

第3章 震源断層近傍における地震動の数値計算例

3.1 離散化パラメータ

地盤変位 $u(x, y, z, t), v(x, y, z, t), w(x, y, z, t)$ は、2章で示した振動数一波数領域での解析解をフーリエ変換することによって求められる。すなわち、深さ z の平面上の任意点 (x, y) での変位は次の3重フーリエ変換によって計算する。

$$\begin{aligned} u(x, y, z, t) &= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} u(\kappa_x, \kappa_y, z, \omega) e^{i[\kappa_x x + \kappa_y y - \omega t]} d\kappa_x d\kappa_y d\omega \\ v(x, y, z, t) &= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} v(\kappa_x, \kappa_y, z, \omega) e^{i[\kappa_x x + \kappa_y y - \omega t]} d\kappa_x d\kappa_y d\omega \\ w(x, y, z, t) &= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} w(\kappa_x, \kappa_y, z, \omega) e^{i[\kappa_x x + \kappa_y y - \omega t]} d\kappa_x d\kappa_y d\omega \end{aligned} \quad (3.1)$$

これを、空間領域 $L_x \times L_y [m \times m]$ と時間領域 $T [\text{sec}]$ の周期関数として3重フーリエ変換によって表現すると、次式のようになる。

$$\mathbf{u}_{L_x L_y T}(j_x \Delta x, j_y \Delta y, z, k \Delta t) = \frac{1}{L_x L_y T} \sum_{m=0}^{N_k-1} \sum_{n=0}^{N_k-1} \sum_{l=0}^{N_\omega-1} \mathbf{u}(m \Delta \kappa_x, n \Delta \kappa_y, z, l \Delta \omega) E_{N_k}^{j_x m} E_{N_k}^{j_y n} E_{N_\omega}^{kl}$$

ここに、

$$\begin{aligned} E_{N_k} &= e^{i \frac{2\pi}{N_k}} \\ E_{N_\omega} &= e^{-i \frac{2\pi}{N_\omega}} \end{aligned} \quad (3.2)$$

上式のフーリエ変換は、離散化フーリエ変換とFFT(Fast Fourier Transform)によって効率的に計算することができる。振動数一波数領域において、離散化は次式のように行う。

$$\Delta \omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{2 \cdot \omega_{\max}}{N_\omega}, \quad \Delta \kappa_x = \frac{2\pi}{L_x} = \frac{2 \cdot \kappa_{x \max}}{N_k}, \quad \Delta \kappa_y = \frac{2\pi}{L_y} = \frac{2 \cdot \kappa_{y \max}}{N_k} \quad (3.3)$$

このとき、時間-空間領域の離散化は、次式のようになる。

$$\Delta t = \frac{2\pi}{2 \cdot \omega_{\max}}, \quad \Delta x = \frac{2\pi}{2 \cdot \kappa_{x \max}}, \quad \Delta y = \frac{2\pi}{2 \cdot \kappa_{y \max}} \quad (3.4)$$

もっと具体的に記述すると、先ず、波数領域 $-\kappa_{x \max} \sim \kappa_{x \max}$ 、 $-\kappa_{y \max} \sim \kappa_{y \max}$ で、 $\mathbf{u}(\kappa_x, \kappa_y, z, \omega)$ を計算する。

ここに、

$$\begin{aligned}\kappa_x &= d\kappa_x (i - N_{\kappa \text{fold}}) \quad i = 1, 2, \dots, N_\kappa \\ d\kappa_x &= \frac{2\kappa_{x \max}}{N_\kappa}, \quad N_{\kappa \text{fold}} = \frac{N_\kappa}{2} + 1\end{aligned}\tag{3.5}$$

となり、

$$\text{領域} \quad -\kappa_{x \max} \sim \kappa_{x \max} - d\kappa_x$$

$$\text{分割数} \quad N_\kappa$$

$$\text{間隔} \quad d\kappa_x$$

のデータを取り扱う。 κ_y についても同様である。

これらを $0 \sim +2\kappa_{x \max}$ 、 $0 \sim +2\kappa_{y \max}$ に並び替え、 x, y について高速フーリエ変換し、

計算する地点の $\mathbf{u}(x, y, z, \omega)$ を取り出す。この作業を $0 \sim +2N_{\omega \text{fold}} \times d\omega$ まで繰り返し、

ω についての1次元配列を作る。これを $N_{\omega \text{fold}}$ で折り返し、 $0 \sim +2\omega_{\max}$ とする。これ

を高速フーリエ変換して、 $\mathbf{u}(x, y, z, t)$ を計算している。

ここに、

$$\begin{aligned}\omega &= d\omega (i - 1) \quad i = 1, 2, \dots, N_\omega \\ d\omega &= \frac{\omega_{\max}}{N_{\omega \text{fold}}}\end{aligned}\tag{3.6}$$

となり、

$$\text{領域} \quad 0 \sim 2\omega_{\max} - d\omega$$

$$\text{分割数} \quad N_\omega$$

$$\text{間隔} \quad d\omega$$

のデータを取り扱う。

3.2 断層を含む半無限地盤上の水平成層地盤における波動場の検証

証と数値計算例

ここで、断層を含む半無限地盤上の水平成層地盤における波動場の振動数一波数領域での定式化とその数値計算プログラムの妥当性を Bouchon (1979) の数値計算結果と比較し、検証するものとする。

(1) 断層—地盤モデルおよび離散化パラメータ

Bouchon (1979) は、図3-2-1、表3-2-1、表3-2-2に示すような半無限地盤に表層が1層の場合の断層—地盤モデルに対して、地表面変位の数値計算を行っている。離散化パラメータを表3-2-3に示す。

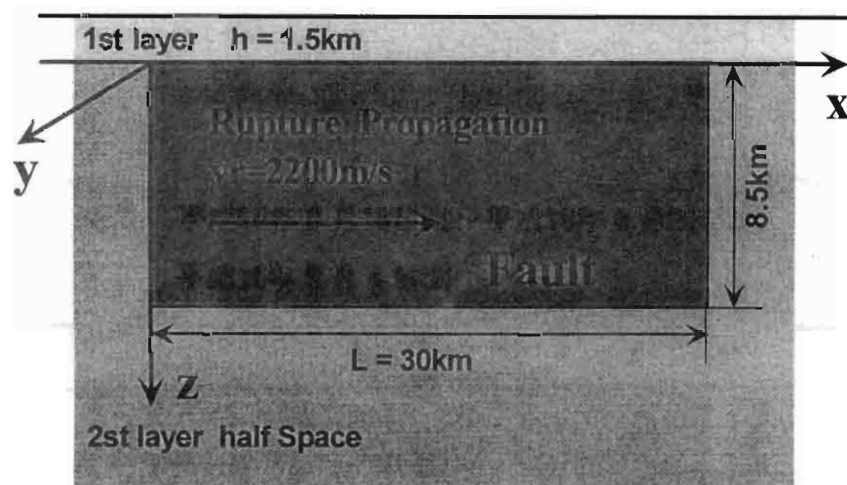


図3-2-1 数値計算に用いた断層

表3-2-1 半無限地盤と表層地盤の厚さと物性値

	Thickness of layer h [m]	Elastic P velocity [m/sec]	Elastic S velocity [m/sec]	Mass density ρ [t/m ³]	Attenuation factor Q
1st Layer	1500	3000	1600	2.3	600
Half space	-----	6000	3500	2.8	600

表3-2-2 震源パラメータ

Seismic Moment M_0	$[N \cdot m]$	2.230×10^{17}
Rise Time of the Ramp Function τ	$[\text{sec}]$	0.3
Length of Fault L	$[m]$	30000
Width ength of Fault W	$[m]$	8500
Velocity of Rupture v_r	$[m / \text{sec}]$	2200
Depth of Uper Edge of Fault z_{so}	$[m]$	0.0
Strike Angle ϕ	$[\text{°}]$	0.0
Dip Angle δ	$[\text{°}]$	90.0
Slip Angle λ	$[\text{°}]$	0.0
Slip Type		Type 1

表3-2-3 振動数および波数の数値計算領域と分割数

Cutoff frequency ω_{\max}	$[\text{rad} / \text{sec}]$	19.6349551
Cutoff x-wave number $\kappa_{x \max}$	$[\text{rad} / m]$	$\pm 4.0 \times 10^{-3}$
Cutoff y-wave number $\kappa_{y \max}$	$[\text{rad} / m]$	$\pm 4.0 \times 10^{-3}$
N_ω		1024
N_κ		1024
Δt	$[\text{sec}]$	0.16
Δx	$[m]$	785.0
Δy	$[m]$	785.0

(2) 変位時刻歴波形

ここでは、表3-2-4に示す地点の数値計算を行い、Bouchon (1979)の結果と比較する。

表3-2-4 数値計算を行った地点 (表層地盤地表面)

$x [m]$	$y [m]$	$z [m]$
14915	785	0

図3-2-2には、表3-2-4に示した地点の変位時刻歴波形をBouchon (1979)の結果とともに示す。ただし、変位は断層のすべり量 $D [m]$ で無次元化した。

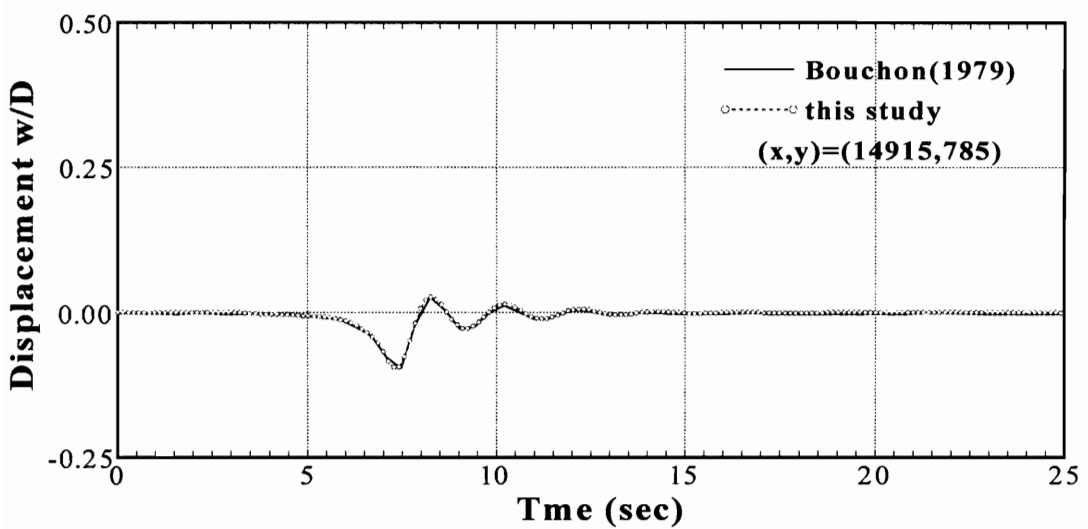
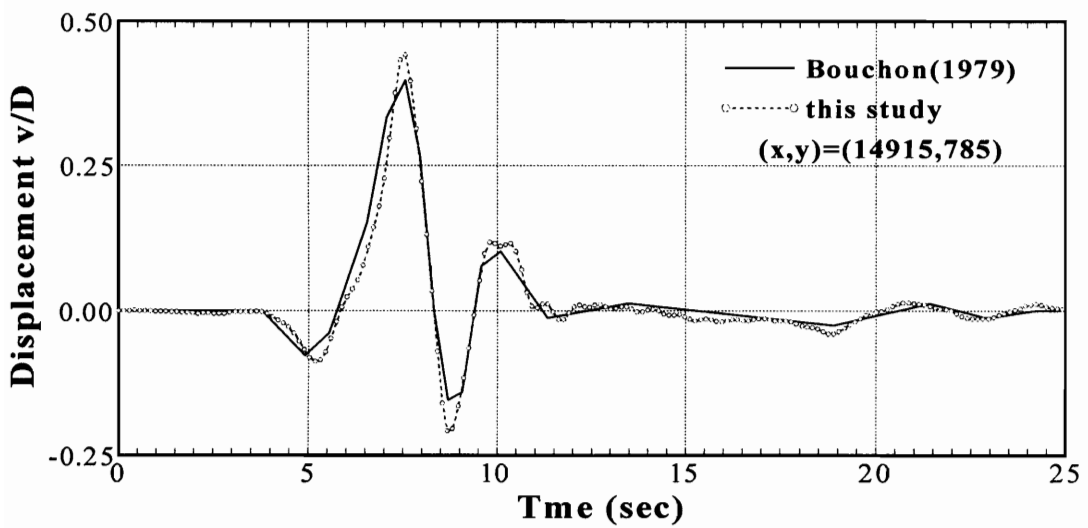
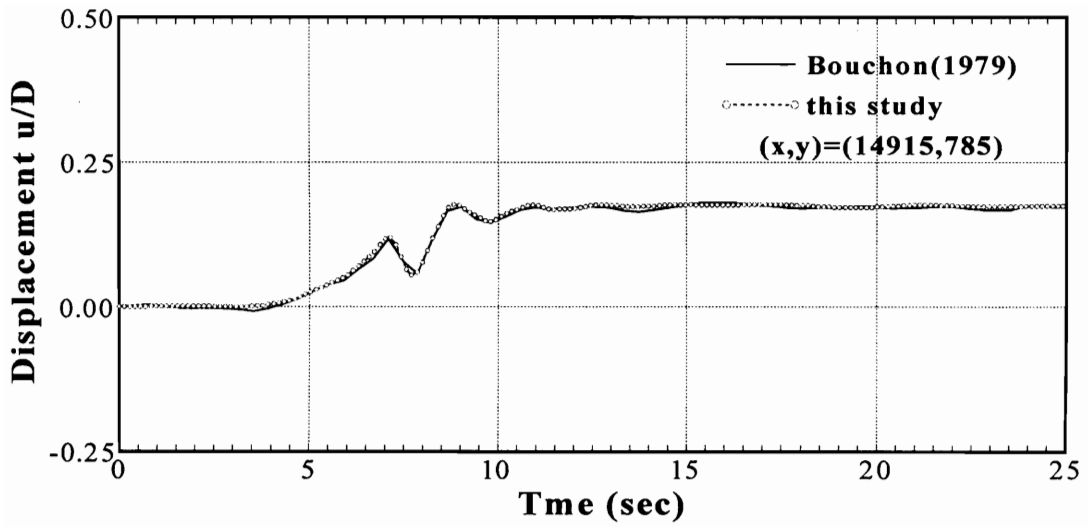


図3-2-2 数値計算を行った地点の無次元変位

ここでは、1 地点の変位波形の比較を示したが、その他の地点でも両者はよく一致しており、本研究における断層を含む半無限地盤上の水平成層地盤における波動場の定式化と数値計算プログラムの妥当性が確認されたと思われる。

3.3 半無限地盤上の断層を含む水平成層地盤における波動場の検証

ここでは、2 章で示した半無限地盤上の断層を含む水平成層地盤における波動場の振動一波数領域での定式化とその数値計算プログラムの妥当性を検証する。

図3-3-1に示すように、半無限地盤上に表層が2層の地盤モデル（第2層に断層）を想定する（図3-3-1 (a)に参照）。このとき、第2層がある程度厚くなると、第3層（この場合、半無限地盤）の影響を受けなくなる（図3-3-1 (b)に参照）。これは、断層を含む半無限地盤に表層が1層の場合として取り扱うことができる（図3-3-1 (c)に参照）。

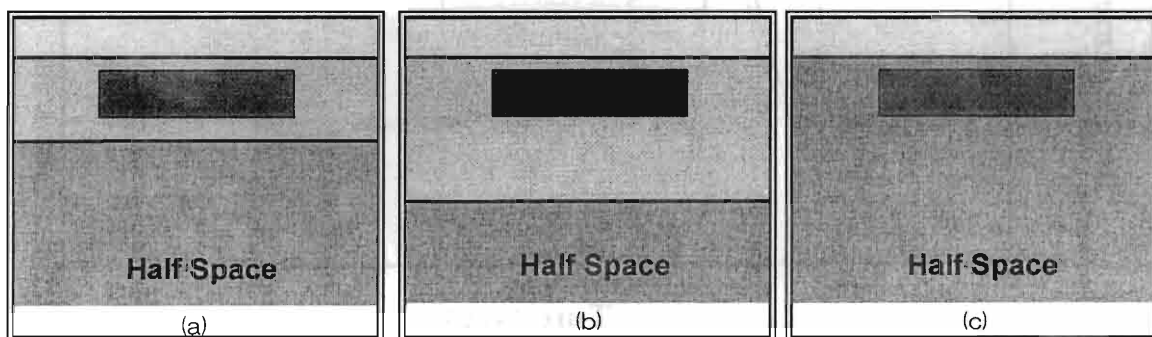


図3-3-1 半無限地盤にのる水平成層地盤

以上のことを利用して、「半無限地盤上の断層を含む水平成層地盤における波動場」の定式化を、「断層を含む半無限地盤上の水平成層地盤における波動場」の数値計算結果と比較し、検証する。

(1) 断層—地盤モデルおよび離散化パラメータ

断層—地盤モデルとして、図3-3-2、表3-3-1、表3-3-2に断層—地盤モデルを示すように、断層を含む第2層の層厚が異なる4つのモデルを想定する。数値計算のための離散化パラメータは、表3-3-3に示す。

表3-3-1 半無限地盤と表層地盤の厚さと物性値

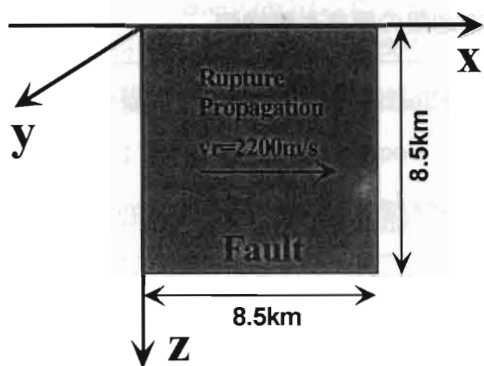
	Thickness of layer h [m]	Elastic P velocity [m/sec]	Elastic S velocity [m/sec]	Mass density ρ [t/m ³]	Attenuation factor Q
1st Layer	1500	2800	1600	2.3	150
2nd Layer (Case 1)	8500				
2nd Layer (Case 2)	10000				
2nd Layer (Case 3)	20000	6000	3500	2.8	400
2nd Layer (Case 4)	40000				
2nd Layer (half space)	—				
Half space	—	8000	4500	3.1	600

表3-3-2 震源パラメータ

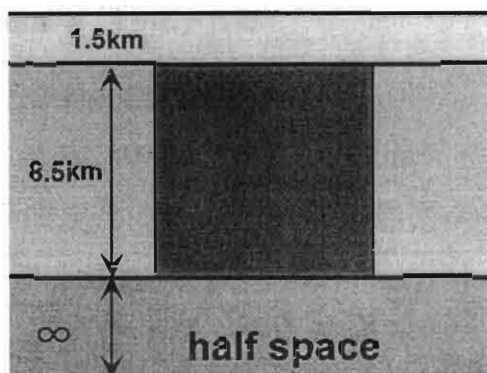
Seismic Moment M_0	[N · m]	2.230×10^{17}
Rise Time of the Ramp Function τ	[sec]	0.3
Length of Fault L	[m]	8500
Width length of Fault W	[m]	8500
Velocity of Rupture v_r	[m/sec]	2200
Depth of Uper Edge of Fault z_{so}	[m]	0.0
Strike Angle ϕ	[°]	0.0
Dip Angle δ	[°]	90.0
Slip Angle λ	[°]	0.0
Slip Type		Type 1

表3-3-3 振動数および波数の数値計算領域と分割数

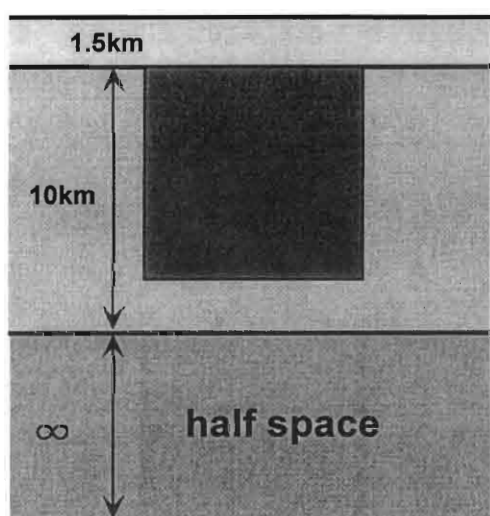
Cutoff frequency ω_{\max}	[rad/sec]	19.6349551
Cutoff x-wave number $\kappa_{x\max}$	[rad/m]	$\pm 4.0 \times 10^{-3}$
Cutoff y-wave number $\kappa_{y\max}$	[rad/m]	$\pm 4.0 \times 10^{-3}$
N_ω		1024
N_κ		1024
Δt [sec]		0.16
Δx [m]		785.0
Δy [m]		785.0



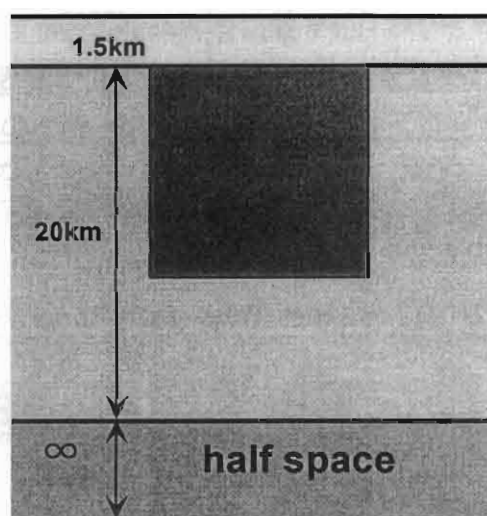
(Fault Model)



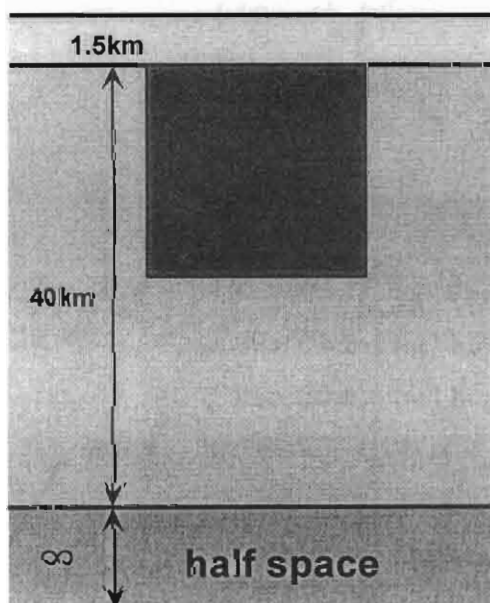
(Case 1)



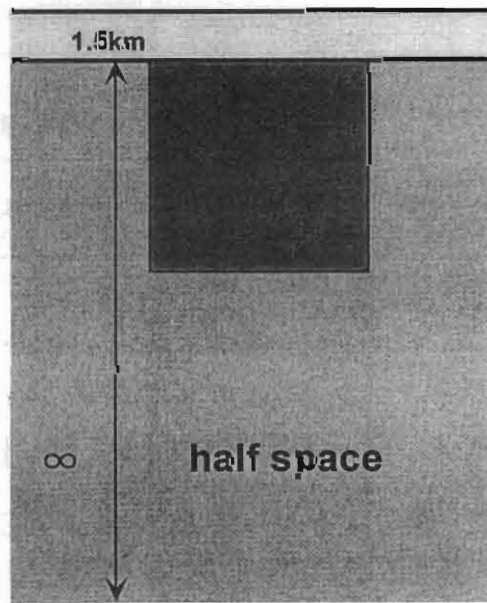
(Case 2)



(Case 3)



(Case 4)



(Case 5) (2nd layer [half space])

図 3-3-2 数値計算に用いた断層-地盤モデル

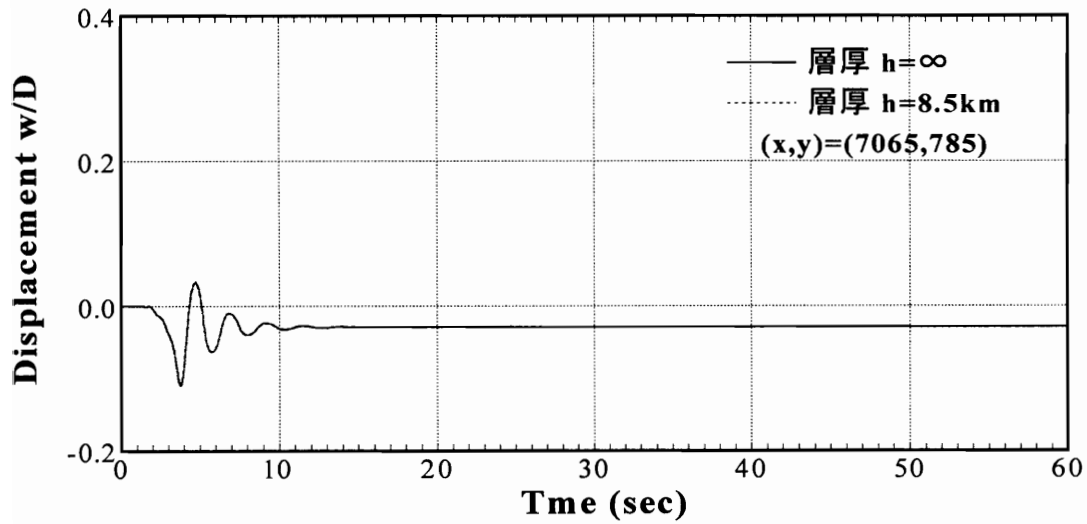
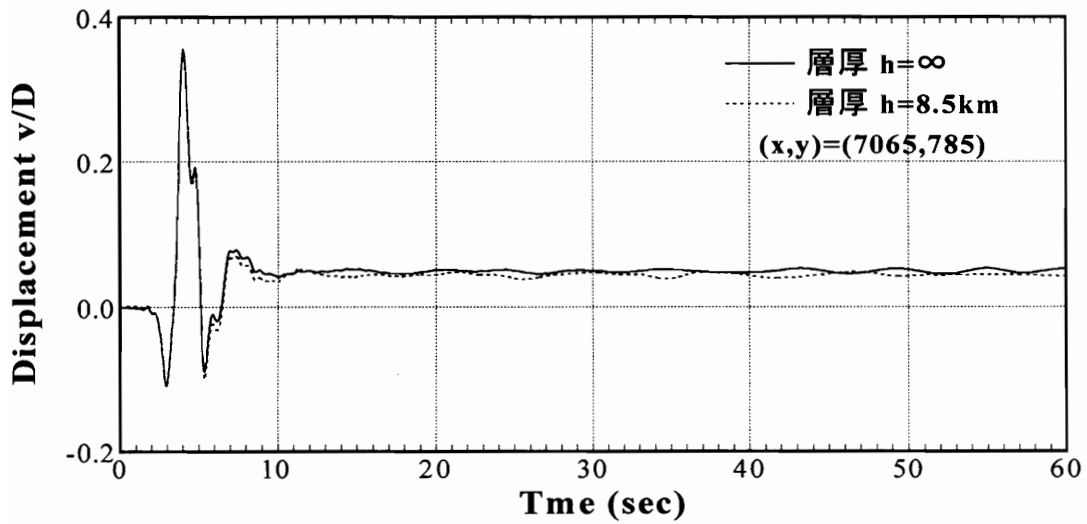
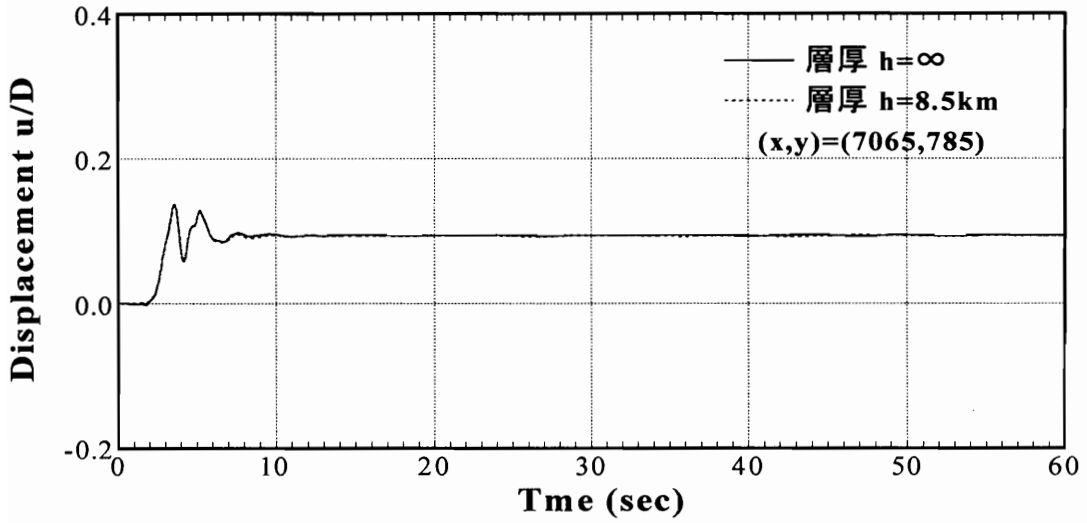


図3-3-3 Case 1の無次元変位

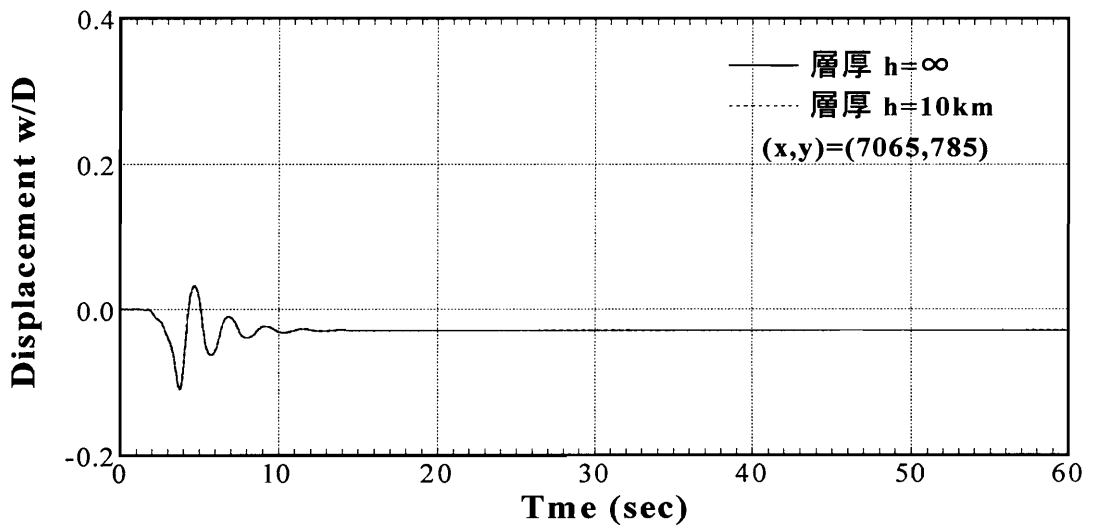
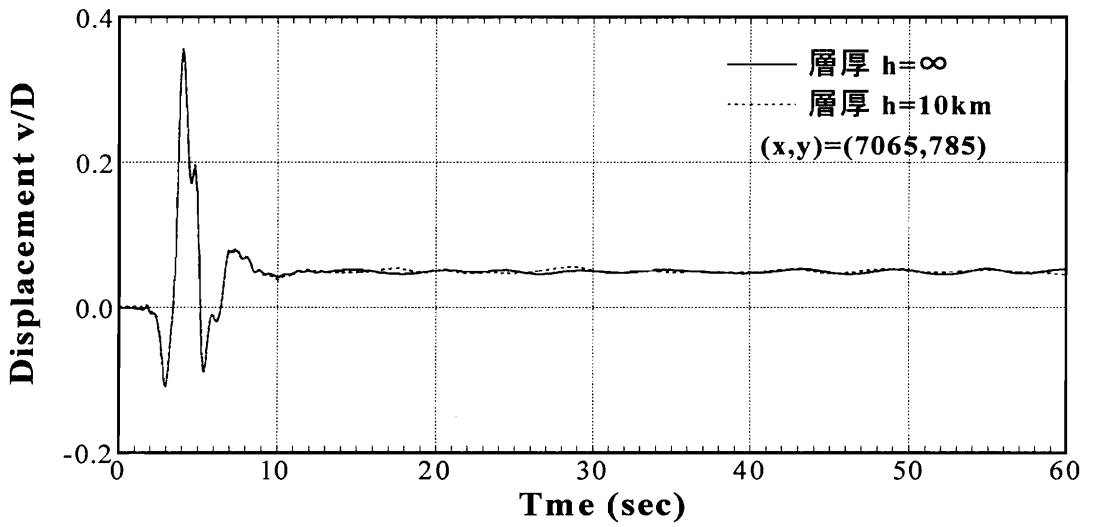
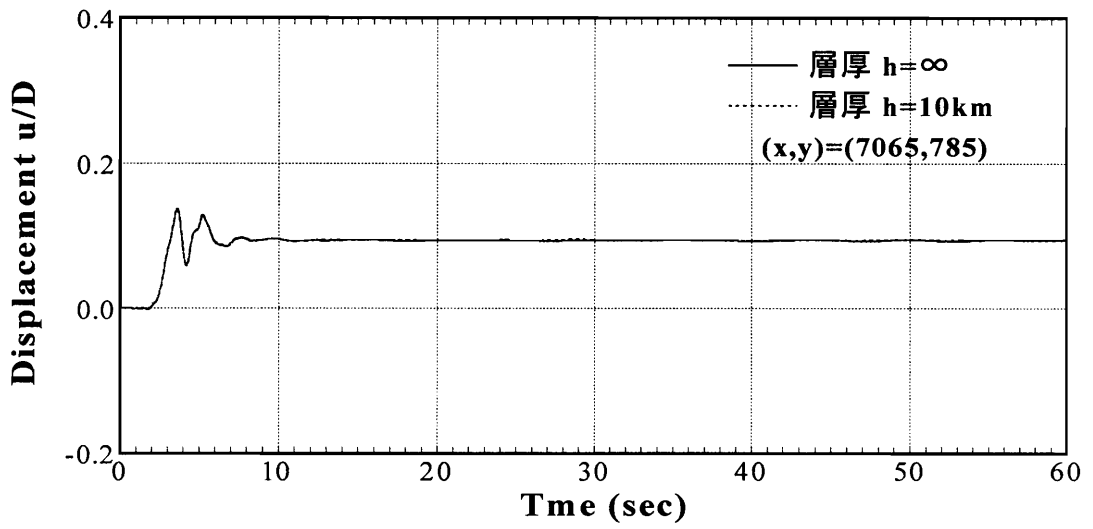


図3-3-4 Case 2の無次元変位

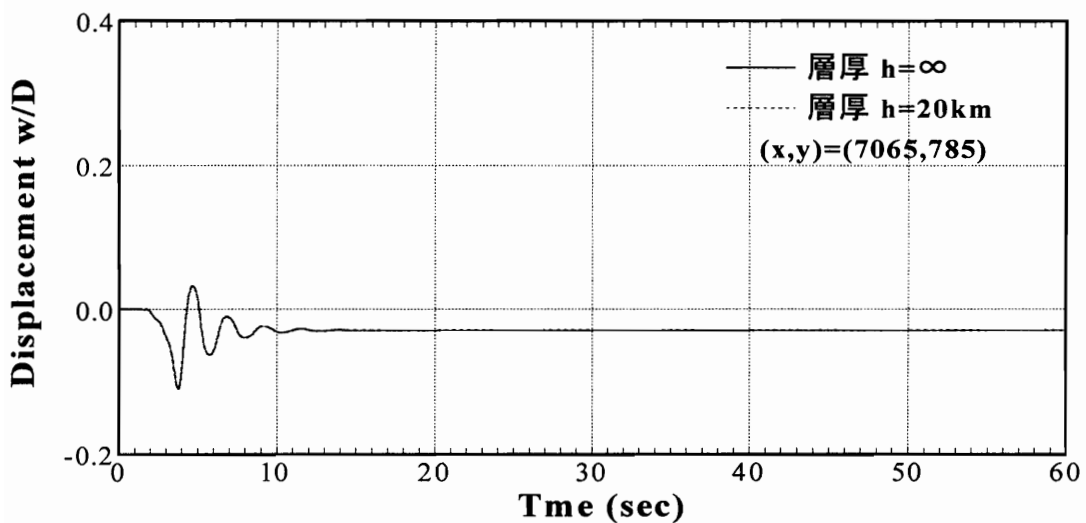
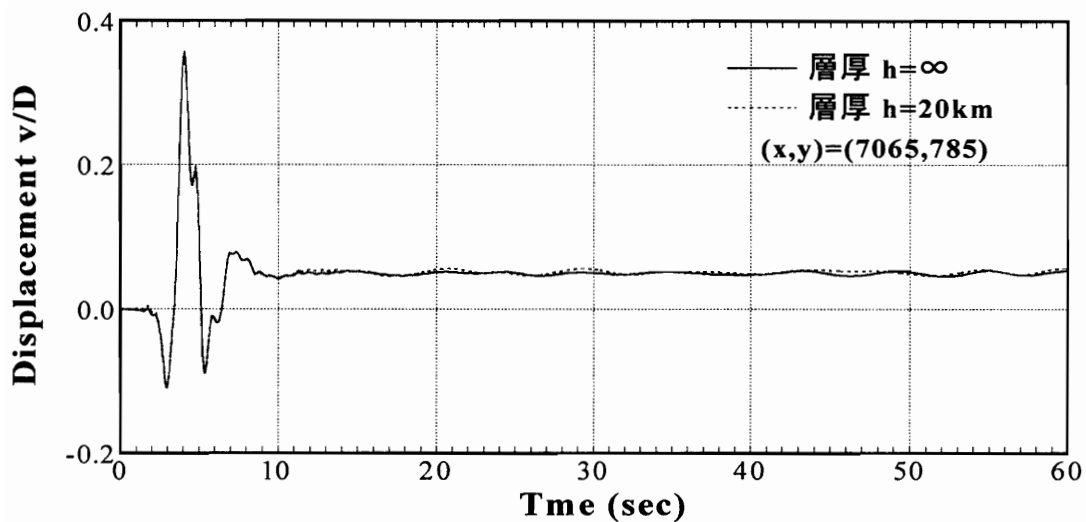
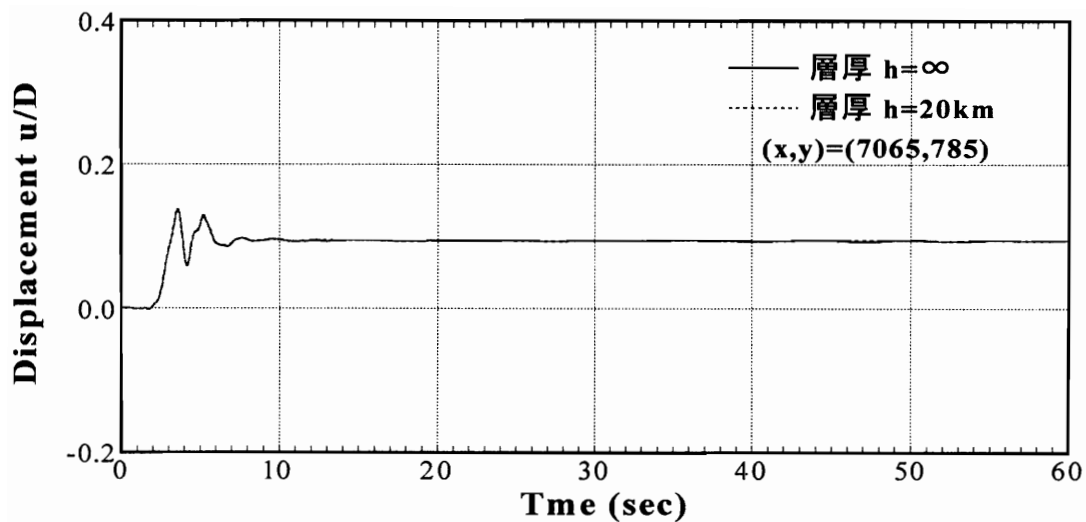


図3-3-5 Case 3の無次元変位

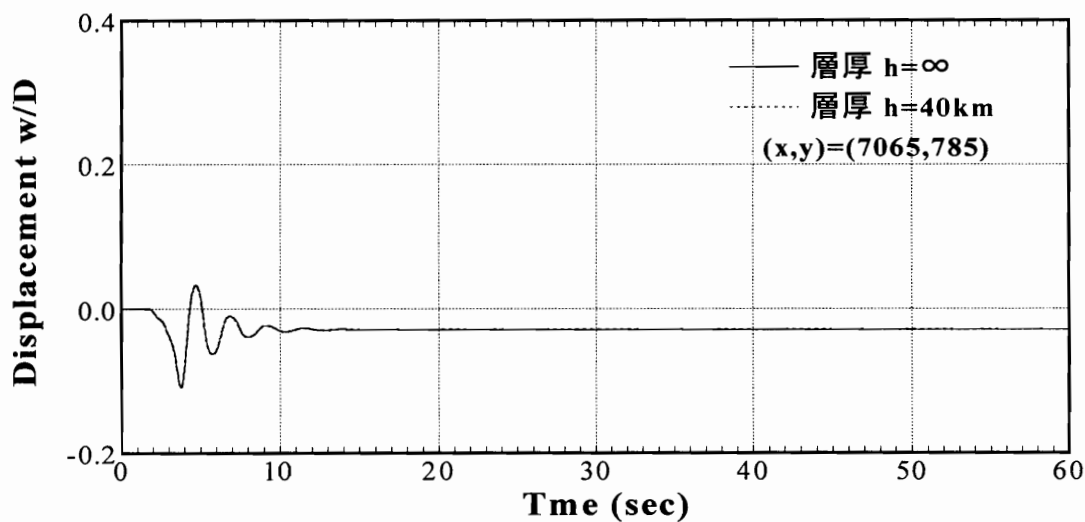
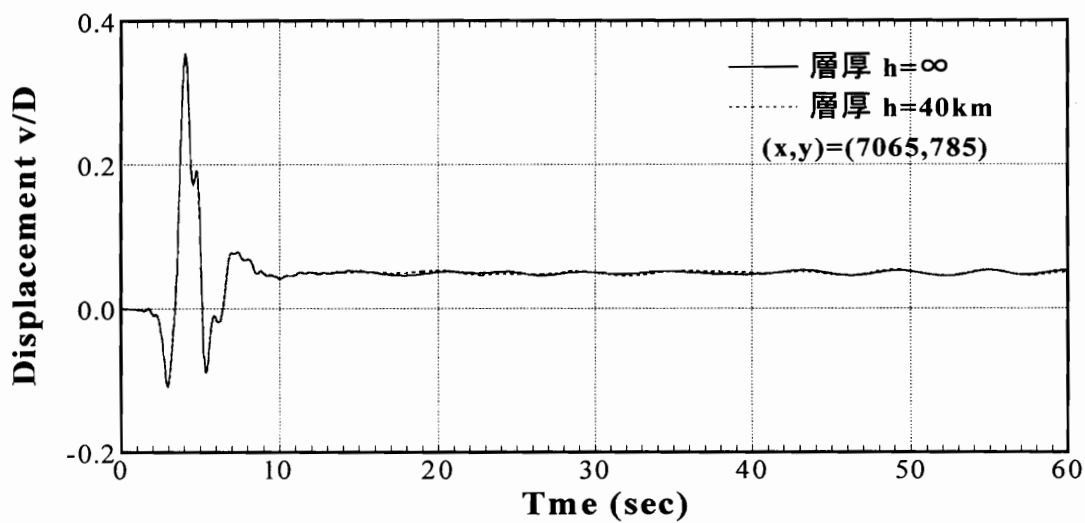
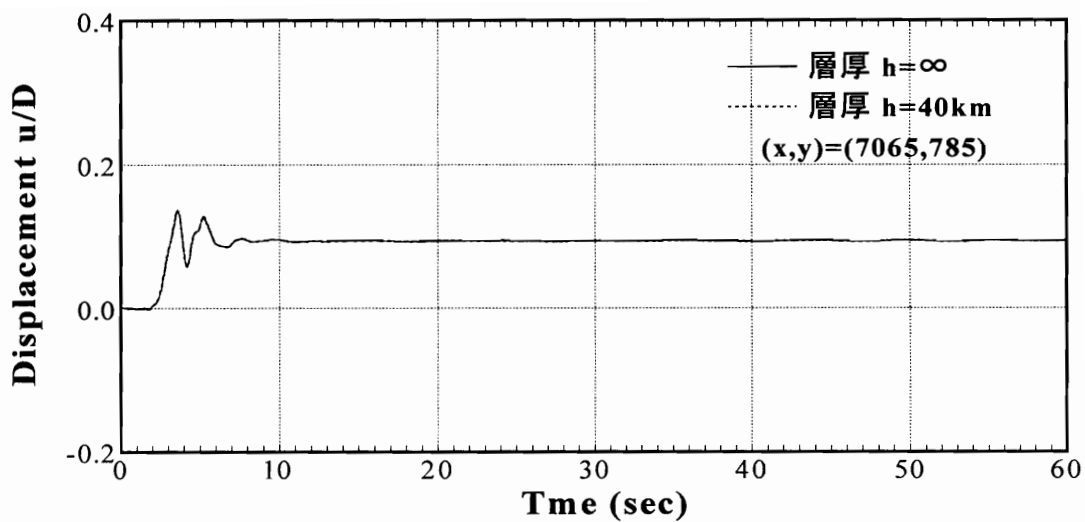


図3-3-6 Case 4の無次元変位

(2) 数値計算例による比較

図3-3-2と表3-3-2に示すように、断層を含む第2層の層厚が異なる4つのモデルの地表面変位（case1~4）を第2層が半無限地盤としたモデルにおける（case5 実線）地表面変位と比較し、図3-2-3~図3-2-6に示す。この結果により、第2層が8.5km、10km、20km、40kmと厚くなるにつれて第3層（半無限地盤）の影響が少なくなってゆき、第2層の層厚が40kmでは、第3層の影響が全くなくなって実線と点線は完全に一致している。

このことから、半無限地盤上の断層を含む水平成層地盤における波動場の定式化と数値計算プログラムの妥当性が確認されたと思われる。

したがって、半無限地盤上にある水平成層地盤の地震動の波形は、半無限地盤に震源断層が存在する場合、また、層内に震源断層が存在する場合のどちらからでも、剛性マトリックスに基づき合成することができる。

3.4 地表面の地震動の時空間分布の複雑性—地震動の渦現象—

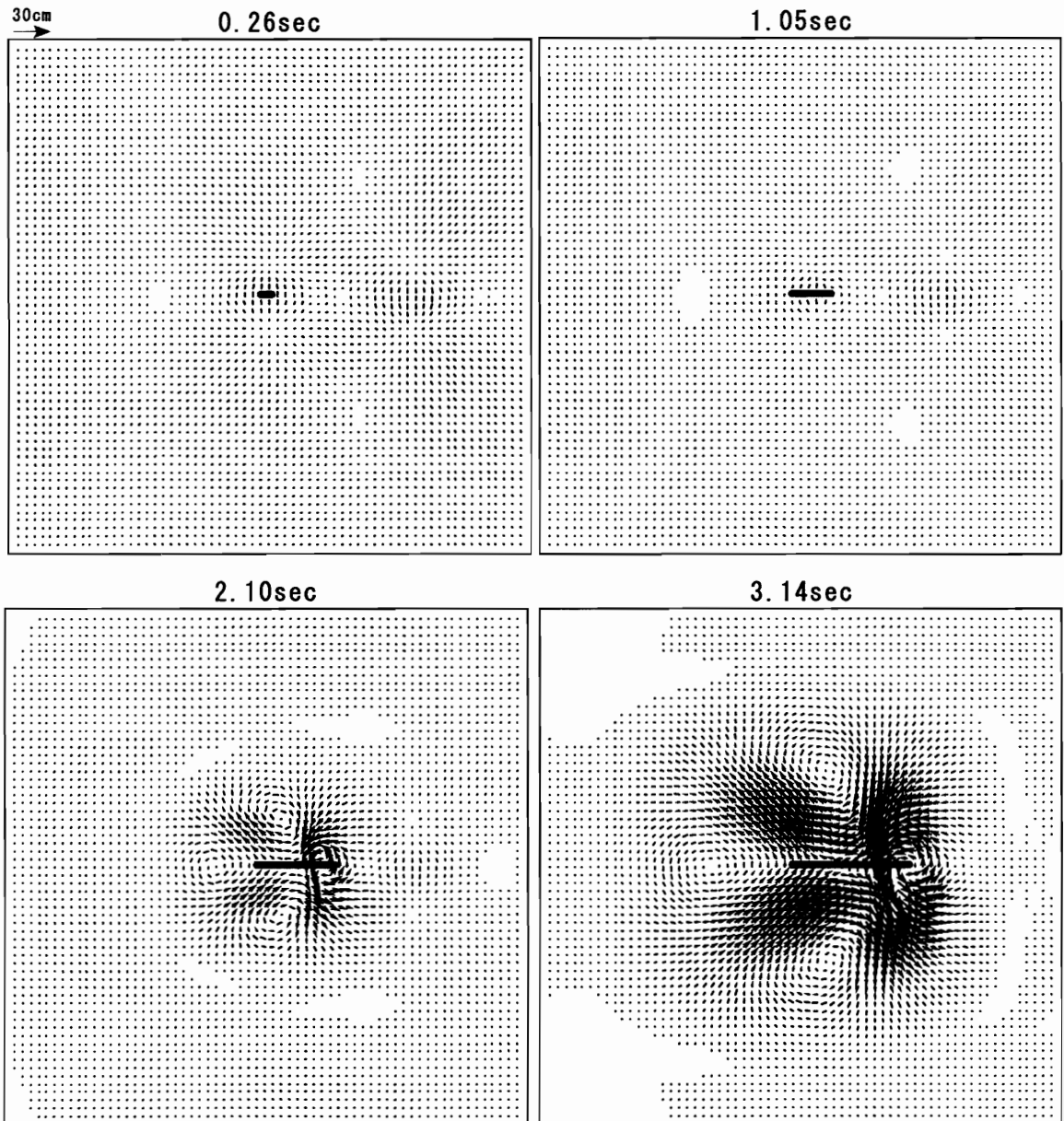
ここでは、前節の計算で用いた震源断層—地盤モデルにおいて半無限地盤中に震源断層が存在する場合（図3-3-2 case5）のモデルを用いて、震源断層近傍の地表面（ $30\text{km} \times 30\text{km}$ ）における地震動の変位、速度、加速度波形の時間的—空間的变化を観るものとする。なお、震源断層パラメータ、地盤諸定数、3.3節で用いたもの（表3-3-1、表3-3-2）である。離散化パラメータは、表3-3-4に示す。

表3-3-4 振動数および波数の数値計算領域と分割数

Cutoff frequency ω_{\max}	[rad/sec]	12.0
Cutoff x-wave number $\kappa_{x\max}$	[rad/m]	$\pm 6.545 \times 10^{-3}$
Cutoff y-wave number $\kappa_{y\max}$	[rad/m]	$\pm 6.545 \times 10^{-3}$
N_{ω}		512
N_{κ}		2048
Δt	[sec]	0.2617
Δx	[m]	480.0
Δy	[m]	480.0

図3-3-7aと7bは、断層破壊開始時刻から約1秒毎の断層近傍地表面水平動成分と約2秒毎の上下動成分の変位波形の時空間分布図を示す。図3-3-8、図3-3-9はそれぞれ約1秒毎の断層近傍地表面水平動成分の速度波形と加速度波形の時空間分布を示す。それぞれの時刻毎の水平成分の分布図において、中央から右方向へ伸びる黒帯は、震源断層の破壊領域の地表面へ投影の長さを表す。断層の長さ8.5km、断層の破壊速度2.2km/sec、約3.9secで破壊が終了する。また各図の矢印の方向と長さは、地表面の各地点における断層の平均すべり量 $D_0 = 1m$ と仮定したときの地表面各地点の水平地震動の向きと大きさを表す。

(1) 水平動変位波形の時空間分布図 (ベクトル表示)



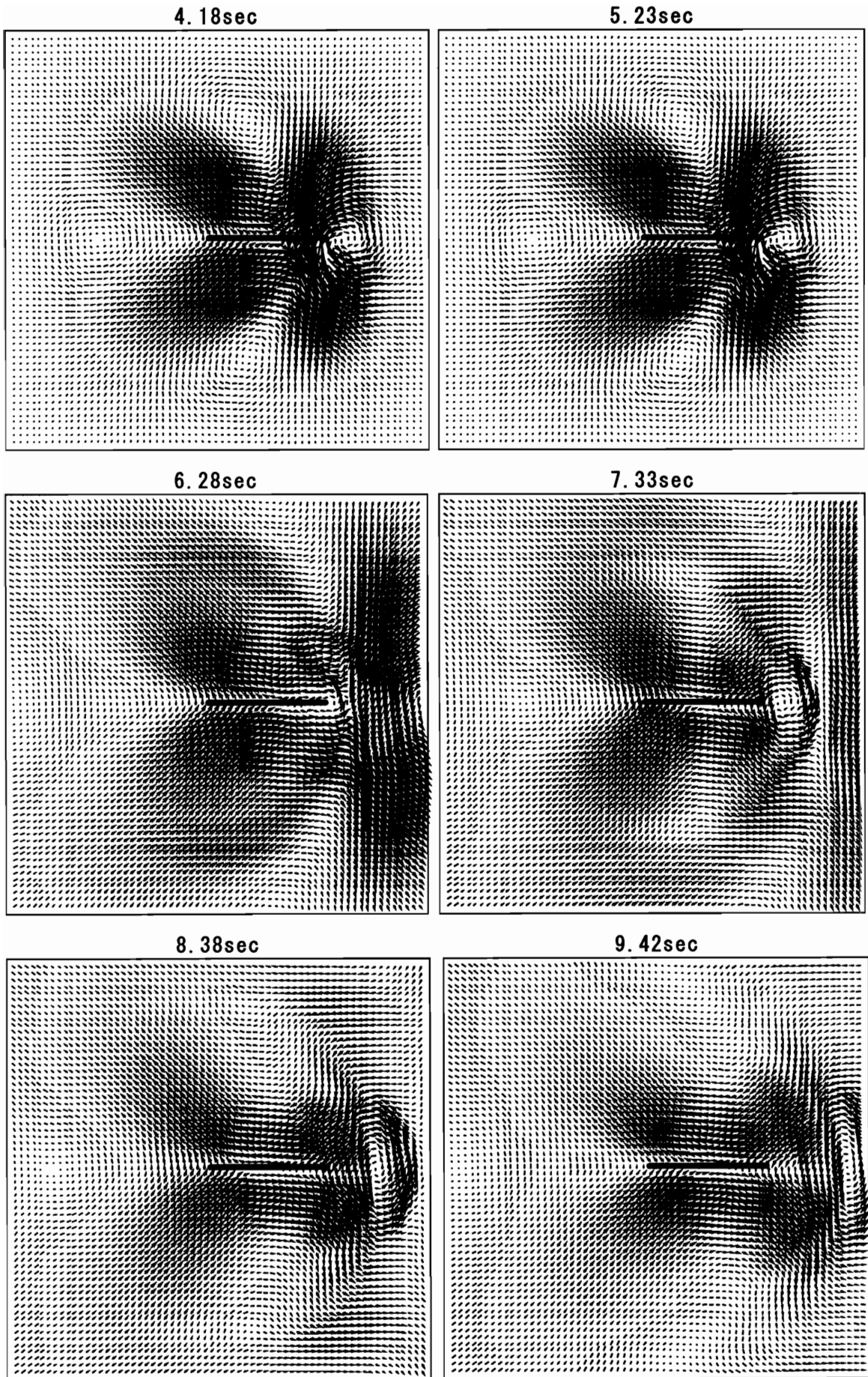
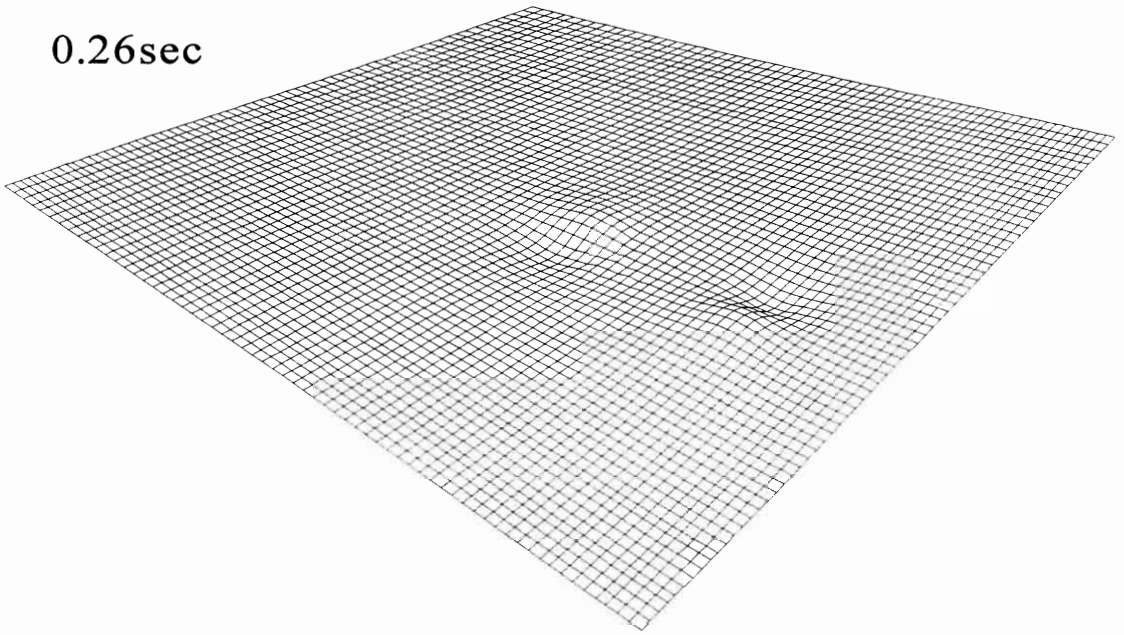


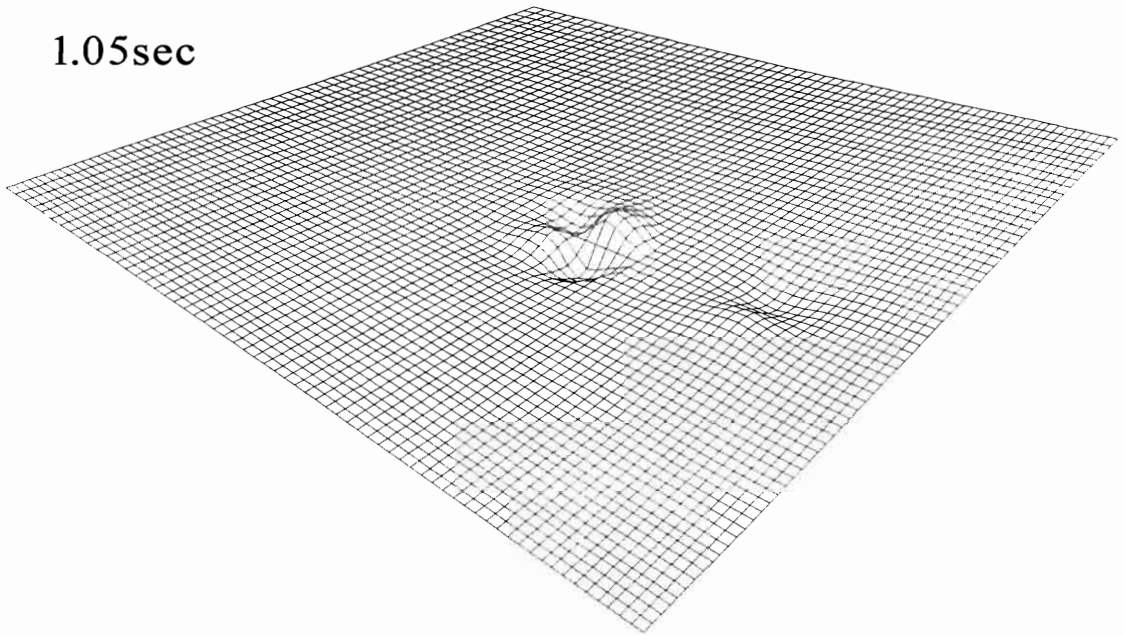
図3-3-7a 10つの時刻毎の断層近傍地表面 $30km \times 30km$ における水平変位分布図

(2) 上下動変位波形の時空間分布図 (3D 表示)

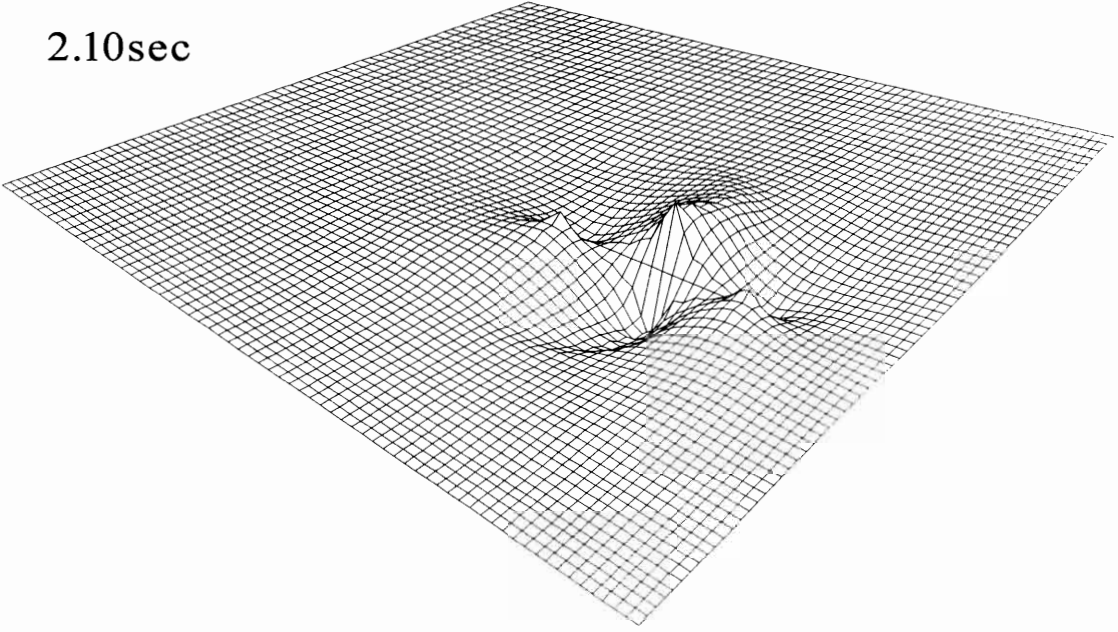
0.26sec



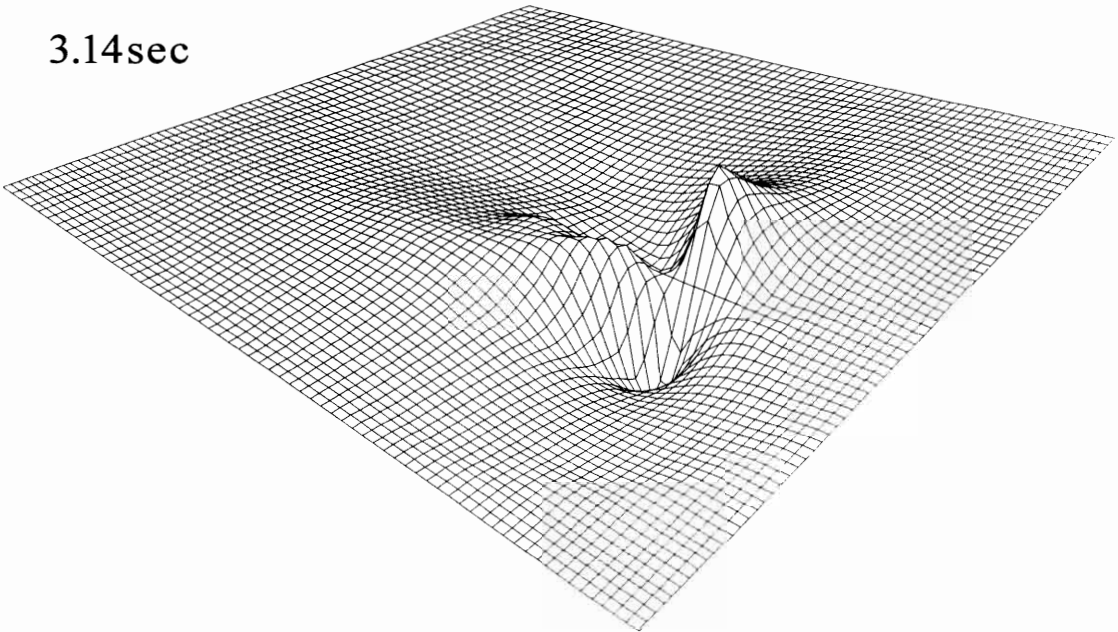
1.05sec



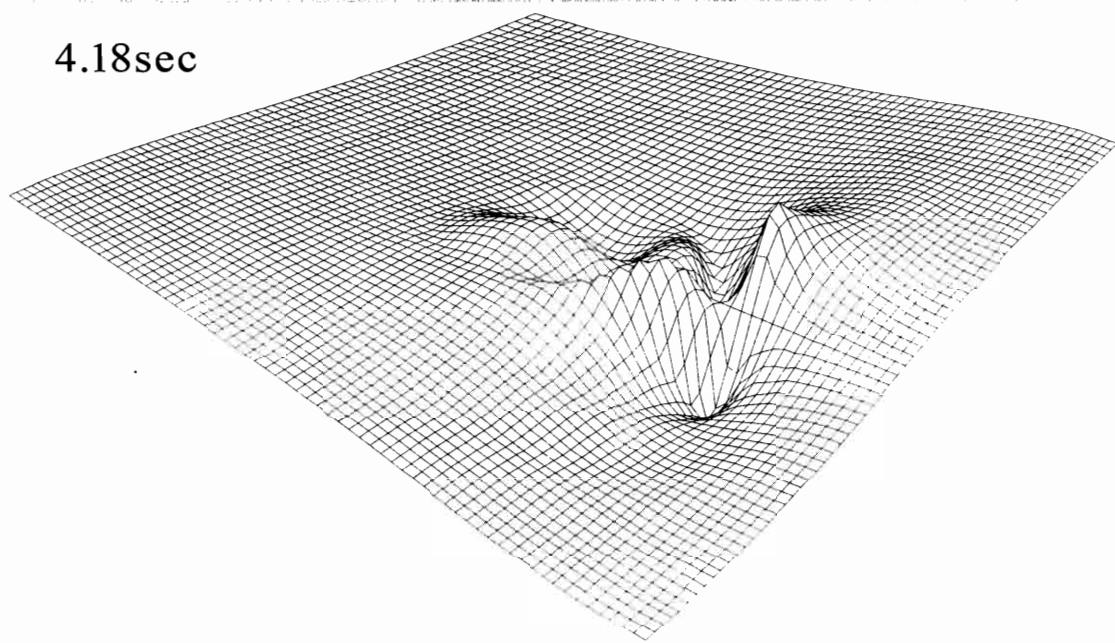
2.10sec



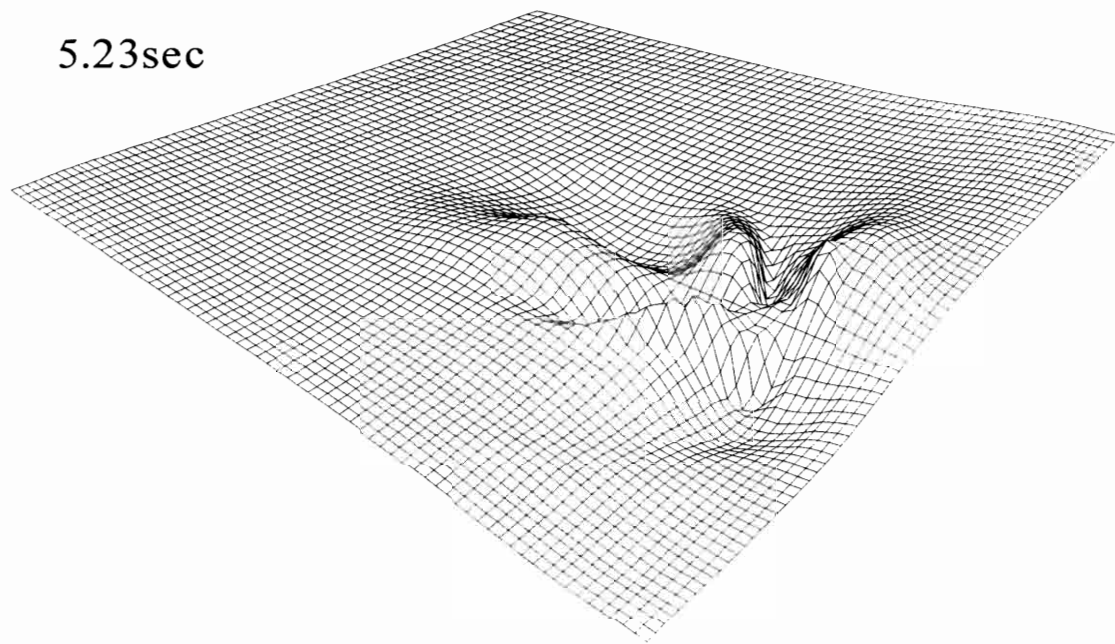
3.14sec



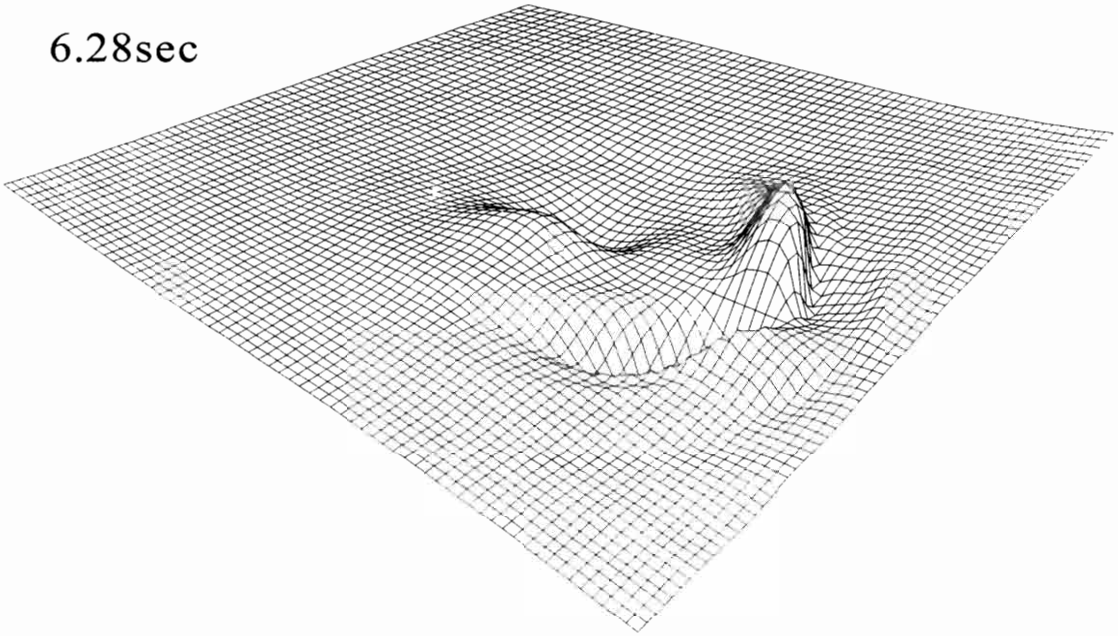
4.18sec



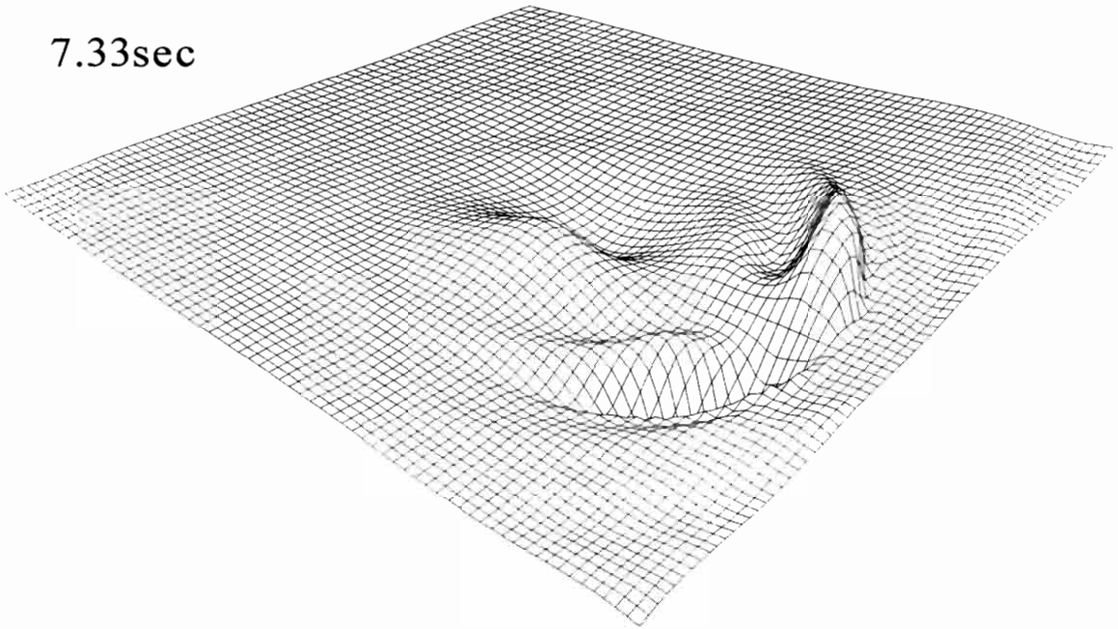
5.23sec



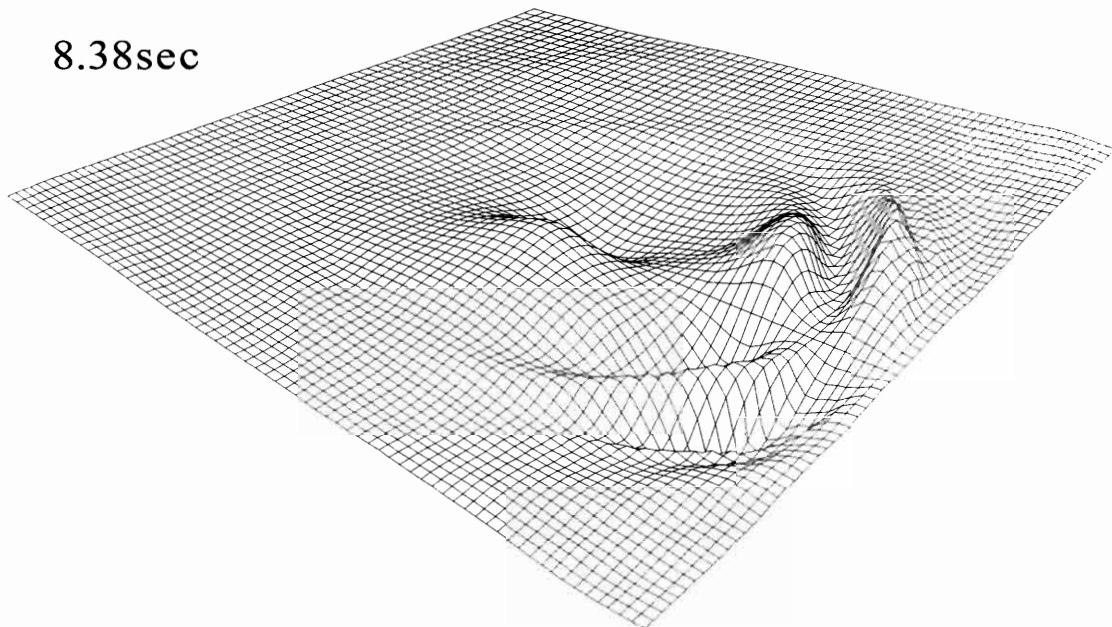
6.28sec



7.33sec



8.38sec



9.42sec

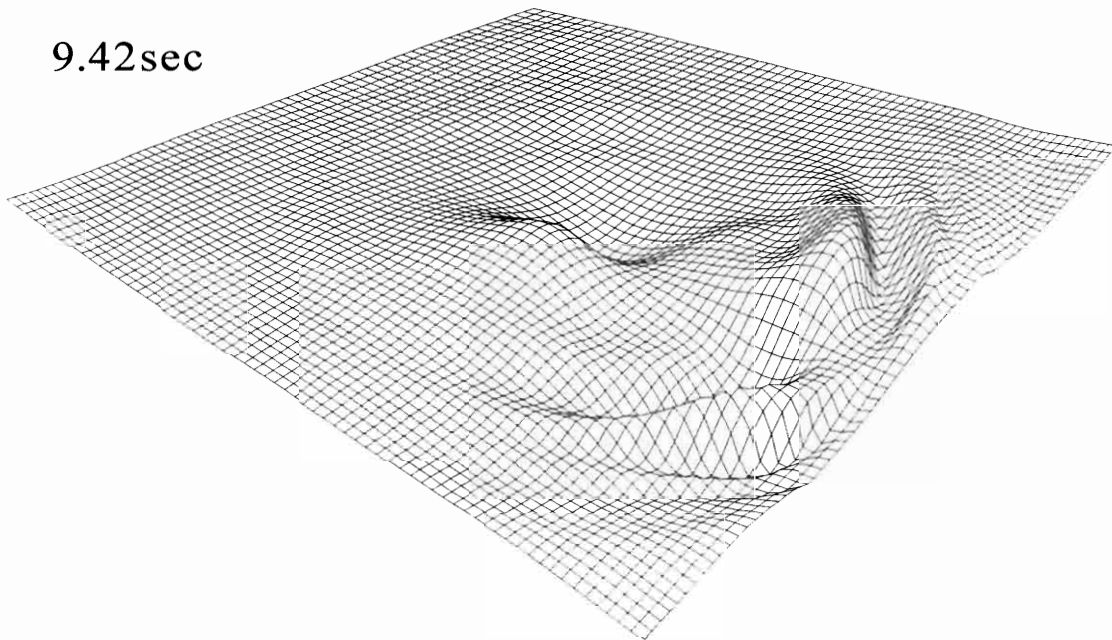
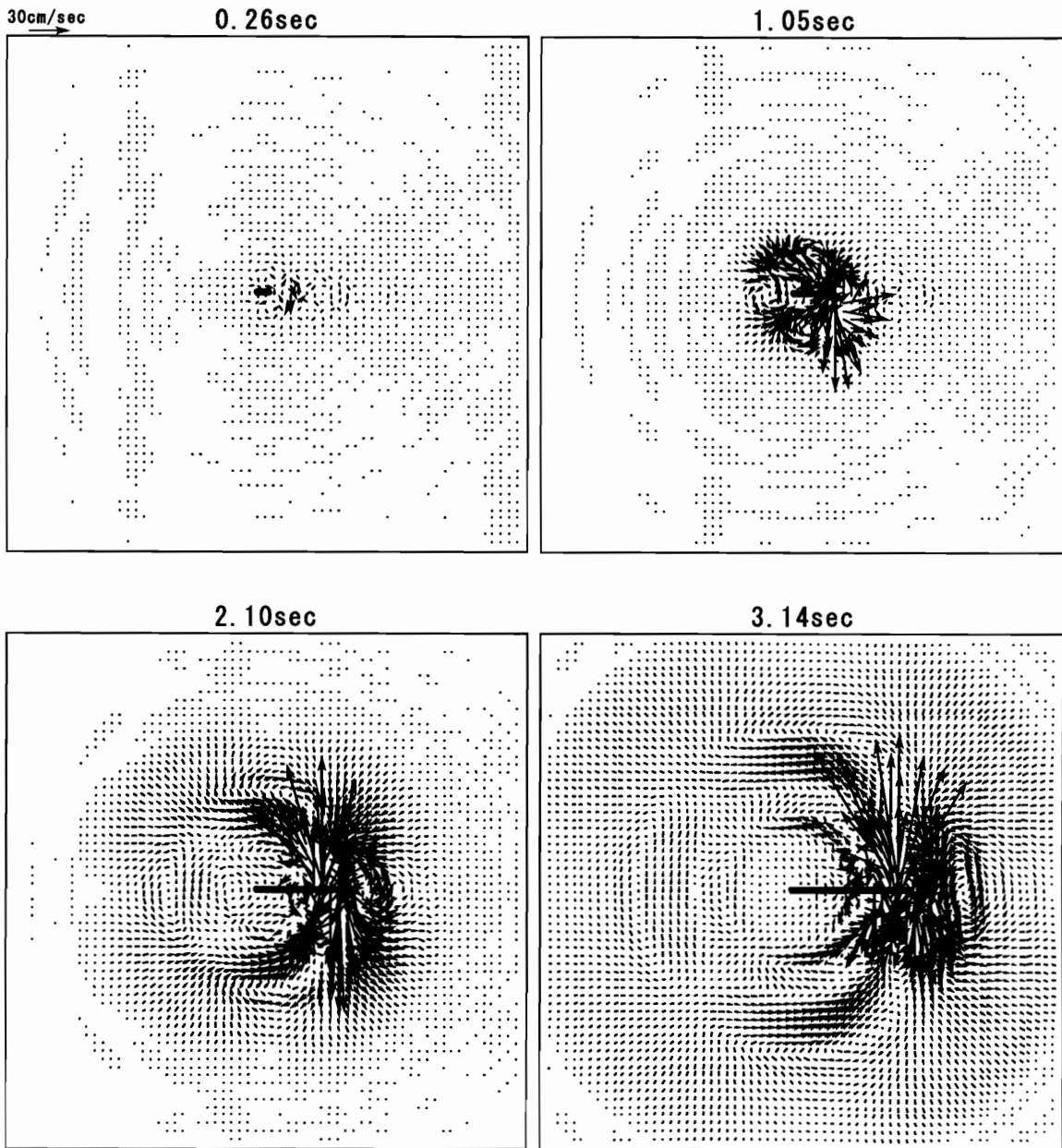


図3-3-7b 10つの時刻毎の断層近傍地表面 $30km \times 30km$ における上下変位分布図

(3) 水平動速度波形の時空間分布図 (ベクトル表示)



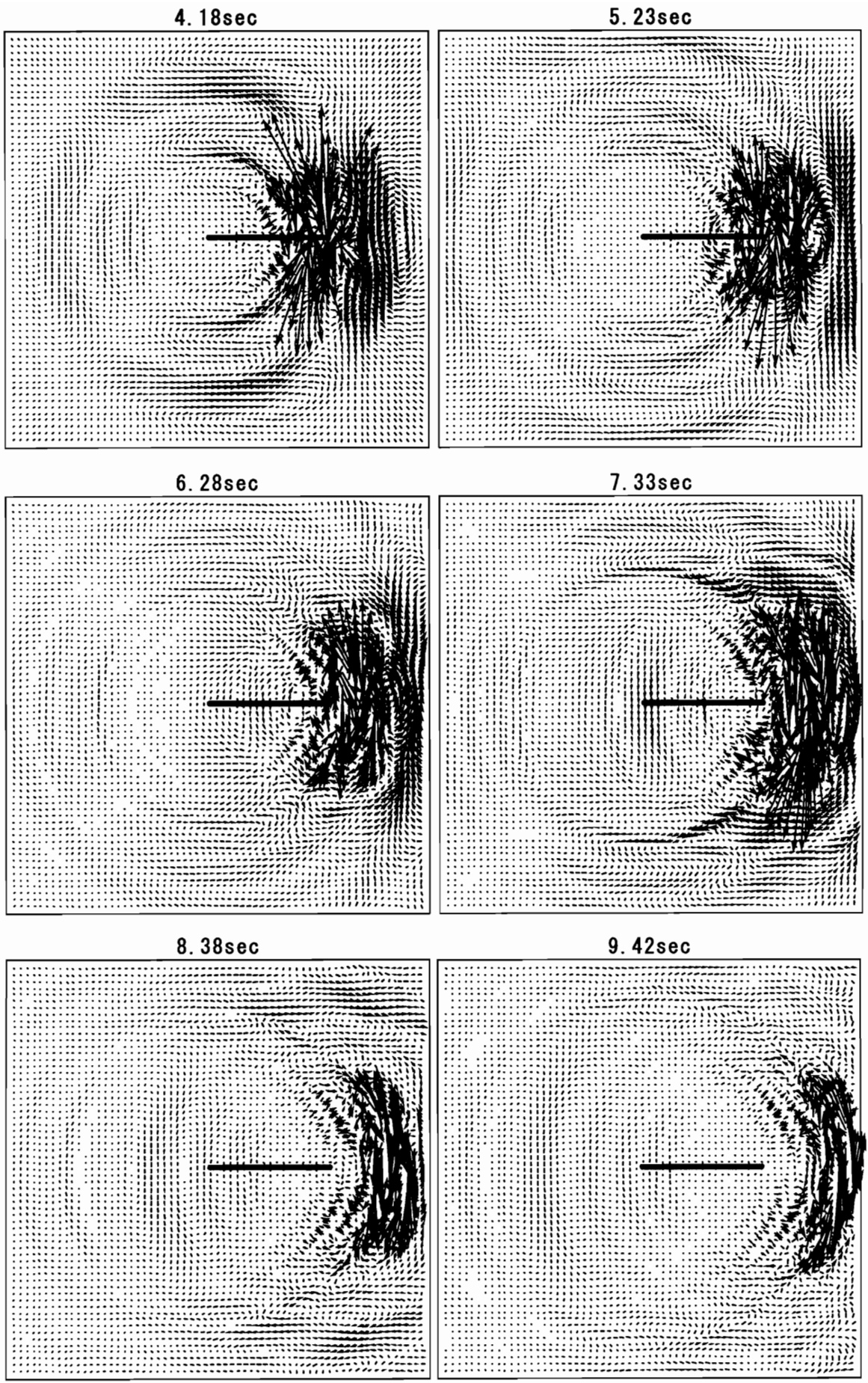
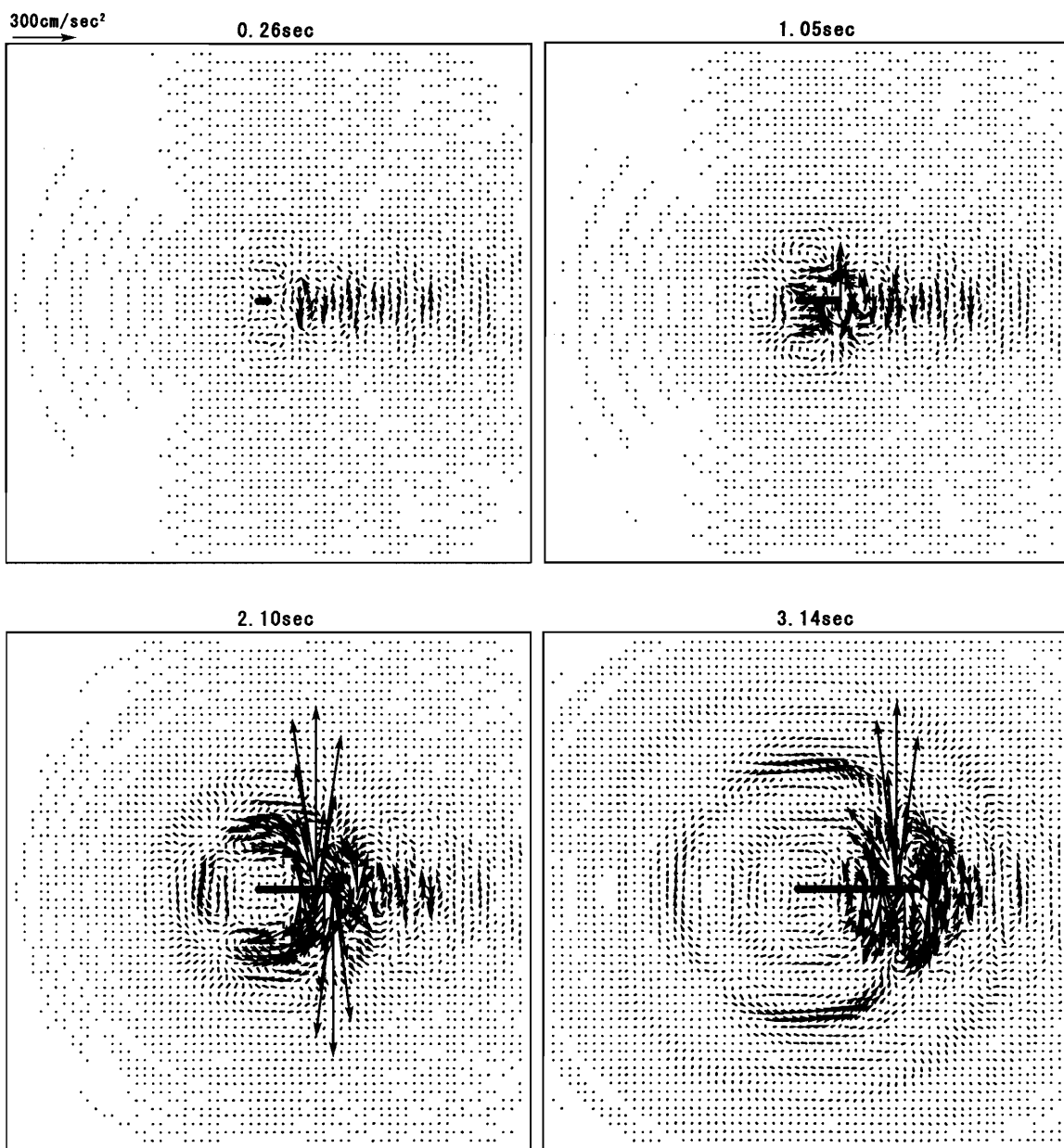


図3-3-8 10つの時刻毎の断層近傍地表面 $30km \times 30km$ における水平速度分布図

(4) 水平動加速度波形の時空間分布図 (ベクトル表示)



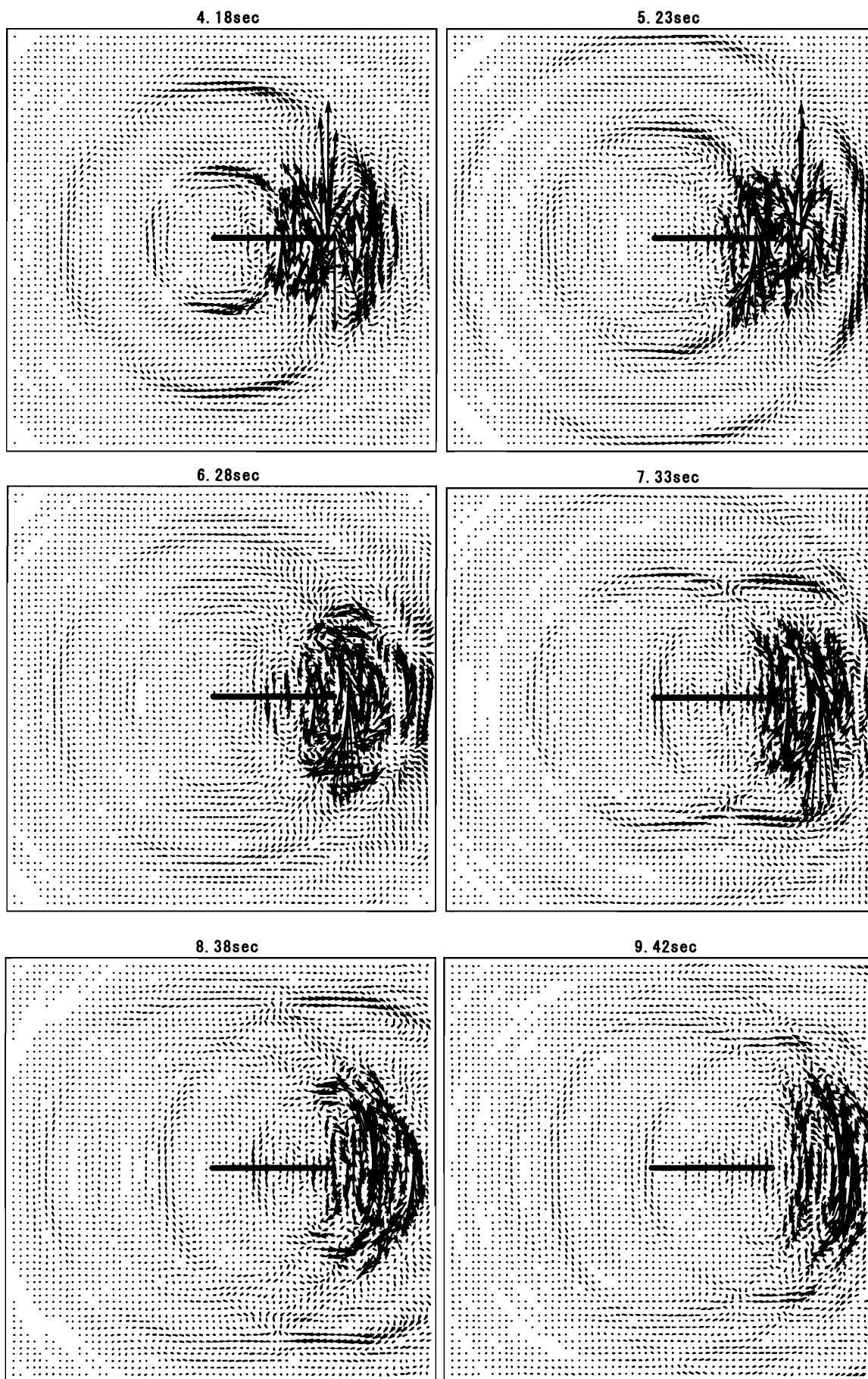


図3-3-9 10つの時刻毎の断層近傍地表面 $30km \times 30km$ における水平加速度分布図

これらの地震波動の時空間分布図によると、断層破壊の開始から終了付近にかけて、地表面に時計回りと半時計回りの渦が現れ、あたかも台風の雲のように渦をまきながら地震波を伝播しているように見える。

本計算では、480m 間隔で地表面の地震動を計算したが、図3-3-9に示すように断層破壊先端付近の局所的な地表面領域において480mの間隔で逆方向に大きな加速度振幅が現れるなど、2つの渦の重なり具合から地震動加速度波形の複雑な空間分布特性が見られる。これら複雑な空間分布特性は、変位波形、速度波形、加速度波形のように短周期地震波になるほど、短い距離で変化している。

これらの複雑な時空間分布特性は、論文[2]でも示されているが、震源の複双力に基づいた運動学的断層モデルにおける破壊特性と表層地盤内の S 波の伝播特性に、ディレクティビティー効果も加わった結果として現れる現象であると考えられる。

参考論文

- (1) Bouchon,M.(1979),Predictability of ground displacement and velocity near an earthquake fault, Journal of Geophys. Res., Vol.84, No.B11, pp.6149-6159.
- (2) 原田隆典、山下肇、(2000),剛性マトリックスに基づく地震動の波形合成法と震源断層近傍地震動の渦現象、応用力学論文集、土木学会、Vol.3, pp.569-576.