

土木研究所資料

谷状地盤における地震動増幅特性に関する研究

平成13年 1 月

国土交通省土木研究所

耐震技術研究センター振動研究室

Copyright © (2001) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, not transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P.W.R.I.

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、土木研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

建設省は、平成13年1月6日付けで国土交通省に再編

谷状地盤における地震動増幅特性に関する研究

耐震技術研究センター 振動研究室 室 長 田村 敬一
研 究 員 片岡正次郎
松本 俊輔

要 旨

急峻な地形を有する地域に建設される大規模ダムに地震時に入力される地震動は一様ではなく、例えば、ダム底部とダム袖部には異なる地震動が作用すると考えられる。本資料は、設計用入力地震動の合理化・高度化に資することを目的として、谷状の地形を有する地盤における地震動特性に関する検討を行った結果をまとめたものである。谷状地盤における地震動増幅を表す指標として平均増幅率を提案し、形状の異なる様々な谷状地盤のモデルについて平均増幅率を計算することにより、谷状地盤の形状が平均増幅率に及ぼす影響を明らかにするとともに、平均増幅率の簡単な評価式を提案した。

キーワード：谷状地盤、分布入射波平均増幅率、平均増幅率、境界要素法

ま え が き

急峻な地形を有する地域に建設される大規模ダムに地震時に入力される地震動は一様ではなく、例えば、ダム底部とダム袖部には異なる地震動が作用すると考えられる。したがって、ダムの耐震設計の合理化・高度化を図るためには、ダムの建設サイト周辺における地震動の分布を予測し、その分布に基づいて設計地震動を設定する必要がある。

本資料は、設計地震動の合理化・高度化に資することを目的として、谷状の地形を有する地盤における地震動特性に関する検討を行った結果をまとめたものである。地震動の到来方向によって谷状地盤における地震動増幅特性は異なるが、実際には到来方向が精度良く予測されていることはほとんどないと考えられることから、谷状地盤における地震動増幅を表す指標として、平面波の入射角度と振動数に関する平均増幅率を提案した。形状の異なる様々な谷状地盤のモデルについて平均増幅率を計算することにより、谷状地盤の形状が平均増幅率に及ぼす影響を明らかにするとともに、平均増幅率の簡単な評価式を提案した。また、傾斜が大きく変化する地点の周辺では構造物に入力される地震動が急激に変化し、ダムに局所的に大きな歪や応力が発生する可能性を指摘した。

平成13年1月

耐震技術研究センター 振動研究室 室 長 田 村 敬 一
研 究 員 片 岡 正 次 郎
松 本 俊 輔

目 次

まえがき

1. 概説	1
2. 谷状地盤の振動解析	2
2. 1 解析手法	2
2. 1. 1 二次元面外波動場境界要素法	2
2. 1. 2 入射波のモデル化	4
2. 1. 3 分布入射波平均増幅率	5
2. 2 地盤モデル	6
2. 3 地盤振動解析結果	7
3. 谷状地盤の形状が地震動増幅特性に及ぼす影響	21
3. 1 平均増幅率	21
3. 2 傾斜角の影響	22
3. 3 谷の深さの影響	22
3. 4 斜面の傾斜が変化する影響	23
3. 5 考察	24
4. まとめ	26
謝 辞	27
参考文献	28

1. 概説

地表面地形の影響によって地震動の増幅特性が変化することはよく知られている。ダムサイトについても、1971年のSan Fernando地震（マグニチュード6.6）の際にPacoimaダムの左岸アバットメント上の加速度強震計が水平最大加速度1.25g、鉛直最大加速度0.70gをもつ強震動を記録した¹⁾が、強震計が尾根に設置されていたことから地形による影響が注目された。Bouchon(1973)²⁾はAki-Larner法³⁾によりこのPacoimaダムにおける地形の影響を考慮した変位地震動のシミュレーションを行い、地形の影響がない場合と比較して地震動が30～50%増幅されたと指摘している。また、Bouchon(1973)²⁾は一般的な谷地形や丘地形の影響についても検討を行っており、地震波の波長が地形変化部の大きさと同じオーダーの場合には地表面における地震動が大きく変化し、谷地形では谷底で特に増幅率が小さくなること、丘地形では頂部で特に増幅率が大きくなることなどを示している。

このように、比較的古くから地震動に対する地形の影響は指摘されているが、構造物の設計地震力を設定する際、一般には地形の影響は考慮されていない。この理由の一つとしては、地震動の増幅特性が場所ごとの地形あるいは地震動の到来方向によって複雑に変化するために、設計地震力の設計に反映できるような簡便な形で地形の影響が評価されてきていないことが考えられる。

本研究では以上のような背景から、特に谷状の地形を有する地盤（谷状地盤）を対象として、地形が地震動増幅特性に及ぼす影響に関する検討を行い、その影響を簡便に評価することを目的としている。谷状地盤における地震動増幅特性は地震動の到来方向によって異なり²⁾、実際には到来方向が精度良く予測されていることはほとんどないと考えられる。そこで本研究では、谷状地盤における地震動増幅を表す指標として、平面波の入射角と振動数に関する平均増幅率を提案した。さらに、形状の異なる様々な谷状地盤のモデルについて平均増幅率を計算することにより、谷状地盤の形状が平均増幅率に及ぼす影響を明らかにするとともに、平均増幅率の簡単な評価式を提案した。

2. 谷状地盤の振動解析

2.1 解析手法

地盤を地表面が水平な半無限等方均質線形弾性体と仮定すると、例えば平面波が入射する場合、入射波と地表面における反射波の2つの平面波を重ね合わせることで、任意の地点での応答を解析的に簡単に求めることができる⁴⁾。しかし、地表面が水平という仮定が成り立たないような、急峻な地形を有する地盤を対象とする場合には、入射波が直接到達しない地点や、複数の反射波が到達する地点が存在するようになり、上記のような簡単な取り扱いができなくなる。

このような場合にも、波線法、Aki-Larner 法、有限要素法、境界要素法などを用いて数値的に計算することにより、急峻な地形を有する地盤における複雑な波動伝播過程を考慮した応答を求めることができる。本研究ではこれらのうち、入射波の取り扱いや地盤のモデル化が容易であることなどから、境界要素法を用いて谷状地盤の振動解析を行うことにした。また、ダムの耐震設計あるいは耐震安全性の照査を行う観点からは、一般には上下流方向（ダム軸直交方向）の地盤振動が最も重要であると考えられるので、本研究ではダム軸方向に鉛直に切断した断面が上下流方向に一樣な、二次元の谷状地盤を考え、その上下流方向、すなわち面外方向の地盤振動を対象とした解析を行うこととした。以下に、本研究で用いた二次元面外波動場を対象とする境界要素法と入射波のモデル化について簡単に説明する⁵⁾。

2.1.1 二次元面外波動場境界要素法

ここでは簡単のため、地盤を半無限等方均質線形弾性体と仮定し、図-2.1に示すような x_1 - x_2 座標系をおく。このとき、二次元面外波動場の弾性波動方程式は、振動数領域では次の Helmholtz 方程式として表せる。

$$\{\nabla^2 + k^2\}u(z) = 0 \quad (2.1)$$

ここで、 $u(z)$ は点 $z (z_1, z_2)$ における変位である。簡単のため時間項 $\exp(i\omega t)$ は省略する。また、 k はS波の波数 $k = \omega/\beta$ 、 ω は角振動数、 β は内部減衰を考慮した複素S波速度で、その実部、虚部をそれぞれ β_{Re} 、 β_{Im} とすると減衰定数 h を用いて次式で表される⁶⁾。

$$\beta = \beta_{\text{Re}} + i\beta_{\text{Im}} = \beta_{\text{Re}}(1 + ih) \quad (2.2)$$

ただし、 β_{Re} は内部減衰を考慮しない場合に用いられるS波速度である。

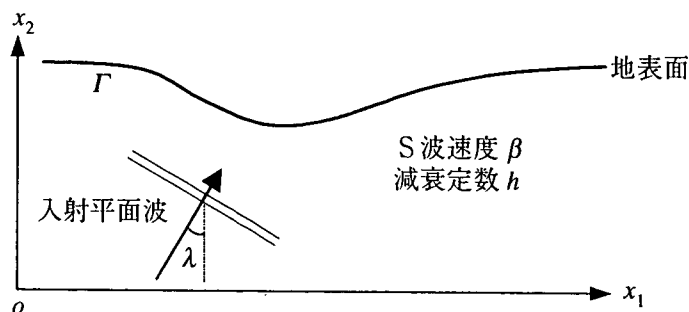


図-2.1 二次元座標系と地盤モデル

式(2.1)を境界積分方程式に変換すると、領域内に入射波を考慮する場合には次式が得られる。

$$c(x)u(x) + v.p. \int_{\Gamma} Q(x, y)u(y)d\Gamma(y) - \int_{\Gamma} U(x, y)q(y)d\Gamma(y) = v(x) \quad (2.3)$$

ここで、 $v.p.$ は積分を主値積分の意味で評価することを示しており、 Γ は対象とする領域の境界（ここでは地表面）、 x, y は Γ 上の作用点と観測点の座標を表す。 $c(x)$ は点 x における境界 Γ の形状で決まる係数であり、滑らかな場合には $c(x)=1/2$ で与えられる。また、 $v(x)$ は入射波による点 x の変位、 $q(x)$ は変位 $u(x)$ の法線方向の勾配で、 $n(x)$ を点 x における境界 Γ の外向き法線ベクトルとすると、

$$q(x) = \frac{\partial u(x)}{\partial n(x)} \quad (2.4)$$

で表される。

基本解 $U(x, y)$ 、 $Q(x, y)$ は無限領域における変位の Green 関数とその法線方向の勾配であり、 $U(x, y)$ は次式から得られる。

$$\{\nabla^2 + k^2\}U(x, y) = -\delta(x - y) \quad (2.5)$$

式(2.5)を解くことにより、基本解は次式で表されることが分かる⁷⁾。

$$U(x, y) = -\frac{i}{4} H_0^{(2)}(k, r) \quad (2.6)$$

$$Q(x, y) = \frac{\partial u^*(x, y)}{\partial n(y)} = -\frac{ik}{4} H_1^{(2)}(k, r) \frac{\partial r}{\partial n(y)}$$

ここで、 r は点 x と点 y 間の距離 $r = |x - y|$ を表し、 $H_v^{(2)}$ は v 次の第二種 Hankel 関数である。

式(2.3)において、境界 Γ が地表面を表しており、地表面での変位の法線方向勾配が 0 であることを考慮すると、本研究で用いる境界積分方程式は次式のように表せる。

$$c(x)u(x) + v.p. \int_{\Gamma} Q(x, y)u(y)d\Gamma(y) = v(x) \quad (2.7)$$

式(2.7)の Γ に関する積分を直線の境界要素 Γ_m ($m=1, \dots, M$) に関する積分に分割し、一つの境界要素上の変位 u_m を一定と仮定する（一定要素を用いる）と、式(2.7)の左辺を次のように変形することができる。

$$\begin{aligned} c(x_m)u_m + v.p. \int_{\Gamma} Q(x_m, y)u(y)d\Gamma(y) \\ \approx c(x_m)u_m + \sum_{m'} u_{m'} \int_{\Gamma_{m'}} Q(x_m, y)d\Gamma(y) \\ = \sum_{m'} u_{m'} h(m, m') \end{aligned} \quad (2.8)$$

$$h(m, m') = c(x_m) \quad (m = m'), \quad h(m, m') = \int_{\Gamma_{m'}} Q(x_m, y)d\Gamma(y) \quad (m \neq m') \quad (2.9)$$

ここで、 x_m は境界要素 Γ_m の中点の座標である。なお、式(2.9)では $m=m'$ で評価する必要がある特異積分が一定要素を用いた場合には 0 であることが考慮されている。特異性を含まない積分は数値積分で評価することができる。

式(2.8)を用いて式(2.7)を離散化すれば、振動数ごとに次の連立一次方程式が得られる。

$$\mathbf{H} \mathbf{u} = \mathbf{v} \quad (2.10)$$

ここで、 $\mathbf{H}$ は $h(m, m')$ を要素とする行列であり、 $\mathbf{v}$ は入射波の変位 v 、 $\mathbf{u}$ は節点変位 u をまとめてベクトル表記したものである。この連立一次方程式を解くことにより、全ての節点変位が得られる。

2.1.2 入射波のモデル化

式(2.10)の両辺に $\mathbf{H}$ の逆行列をかけ、次のように表す。

$$\mathbf{u} = \mathbf{H}^{-1} \mathbf{v} = \begin{bmatrix} \mathbf{p}_1 \\ \vdots \\ \mathbf{p}_M \end{bmatrix} \mathbf{v} \quad (2.11)$$

ここで、 $\mathbf{p}_m (m=1, \dots, M)$ は $\mathbf{H}^{-1}$ の m 行目だけを取り出した行ベクトルであり、境界要素でモデル化された地盤構造のみによって定まる。

これより、節点 m の変位 u_m とパワースペクトル S_m は次式で表される。

$$u_m = \mathbf{p}_m \mathbf{v} \quad (2.12)$$

$$S_m = u_m u_m^* = \mathbf{p}_m \mathbf{V} \mathbf{p}_m^H \quad (2.13)$$

ここで、 $*$ は複素共役、 ^{H} は共役転置を表している。また、 $\mathbf{V}$ は入射波のクロススペクトルを要素とする行列であり、次式で表される。

$$\mathbf{V} = \mathbf{v} \mathbf{v}^H = \begin{bmatrix} S'_{11} & \dots & S'_{1M} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ S'_{M1} & \dots & S'_{MM} \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

ここで、 $'$ は入射波に関するスペクトルであることを示している。

図-2.1 のように入射角 λ の平面波を考えた場合、節点 $n(x_{n1}, x_{n2})$ での入射波 v_n は次式で表される。

$$v_n = a \exp(-i\xi_1 x_{n1} - i\xi_2 x_{n2}) \quad (2.15)$$

ここで、 a は入射波の複素振幅であり、位相の情報も含まれている。また、 ξ_1, ξ_2 はそれぞれ x_1, x_2 方向の波数であり、入射角 λ により次式で表される。

$$\xi_1 = k \sin \lambda, \quad \xi_2 = k \cos \lambda \quad (2.16)$$

この平面波に対する増幅率は、地盤の応答の振幅を入射波の振幅で除することによって得られるが、2.3 でも解析結果を示すように、入射角 λ によって地盤の応答が変化し、地盤の増幅率を一意的に決定することができなくなる。そこで、本研究では茂木・川上(1998)⁵⁾ にならい、入射波を以下のようにモデル化した。

まず、節点 $n(x_{n1}, x_{n2})$ での入射波 v_n を次式のように入射角 $\lambda_l (l=1, \dots, L)$ の平面波の重ね合わせで表す。

$$v_n = \sum_{l=1}^L a_l \exp(-i\xi_{l1} x_{n1} - i\xi_{l2} x_{n2}) \quad (2.17)$$

ここで、 ξ_{l1}, ξ_{l2} はそれぞれ x_1, x_2 方向の波数であり、入射角 λ_l により次式で表される。

$$\xi_{l1} = k \sin \lambda_l, \quad \xi_{l2} = k \cos \lambda_l \quad (2.18)$$

ただし、 λ_l は $-90^\circ \sim 90^\circ$ を等分割するものとする。実際の解析では、 λ_l を 1° 刻みで設定し、 $L=181$ として

計算した。

次式のように、入射角 λ_l の成分の複素振幅 a_l を平均値が0で等しい分散をもつ、互いに独立な確率変数と仮定する。

$$\begin{aligned} E(a_l) &= 0 \\ E(a_l a_{l'}^*) &= \begin{cases} \alpha & (l=l') \\ 0 & (l \neq l') \end{cases} \end{aligned} \quad (2.19)$$

ここで、 α は正の実数、 $E()$ はアンサンブル平均を表す。式(2.17) (2.19)は、入射角 λ_l が $-90^\circ \sim 90^\circ$ の範囲にあり、それぞれの振幅が互いに無相関で、かつ、平均的に等しいパワースペクトルをもつ平面波の重ね合わせで入射波を表したことになる。本研究では式(2.15)で表される一つの平面波に対する増幅率に加え、式(2.17) (2.19)でモデル化した入射波に対する谷状地盤の増幅率（分布入射波平均増幅率⁵⁾）を計算し、その結果を2.3に示す。

2.1.3 分布入射波平均増幅率

入射波を式(2.17) (2.19)でモデル化したとき、入射波のクロススペクトルは

$$\begin{aligned} S_{nn'}^I &= v_n v_{n'}^* = \mathbf{e}_n \mathbf{a} \mathbf{a}^H \mathbf{e}_{n'}^H \\ &= \mathbf{e}_n \begin{bmatrix} a_1 a_1^* & \cdots & a_1 a_L^* \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_L a_1^* & \cdots & a_L a_L^* \end{bmatrix} \mathbf{e}_{n'}^H \end{aligned} \quad (2.20)$$

で表される。ここで、 $\mathbf{e}_n$ は $l=1, \dots, L$ に対する $\exp(-i\xi_{l1}x_{n1} - i\xi_{l2}x_{n2})$ を要素とする行ベクトル、 $\mathbf{a}$ は a_l を要素とする列ベクトルである。

式(2.20)のアンサンブル平均をとると、式(2.19)から

$$E \left(\begin{bmatrix} a_1 a_1^* & \cdots & a_1 a_L^* \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_L a_1^* & \cdots & a_L a_L^* \end{bmatrix} \right) = \text{diag}\{\alpha, \dots, \alpha\} \quad (2.21)$$

となる。したがって、節点 n と節点 n' における入射波のクロススペクトルのアンサンブル平均は

$$E(S_{nn'}^I) = E(v_n v_{n'}^*) = \alpha \sum_{l=1}^L \exp\{i\xi_{l1}(x_{n'1} - x_{n1}) + i\xi_{l2}(x_{n'2} - x_{n2})\} \quad (2.22)$$

で表される。これより、各節点における入射波のパワースペクトルのアンサンブル平均はすべて等しく、

$$E(S_{nn}^I) = L\alpha, \quad n=1, \dots, M \quad (2.23)$$

となる。

以上の式(2.20)～式(2.23)より、式(2.13)のアンサンブル平均をとると、節点 m におけるパワースペクトルのアンサンブル平均と入射波のパワースペクトルのアンサンブル平均との関係が次式のように与えられる。

$$E(S_m) = E(S_{mm}^I) R_m^2 \quad (2.24)$$

$$R_m^2 = p_m \begin{bmatrix} I_{11} & \cdots & I_{1M} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ I_{M1} & \cdots & I_{MM} \end{bmatrix} p_m^H \quad (2.25)$$

$$I_{mn} = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L \exp\{i\xi_{l1}(x_{n1} - x_{n1}) + i\xi_{l2}(x_{n2} - x_{n2})\} \quad (2.26)$$

式(2.24)において、 R_m^2 は各節点における入射波のパワースペクトルのアンサンブル平均 $E(S_m^I)$ に対する節点 m におけるパワースペクトルの倍率を示している。したがって R_m は、式(2.17) (2.19)でモデル化した入射波の Fourier スペクトルの節点 m における平均的な増幅率と考えることができる。このことから、茂木・川上(1998)⁵⁾はこの R_m を分布入射波平均増幅率とよび、入射波が特定できない場合には不整形地盤の増幅特性を考える上で有効な指標であるとしている。

2.2 地盤モデル

地盤振動解析に用いる谷状地盤モデルを図-2.2 に示す。谷底の幅を 100[m]として、その中心に x 座標の原点をおく。谷の深さを H 、谷の左側と右側の斜面の傾斜角をそれぞれ θ_1 、 θ_2 として、これらのパラメータを変化させることにより、形状の異なる様々な谷状地盤モデルを設定した。谷の斜面以外では地表面は水平になっている。

厳密には地表面を水平方向に無限にモデル化する必要があるが、通常の境界要素を用いる際には、対象領域より十分遠方でモデル化を打ち切ることにより解析精度の低下を防ぐ。ここでは谷から 2000[m]、1000[m]離れた地点で境界要素によるモデル化を打ち切った場合の計算結果がほぼ一致していたことから、図-2.2 のように、打ち切り長さを 1000[m]とした。

また、地盤の S 波速度 $\beta=2500[\text{m/s}]$ とし、減衰定数 $h=0.02$ の内部減衰を考慮することとした。境界要素は一定要素を用いるが、一つの要素の長さをおよそ 20[m]とし、振動数 10[Hz]程度までの解析に十分な精度をもたせるようにした。なお、平面波を入射する場合には、その入射角 λ を図-2.2 のように定義する。

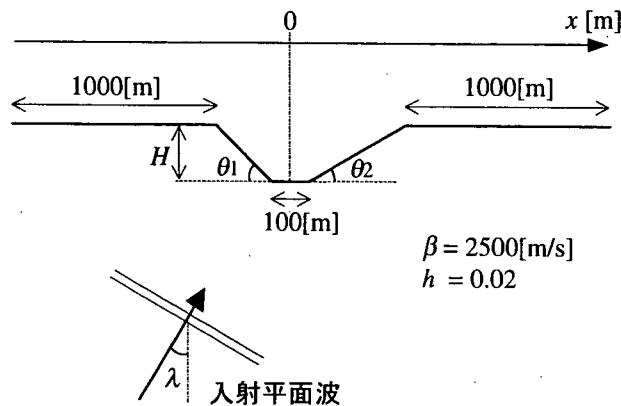


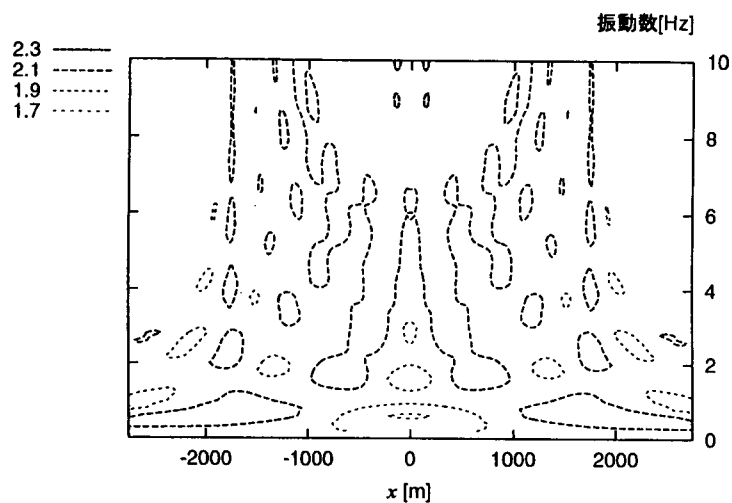
図-2.2 谷状地盤のモデル

2.3 地盤振動解析結果

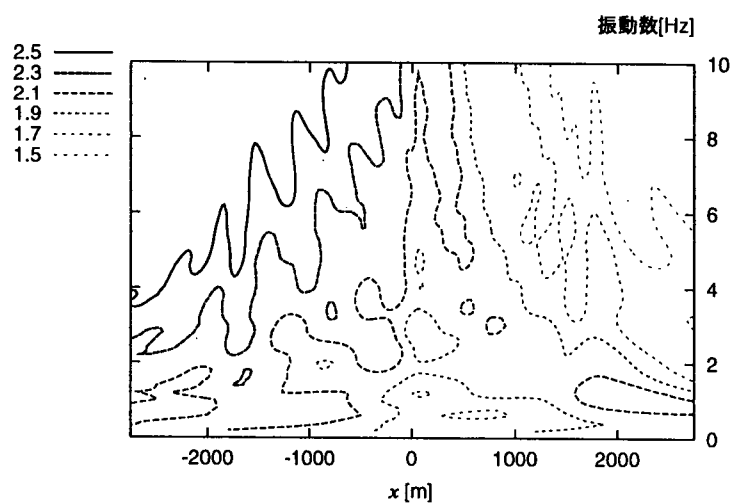
2.1 の手法により 2.2 に示した谷状地盤モデルの振動解析を行い、平面波に対する増幅率と分布入射波平均増幅率を計算した結果を図-2.3.1～図-2.3.13 に示す。これらの図では、横軸を図-2.2 の x 座標、縦軸を 0～10[Hz]の振動数として、等値線により増幅率を示している。平面波に対する増幅率を計算する際には、入射角を 0° , 30° とした2つのケースを計算した。解析に用いた谷状地盤モデルは、2.2 で述べたように谷の深さ H と斜面の傾斜角 θ_1 , θ_2 を変化させて設定したものであり、表-2.1 にこれらのパラメータをまとめて示す。これらのうち、モデル 1～10 は谷の深さを 300[m]に固定し、斜面の傾斜角の影響を検討するために設定したものであり、モデル 11～13 は斜面の傾斜角を固定し、谷の深さの影響を検討するために設定したものである。

表-2.1 解析に用いた谷状地盤モデルのパラメータ

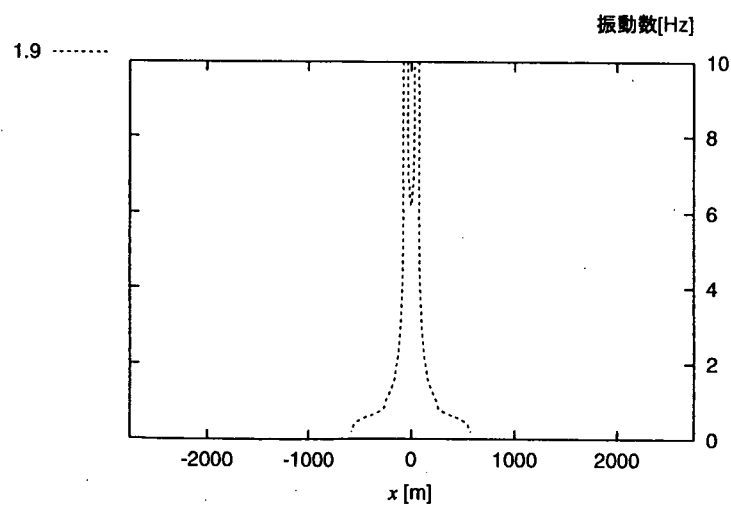
モデル	H [m]	θ_1 [deg.]	θ_2 [deg.]
1	300	10	10
2	300	20	10
3	300	30	10
4	300	40	10
5	300	20	20
6	300	30	20
7	300	40	20
8	300	30	30
9	300	40	30
10	300	40	40
11	150	30	20
12	450	30	20
13	600	30	20



(a) 入射角 0° の平面波に対する増幅率



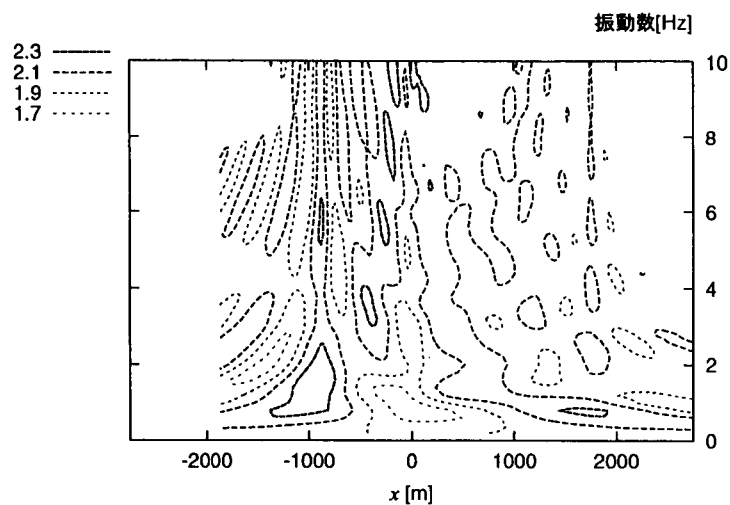
(b) 入射角 30° の平面波に対する増幅率



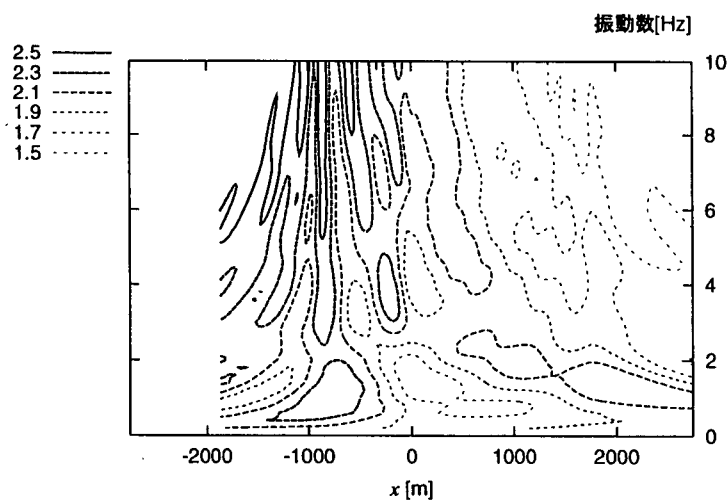
(c) 分布入射波平均増幅率

図-2.3.1 平面波に対する増幅率と分布入射波平均増幅率

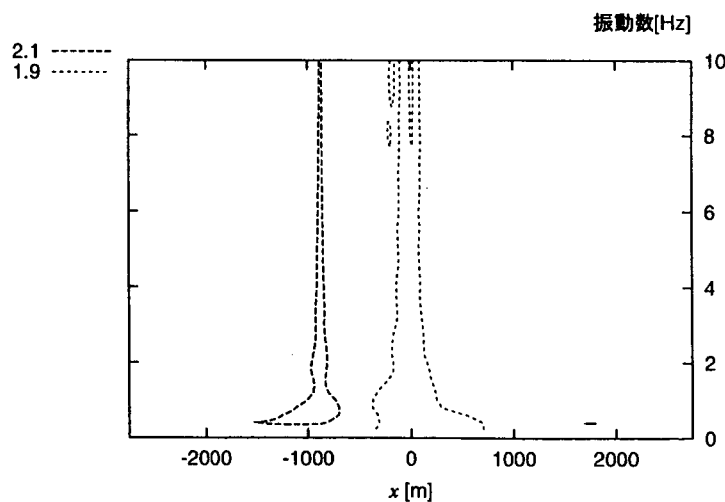
モデル 1 ($\theta_1=10^\circ$, $\theta_2=10^\circ$, $H=300[\text{m}]$)



(a) 入射角 0° の平面波に対する増幅率



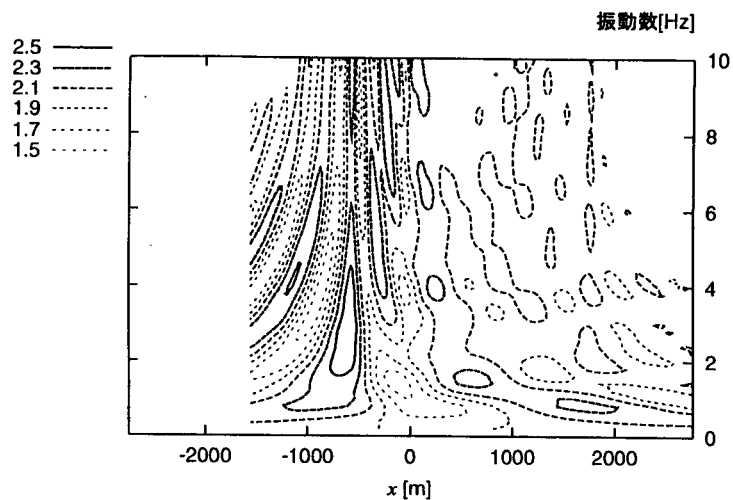
(b) 入射角 30° の平面波に対する増幅率



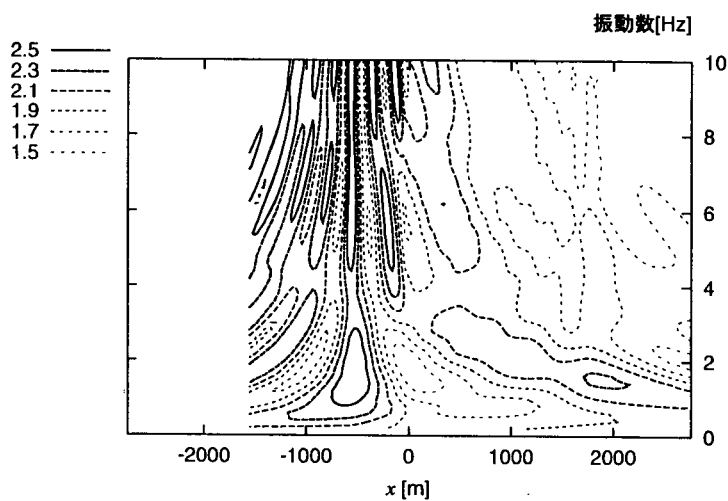
(c) 分布入射波平均増幅率

図-2.3.2 平面波に対する増幅率と分布入射波平均増幅率

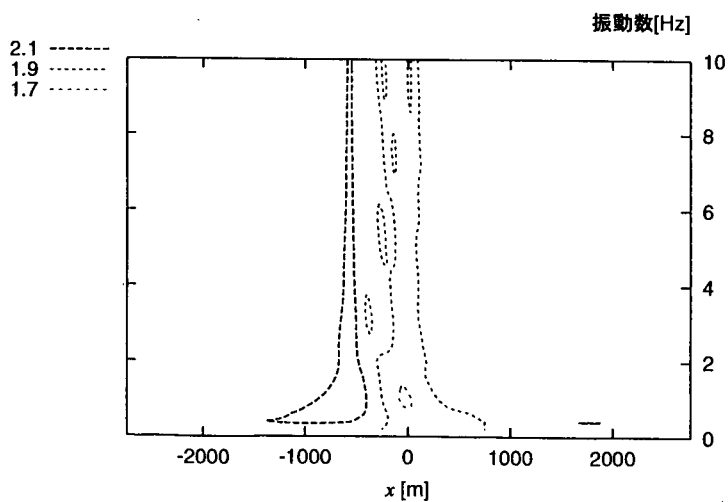
モデル 2 ($\theta_1=20^\circ$, $\theta_2=10^\circ$, $H=300[\text{m}]$)



(a) 入射角 0° の平面波に対する増幅率

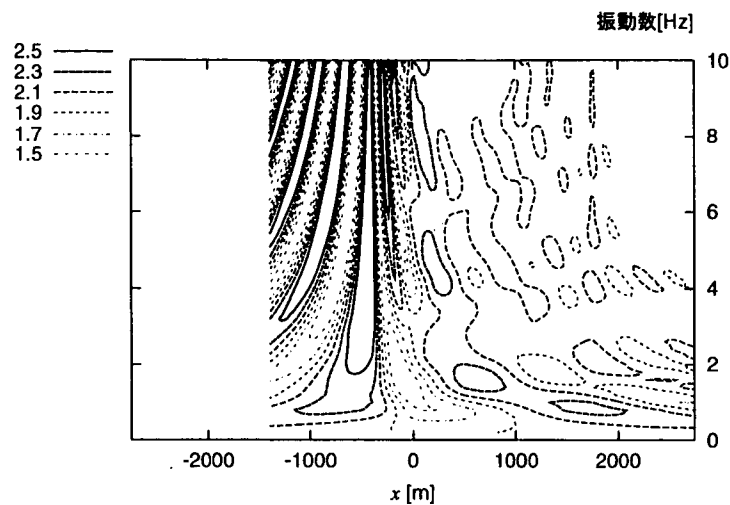


(b) 入射角 30° の平面波に対する増幅率

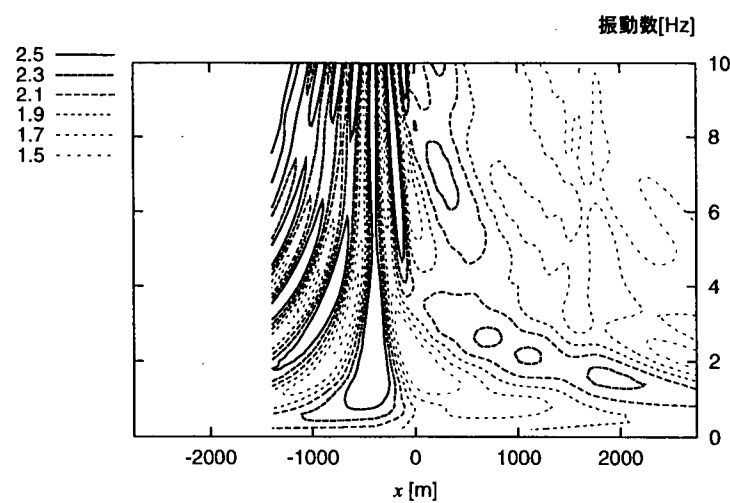


(c) 分布入射波平均増幅率

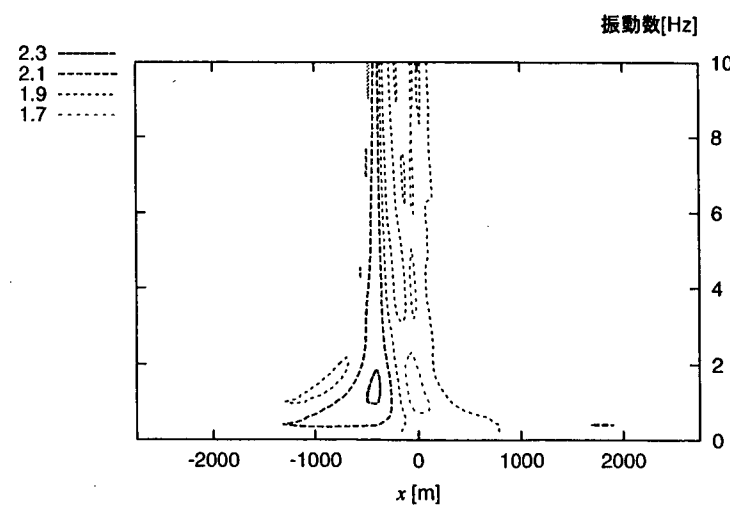
図-2.3.3 平面波に対する増幅率と分布入射波平均増幅率
モデル 3 ($\theta_1=30^\circ$, $\theta_2=10^\circ$, $H=300[\text{m}]$)



(a) 入射角 0° の平面波に対する増幅率

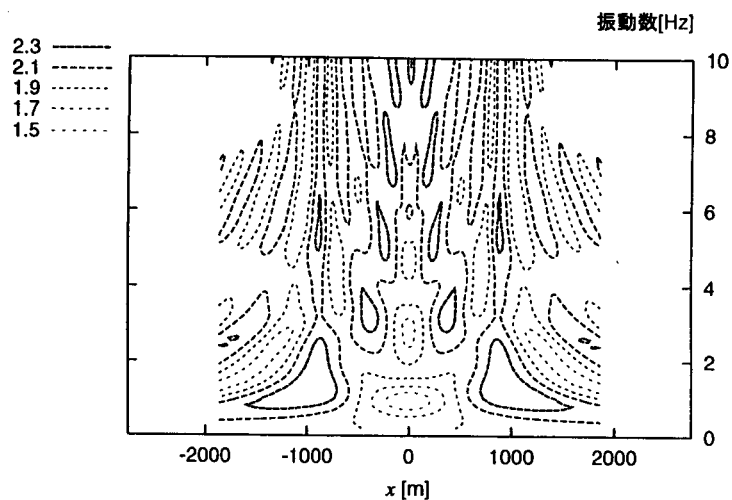


(b) 入射角 30° の平面波に対する増幅率

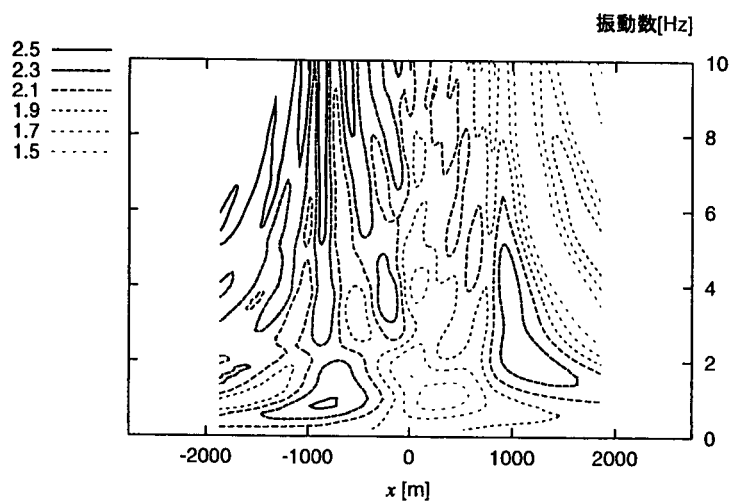


(c) 分布入射波平均増幅率

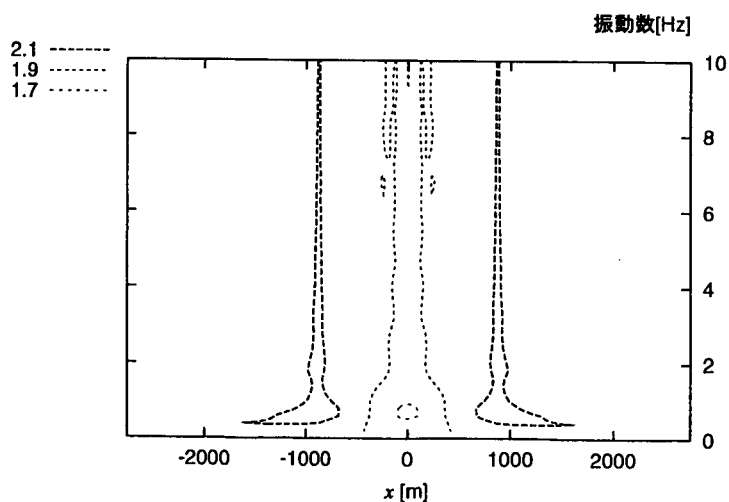
図-2.3.4 平面波に対する増幅率と分布入射波平均増幅率
モデル 4 ($\theta_1=40^\circ$, $\theta_2=10^\circ$, $H=300[\text{m}]$)



(a) 入射角 0° の平面波に対する増幅率

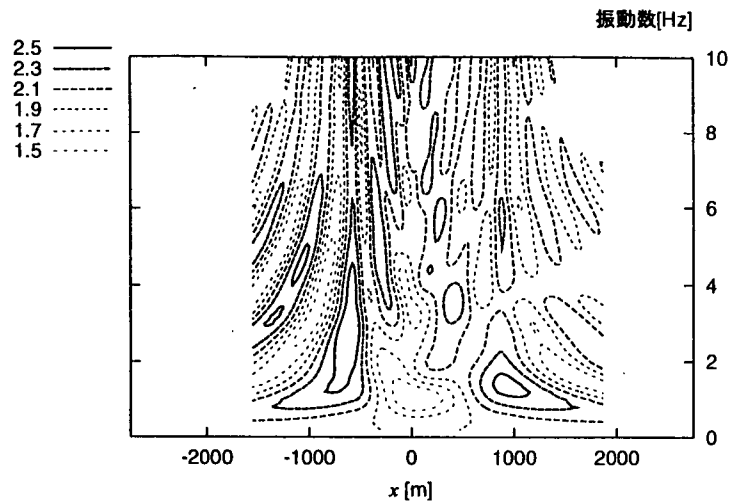


(b) 入射角 30° の平面波に対する増幅率

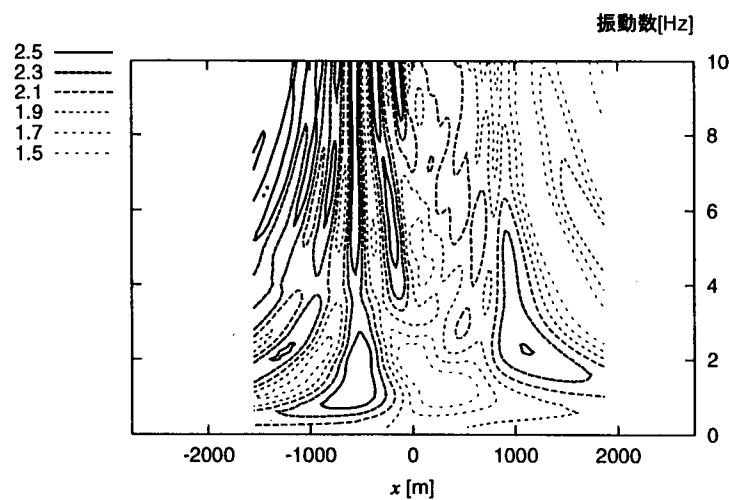


(c) 分布入射波平均増幅率

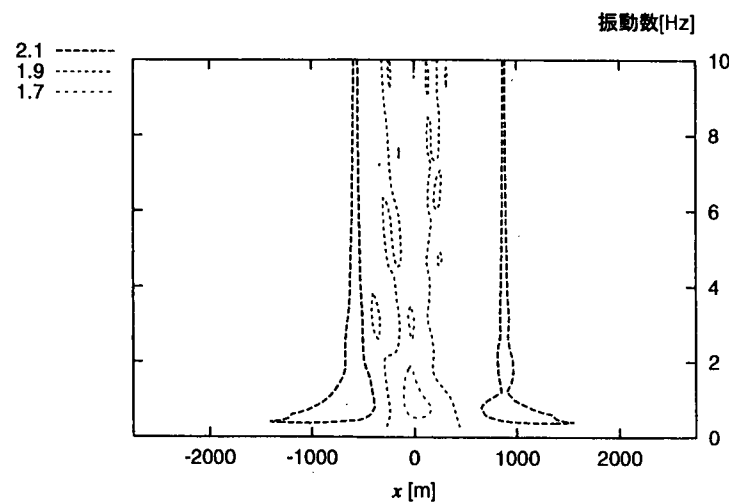
図-2.3.5 平面波に対する増幅率と分布入射波平均増幅率
モデル 5 ($\theta_1=20^\circ$, $\theta_2=20^\circ$, $H=300[\text{m}]$)



(a) 入射角 0° の平面波に対する増幅率

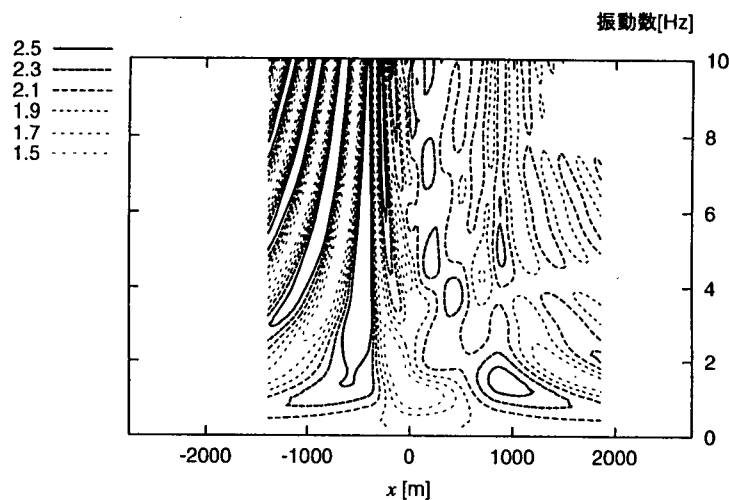


(b) 入射角 30° の平面波に対する増幅率

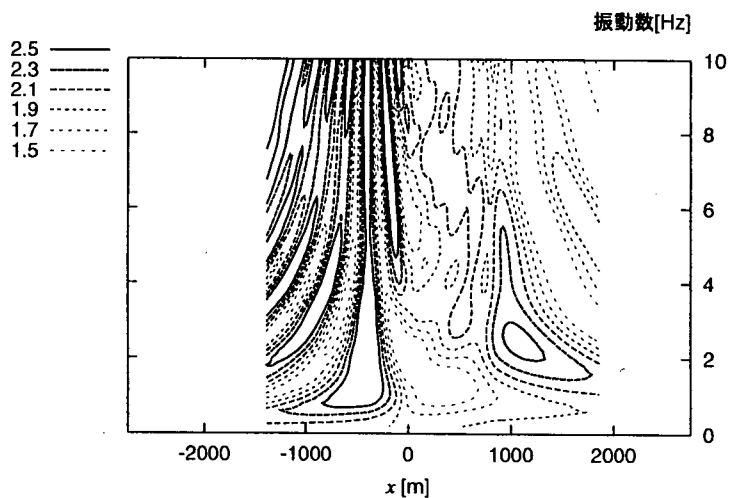


(c) 分布入射波平均増幅率

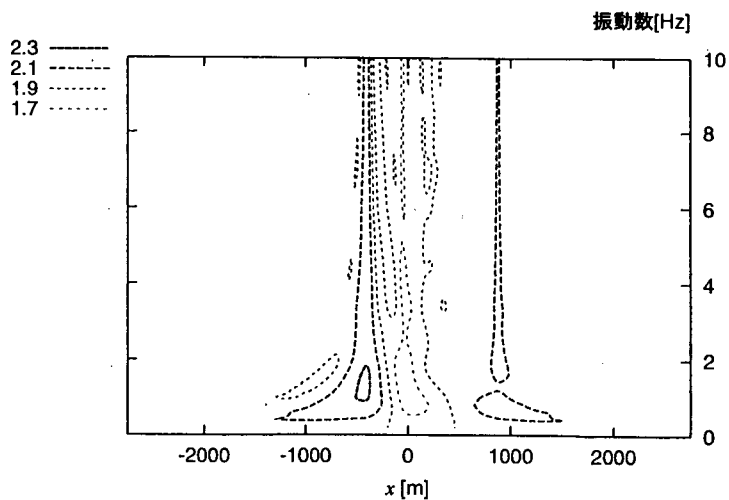
図-2.3.6 平面波に対する増幅率と分布入射波平均増幅率
モデル 6 ($\theta_1=30^\circ$, $\theta_2=20^\circ$, $H=300[\text{m}]$)



(a) 入射角 0° の平面波に対する増幅率

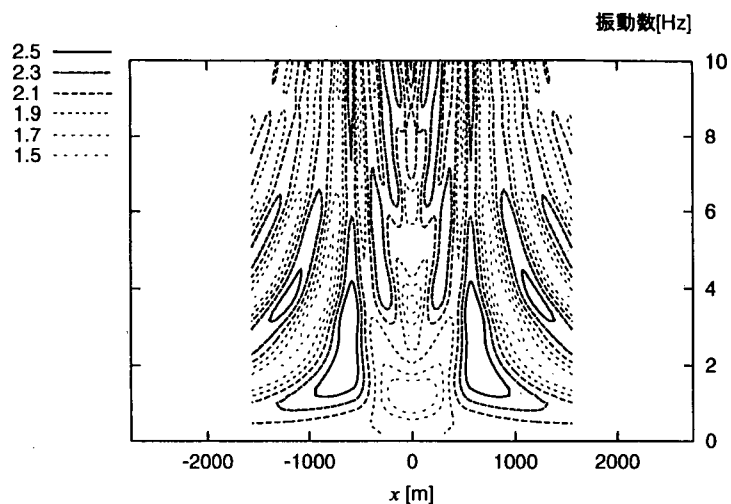


(b) 入射角 30° の平面波に対する増幅率

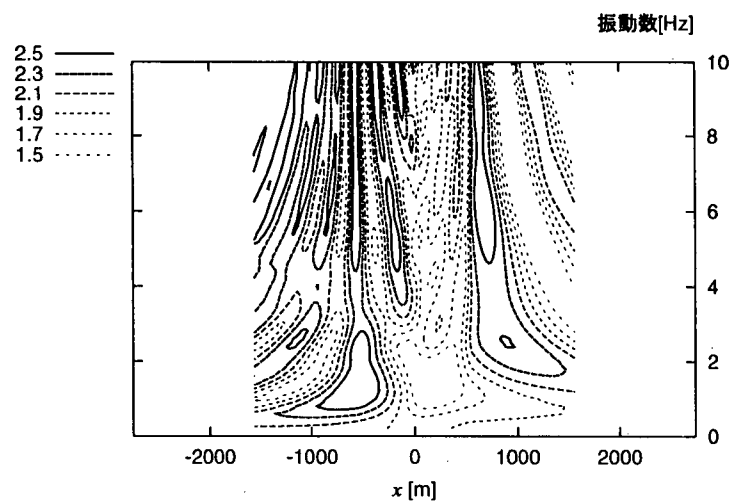


(c) 分布入射波平均増幅率

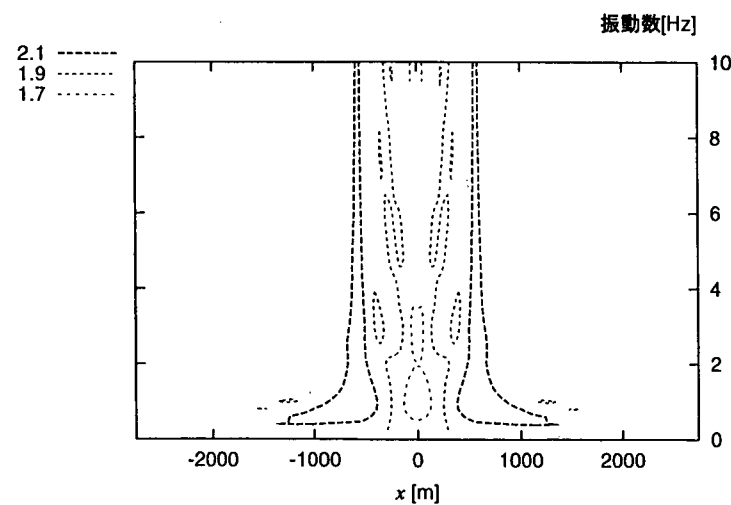
図-2.3.7 平面波に対する増幅率と分布入射波平均増幅率
モデル 7 ($\theta_1=40^\circ$, $\theta_2=20^\circ$, $H=300[\text{m}]$)



(a) 入射角 0° の平面波に対する増幅率

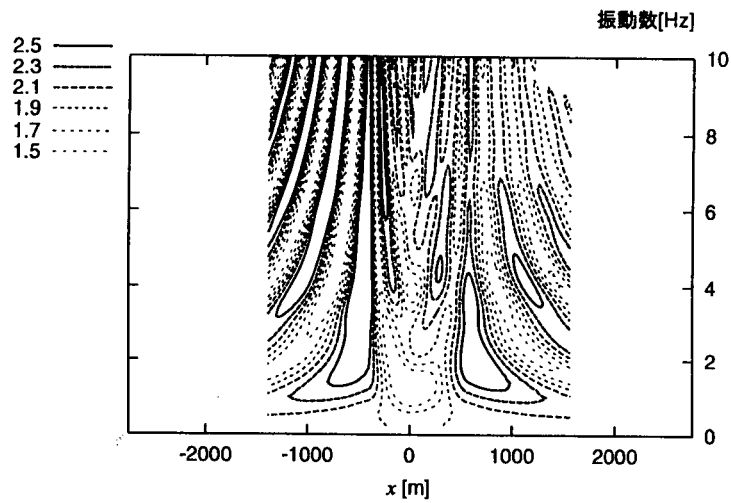


(b) 入射角 30° の平面波に対する増幅率

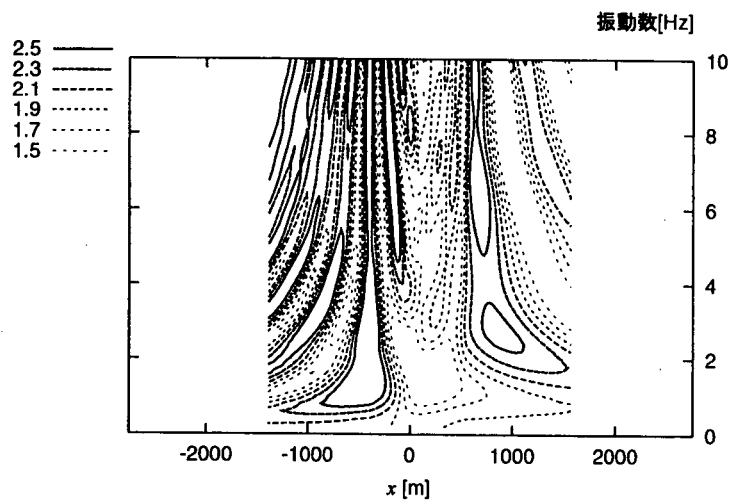


(c) 分布入射波平均増幅率

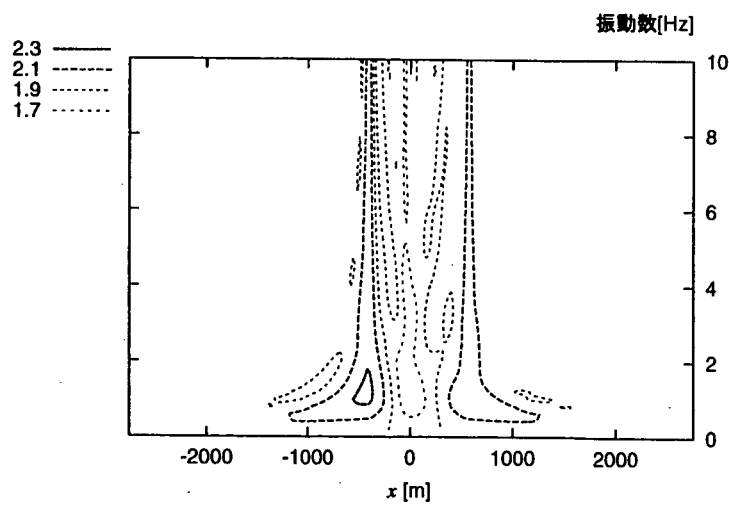
図-2.3.8 平面波に対する増幅率と分布入射波平均増幅率
モデル 8 ($\theta_1=30^\circ$, $\theta_2=30^\circ$, $H=300[\text{m}]$)



(a) 入射角 0° の平面波に対する増幅率

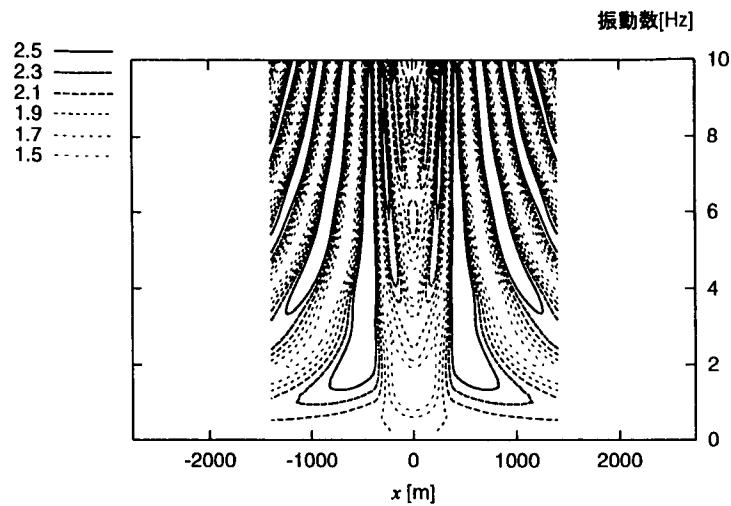


(b) 入射角 30° の平面波に対する増幅率

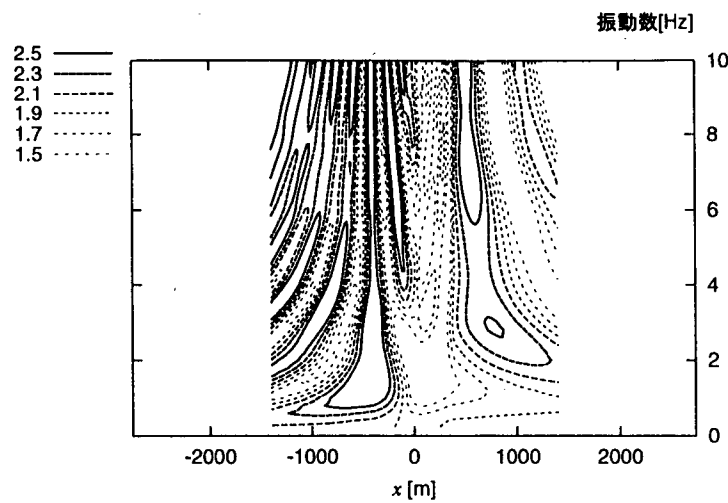


(c) 分布入射波平均増幅率

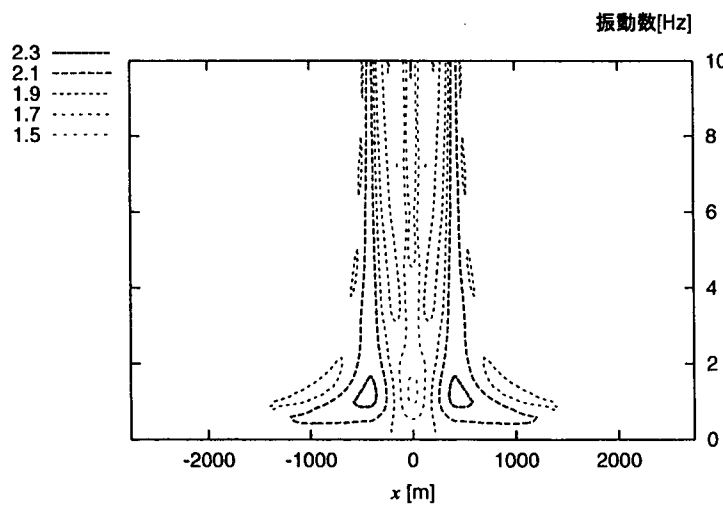
図-2.3.9 平面波に対する増幅率と分布入射波平均増幅率
モデル 9 ($\theta_1=40^\circ$, $\theta_2=30^\circ$, $H=300[m]$)



(a) 入射角 0° の平面波に対する増幅率

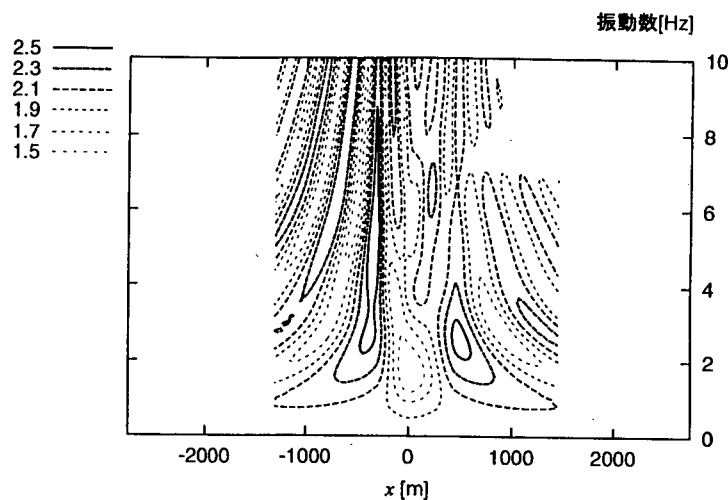


(b) 入射角 30° の平面波に対する増幅率

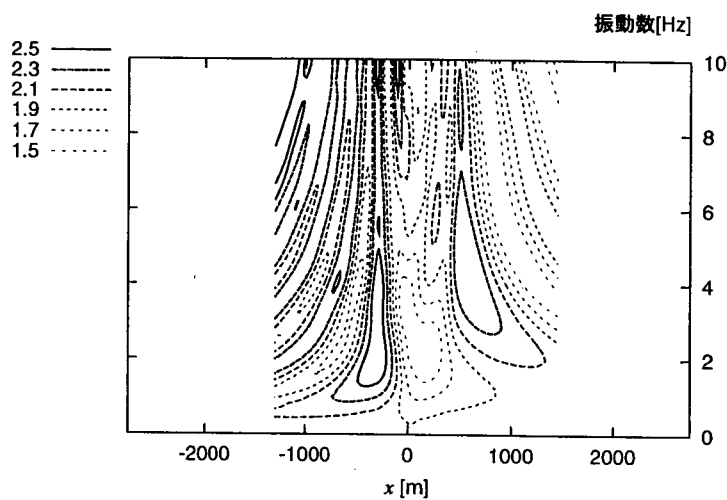


(c) 分布入射波平均増幅率

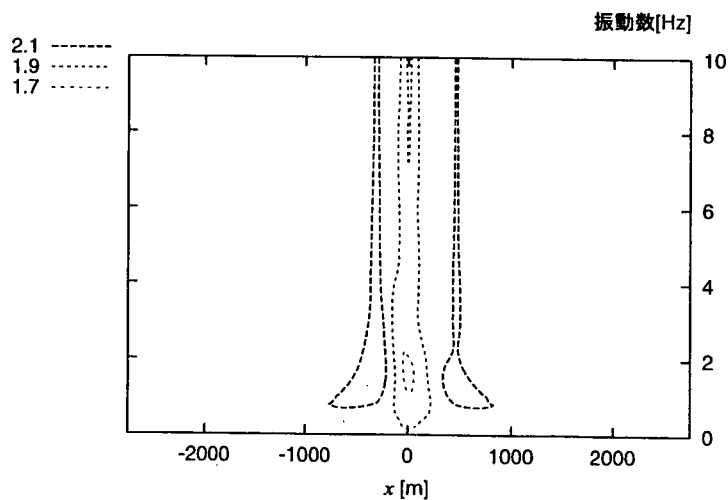
図-2.3.10 平面波に対する増幅率と分布入射波平均増幅率
モデル 10 ($\theta_1=40^\circ$, $\theta_2=40^\circ$, $H=300[\text{m}]$)



(a) 入射角 0° の平面波に対する増幅率

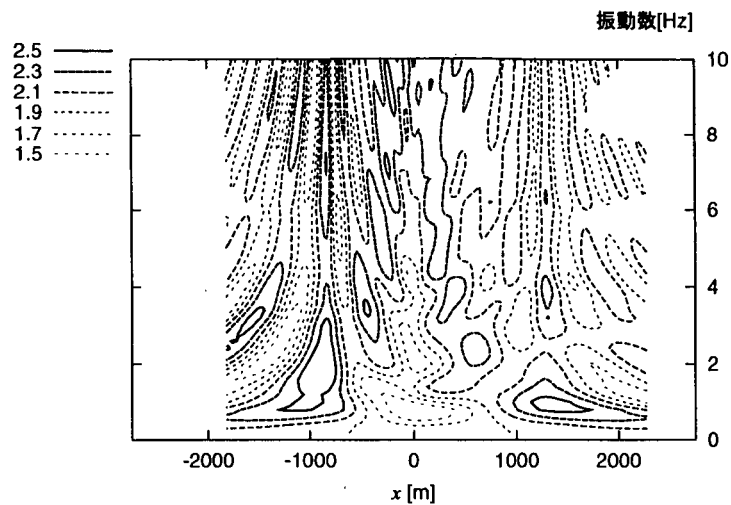


(b) 入射角 30° の平面波に対する増幅率

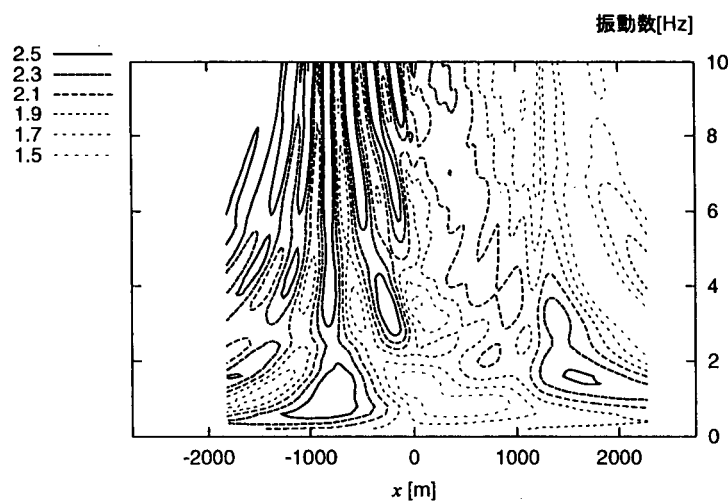


(c) 分布入射波平均増幅率

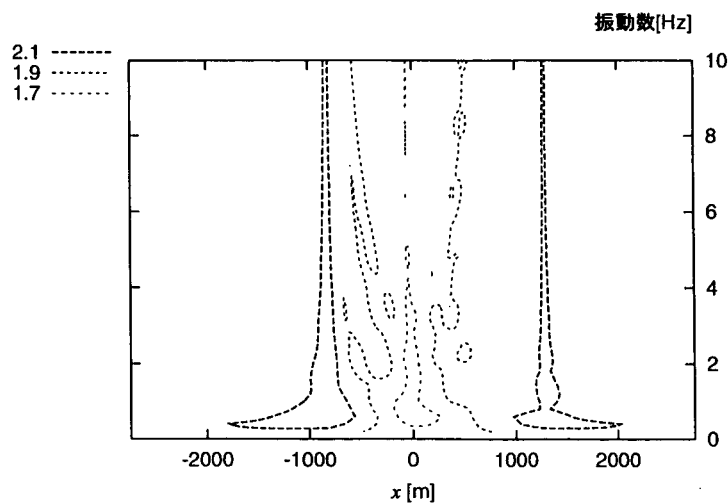
図-2.3.11 平面波に対する増幅率と分布入射波平均増幅率
モデル 11 ($\theta_1=30^\circ$, $\theta_2=20^\circ$, $H=150[\text{m}]$)



(a) 入射角 0° の平面波に対する増幅率

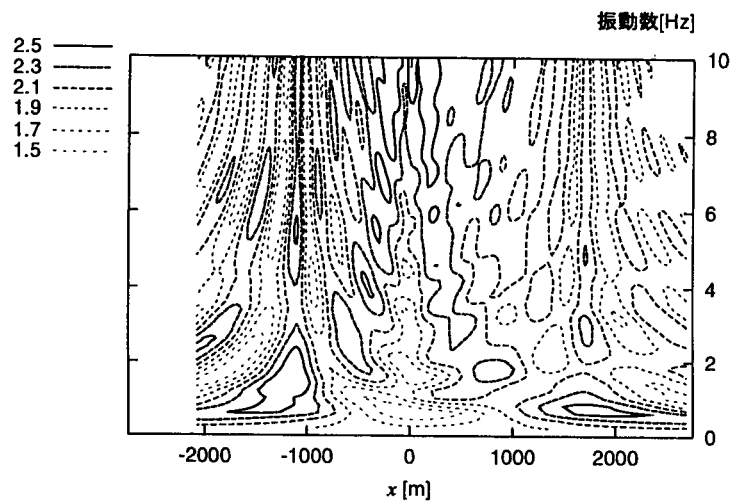


(b) 入射角 30° の平面波に対する増幅率

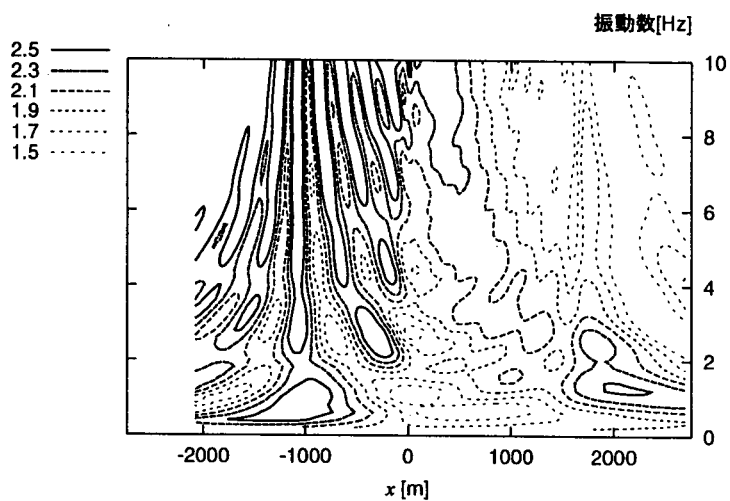


(c) 分布入射波平均増幅率

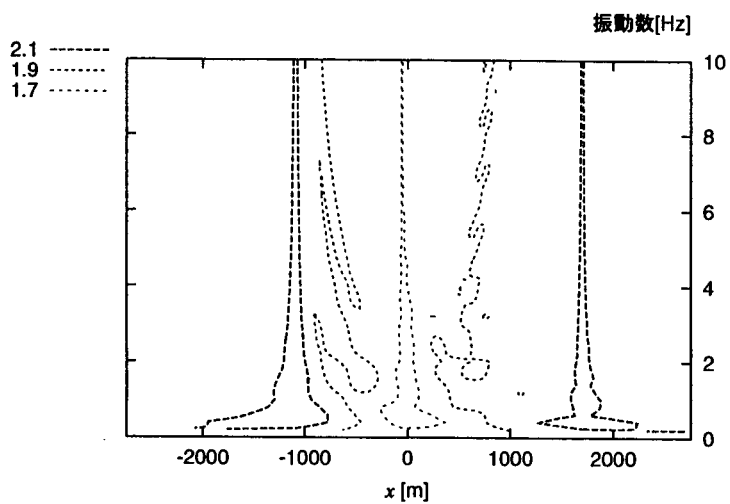
図-2.3.12 平面波に対する増幅率と分布入射波平均増幅率
モデル 12 ($\theta_1=30^\circ$, $\theta_2=20^\circ$, $H=450[\text{m}]$)



(a) 入射角 0° の平面波に対する増幅率



(b) 入射角 30° の平面波に対する増幅率



(c) 分布入射波平均増幅率

図-2.3.13 平面波に対する増幅率と分布入射波平均増幅率
モデル 13 ($\theta_1=30^\circ$, $\theta_2=20^\circ$, $H=600[\text{m}]$)

3. 谷状地盤の形状が地震動増幅特性に及ぼす影響

3.1 平均増幅率

図-2.3.1～図-2.3.13 に示した平面波に対する増幅率は、 x 座標すなわち地盤上の位置と振動数による変動が大きい。また、平面波に対する増幅率は入射角によっても大きく異なっており、谷状地盤に入射する地震動の入射角が不明の場合には、一つの平面波（例えば鉛直入射した平面波）に対する増幅率によって谷状地盤の増幅特性を代表させることはできないことが分かる。

一方、分布入射波平均増幅率は振動数による変動が小さい。図-3.1 に例として、谷状地盤モデル 6 ($\theta_1=30^\circ$, $\theta_2=20^\circ$, $H=300[\text{m}]$) の振動数 2[Hz] と 5[Hz] における増幅率の分布を示すが、これらの傾向が明瞭に現れている。

本研究では以上のことから、分布入射波平均増幅率をダムの低次固有振動数が含まれる範囲 0.2～10.0[Hz] について平均をとったものを、谷状地盤における地震動増幅を表す指標として提案し、平均増幅率とよぶことにする。以下では、谷状地盤の形状が平均増幅率に及ぼす影響や平均増幅率の特性について検討する。

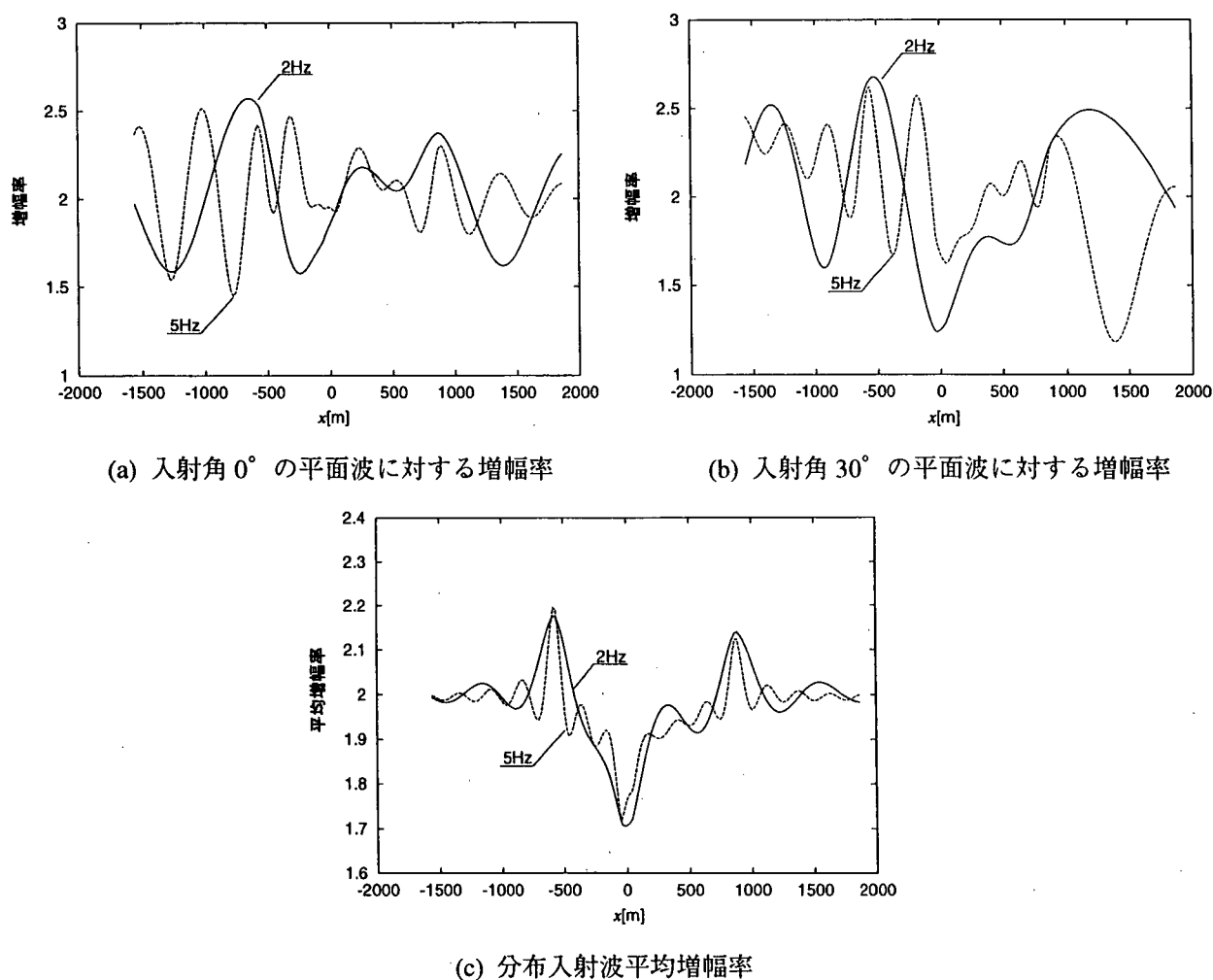


図-3.1 平面波に対する増幅率と分布入射波平均増幅率
モデル 6 ($\theta_1=30^\circ$, $\theta_2=20^\circ$, $H=300[\text{m}]$)

3.2 傾斜角の影響

図-3.2 (a)には θ_2 を 10° で固定し、 θ_1 を 10° 、 20° 、 30° 、 40° と変化させた場合(表-2.1のモデル1, 2, 3, 4), 図-3.2 (b)には θ_1 を 10° で固定し、 θ_2 を 10° 、 20° 、 30° 、 40° と変化させた場合(表-2.1のモデル4, 7, 9, 10)の平均増幅率を比較して示す。これらの図によると、谷の左側と右側の平均増幅率は互いに影響を及ぼさないこと、平均増幅率は斜面の頂上でピークをもち、傾斜角が大きくなるほどそのピークは大きくなることから、このピークでの平均増幅率 a_p は、ピークの大きさが傾斜角 θ にほぼ比例していることから、おおよそ次式で表すことができる。

$$a_p = 2.00 + 0.006\theta \quad (3.1)$$

ここで、右辺第1項は地表面での平均増幅率であり、第2項が谷の傾斜による影響を表している。

また、平均増幅率は斜面下部でトラフをもち、傾斜角が大きいほどトラフでの増幅率は小さくなっている。このトラフでの平均増幅率 a_t は、トラフの大きさが傾斜角 θ にほぼ比例していることから、おおよそ次式で表すことができる。

$$a_t = 1.90 - 0.006\theta \quad (3.2)$$

ここで、右辺第1項は谷底での平均増幅率であり、第2項が谷の傾斜による影響を表している。

式(3.1)(3.2)において、傾斜角 θ の係数の絶対値が等しくなっているが、これは傾斜角が同じならばピークとトラフの大きさが等しいことを示している。また、ピークとトラフを除外すると、斜面の頂上から谷底までの平均増幅率は2.00から1.90まで単調に小さくなっている。

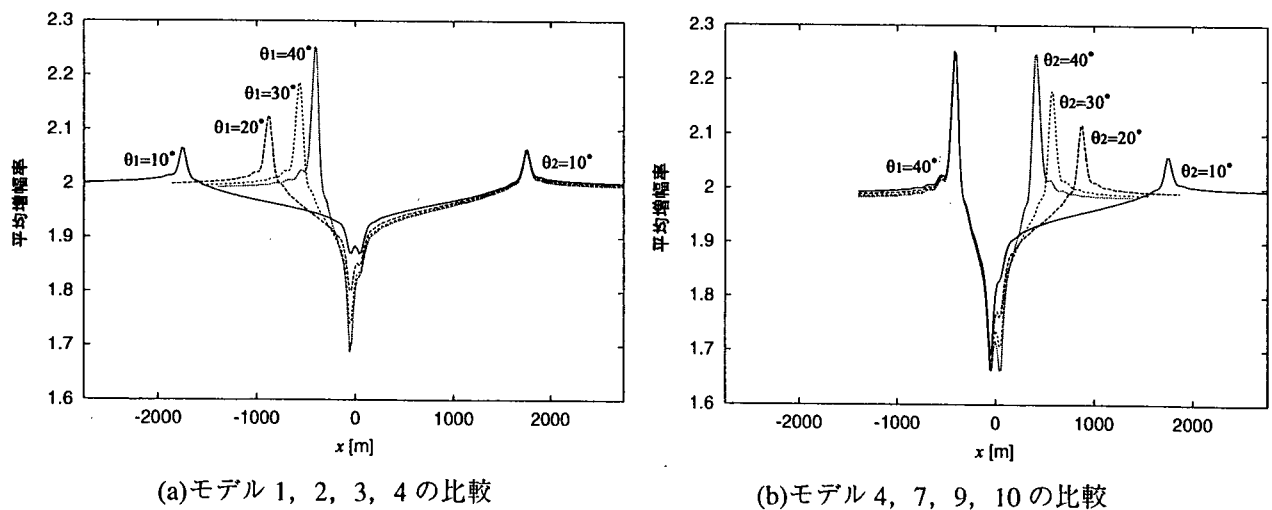


図-3.2 平均増幅率に対する傾斜角の影響

3.3 谷の深さの影響

θ_1 と θ_2 をそれぞれ 30° と 20° で固定し、谷の深さ H を150[m], 300[m], 450[m], 600[m]と変化させた場合(表-2.1のモデル6, 11, 12, 13)の平均増幅率を図-3.3に示す。これによると、平均増幅率のピークは谷の深さ H には影響を受けていない。したがって、ピークでの平均増幅率 a_p は3.2と同様に式(3.1)で表せることが分かる。トラフでの平均増幅率 a_t は谷が深いほど小さくなっているが、ここで検討した範囲ではトラ

フでの平均増幅率は最大でも 0.1 程度しか変化しておらず、谷の深さの影響は比較的小さいと考えられる。

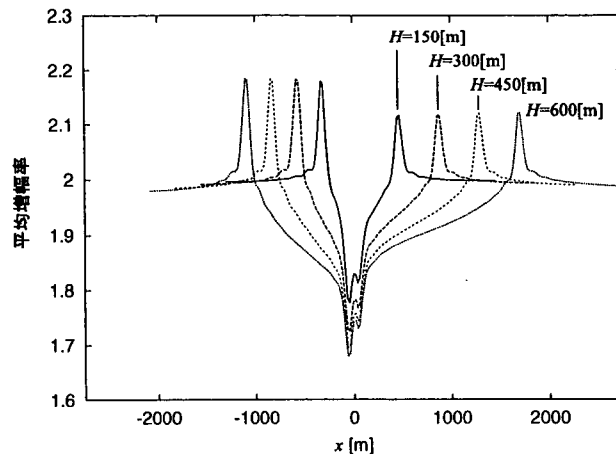


図-3.3 平均増幅率に対する谷の深さの影響（モデル 6, 11, 12, 13 の比較）

3.4 斜面の傾斜が変化する影響

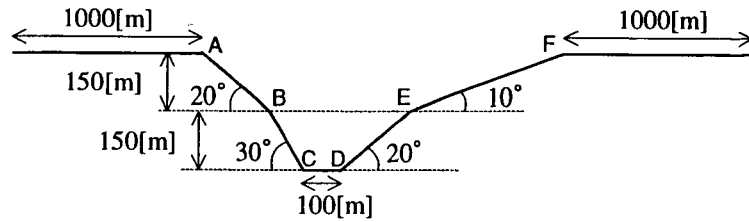
図-3.4 のように斜面の傾斜が深さ 150[m]で変化する 2つのモデル 14, 15 を考える。図に示すように、モデル 14 とモデル 15 は谷底から深さ 150[m]までは同じ地形を有しているが、ともに深さ 150[m]で傾斜が変化する、モデル 14 では斜面が上に凸になるのに対し、モデル 15 では斜面が下に凸になっている。

これらのモデルについて平均増幅率を計算したものが図-3.5 である。図-3.5 には傾斜が変化しないモデル 6 ($H=300[m]$, $\theta_1=30^\circ$, $\theta_2=20^\circ$) の平均増幅率も併せて示した。これによると、谷底から深さ 150[m]まで 3つのモデルの平均増幅率はほぼ一致しており、それ以浅の地形の違いにあまり影響を受けていないことが分かる。ただし、深さ 150[m]及び 0[m]の斜面の傾斜が変化する部分では、その傾斜の変化に応じた変化が見られる。

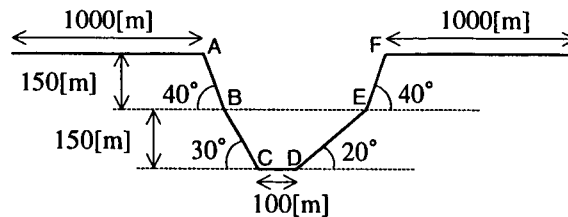
まず、モデル 14 の点 B, E, F では 10° 上に凸になっており、平均増幅率に図-3.2 に示した傾斜角 $\theta=10^\circ$ の斜面の頂上とほぼ同じ大きさのピークがある。ただし、ピークでの平均増幅率の値は点 B, E よりも F の方が大きく、これは傾斜が変化しない場合に平均増幅率が斜面の頂上から谷底まで単調減少することによるものである。

また、モデル 14 の点 A では 20° 、モデル 15 の点 A, F では 40° 上に凸になっているが、それぞれ図-3.2 に示した傾斜角 $\theta=20^\circ$ 及び 40° の斜面の頂上とほぼ同じ大きさのピークがある。したがって、これらのピークの大きさは傾斜がどの程度変化しているかによって決まっており、斜面上の位置には依存していない。

一方、モデル 15 の点 B, E では斜面がそれぞれ 10° 、 20° 下に凸になっているため、平均増幅率にはその傾斜の変化に応じた大きさのトラフがある。図-3.2 と比較すると、これらのトラフの大きさは傾斜角 $\theta=10^\circ$ 及び 20° の斜面の頂上での平均増幅率のピークとほぼ等しいことが分かるが、これらのピークは同じ斜面の下部での平均増幅率のトラフと同じ大きさである。したがって、トラフの大きさも傾斜がどの程度変化しているかにより影響され、斜面上の位置には依存していないと考えられる。



(a) モデル 14



(b) モデル 15

図-3.4 斜面の傾斜が変化する谷状地盤モデル

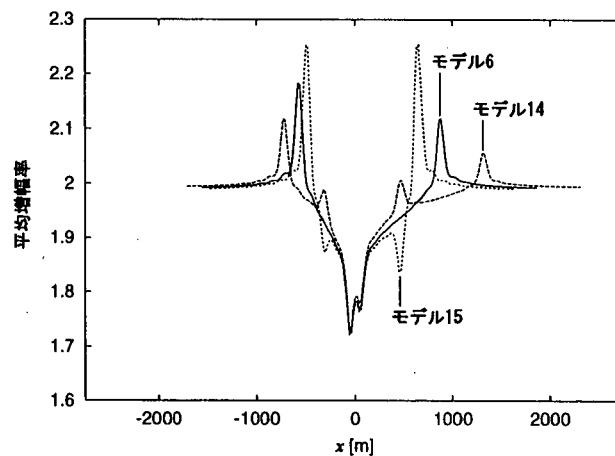


図-3.5 平均増幅率に対する斜面の傾斜が変化する影響 (モデル 6, 14, 15 の比較)

3.5 考察

以上のように、谷状地盤の形状が平均増幅率に与える影響を検討した結果、次のことが明らかになった。

- ① 平均増幅率のピークやトラフは斜面の傾斜が変化する地点に発生し、上に凸になる地点ではピークに、下に凸になる地点ではトラフになる。
- ② 傾斜の変化の程度に比例した大きさのピークあるいはトラフが発生する。
- ③ 傾斜の変化の程度が同じならばピークとトラフの大きさは同じである。
- ④ ピークやトラフの大きさは斜面上の位置には依存しない。
- ⑤ ピークやトラフがない地点での平均増幅率は斜面の頂上から谷底まで単調に減少する。
- ⑥ ピークやトラフでの平均増幅率の値は、それらがなく (傾斜が変化しない) 場合の平均増幅率にピークの大きさを足すあるいはトラフの大きさを引くことによって得られる。

したがって、谷状地盤において、斜面の傾斜が変化し、 α [deg.]の角度で上に凸になっている（下に凸になっている場合 α は負の値をとる）地点での平均増幅率 a は、式(3.1)(3.2)を参考にするとおおよそ次式で表せる。

$$a = 2.00 - 0.10 \frac{D}{H} + 0.006\alpha \quad (3.3)$$

ここで、 D はその地点の深さであり、傾斜が変化しない地点の平均増幅率は斜面の頂上で2.00、谷底で1.90となり、斜面上では直線的に減少していくものとしている。この式によれば、斜面の傾斜が 40° 変化する場合、平均増幅率の最大値は $c = 2.00 + 0.24 = 2.24$ 、最小値は $c = 2.00 - 0.10 - 0.24 = 1.66$ であり、その差は0.58と30%程度の大きさになる。

また、例えば図-3.5 から、特に傾斜の変化が大きい場合には鋭いピークやトラフとなり、平均増幅率が大きく変化していることが分かるが、これは傾斜が変化する地点の周辺では、構造物に入力される地震動が急激に変化することを意味している。そのため、傾斜が大きく変化する地点では、構造物に局所的に大きな歪や応力が発生する可能性があり、特に注意が必要であると考えられる。ただし、3.1 で述べたように、平均増幅率は分布入射波平均増幅率を振動数に関して平均したものであるから、入射波が式(2.17)(2.19)で近似できる場合を想定していることに注意する必要がある。

4. まとめ

本研究では、設計地震動の合理化・高度化に資することを目的として、谷状の地形を有する地盤における地震動特性に関する検討を行った。得られた結果を列挙すると以下のようになる。

- 1) 二次元面外波動場を対象とした境界要素法を用いて谷状地盤の振動解析を行い、形状の異なる様々な谷状地盤モデルについて平面波に対する増幅率と分布入射波平均増幅率を計算した。
- 2) 平面波に対する増幅率は入射角によって大きく異なるため、例えば鉛直入射した平面波のように一つの平面波に対する増幅率によって谷状地盤の増幅特性を代表させることはできないことを示した。
- 3) 分布入射波平均増幅率は振動数による変動が小さいことから、分布入射波平均増幅率をダムの低次固有振動数が含まれる範囲 $0.2 \sim 10[\text{Hz}]$ について平均をとったものを平均増幅率とし、谷状地盤における地震動増幅を表す指標として提案した。
- 4) 形状の異なる様々な谷状地盤のモデルについて平均増幅率を計算することにより、斜面の傾斜や深さ及び傾斜の変化が平均増幅率に及ぼす影響を明らかにした。
- 5) 4)の結果から、谷状地盤において斜面の傾斜が変化する地点での平均増幅率を、傾斜の変化と谷の深さ及びその地点の深さから簡単に評価する式(3.3)を提案した。
- 6) 傾斜が大きく変化する地点の周辺では構造物に入力される地震動が急激に変化するため、構造物に局所的に大きな歪や応力が発生する可能性を指摘した。

謝 辞

埼玉大学工学部建設工学科 茂木秀則博士には，境界要素法の数値解析プログラムをご提供頂いた．末筆ながら厚く御礼申し上げます．

参考文献

- 1) 土木学会編：エネルギー施設，動的解析と耐震設計第3巻，1989.
- 2) Bouchon, M.: Effect of topography on surface motion, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 63, No. 3, pp. 615-632, 1973.
- 3) Aki, K. and Larner, K. L.: Surface motion of a layered medium having an irregular interface due to incident plane SH waves, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 75, pp.933-953, 1970.
- 4) 例えば，佐藤泰夫：弾性波動論，岩波書店，1978.
- 5) 茂木秀則，川上英二：不整形地盤における SH 波の入射境界増幅率と分布入射波平均増幅率，土木学会論文集，No.605/I-45, pp.91-103, 1998.
- 6) 宇津徳治：地震学，第2版，共立全書，1984.
- 7) 今村勤：物理とグリーン関数，岩波書店，1978.