

地表地震断層ごく近傍の永久変位・強震動 を計算する理論手法(波数積分法)

土木学会 原子力土木委員会
基礎地盤の変形評価に関する研究小委員会

2022年3月17日(オンライン開催)

久田嘉章(工学院大学・建築学部)

日本地震学会・強震動委員会講座「強震動予測－その基礎と応用」
第20回講習会「テーマ:活断層と地震動予測(2021/12/3)」の教材などを使用
教材・ソフト・データのサイト: <http://kouzou.cc.kogakuin.ac.jp/Open/SSJ/>

1

概要

○波数積分法による断層変位を含む強震動計算法

強震動予測と設計用入力地震動

震源モデルとその近傍の強震動

(指向性パルスとフリングステップ)

波数積分法と様々な数値計算手法

○計算コードと震源近傍強震動の計算例の紹介

- ・単純な震源・地盤モデルによる震源近傍強震動の計算

- ・2016年熊本地震の西原波の計算(一部のみ)

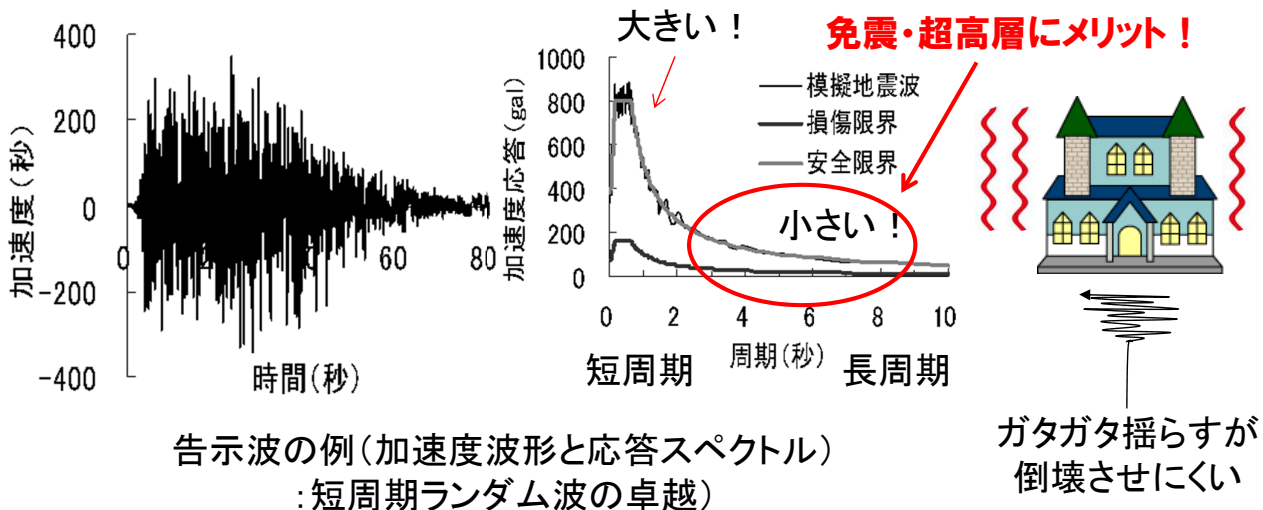
2

様々な強震動特性と建物への影響 (ランダム特性とコヒーレント特性)

- ・ランダム特性を持つ短周期地震動が卓越

標準的入力地震動(エルセントロ波、タフト波、告示波・・・)

→ 耐震設計建物を大変形させ、倒壊させる破壊力は大きくない

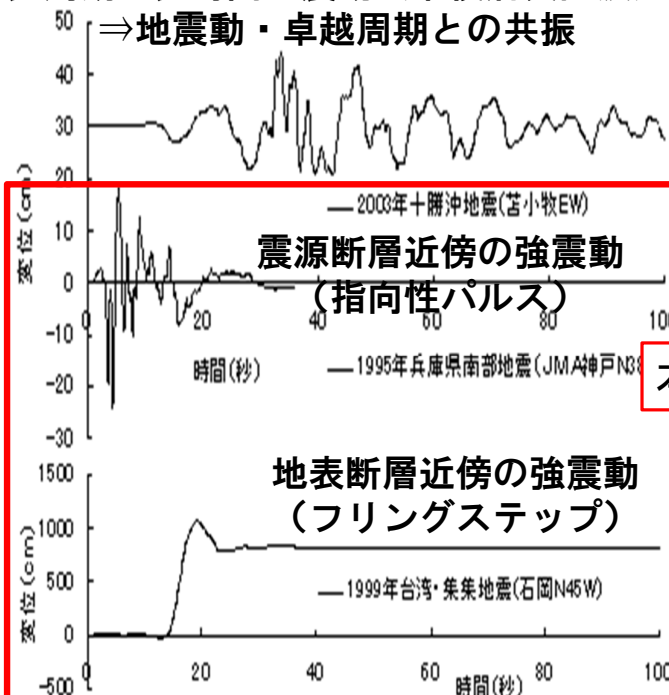


3

活断層や海溝型巨大地震による特徴的な 観測地震動(長周期・長時間地震動、断層近傍強震動)

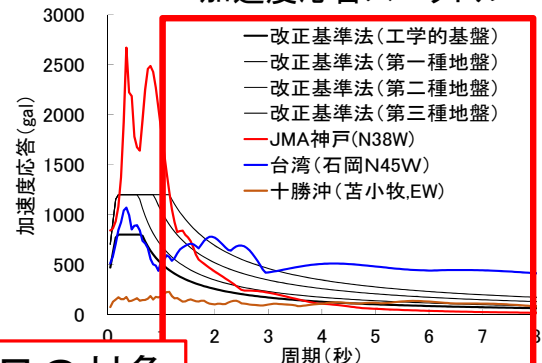
長周期・長時間地震動(堆積層表面波)

⇒地震動・卓越周期との共振



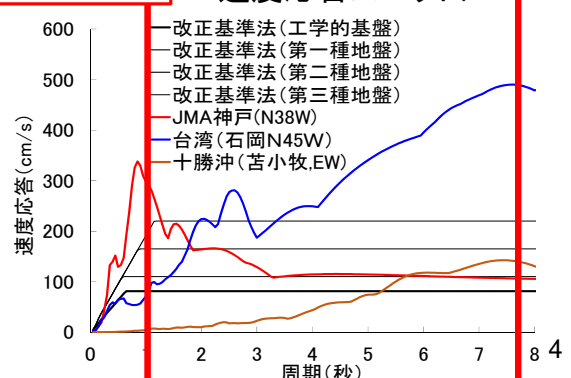
⇒周期1秒程度以上のコヒーレント特性
より建物に大きな変形を生じさせる能力

加速度応答スペクトル



本日の対象

速度応答スペクトル



強震動予測レシピによる強震動

地震調査研究推進本部、震源断層を特定した地震の強震動予測手法(「レシピ」、2020)

- ・ **レシピ**:「誰がやっても同じ答
が得られる標準的な方法論」
⇒ 同じ結果は得られない！
- ・ **震源・伝播・サイト特性の複雑さ**:
レシピでは大幅に単純化している。
- ・ **強震動策定**:任意に設定可能な
膨大な数のパラメータの組み合わせ
があり、理論の理解度や経験等
により結果に大きな差が生じる。



隠し味が絶妙...



同じレシピなのに・・・
(甘くも辛くも自由自在)

⇒ 経験による相場観や最終イメージの有無など専門家判断が重要。特に、震源近傍地震動における適用に要注意。
最後は工学的判断(例: 深さ20kmのM7.3の都心南部直下地震のほぼ直上のサイトにおいて、L2告示波以下?)

5

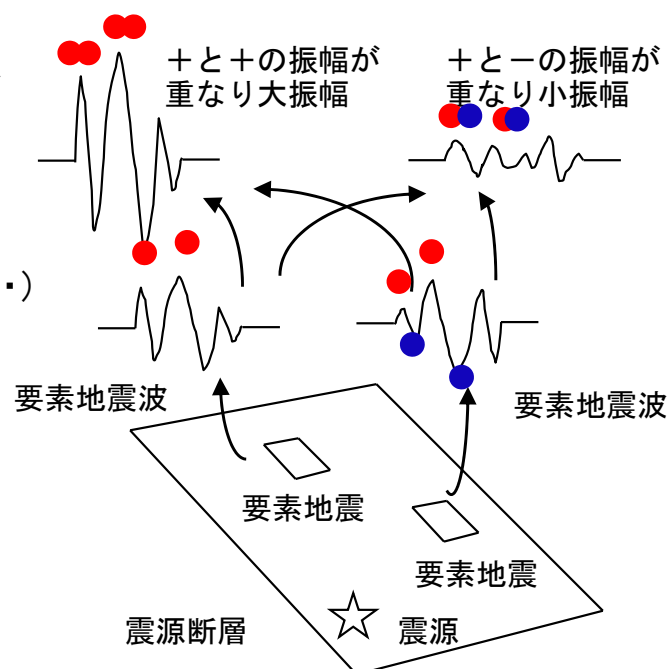
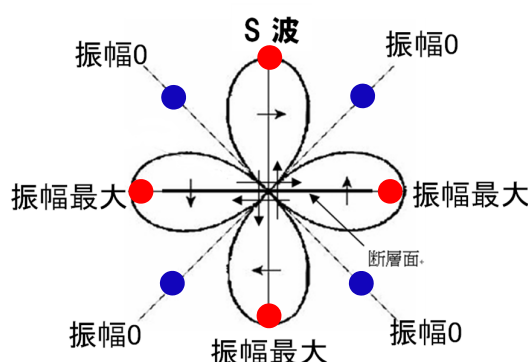
強震動・震度分布が空間的に変動する原因 震源・伝播・サイト特性

サイト特性

- ・ **深い地盤**: エッジ効果、堆積層表面波、
到来方向、卓越周期
- ・ **浅い地盤**: 軟弱地盤、卓越周期、
地形効果・・・

昔の震度分布

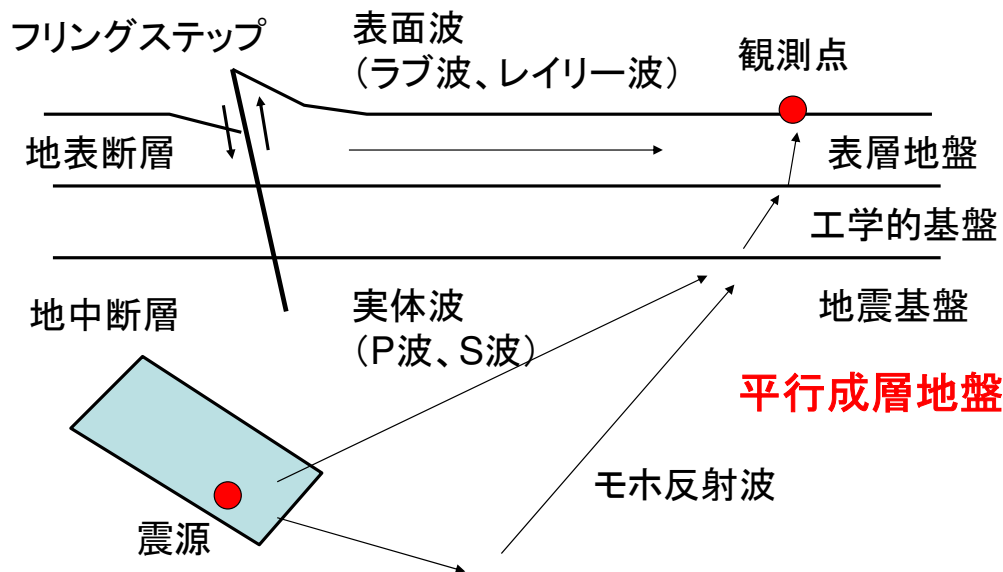
建物特性(構造、年代、地域性・大工・・・)



震源特性(放射特性・指向性効果)

伝播特性(要素地震波の干渉・・・) 6

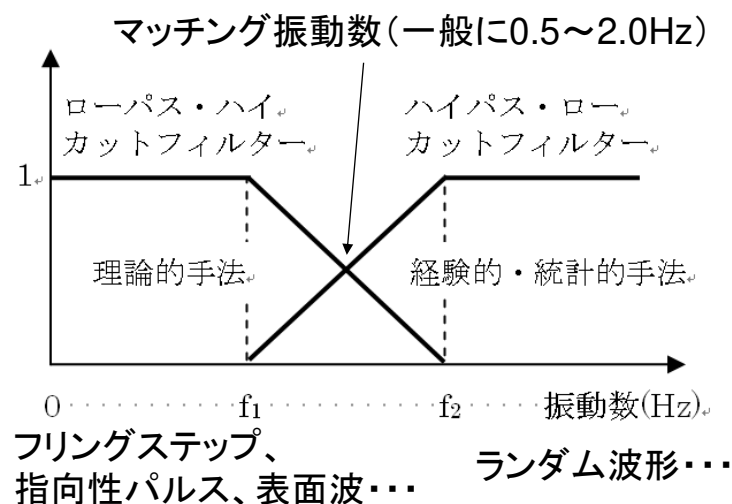
波数積分法で扱う震源・地盤モデル



1次元平行成層地盤の3次元波動場を高振動数まで高速で精度良く計算
 ⇒実体波が卓越する震源近傍の強震動計算に特に有効
 ⇒表面波も扱うが、2・3次元地盤の盆地生成表面波などは再現できない

7

強震動計算 → ハイブリッド手法



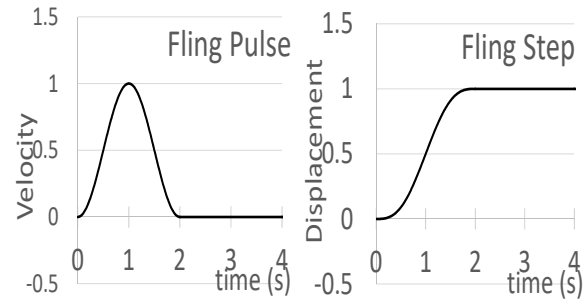
- ・低振動数: 理論的手法→差分法、有限要素法など
 - ・高振動数: 経験的・統計的手法→統計的グリーン関数法など
- ⇒波数積分法は主に低振動数に使用されるが、高振動数も計算可能
 (高振動数の例: 統計的震源モデル法:)

フーリエ変換・逆変換

フーリエ変換 $F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{+i\omega t} dt$

フーリエ逆変換 $f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega)e^{-i\omega t} d\omega$

- ・定式・計算は周波数領域で実施
- ・工学におけるフーリエ変換の定義とは指数部の符号が逆！
- ・波形はフーリエ逆変換で計算
⇒工学分野でのFFTソフト(大崎、1996など)を使用して波形を得る場合、周波数領域の結果の虚数部の符号を逆転させる
- ・出力は速度波形。変位波形は時刻領域で積分(フリングステップなど永久変位を得るため)



速度 変位
フリングパルス/ステップ

9

強震動計算の基礎(表現定理)

- ・表現定理(面震源による強震動の計算式)

$$U_k(Y; \omega) = \int_{\Sigma} T_{ik}(X, Y; \omega) [D_i(X; \omega)] d\Sigma$$

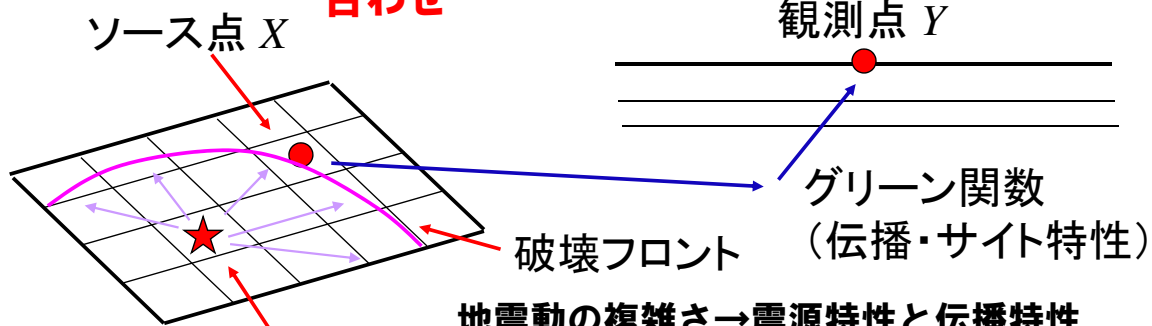
観測点Yの変位解

グリーン関数 (伝播・サイト特性)

すべり関数・破壊伝播 (震源特性)

重ね
合わせ

震源断層近傍で支配的



破壊開始点(震源)

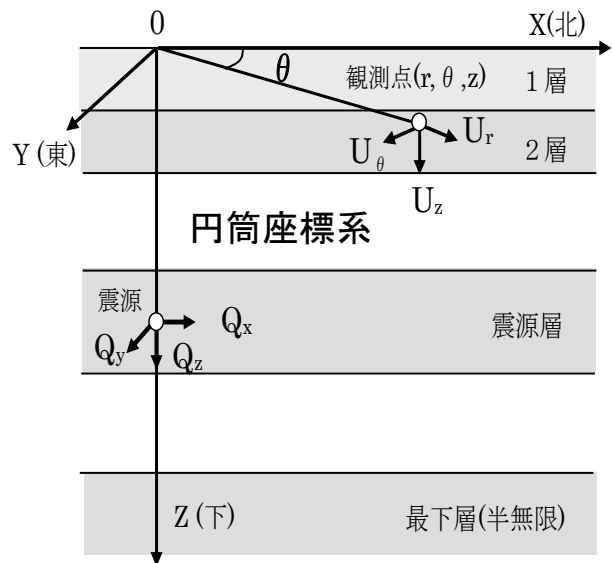
地震動の複雑さ→震源特性と伝播特性
単純な震源特性、遠方場では伝播特性でカバー
震源近傍では、震源特性がそのまま表れる

10

平行成層地盤のグリーン関数 (伝播・サイト特性)

○伝達マトリックス法

- ・古典: Haskellのマトリックス法
→高振動数で発散
- ・本手法: R/Tマトリックス法
→高振動数でも安定
- Hisada (1993): 元の手法
(Luco and Apsel, 1983)
の震源の発散項を改良)
- ・静的解も得られる



・定式は、Hisada, Y.: An efficient method for computing Green's functions for a layered half-space with sources and receivers at close depths, Bull. Seism. Soc. Am., Vol.84, pp.1456 -1472, 1993

・詳細は、久田嘉章: 成層地盤の解析手法、地盤震動 一現象と理論一、日本建築学会、(3.2 波数積分法と表面波の理論)、pp.84-102, Jan., 2005

11

平行成層地盤のグリーン関数 (波数積分法: フーリエ・ベッセル変換より)

$$U_{r(x)}^o(r, \theta, z; h) = \int_0^\infty \left\{ V_{1(x)}^o(z; h) \frac{dJ_1(kr)}{dkr} + H_{1(x)}^o(z; h) \frac{J_1(kr)}{kr} \right\} dk \begin{pmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{pmatrix}$$

$$U_{rz}^o(r, \theta, z; h) = - \int_0^\infty \{ V_{1z}^o(z; h) J_1(kr) \} dk$$

$$U_{\theta(x)}^o(r, \theta, z; h) = \begin{pmatrix} - \\ + \end{pmatrix} \int_0^\infty \left\{ V_{1(x)}^o(z; h) \frac{J_1(kr)}{kr} + H_{1(x)}^o(z; h) \frac{dJ_1(kr)}{dkr} \right\} dk \begin{pmatrix} \sin \theta \\ \cos \theta \end{pmatrix}$$

震源の加振向き (観測点の振動向き) 深さ方向の振幅 (P-SV波) (SH波) 波数 = ω / C ベッセル関数

- ・波数軸上で関数値が発散する極は表面波、分岐点は実体波に対応
- ・極の寄与を留数定理で求めた解析解が正規モード解(表面波)
- ・波数積分は数値積分法で解く。離散化波数法は空間のフーリエ級数

12

地盤モデルの例(赤字部分修正)

layer	density (t/m ³)	Vp (m/sec)	Qp	Vs (m/sec)	Qs	Thickness (m)
1	1.8	1800	60	400	30	100.0
2	1.9	1900	100	800	50	200.0
3	2.0	2300	200	1200	100	900.0
4	2.3	3300	200	1400	100	1300.0
5	2.5	4700	300	2720	150	500.0
6	2.6	5700	400	3330	200	∞

地盤減衰 Q_s 値の与え方(Q_p も同じ)

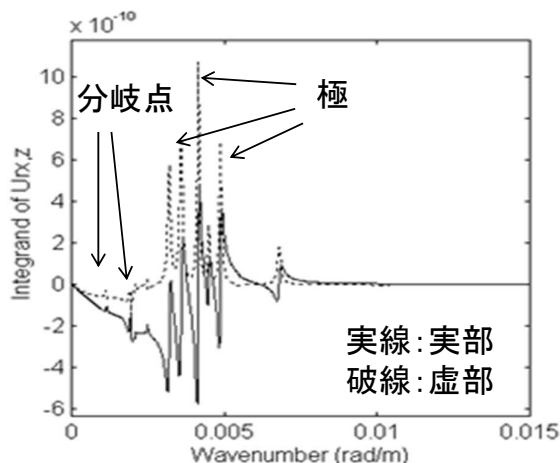
$$Q_s(f) = \begin{cases} V_s \left(1 - \frac{i}{2} Q_{s0} \right) & (f \leq 1\text{Hz}) \text{ (周波数依存なし)} \\ V_s \left(1 - \frac{i}{2} Q_{s0} f^{Q_{SF}} \right) & (f > 1\text{Hz}) \text{ (周波数依存あり)} \end{cases}$$

表の例は Q 値の周波数依存なし ($Q_{SF}, Q=0$)

- ・事例・定式 久田嘉章: 成層地盤の解析手法、地盤震動—現象と理論—、3.2 波数積分法と表面波の理論、日本建築学会、pp.84-102, Jan., 2005

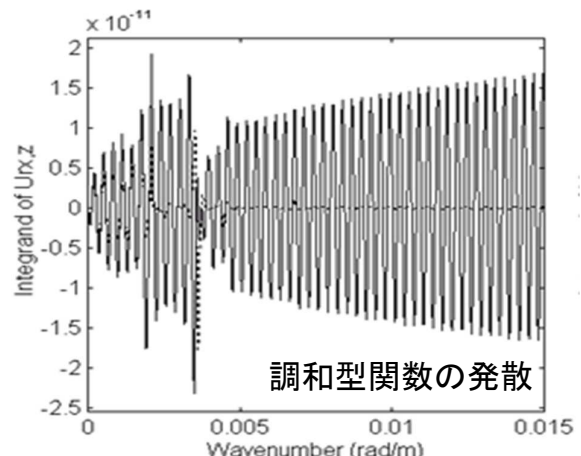
13

被積分関数と数値積分法の課題への対処法



点震源のごく近傍($r=1\text{m}$)

震源深さ>観測点深さ($h=1\text{km}, z=0\text{km}$)



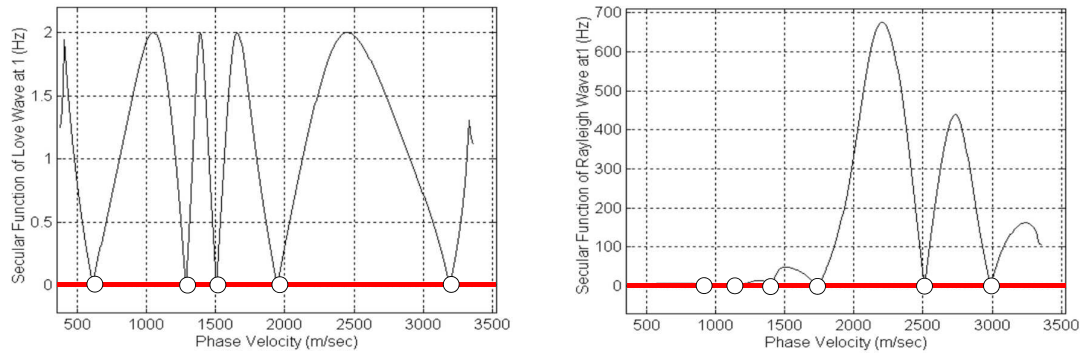
点震源のやや遠方($r=1\text{km}$)

震源深さ≒観測点深さ($h=1\text{km}, z=0.99\text{km}$)

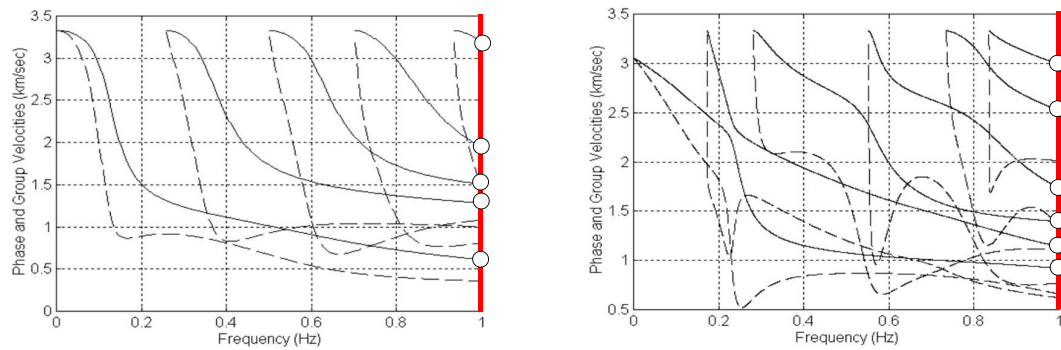
- ・分岐点(V_p, V_s に対応)・極(表面波の位相速度に対応)によるピーク値
⇒ Q 値導入+表面波の位相速度を計算、密な積分点を使用(Simpson積分)
- ・調和関数による振動(大きな r)⇒Filonの積分法(包絡関数+調和関数)
- ・震源と観測点深さが近い場合、波数の増大とともに振幅が発散
⇒漸近解法(Hisada, BSSA, 1995)、積分路変換法(Greenfield, BSSA, 1995)

14

表面波の位相速度(分散曲線)の例



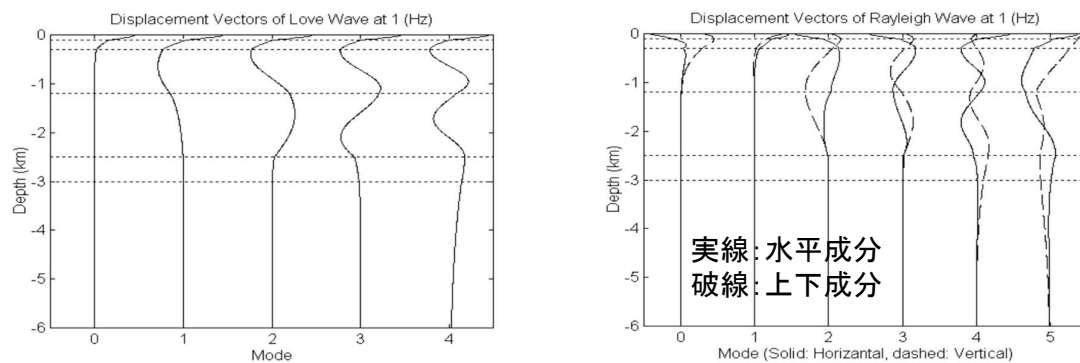
Love波(左)とRayleigh波(右)の特性方程式による位相速度の収束計算(1Hz)



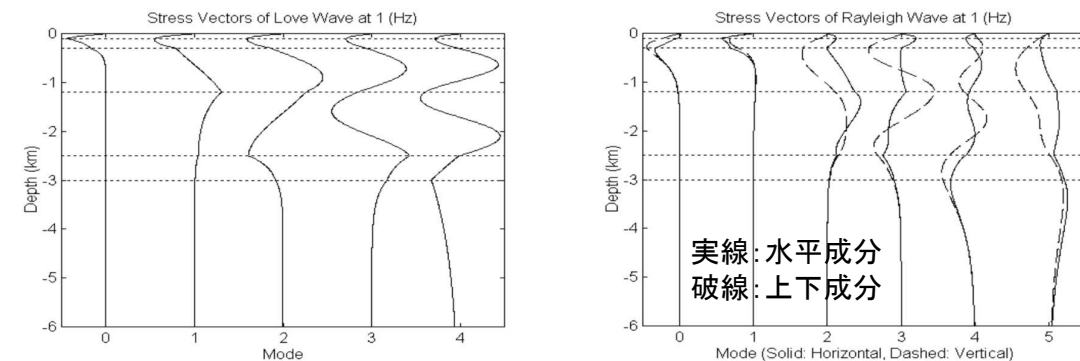
Love波(左)とRayleigh波(右)の分散曲線(実線:位相速度、破線:群速度)

15

表面波の変位・応力ベクトルの例



Love波(左)とRayleigh波(右)の変位ベクトル(1Hz)



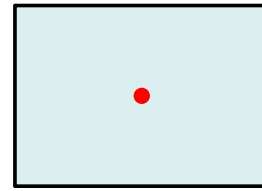
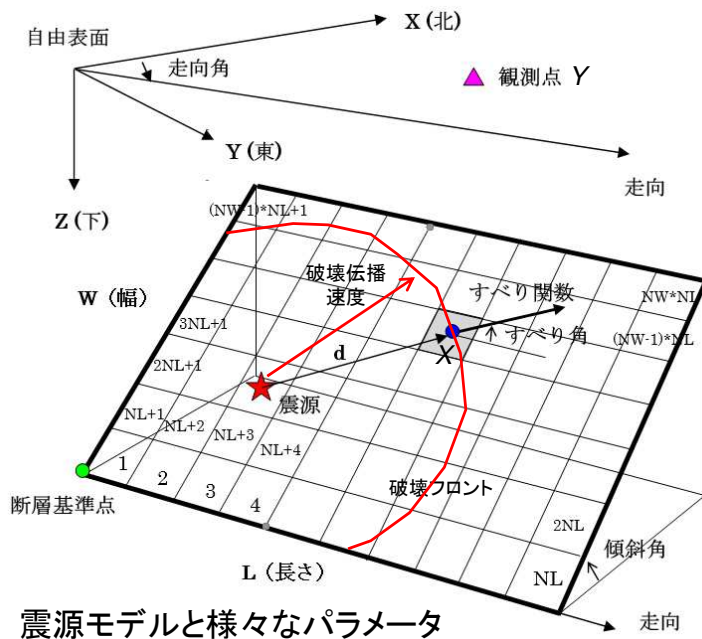
Love波(左)とRayleigh波(右)の応力ベクトル(1Hz)

16

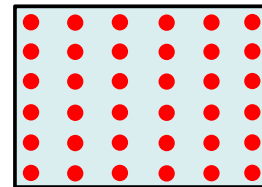
震源モデルと様々なパラメータ

要素断層 グリーン関数 すべり関数

$$U_k(Y; \omega) = \sum_{e=1}^{NW \cdot NL} \int_{\Sigma_e} T_{ik}(X, Y; \omega) [D_i(X; \omega)] d\Sigma$$



要素断層内の積分点(1x1)

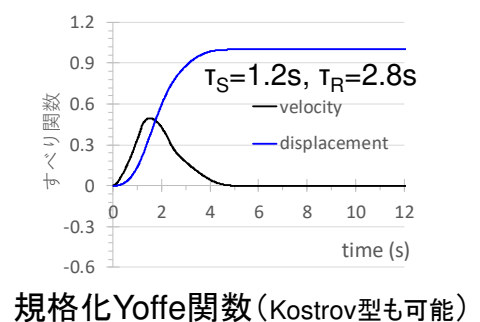
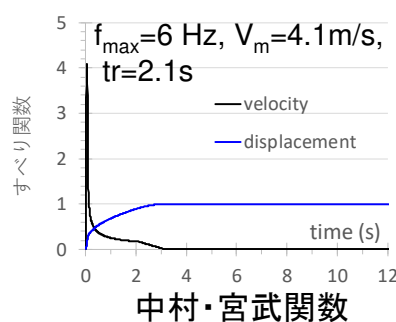
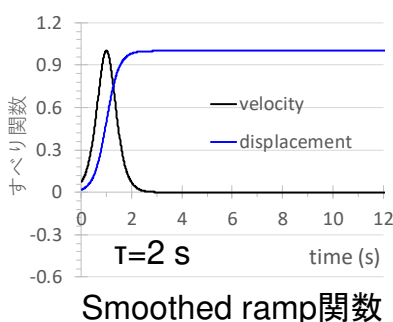
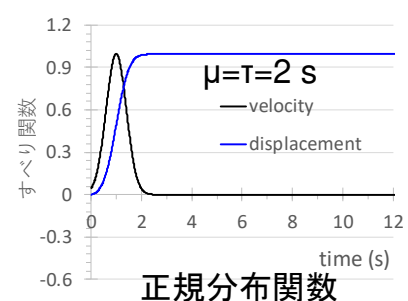
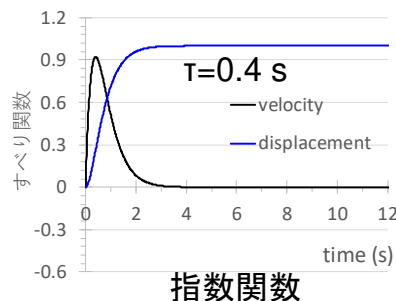
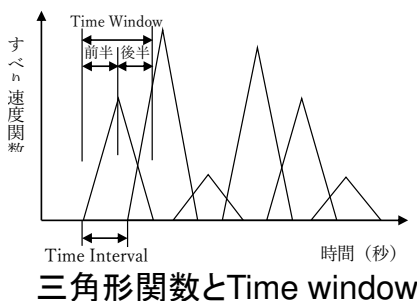


要素断層内の積分点(6x6)

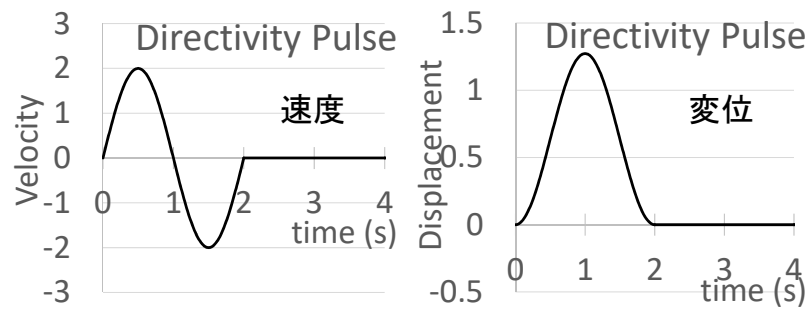
Gauss-Legendre数値積分による
要素断層の面積分(1x1~6x6点)
・積分点が少ないと破壊フロントが
不連続で短周期波を発生、人工的
な卓越周期が現れる場合あり
⇒破壊開始時間にランダム性導入
・積分点が多いと破壊フロントが連
続し、短周期波が発生しにくい 17

様々なすべり関数

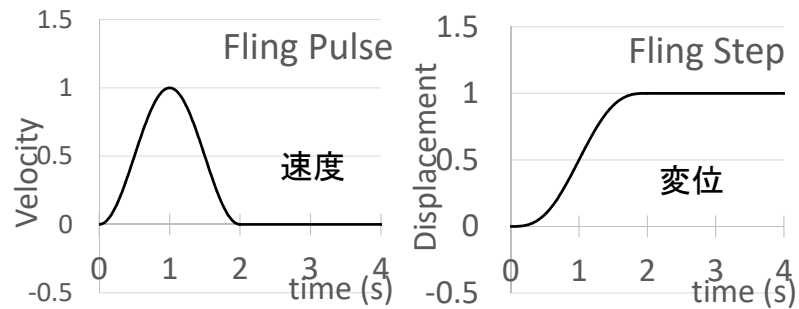
0. 矩形関数、 1. 不等辺三角形: Time windowに対応
 2. 指数関数、 3. 正規分布関数、 4. Smoothed Ramp関数
 5. 中村・宮武関数、 6. 規格化Yoffe関数
- ⇒ 詳細な使用法は「すべり速度関数選択の説明.docx」を参照



震源近傍の強震動:指向性パルスとフリングステップ



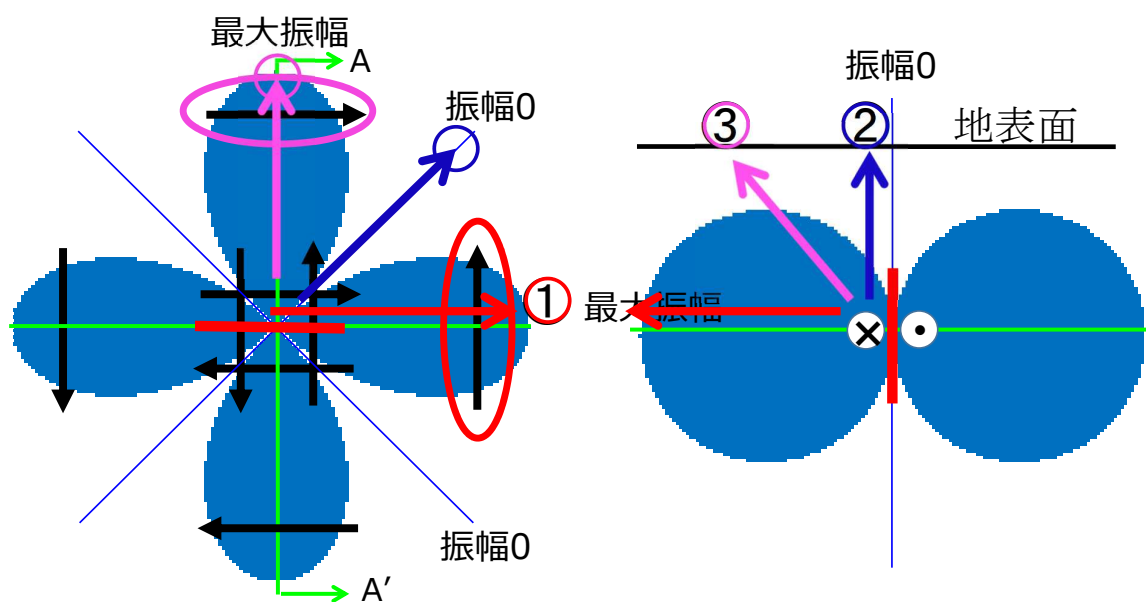
単純化したForward Directivity Pulse(指向性パルス)



単純化したFling Step/Fling Pulse(長周期パルス)

19

点震源によるS波放射特性

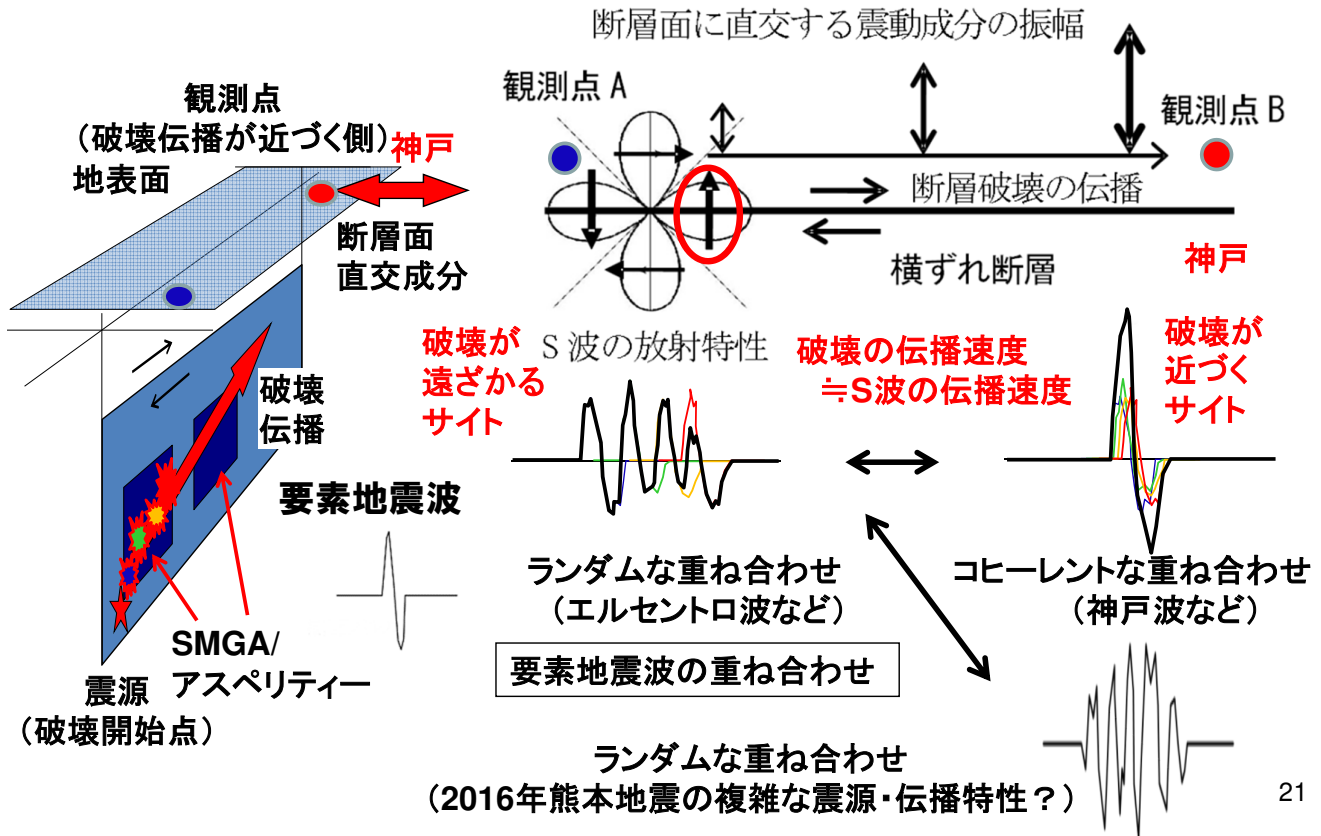


右横ずれ断層を上から見た場合
(ダブルカップル震源の平面図)

右横ずれ断層を横から見た場合
(A-A' 断面図)

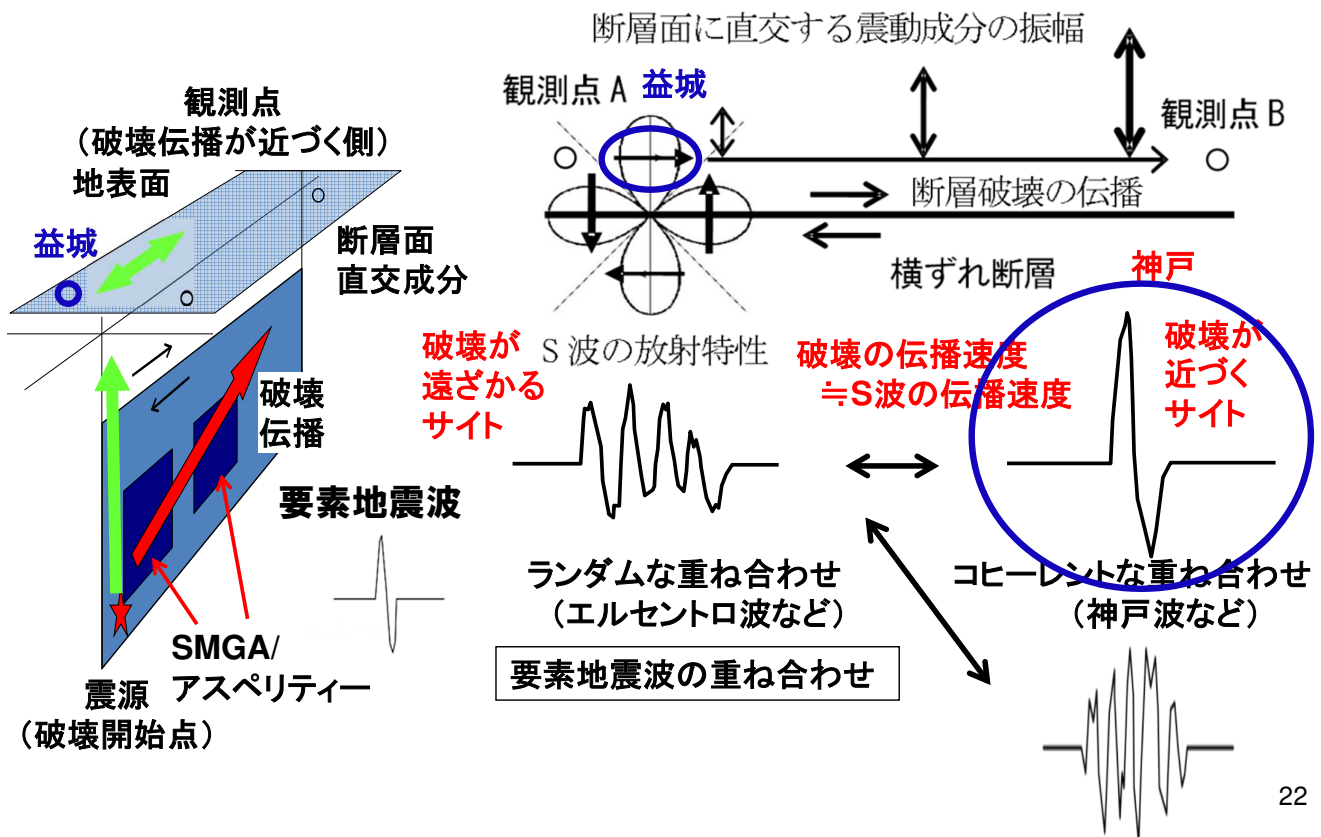
20

震源特性の基礎：破壊伝播効果と指向性 ランダム波と指向性パルスの成因



21

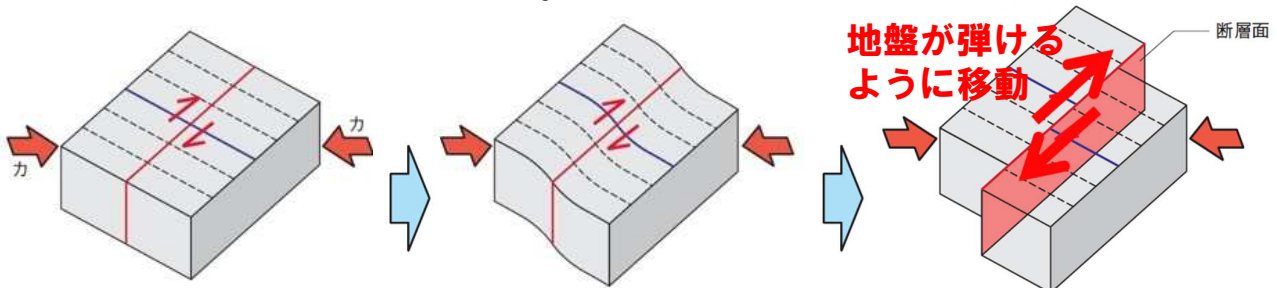
震源特性の基礎：破壊伝播効果と指向性 ランダム波と指向性パルス波の成因



22

フリングパルス/ステップ(長周期パルス)

- **Fling(他動・名詞)**: 投げる、放り出す、急に動かす、勢いよく動かす
- **地震**: 断層面を挟んだ弾性体における急激な応力解放
⇒「Elastic Rebound Theory(弾性反発説)のイメージ」



「地震が分かるQ&A(文部科学省、H20)」

- **Fling Step**: 断層すべりを生じる断層面のごく近傍において、断層すべり量に近い永久変位を伴うステップ関数状の変位波形
- **Fling Pulse**: Fling Stepの速度波形(片振幅の長周期パルス波)
⇒明瞭に観測されるのは地表地震断層のごく近傍であり、断層を横切るライフラインや建物・土木施設に甚大な影響がため、近年、特に工学分野で注目(例えば、Stewart et.al, PEER Report 2001)

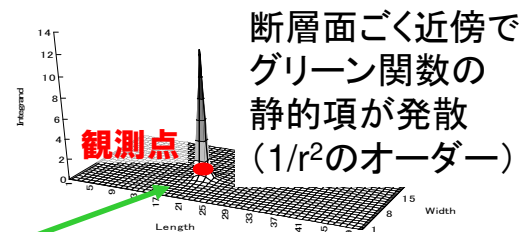
23

フリングパルス/ステップの強震動計算(修正表現定理)

表現定理(オリジナル)

$$U_k(Y; \omega) = \int_{\Sigma} T_{ik}(X, Y; \omega) [D_i(X; \omega)] d\Sigma$$

計算波形 グリーン関数 すべり関数



修正表現定理(Hisada and Bielak, 2003)

動的項

$$U_k(Y; \omega) = \int_{\Sigma} \{T_{ik}(X, Y; \omega) - T_{ik}^S(X, Y)\} [D_i(X; \omega)] d\Sigma$$

計算波形 グリーン関数 静的グリーン関数 すべり関数

静的項

$$+ \int_{\Sigma} T_{ik}^S(X, Y) [D_i(X; \omega)] d\Sigma$$

静的グリーン関数 すべり関数

T_{ik} : 動的グリーン関数 → 幾何減衰: $1/r \sim 1/\sqrt{r}$ → **指向性パルス**

T_{ik}^S : 静的グリーン関数 → 幾何減衰: $1/r^2$ → **フリングパルス/ステップ**

⇒フリングステップは表現定理における静的グリーン関数の寄与

断層ごく近傍にFling Stepを効率的に計算する ための修正表現定理と断層面積分法

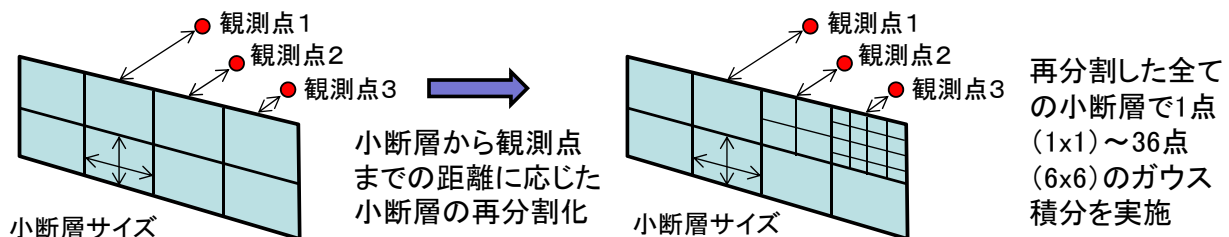
特徴 (平行成層地盤での強震動計算を行うFortan77プログラム)

○遠方から断層ごく近傍まで、低振動数から高振動数まで有効な各手法を導入

○修正表現定理により地表断層近傍のfling stepを高精度・高速に計算

$$U_k(Y; \omega) = \int_{\Sigma} \{T_{ik}(X, Y; \omega) - T_{ik}^S(X, Y)\} [D_i(X; \omega)] d\Sigma + \int_{\Sigma} T_{ik}^S(X, Y) [D_i(X; \omega)] d\Sigma$$

- ・動的グリーン関数項: 通常の断層面積分(各小断層で1x1~6x6のガウス積分)
- ・静的グリーン関数項: 観測点から小断層までの最短距離を求め、最短距離が小断層サイズよりも小さい場合、小断層サイズが最短距離以下になるように再分割。全ての小断層で1x1~6x6のガウス積分を実施。

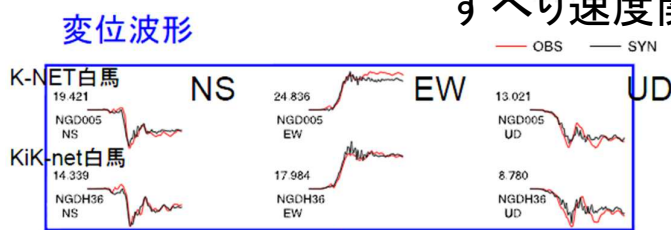
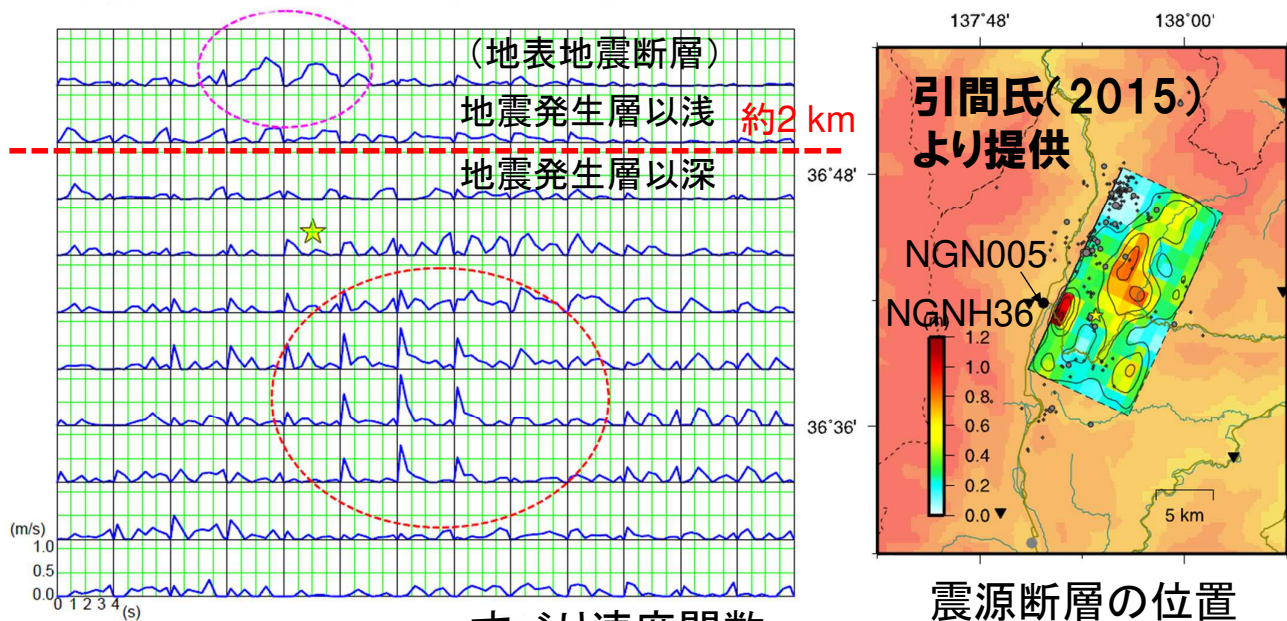


- ・震源深さが観測点深さに近い場合(例: 地表震源など)、動的項の波数積分では非積分関数から静的項を引いて計算を高速化(動的項と静的項の差は、高波数では0に収束)。静的項には積分路変換法による効率的な積分計算。

25

レシピの修正: 2014年長野県北部の地震 (M_j 6.7) のすべり速度関数

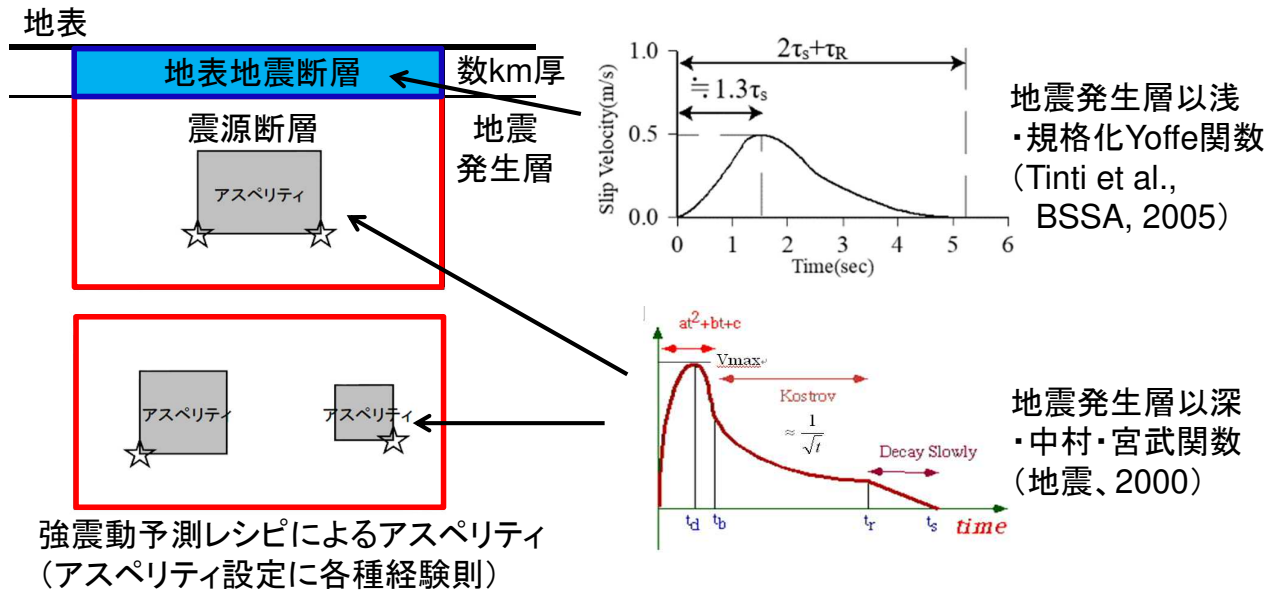
Fault Slip Velocities of the 2014 Northern Nagano Earthquake (引間ほか, SSJ予稿, 2015)



⇒ 引間モデル(グリーン関数を観測点ごとにチューニング)
⇒ 地震発生層と、浅い地表地震断層部とのすべり速度関数の形状は大きく異なる

26

強震動予測レシピ(特性化震源モデル) と深さに依存のすべり速度関数



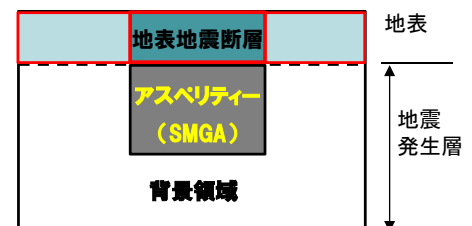
レシピ: 深さ数km以深の震源発生層に単純な震源モデル(Asperity/SMGAと背景領域)と破壊過程を仮定、Kostrov型すべり関数(中村・宮武関数など)
・地表地震断層の近傍では、地震発生層以浅の断層モデルを設定する必要有
⇒すべり部と、一般に滑らかなすべり関数を選択(smoothed ramp関数など)

27

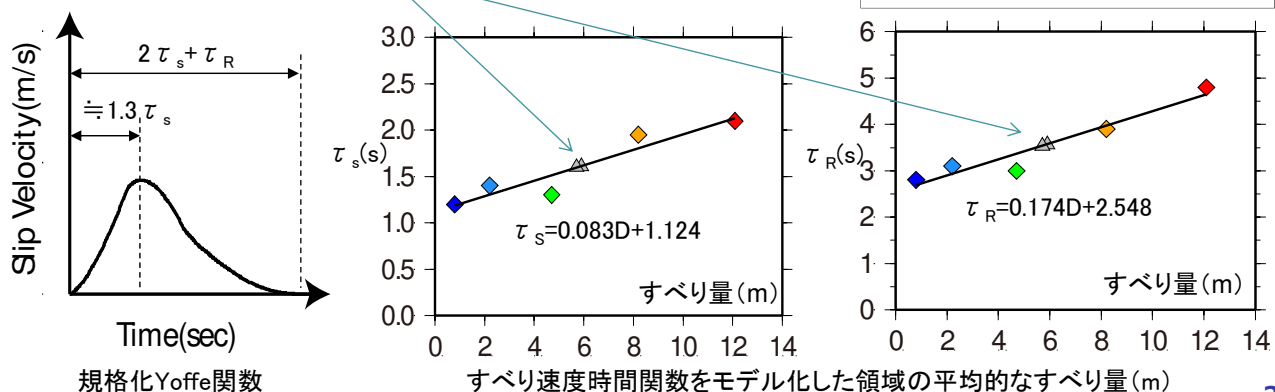
強震動予測レシピの改良: 地震発生層以浅の経験的すべり関数

- 得られた規格化Yoffe関数の τ_s と τ_R の時間と、対象とした地震発生層以浅における観測点近傍の領域のすべり量の関係と比較。
- $\tau_s \cdot \tau_R$ は、すべり量大きいほど長くなる傾向。
(田中・引間・久田、日本地震工学論文集、2017)

集集地震の南部の下盤側の観測点は感度が低いと考え、回帰には含めていない。
→回帰式に基づくすべり速度時間関数でも観測記録を再現できることを確認。

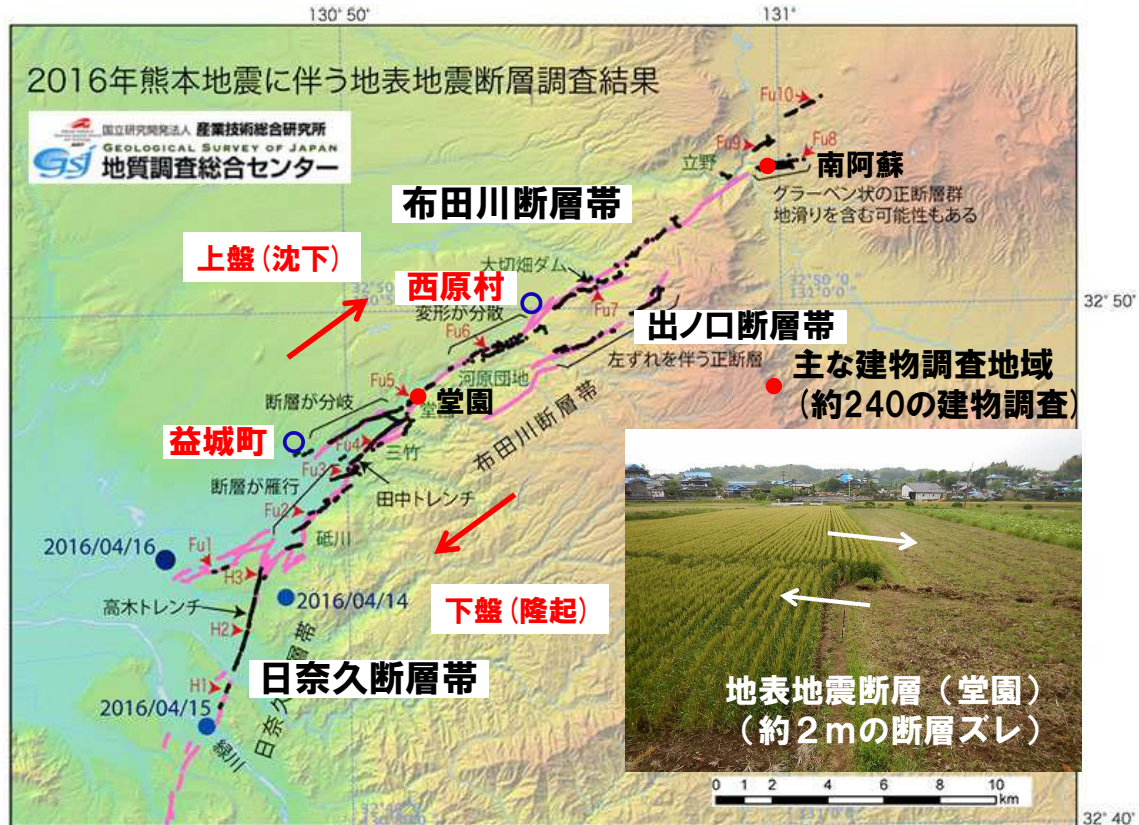


- ◆ TCU052(1999年集集地震)
- ◆ TCU068(1999年集集地震)
- ◆ LUC(1992年ランダース地震)
- ◆ KiK-net益城(2016年熊本地震)
- ◆ K-NET白馬(2014年長野県北部の地震)
- ▲ TCU065/075(1999年集集地震)
- 回帰式



28

2016年熊本地震の地表地震断層近傍の強震観測点

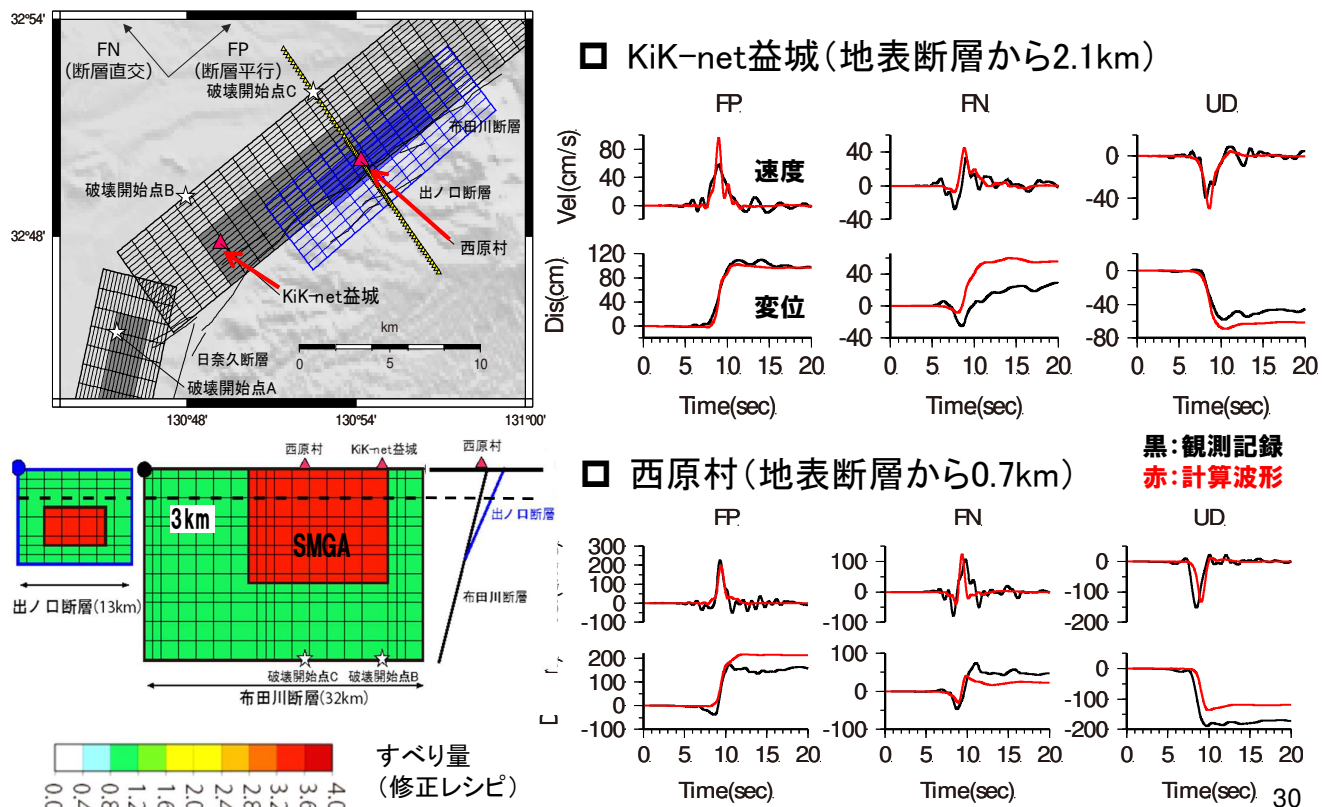


活断層と地表地震断層(地質調査総合センター)

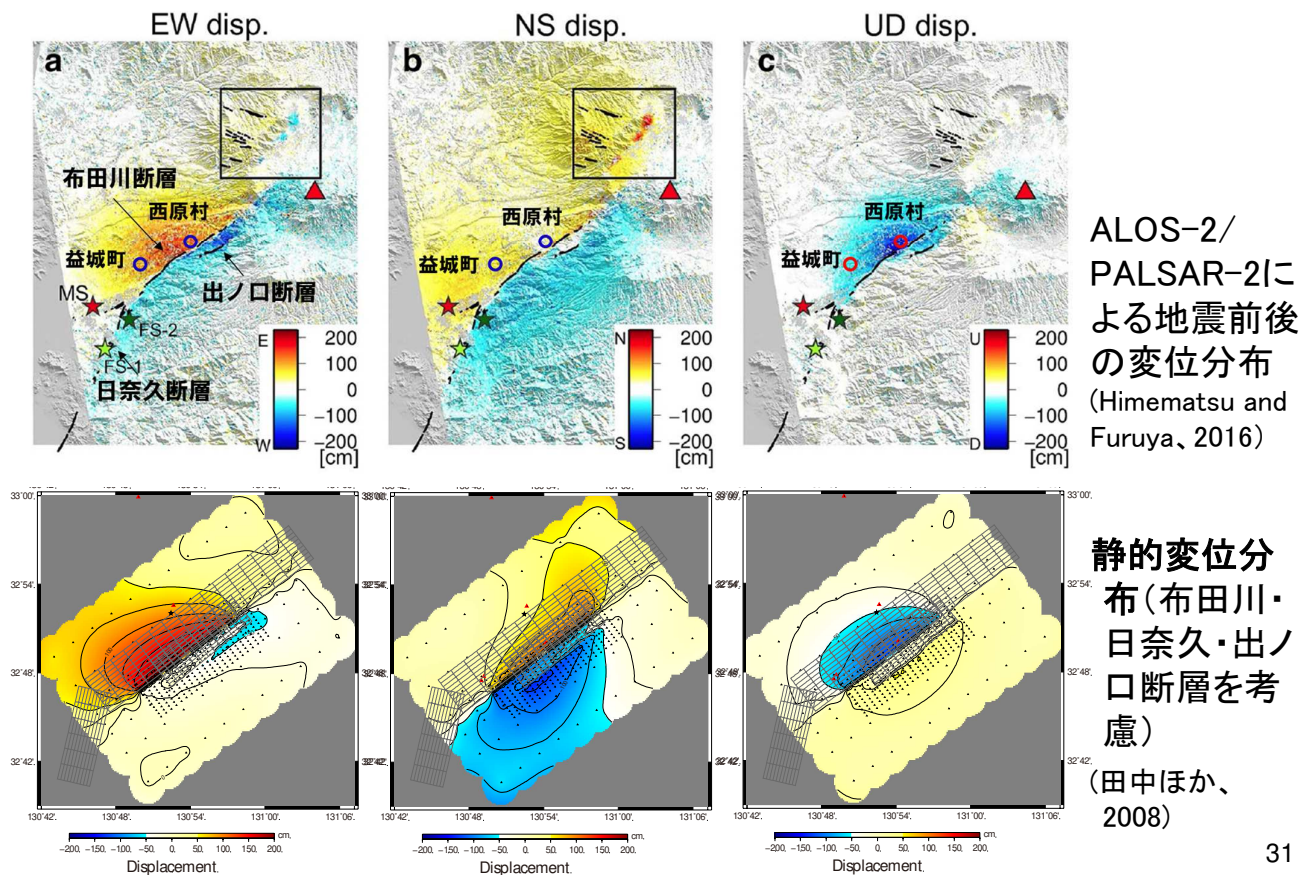
29

2016年熊本地震のKiK-net益城波、西原波の再現

(田中ほか、AIJ構造系論文集、83巻, 第752号, pp. 1525-1535, 2018)



SAR (合成開口レーダー) による地表変動との静的変位分布の比較



31

波数積分法による強震動計算 公開計算コード(Fortran)の主な特徴1

- ・ 平行成層地盤における強震動計算を行うFortran77プログラム (Hisada, BSSA, 1993; 久田、建築論文集1995など)。
- ・ R/T伝達マトリックス法 (Luco & Apsel, BSSA, 1983; Hisada, BSSA, 1993) などにより、高振動数でも安定した解を得る。
- ・ 振動数に虚数を導入し、波数積分を効率化するPhinney法 (JGR, 1965) の導入も可能
- ・ 周波数依存のQ値として、単純な虚数部の導入 (P13参照)、または、因果性を満たす一定Q (Futterman, JGR, 1962) の導入可。
- ・ グリーン関数の動的項と静的項を分離し、断層面積分を厳密に評価することにより、地表断層近傍の永久変位 (fling step) を高精度に評価可能 (Hisada and Bielak, BSSA, 2003)
- ・ 数値積分: 低波数ではSimpson積分、高波数 (振幅が変動する調和関数) ではFilon積分 → 近地・遠地とも高速・高精度
- ・ 表面波の位相速度 (極) を事前に計算 (群速度・分散曲線・変位/応力ベクトル・H/Vスペクトル・Medium Responseも計算...) → 波数積分の数値積分を効率化 (極・分岐点周辺を密)

32

波数積分法による強震動計算 公開計算コード(Fortran)の主な特徴2

- ・ 震源深さが観測点深さに近い場合、動的項の波数積分では非積分関数から静的項を差し引いて効率化(Hisada, 2005)。一方、静的項の計算には積分路変換法(Greenfield, 1995)で高速化
- ・ 断層面積分は小断層ごとにガウス積分を使用($1 \times 1 \sim 6 \times 6$ 点)
- ・ すべり速度関数には、四角形・三角形関数の組み合わせ、指数関数、正規分布関数、Smoothed Ramp関数、中村・宮武関数、規格化Yoffe関数を選択することが可能
- ・ 震源モデルの小断層パラメータに3パターンの入力方法を選択
 - ①小断層ごとに各Time Windowのすべり量とすべり角を入力
 - ②すべり量とすべり角の分布をMatrix形でTime Windowごとに入力
 - ③小断層ごとに地震モーメント(Nm)を入力
- ・ 小断層の破壊開始時間にランダム性を導入可能
- ・ 様々な震源近傍での観測強震動の再現データを順次公開中

<http://kouzou.cc.kogakuin.ac.jp/Open/StrongMotionSimulation/>

参考: Hisada and Tanaka (BSSA, Vol.111, 2021)

33

波数積分法による強震動計算の流れ

○計算手順

⇒補足資料「**震源断層モデルの補足説明.doc**」も参照

①表面波の位相速度(分散曲線)を計算:

phase-v3.f(実行ファイル: phase-v3.exe)

⇒位相速度データを出力(同じ地盤では1度のみ)

②波数積分法による強震動計算:

grflt-v22.f(実行ファイル: grflt-v22.exe)

⇒速度波形を出力(振動数領域)

③フーリエ逆変換:

grfftsx-v2.f(実行ファイル: grfftsx-v2.exe)

⇒時刻歴速度波形、フーリエ振幅スペクトルを出力

34

演習例題1：単純な震源・地盤モデルによる 震源近傍強震動の計算(入力データ・地盤モデル)

・入力データ

Fault-B-in.csv: 地中断層モデル

Fault-S-in.csv: 地表断層モデル

地盤モデル(共通): 2層地盤モデル

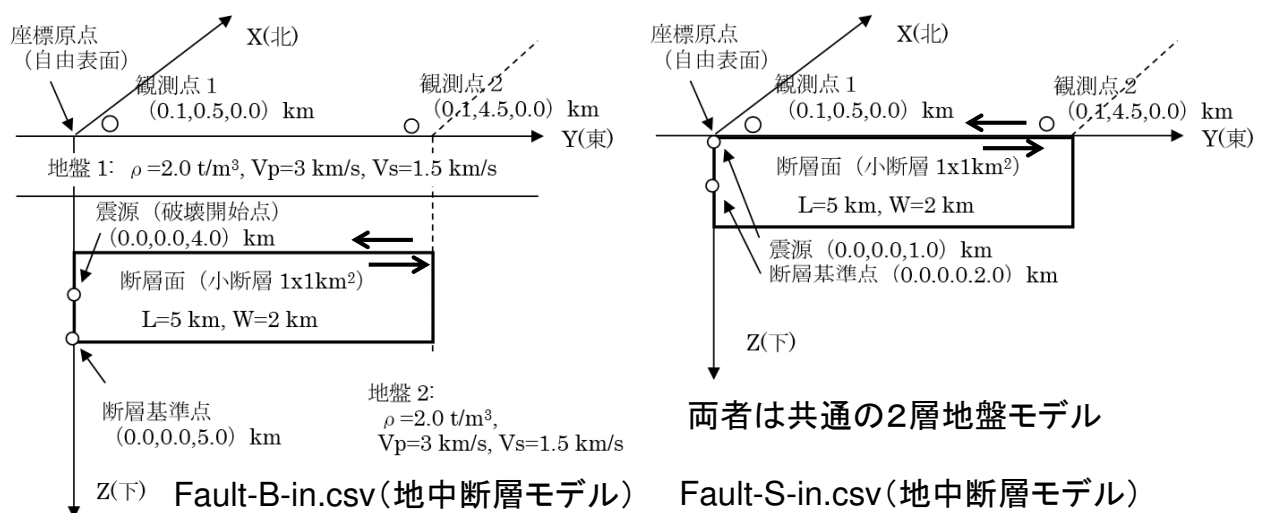
観測点(共通): 観測点1 (Backward Directivity側)、
観測点2 (Forward Directivity側)

・2層地盤モデル

NL (Number of Layers)	(Note: Frequency-Dependent Q; $Q_p(f) = Q_{p0} \times f^{**} Q_{pf}$ & $Q_s(f) = Q_{s0} \times f^{**} Q_{sf}$)							
2								
Layer Number	density(t/m3)	Vp(m/s)	Qp0	Qpf	Vs(m/s)	Qs0	Qsf	Thickness(m)
1	2	3000	200	0	1500	100	0	1500
2	2.5	5000	400	0	3000	200	0	0

35

演習例題1：単純な震源・地盤モデルによる 震源近傍強震動の計算(震源断層モデル)



震源パラメータ: $L=5000 \text{ m}$, $W=2000 \text{ m}$, 断層分割数 ($NL=5$, $NW=2$)、

小断層のガウス積分点3 (計 $3 \times 3=9$ 点)、破壊開始時間 0 s 、走向角 90 度、傾斜角 90 度、

破壊伝播速度 2500 m/s 、不規則破壊なし ($dtr=0 \text{ s}$)、地中断層: 震源位置 $(0,0,4000) \text{ m}$ 、

基準点 $(0,0,5000) \text{ m}$ 、地表断層: 震源位置 $(0,0,1000) \text{ m}$ 、基準点 $(0,0,2000) \text{ m}$ 、Time Windows 1 個

すべり速度関数: 継続時間 0.6 s の 2 等辺三角形、すべり量 1 m 、すべり角 0 度 (左横ずれ断層)

観測点1 (backward) の位置 $(100,500,0) \text{ m}$ 、観測点1 (forward) の位置 $(100,4500,0) \text{ m}$

36

表面波の位相速度の計算

○phase-v3.exeを起動し、表面波の分散曲線を計算

- ・入力データ: Fault-B-in.csv
(Fault-S-in.csvと共通なので1度のみ実施)
- ・出力データ: check-phase.csv(チェック用データ)
HoverV-Spectra.csv(H/Vスペクトル)
- ・Love波: Love-Dispersion.csv(分散曲線)、
Love-Medium-Resp.csv(Medium Response)
- ・Rayleigh波: Rayl-Dispersion.csv(分散曲線)、
Rayl-Medium-Resp.csv(Medium Response)
- ・その他: om_dat, mdl_dat, mdr_dat, phsl1_dat, phsr1_dat
(波数積分計算に受け渡す位相速度データ)

37

分散曲線計算:入力データ(Fault-B-in.csv)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I							
1	*** Data for Delta Time, Duration, and Minimum Period ***															
2	Delta Time (sec) Number of Time (must be Power of 2)															
3	0.16	256	← 時間刻み(dt:s)、個数(2の累乗個:nt)													
4	Minimum Period Imaginary Omega for Phinney's method															
5	0.32	0	← 最小周期(s: 通常はdtの倍)、 Phinney法の ω 虚数値													
6	*** MEDIUM DATA ***															
7	(Number of Layer) Use of Const. Q Reference Frequency (Hz)															
8	2	0	0.16													
9	Layer Number	density(g/cm3)	Vp(m/s)	Qp0	Qpf	Vs(m/s)	Qs0	Qsf	Thichness(m)							
10	1	2	3000	200	0	1500	100	0	1500							
11	2	2.5	5000	400	0	3000	200	0	∞							

地盤データ

(QpfとQsf:一定Q値は0、
振動数依存Q値は該当値)

$$V_s \left(1 - \frac{i}{2} Q_{s0} f^{Q_{sf}} \right)$$

- ・地盤総数(NL)、
- ・Q値の選択(FuttermanQ値を用いるときは1、
用いないときは0⇒通常は0を選択)
- ・FuttermanのQ値を用いる場合の参照振動数

38

表面波の位相速度(極)の計算: phase-v3.exe

```

For trouble, please check "check-phase.csv"
This code is open for the academic use.
For questions, e-mail to "hisada@cc.kogakuin"
(Originally made in 1992, and modified in 2010)

Enter Input File Name for "Grflt-v***.csv"
Fault-B-in.csv

Delta Time (s) = 0.16, Number of Time = 256

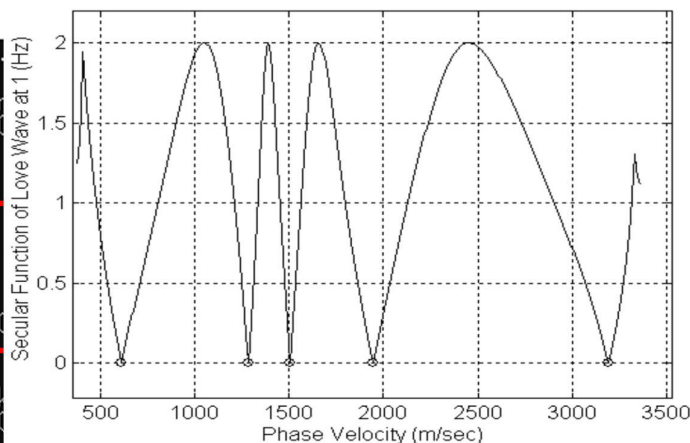
Maximum frequency (Hz) = 3.125
Check Secular Functions & Eigen Vectors? (N=0)
Number of Layers= 2
Layer, Density, Vp, Qp, Fp, Vs, Qs, Fs, Thickness
1 2. 3000. 200. 0. 1500. 100. 0. 1500
2 2.5 5000. 400. 0. 3000. 200. 0. 0.

Enter Tolerance for Secular Function (ex., 0.01):
0.01

Enter Max Number of Iterations (ex., 200):
200

VSMAX, VPMAX = 3000.000 5000.000
CCMIN, CCMAX = 1398.789 2742.579

Min and Max Velocities (Cmin and Cmax: m/s) = 1370.813 3030.000
Enter Number of Partitions from Cmin to Cmax (ex., 1000):
1000
    
```



通常は0.01 (特性方程式の振幅の収束判定値)

通常は200 (位相速度を検索する収束計算の回数)

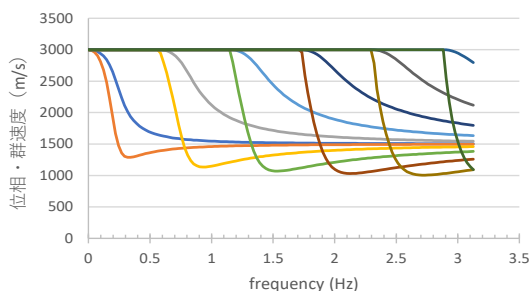
(P15参照)

通常は1000 (位相速度検索のための最小～最大位相速度の分割数)

39

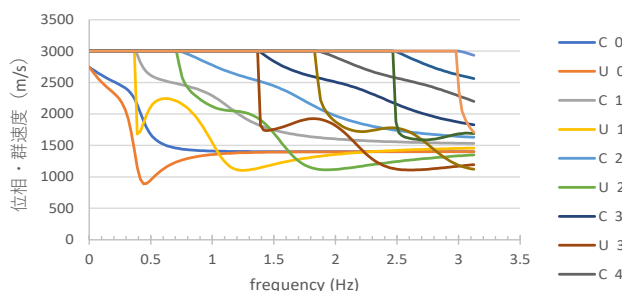
Love波・Rayleigh波の分散曲線・Medium Response

Love波の分散曲線



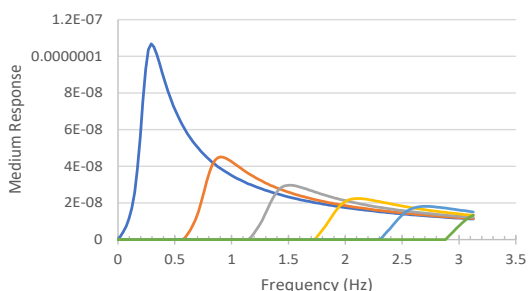
Love-Dispersion.csv

Rayleigh波の分散曲線



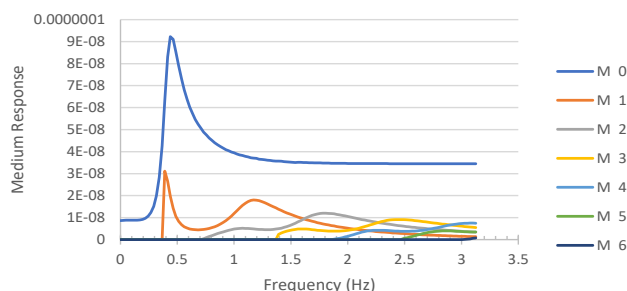
Rayl-Dispersion.csv

Love波のMedium Response



Love-Medium-Resp.csv

Rayleigh波のMedium Response



Rayl-Medium-Resp.csv

⇒ その他、H/Vスペクトルも出力 (HoverV-Spectra.csv)

強震動計算用の入力データ:Fault-B-in.csv

断層震源パラメータ

12	*** Seismic Fault Parameters ***									
13	Length (m)	Width (m)	Num. of S	Num. of	Number of Gaussian Points per Sub-Fault (from 1=1x1 up to =6->6x6)					
14	①	5000	2000	5	2	3				
15	Start Time of Ru Strike (deg)		Dip (deg)	Vr (m/s)	dtr (s; random number for dtr (integer)					
16	②	0	90	90	2500	0	1			
17	Location of Hyp Y(m)		Z(m)	(Note: X->North, Y->East, Z->Down)						
18	③	0	0	4000						
19	Location of Fau Y(m)		Z(m)	(Note: X->North, Y->East, Z->Down)						
20	④	0	0	5000						
21	Number of Time Interval Time (s)		Slip Veloc	dtN (seifmax (H Vm(1/s; N tr(s; only f TauS(s TauR(s; only for Yoffe)						
22	⑤	1	0	1	0.01	6	2.28	1.84	0.02	3.1

- ① 断層長さ(L: m)・幅(W: m)、LとW方向の断層分割数
LとW方向のガウス積分点数(1~6点まで)
- ② 破壊開始時間(s)、走向角(°)、傾斜角(°)、破壊伝播速度(m/s)
各小断層の破壊開始時間に乱数を発生させる場合のばらつき時間(dtime: s)、
乱数発生のための任意の整数値、使用の場合は±dtimeで乱数時間が発生
- ③ 震源(破壊開始点)の座標(x,y,z: m)、④ 断層基準点の座標(x,y,z: m)
- ⑤ すべり関数に用いるtime windows数、time windowsの時間間隔(s)、
すべり関数タイプ(1は三角関数)⇒詳細は「[すべり速度関数選択の説明.docx](#)」

41

強震動計算用の入力データ:Fault-B-in.csv

断層震源パラメータ

23	Time Win 1st Half R 2nd Half Rise Time (s)									
24	⑥	1	0.3	0.3						
25	Slip and Rake Data Pattern (=1: Original, =2: Time Window Matrix, =3: Multiple Seismic Moments)									
26	⑦	2								
27	1st Time Window (0.0 - 0.6 sec)									
28	Slip (m)	Strike 1	Strike 2	Strike 3	Strike 4	Strike 5				
29	⑧	1	1	1	1	1				
30		2	1	1	1	1				
31	Rake (deg)	Strike 1	Strike 2	Strike 3	Strike 4	Strike 5				
32	⑨	1	0	0	0	0				
33		2	0	0	0	0				

- ⑥ time windowsの時間(三角関数の場合は頂点までの前半・後半の時間幅:s)
- ⑦ すべり量とすべり角の与え方タイプ(2の場合は、time window matrixで与える)
⇒詳細は「[断層モデルのすべり・すべり角分布の与え方.docx](#)」
- ⑧ time window 1のすべり量マトリックス(m): L方向は列、W方向は行に与える
- ⑨ time window 1のすべり角マトリックス(°): L方向は列、W方向は行に与える

42

強震動計算用の入力データ: Fault-B-in.csv

波数積分、フーリエ逆変換、観測点のデータ

34	*** Data for Static Wavenumber Integration using Greenfield's Quadrature ***				静的グリーン関数用
35	The first Initial Number of Integration Points for Adaptive Newton-Cotes Quadrature				
36	2	16			このまま使用する(積分路基準点と積分点の初期値)
37	The second Initial Number of Integration Points for Adaptive Newton-Cotes Quadrature				
38	10	32			
39	*** Data for Dynamic Wavenumber Integration using Simpson's and Filon's quadratures ***				動的グリーン関数用
40	Number of Integration Points from 0 to ω_m /Ryleigh(min)				
41	200				このまま使用する(減衰が極端に小さい場合などでは、50を大きくする場合有り)
42	Number of Integration Points from ω_m /Ryl(min) to ω_m /c(final)				
43	50				
44	Factor for c(final): c(final)=Ryl(min)/Factor (Ex., 10)				
45	10				
46	*** CHANGE OF SIGNS OF IMAGINARY PARTS OF FINAL RESULTS (FOR FFT) ***				フーリエ逆変換用
47	Change sign (=1), or do not change sign (=0)				
48	1				通常は1(計算波形の複素数の虚数部の符号変換)
49	*** OBSERVATION POINT ***				
50	NUMBER OF Observation Points				
51	2				2点の観測点
52	Observation Location: Y (m) Z (m)				
53	1	100	500	0	破壊伝播のbackward側観測点座標(x,y,z: m)
54	2	100	4500	0	破壊伝播のforward側観測点座標(x,y,z: m)

43

43

強震動の計算: grflt-v22.exe

```

Data Input from INDAT
(For Detail for Cheking, Please see check-Grflt.csv)

Enter Input-Data File for "***-in.csv"
Fault-B-in.csv

```

入力データ(Fault-B-in.csv)

```

Num. of Time, Delta Time and Min. Period (s)= 256 0.1600 0.3200
Num. of Omega, dOM, and Imag OM (rad/sec) = 128 0.1533981 0.0000000

Total Number of Layers = 2
Use of Const. Q of Futterman (1962)= 0
Reference Frequency (Hz) = 0.000
Layer, Density, Vp(m/s), Qp, Fp, Vs(m/s), Qs, Fs, Thick(m)
1 2.00 3000.0 200.0 0.0 1500.0 100.0 0.0 1500.0

```

静的グリーン関数項の計算

```

Skip computation of static terms?
Enter 0 for NO (Exact, but slow. Use for surface fault)
Enter 1 for YES (Fast, but approximate. Effective for buried fault)
0

```

0を入力(静的項を計算しない場合は1)

```

From HKQVWs:
Output Static Integrands?
Enter 0 for No (Regular)
Enter 1 for YES (Checking Purpose Only)
0

```

0を入力(被積分関数を出力する場合は1)

```

Select Extended Source or Point Sources?
Enter 0 for Extended Source (Subdividing Sub-Fault)
Enter 1 for Point Sources (Not Subdividing Sub-Fault)
0

```

0を入力(小断層の再分化を行わない場合は1)

```

Select Type of Gauss Integration Points for the extended Source
Enter 0 for Variable Number of Points
Enter 1 for Fixed Number of Points (ngauss)
0

```

0を入力(ガウス積分点を固定する場合は1)

44

強震動の計算:grflt-v22.exe

動的グリーン関数項の計算

```
Skip computation of dynamic terms?
Enter 0 for NO (Use for normal condition)
Enter 1 for YES (Use, when output static terms only)
0
From HKQVWd:
Please choose the following combinations of integrands
0: Regular (= Dynamic Integrand - Static Integrand)
1: Dynamic (= Dynamic Integrand)
2: Static (= Static Integrand, checking purpose only)
(Enter 1, if the fault is deep. It is faster.)
0
Output Dynamic Integrands?
Enter 0 for No (Regular)
Enter 1 for YES (Checking Purpose Only)
0
Use Dynamic Distribution of Gaussian Points on Fault?
Enter 0 for No (Regular. Num. of Points are fixed)
Enter 1 for YES (Faster, but may lose accuracy)
0
static, dynamic & total (io,iob) 1 1
GGX (0.00774666182,-2.35752283E-005)
static, dynamic & total (io,iob) 1 2
GGX (-0.00774666182,2.35752283E-005)
Omega, Num. of Wave-number integ. points = 0.1534 0.0000 577
Omega, Num. of Wave-number integ. points = 0.3068 0.0000 579
```

0を入力(動的項を計算しない場合は1)

0を入力(1は深部震源など動的項のみ使用する場合、2は静的項のみ使用)

0を入力(動的被積分関数を出力する場合は1)

0を入力(波長でガウス積分点数を変える場合は1)

計算終了で、周波数領域の速度波形が出力(grfault.dxyz)

45

時刻歴波形の計算:grfftsx-v2.exe

時刻歴波形の計算

```
"grfft" - To obtain seismograms for grflt3.f and grpoint.f
at a single observation point.
Choose the input datafile for FFT (Enter Number 1 to 6):
1) grfault.dxyz (x,y,z-comp. of disp. from seismic sources)
2) grfault.dqvw (u,v,w-comp. of disp. from seismic sources)
3) grpoint.dxyz (x,y,z-comp. of disp. from point sources)
4) grpoint.sxyz (x,y,z-comp. of stress from point sources)
5) grpoint.dqvw (u,v,w-comp. of disp. from point sources)
6) grpoint.sqvw (u,v,w-comp. of stress from point sources)
1
DOM,IOM,nom,omi = 0.153398 1 128 0.
New NDATA including OM=0 = 129
Total number of receivers = 2
Enter the receiver number to output :
1
XR,XI,YR,YI,ZR,ZI=
0.77467E-02 0.23575E-04-0.16606E-02 0.61940E-06-0.14376E-02 0.21513E-05
0.81975E-02-0.21758E-02-0.16607E-02 0.39358E-03-0.14065E-02 0.31637E-03
0.86776E-02-0.59076E-02-0.16461E-02 0.86455E-03-0.13308E-02 0.62566E-03
-0.13203E-03 0.98347E-03 0.21571E-04-0.31483E-04 0.10044E-04 0.14319E-04
0.37676E-03 0.71187E-03 0.92643E-05-0.31152E-04 0.14669E-04 0.47373E-05
Change signs of amplitudes? (Yes=1 or No=0) :
1
Change signs of X? (Yes=1 or No=0) :
0
Change signs of Y? (Yes=1 or No=0) :
0
Change signs of Z? (Yes=1 or No=0) :
1
```

1を入力(grfault.dxyzを選択)

2つの観測点のどちらかを選択
(はじめに1、次に2を選択)

波形振幅の符号を変える場合は1を選択

X(北向き),Y(東向き)成分の符号は変えず、
Z(下向き)の符号を変える場合は、0, 0, 1を
入力

46

時刻歴波形の計算: grfftsx-v2.exe

時刻歴波形の計算(「大崎:新・地震動のスペクトル解析入門、1994」のcode参照)

```

You can transfer the velocities to the accelerations;
Do not transfer (Output Velocities) (Enter 0):
Transfer from velocities to accelerations (Enter 1):
0
Band Pass Filter? (Yes=1 or No=0) :
1
Data for TRAPEZOIDAL BAND PASS FILTER:
INITIAL AND FINAL Frequencies = 0. 3.12499839
Enter fL1,fL2,fH1 and fH2 (fL1<fL2<fH1<fH2: Hz):
0
0
0
0
3
The Fourier Spectrum data are stored in "amp.csv"
N, J of N=2**J and dt(s) = 128 7 0.160
Increase NT for smoother seismograms? (Yes=1 or No=0)
1
N, J of N=2**J and dt(s) = 250 8 0.080
Increase NT for smoother seismograms? (Yes=1 or No=0)
1
N, J of N=2**J and dt(s) = 512 9 0.040
Increase NT for smoother seismograms? (Yes=1 or No=0)
1
N, J of N=2**J and dt(s) = 1024 10 0.020
Increase NT for smoother seismograms? (Yes=1 or No=0)
0
Change from (m) to (cm)? (yes=1) :
1
    
```

速度波形を出力する場合は0、加速
度波形を出力する場合は1を入力

バンドパスフィルターを用いる場合
は1、用いない場合は0を入力

台形型のバンドパスフィルターを用いる場
合、4つのコーナー振動数を入力(Hz)。こ
の場合は、高振動数で2-3Hzで振幅0とす
るハイカットフィルター

時間刻みを初期値から2等分する場合、1
を入力し続ける(この場合は、初期値の
0.32sから0.02sまで時間刻みを細分化)

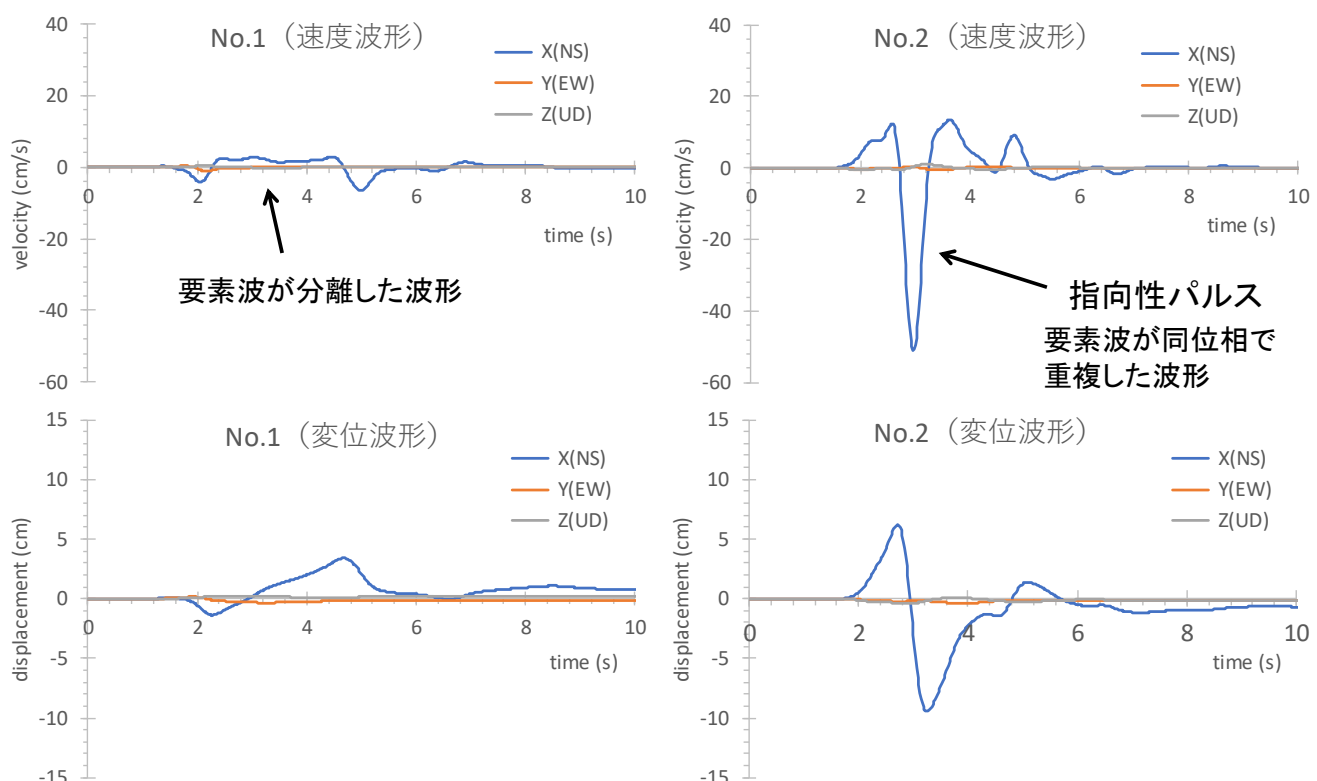
振幅をmからcmにする場合は1を選択

計算終了で、振幅スペクトル(amp.csv)と時刻歴波形(wave.csv)が出力

注: 次の計算前(観測点2やFault-S-in.csvでの計算など)にfile名を変更すること

47

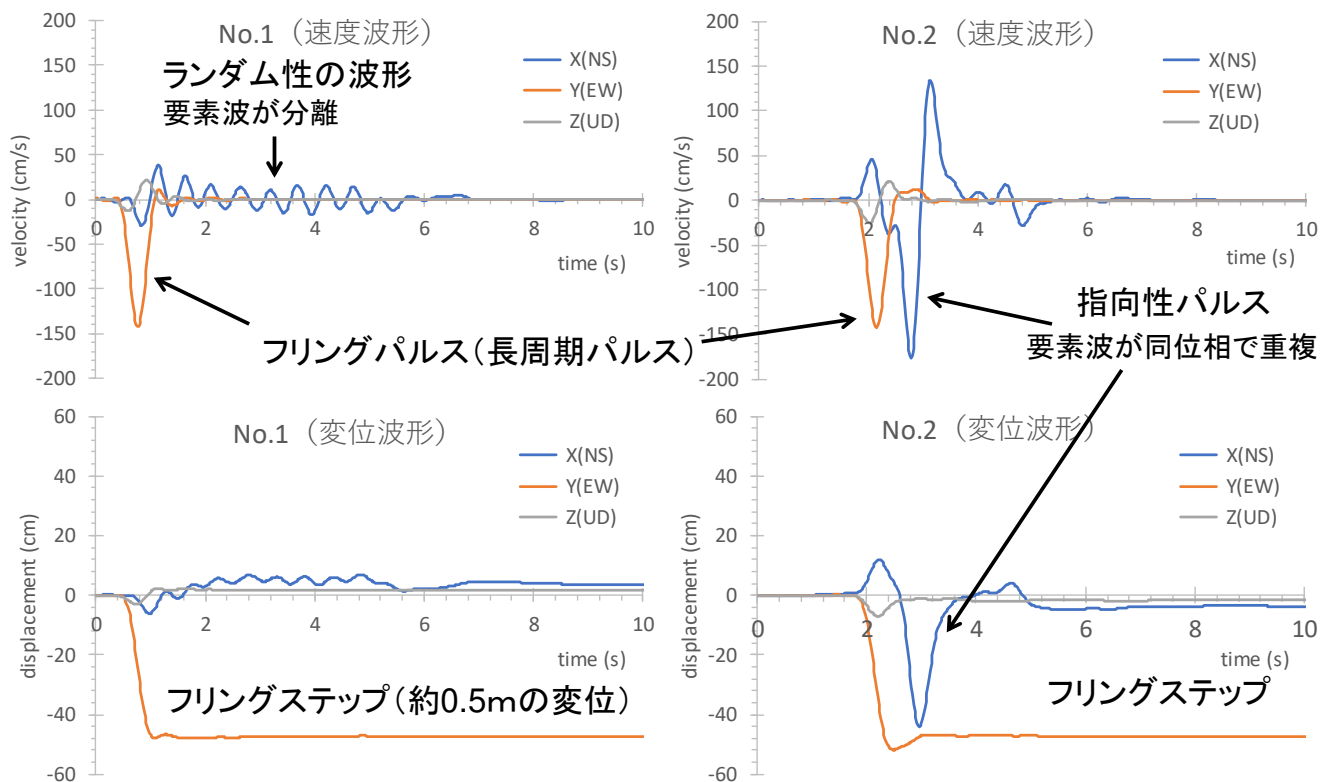
地中断層モデル (Fault-B-in.csv) による速度・変位波形



観測点1 (backward側) の速度(上)・変位(下) 観測点2 (forward側) の速度(上)・変位(下)
⇒ 断層面直行(NS)成分のforward側に指向性パルス、backward側は要素波が分離した波形

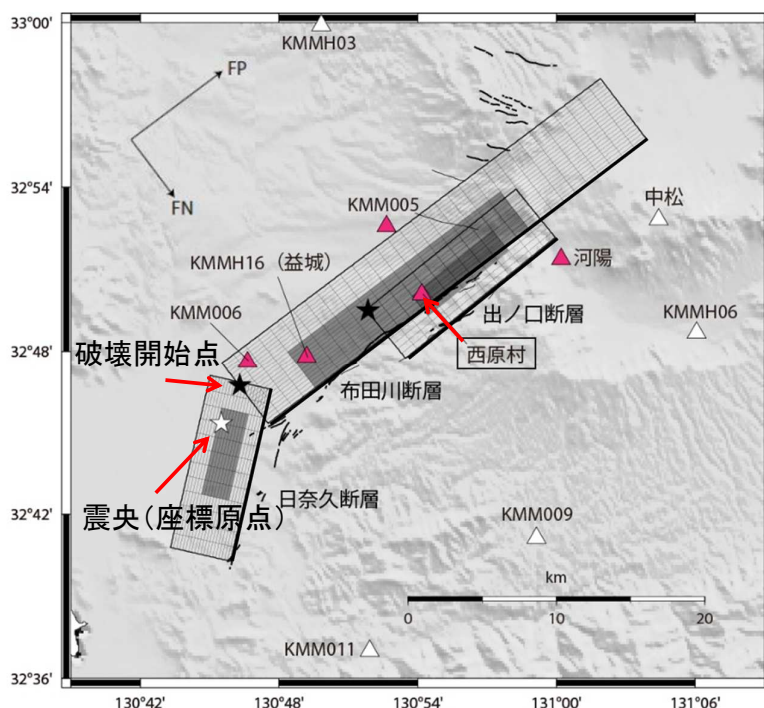
48

地表断層モデル (Fault-S-in.csv) による速度・変位波形



観測点1 (backward側) の速度(上)・変位(下) 観測点2 (forward側) の速度(上)・変位(下)
⇒ NS成分ではforward側に指向性パルス、EW成分では両地点ともfling pulse/stepが出現 49

演習例題2: 2016年熊本地震の西原波の部分再現 (修正レシピ: 布田川断層のSMGA+地表地震断層)



熊本地震の震源断層モデル:
3つの断層面と各3つの入力ファイル
布田川断層:

深部断層(SMGA)

深部断層(背景領域)

浅部断層

日奈久断層:

深部断層(SMGA)

深部断層(背景領域)

浅部断層

出ノ口断層:

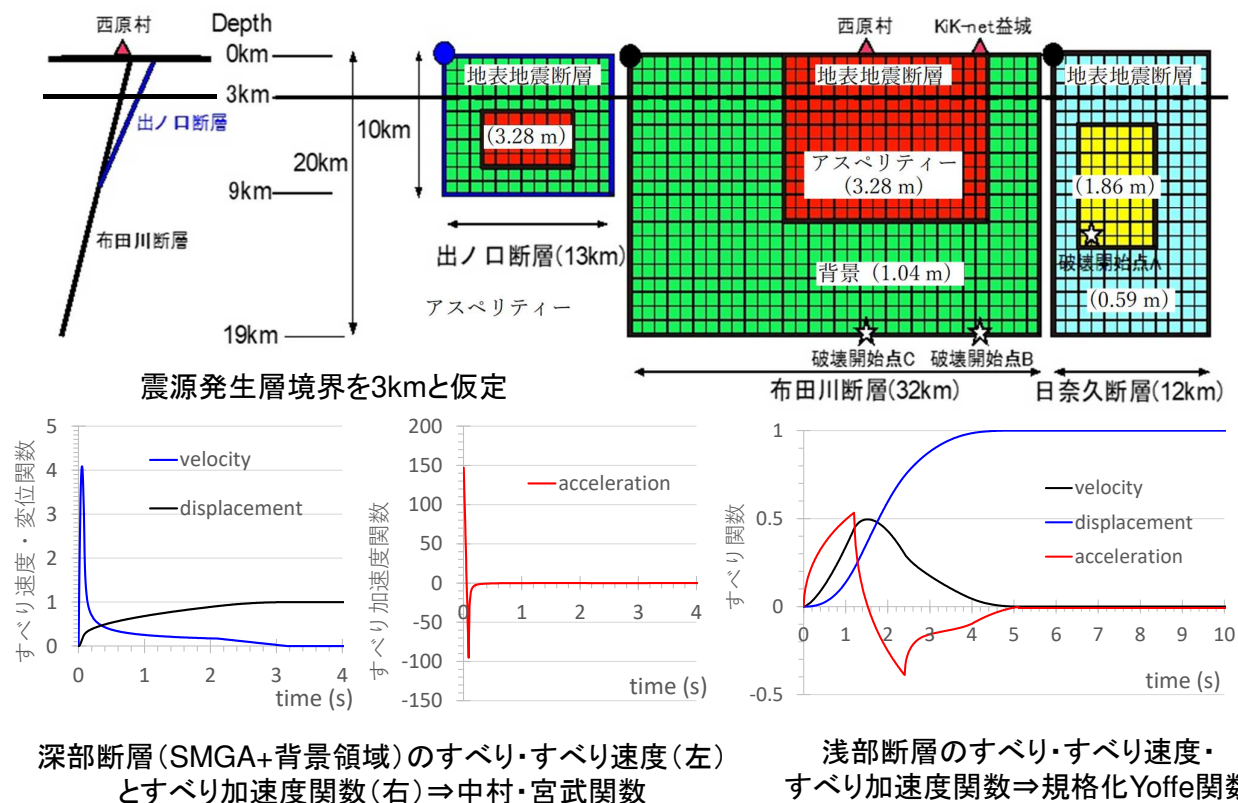
深部断層(SMGA)

深部断層(背景領域)

浅部断層

⇒今回は布田川断層の深部SMGA
と浅部断層を使用し、対象サイトは
西原村(6層地盤モデル)

演習例題2:2016年熊本地震の西原波の部分再現 (修正レシピ:布田川断層のSMGA+地表地震断層)



51

布田川断層のSMGA+浅部断層モデル

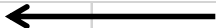
・入力データ

NSH-Futa-DS-in.csv: SMGAモデル (Deep SMGA)

NSH-Futa-SF-in.csv: 地表断層モデル (Surface Fault)

地盤モデル (共通): 6層地盤モデル

観測点 (共通): 西原村

*** Data for Delta Time, Duration, and Minimum Period ***								
Delta Time (sec		Number of Time (must be Power of 2)		時刻刻み(dt:s)、個数(2の累乗個:nt)				
0.32	128							
Minimum Period		Imaginary Omega for Phinney's method		最小周期(s: 通常はdtの倍)、				
0.64	0.01			Phinney法のω虚数値(0.01を使用)				
*** MEDIUM DATA ***								
NL (NUMBER C		(Note: Frequency-Dependent Q; Qp(f) = Qp0 x f ** Qpf & Qs(f) = Qs0 x f ** Qsf)						
6			6層地盤データ					
Layer Number	density(t/m3)	Vp(m/s)	Qp0	Qpf	Vs(m/s)	Qs0	Qsf	Thichness(m)
1	1.9	2000	100	0	600	100	0	3
2	2.15	2500	150	0	1100	150	0	147
3	2.4	4000	200	0	2100	200	0	487
4	2.6	5500	300	0	3100	300	0	1512
5	2.7	5700	300	0	3300	300	0	5000
6	2.75	6000	300	0	3400	300	0	0

⇒ phase-v3.exeを起動し、NSH-Futa-DS-in.csvによる表面波の分散曲線を計算

52

表面波の位相速度(極)の計算: phase-v3.exe

```

This code computes the normal mode solutions
(the phase and group velocities, and eigen vectors of
the Love and Rayleigh waves).
For trouble, please check "check-phase.csv".
This code is open for the academic use.
For questions, e-mail to "hisada@cc.kogakuin.ac.jp".
(Originally made in 1992, and modified in 2021)

Enter Input File Name for "Grflt-v**.csv"
NSH-Futa-DS-in.csv

Delta Time (s) = 0.32, Number of Time = 128

Maximum frequency (Hz) = 1.5625
Check Secular Functions & Eigen Vectors? (N=0 or Y=1)
0

Number of Layers= 6
Layer, Density, Vp, Qp, Fp, Vs, Qs, Fs, Thickness
1 1.9 2000. 100. 0. 600. 100. 0. 3.
2 2.15 2500. 150. 0. 1100. 150. 0. 147.
3 2.4 4000. 200. 0. 2100. 200. 0. 487.
4 2.6 5500. 300. 0. 3100. 300. 0. 1512.
5 2.7 5700. 300. 0. 3300. 300. 0. 5000.
6 2.75 6000. 300. 0. 3400. 300. 0. 0.

Enter Tolerance for Secular Function (ex., 0.01):
0.01

Enter Max Number of Iterations (ex., 200):
200

VSMAX, VPMAX = 3400.000 6000.000
CCMIN, CCMAX = 569.419 3133.456

Min and Max Velocities (Cmin and Cmax: m/s) = 558.031 3434.0
Enter Number of Partitions from Cmin to Cmax (ex., 1000):
1000
    
```

入力データ(NSH-Futa-DS-in.csv)

通常は0、特性方程式や変位・応力ベクトルを出力する場合は1(特定の振動数、深さ方向刻みなどを指定)

通常は0.01(特性方程式の振幅の収束判定値)

通常は200(位相速度を検索する収束計算の回数)

通常は1000(位相速度検索のための最小～最大位相速度の分割数)53

布田川断層のSMGAモデル: NSH-Futa-DS-in.csv

*** Seismic Fault Parameters ***									
	Length (m)	Width (m)	Num. of S	Num. of S	Number of Gaussian Points per Sub-Fault (from 1=1x1 up to =6->6x6)				
①	32000	20000	32	20	1	← 演習用に1を使用(通常はより大きな数を使用)			
	Start Time	Strike (deg)	Dip (deg)	Vr (m/s)	dtr (s; ave	random number for dtr (integer)			
②	1.19	233	75	2450	0	1			
	Location cY(m)	Z(m)	(Note: X->North, Y->East, Z->Down)						
③	2729.848	1036.398	12740	← 破壊開始点(布田川断層と日奈久断層の交点)					
	Location cY(m)	Z(m)	(Note: X->North, Y->East, Z->Down)						
④	23395.69	25531.91	19342.6	← 断層基準点(日奈久断層: 引間、2016)					
	Number of Interval Ti	Slip Veloc	dtN (sec; fmax (Hz); Vm(1/s; Ntr(s; only f	TauS(s; or TauR(s; only for Yoffe)					
⑤	1	0	5	0.01	6	2.28	1.84	0.02	3.1
	Time Winc	1st Half R	2nd Half Rise Time (s)						
⑥	1	0.5	0.5	注: 破壊開始点は、いくつかのパターンモデルあり					

- 断層長さ(L: m)・幅(W: m)、LとW方向の断層分割数
LとW方向のガウス積分点数(1～6点まで)
- 破壊開始時間(s)、走向角(°)、傾斜角(°)、破壊伝播速度(m/s)
各小断層の破壊開始時間に乱数を発生させる場合のばらつき時間(dtime: s)、
乱数発生のための任意の整数値、使用する場合は±dtimeで乱数時間が発生
- 震源(破壊開始点)の座標(x,y,z: m)、④断層基準点の座標(x,y,z: m)
- すべり関数に用いるtime windows数、time windowsの時間間隔(s)、
関数タイプ(5は中村・宮武関数)⇒詳細は「すべり速度関数選択の説明.docx」
- time windowsの時間⇒本モデルでは使用せず

布田川断層のSMGAモデル:NSH-Futa-DS-in.csv

[illegible]

- ⑦ すべり量とすべり角の与え方タイプ(2の場合は、time window matrixで与える)
⇒詳細は「断層モデルのすべり・すべり角分布の与え方.docx」
- ⑧ time window 1のすべり量マトリックス(m): SMGA=3.28m、他は0m
- ⑨ time window 1のすべり角マトリックス($^{\circ}$): 全て-160度(右横ずれ・正断層) ⁵⁵

波数積分、フーリエ逆変換、観測点のデータ
: NSH-Futa-DS-in.csv

*** Data for Static Wavenumber Integration using Greenfield's Quadrature ***				静的グリーン関数用			
The first Initial Number of Integration Points for Adaptive Newton-Cotes Quadrature							
2	16	← このまま使用する(積分路基準点と積分点の初期値)					
The second Initial Number of Integration Points for Adaptive Newton-Cotes Quadrature							
10	32						
*** Data for Dynamic Wavenumber Integration using Simpson's and Filon's quadratures ***				動的グリーン関数用			
Number of Integration Points from 0 to ω_m /Ryleigh(min)							
200	← このまま使用する(減衰が極端に小さい場合などでは、50を大きくする場合有り)						
Number of Integration Points from ω_m /Ryl(min) to ω_m /c(final)							
50	←						
Factor for c(final): c(final)=Ryl(min)/Factor (Ex., 10)							
10							
*** CHANGE OF SIGNS OF IMAGINARY PARTS OF FINAL RESULTS (FOR FFT) ***				フーリエ逆変換用			
Change sign (=1), or do not change sign (=0)							
1	← 通常は1(計算波形の複素数の虚数部の符号変換)						
*** OBSERVATION POINT ***							
NUMBER OF Observation Points							
1	← 観測点は1点						
Observation Location	Y (m)	Z (m)					
1	8787.75	13531.9	0: Nishiha 西原村観測点の座標				

強震動の計算:grflt-v22.exe

```
Data Input from INDAT
(For Detail for Cheking, Please see check-Grflt.csv)
```

```
Enter Input-Data File for "***-in.csv"
```

```
NSH-Futa-DS-in.csv
```

入力データ(NSH-Futa-DS-in.csv)

```
Num. of Time, Delta Time and Min. Period (s)= 128 0.3200 0.6400
Num. of Omega, dOM, and Imag OM (rad/sec) = 64 0.1533981 0.0100000
```

```
Total Number of Layers = 6
Use of Const. Q of Futterman (1962)= 0
Reference Frequency (Hz) = 0.000
Layer,Density,Vp(m/s), Qp, Fp, Vs(m/s), Qs, Fs, Thick(m)
1 1.90 2000.0 100.0 0.0 600.0 100.0 0.0 3.0
2 2.15 2500.0 150.0 0.0 1100.0 150.0 0.0 147.0
```

静的グリーン関数項の計算

```
Skip computation of static terms?
Enter 0 for NO (Exact, but slow. Use for surface fault)
Enter 1 for YES (Fast, but approximate. Effective for buried fault)
```

```
0
```

0を入力(静的項を計算しない場合は1)

```
From HKQVWs:
Output Static Integrands?
Enter 0 for No (Regular)
Enter 1 for YES (Checking Purpose Only)
```

```
0
```

0を入力(被積分関数を出力する場合は1)

```
Select Extended Source or Point Sources?
Enter 0 for Extended Source (Subdividing Sub-Fault)
Enter 1 for Point Sources (Not Subdividing Sub-Fault)
```

```
0
```

0を入力(小断層の再分化を行わない場合は1)

```
Select Type of Gauss Integration Points for the extended Source
Enter 0 for Variable Number of Points
Enter 1 for Fixed Number of Points (ngauss)
```

```
0
```

0を入力(ガウス積分点を固定する場合は1) 57

強震動の計算:grflt-v22.exe

動的グリーン関数項の計算

```
Skip computation of dynamic terms?
Enter 0 for NO (Use for normal condition)
Enter 1 for YES (Use, when output static terms only)
```

```
0
```

0を入力(動的項を計算しない場合は1)

```
From HKQVWd:
Please choose the following combinations of integrands
0: Regular (= Dynamic Integrand - Static Integrand)
1: Dynamic (= Dynamic Integrand)
2: Static (= Static Integrand, checking purpose only)
(Enter 1, if the fault is deep. It is faster.)
```

```
0
```

0を入力(1は深部震源など動的項のみ使用する場合、2は静的項のみ使用)

```
Output Dynamic Integrands?
Enter 0 for No (Regular)
Enter 1 for YES (Checking Purpose Only)
```

```
0
```

0を入力(動的被積分関数を出力する場合は1)

```
Use Dynamic Distribution of Gaussian Points on Fault?
Enter 0 for No (Regular. Num. of Points are fixed)
Enter 1 for YES (Faster, but may lose accuracy)
```

```
0
```

0を入力(波長でガウス積分点数を変える場合は1)

```
static, dynamic & total (io,iob) 1 1
GGX (0.00774666182,-2.35752283E-005)
static, dynamic & total (io,iob) 1 2
GGX (-0.00774666182,2.35752283E-005)
```

```
Omega, Num. of Wave-number integ. points = 0.1534 0.0000 577
Omega, Num. of Wave-number integ. points = 0.3068 0.0000 579
```

計算終了で、周波数領域の速度波形が出力(grfault.dxyz)、中村・宮武関数(N&M_Slip.csv、N&M_Amp.csv)、規格化Yoffe関数(Yoffe_Slip.csv、Yoffe_Slip.csv)なども出力

時刻歴波形の計算: grfftsx-v2.exe

時刻歴波形の計算

```
"grfft" - To obtain seismograms for grflt3.f and grpoint.f
          at a single observation point.

Choose the input datafile for FFT (Enter Number 1 to 6):
1) grfault.dxyz (x,y,z-comp. of disp. from seismic sources)
2) grfault.dqvw (u,v,w-comp. of disp. from seismic sources)
3) grpoint.dxyz (x,y,z-comp. of disp. from point sources)
4) grpoint.sxyz (x,y,z-comp. of stress from point sources)
5) grpoint.dqvw (u,v,w-comp. of disp. from point sources)
6) grpoint.sqvw (u,v,w-comp. of stress from point sources)
1
```

1を入力(grfault.dxyzを選択)

```
DDM,LOM,nom,omi = 0.153398 1 64 0.01
New NDATA including OM=0 = 65

Total number of receivers = 1
Enter the receiver number to output :
1
```

観測点を選択(1)

```
XR,XI,YR,YI,ZR,ZI=
0.10941E+00-0.47991E-04 0.39598E-01 0.27091E-04 0.11355E+00-0.23889E-05
0.34896E-01-0.10301E+00-0.75056E-02-0.39117E-01 0.59852E-02-0.11855E+00
-0.85895E-01-0.78304E-01-0.39665E-01 0.23909E-01-0.13706E+00-0.11421E-01
-0.13203E-03 0.98347E-03 0.21571E-04-0.31483E-04 0.10044E-04 0.14319E-04
0.37676E-03 0.71187E-03 0.92643E-05-0.31152E-04 0.14669E-04 0.47373E-05
```

波形振幅の符号を変える場合は1を選択

```
Change signs of amplitudes? (Yes=1 or No=0) :
1
Change signs of X? (Yes=1 or No=0) :
0
Change signs of Y? (Yes=1 or No=0) :
0
Change signs of Z? (Yes=1 or No=0) :
1
```

X(北向き),Y(東向き)成分の符号は変えず、Z(下向き)の符号を変える場合は、0, 0, 1を入力

59

時刻歴波形の計算: grfftsx-v2.exe

時刻歴波形の計算(「大崎:新・地震動のスペクトル解析入門、1994」のcode参照)

```
You can transfer the velocities to the accelerations;
Do not transfer (Output Velocities) (Enter 0):
Transfer from velocities to accelerations (Enter 1):
0
```

速度波形を出力する場合は0、加速度波形を出力する場合は1を入力

```
Band Pass Filter? (Yes=1 or No=0) :
1
Data for TRAPEZOIDAL BAND PASS FILTER:
INITIAL AND FINAL Frequencies = 0. 1.5624992
Enter fL1,fL2,fH1 and fH2 (fL1<fL2<fH1<fH2: Hz):
0
0
1.5
```

バンドパスフィルターを用いる場合は1、用いない場合は0を入力

台形型のバンドパスフィルターを用いる場合、4つのコーナー振動数を入力(Hz)。この場合は、高振動数で1-1.5Hzで振幅0とするハイカットフィルター

```
The Fourier Spectrum data are stored in "amp.csv"
N, J of N=2**J and dt(s) = 64 6 0.320
Increase NT for smoother seismograms? (Yes=1 or No=0)
1
N, J of N=2**J and dt(s) = 128 7 0.160
Increase NT for smoother seismograms? (Yes=1 or No=0)
1
N, J of N=2**J and dt(s) = 256 8 0.080
Increase NT for smoother seismograms? (Yes=1 or No=0)
1
N, J of N=2**J and dt(s) = 512 9 0.040
Increase NT for smoother seismograms? (Yes=1 or No=0)
1
N, J of N=2**J and dt(s) = 1024 10 0.020
Increase NT for smoother seismograms? (Yes=1 or No=0)
1
```

時間刻みを初期値から2等分する場合、1を入力し続ける(この場合は、初期値の0.32sから0.02sまで時間刻みを細分化)

```
Change from (m) to (cm)? (yes=1) :
1
```

振幅をmからcmにする場合は1を選択

計算終了で、振幅スペクトル(amp.csv)と時刻歴波形(wave.csv)が出力

注: 次の計算前(NSH-Futa-SF-in.csvなど)にfile名を変更すること

60

** Seismic Fault Parameters ***									
Length (m)	Width (m)	Num. of S	Num. of S	Number of Gaussian Points per Sub-Fault (from 1=1x1 up to =6->6x6)					
32000	20000	32	20	1	← 演習用に1を使用(通常はより大きな値)				
Start Time	Strike (deg)	Dip (deg)	Vr (m/s)	dtr (s; ave	random number for dtr (integer)				
1.19	233	75	2450	0	1				
Location C	Y(m)	Z(m)	(Note: X->North, Y->East, Z->Down)						
2729.848	1036.398	12740	← 破壊開始点(布田川断層と日奈久断層)						
Location C	Y(m)	Z(m)	(Note: X->North, Y->East, Z->Down)						
23395.69	25531.91	19342.6	← 断層基準点(日奈久断層:引間、2000000)						
Number of	Interval Ti	Slip Veloc	dtN (sec;	fmax (Hz;	Vm(1/s; N	tr(s; only f	TauS(s; or	TauR(s; only for	Yoffe)
1	0	6	0.01	6	5.41	2.11	1.4	3.1	
Time Win	1st Half Ri	2nd Half Rise	Time (s)						
1	0.5	0.5							

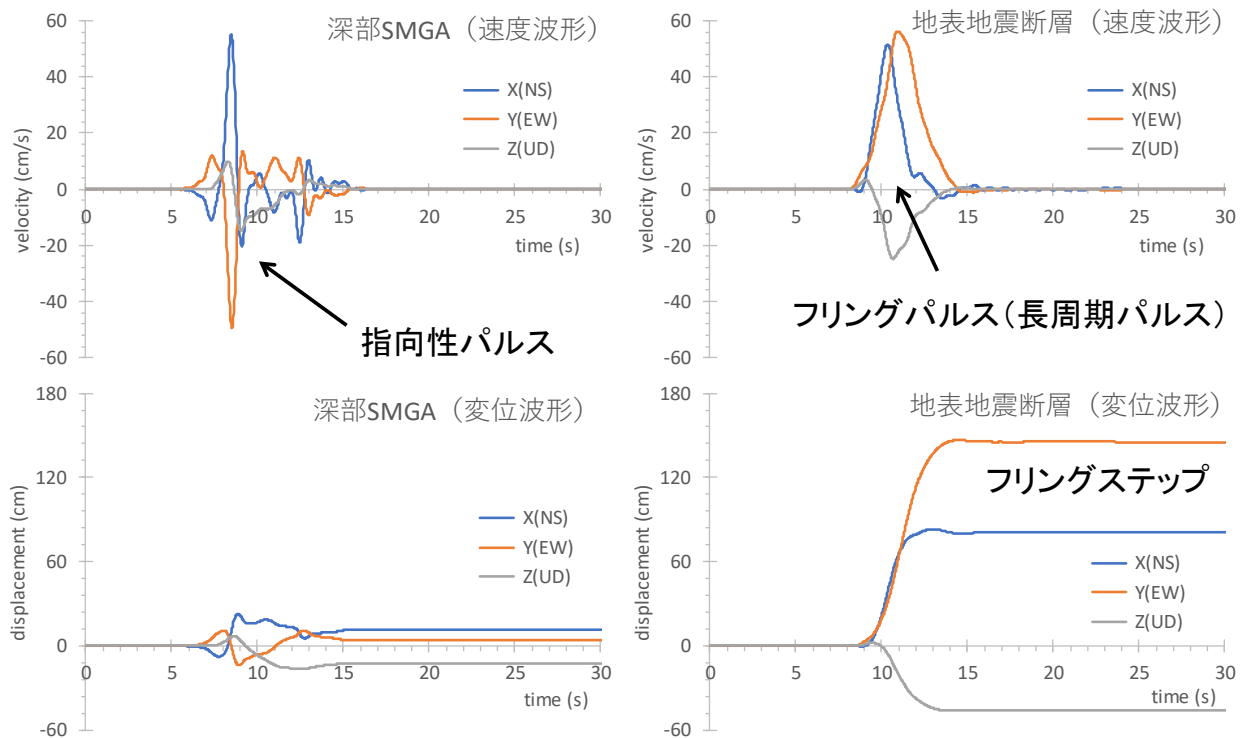
注:破壊開始点は、いくつかのパターンモ

- ① 断層長さ(L: m)・幅(W: m)、LとW方向の断層分割数
LとW方向のガウス積分点数(1~6点まで)
- ② 破壊開始時間(s)、走向角(°)、傾斜角(°)、破壊伝播速度(m/s)
各小断層の破壊開始時間に乱数を発生させる場合のばらつき時間(dtime: s)、
乱数発生のための任意の整数値、使用する場合は±dtimeで乱数時間が発生
- ③ 震源(破壊開始点)の座標(x,y,z: m)、④ 断層基準点の座標(x,y,z: m)
- ⑤ すべり関数に用いるtime windows数、time windowsの時間間隔(s)、
関数タイプ(6は規格化Yoffe関数)⇒詳細は「すべり速度関数選択の説明.docx」
- ⑥ time windowsの時間⇒本モデルでは使用せず

[illegible]

- 62

深部SMGA・地表地震断層モデルによる速度・変位波形



深部SMGAによる速度(上)・変位(下)

地表地震断層による速度(上)・変位(下)

⇒震源・数値パラメータ(破壊開始点の位置、破壊開始時間のランダム性、小断層サイズ・積分点数など)を変えると、計算波形は大きく変化することに注意！

63

おわりに

○波数積分法による断層変位を含む強震動計算法

強震動予測と設計用入力地震動(工学的判断など)

震源モデルとその近傍の強震動(指向性パルスとフリングステップ)、波数積分法と様々な数値計算手法

○計算コードと震源近傍強震動の計算例の紹介

1. 単純な震源・地盤モデルによる震源近傍強震動
2. 2016年熊本地震の西原波の計算(一部のみ)

その他の計算例は、下記を参照ください

過去の地震の強震動計算例(参考文献:[link](#)):

<http://kouzou.cc.kogakuin.ac.jp/Open/StrongMotionSimulation/>

強震動予測手法のベンチマークテスト(理論・数値・統計的手法)

<http://kouzou.cc.kogakuin.ac.jp/newhp/project/new/benchmark.html>