

学位論文題名

堆積盆地の地震応答に関する研究

－石狩平野北部地域を例として－

学位論文内容の要旨

堆積平野で観測される地震記象は、地下の堆積盆地構造の影響によるS波の増幅や表面波の励起などにより、振幅が大きく、継続時間が長くなることが知られている。近年では、高密度な地下構造探査による関東平野や大阪平野など現実の堆積盆地構造の3次元地下構造モデルの構築が行われ、それを用いたシミュレーションによる堆積盆地構造が地震動に与える影響の評価が行われている。石狩平野北部においても詳細な地下構造探査が現在行われつつあるが、3次元地下構造モデルの構築やそれによる地震動の評価までには至っていない。本研究では石狩平野北部の盆地生成表面波に焦点を絞り、石狩平野北部において強震動観測を行い、その観測記象をもとに平野端部で励起される盆地生成表面波の性質を定量的に明らかにすることを目的とする。その目的のため、鉛直アレーデータを用いた解析法を新たに提案する。

北海道中央部に位置する石狩平野は延長約72km、最大幅約34kmの低地である。本研究の対象領域である石狩平野北部には札幌市や石狩市が位置する。石狩平野では従来から行われていた石油や天然ガスの探査に加え、近年では強震動予測のための地下構造探査が行われつつある。それらによると、石狩平野ではS波速度約3km/sの地震基盤の深さは最も深い所で3kmを越えている。一方、石狩平野は北東と南西を山地に囲まれ、堆積盆地構造を構成している。

石狩平野北部の地震動応答特性を調べるため、自治体などによる既存の強震観測点に加え、札幌市内に独自に9点の強震観測点を設置した。このうち3点は札幌市の500mボアホール地震計に併設し、鉛直アレーを構成している。独自の観測点では主に現地収録のイベントトリガ方式で観測点ごとに独立に収録を行った。大半の観測点でGPSによる時刻較正を行った。1999年1月から2003年7月までの期間にマグニチュードが1～7、震源の深さが0～700kmの約260個の地震が記録された。

石狩平野北部の観測点で得られた深発地震の記録を概観すると、山地帯の観測点の記録に比べ平野内の観測点の記録では振幅が大きく、継続時間も長い。また平野内の観測点の間でも波形は大きく異なる。入射波形が主に実体波からなる近地深発地震に対する石狩平野北部の地震動応答特性を調べるため、(1)S波の増幅特性、(2)後続波の励起特性の2点を検討した。

近地深発地震に対するS波の増幅特性を調べるために、岩盤観測点(HSS)の波形を基準として、微動探査などによる1次元地下構造モデルをもとに堆積層の影響を評価し、各観測点のS波の波形を合成した。この合成した波形と実際の観測波形を比較したところ、S波部分については概ね良い一致を見ることができ、ここで堆積層の影響の評価に用いた1次元地下構造モデルが概ね妥当なものであることが示された。

後続波の励起特性を調べるため、いくつかの近地のやや深発～深発地震の記録を、S波の位相を揃えて並べたものを作成した。S波が揃うように波形を並べたとき、堆積盆地構造の影響によりS波から2次的に励起された波が存在すれば、その波も位相が揃うことが期待される。作成した図では、手稲地区の観測点KNNやMEDでの直達S波到達時刻には上下動に振幅の大きな

波は見られない。しかし、S波からはほぼ一定の時間の後、上下動に波群が出現する。また、これらの波群の出現時刻のS波からの遅れは山側から平野中央部に向けて増大している。つまり、これらの波群は、S波から2次的に生成された波で、山側から平野中央に向けて伝播しているように見える。

このS波に続いて観測される後続波の性質を調べるため、ボアホール地震計アレーで得られた鉛直アレーデータを利用して観測波形をP波、S波、レイリー波、ラブ波の各相に分解する方法を提案した。この方法は、1次元構造を仮定するとき、任意の深さの間で、ある相の波の周波数領域での振幅と位相が線形関係で表され、その関係が相によって異なることを利用する。鉛直アレーデータの記録をフーリエ変換し、観測記録を満たすようなそれぞれの相の成分を線形最小自乗法で求め、各相の成分を逆フーリエ変換し、各相に分解された波形を得ることができる。

この方法を用いて、まず数値実験を行い、各相が重なり合い一見極めて複雑な波形であっても、伝達関数が正確で、ノイズがなければ完全に分解することができることを示した。また、伝達関数が多少不正確だったり、ノイズが存在する場合には、ラブ波とレイリー波の分解能力が劣るが、このような場合でも、ラブ波とレイリー波を足し合わせた表面波成分を比較的安定に求められる解析法であることを示した。この方法の現実のデータへの適用例として、東京大学地震研究所が足柄平野に設置した鉛直アレー観測点のCNTのデータを解析した。その結果をもとの観測記録と比較、検討すると、その分解結果は自然なものであり、この方法は実際の観測データに対しても有効であることが示された。

石狩平野北部の観測点で後続波が検出された観測点のうち鉛直アレーが設置されている手稲前田観測点(MED)の深発～やや深発地震の記録をS波と表面波に分解した。その結果、S波から8～10秒後の波はレイリー波、12～15秒後の波はラブ波であることが明らかになった。特にラブ波は分解を行ったことによりその相を明らかにすることができた。これらの波群の群速度、S波からの時間遅れ、ラブ波とレイリー波の振動方向から、分解されたラブ波とレイリー波は共に西南部山地と平野との境界の盆地端部においてS波から励起された盆地生成表面波であることがわかった。

最後に、盆地生成表面波が石狩平野北部の盆地端部構造により生成されることを検証した。まず、盆地端部の構造を明らかにするために、石狩平野北部の構造の走向と直交する測線で人工地震動の観測を行い、そのデータを屈折法で解析し、構造の推定を行った。盆地端部での観測走時を説明する構造として、モデルを2種類作成した。この2種類のモデルに対して重力異常を計算し、観測値との比較を行った。これにより、P波速度5.5km/sの基盤形状の大きな形状を明らかにした。

この探査結果や既存資料などをもとに手稲地区周辺の2次元地下速度構造モデルを作成した。このモデルに対し深発地震を想定し鉛直下方からのS波入射を仮定し、差分法による2次元波動シミュレーションを行った。その結果、P-SV、SH波の両条件に対し盆地生成表面波が現れ、それらの各観測点に対する表面波の出現時刻は実際の観測波形中のそれらと対応がよいことがわかった。岩盤観測点を基に合積により各観測点の観測波形を合成したところ、後続波に至るまでかなりよく再現できた。

以上の研究成果から、石狩平野北部の地震動の増幅特性と盆地生成表面波を堆積盆地構造モデルを用いて定量的に評価できることがわかった。また、鉛直アレーデータを用いた相分解法を新たに提案した。

学位論文審査の要旨

主 査	助教授	笹 谷 努
副 査	教 授	西 田 泰 典
副 査	教 授	小 山 順 二
副 査	教 授	蓬 田 清
副 査	助教授	森 谷 武 男

学 位 論 文 題 名

堆積盆地の地震応答に関する研究

－石狩平野北部地域を例として－

堆積平野で観測される地震動は、その盆地構造の影響による S 波の増幅や新たな表面波の励起などにより、振幅が大きくなり、その震動継続時間が長くなることは定性的には知られている。多くの大都市は堆積平野に位置しており、その地震動災害を軽減するためには、第 1 に堆積盆地構造を明らかにし、その地震動への影響を定量的に評価することが肝要である。大都市の位置する関東平野や大阪平野などでは、古くからこのような研究が精力的に行われてきた。しかし、北海道最大の都市である札幌市の位置する石狩平野北部においては、堆積盆地構造の解明及びその地震動への影響評価に関する研究は、その緒に付いたばかりである。

本論文は、このような状況にある石狩平野北部地域（今後はこれを札幌都市域と呼ぶ）を対象として、地震観測データに基づきその堆積盆地の地震応答を定量的に明らかにしたものである。特に、山地と平野の境界（盆地端部）で励起される盆地生成表面波の特性を定量的に評価した。

著者は、本研究を遂行するために、札幌市内に 9 点の強震観測点を独自に展開し、多くの強震動データの取得を行った。このうちの 2 点は西部の山地部に設置されている。また、3 点は、札幌市の有するボアホール地震計（深度 500 m）の地表部に設置され、鉛直アレーを構成した。さらに、札幌市手稲地区において、山地から平野にかけて、その境界に垂直な方向に 3 点からなる水平アレーを展開した（このうちの平野部の 1 点は鉛直アレー観測点でもある）。本研究においては、これらの観測点と自治体などの観測点で得られたデータの中で、盆地への入射波動場が単純である近地の深い地震による記録を解析対象としている。

まず、堆積層による S 波の増幅特性について検討した。平野部の S 波振幅は、山地の S 波のそれに比べて数倍増幅されており、その増幅特性（周波数特性）は札幌都市域の各地点で異なることを明らかにした。そして、微動探査法等で推定された堆積層の S 波速度構

造（深さ約3000m）を基にして計算されたS波理論波形（1次元多重反射理論による）と観測波形とを比較し、1Hzよりも低周波数側において両者が良い一致を示すことから、推定されている深層S波速度構造の妥当性を明らかにした。

次に、平野部においてS波に続いて存在する特異な後続波の特性を調べるために、手稲地区の水平アレー記録を詳細に検討した。近地深発地震による多くの記録をS波の位相を揃えて並べ、これらの後続波がS波からほぼ一定時刻に常に出現すること、上下動と水平動とでその出現時刻が異なること、そして、出現時刻のS波からの遅れが山地からの距離に比例していることを明らかにした。

続いて、鉛直アレー記録の新たな解析法を開発し、これらの後続波の位相（P波、S波、レイリー波、ラブ波）を特定した。この方法は、観測点直下を1次元構造と仮定すると、地表と任意の深さでのある位相が周波数領域で異なった伝達関数（一般には複素数）によって線形に結ばれることを利用している。この方法の有用性を数値実験で確かめた後で、手稲地区の鉛直アレーデータに適用し、S波から8～10秒後に出現する後続波がレイリー波、12～15秒に出現する後続波がラブ波であることを明らかにした。つまり、S波に続くこれらの後続波は、S波入射により盆地端部で励起された盆地生成表面波である。

最後に、盆地生成表面波の励起特性を定量的に検討した。2002年に札幌市は市内の地下構造調査のためにダイナマイトによる爆破実験を実施したが、その際に著者は、手稲地区の地質構造の走向に直交する測線で約40点の臨時観測点を独自に展開してその人工地震波を観測した。このデータと既存の重力異常データの解析から手稲地区の山地から平野にかけての2次元地下構造（盆地端部構造）モデルを構築した。そして、このモデルに対して深発地震を想定した鉛直下方からのS波入射を仮定し、差分法による2次元波動シミュレーションを実施した。その結果、SH波及びSV波の両入射に対して盆地生成表面波が励起され、それらは実際に観測された特異な後続波をかなり良く再現することを明らかにした。これらの研究成果は、札幌都市域での地震動災害を軽減するための強震動予測に役立つものと期待される。

よって著者は、北海道大学博士（理学）の学位を授与される資格あるものと認める。