

表層地盤の速度構造のモデル化による地震動伝播特性への影響

Influence of wave velocity structure modeling on characteristic of seismic wave propagation in surface layers

2. 構造-2. 振動

速度構造	分散曲線	伝達関数
固有周期	レイリー波	ラブ波

1. 背景と目的

地盤震動の解析では、地盤資料に基づいて地盤構造をモデル化し、それを用いて地震観測記録の分析や強震動予測などを行っている。しかし、速度構造のモデル化の違いが地盤震動特性や地震動伝播特性にどの程度の影響を及ぼすのかについて基礎的な検討は少ないのが現状である。本論では、地震基盤以浅の層厚 1000m の表層について、深部地盤構造調査に基づいて模式的なモデルを複数設定し、その波動伝播特性や地盤增幅特性を比較することにより、地盤の速度構造のモデル化が地盤震動特性に与える影響を考察する。

2. 堆積層の速度構造と地震動伝播特性

地震基盤以浅の堆積層の速度構造の違いが表面波や実体波の特性にどのような影響を与えるかを検討する。

2.1 表層地盤モデルの設定

図 1~3 に検討に用いる地盤モデルを示す。図 1 は堆積層の平均 S 波速度構造が 1000m/s となるように堆積層を 16 分割し、各層の S 波速度の深度方向への増加量を変化させたモデルである。モデル 1 から 6 になるに従って速度変化が小さくなるモデルになっている。図 2 はモデル 4 の平均 S 波速度に一定値を加算したモデルである。また、モデル 4 の 3,4 層目の Vs を 1500m/s とした、逆転層を有するモデル（図 3）に関する検討した。

2.2 レイリー波・ラブ波分散曲線

図 4~5 にモデル 1~3~6、図 6~7 にモデル 4~1~4~4~4 (逆転層) のレイリー波・ラブ波分散曲線を示す¹⁾。図 4~5 より速度傾斜が小さくなるにつれてエアリー相が顕著に現れている。また、そのエアリー相は低振動数側に移動している。モデル 4~4~4 では平均 S 波速度が小さいほどエアリー相が明瞭に現れている。エアリー相はインピーダンス比の大きい層境界があると顕著に現れる傾向がある。すなわち、インピーダンス比の大きい層境界のないモデルの場合、表面波が卓越しない地震波となると考えられる。また、両モデルとも最表層の Vs が小さいほど、より高次のモードが低振動数から存在していることが確認できる。

正会員 ○岩田朋大 *

IWATA Tomohiro

正会員 福和伸夫 **

FUKUWA Nobuo

正会員 飛田潤 ***

TOBITA Jun

正会員 高橋広人 ****

TAKAHASHI Hirohito

2.3 レイリー波・ラブ波モード形

図 8 にモデル 1~3~6、図 9 にモデル 4~1~4~4~4 (逆転層) の伝達関数のピークにおけるレイリー波・ラブ波モード形を示す。なお、本検討では、図の振幅は各モード・各振動数における最大振幅となる値を基準とした振幅比で表している。図 8 より、速度変化が大きいほど、振幅は浅部に集中していることが分かる。また図 9 のモデル 4~1~4~4 においても、低速度な層に振幅が集中している。浅部に速度が小さい層がある場合には、相対的に浅部の変位が大きくなるために、表面波速度も浅部の速度の影響が顕著となっている。逆転層を有するモデルでは、その層で振幅が変化していることが分かる。

2.4 伝達関数

図 10 にモデル 1~3~6、図 11 にモデル 4~1~4~4~4 (逆転層) の基盤と地表との伝達関数を示す。モデル 1~5 では急傾斜であるほど 1 次ピーク振動数は低振動数側にずれ、増幅度は大きくなっている。モデル 6 では、増幅度がスペクトルの谷部分において 1 以下となっており、層全体で逆増幅となっている。モデル 4~4~4 では、平均 S 波速度が大きいほど 1 次ピークは高振動数側となり、増幅度は小さくなる。インピーダンス比が増幅度によく影響を与えていることが分かる。図 11 の逆転層を有するモデルでは、1~2 層での 4 分の 1 波長則から求められる 1.8Hz 付近のピークが特に卓越しており、逆転層の影響が良く出ている。

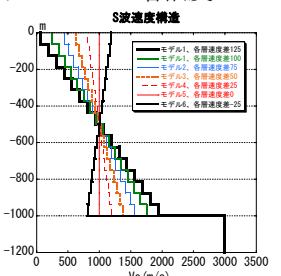


図 1 平均 Vs 一定モデル

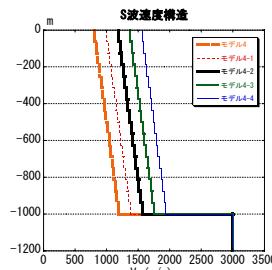


図 2 Vs 增加一定モデル

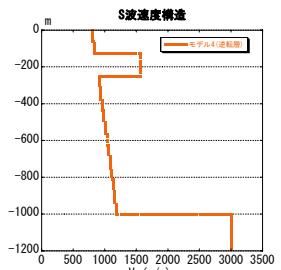


図 3 逆転層を有するモデル

* 名古屋大学大学院環境学研究科・大学院生

Graduate Student, Grad. School of Environmental Studies, Nagoya Univ.

** 名古屋大学大学院環境学研究科・教授・工博

Prof., Graduate, School of Environmental Studies, Nagoya Univ., Dr. Eng.

*** 名古屋大学大学院環境学研究科・助教授・工博

Assoc. Prof., Graduate, School of Environmental Studies, Nagoya Univ., Dr. Eng.

**** 名古屋大学大学院環境学研究科・大学院生・修士(工学)

Graduate Student, Grad. School of Environmental Studies, Nagoya Univ., M. Eng.

2.5 伝達関数モード形

図 12 にモデル 1・3～6、図 13 にモデル 4-1～4-4・4（逆転層）の伝達関数(2E/2E)の 1 次～3 次卓越振動数における深さ方向の振幅分布を示す。図 8 と図 12 の対応するモード形を比較すると、ラブ波のモード形との対応が良いことが分かる。図 12 のモデル 6 では、表層よりも振幅の大きい層が下層に見られる。モデル 4-1～4-4 に関しては、層間のインピーダンス比が等しいため、モード形は各モデルで同じになる。

2.6 H/V スペクトル

図 14 にモデル 1・3～6、図 15 にモデル 4-1～4-4・4（逆転層）のレイリー波 H/V スペクトルと、高次モードまで考慮した理論 H/V スペクトルを示す。また、図 16 にモデル 1・3～6、図 17 にモデル 4-1～4-4・4（逆転層）におけるレイリー波の振幅関数を示す。高次モードの重ね合わせにおいて、レイリー波とラブ波の振幅比は全周波数において 0.7 とした²⁾。図 14 を見ると、モデル 1～6 では急傾斜であるほど、2 つのスペクトルのピークの差違が顕著になる。これは高次モードの振幅の割合が増すためである（図 16）。また、モデル 6 では 1.8Hz 以降にも高次モードの振幅割合の増加が見られる。図 15 のモデル 4-1～4-4 では、基盤とのインピーダンス比が小さいモデルではピークが明瞭に現れていない。図 15 のモデル 4（逆転層）では、理論 H/V スペクトルにおいて、モデル 4 では見られない、2Hz 付近での卓越が見られた。これは逆転層の影響で高次モードが励起されたためと考えられる。

3. 地盤の固有周期の評価法

各モデルの固有周期を異なる計算手法で求め、S 波重複反射理論より求めた固有周期との比較検討を行った。図 18 に、モデル 1～5 及びモデル 4～4-4 に関して示した。グラフでは、各手法で算出した固有周期を、2E/2E で求めた 1 次ピーク卓越周期で割った値をプロットした。用いた手法は以下の 5 つである。

(1) 層厚の重み付けによる平均 S 波速度

層厚で重み付けした平均 S 波速度から 4 分の 1 波長則により周期を求めた。モデル 1～5 では速度構造が急傾斜であるほど 2E/2E に接近し、モデル 4～4-4 ではほぼ一定の差がある。

(2) 伝播時間による平均 S 波速度

波動伝播時間が等価となる S 波速度を求め、4 分の 1 波長則により周期を求めた³⁾。モデル 1～5 においては、速度変化が小さいほど 2E/2E の周期に近づく。しかし、逆に速度変化が大きいと、低速度層の影響で固有周期が長くなり正しく評価できなくなる。モデル 4～4-4 では低速度層がないため 2E/2E の周期との比が一定であり、安

定して求められている。伝播時間を合わせて地盤モデルを作成した場合、Vs が極端に小さい層の存在により固有周期を正しく評価できない可能性があると考えられる。

(3) レイリー波基本モードの H/V スペクトル

レイリー波基本モードの H/V スペクトルの 1 次卓越周期を読みとった⁴⁾。伝達関数に近い値となるが、モデルによってばらつくことが分かる。基盤と表層のインピーダンス比がある程度大きな層境界を有する地盤構造においては近接すると考えられるが、今回検討した 2 つのモデルでは近接する傾向は見られなかった。

(4) 高次モードまで考慮した理論 H/V スペクトル

モデル 1～5 では 2E/2E との差がほぼ一定で推移することが分かる。この評価法では、2E/2E よりも周期が長めに評価されるという傾向が見られた。モデル 4-4 では先に図 15 について述べたように、固有周期のピークがはつきりしないため、2E/2E との差が大きくなつた。

(5) 重力式

重力式⁵⁾から、1 次固有周期を求めた。この算出法は、4 分の 1 波長則を変形し、且つ深さによる重み付けを行っている形になっている。他の評価法に比べ、2E/2E に安定して近い値を示すことが分かる。ただし、Vs の小さい層の影響で周期が長くなる傾向が認められる。

4. 結論

表層地盤の速度構造のモデル化が、表面波・実体波の伝播特性に与える影響について検討した。本検討で用いたモデルは、S 波速度の増加率と平均 S 波速度を変化させたものが主であり、今後は、別のパラメータを変化させるモデルの検討も必要である。また、それらを基に、実際の地盤の複雑な構造のモデル化についても検討していく。

【参考文献】

- 1) 工学院大学久田研究室ホームページ <http://kouzou.cc.kogakuin.ac.jp/>
- 2) 時松考次、新井洋：レイリー波とラブ波の振幅比が微動の水平鉛直スペクトル比に与える影響、日本建築学会構造系論文集、No.511、pp.69-76、1998.
- 3) 藤本一雄、翠川三郎：日本全国を対象とした国土数値情報に基づく地盤の平均 S 波速度分布の推定、日本地震工学会論文集、第 3 卷、第 3 号、pp.13-27、2003.
- 4) 時松考次、宮寺泰生：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集、No.439、pp.81-87、1992.
- 5) 国土交通省住宅局建築指導課：2001 年版建築物の構造関係技術基準解説書、2001.

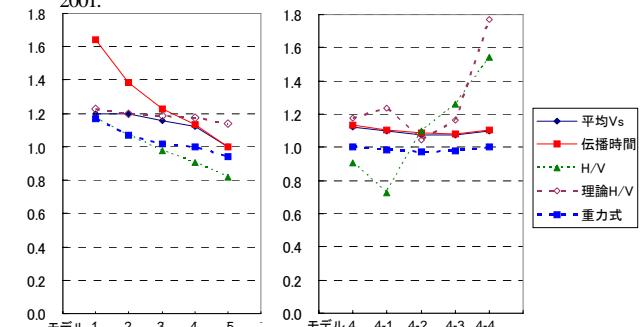


図 18 モデル 1～5・4～4-4 の各評価法による固有周期

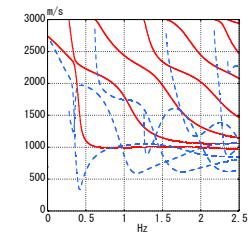
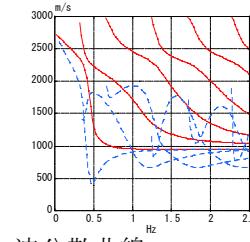
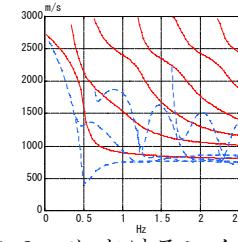
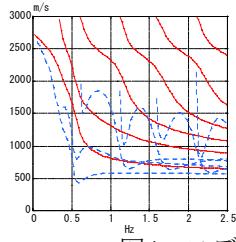
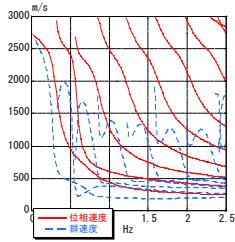


図4 モデル1・3~6におけるレイリー波分散曲線

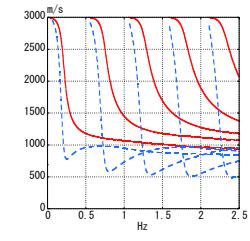
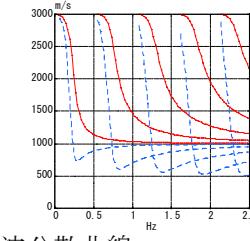
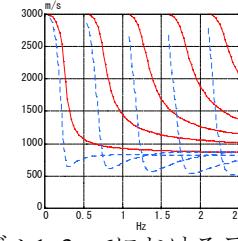
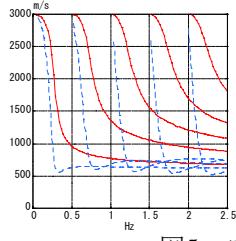
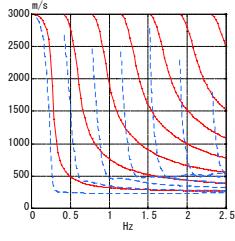


図5 モデル1・3~6におけるラブ波分散曲線

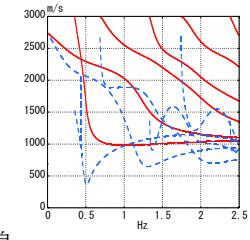
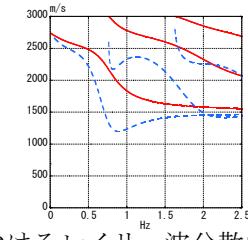
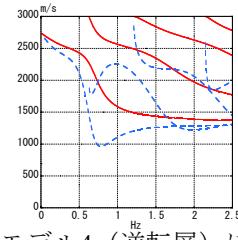
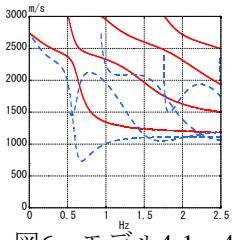
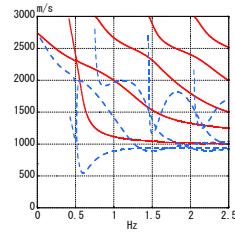


図6 モデル4-1~4-4・モデル4（逆転層）におけるレイリー波分散曲線

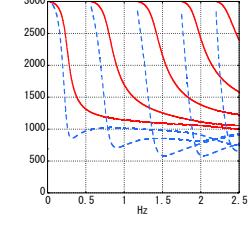
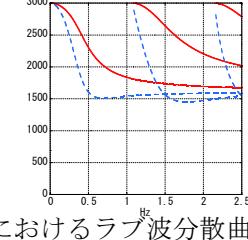
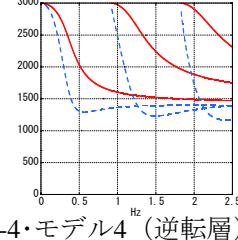
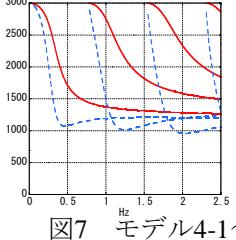
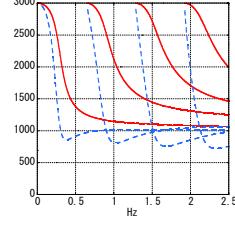


図7 モデル4-1~4-4・モデル4（逆転層）におけるラブ波分散曲線

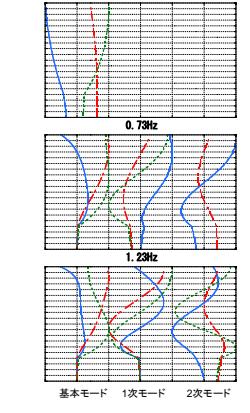
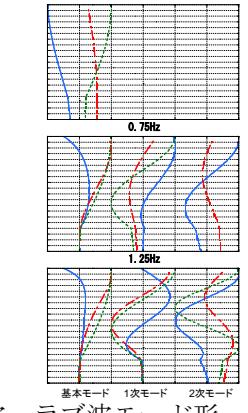
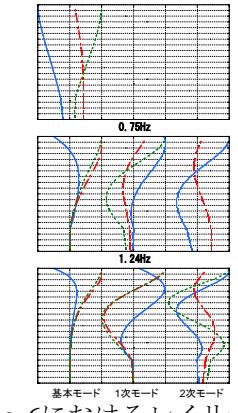
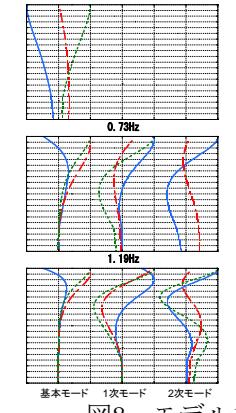
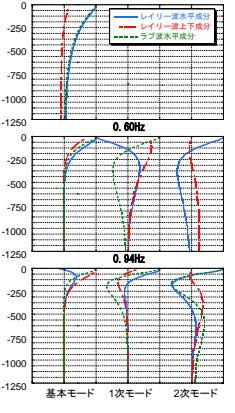


図8 モデル1・3~6におけるレイリー波・ラブ波モード形

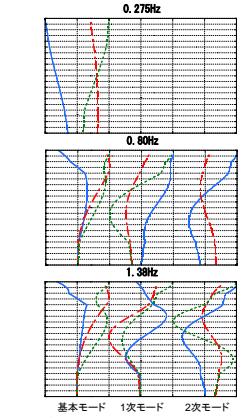
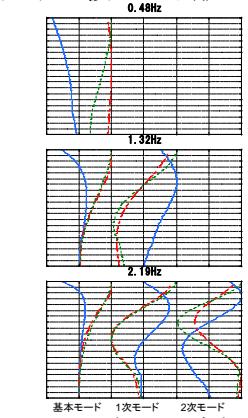
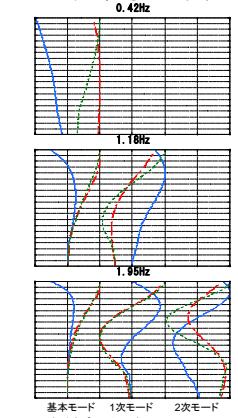
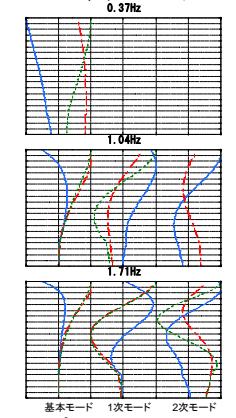
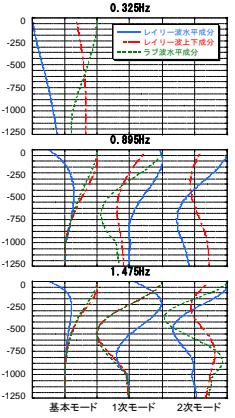


図9 モデル4-1~4-4・モデル4（逆転層）におけるレイリー波・ラブ波モード形

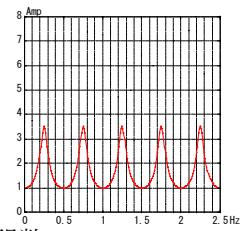
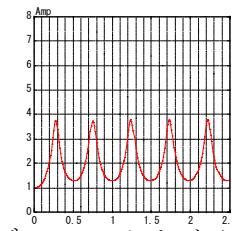
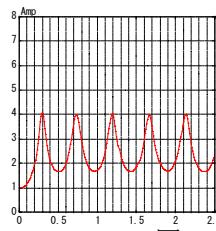
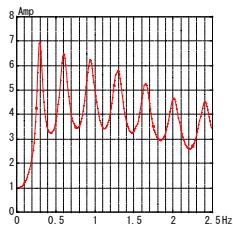


図10 モデル1・3～6における伝達関数 2E/2E

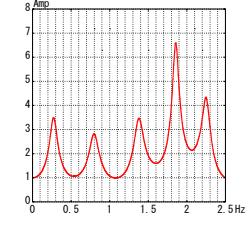
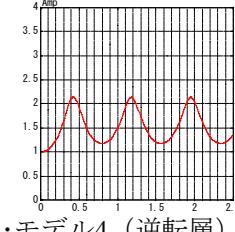
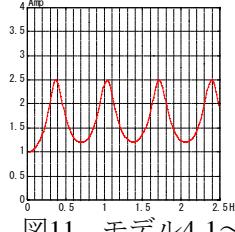
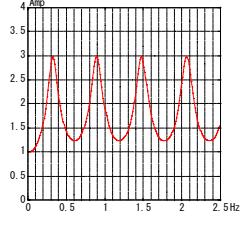


図11 モデル4-1～4-4・モデル4（逆転層）における伝達関数 2E/2E

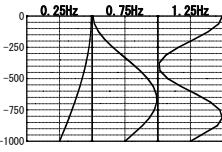
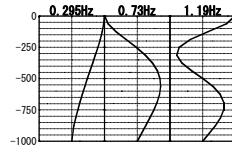
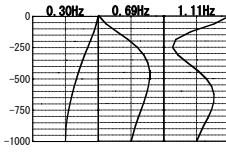
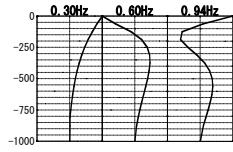


図12 モデル1・3～6の伝達関数の卓越振動数における深さ方向の振幅分布

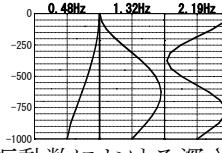
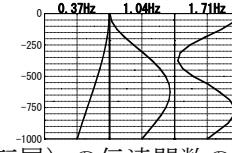
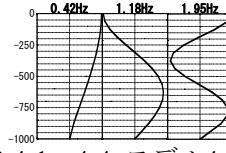
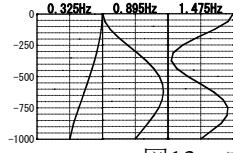


図13 モデル4-1～4-4・モデル4（逆転層）の伝達関数の卓越振動数における深さ方向の振幅分布

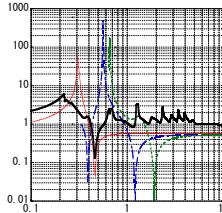
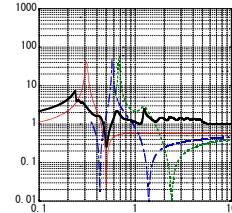
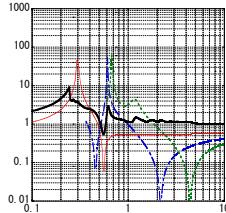
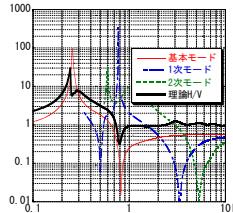


図14 モデル1・3～6におけるレイリー波H/Vスペクトル

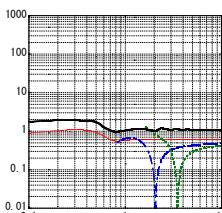
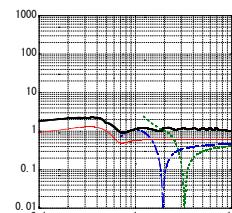
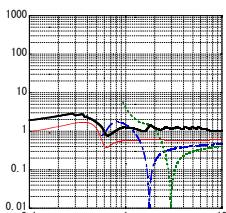
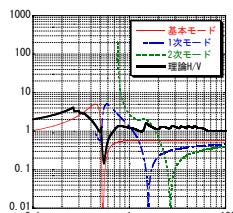


図15 モデル4-1～4-4・モデル4（逆転層）におけるレイリー波H/Vスペクトル

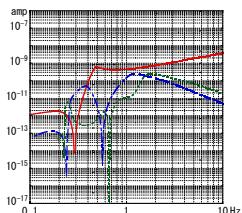
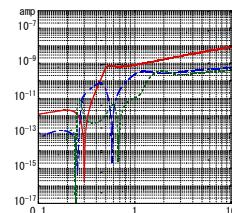
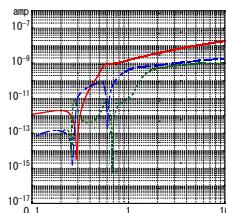
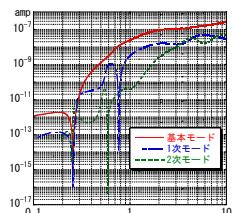


図16 モデル1・3～6におけるレイリー波の振幅関数

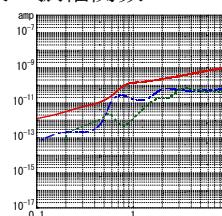
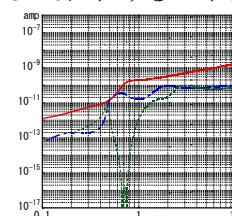
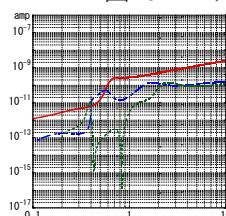
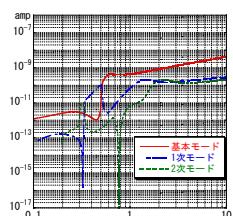


図17 モデル4-1～4-4・モデル4（逆転層）におけるレイリー波の振幅関数