

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。このため、PS検層は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。実務での地震応答計算にはS波速度が必要となるが、その際のS波速度は、一般的には標準貫入試験（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。しかしながら、S波速度に対するN値のばらつきの大さを考慮すると、後に示すようにN値を用いた地震応答計算には多くの誤差が含まれていると判断される。

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。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

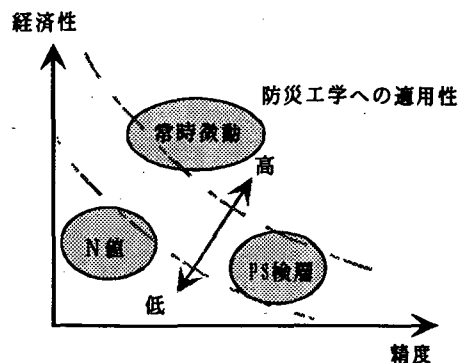


図-1 防災工学への適用性(紺野・長尾,2001)

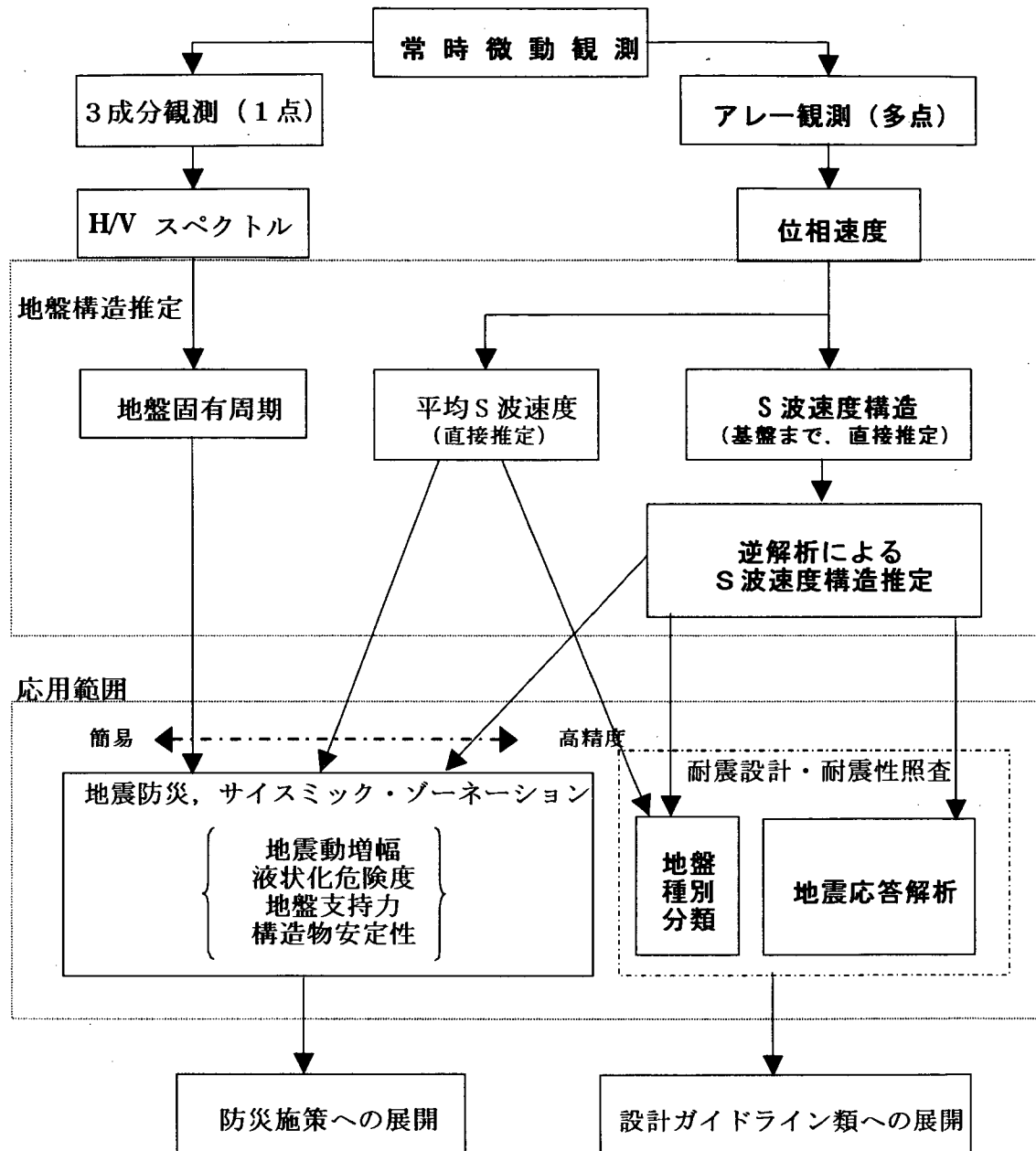
に関する既往の研究は、工学的基盤以深の地震基盤までのS波速度構造の解明に重点を置いた事例が多く（例えば、文部科学省,2001）、表層地盤のS波速度構造に関する研究事例（例えば、Sato et al.,1991）は比較的少ない。

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）。さらに前報では、平均S波速度を用いて地盤のS波速度構造を5mまたは10m刻みで直接推定する手法の提案を行った（西守ほか,2002）。

本研究においては、前報で提案したS波速度構造を初期値とした逆解析を準ニュートン法に基づいて実施し、S波速度構造の最適化を行うとともに、逆解析後に得られたS波速度構造による伝達関数をPS検層結果をもとにした伝達関数と比較し、固有周期の推定精度について検討した。さらに、逆解析結果をもとに1次元の等価線形地震応答解析を実施し、PGA、PGV、加速度スペクトル応答値等について速度検層結果をもとにした地震応答解析値と比較することにより、提案法の耐震設計実務への適用性を検証した。

また関連する研究として、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（Nagao et al.,2002）。

なお、常時微動の理論や解析法、S波速度構造の推定方法などについては前報で詳述しているため、そちらを参照されたい。



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. 逆解析による S 波速度構造の最適化

2.1 提案法とBallard法による S 波速度構造推定方法

前報において提案した S 波速度推定方法（以下，提案法）および Ballard(1964)による推定方法（以下，Ballard法）は次のとおりである。ただし，詳細については前報を参照されたい。

まず提案法について述べる。提案法は，5m または 10m 刻みで S 波速度構造の推定を行うものである。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 波速度は $V_s \Delta x$ とし， Δx 間では S 波速度は一定値と仮定する。 $V_s \Delta x$ は式(1)により推定される。

$$V_s \Delta x = \frac{C(\lambda_b) \Delta x}{\alpha \left\{ 1 - \frac{C(\lambda_b)}{C(\lambda_a)} \right\} x_a + \Delta x} \quad (1)$$

$$= \frac{C(\lambda_b) \Delta x}{\alpha \cdot mx}$$

ここに，

$$\alpha = 0.05 \exp\{6 - 2mx\} + 1 \quad (\Delta x = 5m)$$

$$\alpha = 0.02 \exp\{9 - 1.5mx\} + 1 \quad (\Delta x = 10m) \quad (2)$$

ここで， V_{sx_i} に対応させるレイリー波位相速度 $C(\lambda_i)$ としては表-1 の関係を用いる。これは，既往の PS 検層データをもとにした統計解析により，平均 S 波速度と最も相関の高い位相速度の波長を算出した結果である。

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}	$C(80)$

また，Ballard の方法では，深さ x における S 波速度 $V_s(x)$ は式(3)により求めることができる。

$$V_s(x) = 1.1C(T) \quad (3)$$

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

ここに， $C(T)$: 周期 T における位相速度

なお，Ballard 法においては，連続的に S 波速度構造を推定できるが，提案法との比較の観点から本研究では 5m または 10m 刻みで S 波速度構造を推定した結果を用いる。

2.2 逆解析の実施

常時微動アレー観測結果より得られる位相速度の推定構造を最適化するために，2.1 で述べた S 波速度推定構造を初期解として逆解析を実施する。逆解析とは，ある S 波速度構造を仮定し，Haskell(1953)の方法により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）。

本研究ではまず，提案法の逆解析初期値問題への適用性を評価するため，提案法及び Ballard 法により推定された S 波速度構造を用いて逆解析を行い，S 波速度構造の最適化を行った。逆解析法としては，準ニュートン法の適用を検討することとした。準ニュートン法は，初期解が合理的に設定されている場合，最適解の探索に有利な方法であるといえる。以下に述べる解析では，準ニュートン法の一つである BFGS 法に基づいて開発されたコード(茨木ほか，1991)を使用し，S 波速度および層厚を変数として，式(4)により定義される残差自乗和関数 F の最小化を試みた。

$$F(V_{sj}, \bar{H}_j) = \sum_{i=1}^M \left(C_i^{obs} - C_i^{cal}(V_{sj}, \bar{H}_j) \right)^2 \quad (4)$$

ここで， C_i^{obs} は観測位相速度， C_i^{cal} は提案法による S 波速度構造をもとにして算出される理論位相速度である。添字 i は周期に対応する。 V_{sj} は j 層目の S 波速度である。 \bar{H} は，層厚を H とするとき， $H = \bar{H}^2$ で定義される変数で，逆解析の過程で層厚 H が負になることを避けるために導入している。なお，比較のため，層厚を当初設定の 5m または 10m に固定した場合についても逆解析を実施している。 M は観測位相速度の個数であり，表層 60m の推定であることから，波長 100m までの観測位相速度を対象とした。 C_i^{cal} を求める際に用いる密度は $2.0t/m^3$ とし，P 波速度 V_p については対象地点の PS 検層データより式

(5)の関係を用了。

$$V_p = 100V_s^{1/2} \quad (5)$$

提案法およびBallard法による初期値及び逆解析による位相速度を観測位相速度と比較して図-3に示す。後2者はよく一致する地点が多く、観測位相速度を理論位相速度に近付ける逆解析は適切に行われたことが分かる。ただし、逆解析後の位相速度と観測位相速度に違いが大きい地点もある。これは初期解の与え方や逆解析手法の問題などが考えられ、今後の検討課題である。なお、提案法による場合、逆解析が実施できない地点が6地点存在した。ただし、5m刻みおよび10m刻みのいずれによっても推定できない地点はなかった。逆解析が実施できなかった理由としては、逆解析において評価関数を小さくするような修正値を検索できないことがあげられる。通常このような時は層を合併するなどして地下構造初期推定値を修正して、逆解析を実施することが多いと考えられる。しかしながら、本研究では純粹に初期推定値としての適用性を評価する観点から、逆解析が実施できなかった場合はそのまま解析を行わなかった。

逆解析結果によるS波速度構造をPS検層結果とともに図-4~図-5に示す。まず、層厚を固定した条件ではS波速度構造の一致度は低く、層厚を変化させたほうがS波速度構造の一致度が高いことが分かる。これは、層厚を固定した条件では、最小二乗対象の位相速度に近い位相速度を得るためには実際以上に増減の激しいS波速度構造にする必要があるため、層厚が未知の場合の表層地盤の逆解析においては層厚を変数扱いすることが必須の条件であるといえる。このため以下では、層厚変化の場合について詳細な検討を行う。

逆解析結果では、初期推定値において見られたS波速度の大きな増減が減少し、PS検層結果に近づく地点がある(例えば、新篠津、米子空港)ことがわかる。しかしながら一方で、PS検層結果に見られる極端な低速度層または高速度層については、逆解析結果後も検出できない(例えば、千歳、釧路空港)ことがわかる。これは、薄層の極端な高速度層または低速度層が位相速度に及ぼす影響度が低いことが原因であると考えられ、位相速度を用いた地下構造推定の限界を示すものと考えられる。

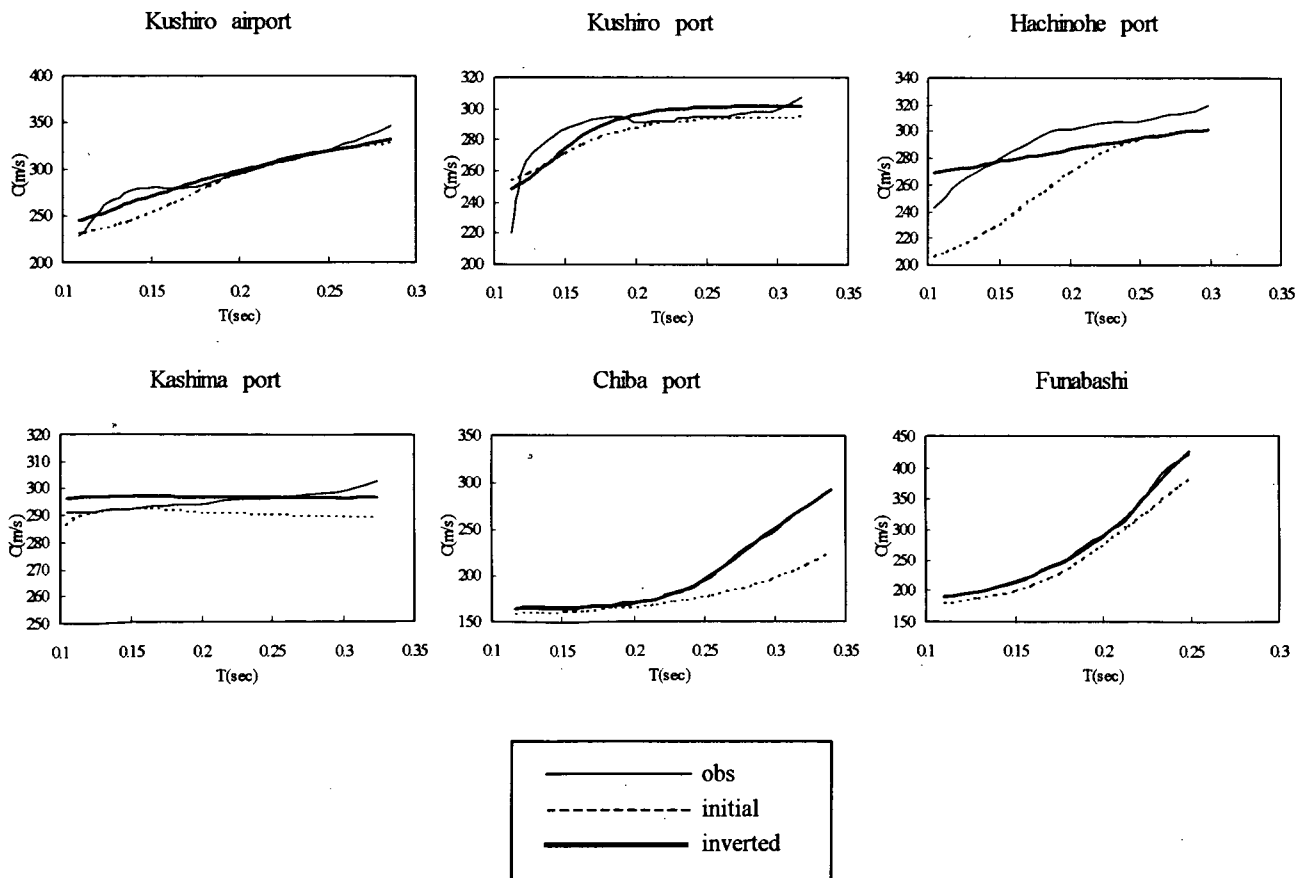


図-3(1) 逆解析結果 (5m 層厚変化)

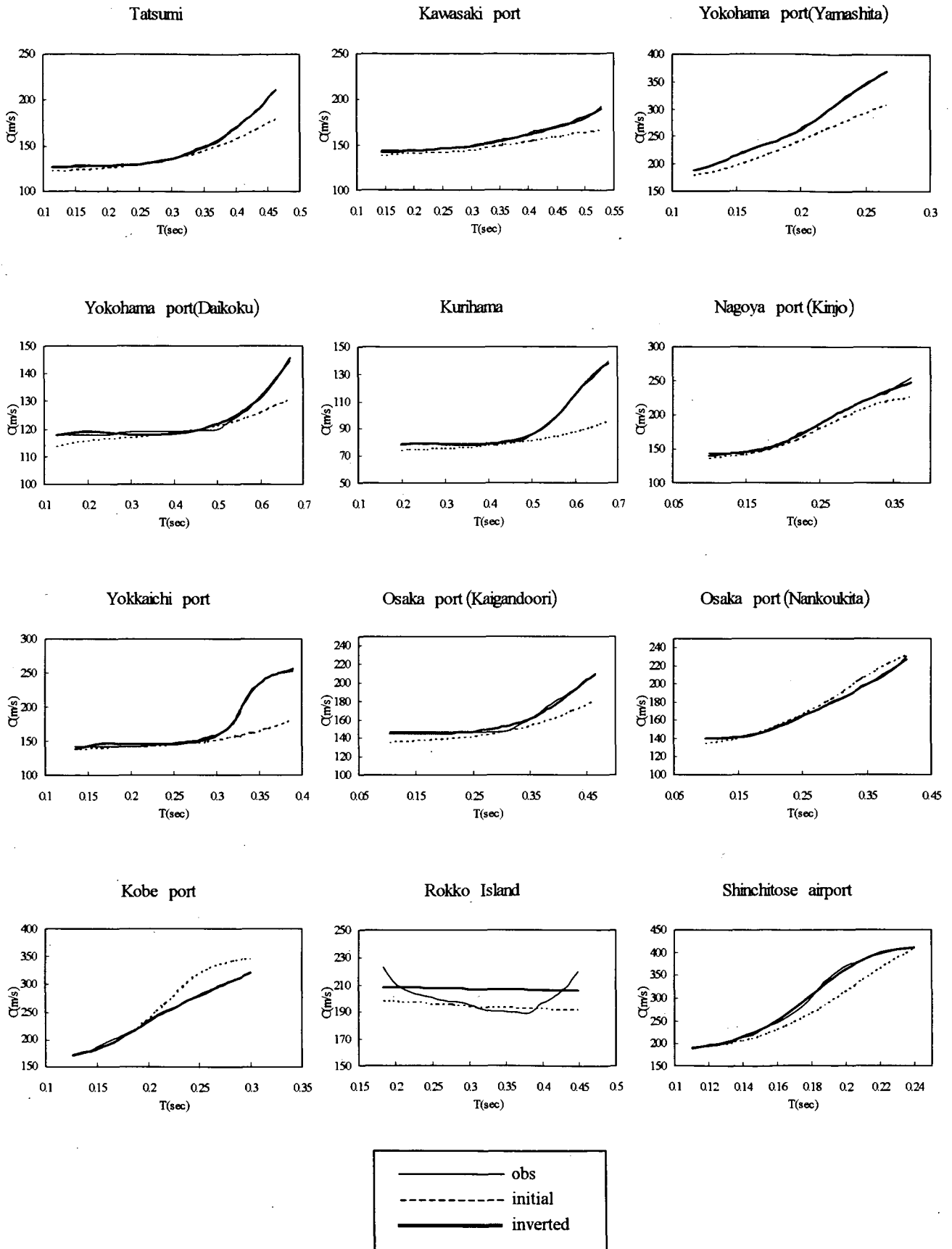


図-3(2) 逆解析結果 (5m 層厚変化)

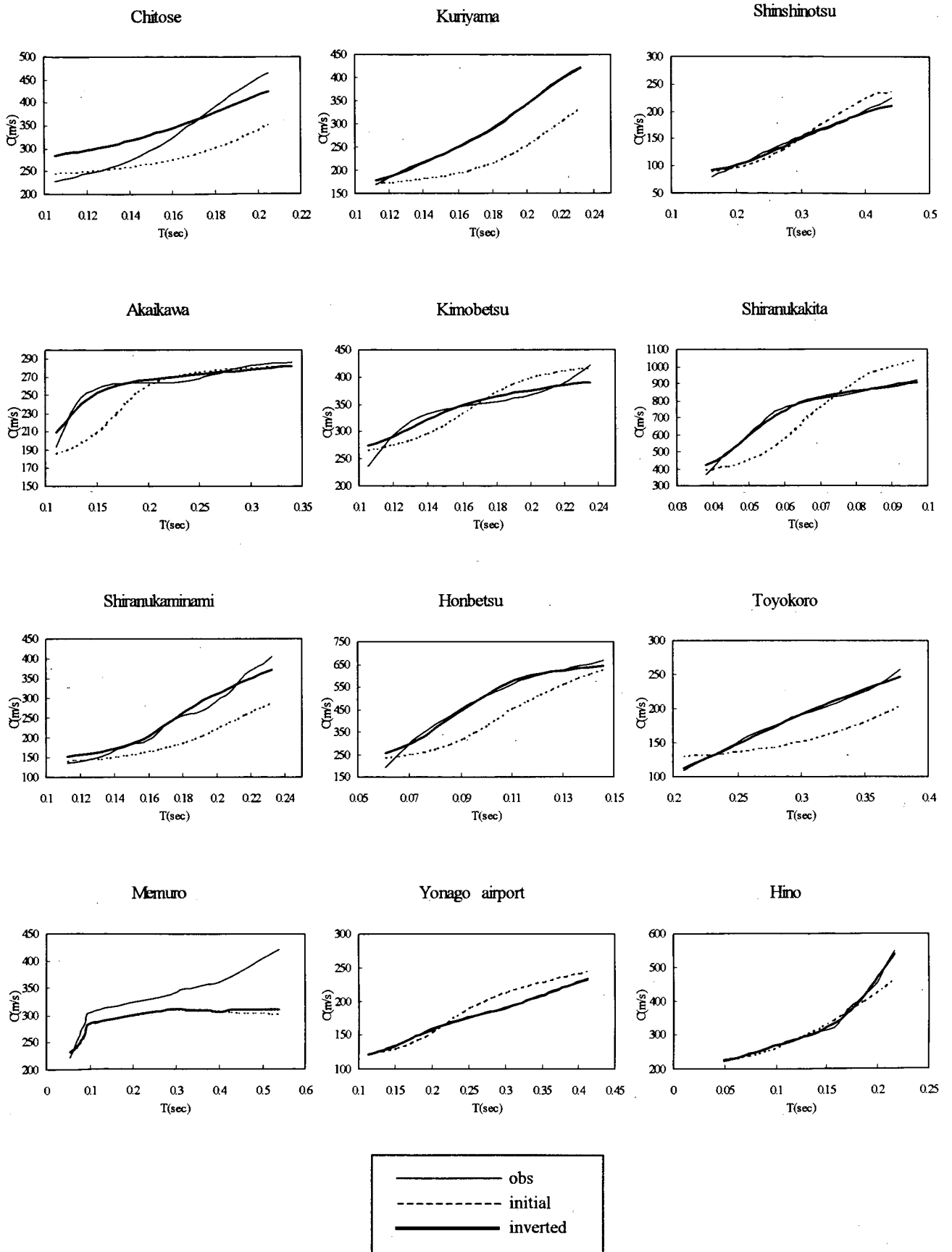


図-3(3) 逆解析結果 (5m 層厚変化)

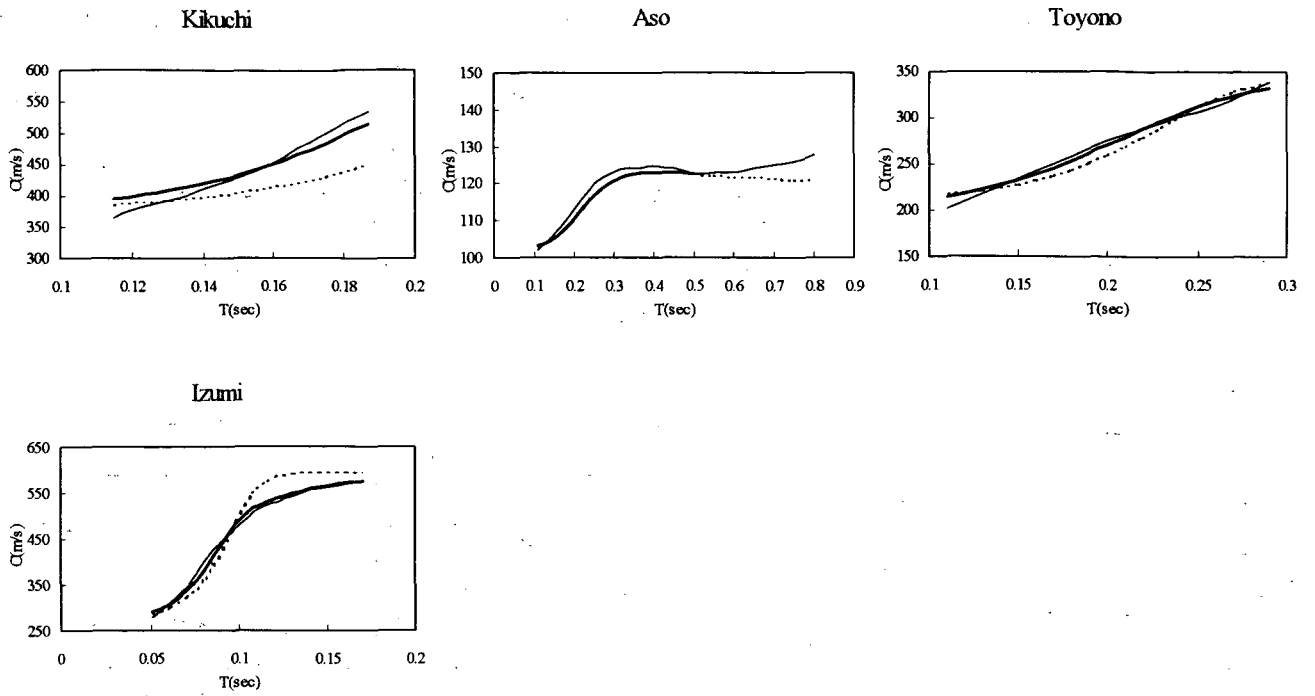


図-3(4) 逆解析結果 (5m 層厚変化)

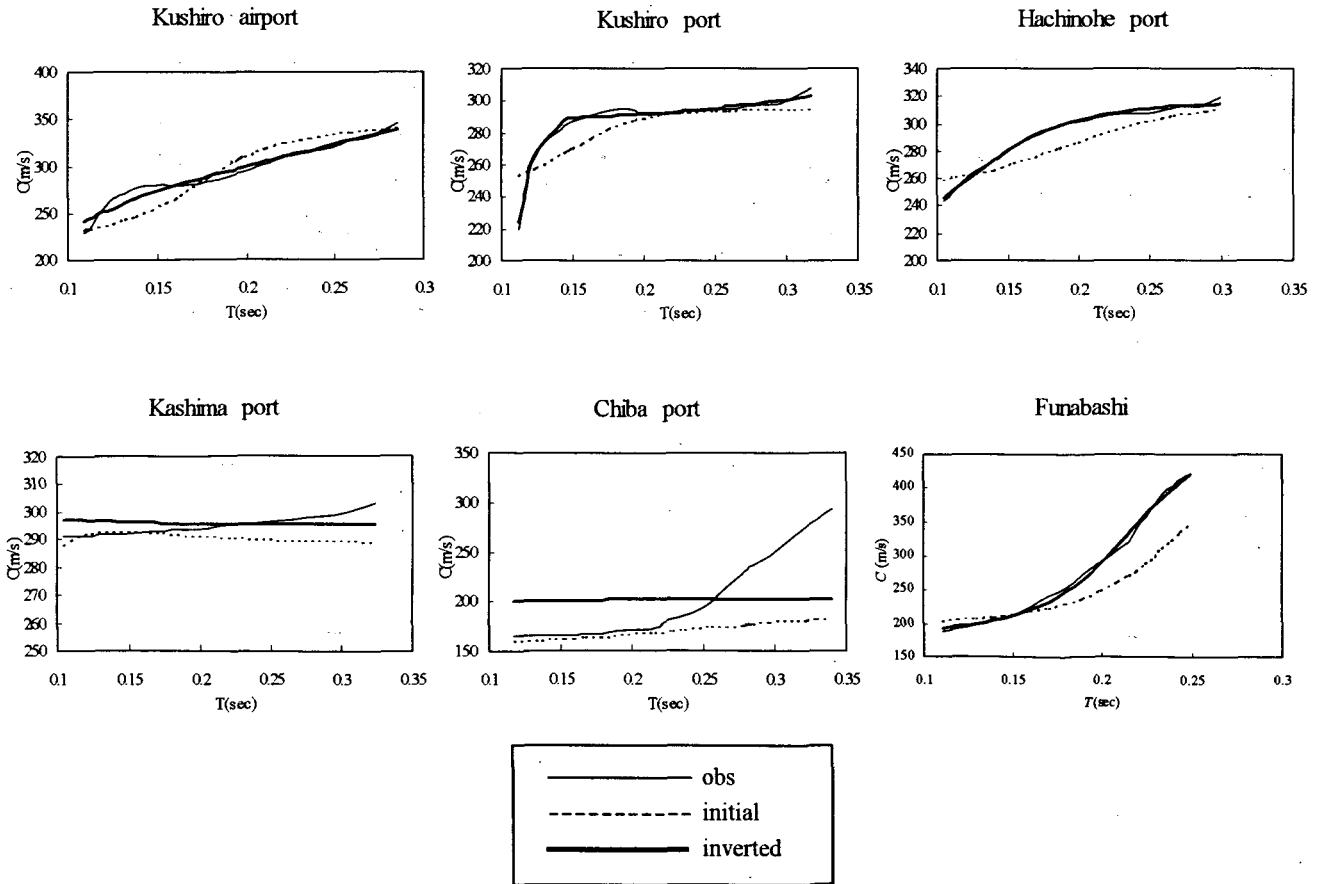


図-3(5) 逆解析結果 (10m 層厚変化)

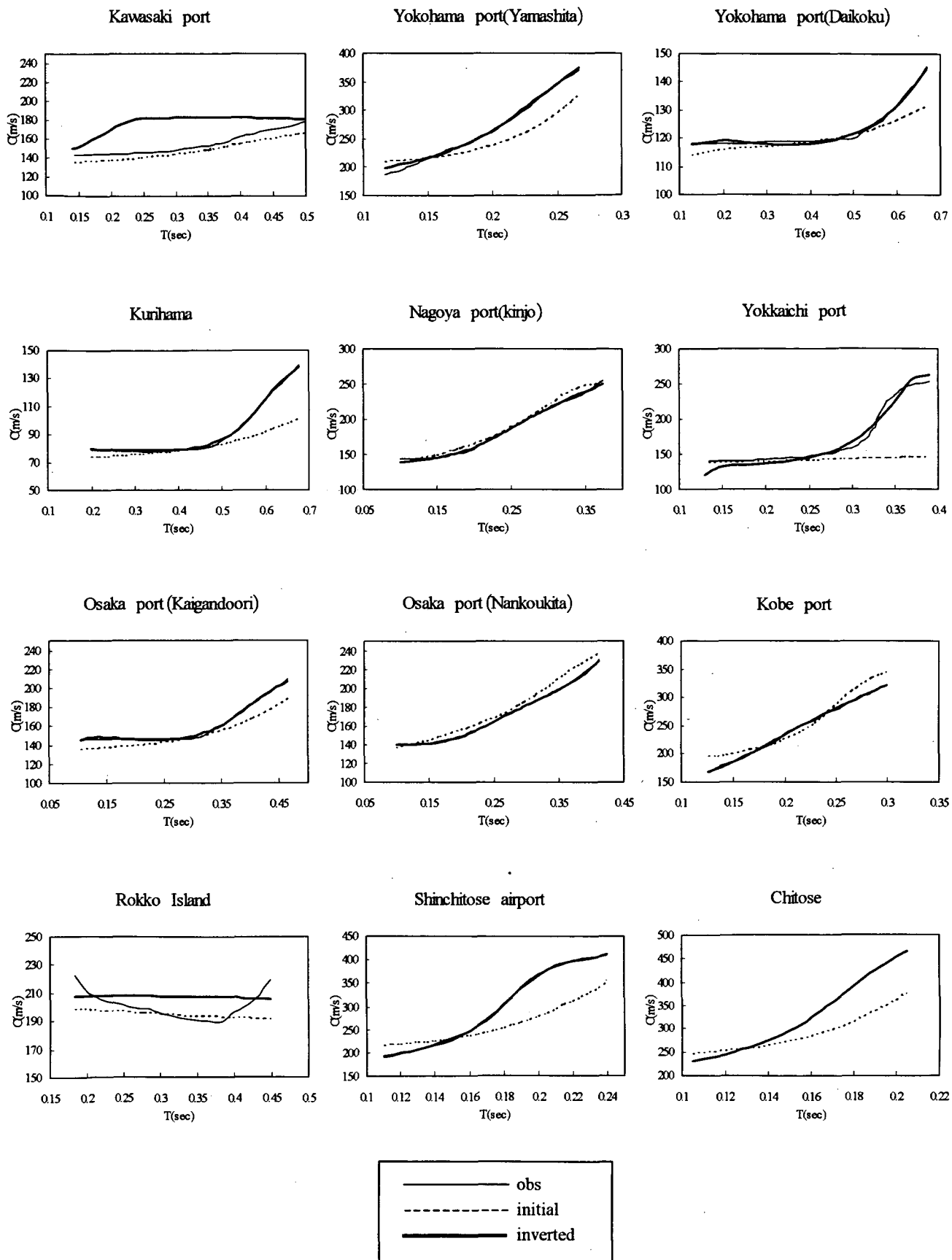


図-3(6) 逆解析結果 (10m 層厚変化)

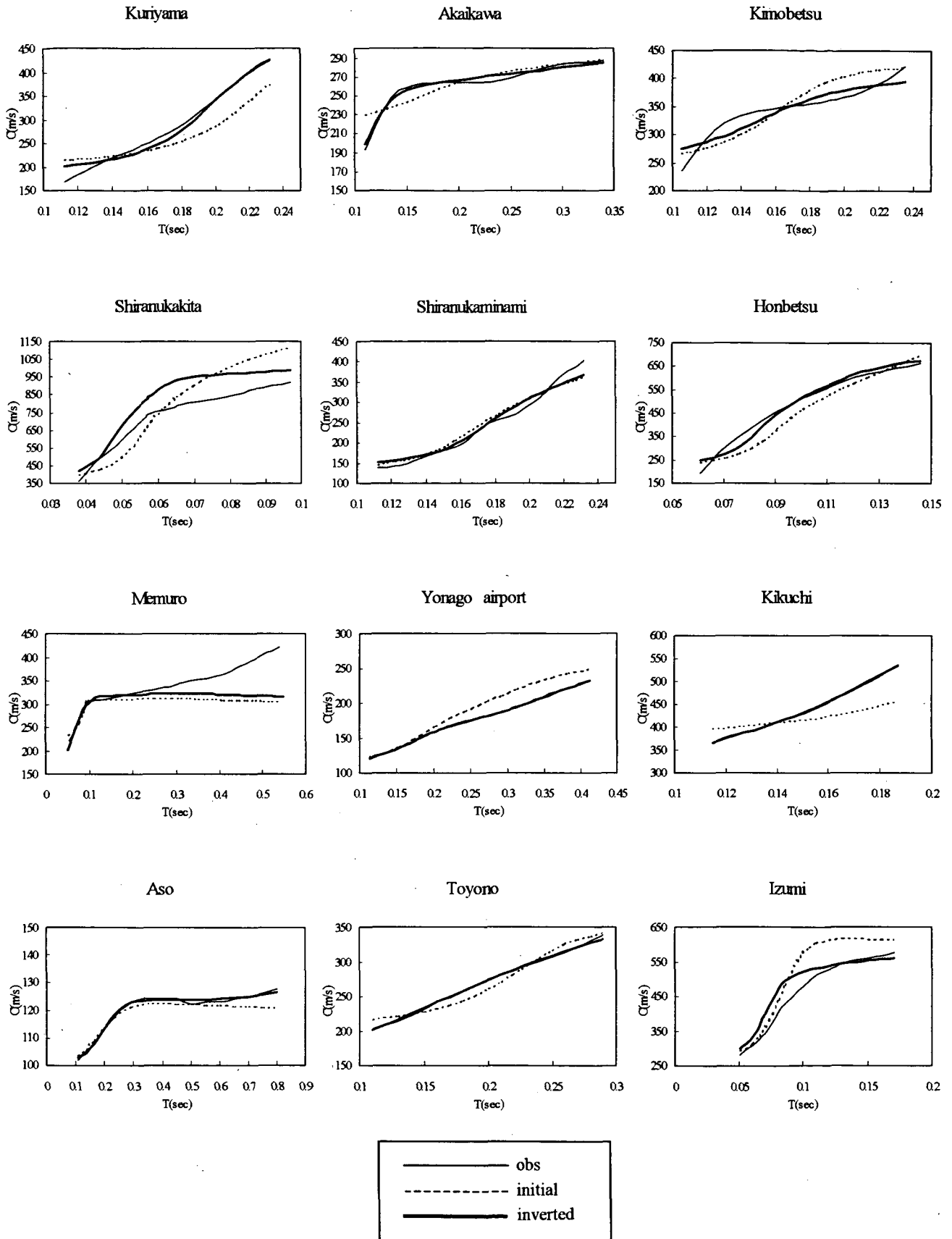


図-3(7) 逆解析結果 (10m 層厚変化)

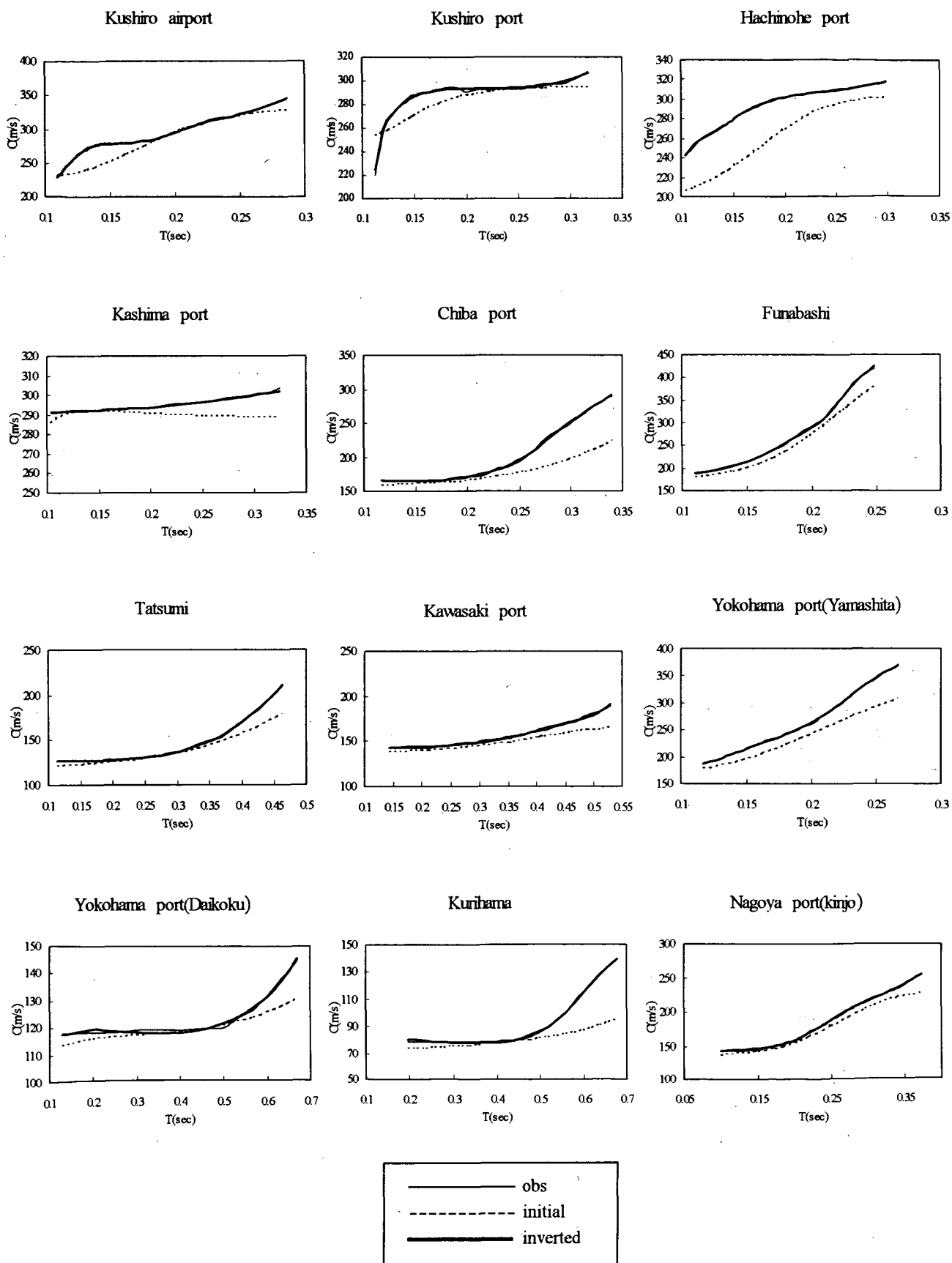


図-3(8) 逆解析結果 (5m 層厚固定)

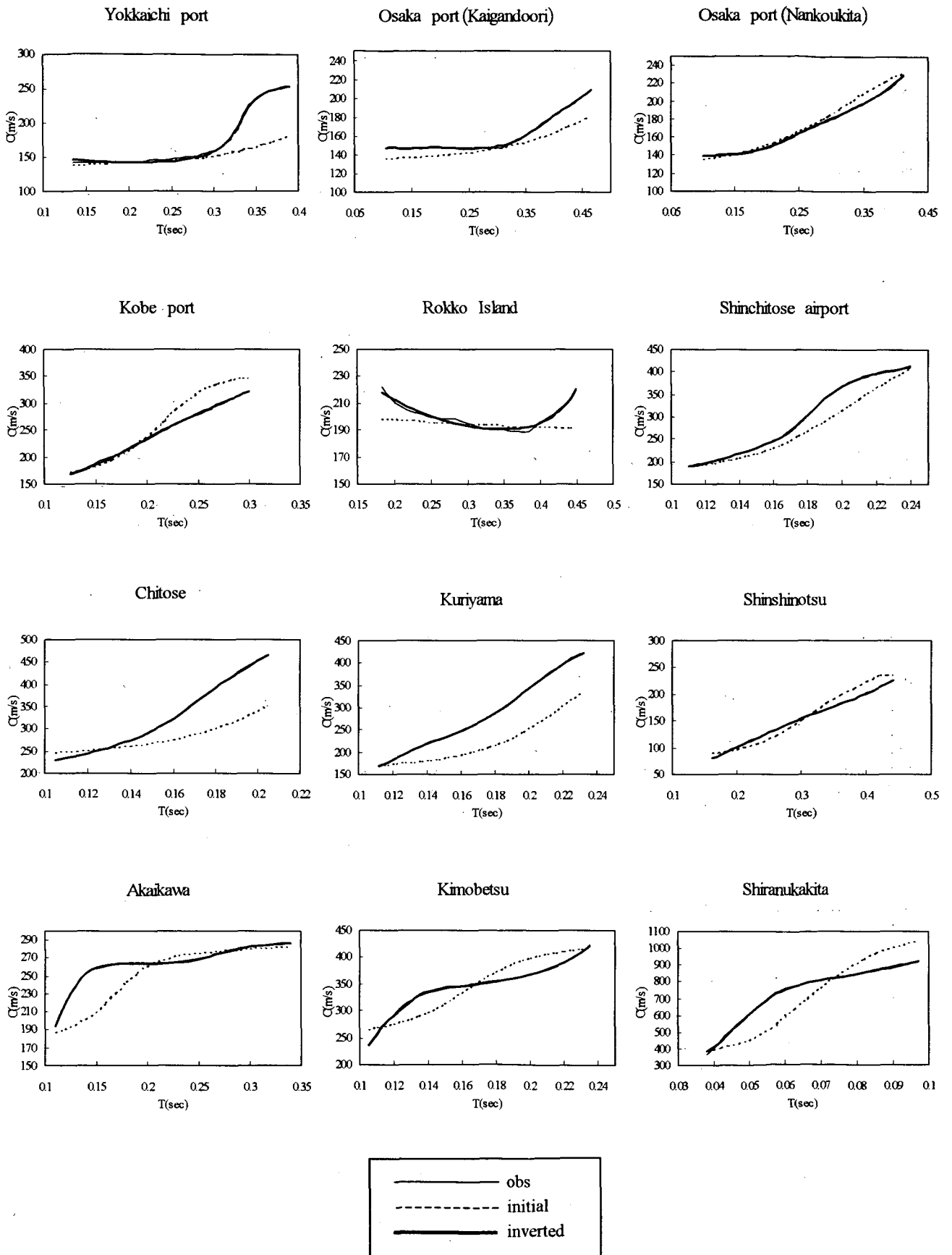


図-3(9) 逆解析結果 (5m層厚固定)

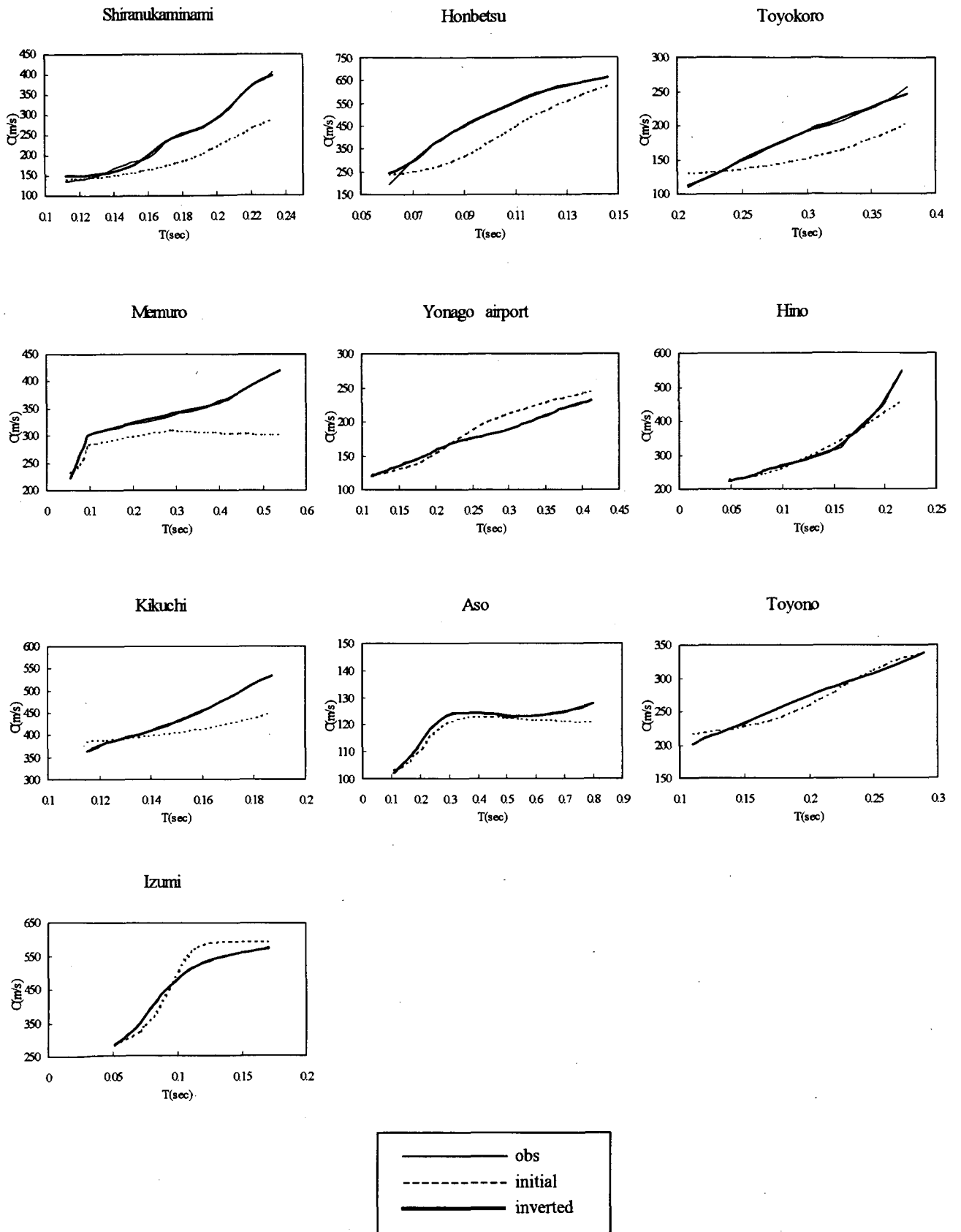


図-3(10) 逆解析結果 (5m層厚固定)

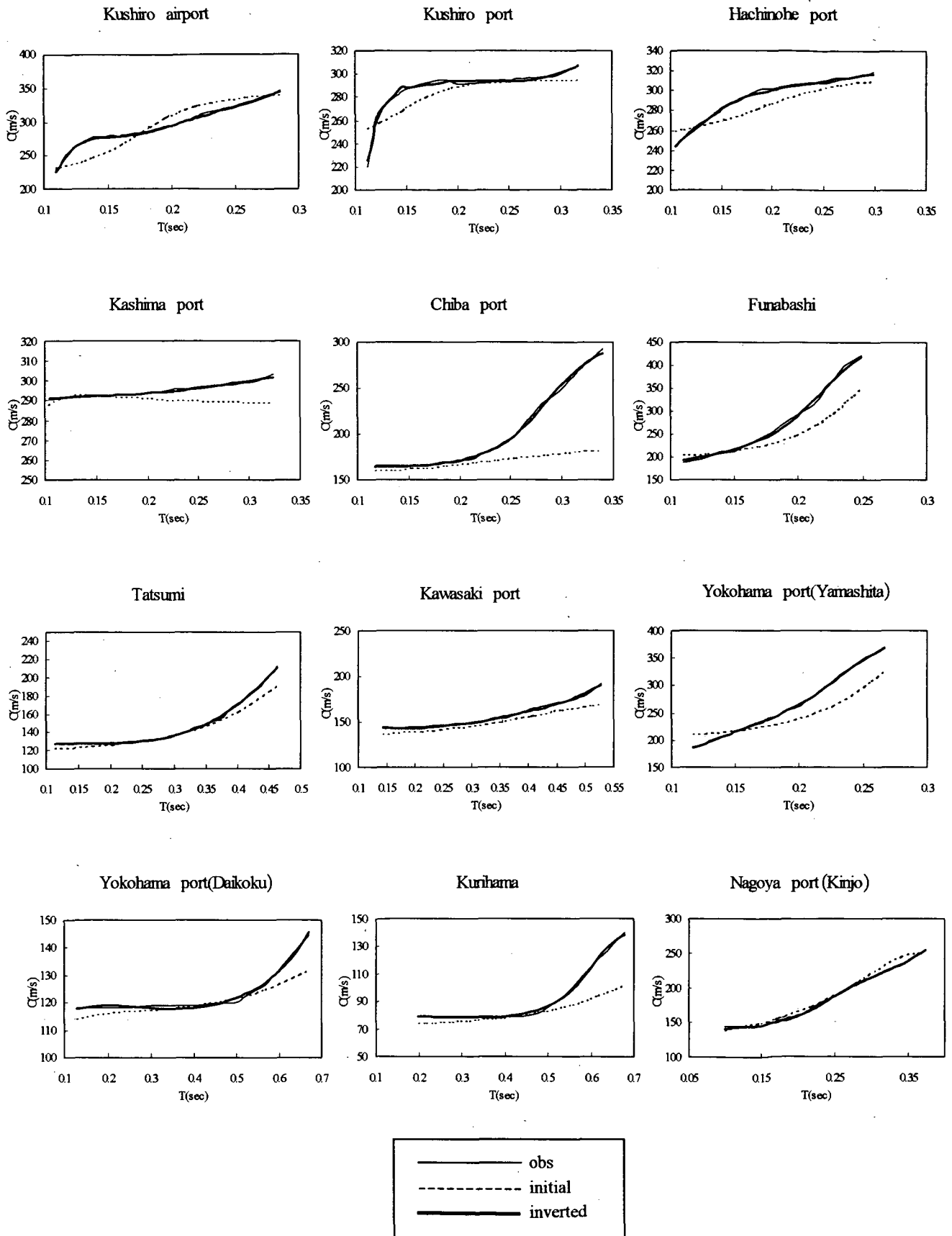


図-3(11) 逆解析結果 (10m 層厚固定)

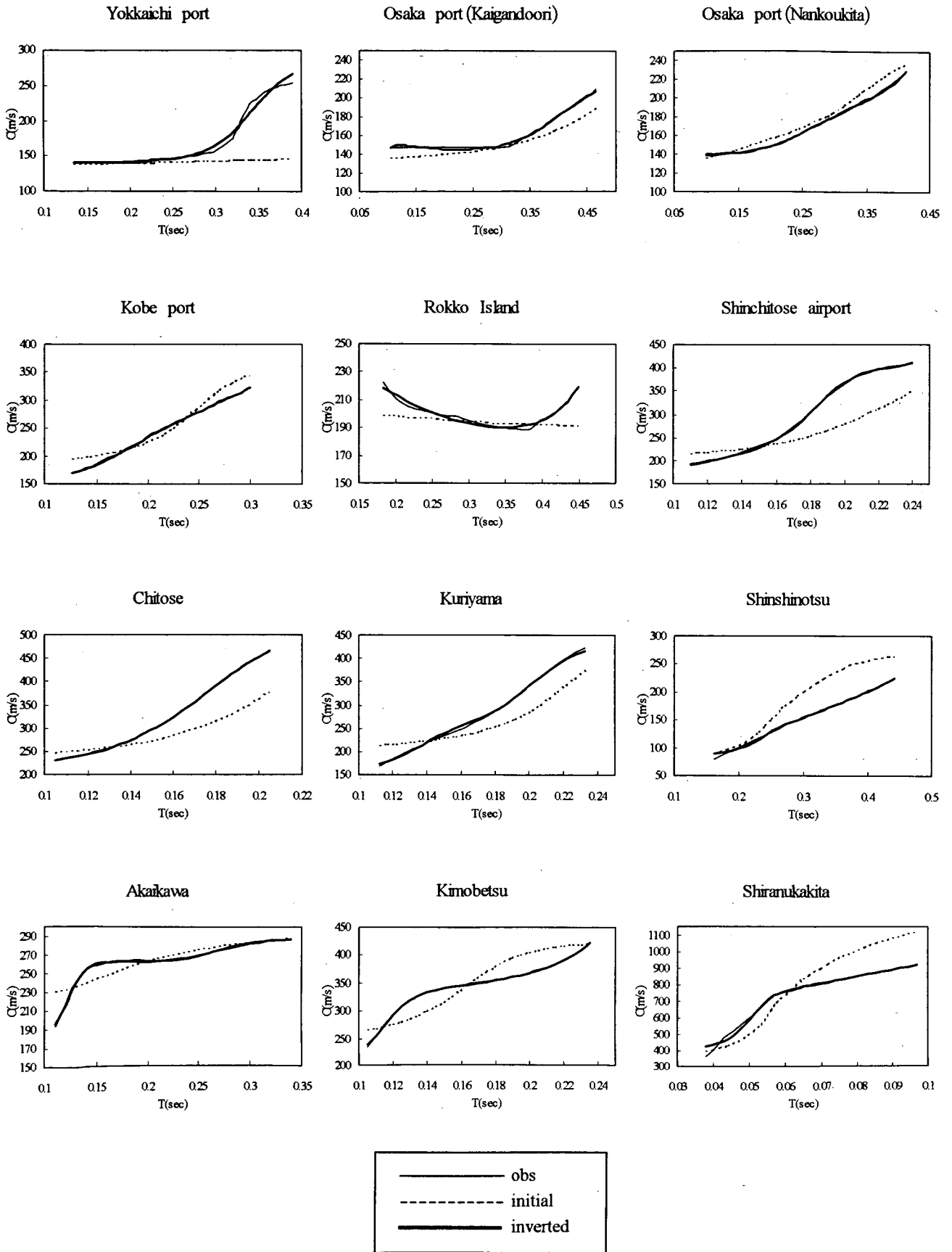


図-3(12) 逆解析結果 (10m 層厚固定)

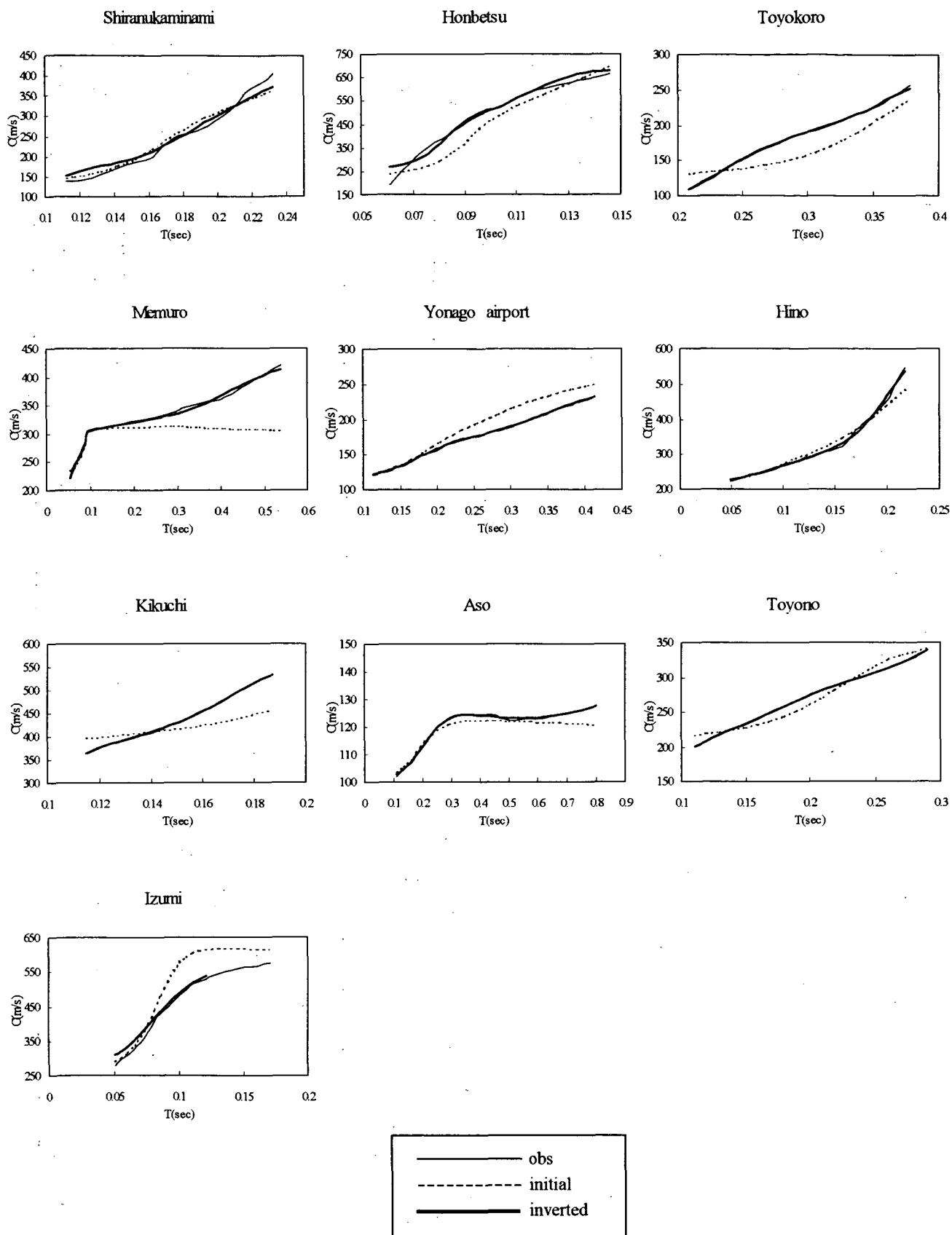


図-3(13) 逆解析結果 (10m 層厚固定)

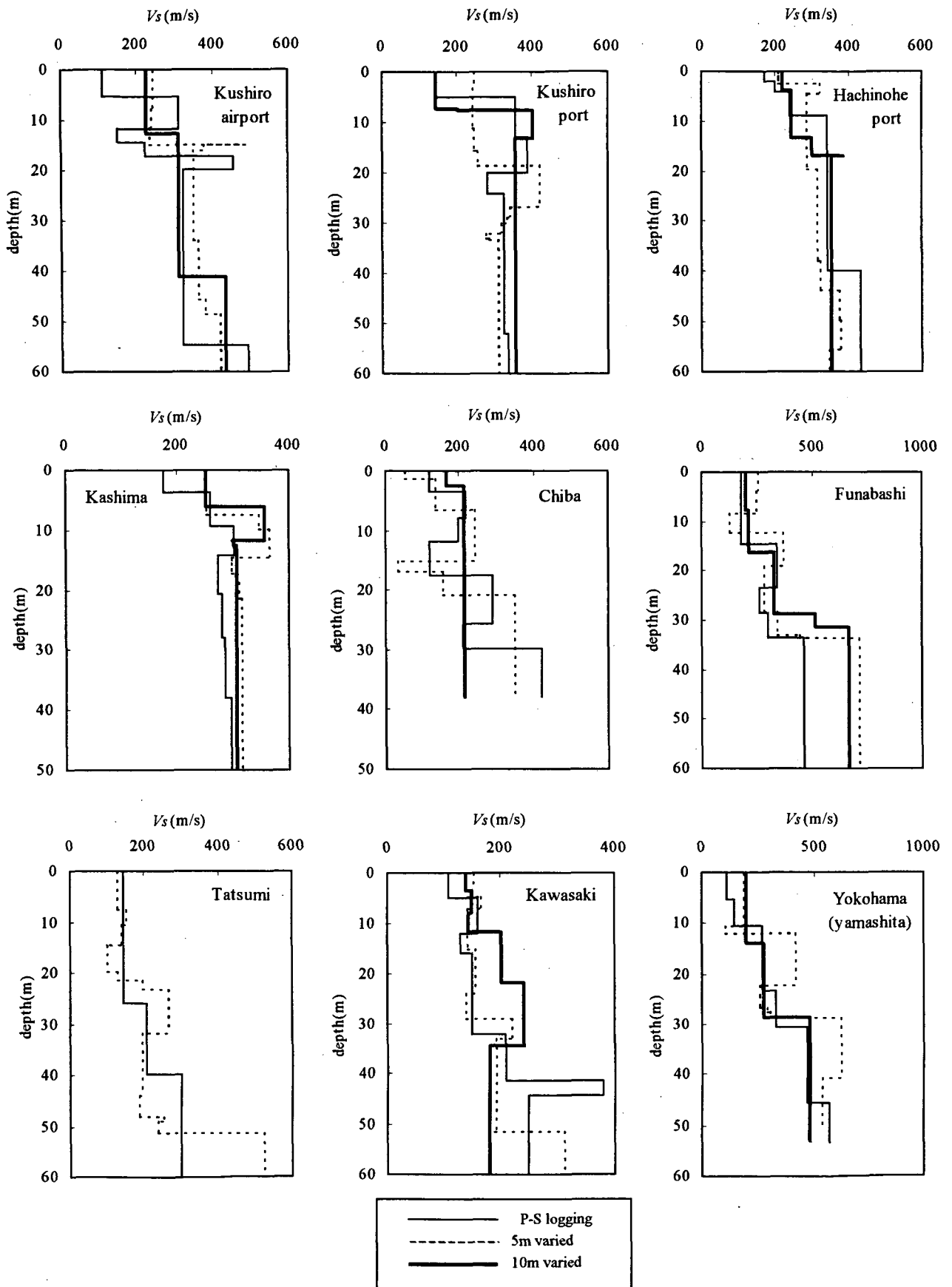


図-4(1) 逆解析結果 (地下構造, 層厚変化)

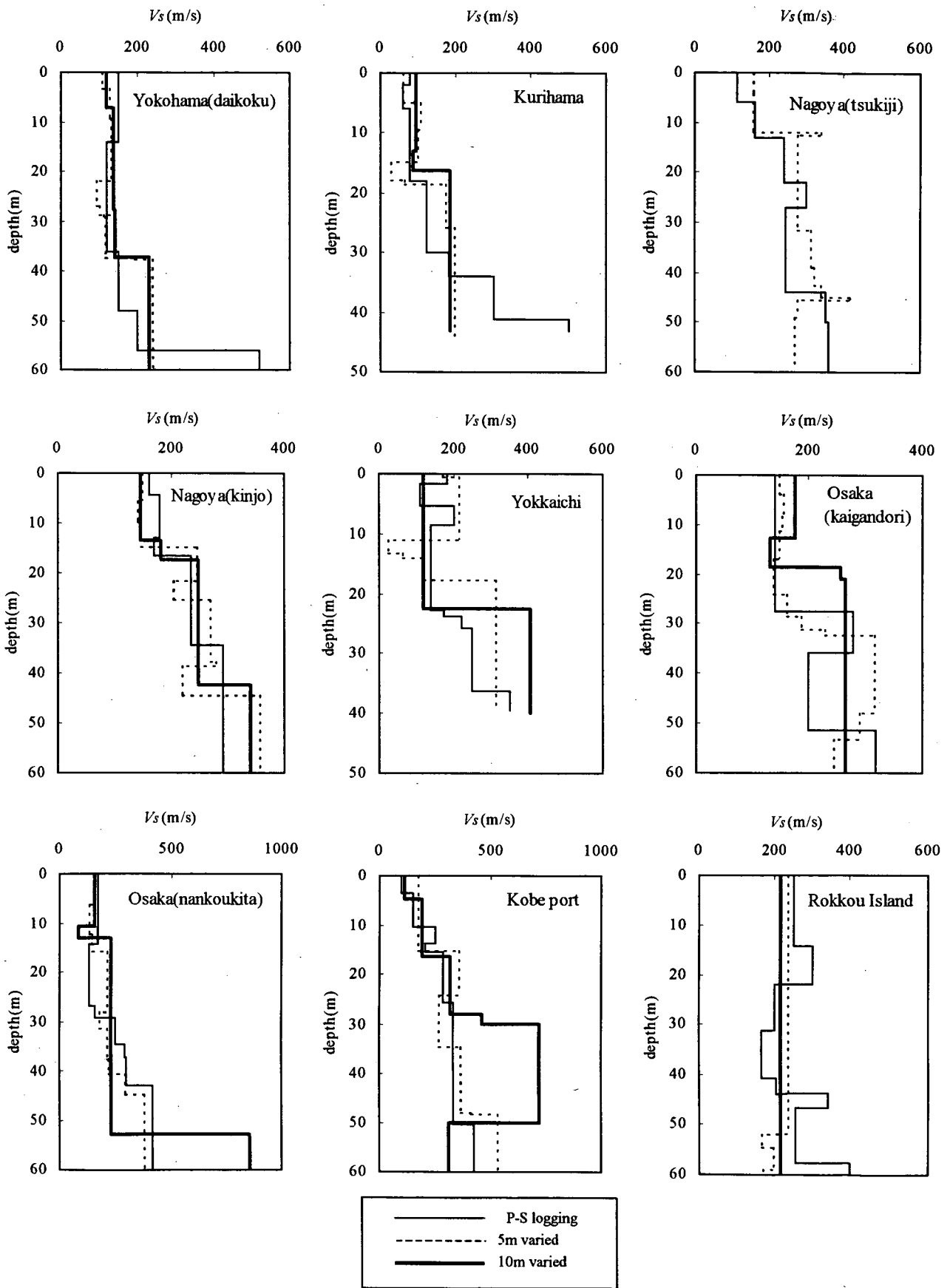


図-4(2) 逆解析結果(地下構造, 層厚変化)

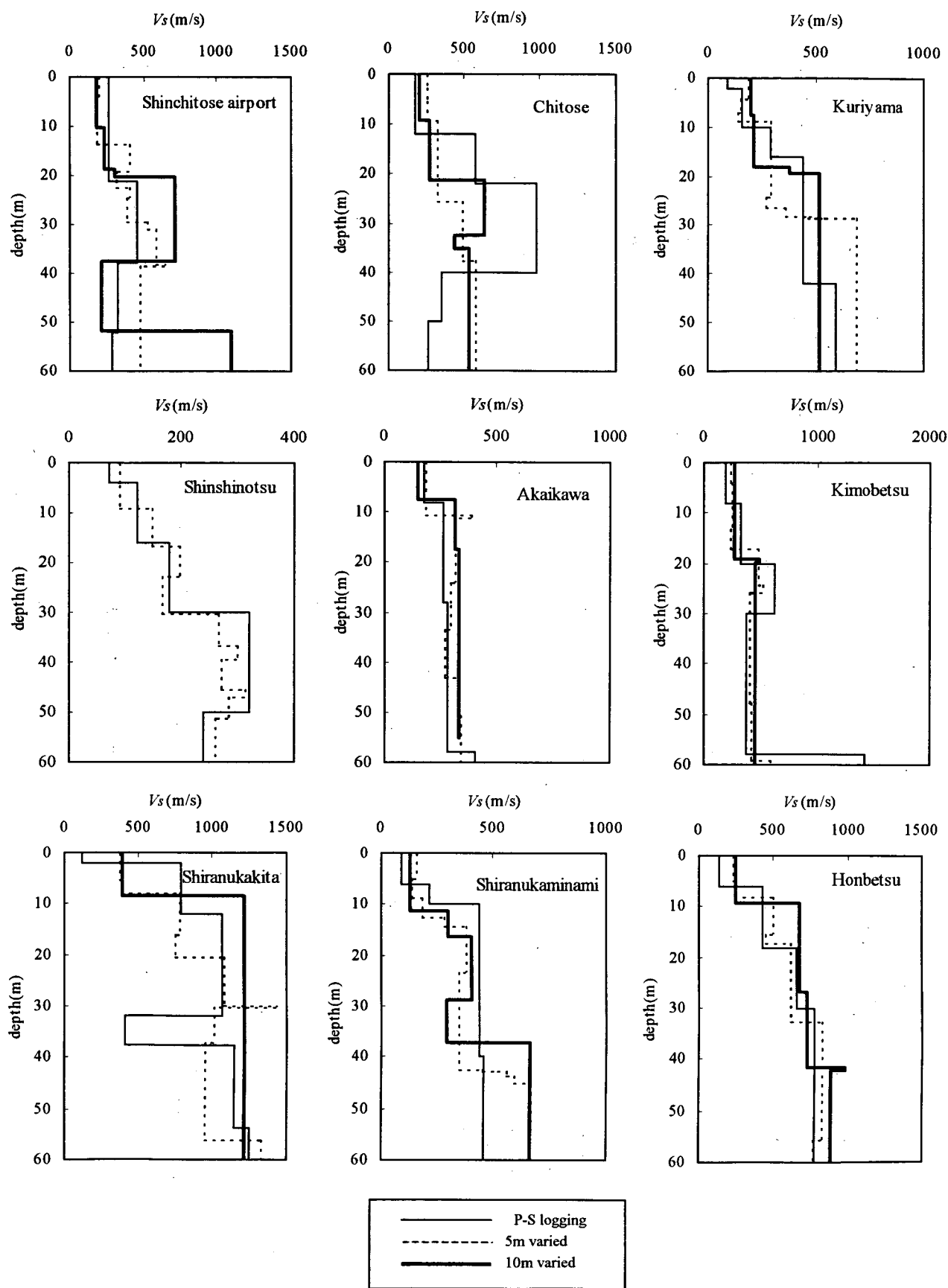


図-4(3) 逆解析結果(地下構造, 層厚変化)

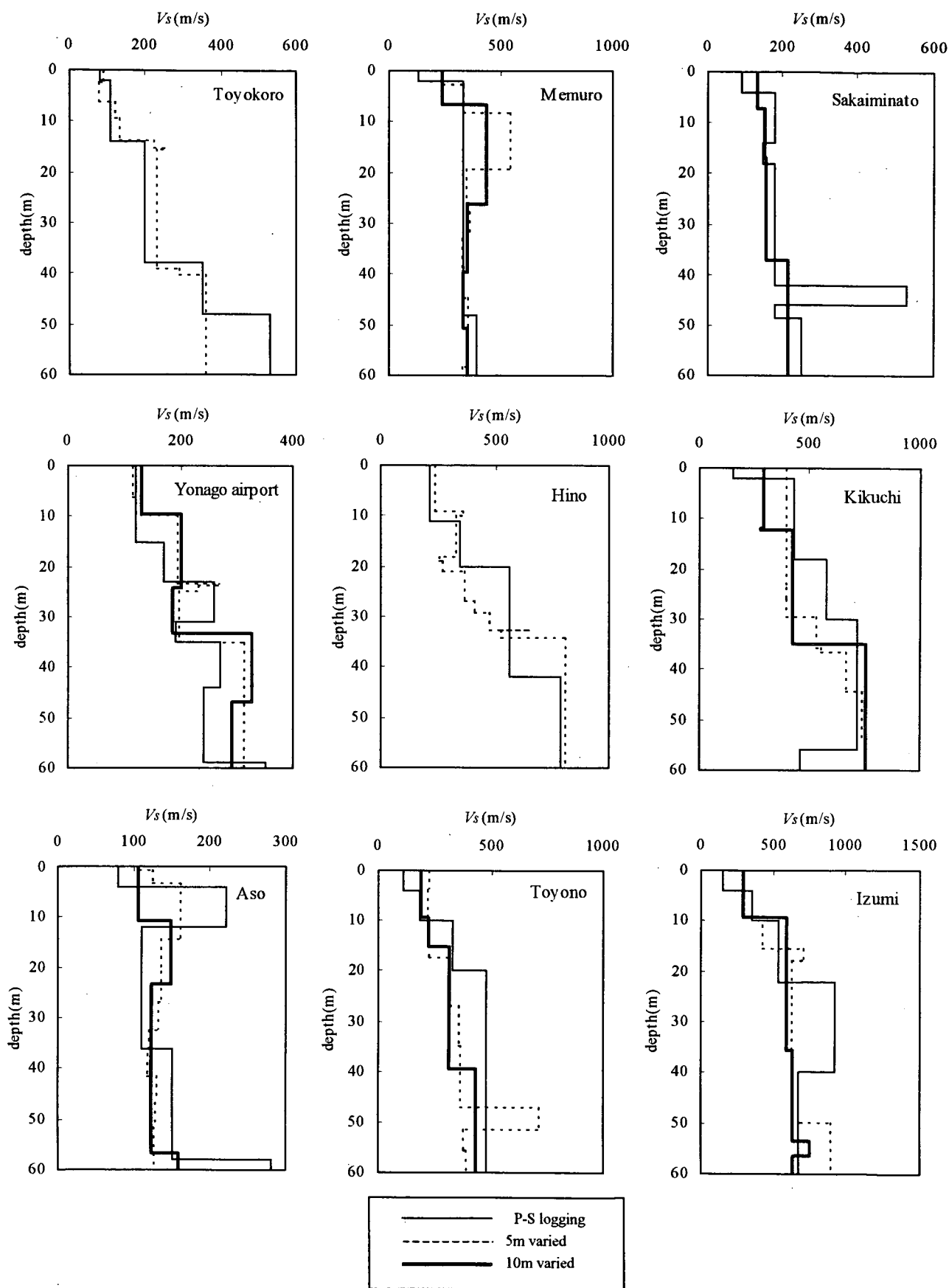


図-4(4) 逆解析結果 (地下構造, 層厚変化)

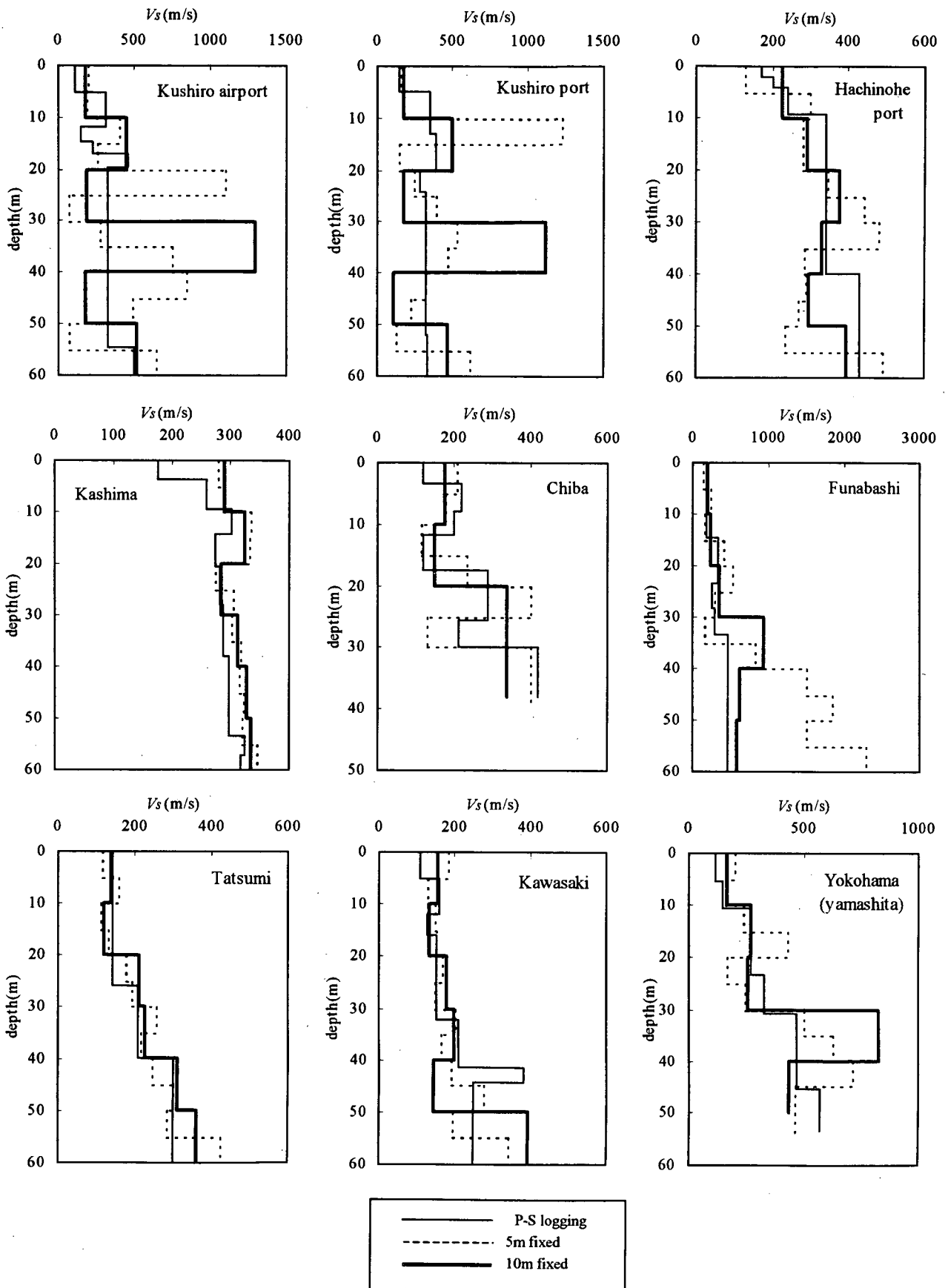


図-5(1) 逆解析結果 (地下構造, 層厚固定)

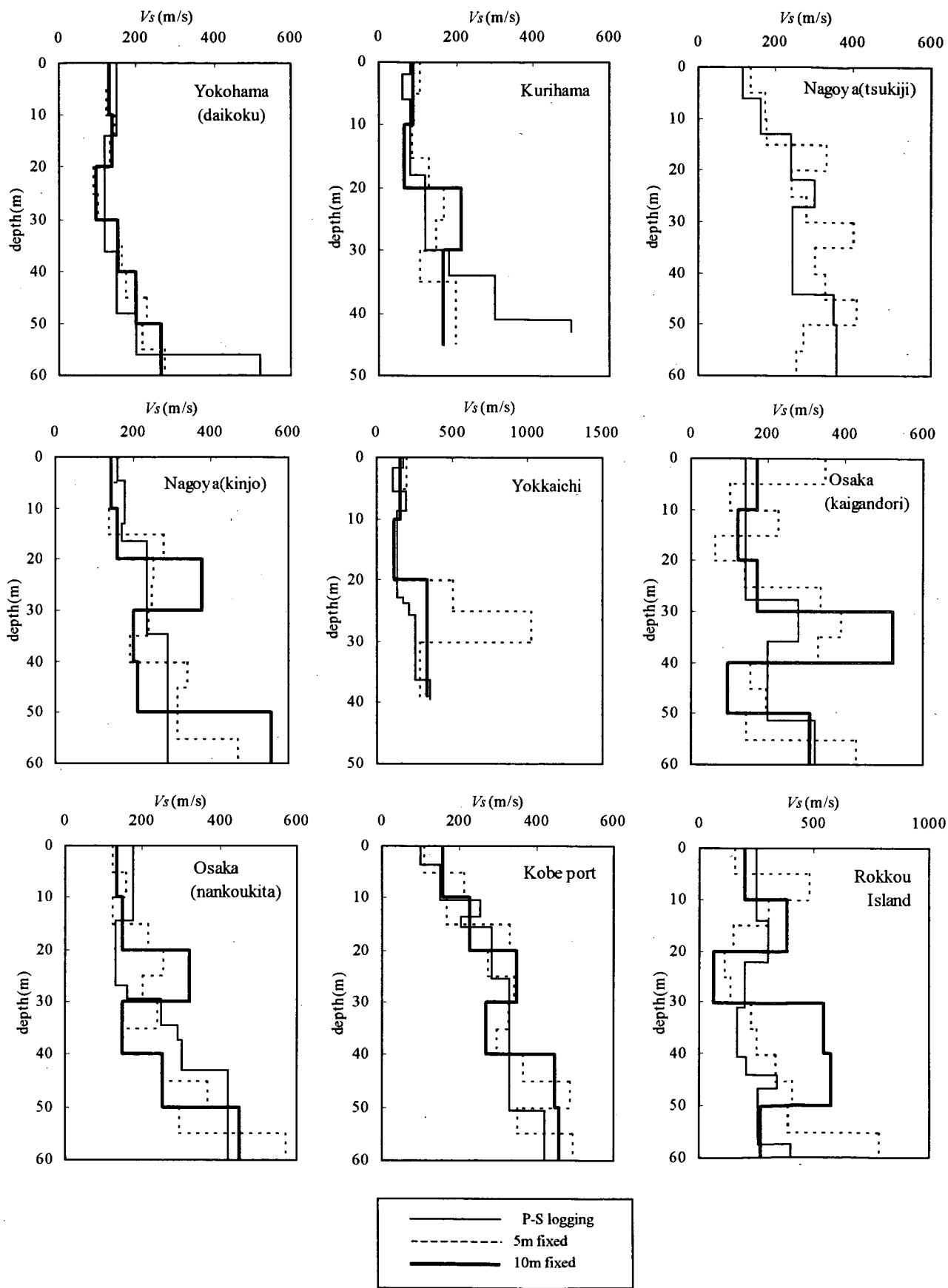


図-5(2) 逆解析結果 (地下構造, 層厚固定)

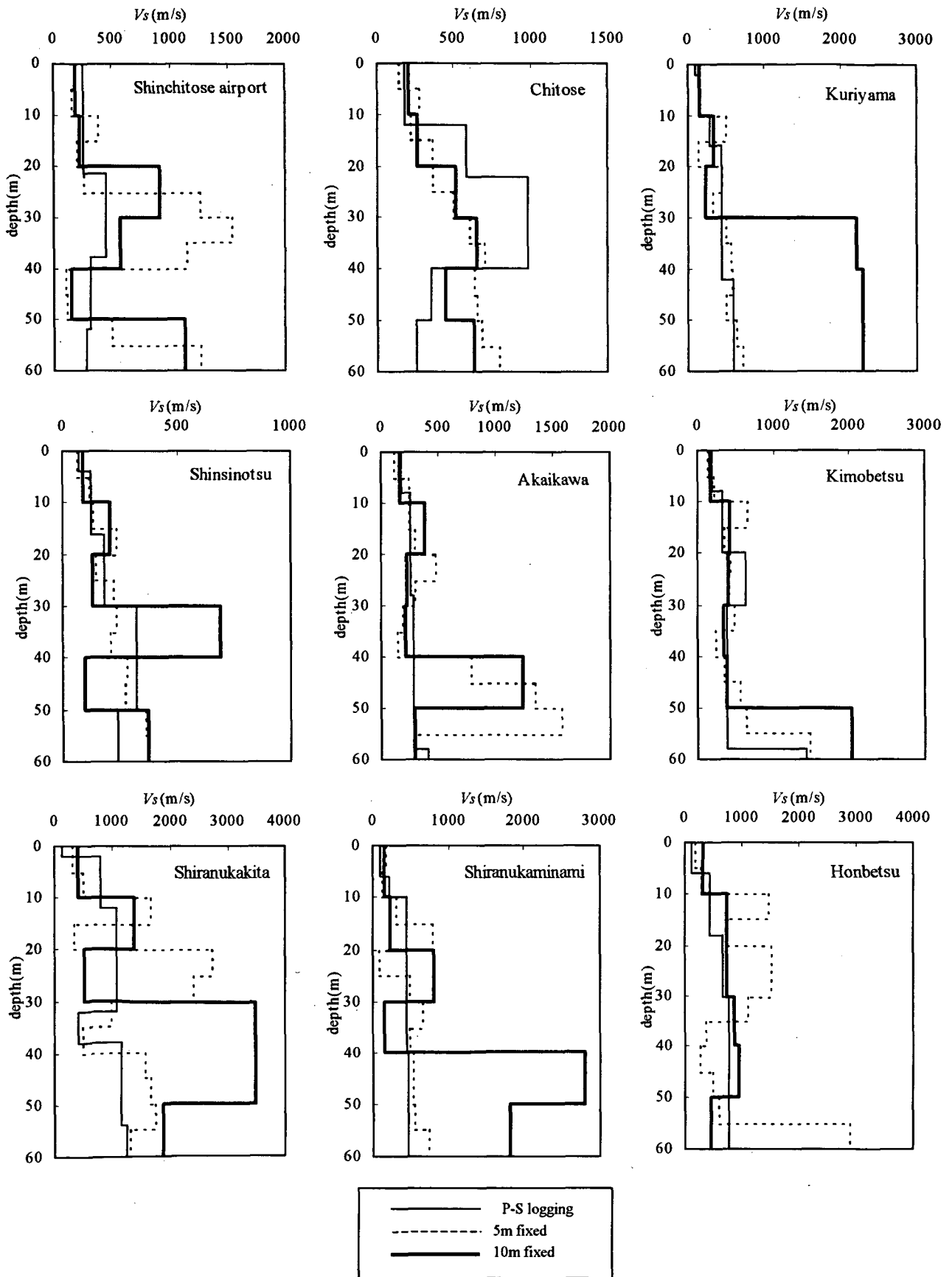


図-5(3) 逆解析結果 (地下構造, 層厚固定)

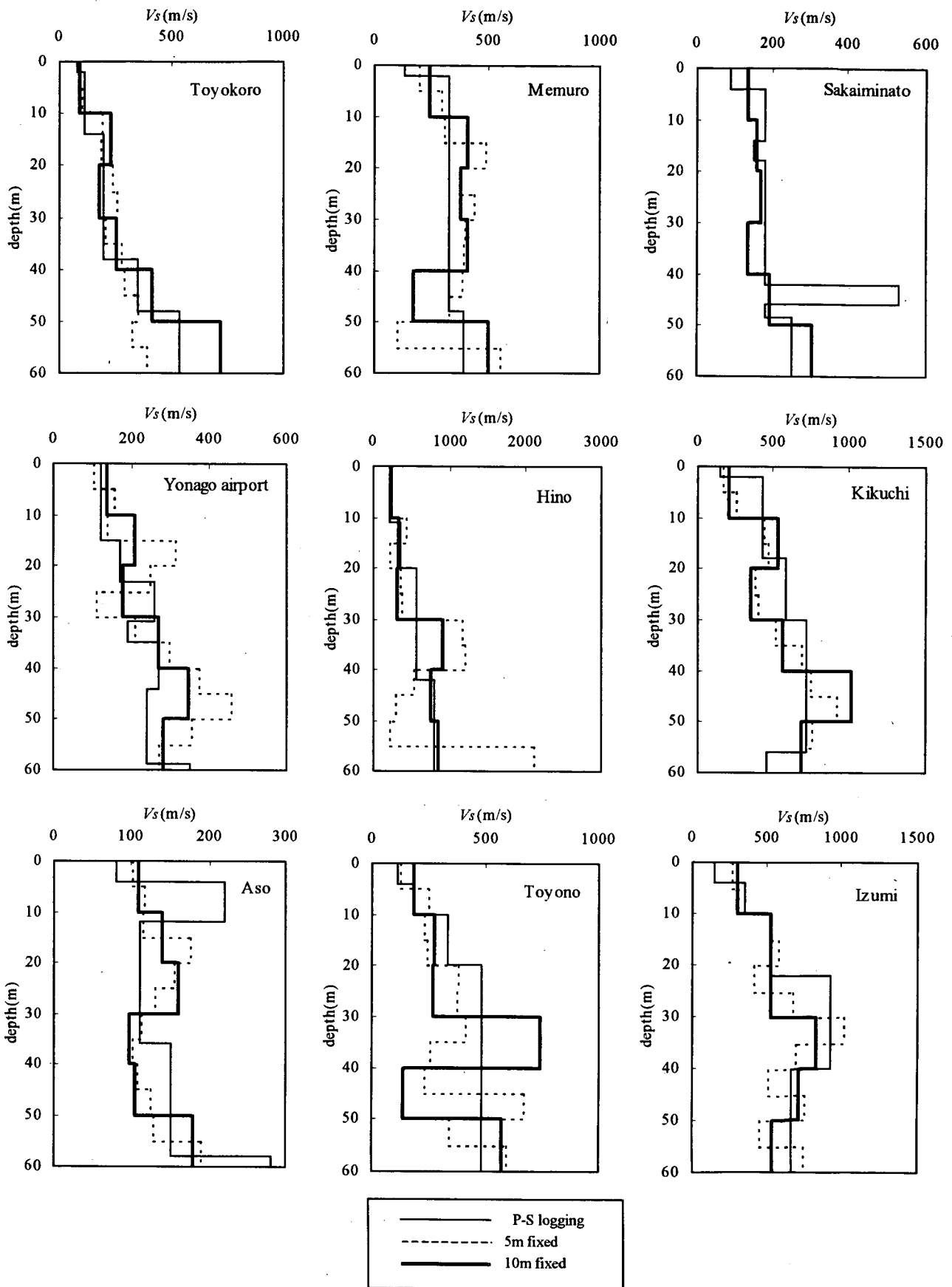


図-5(4) 逆解析結果 (地下構造, 層厚固定)

逆解析結果による表層60mの伝達関数をPS検層による伝達関数と比較した。図-6~図-7 および表-2~表-3に固有周期の比較を示す。なお、逆解析結果が60mまで存在しない地点については省いてある。

提案法による場合、固有周期の推定精度 R_T の平均値は1次固有周期及び2次固有周期について0.97~0.98、標準偏差は0.10~0.12であり、初期推定値によるよりもばらつきの少ない精度のよい結果となっている。Ballard法についても初期推定値よりも精度が向上しているが、1次固有周期に関する R_T の平均値は1.03~1.04、標準偏差は0.12~0.13となり、提案法よりも僅かながら精度が悪い結果となっている。

以上の結果により、提案法によるS波速度構造をもとにして逆解析を行うことにより、非線形性を考慮しない地震動の増幅特性の検討ならば十分精度よく推定することが可能であると考えられる。また、地盤種別分類を行う際に固有周期を分類指標とする場合にも適用性が高いといえる。さらに、Ballard法との比較の観点からは、提案法による結果はBallard法による結果と同程度以上の精度を有すると考えられる。なお、層厚の刻み幅については、5m刻みの方が10m刻みの場合よりも僅かながら精度が良い。しかしながら、図-4の豊野の逆解析結果のように、PS検層結果以上の極端な高速度層(または低速度層)を推定してしまう例があり、刻み幅として5mの方が有利であると断定することは出来ない。

なお、層厚を当初設定の5mおよび10mに固定した場合の1次固有周期の R_T の平均値は1.15程度、標準偏差は0.30程度となり、初期値によるよりもかえって伝達関数の精度が悪くなる結果となった。

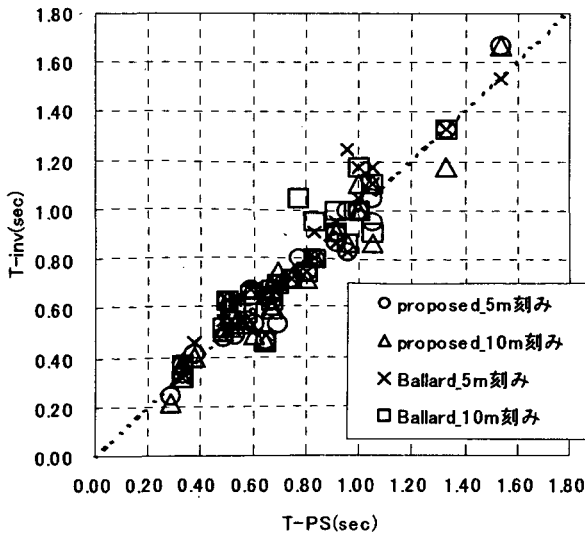


図-6 伝達関数による1次固有周期

表-2 R_T の分布(層厚変化)

(a)一次固有周期

R_T -proposed

	範囲	平均	標準偏差
5m 刻み	0.72~1.25	0.98	0.10
10m 刻み	0.70~1.25	0.97	0.12

R_T -Ballard

	範囲	平均	標準偏差
5m 刻み	0.76~1.31	1.04	0.12
10m 刻み	0.72~1.37	1.03	0.13

(b)二次固有周期

R_T -proposed

	範囲	平均	標準偏差
5m 刻み	0.80~1.22	0.98	0.10
10m 刻み	0.82~1.18	0.98	0.11

R_T -Ballard

	範囲	平均	標準偏差
5m 刻み	0.82~1.23	1.02	0.10
10m 刻み	0.82~1.16	1.00	0.10

表-3 R_T の分布(層厚固定)

(a)一次固有周期

R_T -proposed

	範囲	平均	標準偏差
5m 刻み	0.67~2.31	1.16	0.32
10m 刻み	0.72~1.90	1.13	0.27

(b)二次固有周期

R_T -proposed

	範囲	平均	標準偏差
5m 刻み	0.78~2.41	1.09	0.30
10m 刻み	0.82~1.41	1.02	0.13

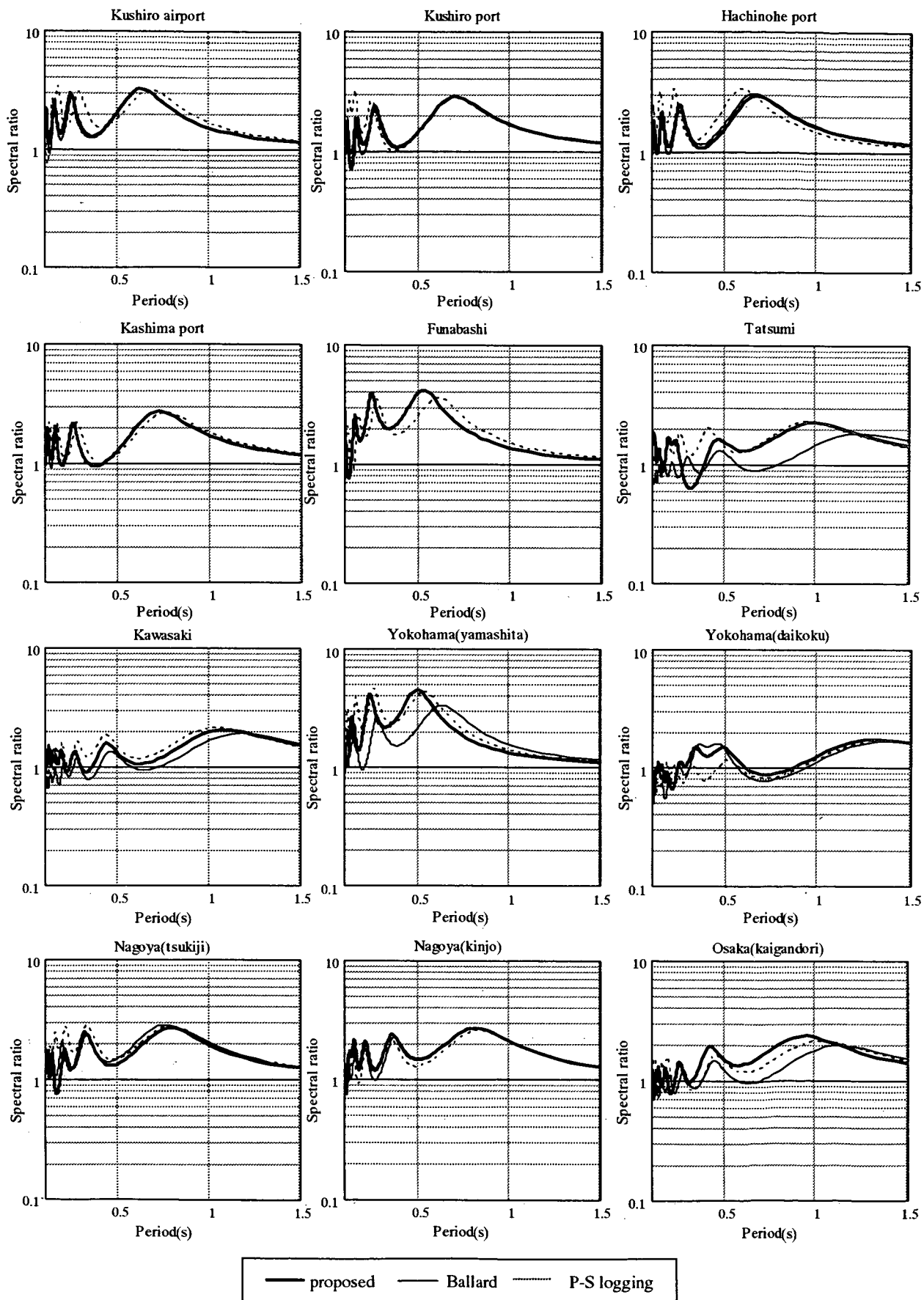


図-7(1) 伝達関数の比較 (5m 刻み)

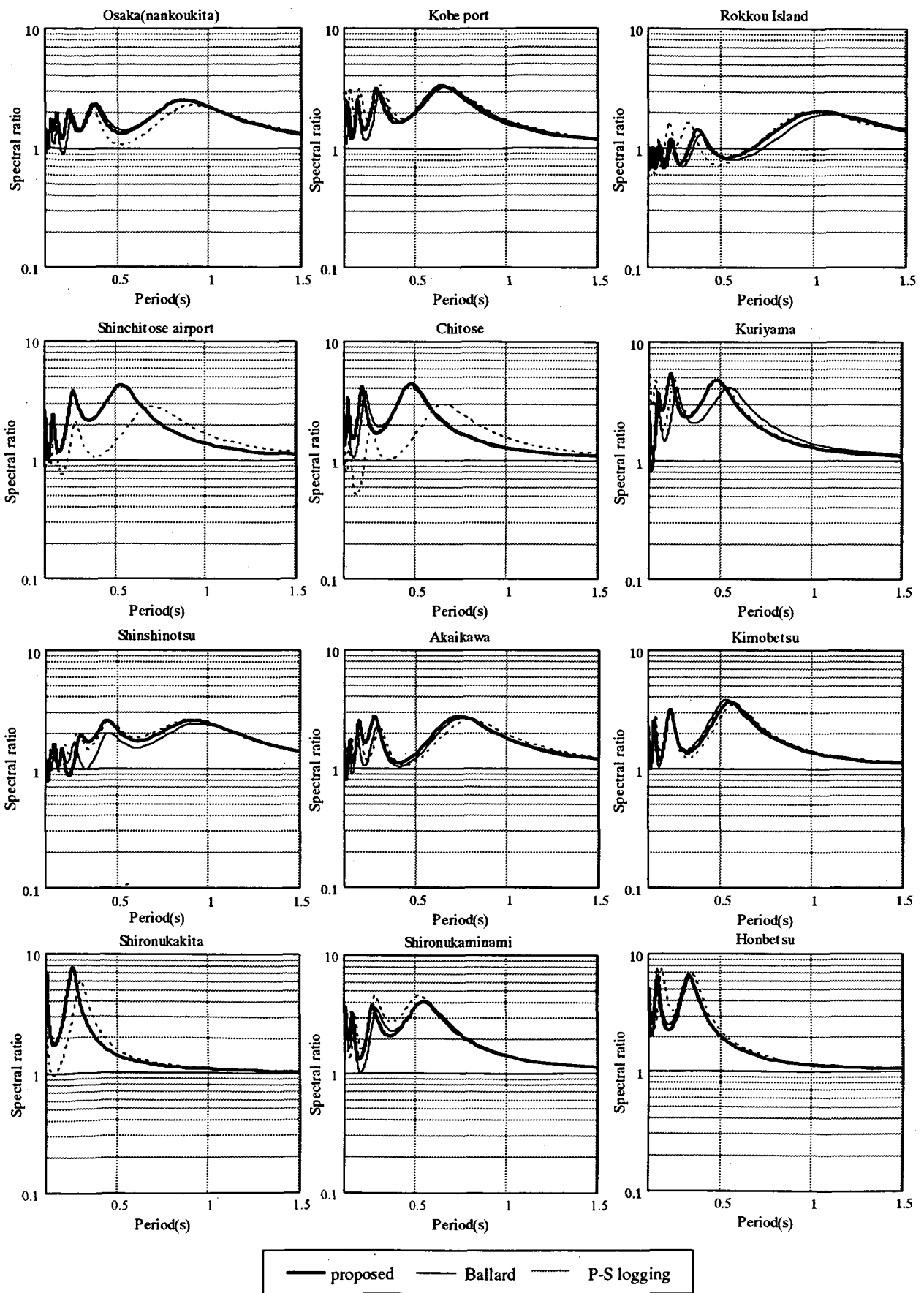


図-7(2) 伝達関数の比較 (5m 刻み)

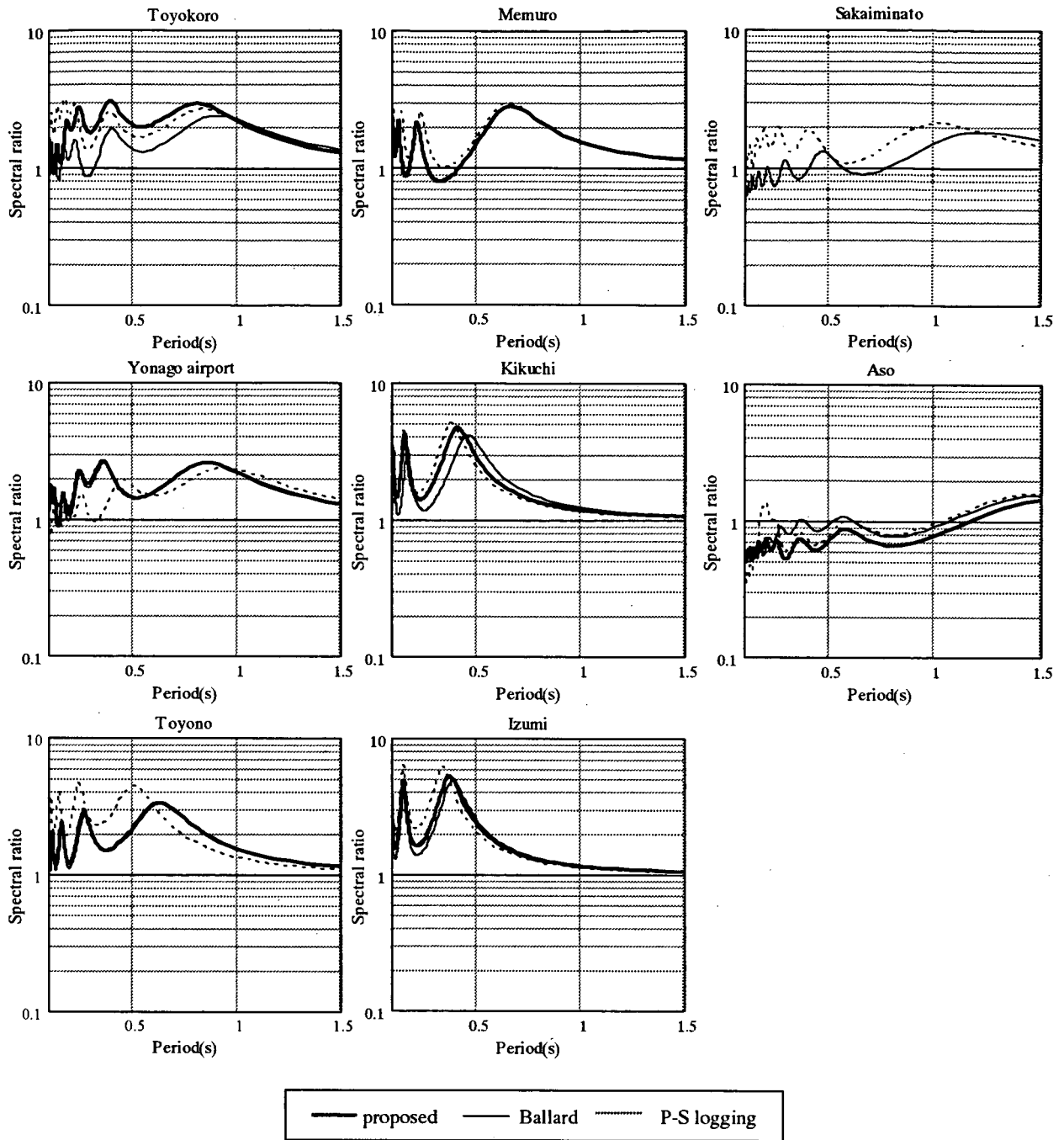


図-7(3) 伝達関数の比較 (5m 刻み)

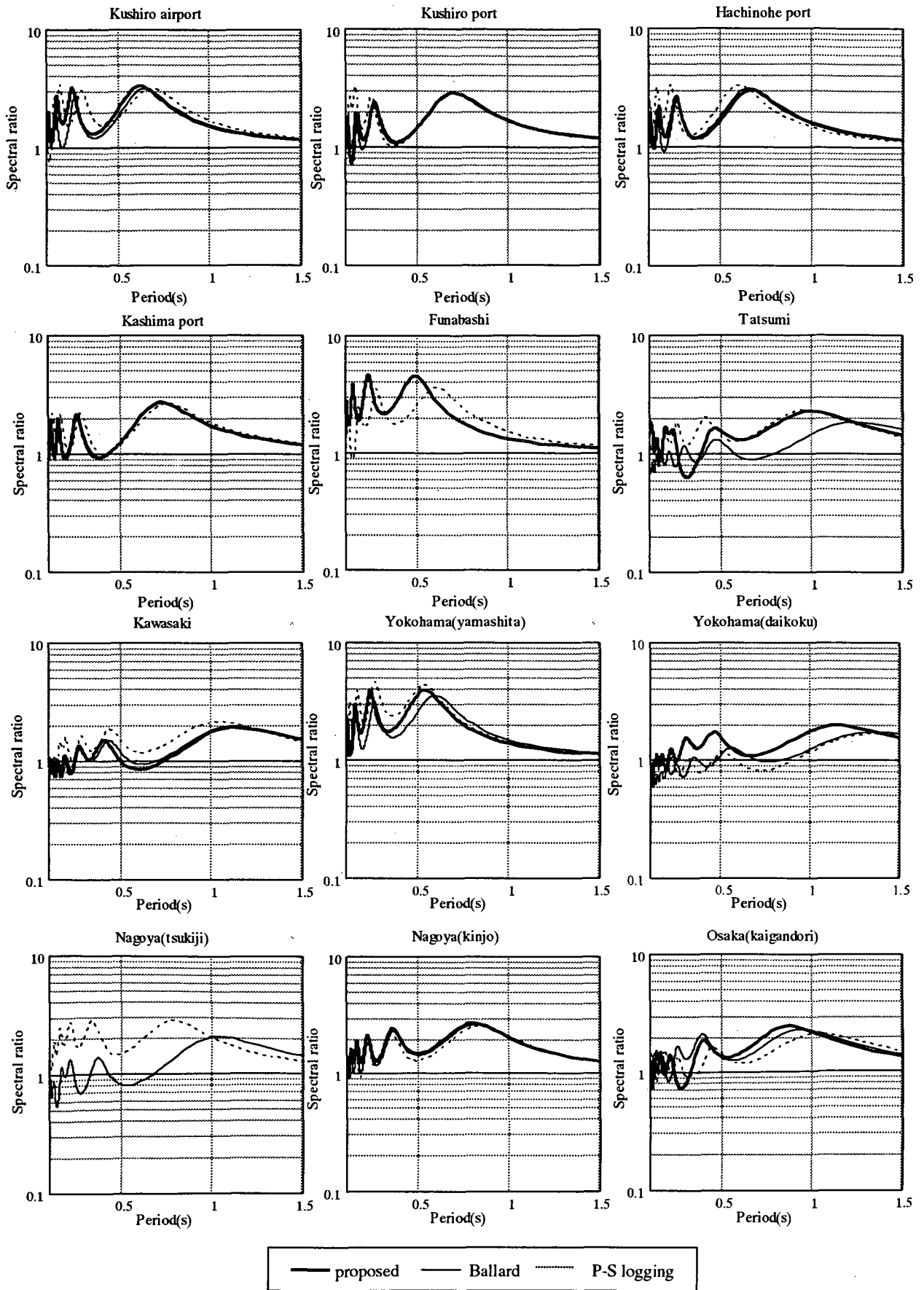


図-7(4) 伝達関数の比較 (10m 刻み)

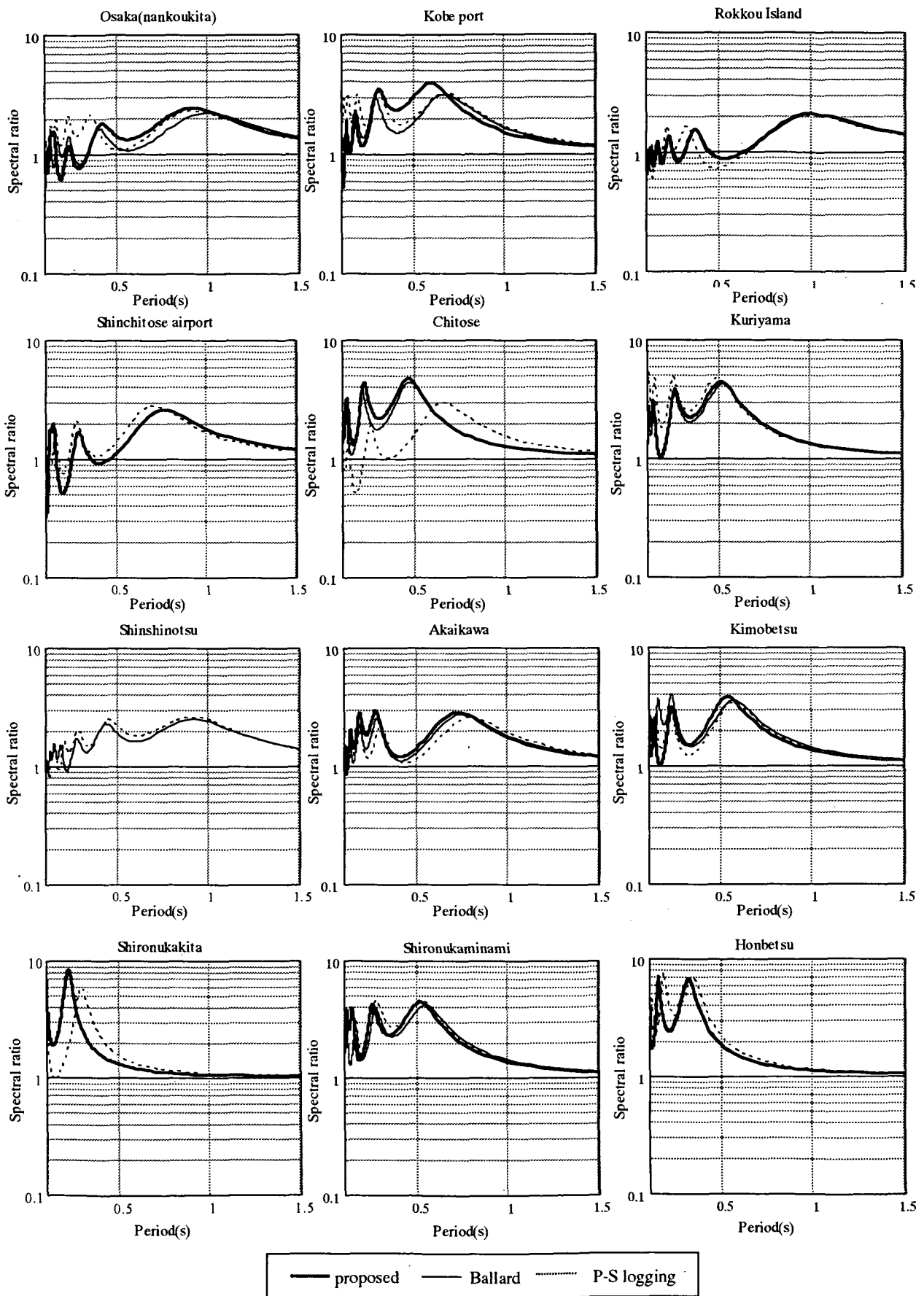


図-7(5) 伝達関数の比較 (10m 刻み)

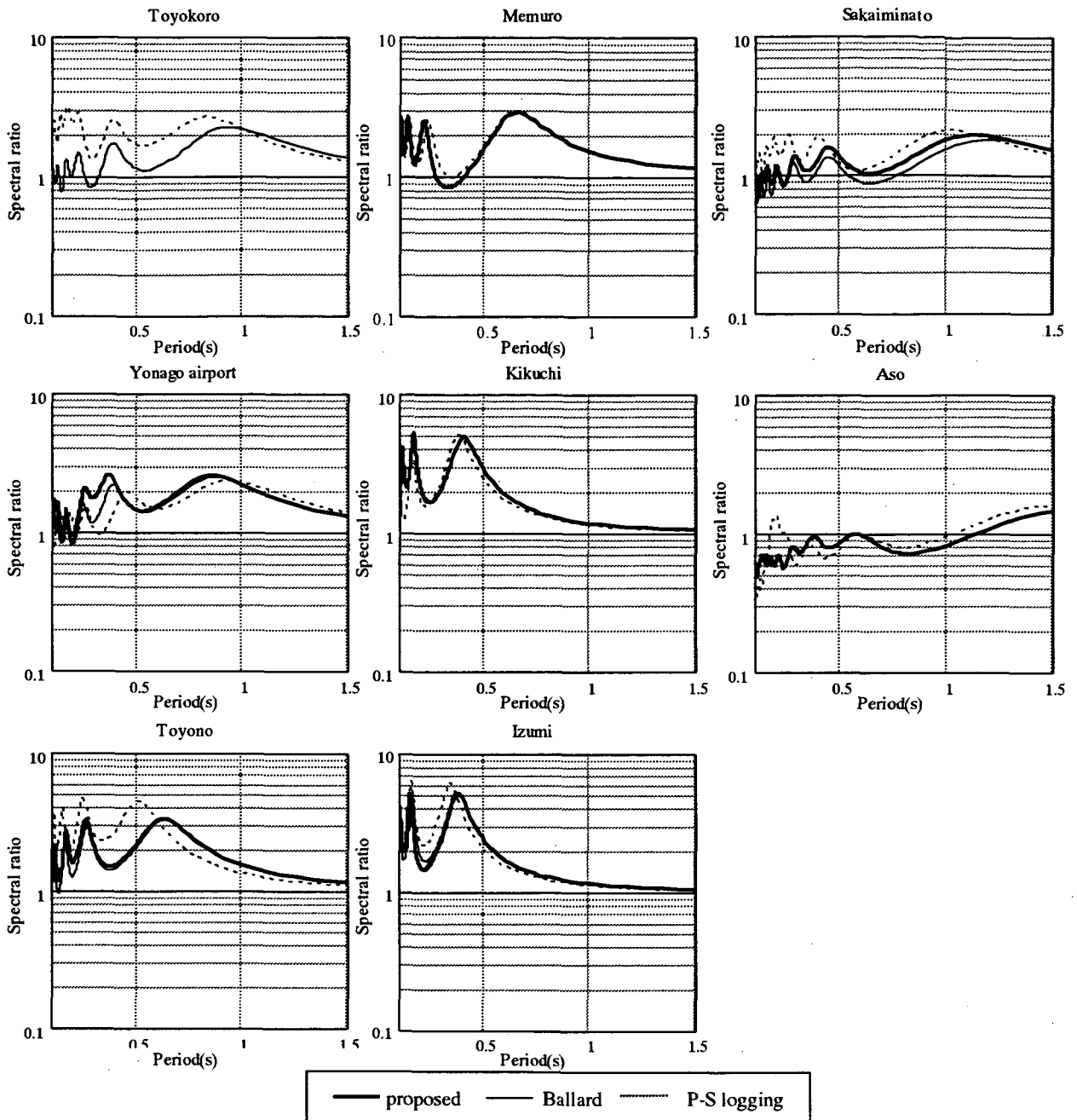


図-7(6) 伝達関数の比較 (10m 刻み)

3. 提案法の耐震設計への適用性

提案法に基づく S 波速度構造の耐震設計実務への適用性を検討するため、逆解析結果をもとにして 1 次元等価線形手法による地震応答解析を行い、PS 検層結果による地震応答結果との比較を行った。解析コードは Dyneq (吉田ほか,1996) を用い、入力地震波形は八戸波および神戸波とし、深さ 60m 地点を基盤として入力した。図-8 に用いた地震波形の加速度時刻歴及び地盤非線形特性を示す。最大加速度振幅は、レベル 1 地震動およびレベル 2 地震動のそれぞれに対する検討を行う観点から 200Gal および 400Gal を 2E として検討した。解析結果から、地表面最大加速度(PGA)、地表面最大速度(PGV)、スペクトル応答加速度(SA)、地表面 SMAC 最大加速度(SMAC)、震度 (k_h) および SI 値 (SI) について検討を行った。スペクトル応答加速度については、地表面の応答加速度をもとに、減衰定数を 5% とし、0.3 秒以上の応答値と 1.0 秒以上の応答値についてそれぞれ比較した。SI 値も減衰定数を 5% とした値である。

まず PGA の結果を図-9 に示す。水平軸は PS 検層による S 波速度構造に基づいた地震応答値 (以下、PGA-PS) であり、鉛直軸は常時微動逆解析結果の S 波速度構造に基づいた地震応答値 (以下、PGA-inv) である。全地点中、特徴的な地点については記号を別にして表示している。PGA-inv と PGA-PS の比の平均値は 0.98 であるが、標準偏差は 0.23 であり、ばらつきは大きい。

対象地点中で例えば千歳、釧路港、米子空港では、PGA-inv は PGA-PS よりも大きな値をとる。この理由として、まず千歳については、図-4 に示したように、低速度層を常時微動からは検出できなかったことがあげられる。前述のように、PS 検層による S 波速度構造は $V_s=980\text{m/s}$ の層の下部に $V_s=260\text{m/s}$ の低速度層が存在するため、重複反射により低速度層のせん断剛性が低下し、地表面の加速度応答値は小さな値となるが、常時微動逆解析による S 波速度は低速度層を含まないものであるため、そのような現象が生じず地表面の応答値は大きくなったと考えられる。

釧路港については、10m 刻みとした場合の八戸波の 400Gal の場合に逆解析結果の応答値が大きくなっている。逆解析結果のみの判断では 10m 刻みの方が 5m 刻みよりも PS 検層結果に近い S 波速度構造を与えていると考えられるが、S 波速度構造の僅かな差が地震波によっては大きな応答値の差となって現れる例といえる。なお神戸波の場合はその差は比較的少ない。

米子空港については 400Gal のケースの精度が悪いが、

微動による推定 S 波速度構造が PS 検層結果よりもインピーダンスコントラストが強いことが原因と考えられる。

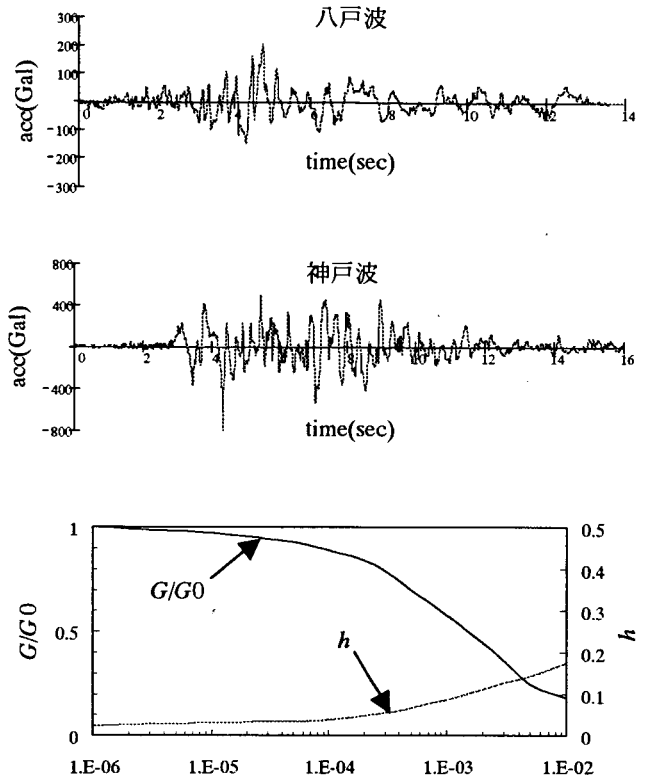


図-8 加速度時刻歴及び非線形特性

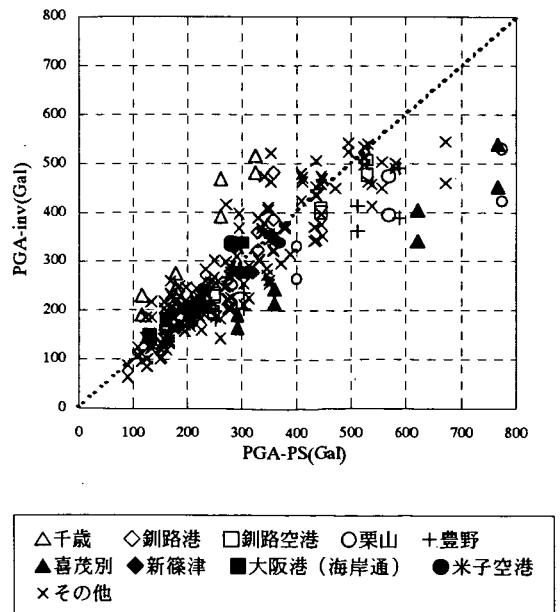


図-9 PGA の比較

次に、常時微動による応答値がPS検層による応答値よりも低いケース(栗山, 豊野, 喜茂別)について検討する。このうち、豊野及び喜茂別については、米子空港とは逆に、PS検層によるS波速度構造と比較して常時微動による推定構造がインピーダンスコントラストが強くないことがPGAの違いの理由と考えられる。その原因として、豊野については観測位相速度と理論位相速度の誤差による影響が考えられるが、喜茂別については観測誤差はわずかである。喜茂別については、深さ20-30mの630m/sという薄層の高速度層のS波速度が位相速度に与える影響が低いため、この層を常時微動から検出することができず、このため逆解析結果ではインピーダンスコントラストが弱いと考えられる。

図-10にはPGVに関する結果を示したが、PGVについてはPGAほどの差は認められない。PGV-invとPGV-PSの比の平均値は0.97、標準偏差は0.19である。食い違いの傾向としては、PGAにおけるものと同様であった。

スペクトル応答加速度(SA-PSなどと記述)の結果は図-11に示したが、PGAと同様、ややばらつきが大きい結果となった。ばらつきの傾向はPGA, PGVと同様である。

次にSMAC加速度(SAMC-PSなどと記述)の結果を図-12に示す。SMAC加速度はハイカットフィルター処理により得られるものであり、応答値がフィルター処理を行わない値(図-9)に比べて小さくなっている。SMAC-invとSMAC-PSの比の平均値は0.97、標準偏差は0.25である。ばらつきの傾向はPGAと同様で推定S波構造とPS検層結果のインピーダンスコントラストの違いなどが原因と考えられる。

次にSMAC加速度をもとに得られる震度について検討する。図-13に式(6)(港湾基準,1999)によって算定される震度(k_h -PSなどと記述)の結果を示す。

$$k_h = \alpha/g \quad (\alpha \leq 200Gal) \quad (6)$$

$$k_h = \frac{1}{3} \cdot (\alpha/g)^{1/3} \quad (\alpha > 200Gal)$$

ここに、

α ; 地表面におけるSMAC加速度最大値 (Gal)

g ; 重力加速度 (Gal)

k_h -invと k_h -PSの比の平均値は0.98、標準偏差は0.18である。現行基準では式(6)による算定は主にレベル2地震動に対する検討の際に行われ、その際の作用震度は0.2以上となることが多い。図-13より震度が小さい領域ではばらつきが大きい、 $k_h \geq 0.2$ の範囲では比の平均値は

0.99、標準偏差0.07となり精度の良い結果となっている。これは、震度算定式(6)より明らかなように、加速度が1/3乗となることでばらつきが軽減されるためであり、耐震設計実務への適用性は高いと考えられる。

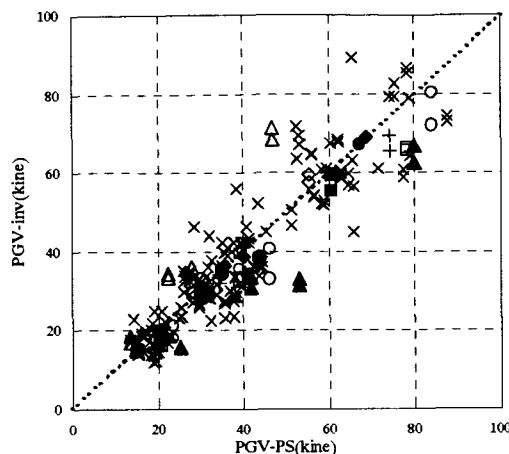


図-10 PGVの比較

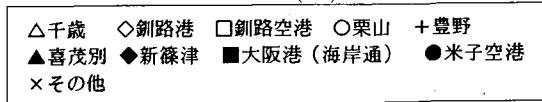
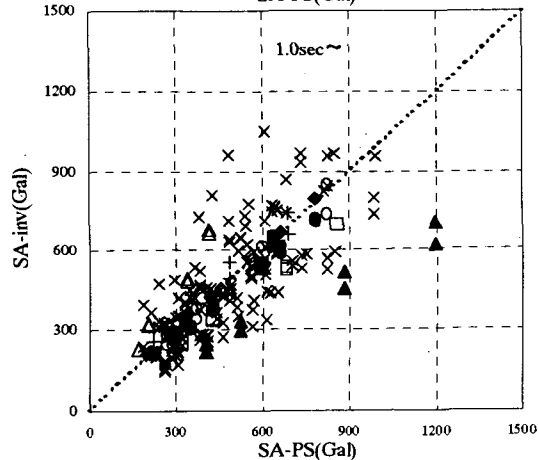
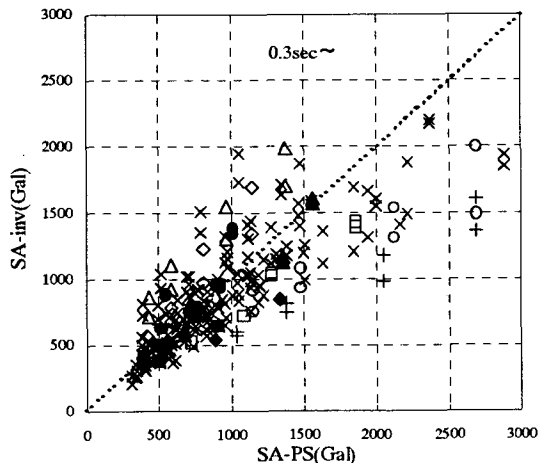


図-11 スペクトル応答加速度の比較

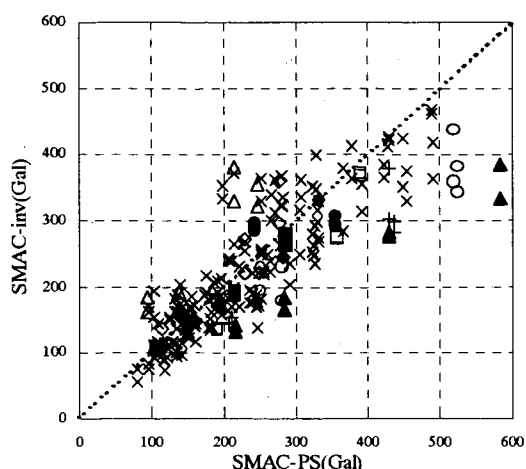


図-12 SMAC相当加速度的比較

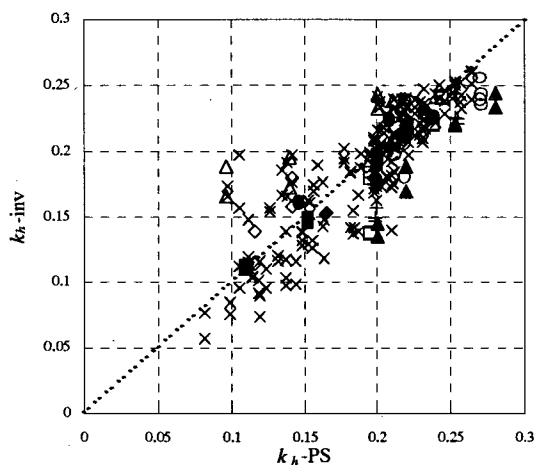


図-13 作用震度の比較

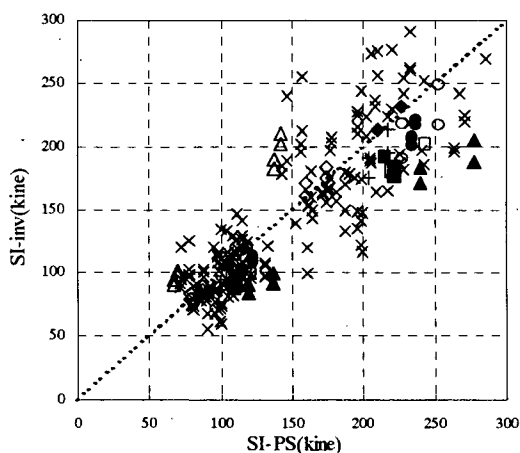


図-14 SI値の比較

△千歳 ◇釧路港 □釧路空港 ○栗山 +豊野
 ▲喜茂別 ◆新篠津 ■大阪港(海岸通) ●米子空港
 ×その他

SI 値 (SI-PS などと記述) の結果を図-14 に示す。SI 値は地震動による構造物の応答を表すものであり、地震危険度の一般的な指標として広く用いられている。SI-inv と SI-PS の比の平均値は 0.97, 標準偏差は 0.21 となりばらつきの傾向, 差は PGV とほぼ同様であった。以上の結果について, 常時微動逆解析結果による応答値と PS 検層結果による応答値の比を表-4 に示す。なお, 層厚の初期設定刻み幅に関する有意な優劣は認められなかった。

表-4 応答値の比の分布

(a) 加速度(PGA)

	範囲	平均	標準偏差
5m 刻み	0.55~1.65	0.98	0.21
10m 刻み	0.54~1.98	0.98	0.25

(b) 速度(PGV)

	範囲	平均	標準偏差
5m 刻み	0.62~1.48	0.98	0.18
10m 刻み	0.59~1.62	0.96	0.20

(c) スペクトル応答加速度(SA)

0.3s 以上

	範囲	平均	標準偏差
5m 刻み	0.48~1.84	0.98	0.28
10m 刻み	0.55~2.04	1.00	0.34

1.0s 以上

	範囲	平均	標準偏差
5m 刻み	0.54~1.90	1.01	0.26
10m 刻み	0.52~2.10	0.98	0.30

(d) SMAC 加速度(SMAC)

	範囲	平均	標準偏差
5m 刻み	0.56~1.86	0.97	0.24
10m 刻み	0.57~1.94	0.97	0.27

(e) 震度(k_a)

	範囲	平均	標準偏差
5m 刻み	0.62~1.86	0.98	0.18
10m 刻み	0.67~1.94	0.99	0.19

(f) SI 値(SI)

	範囲	平均	標準偏差
5m 刻み	0.58~1.42	0.98	0.19
10m 刻み	0.67~1.65	0.96	0.22

次に、 N 値データが存在する場合との比較を行った。検討対象とした 38 地点のうち、深さ 60m まで N 値のデータが存在した 5 地点について、Imai(1977)による関係式を用いて V_s に換算し、地震応答計算を行った。層区分については PS 検層による区分に揃えた。その他の検討条件はこれまでのものと同じである。 N 値による V_s の推定値を図-15 に示す。検討 5 地点における N 値からの換算による応答値及び常時微動逆解析結果による応答値と PS 検層による応答値の比を表-5 に示す。

地震応答解析結果のうち、PGA に関する結果を図-16 に、同一地点の常時微動逆解析結果による応答値とともに示す。 N 値からの換算による応答値 (PGA- N 値) についても常時微動逆解析をもとにした推定結果と同様なばらつきがあることが分かる。PGA- N 値と PGA-PS の比の平均値は 1.01、標準偏差は 0.18 であった。

同様に PGV、スペクトル応答加速度、SMAC 加速度、震度、SI 値に関する結果をそれぞれ図-17, 18, 19, 20, 21 に示す。これら指標については、0.3 秒以上のスペクトル応答加速度を除いては、常時微動逆解析をもとにした推定結果よりも N 値をもとにした応答値のほうが精度がよい結果となった。

今回の結果より、 N 値からの換算により地震応答計算を行った場合、PS 検層結果を用いた応答値と比較して結果に誤差が含まれることが明らかとなった。このような事例があることは例えば遠藤ら(2002)によっても報告されている。しかしながら、一般的には地震応答計算を N 値からの換算によって行う機会が非常に多いことを考慮すると、今回の限られた検討範囲からは、常時微動結果を耐震設計実務にまで適用する可能性が示唆される。ただし、実際の適用にあたっては、最表層の S 波速度の推定精度の向上など、いくつかの課題が残されているといえる。

表-5 応答値の比の分布

(a) 加速度(PGA)

	範囲	平均	標準偏差
N 値	0.71~1.32	1.01	0.18
微動	0.73~1.48	1.02	0.18

(b) 速度(PGV)

	範囲	平均	標準偏差
N 値	0.77~1.14	0.98	0.10
微動	0.62~1.27	0.98	0.17

(c) スペクトル応答加速度(SA)

0.3s 以上

	範囲	平均	標準偏差
N 値	0.66~1.29	0.99	0.19
微動	0.65~1.48	0.96	0.20

1.0s 以上

	範囲	平均	標準偏差
N 値	0.83~1.12	0.98	0.10
微動	0.56~1.46	1.00	0.24

(d) SMAC 加速度(SMAC)

	範囲	平均	標準偏差
N 値	0.82~1.18	1.02	0.11
微動	0.74~1.38	1.00	0.17

(e) 震度(k_h)

	範囲	平均	標準偏差
N 値	0.85~1.18	1.02	0.07
微動	0.74~1.38	1.00	0.14

(f) SI 値(SI)

	範囲	平均	標準偏差
N 値	0.76~1.06	0.96	0.10
微動	0.61~1.32	0.95	0.20

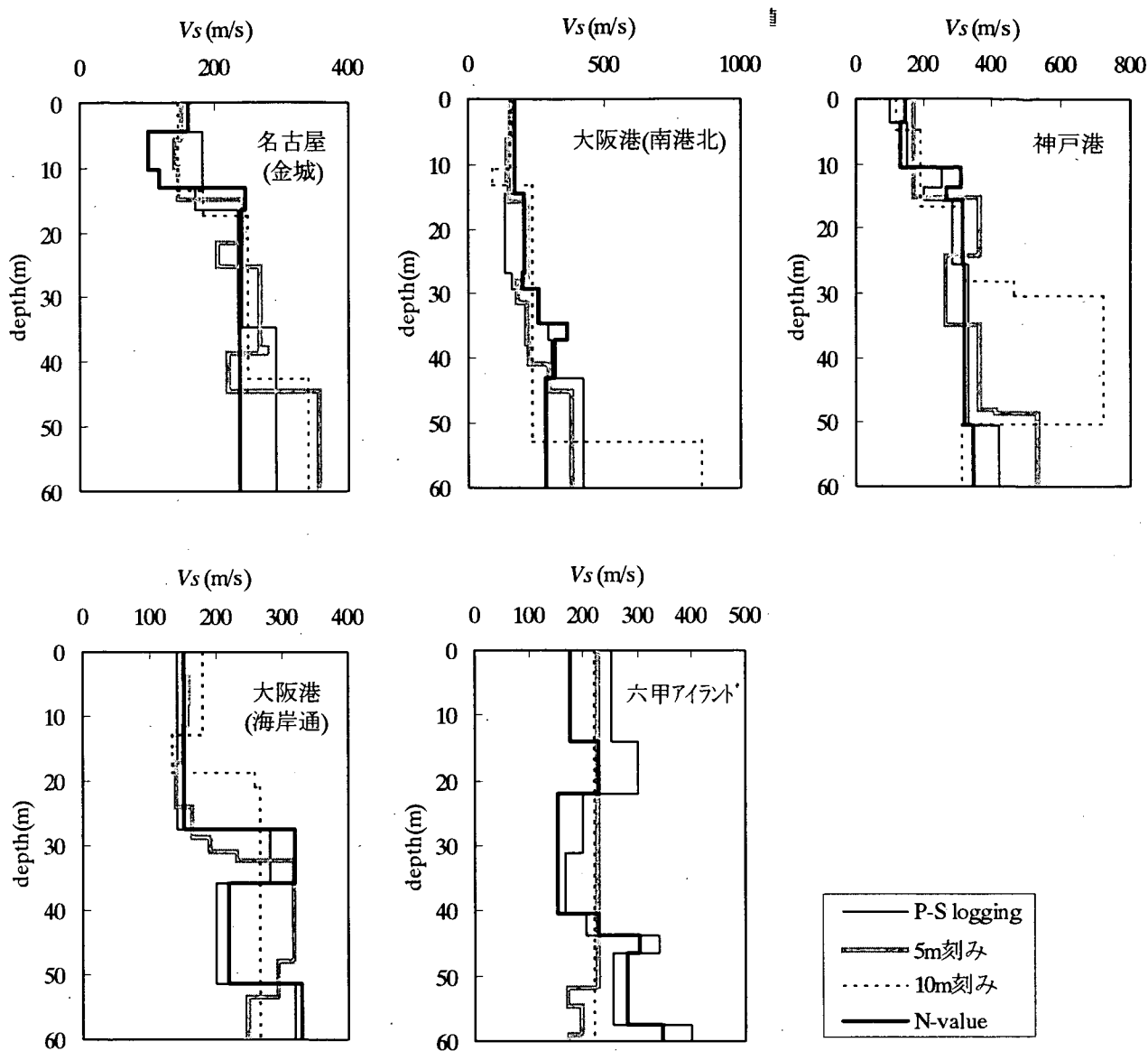


図-15 N値をもとにしたS波速度構造

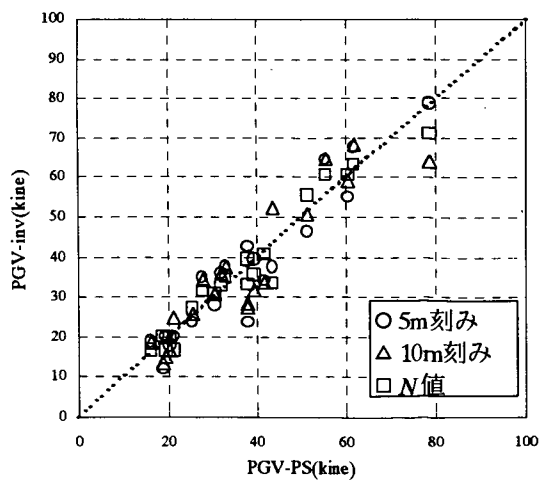
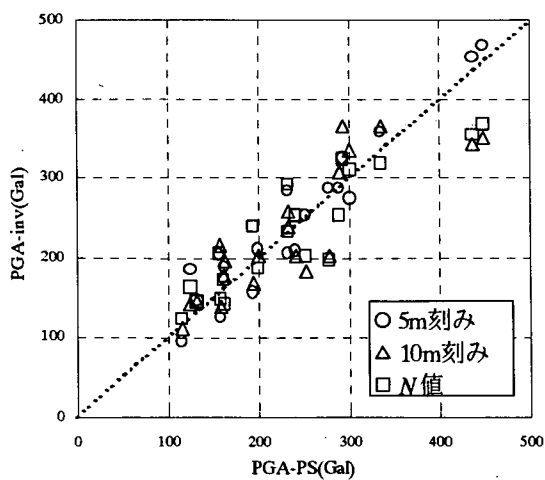


図-17 N値をもとにした応答値との比較(PGV)

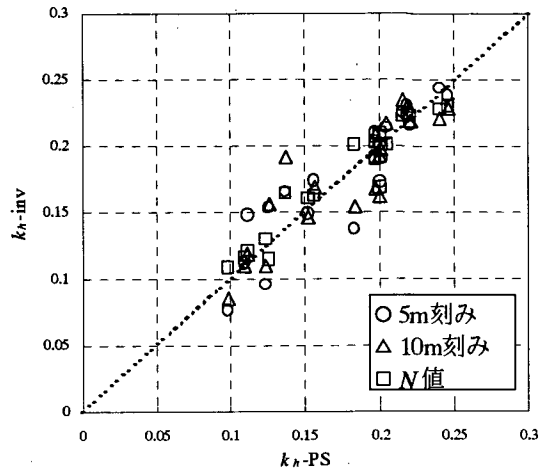
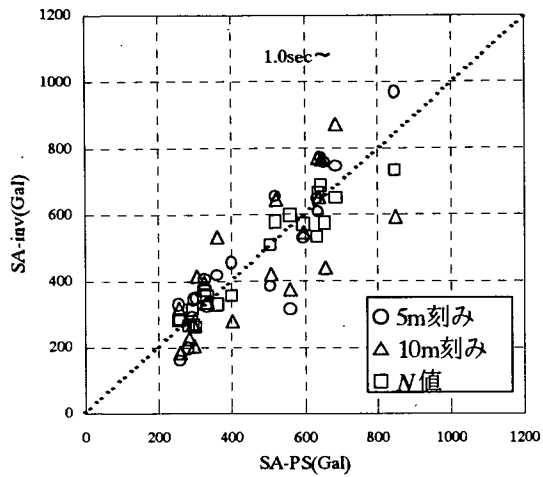


図-20 N値をもとにした応答値との比較(震度)

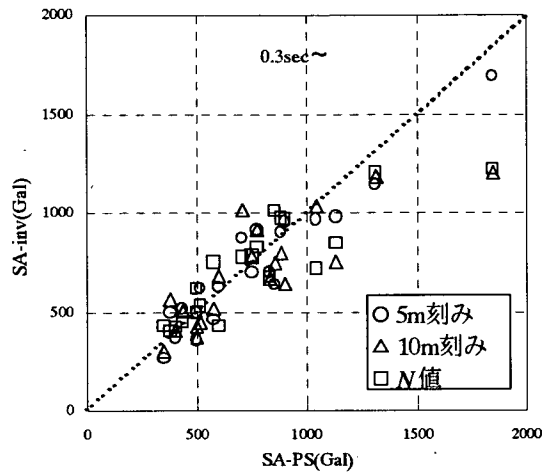


図-18 N値をもとにした応答値との比較(SA)

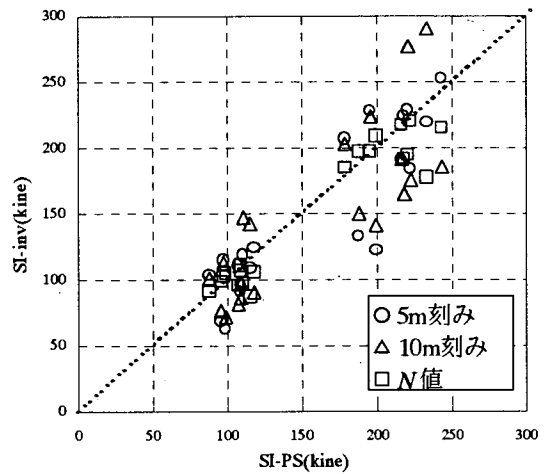


図-21 N値をもとにした応答値との比較(SI値)

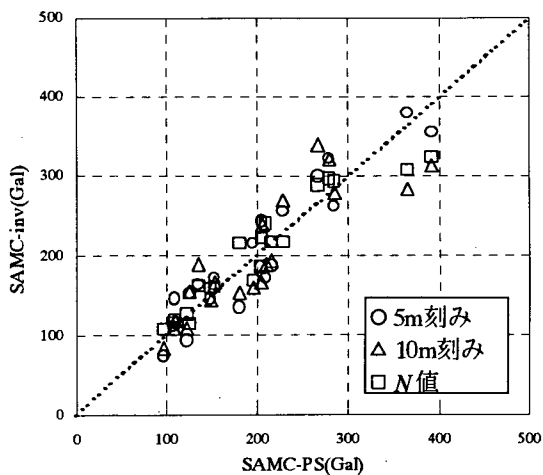


図-19 N値をもとにした応答値との比較(SMAC加速度)

4. 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提案法による S 波速度構造推定値に基づいて準ニュートン法による逆解析を実施することにより、伝達関数の固有周期の推定精度をさらに向上させることが出来る。提案法に基づく固有周期の推定精度 R_T の平均値は 1 次固有周期及び 2 次固有周期について 0.97~0.98 であり、標準偏差は 0.10~0.12 であった。提案法による結果は、Ballard 法による結果と同程度以上の精度を有すると考えられ、非線形性を考慮しない地震動の増幅特性の検討ならば提案法を用いて十分精度よく実施することが可能であると考えられる。

②逆解析により得られた S 波速度構造をもとに地震応答解析を実施した結果、PGA については PS 検層に基づく地震応答値と比較するとややばらつきが大きい結果となった。精度の悪い地点の誤差の理由としては、最表層の S 波速度の推定精度の問題や、薄層の高速度層または低速度層を常時微動からは検知できなかったことなどが考えられる。後者に関しては位相速度を用いる限り精度向上には困難を伴うと考えられるものの、前者については今後短周期側の位相速度の精度向上を図ることにより解決できる可能性がある。

③N 値からの換算による S 波速度を用いた地震応答解析を行った結果、検討対象範囲においては常時微動による推定結果と同様なばらつきがあることが分かった。地震応答計算を N 値からの換算によって行う機会が非常に多いことを考慮すると、今回の限られた検討範囲からは、常時微動結果を耐震設計実務にまで適用する可能性が示唆される。

本研究により、表層地盤の S 波速度構造推定への常時微動アレー観測の適用性は評価できたと考えられる。今後は、最表層の S 波速度推定精度の向上方法について検討を行う必要がある。また、S 波速度の最適化手法について、他の手法の適用を試みるほか、60m 以深の S 波速度構造の推定手法についても検討を進めたい。

本研究で用いた 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。また、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。

(平成 14 年 11 月 15 日)

参考文献

- 茨木俊秀, 福島雅夫(1991): FORTRAN77 最適化アルゴリズム, 岩波書店
- 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.
- 遠藤大輔, 上田 稔, 今枝靖博, 葛巻亜弥子(2002): N 値から推定された S 波速度を地盤の初期の速度構造とした場合の地震応答解析精度, 土木学会第 57 回年次学術講演会, pp.1125-1126.
- 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.
- 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・荒田昌深(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・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.
- 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.
- 西守男雄・長尾 毅・紺野克昭・規矩大義・宮田正史(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, 国土技術政策総合研究所資料

No.34.

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.

吉田 望，末富岩雄(1996)：DYNEQ：等価線形法に基づく水平成層地盤の地震応答解析プログラム，佐藤工業（株）技術研究所報，pp.61-70.

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

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

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

Nagao, T., Iwata, N., Ishida, M., Konno, K.(2003)：Evaluation of probabilistic seismic motion amplification with mean S-wave velocities, Proc. of ICASP2003, submitted to publish.

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.