

6.4 隆起・侵食による地下環境の変動を想定した安全評価

地層処分の安全審査においては、我が国の地質環境変化や気候変動等の処分システムへの影響を考慮した放射性核種の移行評価が求められており、平成23年度は地質環境変化の処分システムへの影響を設定したうえで、HLWの地層処分を対象とし、隆起・侵食・海水面変化に伴う地下水流速及び移行距離の変化を考慮した感度解析を実施した。本年度は、多重バリアの核種の閉じ込め機能等の要件(バリアの閉じ込め機能、隔離機能などの基本設計への影響幅の検討)の長期的な評価を行うため、処分環境の長期変遷を考慮したモデルや評価手法の開発においては、我が国において想定される代表的な処分環境条件に加え、隆起・侵食等の地質・気候関連事象の影響による変動も検討対象とすることとなっている。

そこで、我が国の地質環境特性を勘案し、現実的な地層処分サイトを想定した隆起・侵食に関するシナリオを設定し、以下、本解析におけるシナリオの総称として、隆起・侵食シナリオとする。隆起・侵食速度の変動パラメータを変化させた場合の感度解析並びに安全評価を実施することとした。6.4.1では、この一環として、隆起・侵食速度が人工バリアを含む母岩領域の地下水流速、化学環境(塩水/降水境界等)に及ぼす影響について検討した。6.4.2から6.4.6では、6.4.1の地下水流動解析の結果を考慮した人工バリアの変遷を評価し、その結果に基づいて、個々のモデル/コードにより評価パラメータを設定した。6.4.7では、6.4.1から6.4.6までの検討結果を核種移行解析にリンケージさせた安全評価を実施した。

6.4.1 隆起・侵食が地下環境に与える影響に関する解析的検討

(1) 解析条件

隆起・侵食による地形変化および侵食に伴い地層処分サイトの対地深度が変化し、温度、応力、水理、化学に関するサイト周辺の地下水環境に与える影響を評価しておくことは核種移行に与える影響の観点から重要である。地形変化に伴う地下環境、とくに地下水流動に与える影響については幌延や瑞浪などの既往の調査・研究において、感度解析的検討がすでに実施されている。一方、侵食に伴うサイトの対地深度の変化の可能性に関してはこれまで具体的な地質、地下水環境を想定した評価はなされてこなかった。このため、平成24年度は、幌延を対象として、現実的な隆起・侵食速度を設定したうえで、地表面の削剥によって母岩の対地深度が変化した場合のサイト周辺の地下水流速、化学環境(塩水/降水境界等)に与える影響について感度解析的検討を実施した。この結果、地表面が削剥されただけでは地下水流速や流動経路はほとんど変化せず、対地深度変化に伴ってサイト周辺の透水性を変化させた場合、地下水流速、流動経路が変化する結果となった。一方、塩水/降水境界は将来10万年間に約100~300m低下するが、サイト周辺の透水性を変化させた場合と変化させない場合とでほとんど境界の位置に違いはないという計算結果が得られた。

平成24年度の解析では、解析範囲全域が一様に隆起(現在の地形形状を保ったまま隆起)すると仮定しており、地形の傾斜が時間変化しないため、動水勾配の変化はない結果となった。しかし、対象地点が褶曲軸の翼部に位置する場合、東西圧縮場においては時間の経過とともに地表面および地層の傾斜がさらに大きくなることが予想される。このため、平成25年度は傾動隆起を考慮した解析を実施する。また、平成24年度は、地下水涵養量は一定値を与えていたが、実際は氷期-間氷期サイクルによる気候変動の影響を受けるため、降水量は一定でないことから、降水量を時間変化させた解析ケースも併せて実施することとした。昨年度、幌延において取得した隆起速度、侵食速度等の境界条件、水理データを活用しつつ、今年度は、仮想的サイトを設定したうえで、“現在~将来”の地下水流動解析を実施する。6.4.1では地下水流速、水質の変化幅について感度解析を実施し、6.4.7において核種移行に与える影響について検討する。

(a) 解析モデル

解析モデルは、平成 24 年度、幌延地域における既往の水理地質構造データ（操上 2007⁽¹⁾等）をもとに透水性区分を設定した model-2（亀裂支配の堆積岩モデル）を採用し、解析範囲は底部境界を EL-1.5km、水平方向の幅を 5.5km とした（図 6.4-1）。初期モデルとしての堆積岩の透水性の違いによる水理区分（H1、H2、H3）および断層の性状（断層幅、傾斜をそれぞれ 50m、90°、周囲の母岩よりも 2 桁高い透水係数を設定）は平成 24 年度のモデルと同じとした。また、塩素濃度分布については、昨年度、過去から現在に至るまでの降水による化石塩水の洗い出し計算結果を初期値として与えた。ただし、“将来”計算の降水条件や水理定数等の時間変化する境界条件については今回新たに設定し直すこととした。すなわち、下方境界、側方境界は不透水とするが、上方境界は気候変動を考慮したうえで変化する涵養量変化を与え、水理定数についても対地深度の変化に応じた値を新たに設定することとした。

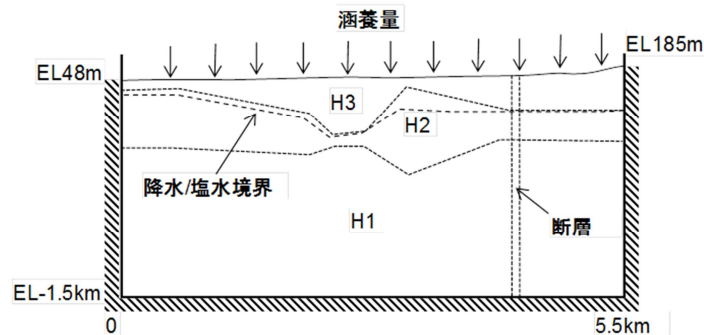


図 6.4-1 解析のための初期モデルと境界条件
（破線：塩水/降水境界、境界より上が降水起源の淡水、下が塩水）

(b) 解析条件の設定方法

平成 25 年度の感度解析において、傾動隆起と気候変動を考慮するにあたり、解析条件設定のためのデータ収集と条件設定の考え方を整理する必要がある。例えば、昨年度の解析では一様隆起を解析条件に与えていたため、侵食に伴う H1～H3 の対地深度の変化量、透水係数の変化量は一定となり、現在からの経過時間が決まれば地点に関係なく同じ値となる。

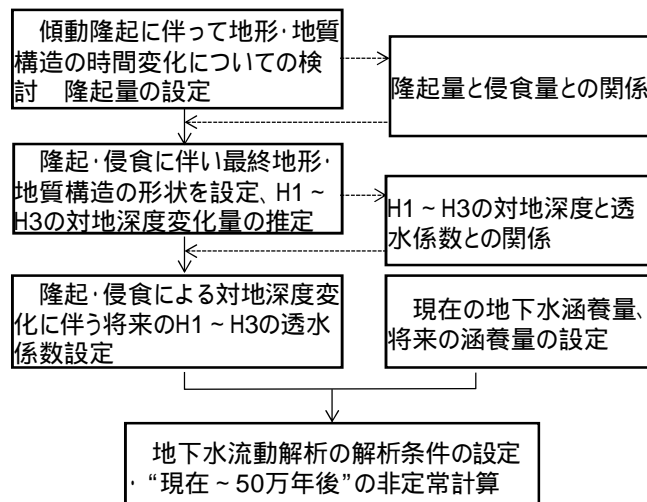


図 6.4-2 解析条件の設定の流れ

しかし、今回のように傾動隆起を想定した場合、隆起量に比例して侵食が進むと仮定した場合、図 6.4-1 の高標高部ほど侵食量が大きく、H1～H3 の対地深度の変化量、透水性の変化量は東端において最大となる。このため、まず、図 6.4-2 に示すように傾動隆起に伴う地形・地質構造の時間変化を推定し、地点ごとの隆起量を算出する。そして、隆起量と侵食量との関係から最終地形形状を推定し、H1～H3 の対地深度の変化量を算出し、それに応じた透水係数の変化幅を設定することとなる。地下水涵養量については、この作業と別個に過去の涵養量に関する調査結果から設定する。

(c) 解析条件の設定のための調査

隆起量の推定

我が国の地殻変動に伴う変動のパターンは Appendix V-E に示すように、曲隆山地、褶曲断層山地、横ずれ断層地塊、逆断層地塊の 4 つに分類される。昨年度検討した一様隆起はこのうち、曲隆山地、横ずれ断層地塊、逆断層地塊において特徴的であり、今年度、想定している傾動隆起はとくに東北地方～北海道にかけての褶曲断層山地に特徴的な隆起パターンである。昨年度の解析においては、幌延地域（研究所周辺）の最大隆起速度 0.3m/千年を保守的な値として採用し、対象範囲が曲隆山地、断層地塊のような一様隆起をするとしたケースを想定した。しかし、褶曲断層山地は広範囲で背斜と向斜の繰り返しを呈しており、背斜から向斜へ傾斜が変化する部分では地形勾配が時間とともに変化するため、水理場への影響が大であると考えられる。このため、今年度は傾動隆起を想定したケースを解析ケースに含めることとした。

幌延地域周辺については、図 6.4-3 に示すように 250 万年(2.5Ma～現在)をかけて褶曲構造が形成され、幌延地域は背斜の西翼部に位置するとされている（新里他、2007⁽²⁾）。図 6.4-4 は既往文献（新里・安江、2005⁽³⁾）をもとに、背斜軸付近の海成段丘の標高（m）と段丘面の年代値とから隆起速度を算出した結果を示したものである。背斜中心の隆起速度は、段丘面標高から当時の海面高度、風成層の層厚を差し引いた値を段丘面の年代値で除した値として算出している。なお、MIS7 と MIS5e 間の 9.5 万年間の計算値は、図に示すように MIS7 と MIS5e との標高差から計算している。海成段丘の傾斜、西側のサロベツ原野の埋没段丘の標高から隆起量（隆起速度）が 0 の地点（図の EL0m）は背斜中心から西へ約 5km の位置にあり（日本原子力研究開発機構、2011⁽⁴⁾）西への傾動が続いている斜面部を見ると水平距離 5km の間で隆起速度に最大約 0.3m/千年の差があるものと推定される。

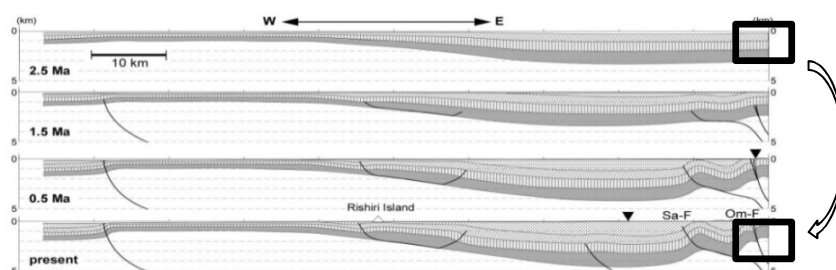


図 6.4-3 幌延地域とその西方海域における約 250 万年前(2.5Ma)以降の地質断面想定図
（図は新里他、2007⁽²⁾より引用、黒枠が幌延地域）

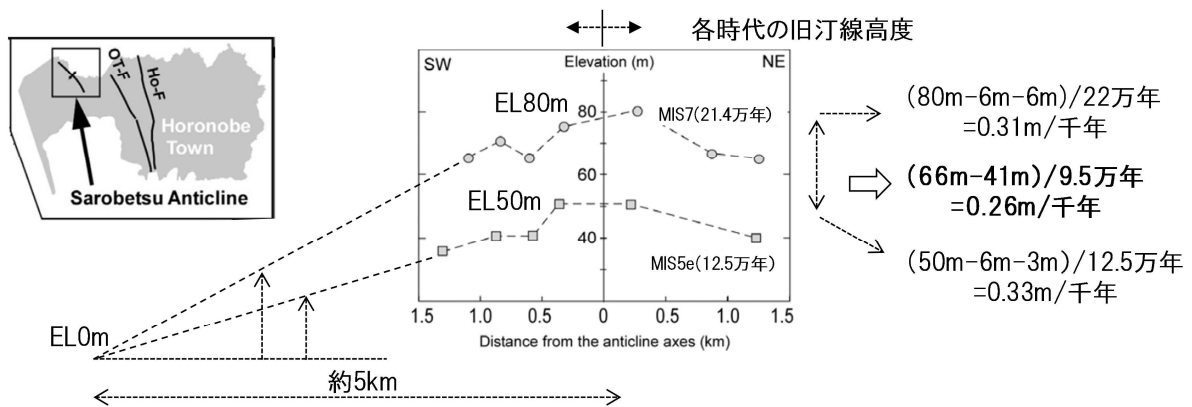


図 6.4-4 背斜軸付近の海成段丘の標高 (m) と隆起速度
(データ: 新里・安江, 2005⁽³⁾、新里他, 2007⁽²⁾を参照)

したがって、将来も過去から現在と同じ速度で傾動隆起が進むと仮定した場合、水平距離 5.5km 区間の解析領域の西端の隆起量は 0 である一方、東端は 50 万年後約 150m 隆起するものと考えられる。

侵食後の最終地形形状の推定

幌延地域の侵食量に関しては、日本原子力研究開発機構(2011)⁽⁴⁾によって推定されており、それによると 0.1~0.5m/千年と報告されている。0.5m/千年という数値は南東部天塩山地における基準高度分散量から求められた値であり、平野部~丘陵部はこれよりも小さく 0.1~0.3m/千年とされており、幌延地域においても同程度の値を示すものと考えられる。幌延地域に関しては、清水川沿いに位置することから、河川平衡が成立するとした場合、侵食速度は隆起速度と同程度となる。したがって、侵食による地表面の削剥が最も進んだ場合を想定して、解析上、侵食量と隆起量とが同程度であると設定することとした。図 6.4-5 に昨年度採用した一様隆起のモデル(左図)と傾動隆起を考慮した今回のモデル(右図)の比較を示す。

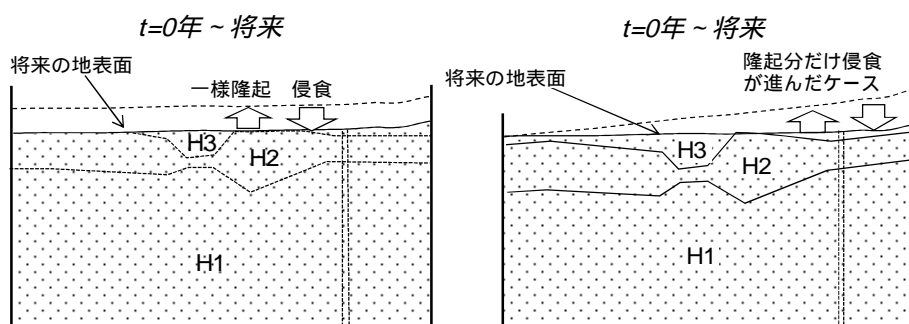


図 6.4-5 一様隆起と傾動隆起モデルの地形・地質構造変化の比較

図に示すように将来、傾動隆起が進み、侵食量=0とした場合の地表地形は破線の位置となる。一方、地盤が隆起し、隆起した分だけ侵食によって削剥されるとすれば、地表面の位置は現在と変わらない。また傾動隆起した場合、H1~H3は隆起による変形に伴い、東側の一部分は欠如し、残りの部分は侵食によって地表に接近することとなる。

対地深度変化に伴う透水係数変化量の推定

傾動隆起・侵食に伴って対象岩盤が地表に接近すれば、一般に岩盤内の応力解放によって亀裂が開口し、透水性が増加する可能性（吉田、2012⁽⁵⁾）が指摘されている。幌延地域の場合、浅部ほど透水性が高い傾向にあること（操上 2007⁽¹⁾）は原位置の透水試験結果から知られており、これは地盤の地表接近に伴って深部で蓄積された差応力が解消されたため、浅部ほどの開口亀裂の密度が高く、割れ目の連結性が高くなっていることによると報告されている（石井他、2007⁽⁶⁾）。亀裂を平板として単純化した場合、Snow（1968）⁽⁷⁾によれば、透水係数は亀裂の表面状態が同じであれば、岩盤の単位長さあたりの亀裂の数（亀裂密度）、亀裂の開口幅によって決まる（図 6.4-6（左図））とされている。亀裂の開口幅あるいは開口率（全体の亀裂数に対する開口亀裂の割合）は、図 6.4-6（右図）に示すように深度が増すにつれて低下する傾向にある（Bianchi and Snow、1968⁽⁸⁾、木下他、1993⁽⁹⁾）。これは単一亀裂を含む堆積岩は、亀裂を含まない堆積岩と異なり、拘束圧を変化させた場合、亀裂の開口幅の変化量に応じて透水性が変化するという室内透水試験結果からも支持されている（石井他、2001⁽¹⁰⁾、真田他、2008⁽¹¹⁾）。幌延地域の泥岩の場合、亀裂を含む堆積岩の有効拘束圧を 2MPa 低下（約 150m の対地深度変化に相当）させると最大 1 桁透水係数が増加しており、応力変化が亀裂の透水性の変化に影響しているものと解釈されている（真田他、2008⁽¹¹⁾）。

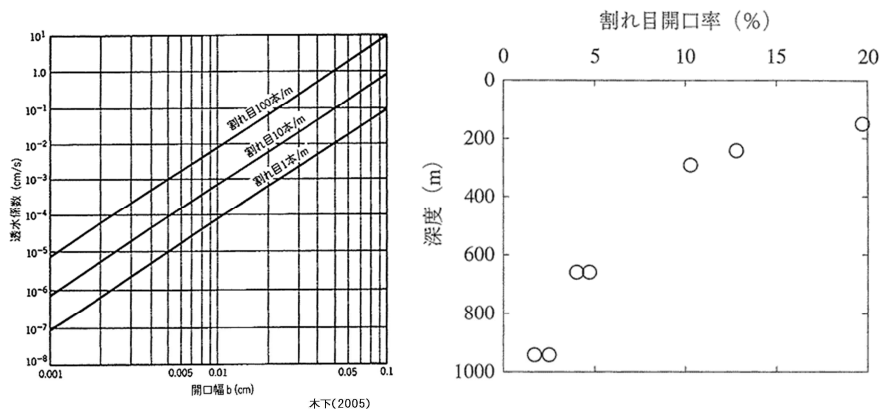


図 6.4-6 岩盤中の亀裂の開口幅と透水係数との関係（左図）、開口率と深度との関係（右図）（Hoek and Bray、1981⁽¹²⁾、木下他、1993⁽⁹⁾）

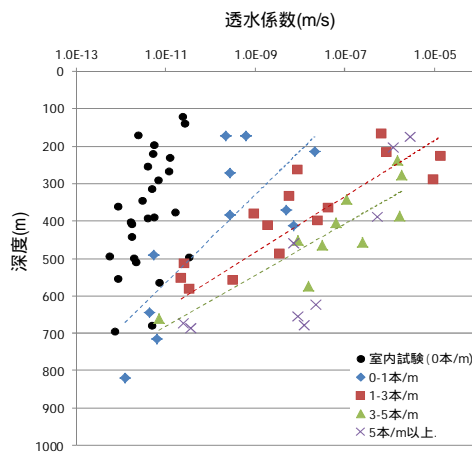


図 6.4-7 稚内層の透水係数と深度との関係
（現地透水試験：操上、2007⁽¹⁾、室内透水試験：操上・竹内・瀬尾、2005⁽¹³⁾）

図 6.4-7 は、稚内層の既往の透水係数に関するデータと深度との関係を整理し、亀裂密度の違いによって分類、図化したものである。図中、亀裂密度（本/m）は透水試験測定区間における亀裂の本数（亀裂全数）を試験区間長で除した値を示している。ここで亀裂を含まない室内試験試料の透水係数は、深度に関係なく $1E-12 \sim 1E-11m/s$ で一定しているのに対して、亀裂を含む原位置の試験区間における岩盤の透水係数は深度に応じて $1E-12 \sim 1E-5m/s$ と大きくばらついている。また、同一深度で比較すると、浅部においては亀裂密度が高いものほど透水係数は大きい値を示すが、深度 700m 前後においては亀裂密度に関係なく透水係数は一部を除いて $1E-11m/s$ オーダー以下である。すなわち、前述のとおり、地下深部に向かうにつれ亀裂の開口率が 0 に近づくため、亀裂密度の違いによる透水係数への影響は小さくなり、一定値に近づくものと思われる。

これらのことから、幌延地域の堆積岩の透水性を左右するのは亀裂密度と亀裂の開口率であり、深度 700m 以浅において、仮に対地深度が変化すると変化量に応じて対象地点の亀裂に働く拘束圧が変化するため、透水性が変化する可能性が考えられる。稚内層の亀裂の密度は $0.5 \sim 1$ 本/m が最頻値であり、図 6.4-7 から $0 \sim 1$ 本/m を代表値とした場合、亀裂密度一定のまま対地深度が 100m 変化した場合、透水係数は 1 桁弱変化することとなる。このことと前述の室内試験の報告例を併せて考えると稚内層の場合、おおむね 150m の対地深度の変化量（50 万年の隆起・侵食量に相当）に対して透水係数は約 1 桁変化するものと考えられる。解析モデルの H1 ~ H3 のうち、H3 と H2 の一部は声問層、勇知層に該当するが大半は稚内層である。このため解析上、全域、稚内層の透水係数と深度との関係が成立するとして、これを侵食に伴い H1 ~ H3 の対地深度が変化した場合、H1 ~ H3 の透水係数の時間変化に適用することとした。

なお、幌延地域の場合、前述のとおり、透水係数は主として亀裂分布、亀裂の開口率に支配されているが、大半の亀裂は高角度であり、水平方向に比べて鉛直方向の透水係数が高いものと考えられる。実際、亀裂を含む地盤に対する水圧、気圧応答試験結果から、鉛直方向の透水係数が水平方向に比べて 2 倍 ~ 1 桁高い値を示す傾向がある（細谷他、2008⁽¹⁴⁾）ことが知られている。この透水異方性の程度（透水係数の鉛直成分と水平成分の比）は深度の増加とともに変化することも考えられる。しかし、これに関する情報は無いため、本解析では、上記知見をもとに深度 700m 以浅については透水異方性が最大 1 桁（ $k_v/k_h=10$ ）存在する場合を解析ケースに含めることとした。深度 700m 以深においては、亀裂の開閉に伴う透水性への影響は存在しないことから、異方性については一律 k_v/k_h を 1 とした。

上記の調査結果をもとに隆起・侵食に伴う透水係数の設定の考え方として、それぞれ侵食のある/なしを想定した 4 ケースとし、さらに透水異方性のある場合とない場合を考えた計 8 ケースを設定した。

- ・一様隆起のみのケース（地形変化なし、透水異方性あり/なしのケース）
- ・一様隆起・侵食を伴うケース（H1 ~ H3 の透水係数が時間変化し、透水異方性あり/なしのケース）
- ・傾動隆起のみのケース（透水異方性あり/なしのケース）
- ・傾動隆起・侵食を伴うケース（H1 ~ H3 の透水係数が時間変化し、透水異方性あり/なしのケース）

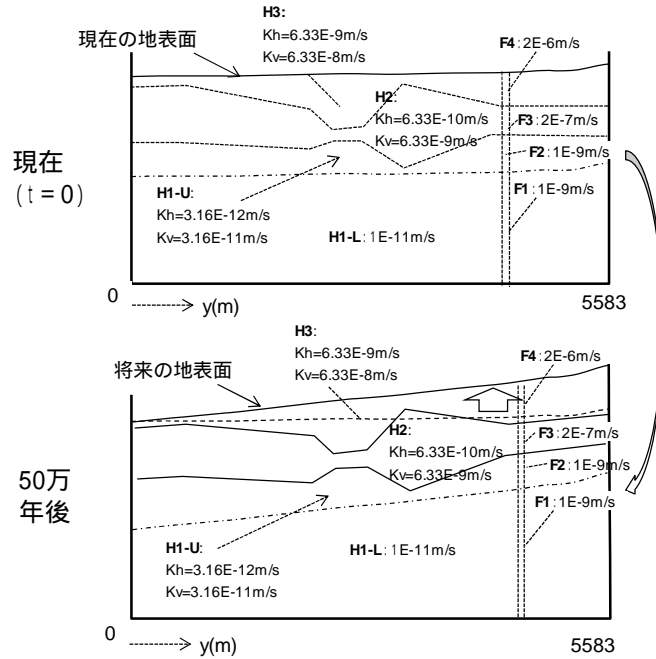


図 6.4-8 傾動隆起に伴い地形変化するケース（透水異方性ありのケース）

図 6.4-8 に傾動隆起に伴い地形変化するケースのうち、透水異方性を考慮した解析ケースの例を示す。図に示す通り、将来は山側の隆起量が水平方向の距離（y-m）に応じて連続的に変化し、内部の地質構造および深度 700m の境界（一点鎖線：H1-L/H1-U）も隆起量の分だけ東側を上昇させている。ただし、このケースは侵食がない場合であるため、H1～H3 の対地深度の変化量は 0 であり、将来の透水係数を現在の値と同じとしている。図 6.4-9 は図 6.4-8 に加えて侵食を考慮した解析ケースの例である。深度 700m の境界（一点鎖線：H1-L/H1/U）は、地表面が隆起した分だけ侵食が進むため、現在と同じ位置（標高値）にあるものとした。

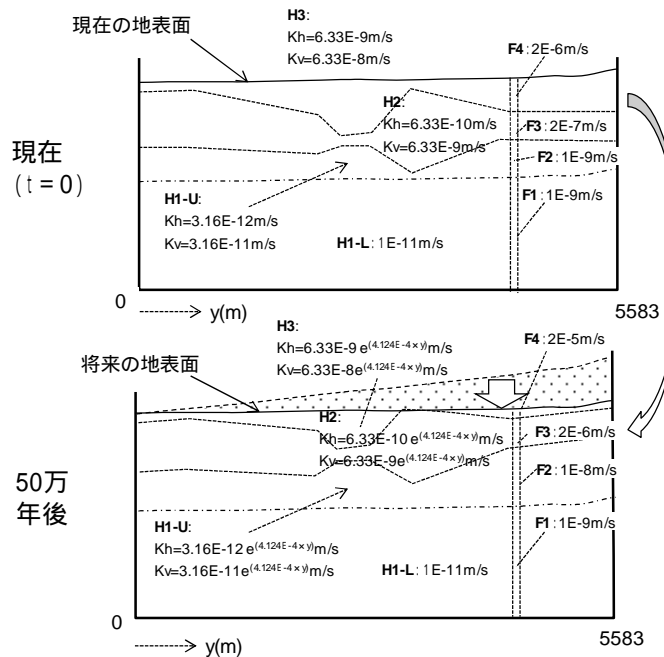


図 6.4-9 傾動隆起・侵食に伴い透水性が変化する場合（透水異方性ありのケース）

一方、H1～H3は傾動隆起した分だけ東側（山側）が上昇するため、H1-U～H3の対地深度も変化している。これらの対地深度の変化量は、西端において0（隆起量=0）であり、起点からの距離に応じて $y(m)$ の関数として表すことができ、図に示すように透水係数についても y の関数で定式化することができる。図 6.4-9の透水係数 k_v 、 k_h は50万年後の数値であり、0～50万年の間はさらに t の関数として線形に変化する。

地下水涵養量

昨年度、解析上、地下水涵養量については気候変動に伴う時間変化を考慮せず、降水量のもっとも多い時期である間氷期（現在）と最も少ない氷期の値を平均化し、将来も継続して過去と同じ降水が地表から供給されるものとして地表面に一定値を与えた。しかし、実際、地下水涵養量は気候変動に伴い時間変化し、水位が非定常に変化していることが予想されるため、この効果を解析に反映させる必要がある。今年度は、氷期 - 間氷期の降水量の時間変化に応じた地下水涵養量の設定を行うこととした。

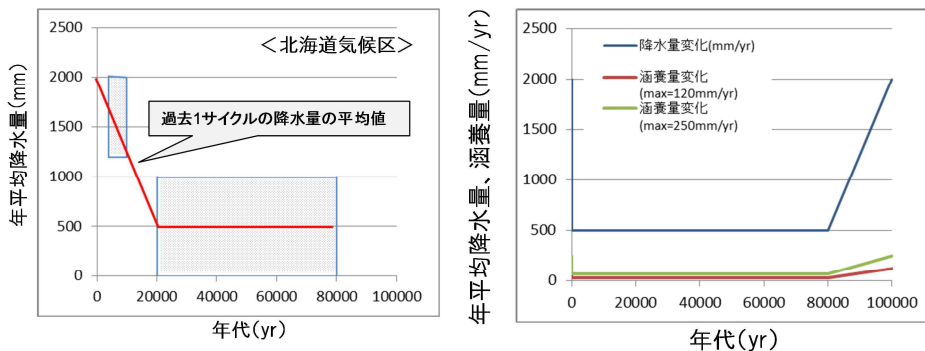


図 6.4-10 過去 8 万年間の平均降水量（左図）と将来 10 万年の涵養量の推定（右図）

過去の降水量変化については全国を対象に過去 8 万年間の花粉化石の種類分析から推定されており、図 6.4-10（左図）は北海道地区における降水量の推定例（松末、2000⁽¹⁵⁾）である。図に示すように数千年前の平均降水量は 1,200mm～2,000mm/年であるのに対して過去 2 万年～8 万年の間は 0～1,000mm/年である。現在の幌延地域の年間降水量は約 1,600mm/年（戸村他、2007⁽¹⁶⁾）、図 6.4-10 から、花粉化石に基づく現在の平均降水量は 2,000mm/年である。幌延地域の水収支解析に基づく現在の地下水涵養量は 120～250mm/年（戸村他、2007⁽¹⁶⁾）と推定されており、この値を間氷期の代表値として採用した。氷期の地下水涵養量に関しては既存のデータは存在しない。ただし、地下水涵養量と降水量とは正の相関があるとされていることから（宮原他、2002⁽¹⁷⁾）、幌延地域の流域の地形・地質条件が変わらず、現在の降水量に対する地下水涵養量の割合（6～12.5%）が氷期においても同じであるとすれば、氷期～亜氷期の 2 万年～8 万年の 500mm/年を平均降水量をとした場合、地下水涵養量は 30～60mm/年と推定される。図 6.4-10 の右図に将来 10 万年間の降水量と地下水涵養量との関係を示す。将来 10 万年の年間降水量は過去 8 万年間の氷期、間氷期の降水量と同じ変化傾向を示すものと仮定した。この場合、降水量に対する地下水涵養量の割合（6～12.5%）は時間変化しないものとし、氷期から間氷期に移り変わる 8 万年から 10 万年の間は、降水量、地下水涵養量は線形に増加するものとした。

（d）解析ケース（“現在”～“将来”の計算）の設定

幌延地域について化石塩水で全域満たした状態から塩水の洗い出し計算を行った結果、昨年

度 model2 に関しては 20 万前～現在までの全水頭、塩素濃度の計算値と観測値とがおおむね一致したことから、今回の解析では 20 万前～現在までの計算結果を初期値とし、将来 50 万年間の非定常解析を行うこととした。なお、側方は不透水、底部は“将来”は“現在”と同様、不透水境界とした（図 6.4-11）。解析コードは MIG2DF を使用した。解析上、地形形状の時間変化については昨年度同様、侵食により、地表部分のメッシュを消失させる代わりに全メッシュ数は変えずに鉛直方向のメッシュ幅を拡縮させることにより対応することとした。

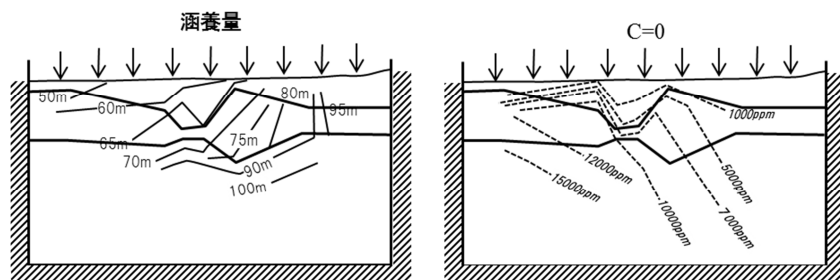


図 6.4-11 “現在”の全水頭分布（左）と塩素濃度分布初期設定値（右）

表 6.4-1、表 6.4-2 に、解析ケースと解析条件を示す。前述の解析条件の検討結果を踏まえて一様隆起の場合（表 6.4-1）と傾動隆起の場合（表 6.4-2）とに分け、さらに侵食の有/無、対地深度の変化に伴う透水係数の変化の有/無の場合に分けて解析ケースを設定した。一様隆起の場合、表 6.4-1 に示すように侵食無し場合は、隆起速度は場所によらず一定であるため $U=0.3\text{m}/\text{千年}$ （Case1、Case2）とし、侵食ありの場合、 $U=0.3\text{m}/\text{千年}$ 、 $E=0.3\text{m}/\text{千年}$ とし、この設定については昨年度と同じとした。一方、傾動隆起に関しては、前述のとおり、起点からの距離に応じて隆起速度が異なるため、表 6.4-1、表 6.4-2 に示すようにその位置によって $U=0\sim 0.3\text{m}/\text{千年}$ とし、侵食がある場合は $E=0\sim 0.3\text{m}/\text{千年}$ とした。

表 6.4-1 解析ケースと解析条件（一様隆起の場合）

no.	隆起・侵食速度	水理定数	涵養量
Case 1	$U=0.3\text{m}/\text{千年}$	水理定数は“現在”と同じ（異方性なし）	C=60(氷期)～250mm/yr(間氷期)×降水量変化期間を2万年と設定)
Case 2	$E=0\text{m}/\text{千年}$	同上（異方性あり）	
Case 3	$U=0.3\text{m}/\text{千年}$ 、 $E=0.3\text{m}/\text{千年}$	隆起・侵食後（50 万年後）透水係数を 1 桁変化（異方性なし）	
Case 4		同上（異方性あり）	

表 6.4-2 解析ケースと解析条件（傾動隆起の場合）

no.	隆起・侵食速度	水理定数	涵養量
Case 5	$U=0\sim 0.3\text{m}/\text{千年}$ $E=0\text{m}/\text{千年}$	水理定数は“現在”と同じ（異方性なし）	Case1～4 に同じ
Case 6		同上（異方性あり）	C=30(氷期)～120mm/yr(間氷期) (降水量増加期間を2万年と設定)
Case 7			Case1～4 に同じ
Case 8	$U=0\sim 0.3\text{m}/\text{千年}$ $E=0\sim 0.3\text{m}/\text{千年}$	隆起・侵食後（50 万年後）透水係数を対地深度の変化量に応じて 0～1 桁変化（異方性なし）	Case1～4 に同じ
Case 9		同上（異方性あり）	Case6 に同じ
Case 10			Case1～4 に同じ
Case 11			C=60(氷期)～250mm/yr(間氷期)×降水量変化期間を3万年と設定)

異方性の設定、透水係数の時間変化は、深度 700m 以浅の領域に対して発生させ、それ以深については将来の透水係数は現在と同じとした。

また、今年度は、前述のとおり深度 700m 以浅の H1 ~ H3 が透水異方性を持たない場合 (Case1、Case3、Case5、Case8) と透水異方性を持つ場合 (Case2、Case4、Case6、Case7、Case9 ~ 11) とを初期モデルに対して設定した。それぞれについて侵食がない場合は、時間の経過とともに透水係数の変化はなし (Case1 ~ Case2、Case5 ~ Case7) とし、一方、侵食を受けた場合、対地深度が時間とともに変化するため、時間の経過とともに透水係数を鉛直方向、水平方向それぞれについて変化させるものとした (Case4、Case9 ~ Case11)。一様隆起の場合 (Case3 ~ Case4) は前述のとおり起点 (y) からの距離に関係なく、透水係数は経過時間のみ依存し、50 万年後には透水係数は 1 桁増加する。一方、傾動隆起の場合 (Case8 ~ Case11) は、起点 (y) からの距離に応じて対地深度の変化量が異なるため、時間変化に加えて y からの距離に応じた透水係数の変化を設定した。また、深度 700m 以深については、対地深度の変化に伴う水理学的亀裂の開口幅の変化量は小さいと考えられるため、透水係数の時間変化はないものとした。上記以外のケースとして隆起・侵食なしのケースを参考として Case0 として設定した。

涵養量については氷期と間氷期の降水量の違いを考慮し、氷期において最小、間氷期において最大とし、前述のとおり 30 ~ 120mm/yr と 60 ~ 250mm/yr の 2 ケースを想定した。なお、Case11 だけは、氷期から間氷期にかけての降水量の増加時間を 3 万年と長くし (他のケースはすべて 2 万年、図 6.4-10 の右図) Case9、Case10 との比較を行った。

(e) 塩水/降水境界の設定

核種移行計算においては、隆起・侵食を考慮した解析結果を踏まえ、将来の塩水 (化石塩水) /降水の境界位置を設定する必要がある。これは、6.4.2 以降の核種移行計算において連続的な水質の空間分布に核種移行パラメータが対応していないためであり、あらかじめ水質分布を代表的な地下水組成である降水系地下水と塩水系地下水とに区分しておく必要があるためである。塩素濃度分布から塩水/降水境界の設定の考え方は昨年度と同様に化石塩水の淡水化率 (F) を指標とすることとした。化石塩水と降水系地下水との境界は酸素同位体比と一般水質を用いた主成分分析によって識別可能であり、降水の浸透下限境界が推定されている (酒井他、2012⁽¹⁸⁾)。

この主成分分析結果に基づく降水の浸透下限境界を淡水化率と関連づけることにより、塩水/降水境界における淡水化率を設定した。幌延地域の化石塩水は、鉛直方向 (z-方向) には塩素濃度が一定しているが、水平方向 (y-方向) に西から東に向かうにつれ塩素濃度は低下 (正規化塩素濃度: $C=0.76 \sim 0.2$) する特徴がある。このため、ボーリング地点ごとに降水による化石塩水の希釈率を算出し、希釈率が同じ地点を内挿することとした。具体的には、図 6.4-12 に示すように、ボーリング地点の鉛直方向の化石塩水の塩素濃度平均値 (C_{av}) とボーリング地点の塩素濃度 (C) との比から淡水化率 ($F=1-C/C_{av}$) を算出する。幌延地域のボーリング孔である HDB-7 孔 ~ SAB-2 孔の 6 孔の主成分分析に基づく降水浸透下限境界の淡水化率 F は、図に示すように 0.0 ~ 0.15 であり、平均値 ($F=0.07$) をもって塩水/降水境界と設定した。“現在” ~ “将来” の塩水/降水境界における淡水化率は “現在” と変わらないものと仮定し、解析によって求められた塩素濃度算出値から淡水化率を計算し、 $F=0.07$ となる深度をもって将来の塩水/降水境界と設定した。

“現在” における塩水/降水境界をもとに境界より上位を “地下水 1” とし、塩水/降水境界より下位を “地下水 2” とした。“地下水 1” の組成は、塩水/降水境界よりも上位にある地下水観測データの平均値とし、“地下水 2” はそれよりも下位の地下水観測データの平均値とした。表 6.4-3 にその地下水組成を示す。表中には、HDB-7 孔 ~ SAB-2 孔の計 6 孔において観測された地下水データから、地下水 1、地下水 2 に属す地下水の平均値と最大値および最小値を示している。Eh や pH については原位置で測定されたデータ数は少なく、必ずしも代表値を示してい

る保証はない。全体的な傾向として地下水1は淡水主体であるため、地下水2よりも塩素濃度、Na等の溶存イオン濃度は低い。地下水2は、塩素濃度の最も高いHDB-7孔において最大16,000ppm、最も低いSAB-2孔において3,100ppmと変化に富んでおり、平均は9,000ppmであり、現海水の濃度の1/2以下である。塩素濃度が最大のHDB-7孔について現海水組成と比較すると、重炭酸イオンが2,500ppmと現海水の140ppmに比べて高く、一方、硫酸イオンは62ppmと現海水の3,800ppmに比べて極端に低い特徴を持つ。pH、Ehについては地下水2では一定しており、地下水1は降水が混合しているのも関わらず、いずれも地下水2と同程度の値を示している。幌延地域の場合、比較的浅部まで炭質物を含み、黄鉄鉱が安定に存在していることから、還元環境が地下浅部まで保持されているものと考えられる。

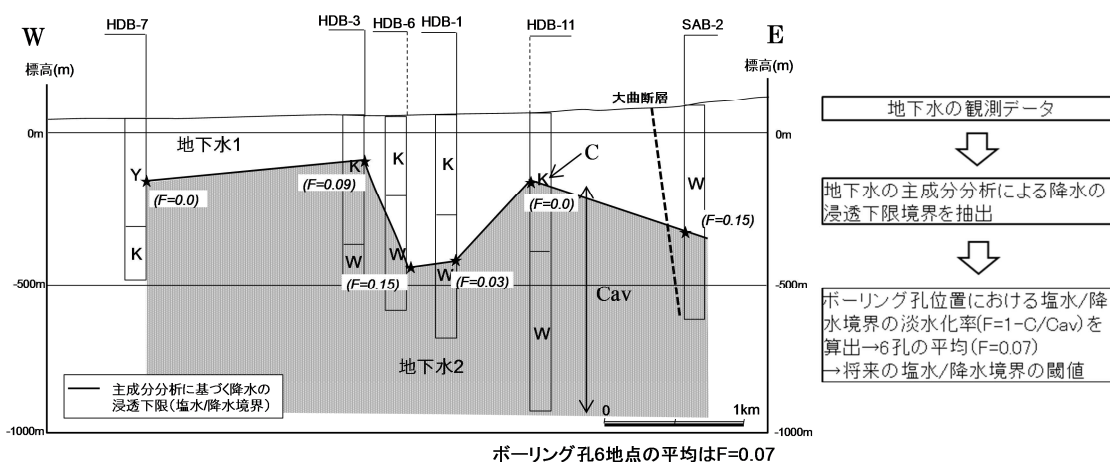


図 6.4-12 観測データに基づく塩水/降水境界の設定法

表 6.4-3 塩水/降水境界の上下の地下水組成の平均値と最大、最小値
(主成分データ：國丸他(2007)⁽¹⁹⁾、pH、Eh：穂刈(2012)⁽²⁰⁾より引用)

	地下水1				地下水2			
	試料数n	平均	最大	最小	試料数n	平均	最大	最小
Na(ppm)	50	2500	6500	8.9	51	6200	11000	2500
Ca(ppm)		110	380	2.5		170	560	19
K(ppm)		100	360	1		160	470	20
Mg(ppm)		60	200	0.7		170	1000	19
Cl(ppm)		3100	11000	13		9000	16000	3100
HCO3(ppm)	12	300	1900	5.5	3	2300	2500	2200
SO4(ppm)		7.7	17	0.2		33	62	0.2
pH	3	6.8	7.2	6.5	2	6.3	6.3	6.3
Eh(mV)		-210	-180	-230		-210	-210	-210
tota-Fe(ppm)	10	3.3	15	0.0	3	0.1	0.2	0
Si(ppm)	8	23	32	15	3	35	50	27

(f) 地質境界(物質境界)の設定

核種移行計算においては、塩水/淡水境界に加えて将来の核種移行途中における核種の吸着や拡散の程度を知るうえで、現在と将来の地質境界(物質境界)の位置を設定する必要がある。幌延地域の場合、水理特性は地質構造(地層の走向・傾斜)よりも断層や亀裂分布の影響を強く受けており、地質境界とは一致しないため、地下水流動解析においては、前述のとおり亀裂分布によって規制される水理境界(H1~H3)を設定した。したがって、地質境界については、幌延地域の既往のボーリングデータ(太田他、2007⁽²¹⁾)をもとに昨年度編集した地質境界(日本原子力研究開発機構、2013⁽²²⁾)を解析モデルに反映させることとした。幌延地域の地質は下

位から上位に向かって稚内層、声問層、勇知層であり、大曲断層によってこれらの地層は変位・変形を受けている。幌延地域の既往の地質観察、鉱物の分析データ（高橋、2005⁽²³⁾）によると稚内層と声問層はいずれも珪質の泥岩～頁岩（硬質泥岩）であるが、勇知層は細粒砂岩であり、岩相的な違いが存在する。また、声問層は稚内層に比べると時代が新しいため、結晶度が低く、含まれるオパールの種類に違いがあるとともに黄鉄鉱を多く含む特徴がある。解析上、幌延地域の地質境界、地質分布、鉱物組成データを今回の解析モデルにも適用し、地質名を上位から順に堆積岩1（勇知層）、堆積岩2（声問層）、堆積岩3（稚内層）と設定した。表 6.4-4 に地質区分と鉱物組成一覧表を示す。図 6.4-13 は、傾動隆起を考慮した Case5～Case11 の現在と将来 50 万年後の水理境界（図 6.4-9）に地質境界を重ねた図である。図中、50 万年後の水理境界、地質境界は、図に示すように両者の位置関係を保ちつつ、起点からの水平方向の距離（y-m）に応じて、東に行くほど隆起に伴う鉛直方向への移動量が大きくなる。このため、領域東縁の y=5583m 周辺において侵食を受けた場合（Case8～Case11）堆積岩2と堆積岩3が大きく削剥される設定となっている。

その他のケースとして Case1～Case2 は一様隆起であり、侵食なしの場合であるため、地質境界、水理境界によって囲まれる領域の将来の形状は現在と同じである。Case3～Case4 は一様隆起、一様侵食の場合であり、50 万年後は地質境界、水理境界の形状を保持しつつ、地表から 150m 部分だけ削剥されることとなる。現在～50 万年後の途中は、隆起速度一定と仮定していることから、地質境界、水理境界の位置は、時間経過に比例して一定速度で変化するものとした。

表 6.4-4 堆積岩1～堆積岩3の鉱物組成（相対量比 wt%、高橋、2005⁽²³⁾）

地質	岩相名	石英	オパール A	オパール C	斜長石	カリ長石	炭酸塩鉱物			粘土鉱物				黄鉄鉱	合計
							方解石	ドロマイト	シテライト	スメクタイト	緑泥石	イライト	カオリナイト		
堆積岩1	中粒砂岩	58.6	0.0	0.0	30.3	6.3	0.6	0.0	0.0	0.6	1.9	1.3	0.0	0.3	100
堆積岩2	珪藻質泥岩	64.5	4.3	0.0	11.4	4.7	0.0	0.0	2.0	1.8	1.9	3.2	0.0	6.1	100
堆積岩3	硬質頁岩	58.8	0.0	22.9	7.2	4.3	0.0	0.0	1.1	0.7	0.7	2.2	0.0	2.2	100

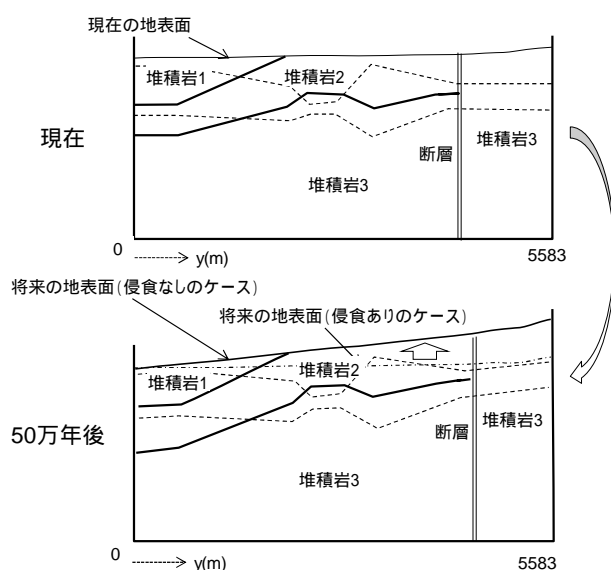


図 6.4-13 傾動隆起・侵食に伴う地質境界の移動（破線：水理境界、実線：地質境界）

(2) 解析結果

(a) 解析条件

感度解析では、隆起の様式（一様/傾動の違い）、侵食、透水異方性、対地深度変化に伴う透水性変化（以上は条件の有無）、氷期-間氷期の涵養量（氷期、間氷期の涵養量の設定値、涵養量の経時変化モデルの違い）に関する条件について、違いを組み合わせた解析ケースを想定し、地質環境条件（2次元の水理、地質・地質構造、隆起・侵食条件、化学環境等）を設定した上で、隆起・侵食による地表面の削剥によって処分場の対地深度が変化した場合の核種移行経路、移行経路中の地下水流速、化学環境（塩水/降水境界）の変化を地下水流動解析、塩分濃度解析および移行経路解析から求めた。解析モデルを図 6.4-14 に示す。

解析モデルは幌延地域を例とした地質構造を鉛直 2 次元断面上において仮定したものである。

図 6.4-14 に示すように東西方向に約 6km、深度方向に 1.5km の領域を要素数 2,343、節点数 2,502 で構成され、堆積岩 1~3 と断層で地層が構成されているとした。図中には破線で示した地質境界線とともに、透水性の区分を色分けで示した。地層区分を表 6.4-5、透水性区分を表 6.4-6 に示す。なお、表 6.4-6 の透水性区分を基本の設定とした。また、図中の赤 + 印は粒子出発位置を示しており、西側境界地表を基点として、1,645~3,925m の位置に 95m 間隔、また、深度-300~-500m 位置に 50m 間隔に配置した総数 125 地点である。表 6.4-6 に示す透水性の区分は図 6.4-14 中の色分けした領域に相当している。これらは幌延地域の透水係数分布が深度に依存した傾向を示すことに基づいて設定したものであり、断層についても深度が深くなるにつれて透水性が小さくなる設定とした。

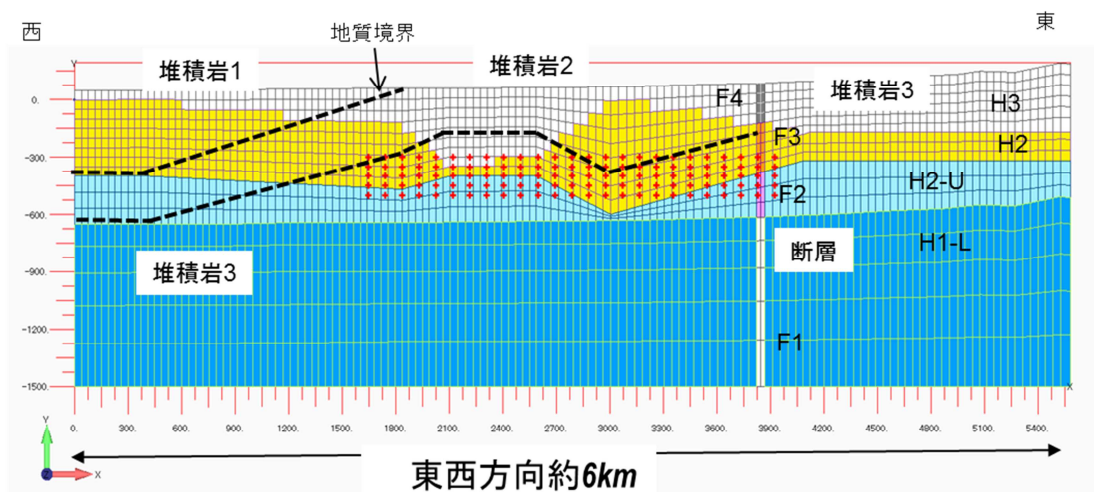


図 6.4-14 解析モデル（地層区分と透水係数分布）

表 6.4-5 地層区分

地層区分	備考
堆積岩1	勇知層に相等
堆積岩2	声間層に相等
堆積岩3	稚内層に相等
断層	大曲断層に相等

表 6.4-6 透水性区分 (基本設定)

透水性区分	透水係数(m/s)	間隙率
H1-L	1.00E-11	0.40
H1-U	1.00E-11	0.40
H2	2.00E-09	0.60
H3	2.00E-08	0.65
F1	1.00E-09	0.65
F2	1.00E-09	0.65
F3	2.00E-07	0.65
F4	2.00E-06	0.65

解析ケースでの境界条件および初期条件を表 6.4-7 に示す。解析における初期条件は、昨年度の本事業⁽²⁴⁾で実施した洗い出し解析の解析結果を初期値と仮定した。図 6.4-15 に洗い出し解析結果の初期濃度分布を示す。解析時間は 50 万年 (6.4.1 (1)参照) とし、引き続き行う移行経路解析は 0 年を移行開始時間としている。また、地表における涵養量については後述する図 6.4-16 に示すように、気候変動サイクルを基に 4 パターンを設定している。

表 6.4-7 境界条件および初期条件

解析		東西側面、底面	地表
境界条件	地下水流動解析	No flow	涵養量 ^{*1)}
	塩分濃度解析	No flux	濃度=0
初期条件		昨年度実施した洗い出し解析の結果を初期圧力・塩分濃度分布条件と仮定	

* 1) 涵養量は気候変動サイクルを基に設定 : 後述する図 6.4-15 参照

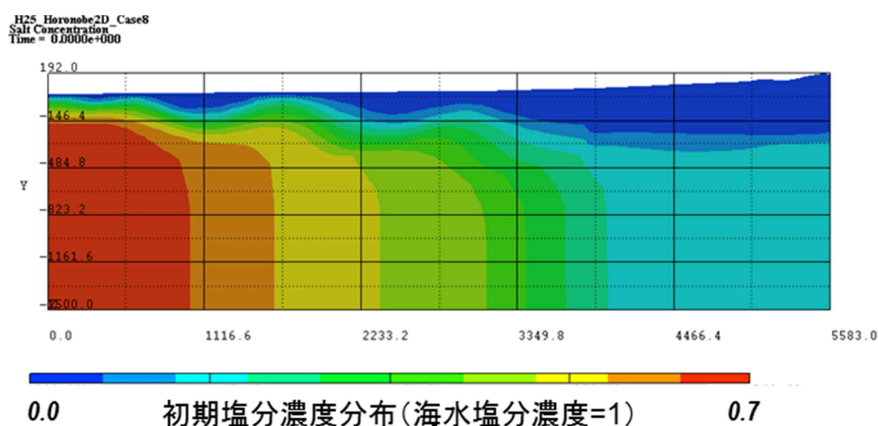


図 6.4-15 洗い出し解析結果の初期塩分濃度分布

全解析ケースは表 6.4-8 のようにまとめられる。このうち、隆起侵食現象の想定の違いから分類すると以下の様に区別できる。

隆起・侵食現象を考慮しないケース

モデル全体が一様に隆起するケース

隆起が生じると同時に侵食も進み、結果として地形面の移動が相殺され、地表面位置は変化しないものの、地下の透水性区分の位置のみ変化するケース

モデル全体が傾動隆起するケース

隆起が生じると同時に侵食も進み、結果として地形面の移動が相殺され、地表面位置は変化しないものの、地下の透水性区分の位置が傾斜移動するケース

隆起侵食現象の想定の違いから分類した解析ケースを表 6.4-9 に示す。また、各ケースの隆起侵食現象の考慮の仕方を図 6.4-17 に示す。

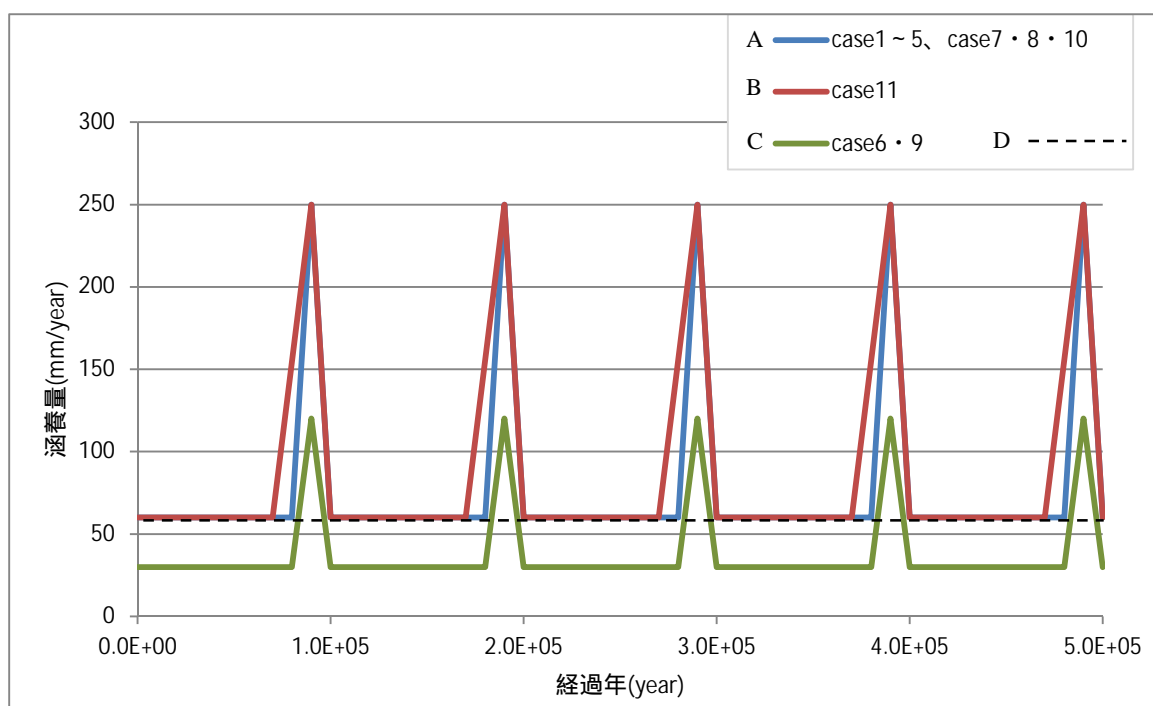


図 6.4-16 解析における涵養量設定パターン

表 6.4-8 全解析ケース

	隆起量 (50 万年)	侵食量 (50 万年)	隆起形式	地層境 界面の 変化	透水異 方性の 有無	透水係数・ 間隙率変化 の有無	涵養量(mm/y)		
									間水期
Case0_1	-	-	-	-	-	-	A	60	250
Case0_2	-	-	-	-	-	-	D	60	
Case0_3	-	-	-	-	-	-	A	60	250

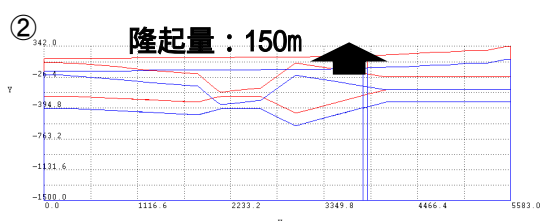
Case1	150m	-	一様隆起		-	-	A	60	250
Case2	150m	-	一様隆起			-	A	60	250
Case3	150m	150m	一様隆起		-		A	60	250
Case4	150m	150m	一様隆起				A	60	250
Case5	150m	-	傾動隆起	-	-	-	A	60	250
Case6	150m	-	傾動隆起	-		-	C	30	120
Case7	150m	-	傾動隆起	-		-	A	60	250
Case8	150m	150m	傾動隆起		-	* 1)	A	60	250
Case9	150m	150m	傾動隆起				C	30	120
Case10	150m	150m	傾動隆起				A	60	250
Case11	150m	150m	傾動隆起				B	60	250

* 1) 50万年間の隆起侵食過程での対地深度の変化に応じて透水係数の変化を考慮(6.4.1 (1)参照)

* 2) 氷期と間氷期の間隔が異なるケース(氷期期間を短くしたケース)

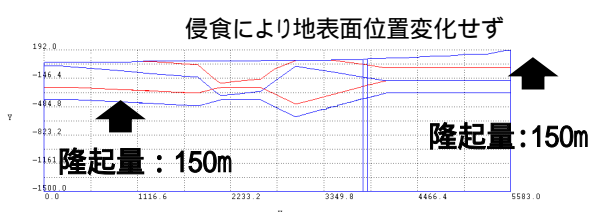
表 6.4-9 隆起侵食現象の想定の違いからの分類による解析ケース区分

隆起侵食現象の想定の違いから分類	Case	内容
	Case0_1~3	基本ケース:隆起・侵食現象を考慮せず
	Case1,2	モデル全体が一様に隆起
	Case3,4	隆起が生じると同時に侵食も進み、結果として地形面の移動が相殺され、地表面位置は変化しないものの、地下の透水性区分の位置のみ変化
	Case5,6,7	モデル全体が傾動隆起
	Case8,9,10,11	隆起が生じると同時に侵食も進み、結果として地形面の移動が相殺され、地表面位置は変化しないものの、地下の透水性区分の位置が傾斜移動



青線: 隆起・侵食前の水理境界
赤線: 隆起・侵食後の水理境界
縦軸・横軸単位(m)

隆起量は50万年間の総隆起量



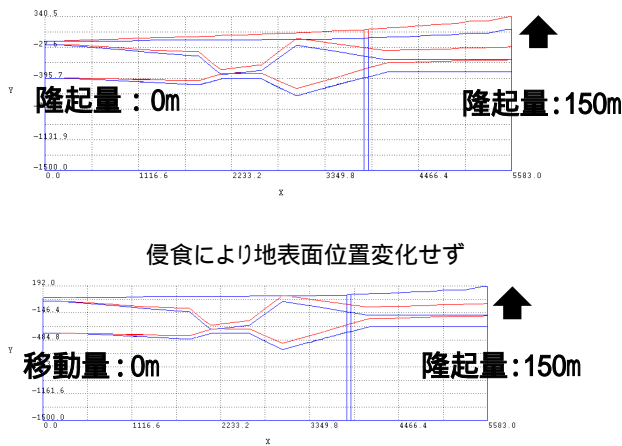


図 6.4-17 隆起侵食現象の想定の違いによる設定区分

透水異方性に関しては、水平方向成分が小さく鉛直方向成分が大きいとする幌延地域の特性をもとに表 6.4-10 のように設定した。また、透水係数の時間変化を考慮するケースにおける 50 万年後の透水係数については表 6.4-11 のように線形的に変化するものとした。さらに、透水係数の深度依存性については、6.4.1 (1)に記述した。

表 6.4-10 透水係数の異方性の設定値

	透水係数(m/s)		間隙率
	水平成分	鉛直成分	
H1-L	1.00E-11	-	0.40
H1-U	3.16E-12	3.16E-11	0.40
H2	6.33E-10	6.33E-09	0.60
H3	6.33E-09	6.33E-08	0.65
F1	1.00E-09	-	0.65
F2	1.00E-09	-	0.65
F3	2.00E-07	-	0.65
F4	2.00E-06	-	0.65

表 6.4-11 透水係数の時間的変化に関する設定値

	初期		500,000 年後	
	透水係数(m/s)	間隙率	透水係数(m/s)	間隙率
H1-L	1.00E-11	0.40	1.00E-11	0.40
H1-U	1.00E-11	0.40	1.00E-10	0.50

H2	2.00E-09	0.60	2.00E-08	0.65
H3	2.00E-08	0.65	2.00E-07	0.65
F1	1.00E-09	0.65	1.00E-09	0.65
F2	1.00E-09	0.65	1.00E-08	0.65
F3	2.00E-07	0.65	2.00E-06	0.65
F4	2.00E-06	0.65	2.00E-05	0.65

(b) 移行経路解析の結果 (隆起の違いによる変化)

隆起の違いによる変化を捉えるために、Case 0_1、Case 1、Case 5 を比較した。図 6.4-18 ~ 図 6.4-20 に粒子の移行経路結果を 50 万年後の塩分濃度分布とともに示す。また、表 6.4-12 に 125 粒子による移行距離、移行時間、平均流速の幾何平均値を示す。これらの結果から、一様な隆起 (Case 1) では、隆起を考慮しない場合 (Case 0_1) とほぼ同様の結果を示しており、移行距離で数%、移行時間で 10% 程度の変動を示した。また、傾動隆起の場合 (Case 5) は、動水勾配の増加から、平均流速が約 4 倍増加し、流動経路もより深部の H2 層を通過する経路に変化した。

H25 Horonobe2D Case0
Salt Concentration
Time = 5.0000e+005

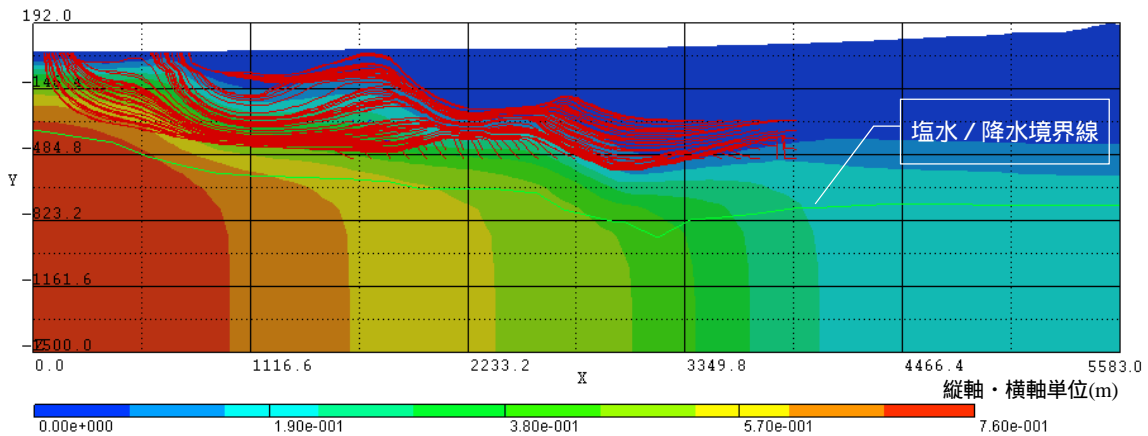


図 6.4-18 Case0_1 の移行経路解析結果と塩分濃度解析結果 (50 万年後)

H25 Horonobe2D Case0
Salt Concentration
Time = 5.0000e+005

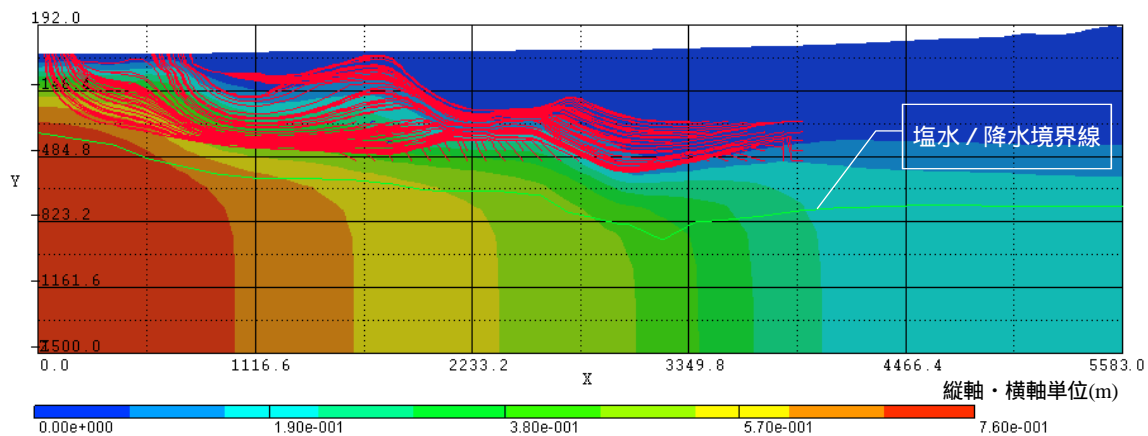


図 6.4-19 Case1 の移行経路解析結果と塩分濃度解析結果 (50 万年後)

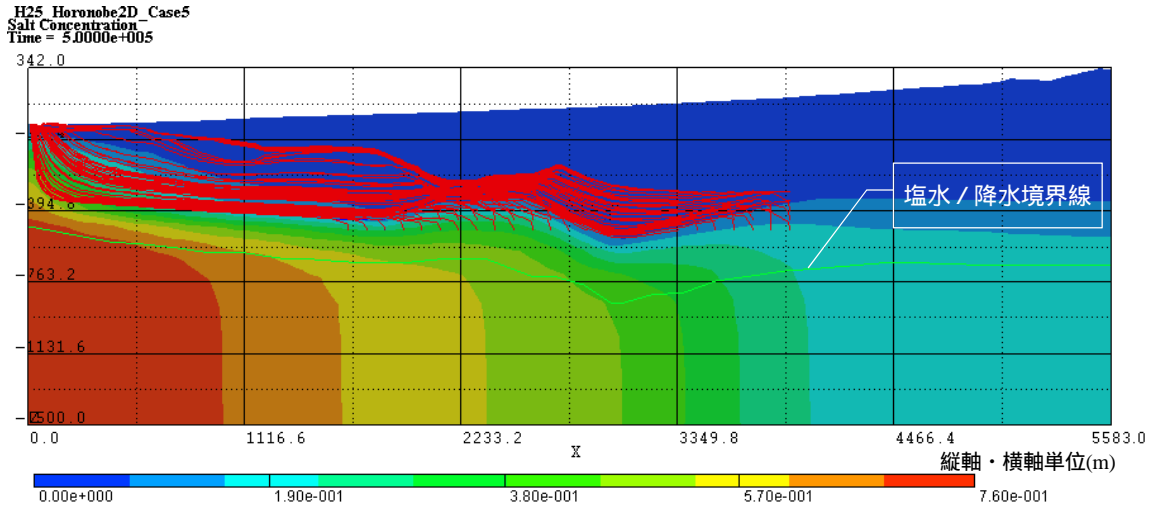


図 6.4-20 Case5 の移行経路解析結果と塩分濃度解析結果 (50 万年後)

表 6.4-12 隆起の違いによる変化

	隆起現象の設定	移行距離(m)	移行時間 (y)	平均流速(m/y)
Case 0_1	隆起考慮しない (現状)	2,540	4.65×10^6	5.5×10^{-4}
Case 1	一様な隆起 (150m/50 万年)	2,610	5.13×10^6	5.1×10^{-4}
Case 5	傾動隆起 (東端部で 150m/50 万年、西端部で 0m)	2,880	1.40×10^6	2.1×10^{-3}

(c) 移行経路解析の結果 (透水性の異方性を考慮した隆起による変化)

透水性の異方性の違いによる変化を捉えるために、Case 0_3、Case 2、Case 7 を比較した。図 6.4-21 ~ 図 6.4-23 に粒子の移行経路結果を 50 万年後の塩分濃度分布とともに示す。透水係数は基本ケースにおいて H3 層では 2×10^{-8} (m/s) に設定していたものを、水平方向: 6×10^{-9} (m/s)、鉛直方向 6×10^{-8} (m/s) に設定した。同様に H2 層については、 2×10^{-9} (m/s) → 水平方向: 6×10^{-10} (m/s)、鉛直方向 6×10^{-9} (m/s)、H1-U 層については、 1×10^{-11} (m/s) → 水平方向: 3×10^{-12} (m/s)、鉛直方向 3×10^{-11} (m/s) としている。透水係数の設定については表 6.4-13 にまとめた。

表 6.4-13 透水係数の異方性の設定

透水性の区分	基本設定の透水係数 (m/s)	異方性を考慮した透水係数 (m/s)
H3	2×10^{-8}	水平 6×10^{-9} 鉛直 6×10^{-8}
H2	2×10^{-9}	水平 6×10^{-10} 鉛直 6×10^{-9}
H1-U	1×10^{-11}	水平 3×10^{-12} 鉛直 3×10^{-11}

また、表 6.4-14 に 125 粒子による移行距離、移行時間、平均流速の幾何平均値を示す。これらの結果から、Case 2 では移行経路は隆起を考慮しない場合 (Case 0_3) とほぼ同じ傾向を示し、複雑な移行経路を示す結果が得られた。また、西端からの距離 2,000m 付近において、比較的短い距離で地表に流出する経路を示している。一方、傾動隆起の場合 (Case 7) では、動水勾配が増加して、平均流速が約 4 倍増加し、流動経路もほぼ水平方向に流れる経路を示した。

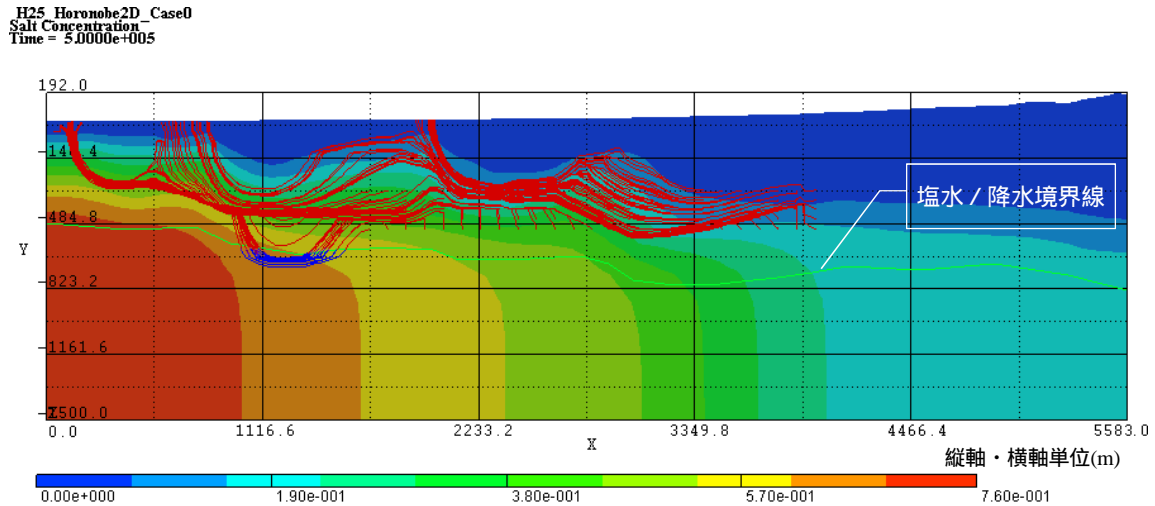


図 6.4-21 Case0_3 の移行経路解析結果と塩分濃度解析結果 (50 万年後)

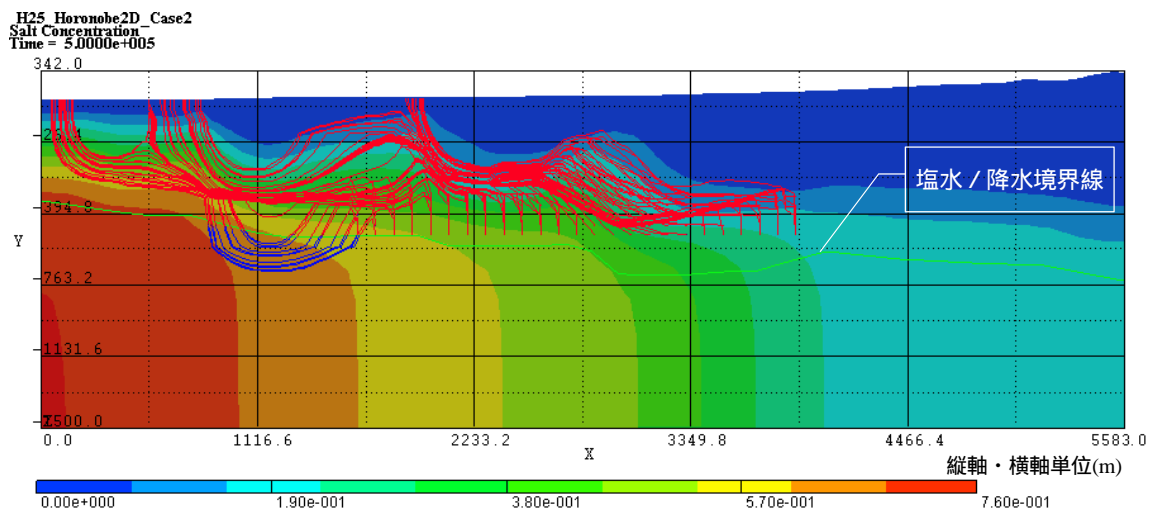


図 6.4-22 Case2 の移行経路解析結果と塩分濃度解析結果 (50 万年後)

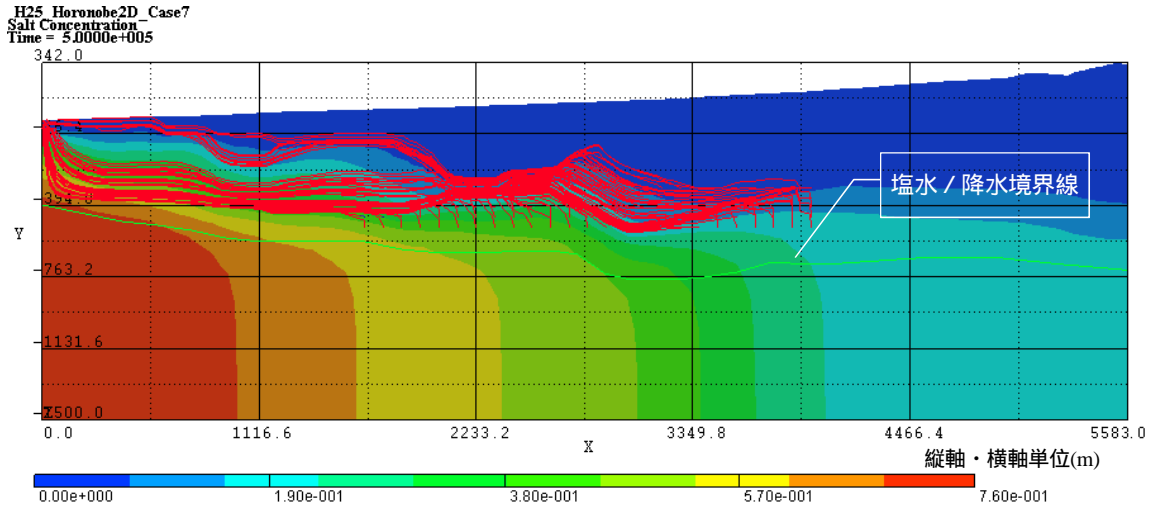


図 6.4-23 Case7 の移行経路解析結果と塩分濃度解析結果 (50 万年後)

表 6.4-14 透水性の異方性を考慮した隆起による変化

	隆起現象の設定	移行距離(m)	移行時間(y)	平均流速(m/y)
Case 0_3	隆起考慮しない(現状)、透水係数の異方性考慮	2,710	1.60×10^7	1.7×10^{-4}
Case 2	一様な隆起(150m/50 万年)、透水係数の異方性考慮	2,350	1.42×10^7	1.6×10^{-4}
Case 7	傾動隆起(東端部で 150m/50 万年、西端部で 0m)、透水係数の異方性考慮	2,950	3.38×10^6	8.7×10^{-4}

(d) 移行経路解析の結果 (透水係数の時間的变化を考慮した隆起侵食による変化)

隆起することにより、地層の深度が浅くなると、地圧の低下に伴う透水性の増大が考えられる。Case4 では表 6.4-11 に示したように透水係数が時間的に線形的に変化するケースを想定した。図 6.4-24 に粒子の移行経路結果を 50 万年後の塩分濃度分布とともに示す。また、表 6.4-15 に 125 粒子による移行距離、移行時間、平均流速の幾何平均値を示す。これらの結果から、透水異方性を考慮した Case 2 と同様に複雑な経路を示すとともに、比較的短い距離で地表に流出する移行経路が増加している傾向が見られる。また、透水係数の小さな層中での存在時間が長いため、透水係数の時間的变化の影響は小さく、移行経路への影響は少ない結果となった。

H25 Horonobe2D_Case4
Salt Concentration
Time = 5.0000e+005

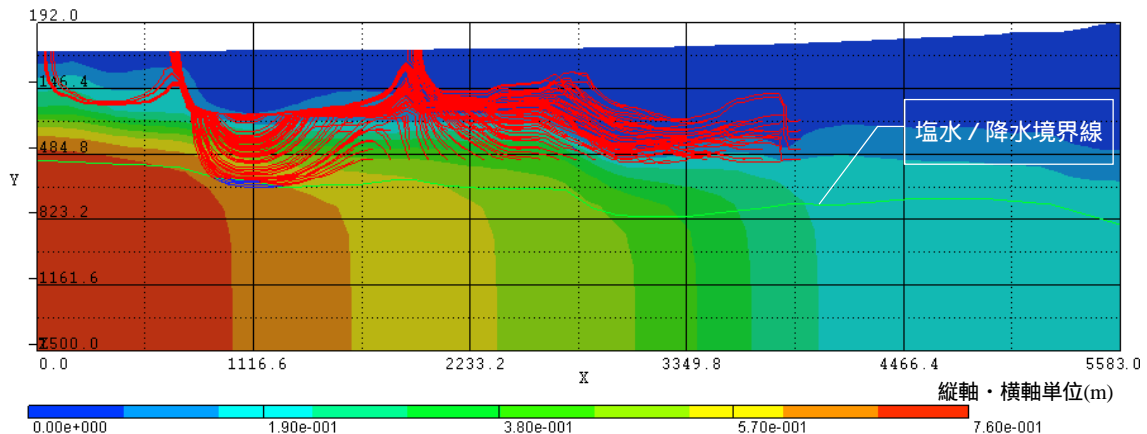


図 6.4-24 Case4 の移行経路解析結果と塩分濃度解析結果 (50 万年後)

表 6.4-15 透水係数の時間的変化を考慮した隆起侵食による変化

	隆起侵食現象の設定	移行距離(m)	移行時間(y)	平均流速(m/y)
Case 4	一様な隆起(150m/50 万年)、一様な侵食(150m/50 万年)、透水係数が 50 万年経過後に一桁大きくなると仮定(線形的に変化)、異方性も同時に考慮	2,380	1.44×10^7	1.7×10^{-4}

(e) 移行経路解析の結果 (涵養量の変動による変化)

涵養量の変動は、地下水流動に影響を与えることが予想される。ここでは、気候変動サイクルに伴う涵養量の減少、変動パターンによって移行経路への影響がどの程度の影響を有するのかについて検討した。隆起が生じると同時に侵食も進み、結果として地形面の移動が相殺され、地表面位置は変化しないとした傾動隆起 (東端部で 150m/50 万年、西端部で 0m) かつ透水係数の異方性を考慮した Case 9 (涵養量減少 : 図 6.4-16 の C)、同様な隆起侵食パターンの Case 10 (基本の涵養量 : 図 6.4-16 の A)、Case 11 (涵養量の変動パターンの変化 : 図 6.4-16 の B) を比較した。図 6.4-25 ~ 図 6.4-27 に粒子の移行経路結果を 50 万年後の塩分濃度分布とともに示す。また、表 6.4-16 に 125 粒子による移行距離、移行時間、平均流速の幾何平均値を示す。これらの結果から、この隆起侵食現象で変化する涵養量パターンでの移行経路に対する変化はわずかであり、50 万年間の長期的な地下水の移行経路解析において涵養量の変化の影響はわずかであると言える。

H25 Horonobe2D_Case9
Salt Concentration
Time = 5.0000e+005

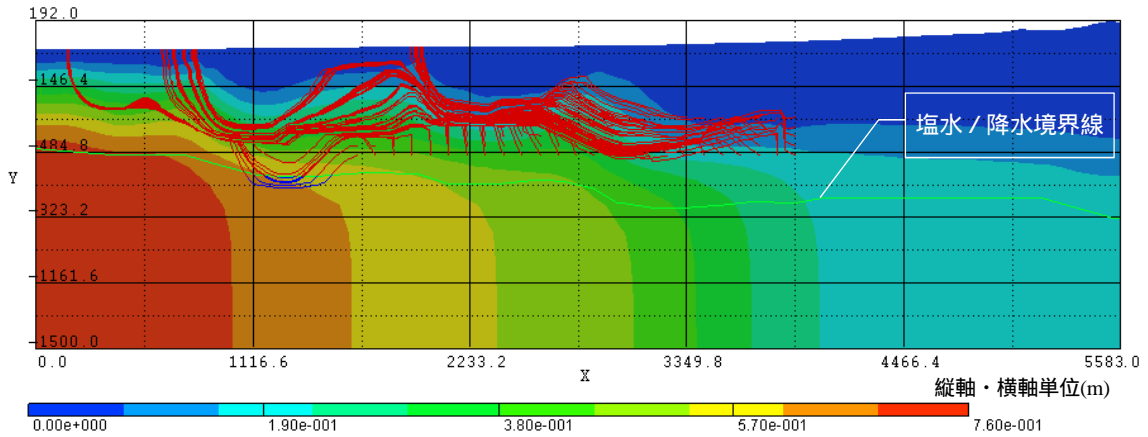


図 6.4-25 Case 9 の移行経路解析結果と塩分濃度解析結果 (50 万年後)

H25 Horonobe2D_Case10
Salt Concentration
Time = 5.0000e+005

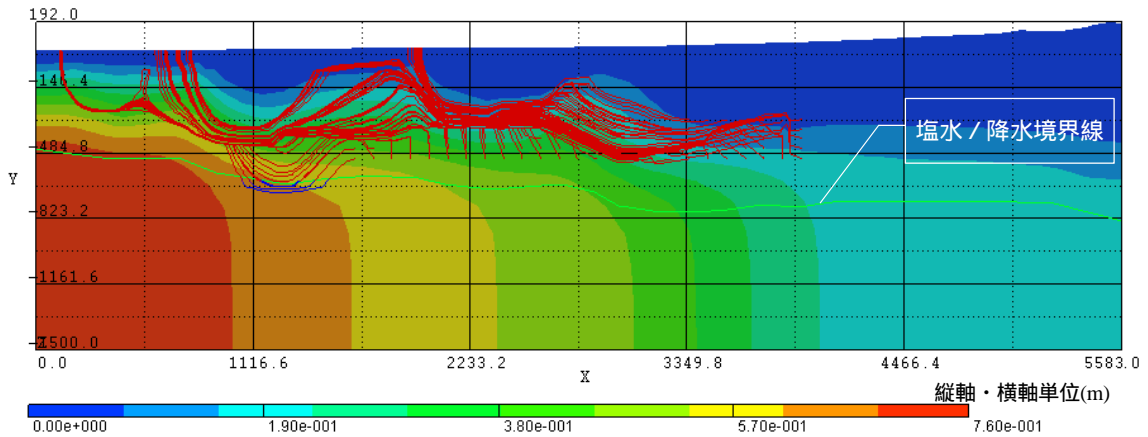


図 6.4-26 Case 10 の移行経路解析結果と塩分濃度解析結果 (50 万年後)

H25 Horonobe2D_Case11
Salt Concentration
Time = 5.0000e+005

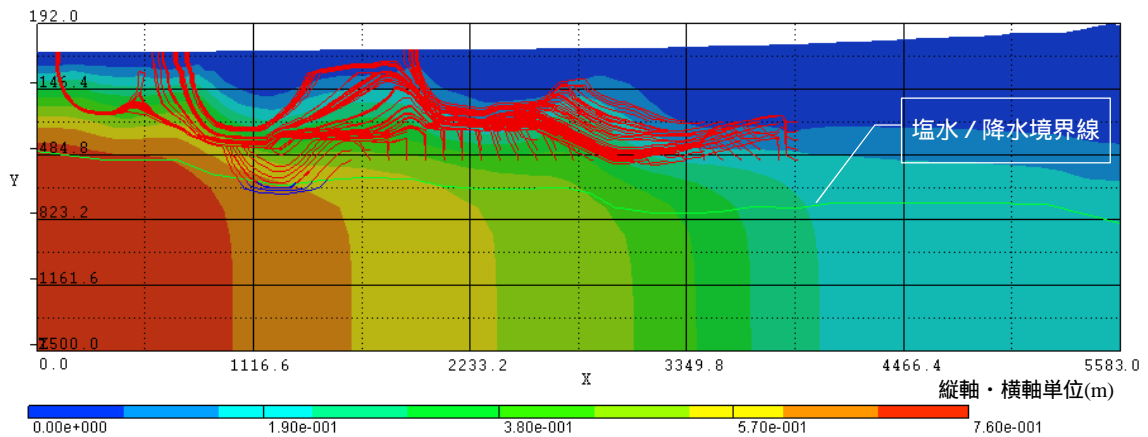


図 6.4-27 Case 11 の移行経路解析結果と塩分濃度解析結果 (50 万年後)

表 6.4-16 涵養量の変動による変化

	隆起侵食現象の設定	涵養量の設定	移行距離(m)	移行時間(y)	平均流速(m/y)
Case 9	傾動隆起(東端で150m/50万年、西端で隆起量0m)、侵食により地表面位置は変化しない、透水係数は地表面深度に依存して変化 ^{*1)} 、透水異方性を考慮	涵養量減少 (氷期 30mm、間氷期 120mm) (図 6.4-16:C)	2,380	1.16×10^7	2.1×10^{-4}
Case 10		涵養量の基本設定 (氷期 60mm、間氷期 250mm) (図 6.4-16:A)	2,400	1.16×10^7	2.1×10^{-4}
Case 11		涵養量変動期間の変化 (図 6.4-16:B)	2,400	1.15×10^7	2.1×10^{-4}

*1) 透水係数値は 6.4.1 (1)参照

(f) 移行経路解析の結果(涵養量の変動による変化)

6.4.1 (1)における隆起侵食現象の進展を考慮し、実環境での透水性や透水異方性、涵養量の長期的変化を考慮した地下水流動解析と塩分濃度変化の解析を行い、パラメータの変化が移行経路のどのような影響を与えるかを検討した。この検討の中で MIG2DF と PASS_TRAC を用いた解析によって隆起侵食現象に関する多様な組み合わせの条件を検討し、核種移行解析とのリンケージのための移行距離・流速を定量的に把握することが可能となった。さらに、幌延サイトの現実的な範囲の条件をベースに、仮想的な堆積岩サイトでの隆起・侵食現象を想定した地下水流動・粒子追跡線の感度解析を行った。表 6.4-17 に全ケースにおける 125 粒子による移行距離、移行時間、平均流速の幾何平均値を示す。本解析結果から、規制の観点から隆起・侵食に関係のある天然バリアの重要な調査要件についてとりまとめると以下の様に列挙できる。

- ・ 地層の隆起現象に関しては、移行距離・流速に与える影響が小さい一様隆起よりも、特に動水勾配の増加による移行経路上の流速の増加に関係する傾動隆起が評価上重要であり、サイトでは長期的な傾動隆起の発生の可能性、発生する場合にはその様式設定の妥当性に着目すべきである。
- ・ 地層の侵食現象に関しては、処分場の相対的な対地深度の変化により、特に流速の増加傾向が見られたことから、サイトの空間的・時間的な侵食の様式設定の妥当性に着目すべきである。その際、サイトにおける堆積現象とあわせた様式の理解がなされているかどうかは、対地深度の変化を抑えた処分場位置の選定という視点で重要と考えられる。
- ・ 透水性の異方性に関しては、鉛直方向の透水性が大きい場合、隆起・侵食の進行に伴い懸念される移行経路の短絡、流速の増加があらわれることから、サイトにおける透水異方性は重要な調査要件の 1 つである。
- ・ 涵養量、涵養量のパターン変化については、想定される変化内での地下水流動や移行経路に対する影響はわずかである。

以上の感度解析の結果からは、処分場位置(水平・鉛直)の違いで移行距離・流速が大きく異なる結果が得られた。これらの結果は、上記の要件の他に、サイト本来の水理地質構造条件

や流出域・涵養域に依存したものであり、処分場位置の選定の妥当性検討の際には、こうした要件に留意すべきである。また、安全評価においては比較的短い距離で地表に流出する経路に留意する必要があり、広範囲な条件下での解析的検討が必要である。

表 6.4-17 全ケースにおける 125 粒子による移行距離、移行時間、平均流速の幾何平均値

ケース	移行距離(m)	移行時間(year)	平均流速(m/year)
case0_1	2.54E+03	4.65E+06	5.45E-04
case0_2	2.54E+03	4.65E+06	5.46E-04
case0_3	2.71E+03	1.60E+07	1.69E-04
case1	2.61E+03	5.13E+06	5.09E-04
case2	2.35E+03	1.42E+07	1.65E-04
case3	2.53E+03	4.69E+06	5.39E-04
case4	2.38E+03	1.44E+07	1.65E-04
case5	2.88E+03	1.40E+06	2.05E-03
case6	2.93E+03	3.33E+06	8.81E-04
case7	2.95E+03	3.38E+06	8.74E-04
case8	2.63E+03	6.18E+06	4.26E-04
case9	2.38E+03	1.16E+07	2.06E-04
case10	2.40E+03	1.16E+07	2.08E-04
case11	2.40E+03	1.15E+07	2.08E-04

(3) 隆起・侵食を想定したリンクージ解析の解析ケースの設定

(a) 処分場初期位置の設定

地下水流動解析の解析条件を基に図 6.4-28 に示す 8 箇所 (P1 ~ P8) を処分場の初期位置として設定した。具体的には、横軸 (図中 x 軸) 方向について、断層から 100m 以上離れた西側 (図の左側) に 3 地点を設定し、縦軸 (図中 y 軸) 方向について、地表面から -300m (P1、2、3)、-400m (P4、5)、-500m (P6、7)、-600m (P8) の処分深度となるよう設定した。

ここで、地下水流動の解析ケースごとに、地下水流路解析コード PASS-TRAC を用いて求めた、各処分場位置から地表までの流跡線の 10 万年ごとの結果を図 6.4-29 ~ 図 6.4-39 に示す。

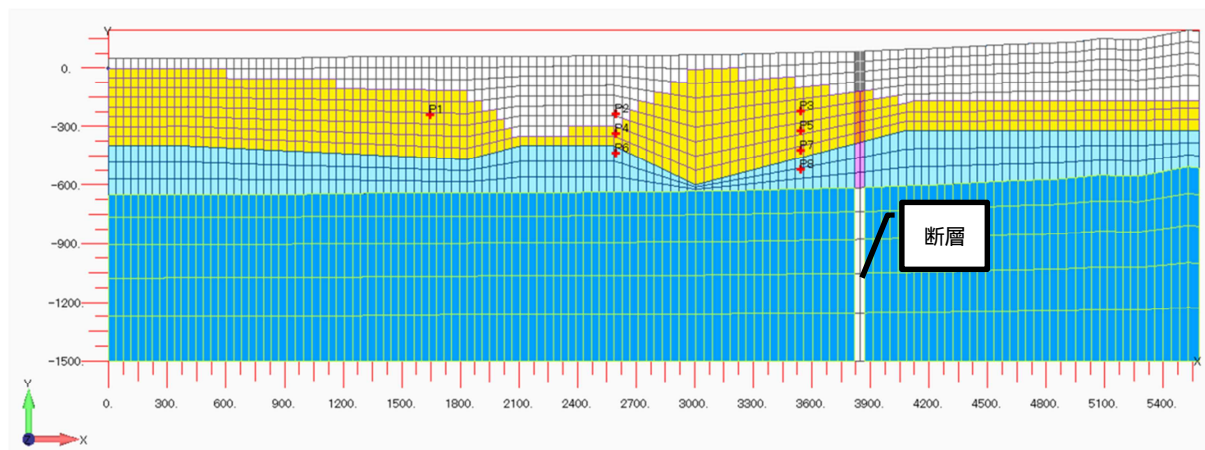


図 6.4-28 隆起・侵食を想定したリンクージ解析で想定した処分場位置

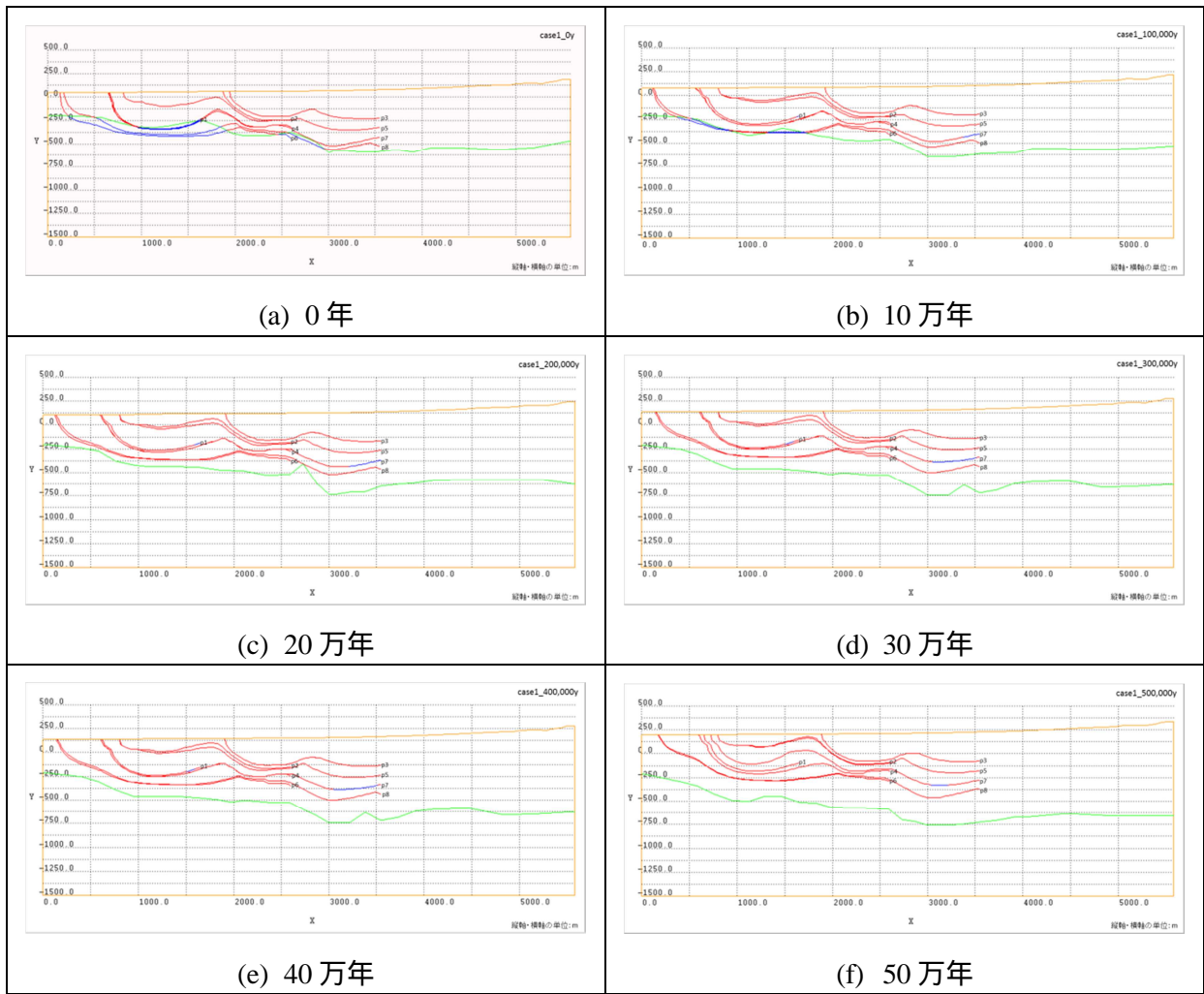


図 6.4-29 地下水流動の各解析ケースにおける処分場位置から地表までの流跡線の10万年ごとの結果 (Case1)

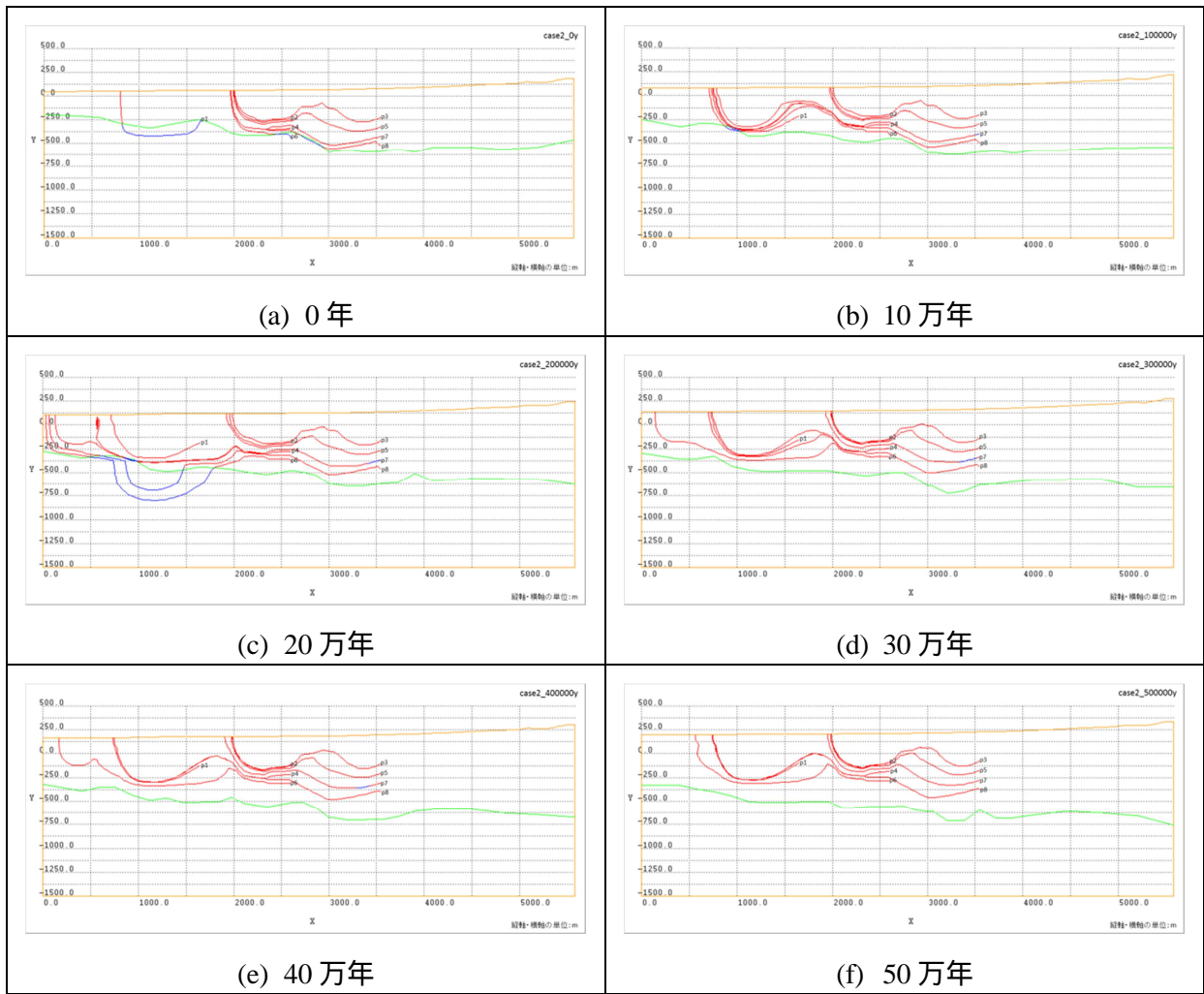


図 6.4-30 地下水流動の各解析ケースにおける処分場位置から地表までの流跡線の10万年ごとの結果 (Case2)

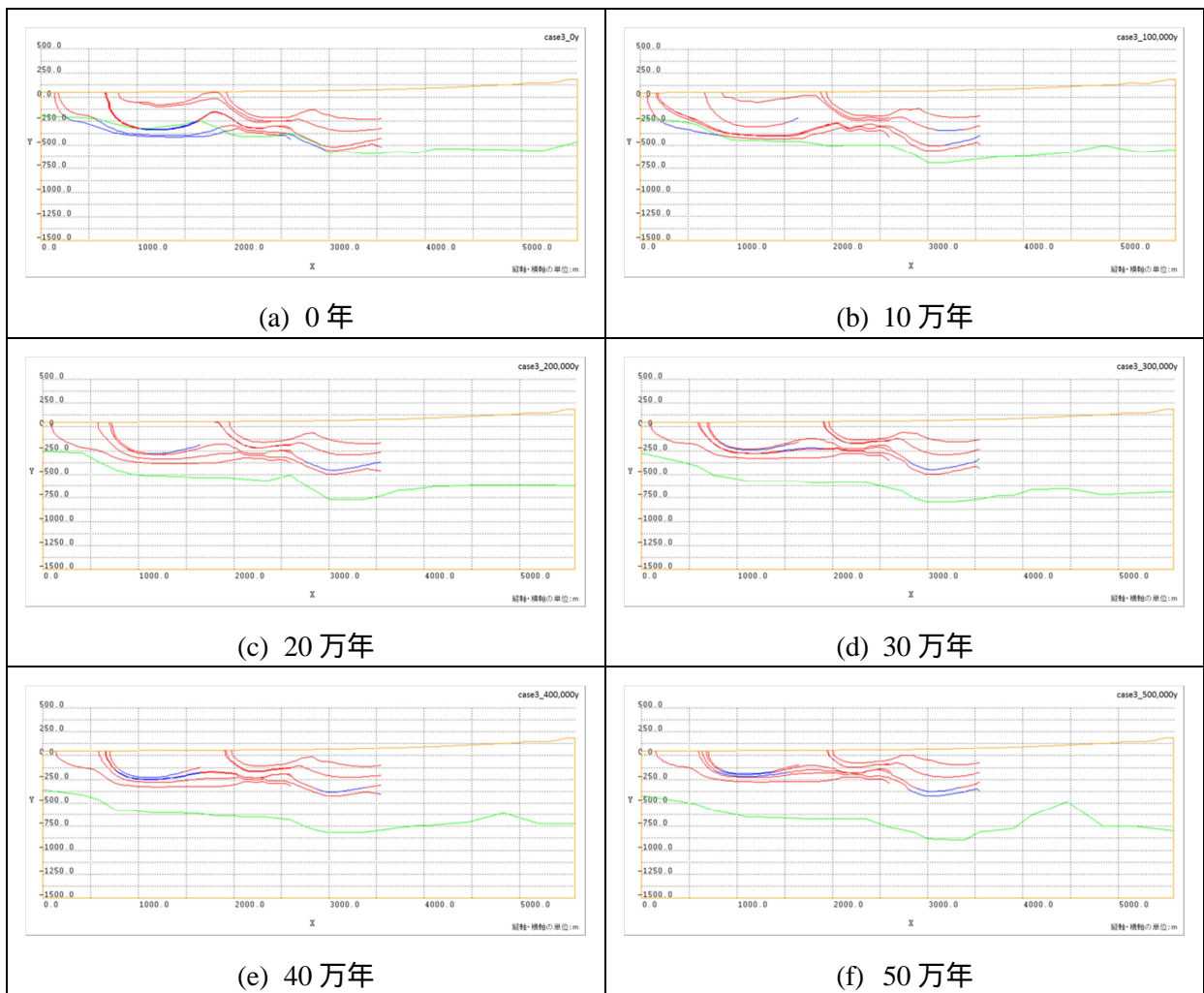


図 6.4-31 地下水流動の各解析ケースにおける処分場位置から地表までの流跡線の10万年ごとの結果 (Case3)

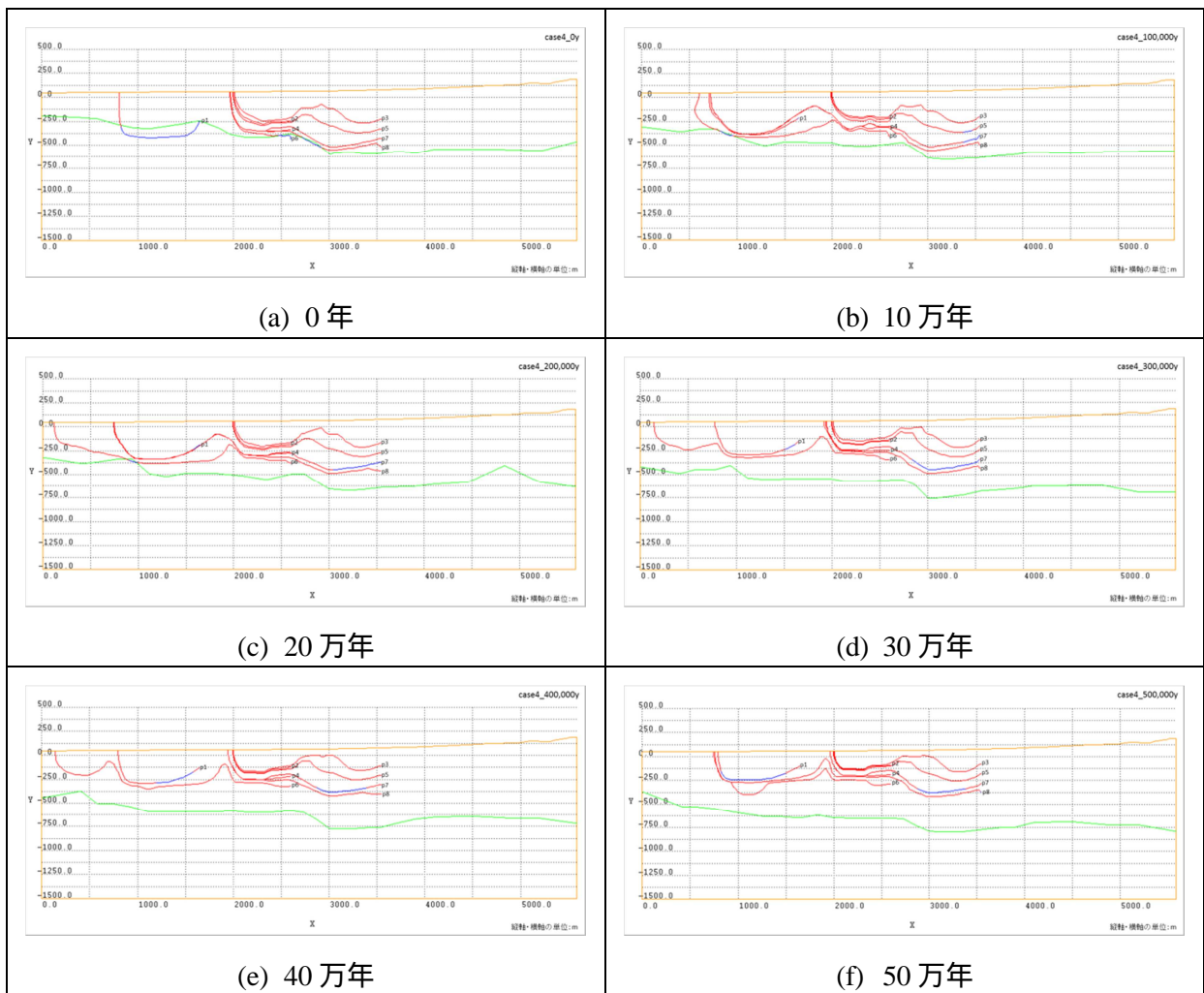


図 6.4-32 地下水流動の各解析ケースにおける処分場位置から地表までの流跡線の10万年ごとの結果 (Case4)

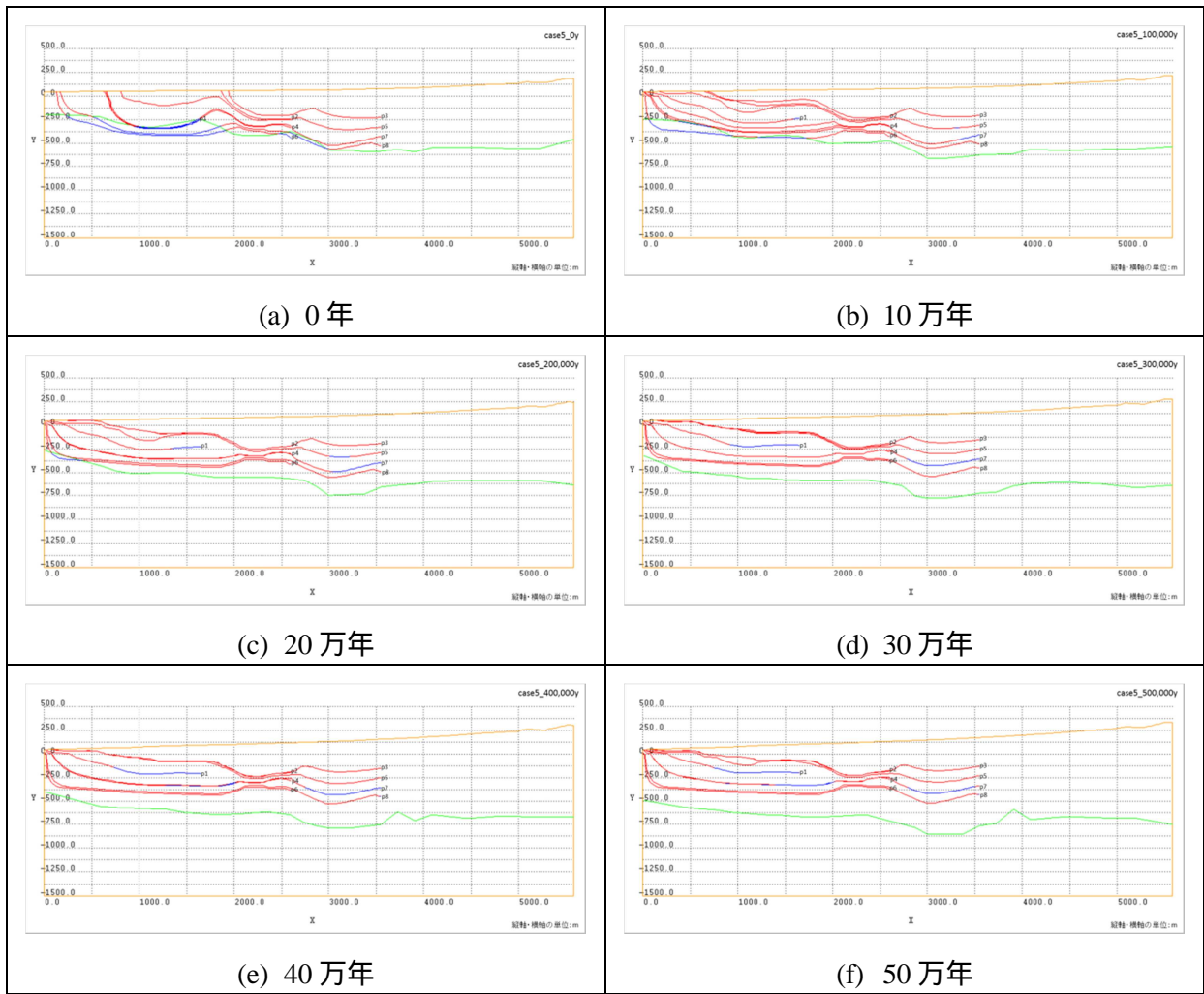


図 6.4-33 地下水流動の各解析ケースにおける処分場位置から地表までの流跡線の10万年ごとの結果 (Case5)

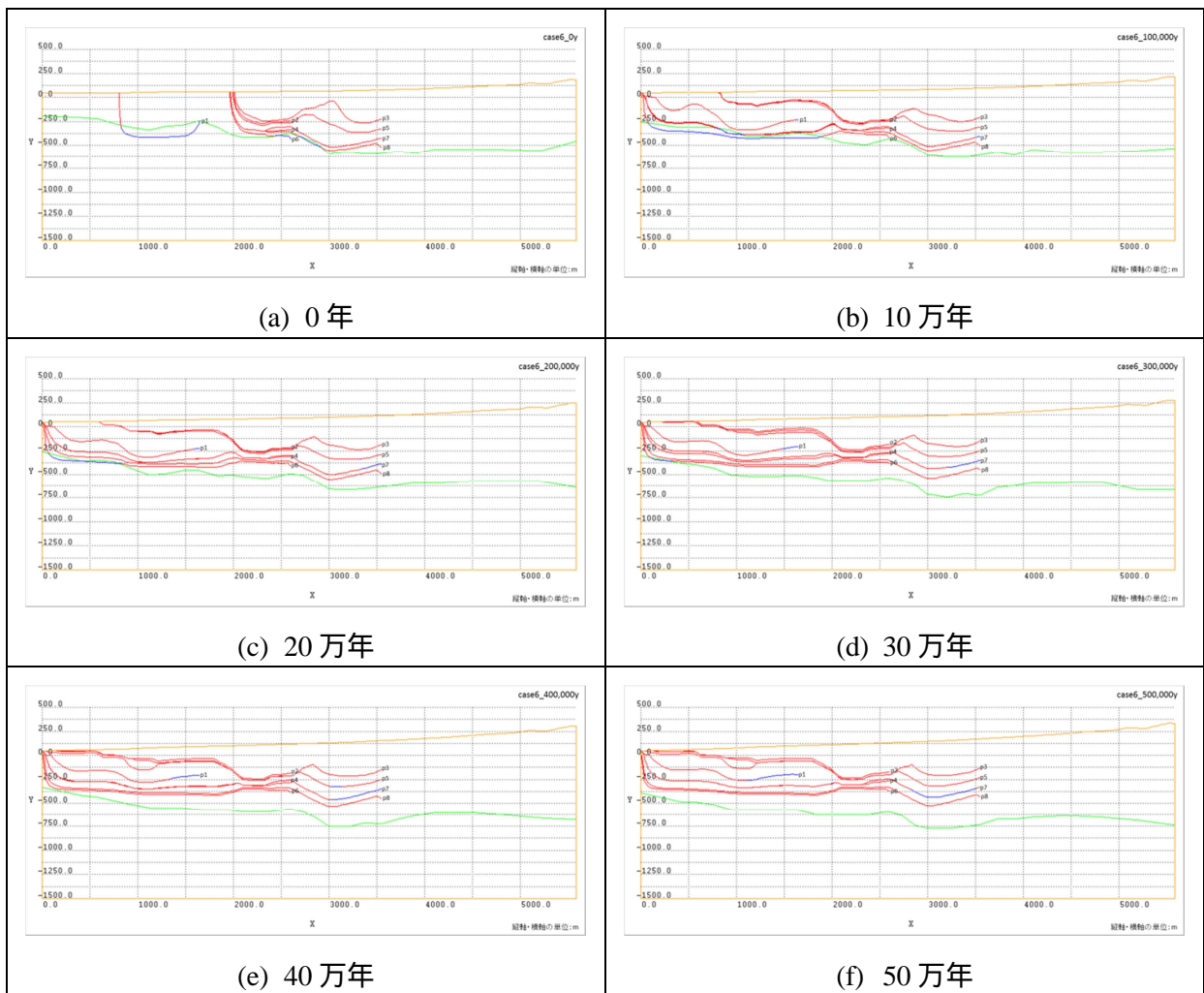


図 6.4-34 地下水流動の各解析ケースにおける処分場位置から地表までの流跡線の10万年ごとの結果 (Case6)

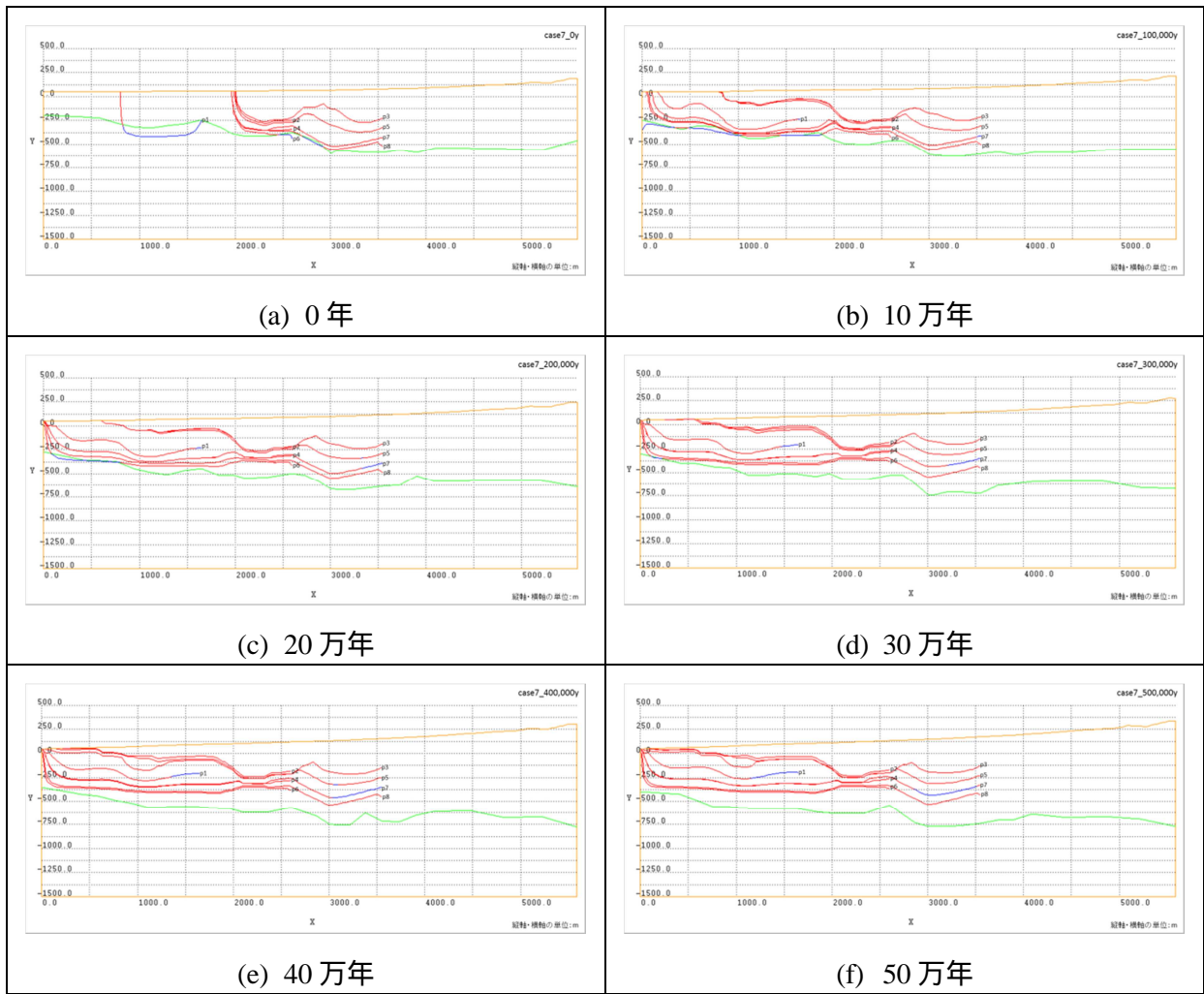


図 6.4-35 地下水流動の各解析ケースにおける処分場位置から地表までの流跡線の10万年ごとの結果 (Case7)

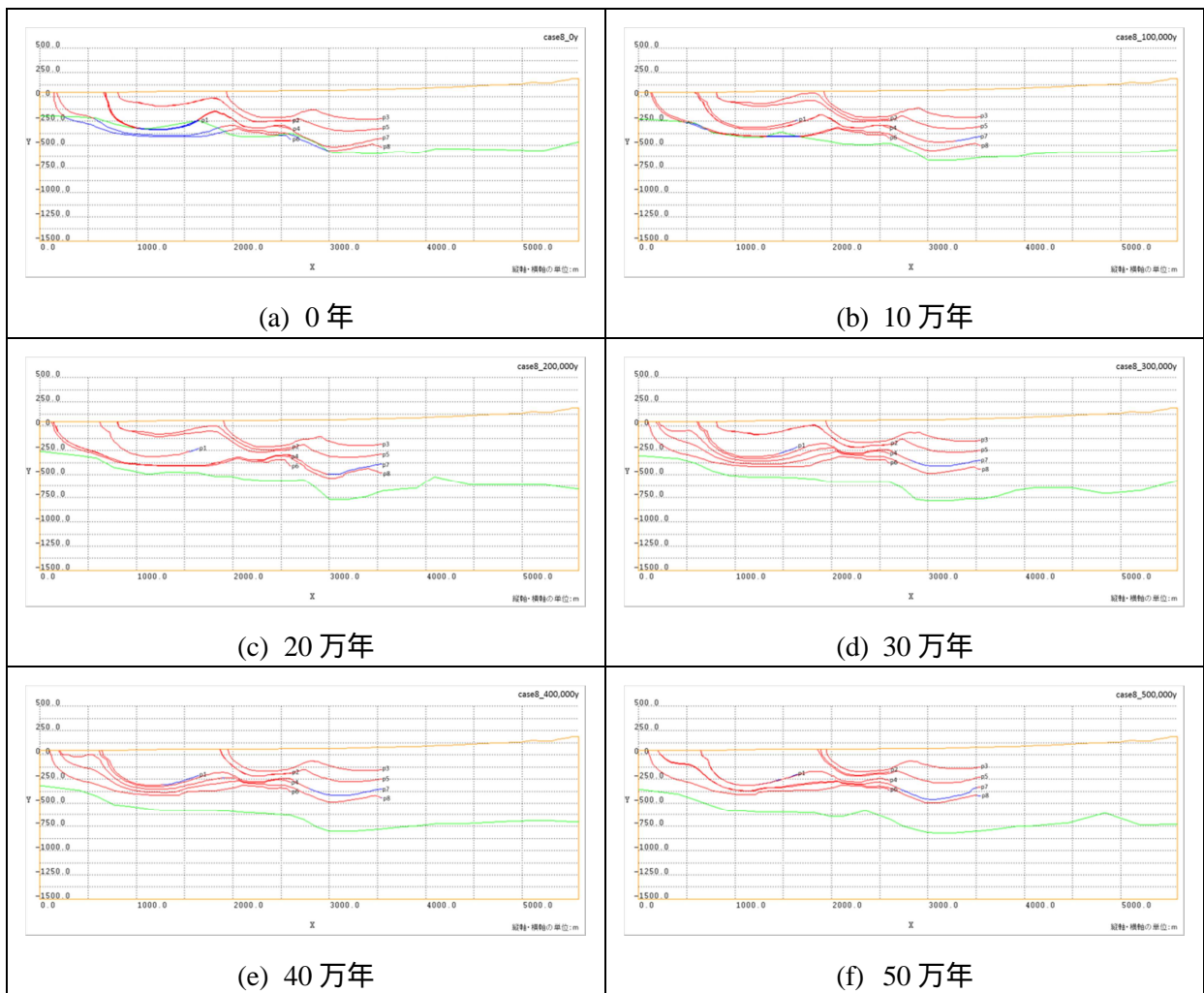


図 6.4-36 地下水流動の各解析ケースにおける処分場位置から地表までの流跡線の10万年ごとの結果 (Case8)

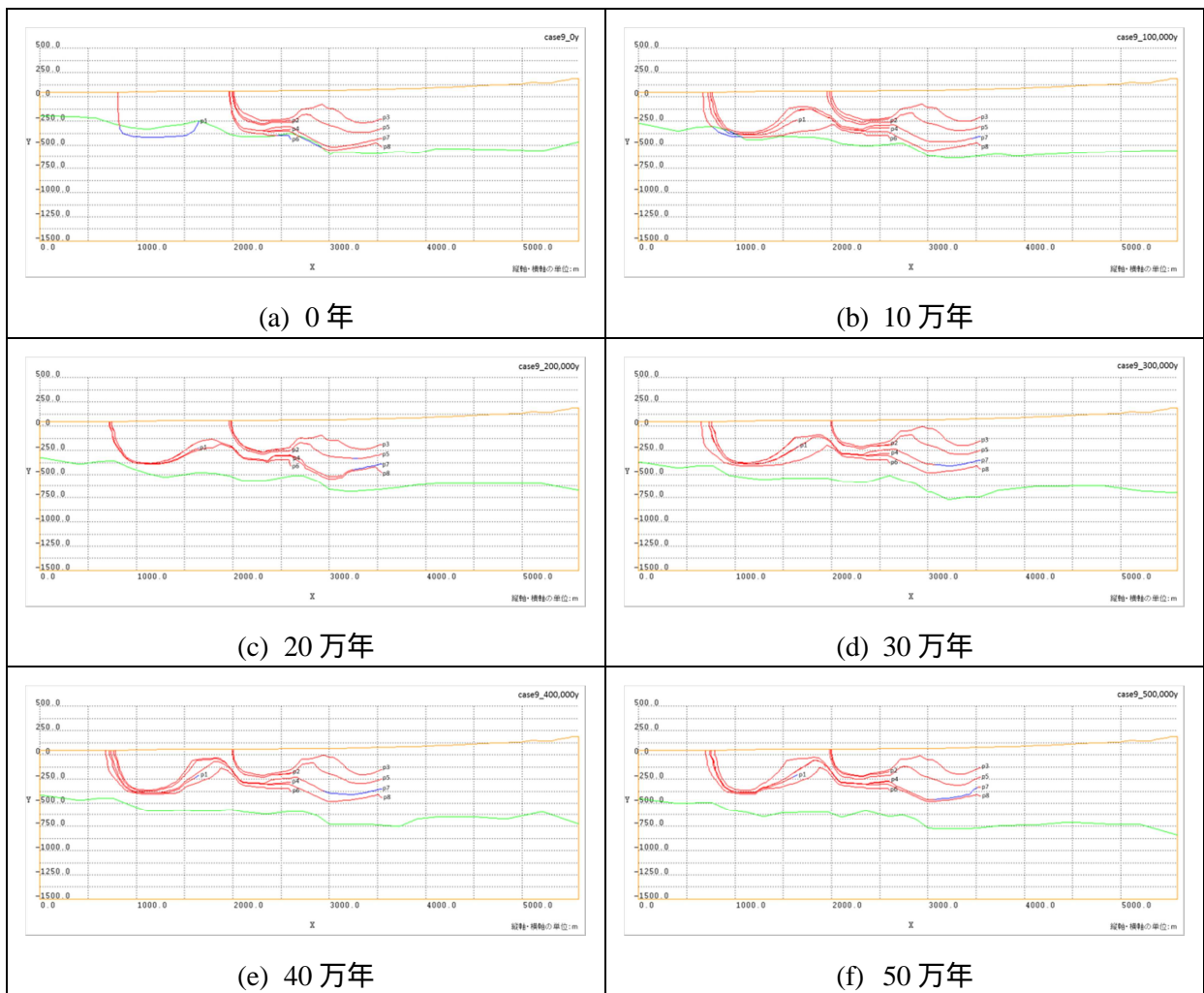


図 6.4-37 地下水流動の各解析ケースにおける処分場位置から地表までの流跡線の10万年ごとの結果 (Case9)

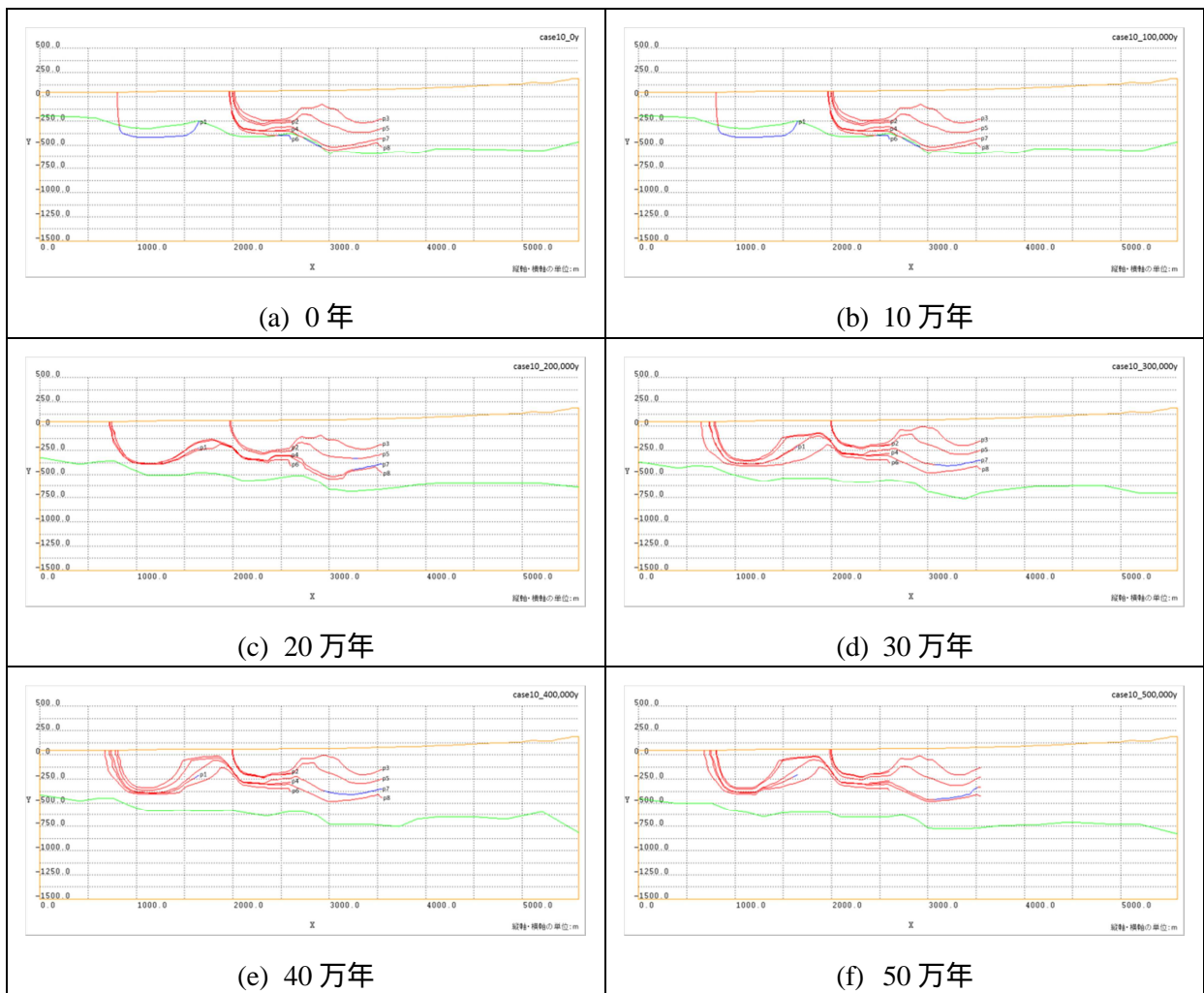


図 6.4-38 地下水流動の各解析ケースにおける処分場位置から地表までの流跡線の10万年ごとの結果 (Case10)

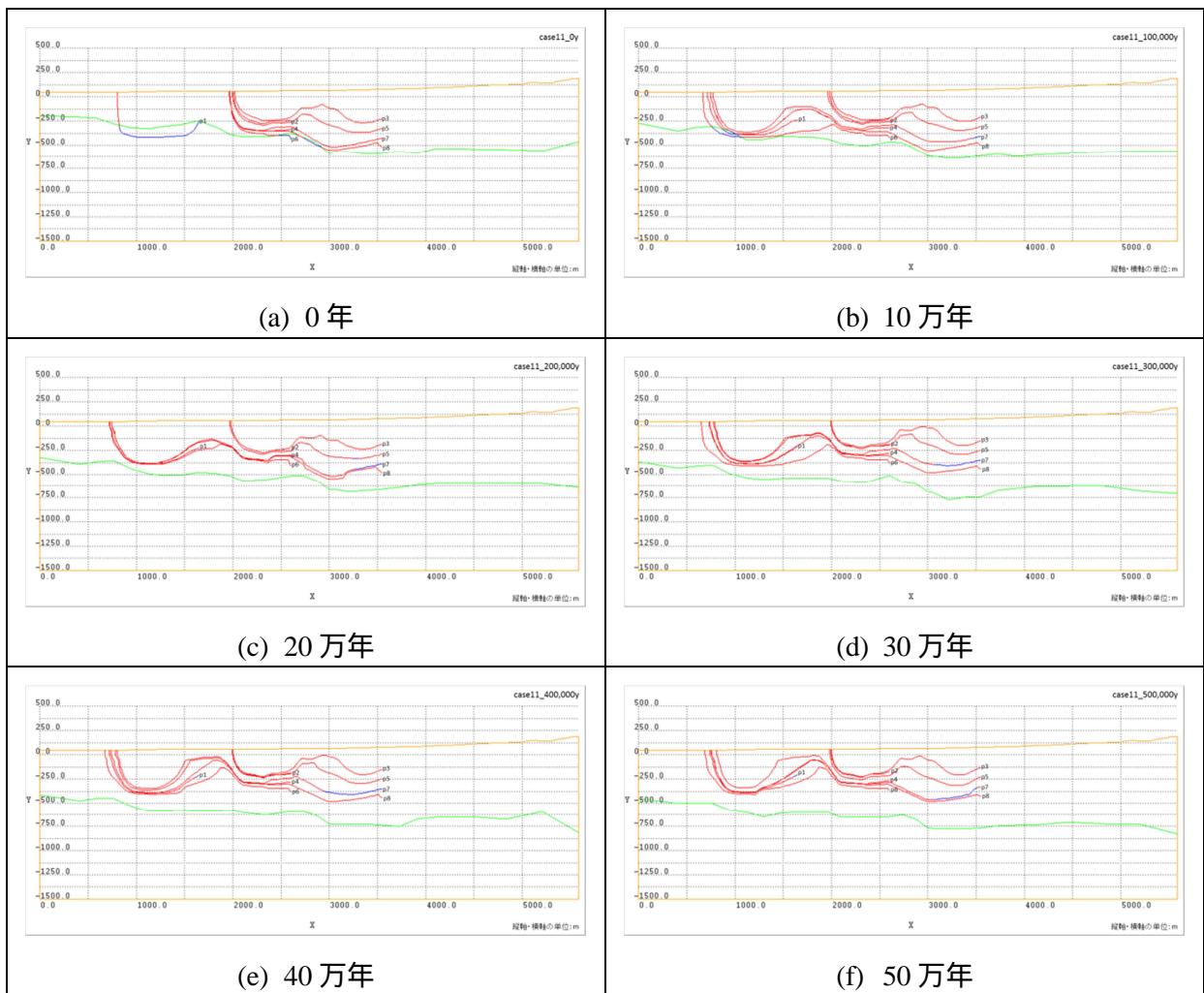


図 6.4-39 地下水流動の各解析ケースにおける処分場位置から地表までの流跡線の10万年ごとの結果 (Case11)

(b) 流速及び移行距離の経時変化

解析ケースごとにみた処分場位置の影響について

まず、地下水流動解析の解析ケースごとに、上記で設定した 8 箇所の処分場位置の移行距離及び平均流速を整理した結果を図 6.4-40 に示す。なお、ここでの移行距離とは、安全評価上の天然バリアとしての核種の移行遅延が機能する距離として考えるため、地表付近の生物圏までの距離として、地表から 40m を帯水層と仮定し、処分場から帯水層の下限に達するまでの距離として算出したものである。また、地下水流路解析コード PASS-TRAC の仕様により、各 Case の 0 年の移行経路解析には、初期の 1000 年間のパラメータの変化が含まれている。

地形変化のない隆起のみの比較的安定した解析条件である Case1 についてみると、処分深度にほぼ依存して、処分深度が浅いほど移行距離は短く、流速も速い傾向がある。また、処分場位置の横軸方向の位置の観点からみると、処分場直上に透水係数の高い領域が広く分布している中央の P2 や P4、P7 は同じ処分深度の他の点に比べて、移行距離が短く、流速も速い傾向がある。

その他の透水異方性や侵食、傾動隆起を考慮したケースでもほぼ同様の傾向がみられるが、処分場位置によっては、移行経路の短絡による移行距離の急激な減少もみられ、複雑な変化パターンとなっている。

また、Case6 と 7、Case9 と 10 と 11 に関しては、解析条件としてそれぞれ考慮する涵養量のみを変化させているが、各組合せでほぼ同様の結果が得られていることがわかる。そこで、これ以降の検討では、前者については Case7 を、後者については Case10 のみを対象とした。

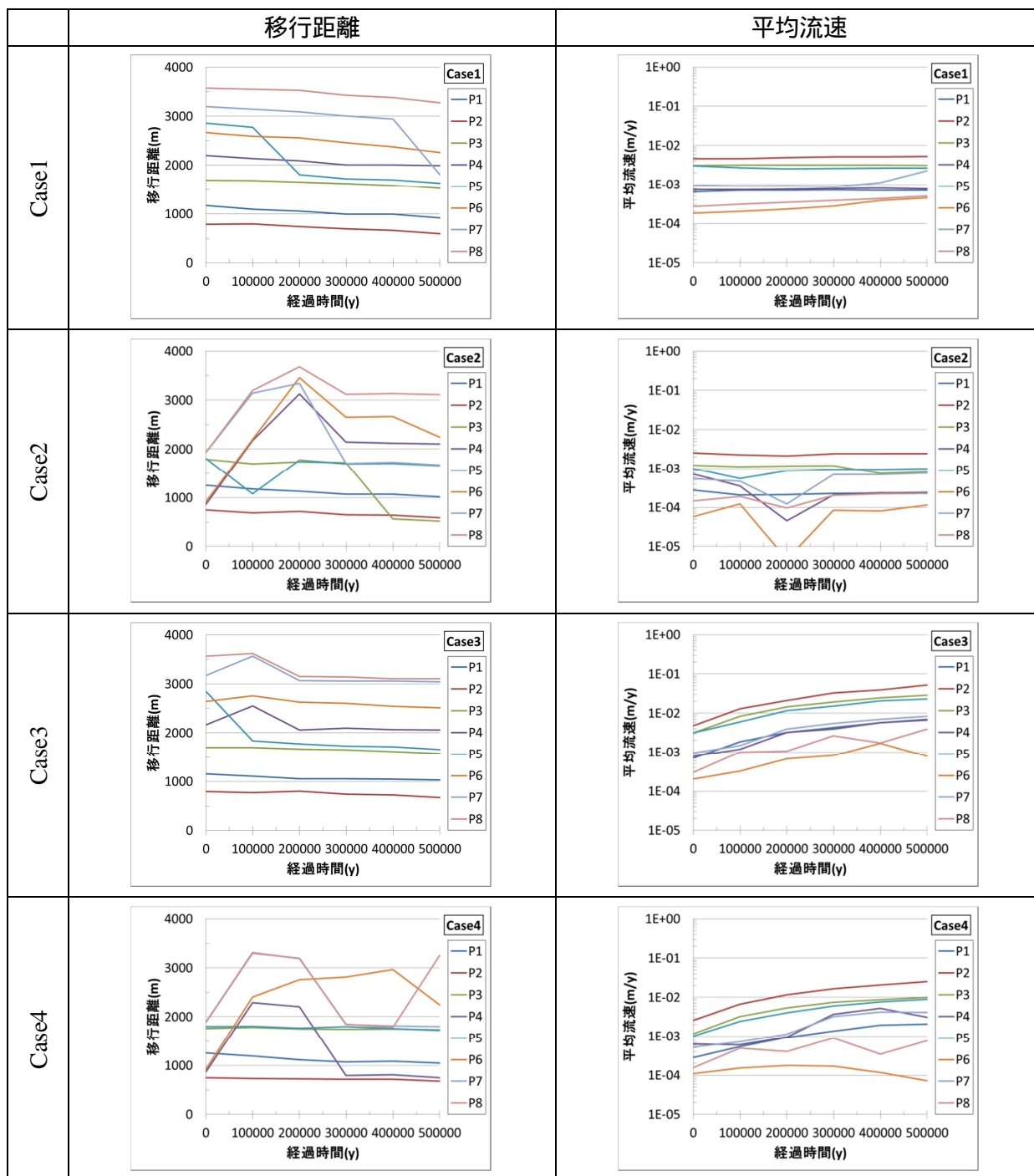


図 6.4-40 地下水流動解析の解析ケースにおける処分場位置ごとの移行距離及び平均流速（一様隆起ケース：1/3）

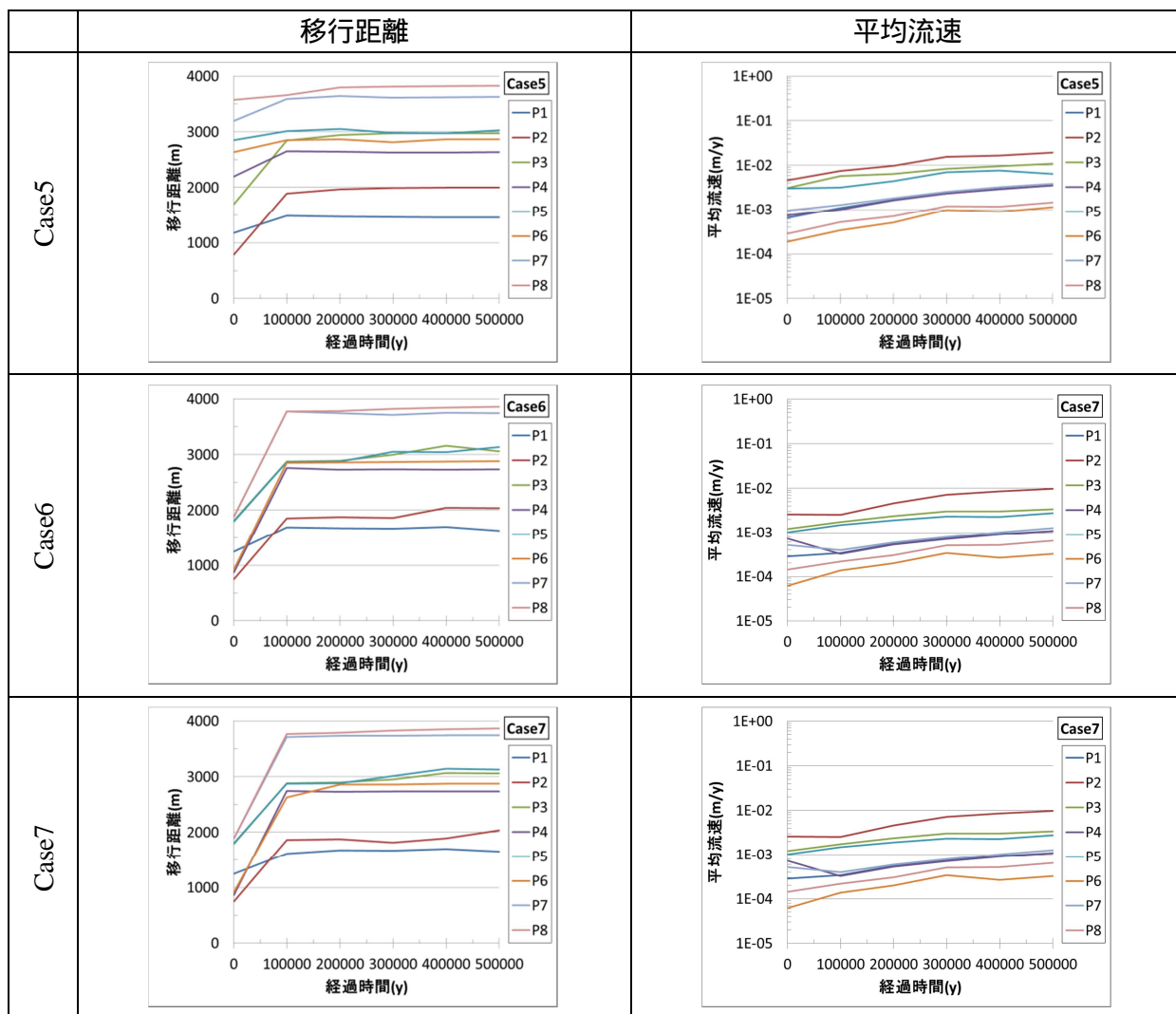


図 6.4-40 地下水流動解析の解析ケースにおける処分場位置ごとの移行距離及び平均流速（傾動隆起・侵食なしケース：2/3）

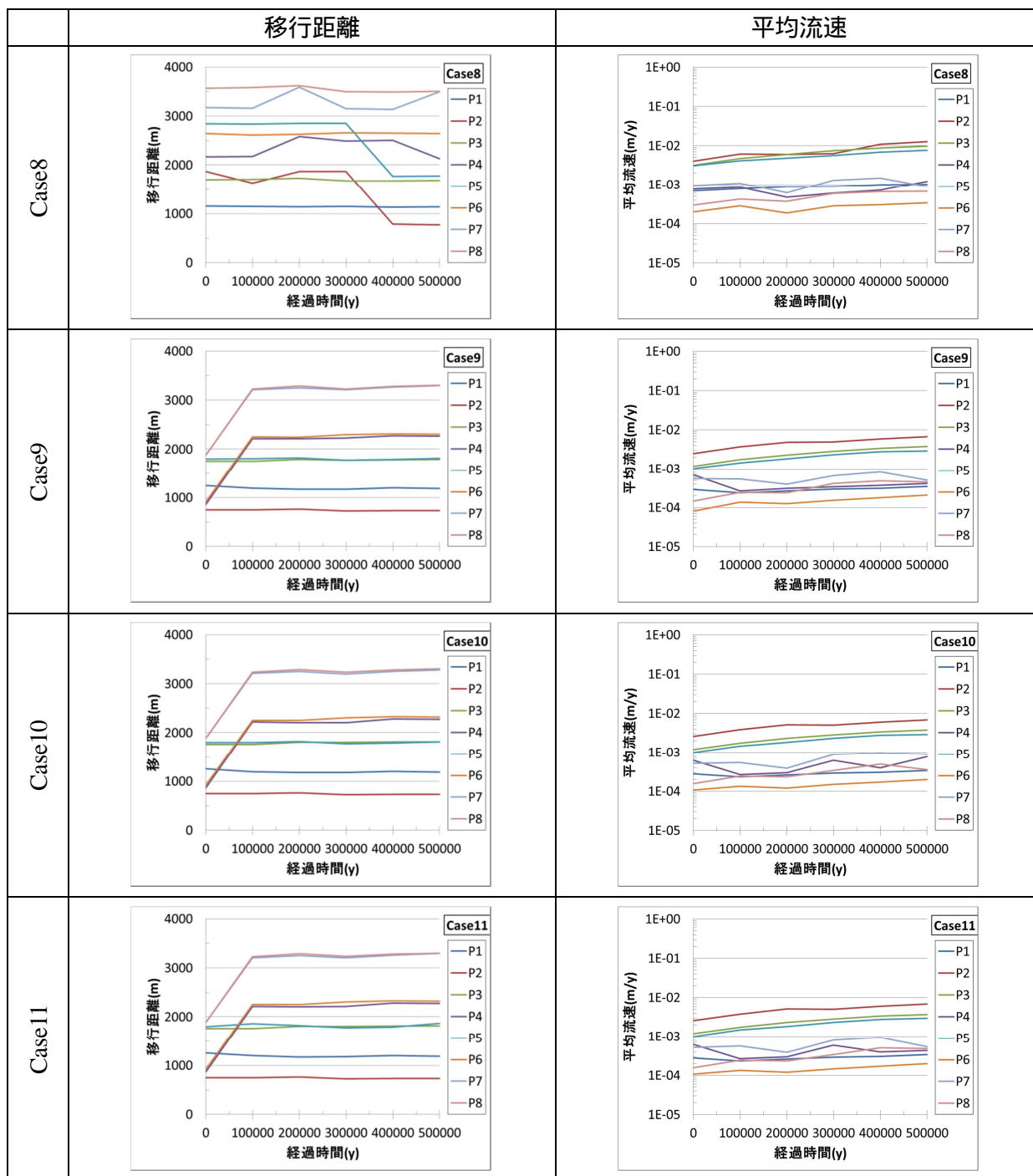


図 6.4-40 地下水流動解析の解析ケースにおける処分場位置ごとの移行距離及び平均流速（傾動隆起・侵食ありケース：3/3）

処分場位置ごとにみた解析ケースの影響について

次に、処分場位置ごとに整理した、地下水流動解析の解析ケースの移行距離を図 6.4-41 に、平均流速を図 6.4-42 に示す。同様に、ここでの移行距離とは、安全評価上の天然バリアとしての核種の移行遅延が機能する距離として地表から 40m を帯水層と仮定し、処分場から帯水層の下限に達するまでの距離として算出したものである。また、便宜的に、透水異方性を考慮しないケースと考慮するケースを分けて表示している。

透水異方性の影響に関しては、概して、透水異方性を考慮したケース (Case2、4、8、10) が、考慮しないケース (Case1、3、5、7) に比べて、移行距離が長く、流速は遅い傾向がある。ただし、解析ケースと処分場位置の組合せによっては、透水異方性を考慮した方が、移行経路の短絡により、移行距離が急激に短くなるケース (Case2 の P3 や Case4 の P4、Case2 及び 4 の P7) もある。なお、そのような移行経路の短絡が生じた場合でも、流速の急激な変化はみられない。

また、侵食の影響については、一様隆起及び傾動隆起ともに、移行距離に対する影響は比較的小さい。一方、平均流速に対しては、一様隆起と傾動隆起とともに侵食に伴う透水係数の上昇を考慮しているものの、その影響が異なっている。つまり、一様隆起では、侵食を考慮したケース (Case3、4) の方が、考慮しないケース (Case1、2) に比べて速くなっており、これは、侵食に伴う透水係数の上昇と一致している。それに対して、傾動隆起では、侵食を考慮したケース (Case8、10) と考慮しないケース (Case5、7) でほとんど差がないか (P3、5)、あるいは、逆に侵食を考慮した方の流速が遅いという場所 (P1、2、4、6、7、8) もみられる。

さらに、隆起のタイプの影響については、傾動隆起 (Case5、7、8、10) は、一様隆起 (Case1、2、3、4) よりも移行距離が長くなり、平均流速も速くなる傾向がある。ここで、移行距離が長くなったことに関しては、傾動隆起することで、浸出域がより遠くなり、平均流速が速くなったことに関しては、傾動隆起することで、動水勾配が大きくなるためであると考えられる。なお、傾動隆起による平均流速の増加に関して、西側の処分場位置ほど小さく、東側ほど大きいのは、この動水勾配の変化に関連している。

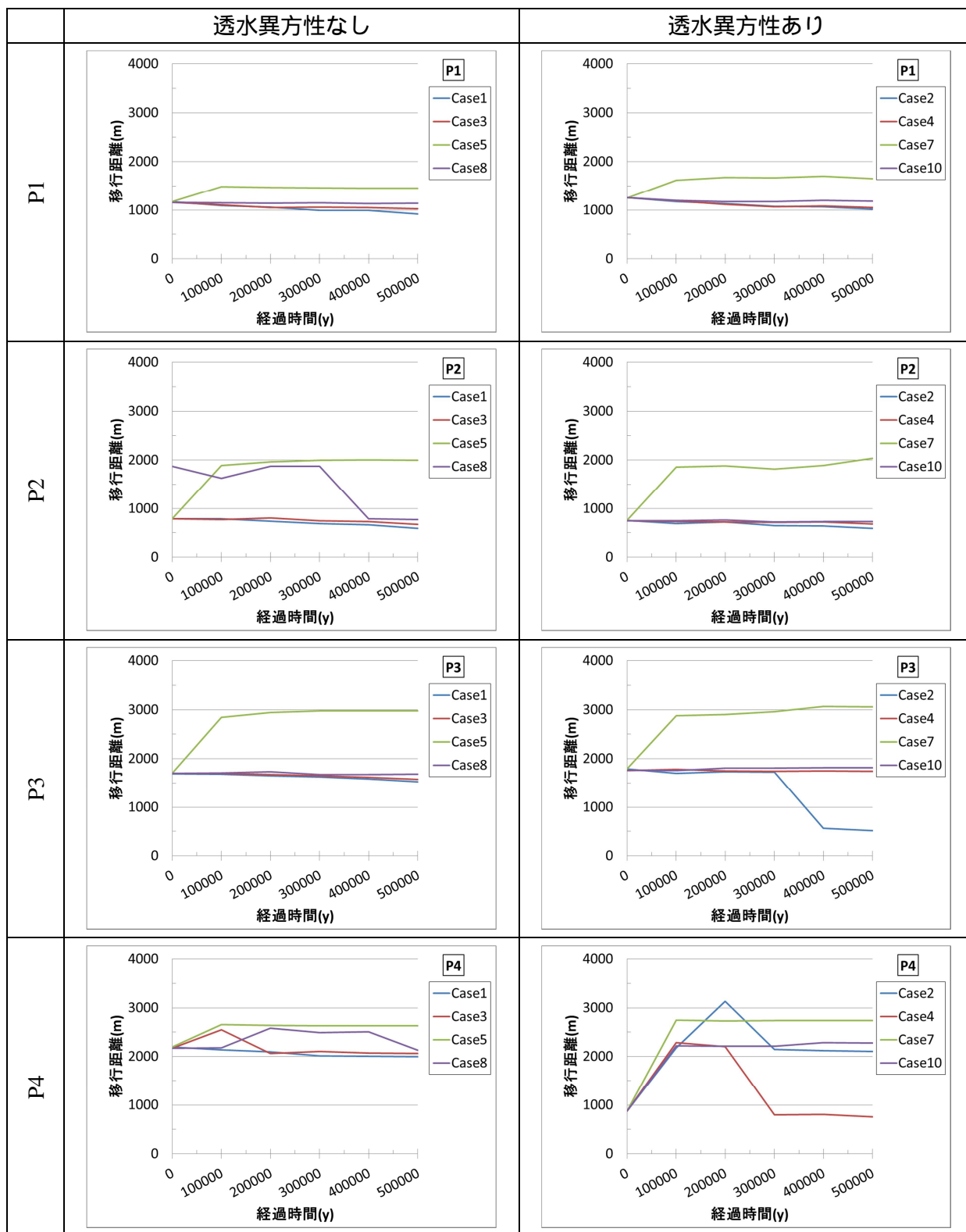


図 6.4-41 各処分場位置における地下水流動解析の解析ケースごとの移行距離の時間的な変化 (1/2)

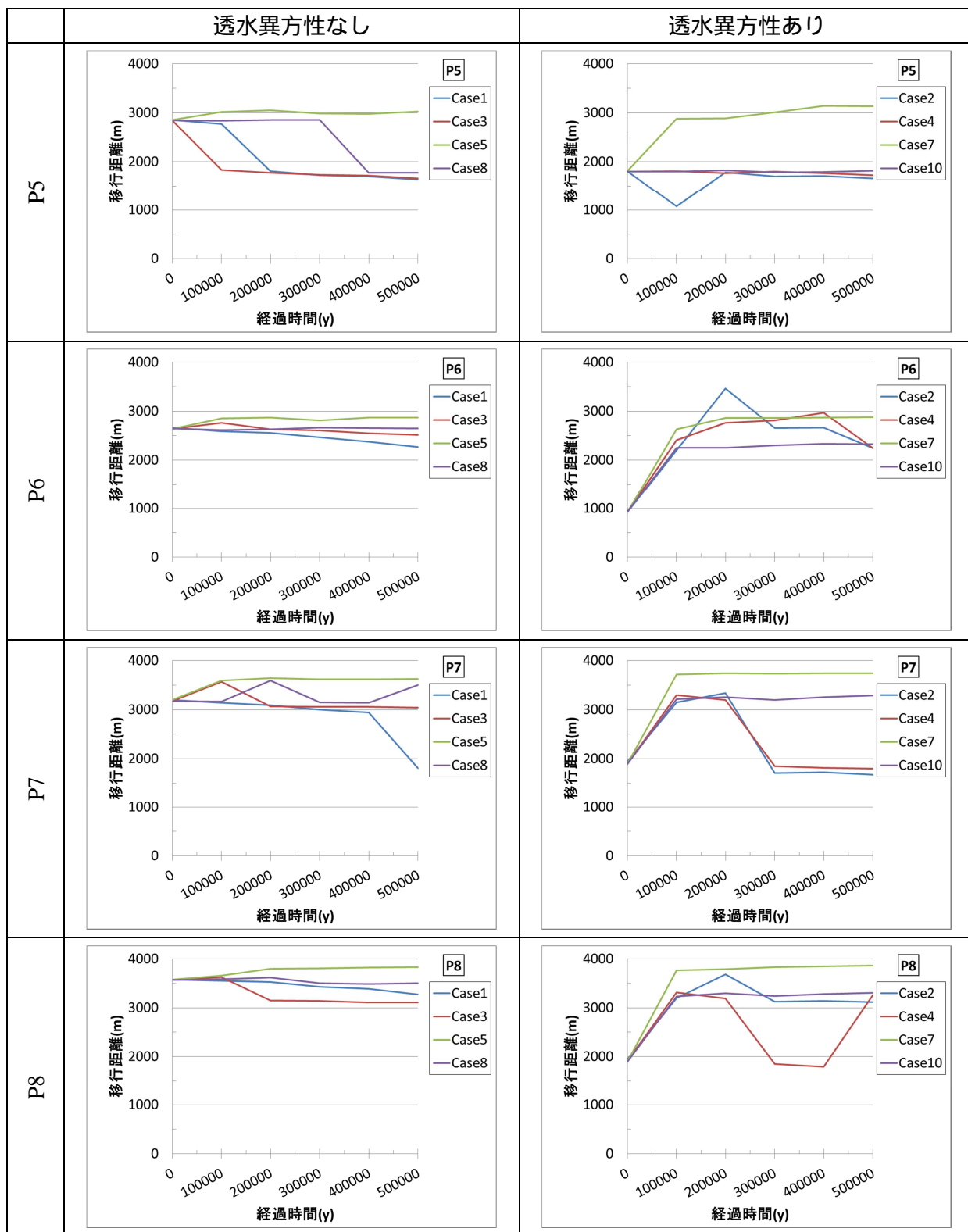


図 6.4-41 各処分場位置における地下水流動解析の解析ケースごとの移行距離の時間的な変化 (2/2)

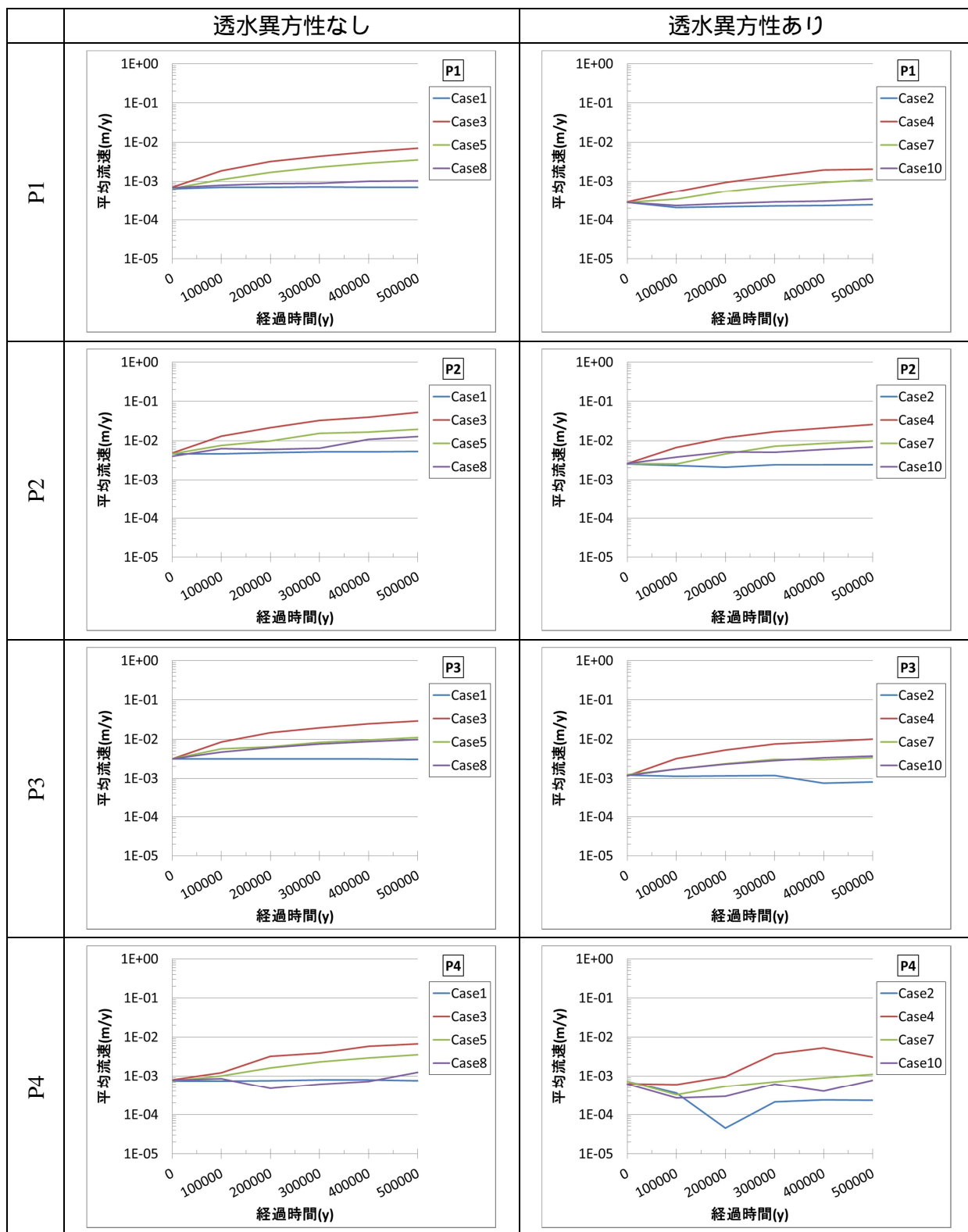


図 6.4-42 各処分場位置における地下水流動解析の解析ケースごとの平均流速の時間的な変化 (1/2)

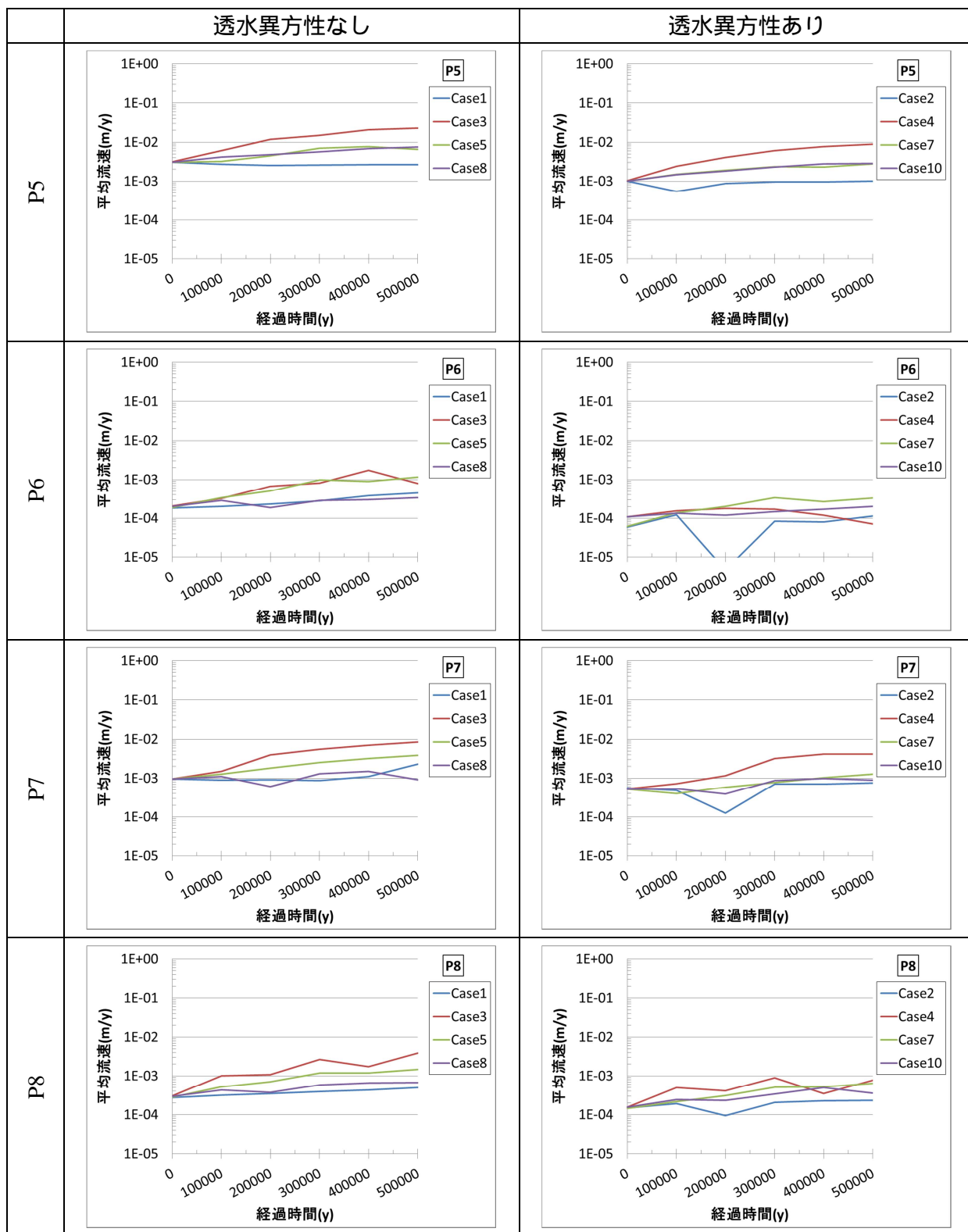


図 6.4-42 各処分場位置における地下水流動解析の解析ケースごとの平均流速の時間的な変化 (2/2)

(c) 隆起・侵食を想定したリンクージ解析の解析ケースの設定

上記の検討により、核種移行解析で考慮する解析ケースは、後述する通り、地下水流動における 8 つの解析ケース (Case1 ~ Case5、Case7、Case8、Case10) × 8 箇所の処分場位置 (P1 ~ P8) の計 64 ケースである (表 6.4-25)。

そこで、以下では、核種移行解析に資するため、上記の各解析ケースにおける移行経路上の地質条件と水質条件の内訳を図 6.4-43 ~ 図 6.4-50 に整理した。ここで、図の下側 (移行距離の 0m) が処分場側 (上流側) を、上側が地表側 (下流側) を表しており、棒グラフが地質条件の内訳を表している。なお、これ以降の検討では、簡便のため、図中の塩水/降水境界の下側 (上流側) の地下水 2 を塩水、上側 (下流側) の地下水 1 を降水と呼ぶものとする。

また、8 箇所の処分場位置において、初期状態において塩水条件であるのは、P1、P6、P7、P8 の 4 箇所であり、それらの処分場位置を想定した解析ケースでは、塩水条件から降水条件への変遷を考慮する必要があるため、処分場位置と塩水/降水境界の関係を図 6.4-51 ~ 図 6.4-58 に整理した。さらに、処分場位置と塩水/降水境界の関係から、処分場位置と塩水/降水境界が交差する最初の時刻を求め、これを処分場位置における塩水/降水条件の切り替わり時刻とした。解析ケースの処分場位置における塩水/降水条件の切り替わり時刻を表 6.4-18 に示す。同表には、百の位で四捨五入した時刻も併せて記載しており、実際の解析ではこちらを参考に解析条件を設定するものとした。なお、残りの 4 箇所 (P2、P3、P4、P5) の処分場位置に関しては、降水条件のみで解析を行う。

移行経路上の地質条件と水質条件の内訳

i) Case1

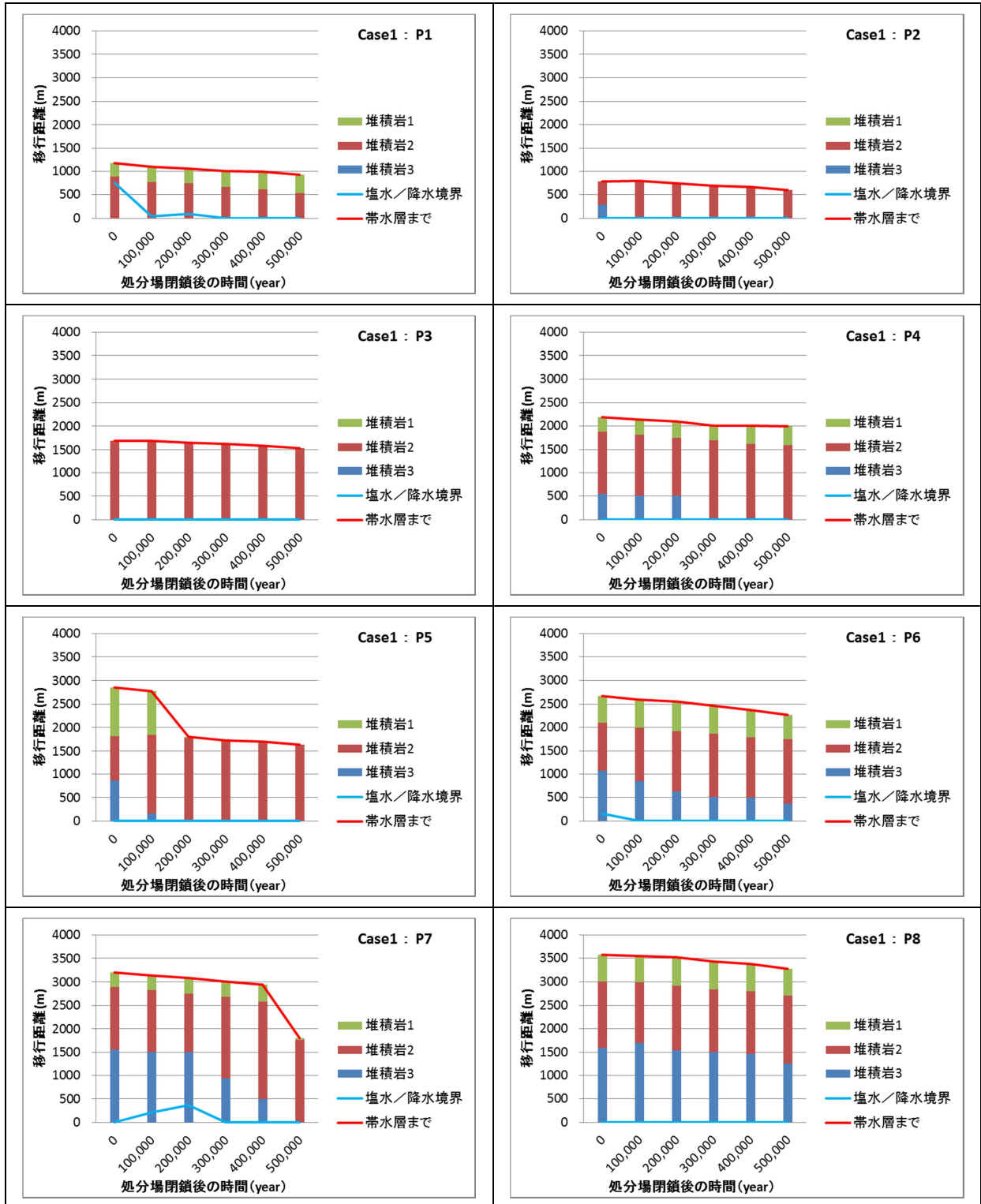


図 6.4-43 移行経路上の地質条件と水質条件の内訳：Case1

ii) Case2

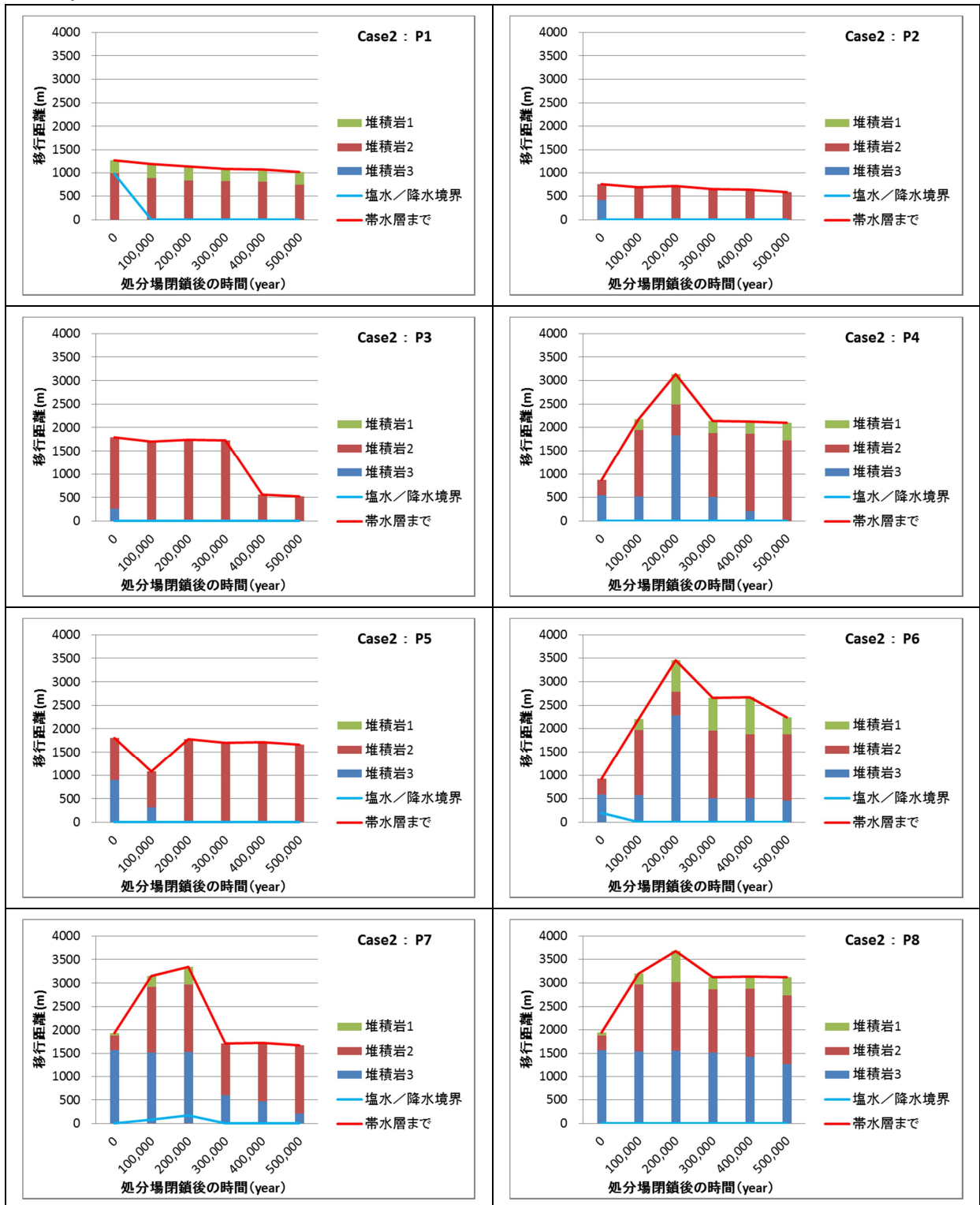


図 6.4-44 移行経路上の地質条件と水質条件の内訳：Case2

iii) Case3

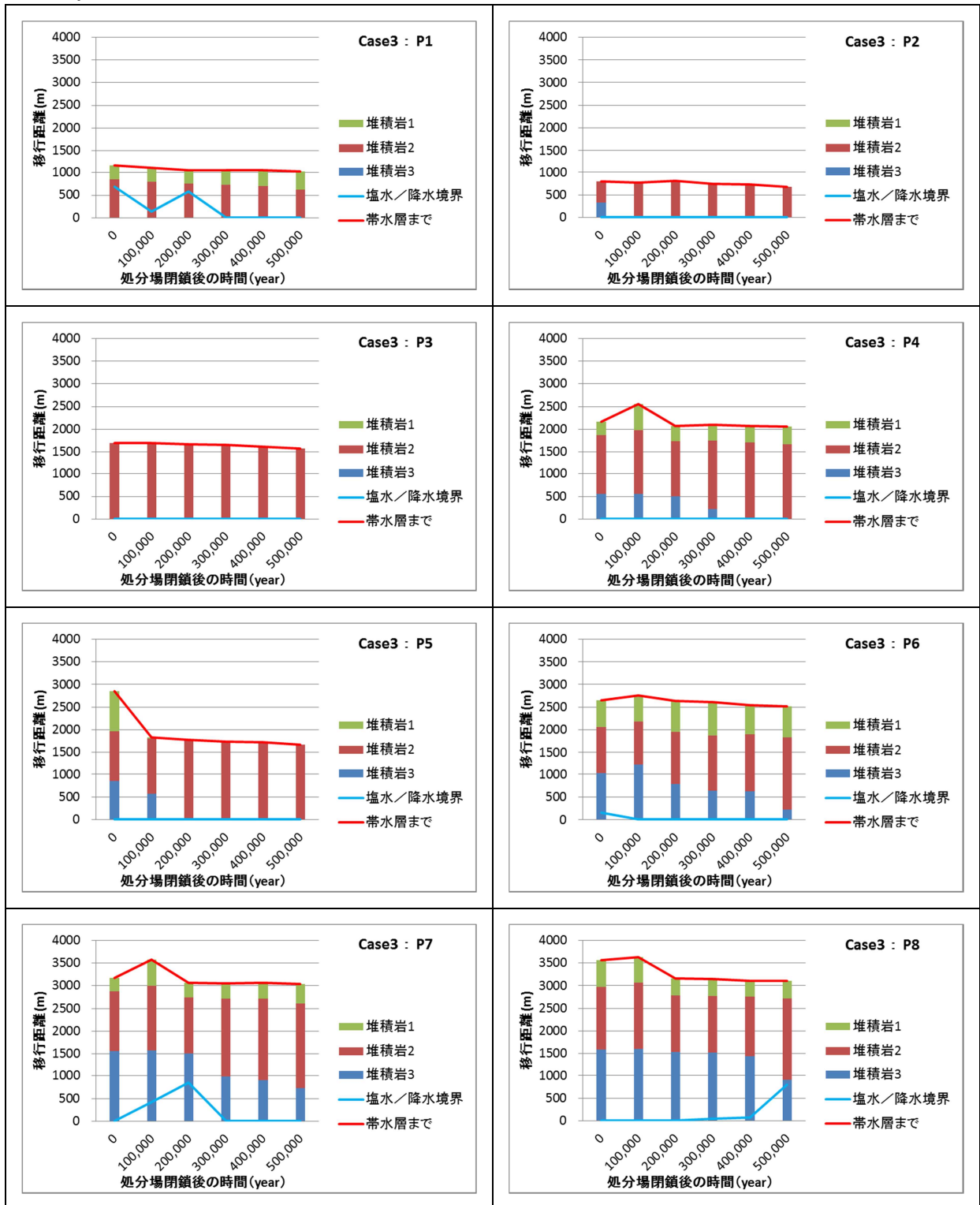


図 6.4-45 移行経路上の地質条件と水質条件の内訳：Case3

iv) Case4

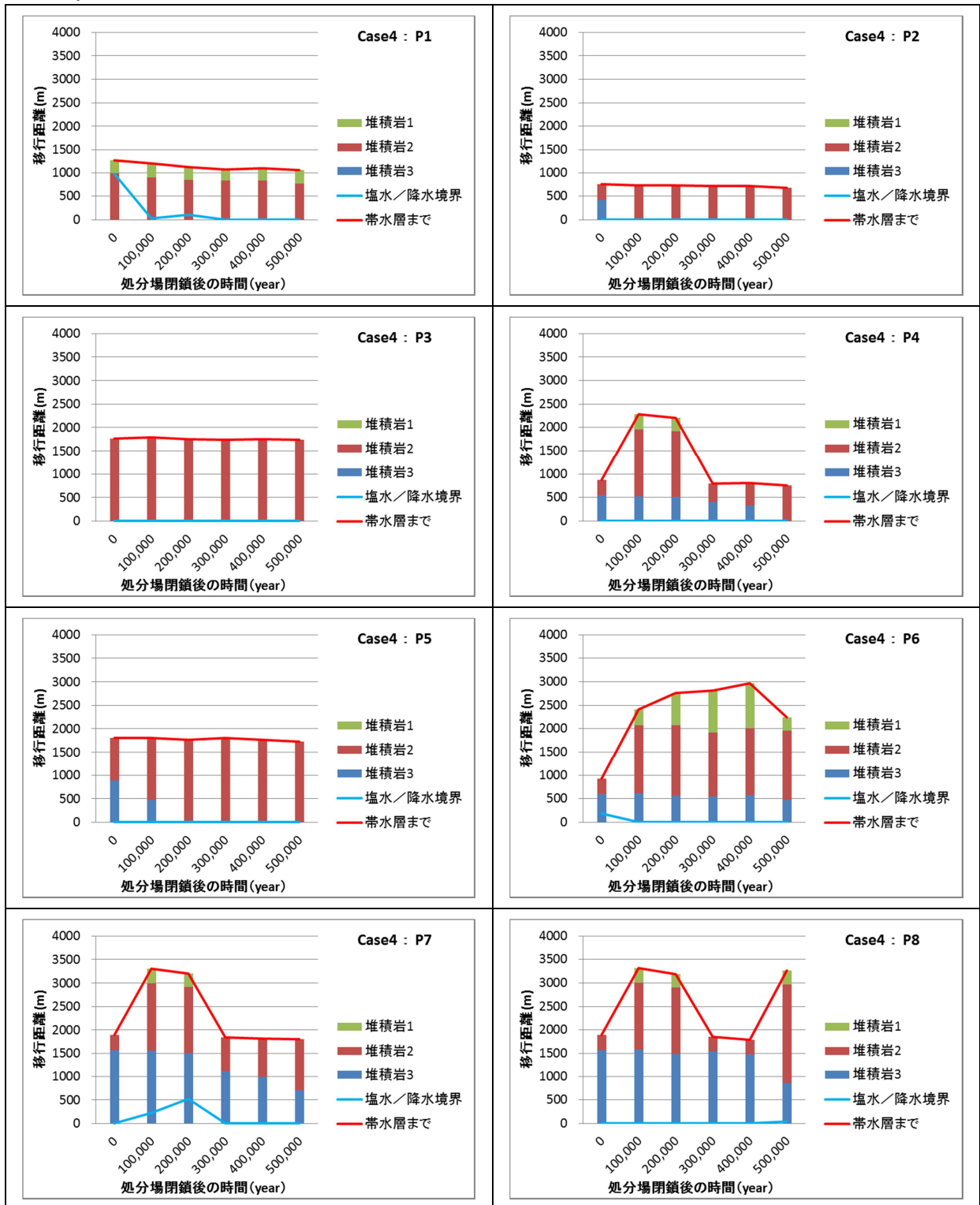


図 6.4-46 移行経路上の地質条件と水質条件の内訳：Case4

v) Case5

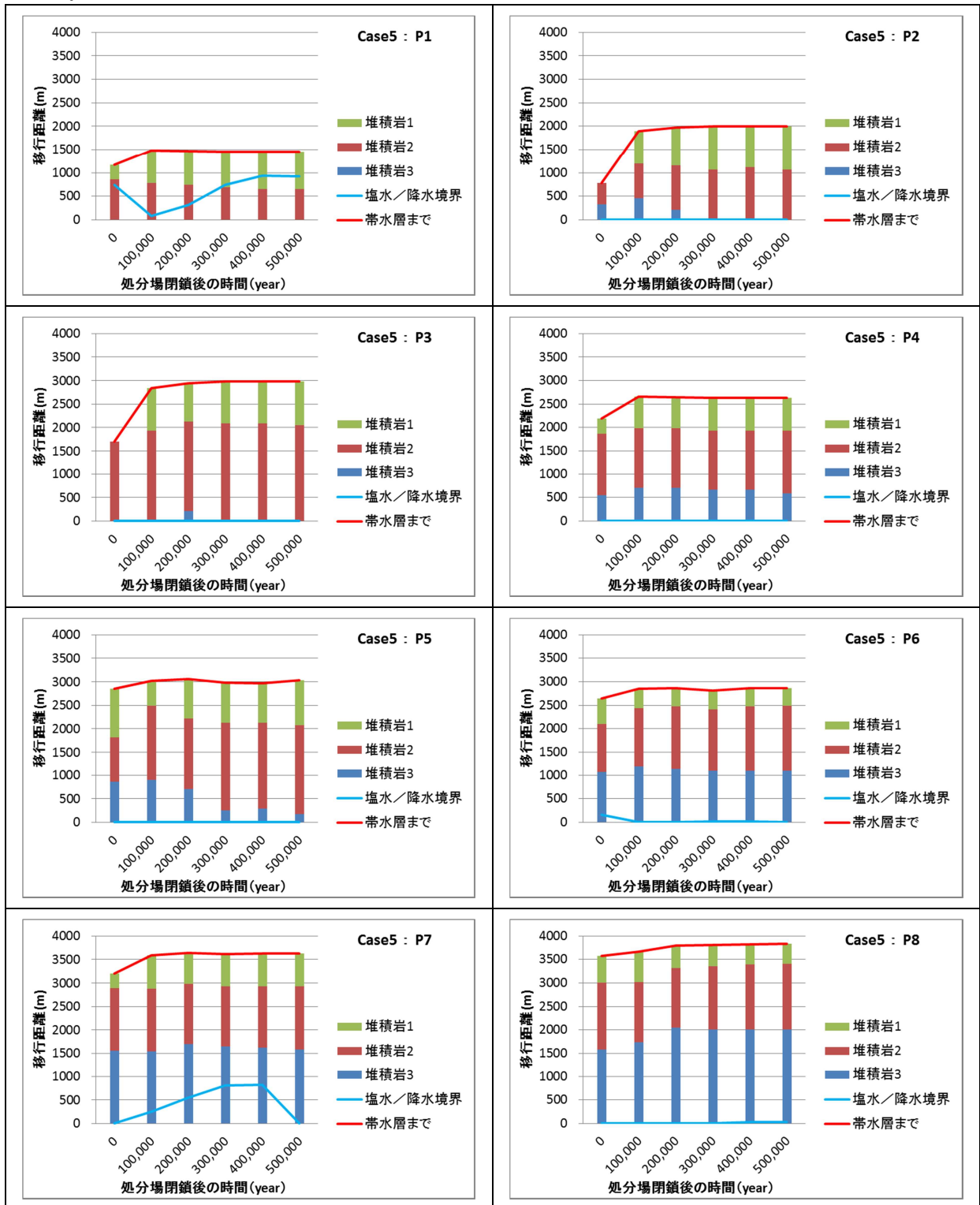


図 6.4-47 移行経路上の地質条件と水質条件の内訳：Case5

vi) Case7

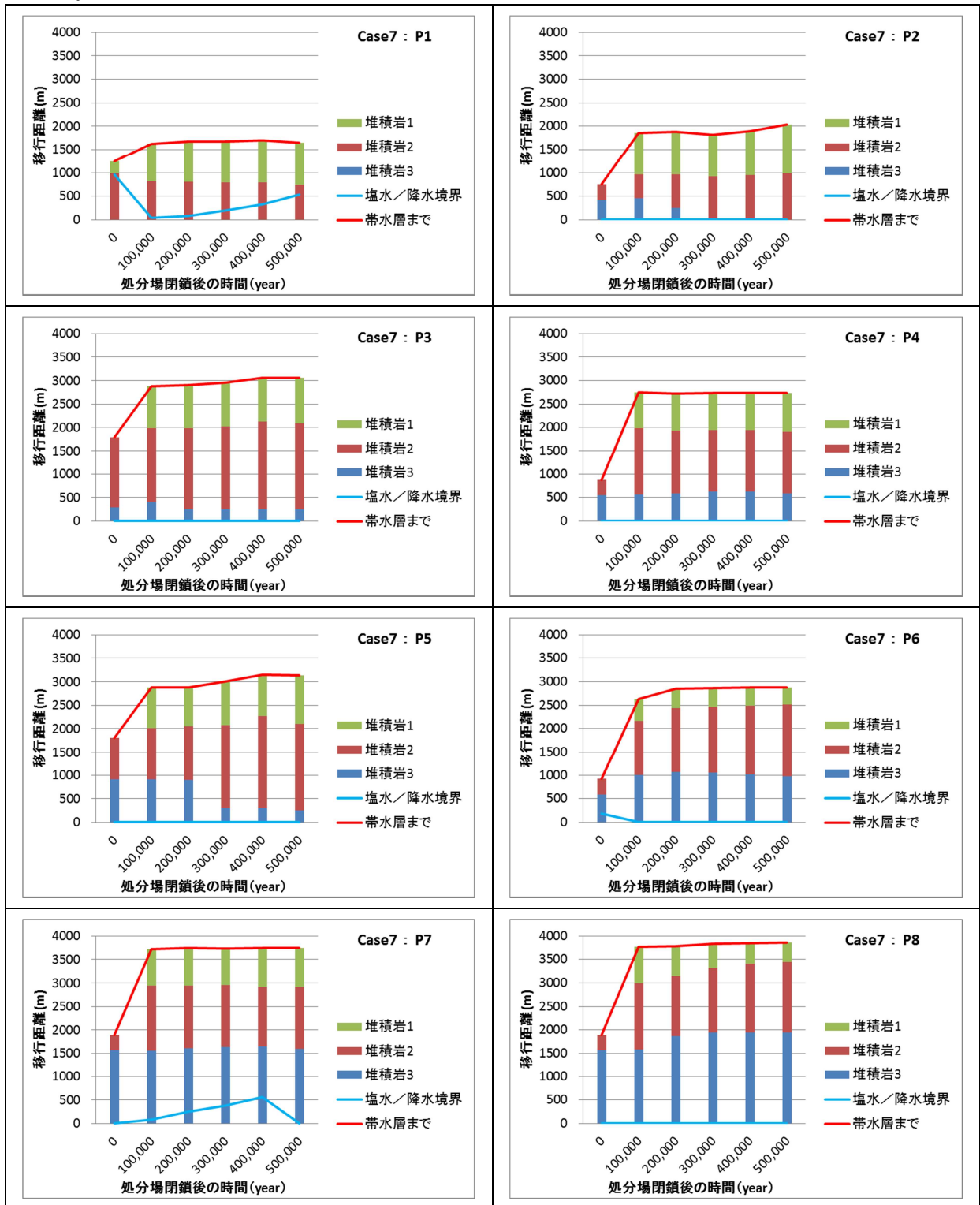


図 6.4-48 移行経路上の地質条件と水質条件の内訳：Case7

vii) Case8

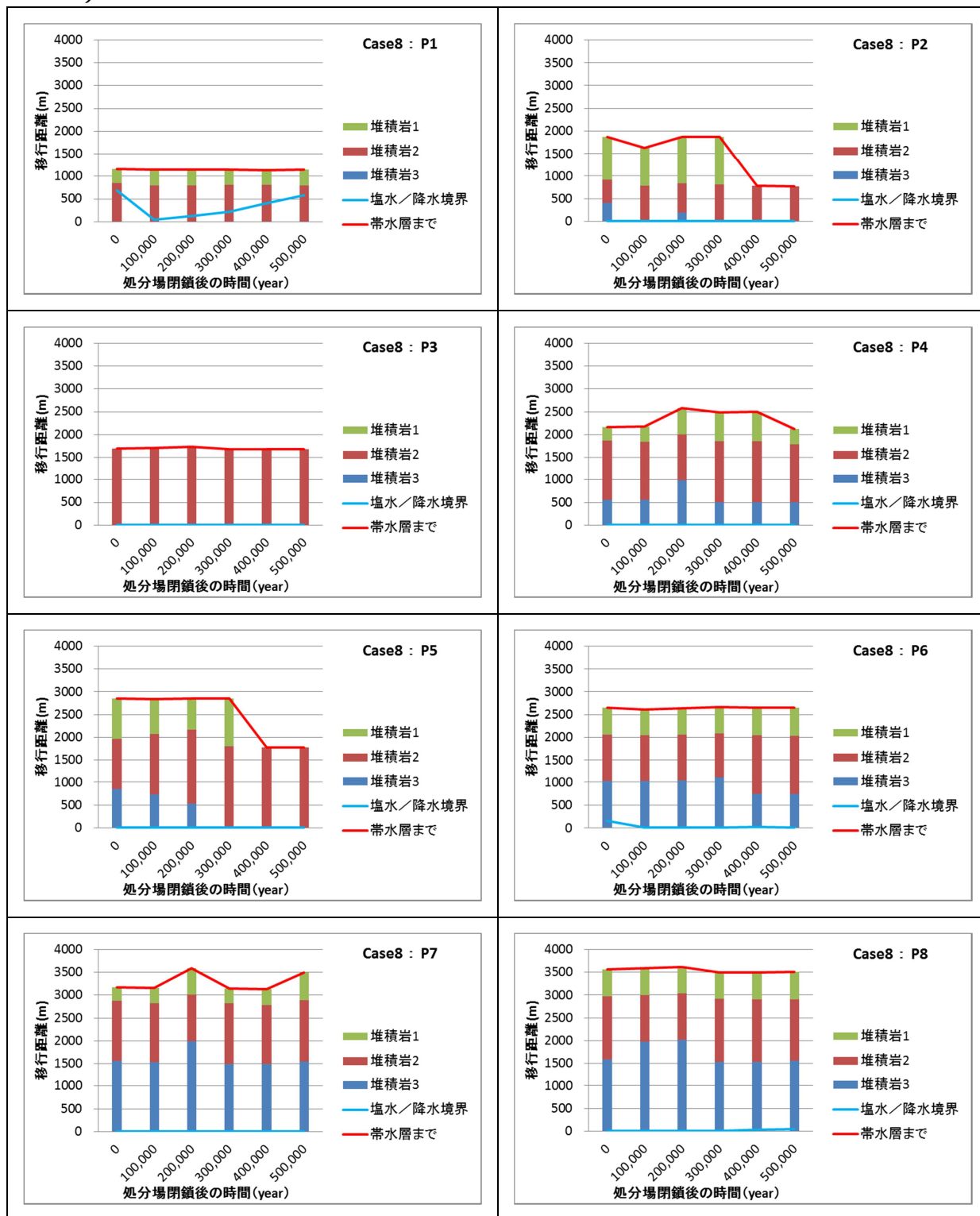


図 6.4-49 移行経路上の地質条件と水質条件の内訳：Case8

viii) Case10

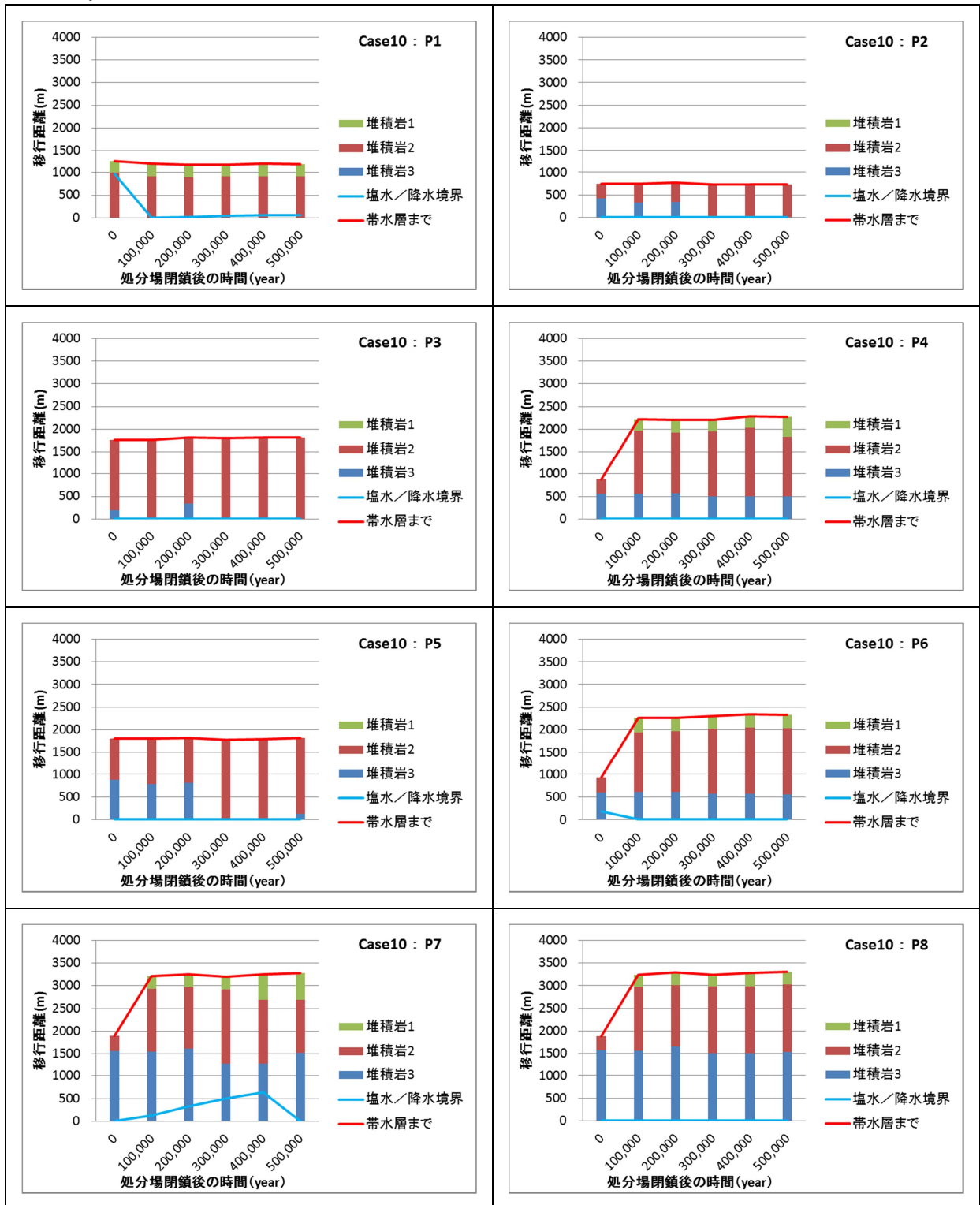


図 6.4-50 移行経路上の地質条件と水質条件の内訳：Case10

処分場位置と塩水 / 降水境界の関係

i) Case1

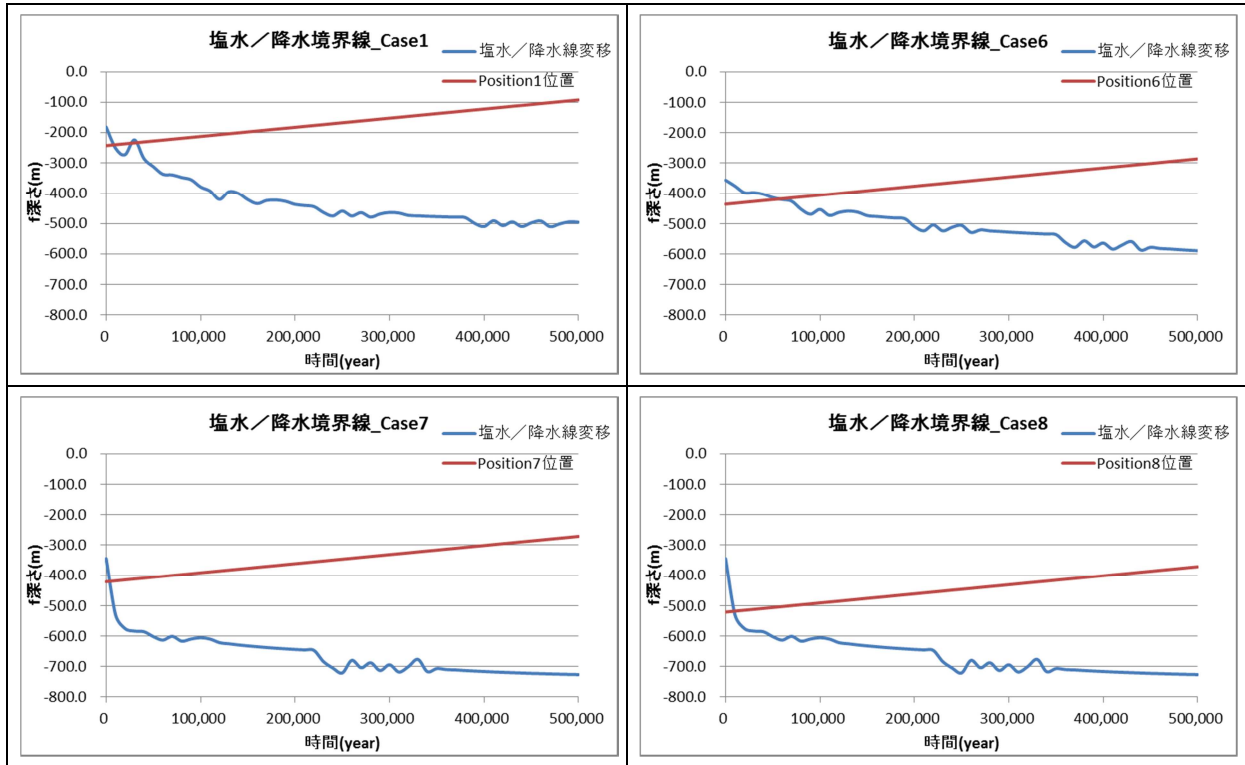


図 6.4-51 処分場位置と塩水/降水境界の関係：Case1

ii) Case2

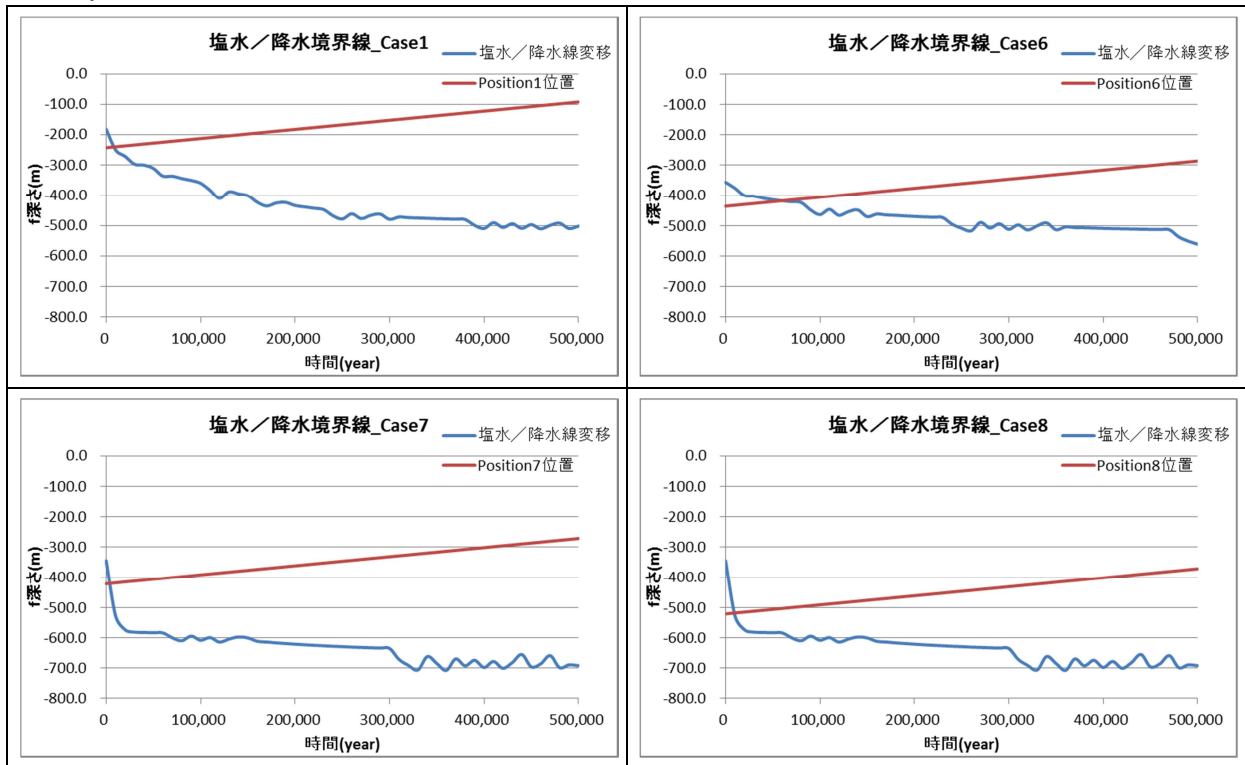


図 6.4-52 処分場位置と塩水/降水境界の関係：Case2

iii) Case3

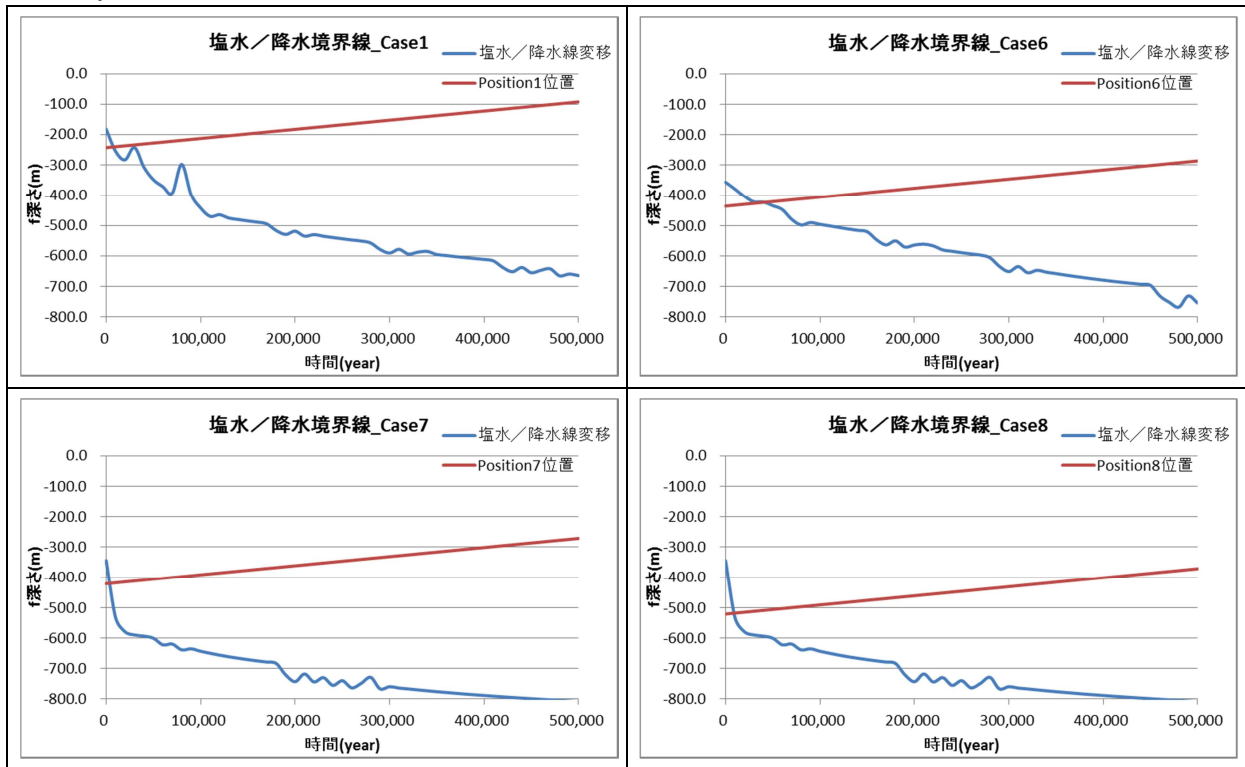


図 6.4-53 処分場位置と塩水/降水境界の関係：Case3

iv) Case4

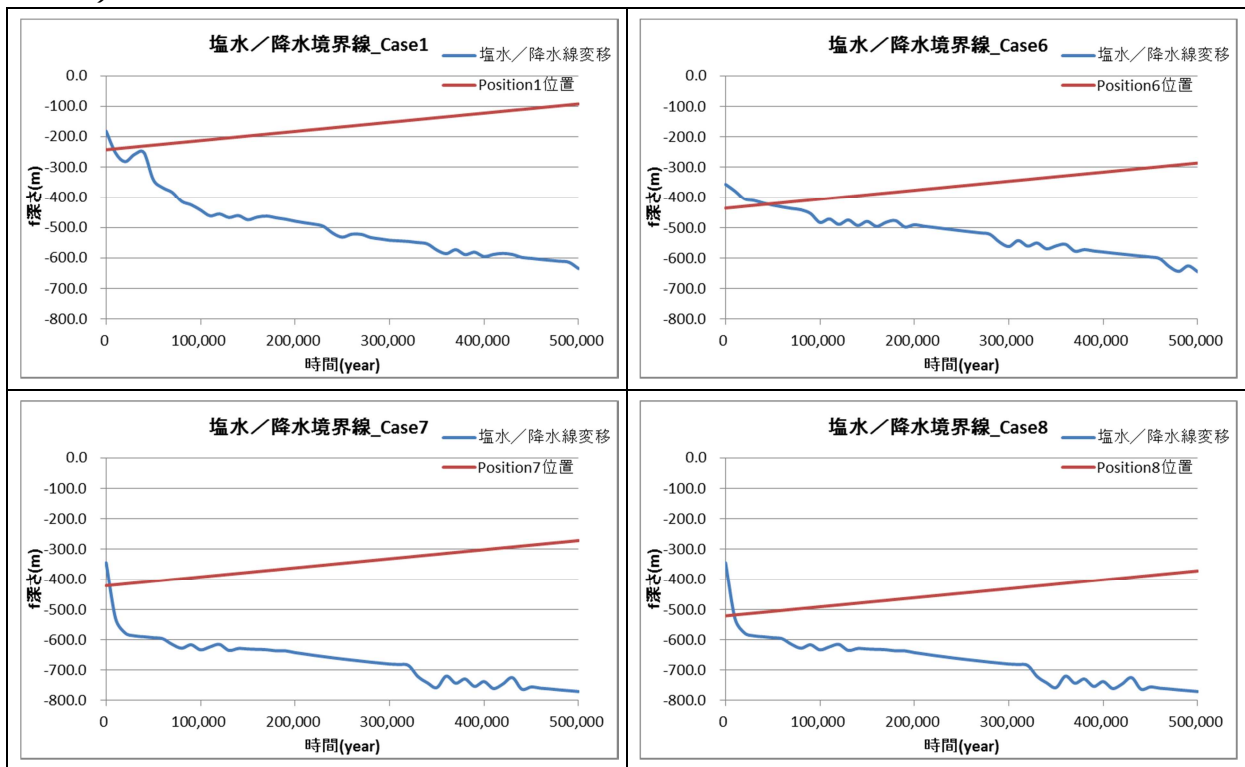


図 6.4-54 処分場位置と塩水/降水境界の関係：Case4

v) Case5

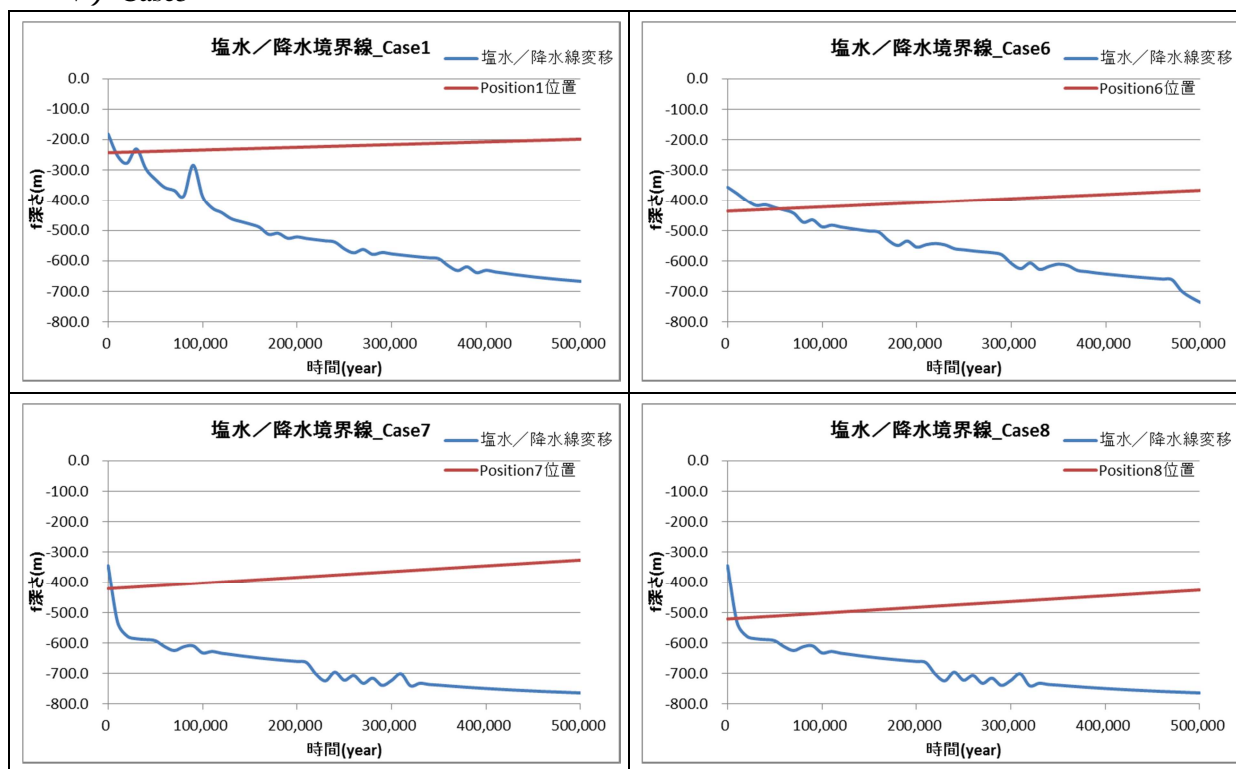


図 6.4-55 処分場位置と塩水/降水境界の関係：Case5

vi) Case7

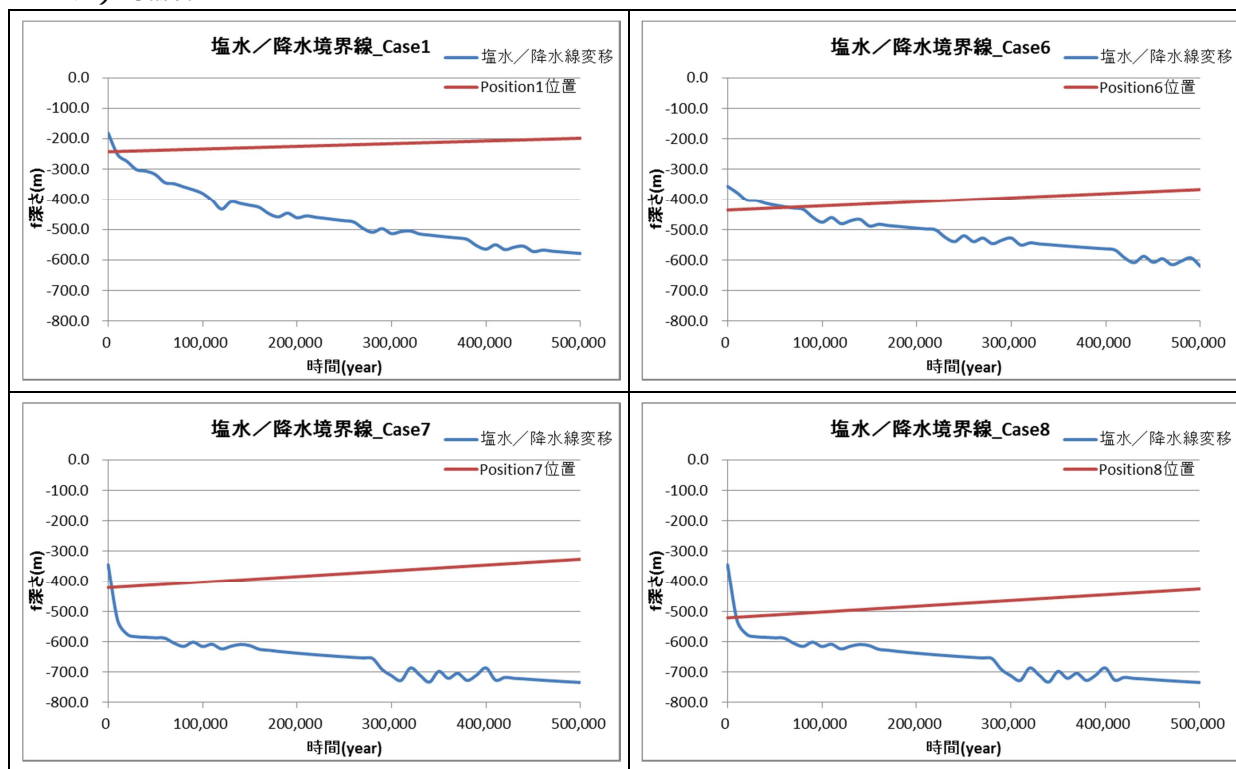


図 6.4-56 処分場位置と塩水/降水境界の関係：Case7

vii) Case8

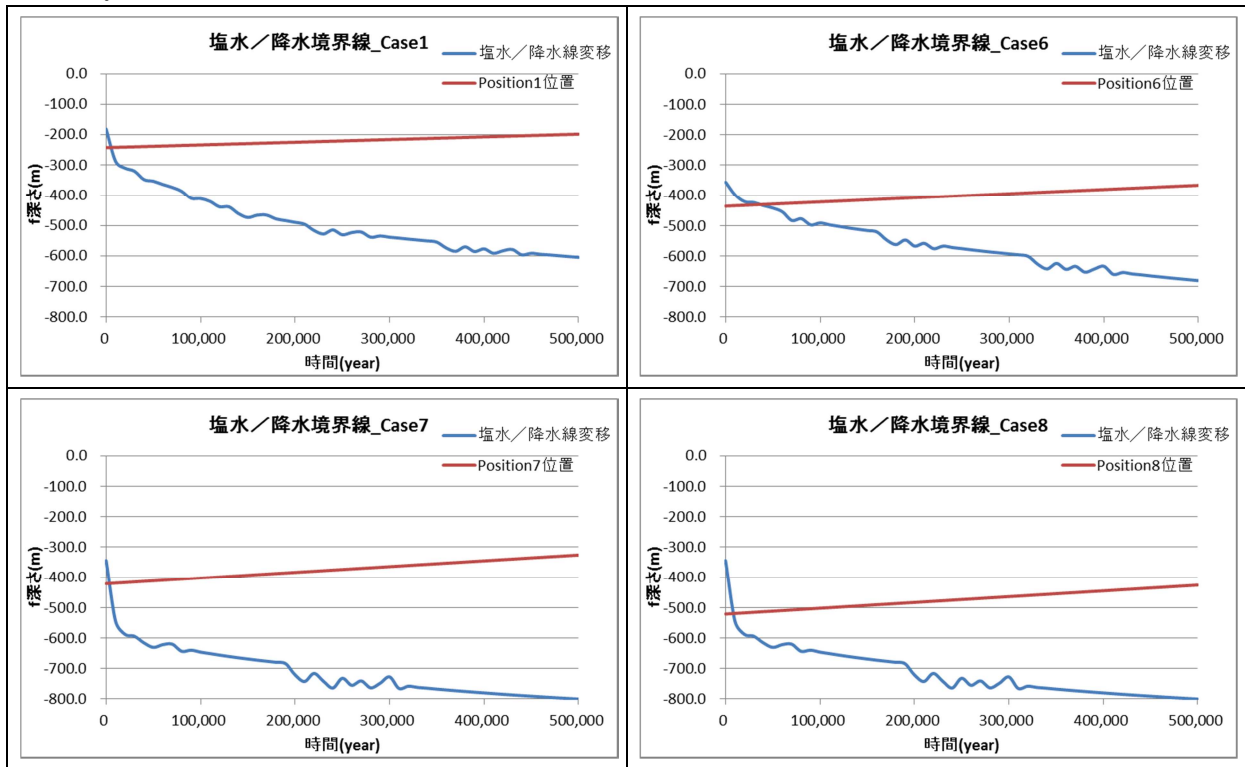


図 6.4-57 処分場位置と塩水/降水境界の関係：Case8

viii) Case10

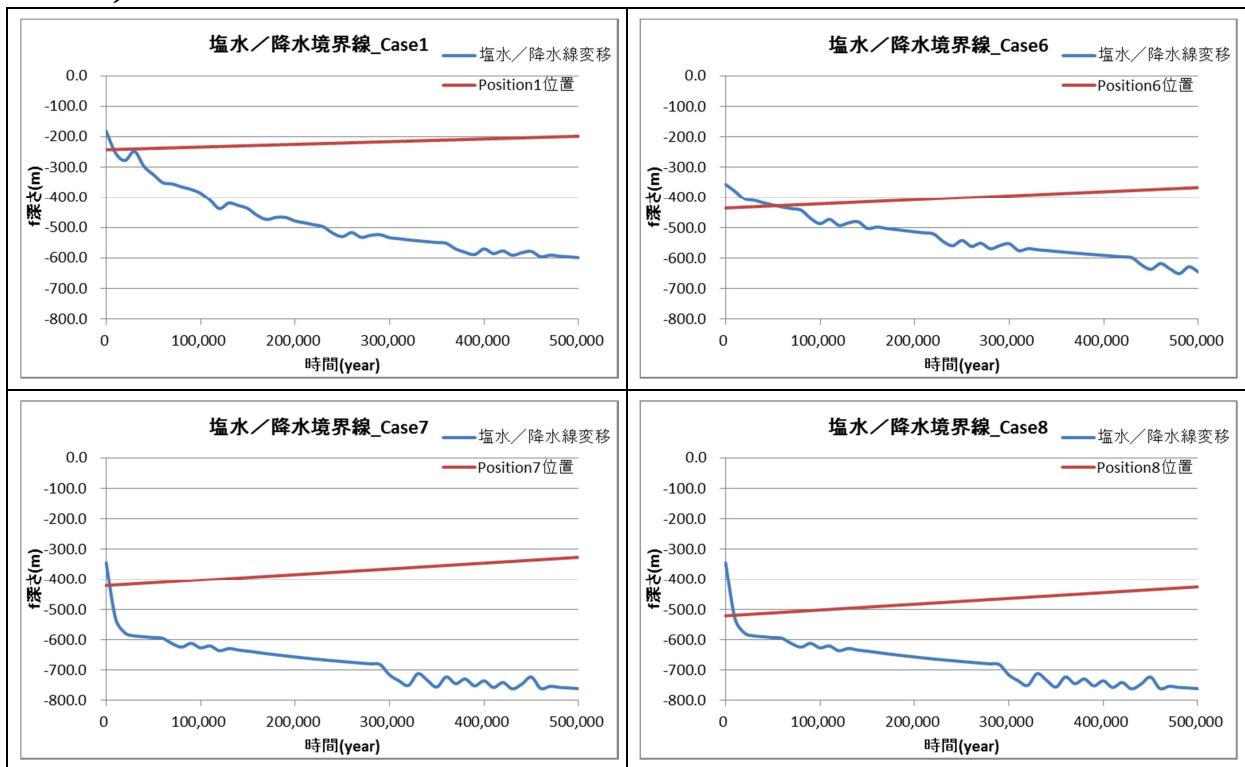


図 6.4-58 処分場位置と塩水/降水境界の関係：Case10

表 6.4-18 各解析ケースの処分場位置における塩水/降水条件の切り替わり時刻

Case No.	Position	地下水条件	切り替わり時刻 (年)	百の位で 四捨五入 した時刻 (年)
1	1	塩水 降水	8392	8000
	6	塩水 降水	57200	57000
	7	塩水 降水	4064	4000
	8	塩水 降水	9332	9000
2	1	塩水 降水	8566	9000
	6	塩水 降水	59595	60000
	7	塩水 降水	4129	4000
	8	塩水 降水	9481	9000
3	1	塩水 降水	8009	8000
	6	塩水 降水	40896	41000
	7	塩水 降水	4016	4000
	8	塩水 降水	9221	9000
4	1	塩水 降水	8166	8000
	6	塩水 降水	44847	45000
	7	塩水 降水	4082	4000
	8	塩水 降水	9372	9000
5	1	塩水 降水	8423	8000
	6	塩水 降水	54625	55000
	7	塩水 降水	4071	4000
	8	塩水 降水	9347	9000
7	1	塩水 降水	8608	9000
	6	塩水 降水	64218	64000
	7	塩水 降水	4136	4000
	8	塩水 降水	9497	9000
8	1	塩水 降水	5716	6000
	6	塩水 降水	36591	37000
	7	塩水 降水	3800	4000
	8	塩水 降水	8724	9000
10	1	塩水 降水	8390	8000
	6	塩水 降水	53411	53000
	7	塩水 降水	4095	4000
	8	塩水 降水	9403	9000

(d) 隆起・侵食シナリオにおける緩衝材変質・間隙水組成の変遷評価のための解析ケースの設定

上記の検討により、隆起・侵食シナリオにおける緩衝材変質・間隙水組成の変遷評価で考慮する必要のある解析ケースは、塩水/降水条件の切り替わり時刻に着目して整理すると、表 6.4-19 のようになった。また、降水 塩水の切り替わり時刻に関する昨年度の解析から、数千年程度の違いに対して、緩衝材中の透水性や水質の変化に顕著な影響が見られなかったことから、解析ケースの絞込みを行い、最終的には表 6.4-20 の 6 ケースを、隆起・侵食シナリオにおける緩衝材変質・間隙水組成の変遷評価のための解析ケースとして設定した。

表 6.4-19 切り替わり時刻による解析ケースの整理

Case	地下水条件	切り替わり時刻 (年)
A	降水	-
B	塩水 降水	4000
C	塩水 降水	6000
D	塩水 降水	8000
E	塩水 降水	9000
F	塩水 降水	37000
G	塩水 降水	41000
H	塩水 降水	45000
I	塩水 降水	53000
J	塩水 降水	55000
K	塩水 降水	57000
L	塩水 降水	60000
M	塩水 降水	64000

表 6.4-20 隆起・侵食シナリオにおける緩衝材変質・間隙水組成の変遷評価のための解析ケース

Case	地下水条件	切り替わり時刻 (年)
A	降水	-
C	塩水 降水	6000 (B : 4000)
E	塩水 降水	9000 (D : 8000)
H	塩水 降水	45000 (F: 37000、 G:41000)
K	塩水 降水	57000 (I : 53000、 J : 55000)
M	塩水 降水	64000 (L : 60000)