

重力異常と脈動を用いたトルコ・アダパザル周辺の 基盤構造の推定

盛川 仁¹・赤松純平²・駒沢正夫³・中村佳重郎⁴・西村敬一⁵・澤田純男⁶

¹ 正会員 工博 東京工業大学助教授 大学院総合理工学研究科 (〒 226-8502 横浜市緑区長津田長 4259)

² 非会員 理博 京都大学助教授 防災研究所 (〒 611-0011 宇治市五ヶ庄)

³ 非会員 理博 産業技術総合研究所主任研究員 地球科学情報研究部門 (〒 305-8567 つくば市東 1-1 中央#7)

⁴ 非会員 理修 京都大学助手 防災研究所 (〒 611-0011 宇治市五ヶ庄)

⁵ 非会員 理博 岡山理科大学教授 総合情報学部 (〒 700-0005 岡山市理大町 1-1)

⁶ 正会員 工博 京都大学助教授 防災研究所 (〒 611-0011 宇治市五ヶ庄)

1999 年コジャエリ地震により、アダパザル市街は甚大な被害を受けた。表層地質の性質だけでなく、市街域が立地している盆地の基盤構造や周辺の断層構造、さらにこれらが被害に及ぼした影響などについて検討する必要がある。このため、同地域の基盤構造の把握を目的として 2000 年 8 月に重力測定と脈動 (長周期微動) 観測を実施した。本論では、ブーゲー異常 (重力異常) と脈動の観測記録から基盤構造を議論する。脈動については、1 地点での 3 成分観測によって水平動/上下動スペクトル比を調べる手法と、2 点同時観測に基づく空間自己相関関数法を適用して位相速度を推定し、3 次元的な速度構造を求め、重力異常から推定される密度構造と併せて議論した。その結果、地形からはほとんど予想できないような基盤岩の大きな変化が示唆された。

Key Words : *bedrock configuration, microseisms, Bouguer anomaly, array observation, spatial auto-correlation method, H/V spectral ratio*

1. はじめに

1999 年コジャエリ (Kocaeli) 地震により、アダパザル (Adapazari) 市街は甚大な被害を受けた。液状化による被害が目立ったことから、表層地質の性質が注目されているが¹⁾、市街域が立地している盆地の基盤構造や周辺の断層構造、さらにこれらが被害に及ぼした影響などは不明である。このため、同地域の基盤構造の把握を目的として 2000 年 8 月に重力測定と脈動 (長周期微動) 観測を実施した。本論では、ブーゲー異常と脈動の観測記録から基盤構造を議論する。

2. アダパザル周辺の地質

図-1 にアダパザルと周辺の地質図を示す。アダパザル市中心部は、直径 25~30km の盆地の西側、西にのびる支盆地入口付近に位置する。南から北にサカリヤ (Sakarya) 川が蛇行し、市街地の表層部分は、川の氾濫により過去約 200 年間に形成された¹⁾。サカリヤ川は盆地の北約 25km で黒海に注いでいる。盆地の南側には東西に北アナトリア断層系がある。南東部のアキヤズ (Akyazi) 付近からは、東北東方向にドゥズセ (Dozce) 断層が延びている。これらの断層系に沿って噴出岩、間入岩、変成岩が分布し、これらを白亜紀~始新世の火山灰層が広く覆っている。盆地北部でも同じく白亜紀~始新世の火山灰層が広く堆積しているが、基盤がデボン期やシルル期の岩体であることが南部との顕著な違いである。盆地の南と西の縁辺部には鮮新世のテラスが形成されている。

3. 重力測定と脈動観測および解析

重力測定にはシントレックス CG-3M とラコスト G 型を使用した。総測定点数は 440 である。位置と標高は、ディファレンシャル GPS により 1m 以内の精度で求まっており、今回の調査には十分な精度をもつ。地形補正は 30" メッシュの GTOPO-30 を使用し、60km までの範囲で行った。地形補正を行った後、仮定密度を 2.3t/m^3 として求めた盆地周辺のブーゲー異常図を図-2 に、また表層の堆積層と基盤の密度差を 0.5t/m^3 として求めた重力基盤図を図-3 に示す。なお、図-3 は図-2 と同じ範囲を示しているが、座標軸は東経 30 度を中心経度とする UTM 座標系で表している。

脈動観測には、固有周期 1 秒の速度型換振器 (勝島製作所製 PMK-110) を用いたが、厳密な計器補整を施すことにより、概ね周期 8 秒までの速度スペクトルについては十分な精度で議論できることを確かめている。しかし、観測期間中は脈動成分のレベルが極めて低かったために 6 秒以上の周期帯ではやや精度が悪くなっているようである。観測はおおよそ 5km メッシュにつき 1ヶ所の割合で観測点を設定し、地盤構造の急激な変化が予想されるような地域では必要に応じて密に観測点をとった。その結果、3 成分を測る移動観測点は盆地内で 40 地点となった。各地点の記録から、自動車などのノイズの無い約 81 秒 (条件により約 40 秒) の区間を 5~10 個とってフーリエスペクトルを計算し、その平均値から水平動/上下動スペクトル比 (H/V) を求めた。H/V (EW/UD) のピークを与える周期 T_P の空間分布を図-4

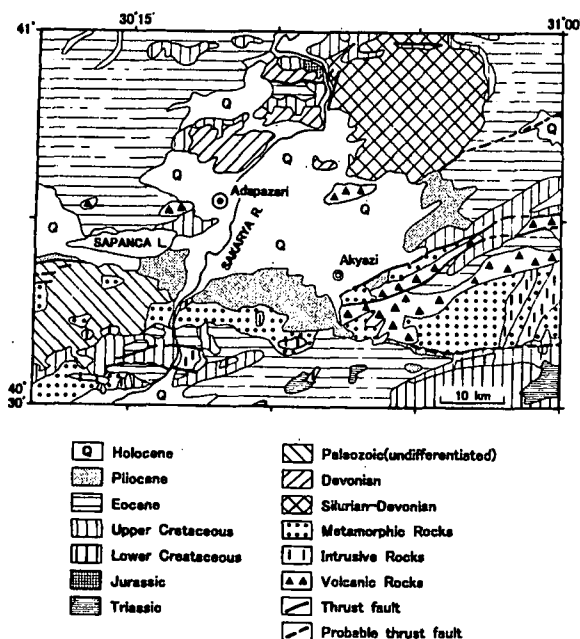


図-1 アダパザル周辺の地質

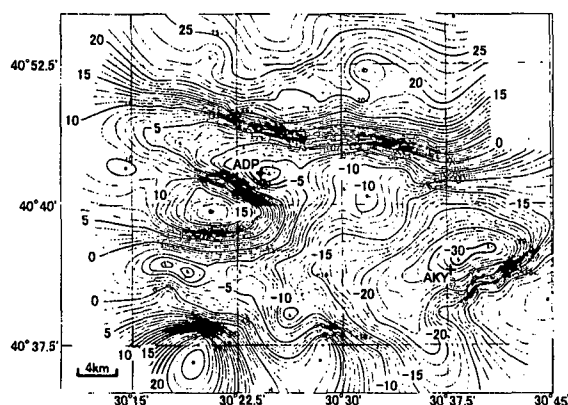


図-2 アダパザル周辺のブーゲー異常図 (仮定密度: 2.3t/m^3 , ADP: アダパザル, AKY: アキヤズ)

に示す。図中では、各観測点での T_p の値を○の大小で表しており、GTOPO-30 による標高をコンターであわせて示している。

また、図-4 に★で示す盆地の南北2ヶ所で、2点同時観測を利用したアレー観測²⁾を実施した。この手法は、中心点とアレーを構成する同心円上の地点との2点同時観測を繰り返すことにより、空間自己相関法 (SPAC法) による多点同時観測と同等の精度で位相速度を求めることができる、というものである。同時観測に際しては、GPS 時計の刻時信号を記録することにより、サンプリング周波数程度の精度で2点での記録を同期させている。図-5 に示すアレー配置よりわかるとおり、北側のアレーは半径 40m~500m の範囲で4アレー、南側のアレーでは半径 100m~450m の範囲で3アレーの観測を行った。図-5 も UTM 座標系で表示している。さらに、これらの観測から得られた位相速度を図-6 に示した。

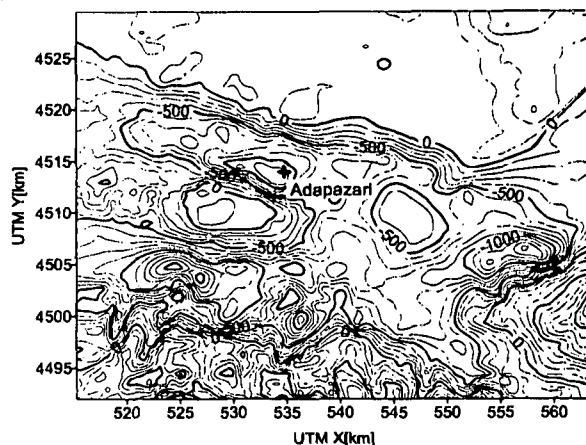


図-3 ブーゲー異常から求められた重力基盤図

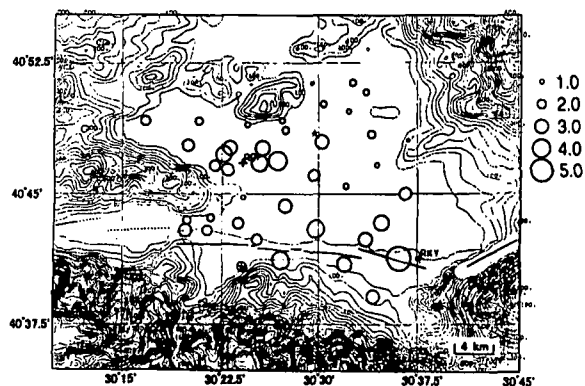


図-4 脈動の H/V のピーク周期 T_p の分布 (★はアレー観測点)

4. 解析結果

(1) ブーゲー異常の特徴と重力基盤構造

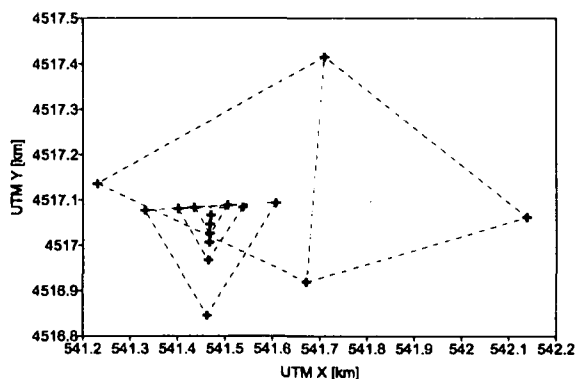
図-2 に示す重力異常の主な特徴として、

- アダパザル市街地と南西の山体との間の北西~西北西に伸びる重力急変帯、
- 上述の山体から地形的に平坦になる東方にまで伸びる高重力異常、
- 盆地南東部のドゥズセ断層に沿う重力急変帯と、これに平行する非常に大きい低異常帯 (アキヤズの東、 -30mGal)、
- 盆地北部をほぼ東西に横切る急変帯、

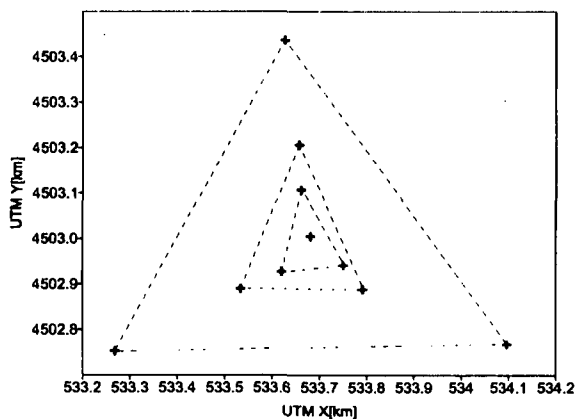
があげられる。(d) については、北側にあるデボン紀の高密度の基盤と南側のより新しい低密度の基盤との地質境界、あるいは基盤の急峻な沈降 (南落ち) のいずれによっても解釈可能であるが、次に述べる脈動の H/V の結果より、主に後者によるものと考えられる。

図-3 は、盆地の周りでは基盤が地形を形成しているとして求めた基盤構造であるが、盆地基盤が2~3の凹地から形成されていることを示している。すなわち、

- アダパザル付近で基盤深度 1000~1200m、幅約 4km の東西に伸びる船底状の凹地、
- サパンジャ (Sapanca) 湖から深度約 1000m で東に伸び、

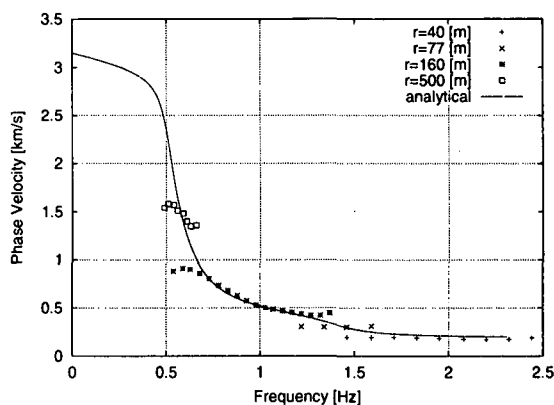


(a) 北側のアレー (Dernekkiri)

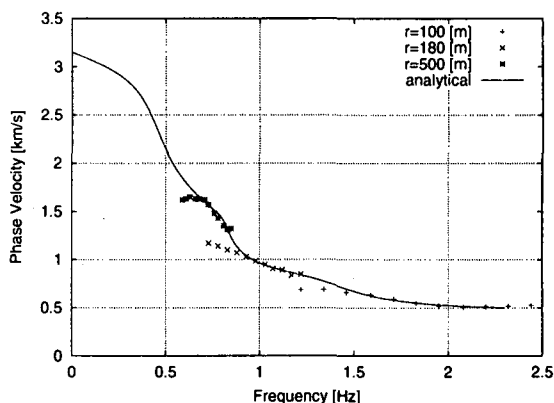


(b) 南側のアレー (Semerciler)

図-5 アレー観測点の配置



(a) 北側のアレー (Dernekkiri)



(b) 南側のアレー (Semerciler)

図-6 各アレーでの位相速度と分散曲線の理論値

(3) アキヤズ付近から 1500m 近くまで沈降して東北東に伸びる凹地、

である。(2) と (3) の境はあまり顕著でないが、(1) と (3) の間には大きな隆起帯 (深さ約 400m) がある。上の (d) の重力急変帯から求まる段差は、デボン紀の岩体 (図-1 参照) の南側を東西に走る断層のようにも見える。

(2) 脈動の H/V のピークを与える周期の空間分布

図-4 に示す H/V のピーク周期 T_P は、全体的に南へいくほど大きくなり、盆地南縁部においても大きい値を有している。特に、盆地南東部で最大値を示し、重力基盤が最も深いこととよい対応を示している。盆地北部の北緯 40 度 48 分付近 (UTM 座標系では Y 座標が 4517km 付近) を境に、 T_P は南北で大きく異なっている。これは前節で述べた重力の急変帯 (d) に対応しており、このことから、重力の急変は岩質の違いによる密度差よりもむしろ基盤岩深度を反映しているものと考えている。アダパザル市街域の T_P は比較的大きく (～3 秒)、盆地基盤が深いことに関連づけられる。

さらに、盆地東部の半島様に突き出ている地形の延長線上で南西方向には、小さい T_P が分布しているが、これは、重力基盤にみられる凹地の間の隆起を反映しているものと考えられる。このように、相対的には T_P の分布は重力基盤構造と極めてよく調和している。ただし、H/V の形状によっては、 T_P の読み取りに幅がある。鋭いピークを有しない場合には、基本モードと推

測される長周期側の山を読み取って図中に示しているが、重力基盤図との対応から考えると、妥当な読み取りを行っているものと考えている。

(3) 2sSPAC 法によるアレー観測記録から推定される速度構造

北側のアレーは、交通量がきわめて多かったこと、またアレー半径の設定がやや不連続で長周期側の位相速度を連続的にとらえることができなかったことが影響して、十分な精度が出ているとはいいがたいが、分散曲線のおおよその形状を知ることができた。位相速度は北側のアレーでは 1Hz で 500m/s 程度、南側のアレーでは 1Hz で 1km/s 程度であった。また、ほぼ同じアレー半径でカバーしている 1.5Hz 付近の位相速度は南側のアレーの方が速いが、1 秒より長周期側では北側のアレーの位相速度は急激に大きくなっている。このことは、堆積層の平均的な音響インピーダンスが基盤岩のそれに比べて非常に小さく、基盤岩と堆積層の間のインピーダンス比が大きいことを示唆している。

周辺の地質条件を勘案して、おおよその弾性波速度を予想し、観測から得られた分散曲線を説明するような 3～4 層の速度構造モデルを、層厚を未知数とするフォワードモデリングにより求めた。各層の弾性波速度に関する情報は皆無であるため、北側と南側のアレーで、表層を除いて同じ速度を与えている。最終的に得られた速度構造モデルを表-1 に、また、図-6 にはその構造から理論的に求められる Rayleigh 波の基本モードの分散曲

表-1 アレー観測点における速度構造モデル

	V_P	V_S	ρ	H
	[km/s]		[t/m ³]	[km]
North	1.500	0.200	1.700	0.065
	1.800	0.500	1.800	0.090
	2.500	1.000	2.000	0.250
	5.400	3.500	2.500	3.000
South	1.500	0.500	1.800	0.150
	2.500	1.000	2.000	0.450
	5.400	3.500	2.500	3.000

線を重ねて描いている。この結果によると、北側では基盤岩までの深さは約 400m、南側では 600m となった。

これらの解析結果の妥当性を確かめるために、以上の結果を比較する。図-7 は、アレー観測を行った南北の 2 地点を結ぶ測線上で、重力基盤、H/V のピークを与える周期 T_P 、アレー観測から求められた基盤岩までの深度を一つにまとめて示したものである。実線で重力基盤を示し、シンボルで T_P を表している。測線上に微動の観測点が密にあるわけではないので、 T_P に関しては、測線までの最短距離が 3.5km 以内の測点を選んで、重力基盤の値とともに図中の右側が北となるように UTM Y 軸上に投影して描いている。ただし、測線から 3.5km 以内にあっても露岩の近くで観測した記録は取り除いている。また、アレー観測を行った地点では、推定された堆積層の厚さを図中に示している。この図から、 T_P と重力基盤が非常に高い相関を有しており、上で述べたような基盤構造の特徴を良く表していることがわかる。また、北側のアレー観測点は、地表面の地形が比較的平坦である場所を選んだが、実際には基盤岩が大きく傾斜した部分にアレーを展開してしまっただことがわかる。北側のアレー観測点で推定される基盤岩深度はアレーを展開した場所での基盤岩深度の平均的な値に対応しているようである。

アレー観測から求められた基盤岩深度は、重力基盤構造に比べてやや浅い結果となっている。これは、重力基盤構造を推定する際に、堆積層と基盤岩との密度差を 0.5t/m^3 としたが、最初に述べた通り、基盤岩はデボン期などに形成された極めて密度の高い岩盤であり、表層はここ 200 年たらずで堆積した非常に密度の低い地盤であるため、実際にはこれらの密度差が 0.5t/m^3 よりも大きく、解析ではやや重力基盤深度を大きく見積もっていることが考えられる。

4. まとめ

重力測定と脈動観測によってアダパザル周辺の基盤構造を推定した。これら 2 つの全く異なる物理量より求められた基盤構造は、互いに高い相関をもっており、推定された基盤構造が信頼に足るものであることを示している。このようにして推定された地盤構造によると、アダパザルの市街地は基盤岩が南の山体から逆断層気

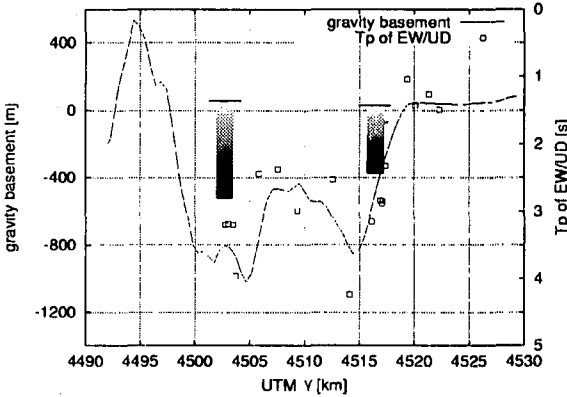


図-7 重力基盤、微動の H/V のピーク周期、アレー観測から求められた基盤岩深度の比較

味に 1km 以上落ち込む盆地境界の北側で、北西方向からのびる凹地上にあることがわかった。断層破壊が南の山体下を西から東に進んだことを考えあわせると³⁾、アダパザルに大きな被害をもたらした原因、すなわち浅い地層を液状化させるような強震動を生成した原因として、兵庫県南部地震における阪神地域の被害集中の原因と同様に、ディレクティビティの効果や、盆地境界生成表面波、フォーカシングの影響などが想起される。

また、地形からはほとんど予想できないような基盤岩の大きな変化が示唆された。北アナトリア断層系の活発な構造運動、複雑な盆地基盤構造、若く軟弱な表層地質等、アダパザルは地震災害を受けやすい場に立地する都市であったと言え、今後、アダパザルにおける被害と基盤構造を関連づけて議論をすすめていく必要がある。

参考文献

1) 地盤工学会：1999 年トルコ・コジャエリ (Kocaeli) 地震第 1 次調査団速報, 1999.
2) Morikawa, H., Sawada, S., Toki, K., Akamatsu, J., Nakajima, D., Ejiri, J., and Miyakoshi, K., "Estimation of Phase Velocities from Microseisms Observed at Two Sites," *Earthquake Geotechnical Engineering*, (Proc. of 2nd Int'l Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Edited by S.e Pinto), A.A.Balkema, 1999.7, pp.119-124.
3) 八木勇治・菊地正幸：1999 年 8 月 17 日トルコの地震の震源過程, 日本地震学会講演予稿集 1999 年度秋季大会, A70, 1999.