

京都盆地の地盤震動特性と重力基盤

赤松純平・駒澤正夫 *

* 産業総合技術研究所

要旨

京都盆地の3次元重力基盤をモデル化し、基盤上面の深さと脈動の地盤による増幅率およびH/Vピーク周期との関係を調べた。得られた主な結果は以下のようである。

- (1) 重力基盤は、宇治川断層によって深さの異なる中北部と南部とに分けられる。
- (2) 盆地南部(巨椋池干拓地周辺)の深い基盤の凹地は山科盆地に繋がる。また、東大阪盆地北東部への開口部の基盤は、深く幅広い。
- (3) 脈動の増幅率と基盤上面の深さとは一定の関数関係がある。
- (4) 脈動のH/Vピーク周期と基盤上面の深さとは一定の関数関係があるが、京都盆地と山科盆地とではその関係は系統的に異なる。
- (5) 山科盆地の堆積層の密度は小さいこと、あるいは山科盆地の東西両縁での基盤岩の落ち込みは深部まで逆断層の形態であることが考えられる。

これらのことから、重力データと脈動資料とから地盤の震動特性を定量的に議論する上での指針が得られたと考えられるが、一方で今後の課題も明らかになった。

キーワード：構造盆地の重力基盤、ブーゲー異常、地盤増幅率、H/Vスペクトル比、山科盆地

1. はじめに

京都盆地においてはマイクロゾーニングを目的として未固結堆積層による脈動の増幅率の分布が調べられ(Akamatsu et al., 1992)、ブーゲー異常の分布と相関のよいことが知られている(Akamatsu et al., 1996)。すなわち、脈動の地盤上と岩盤との同時観測記録のスペクトル比から求めた地盤増幅率の大きい地域では、ブーゲー異常の負の値が大きい。このことは、構造盆地における脈動の地盤増幅率とブーゲー異常とが、ともに基盤岩の上面の深さ(以下基盤深度)の分布を反映していることを意味している。1995年の兵庫県南部地震以降、地震防災を目的として構造盆地の構造調査が各機関により進められている。京都盆地においても重力探査、反射法地震探査、深層ボーリング等が行われ盆地の地盤構造が明らかにされてきている(京都市、1999, 2000, 2001, 2002)。ここでは、最近収集された重力データを編集して検討した重力基盤構造と、脈動の増幅率およびH/Vのピーク周期との関係を議論する。

2. 重力測定とデータ解析

編集した重力データは、2000年以前に京都大学防災研究所、名古屋大学、滋賀県、地質調査所などによって測定された既存の1,770点と、京都市(2001)と京都大学理学部(伊藤、2002)による測点984点、2002年に盆地南西部と北部とで新たに測定した183点(駒澤・赤松、2003)である。この測定は、盆地内とのコントラストを明瞭にするために、盆地外縁部の山地を重点的に測定したものである。重力値はIGSN71に準拠させ、正規重力値は測地規準系1980による式を用いた。地形補正は、実際の地形を仮想扇形プリズムの集合体に近似して60kmの範囲まで、地球による曲率効果も考慮して行った。地形データは、500m以上は国土地理院による250mDEMを、500m以内は50mDEMを用いている。地形補正とブーゲー補正は、密度 $2.3\text{g}/\text{cm}^3$ を仮定した。これは、盆地内の密度は未固結堆積層のために小さく、また周辺山地は花崗岩等の基盤岩が露出しており大きいことが予想されるので、それらの平均的な値としたものである。結果をFig.1に示す。

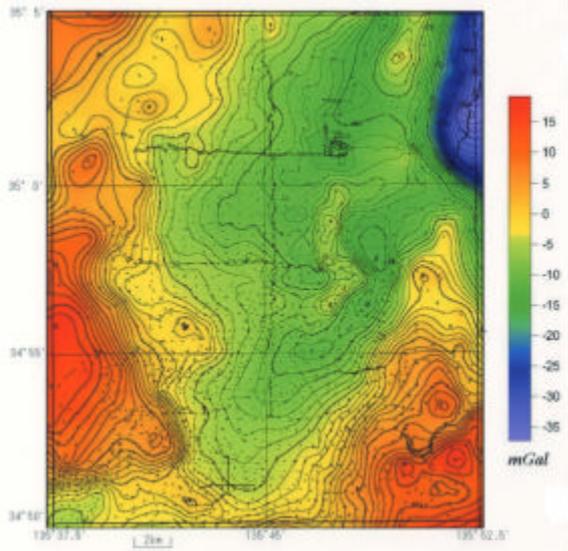


Fig. 1 Bouguer anomaly in and around Kyoto Basin. Assumed density = 2.3g/cm³. Contour interval = 1mGal.

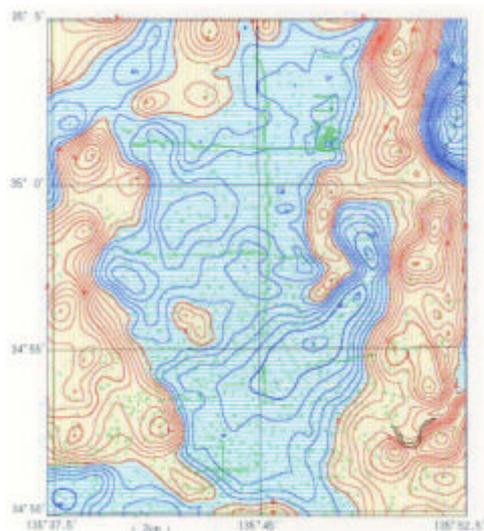


Fig.2 Residual Bouguer anomaly of upward continuation, up(50m) - up(5,000m). Contour interval = 1mGal

近畿地方には、地殻～沈み込み帯の深い構造を反映して、紀伊半島から琵琶湖にかけて重力値が小さくなる強い広域異常が顕著である。この影響を除去するために上方接続フィルターを用いた。接続高度は、約2km以浅の構造を対象とするべく5kmとした(Komazawa, 1995)。また、地表付近の微細構造や測定時の擾乱など短波長成分を除去するために接続高度50mの上方接続フィルターを併用した。なお、メッシュデータのグリッド間隔は250mである。Fig.2にこのようにして得られた残差ブーゲー異常図を示す。盆地南部の巨椋池を中心とする地域に-6mGalに達する大きな負異常があり、この負異常は東北方向の山科盆地に伸びてい

る。また、盆地北西部には-4mGalのやや大きい負異常が広がっている。ブーゲー異常図(Fig.1)では盆地構造は明瞭ではなかったが、残差ブーゲー異常図(Fig.2)では周辺の丘陵地域が正異常、盆地内が負異常と盆地構造がはっきり判る。特に、山科盆地では周囲の丘陵地の正異常とのコントラストが大きいことが注目されるが、このことから基盤の落ち込みの大きいこと、あるいは盆地内堆積物の密度の小さいことが想像される。

3. 重力基盤構造

Fig.2の重力異常を説明する基盤構造を2層構造(半無限+1層)に単純化して計算した。3次元解析に先立ち、京都市(2001)による反射法地震探査測線に沿う2次元解析を行って密度差などのパラメータを検討した。その結果、密度差として0.35g/cm³を与えた均質2層モデルが反射断面と整合性のよいことが判った。この結果を踏まえ、均質2層の3次元解析を反復修正法により行った。計算では、盆地周辺の基盤岩路頭、盆地内の2本のボーリングの着岩深度(京都市, 2001)、更に地震探査による反射深度の情報をコントロールデータとした。このようにして得られた結果をFig.3に示す。

京都盆地の基盤は、中北部の比較的浅い部分と南部の巨椋池周辺の深い凹地とからなることが判る。南部の凹地の北壁に沿って、最近宇治川断層が見つかった(京都市, 2002)。この凹地は北東方向に伸びて山科盆地に繋がる。なお、山科盆地は幅は狭いが京都盆地中北部よりも基盤が深く解析されたことが特徴的である。

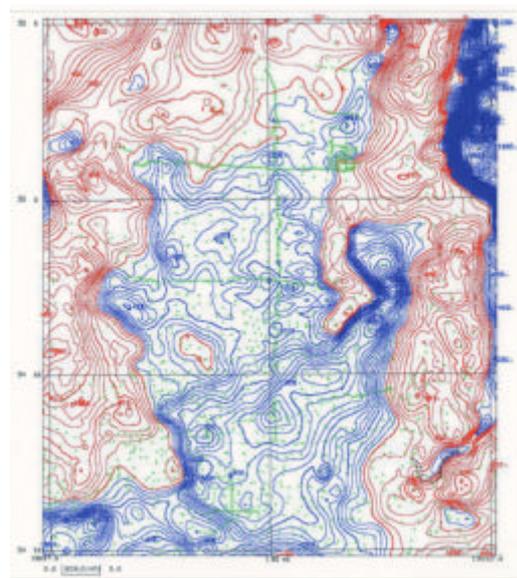


Fig.3 Gravity basement in Kyoto basin. Contour interval = 50m.

4. 脈動増幅率およびH/Vピーク周期と重力基盤深度

Fig. 4に、既往の研究から、脈動の地盤による増幅率の分布(Akamatsu et al., 1996)を引用した。脈動増幅率は、盆地南部の東の醍醐山系にある京都大学防災研究所醍醐地震観測室の観測横坑と地盤上でPELS(周期8~10秒)により同時観測された記録のスペクトル比から求められている。0.4-0.5Hzの周波数帯域の水平動(NS)成分の例では、盆地南部で約16倍、北部で約8倍の増幅率を示している。この増幅率のコンターの分布は、残差ブーゲー異常(Fig.2)の分布によく似ている。

Fig.5に3つの周波数帯域における増幅率と基盤深度との関係を示す。帯域幅は1/3オクターブで、オクターブ離れている。増幅率は水平2成分の幾何平均である。周波数が高いほどばらつきは大きいが、増幅率と基盤深度の間には周波数帯域に特有の一定の関係が認められる。ばらつきの原因として、サイト近傍の微細構造の影響と波動相関距離の影響とが考えられる。

ところで、脈動の増幅率を求めた地盤上の測点は、京都盆地のみで、山科盆地にはない。先に述べたように、山科盆地の重力基盤は京都盆地中北部よりも深く求まっている。このことを検討するために、新たに山科盆地と巨椋池近傍とで脈動観測を2003年2月に実施した。また、京都盆地におけるこれまでの研究では主に地盤/岩盤のスペクトル比

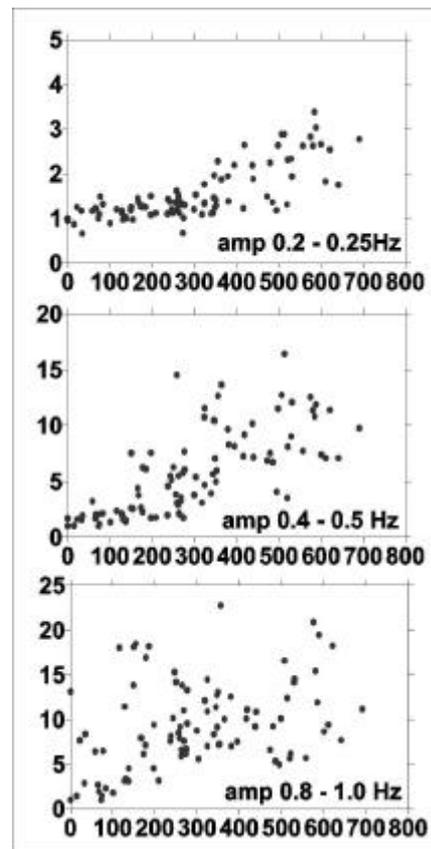


Fig.5 Relations between amplification factors and depth to basement (m).

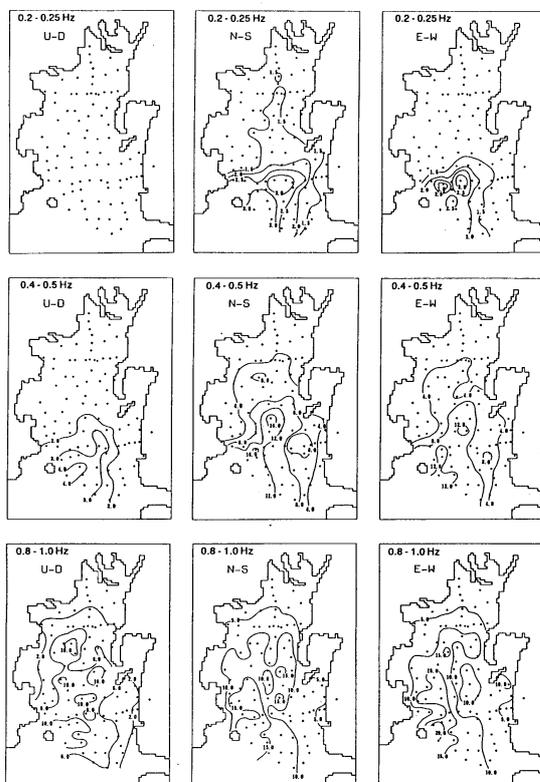


Fig.4 Amplification of microseisms by soil-sediments in Kyoto basin

の性質が議論されているが、近年、堆積地盤の構造研究では上下動 - 水平動スペクトル比(H/V)も多く議論されている(例えば、赤松ほか、1994)。各地域における観測事例では、基盤深度とピーク周期とは概ね正の相関を有しているため、京都盆地におけるH/Vのピーク周期の分布を調べた。Fig.6にH/Vのピーク周期の分布を、Fig.7にピーク周期と基盤深度との関係を示す。既往のデータの周期には1秒のカットオフのあることに注意する必要があるが、Fig.6に見られるように、ピーク周期は北部から中部、南部へと段階的に長周期に移行するようである。南部の巨椋池周辺では特に周期は長い。山科盆地内の測点でのピーク周期は、京都盆地中部と同程度あるいは短周期であり、重力基盤が深く解析されたことと相反する。Fig.7から明らかなように、ピーク周期は、京都盆地と山科盆地とは系統的に異なるが、それぞれ基盤岩深度と良好な関数関係を有している。巨椋池干拓地において2003年2月に測定したH/Vピーク周期は、既往の結果と同じであり、この系統的な違いは、計測時期や計測システムが異なることによるものではない。重力基盤と脈動のH/Vの性質に依拠した特徴と考えられる。これについては次節で議論する。

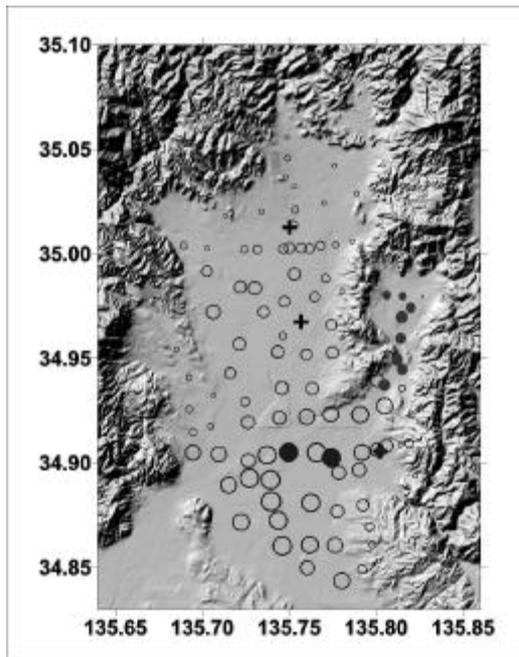


Fig.6 Distribution of peak period, T_p , of H/V in Kyoto basin. Size of symbol is scaled to T_p . Open and closed circles denote the sites for previous data and 2003 data, respectively. + indicates location of boreholes, KD-2, KD-1 and Uji Campus, from north to south.

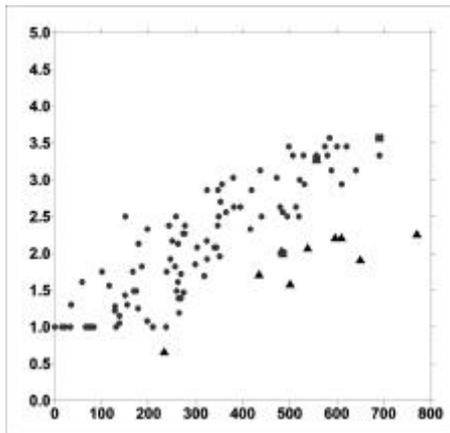


Fig.7 Relation between T_p of H/V (s) and depth to basement (m) in Kyoto basin. Dot denotes previous data. Square and triangle denote the sites in Kyoto basin and Yamashina basin, respectively, observed in 2003.

5. 議論

京都盆地では基盤岩に達するボーリングが掘削され、PS検層が行われている。その地震波速度データを用いてレイリー波の ellipticity を計算し、観測されている H/V スペクトル比との比較を試みた。Fig.8 は、ボーリング孔 KD-1、KD-2(京都市、2001)の例である。対応する観測 H/V は 200

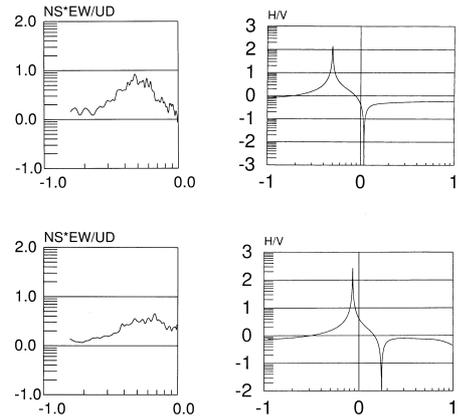


Fig.8 H/V spectral ratios observed (left) and ellipticity of Rayleigh waves (right) at KD-1 (upper) and KD-2 (lower) sites. Location is shown in Fig.6.

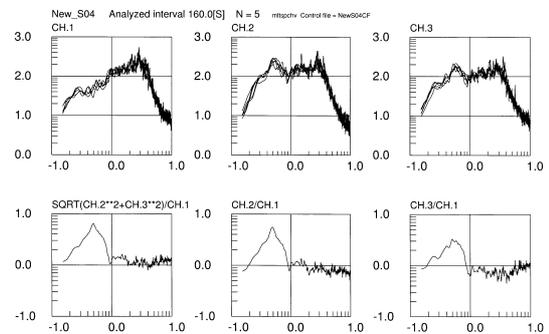


Fig.9 Observed microseisms (upper) and H/V (lower) at Uji campus of Kyoto University (log frequency). CH.1: UD, CH.2: NS, CH.3: EW. Location is shown in Fig.6. In the spectra, no instrumental corrections are made for 1s velocity meters and 3Hz low-pass filter.

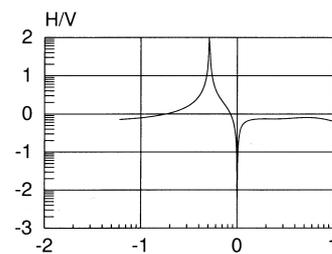


Fig.10 Ellipticity of Rayleigh waves for the site at Uji campus of Kyoto University (log frequency).

~300m 離れた測点のデータである。Fig.9 は京都大学宇治構内における脈動解析例、また Fig.10 は同構内のボーリング井(京都大学防災研究所、2001)の検層結果による計算例である。観測はボーリング孔口で行われた。KD-2 地点での差異がやや大きい、3 地点とも脈動観測値と計算値との対応は良好である。このことは、得られている重力基盤深

度と脈動の H/V の資料を利用して地盤震動特性を推定することの可能性を示唆するものと思われる。しかしながらこの場合、Fig.7 でみられたように、H/V ピーク周期と基盤岩深度との関係が京都盆地と山科盆地とで異なるという深刻な問題に直面する。

山科盆地においては、京都市により反射法地震探査が行われてた。盆地を東西に横切る測線(新十条通と小野御霊町)では基盤岩最深部は標高-330m(大阪層群の厚さ 360m)、また南部の小栗栖 - 石田測線では-450 ~ -550m と推測されている(京都市、2002)。これらの測線付近の脈動観測点での H/V ピーク周期は 2.2 ~ 2.3 秒であり、京都盆地の基盤深度 200 ~ 400m に相当する。これらのことから、山科盆地の重力基盤は実際より深く解析された可能性がある。これを、密度差を 0.35g/cm³ と仮定したことに依ると解釈するなら、山科盆地に分布する堆積層の密度をかなり小さく見積もる必要があることになる。

Fig.2 の残差ブーゲー異常図によると、山科盆地縁辺部の異常の勾配は極めて大きい。ここで用いた 3 次元自動解析では、垂直な断層や逆断層も正断層として解析され、重力異常分は基盤の深さに転嫁される。この解釈によるなら、山科盆地の東西両縁での基盤岩の落ち込みは深部まで逆断層の形態であることになる。なお、地表の地質調査からは、東西両縁を限る活断層が総じて逆断層であるとされている(京都市、2002)。

山科盆地の構造を京都盆地だけでなくもう少し広い地域の構造盆地との関連で理解するために、生駒山系を中心とする京阪奈地域の基盤構造(赤松ほか、2003)を Fig.11 に、また同じ領域の地形図を Fig.12 に示す。大阪盆地の北壁を

形成する基盤の落ち込み(有馬 - 高槻構造線)は、男山の南麓を東に伸びて京都盆地に至り、北に若干シフトして宇治川断層、すなわち京都盆地南部の深い凹地の北壁に繋がっている。また、大阪盆地(河内盆地)の東壁を形成する生駒断層帯は、北部で枚方撓曲と交野断層とに分岐し、交野断層は京都盆地に斜交するように北東方向に伸びて、京都盆地南部の凹地の南壁を形成している。これらの凹地の壁はさらに北東 ~ 北北東に伸びて山科盆地の東西の壁に繋がっている。京都盆地は宇治川断層によって中北部の浅い基盤部分と南部の深い凹地とに分けられ、南部の凹地は、京都盆地中北部よりもむしろ山科盆地と一体の構造であると考えられる。

Fig.13 は、横山(1995)が大阪層群の海成粘土層の分布から復元した古地理図である。第一、第二海成粘土層を堆積した約 100 万年前は、京都盆地は山科盆地とともに古京都湾として描かれている。古大阪湾は幅の広い海峡を挟んで古京都湾に繋がり、さらに山科盆地に直線的に繋がっているように描かれている。奈良盆地には古奈良湾があり、南部の大和川付近で細く古大阪湾と繋がっている。第三海成層を堆積した約 80 万年前には古奈良湾は消滅しているが、山科盆地は古京都湾として続いている。Fig.11 に示される現在の基盤構造の形は、これらの時代の海の分布域とよく似ている。古地理図からは京都盆地中北部と南部との違いは明瞭でないが、山科盆地は京都盆地の支盆地ではなく、むしろ宇治川断層南側の凹地と一体の、さらには大阪盆地と一体の構造盆地として形成されたような印象を受ける。もしそうであるなら、宇治川断層南側の京都盆地南部と山科盆地とは、京都盆地中北部に比べ海進による影響を強く

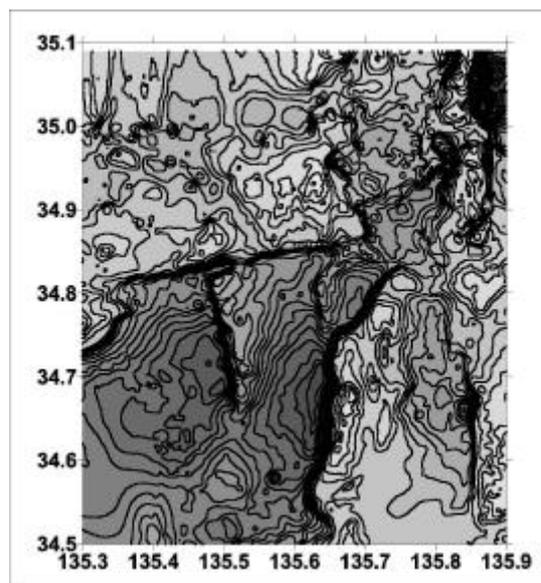


Fig.11 Gravity basement around Ikoma Mountains (Osaka, Kyoto and Nara basins).

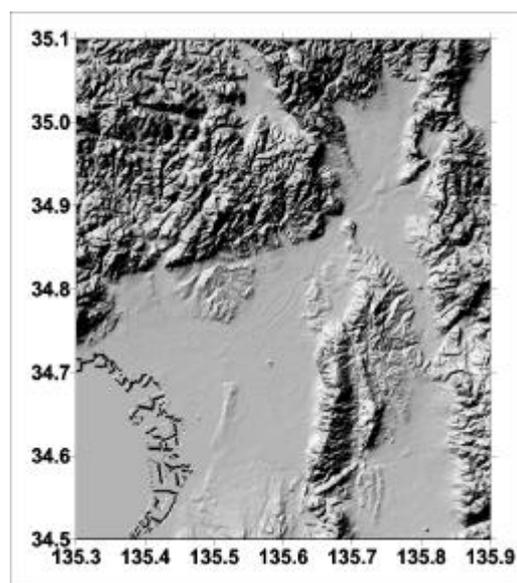


Fig.12 Topography around Ikoma Mountains (Osaka, Kyoto and Nara basins).

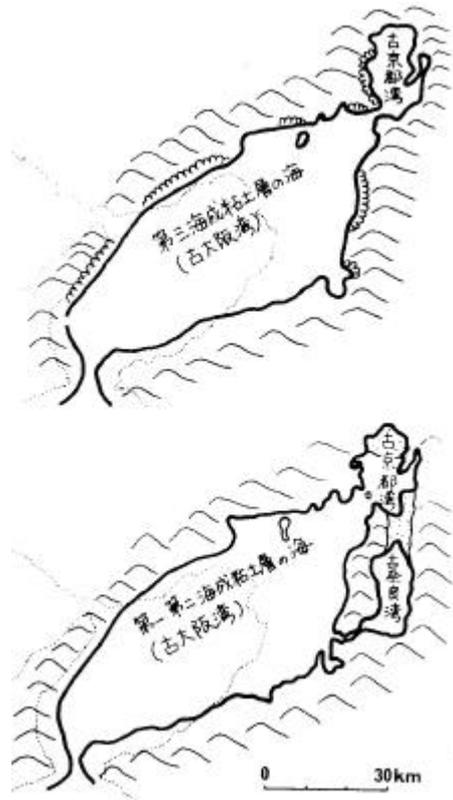


Fig.13 Palaeogeographical map in Early Pleistocene (lower) and beginning of Middle Pleistocene (upper). After Yokoyama, 1995.

受け水没期間が長かったため堆積物の固結が進んでおらず、密度は重力解析で想定したものよりもずっと小さいであろう。

Fig.4 に示した脈動増幅率の分布では、3つの周波数帯域とも、盆地南西部の東大阪盆地との接合方向に向けてコンターが開いており、男山から洞ヶ峠に至る盆地境界に向けて増幅率は減少していない。筆者の一人は、この図が作成された1990年代はじめ(安井, 1993)頃は、盆地基盤も地形と同様閉じていると思っていたので、不思議な現象と理解できずにいたのであるが、このコンターの分布は、京都盆地南部の基盤の凹みか東大阪盆地北東部に繋がることを示すものと解釈できる。

西村・河瀬(1996)は、京都大学北部構内と逢坂山観測所で記録された兵庫県南部地震の余震記録に、直達S波到着後90~100秒から始まって100秒前後継続する卓越周期7秒前後の特異な波群を観測し、淀川流域を伝わってきたラブ波と解釈した。この観測事実もまた、淀川流域から京都盆地南部、更に、山科盆地に至る地域の構造が、長周期の表面波が伝播しやすい構造、すなわち広くて厚い堆積層を有していることを示すものと考えられる。

6. まとめ

京都盆地(山科盆地を含む)の3次元重力基盤構造を2層(1層+半無限)でモデル化し、得られた基盤深度と脈動の堆積地盤による増幅率およびH/Vピーク周期との関係調べた。その結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 重力基盤は、宇治川断層によって深さの異なる中北部と南部とに分けられる。
- (2) 盆地南部(巨椋池干拓地周辺)の深い基盤の凹地は山科盆地に繋がる。また、東大阪盆地北東部への開口部の基盤は、深く幅広い。
- (3) 脈動の増幅率と基盤深度とには一定の関数関係がある。
- (4) 脈動のH/Vピーク周期と基盤深度とには一定の関数関係があるが、京都盆地と山科盆地とは系統的に異なる。
- (5) 山科盆地の堆積層の密度は小さいこと、あるいは山科盆地の東西両縁での基盤岩の落ち込みは深部まで逆断層の形態であることが考えられる。

これらのことから、重力データと脈動資料とから地盤の震動特性を定量的に議論する上での指針が得られたと考えられるが、一方で今後の課題も明らかになった。

謝辞

本研究の一部は、大都市圏地殻構造調査研究の一環として行われた。

参考文献

- Akamatsu, J., M. Fujita and K. Nishimura (1992): Vibrational characteristics of microseisms and their applicability to microzoning in a sedimentary basin, *J. Phys. Earth*, 40, 137-150.
- 赤松純平・李文芸・盛川 仁・斉藤秀雄・羅 奇峰・陶能付・亀田弘行・章 在・藤原悌三(1994): 脈動観測による上海平野の地盤震動特性 - スペクトル比(H/V)のピーク周波数と基盤岩震度との関係 -, 京都大学防災研究所年報, 第37号B-1, 1994, 4, 119-126.
- 赤松純平・中村佳重郎・駒澤正夫・西村敬一(2003): 近畿圏構造盆地の重力基盤構造 - 京阪奈地域 -, 大都市圏地殻構造調査研究平成14年度成果報告書。
- Akamatsu, J., H. Yasui, K. Nishimura and M. Komazawa(1996): Application of microseisms to Microzoning of An Urban Area in A Sedimentary Basin. *Earthquake Hazard and Risk, Advance in Natural and Technological Hazard Research*, Kluwer Academic Press, 267-279.
- 伊藤陽之(2002): 京都盆地における広域重力異常傾向と地下構造, 京都大学大学院理学研究科修士論文。

- Komazawa, M. (1995): Gravimetric analysis of Aso Volcano and its interpretation, J. Geol. Soc. Ja., 41, 17-45.
- 駒澤正夫・赤松純平(2003): 重力と脈動から見た京都盆地の基盤構造, 物理探査学会第 108 回(春季)学術講演会論文集(印刷中).
- 京都大学防災研究所(2001): 京都大学防災研究所 3 次元広帯域地震観測用観測井における P 波 S 波 VSP 探査報告書.
- 京都市(1999): 平成 10 年度地震関係基礎調査交付金京都盆地の地下構造に関する調査成果報告書.
- 京都市(2000): 平成 11 年度地震関係基礎調査交付金京都盆地の地下構造に関する調査成果報告書.
- 京都市(2001): 平成 12 年度地震関係基礎調査交付金京都盆地の地下構造に関する調査成果報告書.
- 京都市(2002): 京都の活断層第 2 版、京都市消防局防災対策室。
- 西村敬一・河瀬真明(1996): 兵庫県南部地震の余震記録に見られた速度の遅いラブ波, 京都大学防災研究所年報, 39B-1, 1-9.
- 安井洋(1993): 厚い堆積層を有する都市地盤を対象とした脈動観測によるマイクロゾーニングの手法、京都大学大学院工学研究科修士論文.
- 横山卓雄(1995): 古大阪湾・古京都湾の自然史 - 自然史をひもとく -, 三和書房.

Vibrational characteristics of microseisms and gravity basement in Kyoto basin

Junpei AKAMATSU and Masao KOMAZAWA*

* Geological Survey of Japan, AIST

Synopsis

3D bedrock structure of Kyoto basin was modeled through Bouguer gravity anomaly and the relation between resultant depth to bedrock and vibrational characteristics of microseisms was discussed. It is revealed that there is a deeper depression of basement under Oguraike reclaimed land in the southern part of basin with ENE-WSW trending steep subsidence, and the depression extends northeastward to Yamashina basin, and southwestward to Higashi-Osaka basin. Good correlations are found between depth to basement and soil-amplification of microseisms based on spectral ratios of soil-sites to rock-site, and between depth to bedrock and peak period of horizontal-to-vertical spectral ratio. However, there is a systematic difference in the depth-period relation between Kyoto basin and Yamashina basin. It is suggested that, the density of soil sediment in Yamashina basin is smaller than Kyoto basin and the east and west basin edges form reverse type faults.

Keywords: Gravity basement of structural basin, Bouguer anomaly, soil induced amplification, horizontal-to-vertical spectral ratio, Yamashina basin