

# 市販ソフトを利用した不整形地盤の 地震応答アニメーション

佐藤 勉<sup>1</sup>・神山 眞<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 工修 (株) システムアンドデータリサーチ (〒186-0003 東京都国立市富士見台 3-25-3)

<sup>2</sup>正会員 工博 東北工業大学教授 工学部土木工学科 (〒982-8577 宮城県仙台市太白区八木山香澄町 35-1)

一般に市販されているアプリケーションソフトを用いて手軽に不整形地盤の地震応答アニメーションを作成する試みが紹介される。不整形地盤の地震時挙動では加速度などのベクトル量の時刻変化のみならず、地盤内の応力やひずみの変動も重要な観点から面内震動問題、面外震動問題のそれぞれに対して加速度および各種の応力成分、ひずみ成分の時刻変動アニメーションが二次元不整形地盤を対象に作成される。このような多くのパラメータの時刻歴を求めるのに有利という理由から応答計算手法としては擬似スペクトル法が用いられる。不整形地盤の形状を代表する幾つかの不整形地盤モデルにおけるアニメーション作成により、それぞれの不整形形状に特有の二次的波動生成の過程がビジュアルに表現される。

**Key Words :** animation, pseudo-spectral method, irregular ground, software on the market, anti-plane motion, in-plane motion, acceleration, strain, stress

## 1. はじめに

不整形地盤では不整形性の著しい地点 (basin edge) で二次的に生成される波動が直達波と干渉、重合など種々の連成挙動を引き起こし、これにより特別に大きな増幅が特定の地点でもたらされる可能性のあることが何人かの研究者により指摘されている<sup>1), 2)</sup>。この現象は理論的には十分予想できることであるが、1995年兵庫県南部地震における「震災の帯」の発生原因に関連して最近注目を集めてきている。このような異なる波動の連成過程は一定の時間間隔で作成されるスナップショットで説明されることが一般である。しかし、この過程が動的なアニメーションとして与えられれば、より詳細なメカニズムが明らかになることが期待できると同時に、一般人にも視覚的に理解しやすいことから防災教育の上からも有効なツールとなるはずである。一方、不整形地盤では加速度などの震動振幅の挙動のみならず、地盤内の応力、ひずみの挙動も重要であるが<sup>3)</sup>、このようなテンソル量の時間変動はなかなか理解しにくいので、これがアニメーションとして視覚的に与えられれば不整形地盤における地震被害の発生原因が多面的に明らかにされ易いと考えられる。

以上のように、不整形地盤における地震応答のアニメーション化は多くの面でメリットをもたらすと期待でき

るが、本格的なアニメーションの作成には労力的にも経済的にもかなりの負担がかかるのが普通である。ところが、最近、インターネットの普及とともに、魅力的なウェブサイト構築のためアニメーションの導入が広まるようになり、これに呼応して経済的なアニメーション作成ソフトが市販されるようになってきた。このような市販のアニメーション作成ソフトはもっぱら娯楽的な要素が強いが、適用によっては科学技術の目的にも十分耐えられる程度に機能性が高まってきている。本報告はこのような市販されるアプリケーションソフトを幾つか組み合わせ合わせて用いて、不整形地盤の地震応答アニメーションを簡易に作成する試みを紹介したものである。

## 2. アニメーション作成の流れ

本研究における不整形地盤の地震応答アニメーション作成のフローを図-1に示す。図-1に示すように、ここでの流れは大きく三つに分類される。一つは不整形地盤の地震応答時刻歴作成のプロセスである。本研究の目的の一つは不整形地盤の地震応答アニメーションを加速度などのベクトル震動と応力、ひずみのテンソル震動を多面的に時刻歴アニメーションとして表現することである。この目的に沿い、ここでは地震応答解析の手法として擬似スペクトル法を用いている。二つ目は各パラメータの

瞬時の応答の空間分布をイメージマップに変換することによりアニメーションを構成するフレームを作成するプロセスである。本研究ではこのプロセスに市販ソフトウェアである NOeSYS(Fortner Software 社製)を用いている。そして、最後のプロセスは作成されたフレームをムービーとしてアニメーション化する作業である。このプロセスとして本研究では Macromedia 社の Flash xJ を採用している。以下では、各プロセスの処理内容をやや詳細に紹介する。

### (1) 擬似スペクトル法

擬似スペクトル法は地盤震動を支配する運動方程式の空間微分をフーリエ変換およびフーリエ逆変換の利用により空間領域から波数領域に変換して解くとともに、時間微分を差分で近似して、各種パラメータの時刻歴を時々刻々求める数値計算手法である。擬似スペクトル法の最大の利点は FDM, FEM, BEM などに比較して空間座標の離散化を粗くすることができることである。また、擬似スペクトル法の第二の利点は加速度、速度、変位、ひずみ、応力を同時に与える multi-attribute な解析法であることである。以下に、P, SV 波を対象とした擬似スペクトル法のアルゴリズムの概略を示す。

いま、図-2 の座標系を参照して面内震動問題を考える。このとき、運動方程式は次のようになる。

$$\rho \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial z} + \rho f_x \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + \rho f_z \quad (2)$$

ここに、 $u_x$ 、 $u_z$  : x、z 方向の変位、 $\sigma_{xx}$  など : 図-2 の応力成分、 $\rho$  : 密度、 $f_x$  など : 単位体積当たりの物体力、 $t$  : 時間、 $x, z$  : 図-2 の座標。

式 (1)、(2) はこのままの形でも擬似スペクトル法により数値的に解くことができるが、仮想境界における吸収効果の高い境界条件を適用しやすくするため、ここでは式 (1)、(2) を変位、応力の一階時間微分を主パラメータとする連立微分方程式に分解して、変位、応力の一階時間微分をパラメータとする擬似スペクトル法を構成した。このような構成の擬似スペクトル法でも空間微分にフーリエ変換、逆変換を適用して、かつ時間微分は差分に変換することにより普通の擬似スペクトル法と全く同様に加速度、速度、変位、ひずみ、応力の算定を時間ステップを進めながらサイクリックに行なうことができる。また、この種の数値解析では計算領域を有限に設定する仮想境界の存在により人工的な反射が生じるので、これを有効に吸収する方法が必要である。ここでは、変位、応力の一階時間微分をパラメータとする擬似スペクトル法に対応して、

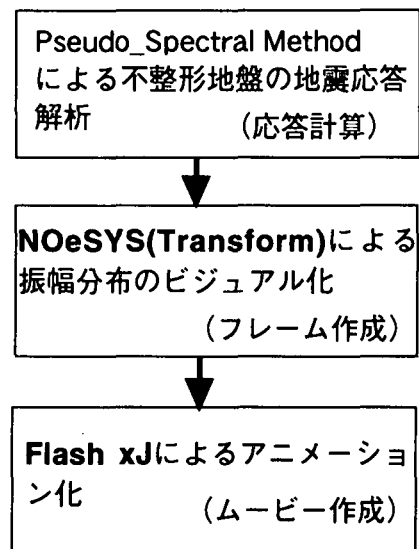


図-1 アニメーション作成の流れ

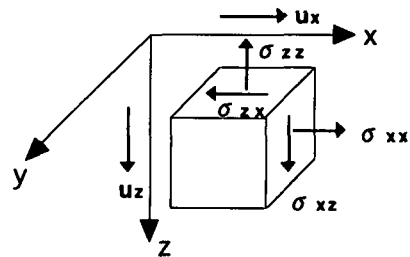


図-2 面内震動問題の座標系

広い周期帯域の波動に吸収効果の高い one-way sponge filter<sup>4)</sup>を用いた。一方、地盤の減衰作用の擬似スペクトル法への導入は Graves<sup>5)</sup>による方法を準用した。この方法は地盤の非弾性減衰を時間領域で取り込む巧みな近似法であるが、地盤の卓越周期を中心とした周期帯域において近似度の高い減衰作用の導入が可能である。

### (2) 応答結果の空間分布イメージマップ

擬似スペクトル法で求められる瞬間時刻における各パラメータの空間分布(コンター分布)は市販されている各種のグラフィックソフトを用いてイメージ化することが可能である。グラフィックソフトは多くの種類が市販されているが、ここでは多様なイメージ作成が可能である Fortner Software 社の NOeSYS を用いた。このソフトは現在、3次元のグラフィックイメージが作成可能な統合ソフトとして市販されているが、ここで試みた2次元の不整形地盤に対する応用ではその因子ソフトの一つである Transform でも対応できる。なお、このような空間分布イメージマップの作成にはアニメーション

ン化したときスムーズな動きと一定の高速性という二つの条件が要求される。そのため、本研究では空間分布イメージマップの作成タイムステップは0.01秒とした。

### (3) アニメーション作成プロセス

最後のプロセスは上述の空間分布イメージマップをアニメーションのフレームとして組み立て、これを連結させることである。この作業を極めて手軽に実現するソフトとして本研究では Macromedia 社の Flash xJ を採用した。今日ではこのようなアニメーション作成プロセスを実現するソフトとして Quick Time や AVI などの技術が各プラットフォームに応じて開発されている。また、インターネットの世界では Shock wave などのプラグイン技術も普及している。Flash xJ はこのような各種の技術に親和性のあるソフトとして最近多く用いられている。このソフトの最大の特徴はグラフィックデータをベクトル形式で表わし、極めてコンパクトなファイル作成を可能にしていることである。この特徴のため、高速のムービー再生が実現されるとともに、ファイルサイズも小さくなる。また、アニメーションではフレームの再生速度（ムービーとして見せるためのコマ送りの速度でフレームレートという）が重要な因子であるが目的に応じて多様なフレーム レートが設定できることも特徴であり、最大 120fps が実現できる。一般に、フレームレートの設定はアニメーションをリアルに再生するための重要なポイントであるが、普通の映画は 24fps で作成され、コンピュータのアニメーションは 10fps 程度で十分とされている。本研究では 10~12fps のフレームレートで再生できるように構成した。

### 3. アニメーションの実例

本研究で用いた不整形地盤の応答計算からアニメーション作成までの主なる条件を表-1 に示す。ここでの応答計算は基盤の上に表面層 1 層を有する各種不整形地盤を対象としたが、不整形地盤のパターンは図-3 に示されている。図-3 に示すように本研究ではとりあえず、傾斜基盤の不整形、盆状の不整形を不整形地盤の対象とした。なお、各不整形地盤のパターンにおける不整形性の寸法は種々の組み合わせを試行した。作成したアニメーションはすべてフルカラーであり、動画なのでこの紙面では示し得ない。実際のデモンストレーションは発表時に譲るとして、ここではアニメーションの画面の様子を例示する。

図-4 は面内震動問題を対象とした加速度のアニメーションの瞬時画面の一例である。代表的時刻における画面が示されている。この例のように時間の経過とともに波動の伝播がさまざま形をとりながら変化していく様子

表-1 面内震動問題の座標系

項目	設定
不整形地盤モデル	表面層1層構造の各種パターン
表面層物性	$V_s=100\text{m/sec}$ , $V_p=200\text{m/sec}$ , $Q=10\sim100$ , $\rho=1.6\text{t/m}^3$
基盤物性	$V_s=250\text{m/sec}$ , $V_p=500\text{m/sec}$ , $Q=100\sim1000$ , $\rho=1.8\text{t/m}^3$
入射波条件	基盤からのRicker wave(中心周期0.3秒)の垂直入射
対象震動問題	面外震動問題(SH波), 面内震動問題(P,SV波)
メッシュのグリッド間隔(横,縦)	(3~5m, 3~5m)
メッシュの寸法(横,縦)	256×64
応答計算タイムステップ	0.005~0.001秒
応答計算のスナップショット	0.01秒間隔
イメージマップのカラーテーブル	seismic(blue-white-red)
フレーム再生レート	10~12fps

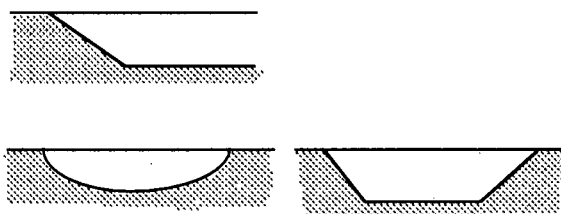


図-3 対象不整形地盤のパターン

が視覚的に表現されている。この動的表現により不整形の存在により二次的に表面波が生成され、これが水平方向に伝播して、直達波と干渉して特定の地点で大きな震動振幅をもたらすメカニズムが明瞭に把握される。このようなアニメーションが面内震動問題、面外震動問題を対象に加速度、応力、ひずみの各成分別に作成された。作成されたアニメーションはループ再生が可能であり、自動的に何回でも観賞でき、波動伝播の詳しいメカニズムが理解しやすくなっている。また、再生の際のフレームレートは 12fps 以下ならどんな値でも簡単に設定でき、特にスローモーションで現象を観察したいとき有効に使うことができる。その他、アニメーション動作中でも任意の時間に動きを停止することが可能であり、動画の操作を自動と手動を簡単に切り替えることもでき、現象の変化を好みに応じて視察できる。

### 4. まとめ

今回の市販ソフトを利用したアニメーション作成の試みにより非常に簡単に、しかも経済的に目的を達成することができることを確認できた。今回の試みでは震動はイメージマップとして表現されており、変形の詳細を示すベクトル変動の表現において未だ不十分な点がある。これは今後の課題としたいが、そのような変形表現なしでも現象の視覚的把握の点では十分であり、市販ソフトの有用性を強調しておきたい。

なお、本文では敢えて採用したソフトの商品名を明記したが、これは市販ソフトの汎用性と柔軟性を例証するためであり、他意はないことをお断りしておく。

参考文献

- (1) Kawase, H.: The cause of the damage belt in Kobe: "The Basin-edge effect", constructive interference of the direct S-wave with the basin-induced diffracted/Rayleigh waves, *Seism. Res. Lett.*, 67, No.5, pp.25-34, 1996
- (2) 竹宮宏和, アダム・マヘール: 地震波の鉢合わせ (バンプ) 現象による不整形地盤の増幅, 土木学会第 50 回 年次学術講演会講演集, pp.1268-1269, 1995
- (3) 神山 真, 他: 擬似スペクトル法による不整形地盤の地震応答解析とその評価, 第 24 回地震工学研究発表会講演論文集, Vol.1, pp.137-140, 1997
- (4) Dai, N., A. Validis & E. Kanawich 1994. Composite absorbing boundaries for the numerical simulation of seismic waves. *Bull. Seism. Soc. Am.* 84-1:185-191.
- (5) Graves R. W. 1996. Simulating seismic wave propagation in 3D elastic media using staggered-grid finite differences. *Bull. Seism. Soc. Am.* 86-4:1091-1106.

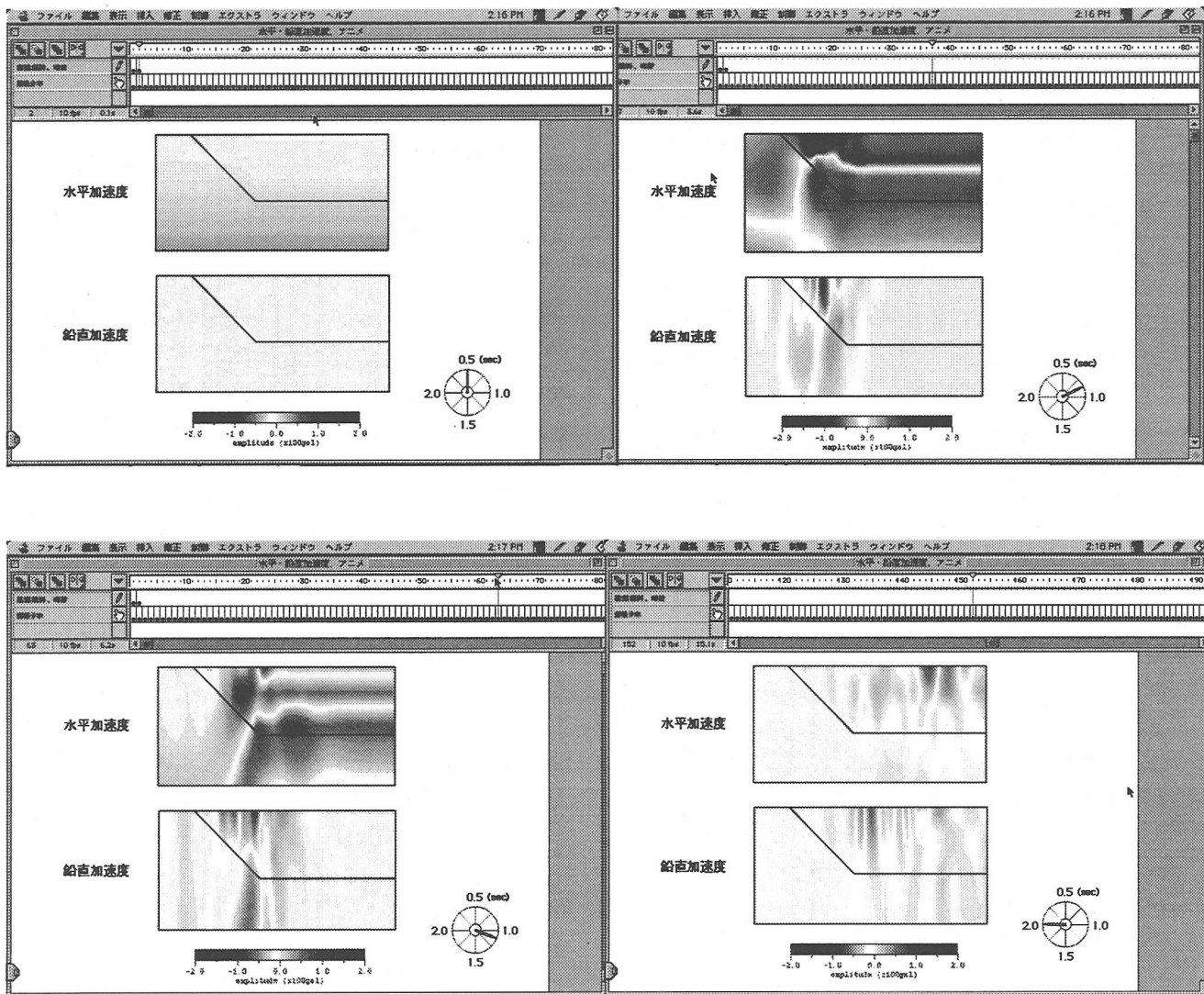


図-4 アニメーション画面の一例