

地盤構造探査からみた入力地震動

東京工業大学 盛川仁

1. はじめに

構造物への入力地震動を設定する、という手続きは、究極的には、ある場所で発生しうる最大の地震動を予測する、ということにほかなりません。精度の高い地震動予測を行うために、波動方程式を差分法によって直接数値的に解いて、特定の地点での地震動を計算する技術がこの10年くらいで非常に注目されています。その背景として、計算機の急速な性能の向上により、これまでとてもできそうにもなかった計算の実行が次々に現実のものとなった、ということが挙げられるでしょう。

計算機の高速化と低価格化、関係者による計算技術の普及のための努力により、地震動の数値計算は、かつてのようなごく一握りの研究者や技術者のものではなく、誰にでも比較的簡単に実行可能なものとして、広く利用されるようになってきました。ただし、地震や地盤の適切なモデルがあつてはじめて意味のある計算結果が得られる、という実に単純きわまりない事実には、多いに注意を払っておかねばなりません。

また、巷に存在する多くの構造物の固有周期は1秒から0.2秒の間におさまる、と考えてよいと思いますが、現時点ではこのような周期帯域において、差分法によって地震動を直接計算することは非常に困難であると考えられています。もちろん、計算機資源としての物量を投入することである程度は解決できる問題ではあります。しかし、その一方でそれだけの詳細な計算に見合うだけの詳細な地盤や地震に関する情報があるわけではありませんから、たとえ計算が実行できたとしても、その結果に現実の現象のシミュレーションとしての意味があるかどうかは別の問題です。

以上のように、すでに、地震動予測というのは、計算の技術そのものから、その前提となる地震や地盤のモデル化をどうするか、というところが眼前の問題となってきました。将来発生するかもしれない地震の特性を事前に規定することは、本質的に困難を伴う作業です。しかし、地盤構造については、次の地震が発生するまでに、今すぐにも調査をすればそれがそのまま地震動予測の精度の向上に貢献するという実在にわかりやすい特徴があります。このことは、地盤構造探

査を実施するということが地震動予測をする上で投資効果の高い作業であることを示唆しています¹。

地盤構造の推定には、物理探査と呼ばれる様々な手法が駆使されますが、構造物を専門にやっている技術者や研究者には少し縁遠いもののように思われます。本稿では、構造物への入力地震動を計算する際に、どうしても避けて通れない地盤構造のモデル化について主として微動を用いた地盤構造探査という観点から思いつくままに書き連ねていきたいと思えます。ここで対象とする地盤構造とは、地震基盤とよばれるせん断波速度が3 km/s程度の層から上(表層)の構造に限ります²。

なお、以下には、筆者の不勉強による誤解、勘違い、思い込みなどが少なからず含まれている可能性があります。書いていることを鵜呑みにしないで、ぜひ批判的にお目通しいただき、お気づきの点やご意見がありましたら、是非、お知らせいただければ、と考えています³。

2. 微動探査法

微動探査法というのは、かつて、北海道大学の岡田広先生が使われた言葉のように記憶していますが、名前がどうであれ、微動を使った地盤探査は日本では広く利用されてきました。微動を用いた地盤探査には、主として2つの方向性があり、ひとつは、1地点で3成分の微動を観測し、水平動/上下動スペクトル比(H/V)を計算し、その形状から地盤構造を議論しようとするものと、もうひとつは、多地点で同時に観測を行うアレー観測を行って位相速度を推定し、その位相速度を満足する地盤構造を求める、というものです。以下では、前者の三成分単点観測、後者をアレー観測、と呼ぶことにします。

¹いささか我田引水と言われるかもしれませんが...

²地球物理学的には、地殻やマンツルの構造という話のほうが興味をひくような雰囲気がありますが、そのような全地球的規模の地盤構造は構造物の設計をどうしようか、というような工学的な目的には直接的なご利益があまりありませんので、省略します。

³なんと手前勝手なやつ、と思われそうですが、せっかくこういう記事を書かせていただく機会を頂戴したのですから、有効に活用して勉強や議論の糧にしたい、思う次第です。

2.1 微動とは何か

そもそも、微動とは何なのでしょう。

微動とは、常に存在しているごく微小な震動のことを言います。もちろん、体にはまったく感じない震動です。そして、その震動は地面の震動なんだから、その場所の地盤構造の影響を受けた震動であるわけで、そこから地盤構造に関する情報を抽出できるはずだと考えるのです。従って、微動探査とは、そこらへんに落ちていくごくごく小さな震動を拾ってきて、地盤構造を推定する手法、と行うことができるでしょう。微動探査においては、震源を準備する必要もありませんし、いつでもどこでも、必要なときにセンサーを持ち出して、観測をすれば直ちに、必要な情報を得ることができる、という点で非常にお気楽で便利な方法であるといえます⁴。

震源がいない、というのは便利ではありますが、見方を変えると震源が何かわからない、ということであり、地震や人工地震を用いた他の物理探査法に比べると観測によって得られる波の素性がよくわからない、ということが問題になります。実体波だろう、という説といや、表面波だ、という説がありますが、現実には両方が混じっているのでしょう。ただ、微動の観測記録から地盤構造に関する何らかの情報を抽出するためには、微動がどのような素性の波であるか、ということ仮定したうえで理論を構築し、解析を実施する必要があります。筆者個人は微動は大部分が表面波で構成されているだろう、と考えていて、この考え方は、それほど、マイナーな立場ではないと思っています。

微動の震源はなんだかわからない、と上に書きましたが、これは、震源をきちんと一意に特定できない、という意味であって、どのような物理現象によって、微動が生成されているのか、ということはいたい理解されています。1秒から10秒程度の周期帯を「やや長周期帯」と呼ぶことがあります。このやや長周期帯の微動は通常「脈動」と呼ばれていて、海の波が海底を叩くことによって生じる波であると考えられています。これは、天気図と脈動レベルの相関性や台風の進行状況と脈動の伝播方向との関係などから、間接的に示されています。

日本のように四方を海に囲まれていて、500kmも行けば必ず海岸にぶつかるような地域では、日本のどんな場所でも脈動をかなり高いレベルで観測できることには納得できます。しかし、チベット山脈のふもと、海

から数千 km 離れた山奥でもそれなりのレベルで脈動は観測されています⁵。このように、地球上のどこへ行っても脈動を観測できそうだと、ということは⁶、地盤構造を決める、という目的からはそれなりに便利なことではあります。

一方、1秒よりも短周期側の微動は、「短周期微動」と呼ばれることがあります⁷。短周期微動は主として、自動車や工場などから発生する人工的な振動が震源と考えられています。そのため、多くの場合、昼間は震動レベルが高く、深夜は非常に低くなる、また、平日はレベルが高く、日曜日は低い、といった日毎、週毎の周期的変動が見られます。日本のように社会活動が活動的な地域では短周期微動が非常に卓越しますが、人里離れた奥地へ行くと短周期微動よりも脈動の方が卓越する場合があります⁸。

2.2 微動を観測する

三成分単点観測にしる、アレー観測にしる、微動を観測して記録をとらないと、地盤構造を推定する、という話は始まりません。微動を観測するためには、センサー(換震器、地震計)が必要です。しかも信号のレベルが非常に小さいため、高感度のセンサーを使うこととなります。もちろん、短周期微動を観測する場合は、信号レベルが小さいとは言っても、やや長周期の脈動に比べれば信号レベルはずっと大きいですから、センサーの感度がほどほどでも、それなりの記録をとることができます。したがって、短周期微動の観測にあたっては、どのようなセンサーを用いても、よほど作りが悪いものでなければセンサーの性能が問題になることはないと言えます。

しかし、脈動を観測するためにはそれなりの準備が必要です。

小型のセンサーを用いると、観測もお手軽で、便利なのですが、小型のセンサーに入っている振り子の固有周期は1秒よりも短いのが普通です。そのため、1秒よりも長周期領域ではセンサーの感度が非常に低くなっており、脈動の信号は短周期微動にマスクされてしまったり、アンプ回路から混入するノイズに埋もれたりして正しい信号を得ることが難しくなります。従って、固有周期が2秒とか10秒というようなセンサーを使うこととなります。固有周期が長ければ長いほど、

⁵中国雲南省の奥地、麗江盆地で脈動が観測されたときは、素直に感動しました。

⁶確認したわけではありませんが...

⁷単に「微動」、と言ったとき、デフォルトで短周期微動を指している場合も少なくありません。

⁸もちろん、地盤構造や天候にもよりますから、この記述は、だいたいイメージです。

⁴微動探査の技術は世界中を見回してみても、日本においてももっとも普及しているように思われます。これは、微動探査の普及を目指して実際の観測をコツコツと積み重ねてきた先人の大いなる努力の賜物と言えると考えています。

センサーを安定して設置することが難しくなりますので、お手軽、という微動のよさが多少スポイルされてしまう、ということは覚えておく必要があります。

そこで、小型でも長周期成分を正確に記録するという目的で、サーボ型のセンサーが用いられることがあります。これは、振り子に対してフィードバックをかけることで、見かけ上、センサーの感度が長周期領域まで一定となるようにしたものです。しかし、フィードバックをかけるときにサーボアンプを用いるのですが、このアンプが必ずしも予定通りに安定な動作をしない、という問題があります。特性上は DC (直流成分) までフラットなレスポンスを示すはずのアンプも、微妙にゼロ点がフラフラ動いてしまい、記録を見たときに、その振動が信号によるゆらぎなのか、アンプのゆらぎなのか区別がつかない、ということになってしまいます。

サーボ型センサーでは、振り子の状態が設計値と厳密に同じである、という前提でフィードバックをかけているわけですが、実際には、センサーを設置したときに期待通りの特性になっていることはあまり期待できません。水準器で水平をとってセンサーを設置しますが、水平にしたつもりでも少しは傾いているのが普通であって、その場合は、固有周期や減衰定数は設計値とは異なっています。振り子の本来の固有周期よりも長い周期帯では、センサーの特性の設計値との小さなズレはそのまま測定値の大きな誤差として出力されますから、これは、たいへんです。

信号とノイズの区別がつかない、という点では、上記のアンプ系のノイズも馬鹿になりませんが、観測時の風の影響も無視できません。風に吹かれてセンサー全体が揺らされる場合、その周期はだいたい 3 ~ 10 秒で揺れます。従って、記録から、脈動と風の違いを区別することはできません。この問題を解決するには、記録を取る段階で風の影響が入らないように対処するしかないわけですが、ほとんど体を感じないような弱い風であっても、高感度な観測を行っているために、ばっちり風を拾ってしまい、わけのわからない記録になってしまいます⁹。段ボール箱などをセンサーにかぶせて風よけをする、というのが単純ですが一番確実な対策です。

短周期微動を観測している場合には気がつきにくいのですが、センサーのすぐ横を人や自動車を通った場合、地面が傾いて、そしてまた元に戻ります。ちゃんとしたセンサーならば、この地面の傾きをきっちり捉

⁹センサーがある程度重いケースに入っている場合は、風の影響は受けにくくなりますが、それも程度問題です。また、上下動成分は風の影響はほとんど受けません。



写真 1 動コイル型地震計の例

えることができますので¹⁰、この地面の動きが、脈動と同じやや長周期領域の震動として記録に残ります。

結局の所、脈動を観測する場合には、サーボ型を使うよりは、昔ながらの単純明快な動コイル型でしかも、固有周期が長いセンサーを使うのが一番間違いない、と考えています。もしも、小型のセンサーを使うのであれば、動コイル型を使用し、観測のたびにセンサーの特性をきちんと測って解析の際に厳密な計器補正をかける、というのが次善の策と言えるでしょう。参考までに、写真 1 に筆者が用いているセンサーの例を挙げておきます。これは、固有周期が 2 秒と比較的長いわりには小型ですので、持ち運びにも便利です。厳密な計器補正によって少なくとも 10 秒までは正確な記録を得ることができます。脈動観測では、適切なセンサーを用いて、風対策をきっちりとおこない、そのうえで、観測中はセンサーに近づかない、というごく当たり前のことをすれば、信頼性の高い記録を得ることができるでしょう。

2.3 三成分単点観測

三成分単点観測は、これまで、日本国内では実に多くの人々によって実施されてきて、地盤構造の推定の資料として広く使われてきました。

微動が表面波だとすれば、H/V は表面波の楕円率 (ellipticity) を表しているはずですから、H/V のピークや谷を与える周期は地盤の速度構造と強い相関があるはず。もちろん、観測された H/V の形状を満足する速度構造を逆解析によって探索する、という方法もあり得ますが、実際には局所解が多すぎて、正攻法ではとてもではありませんが、まともな解を発見で

¹⁰これが記録されないようなセンサーの出力は信用してはいけない、ということでもあります。

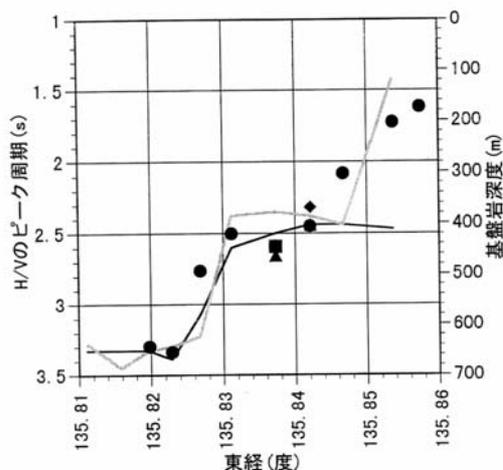


図1 H/Vのピーク周期と基盤岩までの深さの関係

きません。結局のところ、H/Vのピークを与える周期の変化が速度構造のもっともコントラストの強い部分の深さの変化に対応している、という予測と多くの観測事実を根拠として、H/Vのピーク周期の変化から基盤の相対的な深度の変化を追跡する、というのが微動の三成分単点観測記録の上手な利用法と言えます。

図1にある場所において反射法によって得られている基盤までの深さとH/Vのピーク周期の関係を反射法の東西測線にそってプロットしたものを挙げておきます。折れ線がH/Vのピーク周期で線の色の濃い、薄い水平動成分をそれぞれNS(南北)、EW(東西)成分について別々にプロットしたためです。●が反射法による解釈図から読み取った基盤岩までの深さをプロットしたものです。なんとなく、対応がついている、という程度ですが、大雑把には、H/Vのピーク周期で基盤までの深さの相対的な変化が表現されていると言えるでしょう。

H/Vの値そのものが地盤の増幅度を表している、という考え方も広く受け入れられていますが、実際のところ、うまく説明できる場合もあれば、そうでない場合もあったりしてどのような条件下でうまくいくのか、ということがはっきりしていません。また、このような考え方の理論的背景としては、微動を実体波と見なしているような場合もあり、そうでないような場合もあり、H/Vを地盤の増幅度とみなしてよいのかどうか、ということについては、筆者は確信を持って何かを言うことができません。当面は、三成分単点観測から得られる記録において、利用できる量はH/Vのピーク周期であり、必要ならば次に述べるアレー観測の記録とあわせて議論するのが妥当であろう、というのが筆者の率直な印象です。

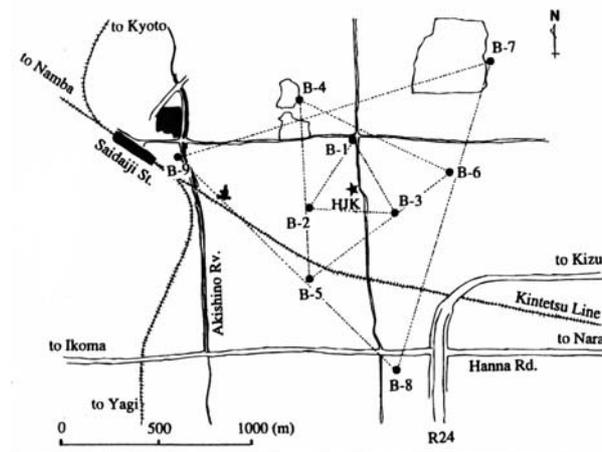


図2 微動アレー観測の観測点配置の例

実際のところ、最近の地盤構造推定に関する研究の様子を見てみると、単純にH/Vのみを用いる、という手法はかつてに比べて著しく減少し、次節に述べるアレー観測をおこなって、物理的意味が明確な位相速度を推定した上で速度構造を求めようとする手法が主流になってきているようです。三成分単点観測による地盤構造の推定手法はその簡便さから広く普及しましたが¹¹、計測器の低価格化、特にGPSによって校正される高精度の時計の普及による記録の同期の容易化により、アレー観測を実施することに対する敷居が低くなった、ということも現在の傾向を後押ししているでしょう。

2.4 アレー観測

微動が表面波である、と考えれば、その位相速度を推定し、地盤の速度構造をかなりもっともらしく推定することができます。このためには、たくさんの地震計で同時に記録をとってそのなかのコヒーレントな波を抽出して位相速度を推定する、という作業が必要になります。このような観測法をアレー観測と呼んでいます。一般には1重または2重の正三角形およびその重心位置にセンサーを置くことでアレーを構成しますが、解析法によって、センサーの設置場所の制約が厳しかったりそうでない場合があります。

図2に奈良の平城宮跡でアレー観測を行った際の観測点の配置の一例を挙げておきます。HJKという点を中心として半径300m~1kmほどのアレーを構成しています。

また、地震計をおく間隔を調節することで様々なス

¹¹簡便である、ということの魅力は今でも十分に高いと思いますが、物理的背景の不明瞭さがなんとなく足かせになっているように思います。

ケールの地盤構造を知ることができます。これは、位相速度を知りたい波の波長によってだいたいのアレーのサイズが決まりますが、これは、見たい地盤構造の深さのスケールでもあります。ただ、あまりにも大きなアレーを設定した場合、コヒーレントな波を捕まえることが難しくなってしまう、理論から期待されるような長い波長の波の位相速度を推定することは難しくなるようです¹²。

アレー観測記録の解析については、かつては広く用いられていたけれどもプログラミングが面倒な周波数-波数 (F-K) 法から空間自己相関 (SPAC) 法に主役の座が入れ替わってきているように見えます。SPAC 法は、理論の枠組みが単純明快で、プログラミングが容易であること、比較的ノイズに強いこと、小さいアレーで F-K 法に比べて長い波長の波の位相速度を推定可能であること、などの特徴が、アレー形状において厳しい制約が存在する¹³、という欠点に勝る魅力である、と認識されるようになってきたことが、このような傾向につながっているものと考えられます。

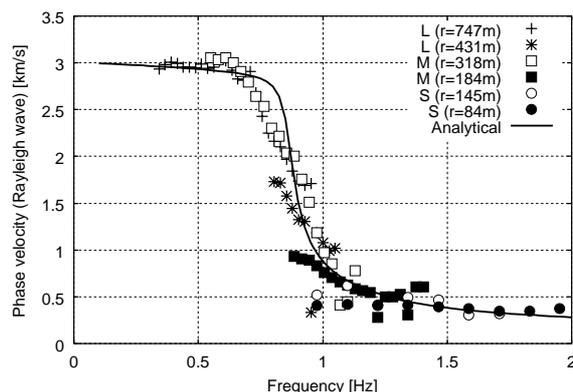
アレー観測によって地盤の速度構造を推定する方法は、位相速度と云う物理的に非常にわかりやすい量を用いますから、理論的背景も明快でたいへん結構なのですが、残念ながら、困ったこともあります。

深い構造を調べたい、という場合、波長の長い波を捉えなくてはなりませんから大きなアレーを設置しなくてはなりません。推定された位相速度から地盤の速度構造を求める際に、私たちは、アレーの下の地盤が水平成層構造であることを仮定して解析するのが普通ですが、アレーが大きくてキロメートルのオーダーになってくると、この仮定がかなり怪しい場合がでてきます。もちろん、解析をすれば何かしらの答えはでてきますが、でてきた速度構造が一体何を反映しているのかわからない、ということになってしまいます。

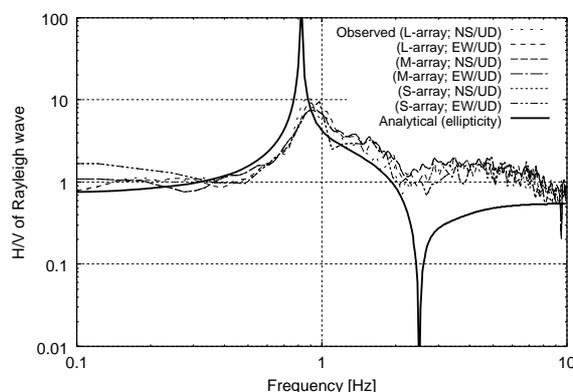
アレー観測では、たくさんの地点での同時観測をやつてようやくひとつだけ速度構造が決まる、ということになります。つまり、あんまり効率が良くないのです。三成分単点観測の場合は、観測を行ったらその分だけ、カバーする領域が広がっていくという目に見えるヨロコビがありますが、アレー観測の場合は、1日かけてやっと1ヶ所、という具合でそれなりにたいへんで

¹²これは経験上の話ですので、単に筆者の観測がヘタクソなだけかもしれません。位相速度にもよりますが、センサーの間隔が2kmを超えるアレーで観測を行うと、インコヒーレントな波で記録が埋め尽くされているような気がします。あくまでも筆者の感覚では、ということですが。

¹³SPAC 法では正確に正三角形または正五角形になるように観測点を設置しないと見えます。F-K 法では、観測点の配置については、ルーズでも問題ありませんが、偏った形状にすると位相速度の推定精度は悪くなります。



(a) 観測から得られた Rayleigh 波の位相速度と地盤の速度構造モデルから計算される Rayleigh 波の基本モードの理論分散曲線



(b) 観測から得られた H/V と (a) で用いた地盤の速度構造モデルから計算される理論楕円率 (ellipticity)

図 3 微動の位相速度と H/V

す¹⁴。

そんなわけですから、要所ではアレー観測を行って、きっちりと速度構造を推定しておき、基盤の3次元形状を決めるために面的に観測点を増やすには三成分単点観測をたくさんやってアレー観測点の間を埋める、というこれら2つの観測法を組み合わせるとするのは悪くない方法と言えるでしょう。

3. もっと詳しく知りたい

3.1 微動データの高精度解析

微動探査法は比較的簡単に地盤の速度構造を推定することができますから¹⁵、たいへん便利な方法です。しかし、面的に観測点を増やすために三成分単点観測を行った場合、得られた結果があまり安定していないのではないかと、という精度への不安がなんとなくつき

¹⁴もちろん、頑張ればいいじゃん、という説もないわけではないのですが、最近になって、頑張りにも限度があるってことを、理性とは関係なく肉体が強く主張するようになってきました。

¹⁵反射法や屈折法に比べて、と云う意味ですが

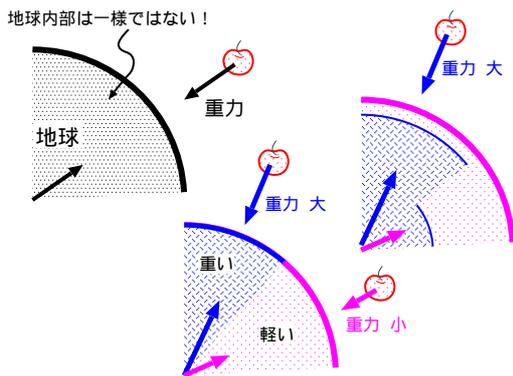


図 4 重力異常の概念

まといます¹⁶。

そのため、たとえば、位相速度と H/V の組み合わせや、微動と別の物理量との組み合わせにより、結果の妥当性を多面的に検証しながらよりよい精度で速度構造を推定しようとする研究が多くなってきています。特に微動アレーの観測の際に、三成分の微動を観測しておけば、位相速度と H/V を同時に検討することができますから、位相速度を満足する速度構造から理論的に求められる ellipticity が観測値から得られる H/V とどの程度整合しているか、についての検討はかなり広く行われるようになってきています。位相速度におけるあいまいさを H/V によって補って速度構造の推定結果をより高い精度で求めようとするためには非常に合理的な考え方といえるでしょう。

図 3 にアレー観測から求められた位相速度と H/V を満足する地盤の速度構造から求められる Rayleigh 波の基本モードの理論分散曲線および ellipticity の例を示します¹⁷。

3.2 微動と重力の組み合わせ

微動と組み合わせる他の物理量としては重力が有力です。重力値は地球内部の密度の違いを反映している量ですから、そこから得られるものは密度構造であって速度構造とはベツモノです。しかし、そのことは承知のうえで、でも、密度とせん断波速度にはそれなりに高い相関がありますから、密度構造が速度構造と高い相関があるに違いない、と思わせる説得力があります。

そのうえ、観測によって得られる重力値は非常に物理的背景がはっきりとしています。ある地点におけるまぎれもなく唯一無二の物理量ですから、微動の三成分単点観測から求められる H/V のピーク周期という

ような曖昧な量とは本質的に異なります。そして、この重力値は日本全国にわたって相当な密度でデータが整備されているのです¹⁸。

地質調査所が重力値の全国の観測データをおさめた CD-ROM を発行したこと¹⁹、そのなかには密度構造を直接的に反映したブーゲー異常値も含まれていることが、地震動の分野で重力データの利用が広がりつつある原動力となっているのではないかと想像しています。微動のアレー観測によって空間内で離散的に得られている地盤の速度構造を補間して、基盤の 3 次元形状を得るためにブーゲー異常の形状が使われることがあります。

この方法は上記 CD-ROM に収録されているデータをダイレクトに利用することができて、たいへん良さそうなのですが、重力値は地表面から地球の中心までの密度構造を反映して決まる量ですから、私たちが対象としているような地球のスケールから見ればごくごく表層の数 km の密度構造を議論するには、余計な情報がたくさん含まれすぎています。図 4 に重力異常に関する概念をごく簡単に示しています。

重力を利用する場合は、もう少しきちんとした解析を行わなくてはなりません。特に、非常に深い部分²⁰の影響は、表層の細かな変化とは関係なく、広域的なトレンドとして重力異常値の中に現れてきます。もちろん、重力は距離の 2 乗に反比例して小さくなりますから、地表面での重力値がごく表層の影響を極めて強く受けていることは間違いありません。しかし、だからといって、地球全体の大きな構造も込みにして表層の構造を議論してしまってもよい、ということにはなりません。

ブーゲー異常値から適当な基盤の 3 次元形状を抽出するためには、対象とする深さにあわせて空間的なバンドパスフィルタをかけることが必要となります。表層を対象とする場合は、もっとも短波長領域のブーゲー異常の変化に着目すればよいこととなります。このような、データ取り扱いの際のちょっとした点に注意すれば、重力値は、非常に便利に利用できると考えています。

日本における重力値のデータは驚くほど整備されて

¹⁶ 図 1 を見て精度に全然不安を覚えないうえ、と云う人はこの節はスキップしていただいても問題ありません。

¹⁷ 観測値と理論値の整合性は結構良い方だと思いますが、自画自賛でしょうか。

¹⁸ 重力値は自律航行するミサイル (巡航ミサイルというやつです) が超低空を地面に衝突しないで安定して飛行するためには、その軌道計算において重要な情報です。従って、国によっては国家機密として管理しているところもあるようです。そんな重要なデータが 1000 円くらいの CD-ROM の形で、自由に誰でも簡単に入手できてしまう日本と云う国は、なんと云ってよいのかわかりませんが、科学的、工学的な立場からは実にありがたいことです。

¹⁹ 2004 年に第二版が発行され、データがさらに充実しています。

²⁰ ここでは、マントルまで、といったスケールで、深いと言っています。

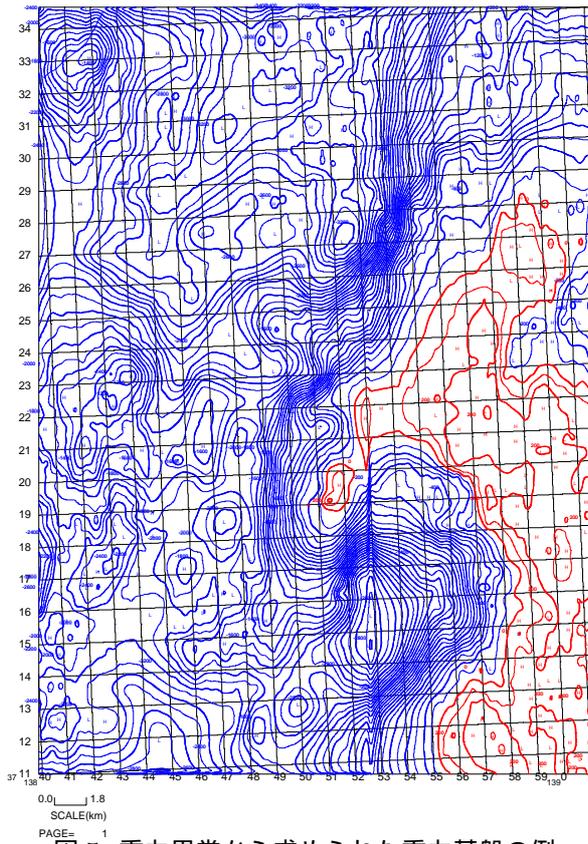


図5 重力異常から求められた重力基盤の例

いますが²¹、しかし、それでもある特定の地域での地震動を計算する、という目的には十分な観測密度ではない場合もあります。結局、これも必要に応じて観測を追加するしかありません。もちろん、既にある観測値とあわせて解析ができること、近年ではGPSの普及により位置決めが簡単になって、脈動の観測に比べてずっと観測が簡単にできるようになったことを考慮すれば、微動探査と重力探査を組み合わせることもよい考えであると思います。

ある地域において、微動アレー観測から得られた速度構造を制約条件として与えて、重力基盤の3次元形状を求めた例を図5に示します。この図では、細かい基盤形状の変化を追跡するために地質調査所のCD-ROMのデータに独自の観測点を大幅に追加して求めたものです。複雑な基盤形状が読み取れるのではないのでしょうか。

4. 入力地震動を考える

なんだか、予備知識に類する話を書いているうちに、紙数もいつのまにやら多くなってしまいました²²。し

²¹ なにしろ、世界中にある可搬型の相対重力計の1/3は日本にある、という話もあるぐらいです。

²² というか、自分の好きな話ばかり書いて、それって完全に我

かし、地震動予測の話をするのがそもそもの目的でしたから、そのことに多少なりとも言及しなくてはなりません。以下では、差分法が利用できるやや長周期領域と、それが難しい1秒以下の短周期領域について、それぞれ別々に議論したいと思います。

4.1 やや長周期領域の地震動

やや長周期帯域の地震動は、工学的には大スパンの橋梁や石油タンク、高層ビルといった長大構造物の振動に大きな影響をおよぼします。特に、首都圏の深い深い堆積層の上ではこのような周期帯で揺れやすいことが知られていますので、見過ごしにできません。

既にこの周期帯の地震動の数値計算の技術は確立しているといつてよい状態にあります。従って、地震の特性と地盤構造さえわかっている、しかもそれなりの計算機を用意することができれば、任意の地点での地震動を計算によって求めることが可能です。

ただし、この前提条件が曲者です。

将来の地震の特性が事前にわかるほど我々は地震について詳しいわけではありませんし、地盤構造についても十分な知識があるとは言えないのが現実です。計算のための技術が確立していることと、それによってよい推定値を得られるかどうか、は全く別の問題なのです²³。

この周期帯の地震動は地震基盤の3次元形状に大きな影響を受けると考えられています。しかし、波長が長いですから、ごく表層の細々とした構造の違いや変化には鈍感です。大雑把に言って、地震動の波長と同程度のスケールの地盤構造の変化をモデル化できれば、数値計算の用には事足りることになります。ですから、脈動を利用した構造推定、というやり方はよい選択であると言えます。

もちろん、地盤構造を知るためには適当な場所でボーリングをして調べるのが確実ですが、関東平野や、大阪盆地のようにキロメートルのオーダーの深い堆積層を有する地域ではもちろんのこと、いつでもどこでも気楽に穴掘りをする、というわけにはいきません。数値計算で使えるような地盤モデルを作るためには、それこそ、そこらじゅうに穴を掘らなくてはならないことになって、とてもたいへんそうです。

そこで、物理探査の手法が使われることになります。

地震動の予測をするために必要なのは、主として速

田引水やん、と言われそうです。すいません。でも、ここまで書いてしまって、今から書き直すのも辛いので(≠切も厳しいし...)ご容赦のほどを。

²³ 実に当たり前のことですが、時々、こういう基本的な部分が混乱しているような人もおられるようなので、念のために...

度構造ですから、いきなり速度構造がわかる手法が便利です。屈折法探査や反射法探査は比較的大きなスケールから細かい構造までよい精度で決定できる方法としてよく利用されてきました。しかし、残念ながら、センサーを設置した測線に沿った2次元断面しか求められません。3次元的な構造を知るためには、いくつもの測線を設定して観測をしなくてはなりません。

最近では、都市部で発破を用いることができませんから、大規模な屈折法探査はやりにくくなってきています。そうすると、どうしたって、パイロサイズを用いた屈折法や反射法を行うことになるわけですが、何かとコストがかかってしまいます。ひと昔前に比べれば、反射法探査の単価も驚くほど下がってきているようではあるのですが、高価であることには変わりはありません。いつでも、どこでも、というにはかなり敷居が高い、というのが現実でしょう。

結局、ボーリングや反射法のデータに微動探査や重力探査から得られる情報をあわせて地盤構造のモデルを構築する、という実にはありがちな結論に落ち着きます。ただ、波長がある程度長い地震波を対象としていますので、観測点の間隔は1~数kmのオーダーで十分な場合も少なからずあると想像されます²⁴。観測点の密度が足りない場合は、微動の三成分単点観測や重力探査を追加することで比較的効率よく広い地域をカバーできることが期待されます。これらの観測法はそれほど高い解像度で地盤構造を推定できるわけではありませんが、基盤形状の非常に細かい変化や詳細な層構造までモデル化したとしても、数値計算の結果にはあまり反映されないでしょうから、効率を優先した観測が有効であると考えられます。

これまでに述べてきた、観測や解析にかかわる種々の注意事項に留意して観測を実施し、データの蓄積を進めていけば、数値計算に必要な地盤モデルを日本全国にわたって整備していくことは現実に実行可能な範疇にある、と考えています²⁵。もちろん、このような地盤に関するデータベースを充実させようという動きも活発になってきていますから、それほど遠くない将来に、必要に応じて地盤データをデータベースから引用して簡単に数値計算で地震動予測ができるようになっているかもしれません²⁶。

²⁴もちろん、表層部分のせん断波速度に大きく依存します。

²⁵あとは、誰がやるか、ですが...

²⁶やや長周期領域までしか使えない、としても、本当に実現すれば素晴らしいことである、と思います。しかし、本稿の最後に述べていますが、最近では観測に対するインセンティブが薄れてきているような気がしています。従って、フィールドでの観測を必要とするような事業はなかなか進みにくいのではないかと、という不安も少なからずあります。

4.2 短周期領域の地震動

構造物への入力地震動を取り扱うという工学的な立場からは、1秒よりも短い短周期領域の地震動を考慮することが非常に重要です。しかし、差分法による数値計算によって短周期領域の地震動を厳密に計算することは、現時点ではあまり現実的なことではない、と考えられています。そのため統計的グリーン関数法などを短周期領域に適用して、これを差分法によるやや長周期領域における解析結果と重ね合わせて広帯域の地震動を計算する、というような手法が用いられています。

短周期領域では地震動の波長も短いですから、広域的な地盤構造の影響よりも、局所的な構造が重要になります。極論すれば地盤の3次元構造なんてどうでもよくて、1次元問題として考えれば十分でしょう、と云うこととなります²⁷。

短周期帯ではごく表層の構造の影響を大きく受けますから、それほど深いボーリングでなくても、工学的基盤と言われるせん断波速度で600 m/s程度の層までの構造がわかっているだけでかなり有用であると言えます。しかも、そのようなボーリングは、地震基盤に達するような穴に比べても圧倒的にたくさんありますから、とても有効に利用できます。このこと自体は非常に喜ばしいことなのですが、ここで、問題となるのは短周期帯での地震動は波長が短いため非常に局所的な地盤構造の影響を受けるといことです。

つまり、現在のボーリングのデータの密度では全然足りない、ということなのです。浅いボーリングは、一見、たくさんあるように見えますが、短周期帯の地震動を考えるには全然足りていないのです。

例えば、新幹線の例を考えてみます。新幹線構造物はとても重要な構造物ですから、構造物を作るときに、路線に沿って入念な調査が行われます。ですから、ほかの場所にくらべても新幹線構造物の周辺では、相当、密なボーリングがデータが存在しています。しかし、それでも、高架橋の地震応答を計算するには、ボーリングとボーリングの間の未知の地盤をどのようにして埋めて、構造物の応答計算をしたらよいのか、真剣に悩んでしまうのです²⁸。高架橋のような構造物を対象とする場合、入力として与える地震動はどの橋脚にも同じものを与える、という方法も考えられます。しかし、橋脚毎の入力波形に位相差があったり、インコヒーレントな成分が含まれていたりすると、応答はどちらかということが大きくなるようですから、一様に同じ入力

²⁷さすがに、ここまで言い切ってしまうのは言い過ぎであるとは思いますが...

²⁸2004年新潟県中越地震の際に高架橋がどのような挙動を示したのか、が多くの人に注目されたことは記憶に新しいところです。

を与える，というのは危険側の判断をしてしまう可能性があることになってしまいます。

このような非常に細かい構造を地盤探査で同定することは非常に困難が伴います。

短周期微動の観測や解析はこれまで非常に多く行われてきていますから，このような目的には最適のようにも思えます。しかし，微動の三成分単点観測を利用する場合には， H/V の物理的根拠があまりよくわからない，ということもあって，うまく構造を説明できていたりいなかったりして困ってしまいます。微動のアレー観測はかなり有望ですが，短周期帯は自動車や工場などの人工的な震源がたくさんあって記録に含まれている波形がノイズなのか信号なのか区別がしづかくなかったり，アレーの内側に震源が存在して正しい位相速度を推定できない，という場合も少なくありません。広大なグラウンドのようなところで，息をひそめてひっそりと観測をする，というようになり条件が整っていないと合理的な結果を得ることは難しいでしょう²⁹。

重力によって表層の細かい構造を知ろうとすると50 m 間隔というような極端に密な観測が必要になりますし，本来知りたいはずの密度構造の微小な変化が，周辺の重いもの³⁰や軽いもの³¹の影響に埋もれてしまいます。したがって，砂漠のまんなかで観測をする，というような特殊な条件でない限り，細かい構造を知ることには難しいでしょう³²。

このような状況の元では，短周期領域の地震動に影響の大きい地盤構造を同定することは，やや長周期領域でのそれに比べても非常に困難であると言えます。従って，たとえ，非常にすぐれた計算機が発明されて，これまでできなかったような短い周期領域まで差分法で厳密な計算ができるようになったとしても，地盤構造のモデルのほうがその精度に追いつかない，ということになってしまいます。

地震基盤のように深い構造と違って，短周期領域の地震動に影響を及ぼす浅い構造はすぐ手の届くところにあるため，わかっているような気になってしまいがちですが，現実には灯台下暗しというか，あまりよくわかっていない，ということをよく認識しなくてはなりません。

最近では，観測によって，構造を決定するよりも，

²⁹もちろん，これを実際にやっている人もおられますから，やればできることは間違いありませんが，いつでもどこでもお手軽に，というような性質のものでないことは確かです。

³⁰コンクリート製の高架橋やビルなど。

³¹ガソリンスタンドの地下タンクや下水管などの中空のものなど。

³²そして，そのような特別な条件のところの地盤データと云うのはたいていの場合，私たちにあって不要なのです。誰も人が住んでいないところでは，工学的なニーズがないのが普通ですから。

既に，広く整備されている表層地質図などを参考にし，統計的に地盤の速度構造に関するパラメータを簡易的にモデル化する方法も提案されており，用途によっては一定の成果をあげています。

短周期領域の地震動を考える上では，このような種々の方法を組み合わせて少しでも情報量を増やして利用できるものは何でも利用できる，という気持ちで取り組むしかない，と考えています。しかし，より重要な点は，現時点で得られている短周期領域での地震動の推定結果は，このような背景のもとで推定されているということに正しく認識し，そのうえで，推定精度についての正しい理解をもって結果を活用していくことではないでしょうか。

5. 地盤探査をしないですませたい

差分法による数値計算で力づくで地震動を求める，という考えとは別に，もしも，小さな地震の観測記録があれば，その地震のすぐ近くで発生した（または発生するであろう）大地震による地震動を予測できます，という方法があります。これは，半経験的グリーン関数法と呼ばれるものですが，小地震の記録をその地点での地震のグリーン関数とみて，大地震を考える場合には，これを重ね合わせればよい，とする考え方です。

この場合は，小地震の記録をグリーン関数と見なすことにより，途中の地盤構造の影響を全部込みにしたブラックボックスとして扱うことができます。従って，構造に関する細かい話をすべて飛ばすことができる，という大きなメリットがあります。ただ，問題は，そのような都合のよい地震の記録が手元にあるかどうか，ということです。また，予測が必要な場所に地震計がおかれている，ということは，たいていの場合，期待できませんから，結局使えない，ということになってしまいがちです。

ただ，グリーン関数がわかればいいたろう，という考え方は非常に示唆に富んでいます。最近，密かなブームになっているのが³³，2地点間の観測記録の相互相関がその間のグリーン関数になる，という考えです。しかも，コーダ波のような散乱を強く受けた波の相互相関を利用することができる，ということになっていて，たいへん便利です。ある程度は理論的な背景も明らかになってきていますので，現実的な応用への取り組みが始められたところ，といえます。ただ，散乱波を利用できるから，といって，そのまま微動のようなよくわからない波に適用できるのかどうかはよくわか

³³ホンマか？

りませんし、その適用範囲も明確ではありません。しかし将来有望な手法のような気がしています。

地盤探査の話を書きながらこのようなことを言うのも無責任ですが、もし、本当にグリーン関数がわかるのなら、必要な地点間での同時観測をすることで、地盤探査をするよりもよほど効率よく、必要な場所における地震動予測が可能になるはずで

す。地盤構造探査のための手法の高度化の検討だけではなく、全く視点を変えて地盤構造を意識しない手法の開発も同時にすすめられれば非常に有効ではないかと考えて、あえて、ここに記した次第です。

6. おわりに

まとまりがないままに、だらだらと長く書いてしまいました。ここまでおつきあいくださった読者の皆様にはとても感謝しています。

地盤構造の推定の話は物理探査学会や地震学会で議論されることが多いのですが、これらの学会の年次講演会などに行ってみると、最近、微動を用いた地盤構造探査の研究が10年前に比べて非常に少なくなっているように思えます³⁴。かつては非常に多くの人々が微動の観測を行い、そのH/Vから「地盤の増幅度」や「卓越周期」を出したりしていました。このような研究テーマのためのセッションには非常に多くの時間がさかれていましたが、最近ではすっかり少数派となってしまい、今では花形の座は数値計算に取って代わられたかのようです。

観測をベースにした研究と云うのは、観測に手間と時間がかかるわりには、たとえば、得られた結果は、コンター図が1枚だけ、とか、速度構造のプロファイルがひとつだけ、というような今時の研究スタイル³⁵にはおおよそマッチしていない地味で効率が悪い、ということがこの種の研究テーマが流行らなくなってきた理由の一つでしょう。また、みんなが、どういうわけか無闇と忙しくなって観測をやっているヒマがなくなってきた、ということもあるかもしれません。そして、それを見て若い人が観測に興味を失ってきて、あるいは、観測そのものを知らないという状態になって、ますます、誰もこの種の研究をしなくなる、という悪循環に陥っているようでもあります。地震動予測では地盤構造モデルが結果に及ぼす影響は非常に大きいので

すから、地盤構造に関する研究は地震防災上極めて重要な分野であるはずだ、と思うのですが、それが、あまり流行っていない、という事実は、将来にむけて幾ばくかの不安を覚えます。

微動はアレー観測に基づく位相速度の推定法を別にとすると物理的背景があまりはっきりしないままに利用されてきたようなところもあります。このことが、微動から得られた地盤構造の推定結果に曖昧さを引き込んでおり、ひいてはそれが研究活動の停滞につながっているのかもしれませんが。

物理探査の解析法については多くが既に完成されたもの、と云う認識も広がっているようで、新しい解析法の開拓に対する意欲もあまり強くは感じられません。そうは言っても、わずかではありますが、新しい解析手法がコンスタントに提案され続けていることを考えると、観測をしてデータを蓄積する、というだけでなく、まだまだ多くの研究テーマが残されているように思います。

地道なデータの蓄積だけではすぐに飽きがきてしまいます。

そうならないためにも、データの蓄積と併せて、新しい手法の開発、明快な物理的解釈の与え方などについての研究が広く進められることが、微動をはじめとした地盤構造推定に関連する研究テーマの活性化に必要である、と考えています。そして、地盤構造に関する研究の発展は今後の地震動予測にとっても重要かつ必要でもあるのです。

このような意識をもって、研究を進めていくことはもちろんのこと、地盤構造の話ができる工学屋さんの仲間を増やしていく努力も必要であると考えています。

そう、そのあなたも、ぜひ、一緒に！

³⁴物理探査学会は行ってないので、よくわかりません。しかし、地震学会では10年前と比べてみると、数え方にもよりますが、半分くらいになっています。

³⁵要求されている成果の単位時間あたりの量(質はどうか、という議論はさておき)が急速に増えている、という現実のことを言っています。