

# 地震動距離減衰及び微動アレイに基づくサイト依存地盤增幅に関する研究

名古屋大学大学院 環境学研究科 都市環境学専攻  
博士課程前期課程 2年 護研究室 都築 和敏

## 1. はじめに

現在、東海地方では南海トラフ巨大地震の発生が懸念されている。建物に入力する地震動を特徴づける要因は震源特性、伝播経路特性、地盤增幅特性に大別される。この中でも、地盤增幅特性については表層まで含めた地盤構造により変化するため、サイトごとに個別の検討が必要である。地盤增幅特性は、長周期成分は深部地盤構造が主にその增幅特性を決定づけ、短周期成分は表層地盤がその增幅特性を決定づけるという特徴を持つ。

従来、深部地盤起因と考えられる長周期成分の地盤增幅特性はその地点固有の一定のものとされてきたが、近年、堆積盆地の地点においては変動するという指摘がされている。ゆえにより精度の高い建物設計用入力地震動を推定するには、この深部地盤起因の長周期帯域における地盤增幅特性の変動を適切に把握する必要がある。

一方で地盤增幅特性の短周期成分に影響する表層地盤は、サイトごとの地下構造の差異が大きいため、地盤增幅特性もサイトに依存して大きく変動する。そのため地盤增幅特性の短周期成分を評価するためには、まず各サイトの地下構造を適切に把握する必要がある。地下構造を把握する手法としては、直接地盤を掘削する方法が最も信頼性が高いとされるが、経費や時間の面から多用できるものではない。これに対し微動記録を用いる方法は比較的簡便かつ安価に行えるという特徴を持つ。そのような中、近年微動アレイ観測記録から地盤を伝播するレイリー波の位相速度を推定する優れた手法として CCA 法が開発され、現在も手法の検証が進められている。また、CCA 法は微動中の表面波を対象としたアルゴリズムであるため、表面波が相対的に少ないとされる比較的硬い地盤に対しては不利と考えられる。

以上のような背景から、本研究では地盤增幅特性について、長周期成分については地盤增幅特性の変動の把握を、短周期成分については地盤構造の推定手法である CCA 法の洪積丘陵地への適用性の検討を目的として検討を行う。ここで地盤增幅特性の変動については長周期成分まで十分なパワーを有している強震観測記録を用いる。また、微動アレイ観測については過去の地盤調査資料が多く蓄積されている名古屋大学東山キャンパスにおいて計測された記録を用いる。

## 2. 強震観測記録と名古屋大学東山キャンパスの概要

本研究で用いる強震観測記録を収録している大都市圏強震動総合観測ネットワークシステムの概要と、微動計測を行った名古屋大学東山キャンパスの地形の概要と過去に行われた地盤調査や地下構造探査の概要について概観する。地盤調査についてはキャンパスの中央部、中央北部に偏っていることを確認した。

## 3. 強震観測記録を用いた地盤增幅特性の変動に関する検討

### 3.1 分析方法

深部地盤起因とされる周期帶の地盤增幅特性の変動について、地震動予測手法の中でも経験的手法にあたる応答スペクトルの距離減衰式を用いて、各地点の強震観測記録から得られる応答スペクトルを比較する。応答スペクトルの距離減衰式は距離減衰式作成時に使用された強震観測記録に依存するが、それらの平均的なスペクトル特性を示す。ゆえに距離減衰式から得られる地表岩盤相当の応答スペクトルと任意の地域で得られた強震観測記録の応答スペクトルを比較すれば、当該地域の平均的な地盤增幅特性を抽出することができる。なお本検討では応答スペクトルの距離減衰式として式 (1) に示す Zhao et al. (2006) を用いる。式中  $M_w$  はモーメントマグニチュード ( $5.0 \leq M_w \leq 8.3$  を使用)、 $X$  は震源距離 ( $X \leq 300$  km を使用)、 $h$  は震源深さ ( $h \leq 162$  km を使用) である。 $a \sim e$  は周期ごとの係数である。 $F_R$ 、 $S_I$ 、 $S_S$ 、 $S_{SL}$  は地震のタイプを補正する周期ごとの係数で、地震タイプとしては、地殻内、プレート境界、スラブ内で発生する地震の地震動に有意な差がみられる。 $C_k$  は表層地盤の影響を表す係数である。

$$\ln SH = aMw + bX - \ln(X + c \cdot \exp(d \cdot Mw)) + e(h - h_c) \\ \delta_h + F_R + S_I + S_S + S_{SL} \ln(X) + C_k \quad (1)$$

### 3.2 検討に用いる強震観測記録

本検討には大都市圏強震動総合観測ネットワークシステム内の 6 つの強震観測網（愛知県、名古屋市、三重県、防災科学技術研究所 K-NET・KiK-net）の記録を使用する。このシステムの東海圏内の観測点で収集された強震観測記録のうち愛知県の県境からの震源距離 100 km 以内、気象庁マグニチュード 5.0 以上の 16 地震（表 1）について検討を行った。また本検討では、堆積平野である濃尾平野・岡崎平野上に位置する図 1 に示す観測点を対象とした。

表 1 検討に用いる地震の諸元

No.	発生日	発生時刻	$M_I$	$M_w$	震源深さ /km	震央北緯 /deg	震央東経 /deg	地震タイプ
1	2000/10/31	1:43	5.5	5.5	43	34.2983	136.32	スラブ内
2	2001/1/6	11:48	5.3	4.8	48	35.3866	137.1166	スラブ内
3	2001/2/23	7:23	5	4.9	32	34.7933	137.5483	スラブ内
4	2001/4/3	23:57	5.3	5.2	30	35.0233	138.0933	スラブ内
5	2001/8/25	22:21	5.3	4.9	10	35.1516	135.66	地殻内
6	2003/1/19	4:50	5.1	5.4	8	33.875	137.24	プレート境界
7	2004/1/6	14:50	5.2	5.2	40	34.215	136.7133	スラブ内
8	2007/4/15	12:19	5.4	5	16	34.79	136.4067	地殻内
9	2009/2/18	6:47	5.2	4.8	9	35.6616	136.3133	地殻内
10	2009/8/11	5:07	6.5	6.2	23	34.785	138.4983	スラブ内
11	2011/2/27	5:38	5.5	5.1	4	36.155	137.4533	地殻内
12	2011/2/27	2:19	5	4.8	4	36.1566	137.4566	地殻内
13	2011/3/15	22:31	6.4	5.9	14	35.3083	138.7133	地殻内
14	2011/8/1	23:58	6.2	5.8	23	34.7066	138.5483	スラブ内
15	2011/8/12	4:37	5.2	5	27	34.4083	138.0816	スラブ内
16	2011/12/14	13:01	5.1	5.1	49	35.355	137.2433	スラブ内

### 3.3 地盤増幅特性の変動幅

同程度の地盤増幅特性と考えられる観測点についてまとめて比較を行うために、各観測点を深部地盤の卓越周期が同程度である観測点ごとに6つのグループに分けて検討を行った。図2に濃尾平野、岡崎平野における各地盤卓越周期の応答スペクトル比を示す。なお岡崎平野については地盤卓越周期1~2 sと5~6 sに該当する観測点が存在しなかつたため図には表していない。濃尾平野、岡崎平野とともに、地盤卓越周期が1~2 sや2~3 s、3~4 sのグループでは地盤卓越周期に応じた周期で応答スペクトル比が卓越している傾向が認められる。また同一の地盤卓越周期のグループであっても応答スペクトル比の値はどのグループにおいても各周期で約10倍の幅をもって変動している。これは地震動予測手法の中でも用いる強震観測記録に大きく依存する経験的グリーン関数法などを使用する際の注意の必要性を示している。

### 4. 小規模アレイ観測による微動記録を用いた表層地盤構造推定手法に関する検討

#### 4.1 CCA 法の概要

CCA 法は図3に示すような半径  $r$  の円周上に設置された  $N$  個の上下動センサーの記録を用いる。 $j$  番目のセンサーで時刻  $t$  に得られる記録を  $d_j(t)$  とする。各センサーの記録を方位平均して得られる波形（式(2)）と  $\exp(-i\theta)$  の重み ( $i$  は虚数単位)をつけて方位平均した複素波形（式(3)）から、それぞれパワースペクトルを計算すると、その相互比  $\rho_{CCA}(f)$  はレイリー波の位相速度と式(4)により関連付けられる。この際に、地盤は水平成層であることとレイリー波の基本モードのみが卓越することを仮定している。式中  $J_m(0)$  は第1種  $m$  次ベッセル関数である。この式(4)から位相速度  $c(f)$  を逆算する。

$$d_{ave}(t) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N d_j(t) \quad (2)$$

$$d_{wave}(t) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N d_j(t) \exp(-i\theta) \quad (3)$$

$$\rho_{CCA}(f) = \frac{J_0^2(2\pi fr/c(f))}{J_1^2(2\pi fr/c(f))} \quad (4)$$

#### 4.2 名古屋大学東山キャンパス内の微動計測概要

微動アレイ計測を行った地点を過去に行われた PS 検層、L字アレイ探査地点と併せて図4に示す。主にキャンパス中央北部の地点で半径 60 cm のアレイ計測を行った。図中 A1、B1、C1、D1 地点における計測は減災館の前の地点で行われ、他の地点は1計測1地点で行われた。PS 検層は減災館前と A5 地点について計測地点のごく近傍で得られているが、他の地点については少々距離のある場所で PS 検層データが得られている。過去に L 字アレイ探査が行われた地点も近傍にある地点とそうでない地点が存在する。図5にセンサー配置を示す。また、追加で別日に D1 地点近傍にてアレイ半径 60 cm、3 m、6 m のアレイ計測を行った。

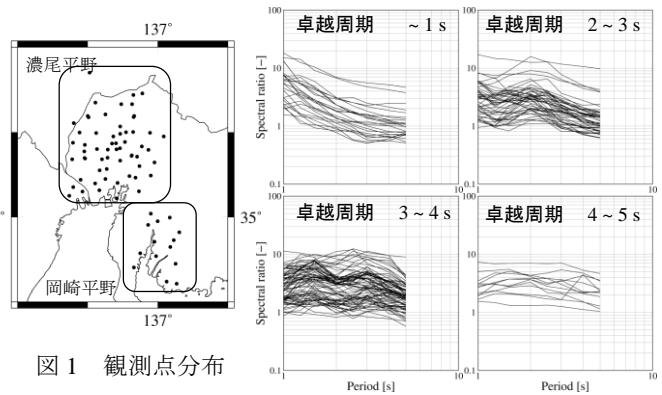


図1 観測点分布

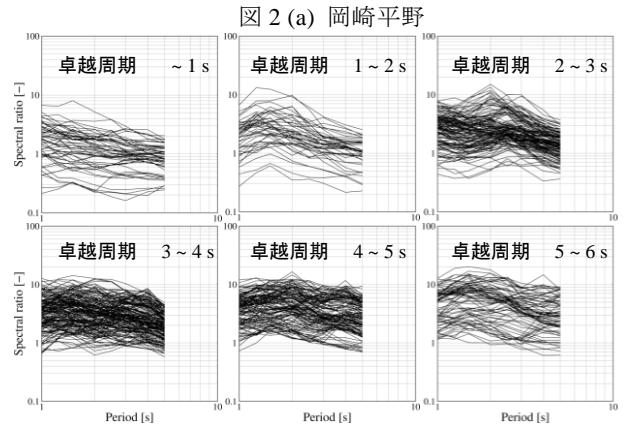


図2(a) 岡崎平野

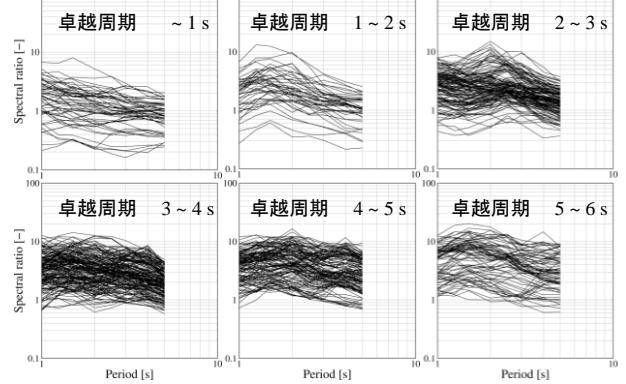


図2(b) 濃尾平野

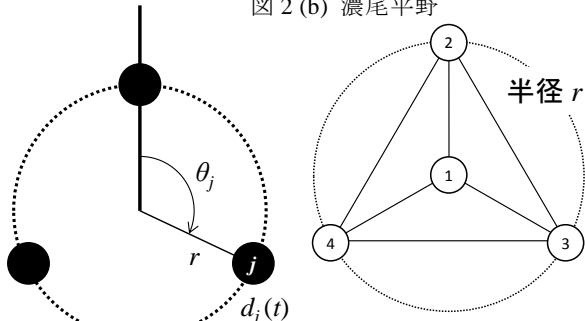


図3 CCA 法の座標図

図5 アレイセンサー配置

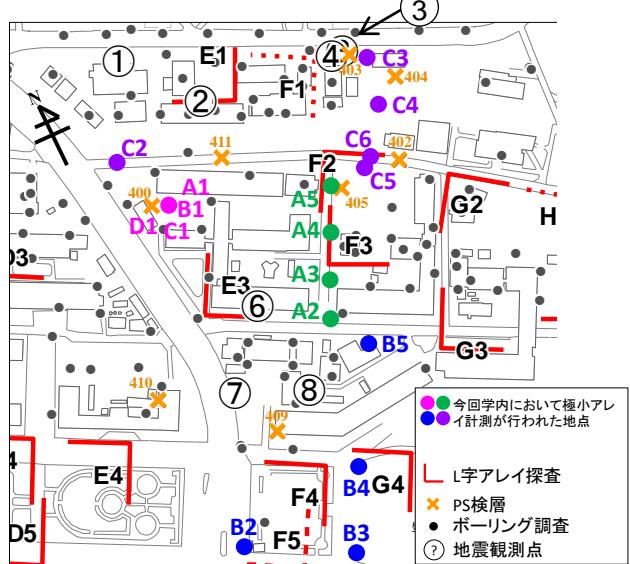


図4 微動アレイ計測地点

#### 4.3 半径 60cm の円形アレイの微動記録の検討

微動記録から CCA 法を用いて推定した位相速度の分散曲線を最も近いと考えられる地点の PS 検層から計算した理論分散曲線と併せて図 6 に示す。特に減災館前の地点については 4 地点の結果をまとめて示す。減災館前で行われた A1、C1、D1 においては約 5 Hz よりも高振動数の範囲で理論分散曲線とよく対応する位相速度を推定できているが、B1 地点については約 10 Hz よりも高振動数で位相速度を推定できている。その他の地点ではおよそ 5~15 Hz 以上の振動数で位相速度を推定できている。理論分散曲線との対応は PS 検層が行われた地点が近傍であればよい対応を示すが、近傍がない地点は対応が悪い。減災館前の地点では波長に換算すると A1 では 55.5 m、B1 では 20.2 m、C1 では 60.0 m、D1 では 65.9 m とアレイ半径の数十倍~百倍程度までの波長で位相速度を推定できていることが確認できる。

#### 4.4 CCA 法の適用限界に関する検討

長らによると CCA 法の適用範囲である最小の振動数は、微動アレイ観測により得られた微動記録の NS 比（ノイズシグナル比）に依存する。さらに長らは、位相速度の推定誤差をある程度に抑える NS 比の上限値を導入し、微動記録の NS 比がこれを下回るような振動数では位相速度を精度よく推定できるとしている。図 7 に減災館前の 4 地点における NS 比とその上限値を示す。概ね NS 比がその上限値を下回っている振動数の範囲では分散曲線は PS 検層と対応していることが確認できる。

さらに他探査・手法との比較を行う。図 8 に減災館前の地点と、過去に L 字アレイ探査が近傍で行われている地点である A4・A5・C5・C6 地点について、CCA 法・SPAC 法を用いて計算した分散曲線と L 字アレイ探査結

果を理論分散曲線と併せて示す。この内安定した NS 比が得られている A1・C1・D1・A4・C6 地点については CCA 法が SPAC 法に比べてより長い波長まで位相速度を推定できていることがわかる。これに対し B1・A5・C5 地点は SPAC 法と同程度の波長までの位相速度しか推定できていないことがわかる。また各地点で L 字アレイ探査結果とも滑らかに接続する分散曲線となっていることからも CCA 法を用いて計算した分散曲線の妥当性が確認できる。

#### 4.5 洪積丘陵地への適用性の検討

CCA 法の洪積丘陵地への適用性を検討するため、減災館前地点においてアレイ半径を 60 cm、3 m、6 m と変化させて計測を行った微動記録を用いて検討を行った。図 9 に各半径のアレイで得られた分散曲線を併せて示す。半径の大きいアレイから得られた分散曲線は高振動数側で位相速度が大きくなってしまっていることがわかる。そこで各アレイにおいて NS 比と上限値の関係から適用

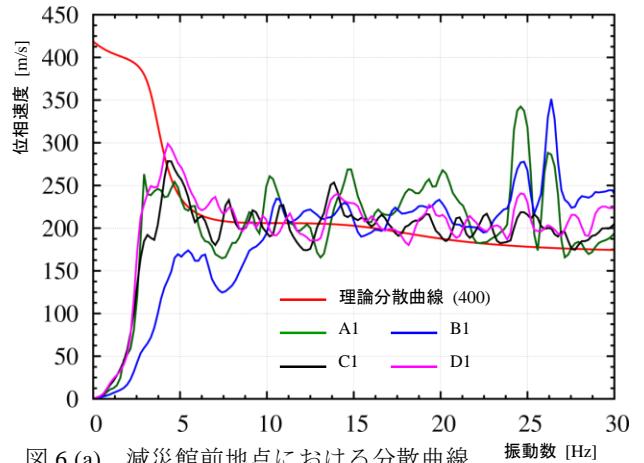


図 6 (a) 減災館前地点における分散曲線

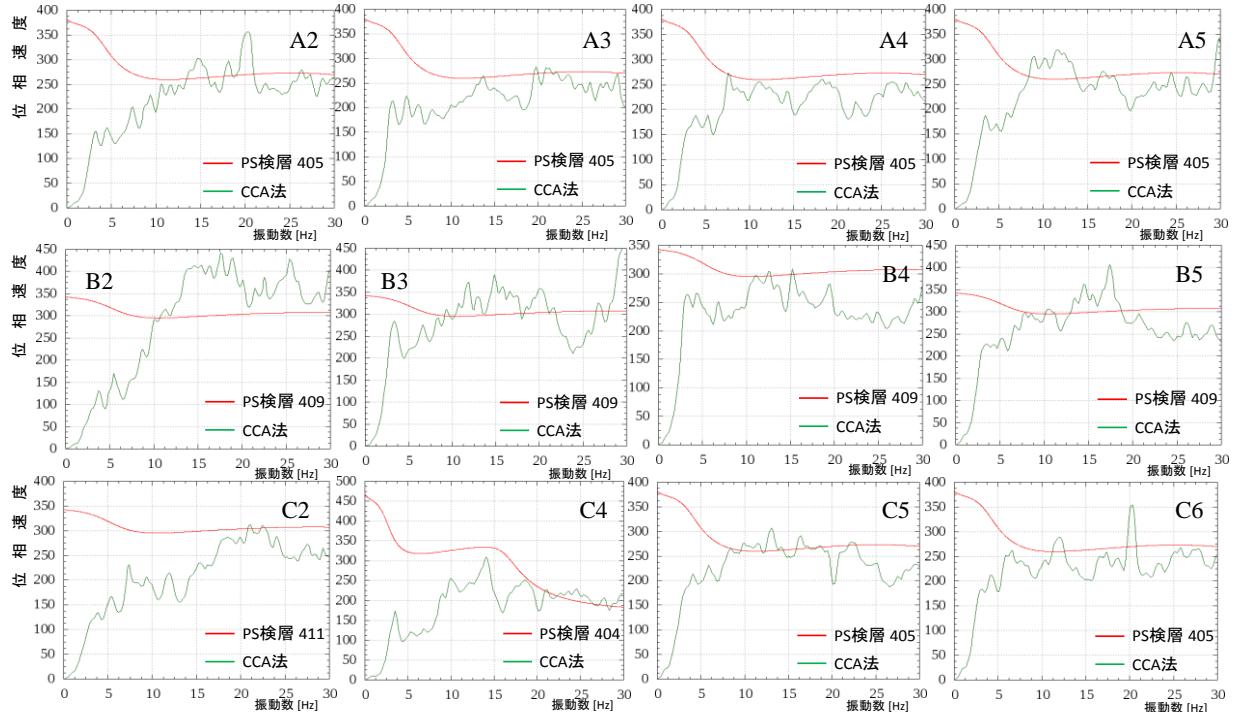


図 6 (b) その他の地点における分散曲線

範囲であると考えられる振動数を抽出し理論分散曲線と併せて図 10 に示す。それぞれのアレイ半径の分散曲線は滑らかに接続しており、理論分散曲線とも概ね対応する分散曲線が得られている。半径 6 m アレイではアレイ半径の約 30 倍、半径 3 m アレイでもアレイ半径の約 30 倍の波長まで位相速度を推定できていることがわかる。追加計測では半径 60 cm アレイではアレイ半径の約 60 倍の波長までしか位相速度を推定できていない。ここで地盤深さと分散曲線を関連付けるために式 (5) に示す紺野 (1997) の提案する簡易的な手法を用い、図 10 における代表的な点における地盤深さを算出し併せて示す。

$$D(f) = 0.5c(f)/f \quad (5)$$

図より、半径 6 m のアレイにより得られた分散曲線は最大で地盤深さ 40~80 m 程度まで、さらに位相速度 450 m/s 程度まで地盤構造を推定できていることがわかる。ここからこの地点の工学的基盤面の深さまで地盤構造を推定できていることがわかる。さらに極表層地盤についても半径 60 cm アレイにより理論分散曲線とよく対応する分散曲線が得られていることから、CCA 法により半径 60 cm、3 m、6 m の円形アレイを組んで微動計測を行うことで極表層から工学的基盤までの地盤構造の推定が可能であると考えられる。

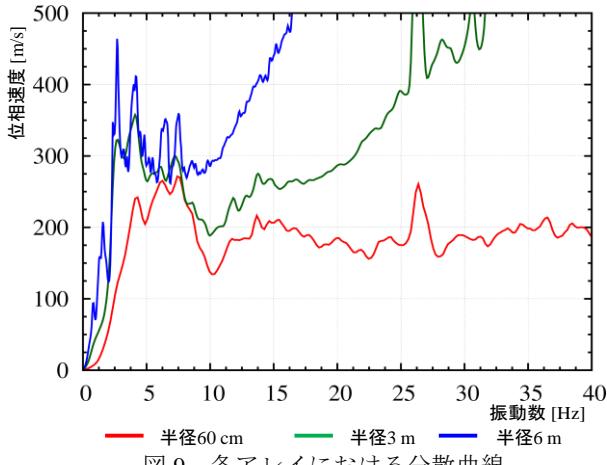


図 9 各アレイにおける分散曲線

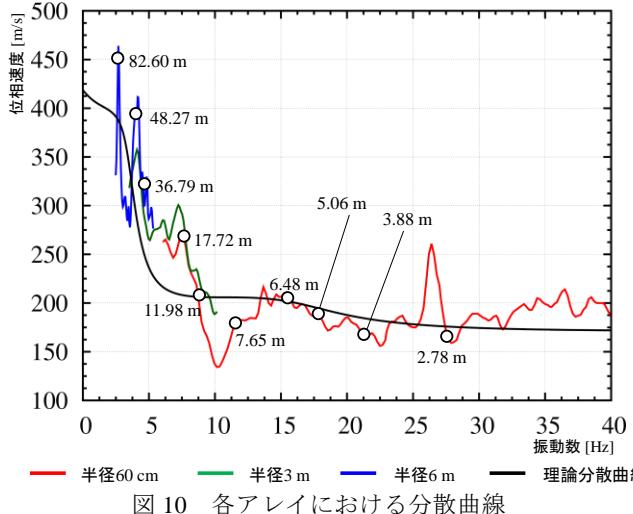


図 10 各アレイにおける分散曲線

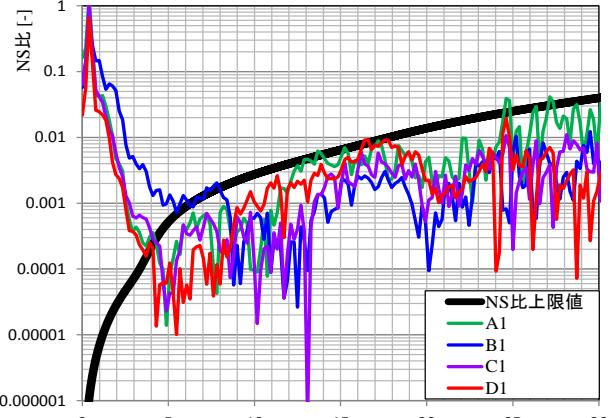


図 7 減災館前地点における NS 比とその上限

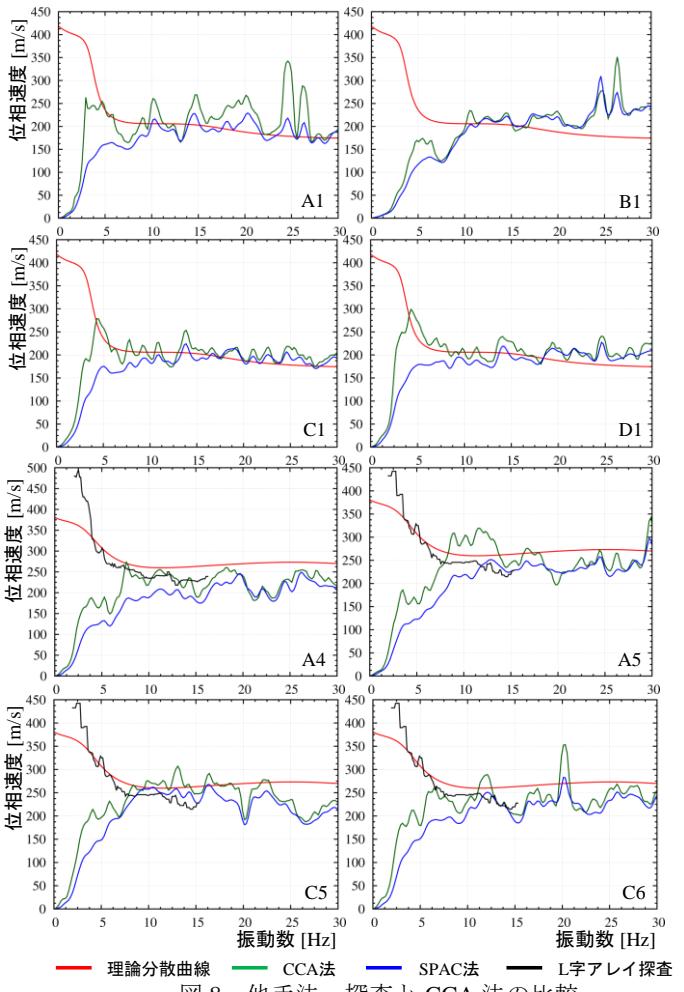


図 8 他手法・探査と CCA 法の比較

## 5.まとめ

本論では地盤増幅特性について、長周期成分についてはその変動について、短周期成分については地盤増幅特性を検討する際の基礎情報となる表層地盤構造の推定手法である CCA 法について検討を行った。長周期成分については約 10 倍程度の幅をもって地盤増幅特性が変化すること、短周期成分については洪積丘陵地上に立地する名古屋大学東山キャンパスにおいては半径 6 m のアレイを組むことにより CCA 法を用いて工学的基盤まで十分に地盤構造を推定することが可能であることを示した。