

---

# Computation of complete synthetic seismograms in spherically symmetric transversely isotropic media for shallow earthquakes

球対称 T I 媒質における浅い地震に対する理論波形計算手法

---

Kenji Kawai<sup>1</sup>, Nozomu Takeuchi<sup>2</sup>, Robert J. Geller<sup>1</sup>

河合 研志・竹内 希・ゲラー ロバート

<sup>1</sup>Graduate School of Science, University of Tokyo

<sup>2</sup>Earthquake Research Institute, University of Tokyo

# Why study shallow earthquakes?

- 近年のアレイ観測網の急激な整備
- 廉価なPCクラスタの登場

イベント数が多い浅い地震を用いた

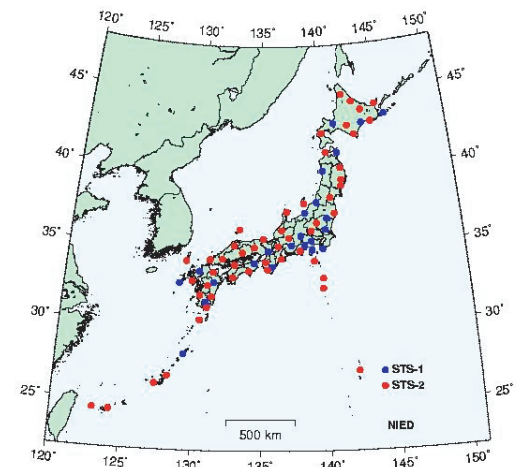
1. forward modeling
2. stacking

などの波形による構造推定の可能性を探る



- ★ UKAEA arrays
- ✕ Other arrays
- ◆ IMS arrays
- Regional Networks

既存のグローバルArray観測点網



(F-net, NIED)

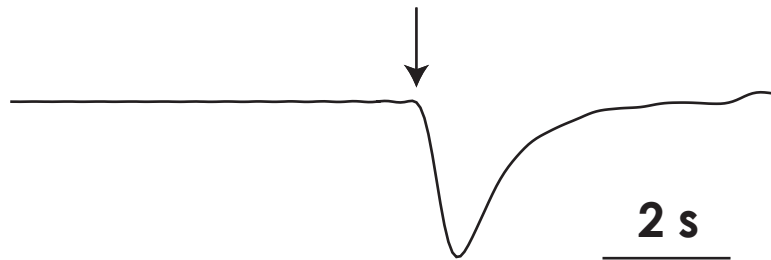
浅いイベントに対する効率の良い  
高精度理論波形計算手法および  
インバージョン手法開発の必要性



# Background (Previous studies)

## 深発地震に対する理論波形

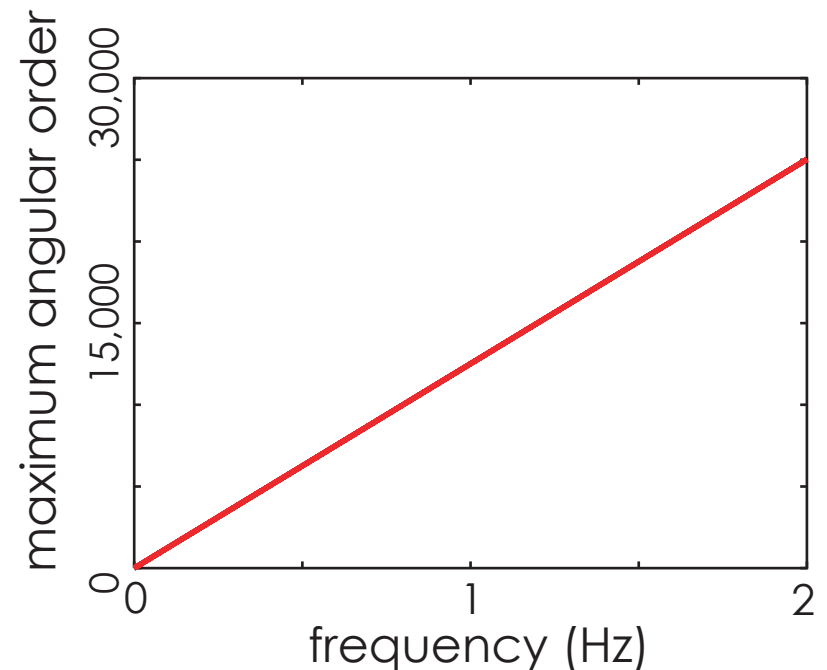
Sharp onset of P-wave  
(2Hzまで anisotropic PREM)



(Kawai et al., GJI submitted)

2Hzまでの計算により  
sharpな立ち上がりが見える  
→完全な地動が表現される

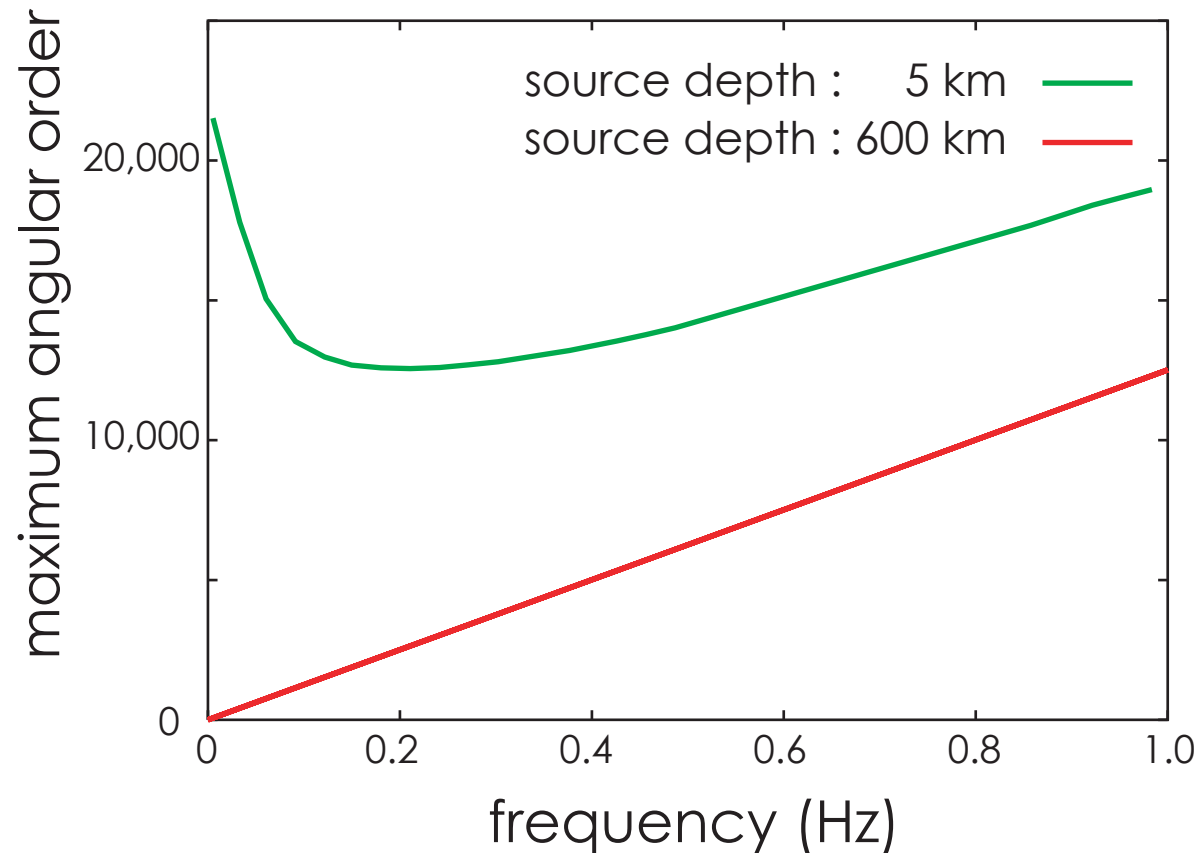
深発(600 km)の計算に  
必要なangular order



周波数が大きいほど  
大きなangular orderまでの  
計算が必要

# Maximum angular order required for accuracy

誤差0.1%で求めるために必要な angular order



浅い地震は、低周波でも大きなangular orderまでの計算が必要

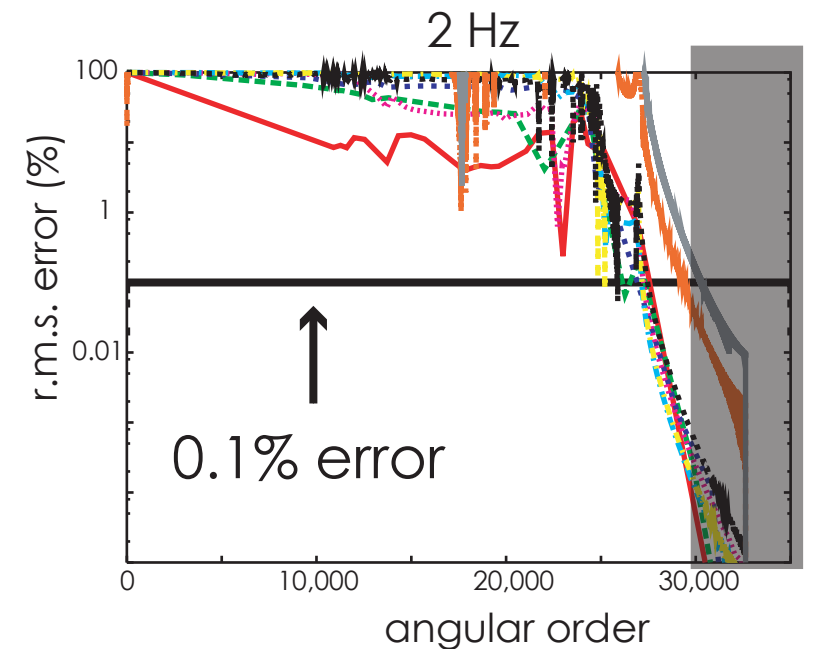
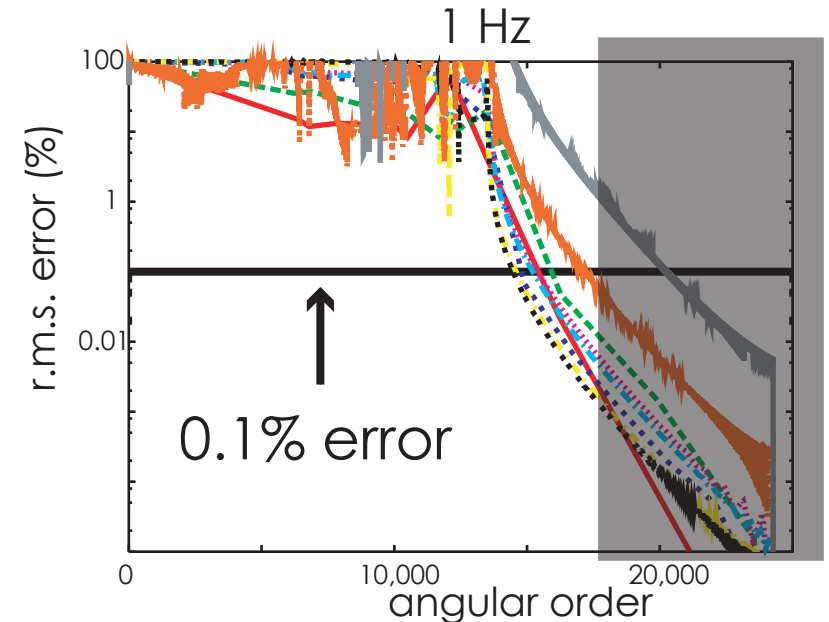
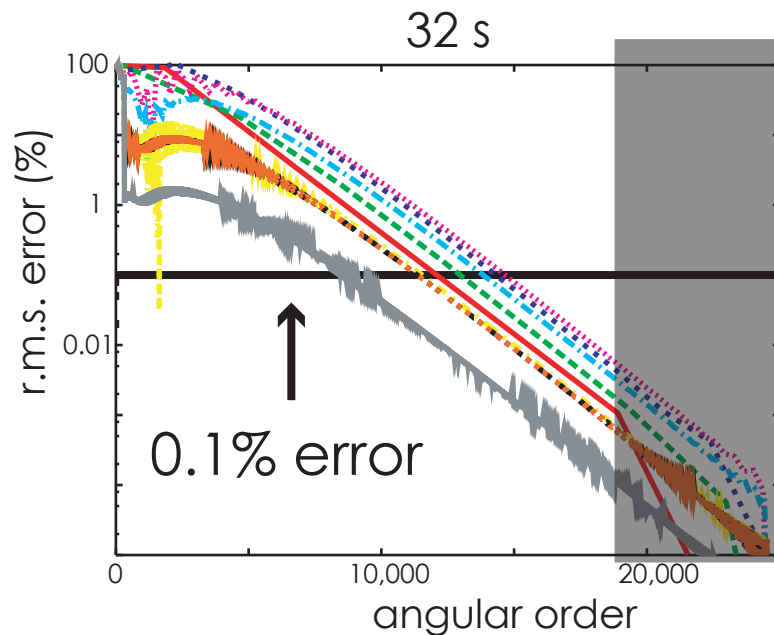
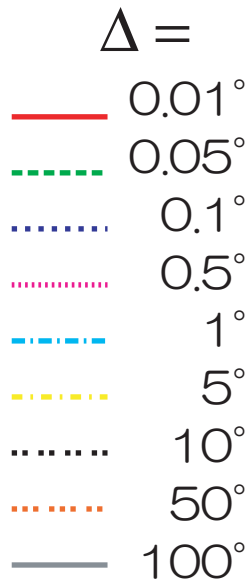
# Contribution of evanescent wave component to error

## 変位の誤差の震央距離依存性

遠地であっても、  
angular orderの打ち切りによって  
十分に優位な誤差が生じる

(震源深さ5km)

→十分に効率の良い計算手法の必要性



# Formal error estimates

$$\text{相対誤差} = \left| \frac{k_z^2 \Delta z^2}{12} \right|$$

(Geller & Takeuchi, 1995)

$$\frac{\omega^2}{c^2} = k_x^2 + k_z^2 = \left( \frac{l + \frac{1}{2}}{r} \right)^2 + k_z^2$$

$k$  wave number     $\omega$  angular frequency  
 $\Delta z$  grid spacing     $c$  phase velocity  
 $l$  angular order     $r$  radius

低周波の evanescent regime では  
大きな angular order まで計算する必要がある

→ 基準を満たすように十分細かいグリッド間隔が必要

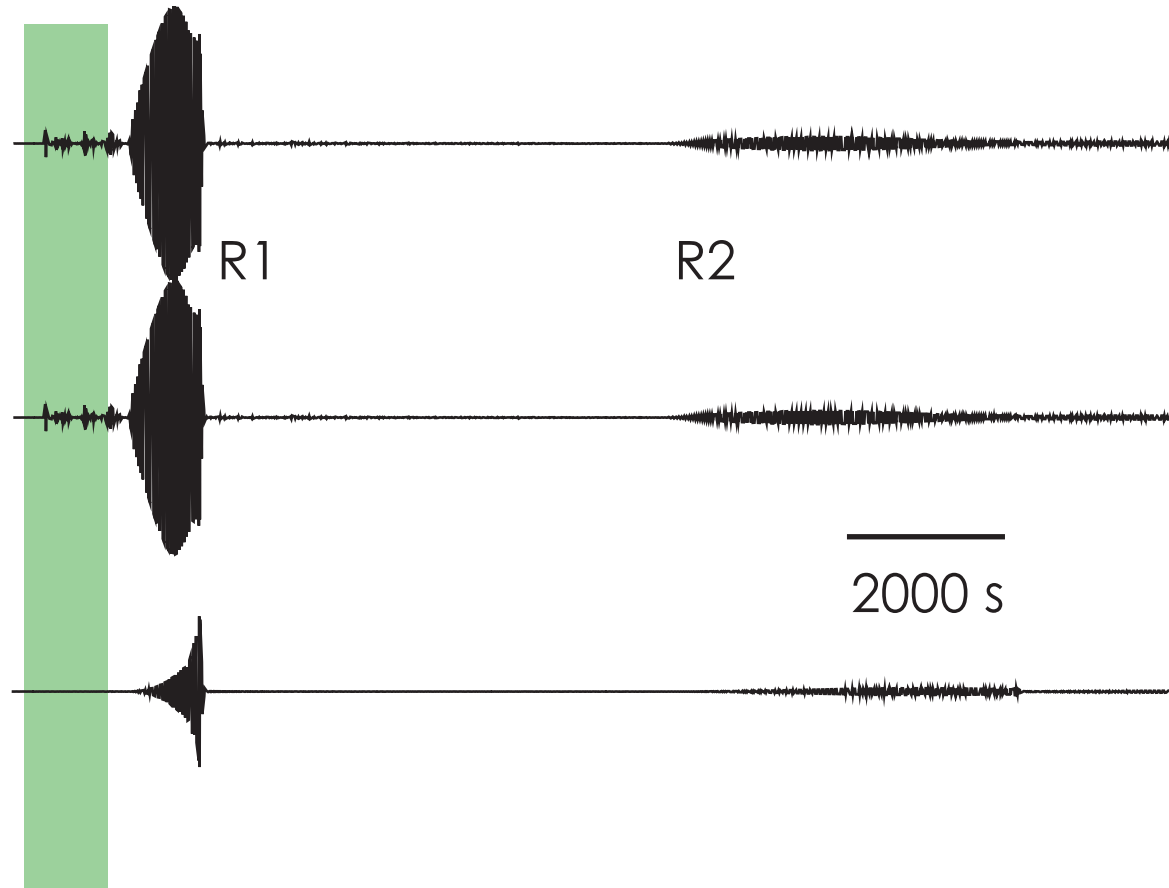
# Error caused by truncation of angular order (1)

Vertical component ( $\Delta = 60^\circ$ )

"exact" ( $l=20000$ )

$l=5000$

Residual \* 10

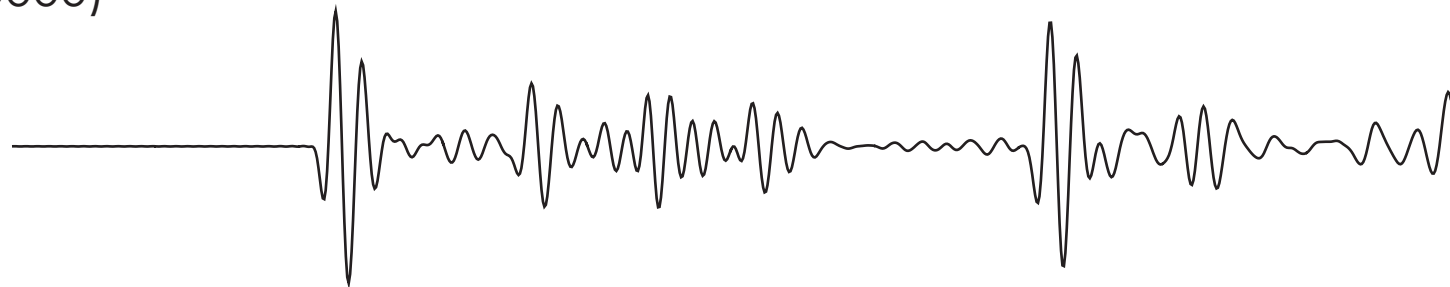


計算の打ち切りにより位相速度の遅い表面波の誤差が卓越する

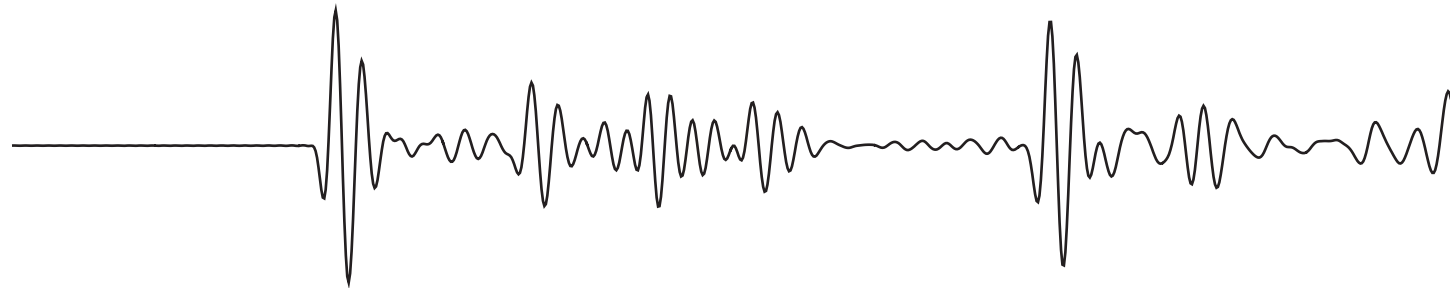
# Error caused by truncation of angular order (2)

Vertical component ( $\Delta = 60^\circ$ )

"exact" ( $l=20000$ )



$l=5000$



200 s

Residual

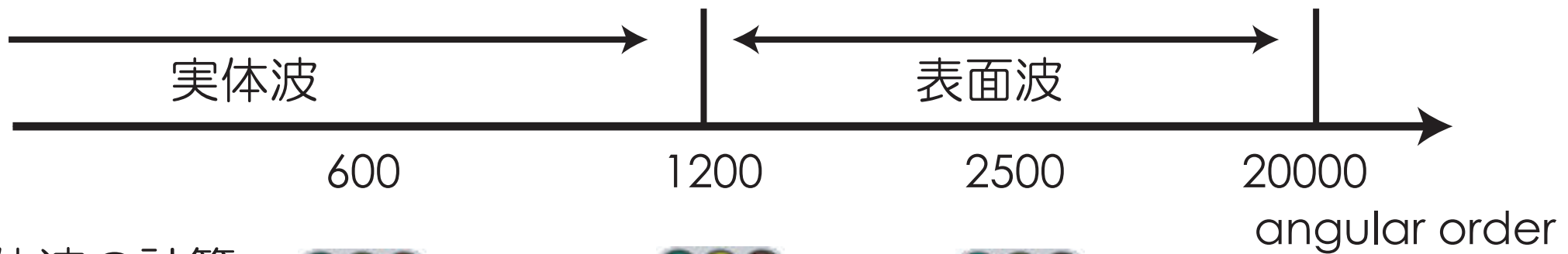
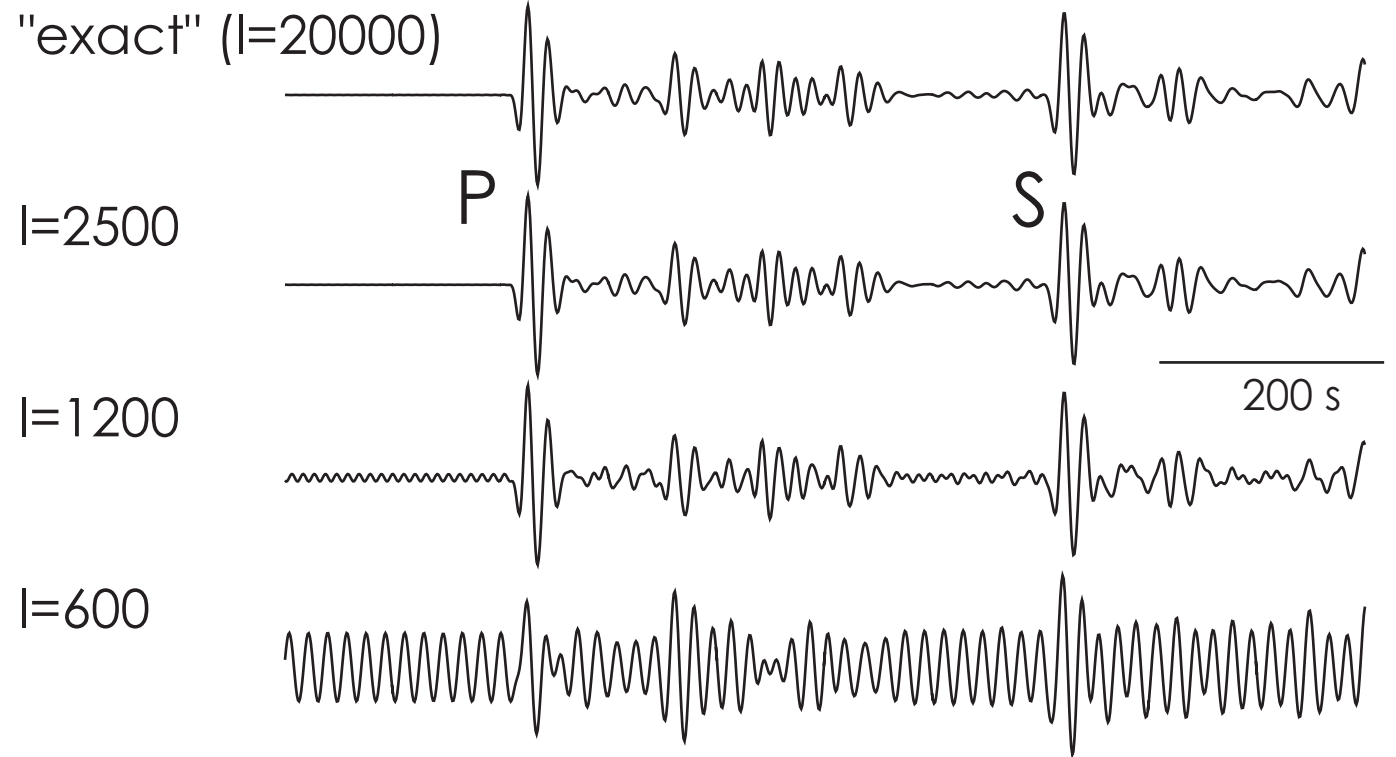


実体波の誤差は小さい



# Error caused by truncation of angular order (3)

Vertical component  
( $\Delta = 60^\circ$ )

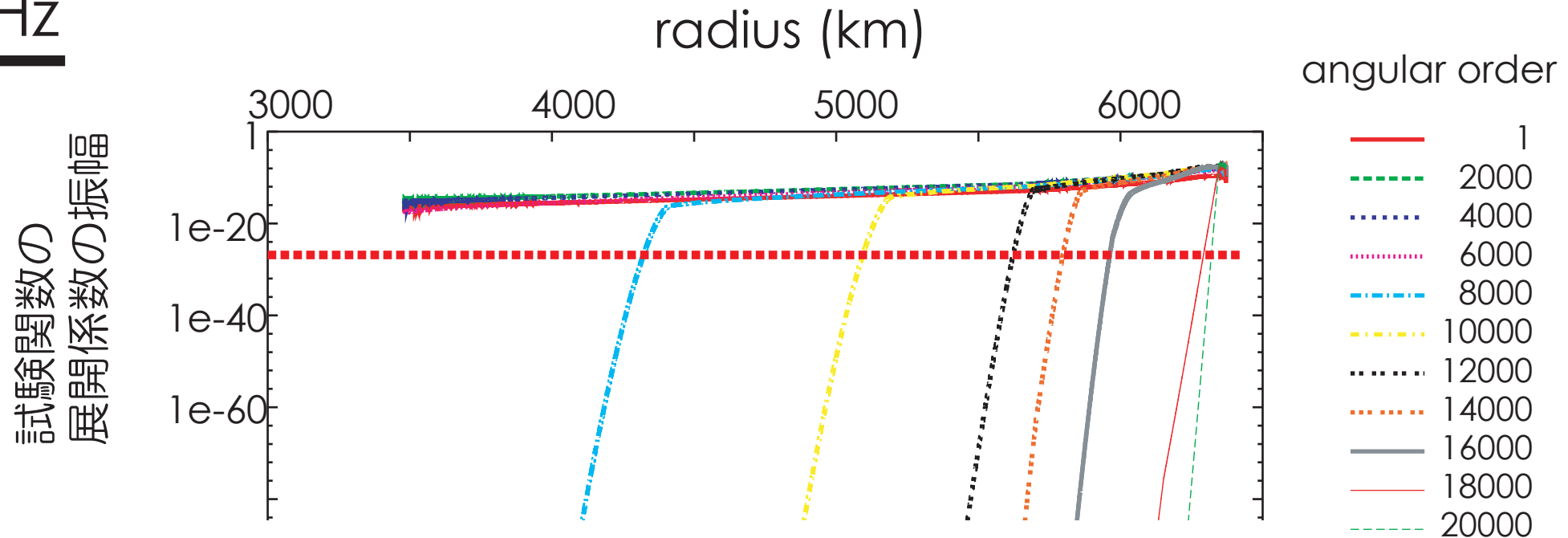


実体波の計算



# Depth cutoff for higher angular orders

2 Hz



大きなangular orderの解は、深いところに感度を持たない

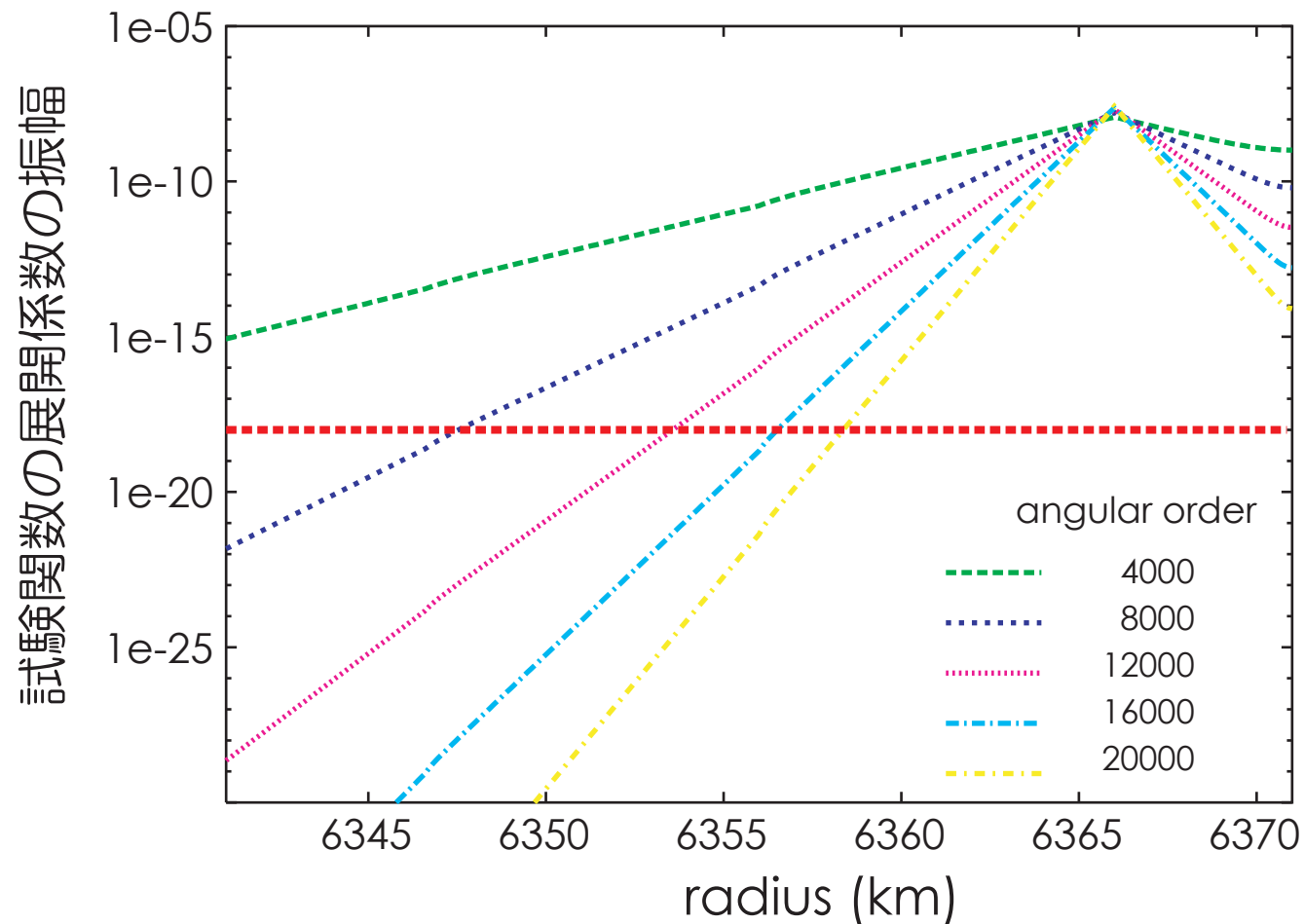
計算するグリッドを打ち切ることにより、CPU時間を大幅に短縮する

最大振幅の $1/10^{10}$ になるところで打ち切ることによれば、有効数字7桁を保ちつつ計算量を減らすことが可能

# Depth dependence of evanescent waves (shallow event)

[ $r_0 = 5$  km]

100s



evanescent waveは指数関数的に減衰する  
→震源の直下までしか感度を持たない

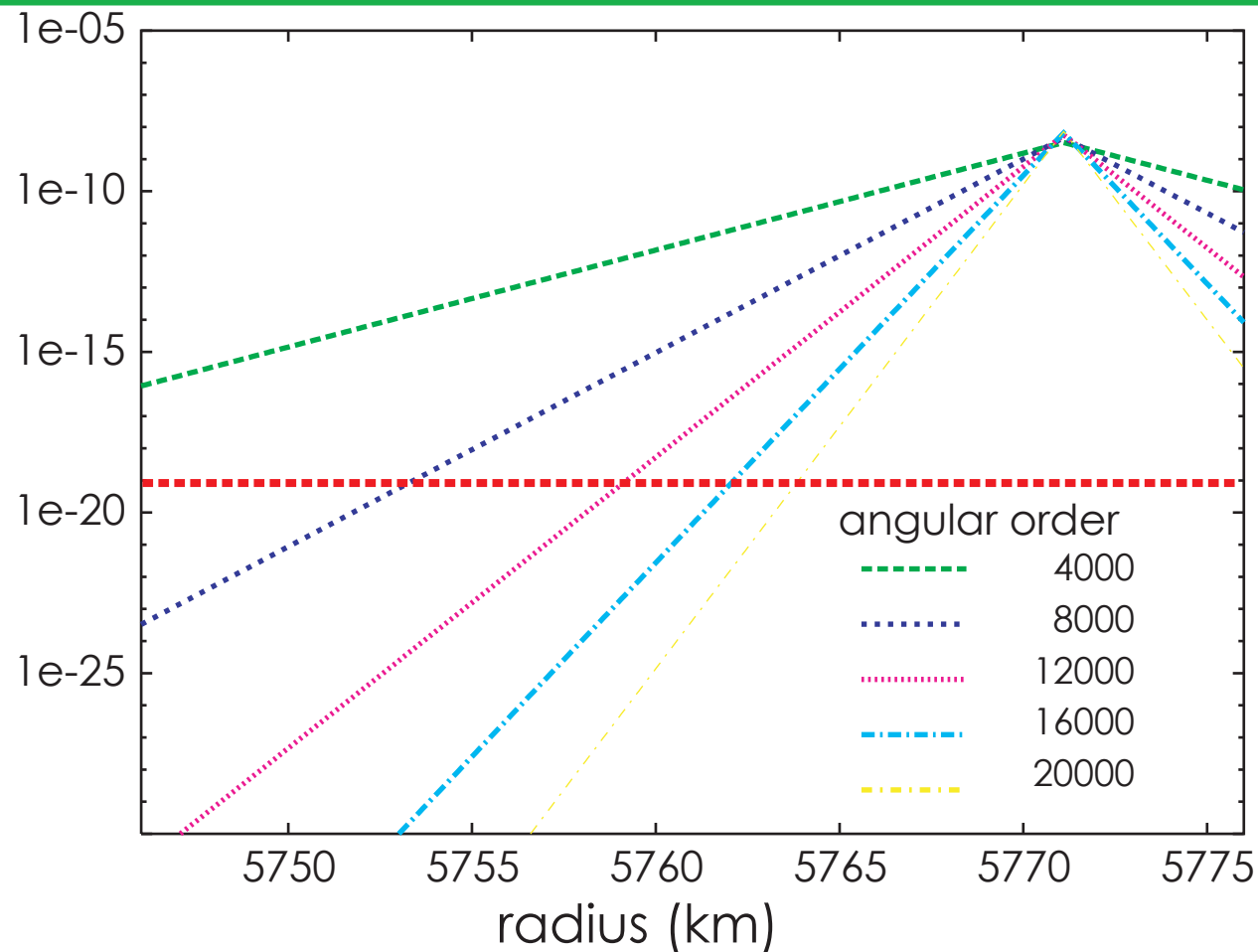
計算領域を震源の直下で打ち切ることができ、計算時間の大幅な短縮

# Depth dependence of evanescent waves (deep event)

[ $r_0 = 600$  km]

100s

試験関数の展開係数の振幅



震源深さ600 kmの場合でもevanescent waveは励起される

深発地震を用いた波形解析の場合でも、evanescent waveを考慮する必要性

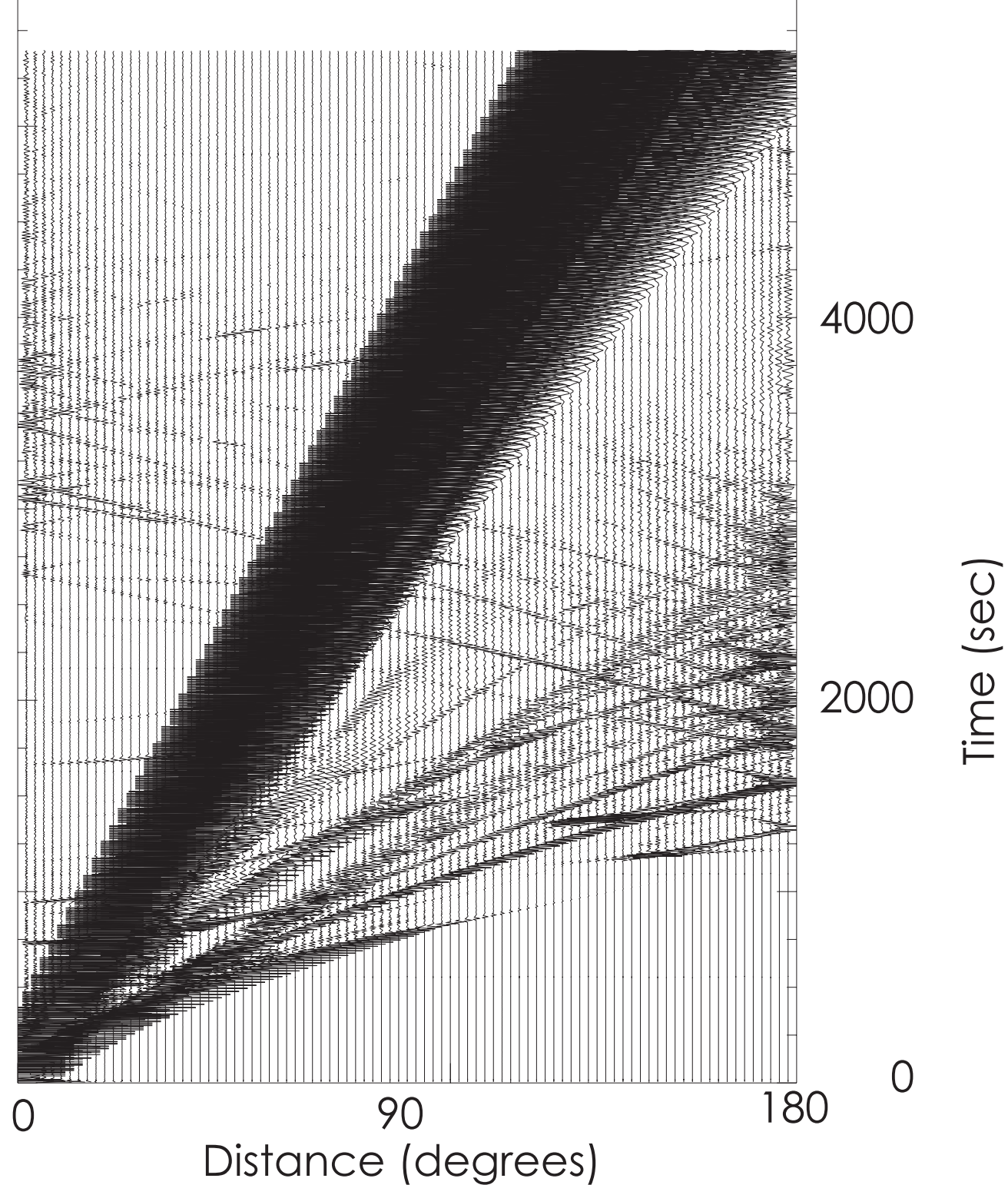
# Record Section (Vertical)

2 s まで計算

source depth : 5 km

構造 :  
PREM including attenuation

2 weeks using 8CPU





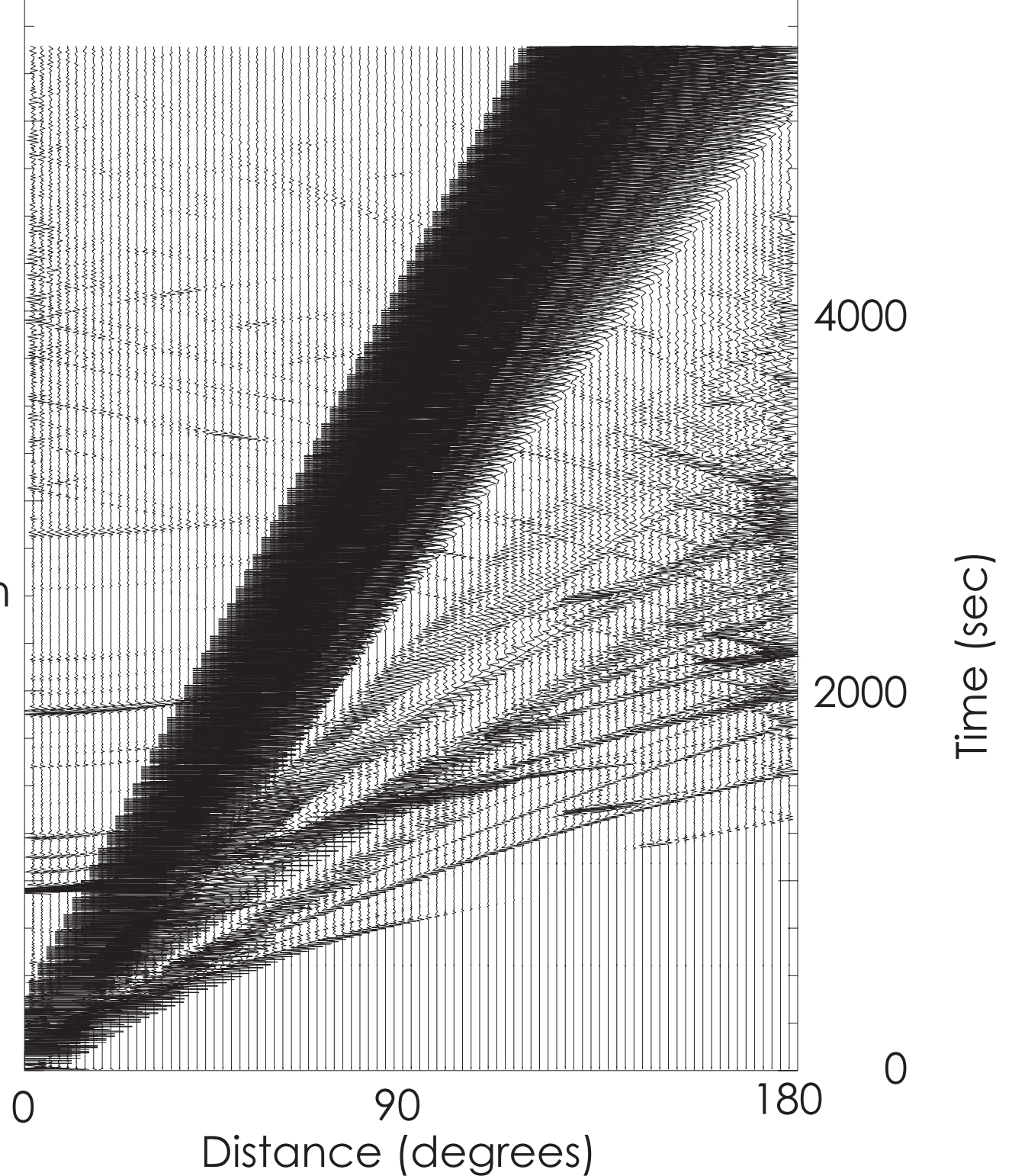
# Record Section (Radial)

2 s まで計算

source depth : 5 km

構造 :  
PREM including attenuation

2 weeks using 8CPU





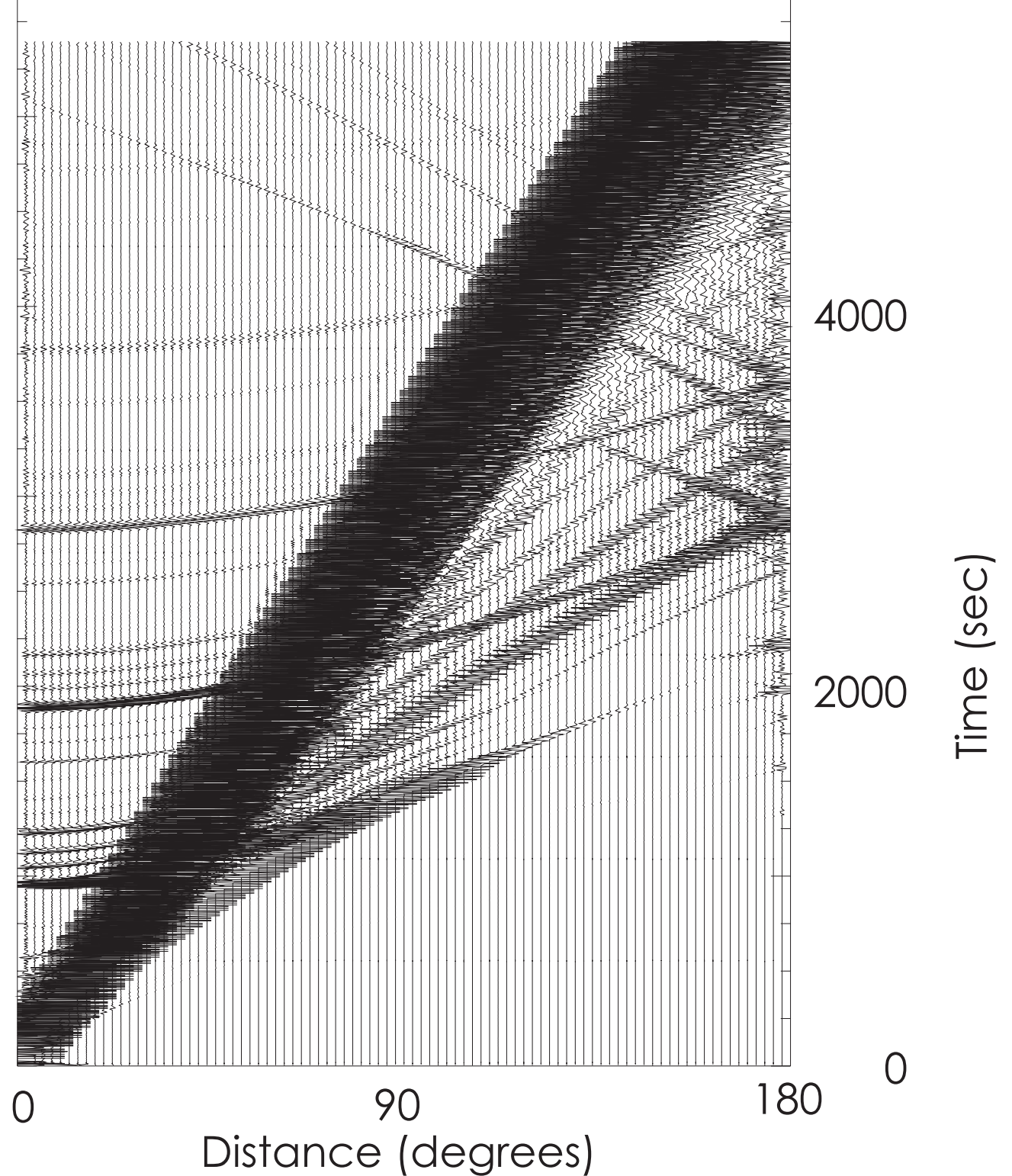
# Record Section (Transverse)

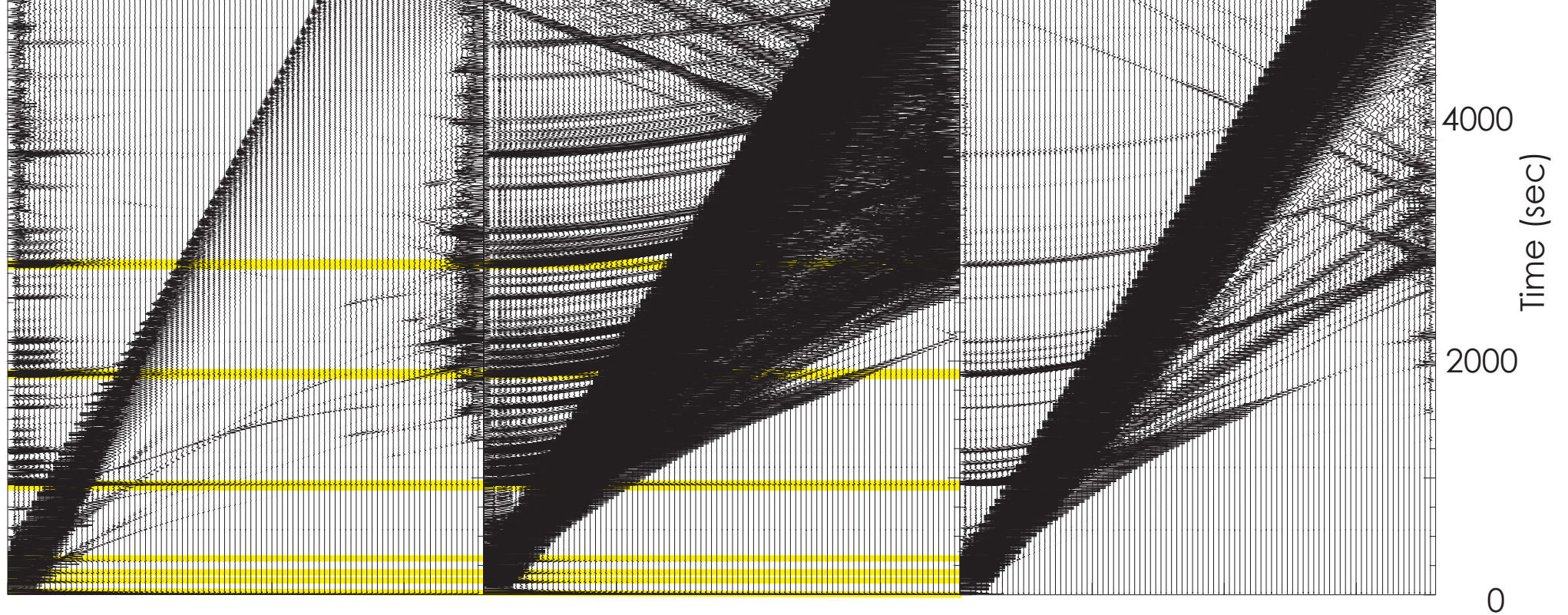
2 s まで計算

source depth : 5 km

構造 :  
PREM including attenuation

2 weeks using 8CPU



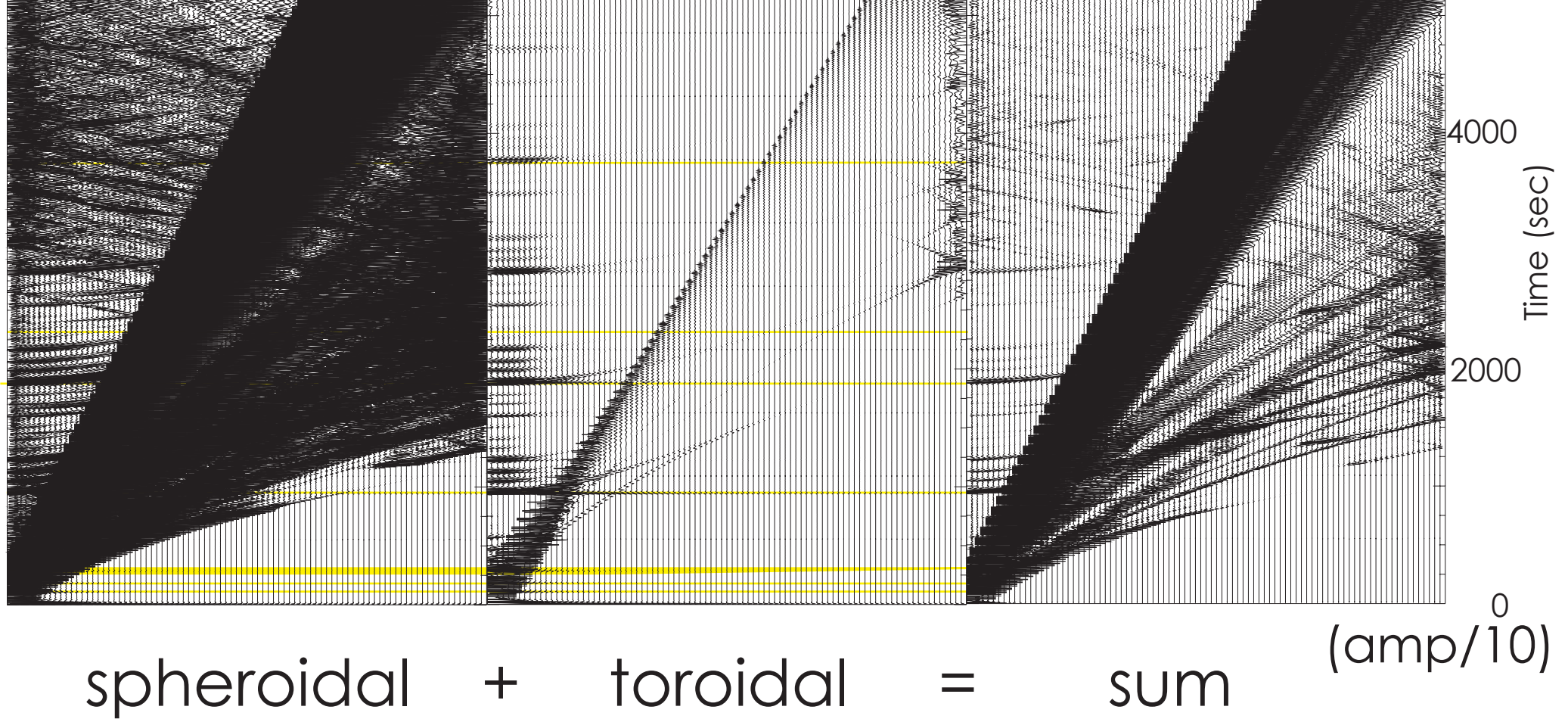


spheroidal + toroidal = sum (amp/10)

両者を足さないで1%程度の誤差が生じる  
特に、フェーズが重なる場合深刻な誤差を招く

Non-physical wave (Transverse) █ Non-physical wave

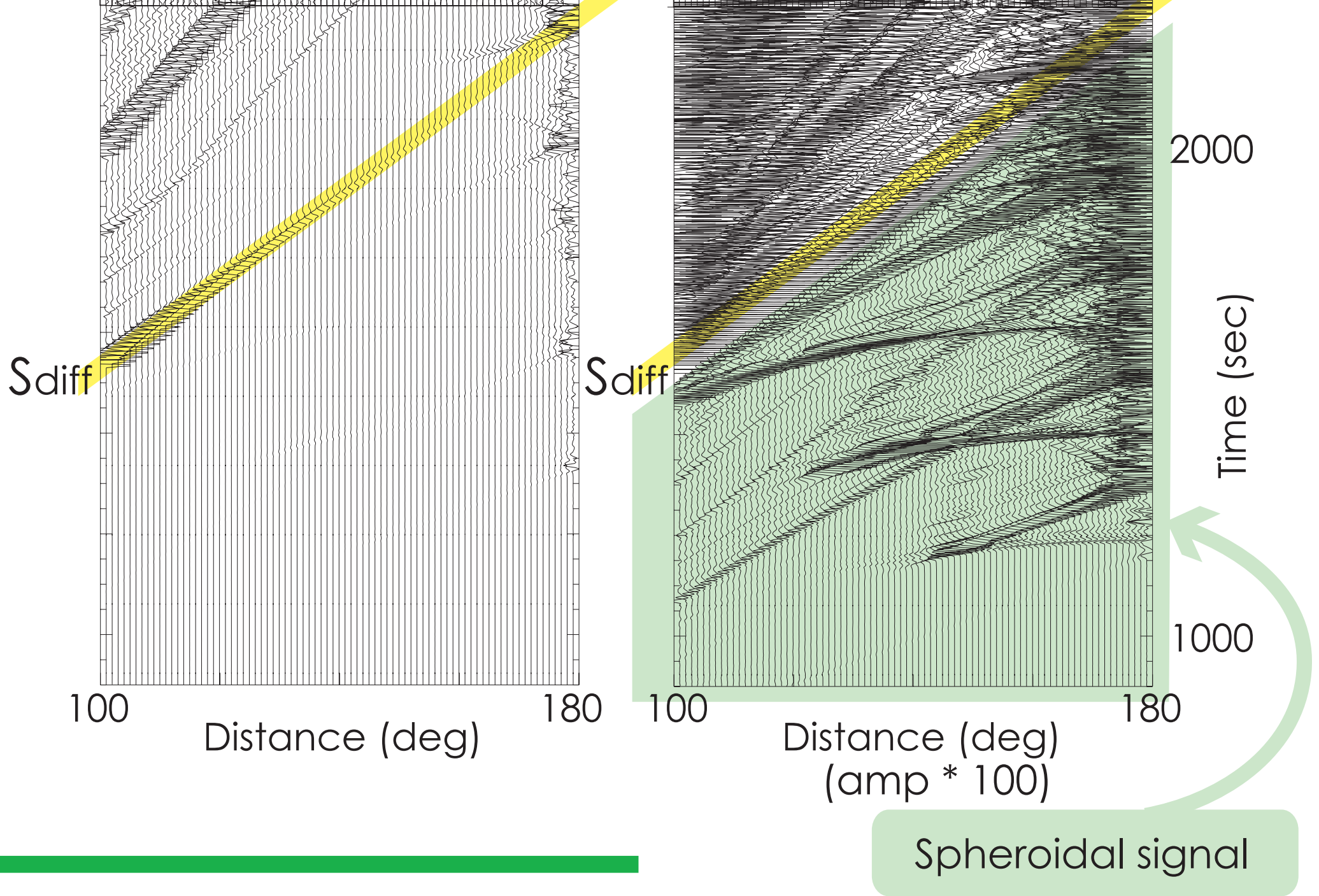




両者を足さないで1%程度の誤差が生じる  
特に、フェーズが重なる場合深刻な誤差を招く

Non-physical wave (Radial)

Non-physical wave



Spheroidal signal in transverse component



# Core phase

