

絶対速度応答計算の 改善について

絶対速度応答の算出方法

$$\text{絶対速度応答} = \text{相対速度応答} + \text{地動速度}$$

絶対速度応答: 高層ビルの高層階の床の揺れ(静止した空間に対する揺れ)の速度を推計

相対速度応答: 地面に対する高層階の床の揺れの速度を推計

(大崎(1994)のRESPにより算出)

地動速度*: 地震による地表面での揺れの速度

*) 加速度記録を積分して算出するが、長周期ノイズ等の影響で不安定になることがあるためハイパスフィルター(HPF)を入れることが多い

改善の背景

- ・現行手法の地動速度の算出は、強震観測報告などで気象庁が報告している最大速度を算出する際に使用する方式
- ・現行手法で、固有周期付近で地動が卓越する場合は、ほぼ正確に絶対速度応答スペクトルを計算可能
- ・ただし、固有周期付近で地動が卓越しない場合は、HPFの影響により絶対速度応答の推定が不正確になる場合があることが判明

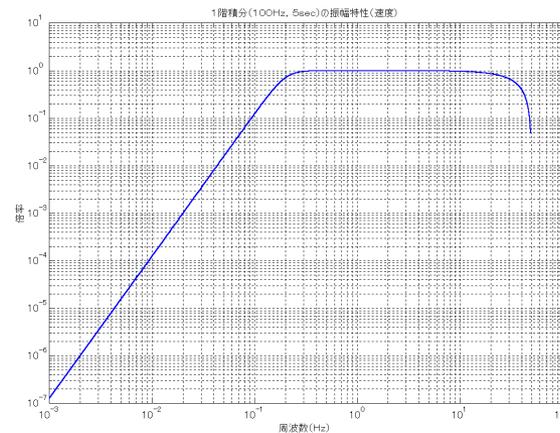
計算手法の改善のポイント

現行手法: 地動速度を計算する際に積分とともに周期5秒以上をカットする3次のHPF(右図)を適用、相対速度応答の計算は観測された加速度記録を入力



改善手法

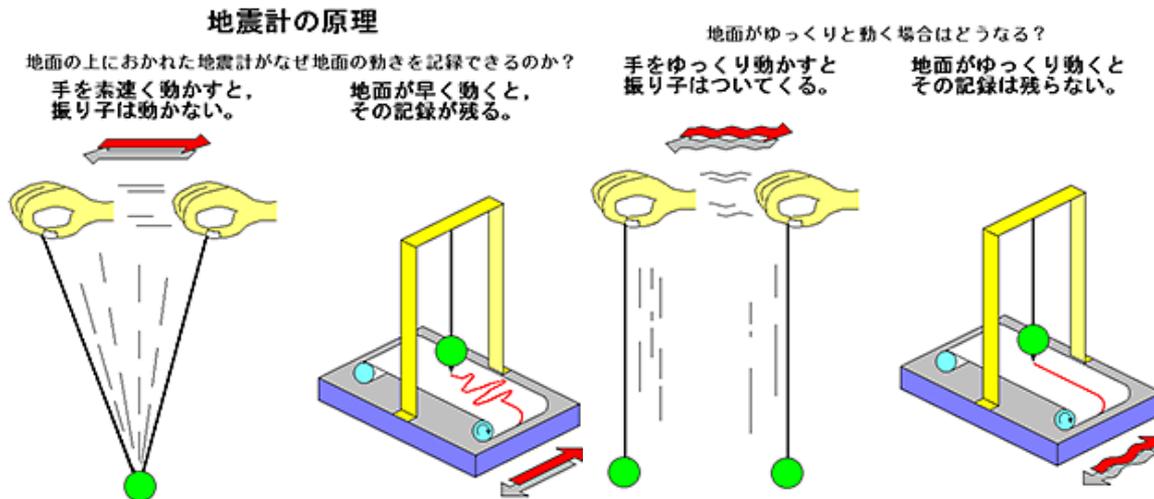
20秒以上をカットする2次のHPFを加速度記録に適用し、相対速度応答と地動速度を計算



周期5秒以上をカットする積分漸化式処理の周波数応答
(強震観測報告、利用の手引より)

絶対応答についての思考実験

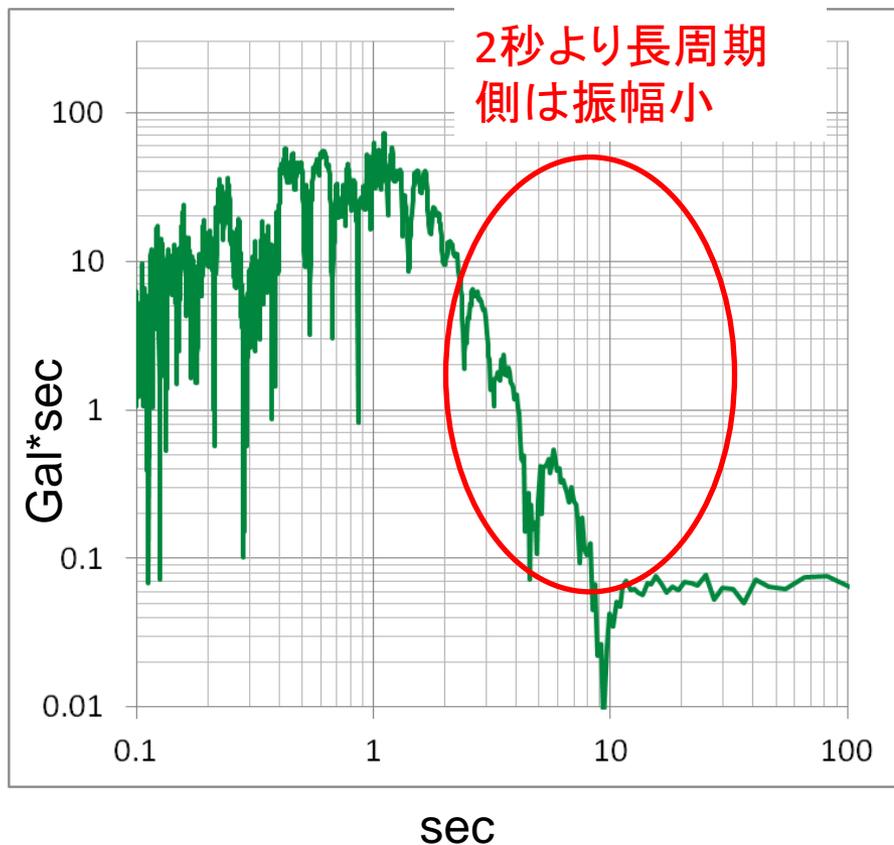
- ・1質点系での振動を考える。
- ・絶対速度応答は、空間に固定された座標系での質点の動きである。
- ・固有周期よりも短い周期の波が入力した場合、質点は空間に静止し(地震計の原理)、絶対速度応答は0となる。このとき相対速度応答は、地動速度と位相が逆の波形となる。
- ・固有周期よりも長い周期の波が入力した場合、質点は地面とともに動き、絶対速度応答は地動速度と一致する。



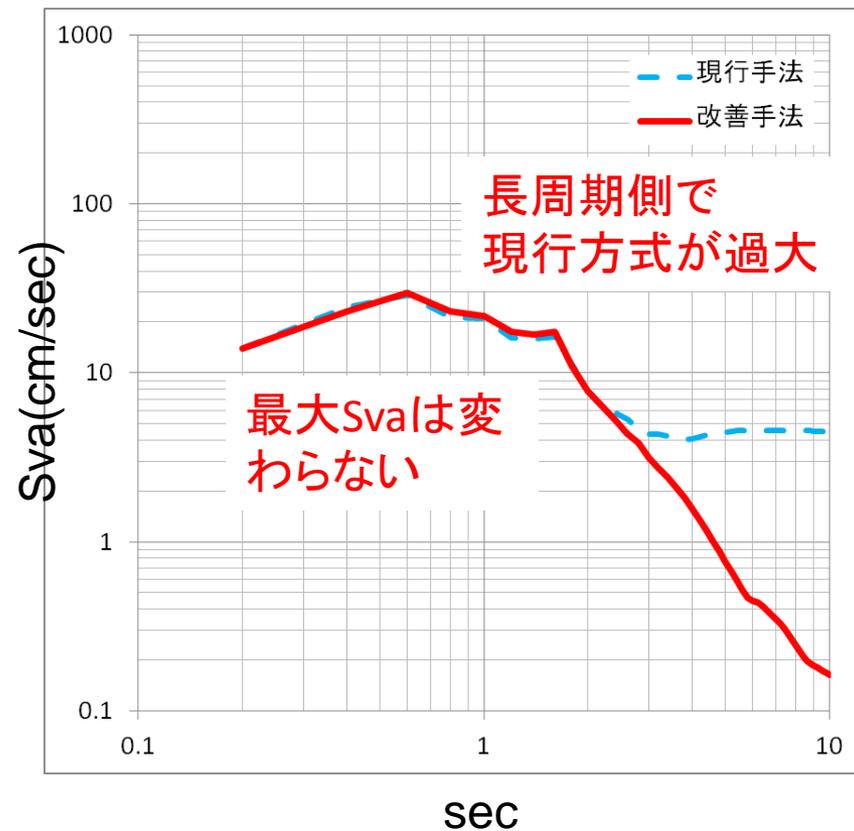
実際の記録の比較

①固有周期よりも短い周期の波が卓越する場合

2013年09月20日 02時25分 福島県浜通り M5.8 いわき市小名浜(長周期地震動階級2)



EW成分加速度フーリエスペクトル



絶対速度応答スペクトル(EW成分)

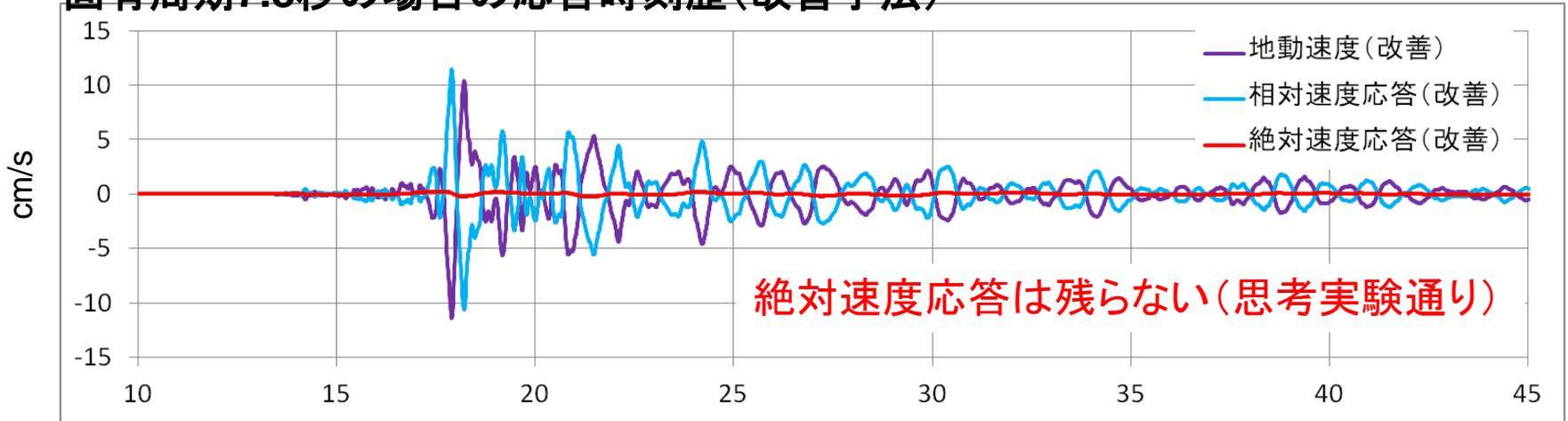
現行手法は固有周期より短い波が卓越する場合に、思考実験と異なり絶対速度応答スペクトルが小さくならない

2013年09月20日 02時25分 福島県浜通り M5.8 いわき市小名浜(長周期地震動階級2)

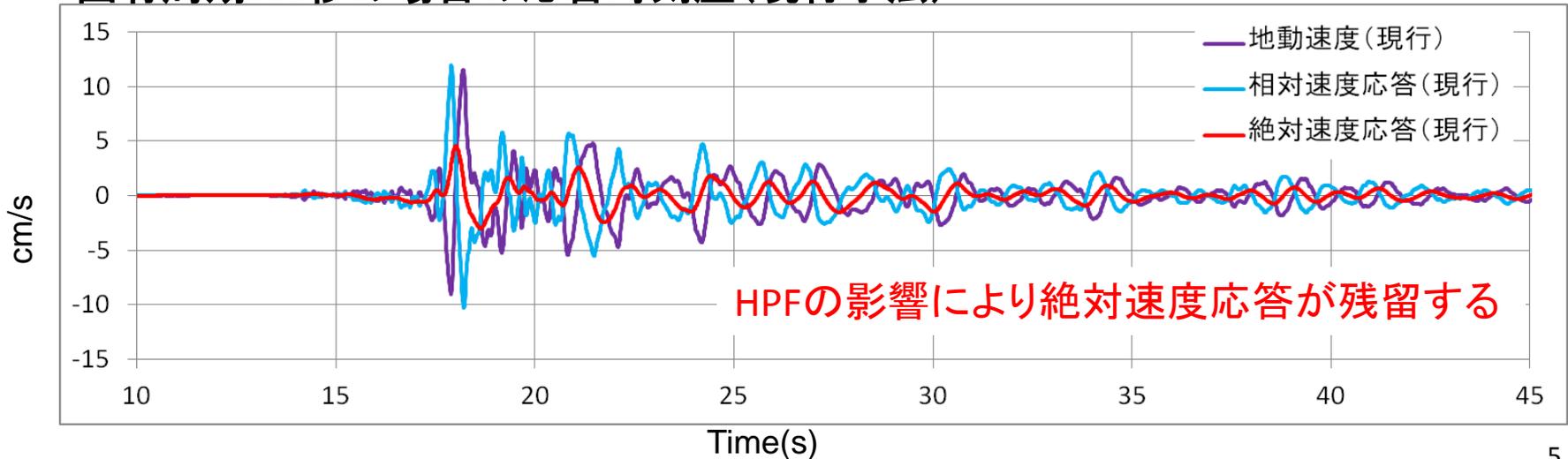
EW成分 T_0 (固有周期)7.8秒の相対速度応答波形と絶対速度応答波形

絶対速度応答 = 相対速度応答 + 地動速度

固有周期7.8秒の場合の応答時刻歴(改善手法)



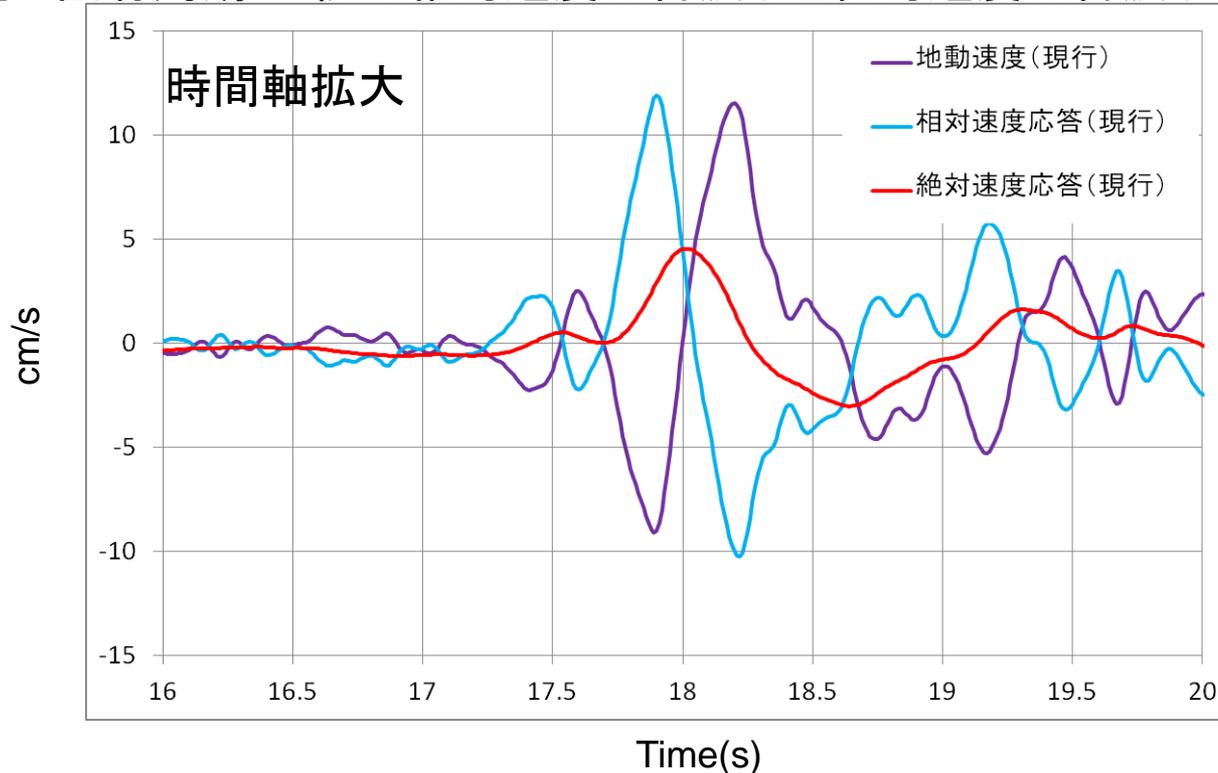
固有周期7.8秒の場合の応答時刻歴(現行手法)



残留する絶対速度の原因

絶対速度応答 = 相対速度応答 + 地動速度

EW成分 固有周期7.8秒の相対速度応答波形と絶対速度応答波形

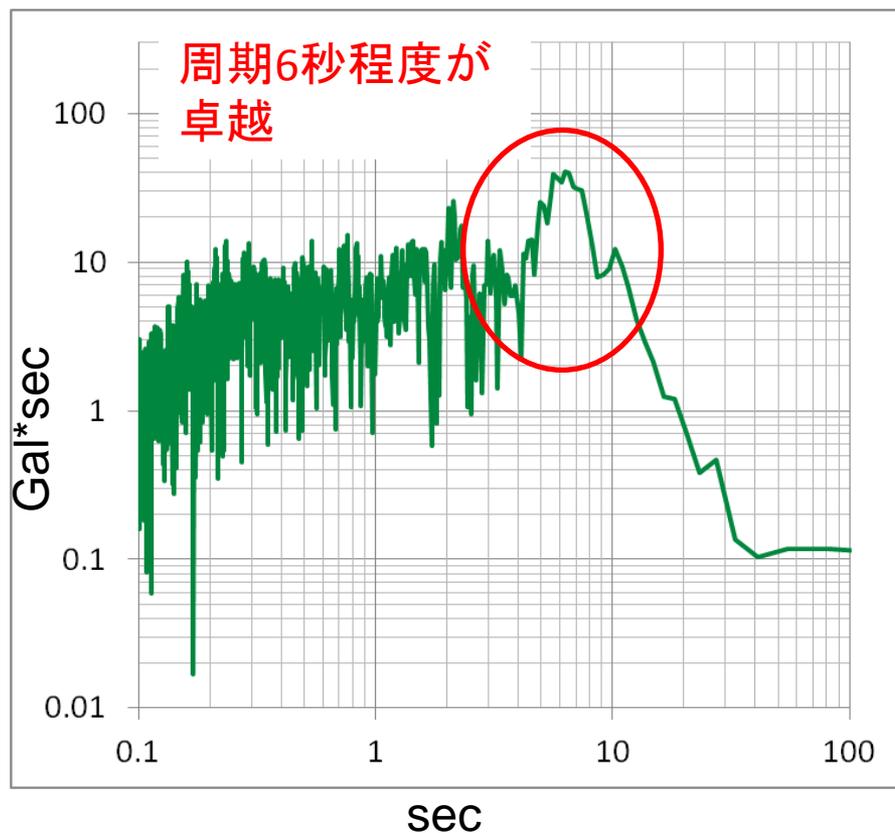


- ・残留する絶対速度は、カットされた5秒以上の周期ではなく、周期1～2秒程度が卓越
- ・相対速度応答(現行)と地動速度(現行)の振幅は、ほぼ似ているが完全には逆転ではない
- ・原因は、相対速度応答と地動速度の位相ずれ

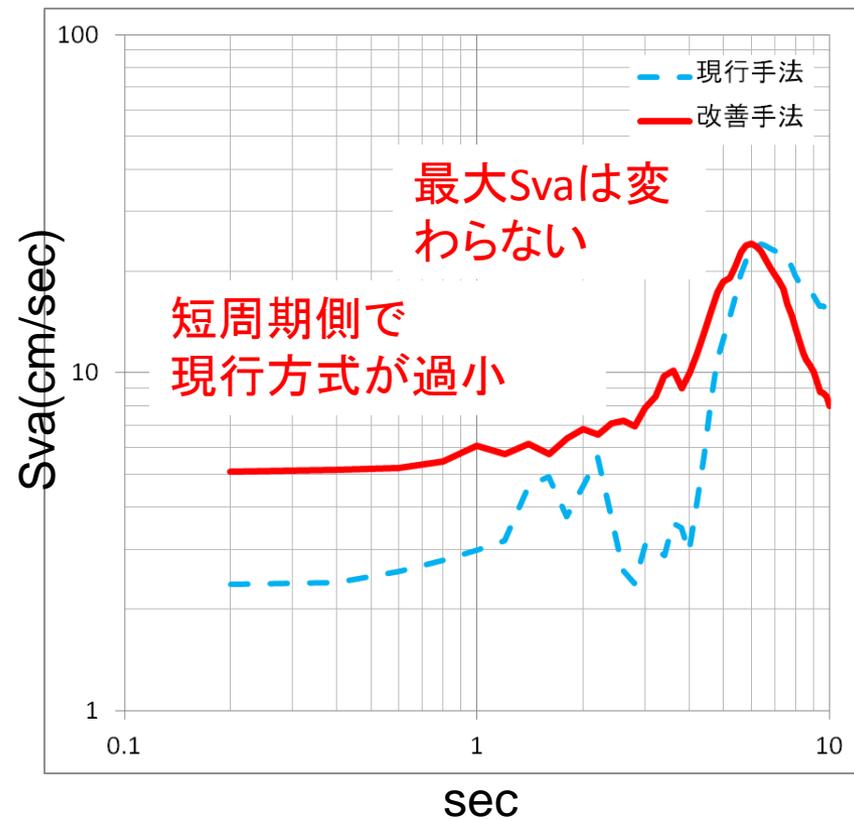
実際の記録の比較

②固有周期よりも長い周期の波が卓越する場合

平成16年(2004年)新潟県中越地震 M6.8 K-NET新宿



EW成分加速度フーリエスペクトル



絶対速度応答スペクトル(EW成分)

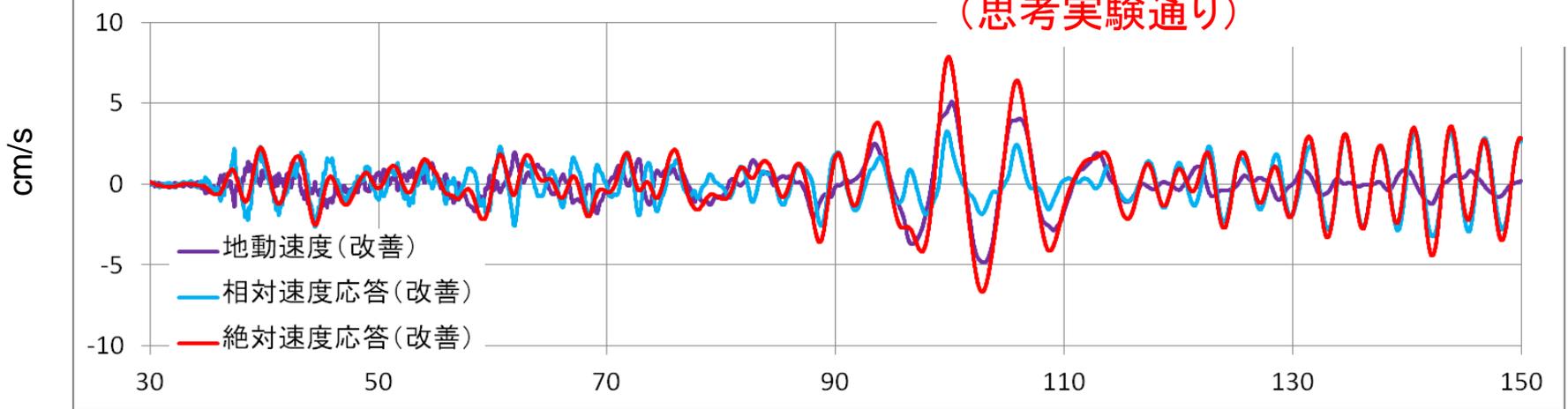
平成16年(2004年)新潟県中越地震 M6.8 K-NET新宿

EW成分 T_0 (固有周期)3.0秒の相対速度応答波形と絶対速度応答波形

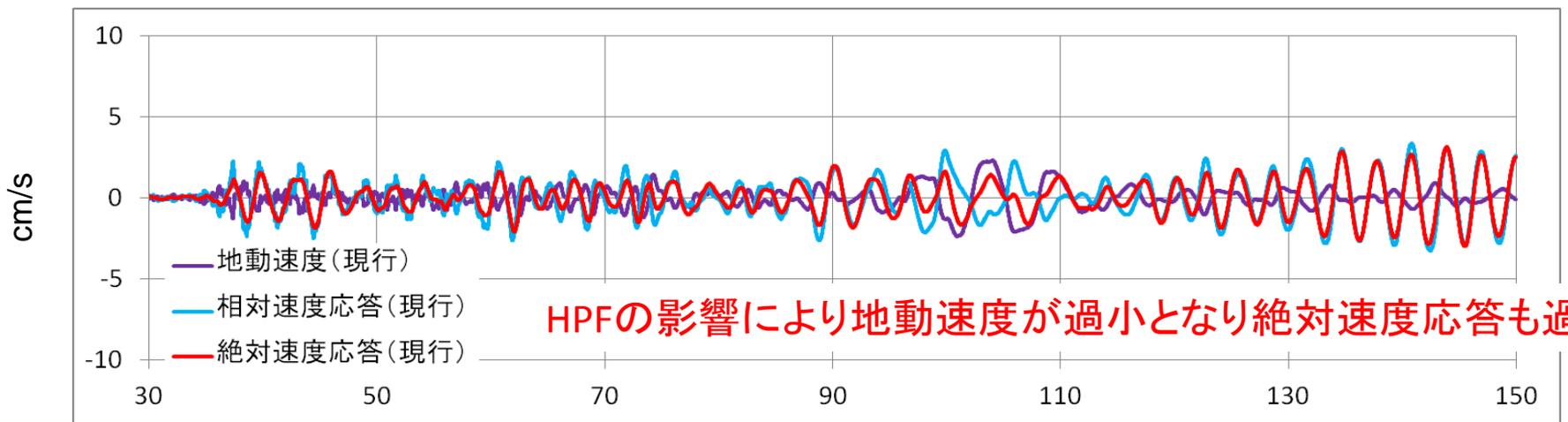
絶対速度応答 = 相対速度応答 + 地動速度

固有周期よりも長周期部分が卓越する場合(応答時刻歴で90-110秒部分)、絶対速度応答は地動速度とほぼ同様(思考実験通り)

固有周期3.0秒の場合の応答時刻歴(改善手法)



固有周期3.0秒の場合の応答時刻歴(現行手法)

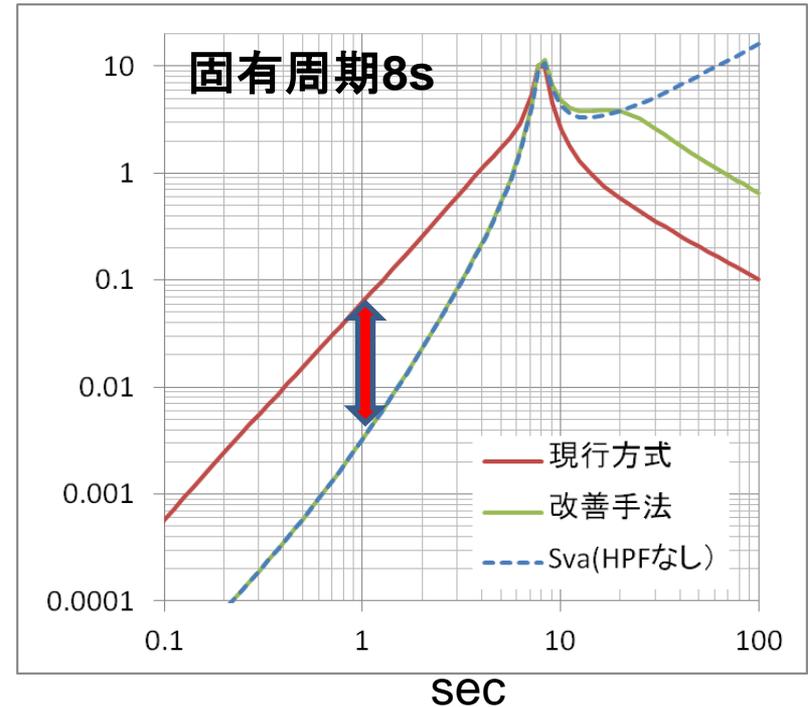
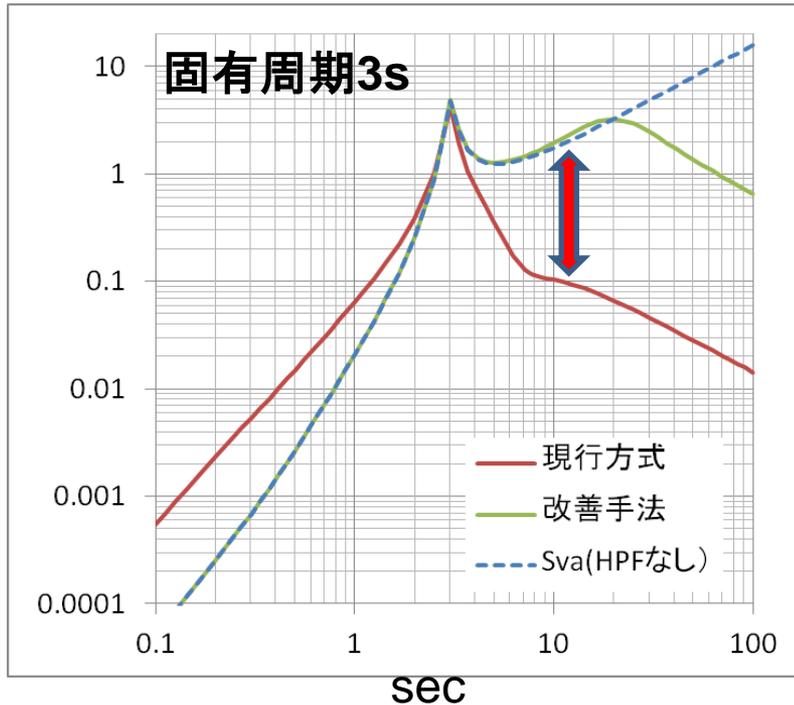


HPFの影響により地動速度が過小となり絶対速度応答も過小

Time(s)

絶対速度応答の周波数特性

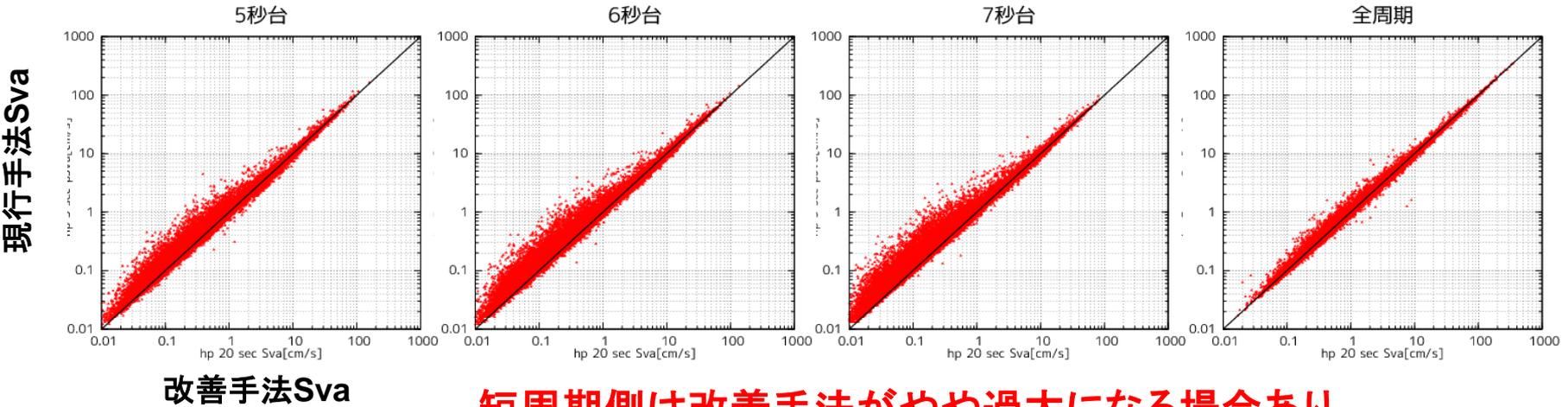
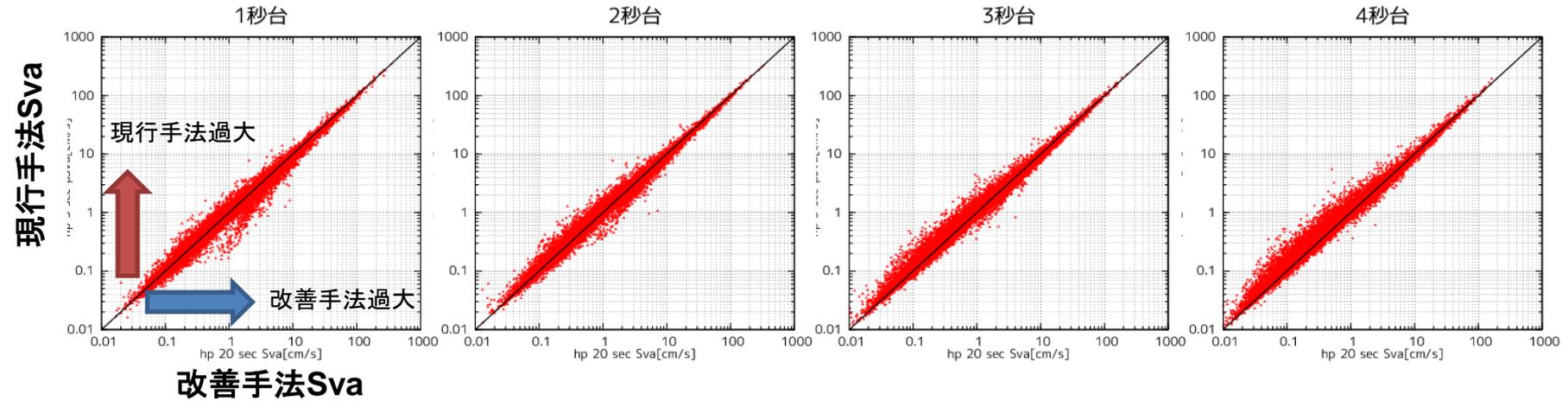
加速度入力に対する絶対速度応答のゲイン



固有周期より長周期側が卓越する場合、現行手法は改善手法に比べ過小
固有周期より短周期側が卓越する場合、現行手法は改善手法に比べ過大
改善手法は現行手法と比べ、HPFのない理想的な絶対速度応答の周波数特性に近い

予測WG報告書※に使用した記録での現行手法と改善手法のSvaの比較

緊急地震速報(警報)を公表した地震(気象庁震度観測点及び防災科学技術研究所強震観測網・M5.5以上)



短周期側は改善手法がやや過大になる場合あり
長周期側は現行手法が過大になる場合あり

予測WG報告書に使用した記録での現行手法と改善手法の

長周期地震動階級の比較

緊急地震速報(警報)発表(M5.5以上)

(気象庁震度観測点及び防災科学技術研究所強震観測網)

1秒台

| | | 改善手法 | | | | |
|------|-----|-------|------|-----|-----|-----|
| | | 階級0 | 階級1 | 階級2 | 階級3 | 階級4 |
| 現行手法 | 階級0 | 25847 | 305 | 0 | 0 | 0 |
| | 階級1 | 119 | 1985 | 99 | 0 | 0 |
| | 階級2 | 0 | 17 | 622 | 27 | 0 |
| | 階級3 | 0 | 0 | 3 | 111 | 3 |
| | 階級4 | 0 | 0 | 0 | 1 | 35 |

2秒台

| | | 改善手法 | | | | |
|------|-----|-------|------|-----|-----|-----|
| | | 階級0 | 階級1 | 階級2 | 階級3 | 階級4 |
| 現行手法 | 階級0 | 25879 | 204 | 0 | 0 | 0 |
| | 階級1 | 123 | 2020 | 84 | 0 | 0 |
| | 階級2 | 0 | 15 | 660 | 21 | 0 |
| | 階級3 | 0 | 0 | 3 | 120 | 7 |
| | 階級4 | 0 | 0 | 0 | 1 | 37 |

3秒台

| | | 改善手法 | | | | |
|------|-----|-------|------|-----|-----|-----|
| | | 階級0 | 階級1 | 階級2 | 階級3 | 階級4 |
| 現行手法 | 階級0 | 26446 | 164 | 0 | 0 | 0 |
| | 階級1 | 114 | 1588 | 55 | 0 | 0 |
| | 階級2 | 0 | 21 | 624 | 15 | 0 |
| | 階級3 | 0 | 0 | 8 | 110 | 1 |
| | 階級4 | 0 | 0 | 0 | 3 | 25 |

4秒台

| | | 改善手法 | | | | |
|------|-----|-------|------|-----|-----|-----|
| | | 階級0 | 階級1 | 階級2 | 階級3 | 階級4 |
| 現行手法 | 階級0 | 26736 | 125 | 0 | 0 | 0 |
| | 階級1 | 111 | 1426 | 41 | 0 | 0 |
| | 階級2 | 0 | 24 | 598 | 9 | 0 |
| | 階級3 | 0 | 0 | 7 | 82 | 1 |
| | 階級4 | 0 | 0 | 0 | 2 | 12 |

5秒台

| | | 改善手法 | | | | |
|------|-----|-------|------|-----|-----|-----|
| | | 階級0 | 階級1 | 階級2 | 階級3 | 階級4 |
| 現行手法 | 階級0 | 26937 | 98 | 0 | 0 | 0 |
| | 階級1 | 104 | 1340 | 29 | 0 | 0 |
| | 階級2 | 0 | 27 | 572 | 3 | 0 |
| | 階級3 | 0 | 0 | 7 | 52 | 0 |
| | 階級4 | 0 | 0 | 0 | 2 | 3 |

6秒台

| | | 改善手法 | | | | |
|------|-----|-------|------|-----|-----|-----|
| | | 階級0 | 階級1 | 階級2 | 階級3 | 階級4 |
| 現行手法 | 階級0 | 27106 | 67 | 0 | 0 | 0 |
| | 階級1 | 126 | 1259 | 29 | 0 | 0 |
| | 階級2 | 0 | 38 | 489 | 0 | 0 |
| | 階級3 | 0 | 0 | 8 | 50 | 0 |
| | 階級4 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 |

7秒台

| | | 改善手法 | | | | |
|------|-----|-------|------|-----|-----|-----|
| | | 階級0 | 階級1 | 階級2 | 階級3 | 階級4 |
| 現行手法 | 階級0 | 27290 | 63 | 0 | 0 | 0 |
| | 階級1 | 129 | 1157 | 22 | 0 | 0 |
| | 階級2 | 0 | 25 | 442 | 1 | 0 |
| | 階級3 | 0 | 0 | 5 | 40 | 0 |
| | 階級4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

全周期(1.6-7.8秒の最大値)

| | | 改善手法 | | | | |
|------|-----|-------|------|-----|-----|-----|
| | | 階級0 | 階級1 | 階級2 | 階級3 | 階級4 |
| 現行手法 | 階級0 | 25004 | 129 | 0 | 0 | 0 |
| | 階級1 | 135 | 2672 | 69 | 0 | 0 |
| | 階級2 | 0 | 21 | 869 | 20 | 0 |
| | 階級3 | 0 | 0 | 5 | 188 | 4 |
| | 階級4 | 0 | 0 | 0 | 1 | 57 |

- ・予測WG報告書で用いた記録の階級はすべて±1以内の変化
- ・手法の変更により、長周期地震動階級に変更が生じるのは1~2割程度(両者とも階級0を除く)
- ・全周期帯での長周期地震動階級について±1階級の変更があったものは、9%程度

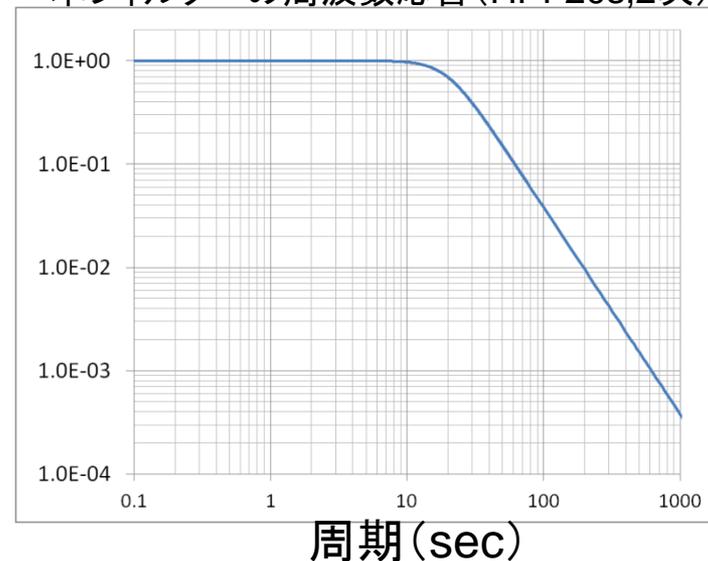
まとめ

- ・固有周期よりも短周期側が卓越する記録では、位相ズレによる残留絶対速度のため、現行手法は過大評価となる場合がある
- ・固有周期よりも長周期側が卓越する記録では、カットオフ周期の影響のため、現行手法は過小評価となる場合がある
- ・今回提案した改善により、より正確に絶対速度応答スペクトルを推定可能となる
- ・現行手法と改善手法による違いは、長周期地震動階級で見える場合は顕著ではない
- ・現在、気象庁ホームページで発表している長周期地震動に関する観測情報における絶対速度応答計算については、本年11月27日から本手法に変更することを予定している。

(参考)

周期20秒以上をカットする漸化式HPFについて

本フィルターの周波数応答(HPF20s,2次)



acc_t^{org} : 入力加速度時刻歴

acc_t^{HPF} : 出力(HPF後)の加速度時刻歴

y_t : 中間変数

a_1, a_2, b_1, b_2, G_0

: フィルターの定数(斎藤(1978)により算出)

下記の漸化式により、HPF後の加速度時刻歴を計算する

$$y_t = acc_t^{org} + a_1 \cdot acc_{t-1}^{org} + a_2 \cdot acc_{t-2}^{org} - b_1 \cdot y_{t-1} - b_2 \cdot y_{t-2}$$

$$acc_t^{HPF} = G_0 \cdot y_t$$

サンプリング周波数100Hzの場合のフィルターの定数

$$a_1 = -2.0 \quad b_1 = -1.995438545842$$

$$a_2 = 1.0 \quad b_2 = 0.995448925627$$

$$G_0 = 0.997721867867$$