

L 字形アレイ微動観測の空間自己相関法 への適用性について

紺野克昭^{1†}, 鈴木貴博², 蔵田孝一³

¹正会員 工博 芝浦工業大学助教授 工学部土木工学科 (〒108-8548 東京都港区芝浦 3-9-14)

²芝浦工業大学大学院生 建設工学専攻 (〒108-8548 東京都港区芝浦 3-9-14)

³東興建設株式会社 (元芝浦工業大学生)

表層 30m の平均 S 波速度 (V_{s30}) と地盤の増幅特性には良い相関があることが指摘されている。この V_{s30} を推定する方法の一つとして、微動に含まれるレイリー波の位相速度を用いる方法がある。この位相速度を推定する方法には、微動のアレイ観測を行い、この記録に対して空間自己相関 (SPAC) 法を適用する方法がある。通常、SPAC 法では、センサーを円の中心と円周上に等間隔に置く必要がある。しかし、L 字形に設置したアレイ観測でも、適用波長に注意すれば比較的精度良く位相速度が推定できることが理論的に示されている。そこで、本研究では、横浜市が実施している強震動観測 150 地点のうち港北区、鶴見区の 24 地点で L 字形アレイ観測を行い、その適用性の検討を行う。

Key Words: microtremor, array observation, spatial auto-correlation method, Rayleigh wave, phase velocity

1. はじめに

基本モードレイリー波の波長 40m の位相速度と表層 30m の平均 S 波速度 V_{s30} とには比較的近い値を示すことが指摘されている^{1), 2)}。一般に、地盤の揺れやすさとこの V_{s30} とには、概ね逆比例の関係があることが指摘されている³⁾。また、欧米においては V_{s30} を耐震設計における地盤種別の分類や地震荷重の設定に利用する動きがあり、今後 V_{s30} は世界標準的な指標として耐震設計に用いられることが予想される。

したがって、常時微動のアレイ観測からレイリー波の位相速度を推定する簡便な方法を開発することは、耐震工学、地震防災上、非常に重要と言える。

2. レイリー波の位相速度と V_{s30} の関係

横浜市の高密度強震計ネットワーク 150 地点では S 波速度検層が行われており、これらのデータからレイリー波の基本モードの位相速度と V_{s30} の関係

を調べる。図-1 にレイリー波の波長 40m における位相速度 C_{40} と S 波速度検層から得られた平均 S 波速度 V_{s30} の関係を示す。なお、P 波速度は S 波速度の経験式⁴⁾を用いている。 C_{40} と V_{s30} は比較的一致していることが分かる。したがって、微動から C_{40} を推定できれば、任意の地点での V_{s30} の推定が可能となる。

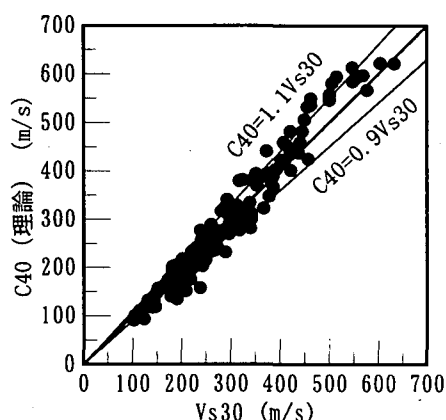


図-1 横浜市 150 地点での C_{40} (理論)と V_{s30} の関係

[†] 現在、右記へ出向中：鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)

3. 微動を用いた位相速度の推定方法

微動のアレイ観測から位相速度を推定する方法には周波数-波数解析法 (F-K 法) と空間自己相関法 (SPAC 法) がある。両者には一長一短があるが、本研究では、理論が比較的簡単で、小規模なアレイ観測でも比較的長周期のレイリー波まで検出できる SPAC 法を使用する。

通常、SPAC 法は円の中心と円周上に等間隔にセンサーを配置して得られた微動記録に対して適用される⁵⁾。一般に、アレイ半径 r で検出できるレイリー波の波長は $2r \sim 10r$ 程度である⁶⁾。したがって、波長 40m のレイリー波を検出するには、4~20m のアレイ半径が必要になる。しかし、この程度のアレイ観測でも観測場所を確保することは比較的困難である。この問題を解決する方法として、L 字形のアレイ観測記録を SPAC 法に適用することが提案されている⁷⁾。以下では、この提案方法を L-SPAC 法と呼ぶことにする。L-SPAC 法は、T 字路や十字路の歩道部での適用が可能であるので、観測場所の確保は格段に容易となる。ただし、上述の様に通常の SPAC 法の適用波長範囲は $2r \sim 10r$ 程度であるが、L-SPAC 法では $3.4r$ 以上である。ただし、微動が四方八方から到来している場合は、通常の SPAC 法と同様に $2r$ 以上となる。なお、上限については今後の検討課題となっている。

図-2 に L 字形のアレイ配置図を示す。アレイ半径 r 、角振動数 ω における観測位相速度 $c(\omega)$ は以下の計算から求めることができる。

$$c(\omega) = \frac{\omega r}{J_0^{-1} \left(\frac{\text{Re}[\text{coh}_{01}(r, \omega) + \text{coh}_{02}(r, \omega)]}{2} \right)} \quad (1)$$

ここで、 $\text{coh}_{0i}(r, \omega)$ はセンサー 0 とセンサー i とのコヒーレンス、 $J_0^{-1}(\cdot)$ は第 1 種 0 次のベッセル関数の逆関数である。

4. L-SPAC 法の適用

港北区 (10 地点) と鶴見区 (14 地点) の強震観測点で L 字形アレイ微動観測を実施した (図-3)。アレイ半径は 5, 10, 15m の 3 通りとし、アレイ半径毎にサンプリング周波数 200Hz で約 5 分間 (サンプル

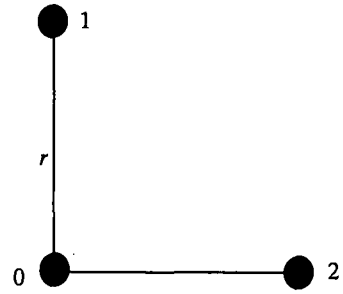


図-2 L 字形のアレイ配置図 (●: センサー)

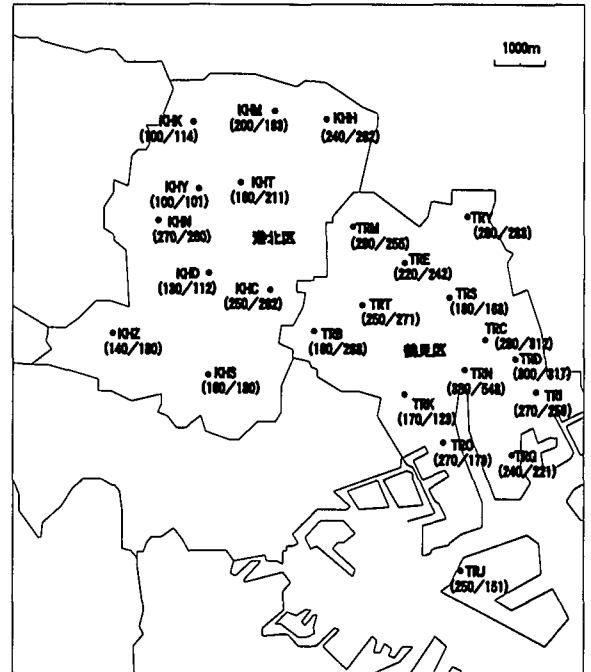


図-3 微動観測点、()内の数字は C40(微動)/Vs30

数: 65,536 個) の微動を記録した。コヒーレンスの算出は、20.48 秒間を半分ずつ重なるように 19 区間取り出し、バンド幅 0.5Hz の Parzen ウィンドウを用いて行っている。

図-4 に各観測点の観測位相速度を示す。観測位相速度はアレイ半径毎に印を変えて表示してある。図中の曲線は S 波速度検層から得られるレイリー波の理論位相速度を示している。図中の水平直線は S 波速度検層から得られた V_{s30} を示している。右下がりの直線は波長 40m の等波長線が示してある。したがって、この等波長線と観測位相速度の交点が C40 (微動) となるが、実際には観測位相速度にはばらつきがあるため、どこを交点とするかを判断するのは困難である。今回は、これらの交点を概略的に読み取り、★印で示す。この★印は水平直線に近いほど、推定精度がよいと言える。なお、実際の利用状況を

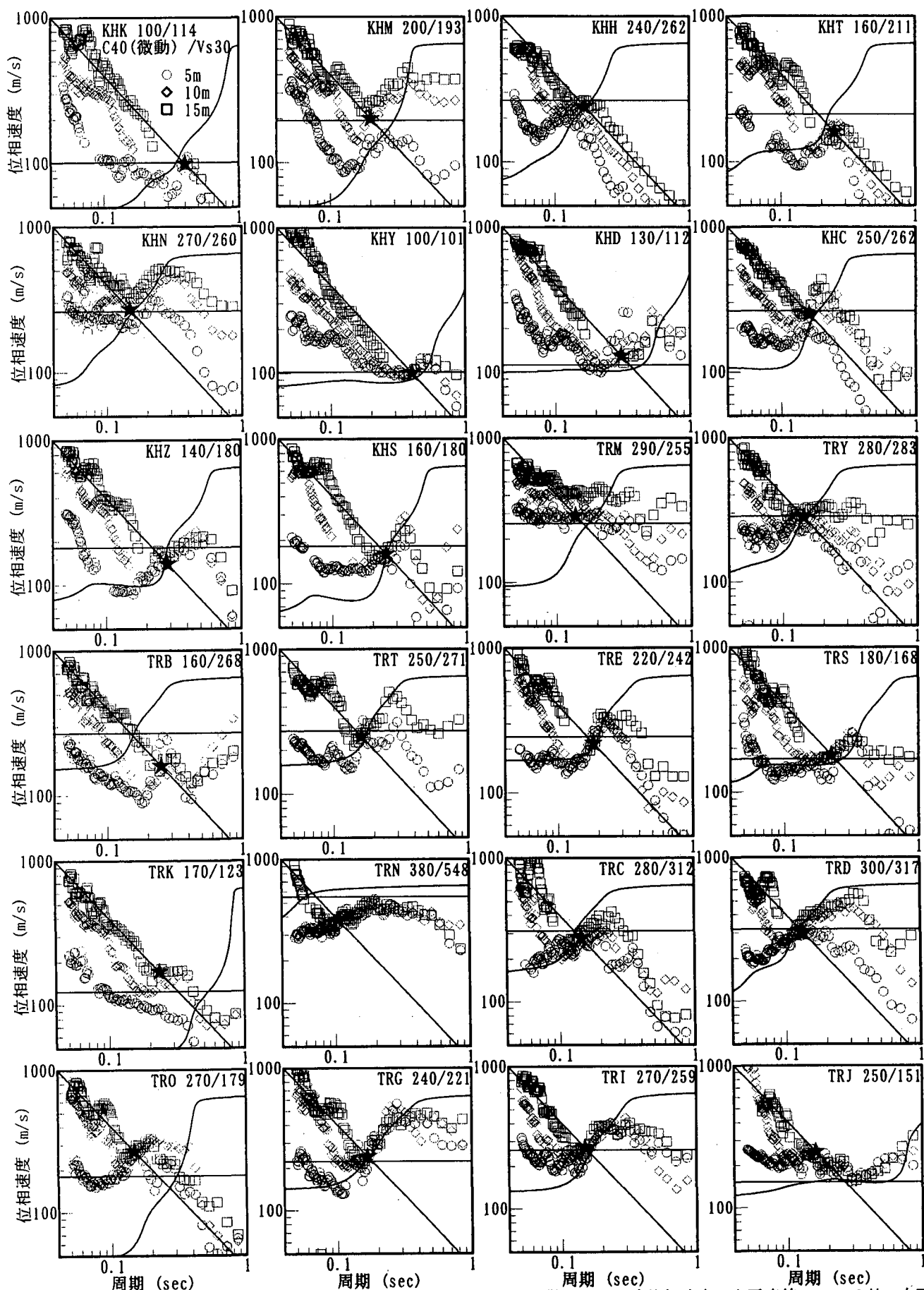


図-4 L-SPAC法から得られた観測位相速度 (曲線: S波速度検層から得られる理論位相速度, 水平直線: Vs30の値, 右下がりの直線: 波長40mの等波長線, ★印: C40 (微動))

想定して、今回の C40（微動）の決定は S 波速度検層の資料を入手する前に行なっている。

図-4 から比較的、観測位相速度と理論位相速度が調和していると思われる観測点を列挙すると、KHT, KHN, KHY, KHD, KHC, KHZ, TRY, TRT, TRE, TRS, TRC, TRD, TRG, TRI の 14 観測点である。一方、TRN, TRO のように観測位相速度は比較的きれいに算出されているが、理論位相速度と調和していない観測点もある。今後、S 波速度検層結果、地下構造の不整形性、交通振動、アレイ半径などと観測位相速度の関係を詳細に検討する予定である。

図-5 に C40（微動）と V_{s30} の関係を示す。港北区では C40（微動）と V_{s30} は比較的一致していることが分かる。一方、鶴見区においても概ね C40（微動）と V_{s30} は一致する傾向が見られるが、数地点では大きく外れている。この内、TRN, TRO については、図-4 から分かるように連続性のある観測位相速度が得られている。S 波速度検層は、深さ方向の線的な地盤情報であるのに対し、C40（微動）はアレイ観測から推定されるため、ある程度の広がりを持った立体的な地盤情報である。観測と理論の位相速度の差異は、この線と立体の違いも一つの要因と考えられる。

5. まとめ

横浜市の強震観測点 150 地点の C40（理論）と V_{s30} を調べた。次に、強震観測点 24 地点で常時微動のアレイ観測を実施し、L-SPAC 法を適用した。以下に、得られた結果をまとめる。

- 1) レイリー波の波長 40m における位相速度 C40 と表層 30m の平均 S 波速度 V_{s30} はほぼ一致することが分かった。
- 2) L-SPAC 法から得られた C40（微動）と V_{s30} は比較的一致することが分かった。

以上から、L-SPAC 法は V_{s30} の推定方法として有効であることが示された。しかし、観測位相速度がきれいに求まらない地点もあり、今後は、これらの原因を追求していく予定である。

謝辞：今回使用した S 波速度検層データは、横浜市総務局災害対策室防災技術課から提供して頂きました。記して感謝します。本研究は文部省科学研究費の補助を受けて行った。

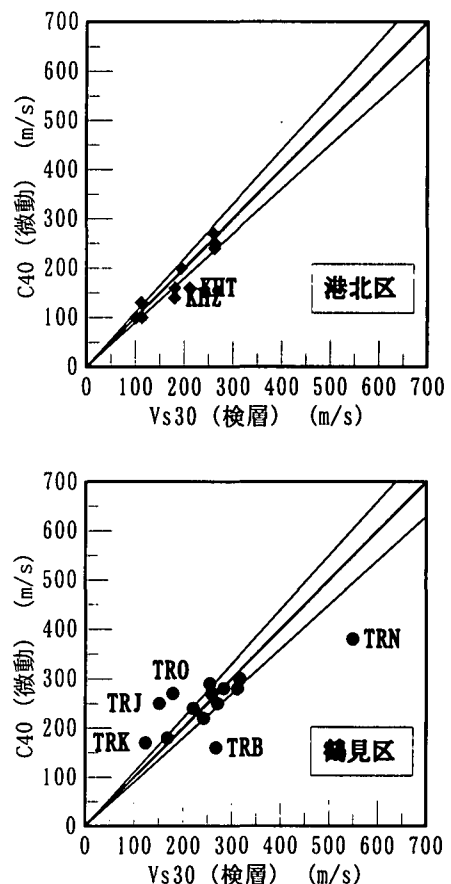


図-5 港北区、鶴見区における C40（微動）と V_{s30} の関係

参考文献：

- 1) 紺野克昭, 片岡俊一：レイリー波の位相速度から地盤の平均 S 波速度を直接推定する方法の提案, 土木学会論文集, No. 647/ I-51, pp. 415-423, 2000.
- 2) 長尾毅, 紺野克昭：常時微動アレイ観測に基づく表層地盤の平均 S 波速度推定精度に関する研究, 土木学会論文集（投稿中）。
- 3) 翠川三郎, 松岡昌志, 作川孝一：1987 年千葉県東方沖地震の最大加速度・最大速度にみられる地盤特性の評価, 日本建築学会構造系論文集, No. 442, pp. 71-78, 1992.
- 4) 紺野克昭：レイリー波の分散曲線の近似計算法の提案と地下構造推定への応用, 土木学会論文集, I-41, pp. 89-105, 1997.
- 5) 岡田広, 松島健, 日高英治：長周期微動に含まれる表面波の位相速度推定法について—空間自己相関法と周波数-波数法の比較—, 北海道大学地球物理学研究報告, No. 49, pp. 53-62, 1987.
- 6) 宮腰研：微動探査による表面波位相速度推定の基礎的研究, 北海道大学学位論文, 1995.
- 7) 紺野克昭：地下構造推定に用いる 2 点間および 3 点間空間自己相関法に関する理論的検討, 土木学会論文集, No. 654/ I-52, pp. 367-375, 2000.