

重力探査を用いた台湾新竹市における 三次元基盤形状の推定

正坂拓也¹・高橋千佳²・駒澤正夫³・陳慧慈⁴・盛川仁⁵

¹ 三重県企業庁 北勢水道事務所

(〒 510-0075 三重県四日市市安島 2-7-15)

² 東京工業大学大学院 総合理工学研究科人間環境システム専攻

(〒 226-8502 横浜市緑区長津田町 4259-G3-7)

E-mail: tchika@enveng.titech.ac.jp

³ 産業総合研究所 地質情報研究部門

(〒 305-8567 つくば市東 1-1-1 中央#7)

E-mail: komazawa-m@aist.go.jp

⁴ 国立中央大学 工学院土木工学系

(〒 32001 桃園縣中壢市五權里 2 鄰中大路 300 號, 中華民國)

E-mail: chenhtofpadau@seed.net.tw

⁵ 東京工業大学 大学院総合理工学研究科人間環境システム専攻

(〒 226-8502 横浜市緑区長津田町 4259-G3-7)

E-mail: morika@enveng.titech.ac.jp

台湾島北西部は、台湾の経済を支える重要な工場等の施設が集中する地域である。このような地域において、地震動評価を適切に行い、地震対策をすすめることは重要である。その基本的な情報としての地盤構造を推定するために、地域の中心都市である新竹市周辺を対象として重力探査を行った。得られた重力値をもとに、ブーゲー異常を求め、さらに重力基盤を推定した。その結果、新竹市周辺で約 200 m、南東部の最深部においては 1200 m に達する基盤深度が推定された。重力基盤の起伏は非常に複雑で、これらの構造は地質学的に知られている向斜・背斜構造や断層と良い対応を示した。また、地震動の数値シミュレーションを行って地盤の物性値を決め、シミュレーション波の走時がある程度観測記録を説明できるモデルであることを示した。

Key Words : gravity survey, Bouguer anomaly, gravity basement, numerical simulation, earthquake ground motion

1. はじめに

台湾は、東側にユーラシアプレートとフィリピンプレートの境界が位置していることや、地殻内においても極めて多くの活断層が存在していることにより、地震活動が活発な地域である。また、台湾は政策として IT 産業の振興に力を入れているが、その基幹産業である IT 関連企業の生産施設等は台湾島北西部に集中している。1999 年集集地震の際には、台湾の半導体工場の一部で生産が停止し、世界中で PC 用メモリの価格が高騰したことは記憶に新しい。

このような重要施設が集中する台湾島北西部の地震動評価を適切に行い、地震対策をすすめることは、台湾における重要課題である。そのためには、地盤構造を推定し、適当な断層を設定し地域の地震動を予測することが必要となる。そこで、半導体工場等が集中する台湾新竹 (Hsinchu) 市周辺を対象地域に定め、もっ

とも基本的な情報となる地盤構造の推定を行う。

地盤構造の推定には、人工地震探査、微動探査、重力探査など種々の手法が広く利用されており、各々、長所短所があることは周知の通りである。詳細な地盤構造を知るためには反射法探査などが有効であるが、広い範囲での構造を決定するには費用が大きな問題となる。ほとんど地盤構造が未知の地域において構造を推定する場合、最初はあまり精度を求めずに広域でおおまかな構造を把握しておき、必要に応じて精度の高い手法を導入していくことが適当であろう。

筆者らの一部はこれまでに、このような考え方のもとで重力探査を用いて地盤構造モデルを比較的短期間に決定した上で、地震動予測を行う手法の有効性を確認してきた^{1),2)}。本研究でもこのような考え方のもとで、新竹地域において重力探査を実施し、基盤構造モデルを作成し、そのモデルを用いた地震動の数値シミュレーションを行うという一連の検討を行った。



図-1 台湾島と新竹市

2. 新竹市について

調査対象地域である新竹市は図-1 に示す通り、台湾の北西部に位置し、北西から南東にかけ標高が高くなる地形となっている。地形図を図-2 に示す。また、図-3 に見られる通り、新竹市周辺には多くの断層が存在している。新竹市の南部には北東-南西方向の走向を有する向斜と背斜が交互に存在し、向斜の部分が断層として認識されている。なかでも、新城断層は活断層と考えられており、新竹地域の地震防災を考える上で非常に重要である。また、新竹市の北側にも同様の背斜構造と新竹断層が位置しており、その構造は極めて複雑である。

なお、先に述べた通り、新竹市にはサイエンスパークが設立されており、多くのハイテク工場や研究機構などが設置されている。このことから、新竹市は「台湾のシリコンバレー」とも呼ばれ、台湾の経済発展の中核を担っている。地震動予測のための調査や研究は当地における今後の地震防災対策に生かすことができるものと期待される。

新竹市の地盤構造については、これまでも地質学的観点からの研究が行われている。これらについては、書帆 (Shu-Fan) により新竹地区地下構造報告としてまとめられたものがあるが³⁾、個々の出典については、はっきりしないため、原典に戻って資料を収集することは難しい状況である。以下では、書帆の資料に基づいて、重要と思われる成果をいくつか孫引きしておく。

台湾島全体の重力探査は既に行われており、この10年の間に観測地点の密度も非常に高くなって高い精度のブーゲー異常図が作成されるようになってきている。Yeh and Yen (1992) によって作成された台湾島全体のブーゲー異常を図-4 に、新竹市周辺を拡大したものを図-5 に示す。これらの図より、新竹市周辺には負のブーゲー異常の特異点が存在していることが分かる。このことから、新竹市周辺に石油が埋蔵されているのではないかと考えられ、この30年ほどの間に深層ボーリングや高密度重力探査を含む種々の地盤調査が行われたようである。実際、新竹県の南に位置する苗栗県ではか

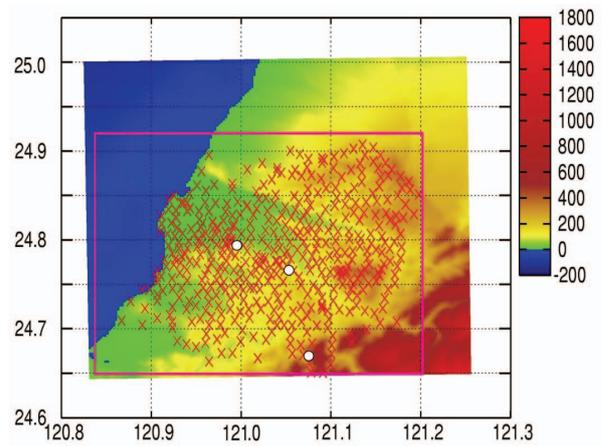


図-2: 新竹市周辺の地形図。横軸は経度、縦軸は緯度である。図中の × は重力観測点、○ は重力基盤の計算で用いたコントロールポイント、四角い枠は解析対象範囲を示している。なお、地形図の表示範囲は図-1 の新竹市に示した四角の範囲に対応している。

つて油田が存在したが、新竹周辺では油田は発見されていない。これらの調査結果をもとにして、いくつかの場所で地質断面が作成されている。図-9, 10 にその一例を示す。この断面は重力異常との整合性も考慮されているようであるが、どのような方法で求められたかはあまりよくわからない。また、重力異常その他を参考にして図-6 密度構造も作成されている。

このように新竹市では、既に、多くの物理探査や地盤調査が行われているものの、残念なことにそれらの記録がどこにどのような形で蓄積されているのかがはっきりせず、本論文が目的としている地盤構造推定と地震動予測に利用するには必ずしも十分とは言えない状況である。できる限り既往の資料を有効に活用することは当然ではあるが、以下では、目的にあわせた形で必要なデータを収集し、解析を行う。

3. 観測と解析結果

(1) 観測方法

観測範囲として新竹市中心部から隣接する新竹県を含む地域 (北緯 24°39' ~ 北緯 24°55' および東経 120°50' ~ 東経 121°12' の南北約 30 km × 東西約 40 km) とした。観測は2006年9月7日から9月28日の間の20日間に、約1 km 間隔を基本として測定を実施し、合計で393点で記録を得た。観測点の位置を図-2 に示す。

重力測定にはZLS社製のBurris自動重力計およびLacoste & Romberg社製のgravity meter G型を用いて、効率的かつ精度良く測定できる相対測定により行った。また、観測点の座標を正確に決定するためディファレンシャルによるGPS測量を行い、水平、鉛直方向ともに1 m 以内の精度で決定した。これらの測定機材による測定の様子を図7に示す。

本研究で採用した相対測定法は、効率的かつ精度良く測定できる一方で、観測地点における絶対重力値を

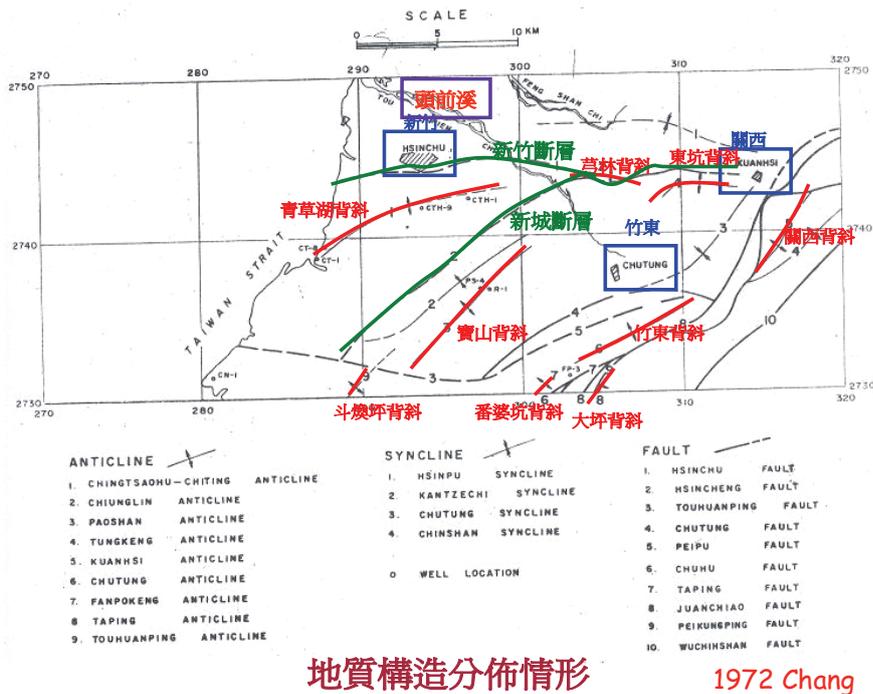


図-3 新竹市周辺の断層

Taiwan Bouguer Anomaly

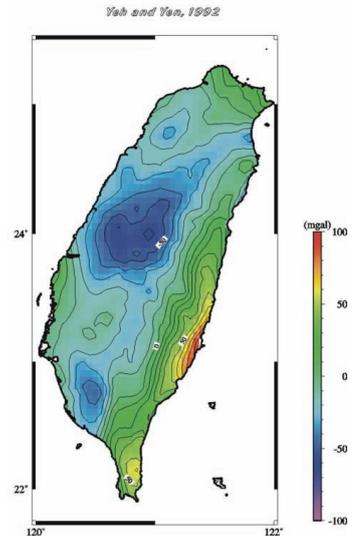


図-4 台湾ブーゲー異常図³⁾

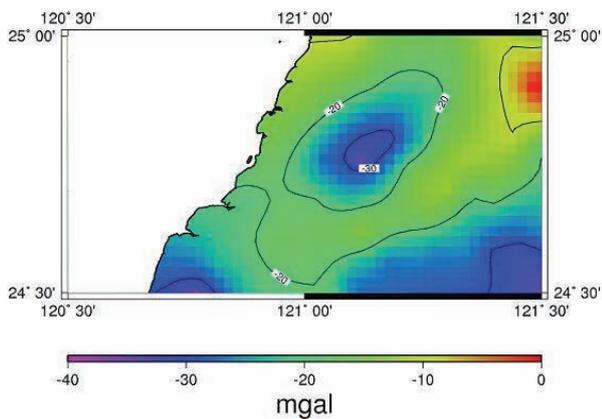


図-5 新竹市ブーゲー異常図³⁾

知るためには、絶対重力値の既知点を基準にして決定する必要がある。そのため、観測に先立って、新竹市内に重力基準点を設置し、絶対重力値が既知である点との往復閉塞測定を行ってその地点における絶対重力値を決定した。そのうえで、観測地域内において基準点と観測点との閉塞測定を繰り返し、各観測点の絶対重力値を求めた。

なお、上記の対象地域内には 60ヶ所あまりで既存の測定記録があるため、解析ではこれらの記録もあわせて計 453 点の重力値を用いて解析を行った。既存の記録は、著者らによる測定結果とどうしても整合しない 2~3 地点の記録を別にすると、重力の基準値の設定や観測点の座標値などが正しく測定されていることが予想される非常に質の高い記録であったことを指摘しておく。

年代	地層	地下密度		地表密度	
		潘 (1965)	謝興胡 (1972)	本研究	
更新世	台地堆積	—	—	1.85	
	紅土台地堆積	—	—	1.90	
	大南潭層	—	—	1.95	
上新-更新世	崩崙山層	上部	1.90-2.00	2.09	
		下部	2.10		
上新世	卓蘭層	2.30	2.20	—	
	錦水頁岩	2.35	2.30		
中新世	桂竹林層	2.45	2.40		
			南莊層		2.54
	河排層	2.40			
	南港層	2.55	—		
	石底層	2.56			
	大寮層	2.57			
木山層	2.60				

図-6: 地質区分と密度構造³⁾。右側の「本研究」と書かれた列は 1975 年の研究成果ということである。

(2) ブーゲー異常

観測した重力値より、器械高補正、潮汐補正、ドリフト補正を行い、周辺環境から受ける影響を取り除いた後、大気補正、地形補正、ブーゲー補正、フリーエア補正を行い、各観測点特有の影響を除去し、地下構造のみの影響による重力異常(ブーゲー異常)を求めた。このとき、仮定密度 ρ の値を適当に与えて解析を行う。そのうえで、対象地域を代表するような適切な仮定密度の



図-7 重力観測に用いた測定機材

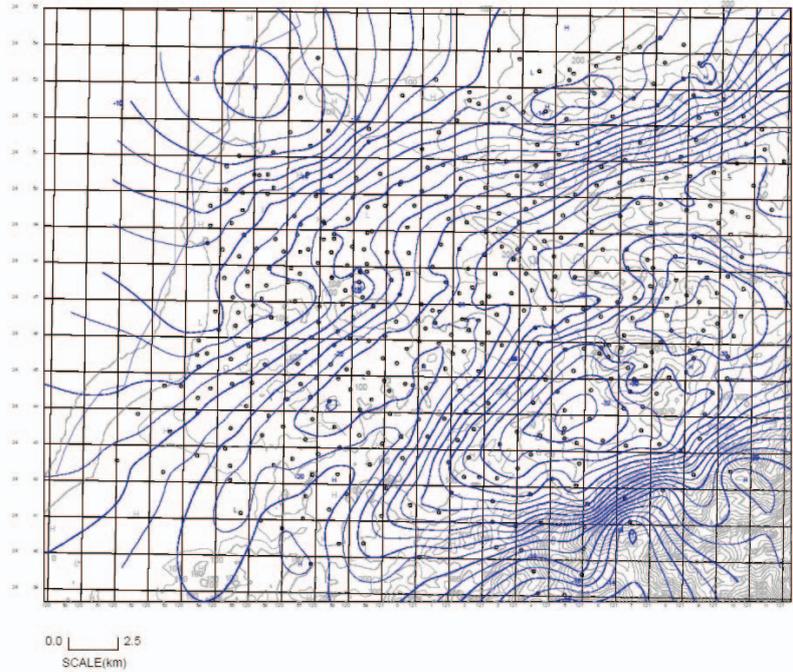


図-8 ブーゲー異常図 (仮定密度: 2.1 t/m³)

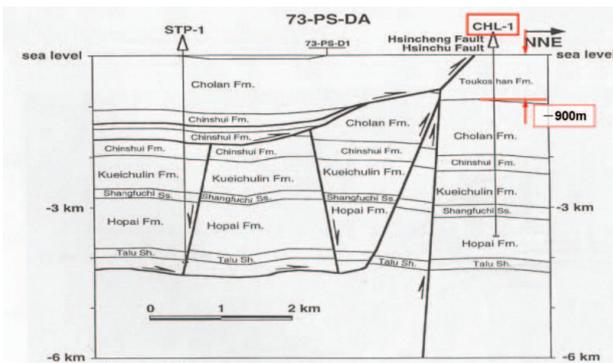


図-9: 新竹市における地質断面 (南南西-北北東) とコントロールポイント (CHL1) (新竹地下構造報告³) に加筆

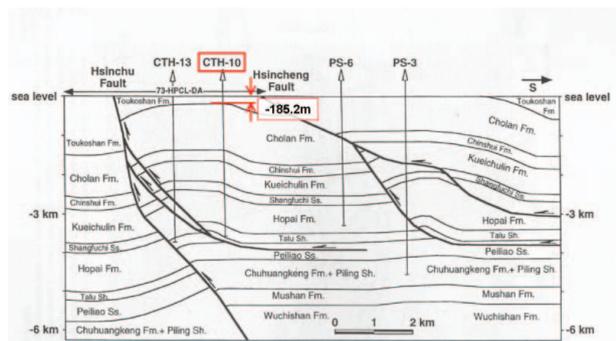


図-10: 新竹市における地質断面 (南-北) とコントロールポイント (CTH10) (新竹地下構造報告³) に加筆

値を決定する。仮定密度の設定に当たっては、 $\rho = 2.0 \sim 2.8 \text{ t/m}^3$ の範囲でブーゲー異常を求め、地形との相関が低いと考えられる値を目視によって決定する方法⁴⁾を採用した。G-H 相関法⁴⁾など他の手法も利用可能であるが、対象地域内で場所による密度差が大きいため、地域を代表する平均的な値を求めるのに便利な手法を採用した。また、図-6 を参考にして堆積層に相当する密度を仮定密度 $\rho = 2.1 \text{ t/m}^3$ とした。

このようにして求められた仮定密度を用いてブーゲー異常を求めた。その結果を図-8 に示す。図-8 よりわかるとおり、観測エリア全体で負のブーゲー異常が見られ、北西から南東にかけて負で異常値の絶対値が大きくなっている。東側において負の絶対値の大きいブーゲー異常値をとるエリアがあり、これは台湾全体のブーゲー異常図にも見られる局所的な負のブーゲー異常に対応している。さらに、南東部にはブーゲー異常の急変部がみられる。

(3) 重力基盤

図-8 のブーゲー異常図は、地震基盤の形状による影

響だけではなく、地震基盤より深い地殻からごく表層の地盤までのすべての密度構造を反映したものとなっている。そこで、表層に近い部分の密度の影響のみを取り出すために 50 ~ 5000 m の上方接続法によるバンドパスフィルタを用いて、深い構造に由来する広域トレンドを除去したうえで地盤構造の解析を行った。以下の 3 次元基盤構造解析では、このようにして得られた重力残差を用いる。

地盤が均質な堆積層と基盤の 2 層からなるという仮定の下で、駒澤⁴⁾に基づき重力残差から逆解析によって 3 次元重力基盤を推定した。ここで解を実際の構造に近いモデルに収束させるために基盤岩の深度に関するコントロールポイントを、深層ボーリングの結果をもとに 3 地点で与えた。基盤と堆積層の境界は上新世の地層である卓蘭層の上面とし、図-6 を参考にして、基盤の密度は 2.4 t/m^3 とした。

図-2 にコントロールポイントを与えた地点を示している。また、コントロールポイントにおける地質断面と条件として設定した基盤面までの深さを図-9, 10 に

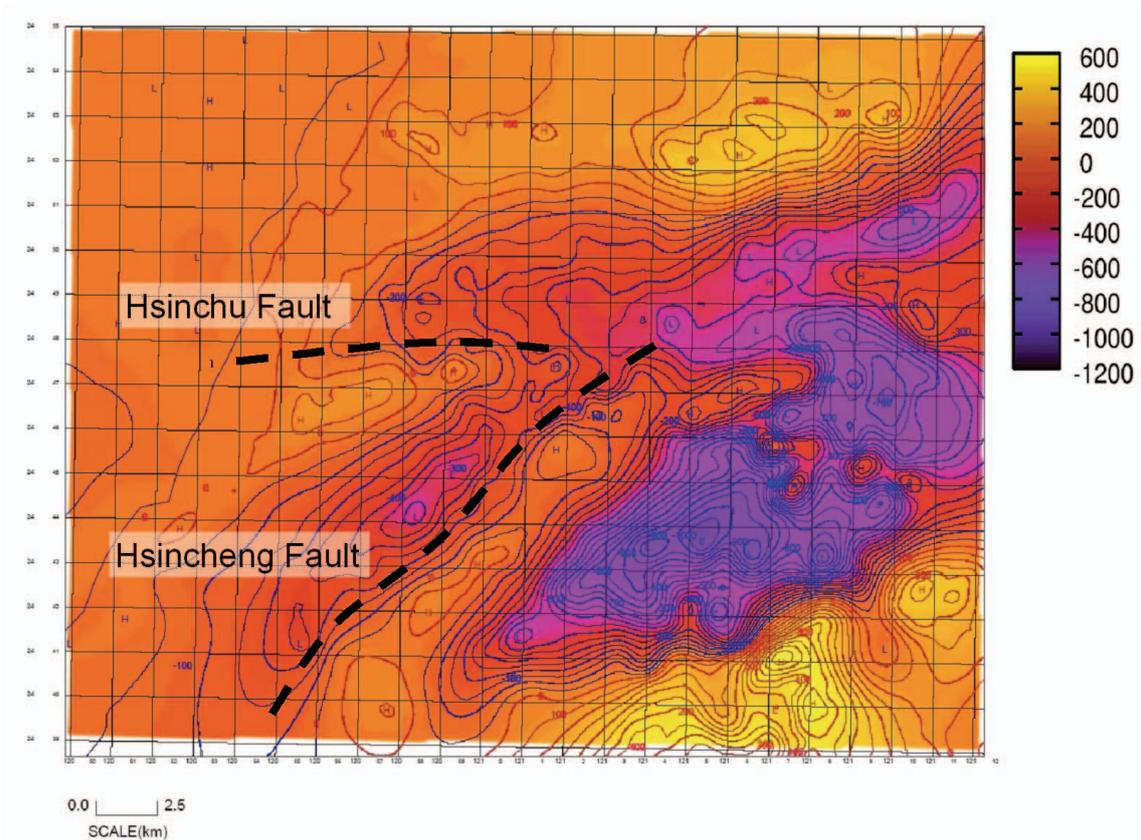


図-11 基盤標高図 (基盤密度：2.4 t/m³，堆積層密度：2.1 t/m³，基盤深度の単位：m)

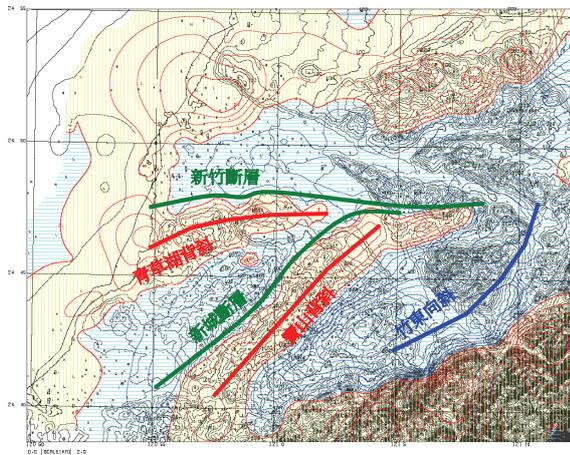


図-12: 重力残差図 (コンタ 図の青は正、赤は負の異常を表す)

示す。南側のコントロールポイントは基盤岩が露出している地点として与えている。

以上のようにして得られた重力基盤の基盤標高図を図-11に示す。図-11より、全体的な傾向として、対象地域の北西部から南東部にかけて基盤が深くなっていることがわかる。また、新竹市中心部となる観測エリア北西部では、基盤は比較的浅く、200 m程度である。一方、観測地域の南東部において基盤が深くなっており、これはブーゲー異常の負の絶対値が大きい領域に対応している。このあたりにおける基盤の最も深いところは、およそ1200 mに達している。

4. 議論

(1) 既知の地質構造との比較

断層が縦ずれ断層である場合、その断層のずれは基盤標高図において急変部として見えることがある。そこで算出された基盤標高と対象地域にある主な断層を比較するために、主な断層の位置を図-11に示した。これより新竹市南部に位置する新城断層や市内北部の新竹断層の位置が基盤標高の急変部と対応していることが分かる。

重力残差図によって、比較的浅い構造が明らかとなる場合がある。そこで重力残差図に対象地域内にある背斜構造、向斜構造を重ねたものを図-12に示す。この結果、正の残差異常の部分が背斜構造に、負の部分が向斜構造とよく対応しており、しかも向斜構造と背斜構造の境界となっている部分に断層が位置している。

以上より、得られた重力異常および重力基盤は定性的には妥当なものであると考えられる。

(2) 地震動の数値シミュレーション

得られた重力基盤を用いて、地震動の数値シミュレーションを行い、対象地域内に震源のある地震について、新竹市内の1ヶ所で得られている観測記録と計算結果を比較した。なお、地震動のシミュレーションは実際の地震動における波形の再現ではなく、構造モデルの確認を目的としているため、震源等のパラメータについては簡単なモデルを用いて計算を行っている。地震動のシミュレーションを行うにあたり、以下のような条件を設定した。

表-1 解析に用いた地震の諸元

発生日時	2001/02/24 01:19:09
北緯	24.74°
東経	121.06°
深さ	6600 m
マグニチュード	$M_L = 4.11$

表-2 解析に用いた地震の震源パラメータ

断層の走向角度	50°
断層の傾斜角度	35°
断層の滑り角度	90°
地震モーメント	1.8197×10^{14}

表-3 シミュレーションにおける物性値

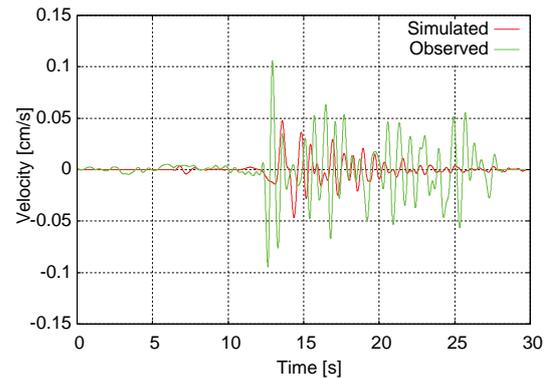
層	V_p [m/s]	V_s [m/s]	ρ [t/m]	Q 値
堆積層	1600	600	2100	100
基盤岩	2200	1100	2400	250

対象とした地震は、2001年に発生した地震であるが、震源に関する情報は震源位置、発震時刻とリヒターのローカルマグニチュードだけである。表-1に解析に用いた地震の諸元を示す。地震の発生位置から新城断層において断層が滑ったことによる地震と仮定し、断層の走向、傾斜角度については断層の形状から決定した。滑り角度については、新城断層が逆断層であることを考慮して、断層面に垂直方向から圧縮力が加わっているものとして推定した。地震モーメントについては、過去の地震でリヒタースケール M_L とモーメントマグニチュード M_W の両方が分かっている地震から、まず M_W を推定し、その後換算式によって地震モーメントを決定した。このようにして決定した震源パラメータを表-2に示す。

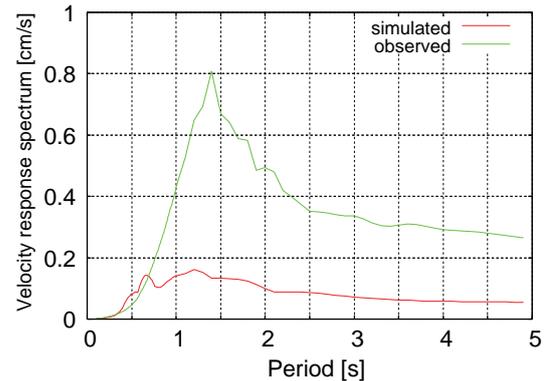
地盤構造については堆積層と基盤岩の2層構造として計算している。基盤岩までの深さは前節において求めたものを用いた。物性値については、P波およびS波の走時が合うように基盤岩および堆積層の弾性波速度を決定した。用いた物性値を表3に示す。

数値シミュレーションは防災科学技術研究所が配布しているプログラムコード Ground Motion Simulator (GMS)⁵⁾を用いた。シミュレーションではX方向、Y方向、Z方向の格子間隔を同一にして数値計算を行った。表層から深さ2000mまでは50m格子を用い、その下の領域では150m格子を用い、震源の深さを考慮して10000mまでをモデル化した。また、想定限界周波数は1.2Hzである。

TCU016(北門國小;北緯24.81°,東経120.97°,標高12m)で観測されたデータとシミュレーション結果とを比較する。図-14に震源の位置と震源モデルおよび観測点(×)の位置を示している。TCU016で、観測さ



(a) 速度波形



(b) 速度応答スペクトル [-2mm]

図-13: TCU016における観測記録とシミュレーション結果(NS成分)の比較

れた実際の速度波形とシミュレーションの結果得られたNS成分の速度波形および速度応答スペクトルを比較したものを図-13に示す。また、NS成分の速度波形の最大振幅分布図と基盤標高図を重ねたものを図-14に示す。

水平動成分についてはシミュレーション波形の振幅は観測波形より小さく、上下動成分についてはその逆であった。走時が合うように弾性波速度を決定したため、S波の到達時刻については、シミュレーション波形と観測波形でおおよそ一致しているように見られる。しかし、P波については、観測波形からP波の初動が読み取りにくいこともあり、整合性を判断することが難しい。

シミュレーション波形は、初動のあとごく短い時間で減衰している。これは震源モデルの設定やQ値の設定値が適切でないなどの問題もあるが、単純な2層構造で地盤をモデル化しているために、後続波をほとんど再現できていないことが大きな原因であると考えられる。最大振幅分布について基盤標高図との相関が見られ、基盤の深い所で振幅が大きくなっていることが分かる。

5. 結論

台湾新竹市において、重力探査を実施した。得られ

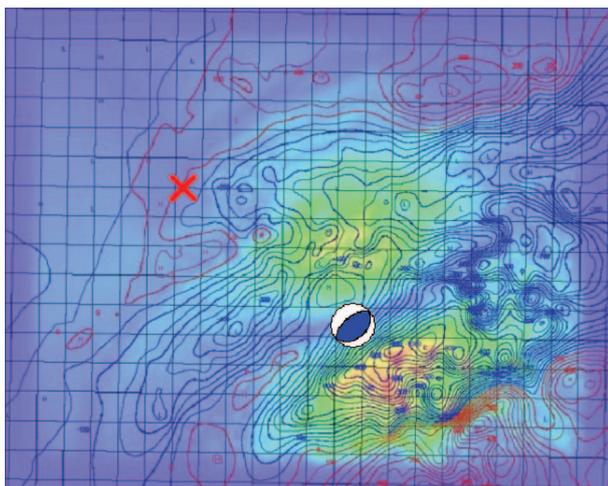


図-14 最大速度振幅分布と基盤標高の比較 (NS 成分)

た観測記録を用いてブーゲー異常を求め、逆解析によって三次元基盤構造モデルを構築した。

以下に本研究で得られた成果を列挙する。

- 三次元地盤構造を推定するにあたり、この地域の重力基盤の密度は $2.4t/m^3$ 、堆積層の密度は $2.1t/m^3$ と推定された。
- ブーゲー異常図から、対象地域の南東部において絶対値の大きな負の異常値が見られ、ここから北西、および南側に向かって大きくなっている。また、同じ傾向が基盤標高図においても見られる。
- 新竹市中心部については、ブーゲー異常値の絶対値が比較的小さく、浅い位置に基盤が存在することが推定された。
- 重力基盤の深度は新竹市内の 200 m から南東部の 1200 m まで複雑に変化しており、かつ、その起伏は、背斜、向斜構造や新城断層、新竹断層などの主要な断層位置とよい対応がみられた。
- 差分法による数値シミュレーションを実施し、観測記録とシミュレーション波形を比較した。S 波の走時があうように地盤の物性値を決定したが、

波形の振幅については地盤が単純すぎるために再現することができなかった。ただ、地震動の振幅の空間分布は定性的には理解しやすい傾向を示した。

謝辞：本研究を遂行するに当たって、National Chiao Tung University 土木工学科 Professor Cheinway Hwang および Taiwan and Ministry of Interior に新竹市周辺の重力データを提供していただいた。また、観測にあたっては、国立中央大学土木工学科の以下の方々にご尽力いただいた：Mr. Dong-Ching Lin, Mr. Rey-Yung Chen, Mr. Jen-Jei Wu, Mr. Shan-Ming Hwang, Mr. Wen-Shi Hwang。地震動の数値シミュレーションには、防災科学技術研究所が配布している GMS を利用させていただいた。以上、記して感謝の意を表する次第である。

参考文献

- 1) 坂井公俊・盛川仁：姉川地震による被害地域における重力探査を用いた三次元基盤形状のモデル化，物理探査，Vol. 58，No. 4，pp.331-338，2005。
- 2) Takahashi, C., Morikawa, H., Sekiguchi, H., Komazawa, M., and Sawada, S.: Estimation of subsurface structure around damaged area by the Niigata-ken Chuetsu earthquake using gravity survey, *Proc. of Third International Symposium on the Effects of Surface Geology on Seismic Motion*, (ESG 2006; Edited by P.-Y. Bard et al.), Grenoble, France, Vol. 1, pp.389-396, 2006.
- 3) 書帆：新竹地区地下構造報告，個人的交流による。
- 4) 駒澤正夫：重力探査，物理探査ハンドブック，物理探査学会，pp.433-468，1998。
- 5) 青井真・藤原広行：不連続格子を用いた 4 次精度差分法による波形合成，第 10 回日本地震工学シンポジウム論文集，Vol.1，pp. 879-884，1998。

(2007.06.29 受付)