

# Chapter 1

## 研究の目的と成果のまとめ

### 1.1 研究の目的

本研究では、震源・地震波伝播過程に基づく設計用入力地震動の改良を目指し、地震動におよぼす表層地盤の影響に関する新しい評価方法を提案する。このためには、震源・地震波伝播過程に基づいて、地形・地層構造の3次元性の影響評価が可能な数値計算モデルの構築し、実記録による検討を通し、現行の経験的方法の適用性を拡張するとともに、理論的方法の適用条件と適用手順を示すことが重要な課題である。本研究の成果として、表層地盤の定義および、地震動におよぼす表層地盤の影響を評価するための新しい道具と知識が提供される。

### 1.2 研究成果のまとめ

本研究によって得られた新しい成果を以下にまとめる。

#### 1.2.1 震源断層－不整形地盤系の境界積分方程式表示

弾性波動場の積分方程式表示を用いて、図1. 2-1に示すような震源断層－不整形地盤系における地震波動場を次式のような3つの積分方程式によって定式化することができた。したがって境界要素法を使ってこれらの境界積分方程式を解くことができるため、有限要素法や差分法などの数値解析法の中で、境界要素法は震源断層－不整形地盤系の地震波動問題に対する厳密な数値解析解を与えるものであることがわかる。簡単のため、観測点 $\mathbf{x}$ は境界上にある場合についての定式を示すものとする。

(1) 震源断層を含む弾性体 $V_0$ においては、次の積分方程式が成立する。

$$\int_{\Gamma_0+\Gamma_{01}} [H_{mk}^0(\mathbf{x}|\boldsymbol{\xi}, \mathbf{n}, \omega)u_m(\boldsymbol{\xi}, \omega) - G_{mk}^0(\mathbf{x}|\boldsymbol{\xi}, \omega)T_m(\boldsymbol{\xi}, \mathbf{n}, \omega)]d\Gamma(\boldsymbol{\xi}) + u_k^{(in)}(\mathbf{x}, \omega) = c(\mathbf{x})u_k(\mathbf{x}, \omega) \quad (1.2-1)$$

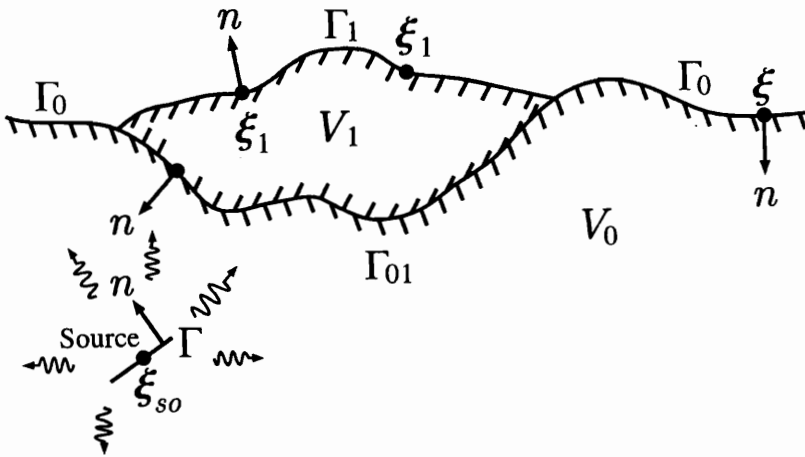


図1. 2-1 震源断層-不整形地盤系の記号

ここに滑らかな境界の場合、 $c(\mathbf{x}) = 1/2$ である。また  $\xi$  は境界  $(\Gamma_0 + \Gamma_{01})$  上の位置を表す。  
 (2) 上式において、 $u_k^{(in)}(\mathbf{x}, \omega)$  は運動学的断層モデルから求められる地震波の変位成分で、以下のように与えられる。

$$u_k^{(in)}(\mathbf{x}, \omega) = \int_{\Gamma} m_{ij}(\xi_{so}, \mathbf{n}, \omega) \frac{\partial G_{ki}(\xi_{so} | \mathbf{x}, \omega)}{\partial \xi_{soj}} d\Gamma(\xi_{so}) \quad (1.2-2)$$

ここに  $\xi_{so}$  は震源断層上の位置を表す。

(3) 堆積層に相当する弾性体  $V_1$  においては、次の積分方程式が成立する。

$$\int_{\Gamma_1 + \Gamma_{01}} [G_{mk}^1(\mathbf{x} | \xi_1, \omega) T_m(\xi_1, \mathbf{n}, \omega) - H_{mk}^1(\mathbf{x} | \xi_1, \mathbf{n}, \omega) u_m(\xi_1, \omega)] d\Gamma(\xi_1) = c(\mathbf{x}) u_k(\mathbf{x}, \omega) \quad (1.2-3)$$

ここに滑らかな境界の場合、 $c(\mathbf{x}) = 1/2$ である。また  $\xi_1$  は境界  $(\Gamma_1 + \Gamma_{01})$  上の位置を表す。

以上のように図1. 2-1に示すような震源断層-不整形地盤系における地震波問題は、積分方程式によって定式化することができることを示した。これらの式(1.2-1)と式(1.2-3)の積分方程式の境界条件は、地表面で応力が零並びに、弾性体  $V_0$  と  $V_1$  の接触している境界上で変位と応力が連続という条件となる。このような積分方程式を境界要素法によって離散化し境界条件を加味すると、境界上の未知変位と未知応力を求めることができる。

### 1.2.2 震源断層-埋設矩形谷地盤系における地表面水平変位ベクトルの時間的变化

図1. 2-2と図1. 2-3に示すような洪積地盤とみなされる埋設矩形谷の中央左端に震源断層が存在する場合と、硬い地殻と洪積矩形谷の境界に震源断層が存在する場合の2つのケースにおける地表面全体の水平変位ベクトルの時間的变化を図1. 2-4と図1. 2-5に示す。これらの図から、台風の雲の動きのように渦を巻きながら地震波が伝播し、

断層近傍の地震動の時空間分布は極めて複雑であることを明らかにした。同じような渦現象という震源断層近傍の特異な地震動は、水平成層地盤モデルにおいても観察されており、変位成分に比べ速度成分においては、渦の大きさは小さく、渦の数は多く地震動速度成分の時空間分布は極めて複雑であることを既に明らかにしている(付録C参照)。このよな震源断層近傍地震動の渦現象はこれまで地震工学では知られていなかった知識であり、この現象の実証とこのような断層近傍地震動の特異な揺れの特徴がパイプラインや連続高架橋などの線状重要構造物の地震時応答に与える影響を早急に調べる事が今後の重要な課題である。

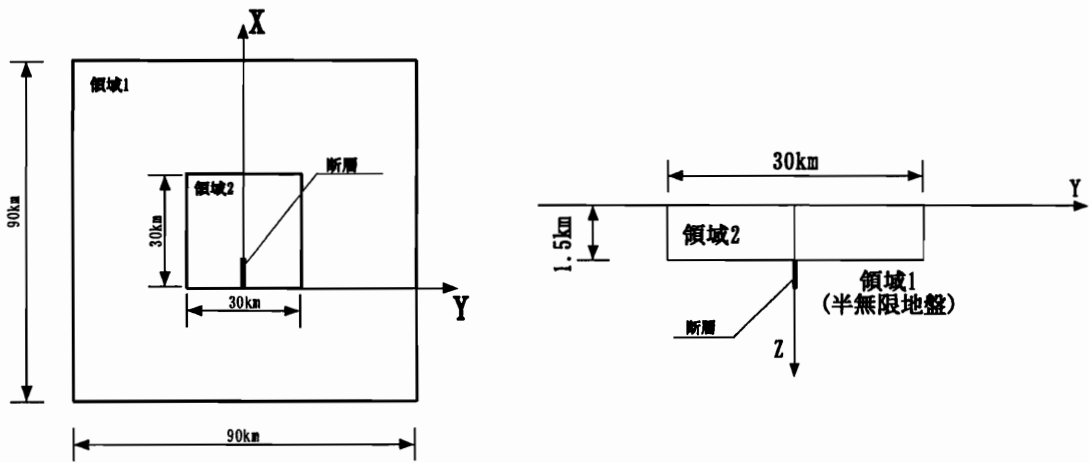


図1. 2-2 洪積地盤とみなされる埋設矩形谷の中央左端に震源断層が存在する場合

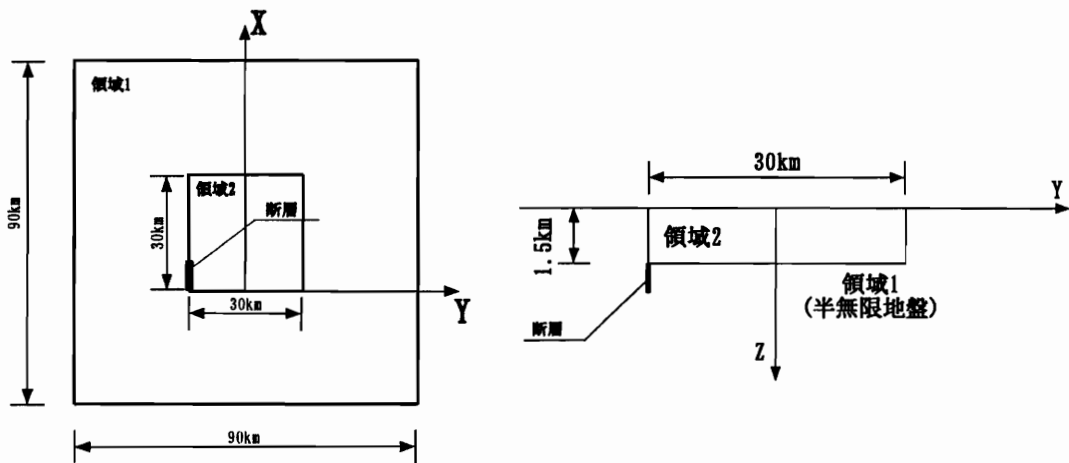


図1. 2-3 洪積地盤とみなされる埋設矩形谷と地殻の境界に震源断層が存在する場合

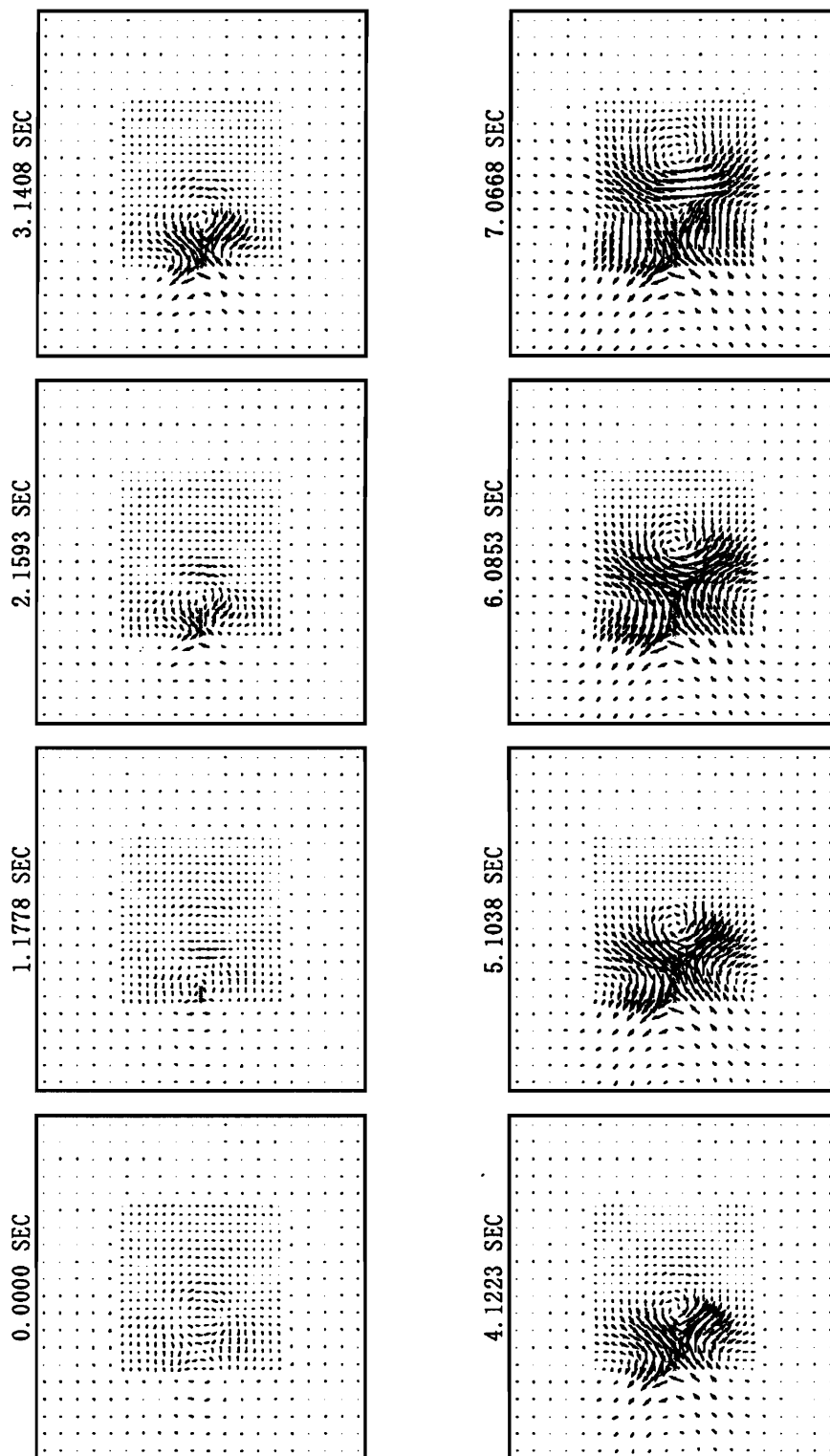


図1. 2-4 洪積地盤とみなされる埋設矩形谷の中央左端に震源断層が存在する場合における地表面水平変位ベクトルの時間的变化 (0秒から7.0668秒)

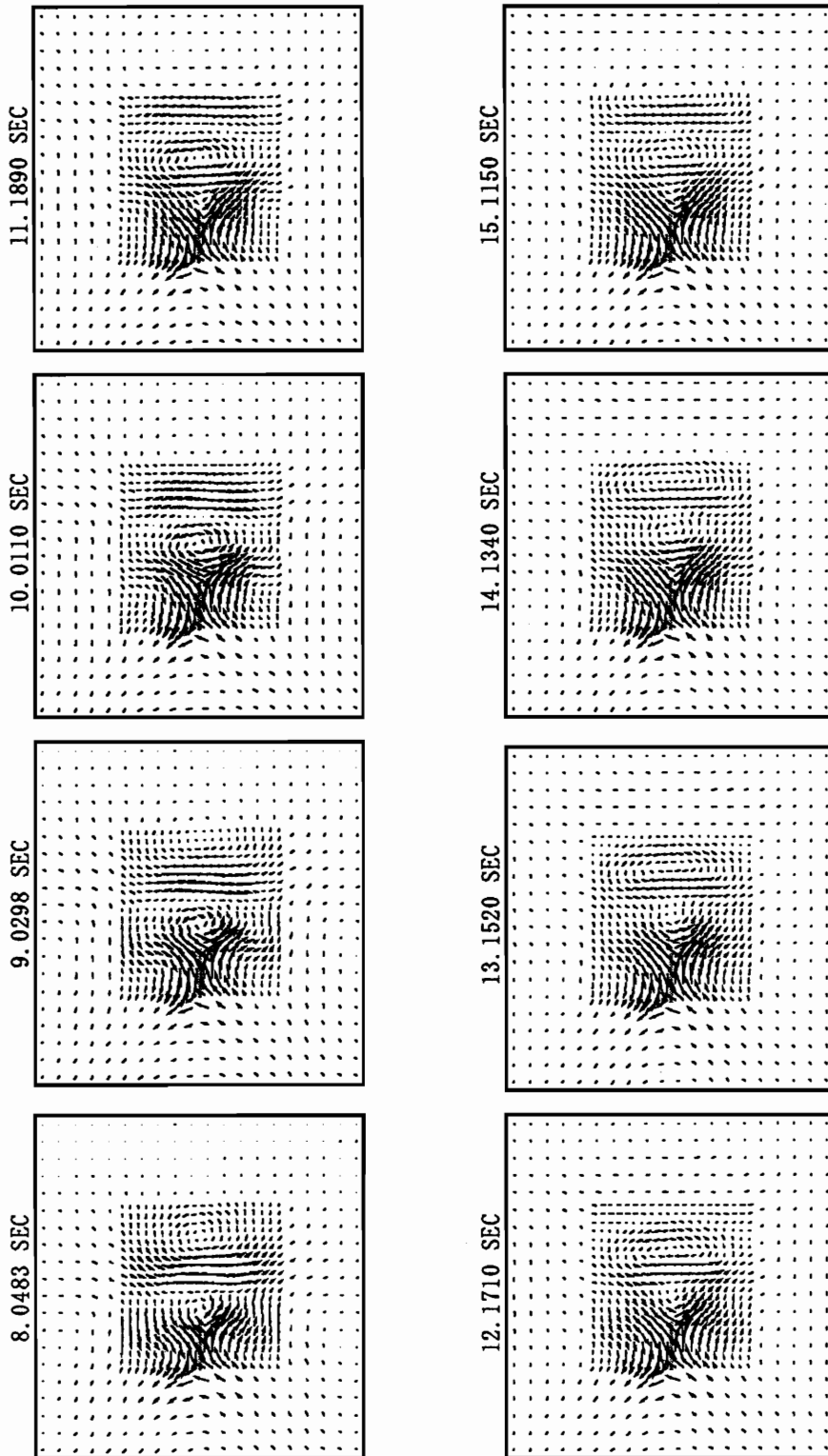


図1. 2-4 洪積地盤とみなされる埋設矩形谷の中央左端に震源断層が存在する場合における地表  
面水平変位ベクトルの時間的变化 (8.0483 秒から 15.1150 秒)

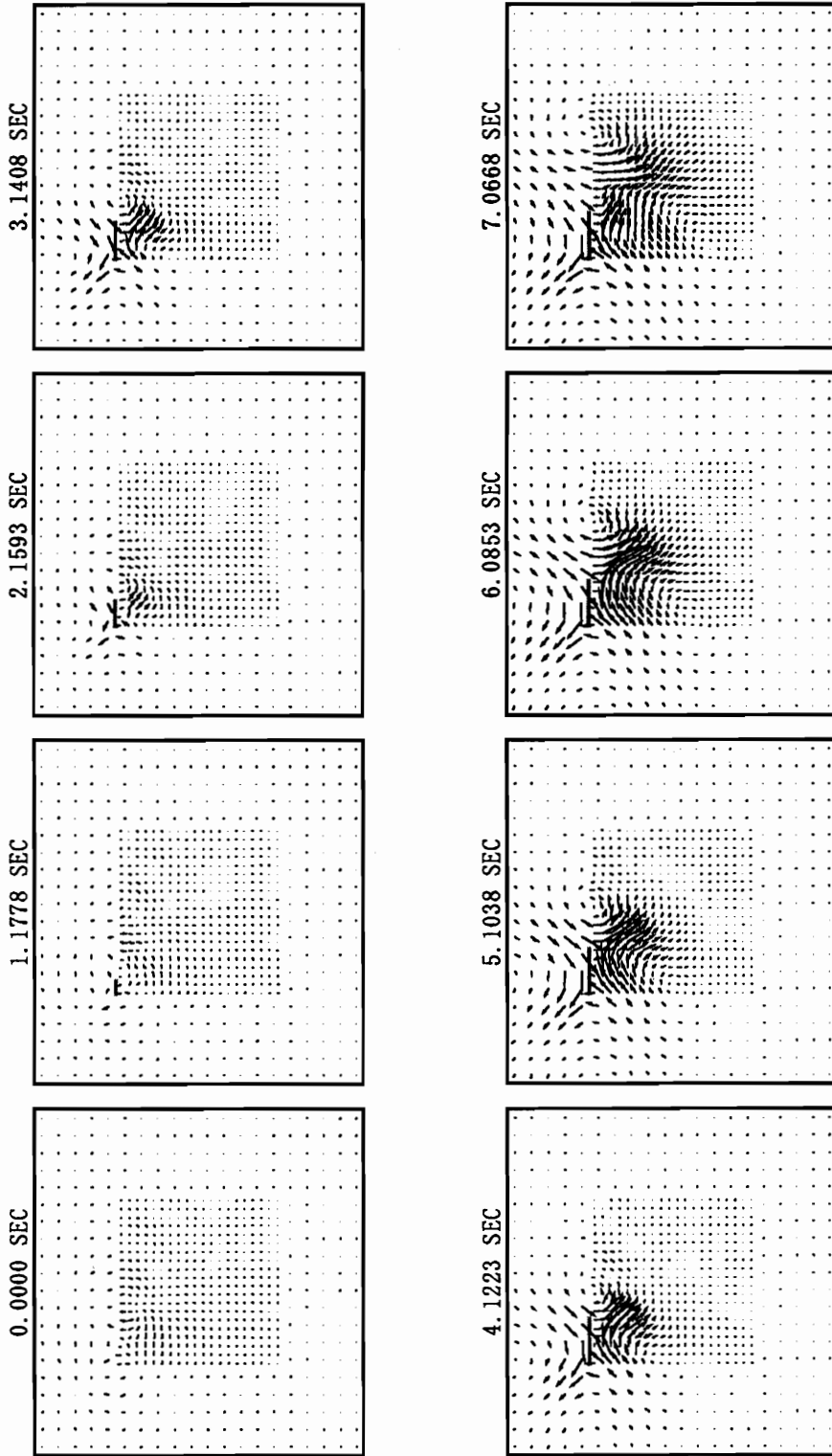


図1. 2-5 硬い地殻と洪積矩形谷の境界に震源断層が存在する場合における地表面全体の水平変位ベクトルの時間的变化 (0秒から7.0668秒)

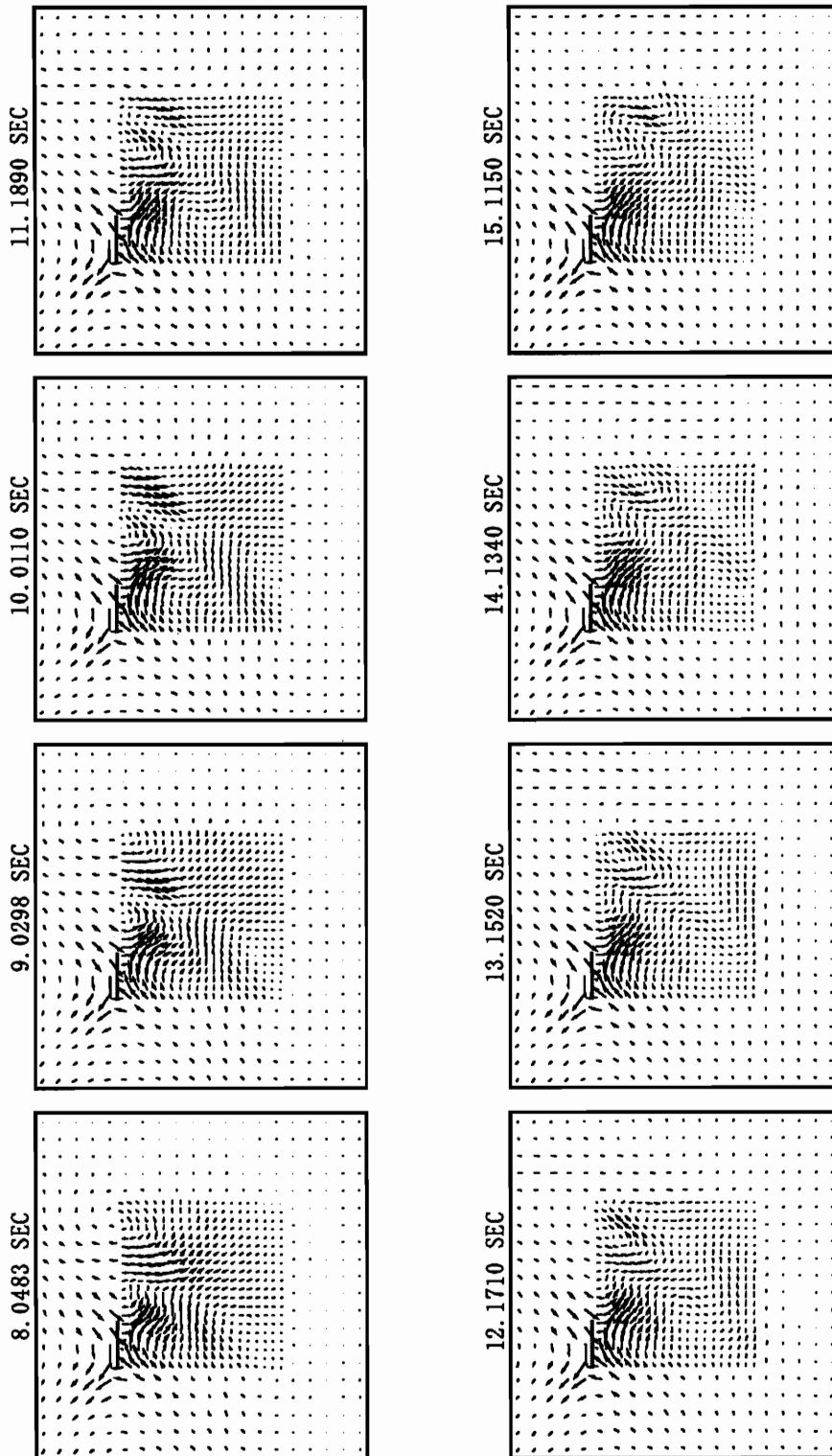


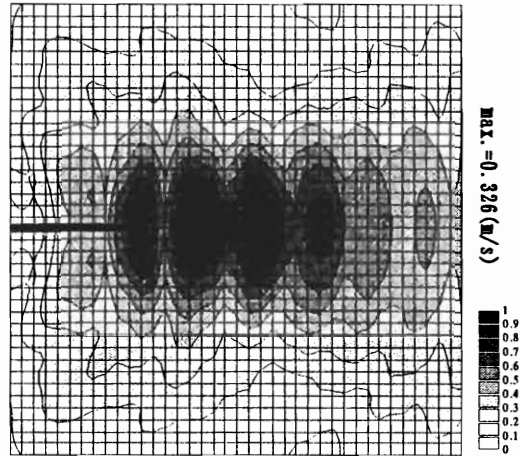
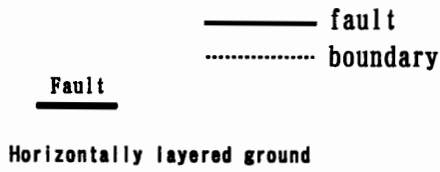
図1. 2-5 硬い地殻と洪積矩形谷の境界に震源断層が存在する場合における地表面全体の水平変位ベクトルの時間的变化 (8.0483秒から15.1150秒)



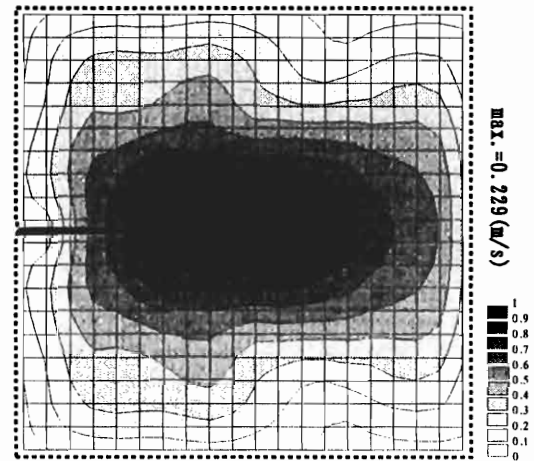
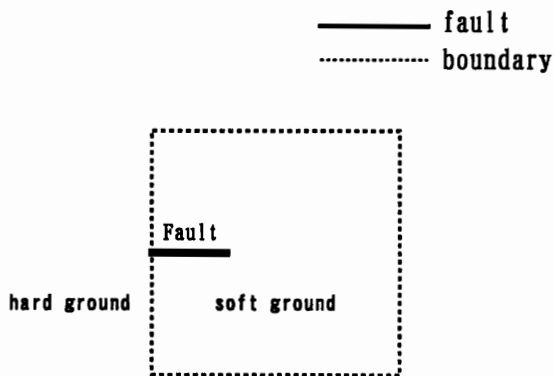
### 1.2.3 震源断層－埋設矩形谷地盤の位置による地表面の最大速度分布の違い

震源断層近傍の地震動は断層直交方向の揺れが大きくなるが、震源断層と矩形谷の位置によって地表面の最大速度分布が大きくかわることを突き止めた。例えば図1. 2-6は、矩形谷の境界が水平方向に無限に広がった水平成層の洪積層地盤の場合と、矩形谷の中央左端に震源断層が存在する場合並びに、硬い地殻と洪積層の矩形谷の境界に震源断層が存在する場合の3つのケースにおける震源断層近傍の地表面における断層直交方向の最大速度分布を示す。水平成層地盤の場合と矩形谷中央に震源断層が存在する場合の比較では、矩形谷の境界の影響が多少あるため、最大変位と最大速度の分布特性は多少違っているものの、震源断層破壊終了付近前方に最大値が現れていることは共通している。しかし地殻部と谷部の境界に震源断層が存在するケースでは、震源断層破壊終了付近前方の谷地形側に最大値が現れているのが特徴的である。

①断層近傍に境界がない場合



②断層近傍に垂直方向の境界がある場合



③断層上に境界が平行に存在する場合

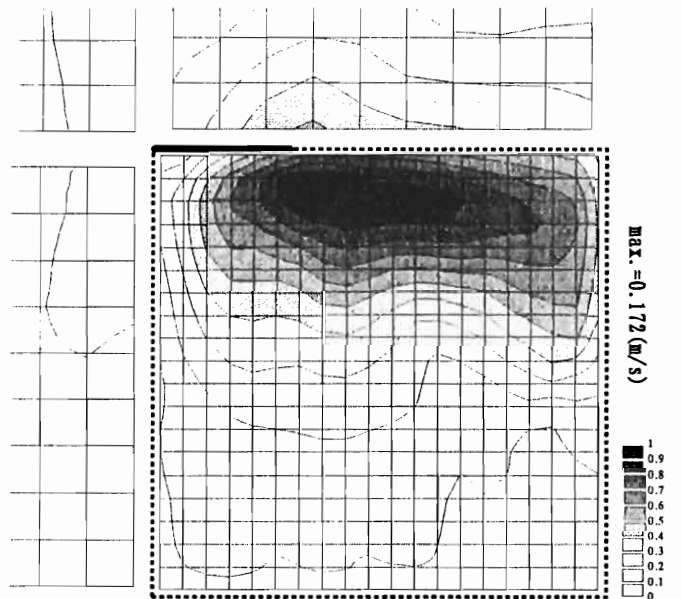
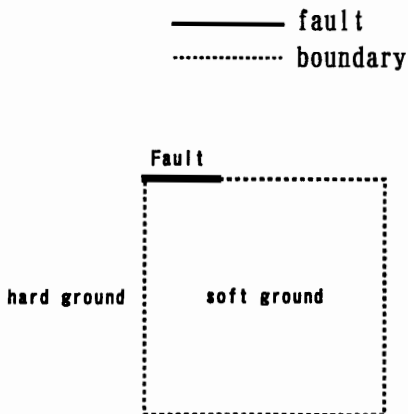


図1. 2-6 震源断層と埋設矩形谷の位置による地表面の断層直交方向の最大速度分布の変化

### 1.2.4 1995年兵庫県南部地震による「地震の帯」との関係

1995年兵庫県南部地震の大被害の地域は、図1. 2-7のように帯状に分布していた。この分布が報告された当時は分布の直下に未知の断層が存在したなどの推測がなされていたが、地震の帯の真下には震源断層は存在しないようである。このような地震の帯のできる原因は、神戸の地盤を六甲山から海岸に向かって切った断面を基にした2次元地盤モデルに平面波入射を行った解析から、沖積地盤の下方から入射した波と六甲山の硬い岩盤から水平方向に伝播する波がぶつかりあった結果として大きな揺れがおきるとしているものが一般的である。このような説明でよいのかも知れないが、平面波入射と2次元地盤モデルという仮定が少々気にかかる。そこでここでは、本研究で開発した震源断層-3次元不整形地盤の解析結果を基にこの地震の帯の現象を見てみると、図1. 2-8のように軟らかい地盤において断層から約1~2kmの範囲に最大値が帯のように現れており、神戸の地震の帯のような特徴が再現されているようである。もちろん、本解析で用いた地盤モデルは神戸の地層構造そのものではないが、震源断層を境にして片方に硬い地盤、もう片方に軟らかい地盤という意味では共通している。

これらのことから、一般的に知られている物理現象を本研究で開発した運動学的断層モデルと3次元直接境界要素法を組み合わせた解析モデルによって再現できたということができよう。本研究で使用した計算機の記憶容量の限界から地震波の振動数範囲は2rad/s以下と長周期地震波を対象としたが、記憶容量の大きい計算機を使用すれば短周期地震波も再現できる。また付録Dにおいて提案している部分解析法の考え方を適用すれば、計算機容量の問題を気にせずに短周期地震波の計算も可能になるとと思われる。本研究で開発した震源断層-不整形地盤系の解析モデルは、震源断層近傍の現実的な地盤構造を取り入れた設計用入力地震動の評価や活断層近傍の都市域の地震防災体策をする際の地盤の揺れの予測に利用できるものである。

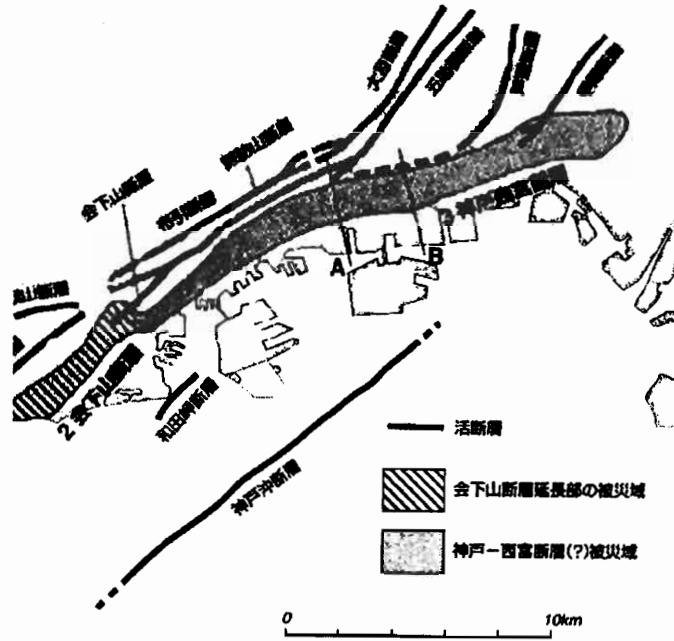


図1. 2-7 1995年兵庫県南部地震による「地震の帯」と断層位置

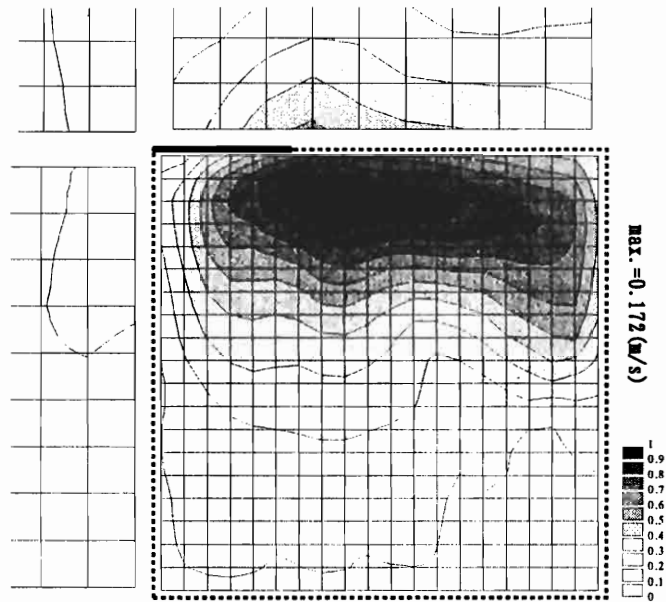


図1. 2-8 地殻部と矩形谷境界に震源断層が存在する場合の解析から得られた地表面最大速度分布