

国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of
National Institute for Land and Infrastructure Management

No. 34

June 2002

常時微動アレー観測による表層地盤のS波速度構造推定手法

西守男雄・長尾 毅・紺野克昭・規矩大義・宮田正史

Estimation of S-wave Velocity Structure by Use of the Microtremor Array Observation

Dano NISHIMORI, Takashi NAGAO, Katsuaki KONNO
Hiroyoshi KIKU and Masahumi MIYATA

国土交通省 国土技術政策総合研究所

National Institute for Land and Infrastructure Management
Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Japan

常時微動アレー観測による表層地盤の S 波速度構造推定手法

西守男雄*・長尾 毅**・紺野克昭***・規矩大義****・宮田正史*****

要 旨

本報告は、常時微動アレー観測より得られる観測位相速度を用いて、地盤の S 波速度構造を直接推定する手法を提案し、その精度を検証するものである。このため、まず、地盤の平均 S 波速度の直接推定手法をこれまで未検討となっていた I 種地盤についても適用し、全地盤種類についてその適用精度を検証した。次に、平均 S 波速度を用いて、地盤の S 波速度構造および基盤深さ直接推定する手法を示し、その精度を検証した。

キーワード：常時微動，アレー観測，レイリー波，位相速度，S 波速度

*沿岸海洋研究部沿岸防災研究室研究員

**沿岸海洋研究部沿岸防災研究室長

***芝浦工業大学工学部土木工学科助教授

****運輸施設整備事業団

*****沿岸海洋研究部主任研究官

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 phone : 0468-44-5024 fax : 0468-44-5068 E-mail : nishimori-d92y2@ysk.nilim.go.jp

Estimation of S-wave Velocity Structure by Use of the Microtremor Array Observation

Dano NISHIMORI*
Takashi NAGAO**
Katsuaki KONNO***
Hiroyoshi KIKU****
Masahumi MIYATA*****

Synopsis

The present report aims at establishing the method for the estimation of the S-wave velocity structure directly from the phase velocity obtained by use of the microtremor array observation. For this purpose, we clarify the direct estimation accuracy of mean S-wave velocity with the phase velocity, including in the class 1 type ground that was not yet assessed. Secondary, we propose the method for estimating the S-wave velocity structure and the depth to the base rock directly from the phase velocity. The accuracy of the proposed method is also discussed.

Key Words: microtremor, array observation, Rayleigh wave, phase velocity, S-wave velocity

* Researcher of Coastal Disaster Prevention Division, Coastal and Marine Department

** Head of Coastal Disaster Prevention Division, Coastal and Marine Department

*** Associate professor, Shibaura Institute of Technology

**** Corporation for Advanced Transport & Technology

***** Senior Researcher of Coastal and Marine Department

目 次

1. はじめに	1
2. 常時微動を用いた表面波の観測とその適用	3
2.1 レイリー波と位相速度	3
2.2 多層系地盤における位相速度	3
2.3 常時微動観測の種類と適用範囲	3
3. 常時微動観測とその結果	7
3.1 観測対象地点	7
3.2 観測方法	7
3.3 観測結果の処理方法	12
3.4 観測結果	13
4. 平均S波速度の推定精度	24
5. S波速度構造を直接推定する手法とその精度	26
5.1 推定方法	26
5.2 推定精度	28
6. 基盤深さを直接推定する手法とその精度	52
6.1 推定方法	52
6.2 推定精度	52
7. 伝達関数の推定精度	52
8. まとめ	70
9. おわりに	70
参考文献	71

1. はじめに

地盤のS波速度構造は、地震時の地盤の振動特性（地震動増幅特性、周波数特性）に支配的な影響を持つ要因の一つである。このため、耐震設計および耐震安全性照査の観点から、地盤のS波速度構造を精度良く把握することは非常に重要である。さらに、地震被害と地盤のS波速度構造は相関性が高いことから(長尾ほか,2001b;長尾・西守,2001), 防災工学の観点からもS波速度構造を正確に把握する必要がある。

地盤のS波速度構造を把握するためのもっとも信頼性の高い手法は速度検層試験(PS検層)の実施であるが、その実施には経済的な負担が大きいため、強震観測地点などのごく限られた箇所においてのみ実施されているのが現状である。一般的にはS波速度は、標準貫入試験(SPT)により得られるN値より Imai(1977)の関係式などを用いて推定されることが多いが、S波速度に対するN値のばらつきを考慮すると、N値を用いた推定には限界があると判断される。また、新規にボーリングを行う必要がある場合には経済的な問題点もあげられる。

地盤のS波速度構造をボーリングを伴うことなく推定する方法の一つとして、常時微動観測による方法があげられる。常時微動観測の特徴として、その実施が容易かつ経済的に可能な点をあげることが出来る。例えば、コスト面を考えると、PS検層やSPTでは表層30m程度の調査を行うためには100万円程度のボーリング費用に加えて60~80万円の程度の試験費用が必要となるが、常時微動で必要なものは30万円程度の試験費用のみである(以上の費用は参考値であり、条件によって変動する)(紺野・長尾,2001)。このため、常時微動観測をもとにしたS波速度構造の推定精度が確認できれば、ボーリングを伴う土質試験の代用として、地震防災、サイスミック・ゾーネーションや耐震性照査、耐震設計などの幅広い分野に適用することが可能と考えられる。特に防災工学の観点からは、経済性および精度の2つの観点から、N値による方法、PS検層の実施などと比較して、常時微動による方法は総合的に適用性が最も高いことが期待される(図-1)。

このような考えのもと、筆者らは、常時微動観測をもとに地盤構造を推定し、その結果を防災工学や耐震工学へ適用するための研究を行っている。図-2に研究の体系を示す。まず、常時微動を用いた地盤構造の推定内容としては、3成分(1地点)観測より固有周期、アレー(多地点)観測より平均S波速度、S波速度構造の推定が可能と考えられる。このうち、3成分観測より得られる固

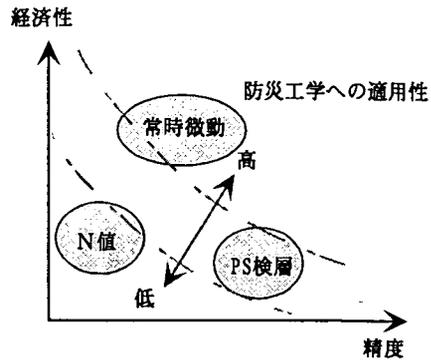


図-1 防災工学への適用性(紺野・長尾,2001)

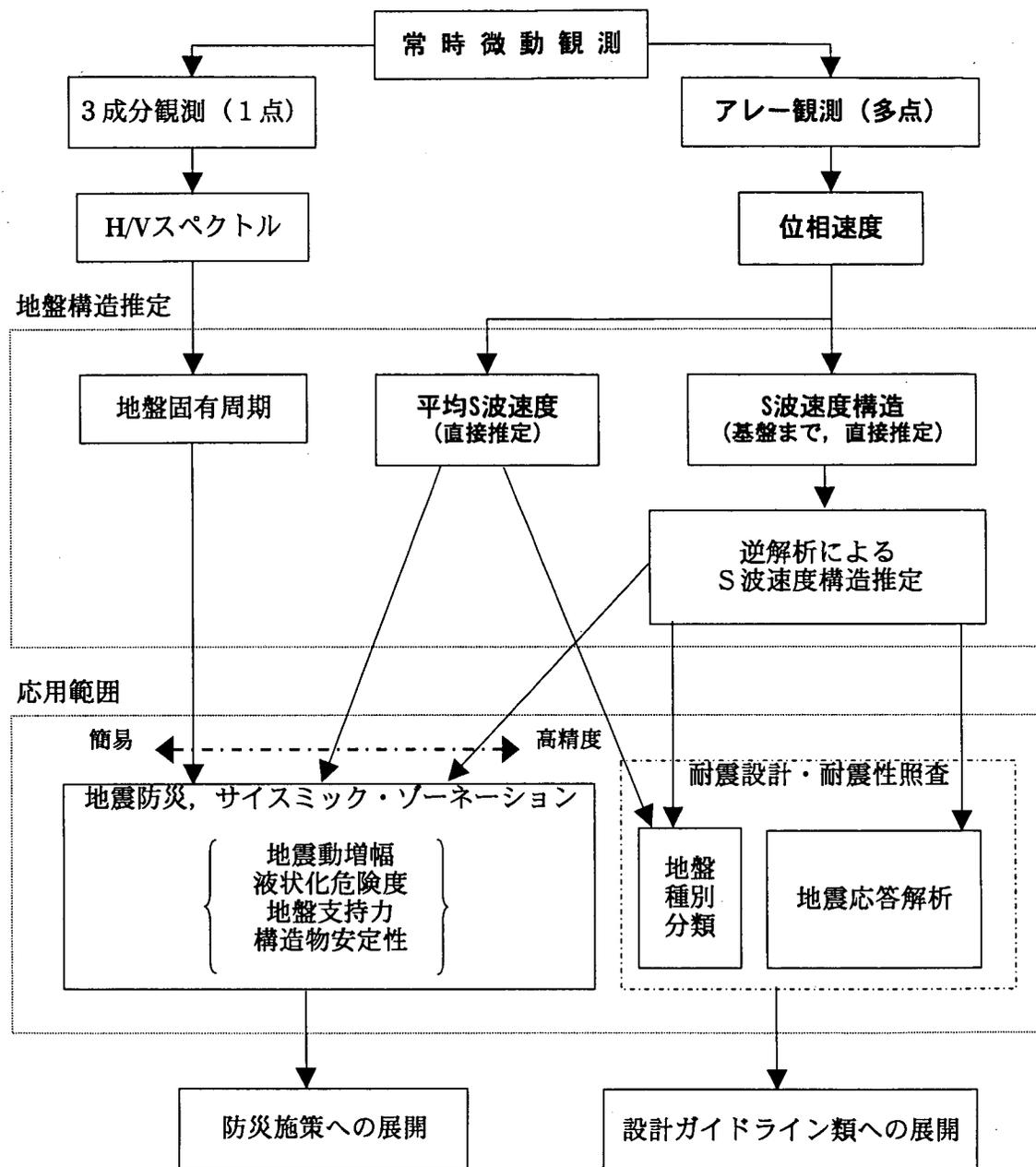
有周期については、ある程度確立された技術と考えられ、各方面で盛んに適用がなされている。

筆者らが主に研究の対象としているのは、アレー観測を用いた表層地盤の平均S波速度の推定及びS波速度構造の推定である。アレー観測によるS波速度構造の推定に関する既往の研究は、工学的基盤以深の地震基盤までのS波速度構造の解明に重点を置いた事例が多く(例えば、文部科学省,2001), 表層地盤のS波速度構造に関する研究事例(例えば、Sato et. al.,1991)は比較的少ない。

これまでに筆者らは、常時微動観測を用いて地盤の平均S波速度を直接推定する方法を確立し、微動観測によってN値によるよりも精度良く平均S波速度を推定できることを示した(紺野・片岡,2000;大橋ほか,2000;紺野ほか,2000;長尾ほか,2001a;長尾・紺野,2002)。ただし、その精度の確認は、おもに港湾・空港地域における観測記録をもとにしていたため、いわゆるⅡ種およびⅢ種地盤を対象としており、Ⅰ種地盤への適用性については未確認であった。

本研究では、常時微動を用いた地盤構造の推定に関する第2のステップとして、まず、平均S波速度の推定精度について、これまで未確認となっていたⅠ種地盤への適用性を含めて、常時微動観測結果をもとに確認する。さらに、平均S波速度を用いて地盤のS波速度構造を直接推定する手法の提案を行う。地盤のS波速度構造は、最終的には図-2に示したように逆解析(インバージョン)によって求める必要があるが、非線形最適化問題となるために局所解が複数存在することから、最終解は初期モデルに大きく依存する(例えば、奈良・佐藤,1996)。本研究におけるS波速度構造の推定は、逆解析における初期値問題として位置付けられるものである。

さらに筆者らは、本研究により経済的かつ精度良く推定される地盤構造の情報を用いて、地震防災やサイスミック・ゾーネーションを合理的に行うための研究を並行的に実施しているところである(図-2参照)。



ゴシック文字：本研究の範囲

図-2 常時微動を用いた研究内容と応用範囲

2. 常時微動を用いた表面波の観測とその適用

2.1 レイリー波と位相速度

地震工学上重要な地震波は、地球内部を伝わる実体波と表面に沿って伝わる表面波に分類される(図-3)。このうち表面波はさらにレイリー波とラブ波に分類される。レイリー波は伝播方向の水平成分と鉛直成分を持つ表面波であり、ラブ波は伝播方向と直行する水平成分のみを有する表面波である。

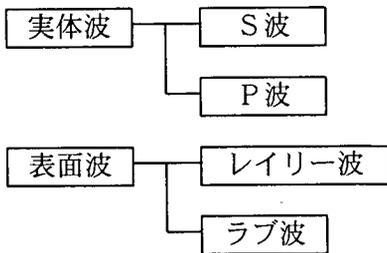


図-3 地震波の分類

いま、半無限均質体をレイリー波が伝わる場合を考えると、その速度 C は特性方程式(1)により得られる。

$$\left\{ 2 - \left(\frac{C}{V_S} \right)^2 \right\}^4 = 16 \left\{ 1 - \left(\frac{C}{V_P} \right)^2 \right\} \left\{ 1 - \left(\frac{C}{V_S} \right)^2 \right\} \quad (1)$$

ここに、 V_S : S波速度
 V_P : P波速度

式より明らかなように、レイリー波の速度はS波速度およびP波速度のそれぞれに依存するが、S波速度の影響が支配的であり、P波速度の及ぼす影響は小さい。たとえばポアソン比 $\nu = 0.33$ のときは $C/V_S = 0.93$ 、 $\nu = 0.49$ のときは $C/V_S = 0.95$ であり、レイリー波の速度はいずれの場合においてもS波速度に近い値となる。

2.2 多層系地盤における位相速度

実際の地盤は上述のような半無限均質体ではなく、多層系であるが、多層系地盤を伝わる表面波の伝播速度は周期(波長)によって異なる点が実体波と大きく異なる点である。このような表面波の性質を分散性と呼ぶ。分散性を示す波動には2種類の伝播速度が考えられる。ひ

とつは特定の周期(波長)の伝播速度で、位相速度と呼ばれる。もうひとつは、いくつかの周期の波動が重なって伝播する時の波群としての速度で、群速度と呼ばれる。本研究では位相速度を扱うが、参考までに群速度 U の定義を示すと式(2)のとおりである。

$$U = C + k \frac{dC}{dk} = C - \lambda \frac{dC}{d\lambda} \quad (2)$$

ここに、 C : 位相速度
 k : 波数
 λ : 波長

図-4に示す水平 n 層地盤の場合における位相速度は、各層の層厚 h 、密度 ρ 、S波速度 V_S 、P波速度 V_P の合計 $4n-1$ 個のパラメータに依存することから、その特性方程式は非常に複雑であり、層数が多い場合は位相速度を解析的に求めることは困難である。このため一般的には、Haskell(1953)のマトリックス法を用いて数値的に求めることが多い。Haskellの方法についての詳細は文献に譲る。

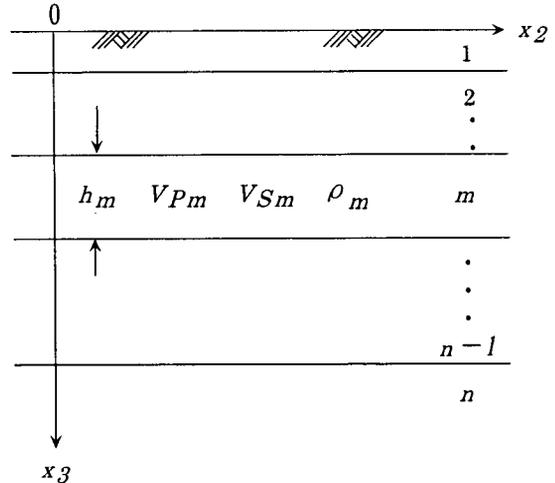


図-4 水平多層地盤

2.3 常時微動観測の種類と適用範囲

(1) 常時微動観測

常時微動とは、各種の人間活動などによって発生する地盤の微小な振動(図-5)を指し、その振幅は数ミリカイン(1mkine=0.001cm/sec)程度の僅かなものである(図-6)。常時微動の観測方法は大きく2つの方法がある。ひとつは水平2方向に加えて鉛直1方向の合計3成分を1地点において観測する方法であり、もうひとつは図-7に示すように円の中心および円周上の多点にセンサーを

配置して観測を行うアレー観測である。3成分観測については、水平方向と鉛直方向のスペクトル比（以下、H/Vスペクトル）をとることにより（中村,1988；大町ほか,1994），地盤の固有周期および地震動増幅率を簡易的に推定することが可能である。また，アレー観測については，空間自己相関法（Aki,1957）などを適用して基本モードレイリー波の位相速度を検出することにより，S波速度構造の推定が可能となる。なお，通常アレー観測は複数のアレー半径について行われる。これは，観測可能な波長の範囲がアレー半径に依存するためで，一般的には式(3)の関係があるとされている（宮腰ほか,1997）。

$$2r \leq \lambda \leq 10r \quad (3)$$

ここに， r ：アレー半径(m)
 λ ：波長(m)

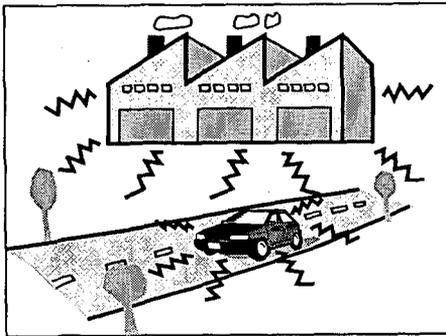


図-5 常時微動発生源

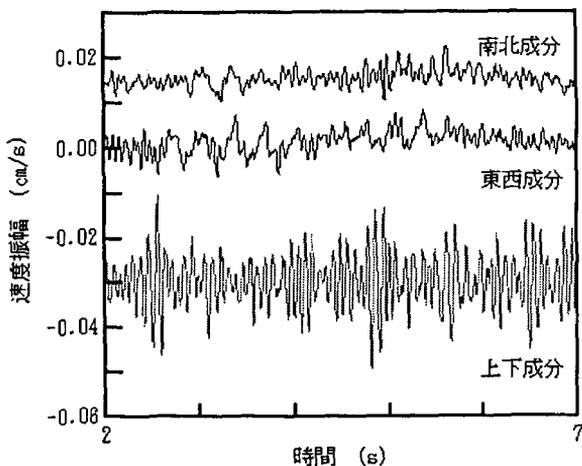


図-6 常時微動波形の例（芝浦工大田町キャンパス）

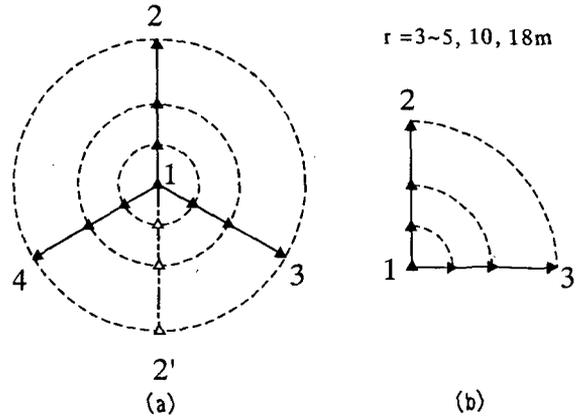


図-7 アレー観測概念図

(2) H/V スペクトルによる固有周期の推定

H/V スペクトルは地盤の固有周期を算出する方法として現在幅広く用いられている。適用方法は非常に簡単で，微動の水平成分と鉛直成分のスペクトル比を求め，そのピーク周期を読みとって地盤の固有周期と見なすものである。H/V スペクトルは中村(1988)により提唱された手法で，地盤固有周期を簡便に推定できるために注目が集まったが，理論的な背景はやや希薄であった。

その後，時松・宮寺(1992)は微動の水平成分及び鉛直成分にレイリー波が卓越していることを示し，微動 H/V スペクトルはレイリー波 H/V 振幅スペクトルで近似できることを示し，H/V スペクトルの適用に関する重要な理論的背景を与えた。その後，大町ほか(1994)は各種の地盤構造に対するレイリー波 H/V 振幅スペクトルと伝達関数のピーク周期の比較を行い，両者がほぼ一致することを示すとともに，微動 H/V スペクトルでピーク周期を判別しにくい場合の固有周期の判定方法を示した。

現在，微動 H/V スペクトルは簡易な地盤構造推定手法として非常に幅広く適用がなされている。

なお，微動 H/V スペクトルはピーク周期のみならず，ピーク値も注目される場合がある。すなわち，ピーク値が大きい場合は地震動増幅率が大きいと言われている。これは，地盤のインピーダンスコントラストが強い場合はレイリー波 H/V 振幅スペクトルが強いピーク値を示す（大町ほか,1994）ことに対応すると考えられている。

(3) 位相速度の算出方法

アレー観測を用いた位相速度の算出方法としては，大別すると空間自己相関（SPAC）法と周波数-波数（F-K）法がある。岡田ほか(1987)は，両手法を比較し，得られる位相速度はほぼ同一であること，さらに SPAC 法によれば観測点が少なくてもすむうえ，解析も容易であるという利点を持つことを明らかにした。また，松岡ほか(1996)は 30m までのアレー半径で観測を実施した結果から，

SPAC法ではアレー半径の10~20倍程度の波長まで対象とできるのに対して、F-K法ではアレー半径の2~3倍程度の波長までしか対象とできないことから、SPAC法の方がF-K法よりも小規模なアレーが使用できることを示した。これらの結果により、本研究の目標である表層地盤のS波速度構造の経済的かつ精度良い推定という要求に対しては、SPAC法の方が適していると考えられる。このため、本研究ではSPAC法を適用する。

なお、センサー数が少なくても位相速度を精度良く求めることが可能なSPAC法では通常、円周上に配したセンサーが正三角形を成すようにアレーを構築する(図-7(a))。これは様々な方向より到来する微動を偏りなく検出するための措置であるが、その場合センサーは円中心を含めて4個必要である。ところが、都市部の狭隘な観測サイトでは、正三角形のアレーを用いることが物理的に困難な場合がある。このため、センサーの数を1個減らし、3個のセンサーでL字型のアレーを適用するL-SPAC法(図-7(b))が紺野(2000)により提案されている。この方法は道路の歩道部分などでも採用できるため、展開しやすいアレー配置であるといえる。ただし、正三角形などに比べてセンサー数が少ないことから観測誤差の影響が大きい場合があることが想定される。現在、積極的に検証が行われている(紺野ほか,2001)。

SPAC法(Aki,1957)では、微動の上下動に基本モードレイリー波が卓越していると仮定し、かつ地盤が水平多層より構成されていると仮定する。加えて、微動が時間的かつ空間的に定常である場合、2つのセンサーにより取得された微動記録を解析することにより2点間の定常的なコヒーレンスが得られる(紺野,2000)(図-8参照)。

アレー半径 r において n 個のコヒーレンスが得られたとき、その実数部分を抽出すると、式(4)のようになる。このコヒーレンスの実数部分は、空間自己相関係数と呼ばれる値である。

$$\begin{aligned} & \text{Re}[\overline{\text{coh}}(r, \omega)] \\ &= \frac{\sum_{j=1}^m P_j(\omega) \left[\sum_{i=1}^n \cos\{kr \cos(\theta_i - \varphi_j(\omega))\} / n \right]}{\sum_{j=1}^m P_j(\omega)} \\ &= \frac{\sum_{j=1}^m P_j(\omega) [J_0(kr)]}{\sum_{j=1}^m P_j(\omega)} \quad (4) \\ &= J_0(kr) \end{aligned}$$

ここに、 m : 微動の到来方向個数

ω : 角周波数

$P_j(\omega)$: 微動のパワースペクトル振幅

k : 波数

θ : センサー配置方向 (図-8 参照)

ψ : 微動到来方向

J_0 : 第1種0次ベッセル関数

位相速度 C は波数 k と $C = \omega/k$ の関係にあるため、式(4)によりベッセル関数の逆演算を用いて周波数毎の位相速度を求めることができる。

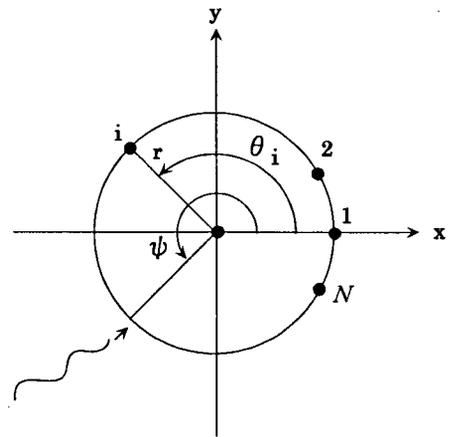


図-8 センサーと微動到来方向

(4) 平均S波速度の推定

レイリー波の振幅は、地表面付近で大きく、鉛直下方に向かって指数関数的に減少するという性質を持つ。一例として、図-9に示すS波速度構造の地盤におけるレイリー波の鉛直成分の振幅分布を、波長15m, 30m, 45mについて図-10に示す。なお、ここでの振幅は、最大値が1になるように正規化してある。さらに、この地盤構造における位相速度を図-11に示す。レイリー波の位相速度は、波長(周期)が長くなると一般的に大きな値を示すが、その理由は、波長が長い場合は深い位置まで振幅を有するので、位相速度が深い位置のS波速度の影響を受けるためである。一般にS波速度は上層ほど小さく、下層ほど大きいので、波長の短い場合は一般に位相速度は小さく、波長が長くなると位相速度は大きくなる。

このことは、レイリー波の特定の波長における位相速度から、地盤の平均的なS波速度が推定できる可能性があることを示唆している。このため、紺野・片岡(2000)、大橋ほか(2000)、紺野ほか(2000)、長尾ほか(2001a)、長尾・紺野(2002)の一連の研究においては、PS検層の実施されている東京都および神奈川県内の85地点および全国の港湾・空港地域40地点の合計125地点を対象に、波長 λ における基本モードレイリー波の位相速度 $C(\lambda)$

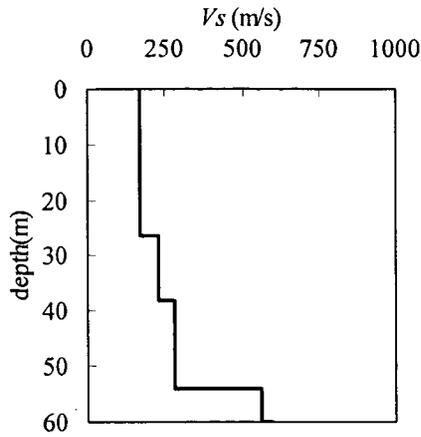


図-9 S波速度構造

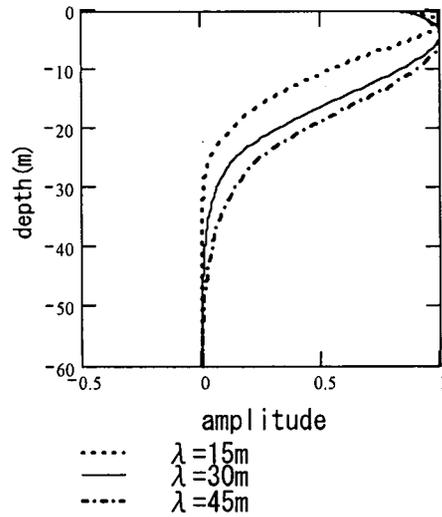


図-10 レイリー波鉛直成分振幅分布

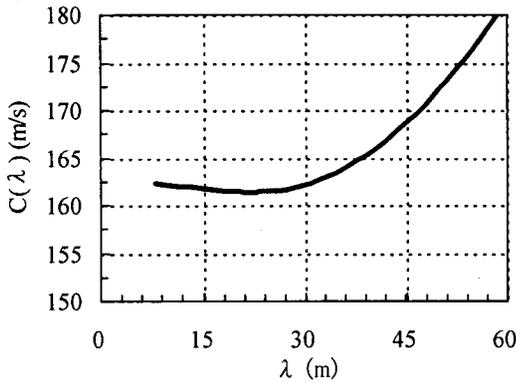


図-11 位相速度

表-1 位相速度と平均S波速度の関係

V_{sx}	$C(\lambda)$
V_{s10}	$C(15)$
V_{s15}	$C(20)$
V_{s20}	$C(30)$
V_{s25}	$C(35)$
V_{s30}	$C(40)$
V_{s35}	$C(50)$
V_{s40}	$C(55)$
V_{s45}	$C(60)$
V_{s50}	$C(70)$
V_{s55}	$C(75)$
V_{s60}	$C(80)$

と深さ x までの地盤の平均 S 波速度 V_{sx} の相関を検討し、式(5)に示すように両者がほぼ等しくなる値として、表-1 に示す関係を得ている。なお、地盤の平均 S 波速度は、走時で重み付けした値であり、式(6)により得られる。

$$C(\lambda) \approx V_{sx} \quad (5)$$

$$V_{sx} = \frac{\sum_i H_i}{\sum_i \frac{H_i}{V_{s_i}}} \quad (6)$$

$$x = \sum_i H_i$$

ここに、 H_i : i 層の層厚 (m)

V_{s_i} : i 層の S 波速度 (m/s)

表-1 より、例えば、表層 30m の平均 S 波速度 V_{s30} は、波長 40m における位相速度より直接読みとることができる。 V_{s30} は、地震動の増幅特性との相関が比較的良好なことが指摘されている(翠川ほか,1992)。また、すでにアメリカ合衆国においては、FEMA302 において、建築構造物の設計における地盤種別分類に V_{s30} を取り入れている(BSSC,1994)ほか、Eurocode においても draft 段階ながら、 V_{s30} により地盤種別を分類する動きがあるなど、今後地盤種別分類に関して V_{s30} などの平均 S 波速度を指標とする動きが強まると考えられる。 V_{s30} を求める方法としては、SPT により N 値から換算する方法も考えられるが、常時微動による方が精度が高いことが確認されている(長尾ほか,2001a; 長尾・紺野,2002)。なお、地盤種別分類などの指標として V_{s30} が適切かどうかについては、今後慎重に検討する必要がある。

(5) S波速度構造の推定

常時微動アレー観測を用いた地盤構造の推定のうち、最終的な目標としては、S波速度構造の推定をあげることができる。これは、あるS波速度構造を仮定し、算出される位相速度と観測位相速度の差を最小にするようにS波速度構造を修正する逆解析と呼ばれる手法である。逆解析手法としては、様々な手法の適用が考えられる(例えば、岡田ほか,1990; 山中・石田,1995; 紺野,1997; 山中,2001)。また、位相速度によらずに、3成分観測により得られるH/Vスペクトルを対象とした逆解析の事例もある(砂田ほか,2001)。逆解析によるS波速度の推定は非線形最適化問題となるので、複数の局所解を有することとなり、最適解の初期解への依存性が問題となる。このため、精度の良い初期値の設定法の開発が重要な課題となる。

初期値は位相速度などより直接設定する必要があるが、その方法としてこれまでに、Ballard(1964)の方法と紺野(1997)の方法がある。

Ballardの方法によれば、深さ x におけるS波速度 $V_s(x)$ は式(7)により求めることができる。

$$V_s(x) = 1.1C(T) \quad (7)$$

$$x = (1/3 \sim 1/2)C(T) \cdot T$$

ここに、 $C(T)$: 周期 T における位相速度

紺野の方法は式(8)によりS波速度構造を求めるもので、Ballardの方法に修正項を加えたものである。

$$V_s(x_n) = \beta \left(C_{n+1} + \frac{\Delta C_n}{\Delta T_n} T_n \right) \quad (8)$$

$$\dot{x}_n = \alpha \cdot C_n \cdot T_n$$

ここに、添字 n は離散的に得られる位相速度の n 番目のデータであることを示す。また、 α および β としては東京・神奈川の85地点の速度検層結果をもとにS波速度の推定値と実測値の残差二乗和が最小となる値として $\alpha = 0.5$, $\beta = 0.8$ を示している。紺野(1997)は、Ballardの方法と紺野の方法を比較した結果、Ballardの方法では推定S波速度は深さ方向に緩やかに変化するのに対し、紺野の方法では推定S波速度は被推定S波速度の凹凸にある程度対応すること、しかしながら逆解析における初期モデルとしてはBallardの方法の方が適していることを示した。

本研究では、S波速度構造の位相速度からの直接推定方法として、平均S波速度を用いた新たな手法を提案する。

3. 常時微動観測とその結果

3.1 観測対象地点

常時微動観測は、表-2に示す全国38箇所を対象に実施した。微動アレー観測により得られる地盤の平均S波速度およびS波速度構造の推定精度を検証する目的から、PS検層が実施されている港湾、空港地域および基盤強震観測地点(kik-net)の中から選定したものである。

検討対象地点の地下構造は図-12(1)~(4)に示すとおりである。PS検層は概ね各地点で強震計を設置する際に実施されたものであり、工学的基盤までの情報を得ることが主な目的であることから、各地点での調査深さは異なる。38地点の表層60mまでの平均S波速度の分布は図-13に示したとおりである。

なお、表-2に記す地点番号1~18の観測結果については、長尾ほか(2001a)によってすでに報告しているため、以下は新たな観測地点である20地点(地点番号19~38)について報告する。ただし、3.4(2)以降の結果・解析には38地点のデータを全て用いて検討している。

3.2 観測方法

表-2には、各観測地点における観測方法を併せて示した。本研究においては、まずアレー半径としては基本的に3~5, 10, 18mの3種類の半径を採用している。しかしながら、場所によっては物理的な制約から18mのアレー観測を行うことが不可能な地点があり、10mまでのアレーとしている場合がある。また、観測地点が広域で物理的な制約がない場合については44mの2点観測を実施した。次に観測点数であるが、基本的に円中心1点(水平2成分, 上下1成分)に加えて円周上に3点のセンサー(上下1成分)を配置した計4点($n=4$)のアレーを採用している。円周上のセンサーの配置は、図-7(a)に示すように各方向から到来する微動を偏りなく観測する観点から正三角形(2-3-4)の配置とするが、物理的に正三角形のアレーを組むことが不可能な場合は正三角形の頂点を底辺側に折り返した菱形(2'-3-4)の配置としている。これは、空間自己相関係数で理論的には正三角形状でも菱形状でも同一となる(紺野,2000)ことによる。また、菱形状のアレーを組むことも不可能な場合は図-7(b)に示すようにL-SPAC法によるL型のアレー配置($n=3$)とした。

表-2 検討対象地点

地点番号	地点名/所在地	収録時間(分)	フックの周波数(Hz)	アレー点数	観測日	PS検層実施土質調査年度	PS検層深度(m)
1	釧路空港/北海道釧路市鶴丘	15	200	4	2000/10/16 16:30~17:00	1989	68.2
2	釧路港/北海道釧路市西港	20	100	4	2000/10/16 10:10~10:50	1994	24.0
3	八戸港/青森県八戸市大字川原木字北沼	3	200	4	2000/ 3/22 19:30~20:00	1995	18.0
4	鹿島港/茨城県鹿嶋市泉川字浜屋敷地先	10	200	4	2000/ 9/29 14:10~14:40	2002	76.0
5	千葉港/千葉県千葉市中央区中央港	30	100	4	2000/12/27 13:45~14:50	1997	38.0
6	船橋/千葉県船橋市浜町	30	100	4	2000/12/27 11:30~12:00	1973	90.0
7	辰巳/東京都江東区辰巳	30	100	4	2000/12/27 8:40~ 9:45	1984	98.2
8	川崎港/神奈川県川崎市千鳥町	30	100	4	2000/11/22 11:00~12:00	1987	74.3
9	横浜港(山下)/神奈川県横浜市中山山下町	30	100	4	2000/11/22 17:40~18:30	1987	53.4
10	横浜港(大黒)/神奈川県横浜市鶴見区大黒埠頭	30	100	4	2001/ 2/20 13:45~14:50	1979	63.5
11	久里浜/神奈川県横須賀市久里浜	30	100	4	2000/11/27 14:20~15:10	1974	43.0
12	名古屋港(築地)/愛知県名古屋港区築地町	30	100	4	2000/12/21 9:10~10:15	1973	90.0
13	名古屋港(金城)/愛知県名古屋港区空見町	30	100	4	2000/12/21 11:40~12:50	1995	77.9
14	四日市港/三重県四日市市千歳町	3	200	3	2000/ 2/14 0:20~ 0:45	1996	39.4
15	大阪港(海岸通)/大阪府大阪市港区海岸通	30	100	4	2000/12/20 10:20~11:30	1995	96.5
16	大阪港(南港北)/大阪府大阪市住之江区南港北	30	100	4	2000/12/20 13:10~14:15	1995	108.5
17	神戸港/兵庫県神戸市中央区小野浜町	30	100	4	2000/12/19 13:30~14:40	1996	80.2
18	六甲(行沖)/兵庫県神戸市東灘区向洋町	30	100	4	2000/12/19 10:40~11:50	1996	89.5
19	新千歳空港/北海道千歳市美々	10	200	4	2001/ 7/31 20:45~21:30	不明	66.0
20	千歳/北海道千歳市釜加	10	200	4	2001/ 8/ 1 8:30~ 9:10	不明	252.0
21	栗山/北海道夕張郡栗山町湯地	10	200	4	2001/ 8/ 1 10:50~11:30	不明	120.0
22	新篠津/北海道石狩郡新篠津村	10	200	4	2001/ 8/ 1 13:50~14:30	不明	125.0
23	赤井川/北海道余市郡赤井川村	10	200	4	2001/ 8/ 2 8:40~ 9:15	不明	218.0
24	喜茂別/北海道虻田郡喜茂別町鈴川	10	200	4	2001/ 8/ 2 11:20~11:55	不明	98.0
25	白糠北/北海道白糠郡白糠町	15	100	4	2001/11/16 14:50~15:55	不明	99.0
26	白糠南/北海道白糠郡白糠町	15	100	4	2001/11/16 11:40~12:40	不明	99.0
27	本別/北海道中川郡本別町	15	100	4	2001/11/12 17:00~18:00	不明	99.0
28	豊頃/北海道中川郡豊頃町	15	100	4	2001/11/12 14:15~15:10	不明	99.0
29	芽室/北海道河西郡芽室町	15	100	4	2001/11/15 11:05~12:00	不明	226.0
30	大樹/北海道広尾郡大樹町	15	100	4	2001/11/13 8:50~10:00	不明	99.0
31	境港/鳥取県境港市昭和町	10	100	4	2001/12/18 18:05~19:00	1976	71.5
32	米子空港/鳥取県境港市佐妻神町	10	100	4	2001/12/18 21:05~22:00	1997	80.8
33	溝口/鳥取県日野郡溝口町	10	200	4	2001/12/19 15:10~16:05	不明	200.0
34	日野/鳥取県日野郡日野町	10	200	4	2001/12/19 12:45~13:40	不明	100.0
35	菊池/熊本県菊池市大字大平	10	200	4	2001/10/ 2 9:20~10:10	不明	200.0
36	阿蘇/熊本県阿蘇郡阿蘇町	10	200	4	2001/10/ 2 11:50~14:55	不明	124.0
37	豊野/熊本県下益城郡豊野町	10	200	4	2001/10/ 3 11:20~12:15	不明	109.0
38	泉/熊本県八代郡泉村	10	200	4	2001/10/ 3 15:00~16:00	不明	99.0

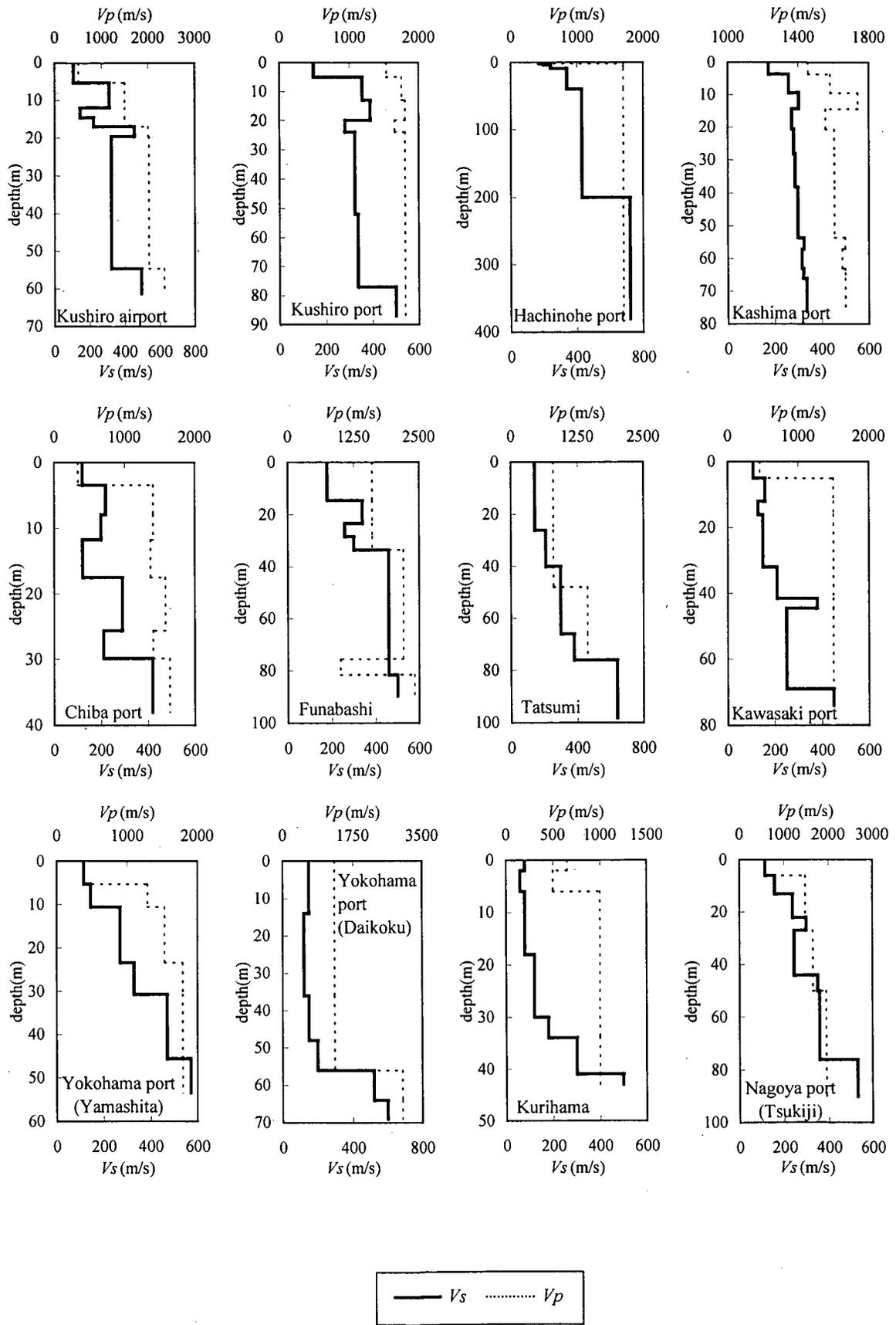


図-12(1) 観測地点における地下構造

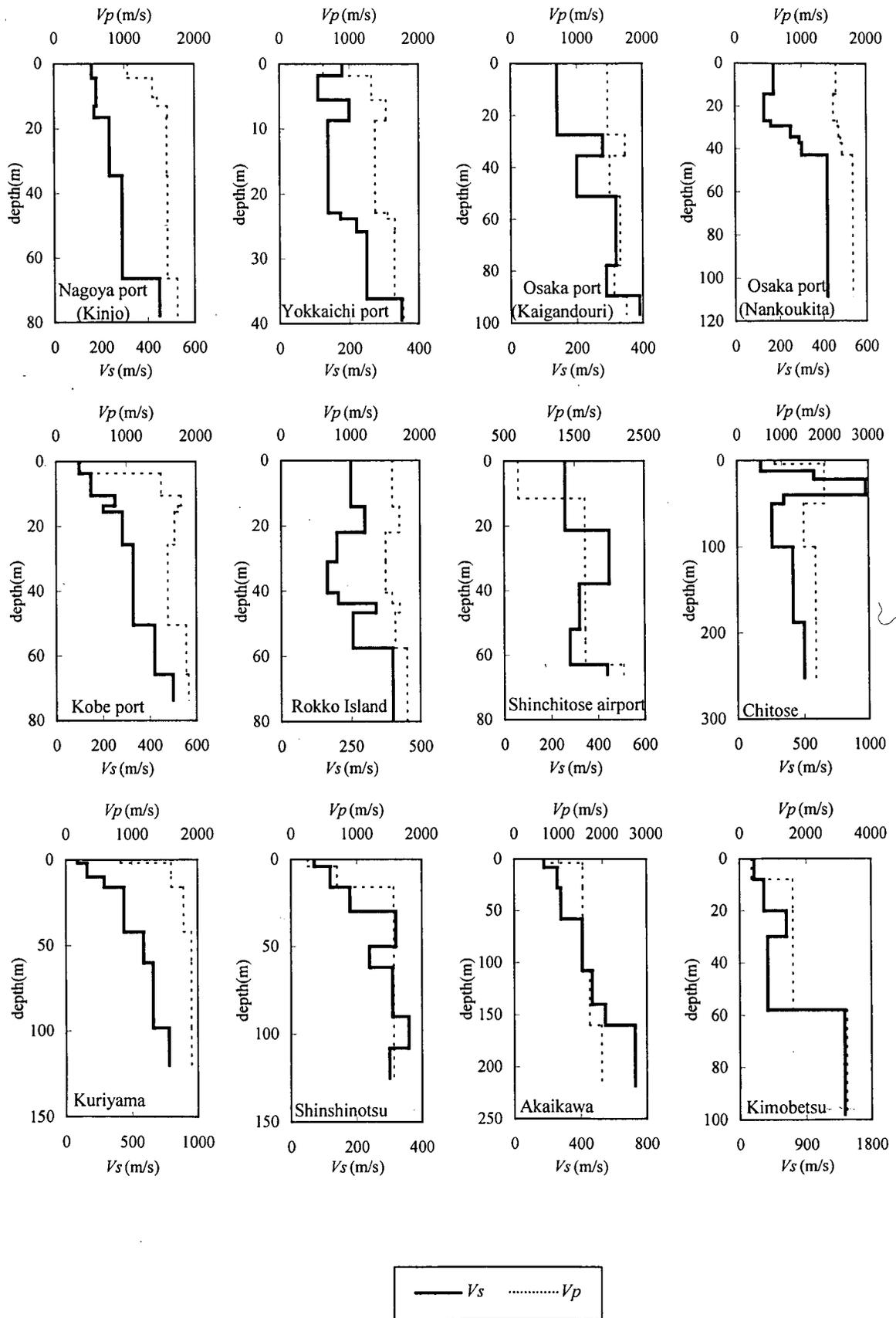


図-12(2) 観測地点における地下構造

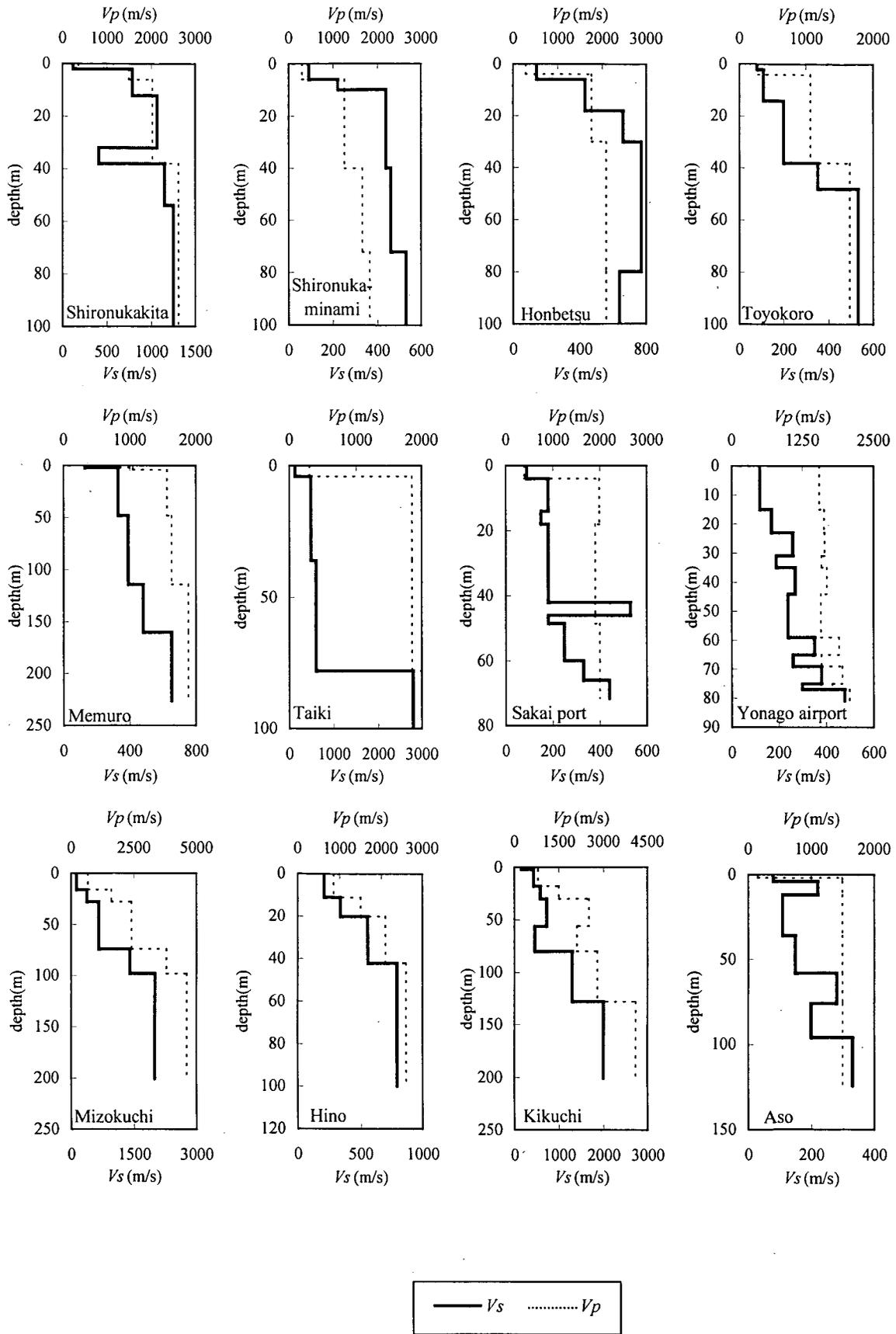


図-12(3) 観測地点における地下構造

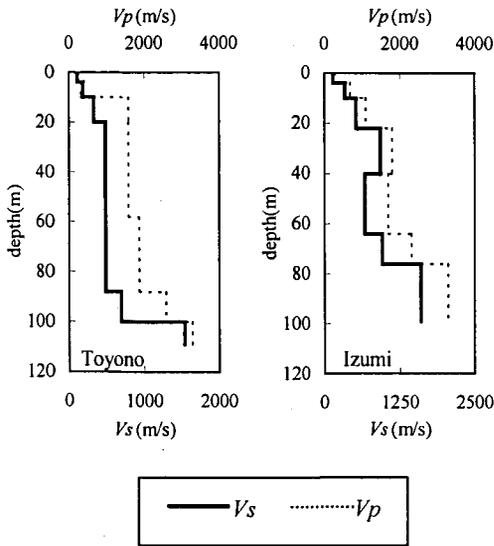


図-12(4) 観測地点における地下構造

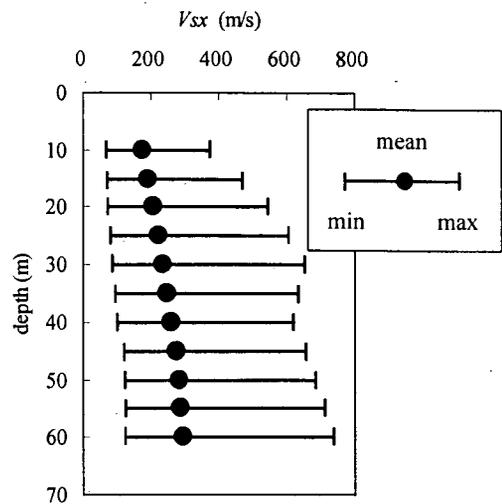


図-13 平均S波速度の分布 (n=38)

観測時間については、微動が完全に定常である場合は短い観測時間でも十分に精度よく位相速度を求めることが可能であると考えられるが、実際には完全に定常的な微動の存在を想定することは困難な場合が多い。このような場合は観測時間をある程度長く取ってコヒーレンスを算出するサンプル数を多く取ることが必要となる。本研究では、ひとつのアレー半径について、短い場合3分、長い場合30分の観測時間とした。なお観測に用いたセンサーは(株)東京測振製VSE-15Dで、本研究で扱う1Hz~20Hz程度の周波数帯においては感度特性および周波数特性のいずれもフラットである。また記録機は同社製SPC-51を用いた。

3.3 観測結果の処理方法

(1) H/V スペクトル

対象地点において実施されたPS検層結果との精度の確認を行う観点から、微動H/Vスペクトル、基本モードレイリー波H/V振幅スペクトルおよび伝達関数の相互比較を行った。

微動H/Vスペクトルの算出方法は次のようにした。まず微動波形をもとに、乱れの少ない部分から40.96秒の区間を3分または10分間の観測では3区間、それ以外の観測では6または9区間抽出する。水平成分については直角2方向の2乗平均の平方根とする。各区間についてバンド幅0.5HzのParzenウィンドウで平滑化を行った後、H/Vスペクトルを求め、抽出した区間について平均する。次に、PS検層による地下構造をもとにHaskell(1953)のマトリックス法を用いて基本モードレイ

リー波のH/V振幅スペクトル(以下、レイリー波H/Vスペクトル)を算出した。さらに、地下構造をもとにして、SH波重複反射理論を用いて伝達関数を算出した。減衰はレイリー型減衰を用い、式(9)に示す値とした。

$$h = \frac{2}{\omega} + 0.02 \quad (9)$$

ここに、 h : 減衰定数、

ω : 角周波数

なお、伝達関数については、通常工学的基盤($V_s=300$ または 400m/s)よりも上部の表層地盤の伝達関数が問題となるが、ここではPS検層により得られている最下層に対する伝達関数とした。よって、以下に示す伝達関数のピーク周期は、工学的な観点での地盤固有周期とは異なることに注意が必要である。このため、1/4波長則を適用して、工学的基盤に関する固有周期を別途算出した。その際、工学的基盤の定義は、S波速度が 400m/s 以上の層が検出されているときは 400m/s 、軟弱地盤で 300m/s 程度の層しか確認できていないときは最下層とした。

(2) 観測位相速度

次に、アレー観測により得られる位相速度の算出方法について述べる。まず、観測記録を50%重なりでの40.96秒の区間に分割してコヒーレンスを算出した。算出されたコヒーレンスをもとに $r=10, 18, 44\text{m}$ の場合は0.6Hz、 $r=3, 5\text{m}$ の場合1.6Hzのバンド幅のParzenウィンド

ウを用いてスペクトルの平滑化を行った。短いアレー半径の場合にバンド幅を広げたのは、アレー半径の短い場合は0.1~0.3秒程度の短周期側の位相速度に主に着目したためである。

なお、観測位相速度にばらつきがあり、読みとりの際にはやや困難を伴うケースとその対処法については以下の通りとした。

- ①観測位相速度の結果より、更に長周期側の位相速度の算出が必要であると判断した場合、円周上のセンサー同士の記録からそれを算出した。このとき、 $r=10m$ におけるセンサー間の距離は17.3m、 $r=18m$ では31.2mである。
- ②観測位相速度が周期の変化に伴って大きく変動する場合は、変動する位相速度のほぼ下限値を結ぶ滑らかな線を観測位相速度とした。
- ③各アレー半径により観測位相速度に違いが大きい場合は、式(3)に示した観測限界波長に注意した上で、有効なアレー半径による観測位相速度の平均的な値を観測位相速度とした。

以上による観測位相速度の設定と、C(20)、C(40)の読みとり例を図-14に示す。

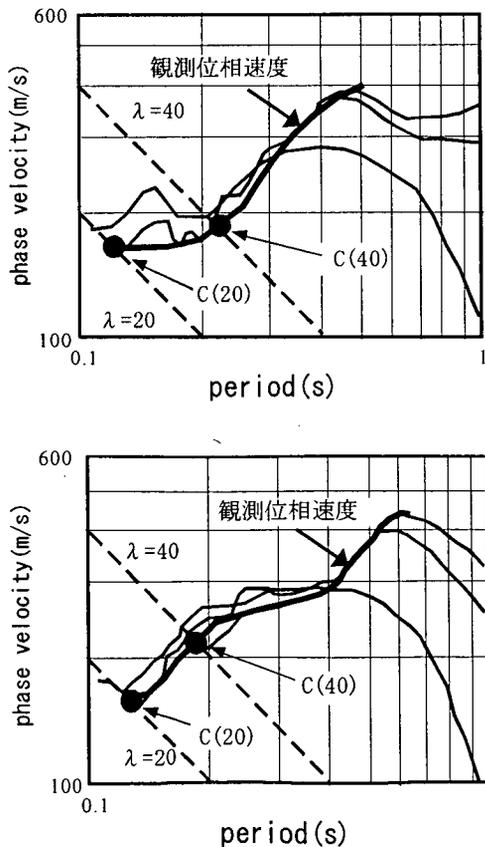


図-14 観測位相速度設定方法

3.4 観測結果

(1)H/V スペクトル

微動 H/V スペクトル、レイリー波 H/V スペクトルおよび伝達関数の対比を図-15(1)~(2)に示す。また、各スペクトルのピーク値を表-3に、微動 H/V スペクトルと他のスペクトルとのピーク値の相関図を図-16に示す。

図-15より、微動 H/V スペクトルとレイリー波 H/V スペクトルは概ね調和的であることがわかる。両スペクトルが調和的でない地点は、白糠北、米子空港、阿蘇、泉である。

まず白糠北については、速度検層の範囲ではインピーダンスコントラストが弱く、このためレイリー波 H/V スペクトルは0.1~10秒間でほぼフラットである。しかしながら、微動 H/V スペクトルには0.5秒に明瞭なピークが認められる。これは、後述するように微動 H/V スペクトルが速度検層深度よりも深い構造を反映している可能性が考えられる。泉についても同様なことが指摘できると考えられる。

米子空港については、微動 H/V スペクトルは右上がりの曲線となり、明瞭な谷が認められない。ただし、ピーク周期については明瞭ではないが1秒付近に認められ、両者は近い値を示す。

阿蘇については、非常に軟弱な地盤であり、ごく表層をのぞいては $v_s=110\sim300m/s$ 程度の層が120m程度続く地盤である。このため固有周期も2秒近いが、微動 H/V スペクトルにはその付近にピークが認められない。これは、本研究で用いたセンサーの周波数特性の問題と考えられる。なお、表-3の阿蘇の微動 H/V のピーク値については0.42秒に明瞭な谷が認められることから、その2倍(大町ほか,1994)と判断し、0.84秒を採用した。

次に、図-16より、1/4波長則による固有周期と微動 H/V スペクトルの比較を行う。ただし、上述のように2秒程度以上の周期においてはセンサーの周波数特性の問題が考えられることから、ここでは1/4波長則において1.0秒以下の固有周期とみなされる地盤に限定して比較を行う。検討対象とした地点のうち、本別、千歳、栗山、白糠南、溝口では微動 H/V スペクトルと1/4波長則による固有周期は整合している。しかしながら、豊野、赤井川、白糠北、大樹、菊池、泉の各地点においては両者は整合せず、いずれも微動 H/V スペクトルの方が長いピーク周期を持つ。さらにこのうち、豊野、赤井川、大樹については、工学的基盤よりも深い層の情報を組み込んだレイリー波 H/V スペクトルのピーク周期と微動 H/V スペクトルピーク周期は近い値を持つ。菊池についてはレイリー波 H/V スペクトルの方が長周期側にピークを持つが、

図-15 を見れば分かるように微動 H/V スペクトルはレイリー波 H/V スペクトルのピーク周期である 0.6 秒付近にもピークを持っている。表-3 に示した 0.41 秒は深度-30 ~ -56m の $V_s=720\text{m/s}$ の値を持つ中間層に対する表層のピーク周期を示した可能性がある。これより、これら地点の微動 H/V スペクトルは、少なくとも PS 検層が実施されている程度の深さの情報は含んだものである可能性がある。さらに、泉については、レイリー波 H/V スペクトルのピーク周期 0.12 秒よりも微動 H/V スペクトルのピーク周期の方が長く、H/V スペクトルは速度検層限界深度よりもさらに下部の情報を含んだものである可能性が高い。本地点における微動 H/V スペクトルピーク周期

0.33 秒における基本モードレイリー波の波長は 400m 程度であることから、このピーク周期は数 100m の深さの S 波速度構造が反映されたものである可能性がある。本地点では 1/4 波長則を適用する場合、固有周期は 0.18 秒であり、I 種地盤と判定されることとなるが、微動 H/V スペクトルから読みとったピーク周期を固有周期と見なす場合、耐震性分類において必要以上に安全側に分類する可能性があることが考えられる。このような、微動 H/V スペクトルと工学的な観点での固有周期には特に I 種地盤で乖離が生じる可能性があり、今後さらに検討する必要があると考えられる。

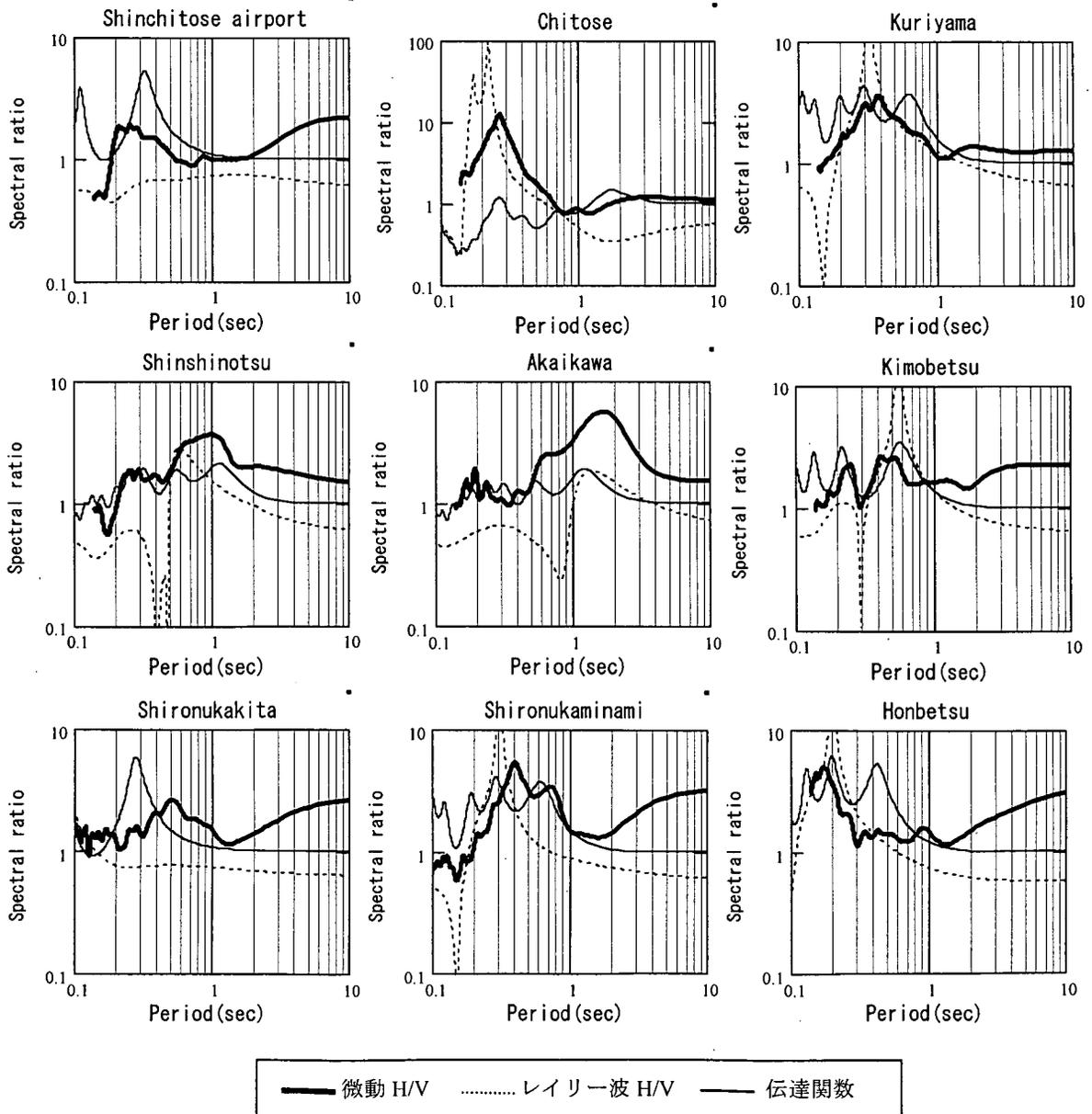


図-15(1) スペクトル比

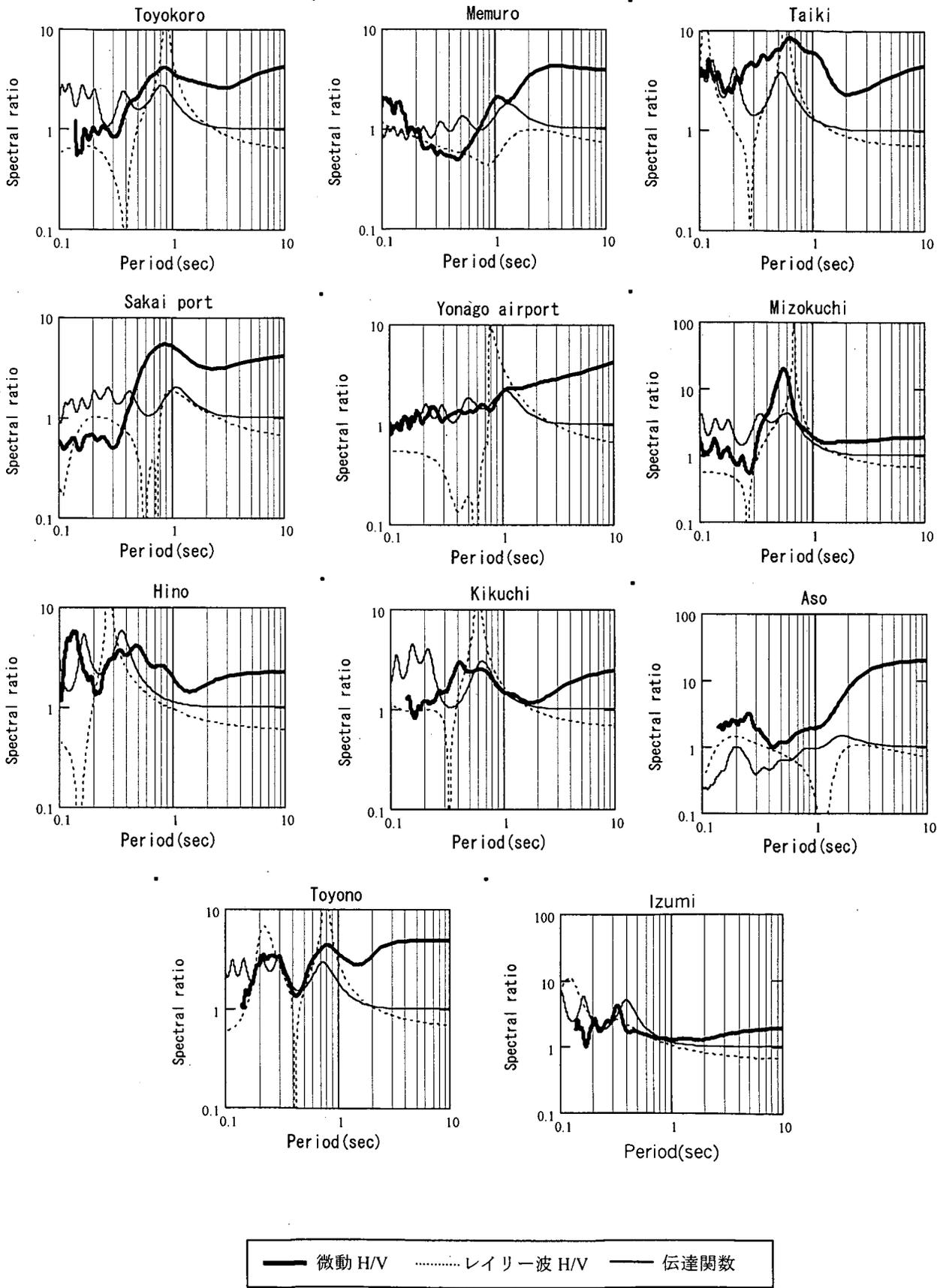


図-15(2) スペクトル比

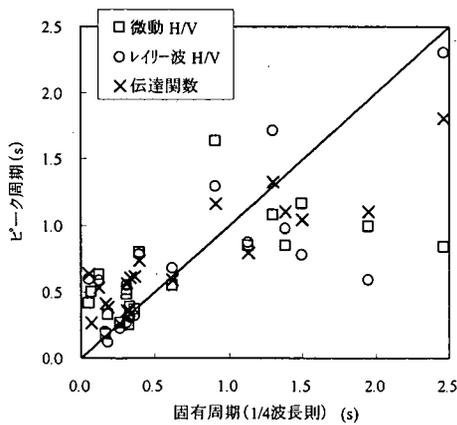


図-16 ピーク周期の相関図

表-3 ピーク周期の比較

地点名	ピーク周期 (秒)			1/4波長則による 固有周期 (秒)
	微動 H/V	レイリー波 H/V	伝達関数	
新千歳空港	0.25	0.32	0.36	0.33
千歳	0.27	0.22	0.26	0.27
栗山	0.37	0.32	0.62	0.37
新篠津	1.00	0.59	1.11	1.95
赤井川	1.64	1.30	1.17	0.91
喜茂別	0.52	0.55	0.57	0.31
白糠北	0.50	-	0.27	0.07
白糠南	0.39	0.31	0.61	0.34
本別	0.18	0.20	0.41	0.17
豊頃	0.85	0.88	0.80	1.13
芽室	1.08	1.72	1.33	1.30
大樹	0.63	0.58	0.53	0.12
境港	0.85	0.98	1.11	1.38
米子空港	1.17	0.78	1.05	1.50
溝口	0.55	0.68	0.59	0.62
日野	0.48	0.27	0.36	0.31
菊池	0.41	0.59	0.64	0.05
阿蘇	0.84	2.30	1.81	2.46
豊野	0.80	0.78	0.74	0.40
泉	0.33	0.12	0.39	0.18

(2) 観測位相速度

観測位相速度の結果を図-17(1)～(4)に示す。図中の細線が各アレー半径に対する観測位相速度の結果であり、太線が各アレー半径の結果(細線)を基に設定した観測位相速度である。前述のように、位相速度は基本的に周期が長くなると増加する。ただし、深度方向にS波速度が逆転するような、いわゆる中間層(低速度層)が存在する場合にはこの限りではない。

前述のように、アレー半径によって観測可能な波長範囲が異なる。各アレー半径において、長周期側で周期が長くなるにつれて観測位相速度が減少するケースが存在する。例えば、喜茂別における結果については、周期0.12～0.2秒程度までは各アレー半径による位相速度はほぼ一致するが、 $r=5\text{m}$ においては周期0.2秒以上、 $r=10\text{m}$ においては0.3秒以上、 $r=18\text{m}$ においては0.33秒以上において、それ以上のアレー半径の結果とのずれが生じる。このずれが生じる波長がそのアレー半径における観測限

界波長を示している。観測の結果、全体的にアレー半径毎の周期と観測位相速度との関係は概ね良好であることが分かる。また、短周期側で観測位相速度のばらつきが目立つ箇所もあるが、これは $r=10, 18\text{m}$ 時に多い。

図-18(1)～(4)には、観測38地点における観測結果を、レイリー波の波長と位相速度との関係で示す。図中の実線が観測位相速度、鎖線がHaskell(1953)の方法による理論位相速度であり、丸印は、PS検層によって算出した平均S波速度であり、表-1に示した波長に対応させて表示している。

平均S波速度と理論位相速度とを比較すると、両者の一致が良くない地点として、釧路空港、釧路港、千歳、白糠北などをあげることができる。これらの地点はいずれも低速度層を含む地盤である。このうち、千歳は深さGL-22mで980m/sの非常にS波速度が大きい凝灰岩の層が出現し、その下部には230mにわたって300～500m/sのS波速度の層が続く、非常に特殊な地盤である。また、白糠北は、GL-12m～99mにおいて1000～1250m/sのS波速度の層が存在するが、その中でGL-32m～38mにおいて410m/sの低速度の砂質泥岩の層が存在する。

このほか、神戸、栗山などにおいては波長の長い領域で平均S波速度が理論位相速度を下回っている。これは、S波速度の深度方向の増加率が地表に近いところでは大きく、ある深さ以上で減少するためであると考えられる。

次に理論位相速度と観測位相速度の整合性を確認すると、新千歳空港、本別で違いが顕著である。このうち新千歳空港はGL-21.3mでいったんS波速度が450m/sに達した後、300m/s程度の層が25.2m続いており、観測位相速度の波長60m以上の部分は高次モードの影響を受けている可能性がある。本別についても同様に高次モードの影響の可能性が考えられる。高次モードが混入する際の誤差の影響の取り扱いについては、今後の課題といえる。

また、大樹では $\lambda=35\text{m}$ 、溝口では $\lambda=40\text{m}$ までしか観測できず、式(3)に示した最大波長を大きく下回っている。観測結果に誤差を与える要因として一般的に風などの影響が考えられるが、両地点では観測時に風は強くなかったことから、風の影響は除いて考えられる。両地点に共通する要素としては、周囲に微動の発生源となる要素が少なかったことが考えられる。このため、微動のパワー不足によりラブ波や実体波など、レイリー波以外の雑微動の割合が大きかったことが良好な観測結果を得られなかった原因の一つとも考えられる。ただしこの他にも、測定システムに起因する原因など、今後さらに検討が必要である。

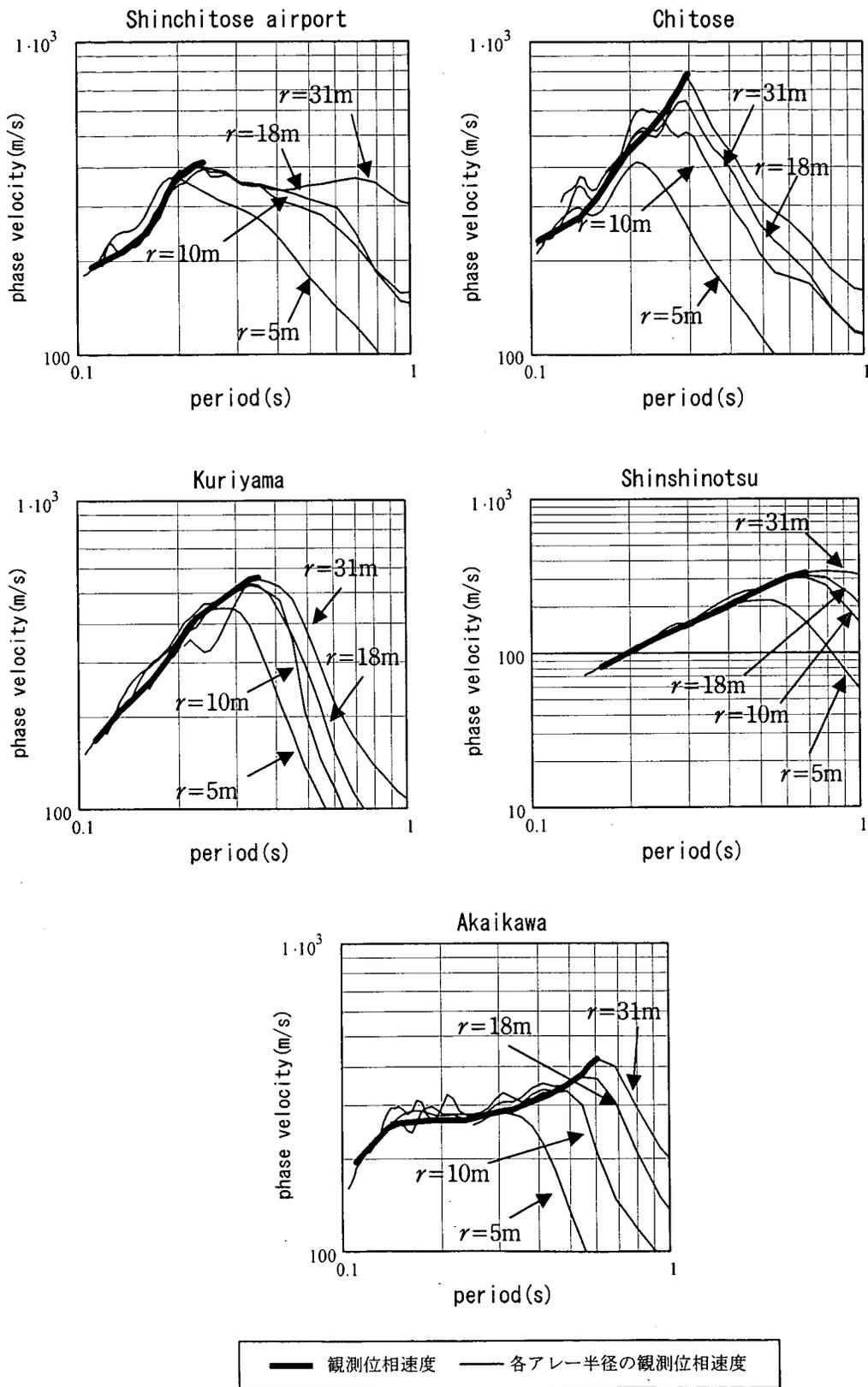


図-17(1) 観測結果 (観測位相速度と周期との関係)

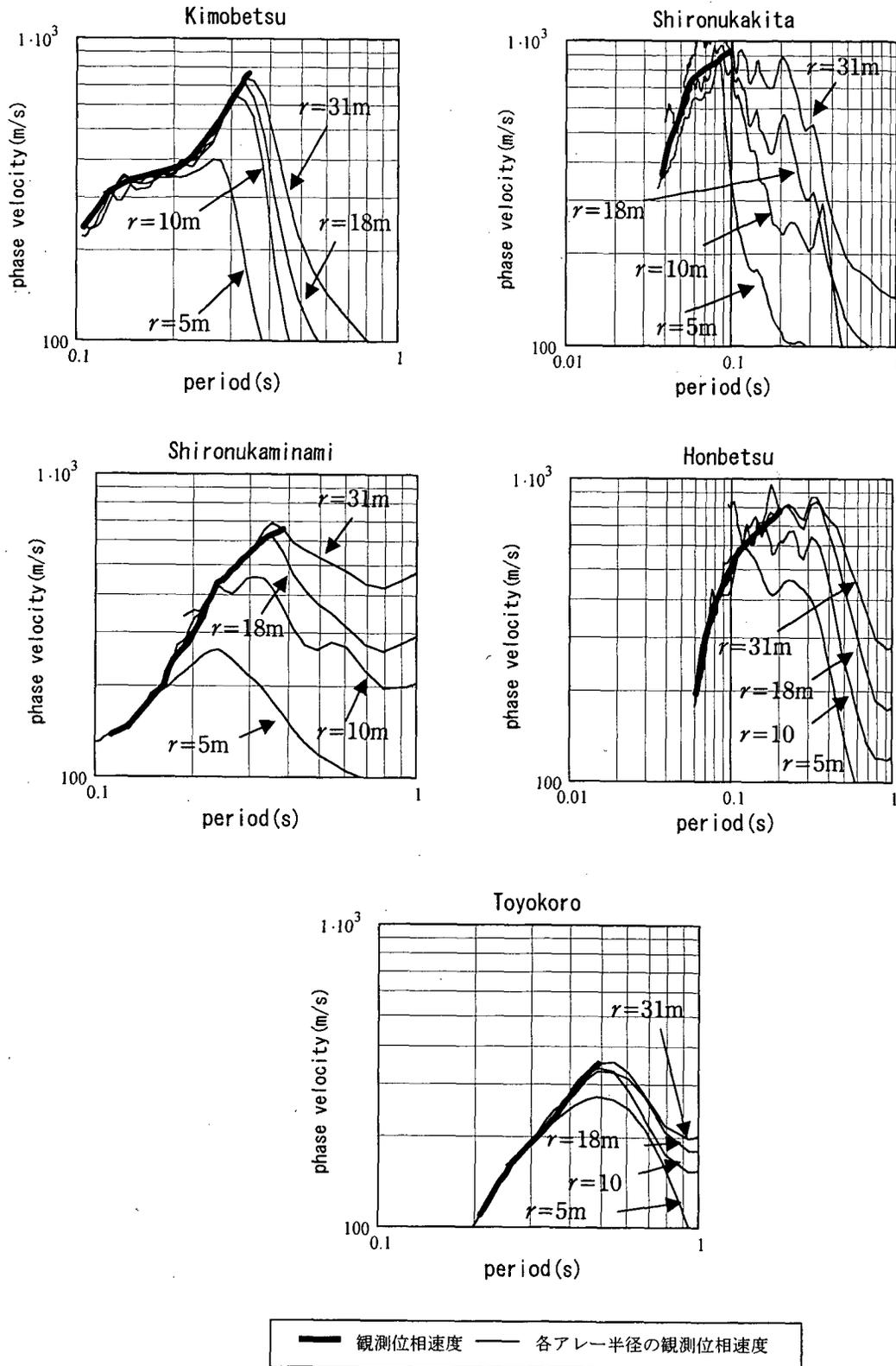


図-17(2) 観測結果 (観測位相速度と周期との関係)

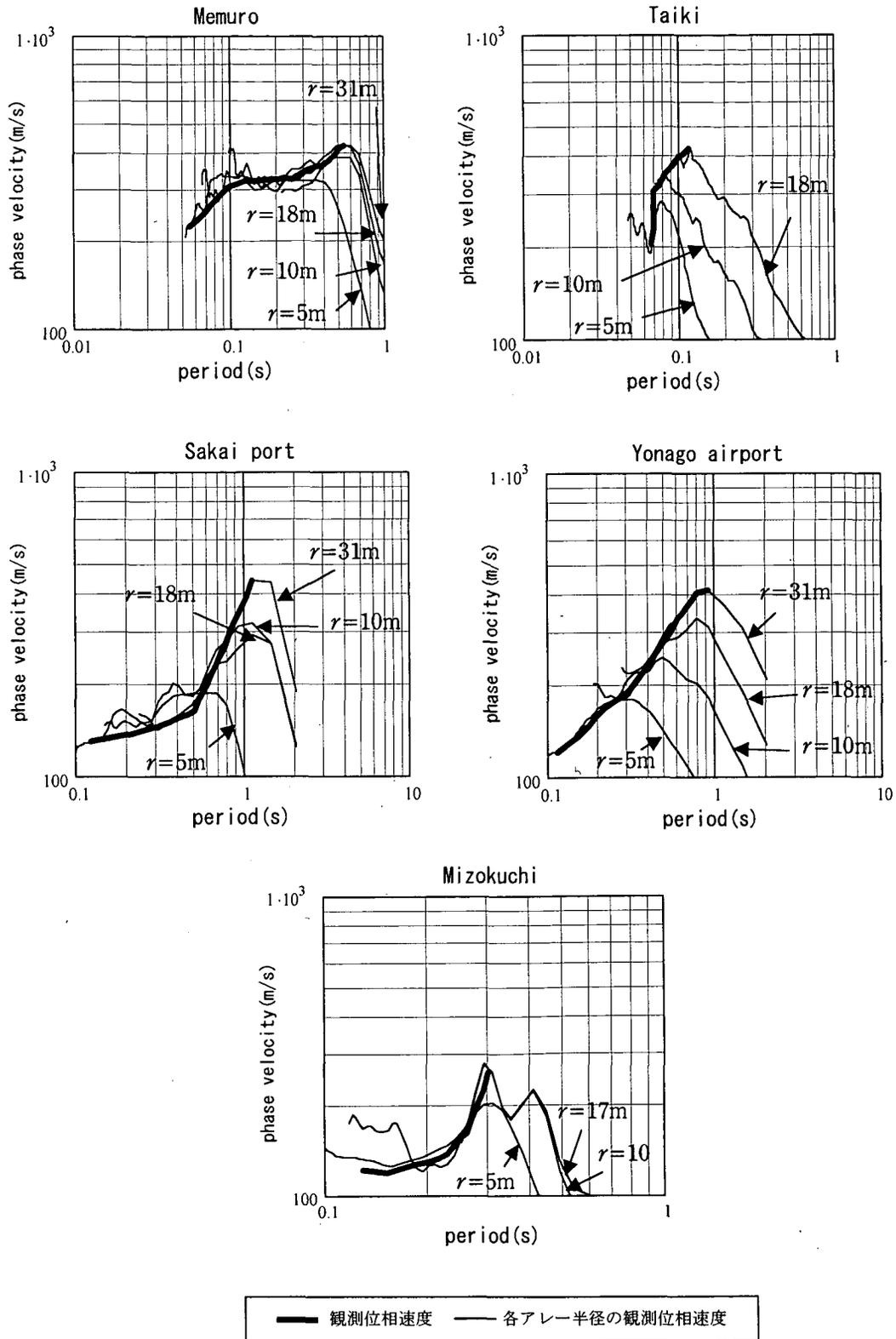


図-17(3) 観測結果 (観測位相速度と周期との関係)

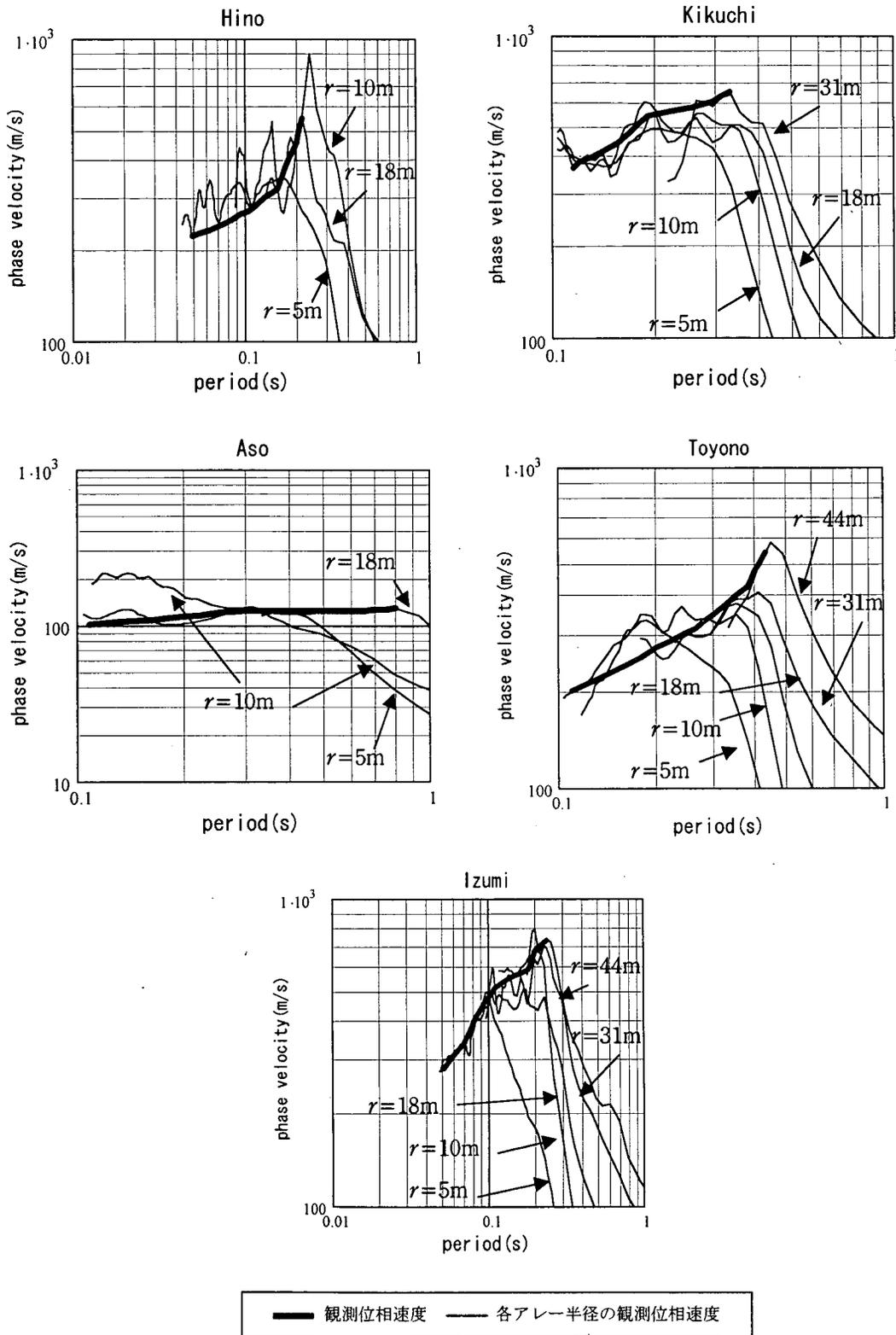


図-17(4) 観測結果 (観測位相速度と周期との関係)

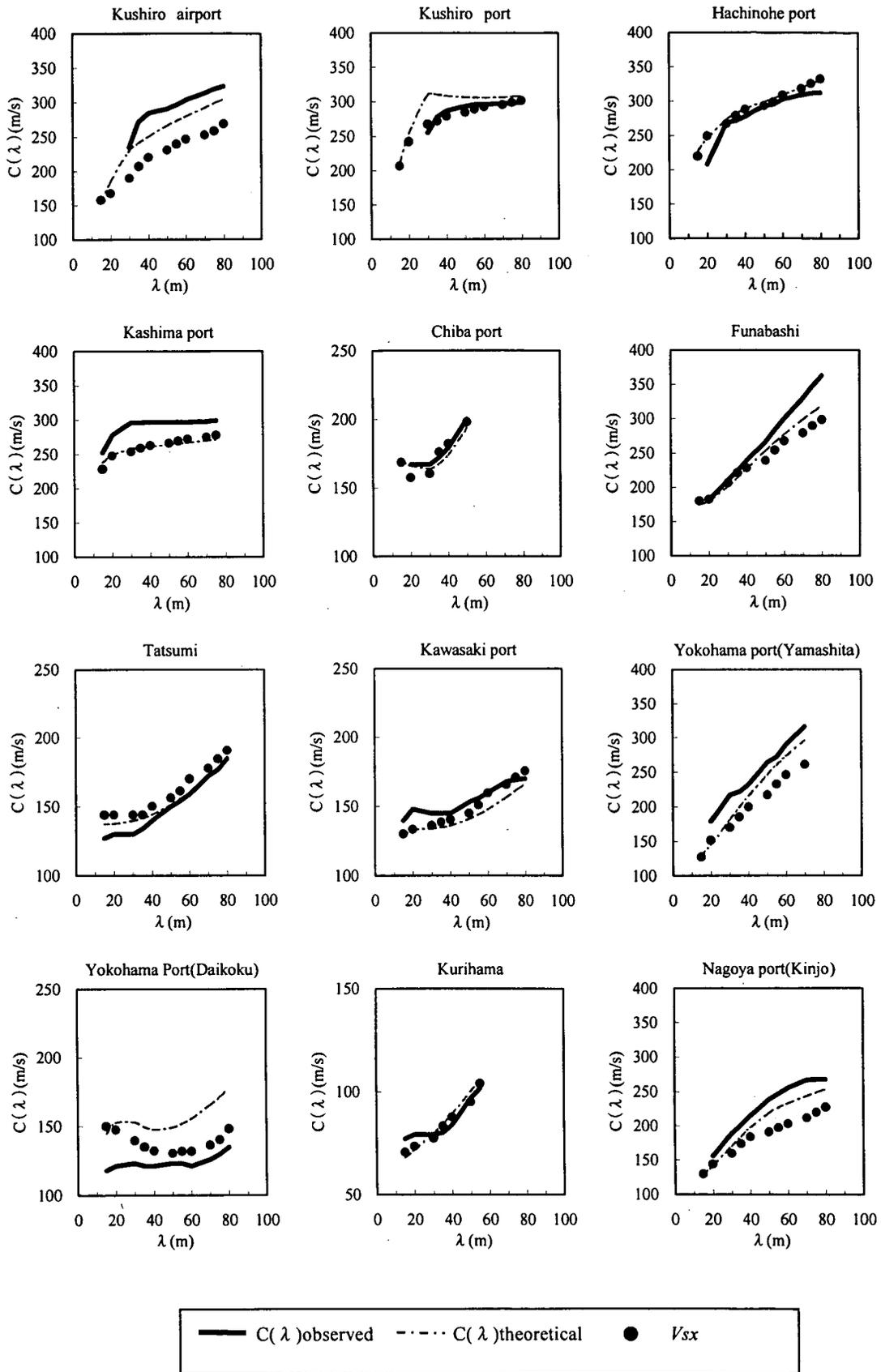


図-18(1) 波長と位相速度との関係

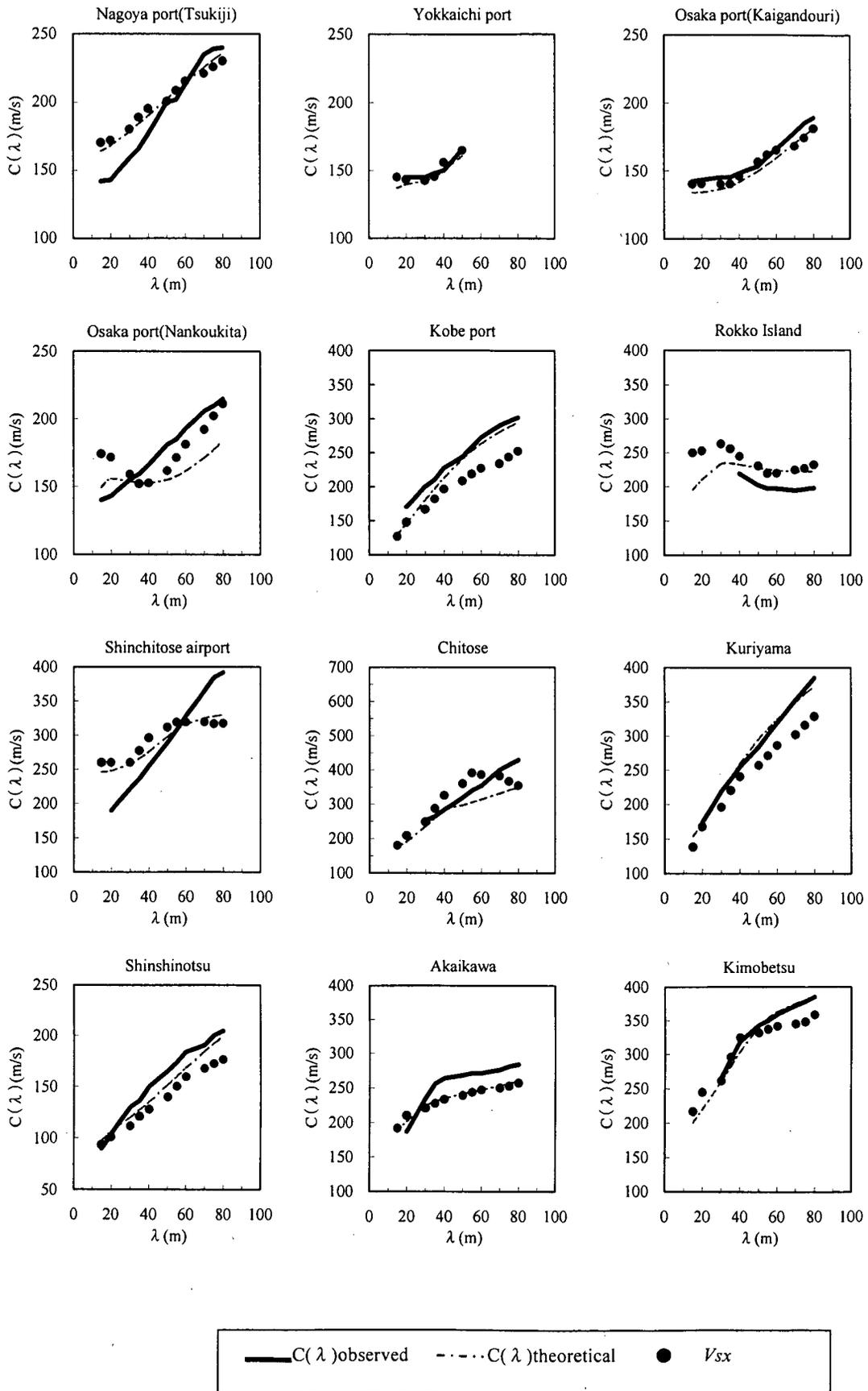


図-18(2) 波長と位相速度との関係

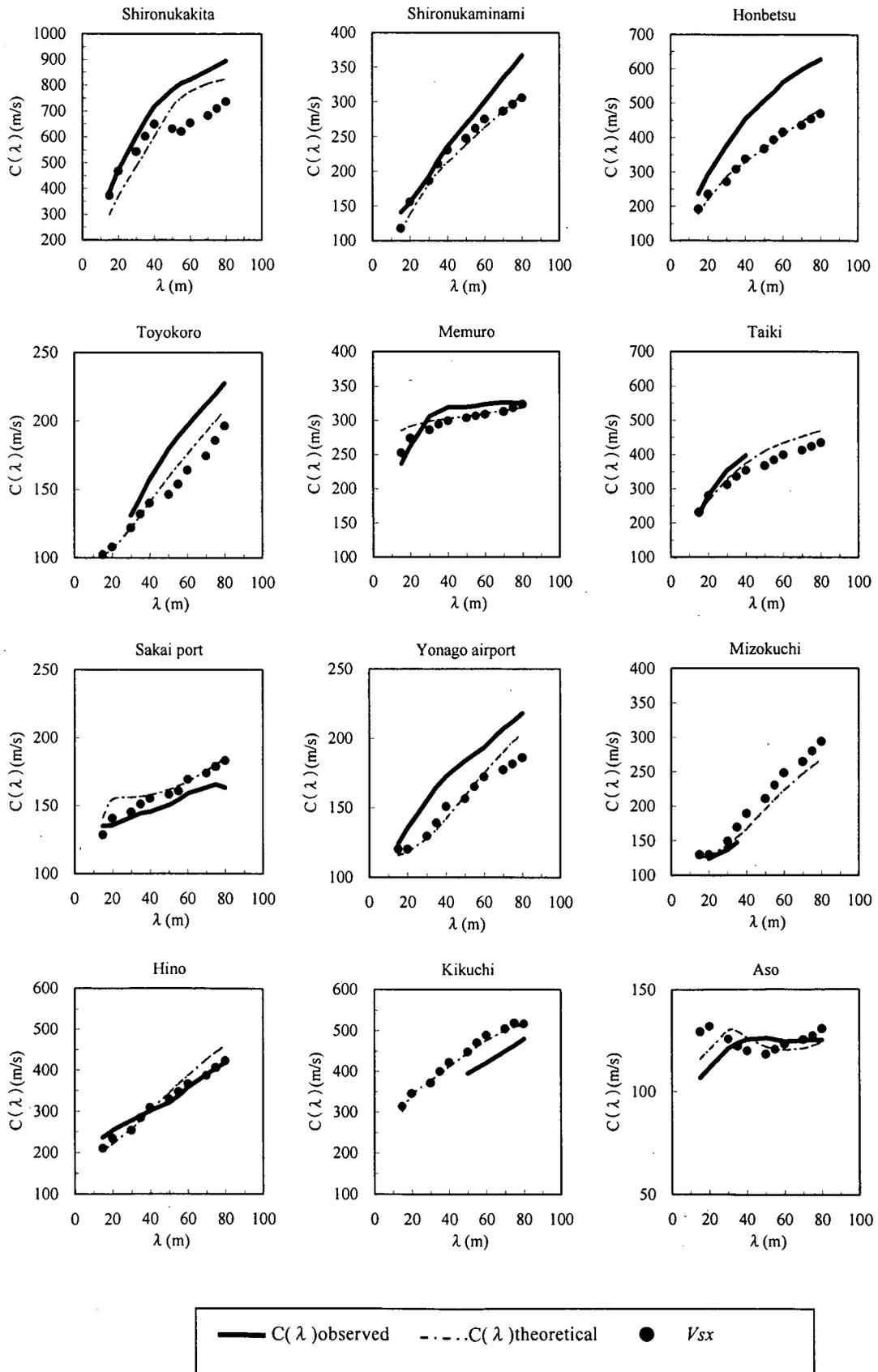


図-18(3) 波長と位相速度との関係

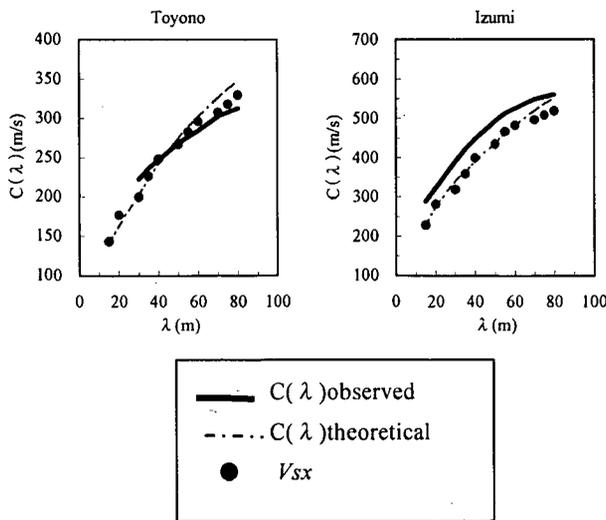


図-18(4) 波長と位相速度との関係

4. 平均S波速度の推定精度

レイリー波の観測位相速度から、2.3(4)に示した方法によって表層60mまでの地盤の平均S波速度を直接推定し、速度検層結果との比較を行う。ここで、耐震設計における地盤種別分類のうち、Ⅱ種およびⅢ種地盤については観測位相速度に基づく精度の確認を行っているが(長尾ほか,2001;長尾・紺野 2002)、Ⅰ種地盤についてはこれまで未確認となっている。

地盤の分類の方法として、港湾の施設の技術上の基準・同解説(港湾局, 1999)においては地盤の種類と第四紀層の厚さにより分類するが、他の構造物においては固有周期により分類するなど(例えば、鉄道総合技術研究所,1999)、現時点で土木構造物に統一的な方法があるわけではない。固有周期については相対的な概念と考えられ、基盤となる地盤をどのように設定するかによって値は変化する。また、設計においてスペクトルを用いない構造物の場合や、一般的な地震による地盤危険度を考えた場合、固有周期以外の手法として平均S波速度による分類も有力と考えられる。平均S波速度を用いた分類の例として、例えばFEMA302(BSSC,1994)では、地盤種別をA～Eの5種類に分類し、 V_{s30} の値として $V_{s30} < 180\text{m/s}$ のクラス、 $180\text{m/s} < V_{s30} < 360\text{m/s}$ のクラス、 $V_{s30} > 360\text{m/s}$ のクラスの3種類を示している。

ここで本研究で対象とした地点の地盤種別について分類を試みる。沿岸部の地盤は一般に軟弱であることから、港湾の施設の技術上の基準・同解説(港湾局, 1999)においては工学的基盤を300m/s以上と定義しており、上記のFEMA302に記された360m/sという値をそのまま適用することは適切ではないと考えられる。このため、こ

ではⅠ～Ⅲ種の地盤種別をそれぞれ $V_{s30} > 300\text{m/s}$ 、 $150\text{m/s} < V_{s30} \leq 300\text{m/s}$ 、 $V_{s30} \leq 150\text{m/s}$ と分類する。ただし、この分類は本研究で対象とした地盤種別ごとの数を示すことだけが目的の便宜的なもので、工学的検討に基づくものではないことに注意が必要である。さて、上記に従って分類すると、本研究で対象とした38地点のうち、Ⅰ種地盤に相当する地点数は8地点、Ⅱ種地盤は7地点、Ⅲ種地盤は23地点である。

図-19にはPS検層より得られた平均S波速度の実測値と微動より直接推定した値の相関を示す。表-4には、平均S波速度推定値と実測値の比の値の分布を示した。ここで、 RV_{sx} は微動観測による平均S波速度の推定値と速度検層による実測値の比により定義される推定精度を示す。

平均S波速度は、位相速度より直接、精度良く推定できることが分かる。 RV_{sx} の標準偏差は0.15未満であり、特に $V_{s20} \sim V_{s55}$ までは0.12以下であり、精度は高いと判断される。 RV_{sx} の平均値は、 V_{s20} 以上については1.04～1.08となり、1.0を数%程度上回る結果となった。この理由としては、波長の長い領域において観測位相速度が理論位相速度を上回る地点が比較的多かったことが原因と考えられる(図-18(1)～(4)参照)。よって、観測の精度がさらに向上すれば、推定値と実測値の比の平均値は1.0に近付くことが期待される。ただし、土層の中間に極端な低速度層が含まれ、その深さに対応する平均S波速度は低下するものの位相速度は減少しない場合は、観測の誤差が全くない場合でも比の値は1.0を上回る事となる。例えば白糠北がそのケースに相当する。図-18(3)をみればわかるように、 V_{s35} 、 V_{s40} は V_{s30} よりも低下しているが、位相速度は理論値、観測値ともに増加している。

表-4 平均S波速度推定精度

V_s	RV_{sx}		
	範囲	平均値	標準偏差
V_{s10}	0.79～1.26	1.01	0.14
V_{s15}	0.73～1.24	1.00	0.12
V_{s20}	0.85～1.39	1.06	0.12
V_{s25}	0.85～1.35	1.05	0.11
V_{s30}	0.86～1.34	1.04	0.11
V_{s35}	0.88～1.38	1.07	0.12
V_{s40}	0.87～1.35	1.06	0.12
V_{s45}	0.86～1.35	1.06	0.12
V_{s50}	0.87～1.37	1.08	0.12
V_{s55}	0.86～1.35	1.07	0.12
V_{s60}	0.85～1.33	1.07	0.13

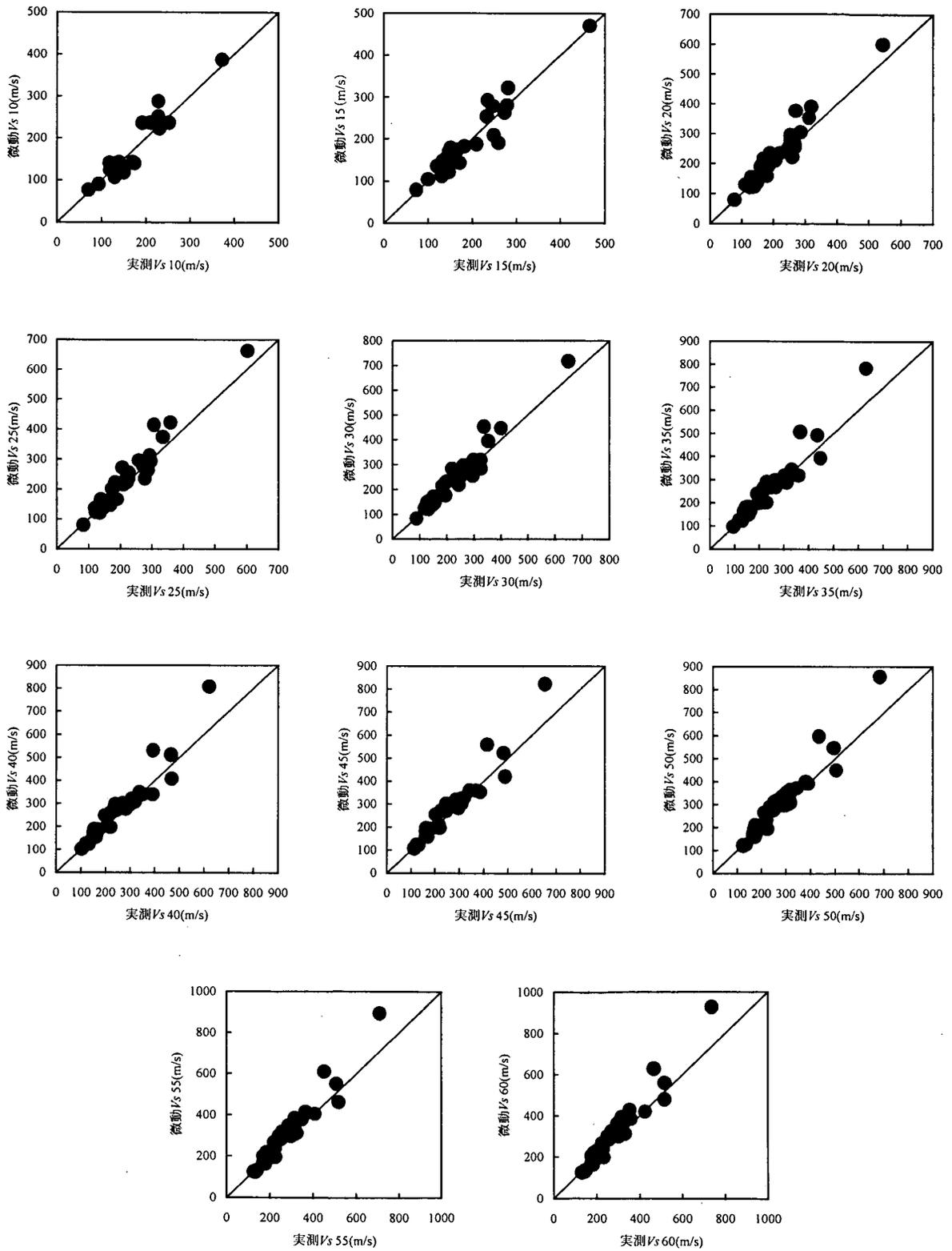


図-19 平均 S 波速度推定精度

5. S波速度構造を直接推定する手法とその精度

5.1 推定方法

本研究においては、2.3(4)で述べた地盤の平均S波速度と基本モードレイリー波の位相速度の関係をもとにしてS波速度構造の推定を試みる。

いま、深さ x_a から Δx だけ深度方向にある深さを x_b とする。 Δx 間のS波速度を $V_s \Delta x$ とする。平均S波速度 $V_s x_a$, $V_s x_b$ は式(10)により得られる。

$$\begin{aligned} V_s x_a &= \frac{x_a}{\frac{x_a}{V_s x_a}} \\ V_s x_b &= \frac{x_b}{\frac{x_b}{V_s x_b}} \\ &= \frac{x_a + \Delta x}{\frac{x_a}{V_s x_a} + \frac{\Delta x}{V_s \Delta x}} \end{aligned} \quad (10)$$

これより、 $V_s \Delta x$ は式(11)により得られる。

$$\begin{aligned} V_s \Delta x &= \frac{V_s x_b \Delta x}{\left(1 - \frac{V_s x_b}{V_s x_a}\right) x_a + \Delta x} \\ &\approx \frac{C(\lambda_b) \Delta x}{\left(1 - \frac{C(\lambda_b)}{C(\lambda_a)}\right) x_a + \Delta x} \end{aligned} \quad (11)$$

ここで、 $V_s x_i$ に対応させるレイリー波位相速度 $C(\lambda_i)$ は表-1の関係を用いる。

推定する層厚の刻み幅 Δx については、本研究においては5mと10mの2種類を想定する。あらかじめボーリングにより層構成が既知の場合も考えられるが、層構成が未知の場合にも適用が可能のように一定の刻み幅とするものである。

図-20～図-27に、理論位相速度、観測位相速度のそれぞれに対して式(11)をあてはめた結果を示す。ここに、鉛直軸に示した RV_s は、 $V_s \Delta x$ の推定値と実測値の比である。 $V_s \Delta x$ の実測値については、 Δx 間でS波速度が変化する場合は、走時で重み付けした平均S波速度として示している。図-20～図-23は $V_s \Delta x$ 実測値に対する分布を示し、図-24～図-27は位相速度の増加率に対する分布を示す。ここに、 $\Delta C(\lambda) = C(\lambda_b) - C(\lambda_a)$ である。なお、5m刻みの場合、位相速度の増加率が大きい場合に式(11)右辺第2式の分母が負の値を示す場合が観測位相速度を用い

た場合3箇所、理論位相速度を用いた場合2箇所存在した。図-20, 21, 24, 25においては、そのようなデータは除いている。

図より、層厚の刻み幅が5mの場合は10m刻み幅の場合に比べてばらつきが大きく、推定値と実測値の比の値は最大で15.75、最小で0.38である。10m刻みの場合は、理論位相速度による場合、比の値の最大値は1点を除いては2.0以下であるが、観測位相速度による場合は、やはりばらつきが大きい。比の値の分布幅は0.40～5.33である。5m刻みのケースについて、 RV_s と位相速度増加率の関係を見ると、ばらつきはあるものの右上がりの弱い正の相関が伺える。このことは、位相速度が注目している波長近傍において急激に増加する場合に、式(11)の近似関係がうまく成立しないことが RV_s のばらつきの原因であることを示唆すると考えられる。そこで、式(11)右辺の第2式の分母を mx と定義し、 mx と RV_s の相関を整理した。結果を図-28～図-31に示す。

位相速度の変化の激しい波長近傍においては mx が小さな値を示すが、この値がある一定値(5m刻みの場合は3m, 10m刻みの場合は6m)以下の場合に、実測値よりも大きな値を推定してしまう傾向にあり、 mx がゼロに近づくにつれて RV_s は指数関数的に増加することが分かる。

そこで、 mx と RV_s の関係の近似式を導入し、式(12)に示すように、 mx の値に応じて $V_s \Delta x$ の推定値を補正することを考える。

$$\begin{aligned} V_s \Delta x &= \frac{C(\lambda_b) \Delta x}{\alpha \left\{ \left(1 - \frac{C(\lambda_b)}{C(\lambda_a)}\right) x_a + \Delta x \right\}} \\ &= \frac{C(\lambda_b) \Delta x}{\alpha \cdot mx} \end{aligned} \quad (12)$$

ここに、

$$\begin{aligned} \alpha &= 0.05 \exp\{6 - 2mx\} + 1 \quad (\Delta x = 5\text{m}) \\ \alpha &= 0.02 \exp\{9 - 15mx\} + 1 \quad (\Delta x = 10\text{m}) \end{aligned} \quad (13)$$

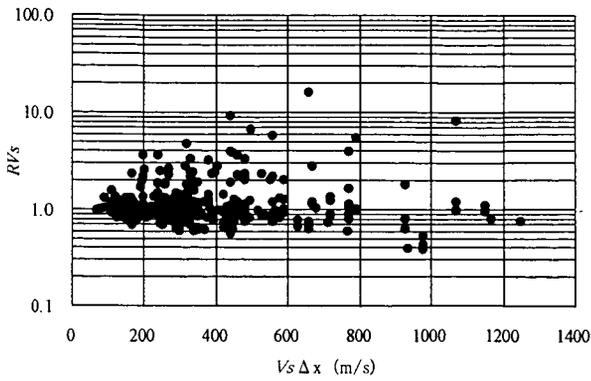


図-20 RV_s の分布 (5 m 刻み, 理論位相速度)

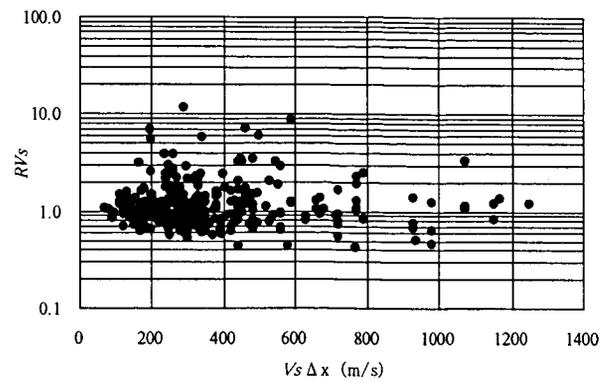


図-21 RV_s の分布 (5 m 刻み, 観測位相速度)

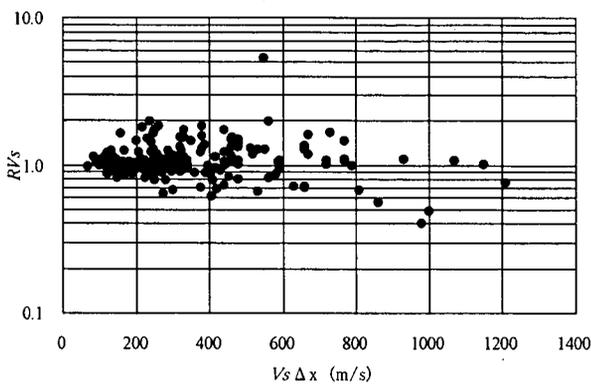


図-22 RV_s の分布 (10m 刻み, 理論位相速度)

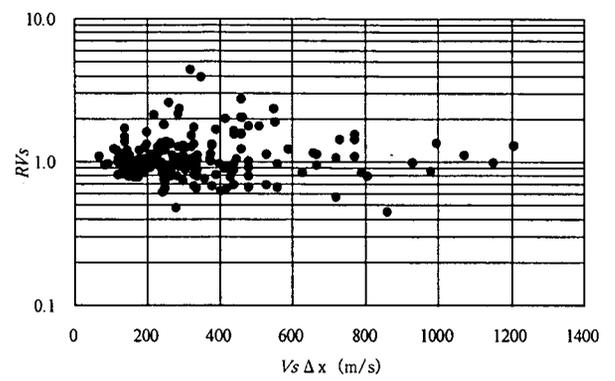


図-23 RV_s の分布 (10m 刻み, 観測位相速度)

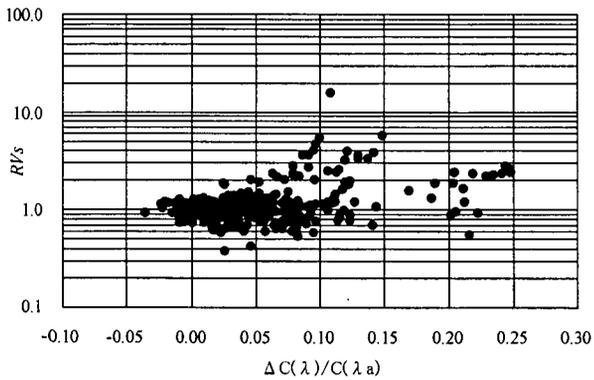


図-24 RV_s の分布 (5 m 刻み, 理論位相速度)

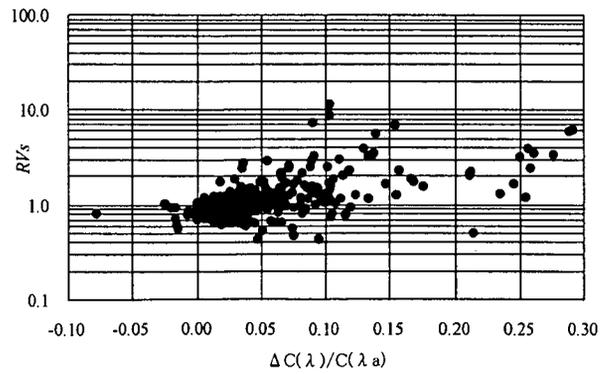


図-25 RV_s の分布 (5 m 刻み, 観測位相速度)

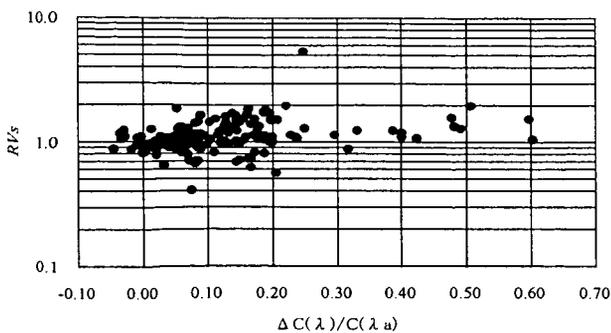


図-26 RV_s の分布 (10m 刻み, 理論位相速度)

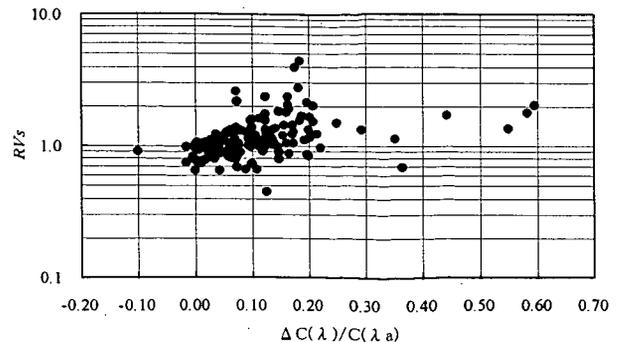


図-27 RV_s の分布 (10m 刻み, 観測位相速度)

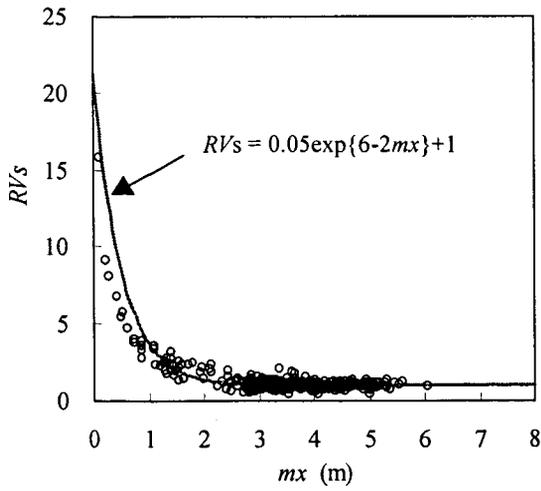


図-28 mx と RVs の相関 (5m 刻み, 理論位相速度)

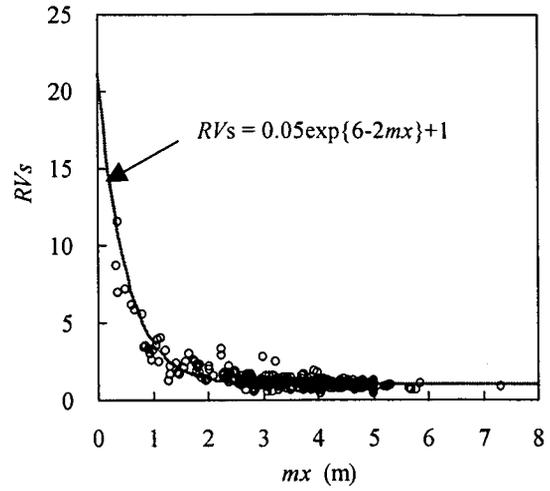


図-29 mx と RVs の相関 (5m 刻み, 観測位相速度)

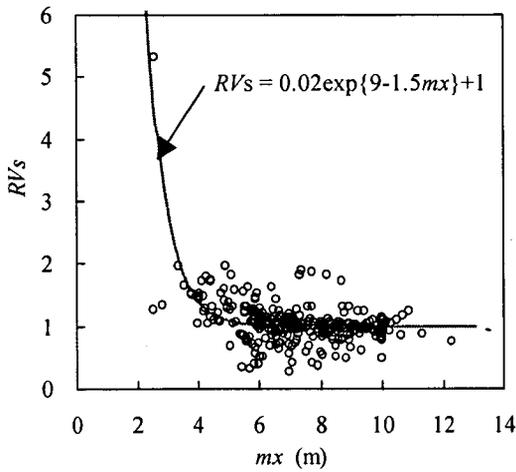


図-30 mx と RVs の相関 (10m 刻み, 理論位相速度)

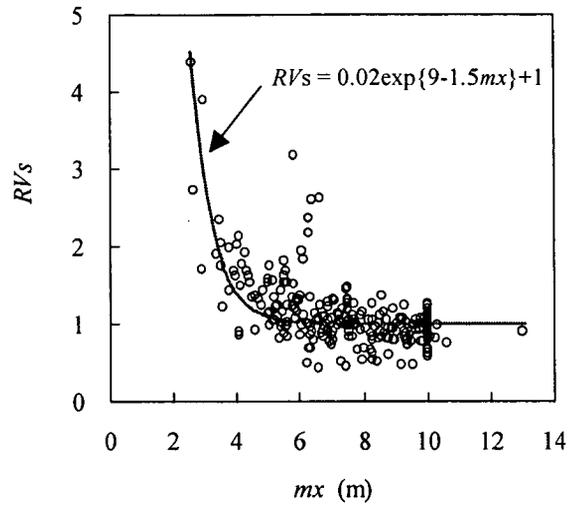


図-31 mx と RVs の相関 (10m 刻み, 観測位相速度)

5.2 推定精度

5.1 で述べた補正によって S 波速度を推定するが、ここで位相速度を次の 3 タイプに分類する。図-32 に示したように、波長に対してほぼ線形に位相速度が増加する場合を type1、位相速度の波長に対する増加の割合がある一定の波長を超えると減少する場合(上に凸)を type2、逆にある一定の波長以上になると位相速度の増加の割合が増加する場合(下に凸)を type3 とする。対応する S 波速度構造としては、例えば、深さ方向に S 波速度が比例的に増加する場合が type1、ある深さのところ S 波速度の増加の割合が減少する場合が type2、ある深さから S 波速度が急激に増加する場合は type3 となる。実際には S 波速度構造は複雑であり、必ずしも上記のように分類されるわけではなく、上述したのは各タイプの代表的な S 波速度構造の特徴であるに過ぎない。

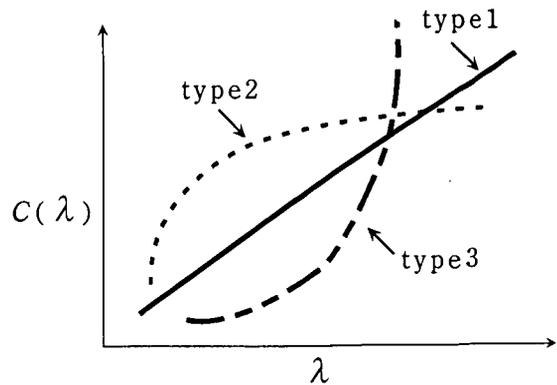


図-32 位相速度分類

図-33(a)～(d)に S 波速度の推定精度をタイプ別に示す。ここでは、S 波速度構造を直接推定する既往の方法として、Ballard 法による場合との比較を示している。Ballard 法においては、連続的に S 波速度構造を推定することができるが、本研究における提案法との比較の観点から、以下の方法で S 波速度構造を設定した。

①式(7)の係数は 1/3 とする。

② 5 m, 10m ごとの推定とするため、深さの刻みを 2.5m とし、対象とする範囲での平均を行った。例えば、深さ -10～-20m 間の S 波速度は、深さ-10, -12.5, -15, -17.5, -20m における S 波速度の平均値とした。

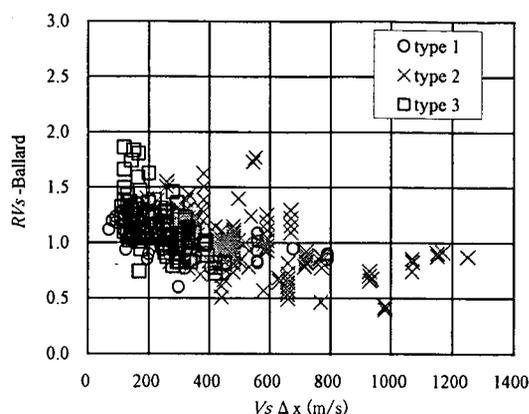
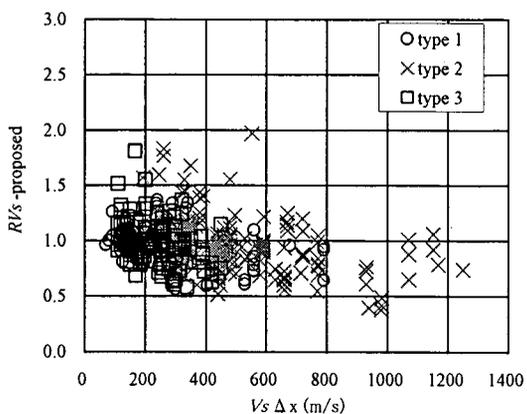


図-33(a) 推定精度の比較 (理論 5m)

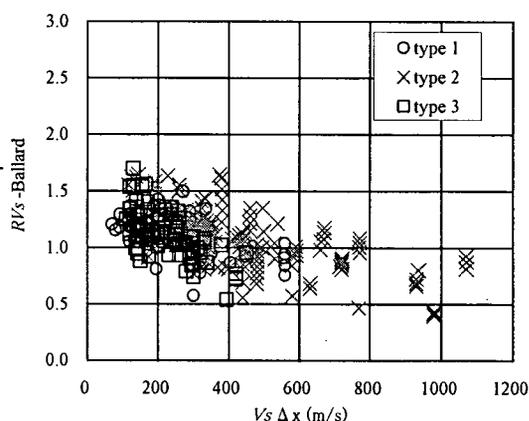
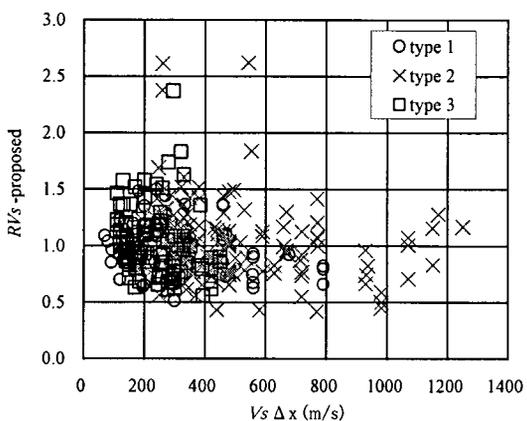


図-33(b) 推定精度の比較 (観測 5m)

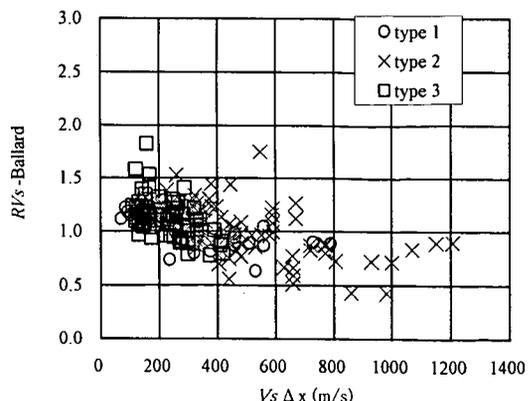
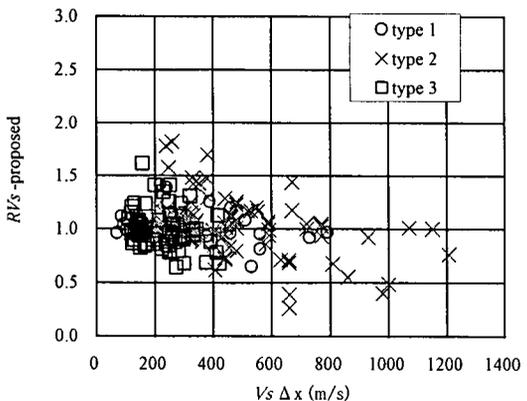


図-33(c) 推定精度の比較 (理論 10m)

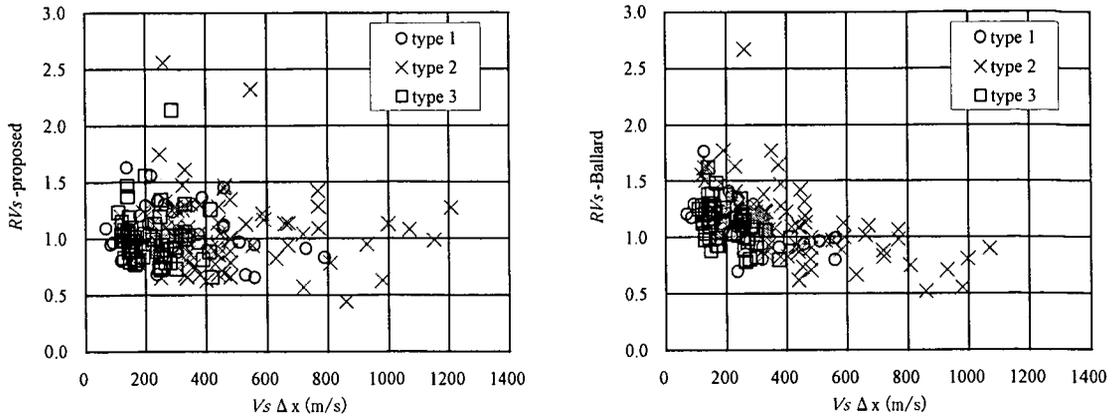


図-33(d) 推定精度の比較 (観測 10m)

表-5(a) 推定精度の比較 (理論)

(i) R/V_s -proposed(5m)				(ii) R/V_s -Ballard(5m)			
type	範囲	平均	標準偏差	type	範囲	平均	標準偏差
1	0.57~1.37	0.958	0.184	1	0.60~1.31	1.040	0.156
2	0.38~1.97	0.972	0.238	2	0.40~1.77	1.024	0.232
3	0.58~1.81	0.985	0.201	3	0.72~1.86	1.137	0.223
total	0.38~1.97	0.973	0.218	total	0.40~1.86	1.061	0.223

(iii) R/V_s -proposed(10m)				(iv) R/V_s -Ballard(10m)			
type	範囲	平均	標準偏差	type	範囲	平均	標準偏差
1	0.65~1.42	1.028	0.137	1	0.63~1.29	1.047	0.153
2	0.26~1.89	1.021	0.241	2	0.43~1.75	1.041	0.221
3	0.64~1.61	0.993	0.182	3	0.78~1.82	1.128	0.184
total	0.26~1.89	1.014	0.209	total	0.43~1.82	1.068	0.203

表-5(b) 推定精度の比較 (観測)

(i) R/V_s -proposed(5m)				(ii) R/V_s -Ballard(5m)			
type	範囲	平均	標準偏差	type	範囲	平均	標準偏差
1	0.51~1.50	0.984	0.221	1	0.58~1.49	1.103	0.186
2	0.42~2.62	1.025	0.325	2	0.40~1.64	1.077	0.241
3	0.56~2.37	1.015	0.285	3	0.54~1.70	1.128	0.198
total	0.42~2.62	1.017	0.296	total	0.50~1.70	1.097	0.221

(iii) R/V_s -proposed(10m)				(iv) R/V_s -Ballard(10m)			
type	範囲	平均	標準偏差	type	範囲	平均	標準偏差
1	0.66~1.63	1.038	0.232	1	0.70~1.77	1.129	0.202
2	0.44~2.56	1.068	0.311	2	0.52~2.67	1.129	0.306
3	0.65~2.14	1.006	0.233	3	0.78~1.62	1.116	0.175
total	0.44~2.56	1.035	0.277	total	0.52~2.67	1.125	0.256

なお、観測位相速度については、観測結果より推定可能な位相速度の波長は各地点毎に異なっているため、推定可能な深さにはばらつきがある。例えば Ballard 法では、深さ-60m における S 波速度を推定するためには 180m の波長における位相速度が求められている必要がある。これに対して本提案法では、80m の波長における位相速度が求められていれば深さ-60m までの S 波速度構造の推定が可能である。このことは、本提案法の方が短いアレー半径で深い位置まで推定可能であることを意味している。

また、本研究では最小のアレー半径として 3m または 5m を採用しているが、波長 15m 程度の位相速度が検出できない場合もある。このため、地表に近いごく浅い部分の S 波速度が推定できない場合もある。このような場合は、本提案法、Ballard 法のいずれにおいても、推定可能な最浅部の S 波速度が地表まで続いているものと仮定して補正を行い、必ず地表から順次 S 波速度構造を推定することとした。

さらに、本提案法では式(12)に示す補正を行うわけであるが、位相速度の増加が極めて大きい場合、前述のように 5m 刻みの場合は m_x の値が負になることがあった。このような場合は便宜的に、対応する深さの上下の S 波速度推定値の平均値を用いた。なお、10m 刻みの場合は m_x の値が負になるケースはなかった。

推定結果より、本提案法、Ballard 法のいずれにおいても、type1 の地盤についてはばらつきが少なく、精度良く推定が行われていることが分かる。ただし、type2、type3 については、ややばらつきがある。

推定精度 RV_s の値の範囲は表-5(a)、(b)に示すとおりである。理論位相速度を用いる場合は、提案法の方が平均的に実際の S 波速度に近い値を与えるが、Ballard 法では平均的にやや大きな S 波速度を与える傾向にある。また、 RV_s の標準偏差は僅かながら提案法の方が Ballard 法よりも小さく、適用性は高いことが推察される。しかしながら、観測位相速度を用いた場合は、 RV_s の標準偏差は逆に提案法の方が Ballard 法よりも大きな結果となった。この結果は、提案法の精度が位相速度の観測精度に依存しやすいことを示すものと考えられる。ただし、 RV_s の平均値は Ballard 法はやや大きく、1.1 程度の値を示すが、提案法では 1.02~1.04 と 1.0 に近い値を示した。

次に、推定された S 波速度構造の分布を図-34~図-37 に示す。Ballard 法においては、基本的に推定 S 波速度は深度方向に単調に増加する。これに対して本提案法ではそのような傾向はなく、深度方向に増減が大きい結果となる。

まず 5m 刻みの理論位相速度 (図-34(1)~(6)) について見ると、type1 地盤では両手法とも速度検層の結果に近い値を与えることがわかる。ただし、type1 の地盤では S 波速度が深度方向に単調に増加するケースが多いが、提案法では S 波速度が減少するケースがあるため、実測値と開きが目立つ箇所が存在する (横浜港(山下)GL-30~35m, 日野 GL-45~50m)。type2 では、GL-22~40m に 980m/s の非常に大きな S 波速度の層が存在する千歳においては、いずれの手法においても実測値との対応はよくない。このほか、泉、白糠南、溝口についても、S 波速度の急激な増大に対応できていないことがわかる。また、釧路港については、提案法では GL-15~20m 区間で非常に大きな S 波速度を推定してしまう結果となった。また、type2 地盤では S 波速度が深度方向にあまり増加しないケースがあるが、そのような地盤では、Ballard 法では実測値との開きが目立つ場合がある (例えば、釧路空港、境港) ことがわかる。これに対し提案法では、S 波速度構造にある程度追従しているといえる。type3 地盤についても、Ballard 法では S 波速度を過大に評価するケースがある (横浜港(大黒))。また、六甲アイランドでは S 波速度の増減に対応できない Ballard 法の特徴があらわれている。以上の傾向は 10m 刻みの場合 (図-35(1)~(6)) についても同様であるといえる。

また、観測位相速度に対する結果 (図-36(1)~(6)、37(1)~(6)) についても、ほぼ同様な点が指摘できる。ただし、観測位相速度は観測誤差を含んでいるため、特に 5m 刻みの場合に理論位相速度よりも誤差が広がる地点 (船橋、新千歳空港、白糠北) が存在する。一方で、誤差のために速度検層結果に推定値が近づくケースもあった (新篠津、5m)。

また、Ballard 法では提案法に比べて長い波長の位相速度を必要とするため、60m の深さまで S 波速度構造を推定できなかった箇所が 33 地点中 13 地点あった。これに対し提案法では、2 地点のみであり、短いアレー半径で深い位置まで推定可能な点が提案法の利点としてあげられる。

以上の結果をまとめると、提案法では実際の地盤の S 波速度の増減以上に増減があるように推定してしまう箇所がある反面、S 波速度の増減がある箇所では増減に追従する可能性が高く、Ballard 法よりも有利であるといえる。また、観測に必要なアレー半径が短くてすむことも有利な点である。

よって、逆解析における初期値の設定方法としての適用性は、今後実際に逆解析に適用した上で検証を行う必要がある。

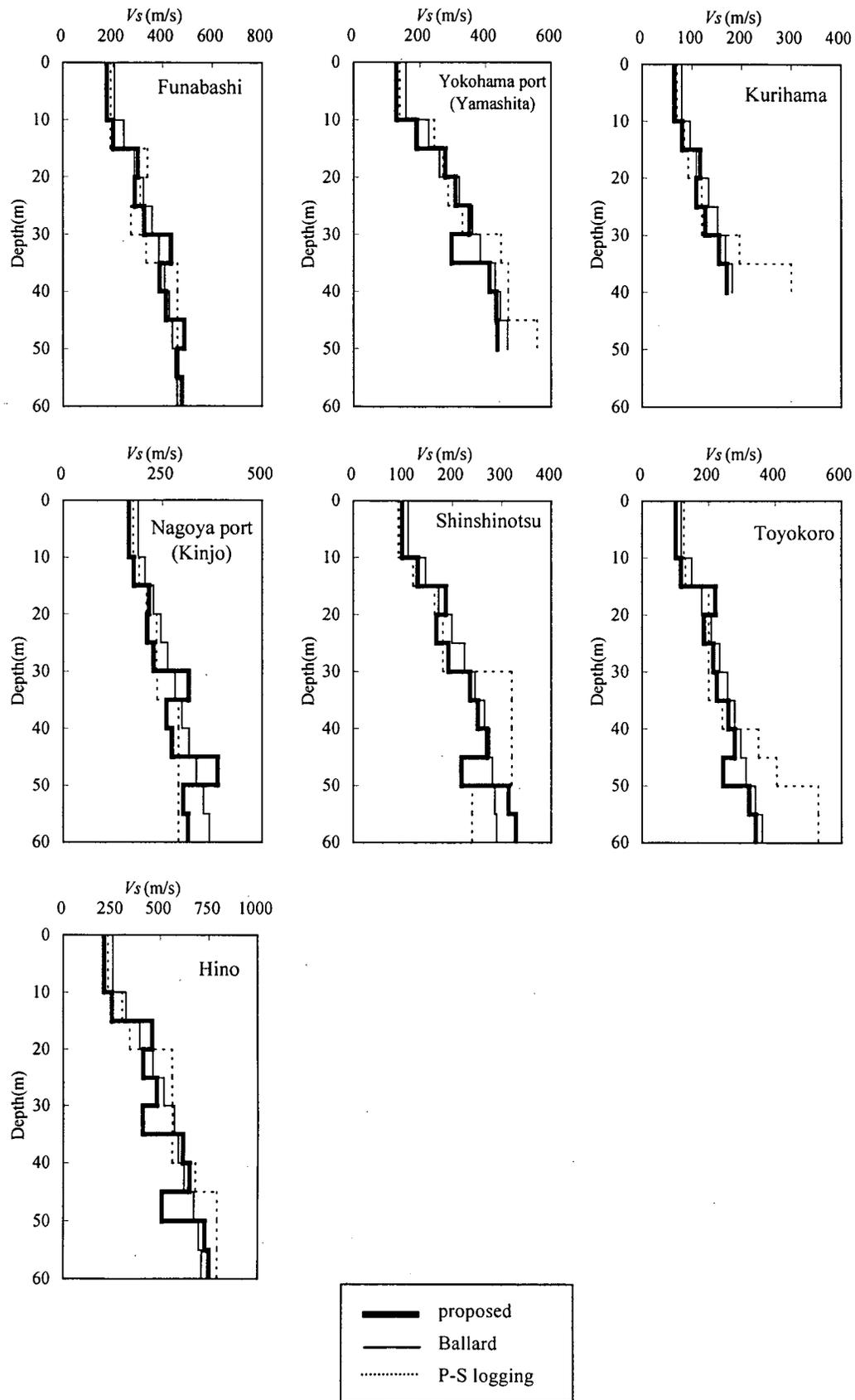


図-34(1) S波速度深度分布の比較(5m, 理論位相速度 type1)

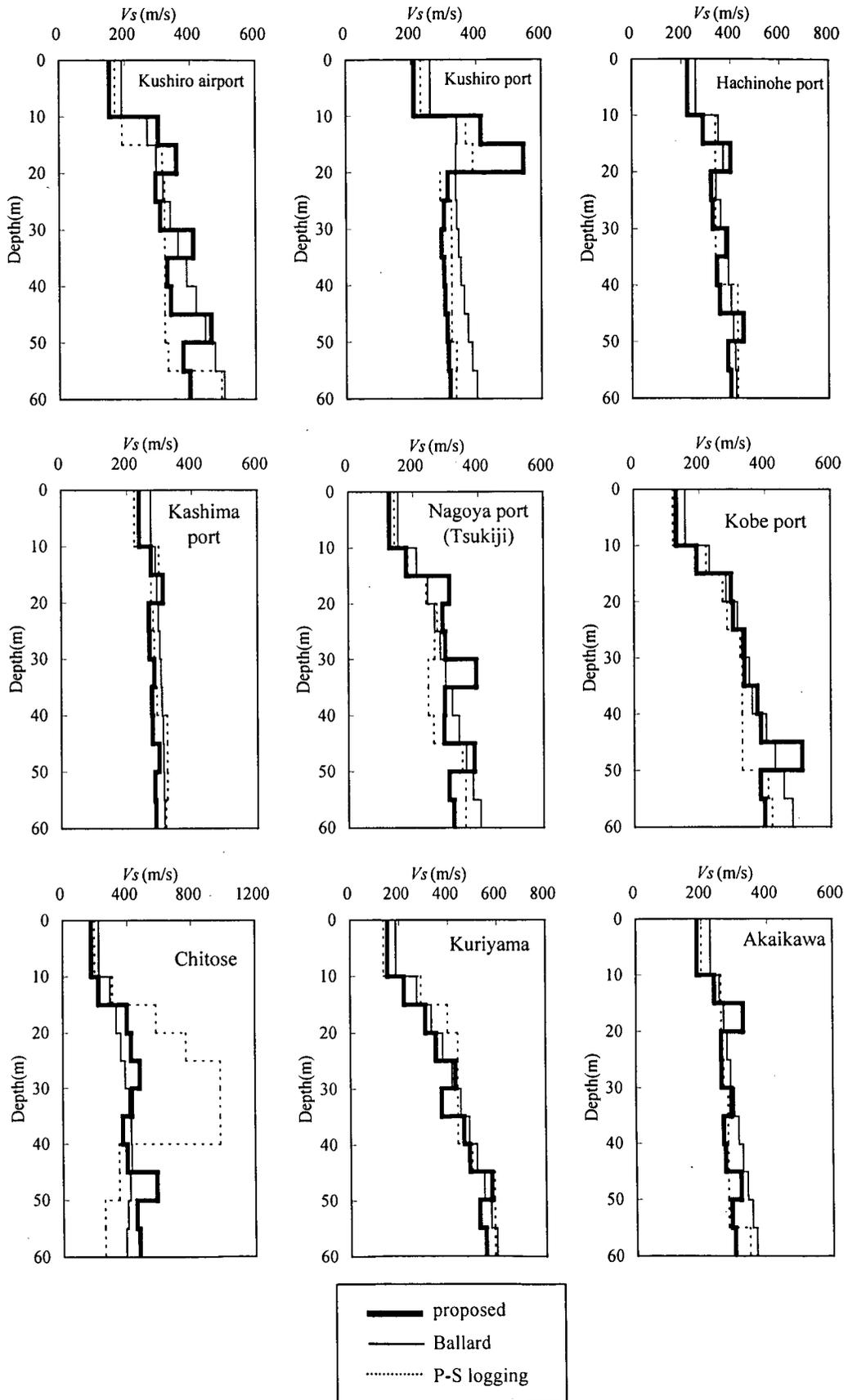


図-34(2) S波速度深度分布の比較(5m, 理論位相速度 type2) -その1

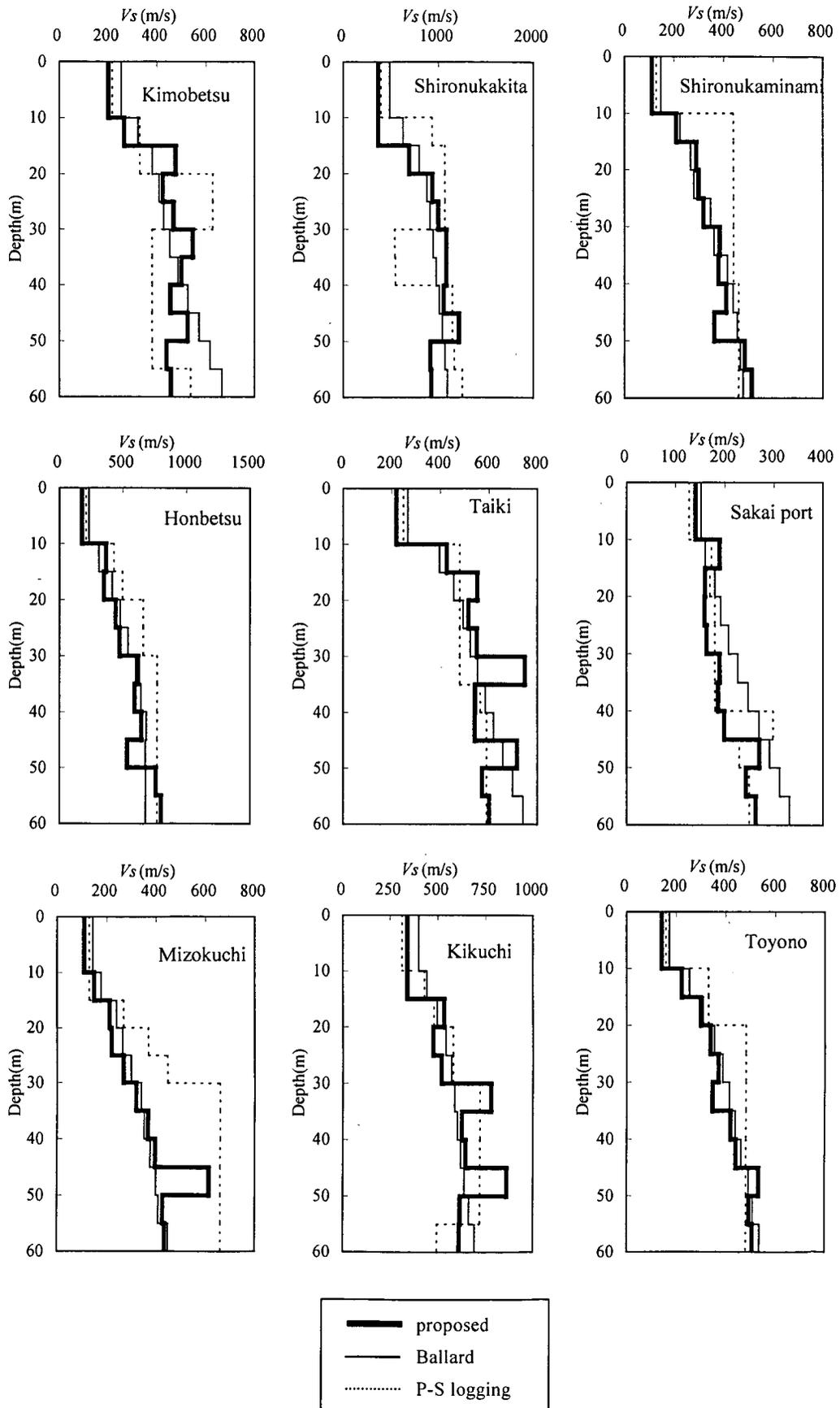


図-34(3) S波速度深度分布の比較(5m, 理論位相速度 type2) -その2

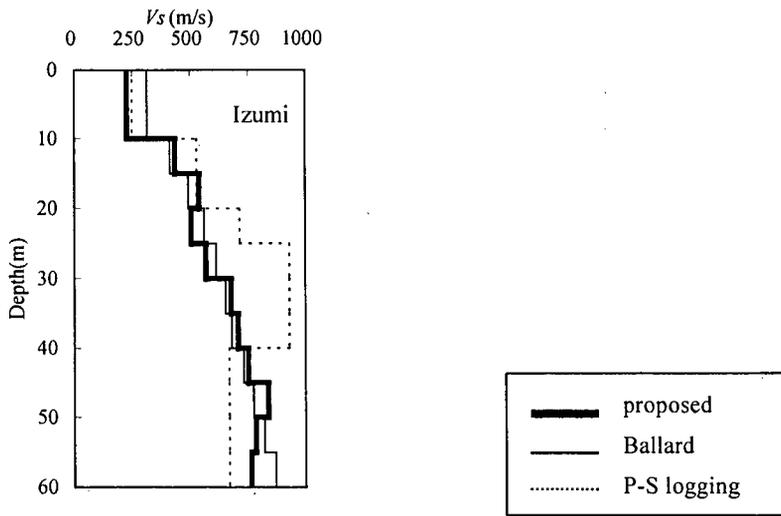


図-34(4) S波速度深度分布の比較(5m, 理論位相速度 type2) -その3

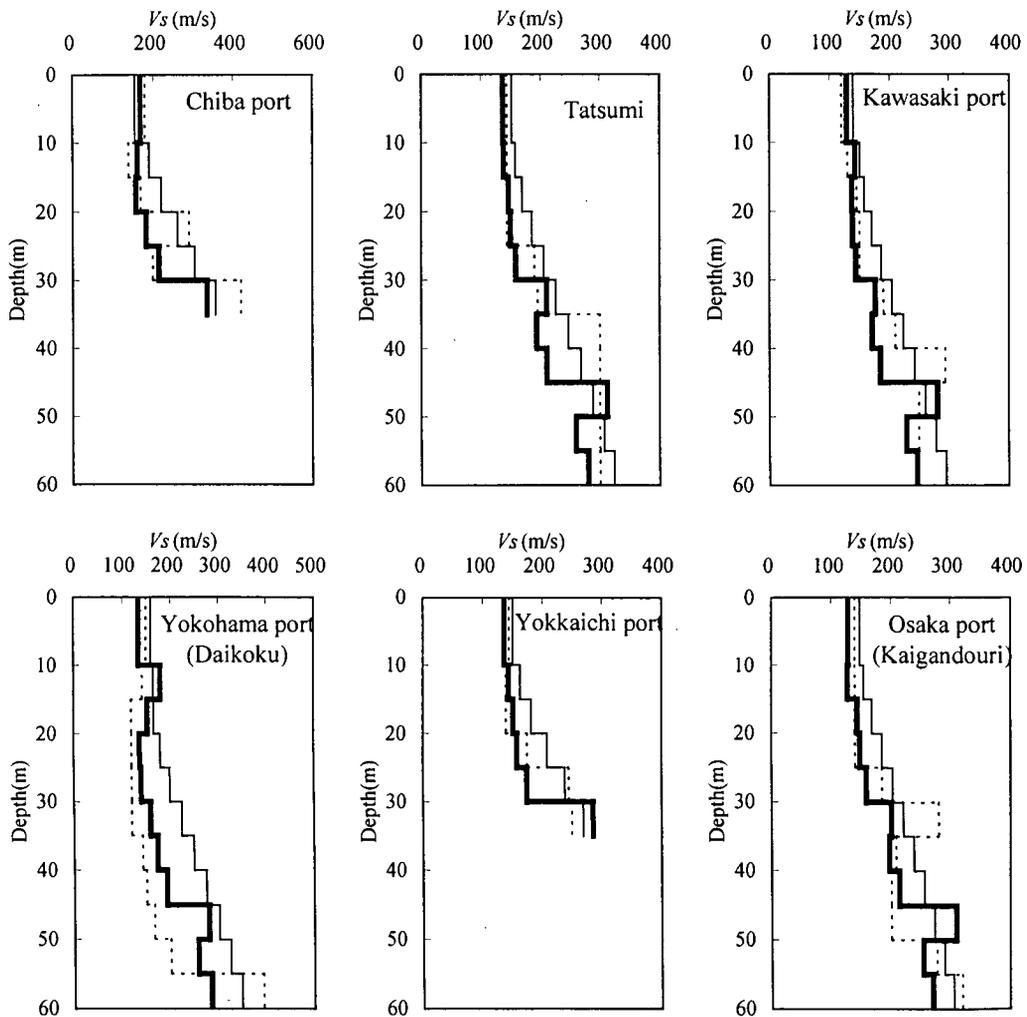


図-34(5) S波速度深度分布の比較(5m, 理論位相速度 type3) -その1

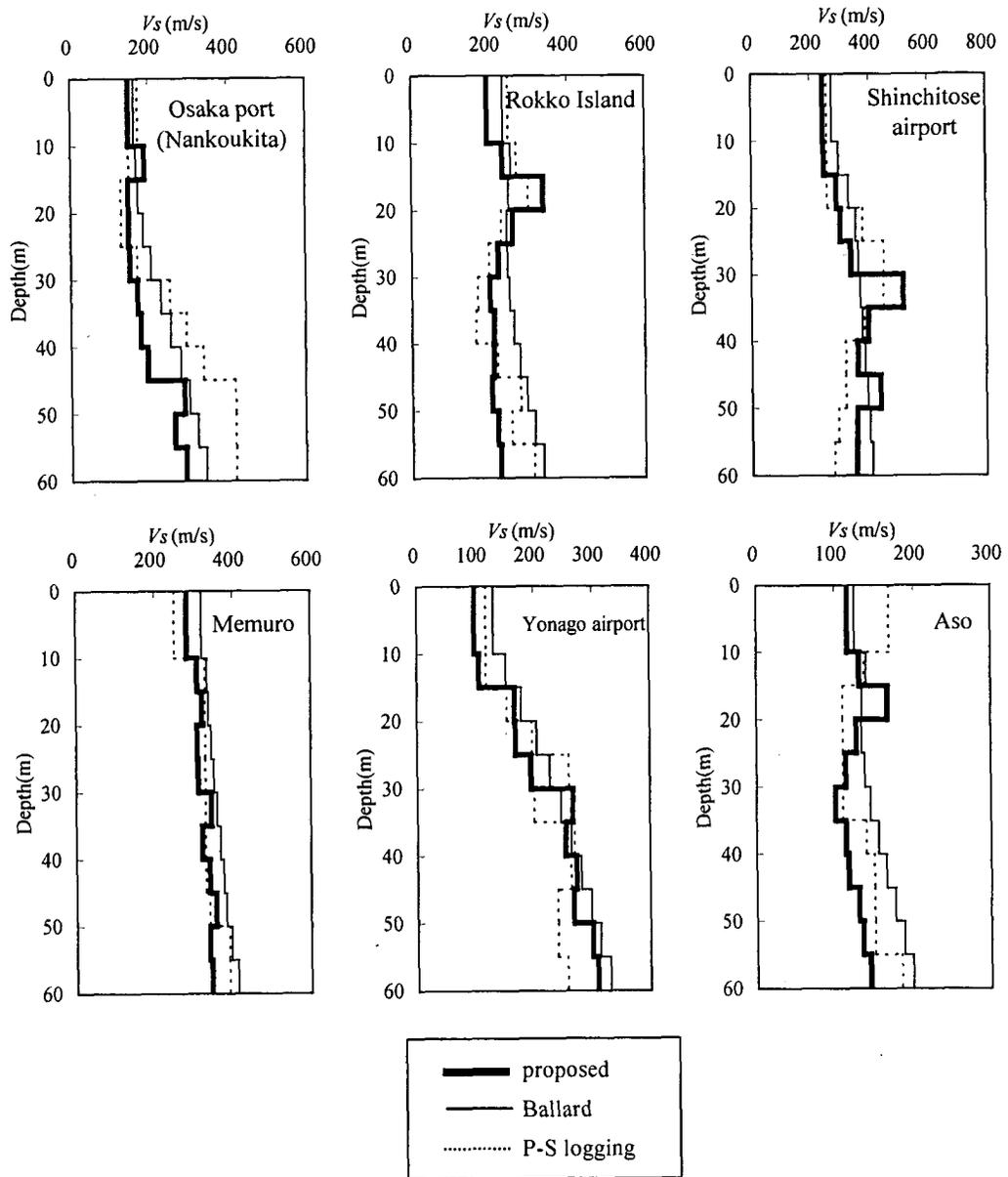


図-34(6) S波速度深度分布の比較(5m, 理論位相速度 type3) -その2

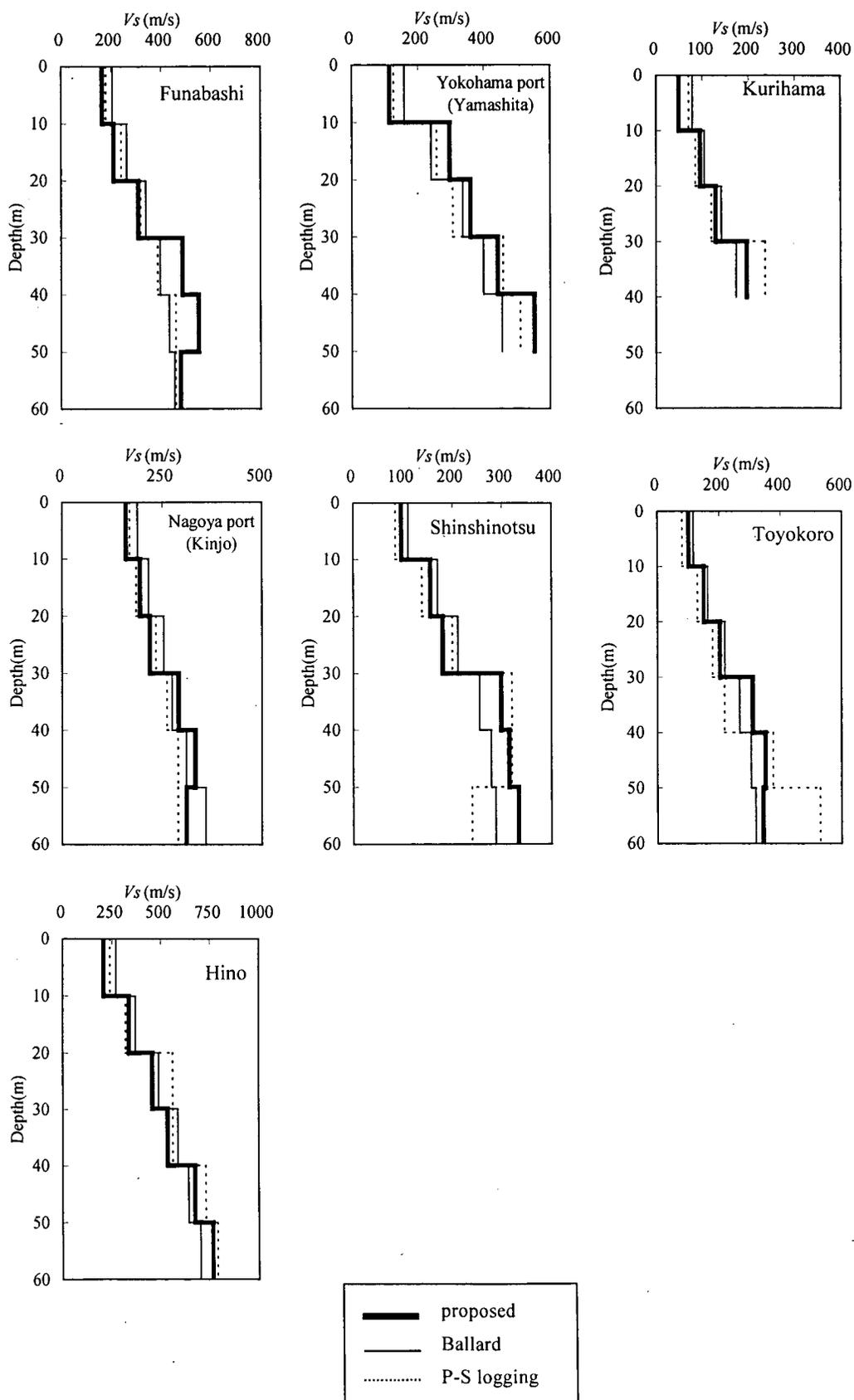


図-35(1) S波速度深度分布の比較(10m, 理論位相速度 type1)

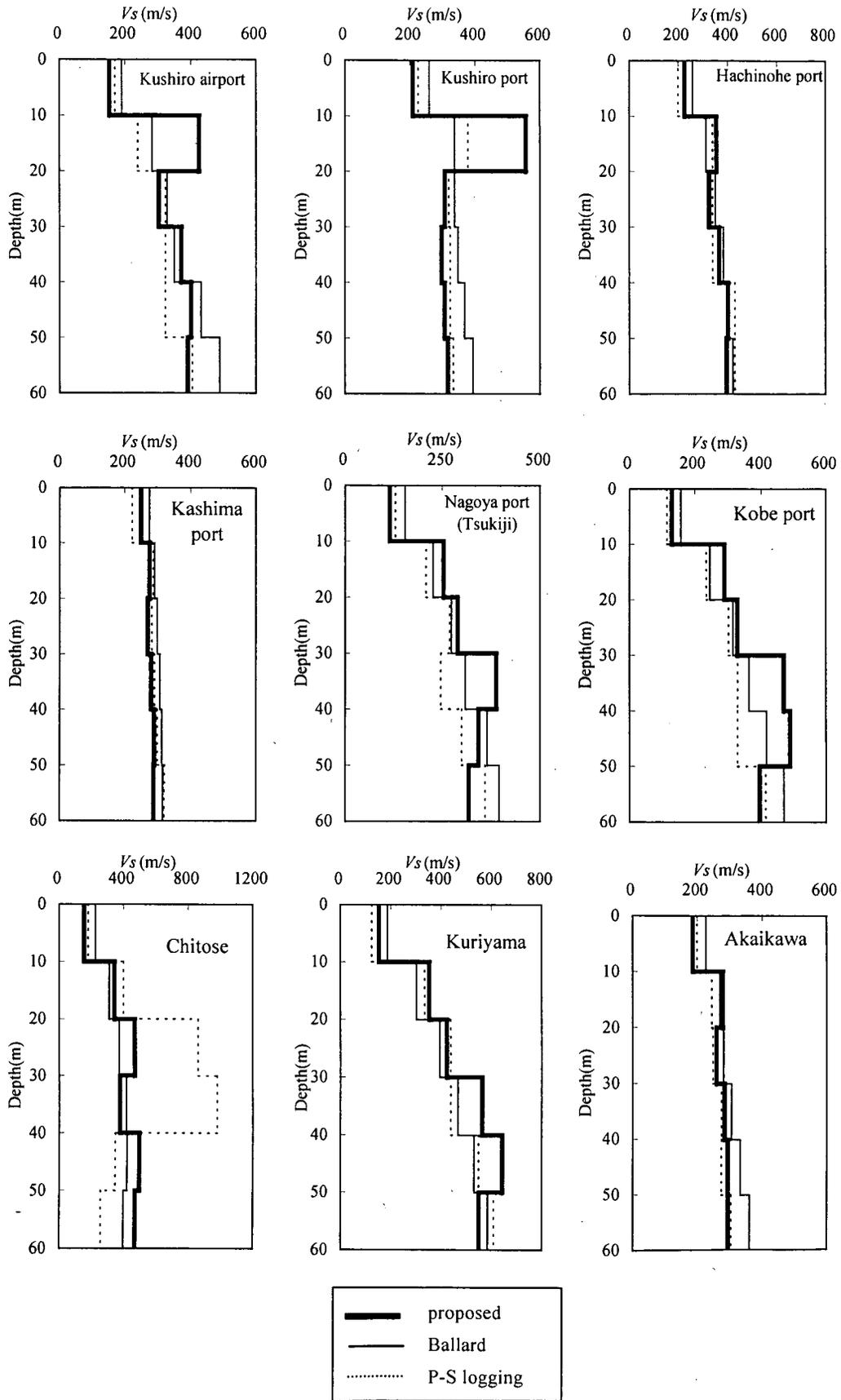


図-35(2) S波速度深度分布の比較(10m, 理論位相速度 type2) -その1

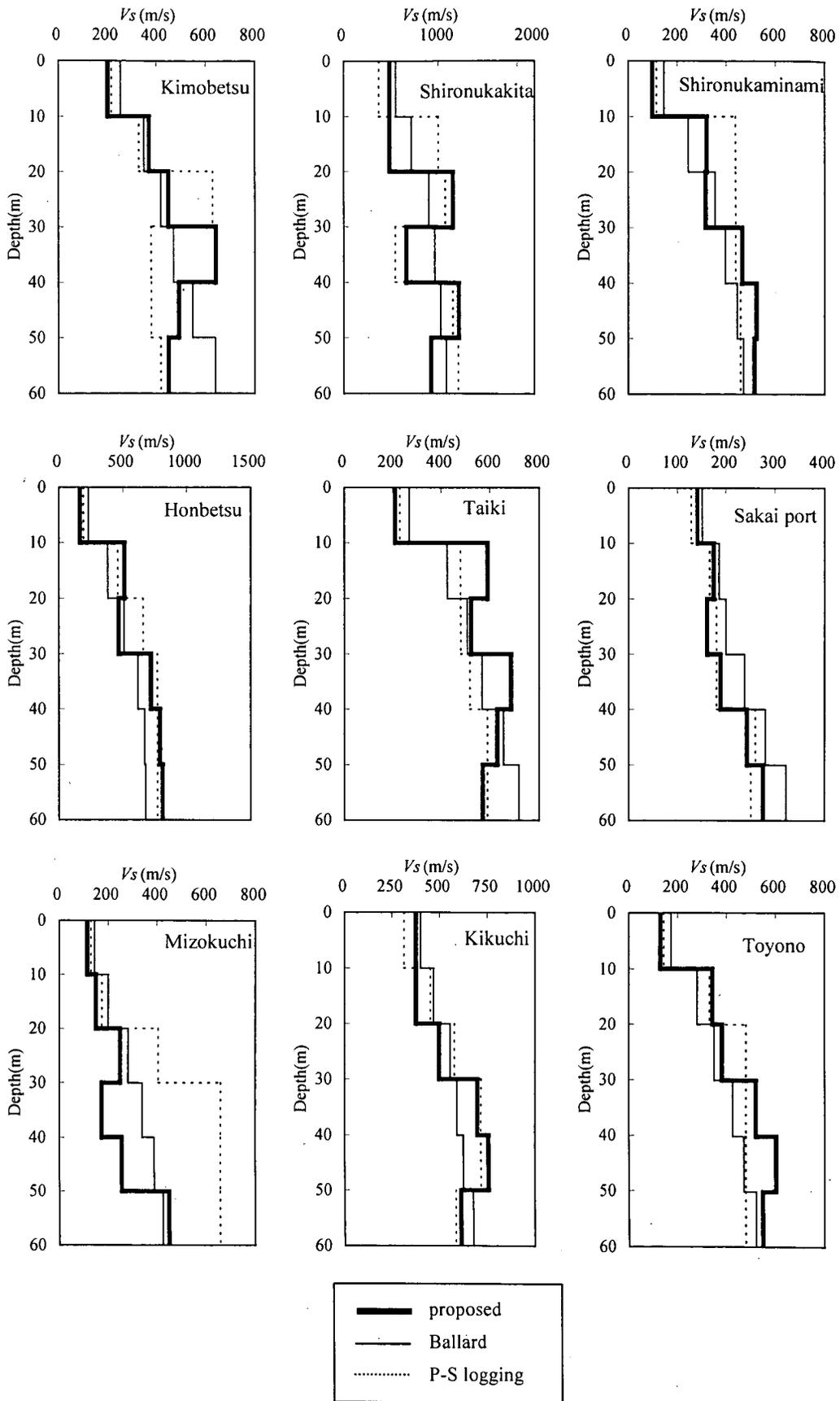


図-35(3) S波速度深度分布の比較(10m, 理論位相速度 type2) -その2

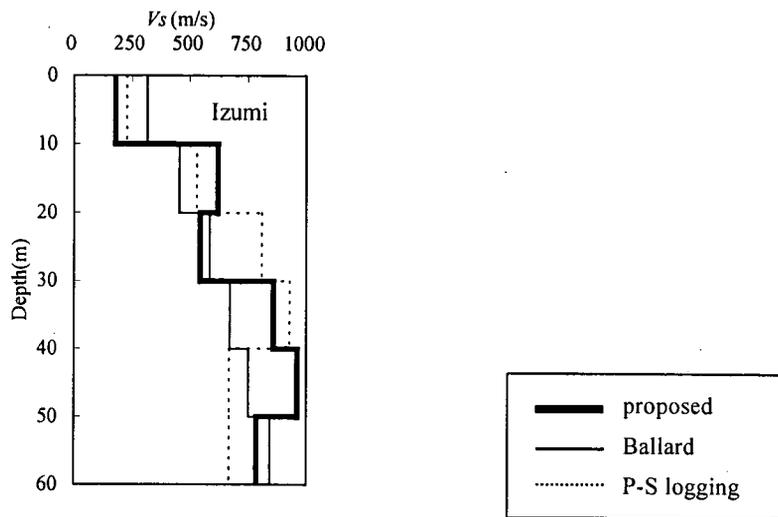


図-35(4) S波速度深度分布の比較(10m, 理論位相速度 type2) -その3

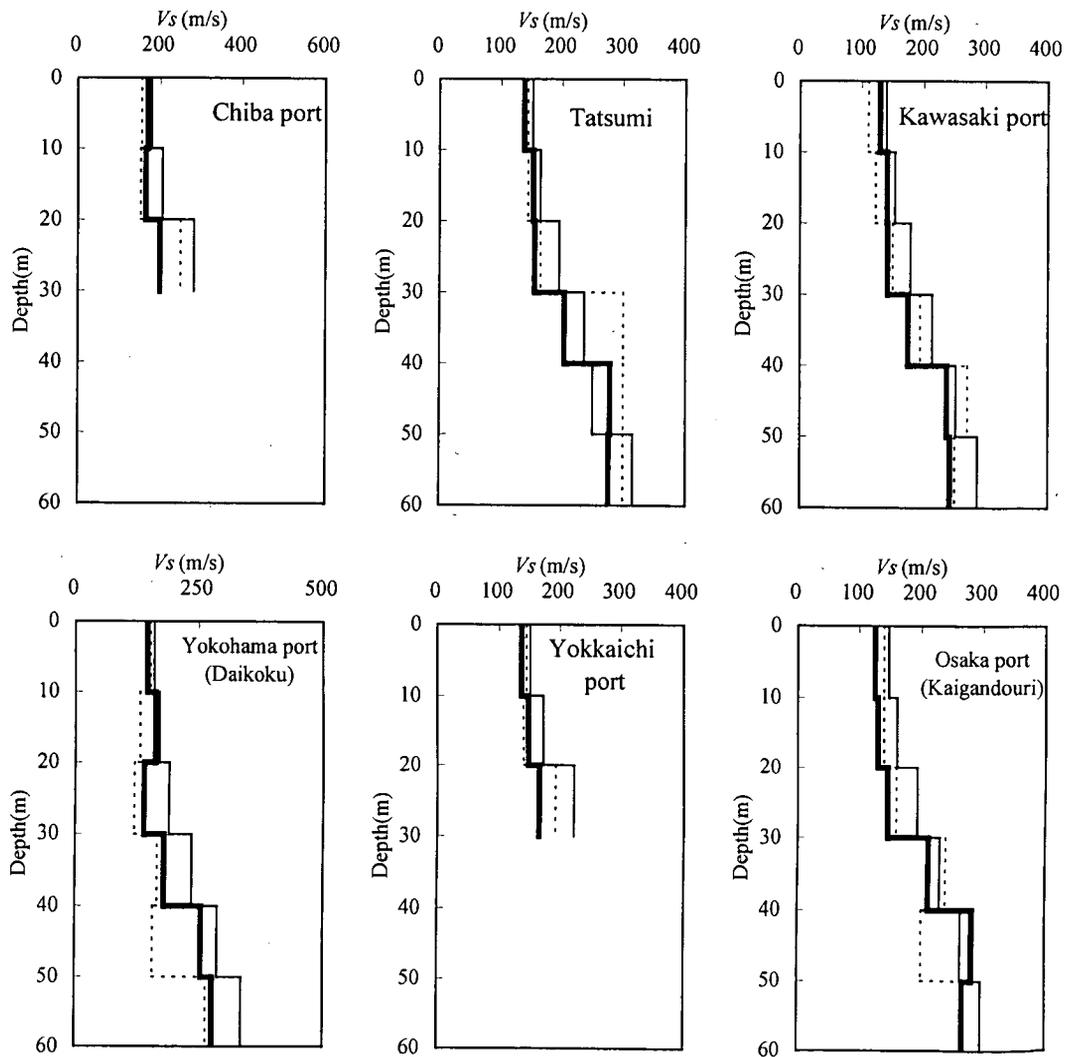


図-35(5) S波速度深度分布の比較(10m, 理論位相速度 type3) -その1

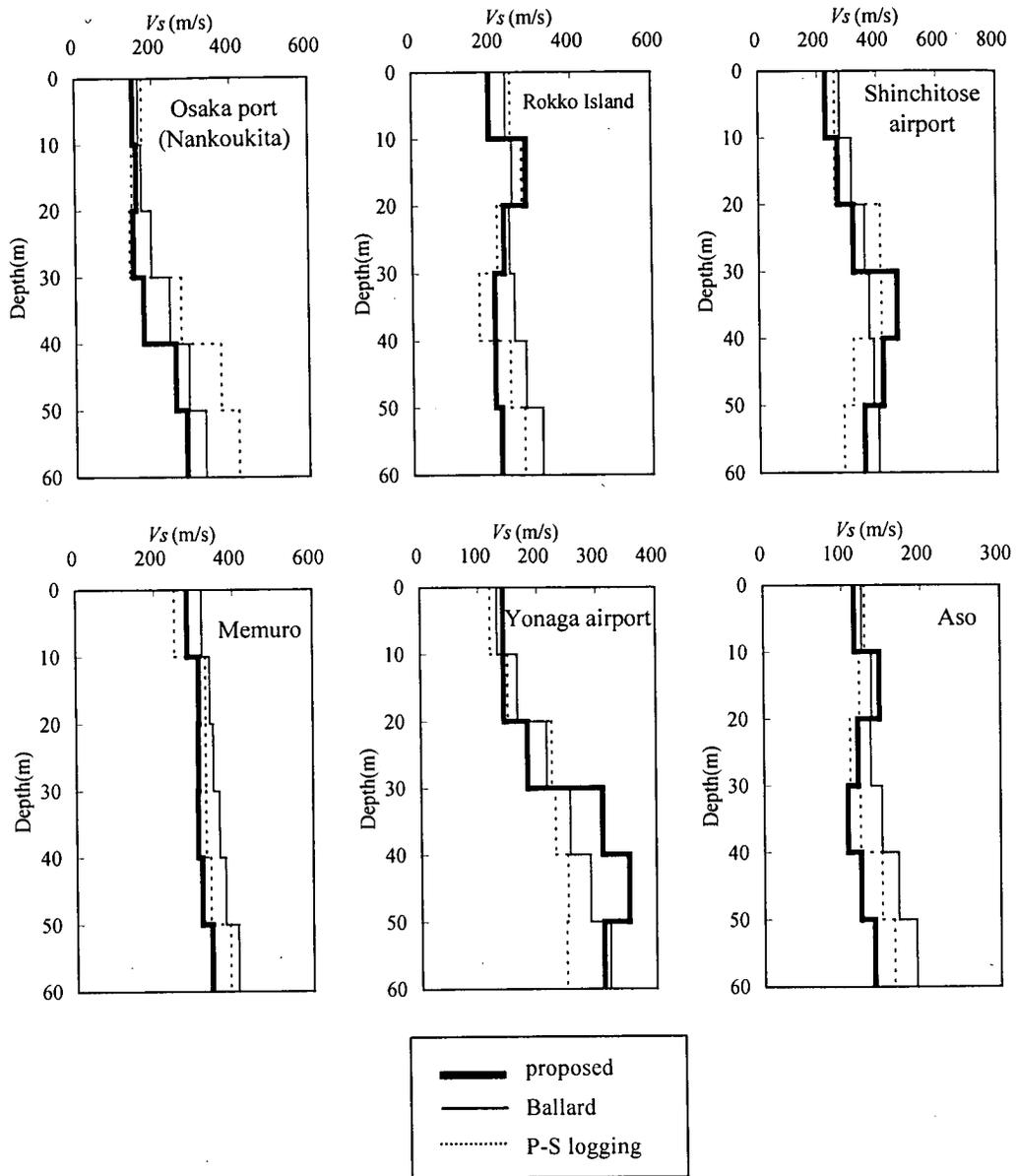


図-35(6) S波速度深度分布の比較(10m, 理論位相速度 type3) -その2

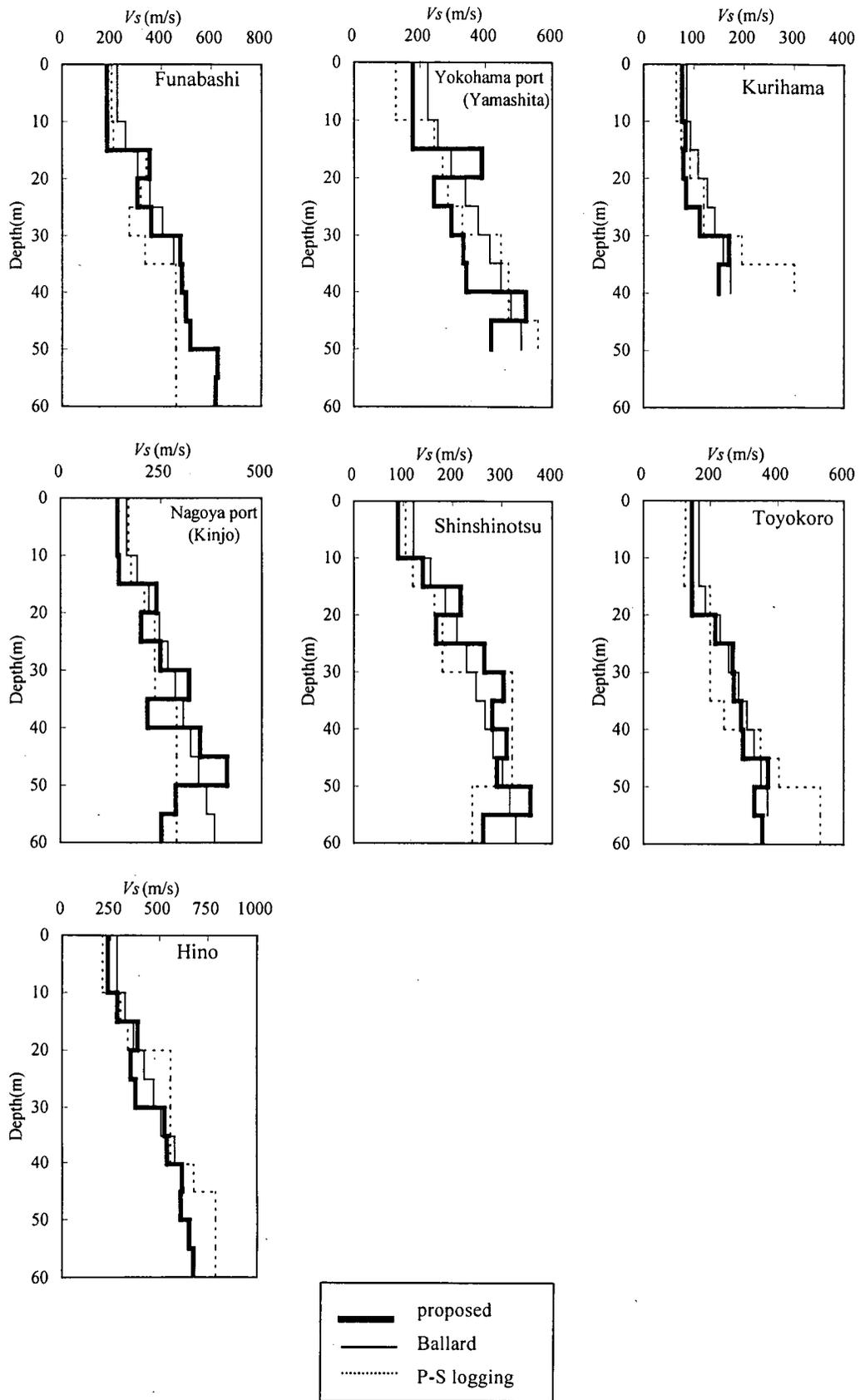


図-36(1) S波速度深度分布の比較(5m, 観測位相速度 type1)

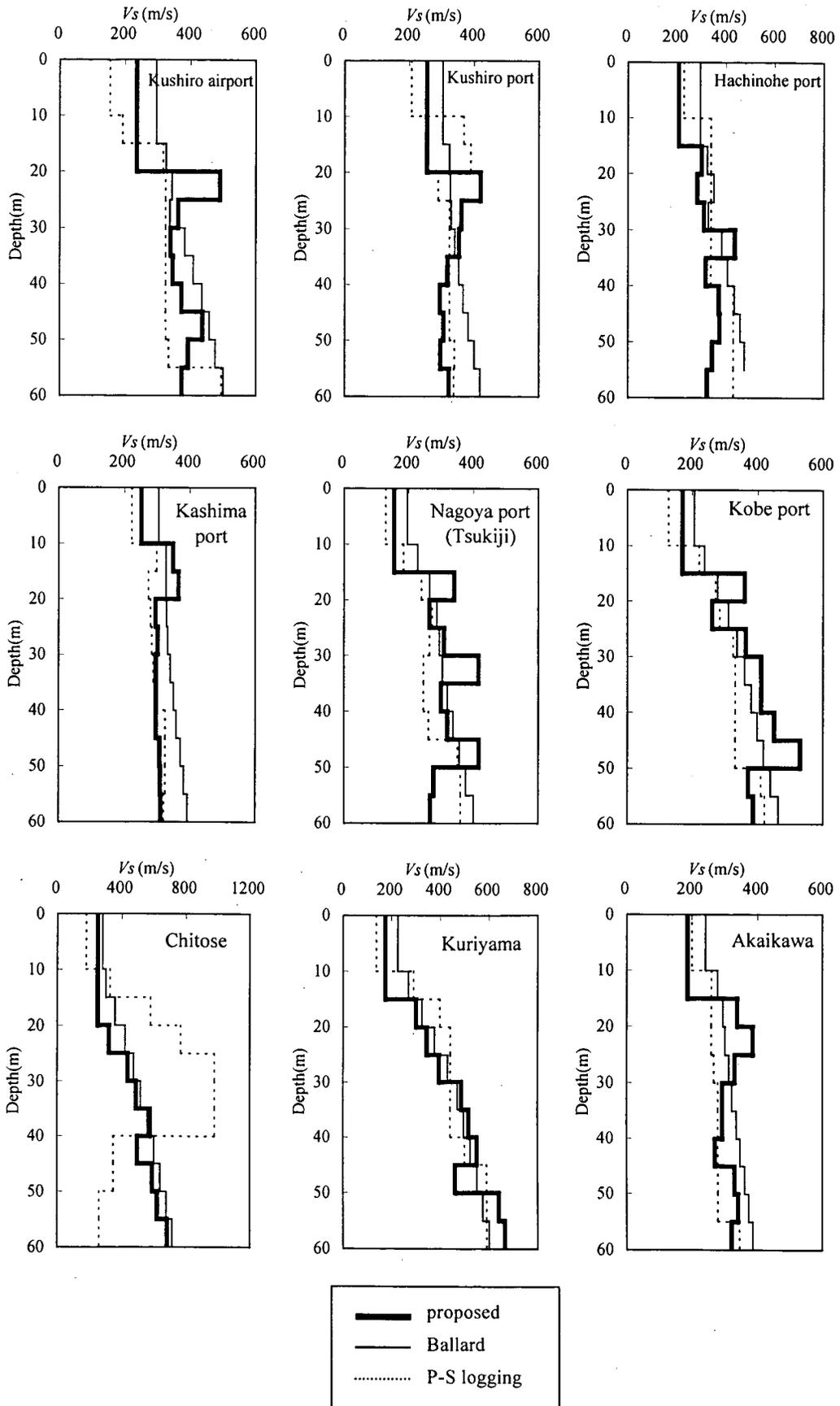


図-36(2) S波速度深度分布の比較(5m, 観測位相速度 type2) -その1

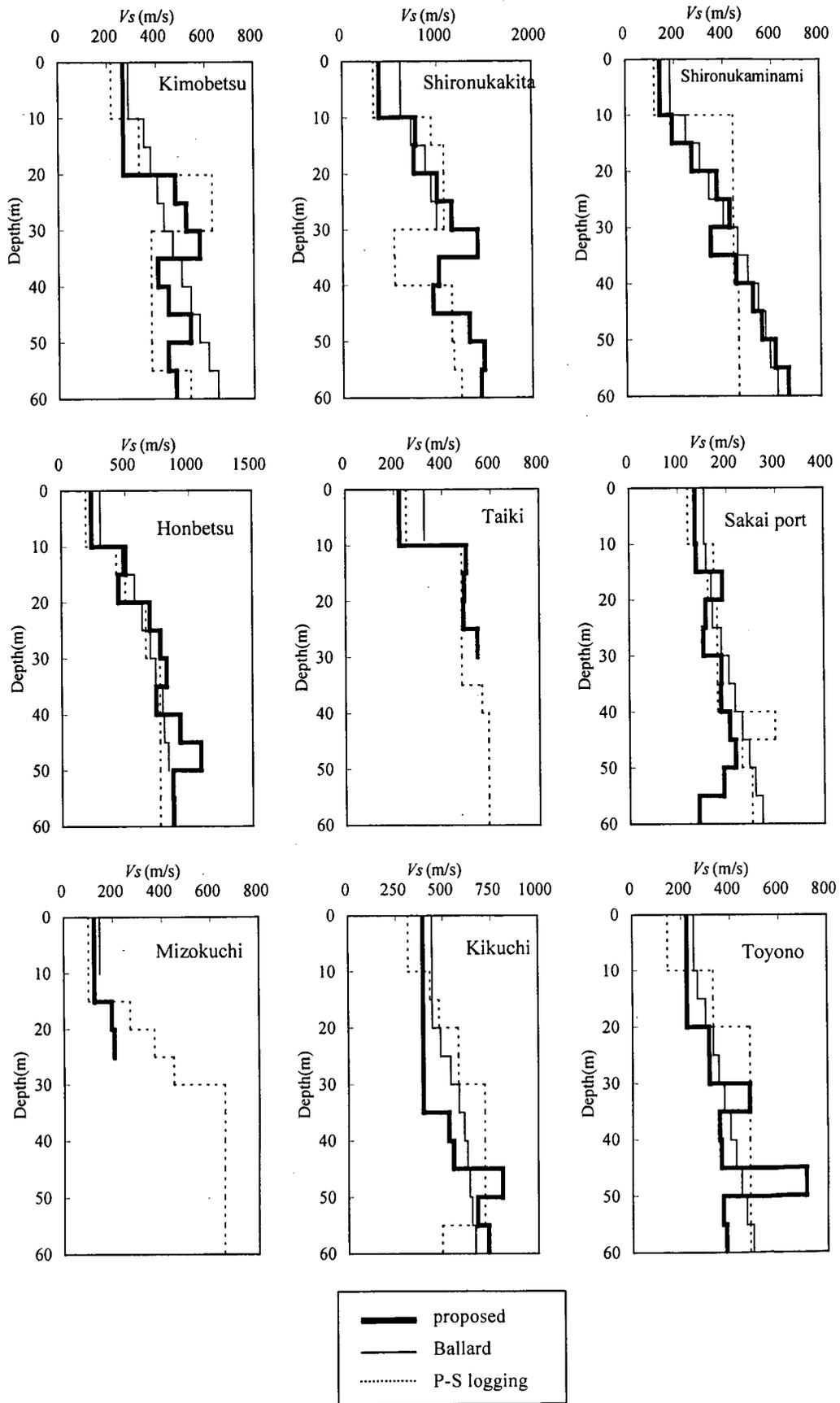


図-36(3) S波速度深度分布の比較(5m, 観測位相速度 type2) -その2

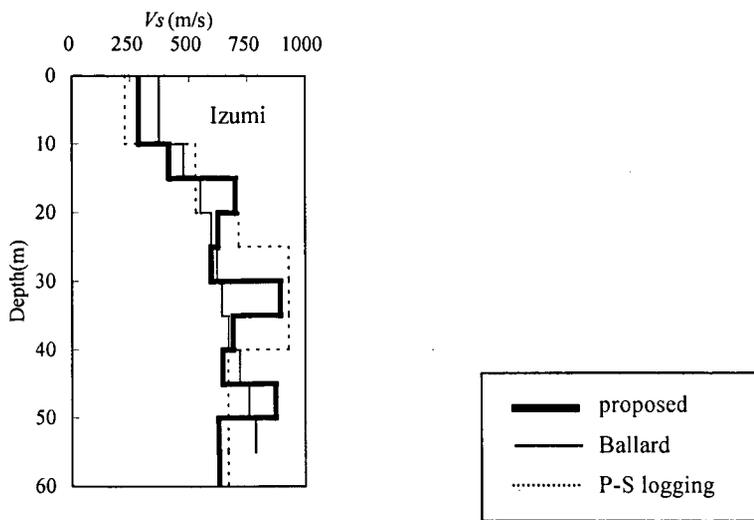


図-36(4) S波速度深度分布の比較(5m, 観測位相速度 type2) -その3

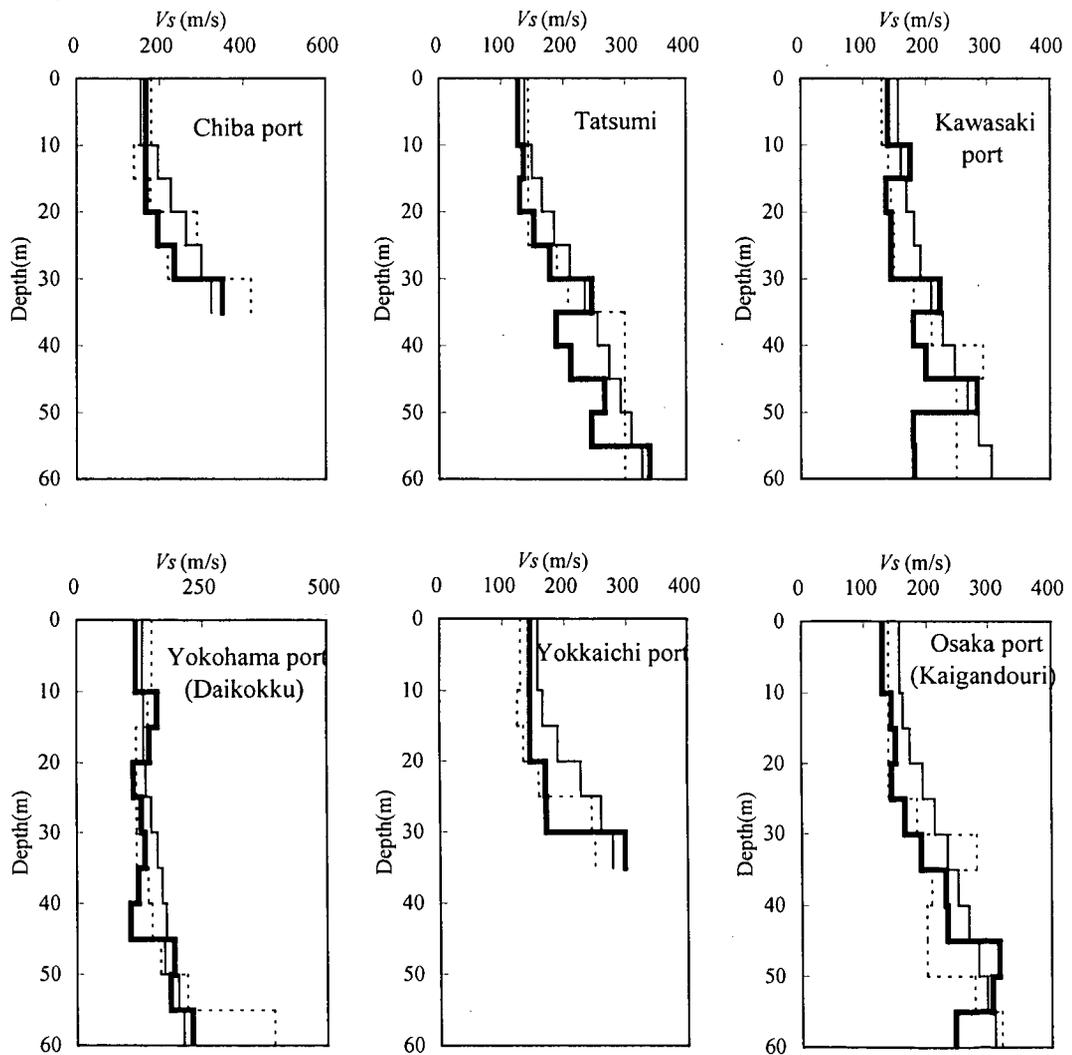


図-36(5) S波速度深度分布の比較(5m, 観測位相速度 type3) -その1

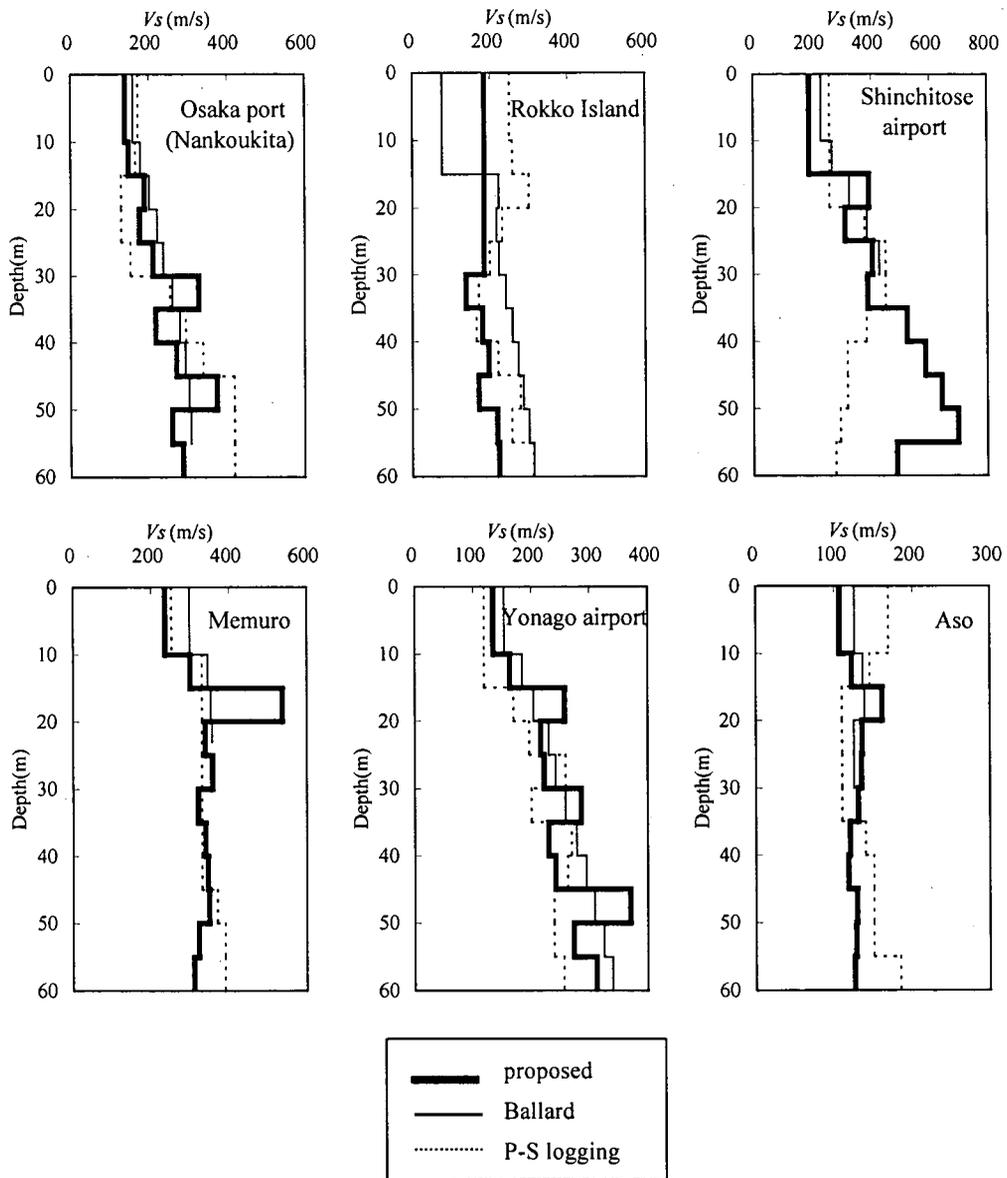


図-36(6) S波速度深度分布の比較(5m, 観測位相速度 type3) -その2

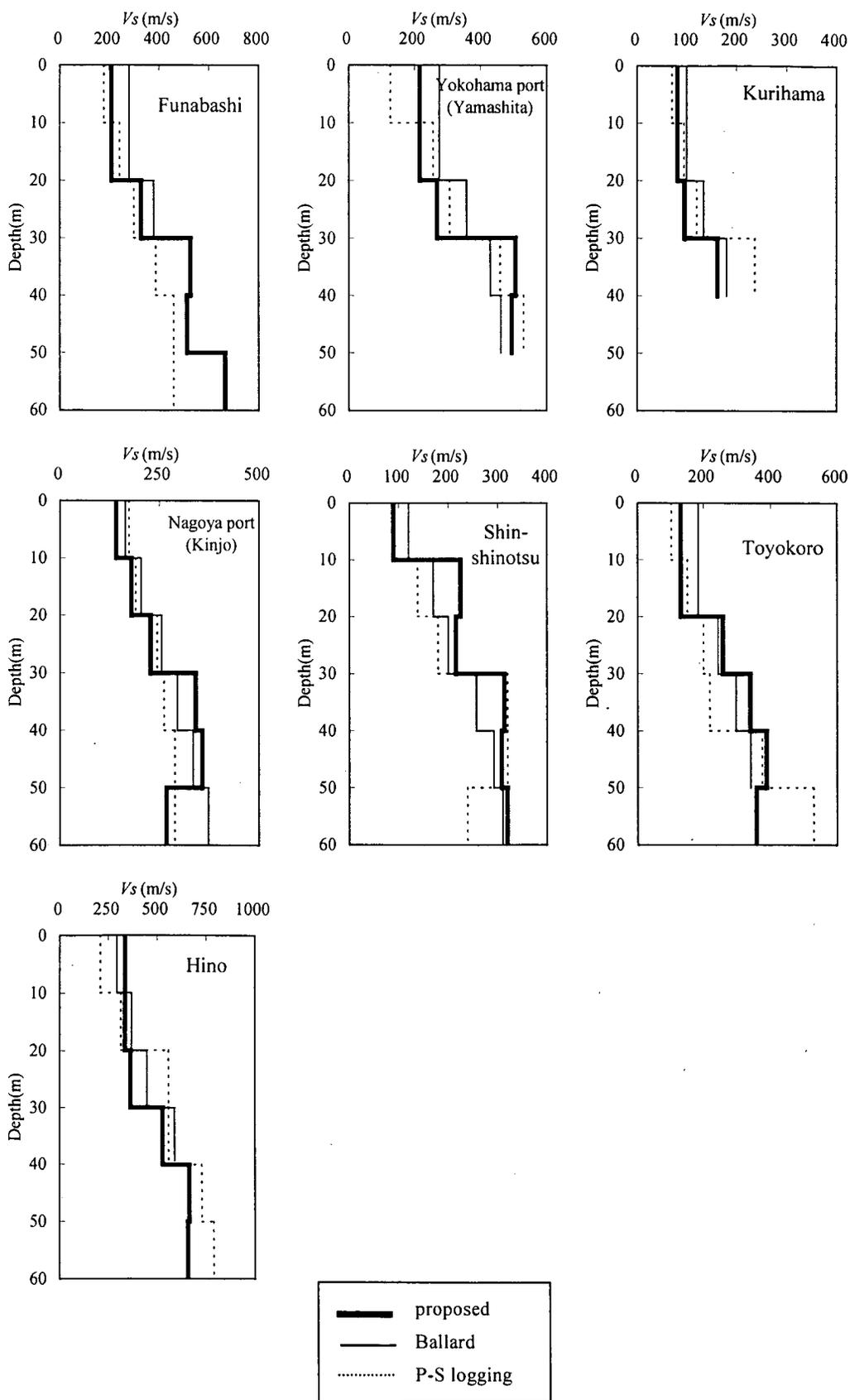


図-37(1) S波速度深度分布の比較(10m, 観測位相速度 type1)

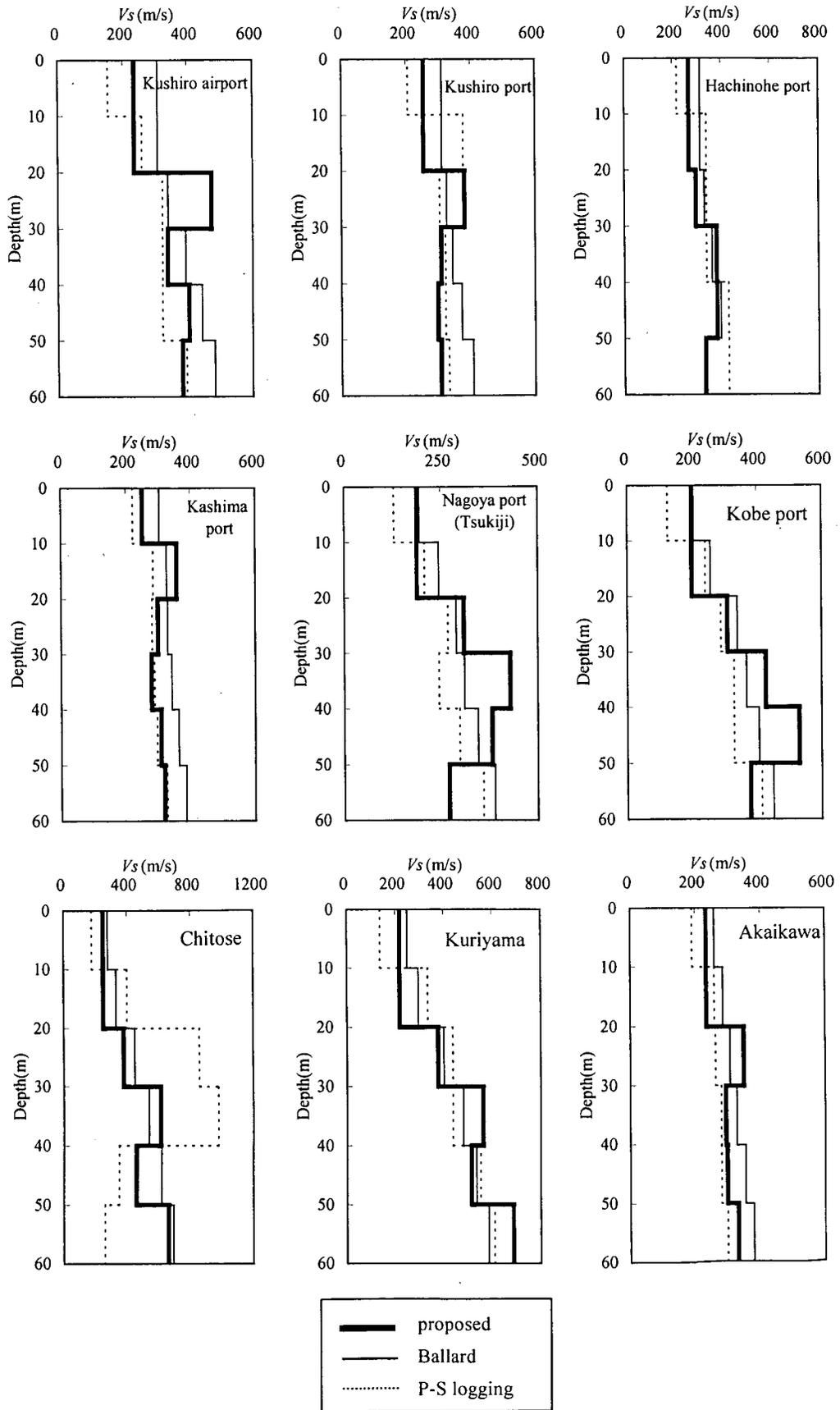


図-37(2) S波速度深度分布の比較(10m, 観測位相速度 type2) -その1

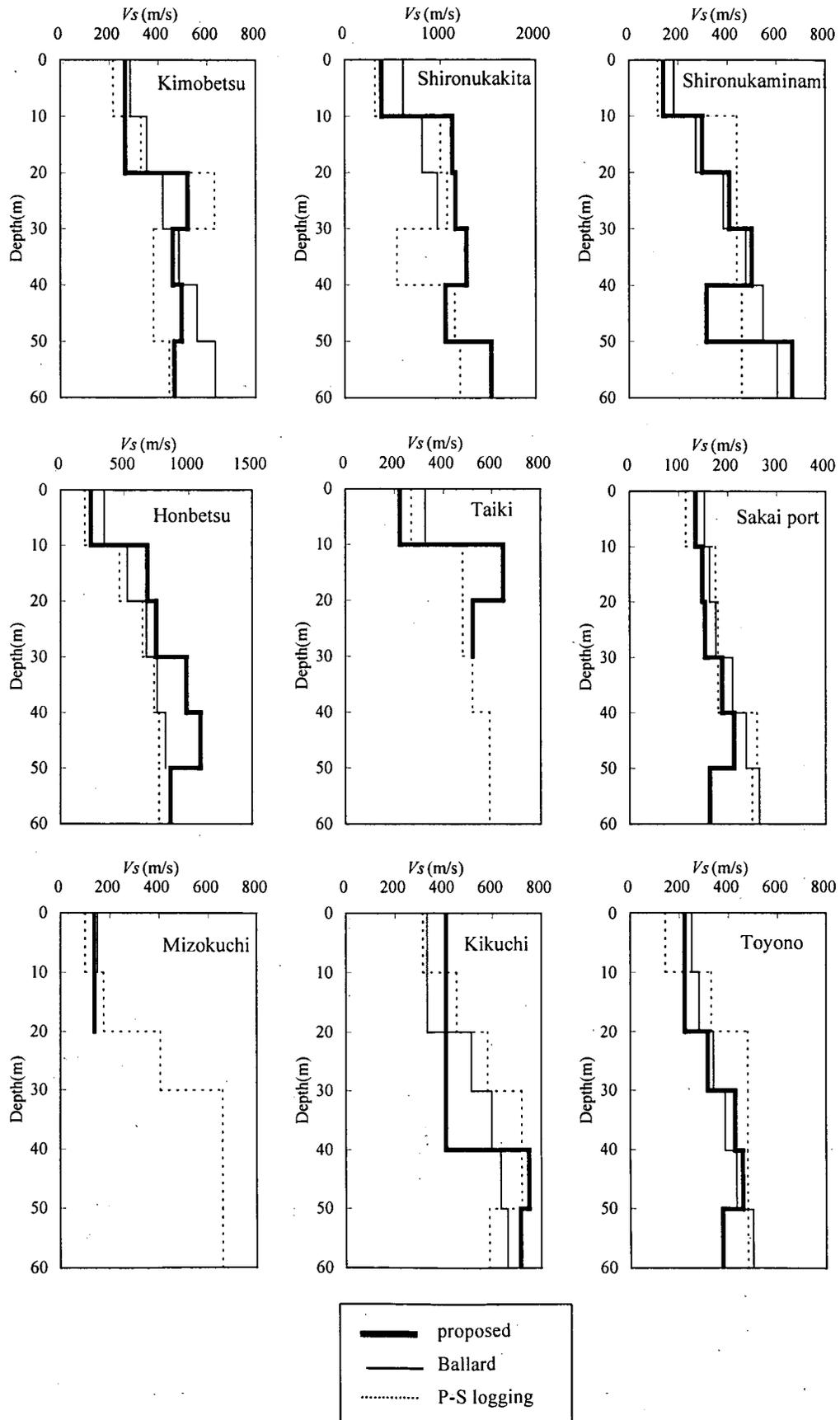


図-37(3) S波速度深度分布の比較(10m, 観測位相速度 type2) -その2

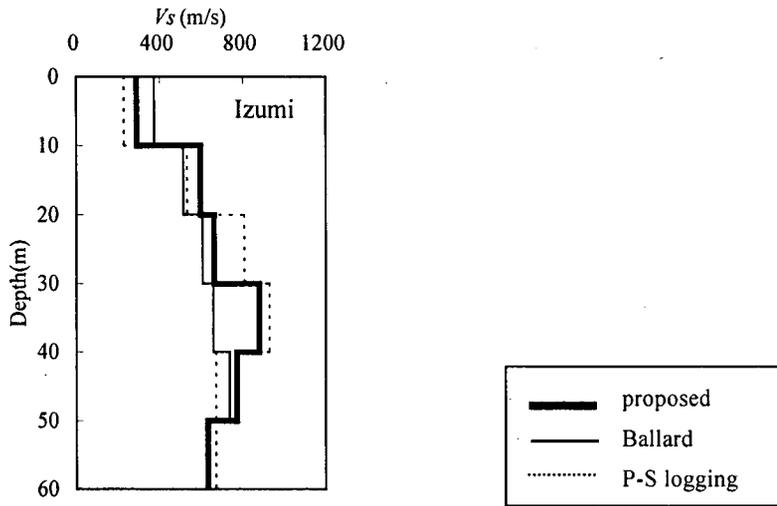


図-37(4) S波速度深度分布の比較(10m, 観測位相速度 type2) -その3

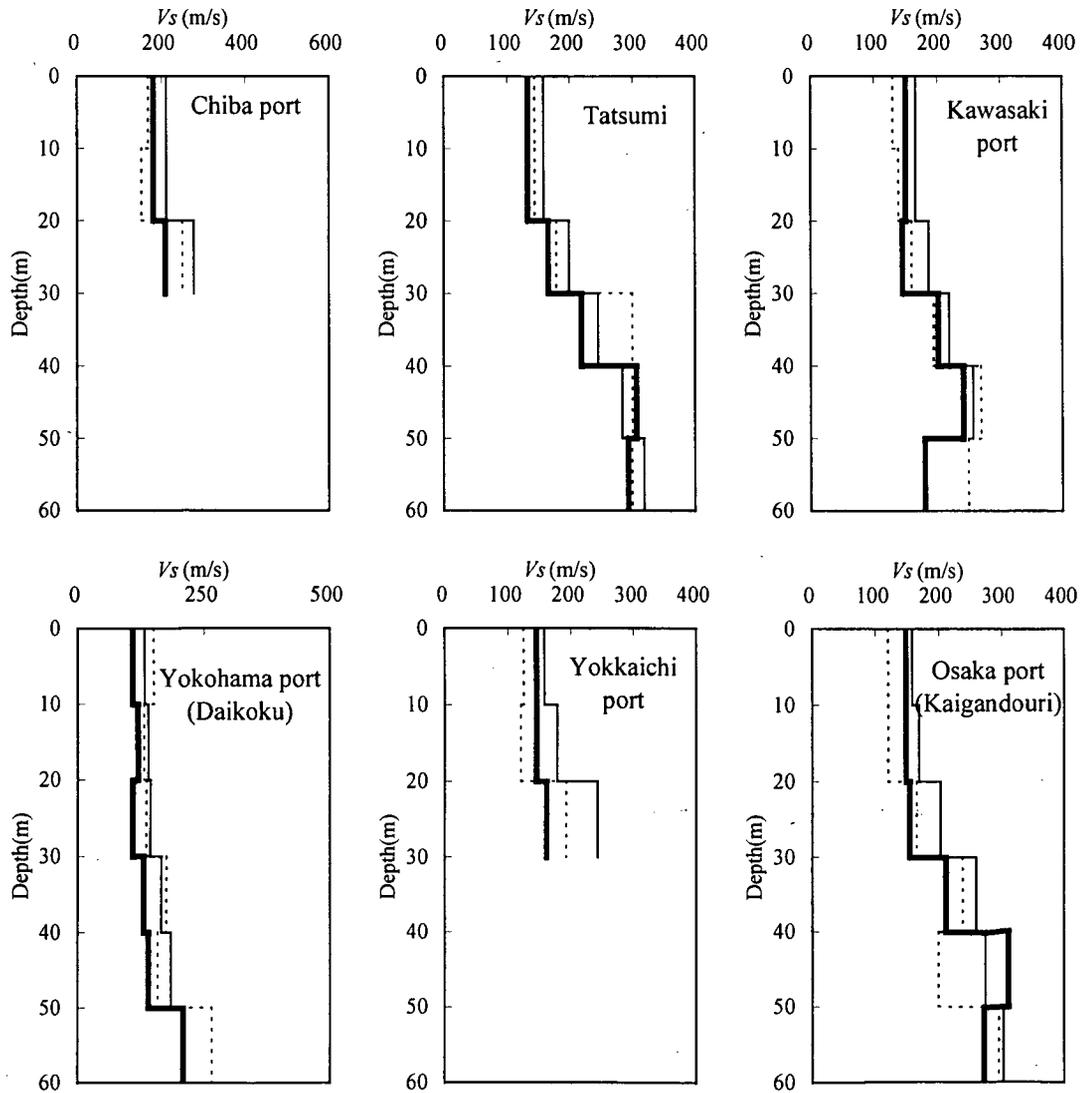


図-37(5) S波速度深度分布の比較(10m, 観測位相速度 type3) -その1

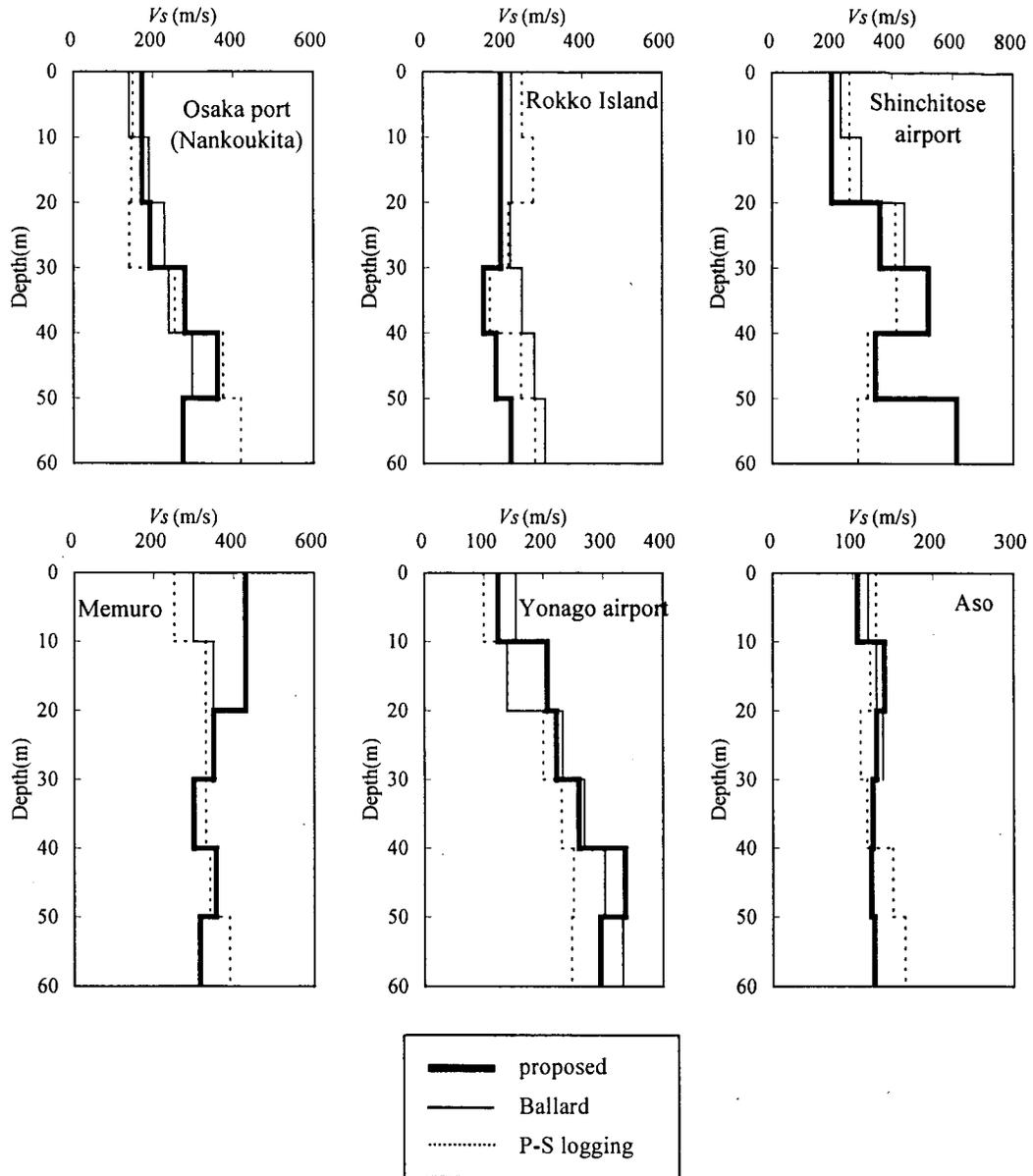


図-37(6) S波速度深度分布の比較(10m, 観測位相速度 type3) -その2

6. 基盤深さを直接推定する手法とその精度

6.1 推定方法

表層地盤のS波速度構造を知る観点からは、ある一定の深さまでのS波速度構造を推定する必要性は比較的低く、工学的基盤までのS波速度構造を推定する必要性が高いと考えられる。また、基盤深さを簡易に推定することは、耐震設計における重要な事前情報を提供することとなるほか、ボーリングを行う場合においてもボーリング深さをおおよそ見積もることができるなどのメリットがある。そこで、本研究においては、基盤深さについても直接推定の対象とすることを考える。推定の方法は次の2種類であり、これをBallardの方法と比較する。

第一の方法は、5.で述べた方法によりS波速度構造を直接推定し、推定S波速度構造より基盤深さを推定するものである。すなわち、第一の方法は5.の方法と等価であり、基盤のS波速度の値を任意に設定できるほか、その層厚についても設定可能である。

第二の方法は、位相速度とH/Vスペクトルを併用して推定を行う方法である。いま、1/4波長則が成立すると仮定すると、深さ x までの平均S波速度 V_{sx} を用いて、深さ x までの地盤固有周期 T_x は式(14)により求めることができる。この値は、深さを深く取るほど増加する。

$$T_x = 4x / V_{sx} \quad (14)$$

一方、H/Vスペクトルより地盤固有周期を推定することができる。H/Vスペクトルより推定される地盤の固有周期を T_m とすると、 $T_m < T_x$ ならば基盤は x よりも深い位置にあると判断する。 $T_m > T_x$ ならば基盤は x よりも浅い位置にあると判断する。なおこの方法では、基盤のS波速度や層厚は任意に設定できない。

6.2 推定精度

精度の検証に当たり、工学的基盤として、その層の V_s が基準値以上となる層厚が10m以上続く層と定義している。基準値としては、港湾の施設の技術上の基準・同解説(港湾局, 1999)で用いられている300m/sと他の土木施設で用いられることの多い400m/sの2種類を設定した。また、推定する際に用いる位相速度は、観測位相速度とし、5m刻み、10m刻みのそれぞれについて検討した。

推定精度を図-38～図-41に示す。図より、H/Vスペクトルを併用する方法は、ややばらつきが大きい結果とな

った。これは、3.4(1)で述べた1/4波長則とH/Vスペクトルのピーク周期の開きが主な原因と考えられる。さて、残る2つの手法の適用性について検討すると、工学的基盤のS波速度を400m/s以上と定義した場合、比較的精度が高いことが分かる。実際の基盤深さよりも浅く推定してしまう危険度は低いことから、安全側のマージンを含んだ予備的な概略推定法としては適用が考えられる。

7. 伝達関数の推定精度

最後に、直接推定したS波速度構造を用いて得られる伝達関数をPS検層の結果による伝達関数と比較する。減衰は式(9)を用いる。伝達関数として、ここではPS検層が深さ60mまで実施されていないときはPS検層の深さまで、PS検層が60m以深まで実施されているときは60mまでの深さの層を基盤とする伝達関数を想定する。ただし、前述のように60m以深までPS検層が実施されているにもかかわらず観測位相速度を用いた場合は浅い地点までしか推定できない地点があったため、最低50mまで推定できなかった地点はここでは除外している。

図-42, 43にPS検層結果による伝達関数の1次および2次固有周期と推定値による固有周期の比較を示す。固有周期の推定値とPS検層結果を用いた理論値の比を R_T と定義し、 R_T の分布を表-6に示す。図-44(1)～(4)、図-45(1)～(4)、図-46(1)～(3)、図-47(1)～(3)には伝達関数の比較を示す。これら結果より、伝達関数は比較的よく一致していることがわかる。いずれの方法を用いた場合においても、観測位相速度をもとにした場合は R_T の標準偏差は0.15程度であり、非線形性を考慮しない地震動の増幅特性の検討ならば初期推定値のみによっても十分精度の良い推定が可能であることが示唆される。地盤種別としては、1次固有周期の短いI種地盤において比較的精度が良くないケースがあるといえる。

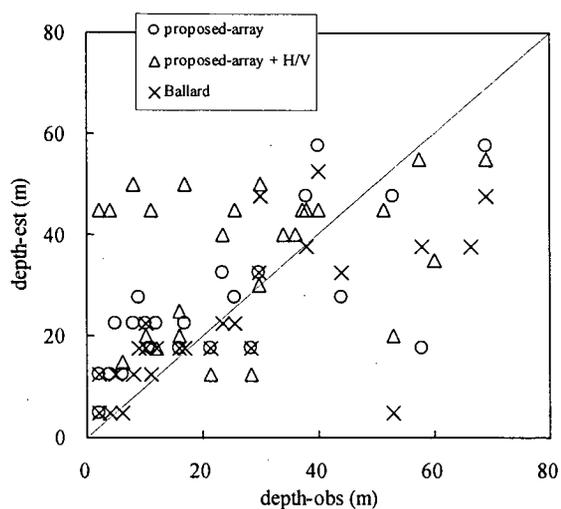


図-38 基盤深さ推定精度 (300m/s 以上, 5m 刻み)

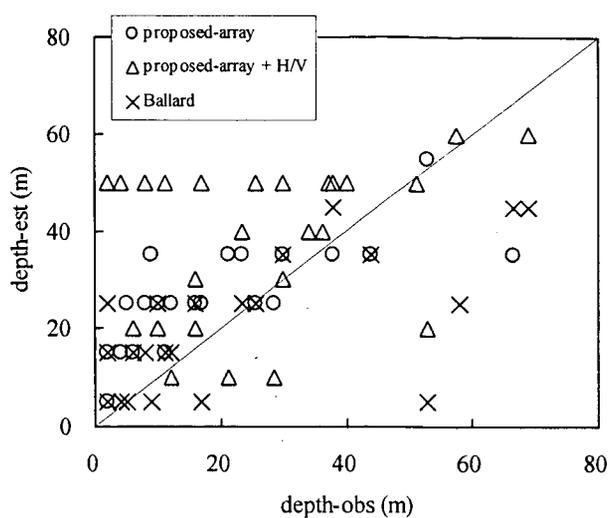


図-39 基盤深さ推定精度 (300m/s 以上, 10m 刻み)

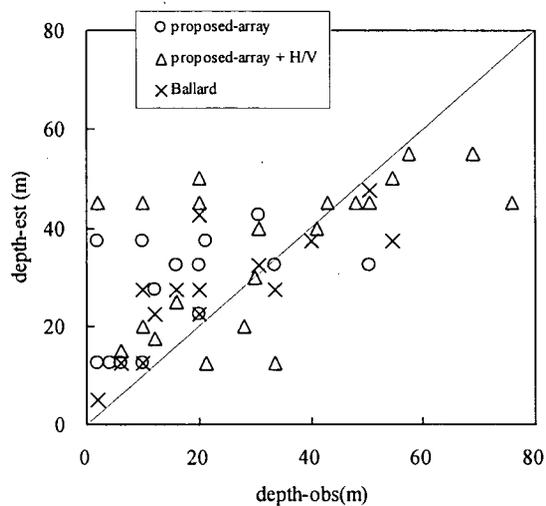


図-40 基盤深さ推定精度 (400m/s 以上, 5m 刻み)

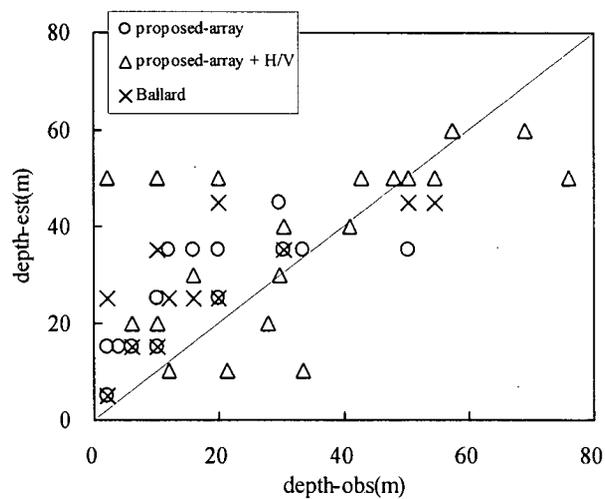
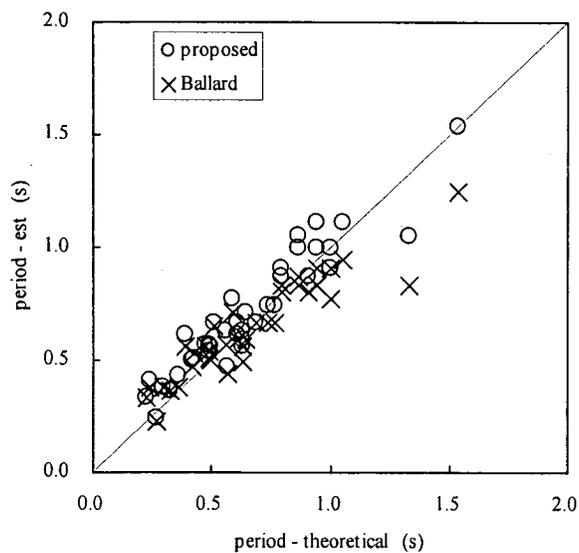
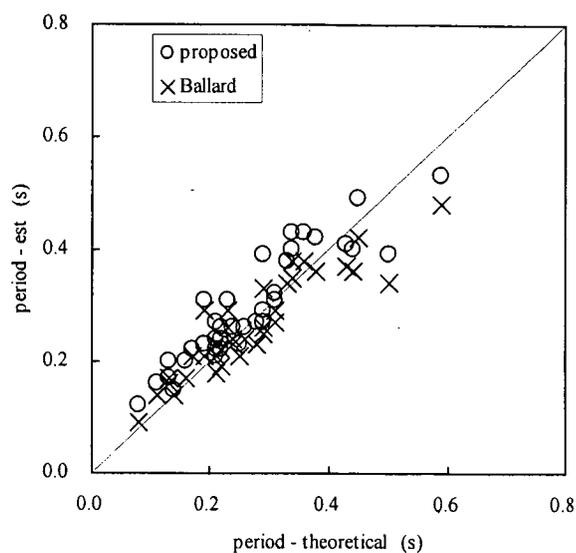


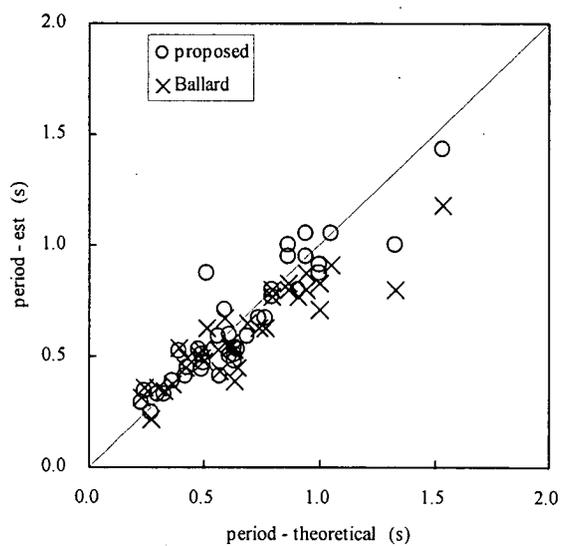
図-41 基盤深さ推定精度 (400m/s 以上, 10m 刻み)



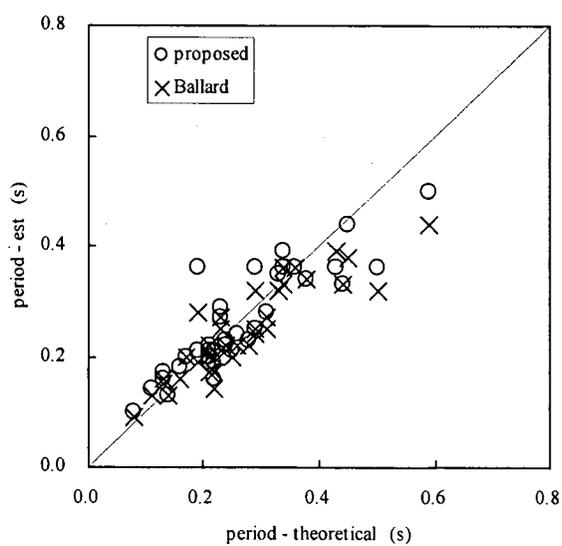
理論 5 m 1次固有周期



理論 5 m 2次固有周期

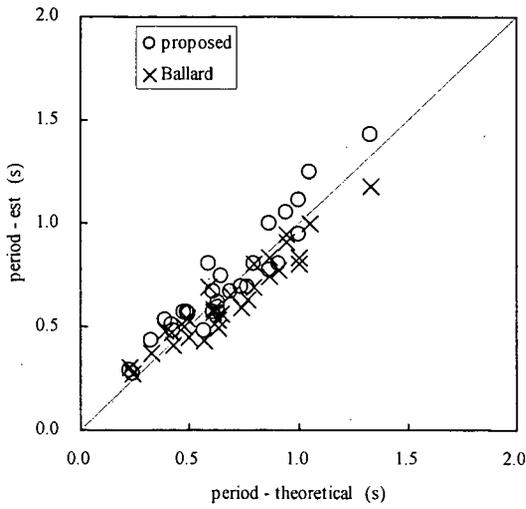


理論 10m 1次固有周期

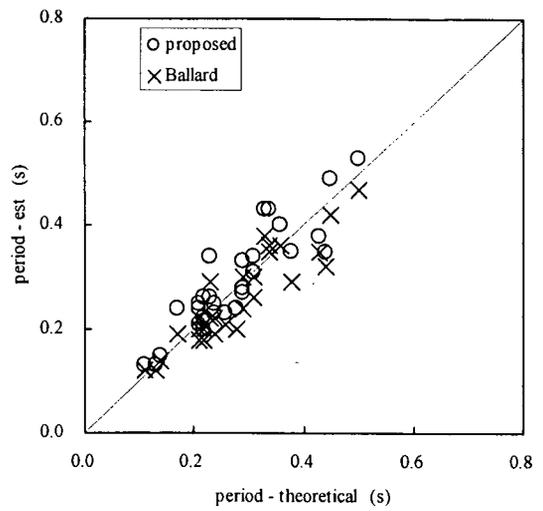


理論 10m 2次固有周期

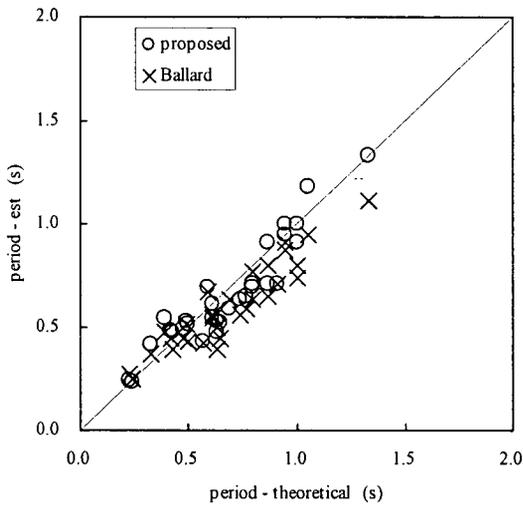
図-42 固有周期の比較 (理論位相速度)



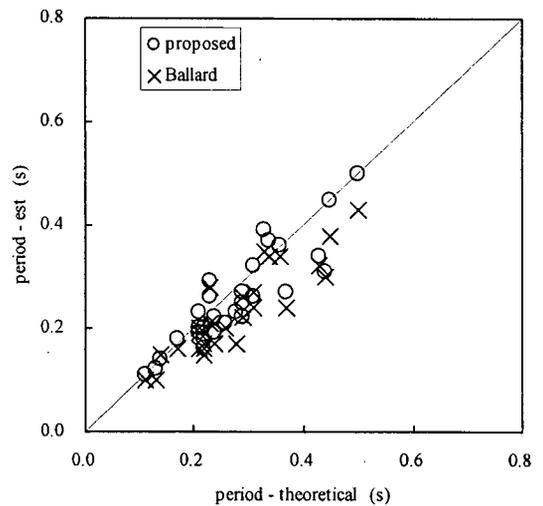
観測 5 m 1次固有周期



観測 5 m 2次固有周期



観測 10m 1次固有周期



観測 10m 2次固有周期

図-43 固有周期の比較 (観測位相速度)

表-6 R_T の分布

ratio of natural period (1st)

		i) proposed			
		Δx (m)	R_T	μR_T	σR_T
theoretical	5	0.79 ~ 1.71	1.11	0.19	
	10	0.72 ~ 1.71	1.00	0.19	
observed	5	0.84 ~ 1.36	1.08	0.14	
	10	0.75 ~ 1.38	0.97	0.15	

ratio of natural period (1st)

		ii) Ballard			
		Δx (m)	R_T	μR_T	σR_T
theoretical	5	0.62 ~ 1.58	1.02	0.20	
	10	0.60 ~ 1.50	0.96	0.20	
observed	5	0.75 ~ 1.30	0.96	0.14	
	10	0.62 ~ 1.21	0.90	0.15	

ratio of natural period (2nd)

		iii) proposed			
		Δx (m)	R_T	μR_T	σR_T
theoretical	5	0.78 ~ 1.63	1.15	0.19	
	10	0.72 ~ 1.90	1.02	0.22	
observed	5	0.80 ~ 1.48	1.08	0.16	
	10	0.70 ~ 1.26	0.94	0.14	

ratio of natural period (2nd)

		iv) Ballard			
		Δx (m)	R_T	μR_T	σR_T
theoretical	5	0.68 ~ 1.53	1.01	0.17	
	10	0.64 ~ 1.47	0.95	0.17	
observed	5	0.71 ~ 1.26	0.93	0.13	
	10	0.61 ~ 1.22	0.85	0.14	

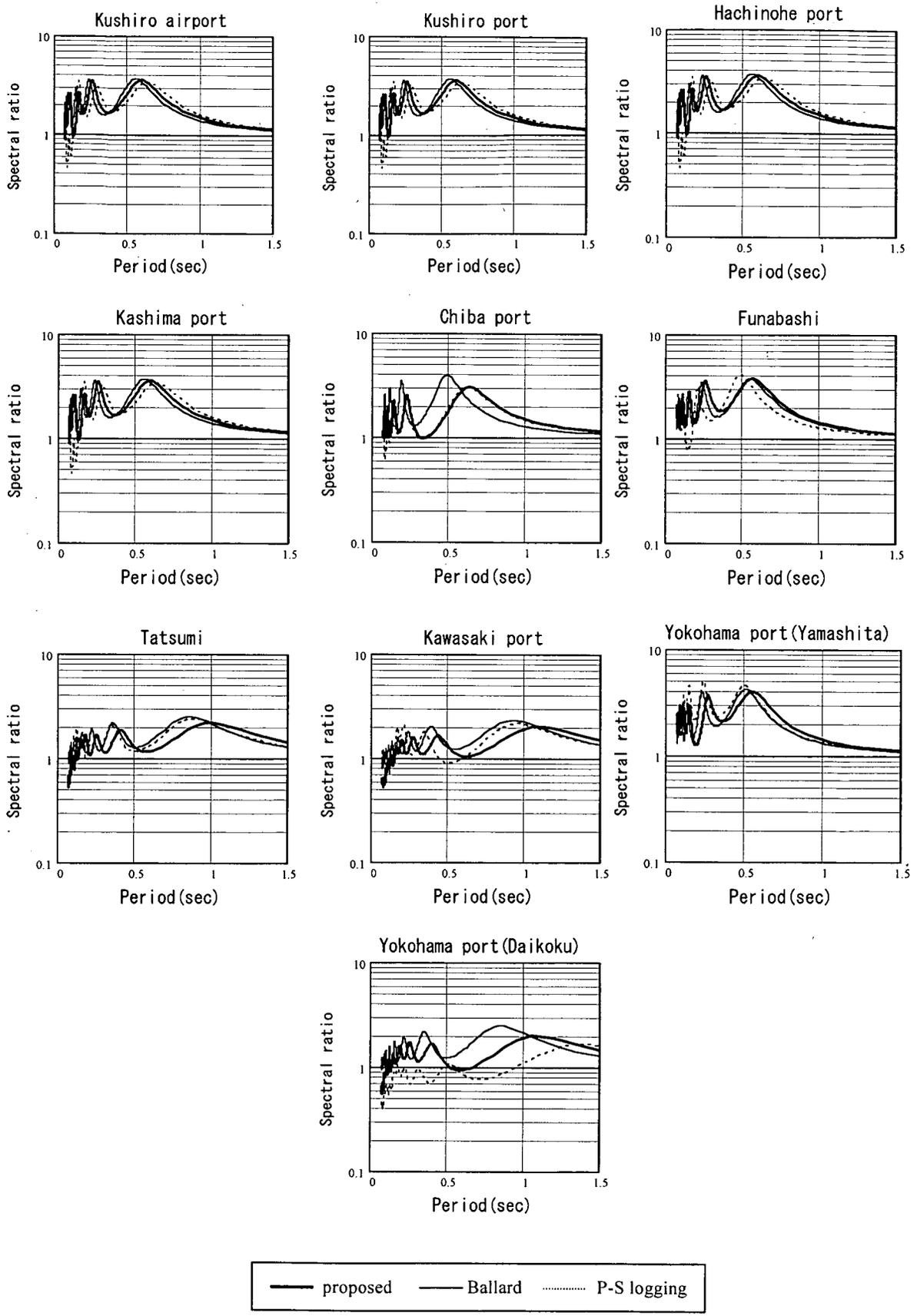


図-44(1) 伝達関数 (理論 5m 刻み)

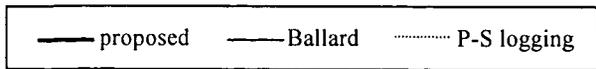
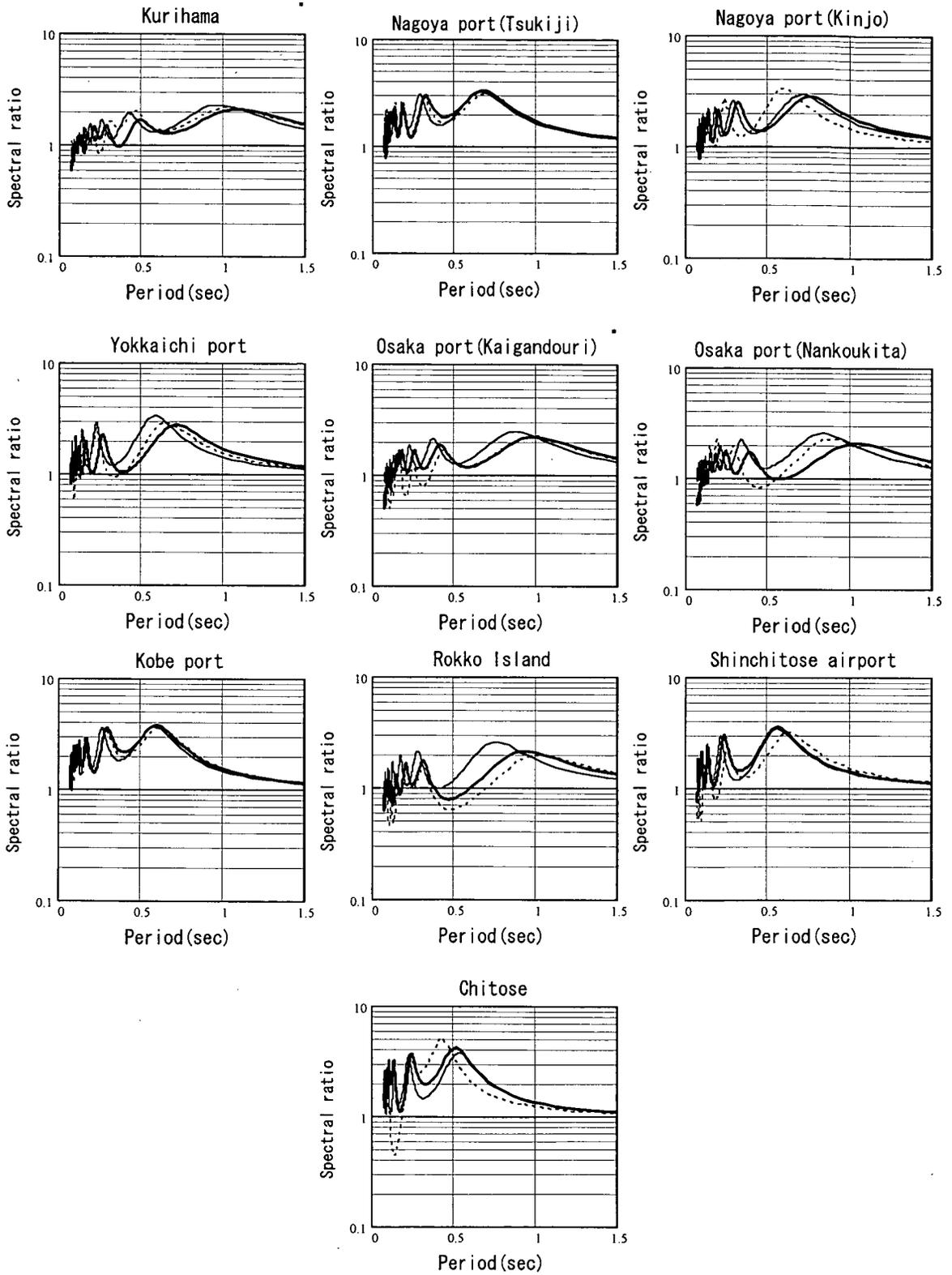
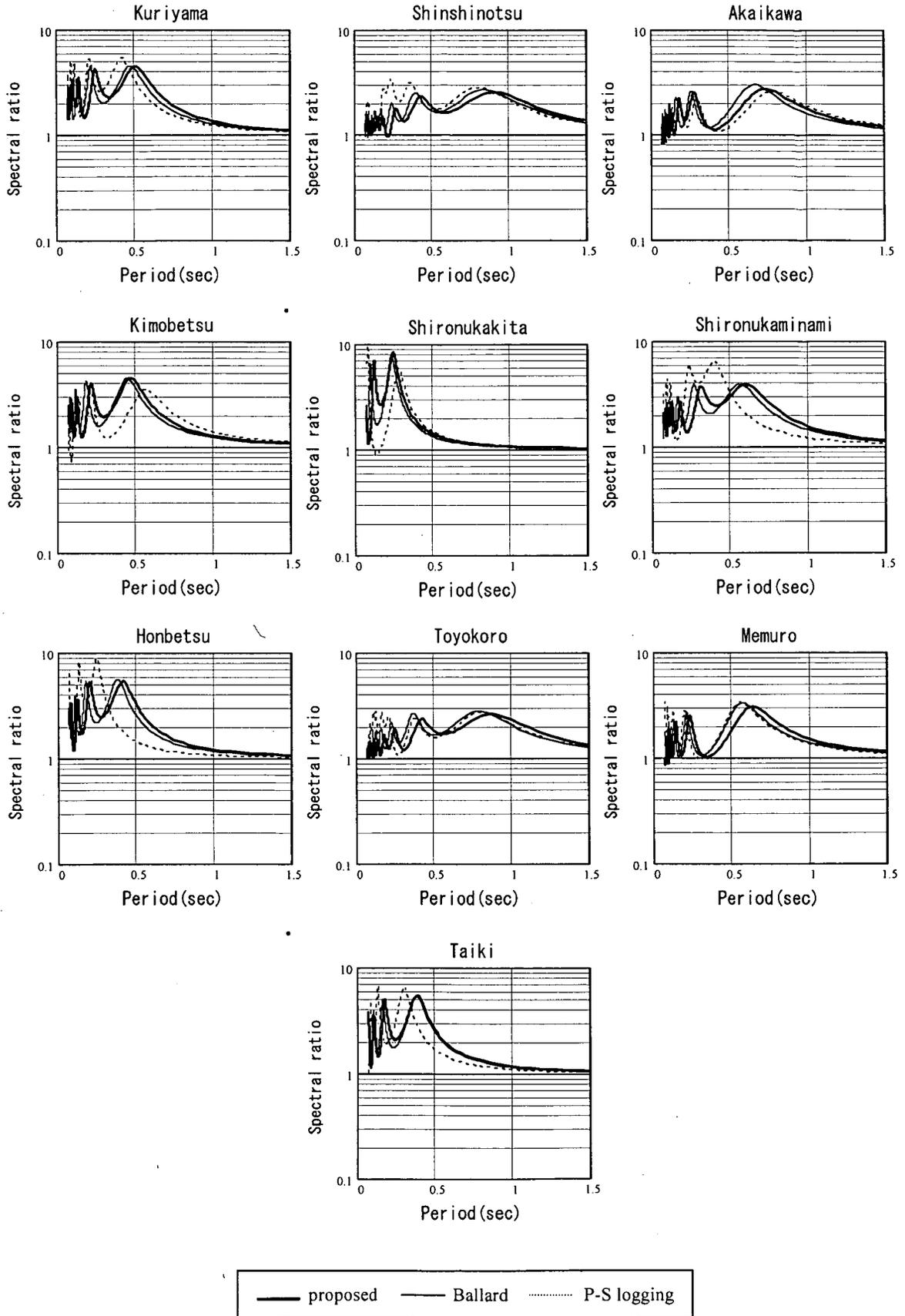


図-44(2) 伝達関数 (理論 5m 刻み)



— proposed - - - Ballard P-S logging

図-44(3) 伝達関数 (理論 5m 刻み)

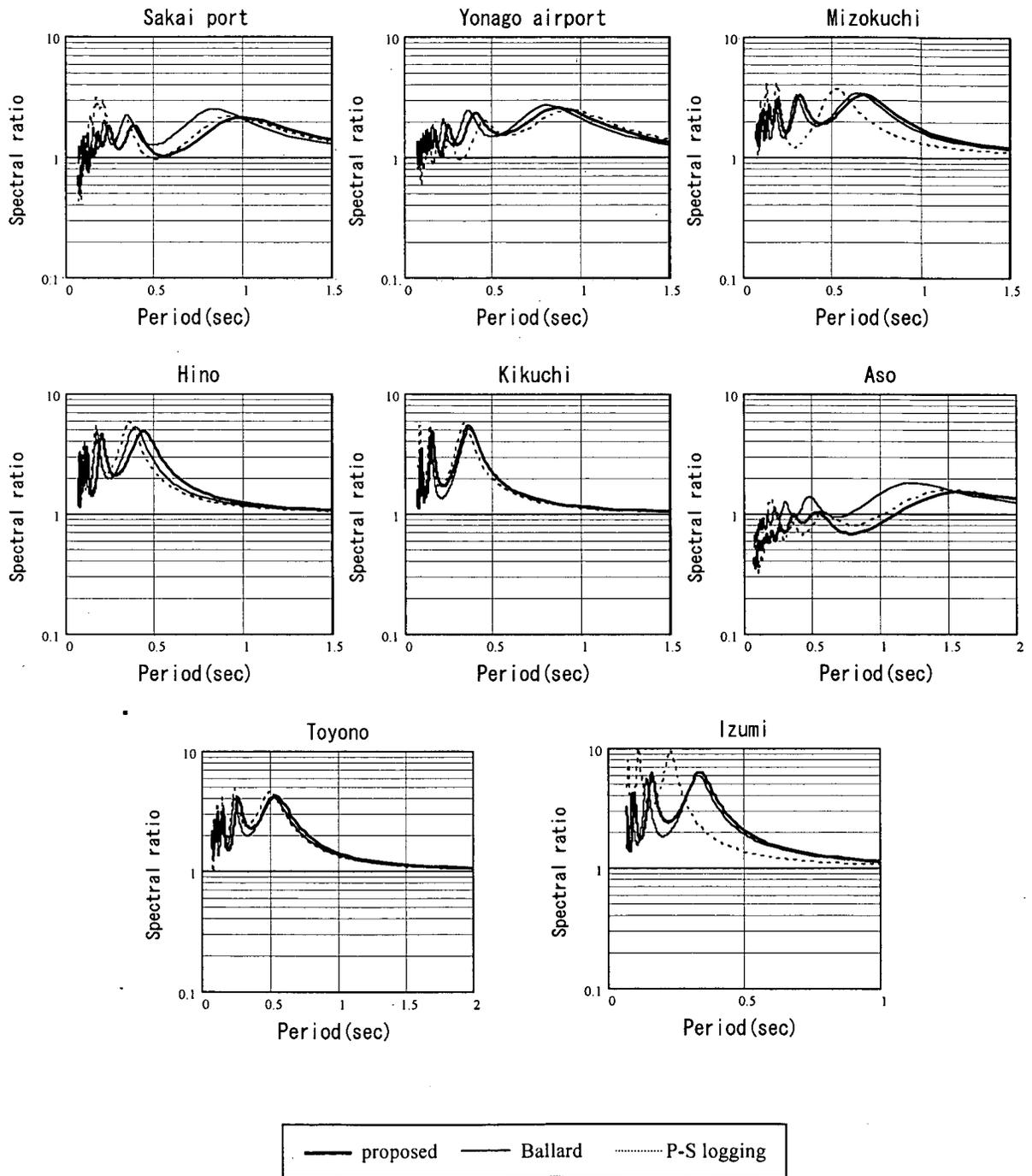


図-44(4) 伝達関数 (理論 5m 刻み)

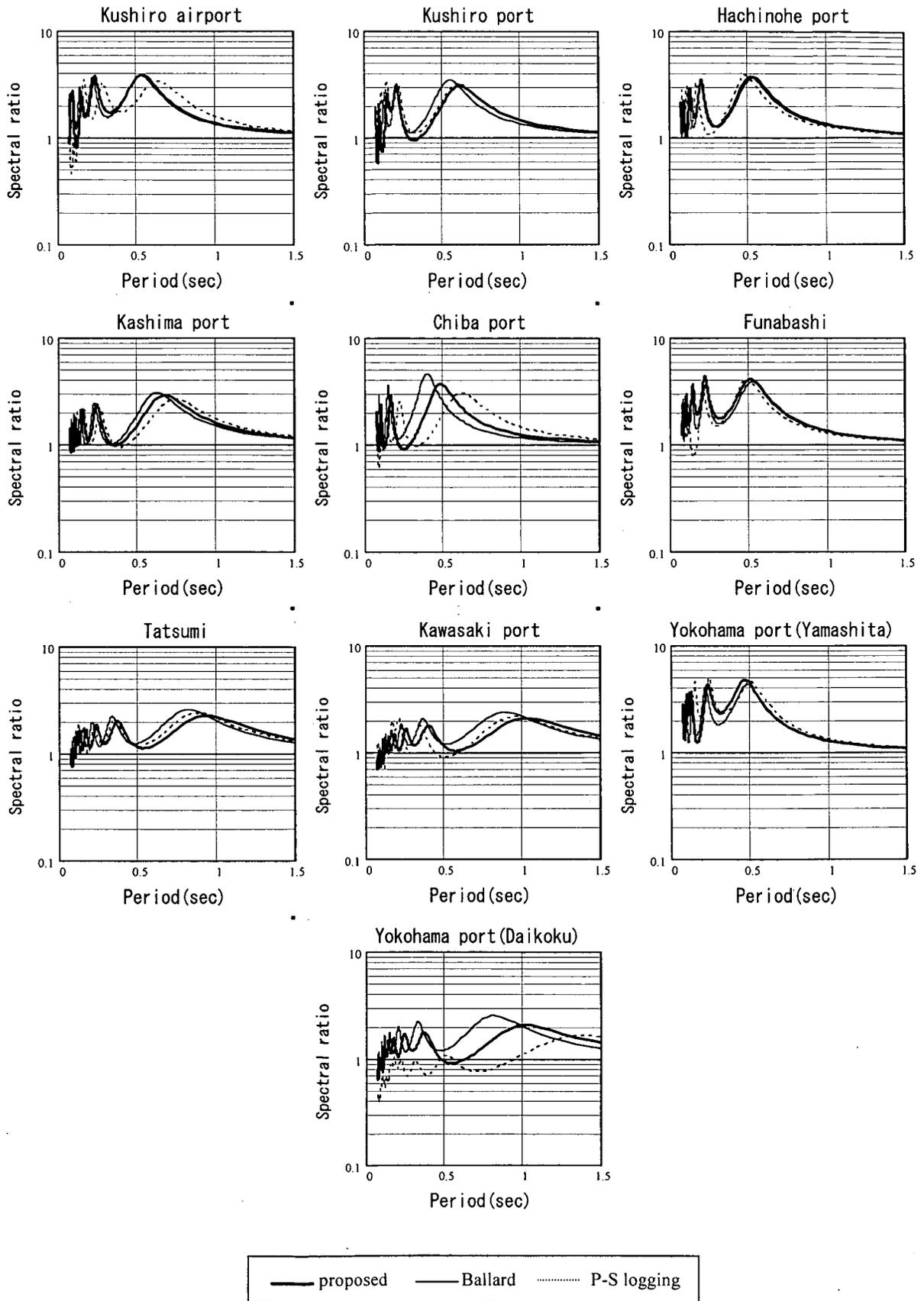
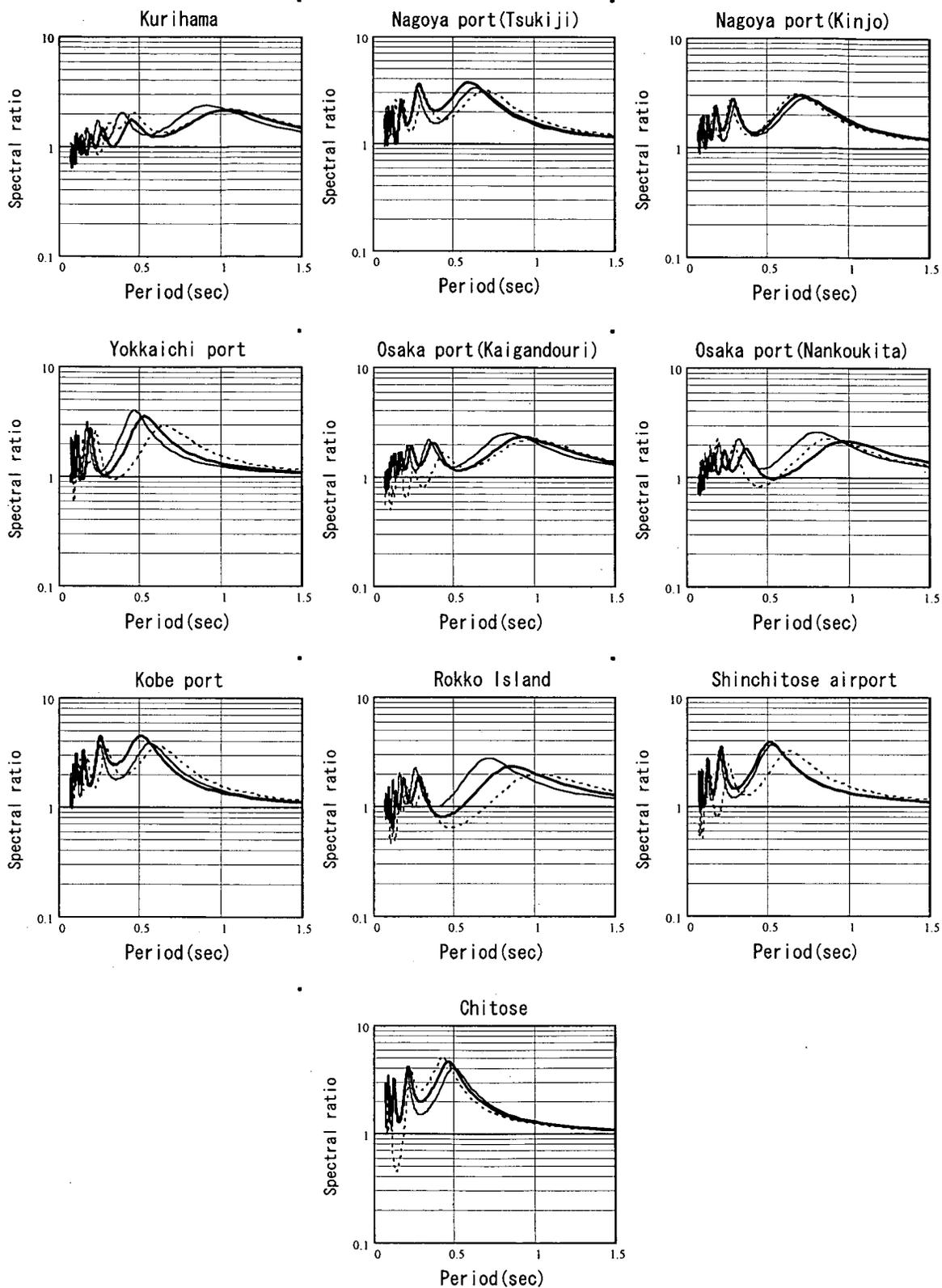


図-45(1) 伝達関数 (理論 10m 刻み)



— proposed — Ballard P-S logging

図-45(2) 伝達関数 (理論 10m 刻み)

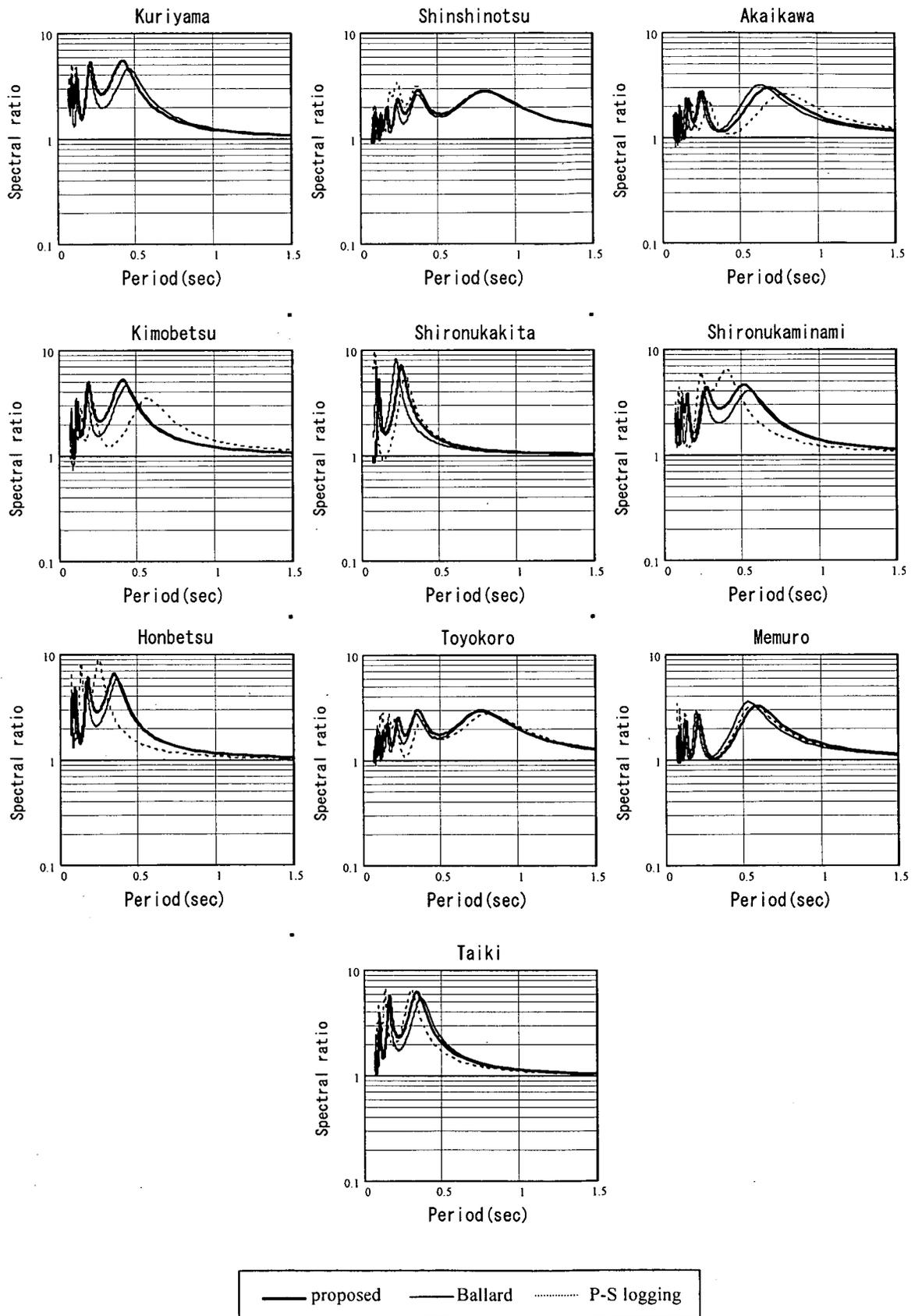


図-45(3) 伝達関数 (理論 10m 刻み)

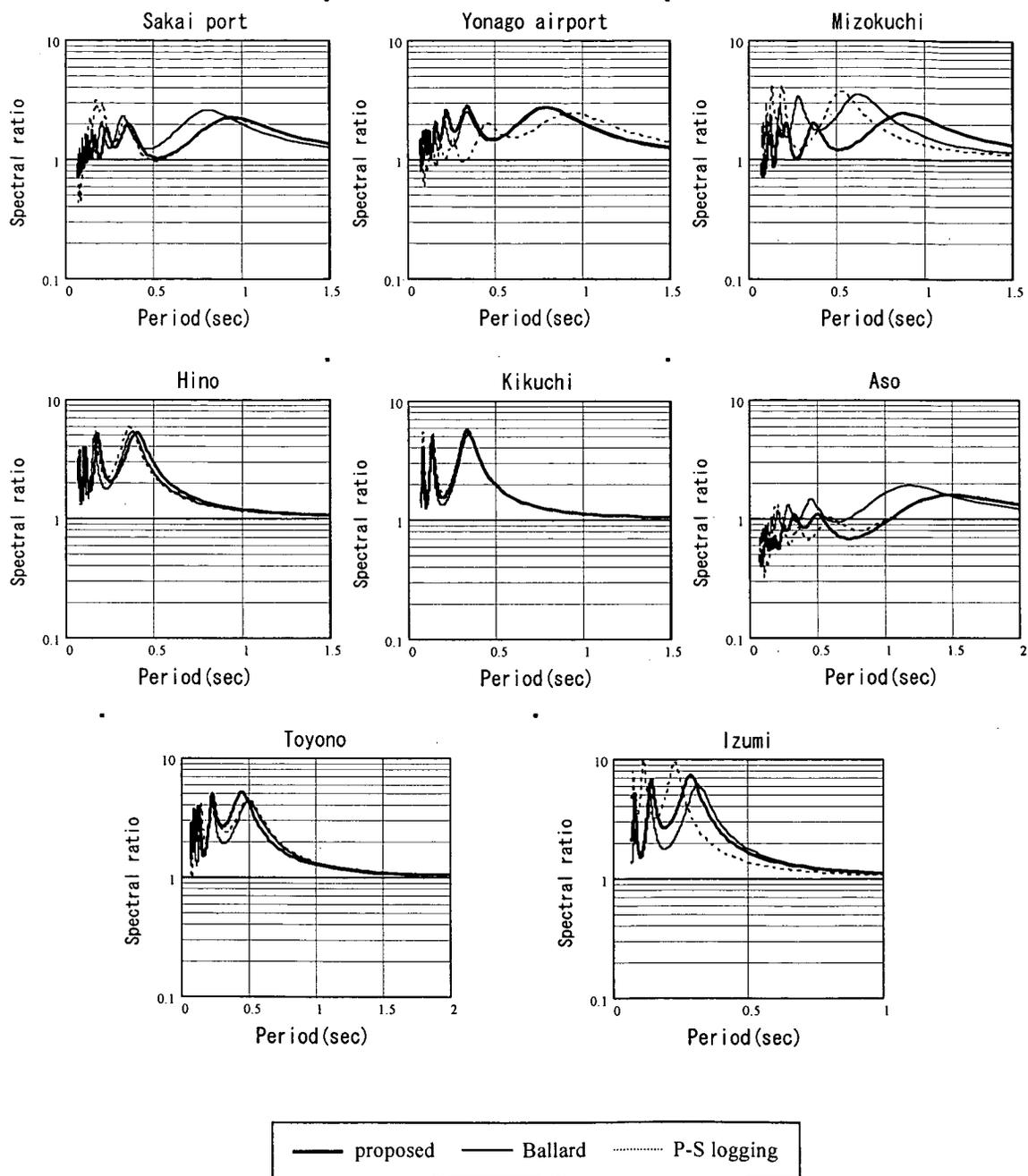


図-45(4) 伝達関数 (理論 10m 刻み)

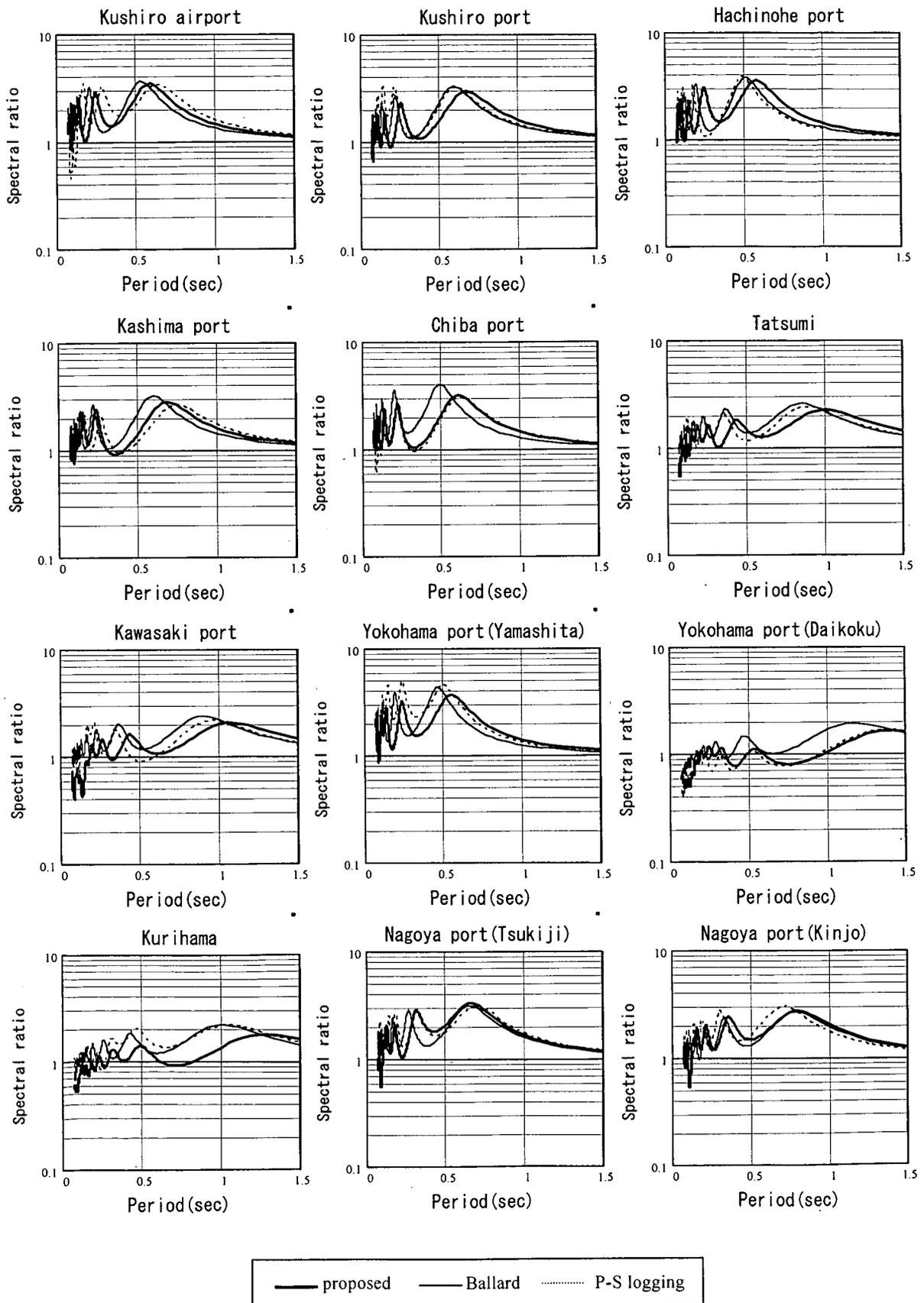


図-46(1) 伝達関数 (観測 5m 刻み)

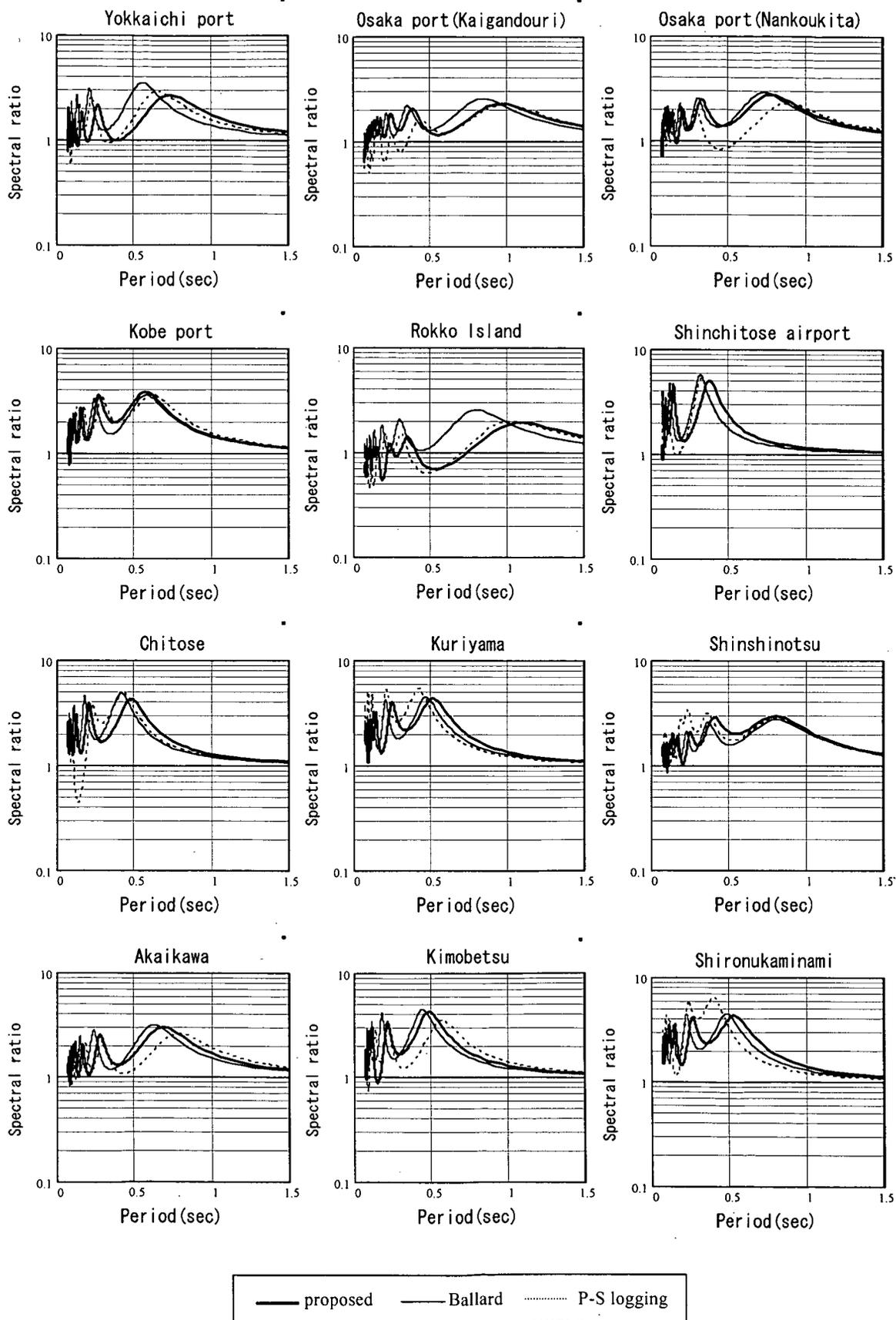


図-46(2) 伝達関数 (観測 5m 刻み)

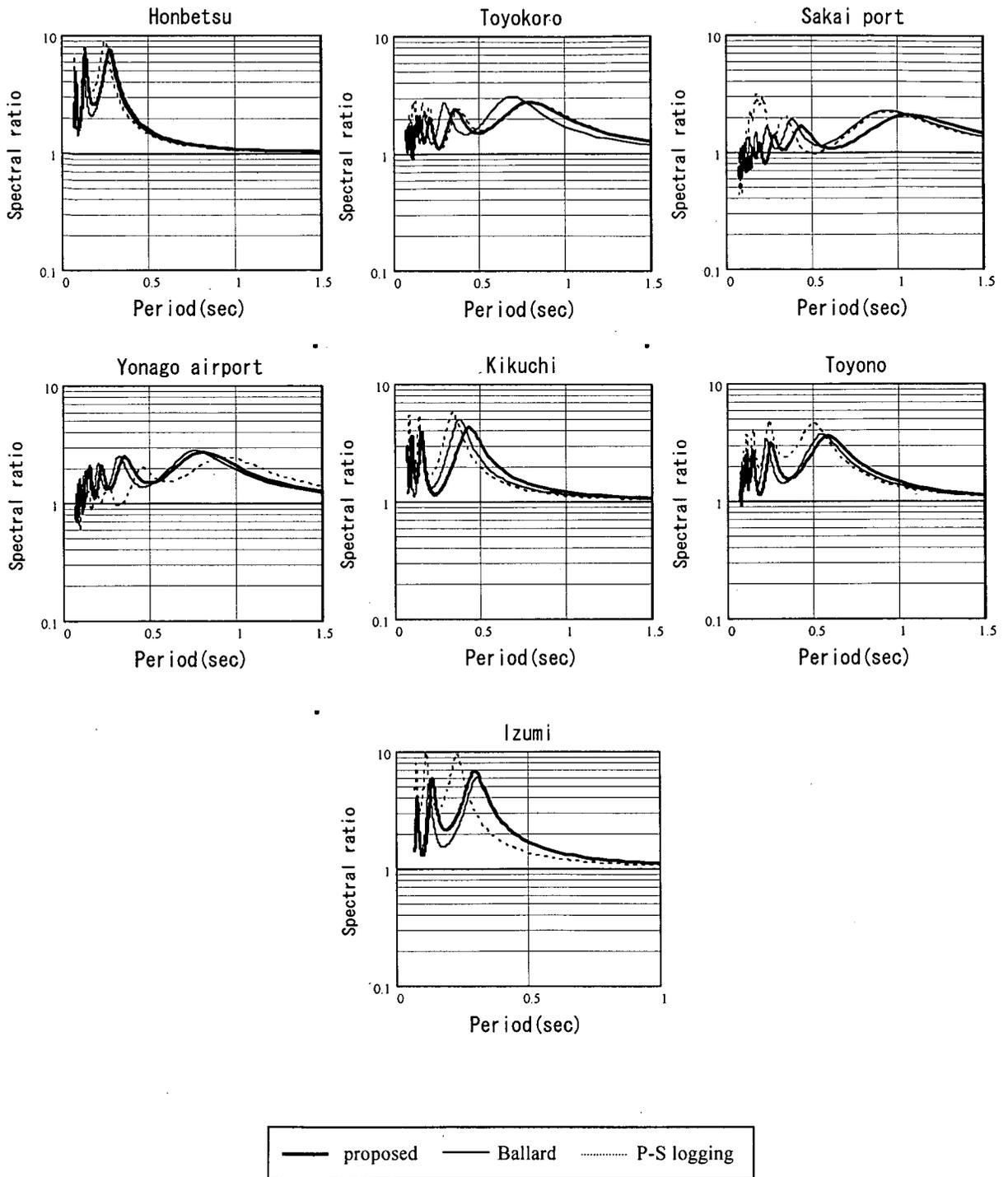


図-46(3) 伝達関数 (観測 5m刻み)

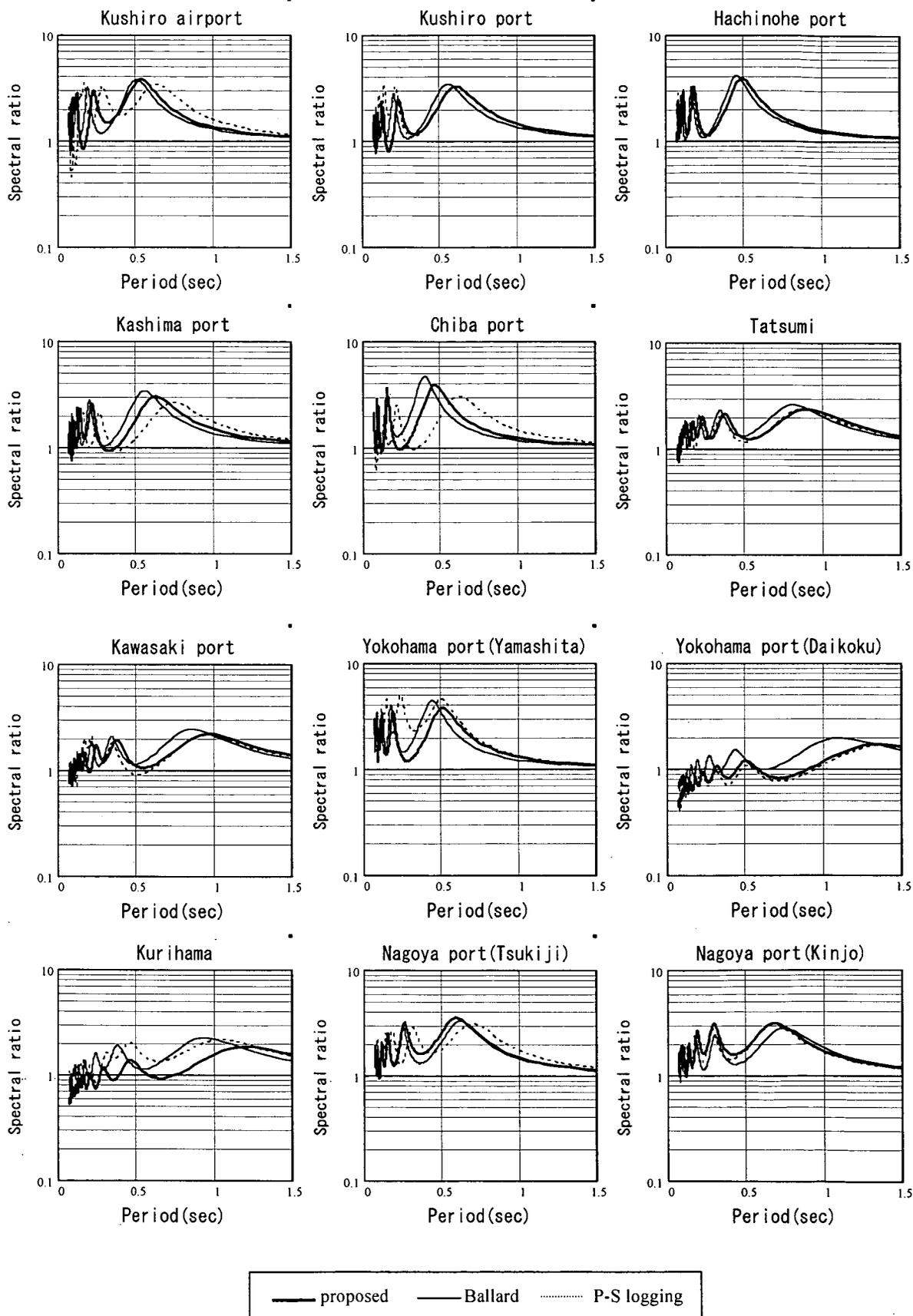


図-47(1) 伝達関数 (観測 10m 刻み)

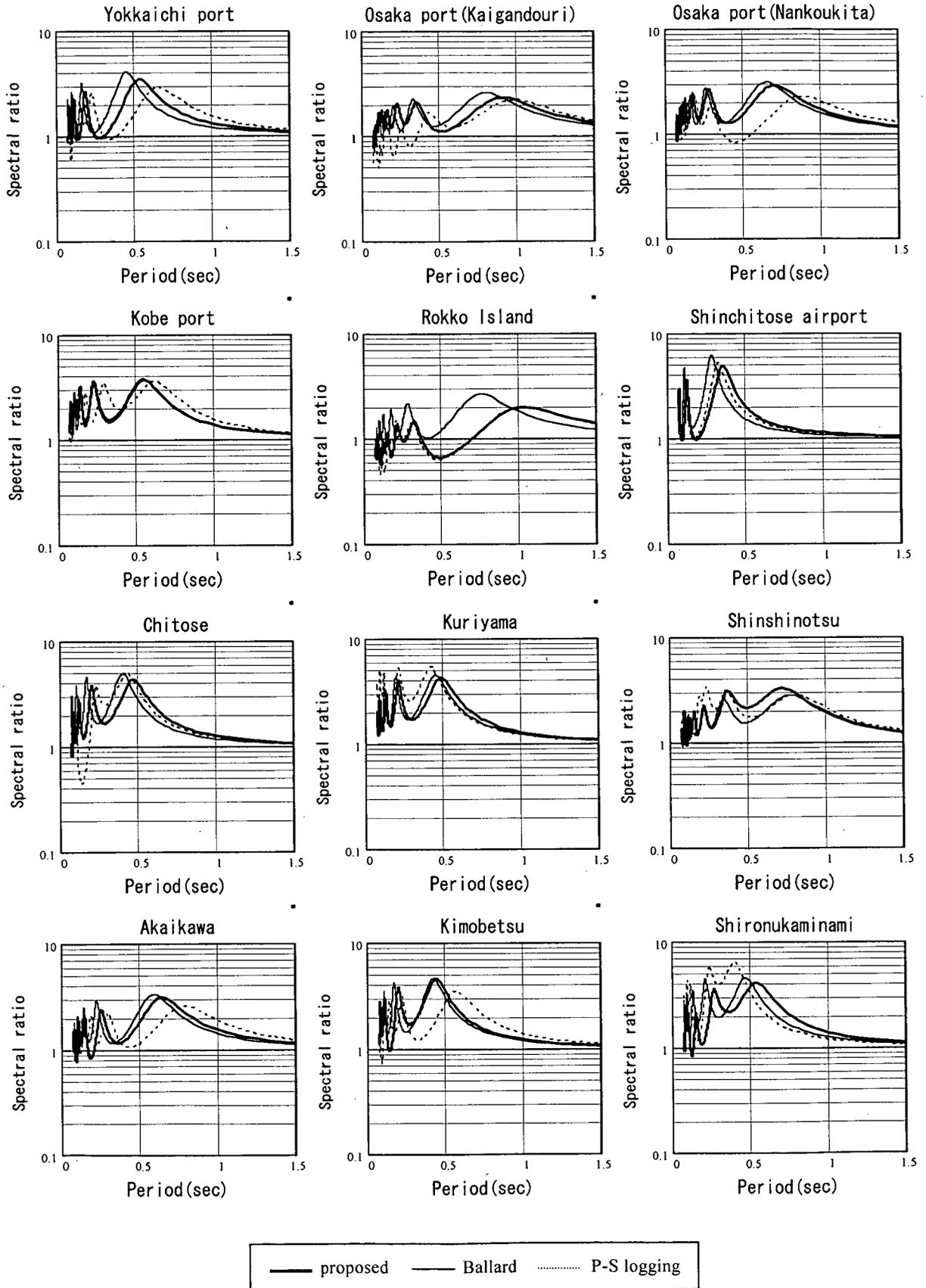
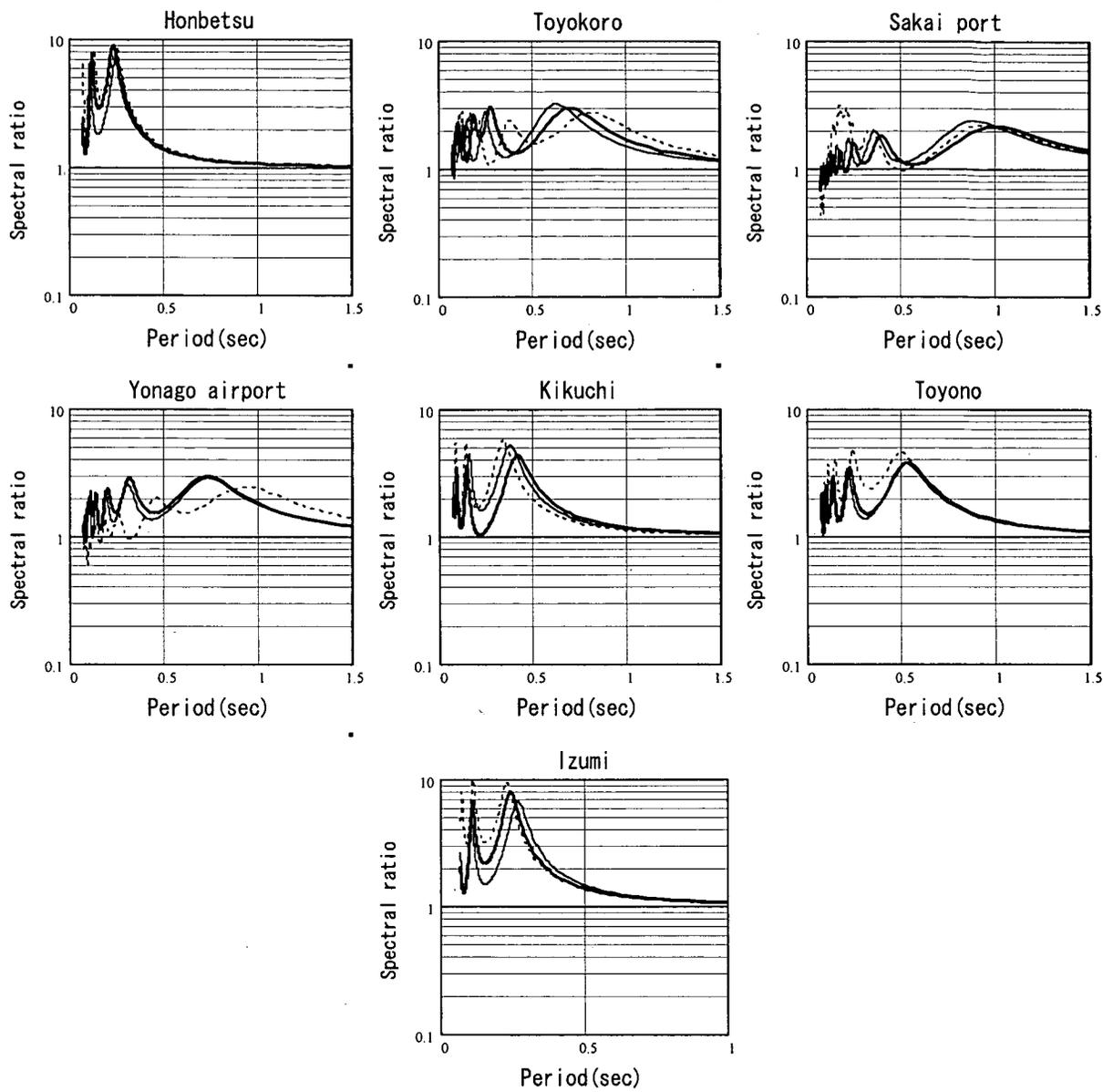


図-47(2) 伝達関数 (観測 10m 刻み)



— proposed - - - Ballard P-S logging

図-47(3) 伝達関数 (観測 10m 刻み)

8. まとめ

本研究により得られた知見をまとめると以下の通りである。

①微動H/Vスペクトルには工学的基盤よりも深い位置のS波速度構造が反映されている可能性が高く、H/Vスペクトルから読みとったピーク周期を固有周期と見なす場合、耐震性分類において必要以上に安全側に分類する可能性がある。このような、微動H/Vスペクトルと工学的な観点での固有周期には特にI種地盤で乖離が生じる可能性があり、今後さらに検討する必要がある。

②微動アレー観測より得られる観測位相速度を用いて、表層地盤の平均S波速度を直接推定する手法の精度の検証を行った。今回は、これまで未検討であったI種地盤を含めた全地盤種別について検討を行った。

その結果、平均S波速度は、位相速度より直接、精度良く推定できることを確認した。 V_s の推定値と実測値との比(RV_{sx})の標準偏差は0.15未満であり、特に V_{s20} ～ V_{s55} までは0.12以下であり、精度は高いと判断される。 RV_{sx} の平均値は、 V_{s20} 以上については1.04～1.08となり、1.0を数%程度上回る結果となった。

③位相速度をもちいてS波速度構造を直接推定する手法を提案した。提案手法と既往のBallard法との比較を行った結果、推定精度 RV_s の標準偏差は、理論位相速度を用いた場合、提案法の方がBallard法よりも低く、かつ RV_s の平均値も1.0に近く、適用性が高いことが推察される。しかしながら、観測位相速度を用いた場合は、 RV_s の標準偏差は逆に提案法の方がBallard法よりも大きな結果となった。この結果は、提案法の精度が位相速度の観測精度に依存しやすいことを示すものと考えられる。ただし、 RV_s の平均値はBallard法はやや大きく、1.1程度の値を示すが、提案法では1.02～1.04と1.0に近い値を示した。

また、提案法では実際の地盤のS波速度の増減以上に増減があるように推定してしまう短所がある反面、S波速度の増減がある箇所では増減に追随する可能性が高く、Ballard法よりも有利であるといえる。また、観測に必要なアレー半径が短くてすみ、省スペースで推定が可能である。例えば、深さ60mまでの推定であれば、Ballard法では波長180mまでの位相速度が必要であるが、提案法では波長80mまでの位相速度が観測できればよいことから、アレー半径が少なくすみ、省スペースで推定が可能である。

以上より、逆解析における初期値の設定方法としての適用性は、今後実際に逆解析に適用した上で検証を行う必要がある。

④位相速度を用いて基盤深さを直接推定する手法を提案

し、その精度を検証した。H/Vスペクトルを併用する方法は、ややばらつきが大きい結果となったが、アレー観測のみによる方法は、工学的基盤のS波速度を400m/s以上と定義した場合、比較的高い精度で推定が可能である。これは、Ballard法を用いた場合でも同様であった。実際の基盤深さよりも浅く推定してしまう危険度は低いことから、安全側のマージンを含んだ予備的な概略推定法としては適用が考えられる。

⑤直接推定したS波速度構造を用いた伝達関数は速度検層結果による伝達関数と比較的よく一致した。固有周期の推定値と速度検層結果を用いた理論値の比を R_T と定義すると、提案法、Ballard法のいずれの方法を用いた場合においても、観測位相速度をもとにした場合は R_T の標準偏差は0.15程度であり、非線形性を考慮しない地震動の増幅特性の検討ならば初期推定値のみによっても十分精度の良い推定が可能であることが示唆される。地盤種別としては、1次固有周期の短いI種地盤において比較的精度が良くないケースがあるといえる。

9. おわりに

本研究室による地盤のS波速度構造推定結果は、耐震設計に適用できるほか、地震防災・サイスミックゾーンেশョンの際の重要な指針となる。今後は、逆解析によって、さらにS波速度構造を推定する研究を行う予定である。

S波速度構造をこの値を容易かつ経済的に測定できることが明らかになれば、今後実務面での広範囲な適用が期待される。具体的には、ボーリングおよびPS検層を実施していないが、耐震安全性を評価する必要のある地点、地盤構成の面的な変化が大きく、綿密な土質調査を本来必要とするものの、経済的な理由から限定的にしか土質調査を実施できない地点、さらに地盤改良の効果の確認など、幅広い応用が想定される。特に港湾および空港地域においては、都市部と比較すると空間的にアレー観測を実施しやすい環境にあることから、その適用性は非常に高いものと考えている。

なお、本研究においては、アレー観測によるS波速度構造の推定を対象を絞ったため、3.4(1)で述べた微動H/Vスペクトルのピーク周期と工学的な固有周期の開きの原因については可能性を指摘するにとどまっている。しかしながら、この点は工学的に非常に重要であり、かつ各方面でH/Vスペクトルが固有周期の判定法として非常に盛んに適用されている事実を鑑みると、早急に検証が必要であると認識している。この原因の解明に当たっ

ては、速度検層が通常実施されていない数 100m の深さの S 波速度構造が必要と考えられ、今後アレー半径を広げた微動観測の実施を行い、検討していきたい。また、この問題には、地盤種別分類として（すなわち、地盤が良好か軟弱かという定性的な傾向も示す指標として）正確な値が求められるという問題と、長周期の地震波を考慮する必要がある構造物に対しても正確な耐震性照査のための指標を提示する必要があるという 2 つの側面があることにも注意が必要であると考えられる。

最後に、常時微動観測の実施におきまして、中国地方整備局境港湾空港工事事務所、航空自衛隊美保基地第三輸送航空隊司令部ならびに北海道開発局札幌開発建設部新千歳空港建設事務所（以上、2002 年度観測実施分）の協力を頂きましたことに感謝します。kik-net 強震観測地点の土質データについては独立行政法人防災科学技術研究所のホームページ（<http://www.kik.bosai.go.jp>）より入手しました。本研究は運輸施設整備事業団基礎研究制度の助成を受けて行ったものである。

（2002 年 2 月 14 日受付）

参考文献

- 大橋明如・紺野克昭・片岡俊一・斉藤正樹(2000)：地盤の平均 S 波速度とレイリー波の位相速度の関係，土木学会第 55 回年次学術講演会 I -B347, pp.694-695.
- 運輸省港湾局監修(1999)：港湾の施設の技術上の基準・同解説，日本港湾協会。
- 大町達夫・紺野克昭・遠藤達哉・年縄 巧(1994)：常時微動の水平動と上下動のスペクトル比を用いる地盤周期推定方法の改良と適用，土木学会論文集，No.489, I-27, pp.251-260.
- 岡田 廣・松島 健・日高英治(1987)：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，Vol.49, pp.53-62.
- 岡田 廣・松島 健・森谷武男・笹谷 努(1990)：広域・深層地盤調査のための長周期微動探査法，物理探査，Vol.43, No.6, pp.402-417.
- 紺野克昭(1997)：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，No.577, I-41, pp.89-105.
- 紺野克昭・長尾 毅・佐藤幸博・田中 剛・一井康二・片野隆史・大出哲也・津留 崇・荒田昌潔(2000)：羽田空港におけるアレー微動観測を用いた地盤の平均 S 波速度の推定，土木学会第 55 回年次学術講演会 I -B333, pp.666-667.
- 紺野克昭(2000)：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.
- 紺野克昭・片岡俊一(2000)：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.
- 紺野克昭・長尾 毅(2001)：地震防災に向けた常時微動の活用例，土木学会誌，Vol.86, November, pp.40-43.
- 紺野克昭・鈴木貴博・蔵田孝一(2001)：L 字型アレー微動観測の空間自己相関法への適用性について，第 26 回地震工学研究発表会講演論文集，pp.297-300.
- 砂田尚彦・澤田 勉・三神 厚・辻原 治(2001)：微動記録を用いた地盤各層の S 波速度の同定と妥当性の検討，第 26 回地震工学研究発表会講演論文集，pp.445-448.
- 鉄道総合技術研究所編(1999)：鉄道構造物等設計標準・同解説；耐震設計，丸善株式会社。
- 時松孝次・宮寺泰生(1992)：短周期微動に含まれるレイリー波の特性と地盤構造の関係，日本建築学会構造系論文報告集 No.439, pp.81-87.
- 中村 豊(1988)：常時微動計測に基づく表層地盤の地震動特性の推定，鉄道総研報告 Vol.2, No.4, pp.18-27.
- 奈良浩一・佐藤泰司(1996)：システム工学の数理手法，コロナ社。
- 長尾 毅・西守男雄・佐藤幸博・佐藤陽子・海老原健介・田中 剛・巽 裕一郎(2001a)：微動アレー観測を用いた表層地盤の平均 S 波速度の推定，港湾技研資料 No.992.
- 長尾 毅・西守男雄・宮田正史・小濱英司・海老原健介(2001b)：境港における常時微動観測による表層地盤構造と鳥取県西部地震被害の関係，第 26 回地震工学研究発表会講演論文集，pp.325-328.
- 長尾 毅・西守男雄(2001)：常時微動観測による米子空港地下構造と鳥取県西部地震被災の関係，第 56 回土木学会年次学術講演会，CD-ROM.
- 長尾 毅・紺野克昭(2002)：常時微動アレー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，No.696, I-58, pp.225-235.
- 松岡達郎・梅沢夏実・巻島秀男(1996)：地下構造推定のための空間自己相関法の適用性に関する検討，物理探査，Vol.49, No.1, pp.26-41.
- 翠川三郎・松岡昌志・作川孝一(1992)：1987 年千葉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報告集 No.442, pp.71-78.
- 宮腰 研・岡田 広・凌 魁群(1997)：微動探査法にお

ける推定可能な微動中の表面波位相速度の波長範囲，
科研報告（地震時の地盤震動特性評価のための微動の
活用に関する研究），pp.73-79.

文部科学省(2001)：第2回堆積平野地下構造調査成果報
告会予稿集.

山中浩明・石田 寛(1995)：遺伝的アルゴリズムによる
位相速度の逆解析，日本建築学会構造系論文報告集
No.468, pp.9-17.

山中浩明(2001)：焼きなまし法による位相速度の逆解析
－遺伝的アルゴリズムとの性能比較－，物理探査，
Vol.54, No.4, pp.197-206.

Aki, K.(1957)：Space and time spectra of stationary
stochastic wave, with special reference to microtremors,
Bulletin, Earthquake research Institute, Vol.35,
pp.415-456.

Ballard, R. F. and Jr.(1964)：Determination of soil shear
moduli at depth by in situ vibratory techniques, U. S.
Army Waterways Experiment Station.

Building Seismic Safety Council(BSSC)(1994)：NEHRP
Recommended provisions for the development of seismic
regulations for new buildings, part I :Provisions,
developed for the Federal Emergency Management
Agency, Washington D.C.

N. A. Haskell(1953)：The dispersion of surface waves on
multilayered media, Bull., Seismol., Soc. Am., 43,
pp.17-34.

Imai(1977)・ T.：P and S wave velocities of the ground in
Japan, Proc. IXth ICSMFE, 1977.

Sato, T.・Kawase, H.・Matsui, M. and Kataoka, S.(1991)：
Array measurement of high frequency microtremors for
underground estimation, Proc. of the 4th international
Conference on Seismic Zonation, Vol.2, pp.409-416.

国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of NILIM

No. 34

June 2002

編集・発行 ©国土技術政策総合研究所

本資料の転載・複写のお問い合わせは

〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1
管理調整部企画調整課 電話:0468-44-5018