

仮想的垂直二次元水理地質モデルに基づく 我が国の水理特性の検討

1992年8月

動力炉・核燃料開発事業団
東 海 事 業 所

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

〒319-11 茨城県那珂郡東海村大字村松 4-33

動力炉・核燃料開発事業団 東海事業所

技術開発推進部・技術管理室

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technology Management Section Tokai Works Power Reactor and Nuclear
Fuel Development Corporation 4-33, Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun,
Ibaraki-ken 319-11, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development
Corporation) 1992

公 開 資 料
P N C T N 8410 92-168
1 9 9 2 年 8 月

仮想的垂直二次元水理地質モデルに基づく
我が国の水理特性の検討

内田 雅大* 岡本 二郎**

要 旨

本報告書の目的は、現状の知見に基づきニアフィールドでの水理及び天然バリア中での核種移行を評価する上での条件となる我が国の水理特性の範囲をモデル解析によって導出するとともに、種々のパラメータの影響を評価することである。

地下水理は、様々な要因によって支配されるが、このうち特に、地下深部の岩体の透水係数については測定例が少なく、詳細な解析を実施可能な地域は限定されざるを得ない現状である。

他方、原子力委員会が策定した「高レベル放射性廃棄物の地層処分研究開発の重点項目とその進め方」においては、我が国における地層処分の技術的実現可能性を、地域を特定することなく幅広く示していくことが求められている。上記の要件を考慮し、地域に固有の特性を合理的な範囲で包絡可能な水理条件に基づいた流動解析を行うことによって水理パラメータを評価することとした。

本報告書で記述する水理解析は、最も不確実性の大きい因子と考えられる地下深部の岩体の透水係数が解析結果の曖昧さにつながることを避けるため、動水勾配を水理条件の尺度として捉えることとした。また、保守的な動水勾配を得るために、地層は地表まで飽和されており、我が国の急峻な地形がそのまま固定水頭として地下水流动の駆動力となる様な仮想的な概念モデルを採用することとした。本報告書においては、以下の要因について我が国における地形を整理し、保守性が担保されるような選択を行うことにより水理地質モデルを構築した。

- ① 地形断面形状として山頂標高、山体斜面の勾配、平野規模
- ② 境界条件としての領域背後の高山の影響、海側あるいは塩淡境界の影響、谷側においては隣接する水系との干渉
- ③ 透水係数分布としての表層、断層の効果

上記の要件を組み合わせることにより、19ケースのモデルを構築し、FEMWATERを用いた垂直二次元定常流動解析を行った。

その結果、急傾斜の斜面を挟む2本の断層を想定した場合、急傾斜の斜面、高透水性の厚い表層、平野規模の小さい場合等では、動水勾配の最大値が増加する傾向を示した。逆に背後に高山が存在するケース、2本の断層が存在する場合の一部等では、動水勾配の最大値が減少する傾向を示した。また、動水勾配としては0.01から0.61の範囲であった。

* 東海事業所 環境技術開発部 地層処分開発室

**現在 鹿島建設(株) 土木設計本部 第3設計部

目 次

1. はじめに	1
2. 概念モデルとパラメータ値の設定	1
2.1 解析手法	1
2.2 概念モデル	2
2.3 パラメータ値の設定	17
2.4 ケース設定	18
3. 解析結果	20
4. 今後の課題	29
5. 謝 辞	31
6. 参考文献	32

表 一 覧

表-1	我が国の傾斜別面積比率	4
表-2	解析ケース	19
表-3	各モデルにおける動水勾配の最大値および最小値	20

図 一 覧

図-1	平野に面する山体の山頂標高	5
図-2 a	山地内部の山の斜面規模	6
図-2 b	山地内部で傾斜 60 %以上の斜面の規模	7
図-3	平野に面する山体の斜面傾斜	8
図-4 a	山地内部の山の斜面傾斜	9
図-4 b	山地内部で斜面規模 1500 m以上の斜面の傾斜	10
図-5	我が国の平野の奥行き規模	11
図-6 a	地形モデル(1)	13
図-6 b	地形モデル(2)	14
図-7	広域モデル	15
図-8 a	地下 500 mにおける動水勾配(1)	21
図-8 b	地下 500 mにおける動水勾配(2)	22
図-8 c	地下 500 mにおける動水勾配(3)	23
図-8 d	地下 500 mにおける動水勾配(4)	24
図-9 a	地下 1000 mにおける動水勾配(1)	25
図-9 b	地下 1000 mにおける動水勾配(2)	26
図-9 c	地下 1000 mにおける動水勾配(3)	27
図-9 d	地下 1000 mにおける動水勾配(4)	28

1. はじめに

地下水理は、様々な要因によって支配されると考えられる。そのうち、特に、地下深部の岩体の透水係数については測定例が少なく、詳細な解析を実施可能な地域は限定されざるを得ない現状である。

他方、原子力委員会が策定した「高レベル放射性廃棄物の地層処分研究開発の重点項目とその進め方」においては、我が国における地層処分の技術的実現可能性を、地域を特定することなく幅広く示していくことが求められている。

以上の二つを考え併せれば、各地域の深部地下水理の詳細な研究を行うに先立ち、まず、地域に固有の特性を合理的な範囲で包絡可能な条件で代表させ、このようにして得られた水理条件に基づいた流動解析を行うことによって得られる水理パラメータに基づき地層処分システム性能のうちどの要素がどの程度表現され得るかを把握することが重要と考えられる。

本報告書で記述する水理解析は、最も不確実性の大きい因子と考えられる地下深部の岩体の透水係数が解析結果の曖昧さにつながることを避けるため、動水勾配を水理条件の尺度として捉えることとした。また、保守的な動水勾配を得るために、地層は地表まで飽和されており、我が国の急峻な地形がそのまま固定水頭として地下水流动の駆動力となる様な仮想的なモデルを採用することとした。この概念モデルの作成と、対応するパラメータの設定については、次節以降において記述する。

2. 概念モデルとパラメータ値の設定

2.1 解析手法

解析は、有限要素法による垂直二次元地下水解析コード(FEMWATER,Yeh and Ward, 1980)⁽¹⁾を用いて、定常状態の地下水流动のシミュレーションを行った。地下水流动場は、多孔質媒体と仮定し、ダルシー則と質量保存則に基づく下記の方程式で記述される。

$$F \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial H}{\partial x} + K_{xz} \frac{\partial H}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{xx} \frac{\partial H}{\partial x} + K_{xz} \frac{\partial H}{\partial z} \right) + Q$$

$$F = \frac{\theta}{n} \alpha + \beta \theta + \frac{d \theta}{d h}$$

$$H = h + z$$

ここで、
 h : 圧力水頭(L)
 θ : 体積含水率(-)
 n : 有効間隙率(-)
 K_i : 透水係数(L/T)
 Q : 注入流量あるいは排水流量
 t : 時間(T)
 x : x 方向(水平方向)の座標(L)
 z : z 方向(鉛直方向)の座標(L)
 α : 媒体の圧縮率(1/L)
 β : 地下水の圧縮率(1/L)

2.2 概念モデル

ここでは、動水勾配を評価する上で、地下水流動を支配する要因として、

- ① モデル形状(地形断面)
- ② 境界条件
- ③ 透水係数分布

の3つを考慮することとし、それぞれ合理的な範囲での上限値を定めることによって垂直二次元概念モデルを作成した。

① モデル形状(地形断面)

地下水流動は、本来三次元的なものであるため、垂直二次元解析では複雑な三次元的流動を正確に記述することは困難である。特に、下流側に向かって流線が収束するような盆地地形については、垂直二次元解析より流速が増加するため、保守性という観点からは問題となる。

三次元的地形を二次元垂直断面で特徴付けるに当たって、地下水流出側での上昇流の存在の可能性という観点から、平野に面しているため上昇流の発達の少ない場合と、山地内部に位置し上昇流の発達が著しいと予想される場合とに区別することができると考えられる。前者の場合については、海岸に至る断面を設定する場合、山頂を通過する断面は鞍部を通過する断面に較べ高いポテンシャルを持つことから、保守的な流動を代表することが可能と考えられる。一方、後者のような山地内部においては、一般に河川の下刻作用のため、尾根が河川を挟んで対向する場合が多い。このような場合には、①河川あるいは稜線に平行な大局的な流動系の成分と②河川に直交する局所的な流動系の成分とに分解することが可能と考えられる。この場合、①の平均的勾配は、稜線の平均勾

配あるいは河川の勾配に支配されるため緩やかな断面を呈するが、②は山体自体の斜面傾斜が直接反映されるため急峻な断面形状となる。従って、後者の動水勾配としては②の断面を考慮することにより保守的な評価を行うことが可能と考えられる。

以上の観点に立ち、我が国の地形を保守的に代表しうるモデル断面の形状を検討した。

地形モデルとしては、下記の要因を考慮して作成することとした。

地形断面を定める際に動水勾配に影響を及ぼす要因として、

- a) 山地の斜面規模（山地斜面部の標高差）
- b) 山地の傾斜
- c) 山頂から下流側境界までの距離

を考えられる。これらについて、以下の検討を行い解析モデルを作成した。

a) 山地の斜面規模（山地斜面部の標高差）

ここでは、山体が平野もしくは海に臨む場合と、山地内に位置する場合とに分け山地の標高を設定することとする。この場合、山頂の標高と稜線の鞍部（峠）の標高とが考えられるが、保守性を考慮する観点から山頂の標高で代表させることにした。また、山体の指標として、山体が平野もしくは海に臨む場合については、山頂から標高200mまでの純粹の山地斜面に着目し、山地内に位置する場合には、当該山体斜面のみを下刻する谷が他の山体に発する谷と合流し、緩傾斜の谷となる部分までの山頂からの標高差に着目し、主要な山について検討した。

その結果、山体が平野もしくは海に臨む場合には、山地斜面の規模が900～1,000m級（山頂標高1,100～1,200m）の山が多いとの結果が得られた（図-1）。また、山体が山地内に位置する場合については、上述の山頂から谷までの標高差を検討した結果、海に臨む山とほぼ同じく山地斜面の規模が1,000m～1,100m程度の山が多いとの結果が得られた（図-2 A）。

以上のことから、山体が平野もしくは海に臨む場合については、山地斜面の規模として、1,000m（山頂標高1,200m）を採用した。山体が山地内に位置する場合については、図-2 Bに示すように、60%以上の勾配の斜面で1,600mをやや上回る規模のものが我が国において存在するため、1,600mを想定することとした。

また、後述するように、背後により高い山体が存在し、境界条件が非保守的になる場合がありうるために、背後に3000m級の山体が存在する場合も考慮することとした。

b) 傾斜

傾斜については、表-1に示す我が国の地形勾配別面積⁽²⁾によると、傾斜58.8%以上の斜面が国土の8.3%存在することが分かる。しかし、ここでの値は小規模な地形起伏を示していることから、山体規模での傾斜に比較して大きな値になっているものと考えられる。

表-1 我が国の傾斜別面積比率

勾配分布	傾斜度	0～3°	3～8°	8～15°	15～20°	20～30°	30°以上
		0～5.2%	5.2～14.1%	14.1～27.0%	27.0～36.4%	36.4～58.8%	58.8%以上
面積	km ²	48,450	50,309	81,341	56,386	80,526	28,519
	%	14.0	14.6	23.5	16.3	23.3	8.3

山体が平野もしくは海に臨む場合については、a)で抽出した山の山頂から標高200mまでの山地斜面の最大傾斜が図-3に示すように、30～35%のものが多いとの結果が得られたことから、保守性を加味して40%とすることとした。また、一部、50%を越える急斜面も認められること、および表-1に示されるように傾斜58.8%以上の斜面が国土の8.3%存在することから、保守的なケースとして、60%も検討対象に加えた。

山体が山地内に位置する場合については、図-4 Aに示すように45%程度の斜面が最も出現頻度が高く、最大で75%を上回る斜面が存在するとの結果が得られた。しかし、モデル上用いる傾斜については斜面の規模との整合性を考慮する必要があるため、斜面規模が1,500m以上の大規模のものを選び整理したのが図-4 Bである。図に示されるようにこの規模では、60%をやや上回るもののが存在することが分かる。以上のことから、先に選んだ斜面規模1600mと組み合わせる傾斜として60%を想定することとした。

c) 山頂から下流側境界までの距離

山体が平野もしくは海に臨む場合の、山頂から下流側境界までの距離は、平野の規模によって変化する。我が国の場合、海岸線から標高100mまでの所謂平野部の規模が、大規模な平野がある場合もあれば山地が海岸線にせまっている場合もあり、大きく異なることからパラメータとして変動させることとした。

我が国の固有名称を持つ平野の海岸線から標高100m地点までの距離を整理したのが、図-5であるが、図に示されるように、多くの平野は6～18km程度であり平均で10kmとの結果が得られた。このことから、基本ケースとして平野規模10kmを採用した。

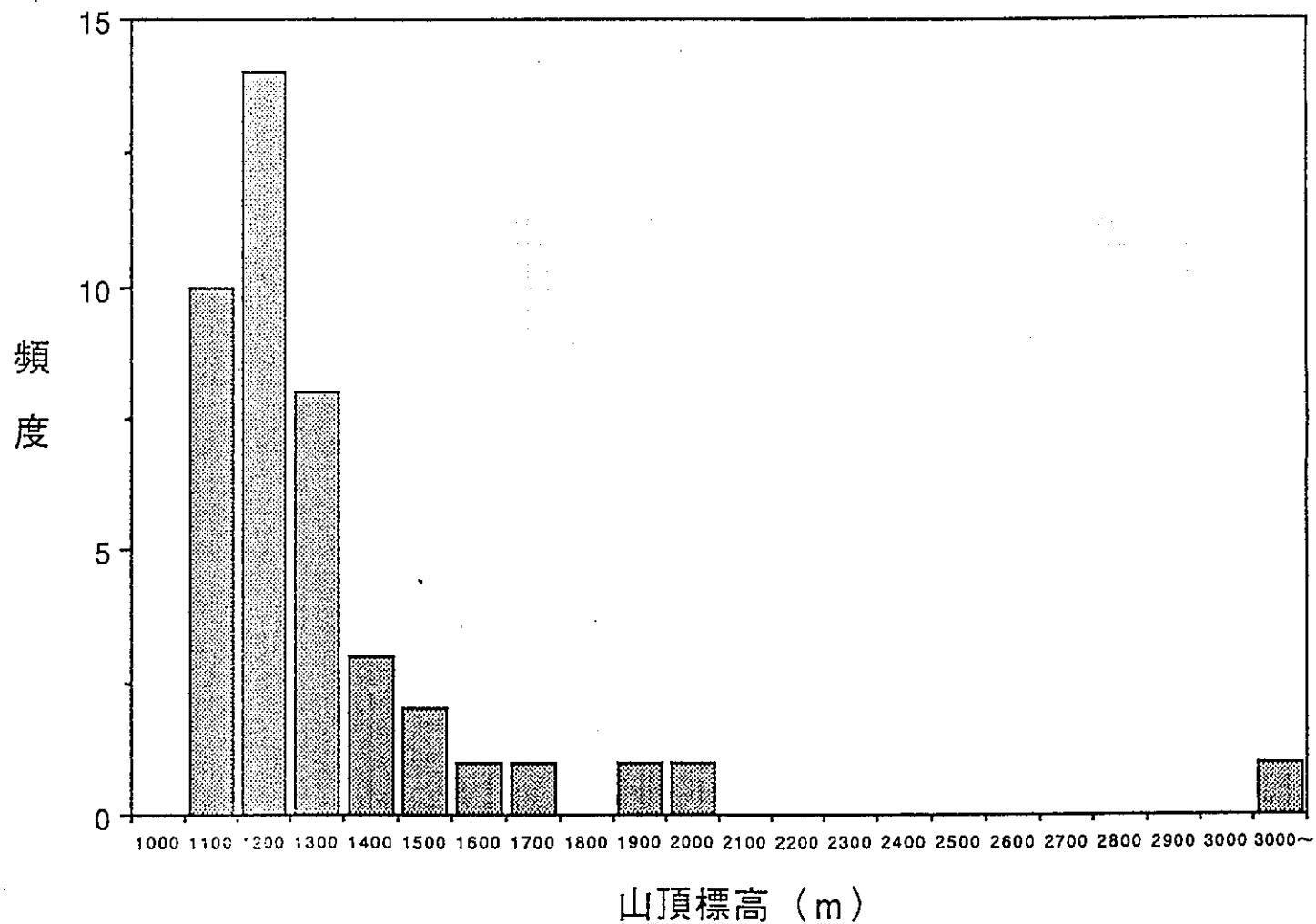


図1 平野に面する山体の山頂標高

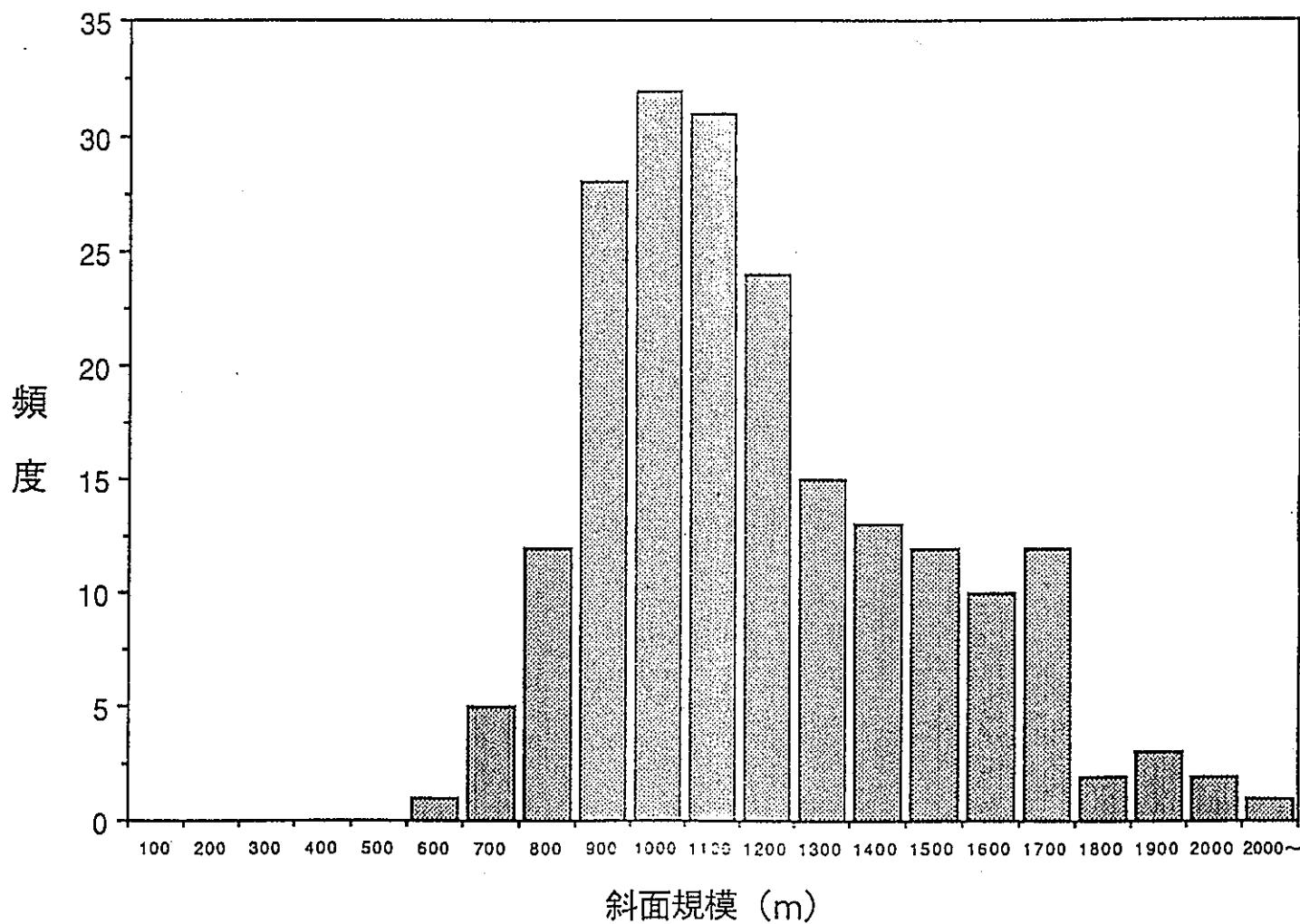


図2 a 山地内部の山の斜面規模

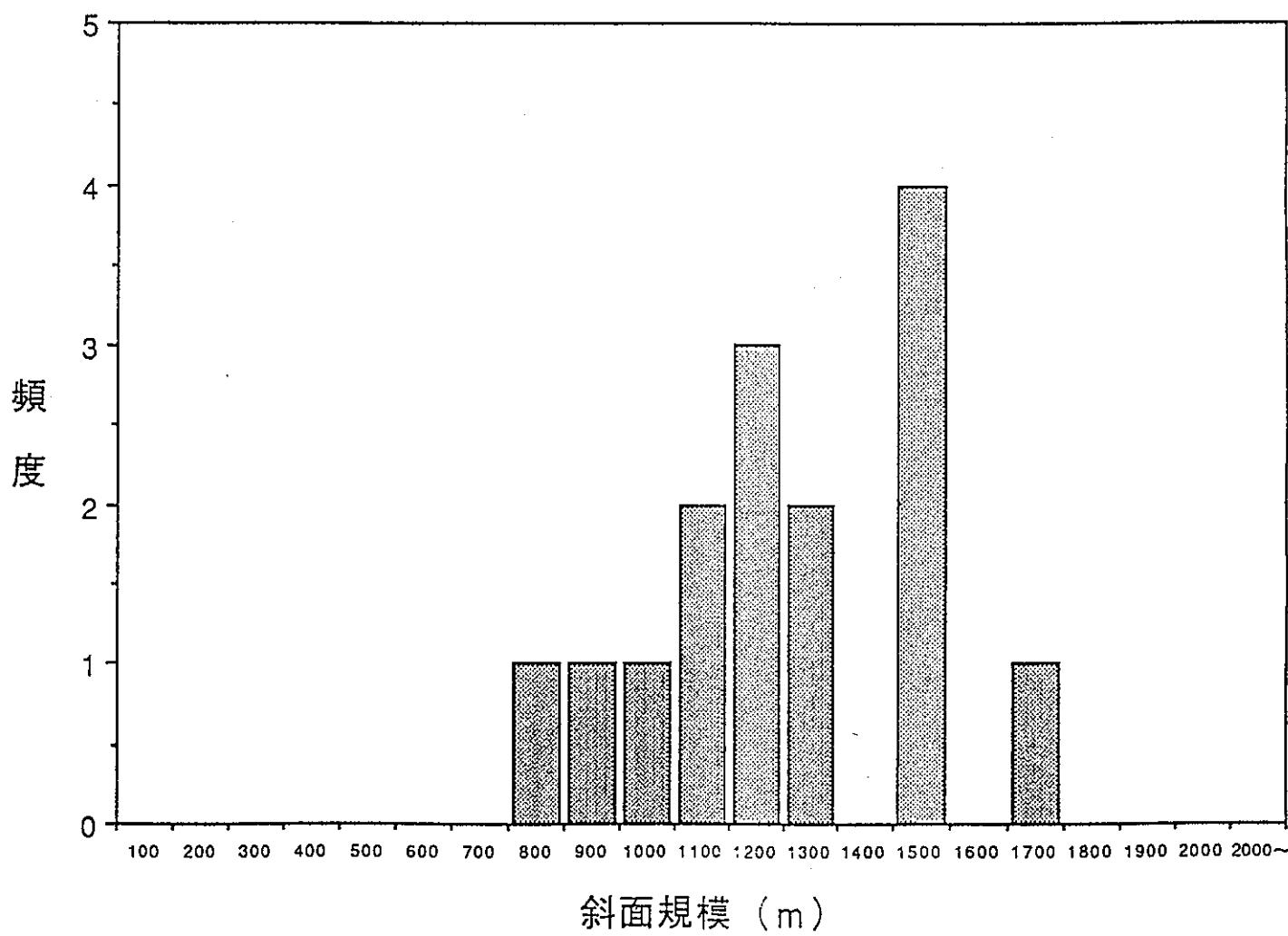


図2 b 山地内部で傾斜 6.0 %以上の傾斜の規模

- 8 -

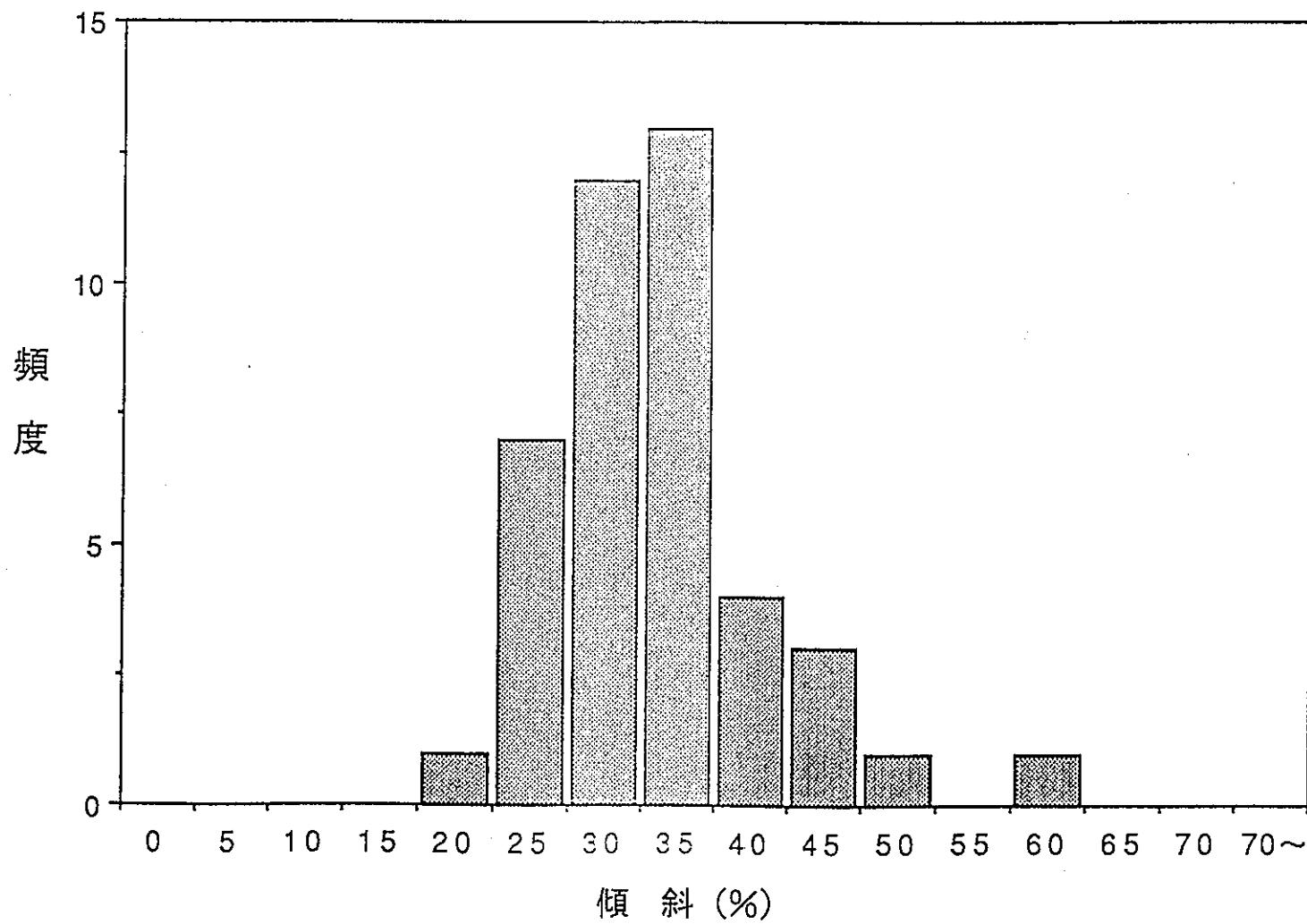


図3 平野に面する山体の斜面傾斜

- 6 -

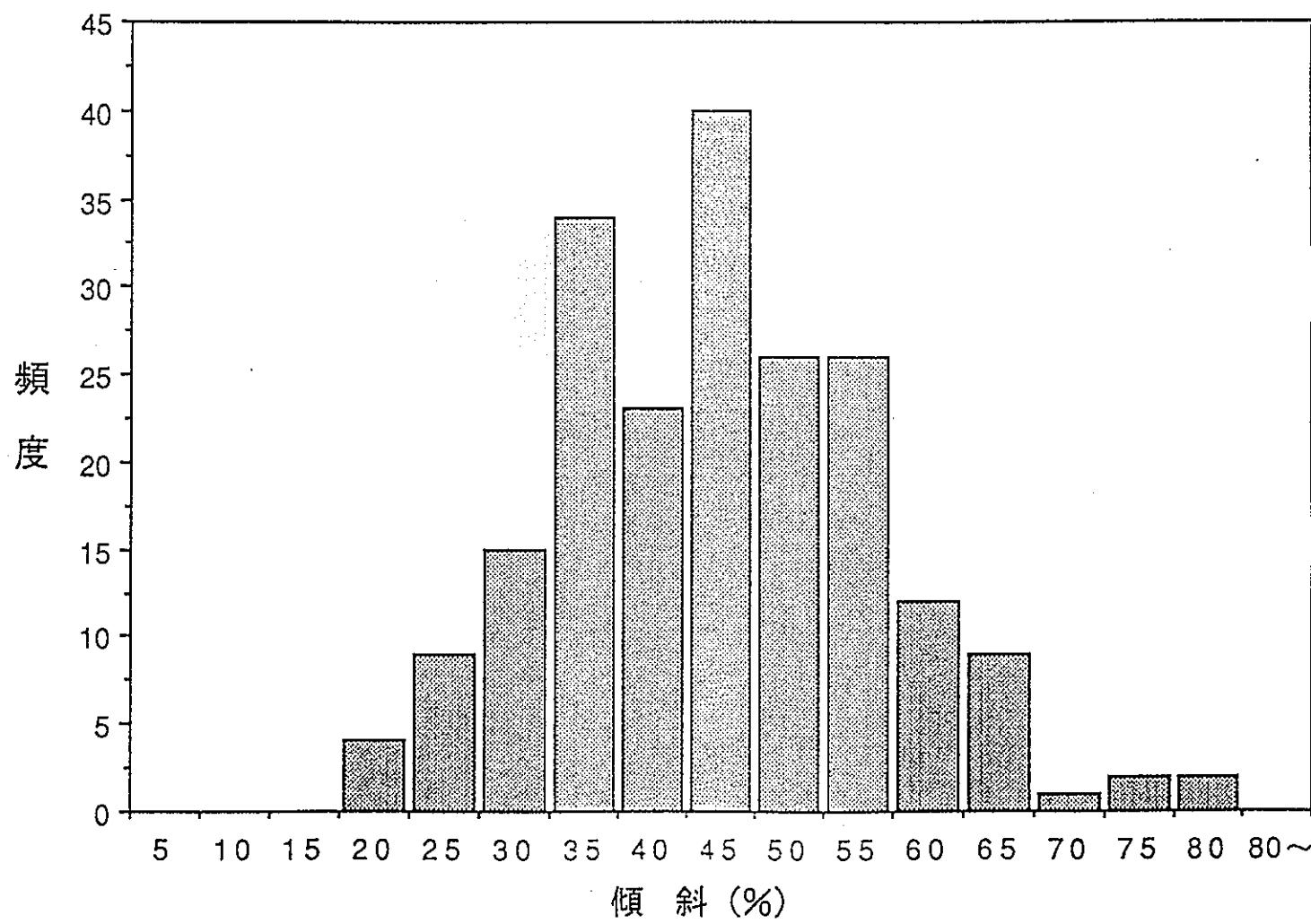


図4 a 山地内部の山の斜面傾斜

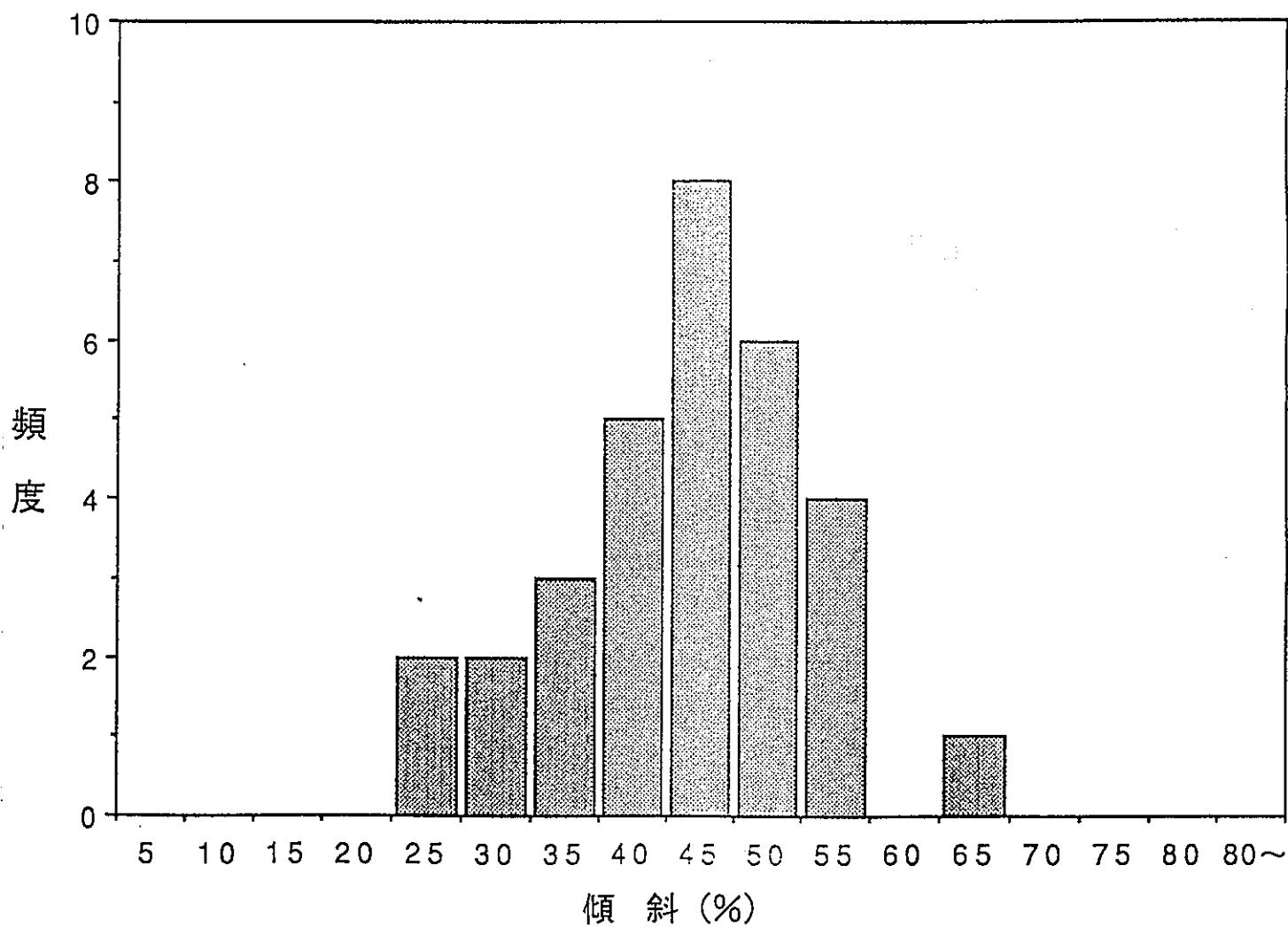


図4 b 山地内部で斜面規模1500m以上の斜面の傾斜

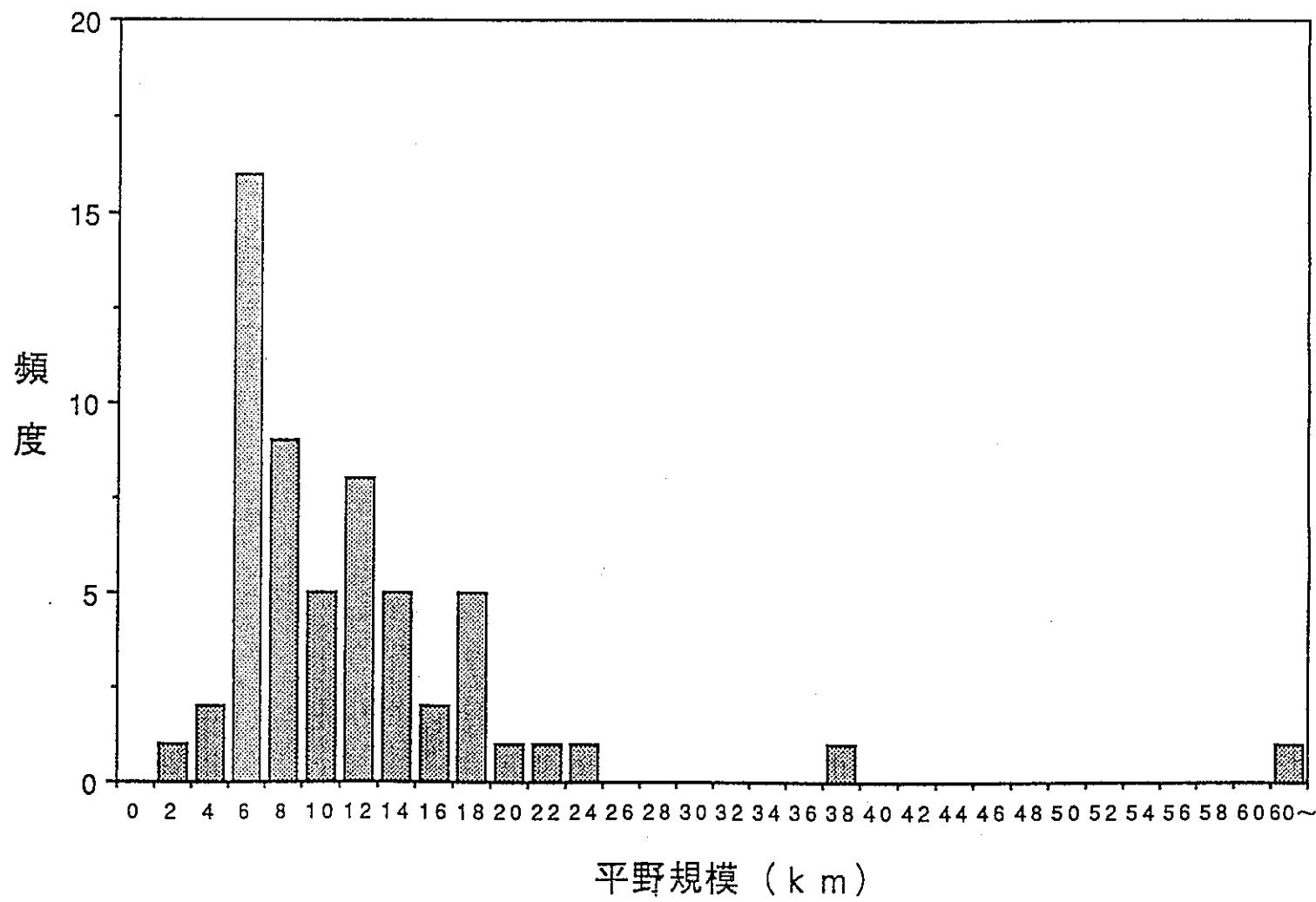


図5 我が国の平野の奥行き規模

これに加え、より小規模の平野のケースとして、平野規模4km のケースを、さらに山地が海岸にせまっているケースとして、平野規模0km のケースも考慮することとした。

また、平野と山地斜面の間には通常漸移部が存在することから、山麓部として1km にわたる10% 傾斜の斜面を設けた。

山体が山地内に位置する場合については、谷を挟んで山地斜面が直接向かい合う場合が多いので、山麓部を省略した。

以上の検討に基づき作成した地形モデルを、図- 6 に示す。

② 境界条件

・流入側境界

流入側境界としては、山地が分水嶺をなす事が考えられるため、基本ケースを不透水境界とした。

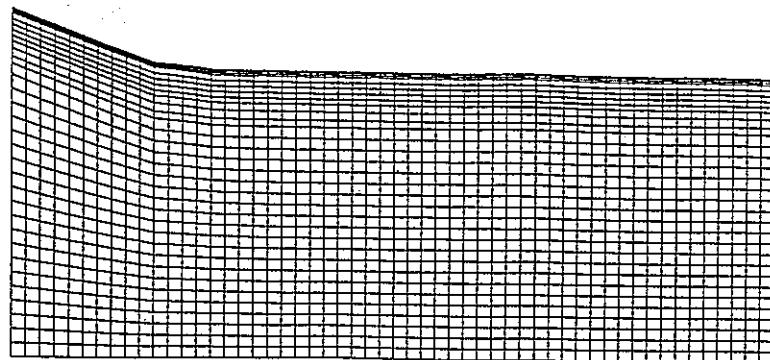
また、この様な準広域スケールでの解析は、より広域の領域の一部を切取って解析するものであるため、解析領域外の高山の影響を受ける可能性があるなど、境界条件が一義的に定められないといった問題がある。そこで、保守的な想定として海岸線から28kmの位置に3,000m級の高山が存在することを仮定し、図- 6 に示した準広域水理モデルを含む広域流動モデル（図- 7）を解析し、準広域水理モデルの境界面で得られた水頭値を与えた固定水頭境界ケースを検討に加えた。

・流出側境界

流出側境界については、山地においては隣接した水系による干渉、海においては塩水クサビの存在によって定まるものと考えられる。これらのいずれにおいても、山地においては流出域における上昇流の発達により、また海においては塩淡の密度差により不透水境界で近似できると考えられる。ここでは、基本ケースとして、流出側境界として鉛直な不透水境界を考えることとする。

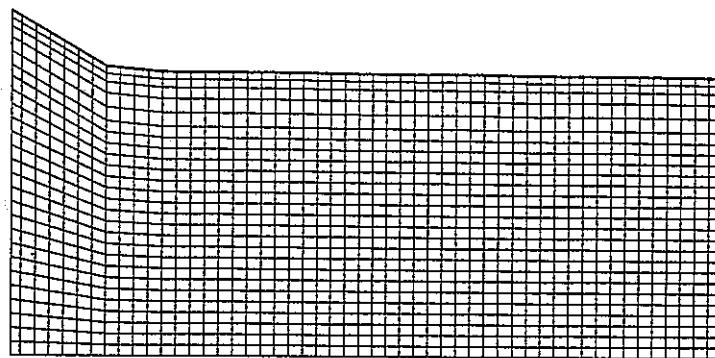
また、平野部の規模が小さい、あるいは山地が直接海にせまっているケースにおいては、不透水境界では流出域における上昇流の発達が過大評価され非保守的となるため、静水圧境界を変動ケースとして加えた。

なお、不透水境界の傾きを考慮した解析、特に塩水クサビのモデル化については、今後の検討課題とする。



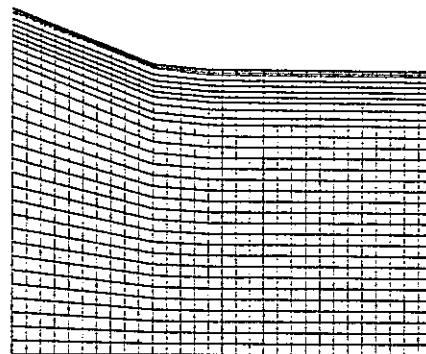
基本地形モデル

(山頂標高 1200m, 斜面傾斜 40%, 平野規模 10km)



急斜面モデル

(山頂標高 1200m, 斜面傾斜 60%, 平野規模 10km)



小規模平野モデル

(山頂標高 1200m, 斜面傾斜 60%, 平野規模 4km)

5 km

図 6-a 地形モデル(1)

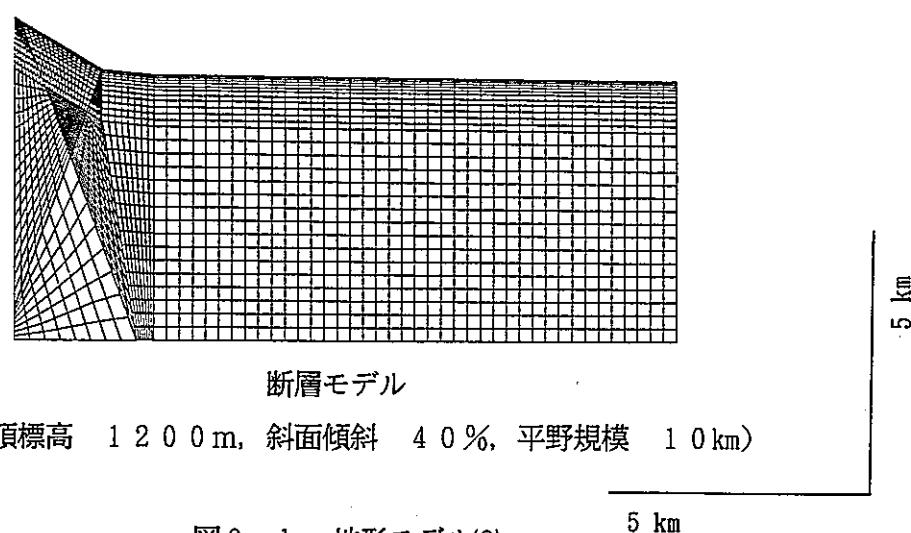
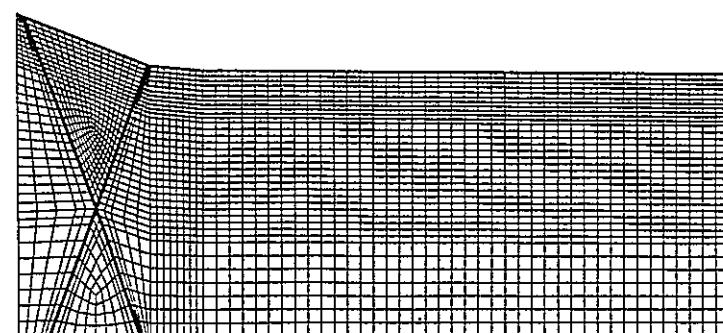
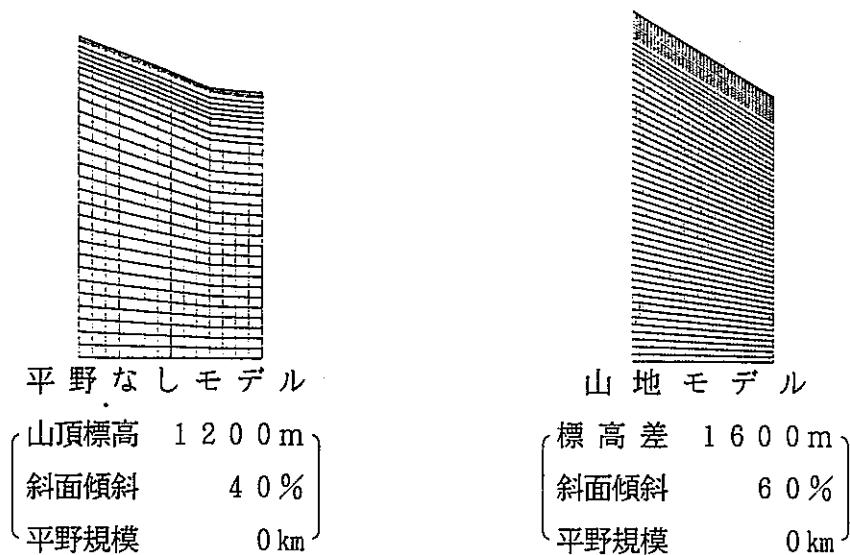


図 6-b 地形モデル(2)

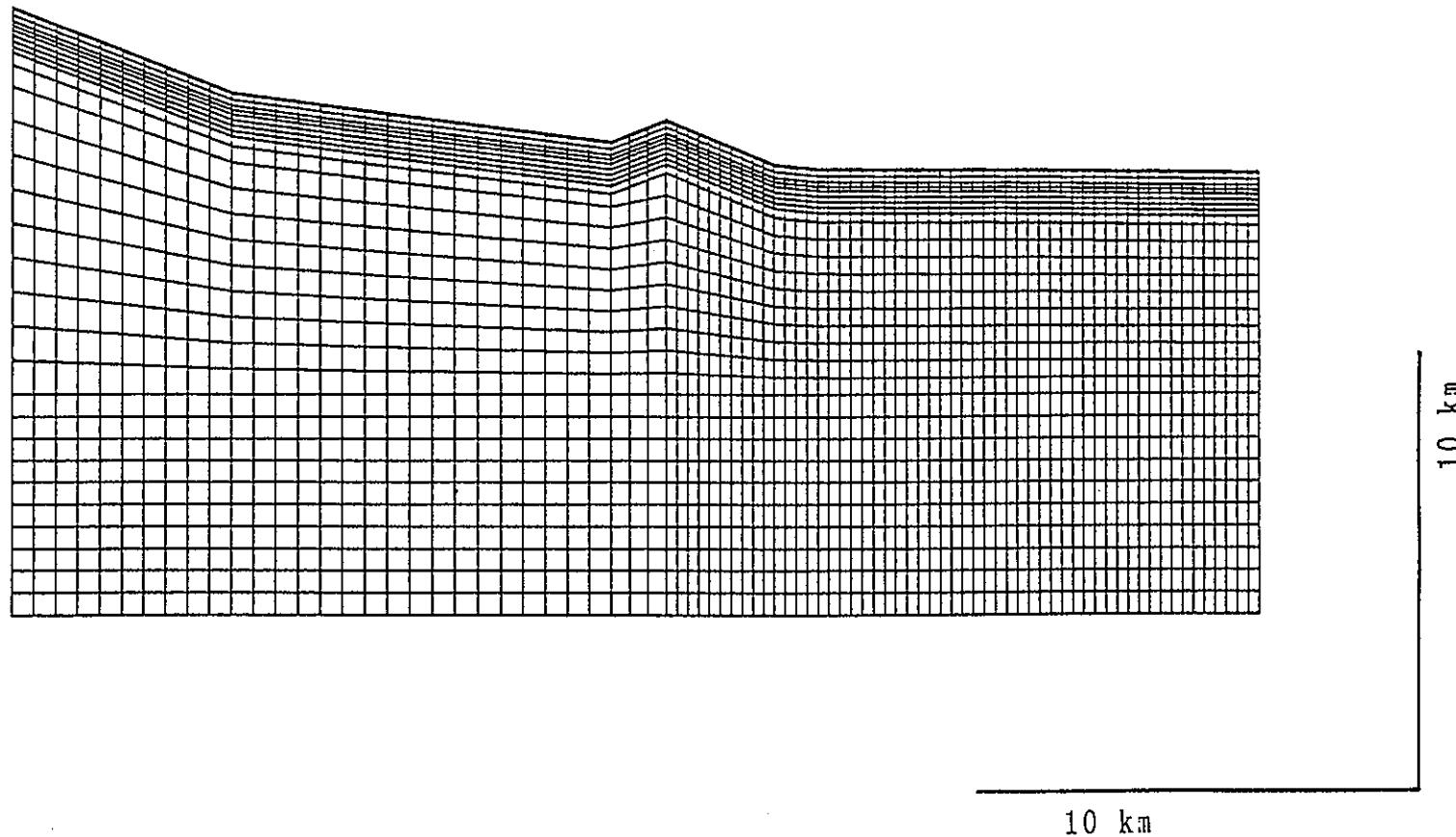


図7 広域モデル

- ・上部境界

本来、上部境界については飽和・不飽和解析を実施するために、涵養量一定の一定流量境界とすることが望ましいが、我が国の場合地表面直下に地下水位面が認められる場合が多いこと、また地下水位面の位置は設定する透水係数の値の影響を受けると考えられるため、保守的に地形面と地下水が一致するよう、地表面での圧力水頭を0に設定した。

- ・下部境界

下部境界は、不透水境界とし、その深度は地下-1,000m の処分場での動水勾配に影響が及ばないように標高-5,000m の位置に設定した。

また、背後に高山があると想定した場合においては、流入側境界と同様に、3000m級の高山が存在することを仮定した広域流動モデルから得られた準広域モデルの下部境界位置での水頭値を与えた固定水頭境界ケースを検討に加えた。

③ 透水係数分布

- ・動水勾配を出力として、上部境界固定で行う解析においては、透水係数の絶対値は結果に影響を及ぼさないが、透水係数の相対比は地下水水流束の集散の割合を規定するため、その変化は動水勾配を変化させる要因となる。
- ・透水係数のコントラストを生じるものとして、
 - 高透水性の表層
 - 高透水性の断層、あるいは砂層等
 - 低透水性の断層

を考慮することとした。

なお、岩盤内部の透水係数については、巨視的透水係数に関する知見が限られていること、広域スケールでの解析においてはローカルな透水係数の違いは平均化されることから、一定とした。

上記のうち、高透水性の表層の厚さについては標準ケースとして30m、また深層風化のある場合も考慮し300mの2ケースを想定した。

断層については、結晶質岩中においては、高透水性を示す場合が多いので、解析上考慮することとした。我が国の場合には、断層は小規模のものを含めると多数存在しており、全てをモデル化することは不可能である。

そこで、今回モデル化をはかる10km程度の範囲内において1本程度存在する規模の断層として、幅10～50mの断層が想定されるとの緒方・本荘(1981)⁽³⁾の研究結果に基づき、幅50mの断層を考慮することとした。この規模の断層は、緒方・本荘は跡津川断層、山崎断層に匹敵する大規模断層であると述べている。このような断層は、軟弱な破碎帯を伴うため、谷あるいは山麓部を通過する場合が多く、リニアメントとして認識可能な三角末端面等の特徴的な地形を形成することが知られている^(4, 5)。

そこで、山麓付近に位置し上向き流れを促進するような傾斜で1本存在するケースを考慮した。また、保守的想定として、これに加え下向き流れを促進するように最もポテンシャルの高い山頂付近に端を発し、もう1本の断層と交差するような断層を持つケースを想定した。このようなケースは、上述の理由により存在確率も低くその通過位置も存在しにくい非常に保守的なケースと考えられる。

低透水性の断層については、堆積岩中においては、周囲より低透水性を示す断層が存在する場合があるため、その効果を見るために山麓付近に上向き流れを促進する位置に1本存在するケースを想定した。

断層を含む解析モデルを図-6 bに示す。

2.3 パラメータ値の設定

本解析のような大領域の解析においては、各要素の規模も数10～数100mの規模となり、このスケールでの巨視的透水係数を設定する必要がある。

巨視的透水係数について調査した例としては、大島(1983)⁽⁶⁾、下茂他(1986)⁽⁷⁾、福田他⁽⁸⁾の研究例がある。

下茂他は、菊間石油備蓄実証プラントにおいて湧水量を実測し、同サイトを構成する花崗岩類（花崗閃緑岩）の巨視的透水係数を 2.5×10^{-8} cm/sとしている。

福田他は、釜石鉱山の延長50mの新規坑道への湧水量から求めた巨視的透水係数、単一孔での低圧透水試験での透水係数、孔間透水試験での透水係数、割れ目解析に基づく透水テンソルとの比較を行い、孔間透水試験での透水係数は選択的経路の透水性に支配されるため最も高い値を示したこと、低圧透水試験は $10^{-5} \sim 10^{-8}$ cm/sの広い幅を持つこと、坑道での湧水量から求めた巨視的透水係数は 2×10^{-8} cm/sであるとの結果を得ている。

文献を調査した結果⁽⁹⁾、花崗岩類を始めとする、8岩種の透水係数は各岩種とも $1 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-8}$ cm/sにモードを持ち、幅としては $1 \times 10^{-8} \sim 1 \times 10^{-2}$ cm/sに多くの測定値が含まれることが分かった。そこで、本解析においては $1 \times 10^{-8} \sim 1 \times 10^{-2}$ cm/sを通常の岩盤の透水係数の範囲とした。

断層の透水係数については、 $5 \times 10^{-6} \sim 8 \times 10^{-3}$ cm/s(チャート中で 1×10^{-1} cm/sの例も報告されている)の範囲が得られている⁽¹⁰⁾。

表層については、 $1 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-8}$ cm/sの広い範囲の透水係数が存在することが文献に示されている^(9, 10)。

本解析の目的は、動水勾配の範囲を設定することである。本解析のように、地形面に沿って圧力水頭を0とする解析においては、透水係数のコントラストが動水勾配を変化させることから、透水係数のコントラストについて検討する。

解析ケースとして、

- ① 一層ケース（透水係数のコントラストなし）
- ② 二層ケース（表層を考慮）
- ③ 二層+断層ケース

での組み合わせとして、

②においては、岩盤の透水係数の範囲 $1 \times 10^{-2} \sim 1 \times 10^{-8}$ cm/sと表層の透水係数の範囲 $1 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-8}$ cm/sとの組み合わせであるが、最も存在しうる岩盤の透水係数は $1 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-6}$ cm/sと表層 $1 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-8}$ cm/sであり、最大6オーダーの透水係数のコントラストが想定しうるが、表層の透水係数が 1×10^{-6} cm/sは砂礫層のような極端なケースと考えられるため、表層の透水係数を 1×10^{-1} cm/sに設定し、岩盤の透水係数については巨視的透水係数の値を参考に、また地下深部での透水係数の減少も考慮し、 1×10^{-6} cm/sに設定(5オーダーの差)した。

③において、②に加えさらに断層の透水係数を設定する必要があるが、上記の文献での値から 1×10^{-2} cm/sを想定した。

さらに、新第三紀の堆積岩の場合、断層部の方が透水係数が低い場合もあることから、断層の透水係数を 1×10^{-9} cm/sとしたケースについても検討した。

2.4 ケース設定

上記の検討に基づき、ケースを表-2のように設定した。

表-2 解析ケース

ケース番号	山地斜面標高差(m)	山地斜面勾配(%)	平野の長さ(km)	岩盤の透水係数(cm/s)	表層		断層		流入側境界条件	流出側境界条件
					厚さ	透水係数(cm/s)	位置	透水係数(cm/s)		
1 2	1000 1000	40 40	10 10	1×10^{-6} 1×10^{-6}	— —	— —	— —	— —	不透水境界 固定水頭境界	不透水境界 不透水境界
3 4 5 6 7	1000 1000 1000 1000 1000	40 40 40 40 40	10 10 10 10 10	1×10^{-6} 1×10^{-6} 1×10^{-6} 1×10^{-6} 1×10^{-6}	30m 30m 30m 300m 300m	1×10^{-1} 1×10^{-1} 1×10^{-1} 1×10^{-1} 1×10^{-1}	— — — — —	— — — — —	不透水境界 不透水境界 固定水頭境界 固定水頭境界 不透水境界	不透水境界 静水圧境界 不透水境界 不透水境界 不透水境界
8 9 10 11 12	1000 1000 1000 1000 1000	40 60 40 60 40	10 10 10 10 10	1×10^{-6} 1×10^{-6} 1×10^{-6} 1×10^{-6} 1×10^{-6}	30m 30m 30m 30m 30m	1×10^{-1} 1×10^{-1} 1×10^{-1} 1×10^{-1} 1×10^{-1}	上向き流れ 上向き流れ 上向き流れ+下向き流れ 上向き流れ+下向き流れ 上向き流れ	1×10^{-2} 1×10^{-2} 1×10^{-2} 1×10^{-2} 1×10^{-9}	不透水境界 不透水境界 不透水境界 不透水境界 不透水境界	不透水境界 不透水境界 不透水境界 不透水境界 不透水境界
13 14	1000 1000	60 60	10 10	1×10^{-6} 1×10^{-6}	— —	— —	— —	— —	不透水境界 不透水境界	不透水境界 静水圧境界
15 16	1000 1000	40 40	4 4	1×10^{-6} 1×10^{-6}	— —	— —	— —	— —	不透水境界 不透水境界	不透水境界 静水圧境界
17 18	1000 1000	40 40	0 0	1×10^{-6} 1×10^{-6}	— —	— —	— —	— —	不透水境界 不透水境界	不透水境界 静水圧境界
19	1600	60	0	1×10^{-6}	—	—	—	—	不透水境界	不透水境界

3. 解析結果

各解析ケースの地表から-500m レベル、-1000m レベルにおける動水勾配の水平変化を、図-8, 9 に示す。また、各レベルにおける最大および最小の動水勾配を表-3 にまとめた。

表-3 各モデルにおける動水勾配の最大値および最小値

ケース 番 号	動水勾配			
	-500m		-1000m	
	最大値	最小値	最大値	最小値
1	0.441	0.015	0.297	0.014
2	0.324	0.046	0.214	0.045
3	0.451	0.015	0.302	0.014
4	0.451	0.011	0.303	0.011
5	0.323	0.046	0.217	0.046
6	0.396	0.045	0.246	0.044
7	0.500	0.014	0.349	0.014
8	0.488	0.012	0.339	0.012
9	0.574	0.012	0.379	0.012
10	0.381	0.021	0.324	0.020
11	0.613	0.023	0.608	0.022
12	0.389	0.011	0.222	0.010
13	0.537	0.013	0.365	0.013
14	0.537	0.010	0.365	0.011
15	0.438	0.041	0.294	0.037
16	0.443	0.015	0.299	0.019
17	0.413	0.193	0.262	0.116
18	0.458	0.120	0.318	0.120
19	0.568	0.289	0.391	0.134

今回の解析の結果、動水勾配の最大値の増加をもたらした要因は、影響の程度の順序として、60% 斜面に断層が2本存在する場合、斜面傾斜が60% である場合、表層厚さが300mである場合、断層が1本存在する場合、平野規模が0kmの場合の順であった。一方、逆に減少傾向を示したのは、上流側に高山を想定した場合（流入側境界を固定水頭境界としたケース）と40% 傾斜に断層が2本存在する場合の一部（地下500m）であった。

今回の解析の結果、最大の動水勾配はケース11（60% 斜面に断層が2本存在するケース）での0.61であったが、図-8, 9 に示されるように動水勾配が高いのは、2本の断層に囲まれたブロック内に限定されていることに留意する必要がある。

表-3 に示すように、保守性を加味した本解析における動水勾配の範囲は、0.01～0.61の間であるとの結果が得られた。今回の解析で得られた動水勾配の最大値自体については、保守的設定のもとに、かつそれらを組み合わせたものであり、通常にくらべて極めて高い動水勾配となっている。従って、このようにして得られた動水勾配の出現頻度は実際の条件下では相当に低くなる可能性が大きいものと思われる。

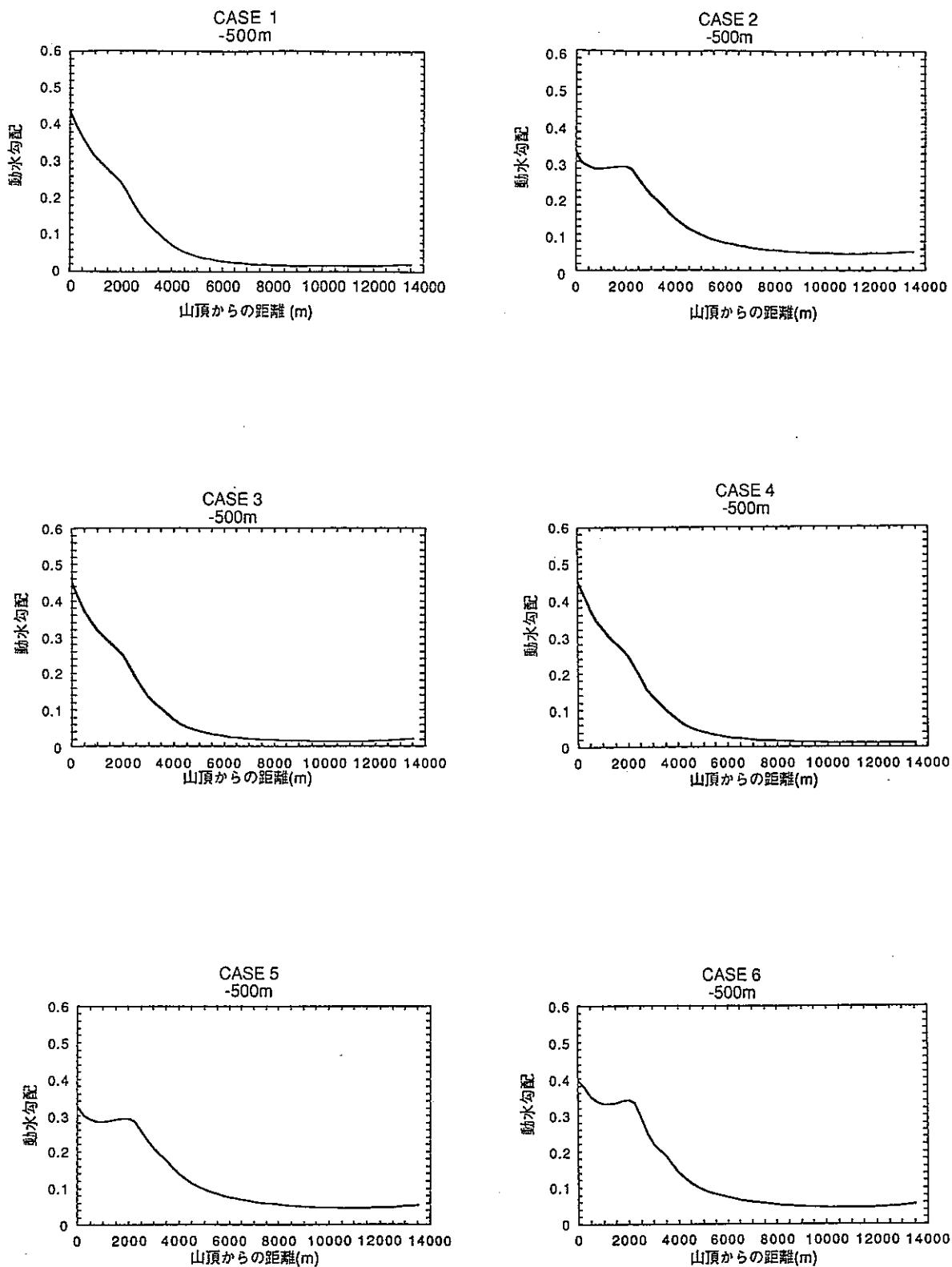


図 8-a 地下 500 m における動水勾配(1)

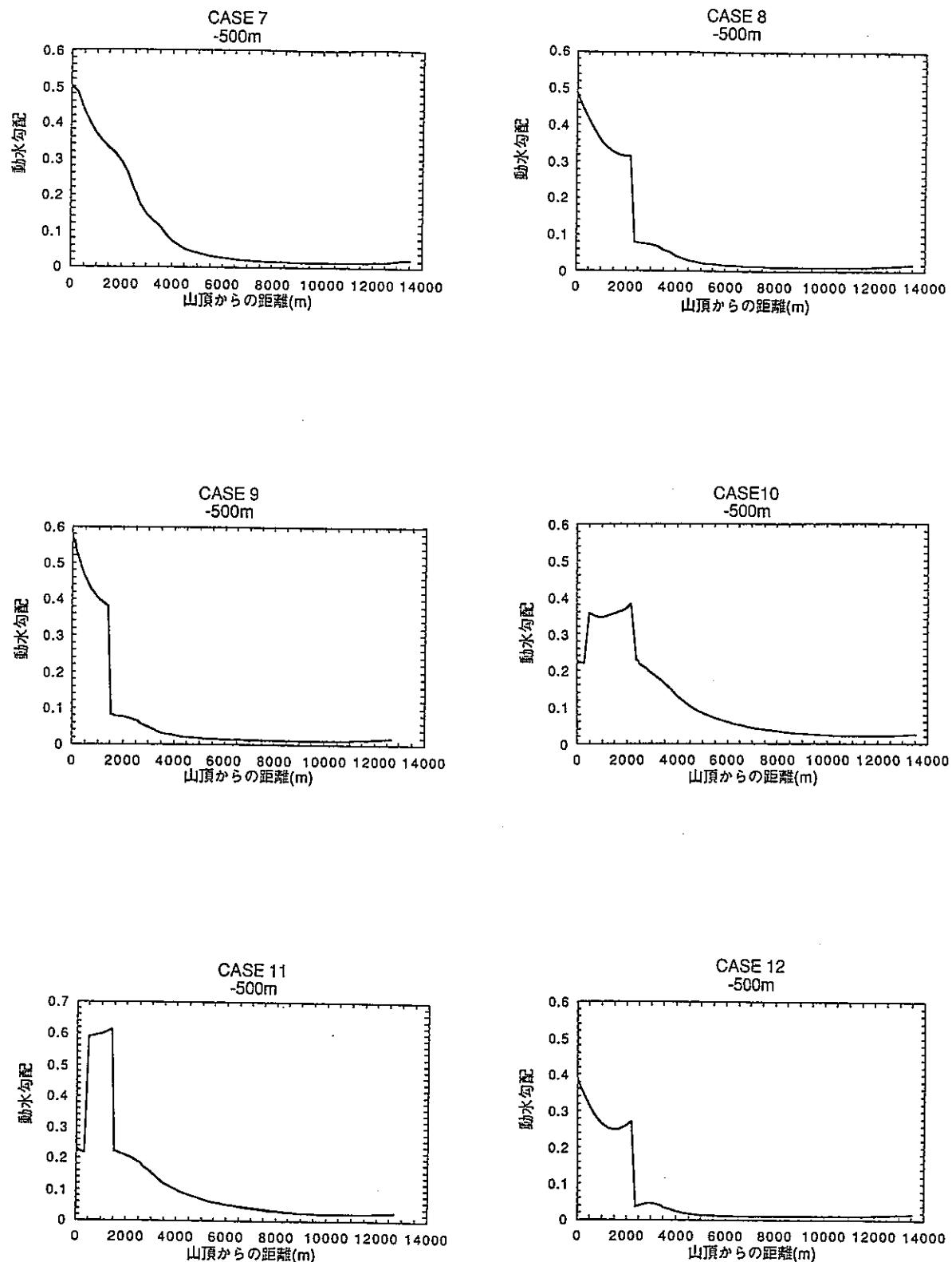


図 8-b 地下 500 m における動水勾配(2)

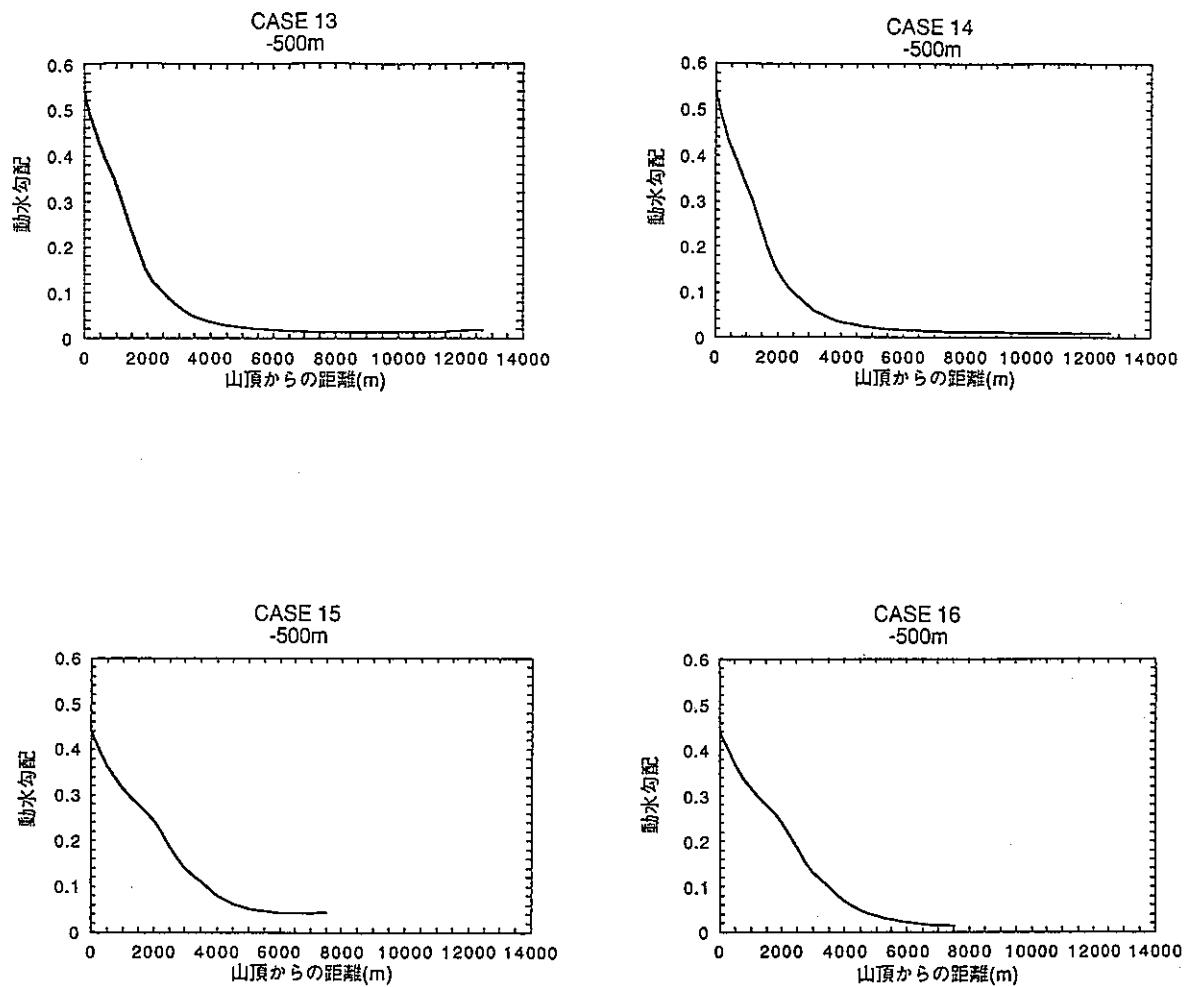


図 8-c 地下 500 m における動水勾配(3)

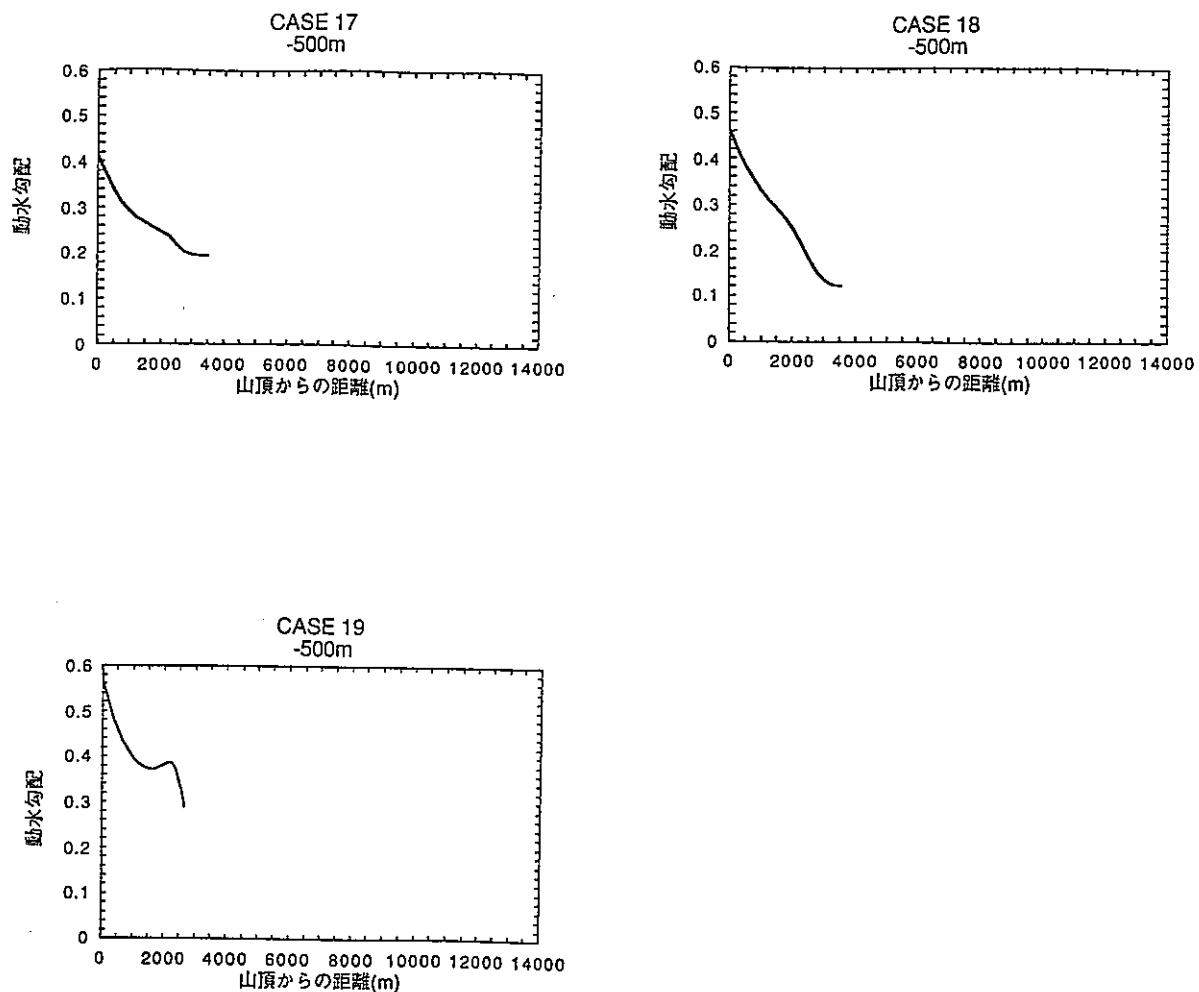


図8-d 地下500mにおける動水勾配(4)

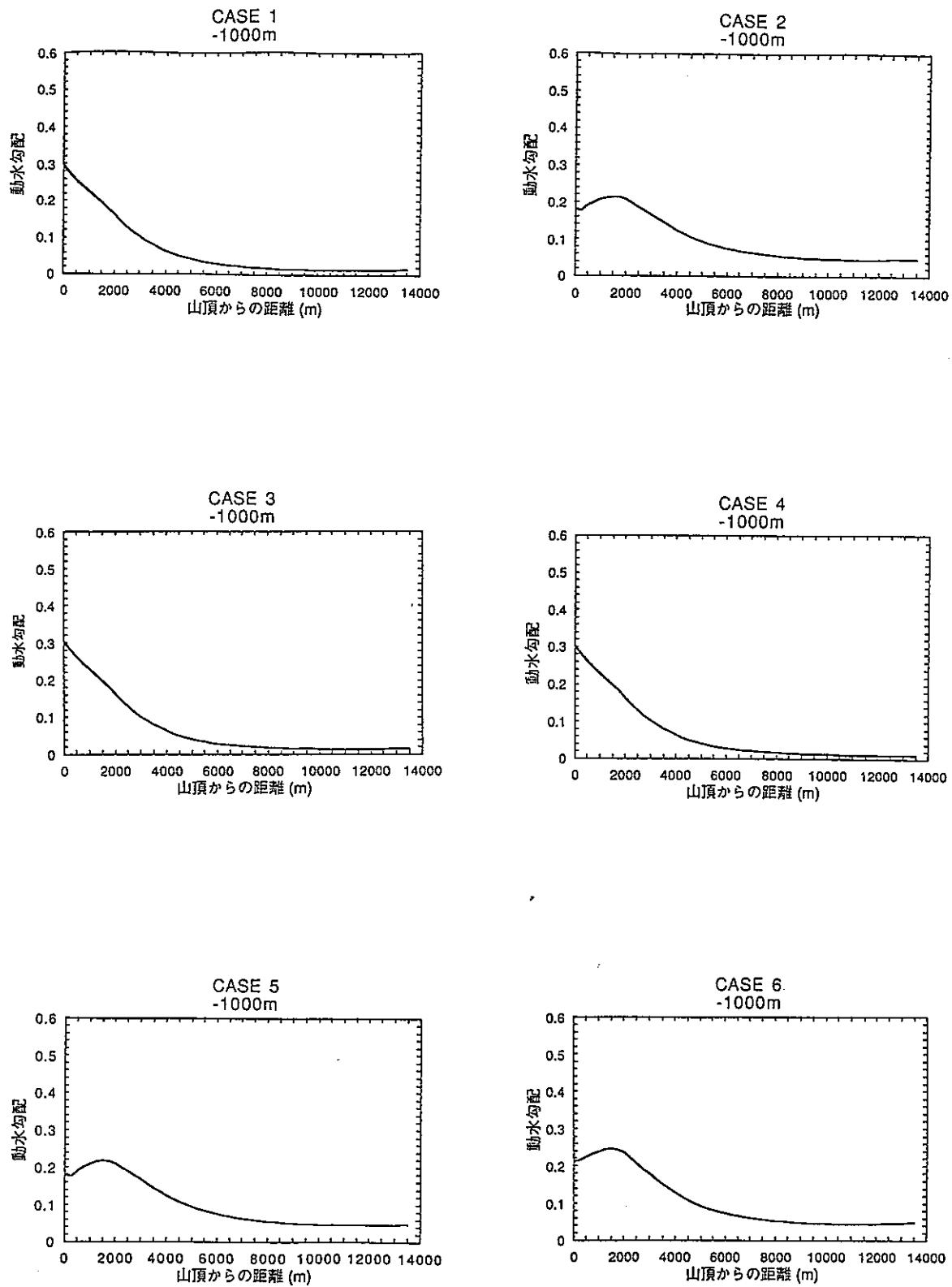


図9-a 地下1000mにおける動水勾配(1)

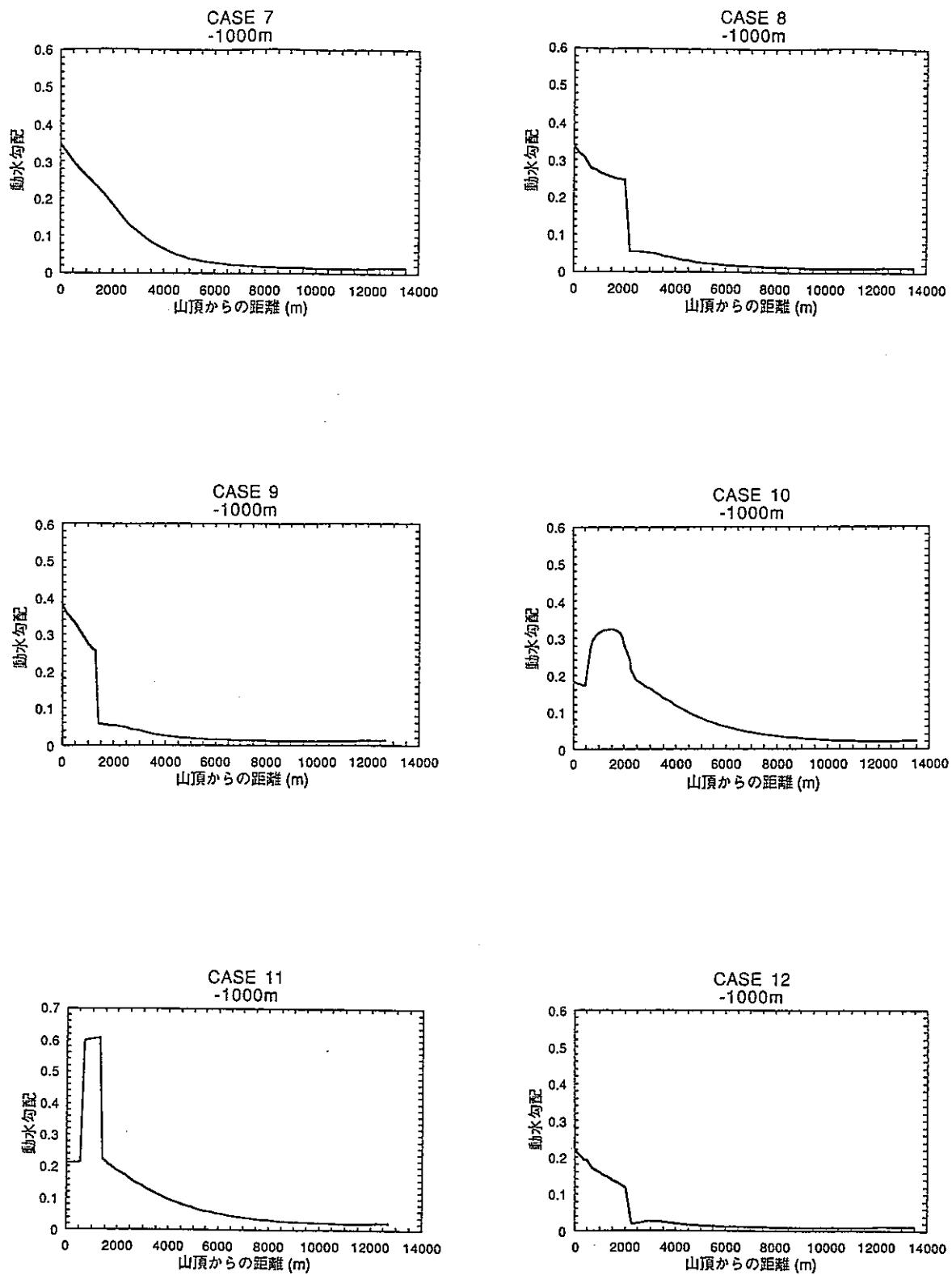


図9-b 地下1000mにおける動水勾配(2)

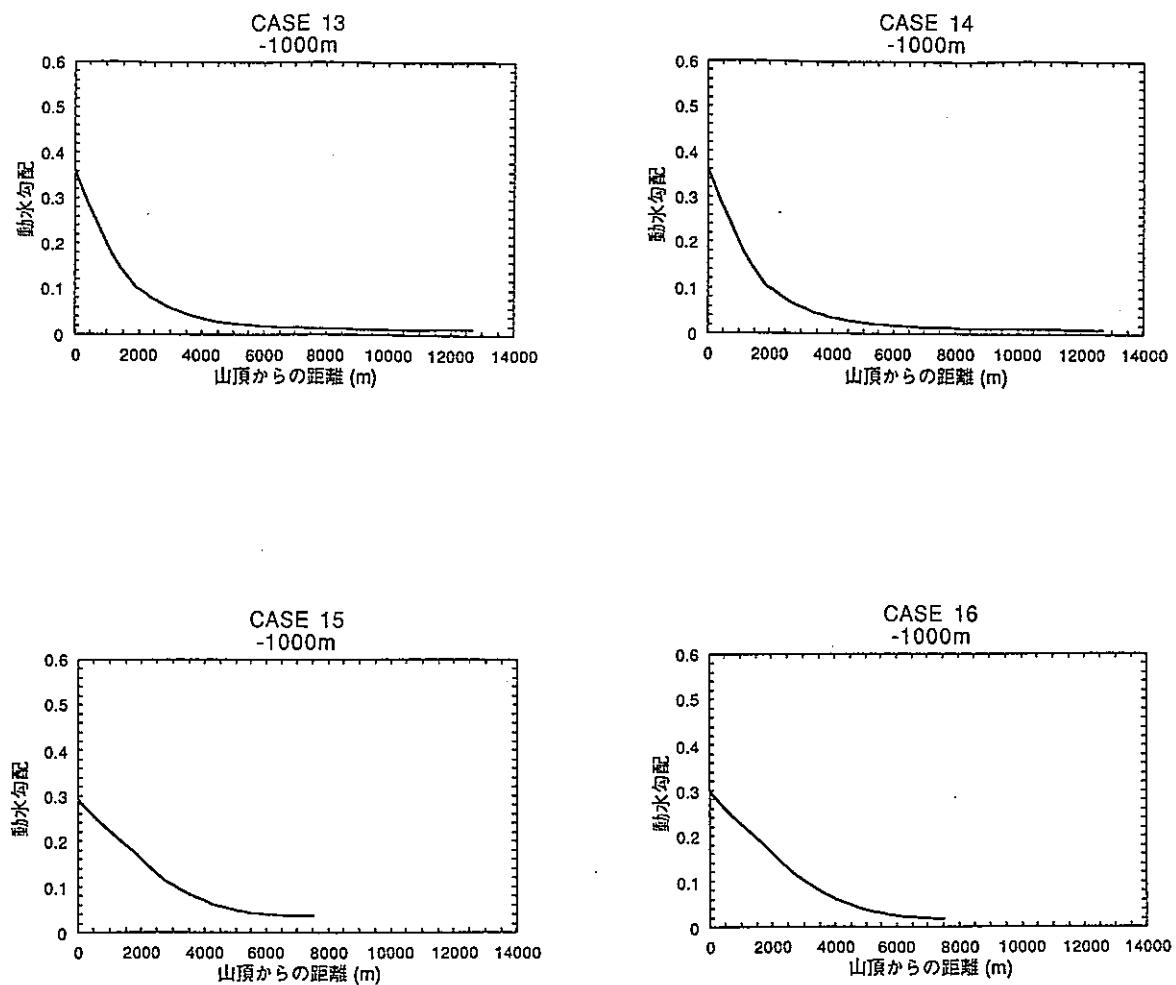


図9-c 地下1000mにおける動水勾配(3)

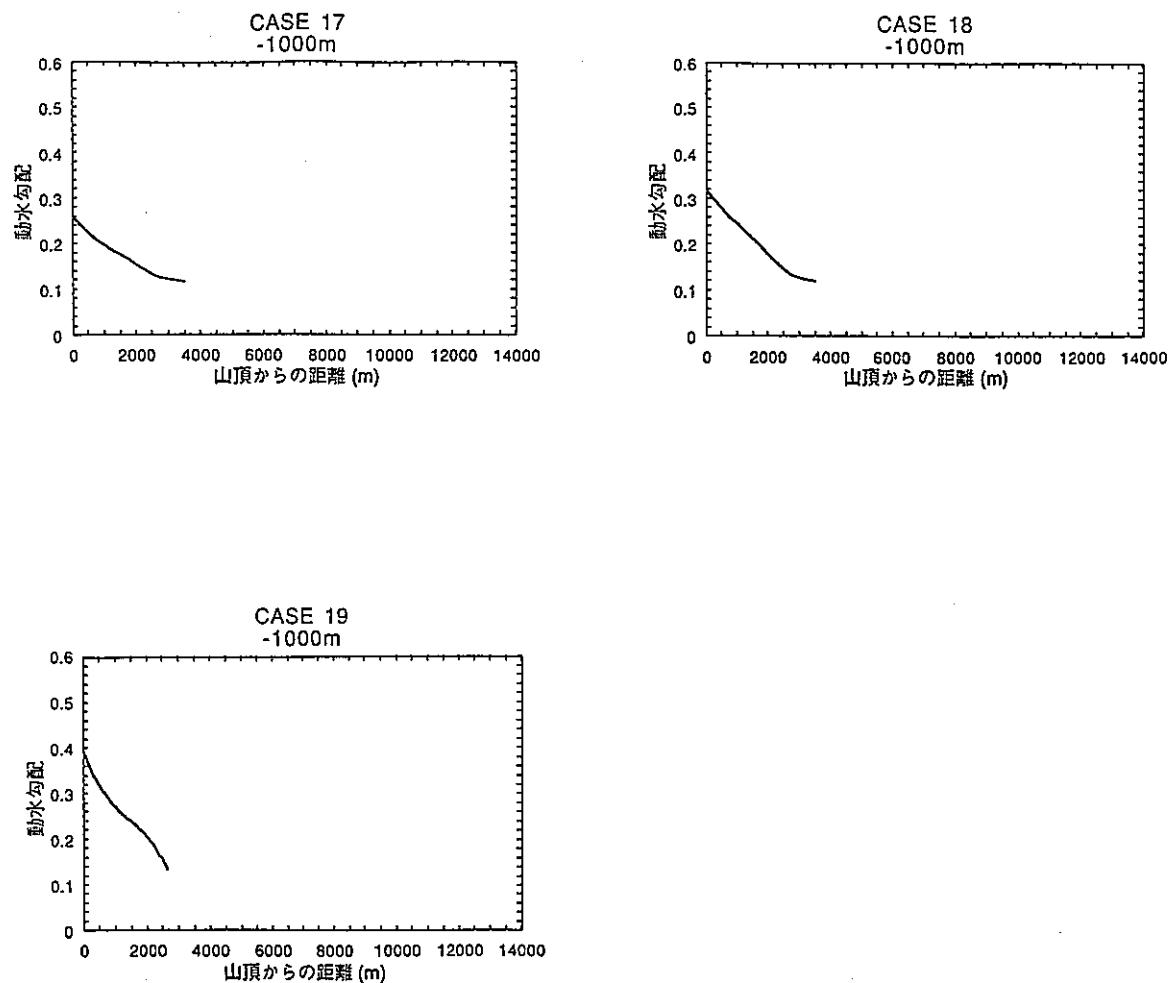


図 9-d 地下 1 0 0 m における動水勾配(4)

4. 今後の課題

(1) 流量による評価

今回の解析においては、代表的透水係数が現状の知見では設定できないために、動水勾配を求め、平均的透水係数をパラメータとする解析を行った。

しかし、動水勾配自体は一つの指標でしかなく、透水係数に不均質性が存在する場合は、透水係数の低い部分では動水勾配は大きくなり、逆に透水係数の高い部分では動水勾配は小さくなる。従って、水理的条件を設定するためには、動水勾配と透水係数の両方を考慮した流量として表現していく必要がある。このためには、後述するように、地下深部での透水係数データの取得が必要である。

(2) 滞留量の考慮

今回の解析においては、代表的透水係数が現状の知見では設定できないために、滞留量を考慮した解析が行えなかった。

動水勾配に影響を与える主要因は、地形勾配であるが、正確には地下水位面の傾斜が地下水の駆動力となる。

従って、今後は表層の透水係数、透水係数の深度依存性を考慮して、正確に地下水位面をモデル化する必要がある。

(3) 透水係数の深度依存性の考慮

透水係数は、亀裂状媒体の場合垂直応力15MPa までは応力の増加に伴い著しく減少することから、地下500m程度までは透水係数が低下することが期待される。

透水係数が低い地下深部においては、透水係数が低下することにより流量は減少するはずであり、この状況を今後考慮する必要がある。

(4) 透水係数の不均質性の考慮

堆積岩においては、透水係数の高い砂岩層と透水係数の低い泥岩層とが互層をなすことが多い。この場合、例えば透水係数の低い泥岩層が厚く分布すると、その下の地層中では動水勾配も流量も小さくなるものと考えられる。このような水理的障壁となる地層の存在を今後考慮する必要がある。

結晶質岩においては、高透水性の断層が存在し、これらが交差し合うことにより、岩盤をブロック状に分割している場合が多い。また、断層は通常断層粘土と断層角礫とが互層状を示すことが多く、後者の透水係数は高いが、前者の透水係数は低いため断層面に平行な透水係数は高いが、断層面を横切る方向の透水係数は低いものと考えられる。このような断層は、

断層自体が排水路になり、断層に囲まれたブロックを水理的に他のブロックから隔離する役割を果している可能性がある。このことは、諸外国において断層を境にして地下水位面が異なることが報告されていることからも支持される。従って、背後に山地等が存在しても断層に囲まれるブロック自体の中に大きな起伏がなければブロック内部の動水勾配は小さくなる可能性がある。

(5) 地下水の塩分濃度の深度方向の変化による密度差の効果

地下水の塩分濃度は、深度の増大に伴い増加する。このため、地下水に密度差が発生し、海岸付近で発生することが知られている「塩水くさび」に類似した現象が発生し、塩淡境界より下の領域では水は殆ど動いていない可能性がある。この点について、今後調査していく必要がある。

(6) 温度勾配を考慮した広域水理解析

今回の広域水理解析においては、下部境界の深度を海拔-5～-10kmとしたが、実際には、透水係数の深部への減少、深部での温度上昇に伴う上昇流の発生により、このような地下深部まで地表からの流動が到達していない可能性がある。従って、熱一水理連成解析結果と、地下深部の水を採取し、どの深度からはほぼ結晶水の組成になるかを調査して得られた地表水の到達深度を比較検討する等して、地表水の到達深度(下部境界深度)を設定する必要がある。

(7) 亀裂のネットワーク構造を考慮した解析の実施

亀裂状媒体においては、実際の流速は亀裂の連結したpathが、どことどこを連絡しているか、pathの長さ、亀裂あるいはチャンネルの透水量係数、亀裂交差部の幅に依存する。従って、このような様々な要因を総合的に考慮可能な亀裂ネットワークモデルを用いることによって、より現実的な流速(流量)を評価する必要がある。

(8) 広域水理モデルの確証

今後実際のサイトの評価を行うためには、モデルの確証のステージが含まれると考えられるが、その際の確証をどのように行うかが課題となろう。

例えば、ボーリング孔を新規に掘削し、そこでの間隙水圧分布で評価する方法、また鉄道トンネル等への湧水量等が利用可能と思われる。

これら利用可能なデータと、モデルでの予測結果を比較することによる確証の方法を、今後確立する必要がある。

5. 謝 辞

本報告書の作成に当たっては、本社環境技術開発推進本部の石黒和彦氏、梅木博之氏、中部事業所環境地質課の柳沢孝一氏、日揮株式会社の高瀬博康氏には、多数の助言を頂きました。また、東海事業所環境技術開発部地層処分開発室の畠中耕一郎氏には、FEMWATERの使用に当たって協力していただきました。ここに、深謝いたします。

6. 参考文献

- (1) YEH,G.T. and WARD, D.S.(1980): "FEMWATER, A Finite Element Model of Water Flow Through Saturated - Unsaturated Porous Media", Oak Ridge National Laboratory Report ORNL-5601.
- (2) 国土庁(1987): 国土統計要覧
- (3) 緒方正虔, 本荘静光(1981): 電力施設の耐震設計における断層活動性の評価, 応用地質, Vol.22, No.1, p.67-87
- (4) 吉川虎雄, 杉村 新, 貝塚爽平, 太田陽子, 坂口 豊(1973): 新編 日本地形論
- (5) 松田時彦, 岡田篤正(1968): 活断層, 第四紀研究, Vol.7, p.188-199
- (6) 大島洋志(1983): トンネル掘削に伴う湧水とそれに伴う水収支変化に関する水文地質学的研究, 鉄道技術研究報告, No.1228
- (7) 下茂道人, 竹田直樹, 宮下国一郎, 青木謙治(1986): 岩盤内空洞掘削と地下水環境－菊間実証プラント－, 土と基礎, No.1646, p.57-63
- (8) 福田和寛, 野口義文, 堀田政國(1992): 花崗岩盤における巨視的透水係数の評価, 第24回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, p.26-30
- (9) 柳沢孝一, 古屋和夫, 大澤秀明, 若松尚則, 梅田浩二(1992): 我が国における地盤の透水性に関する調査・研究(その1), PNC TN7410 92-015 TR/GE 92-01
- (10) 土木学会・編(1977): ダムの地質調査