

論文 超音波法を用いたコンクリート内部の音速分布測定による圧縮強度推定方法の提案

森濱 和正^{*1}・山口 順一郎^{*2}・山口 達夫^{*3}・奥 紀仁^{*4}

要旨：新設の鉄筋コンクリート構造物の性能を確認するために、非破壊試験によって構造物を直接検査する方法を検討している。その内、超音波法による強度推定方法を提案する。ここで提案する方法は、超音波法を用いてコンクリート内部の音速分布を推定することにより圧縮強度を推定するものである。本方法による推定強度は、コンクリートの強度特性を表していることが明らかになった。

キーワード：非破壊試験，超音波法，音速分布，コンクリート強度

1. はじめに

新設コンクリート構造物の性能・品質を竣工時に確認しておくことは、コンクリート構造物の寿命予測などにとって重要である。

ところが現在、竣工時の検査では、通常、出来形および表面状態を除いて、構造物の性能・品質が直接検査されてはならず、新設時の構造物の性能・品質はほとんど確認されていないのが現状である。

そのため、筆者らは、新設の鉄筋コンクリート構造物を非破壊試験および局部破壊試験によって竣工時に検査できる方法の確立をめざして研究を行なっている。非破壊試験で検査できるようになれば、構造物を傷つけることなく性能・品質の情報が直接得られるようになり、また、経時的に調査を継続することにより維持管理にも役立てることができるようになる。

ここでは、超音波法を用いた強度推定方法について報告する。

これまで、超音波法による強度推定について数多くの実験が行われている。しかし、構造物のコンクリート強度を推定するためには、構造物のコンクリート音速を求める必要があるが、

そのための研究は皆無であった。

そこで筆者らは、まず構造物コンクリートの表面から内部に至る音速の分布を推定する方法を提案した¹⁾。この方法により、耐久性に大きな影響を及ぼす表層の緻密性と同時に、コンクリート内部の音速を利用して強度を推定することを、いくつかの供試体、構造物で試みており、ほぼ推定できることを明らかにした²⁾。ただし、これまで実験したコンクリートの呼び強度はほとんど 24 のものであるなど、実験条件は限られている。

今回、強度レベルの異なる大型の供試体による強度推定実験を行なったので、その結果を報告する。

2. 強度推定方法の概要

強度推定方法については既に提案している¹⁾。以下では、本論文で必要な最小限度のことについて記述する。

2.1 音速分布の推定方法

強度推定に用いるコンクリート内部の音速分布は、表面走査法によって伝搬時間を測定し、変分法によって伝搬経路を求めることによって

*1 土木研究所技術推進本部構造物マネジメント技術チーム 主任研究員 (正会員)

*2 土木研究所技術推進本部構造物マネジメント技術チーム 交流研究員 (正会員)

*3 (株)東横エルメス (正会員)

*4 (株)八洋コンサルタント

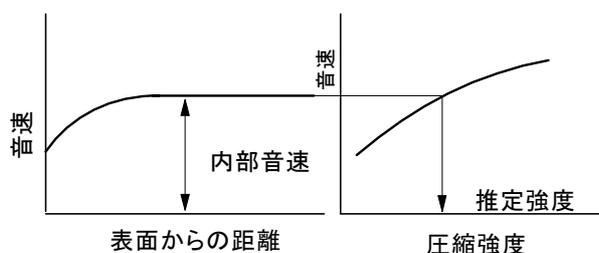
推定する。表面走査法とは、同一平面上で探触子間隔を変化させながら伝搬時間を測定する方法である。一般にコンクリート表面は内部より品質が劣っているので、音速は表面が遅く内部が速い。そのため、表面に設置した探触子間の超音波の最速経路はコンクリート内部を湾曲しながら伝搬するものと仮定して音速分布を求める。

2.2 強度の推定方法

上記方法により図-1(a)の音速分布が得られる。圧縮強度は、図-1(a)の一定となった部分の音速(以下、「内部音速」と呼ぶ)を用い、図-1(b)の圧縮強度と音速の関係から、内部音速に一致する強度を求めることによって推定する。図-1(b)は、コンクリート打設時に圧縮強度試験用の円柱供試体を作製し、構造物コンクリート内部の状態に近づけるために封かん養生し、強度試験前に円柱供試体の長手方向を透過法によって音速を測定し、強度と音速の関係を求めるものである。

2.3 強度の材齢補正

構造物を調査する材齢は、施工条件などの制



(a)内部の推定音速分布 (b)音速と強度の関係
図-1 コンクリート内部の音速分布と強度推定

約を受けるため、28日基準材齢のときに調査を実施することは難しい。調査材齢が異なっても28日強度が得られるように、次のように補正することを考えた。

強度は式(1)の双曲線関数で発現するものと仮定する。

$$f_{ct} = t / (1/a + t/b) \quad (1)$$

ここに、 f_{ct} : 材齢 t 日の圧縮強度、 a : $t=0$ の時の接線勾配、 b : 最終($t=$)到達強度を表わす係数。

材齢 t 日の強度を 28 日強度 f_{c28} に補正するために、式(1)の右辺の分子、分母に f_{c28} を掛けることによって式(2)を得る。

$$f_{c28} = f_{ct} (+ \cdot t) / t \quad (2)$$

ただし、 $= f_{c28}/a$ 、 $= f_{c28}/b$ 。

材齢補正係数、を求めることにより、式(2)で材齢 t 日に求めた強度を 28 日強度に補正できる。

3. 実験方法

3.1 供試体の種類

実験に使用した供試体は、図-2のL型供試体、3体である。3体の違いおよびL型の壁と底版は、表-1のようにコンクリートの種類が異なっている。コンクリートの種類のNは普通ポルトランドセメント、BBは高炉セメントB種であり、数字は呼び強度を表している。

供試体作製時に 100mm×200mmの円柱供試体を作製し、所定材齢まで水中養生および封かん養生を行い、音速を測定したあと強度試験を行なった。

表-1 供試体の種類とコンクリートの配合

供試体 名称	部位	コンクリート の種類	粗骨材 最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	空気量 (%)	水セメント 比 (%)	細骨材 率 (%)	単位量 (kg/m ³)				
								水	セメント	粗骨材	細骨材	混和剤*
A	壁	N18	25	8	4.5	63.0	44.9	158	251	1026	824	2.69
	底版	BB18	40			59.0	43.0	148	251	1070	799	2.69
B	壁	N27	25			49.5	43.2	158	320	1023	771	3.42
	底版	BB18	40			59.0	43.0	148	251	1070	799	2.69
C	壁	N40	25			38.0	41.0	159	419	1015	696	4.48
	底版	BB27	40			45.5	41.3	148	326	1064	740	3.49

* AE減水剤

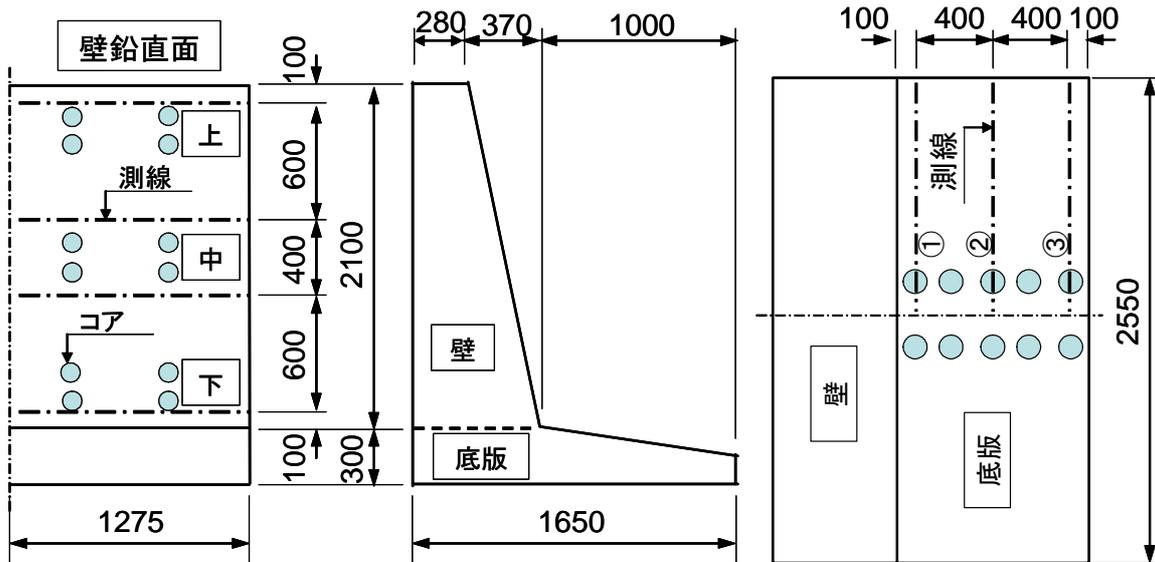


図-2 供試体の形状・寸法，超音波の測線，コア採取位置

3.2 表面走査法による伝搬時間の測定方法

表面走査法による測線は，壁の鉛直面は上段，下段と，中段はコア採取位置の上下とした。底版は，壁近く，先端近くとその中間とした。探触子間隔は，300mmまで50mmピッチ，1200mmまで100mmピッチとした。測定した材齢は，1，2，4週，3，6箇月，1年である。

伝搬時間の測定結果から文献 1)の解析方法により音速分布を求めた。

3.3 コアの試験

コアは図-2の位置で，材齢1，2，4週，3，6箇月，1年で採取し，半径方向の透過音速を表面から10mmピッチで測定したあと，強度試験を行なった。

4. 実験結果

4.1 円柱供試体の音速，強度試験結果

封かん養生した円柱供試体の強度と材齢の関係，強度と音速の関係を図-3，図-4に示す。強度と材齢の関係を式(1)で回帰し，その結果から式(2)の材齢補正係数を求めた。また，強度と音速の関係を式(3)で回帰し，強度推定に用いた。

$$f_c = a \cdot \exp(b \cdot V) \quad (3)$$

ここに， f_c ：圧縮強度(N/mm²)， V ：音速(m/s)， a ， b ：回帰係数である。

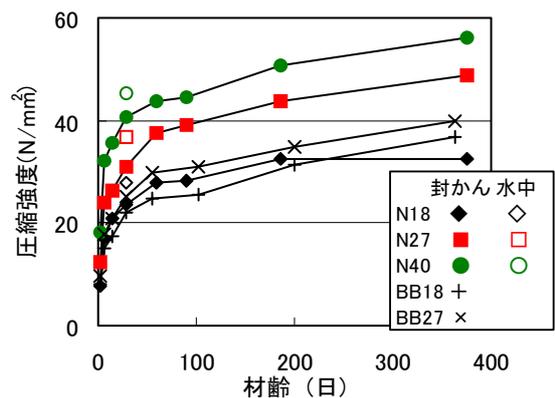


図-3 材齢と圧縮強度の関係

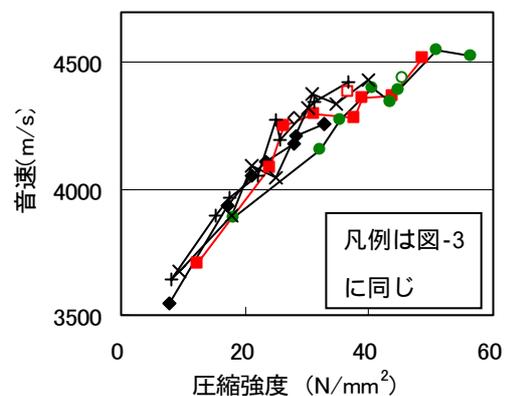


図-4 音速と強度の関係

4.2 コアの音速，強度試験結果

コアの半径方向の透過音速測定結果を図-8, 9に示す。詳細については次節でふれる。

強度と材齢の関係は図-5 および 6 のとおりであり，図-3 の円柱供試体の結果とほぼ同じである。水中養生強度と封かん養生強度またはコア強度を比較すると，図-7 のように封かん養生強度とコア強度はほぼ同じであり，水中養生強度

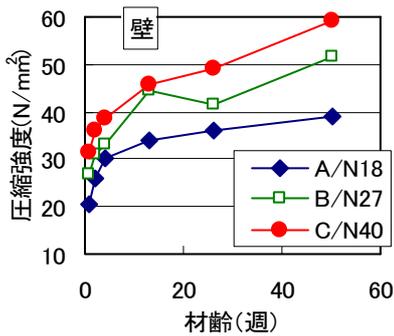


図-5 コア強度と材齢の関係（壁）

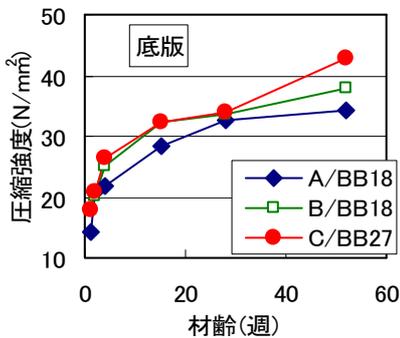


図-6 コア強度と材齢の関係（底版）

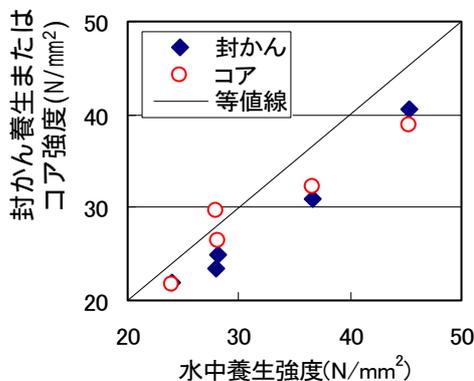


図-7 封かん養生強度，コア強度と水中養生強度の関係

より 10%程度小さくなっている。この結果より，強度推定に封かん養生した供試体を用いることはほぼ妥当と考えられる。

4.3 音速分布の推定結果

音速分布の推定結果を図-8, 9に示す。図中の記号は，コアの半径方向の透過音速である。底版の推定した音速分布とコアの透過音速はよく一致しており（図-9），打設面からの音速分布の推定はほぼ妥当と考えられる。

壁のコアの透過音速は（図-8），音速分布を推定するときの仮定のとおり，表面は遅く内部ほど速くなり，表面から 20~30mm 内部からほぼ一定になる傾向がある。この結果に対し，表層の音速分布および内部音速は，コアの透過音速よりやや大きい傾向がある。この理由については後述する。

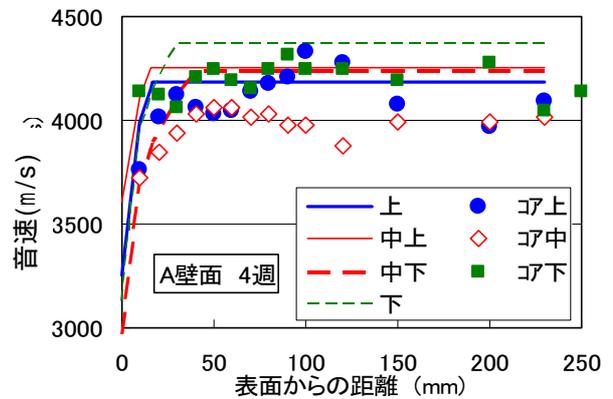


図-8 推定音速分布とコア音速の比較（壁）

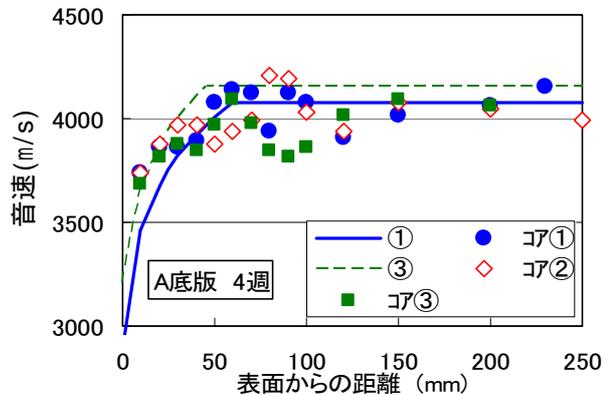


図-9 推定音速分布とコア音速の比較（底版）

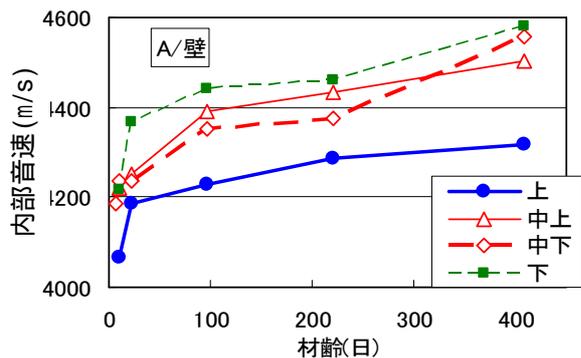


図-10 内部音速と材齢の関係（壁）

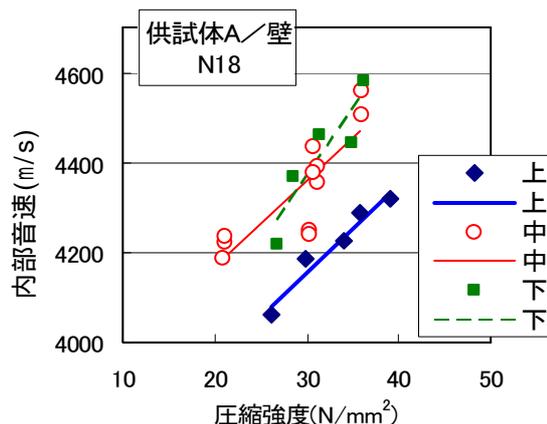


図-12 内部音速とコア強度の関係（壁）

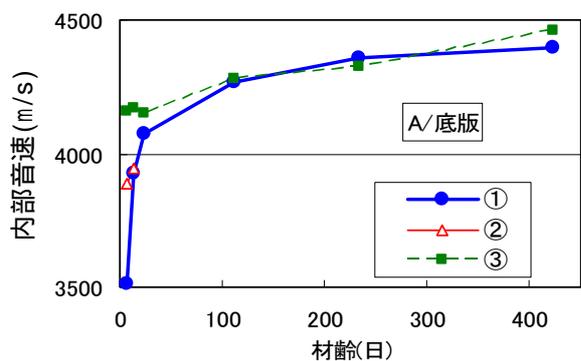


図-11 内部音速と材齢の関係（底版）

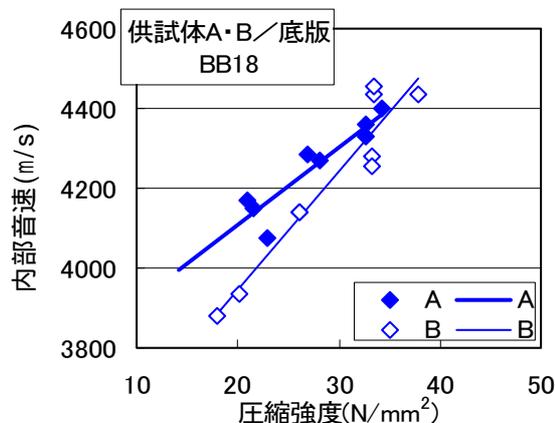


図-13 内部音速とコア強度の関係（底版）

強度推定には内部音速を使うことから、内部音速と材齢の関係を図-10, 11に、内部音速とコア強度の関係を図-12, 13に示す。

図-10, 11は、図-3や図-5, 6の円柱、コア強度と材齢の関係と類似している。図-12, 13の直線は、内部音速とコア強度の関係を測定位置ごとに直線で回帰した結果であり、高い相関関係がある。図-12の壁の結果は、コア強度に対して内部音速は下部ほど速くなっている。これは、下部ほどよく充填されており、強度が増加することと一致している。

これらの関係は、内部音速がコンクリートの一般的な強度特性を表しており、強度を推定できる可能性を有していることを示している。

4.4 強度推定結果

強度を推定した結果が図-14, 15である。コア強度と比較してある。底版は両者がよく一致しており、打設面から測定する場合、提案する方

法により強度推定できる。

壁の推定強度は、コア強度より大きく推定している場合が多い。図-12より、測定位置によって内部音速が異なっていたことから、図-14の結果を測定位置ごとに原点を通る直線で回帰して傾きを求めた。その傾きと測定位置の関係は、図-16のようになった。上段の傾きはほぼ1になっており、推定強度はコア強度にほぼ一致していることを示している。

しかし、中段、下段は傾きが大きくなっており、推定強度はコア強度より大きく推定している。この原因に、圧密効果と材料分離の影響が考えられる。圧密効果については、強度増加を本方法による音速の増加として考慮できる。しかしながら材料分離については、粗骨材の沈降によって音速が速く測定されることになる。そのため、強度を推定するに当たってはどの位置

で測定すべきかを検討する必要がある。

そこで図-16の結果より、壁状あるいは柱状の部材のように打設高さが高く、側面から測定する構造物の場合の測定位置は、打設面から200～300mmの位置で測定すると、コア強度に一致する推定強度が得られるものと考えられる。

5. まとめ

表面走査法により伝搬時間を測定することによってコンクリート内部の音速分布を推定し、内部音速から強度推定を行なった。この結果から次のことが明らかになった。

- (1) 内部音速は、材齢の進行に伴い増加する、壁状部材のように上下の強度差と同様に音速差も推定できるなど、強度特性と同様の傾向を有している。経時変化は、1年までの結果では、強度発現性状をよく推定できることがわかった。
- (2) 打設面の伝搬時間測定結果から推定した強度は、コア強度によく一致しており、本方法による強度推定方法が妥当であることを確認した。
- (3) 壁の強度推定結果は、上下の強度差が大きく現れ、コア強度よりも大きく推定されたが、上段の推定結果はコア強度とほぼ一致した。壁のように打設高さが高く、側面から測定する構造物を本方法によって強度推定する場合、打設面近くで測定し、強度推定を行えばよいことがわかった。

参考文献

- 1) 森濱和正：非破壊検査工学叢書「非破壊検査の最前線」第3巻2章2.1.4超音波法の今後の展開,(社)日本非破壊検査協会,pp.2-17～21,2002.10
- 2) 森濱和正ほか：超音波法による構造物コンクリートの強度、緻密性の推定,コンクリート工学年次論文集,Vol.25,No.1, pp.1739-1744, 2003.7

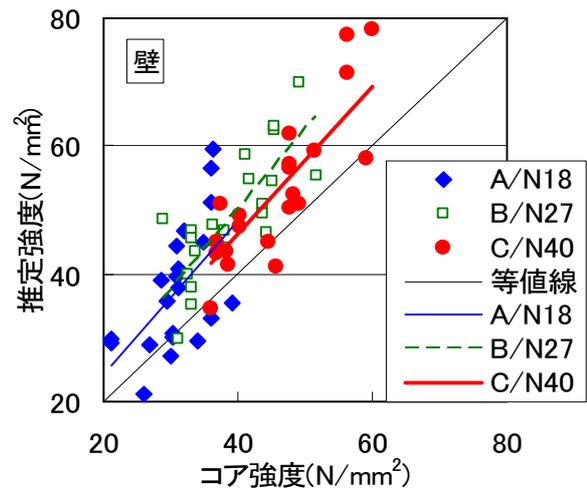


図-14 推定強度とコア強度の比較（壁）

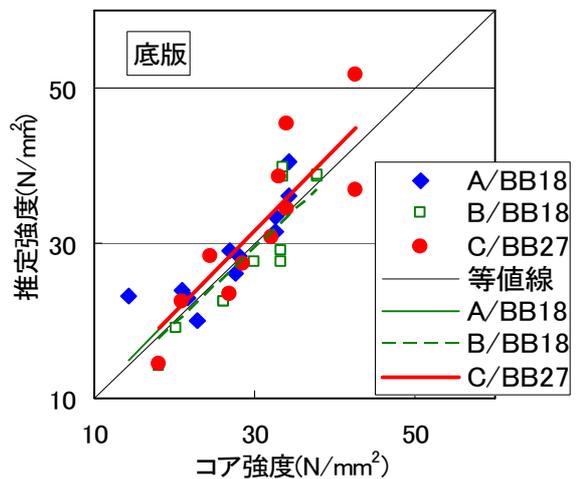


図-15 推定強度とコア強度の比較（底版）

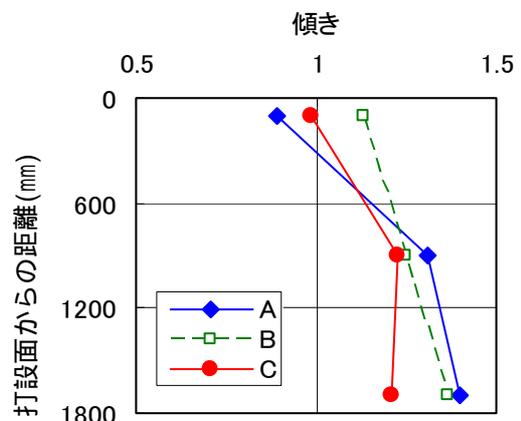


図-16 測定位置ごとの推定強度