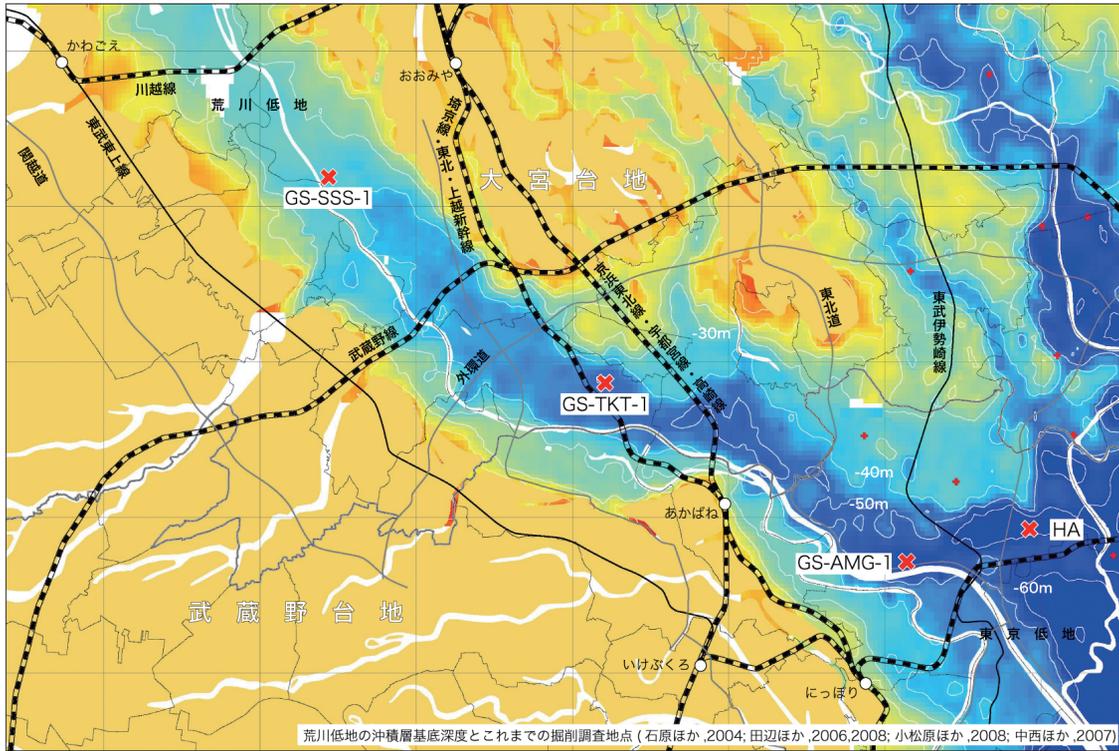
第4図 加須低地—大宮台地—荒川低地—入間台地を横断する約30km長の反射法地震探査の深度変換断面。縦横比は10:1。線ABCはBで最深となる反射面, DEFはEで最深となる反射面, Gは背斜状の構造を示す。断面上部に, 入間川 (IrR), 荒川 (ArR), 綾瀬川断層 (AyF), 久喜断層 (KuF), 元荒川構造帯の位置, ボーリング地点 (川島:KJ, 菖蒲:SB, 鷺宮:WM) の投影位置を示す。断面下部に測線名を示す。ボーリング柱状図は水野ほか (2008) による。(山口ほか, 2008)



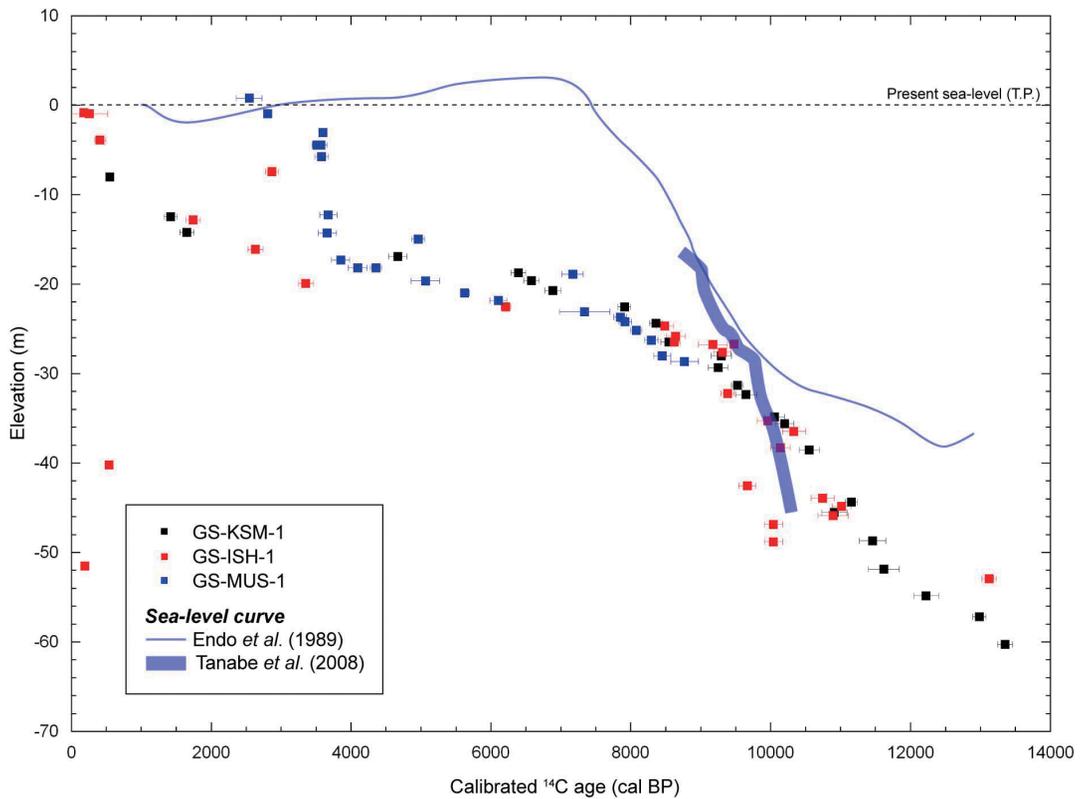
第 5 図 鴻巣 - 菖蒲地域の重力異常.



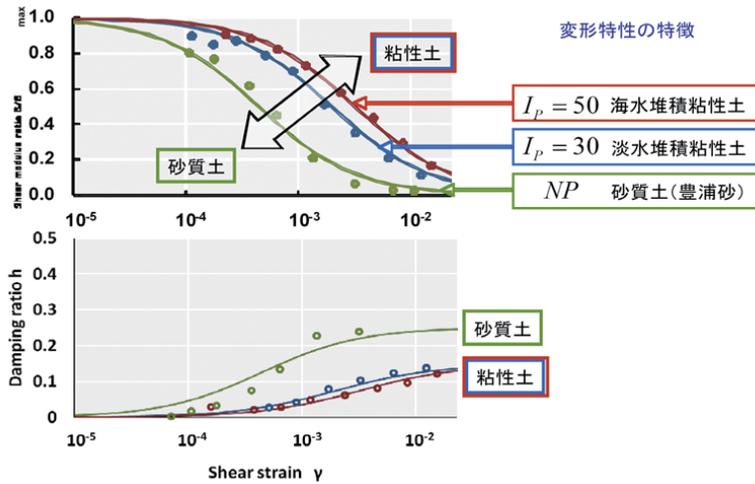
第 6 図 関東平野中央部の地下水の滞留時間分布.



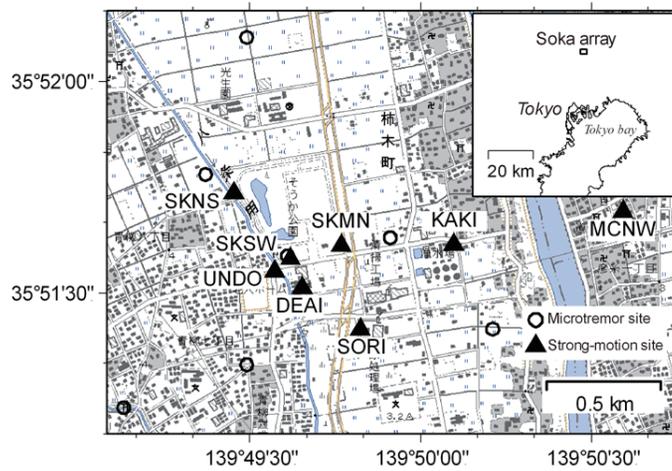
第7図 荒川低地付近の沖積層基底面の等高線図と掘削地点.



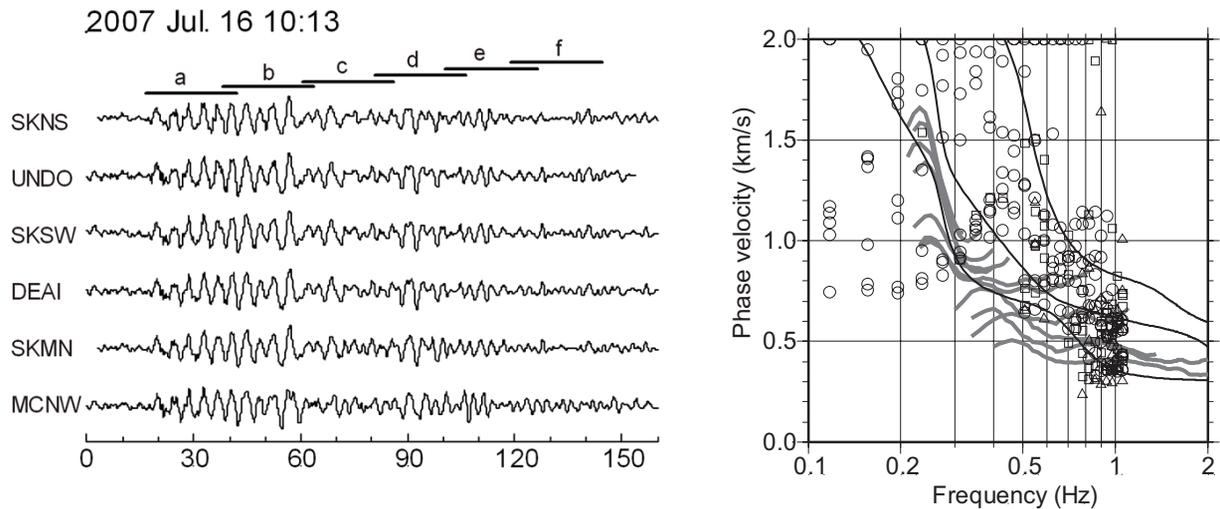
第8図 GS-KSM-1, GS-ISH-1,GS-MUS-1 の3本の沖積コア試料に関する放射性炭素年代値(暦年)とその堆積年代曲線.



第 9 図 春日部地区の粘性土に関する剪断剛性—剪断ひずみ曲線（上）と減衰定数—剪断ひずみ曲線（下）。



第 10 図 強震観測点と微動アレー探査（半径 1 km と 500 m）の観測点の位置。



第 11 図 (左) 2007 年新潟県中越沖地震による速度波形の上下動成分。(右) 地震動記録と微動記録（灰色）の解析から得られた位相速度と構造モデルからの理論計算による位相速度（黒実線）の比較。○、□、△はそれぞれ地震動記録の f-k スペクトル中最大、2、3 番目のピークから得られた値。理論計算による位相速度は 2nd higher mode まで示した。