

研究施設等廃棄物のトレンチ処分施設における 覆土の設計検討

Design Study on Cover Soil in the Trench Disposal Facility
for Very Low-level Radioactive Waste Generated
from Research Facilities and Other Facilities

小川 理那 仲田 久和 菅谷 敏克 坂井 章浩

Rina OGAWA, Hisakazu NAKATA, Toshikatsu SUGAYA and Akihiro SAKAI

バックエンド統括本部
埋設事業センター

Radioactive Wastes Disposal Center
Decommissioning and Radioactive Waste Management Head Office

July 2022

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。本レポートはクリエイティブ・コモンズ表示 4.0 国際 ライセンスの下に提供されています。本レポートの成果（データを含む）に著作権が発生しない場合でも、同ライセンスと同様の条件で利用してください。（<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ja>）
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ウェブサイト（<https://www.jaea.go.jp>）より発信されています。本レポートに関しては下記までお問合せください。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 JAEA イノベーションハブ 研究成果利活用課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方2番地4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.en>).
Even if the results of this report (including data) are not copyrighted, they must be used under the same terms and conditions as CC-BY.
For inquiries regarding this report, please contact Institutional Repository and Utilization Section, JAEA Innovation Hub, Japan Atomic Energy Agency.
2-4 Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

研究施設等廃棄物のトレンチ処分施設における覆土の設計検討

日本原子力研究開発機構 バックエンド統括本部 埋設事業センター

小川 理那、仲田 久和、菅谷 敏克、坂井 章浩

(2022年3月29日受理)

日本原子力研究開発機構では、研究施設等廃棄物の処分方法の一つとして、トレンチ埋設処分を検討している。トレンチ埋設処分は、「核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律」が適用され、特に、埋設施設の設計については、「第二種廃棄物埋設施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則」が適用される。この規則は、令和元年に改正され、トレンチ埋設施設には、施設中への雨水及び地下水の浸入を十分に抑制させる設計を取り入れることが新たな要求事項として追加された。

そこで、本報告では、現在計画しているトレンチ埋設施設に追加された規則の要求事項を適応させた設計の検討を行うこととした。検討中のトレンチ埋設施設は、地下水位より浅い位置に設置することを想定している。そのため、施設中に浸入する水は、主に雨水由来のものであると考えられることから、トレンチ埋設施設の表面にある覆土の設計について検討を行うこととした。

本報告では、日本原子力研究開発機構が検討しているトレンチ埋設施設のうち、安定型トレンチ埋設施設の覆土設計について検討した。検討方法としては、覆土に用いる材料や施工方法により設計条件の変更が可能である透水係数及び厚さについてパラメータスタディを実施し、各条件における廃棄体層へ浸入する水の流速を評価した。各条件における流速の結果を比較し、より効率的に雨水の浸入を抑制する覆土の設計条件を評価することとした。

解析の結果、粘土層及び排水層の厚さや透水係数の値の組み合わせ毎に覆土の遮水性能を把握することができた。将来、実施するトレンチ施設の基本設計においては、安全評価上有効な遮水性能に加え、その他の課題や施工費の検討も実施した上で合理的な覆土の仕様を決定する予定である。

**Design Study on Cover Soil in the Trench Disposal Facility for Very Low-level
Radioactive Waste Generated from Research Facilities and Other Facilities**

Rina OGAWA, Hisakazu NAKATA, Toshikatsu SUGAYA and Akihiro SAKAI

Radioactive Wastes Disposal Center
Decommissioning and Radioactive Waste Management Head Office
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received March 29, 2022)

Japan Atomic Energy Agency has considered trench disposal as one of the disposal methods for radioactive wastes generated from research facilities and other facilities. The trench disposal facility is regulated by "Act on the Regulation of Nuclear Source Material, Nuclear Fuel Material and Reactors". In particular, the design of the trench facility is regulated by a rule under the law. When the rule was amended in 2019, the design of the trench disposal facility required equipment to reduce ingress of rain water and groundwater.

In the report, studies on the design of a trench disposal facility to adapt to the amended rule were performed. The trench disposal facility has considered being established in a place lower than groundwater level. Therefore, it was decided to study covering soil at the upper part of the trench facility, because the ingress water in the facility is mainly derived from rain water. In this study, it was decided to evaluate the design of covering soil of the radioactive waste categorized into chemically stable materials. Therefore, as the examination method, a parameter study on varying the permeability coefficient and thickness of the layers composing cover soil. In the parameter study, the velocity of the water infiltrating into the trench facility was evaluated. Based on the results, more efficient design of the layers composing the covering soil was considered. The result showed that the impermeable efficiency of the covering soil was different depending on the thickness and the permeability conductivity of each layer.

As a result, it was possible to understand the impermeable performance of covering soil by the permeability coefficient and thickness of each layer. We will plan to decide the specification of the cover soil while examination of future tasks and cost in the basic design.

Keywords: Trench Disposal, LLW, Infiltration Water, Cover Soil, Design of Disposal Facility

目 次

1. 経緯と目的	1
2. 本報告書の構成	3
3. 法令要件等の整理	4
4. 遮水層の標準モデルにおける浸透水量の評価	5
4.1 標準モデルの検討	5
4.2 不飽和領域の条件設定	6
4.3 解析に用いたコード等	6
4.4 評価方法	7
4.5 解析結果	7
5. 覆土の構成におけるパラメータスタディ	9
5.1 覆土の構成の設定	9
5.2 覆土の構成におけるパラメータスタディの結果	9
6. 覆土の各構成材料のパラメータスタディ	10
6.1 粘土層のパラメータスタディ	10
6.1.1 粘土層のパラメータの設定	10
6.1.2 粘土層のパラメータスタディの結果	10
6.2 排水層のパラメータスタディ	11
6.2.1 排水層のパラメータの設定	11
6.2.2 排水層のパラメータスタディの結果	11
6.3 保護土のパラメータスタディ	12
6.3.1 保護土のパラメータの設定	12
6.3.2 保護土のパラメータスタディの結果	12
7. 検討結果と今後の課題	13
7.1 検討結果	13
7.2 基本設計に向けた今後の課題	14
謝辞	53
参考文献	54

Contents

1. Background and Purpose	1
2. Compositions of This Report	3
3. Investigation of Legal Requirements	4
4. Evaluation of the Amount of Seepage Water in Standard Model of The Impermeable Layer	5
4.1 Setting of Analysis Model	5
4.2 Setting of Unsaturated Region	6
4.3 Code Used for Analysis	6
4.4 Method of Evaluation	7
4.5 Results of Analysis	7
5. Parameter Study of Cover Soil Composition	9
5.1 Setting of Cover Soil Composition	9
5.2 Results of Parameter Study of Cover Soil Composition	9
6. Parameter Study of Cover Soil of Each Constituent Material	10
6.1 Parameter Study of Clay Layer	10
6.1.1 Setting of Clay Layer	10
6.1.2 Results of Parameter Study of Clay Layer	10
6.2 Parameter Study of Drainage Layer	11
6.2.1 Setting of Drainage Layer	11
6.2.2 Results of Parameter Study of Drainage Layer	11
6.3 Parameter Study of Protect Soil	12
6.3.1 Setting of Protect Soil	12
6.3.2 Results of Parameter Study of Protect Soil	12
7. Examination Results and Future Tasks	13
7.1 Examination Results	13
7.2 Future Tasks toward Basic Design	14
Acknowledgement	53
References	54

表リスト

表 4-1	解析で設定したパラメータ	16
表 4-2	圧力水頭 h_p と含水率 θ の関数	16
表 4-3	含水率 θ と不飽和低減係数の関数	16
表 6-1	粘土層のパラメータスタディ	17
表 6-2	排水層のパラメータスタディ	17
表 6-3	保護土のパラメータスタディ	17

図リスト

図 4-1	モデルの概略図	18
図 4-2	解析モデルのメッシュ図	19
図 4-3	圧力水頭と含水率及び含水率と不飽和低減係数の関係	20
図 4-4	圧力水頭に対する不飽和低減係数	20
図 4-5	圧力水頭分布	21
図 4-6	全水頭分布	22
図 4-7	流速及び流向分布	23
図 5-1	検討モデルの概略図	24
図 5-2	検討モデルの流速及び流向	25
図 6-1	粘土層のパラメータスタディにおける境界平均流速	26
図 6-2	粘土層の厚さ 0.1m、透水係数 $1.0 \times 10^{-7} \text{m/s}$ の場合の流速及び流向	27
図 6-3	粘土層の厚さ 0.1m、透水係数 $1.0 \times 10^{-8} \text{m/s}$ の場合の流速及び流向	28
図 6-4	粘土層の厚さ 0.1m、透水係数 $1.0 \times 10^{-9} \text{m/s}$ の場合の流速及び流向	29
図 6-5	粘土層の厚さ 0.5m、透水係数 $1.0 \times 10^{-7} \text{m/s}$ の場合の流速及び流向	30
図 6-6	粘土層の厚さ 0.5m、透水係数 $1.0 \times 10^{-9} \text{m/s}$ の場合の流速及び流向	31
図 6-7	粘土層の厚さ 1.0m、透水係数 $1.0 \times 10^{-7} \text{m/s}$ の場合の流速及び流向	32
図 6-8	粘土層の厚さ 1.0m、透水係数 $1.0 \times 10^{-8} \text{m/s}$ の場合の流速及び流向	33
図 6-9	粘土層の厚さ 1.0m、透水係数 $1.0 \times 10^{-9} \text{m/s}$ の場合の流速及び流向	34
図 6-10	排水層のパラメータスタディにおける境界平均流速	35
図 6-11	排水層の厚さ 0.03m、透水係数 $1.0 \times 10^{-3} \text{m/s}$ の場合の流速及び流向	36
図 6-12	排水層の厚さ 0.03m、透水係数 $3.0 \times 10^{-4} \text{m/s}$ の場合の流速及び流向	37
図 6-13	排水層の厚さ 0.03m、透水係数 $1.0 \times 10^{-4} \text{m/s}$ の場合の流速及び流向	38
図 6-14	排水層の厚さ 0.1m、透水係数 $1.0 \times 10^{-3} \text{m/s}$ の場合の流速及び流向	39
図 6-15	排水層の厚さ 0.1m、透水係数 $3.0 \times 10^{-4} \text{m/s}$ の場合の流速及び流向	40
図 6-16	排水層の厚さ 0.1m、透水係数 $1.0 \times 10^{-4} \text{m/s}$ の場合の流速及び流向	41
図 6-17	排水層の厚さ 0.3m、透水係数 $1.0 \times 10^{-3} \text{m/s}$ の場合の流速及び流向	42
図 6-18	排水層の厚さ 0.3m、透水係数 $1.0 \times 10^{-4} \text{m/s}$ の場合の流速及び流向	43
図 6-19	保護土のパラメータスタディにおける境界平均流速	44
図 6-20	保護土の厚さ 0.3m、透水係数 $1.0 \times 10^{-5} \text{m/s}$ の場合の流速及び流向	45
図 6-21	保護土の厚さ 0.3m、透水係数 $1.0 \times 10^{-6} \text{m/s}$ の場合の流速及び流向	46
図 6-22	保護土の厚さ 0.6m、透水係数 $1.0 \times 10^{-4} \text{m/s}$ の場合の流速及び流向	47
図 6-23	保護土の厚さ 0.6m、透水係数 $1.0 \times 10^{-5} \text{m/s}$ の場合の流速及び流向	48
図 6-24	保護土の厚さ 0.6m、透水係数 $1.0 \times 10^{-6} \text{m/s}$ の場合の流速及び流向	49
図 6-25	保護土の厚さ 1.0m、透水係数 $1.0 \times 10^{-4} \text{m/s}$ の場合の流速及び流向	50
図 6-26	保護土の厚さ 1.0m、透水係数 $1.0 \times 10^{-5} \text{m/s}$ の場合の流速及び流向	51
図 6-27	保護土の厚さ 1.0m、透水係数 $1.0 \times 10^{-6} \text{m/s}$ の場合の流速及び流向	52

1. 経緯と目的

日本原子力研究開発機構（以下、「原子力機構」という。）は、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構法の改正（平成 20 年法律第 51 号）により、原子力機構及び国内の研究施設等から発生する低レベル放射性廃棄物（以下、「研究施設等廃棄物」という。）の埋設処分業務の実施主体となり、研究施設等廃棄物の浅地中処分の実施に向けて様々な検討を行っている。

浅地中処分の方法としては、地下水位より浅い位置に施設を設けるトレンチ処分と、地下水位より深い位置に施設を設けるコンクリートピット処分を検討しており、『JAEA-Technology 2012-031 研究施設等廃棄物浅地中処分施設の概念設計（以下、「概念設計」という。）¹⁾』では埋設事業所の概念設計を実施し、コンクリートピット埋設処分施設（以下、「ピット施設」という。）及びトレンチ埋設処分施設（以下、「トレンチ施設」という。）の設計について検討した。トレンチ施設及びピット施設は、「核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律」（以下、「原子炉等規制法」という。）の第二種廃棄物埋設施設に分類される。特に、埋設施設の設計等については、原子炉等規制法の『第二種廃棄物埋設施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則（以下、「許可基準規則」という。）²⁾』が適用される。許可基準規則は、令和元年 11 月 13 日に改正され、その際に、「新たにトレンチ施設の表面を土砂等で覆う方法、人工バリアを設置する方法により、雨水及び地下水の浸入を十分に低減させること」が要求された。概念設計¹⁾において検討したトレンチ施設は、コンクリートや金属等の安定五品目に相当する廃棄物を処分する施設（以下、「安定型トレンチ」という。）と安定五品目以外の廃棄物を処分する施設（以下、「付加機能型トレンチ」という。）の 2 種類であるが、安定型トレンチは安定型五品目を処分することを想定していたため、遮水工等の雨水の浸入を低減させる設計に関する追加の検討が必要となった。

そこで、本報告では、安定型トレンチの遮水工を設けた覆土の設計について追加検討を行うこととした。トレンチ施設は、地下水位より浅い位置に設置することを想定しているため、安定型トレンチの覆土には、廃棄体等を定置している領域（以下、「廃棄体層」という。）に浸入する可能性のある自然水のうち、地表から浸入してきた雨水（以下、「浸透水」という。）を遮水する機能を設けることとした。付加機能型トレンチの覆土の設計については、『研究施設等廃棄物のトレンチ処分施設の上部覆土内への浸透水量の評価 JAEA-Technology 2014-013（以下、「浸透水量評価報告書」という。）³⁾』及び『研究施設等廃棄物のトレンチ処分施設における遮水機能の設計検討（共同研究） JAEA-Technology 2016-019（以下、「トレンチ設計検討報告書」という。）⁴⁾』において様々な技術的検討が行われてきた。その中で、遮水するための層（以下、「遮水層」という。）を設けた覆土が検討されており、透水性の高い砂などを設置して、廃棄体層の上部を迂回して地下に流す層や粘土などの水を浸透しにくい層を設けて組み合わせることにより、廃棄体層への浸透水の浸入を低減させることが検討されている。そこで、安定型トレンチについても、トレンチ施設の上部に排水層や低透水層を組み合わせることにより、浸透水を低減させる覆土の設計を検討することとした。

検討方法としては、トレンチ施設の排水層や低透水層における透水係数及び厚さについて、2次元での不飽和領域における浸透水流動解析が可能である MIG2DF^{5), 6)}を用いたパラメータ

スタディを実施することにより、浸透水をより低減させる覆土の設計条件を模索することとした。その評価結果を基に、安定型トレンチにおける浸透水をより低減させる覆土設計の最適な条件及び今後実施する基本設計に向けて検討する必要がある課題の抽出を行った。

2. 本報告書の構成

本報告書の構成を以下に示す。

(1) 法令要件等の整理 (3章)

トレンチ施設の設計の検討を行うにあたり、適用される法令の整理を行った内容を示す。

(2) 遮水層の標準モデルにおける浸透水量の評価 (4章)

本解析における標準モデルを設定し、覆土の中で最も低透水性を示す粘土層を通過する水の流速を評価した。解析に用いたソフトウェア及びコード、解析の方法及びその結果を示す。

(3) 覆土の構成におけるパラメータスタディ (5章)

4章で示した解析の結果をリファレンスとし、覆土を構成する排水層及び粘土層の位置を入れ替えた覆土についての検討を行い、標準モデルを比較した結果を示す。

(4) 覆土の各構成材料のパラメータスタディ (6章)

4章で示した解析の結果をリファレンスとし、覆土のうち、粘土層、排水層、保護土及び上部覆土について透水係数や厚さ等に関するパラメータスタディを実施し、浸透水をより低減させる設計条件の検討の結果を示す。

(5) 検討結果と今後の課題 (7章)

4～6章で行った解析結果をまとめ、今後実施する基本設計における課題を示す。

3. 法令要件等の整理

放射性廃棄物のトレンチ施設は、原子炉等規制法が適用され、特に、処分施設の設計等については、原子炉等規制法の許可基準規則²⁾に定められている。許可基準規則²⁾は令和元年11月13日に改正され、その中には、トレンチ施設の設計に関する事項が新たに追加された。追加された事項を以下に示す。

(ピット処分又はトレンチ処分に係る廃棄物埋設地)

第十三条 ピット処分又はトレンチ処分に係る廃棄物埋設地は、次の各号に掲げる要件を満たすものでなければならない。

- 二 トレンチ処分に係る廃棄物埋設地は、その表面を土砂等で覆う方法その他の人工バリアを設置する方法により、廃棄物埋設地への雨水及び地下水の浸入を十分に抑制し、埋設する放射性廃棄物の受入れの開始から廃止措置の開始までの間において、廃棄物埋設地の外への放射性物質の漏出を低減する機能を有するものであること。

許可基準規則²⁾第十三条第一項第二号より、埋設処分する廃棄物の種類等によらず、トレンチ施設には、雨水及び地下水の浸入を防ぐ遮水機能を設計に取り入れることが必要となった。

トレンチ施設の設計は、平成24年に実施した概念設計¹⁾において検討されており、埋設する廃棄物の種類によって、2種類の施設が検討されている。1つは、金属及びコンクリート、また、「廃棄物の処理及び清掃に関する法律」(以下、「廃棄物処理法」という。)においてそのまま埋設しても環境保全上支障のないものとされているプラスチック、ゴム屑及びガラスが分類される安定五品目を埋設する安定型トレンチである。もう1つは、安定五品目以外の廃棄物を埋設するため、廃棄物に含まれる化学物質の環境影響を考慮した遮水層を設ける管理型処分場に相当する付加機能型トレンチである。概念設計¹⁾の実施の際には、付加機能型トレンチについては、遮水層の設置を考慮しており、さらに浸透水量評価報告書³⁾及びトレンチ設計検討報告書⁴⁾において、様々な技術的検討を行ってきた。一方、安定型トレンチについては、遮水層を設けた設計の検討をする必要があるため、本報告書では、安定型トレンチの覆土の検討を行うこととした。

4. 遮水層の標準モデルにおける浸透水量の評価

トレンチ施設の安全評価では、トレンチ施設へ雨水及び地下水が浸入することにより、施設内の放射性核種が移行し、生活圏へ影響を及ぼすシナリオを想定している。そのため、許可基準規則²⁾の改正により追加された要求事項に従って、トレンチ施設の覆土には、遮水機能を設けることが必要である。概念設計¹⁾では、トレンチ施設は地下水位より浅い位置に設置することを想定していることから、本検討では、雨水の浸入を抑制するためのトレンチ施設上部の遮水層を設けた覆土の設計を検討することとした。

検討方法としては、まず、本報告書において基準となるモデル(以下、「標準モデル」という。)を設定して浸透水量の評価を行い、その後、様々な覆土設計条件における浸透水量のパラメータスタディを行い、今後実施する基本設計で考慮すべき設計条件等を検討することとした。

本章では、標準モデルにおける浸透水量の評価について述べる。

4.1 標準モデルの検討

本解析で設定したパラメータを表 4-1 に、モデルの概略を図 4-1 に示す。

トレンチ施設における周囲の環境条件については、概念設計¹⁾で設定した我が国における一般的な立地環境に基づき設定した。トレンチ施設は地下水位より浅い位置に設置することを検討している。そのため、トレンチ施設は岩盤等の透水係数が低い場所ではなく、土壌などの透水係数が比較的高い場所に設置と考えられることから、標準モデルにおけるトレンチ施設周辺の地層は土壌(以下、「土壌層」という。)とし、透水係数は $1.0 \times 10^{-4} \text{m/s}$ とした。

トレンチ施設の条件は、概念設計¹⁾において示された安定型トレンチに基づいて設定し、トレンチ施設の大きさは上辺 30.598m、下辺 14.55m、高さ 4.012m の台形型とし、トレンチ施設内の廃棄物層の透水係数は周辺の土壌層と同等の $1.0 \times 10^{-4} \text{m/s}$ とした。

遮水層は、概念設計¹⁾、トレンチ設計検討報告書⁶⁾及び『人形峠鉱山夜次鉱さいたい積場上流側「廃砂たい積場」の跡措置 JAEA-Technology 2015-063 (以下、「人形峠報告書」という。)⁷⁾を参照して、モデルの条件を設定した。概念設計¹⁾によると、安定型トレンチには、設備が露出しないよう配慮して地表面上 2.5m の覆土を施すこととしていることから、本解析においても、地表面上における全覆土の厚さを 2.5m とすることとした。覆土に設ける遮水層については、以下に示した 3 つの役割を期待する層を地表面に設置することとした。

- ・ 覆土を保護する層(以下、「保護土」という。)
- ・ 浸透水がトレンチ施設を迂回するように流す層(以下、「排水層」という。)
- ・ 廃棄体層へ浸入するのを防ぐ機能を持つ層(以下、「粘土層」という。)

この遮水工の設計は、浸透水が排水層によりトレンチ施設上部を迂回するように流れ、迂回しなかった残りの浸透水は粘土層により遮水することを想定している。保護土は、風化等による排水層の露出による、排水機能の低下を防ぐためのものである。各層の厚さについては、人形

峠報告書⁷⁾を参照し、保護土 0.3m、排水層 0.3m、粘土層 0.5m とすることとし、透水係数については、保護土は周囲の環境と同等の透水係数とするために $1.0 \times 10^{-4} \text{m/s}$ 、排水層及び粘土層はトレンチ設計報告書⁶⁾を参照し $3.0 \times 10^{-4} \text{m/s}$ 及び $1.0 \times 10^{-8} \text{m/s}$ とした。遮水層以外の覆土（以下、「上部覆土」という。）については、粘土層より地下にあり、廃棄体層に接することから粘土層から浸透した水をさらに低減させるために、周辺の土壌に比べ十分に締め固めることを考慮し、透水係数は $1.0 \times 10^{-6} \text{m/s}$ とした。

また、概念設計¹⁾で検討したトレンチ施設の覆土には、浸透水を排水しやすくするために施設の中心を頂点として勾配を設けていることから、本検討においても勾配を設定しその程度は 2.4% とした。

上記の条件を基に作成した解析モデルのメッシュ図を図 4-2 に示す。

解析領域は、本解析では粘土層を通過する浸透水を解析するため、境界による流速及び流向の影響を受けにくくなるように保護土の端から 10m まで、モデルの深さを地表面から 10m までとして解析領域を設定した。境界条件は、モデルの上辺、側辺及び底辺それぞれに設定し、モデルの上辺は浸透水量の条件として 0.6m/y 、側辺を水位拘束の条件として地下水位の -4.5m 、底辺は地下水位 $\pm 0 \text{m}$ の位置からの圧力水頭値を設定した。

4.2 不飽和領域の条件設定

トレンチ処分施設は地下水位より浅い位置に設置することから不飽和領域となる。

本解析で用いる解析コードである MIG2DF^{5),6)}における不飽和領域の解析は、以下の式により不飽和時の透水係数 k' を求めることで計算をしている。

$$k' = k \cdot K_{\theta} \cdot K_u$$

ここで、 k は飽和時の透水係数、 K_{θ} は圧力水頭 hp 及び含水率 θ に関する飽和時の k に対する割合（以下、「不飽和低減係数」という。）、 K_u は平均流速 u に関する飽和時の k に対する割合を示す。 K_{θ} は、不飽和時の含水率 θ と圧力水頭 hp の関数及び含水率 θ と不飽和低減係数 K_{θ} との関数より求めた圧力水頭 hp と不飽和低減係数 K_{θ} との関数である。また、 K_u は平均流速 u と K_u の関数を与えて求めている。

本解析では、不飽和低減係数は原子力機構で実証された放射能レベルが極めて低いコンクリート廃棄物をトレンチ処分施設に埋設する実地試験の報告書である『(平成 10 年度科学技術庁委託事業) 極低レベル固体廃棄物合理的処分安全性実証試験報告書 平成 11 年 3 月 (以下、「埋設実証実験」という。)⁸⁾にて、平成元年度に測定された結果から評価された関数を参照した。関数を表 4-2 及び 4-3 及び図 4-3 及び 4-4 に示す。また、 K_u は平均流速による透水係数への影響はないと考えて、1 とした。

4.3 解析に用いたコード等

本解析では、トレンチ施設の覆土の設計条件等を検討するため、モデル及び作成されるメッシュの形状等が複雑であることから、有限要素法を採用することとした。

解析モデルの作成には、Siemens Product Lifecycle Management Software Inc.がリリースしている Finite Element Modeling And Postprocessing（以下、「Femap」という。）を用いることとした。

設定したモデルの遮水機能の性能を検証するために、本検討では、覆土に設置する遮水工を通過する水の流速を解析により算出した。浸出する水の流速が小さいほど、遮水機能が高いことを示すこととなる。本解析では、降雨によりモデル内に浸入した水の不飽和領域における浸透流解析が必要であることから、原子力機構安全研究センターが開発した2次元地下水流動解析コードであるMIG2DF^{5),6)}を用いることとした。

結果の可視化の方法として、2つの方法を用いた。1つは、Advanced Visual Systems Inc.が開発した汎用可視化ソフトAVS/Expressにて、プログラムPASS_POST⁶⁾で処理を行い、圧力水頭分布及び全水頭分布の可視化を行った。もう1つは、埋設事業センターが開発した三次元地下水流動解析コード3D-SEEPのGNU PLOTを用いた作図プログラム⁹⁾をMIG2DF^{5),6)}に対応させたプログラムを用いて、メッシュ毎の流速及び流向の可視化を行った。

4.4 評価方法

トレンチ施設の安全評価では、雨水及び地下水が廃棄体層へ浸入し、廃棄体層中の放射性物質が浸入した水へ移行し、環境中へ漏出するシナリオを想定している。本解析では、廃棄体層へ浸入する水は雨水によるものとしているため、モデル上部からの水の浸入について着目した。そこで、トレンチ施設へ浸入する水を、覆土の中で最も透水性の低い粘土層を通過した水とし、粘土層を通過した水は全てトレンチ施設へ浸入すると仮定することとした。

従って、トレンチ施設の上部に位置する粘土層と上部覆土の境界の垂直方向の平均流速（以下、「境界平均流速」という。）を算出し、設定した覆土の条件により、浸透水に比べどれだけ低減されているか評価することとした。

4.5 解析結果

標準モデルにおける境界平均流速は $2.01 \times 10^{-2} \text{m/y}$ であった。これは、解析条件で設定したモデル上部からの浸透水量 $6.0 \times 10^{-1} \text{m/y}$ の約3.4%にあたる。従って、4.1で設定したトレンチ施設の覆土の設計である排水層0.3m、粘土層0.5mとして、透水係数は、排水層 $3.0 \times 10^{-4} \text{m/s}$ 、粘土層 $1.0 \times 10^{-8} \text{m/s}$ とした設計は、トレンチ施設へ浸入する水量の抑制ができる結果であった。

図4-5にモデル内の圧力水頭分布、図4-6に全水頭分布を示す。

一般的に、圧力水頭は地下水位の位置で0となり、本結果においても、地下水位の位置で圧力水頭が0となっていた。また、地下水位より深い位置になるほど、圧力水頭の値が高くなる結果となっていた。一方、保護土、排水層及び粘土層等の覆土周辺は、排水層の領域の圧力水頭が比較的大きく、保護土及び排水層より地下水位に近い位置にある粘土層の圧力水頭は比較的小さくなっていた。全水頭分布を見ると、保護土及び排水層の領域では、モデルの中心から左又は右へ全水頭の値が小さくなっていたことから、保護土及び排水層では、浸透水はモデル

左又は右の方へ向かって流れていると考えられる。一方、粘土層では、保護土及び排水層と異なり、地表面に近い方が全水頭の値が大きく、地下水位に近い方ほど全水頭の値が小さくなっていったことから、粘土層へ浸入した水は廃棄体層の方向へ流れていると考えられる。これは、各層の透水係数による影響と考えられる。保護土及び排水層の透水係数は $1.0 \times 10^{-4} \text{m/s}$ 及び $3.0 \times 10^{-4} \text{m/s}$ と大きいため、浸透水は保護土及び排水層内を、モデルの左又は右の方向へ移動し、粘土層は透水係数が $1.0 \times 10^{-8} \text{m/s}$ と小さいため、不透水層に近い状態となったと考えられる。

また、図 4-7 に解析により算出されたモデル内の流速及び流向を示す。(図内の矢印の色は流速を、矢印の方向は流向を表す。)

保護土及び排水層は流速が速く、特に排水層はモデル内で最も透水係数を高く設定していることもあり、非常に流速が速くなっていた。また、保護土及び排水層が中心から離れるほど、流速が速くなっていた。これは、保護土及び排水層は、中心が高くなるような傾斜をしているためと考えられる。また、降雨により浸入した浸透水は矢印の方向から分かるとおり、中心から左側の位置ではモデルの左端の方向へ、中心から右側の位置ではモデルの右端の方向へそれぞれ流れていた。一方、粘土層では、流速は保護土及び排水層の流速よりも非常に小さくなっていた。これは、粘土層及び上部覆土の透水係数が、保護土及び排水層の透水係数より小さいためと考えられる。

以上のことから、保護土及び排水層により浸透水がモデルの左又は右に向かって流れ、粘土層により、浸透水の移動を遅延させる解析結果となっていた。従って、天然にある材料により浸透水を低減させることが可能であると考えられる。また、各層における浸透水を低減させる作用が異なることから、各材料の施工による透水係数及び厚さを変えることにより、浸透水の低減率が変化すると考えられる。

5. 覆土の構成におけるパラメータスタディ

5.1 覆土の構成の設定

標準モデルでは、覆土を地表側から保護土、排水層、粘土層という順にした構成を検討した。この構成の妥当性を評価するために、遮水機能として重要な層である排水層と粘土層の位置を入れ替えた覆土の設計モデル（以下、「検討モデル」という。）について検討することとした。

検討モデルのイメージ図を図 5-1 に示す。標準モデルの排水層と粘土層の位置を入れ替え、保護土、粘土層、排水層という順に設定した。保護土、粘土層及び排水層の厚さは 0.3m、0.5m 及び 0.3m、透水係数は $1.0 \times 10^{-4} \text{m/s}$ 、 $1.0 \times 10^{-8} \text{m/s}$ 及び $3.0 \times 10^{-4} \text{m/s}$ と標準モデルと同じパラメータを設定した。

評価する境界平均流速は、標準モデルでは粘土層と上部覆土の境界の平均流速としていたが、検討モデルでは、排水層と粘土層の位置が入れ替わっていることから、標準モデルと同等の位置にて評価するために、排水層と上部覆土の境界の流速を境界平均流速として評価することとした。

5.2 覆土の構成におけるパラメータスタディの結果

解析の結果、検討モデルにおける境界平均流速は $5.79 \times 10^{-2} \text{m/y}$ であった。これは浸透水量 0.6m/y の 9.7% であった。検討モデルの覆土の場合においても、遮水効果があることが確認されたが、4.5 で示した標準モデルにおける境界平均流速 $2.01 \times 10^{-2} \text{m/y}$ より 2.9 倍速い結果であった。検討モデルの境界平均流速が標準モデルの場合より速い結果となった原因としては、浸透水が粘土層を通過することによって排水層における排水効果が低減したためと考えられる。

ここで、検討モデル内の流速及び流向を図 5-2 に示す。

検討モデルでは、図 4-7 に示した標準モデルと比較すると、排水層中の流向は同じように傾斜に沿って左右いずれかの方向を向いていたが、流速は検討モデルの場合の方が遅くなっていた。これは、検討モデルでは、排水層の上部に粘土層があるため、排水層中の水の流速が遅くなったと考えられる。さらに、排水層の下部は粘土層より透水係数の高い上部覆土であるため、標準モデルよりも上部覆土への水の浸入がしやすくなったと考えられる。

以上の結果より、覆土の構造としては、標準モデルの方の遮水効果が高いことが示された。従って、浸透水による施設への水の浸入低減するためには、まず、透水係数の高い排水層等を設けることにより浸透水がトレンチ施設を迂回する方向へ流して十分排水し、そして、排水しきれずに残った水は透水係数の低い粘土層等を設けて遮水するという覆土設計にすることが合理的であると考えられる。

6. 覆土の各構成材料のパラメータスタディ

4章で解析した結果より、各層における浸透水を低減させる作用が異なることから、各材料の施工による透水係数及び厚さを変えることにより、浸透水の低減率が変化することが示唆された。そこで、トレンチ施設の覆土の設計の条件を検討するために、パラメータスタディを実施することとした。

パラメータスタディでは、4章及び5章の結果より、遮水効果が高かった標準モデルにて評価を行うこととした。パラメータスタディの対象は、標準モデルにおける覆土を構成する粘土層、排水層及び保護土の厚さ及び透水係数とした。パラメータスタディにおいても、4章と同様に、境界平均流速を浸入水量として評価した。

6.1 粘土層のパラメータスタディ

6.1.1 粘土層のパラメータの設定

粘土層は4.1に示した通り、排水層により流れなかった浸透水を遮水するため層であるため、基本設計の検討する際には、排水層の性能を考慮して厚さや透水係数を決定すると考えられる。そこで、パラメータスタディでは粘土層の厚さを0.1m、0.5m、1.0m、透水係数を $1.0 \times 10^{-7} \text{m/s}$ 、 $1.0 \times 10^{-8} \text{m/s}$ 、 $1.0 \times 10^{-9} \text{m/s}$ の計9パターンについて解析を実施し、粘土層が境界平均流速に与える影響を評価することとした。粘土層の厚さが変化しても、覆土全体の厚さは2.5mとなるように、上部覆土で厚さを調整した。

6.1.2 粘土層のパラメータスタディの結果

境界平均流速の結果を表6-1及び図6-1に示す。

粘土層の厚さが0.5mの場合では、透水係数が $1.0 \times 10^{-7} \text{m/s}$ 、 $1.0 \times 10^{-8} \text{m/s}$ 、 $1.0 \times 10^{-9} \text{m/s}$ と低くなるにつれ、境界平均流速が $1.31 \times 10^{-1} \text{m/y}$ 、 $2.01 \times 10^{-2} \text{m/y}$ 、 $2.12 \times 10^{-3} \text{m/y}$ と小さくなっており、浸透水量である0.6m/yの約22%、3.4%、0.35%であった。また、粘土層の透水係数が $1.0 \times 10^{-8} \text{m/s}$ の場合で、厚さを0.1m、0.5m、1.0mと厚くすると、境界平均流速が $7.54 \times 10^{-2} \text{m/y}$ 、 $2.01 \times 10^{-2} \text{m/y}$ 、 $1.04 \times 10^{-2} \text{m/y}$ と小さくなっており、浸透水量である0.6m/yの約13%、3.4%、1.7%であった。このことから、粘土層の透水係数を高くするほど、及び層を厚くするほど廃棄体層へ浸入する水量が減少すると考えられる。

また、図6-2～6-9に解析により算出されたモデル内の浸透水の流速及び流向を示す。4章で示した結果と比較すると、粘土層の厚さ0.1mで透水係数 $1.0 \times 10^{-7} \text{m/s}$ の場合（図6-2）では、境界平均流速が標準モデルの場合の10倍以上となっていた。これは、廃棄体層の中心の位置の流速が大きくなったことから、廃棄体層を通過する浸透水量が増加していると考えられる。一方、粘土層の厚さ0.5mで透水係数 $1.0 \times 10^{-9} \text{m/s}$ の場合（図6-6）、及び粘土層の厚さ1.0mで透水係数 $1.0 \times 10^{-9} \text{m/s}$ の場合（図6-9）では、境界平均流速が標準モデルの場合の10

分の1以下となった。これは、廃棄体層の中心の位置の流速が小さくなったことから、廃棄体層を通過する浸透水量が低減されていると考えられる。モデル内の水の流向については、粘土層の条件が異なることにより、廃棄体層及びその周辺の土壌層の流向が異なっていた。境界平均流速が大きい場合では、廃棄体層内の流向はモデルの下方方向へ向いていた。また、廃棄体層の周囲の土壌層の流向についても、モデルの下方方向を向いていた。一方、境界平均流速が小さい場合では、廃棄体層内及びその周辺の土壌層の流向は、モデルの中心へ向かっていた。これは、本解析で設定した廃棄体層及び土壌層の透水係数が同じであり、覆土の条件により廃棄体層へ浸入する浸透水量が異なったためと考えられる。保護土、排水層、粘土層及び上部覆土の流向については粘土層の条件による大きな影響は確認されなかった。

6.2 排水層のパラメータスタディ

6.2.1 排水層のパラメータの設定

排水層は、粒子径の大きい礫や排水シート等を用いることを検討している。礫を用いた排水層の場合、厚くしすぎると浸入してきた水の流れにより覆土が崩れる可能性があるため、パラメータスタディでは、排水層の厚さを0.3m、0.1m、0.03mとし、透水係数を $1.0 \times 10^{-3} \text{m/s}$ 、 $3.0 \times 10^{-4} \text{m/s}$ 、 $1.0 \times 10^{-4} \text{m/s}$ の計9パターンについて解析を実施し、排水層が境界平均流速に与える影響を評価することとした。排水層の厚さが変化しても、覆土全体の厚さは2.5mとなるように、上部覆土で厚さを調整した。

6.2.2 排水層のパラメータスタディの結果

境界平均流速の結果を表6-2及び図6-10に示す。

排水層の厚さが0.3mの場合では、透水係数が $1.0 \times 10^{-4} \text{m/s}$ 、 $3.0 \times 10^{-4} \text{m/s}$ 、 $1.0 \times 10^{-3} \text{m/s}$ と高くなるにつれ、境界平均流速が $3.83 \times 10^{-2} \text{m/y}$ 、 $2.01 \times 10^{-2} \text{m/y}$ 、 $8.30 \times 10^{-3} \text{m/y}$ と小さくなっていた。これは、浸透水量0.6m/yの約1.4%、3.4%、6.4%であったことから、排水層の透水係数を高くすることにより、浸透水をさらに低減させることが可能であると考えられる。また、透水係数 $3.0 \times 10^{-4} \text{m/s}$ の場合で、排水層の厚さを0.03m、0.1m、0.3mと厚くすると、境界平均流速が $5.61 \times 10^{-2} \text{m/y}$ 、 $3.77 \times 10^{-2} \text{m/y}$ 、 $2.01 \times 10^{-2} \text{m/y}$ と小さくなっていた。これは、浸透水量0.6m/yの約9.4%、6.3%、3.4%であったことから、排水層の厚さを厚くすることによっても、浸透水をさらに低減させることが可能であると考えられる。従って、排水層の透水性を高いほど、及び排水層の厚さを厚くするほどトレンチ施設への浸透水の低減が可能であると考えられる。

図6-11～6-18に解析により算出されたモデル内の流速及び流向を示す。

排水層の厚さ0.3mで透水係数 $1.0 \times 10^{-3} \text{m/s}$ の場合(図6-17)では、境界平均流速が最も小さい結果となっていた。この条件では、他の場合と比べ、粘土層及び上部覆土の流速が小さくなっていた。これは、排水層の厚さが厚く、透水係数が大きくなったことから、粘土層へ移行

する浸透水量が低減されたためと考えられる。また、モデル内の水の流向については、6.1 で示した粘土層のパラメータスタディと異なり、どの条件においても大きな変化は見られなかった。

6.3 保護土のパラメータスタディ

6.3.1 保護土のパラメータの設定

保護土は、4.1 の通り覆土を保護する役割を目的としているため、トレンチ施設が露出することがない設計を検討する必要がある。そこで、パラメータスタディでは、保護土の厚さを 0.3m、0.6m、1.0m とし、透水係数を $1.0 \times 10^{-4} \text{m/s}$ 、 $1.0 \times 10^{-5} \text{m/s}$ 、 $1.0 \times 10^{-6} \text{m/s}$ の計 9 パターンについて解析を実施し、保護土の厚さや透水係数が境界平均流速に与える影響を評価することとした。保護土の厚さが変化しても、覆土全体の厚さは 2.5m となるように、上部覆土で厚さを調整した。

6.3.2 保護土のパラメータスタディの結果

境界平均流速の結果を表 6-3 及び図 6-19 に示す。

保護土の厚さが 0.3m の場合では、透水係数が $1.0 \times 10^{-4} \text{m/s}$ 、 $1.0 \times 10^{-5} \text{m/s}$ 、 $1.0 \times 10^{-6} \text{m/s}$ と低くなるにつれ、境界平均流速が $2.01 \times 10^{-2} \text{m/y}$ 、 $2.56 \times 10^{-2} \text{m/y}$ 、 $2.63 \times 10^{-2} \text{m/y}$ と大きくなっていった。また、透水係数 $1.0 \times 10^{-4} \text{m/s}$ の場合で、保護土の厚さを 0.3m、0.6m、1.0m と厚くすると、境界平均流速が $2.01 \times 10^{-2} \text{m/y}$ 、 $1.59 \times 10^{-2} \text{m/y}$ 、 $1.24 \times 10^{-2} \text{m/y}$ と小さくなっていった。ただし、6.1.2 の結果と比較するとパラメータの違いによる境界平均流速の差は非常に小さかった。従って、保護土の設計条件は、浸透水の低減にほとんど影響はないと考えられる。

図 6-20～6-27 に解析により算出されたモデル内の流速及び流向を示す。

標準モデルでは、保護土内の流向は、排水層と同様に覆土の勾配の方向に流向を示していたことから、浸透水をトレンチ施設の上部で迂回させる役割があると考えられた。保護土の透水係数が $1.0 \times 10^{-4} \text{m/s}$ の場合（図 6-22、6-25）では、標準モデルと同様に保護土内の流向は覆土の勾配に沿った方向を向いていた。しかし、透水係数が $1.0 \times 10^{-5} \text{m/s}$ 、 $1.0 \times 10^{-6} \text{m/s}$ と小さくなるにつれ、流向は覆土の勾配の方向ではなく、モデルの下方向へ変わっていた。これは、透水係数が小さくなったことにより、覆土の勾配方向より重力方向の水圧の方が大きくなったためと考えられる。このことから、保護土の透水係数が $1.0 \times 10^{-5} \text{m/s}$ 以下では、排水層と同様の浸透水をトレンチ施設の上部を迂回させる機能ではなく、粘土層のように浸透水を遮水する機能に変わったと考えられる。

7. 検討結果と今後の課題

7.1 検討結果

原子力機構では、令和元年に改正された許可基準規則²⁾の要求を満たすトレンチ施設の設計条件等を追加検討することとした。そこで、本報告書では、概念設計¹⁾にて検討したトレンチ施設のうち、安定型トレンチにおいて、廃棄体層へ浸入する雨水である浸透水を低減させる覆土の設計条件を把握することとした。検討方法は、2次元における有限要素法による浸透流解析にてパラメータスタディを実施し、各条件における粘土層と上部覆土の境界の流速である境界平均流速を比較することにより評価した。パラメータスタディは、まず、基準となる標準モデルを設定し、その後、粘土層、排水層、保護土及び上部覆土の厚さ及び透水係数のパラメータを変えて実施した。

標準モデルは、地表から保護土 0.3m、排水層 0.3m、粘土層 0.5m 及び上部覆土と重なり、計 2.5m とする覆土を設定した。また、各層の透水係数は、保護土 $1.0 \times 10^{-4} \text{m/s}$ 、排水層 $3.0 \times 10^{-4} \text{m/s}$ 、粘土層 $1.0 \times 10^{-8} \text{m/s}$ とし、モデル上部から浸入する浸透水は 0.6m/y とした。

解析の結果、境界平均流速は、浸透水 0.6m/y の約 3.4%である $2.01 \times 10^{-2} \text{m/y}$ まで低減されていた。従って、標準モデルとして設定した覆土の設計において、浸透水の低減が可能であることが示唆された。

次に、粘土層、排水層及び保護土についてパラメータスタディを実施し、より低減させる設計条件を検討することとした。

- ・粘土層のパラメータスタディ

粘土層の厚さを 0.1m、0.5m、1.0m とし、透水係数を $1.0 \times 10^{-7} \text{m/s}$ 、 $1.0 \times 10^{-8} \text{m/s}$ 、 $1.0 \times 10^{-9} \text{m/s}$ と設定して解析を行った。解析の結果、粘土層は、施工の厚さを厚くするほど、及び透水係数を低くするほど、浸透水の低減効果が高くなったが、透水係数が $1.0 \times 10^{-9} \text{m/s}$ まで低くなると厚さを変えても境界平均流速がほとんど変化しなかった。

- ・排水層のパラメータスタディ

排水層の厚さを 0.03m、0.1m、0.3m とし、透水係数を $1.0 \times 10^{-3} \text{m/s}$ 、 $3.0 \times 10^{-4} \text{m/s}$ 、 $1.0 \times 10^{-4} \text{m/s}$ と設定して解析を行った。解析の結果、施工の厚さを厚くするほど、及び透水係数を高くするほど、浸透水の低減効果が高くなった。

- ・保護土のパラメータスタディ

保護土についてのパラメータスタディは、厚さを 0.3m、0.6m、1.0m、透水係数を $1.0 \times 10^{-4} \text{m/s}$ 、 $1.0 \times 10^{-5} \text{m/s}$ 、 $1.0 \times 10^{-6} \text{m/s}$ と設定して解析を行った。解析の結果、保護土の厚さ及び透水係数が変化しても、境界平均流速に大きな変化は確認できなかった。

パラメータスタディの結果より、廃棄体層へ浸入する浸透水を低減させる設計条件として、粘土層は透水係数をより低くし、排水層は透水係数をより高くし、どちらの層も厚く施工することが、浸透水をより低減する覆土の設計として有効であることが分かった。以上のように、本報告における解析により、粘土層、排水層、保護土の組み合わせによる透水性能を把握することができた。

本検討では、解析による評価のみ実施したが、今後検討する基本設計では、覆土の施工にかかる費用についても考慮する必要がある。本解析結果を経済的観点から考察すると、次のことが言える。

粘土層は、低透水性とするための方法として覆土に天然材料であるベントナイトを添加することが考えられる。6.1の検討によると、粘土層は厚くするほど、透水係数が低いほど境界平均流速が小さくなる結果となったが、粘土層を厚くすること及び透水係数を低くすることは、添加するベントナイトの量が増加することになるため、施工費が高価になる可能性が考えられる。

また、表 6-1 を参照すると、粘土層の透水係数が $1.0 \times 10^{-9} \text{m/s}$ の場合では、粘土層の厚さが変わっても境界平均流速はほとんど変わらなかった。このことから、粘土層の透水係数を $1.0 \times 10^{-9} \text{m/s}$ とする場合、材料の使用量が最も少ない 0.1m の厚さでも遮水が十分であると考えられる。また、厚さが同じ場合では透水係数が低い方が境界平均流速は低くなっているが、粘土層の厚さが 1.0m であり透水係数が $1.0 \times 10^{-8} \text{m/s}$ の場合と、粘土層の厚さが 0.1m であり透水係数が $1.0 \times 10^{-9} \text{m/s}$ の場合とでは、境界平均流速はほとんど変わらなかった。このことから、透水係数を $1.0 \times 10^{-9} \text{m/s}$ の覆土を用いることと、厚さを 1.0m まで厚く施工すること、どちらの施工費が高価になるか比較をし、遮水の有効性においても経済性においても適する設計の検討が今後必要である。

排水層や保護土については、粘土層より層の厚さや透水係数が与える境界平均流速への影響は小さかったが、粘土層と同様に施工費を含めた検討を今後行う必要があると考えられる。

7.2 基本設計に向けた今後の課題

本検討において、基本設計に向けた課題としては以下のことが挙げられる。

- ・ 施工費用の検討

本報告では、2次元の浸透流解析により、浸透水の低減率がより高い設計条件について検討したが、7.1で述べた通り、施工費用についての検討も必要である。従って、遮水層の施工における浸透水の低減率及び施工費用をそれぞれ算出し、より効率的かつ経済的な覆土の設計条件について検討を深める必要がある。

- ・ 廃棄体層に浸入する水量の解析

本解析では、廃棄体層に浸入する水として、降雨により地下に浸入した水にのみ着目したが、4章及び6章で示したモデル内の流速及び流向分布より、廃棄体層への浸入水は、上部のみではなく、左右からの浸入も考えられる結果が得られた。従って、基本設計

において廃棄体層への浸入水量を検討する際には、廃棄体層の境界の流速及び流向を求めて解析を行い、廃棄体層への上部からの浸入水だけでなく、側部からの浸入水の評価も行う必要がある。

- 覆土の厚さ及び層序の検討

本解析では、覆土の厚さを **2.5m** として、図 4-1 の層序で評価を実施した。粘土層、排水層、保護土の機能について確認することができたが、基本設計に向けては、表層の植生による影響やトレンチ施設の線量評価で想定する外部からの擾乱の影響、廃棄物層内の空隙による長期的な変形事象を考慮して、各層の層序と厚さを引き続き検討する必要がある。

上記に挙げた課題について検討し、今後も基本設計に向けて、トレンチ施設の安全性を評価し、合理的な覆土の仕様を検討していくことを予定している。

表 4-1 解析で設定したパラメータ

層	透水係数 (m/s)
保護土	1.0×10^{-4}
排水層	3.0×10^{-4}
粘土層	1.0×10^{-8}
上部覆土	1.0×10^{-6}
廃棄体層	1.0×10^{-4}
土壌層	1.0×10^{-4}

表 4-2 圧力水頭 h_p と含水率 θ の関数

含水率 θ (%)	6.96	8.91	10.7	20	40
圧力水頭 h_p (m)	-10	-0.938	-0.563	-0.125	0

表 4-3 含水率 θ と不飽和低減係数の関数

含水率 θ (%)	6.09	8.04	10	14	40
不飽和低減係数 (-)	0	0.025	0.127	0.952	1

表 6-1 粘土層のパラメータスタディ

厚さ(m)	透水係数(m/s)	境界平均流速(m/y)
0.1	1.0×10^{-7}	2.33×10^{-1}
	1.0×10^{-8}	7.54×10^{-2}
	1.0×10^{-9}	9.68×10^{-3}
0.5	1.0×10^{-7}	1.31×10^{-1}
	1.0×10^{-8}	2.01×10^{-2}
	1.0×10^{-9}	2.12×10^{-3}
1.0	1.0×10^{-7}	8.35×10^{-2}
	1.0×10^{-8}	1.04×10^{-2}
	1.0×10^{-9}	1.06×10^{-3}

表 6-2 排水層のパラメータスタディ

厚さ(m)	透水係数(m/s)	境界平均流速(m/y)
0.3	1.0×10^{-3}	8.30×10^{-3}
	3.0×10^{-4}	2.01×10^{-2}
	1.0×10^{-4}	3.83×10^{-2}
0.1	1.0×10^{-3}	1.88×10^{-2}
	3.0×10^{-4}	3.77×10^{-2}
	1.0×10^{-4}	5.43×10^{-2}
0.03	1.0×10^{-3}	3.86×10^{-2}
	3.0×10^{-4}	5.61×10^{-2}
	1.0×10^{-4}	6.43×10^{-2}

表 6-3 保護土のパラメータスタディ

厚さ(m)	透水係数(m/s)	境界平均流速(m/y)
0.3	1.0×10^{-4}	2.01×10^{-2}
	1.0×10^{-5}	2.56×10^{-2}
	1.0×10^{-6}	2.63×10^{-2}
0.6	1.0×10^{-4}	1.59×10^{-2}
	1.0×10^{-5}	2.32×10^{-2}
	1.0×10^{-6}	2.45×10^{-2}
1.0	1.0×10^{-4}	1.24×10^{-2}
	1.0×10^{-5}	2.11×10^{-2}
	1.0×10^{-6}	2.28×10^{-2}

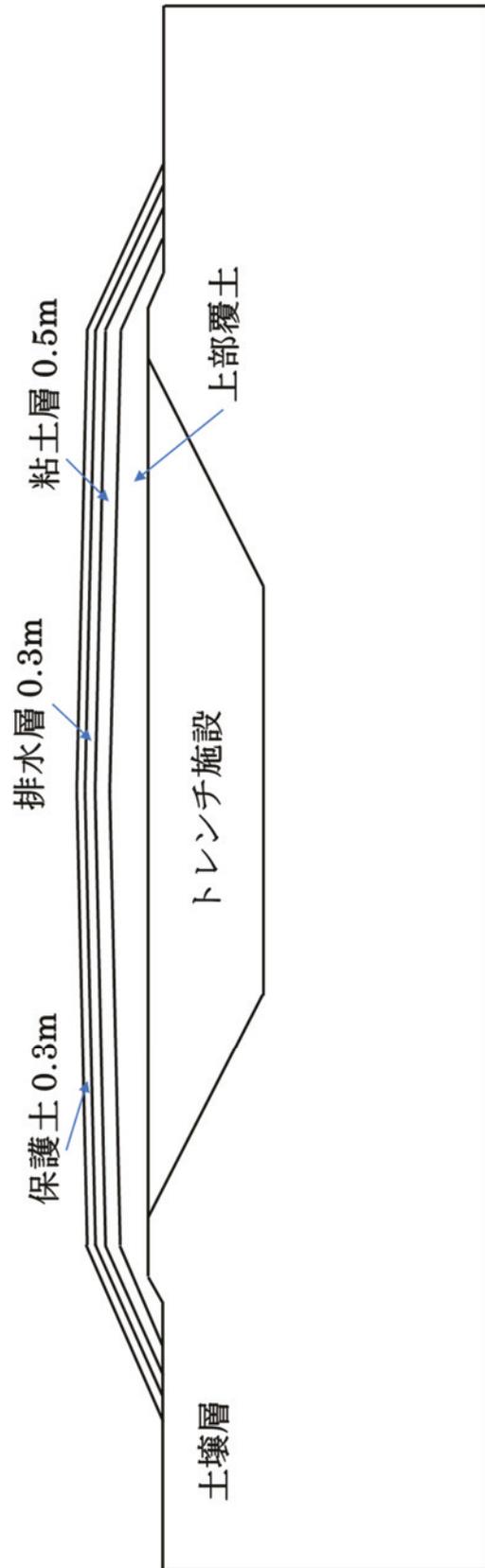


図 4-1 モデルの概略図

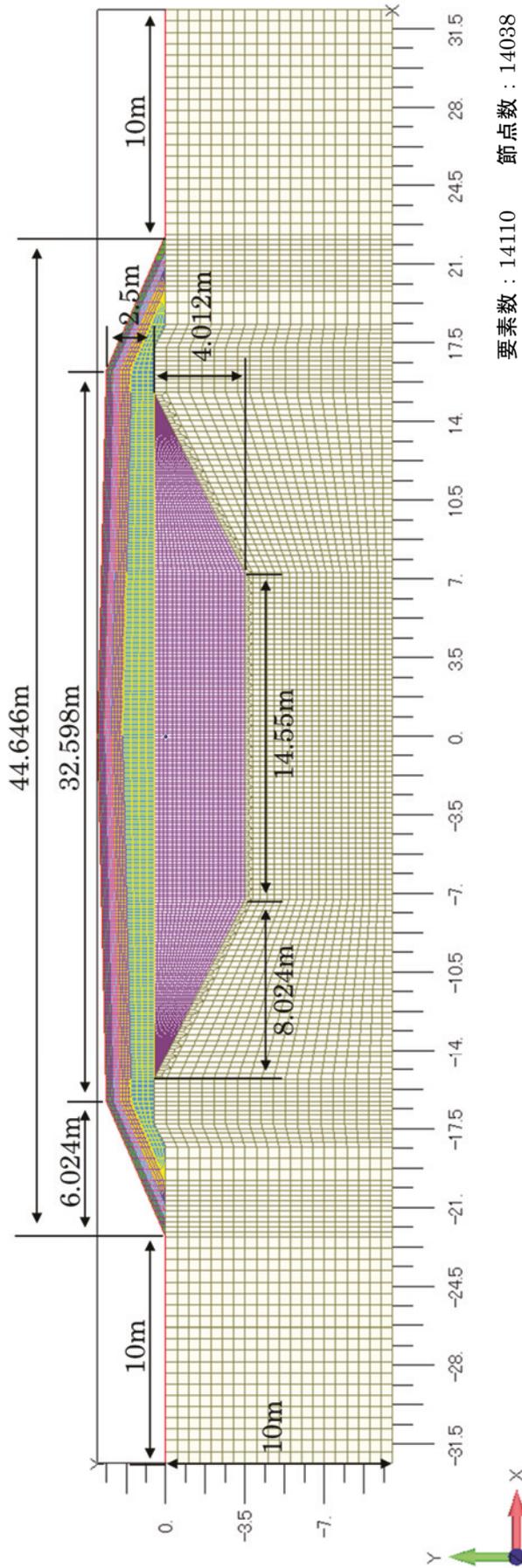


図 4-2 解析モデルのメッシュ図

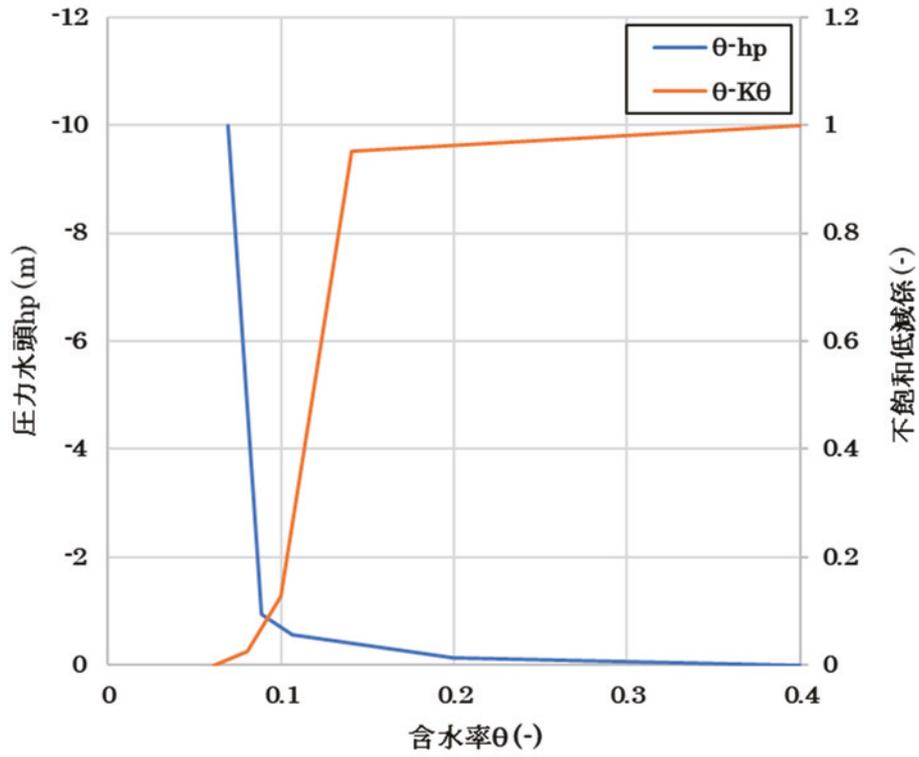


図 4-3 圧力水頭と含水率及び含水率と不飽和低減係数の関係

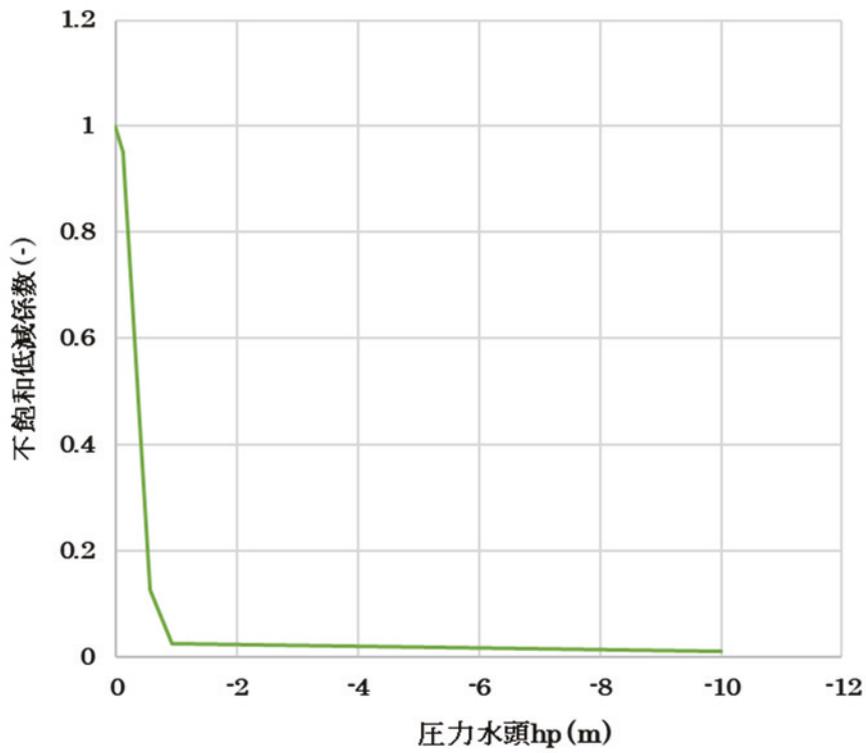


図 4-4 圧力水頭に対する不飽和低減係数

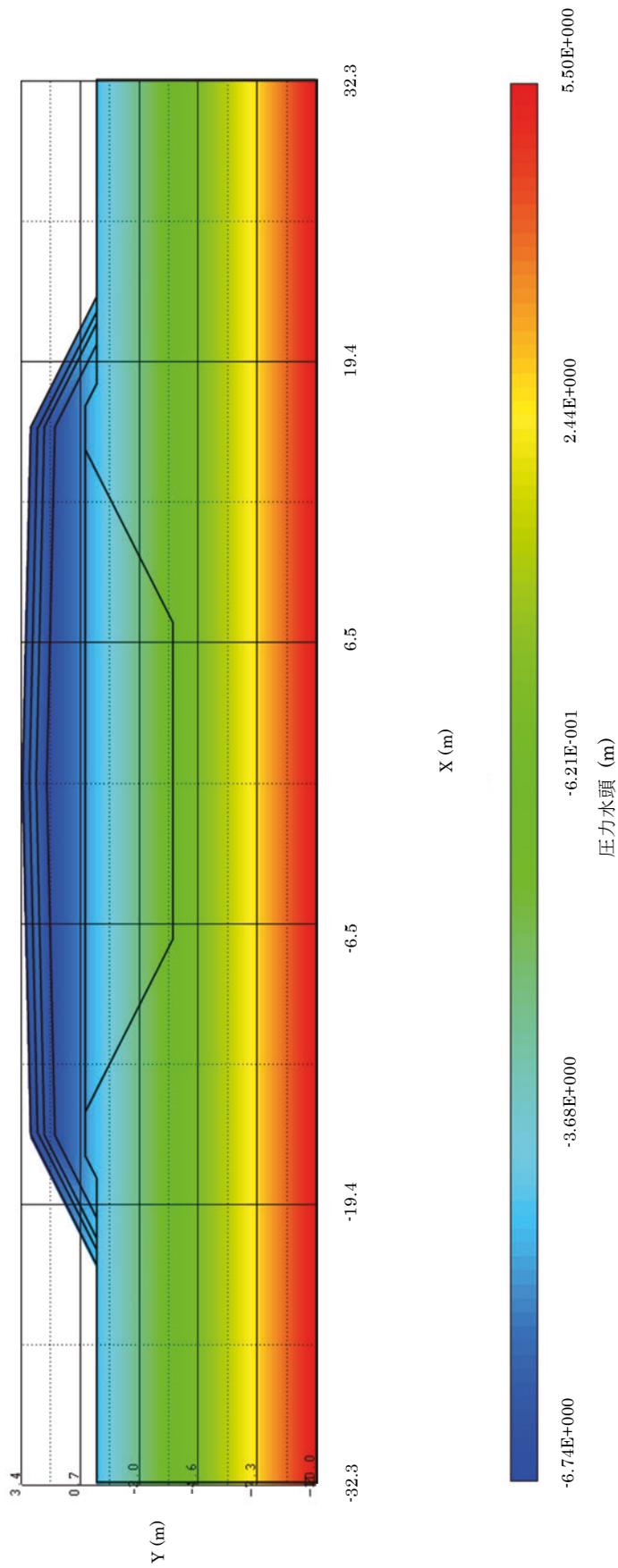


图 4-5 压力水頭分布

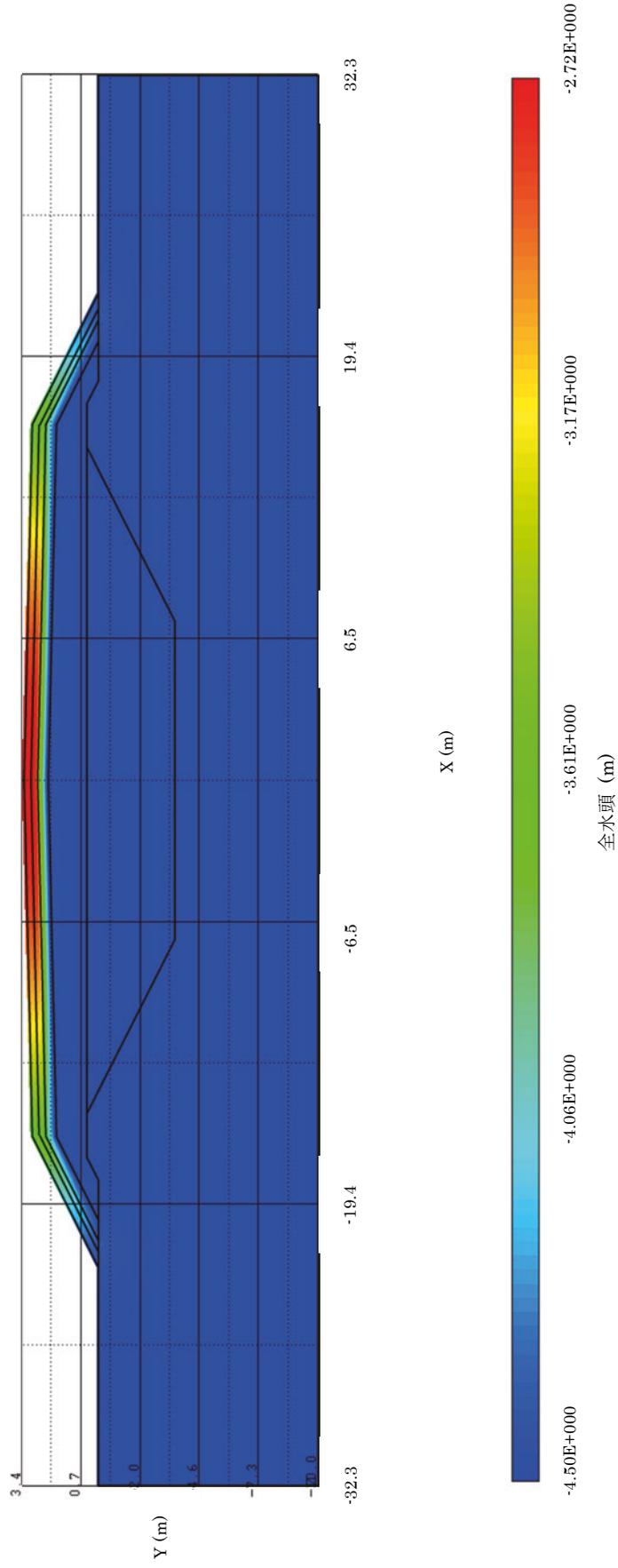


図 4-6 全水頭分布

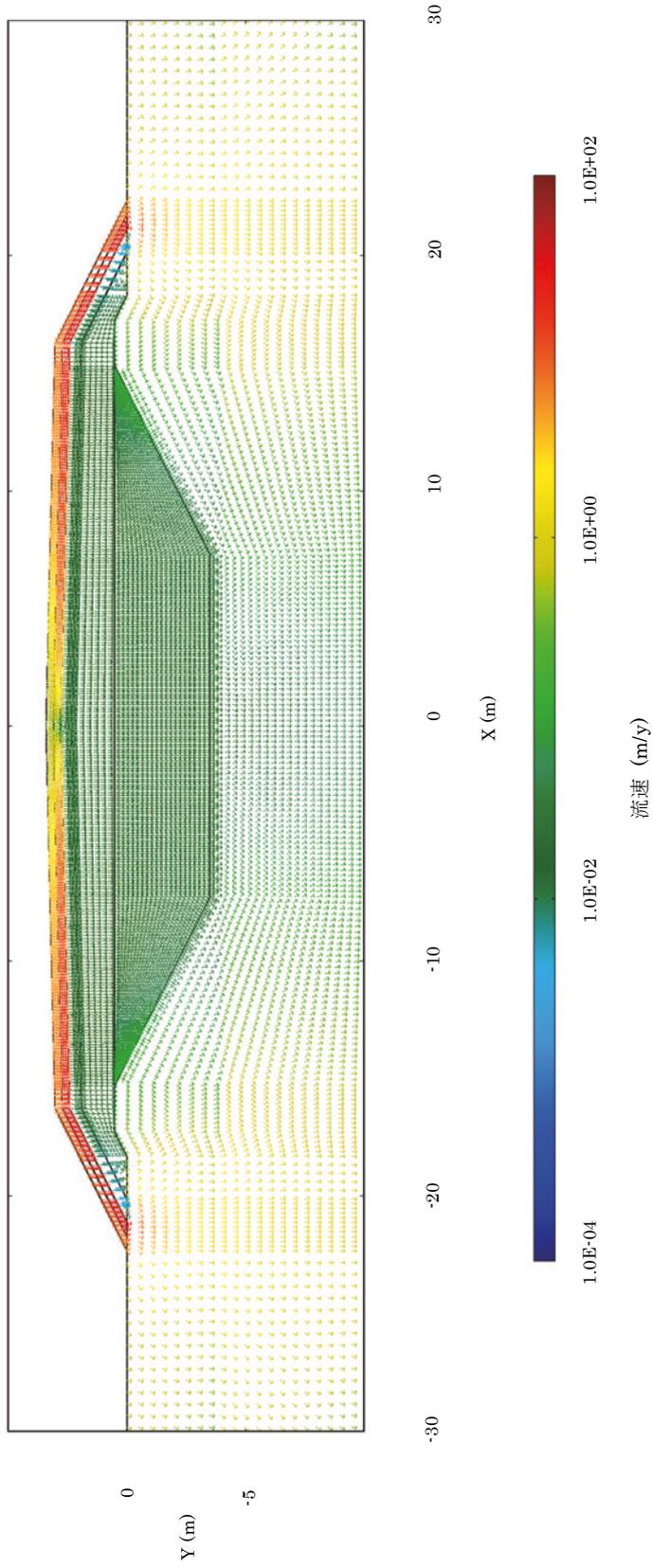


图 4-7 流速及ひ流向分布

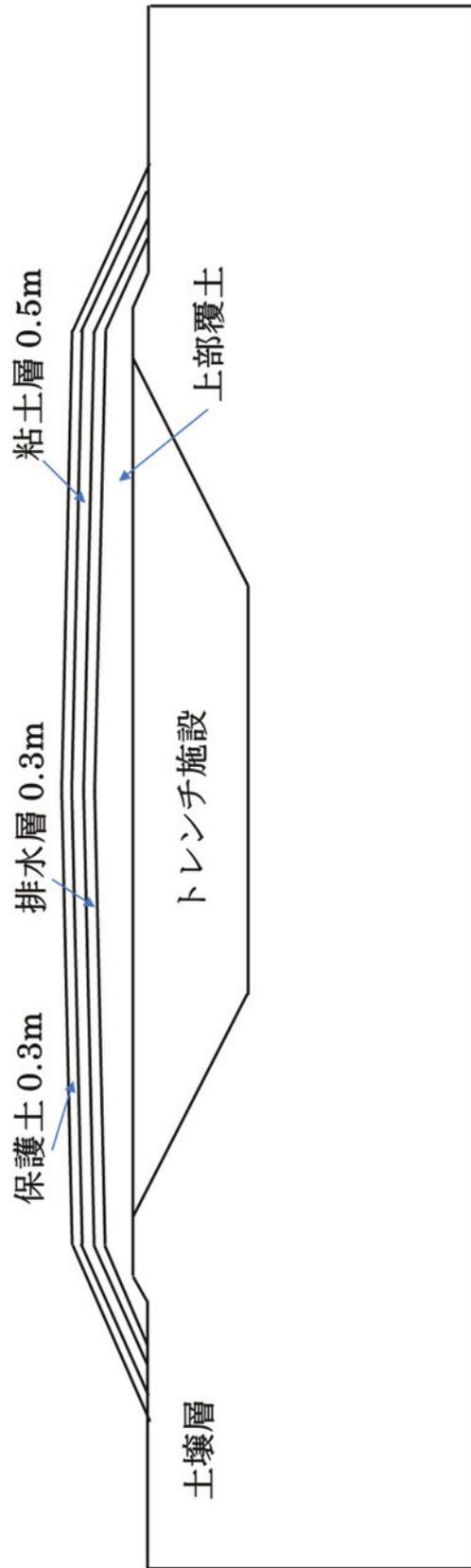


図 5-1 検討モデルの概略図

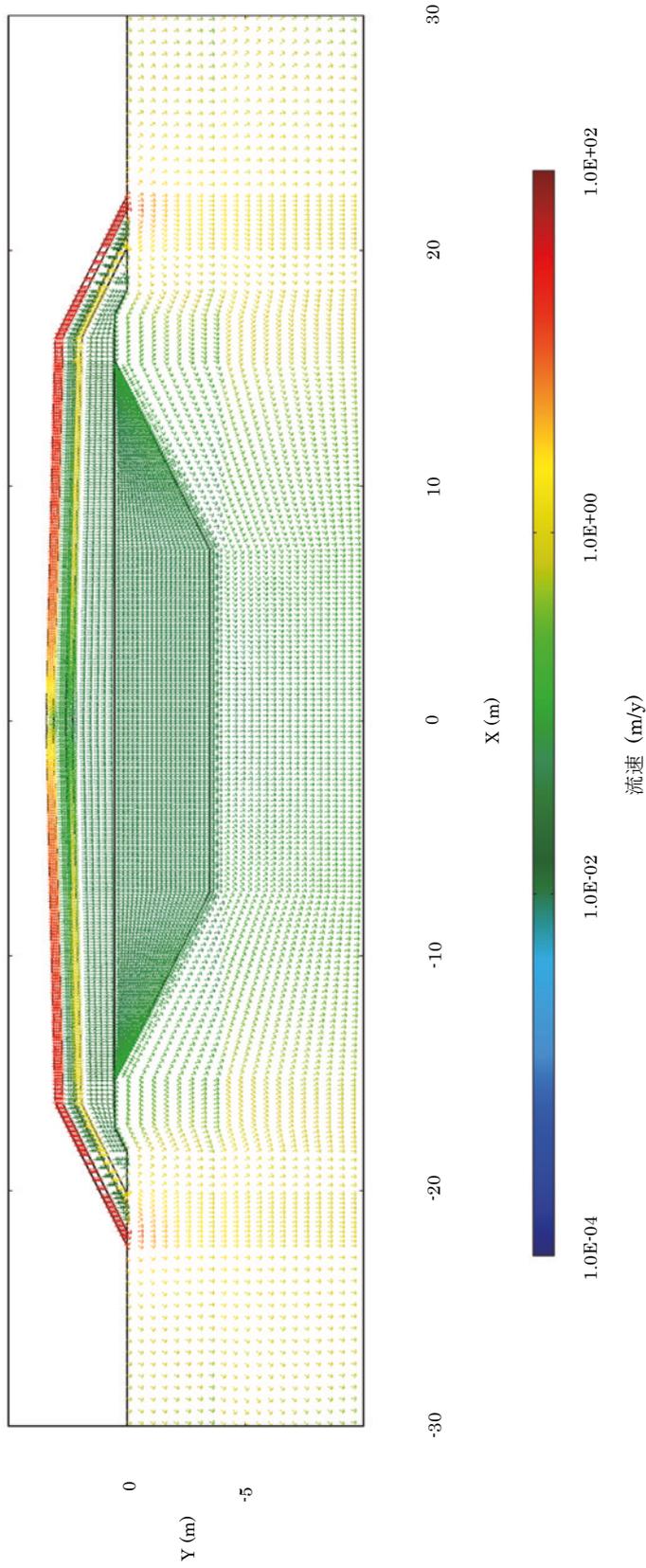


図 5-2 検討モデルの流速及び流向

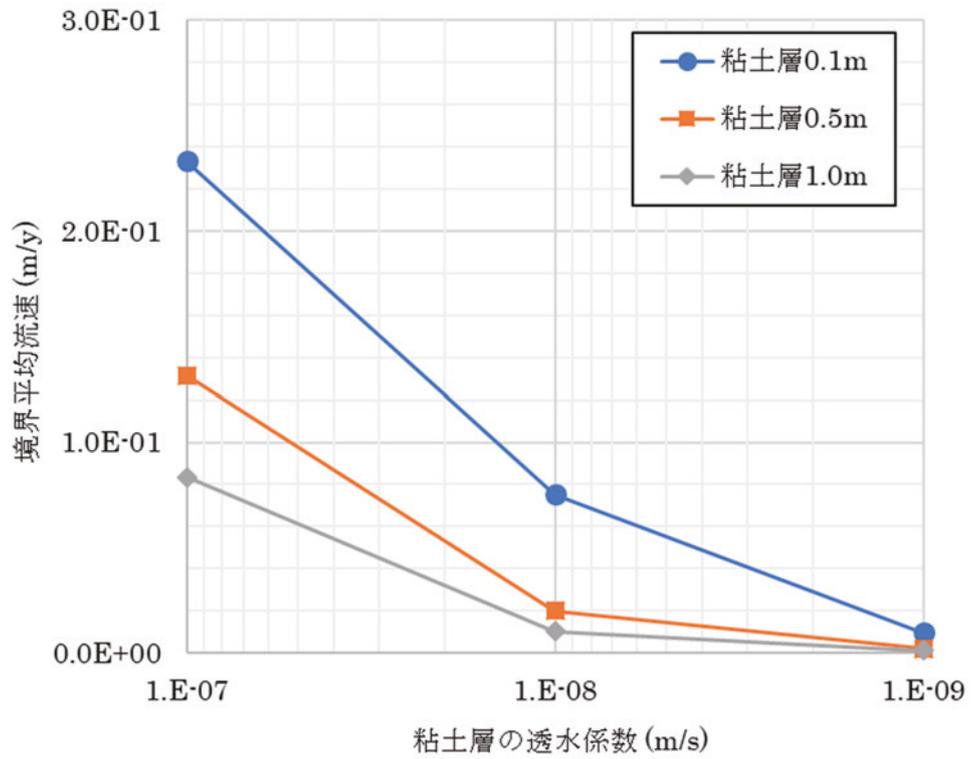


図 6-1 粘土層のパラメータスタディにおける境界平均流速

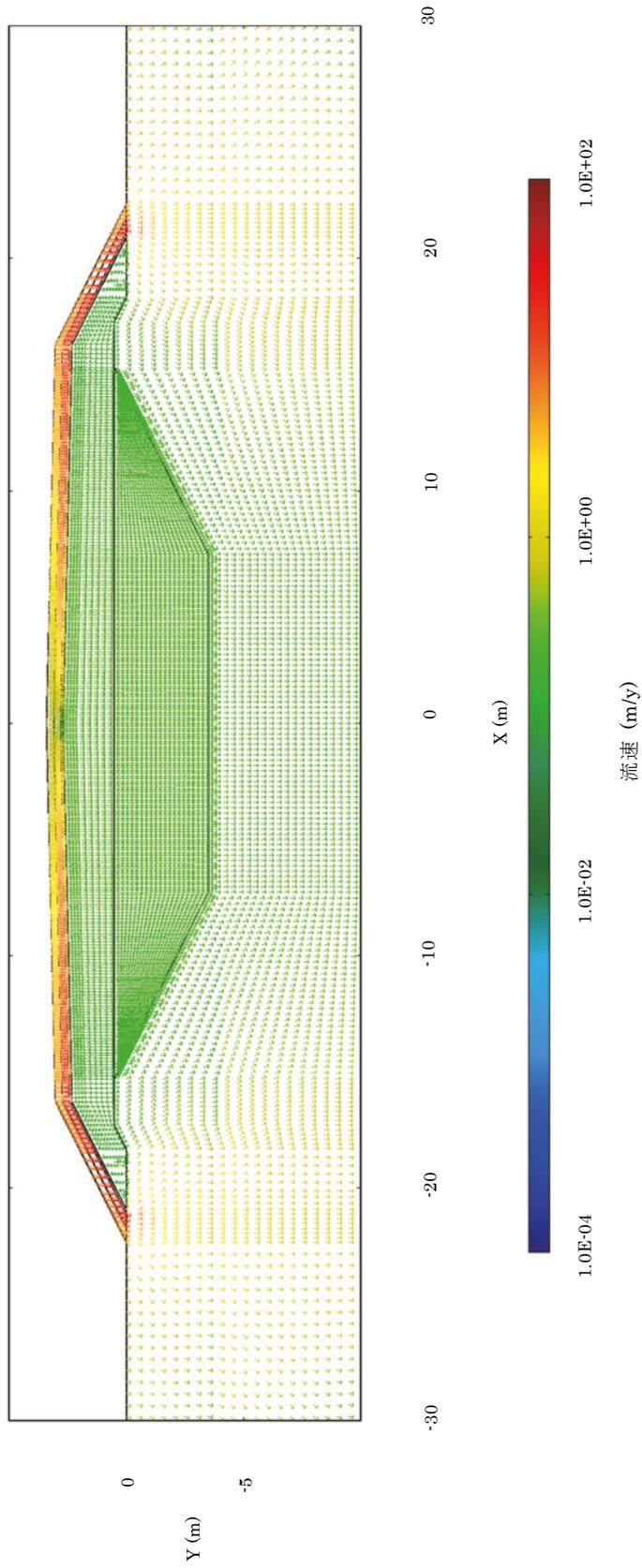


図 6-2 粘土層の厚さ 0.1m、透水係数 $1.0 \times 10^{-7} \text{m/s}$ の場合の流速及び流向

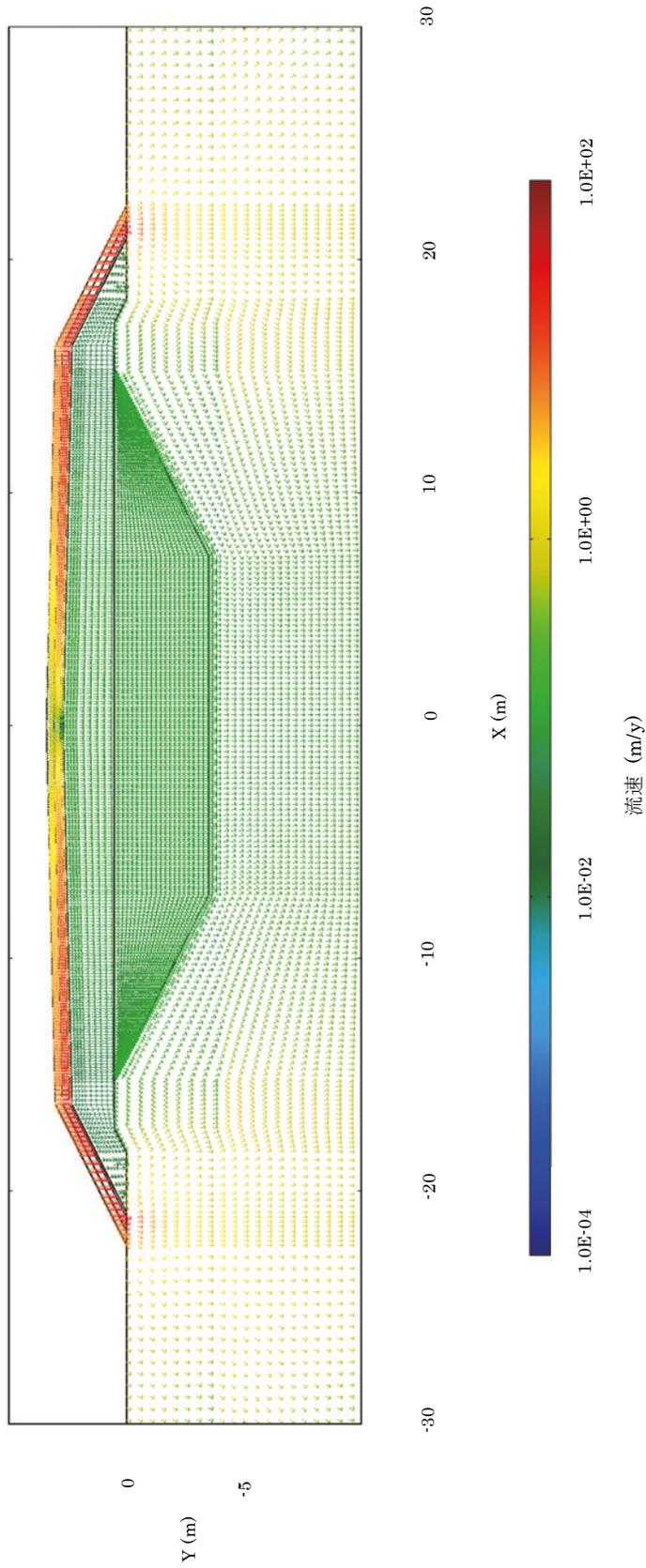


図 6-3 粘土層の厚さ 0.1m、透水係数 $1.0 \times 10^{-8} \text{m/s}$ の場合の流速及び流れ方向

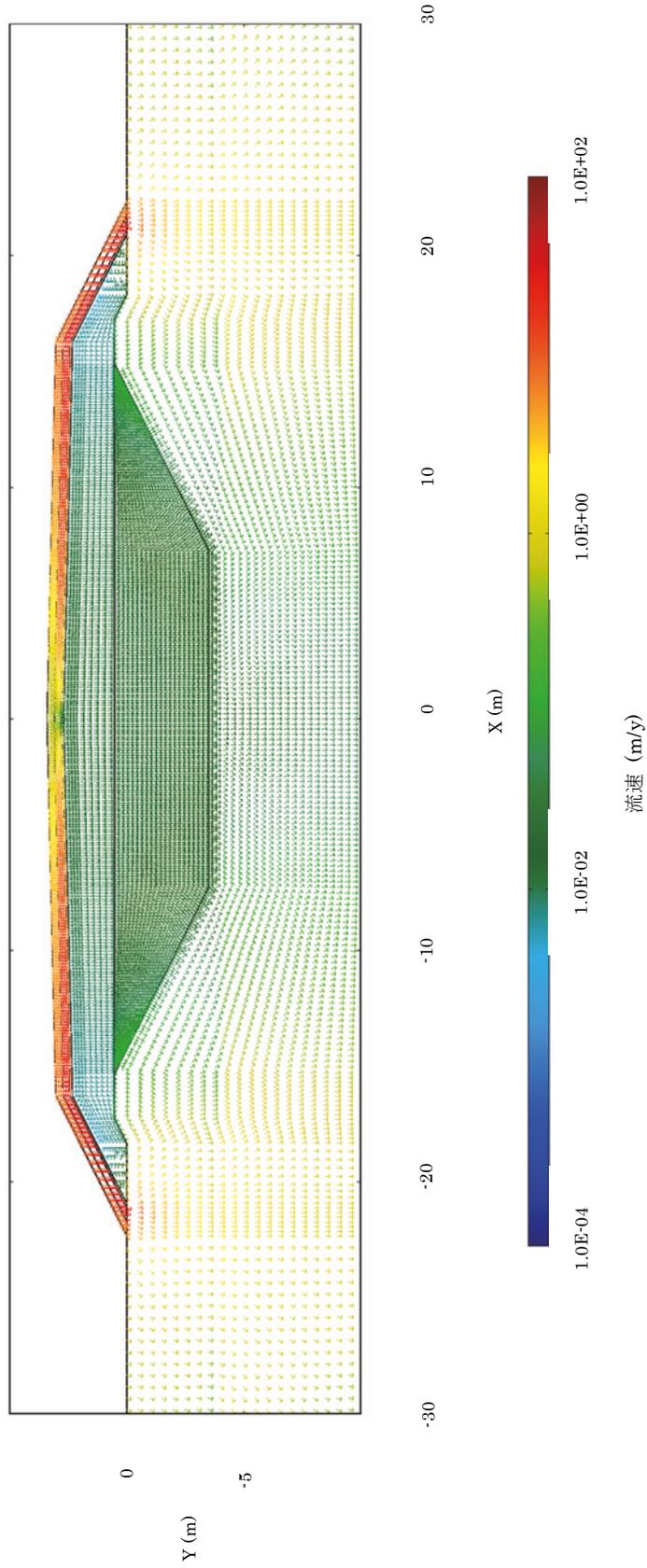


図 6-4 粘土層の厚さ 0.1m、透水係数 $1.0 \times 10^{-9} \text{m/s}$ の場合の流速及び流向

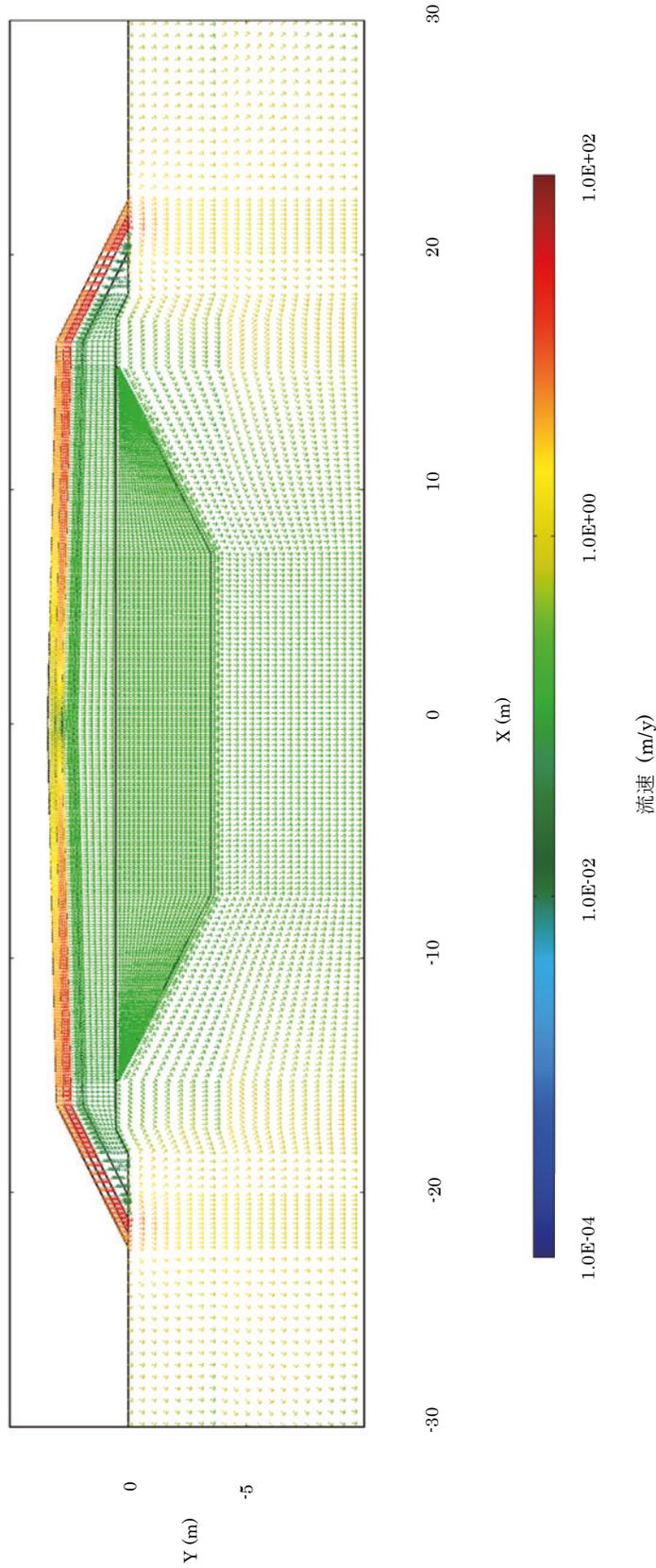


図 6-5 粘土層の厚さ 0.5m、透水係数 $1.0 \times 10^{-7} \text{m/s}$ の場合の流速及び流向

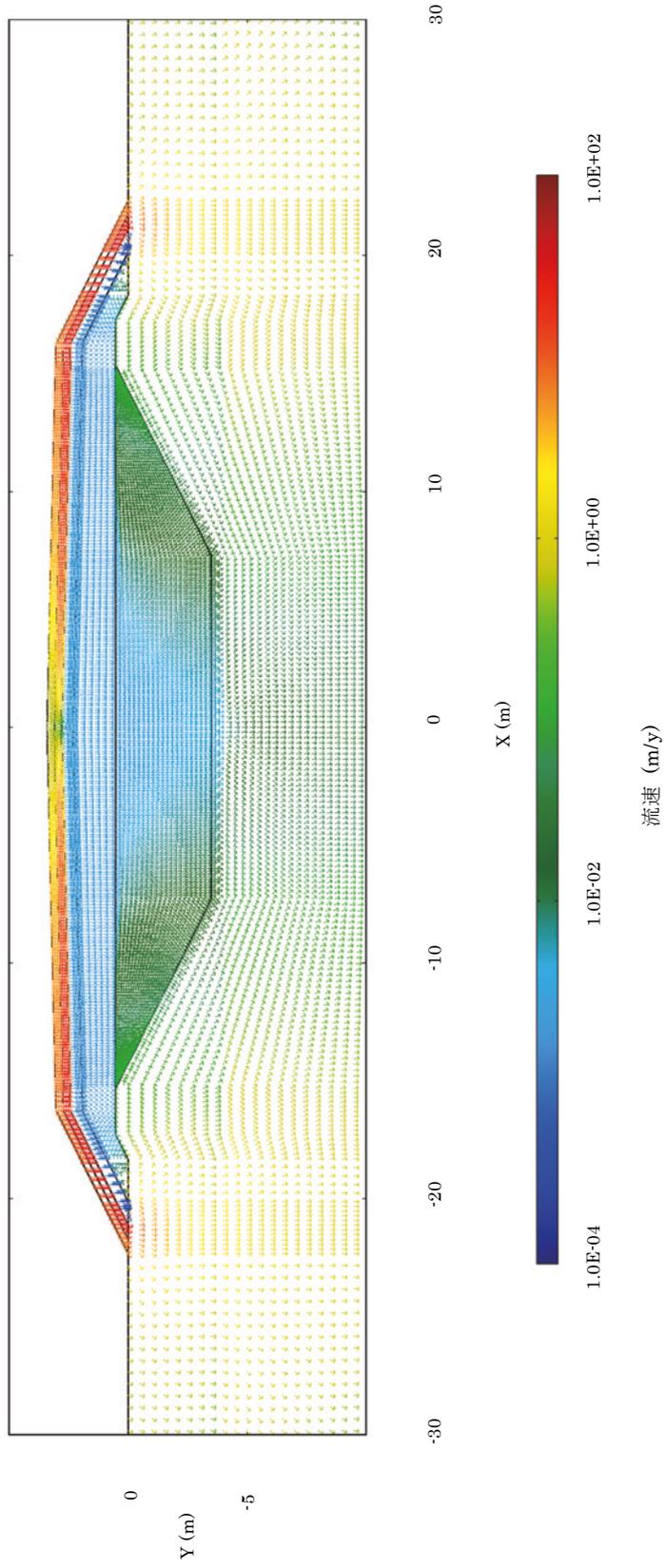


図 6-6 粘土層の厚さ 0.5m、透水係数 $1.0 \times 10^{-9} \text{m/s}$ の場合の流速及びび流方向

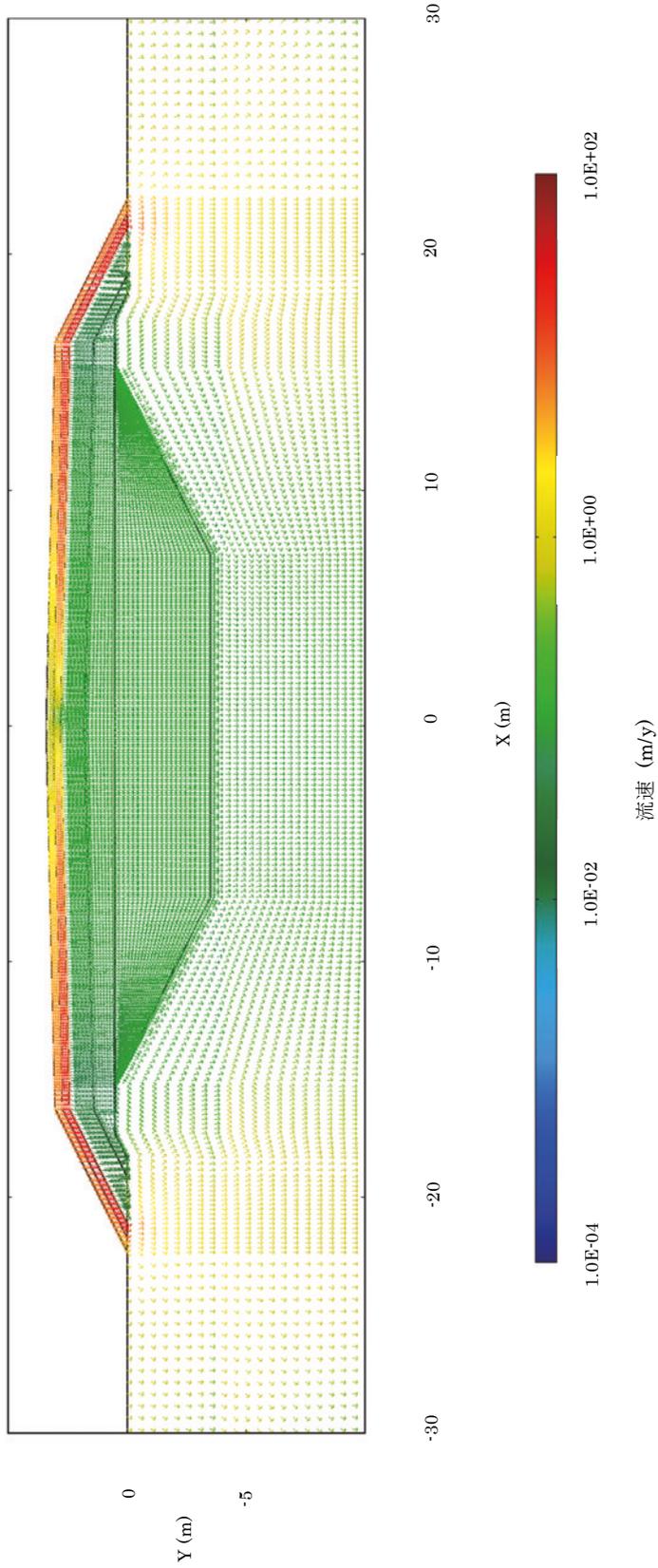


図 6-7 粘土層の厚さ 1.0m、透水係数 $1.0 \times 10^{-7} \text{m/s}$ の場合の流速及び流向

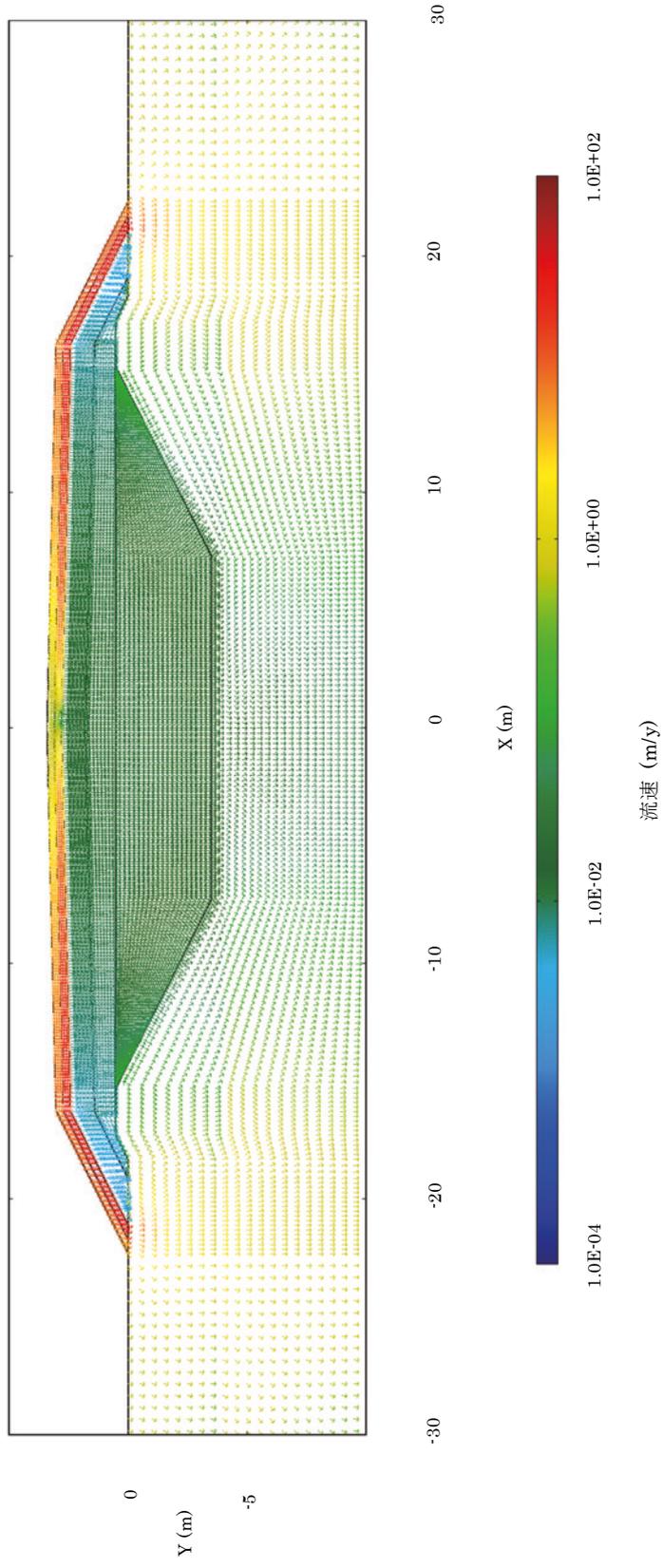


図 6-8 粘土層の厚さ 1.0m、透水係数 $1.0 \times 10^{-8} \text{m/s}$ の場合の流速及びひび流方向

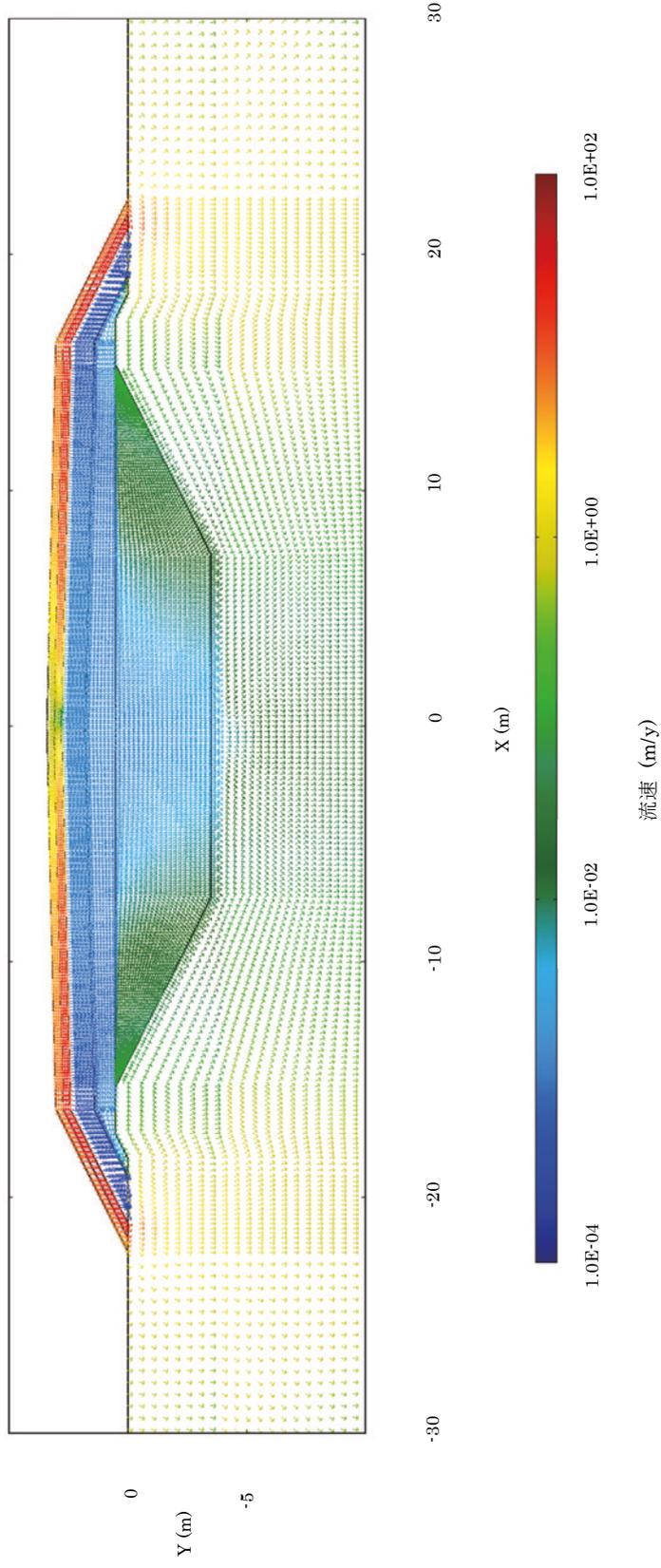


図 6-9 粘土層の厚さ 1.0m、透水係数 1.0×10^{-9} m/s の場合の流速及び流向

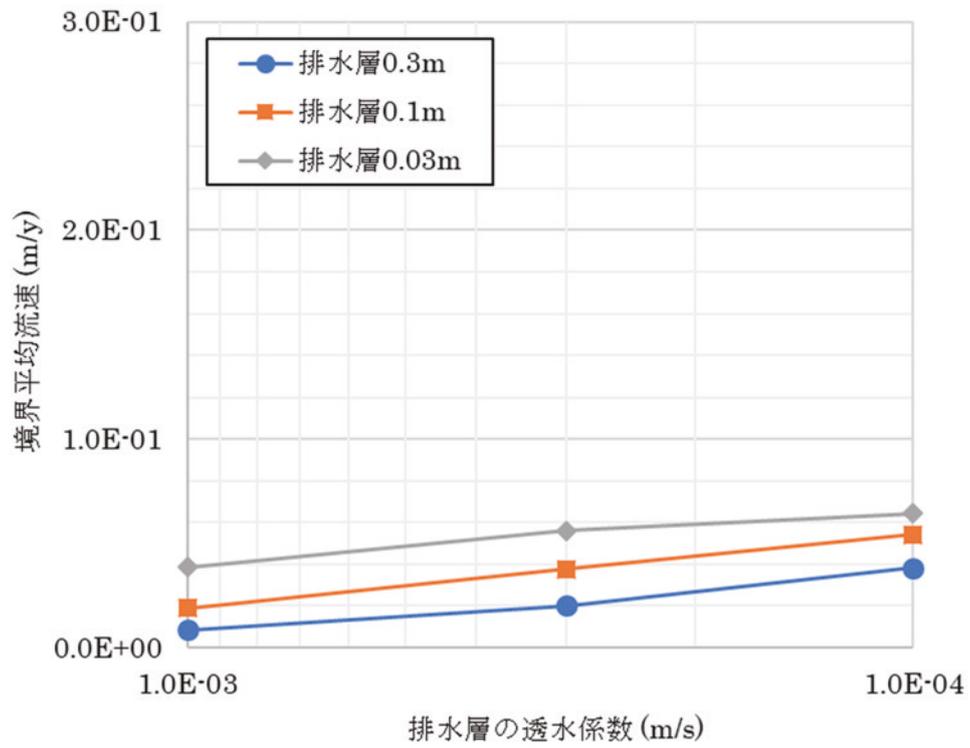


図 6-10 排水層のパラメータスタディにおける境界平均流速

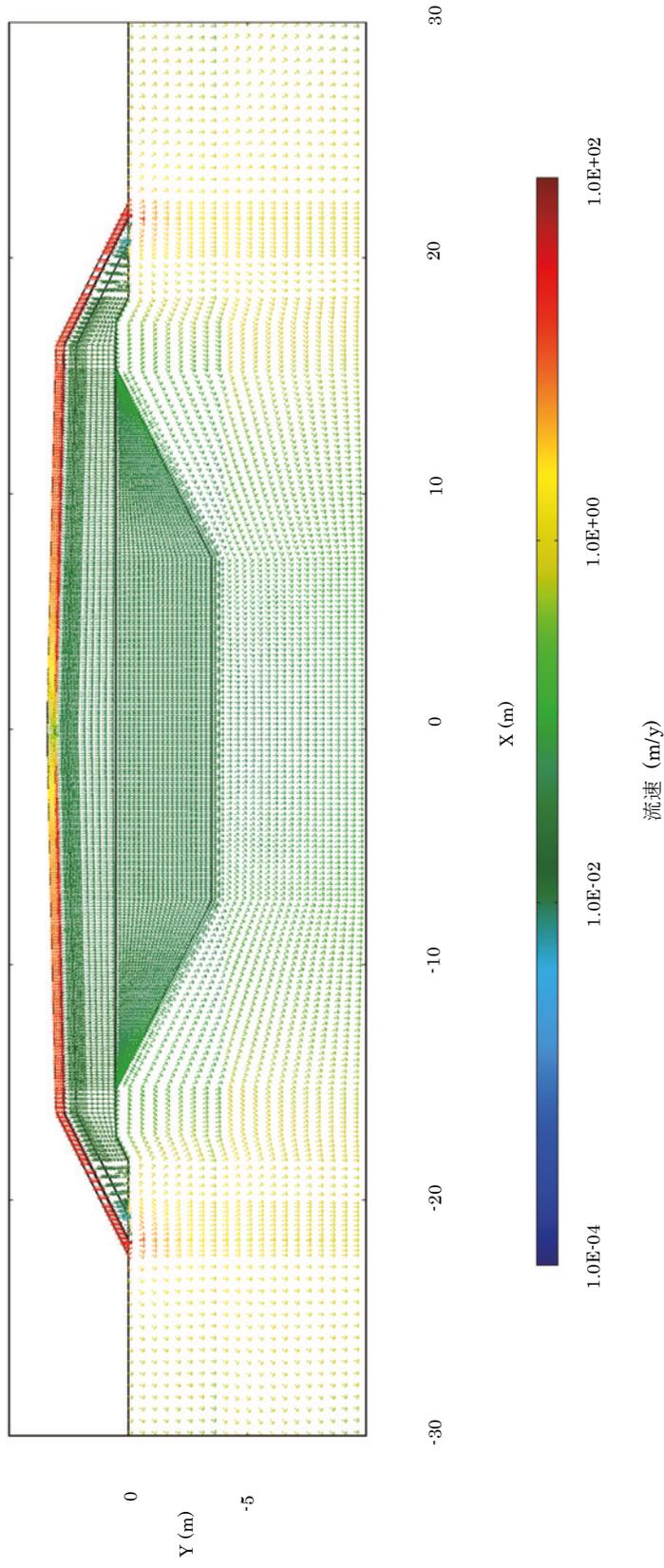


図 6-11 排水層の厚さ 0.03m、透水係数 $1.0 \times 10^{-3} \text{m/s}$ の場合の流速及び流向

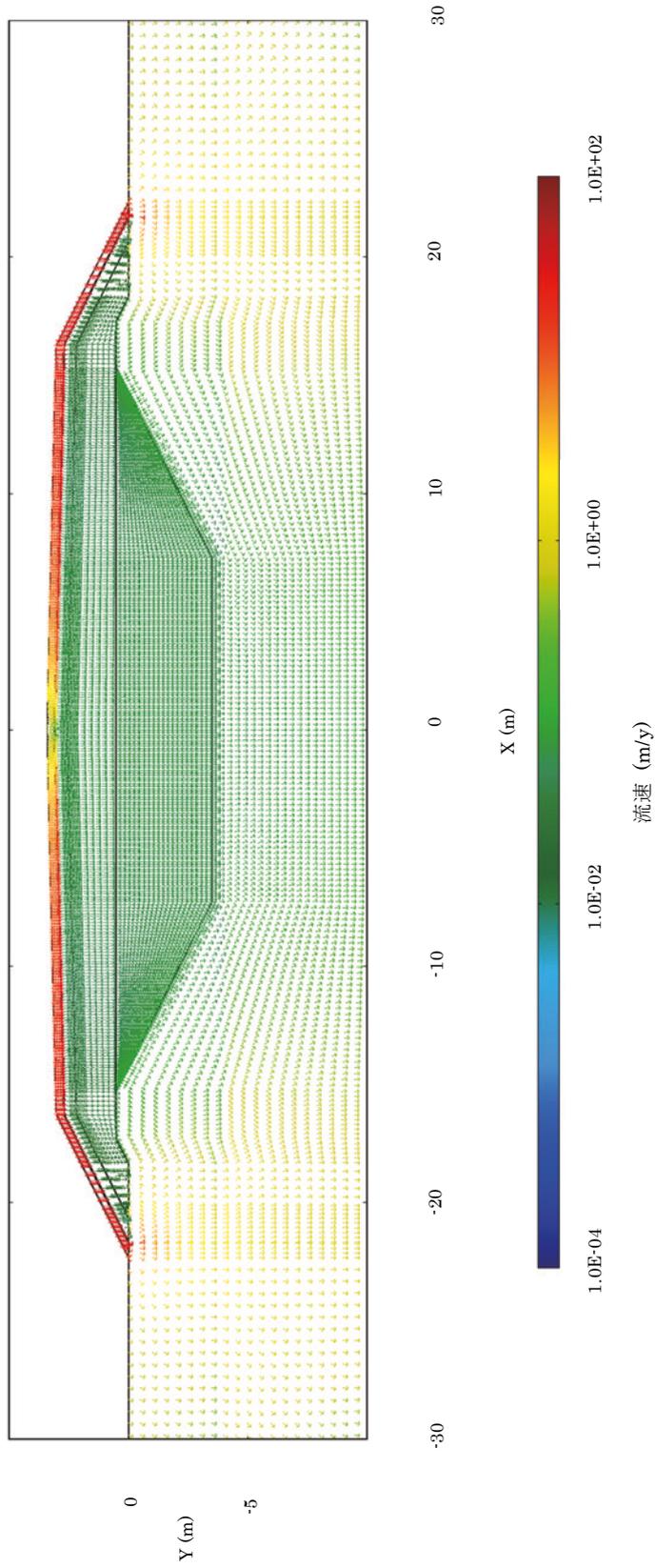


図 6-12 排水層の厚さ 0.03m、透水係数 $3.0 \times 10^{-4} \text{m/s}$ の場合の流速及びび流方向

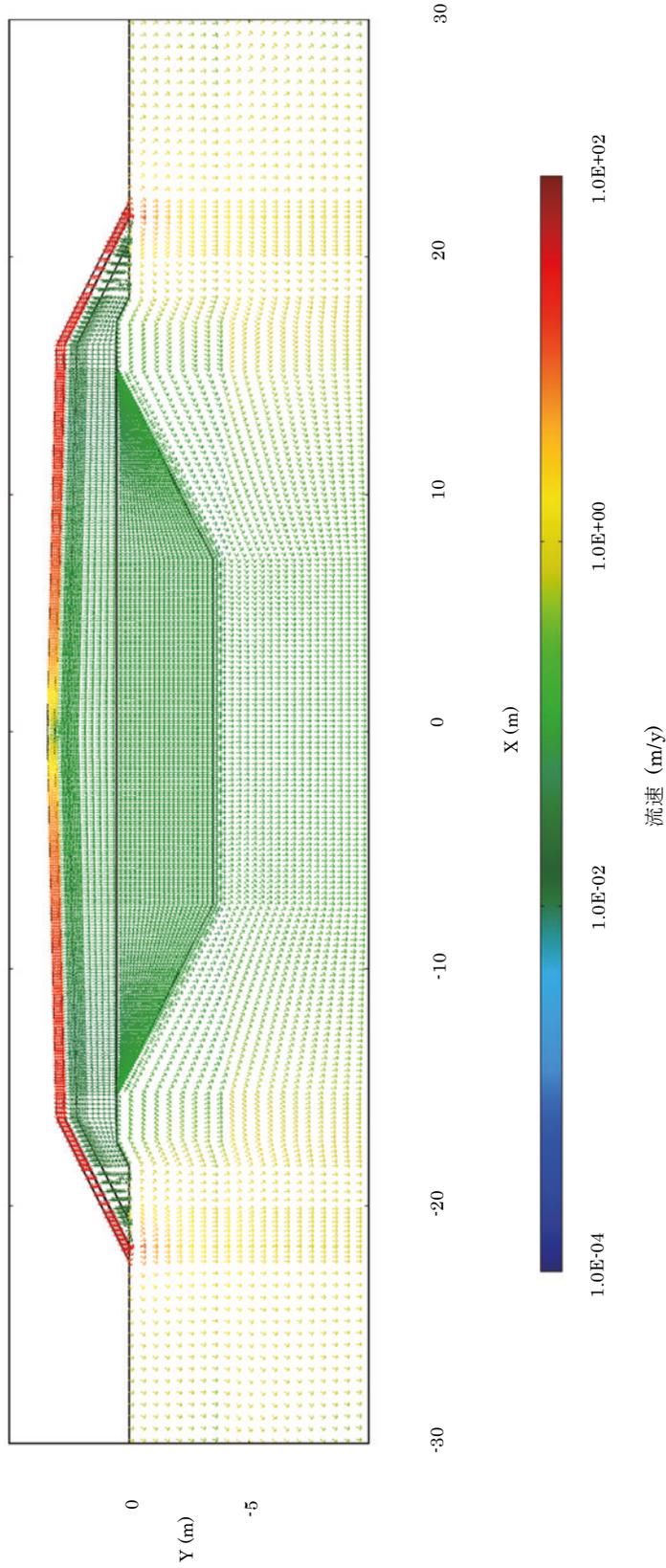


図 6-13 排水層の厚さ 0.03m、透水係数 $1.0 \times 10^{-4} \text{m/s}$ の場合の流速及び流向

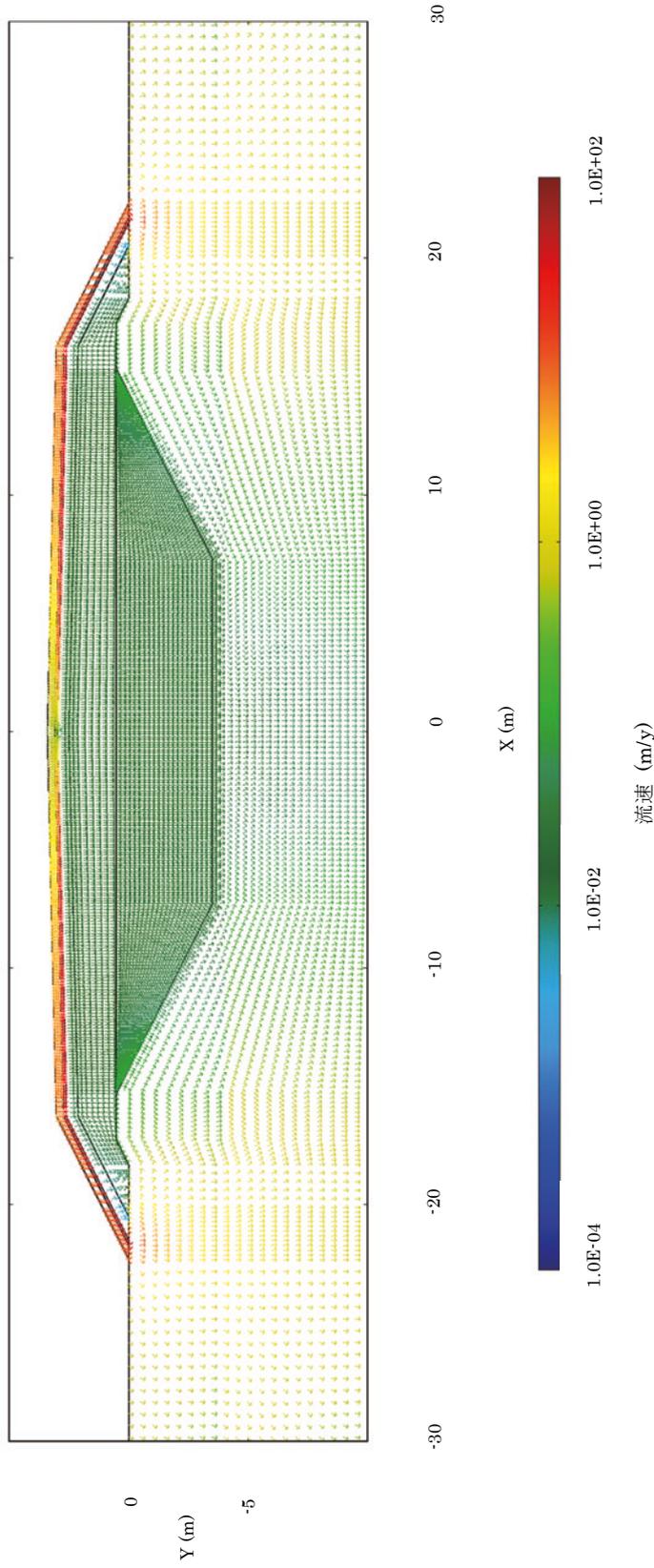


図 6-14 排水層の厚さ 0.1m、透水係数 $1.0 \times 10^{-3} \text{m/s}$ の場合の流速及び流向

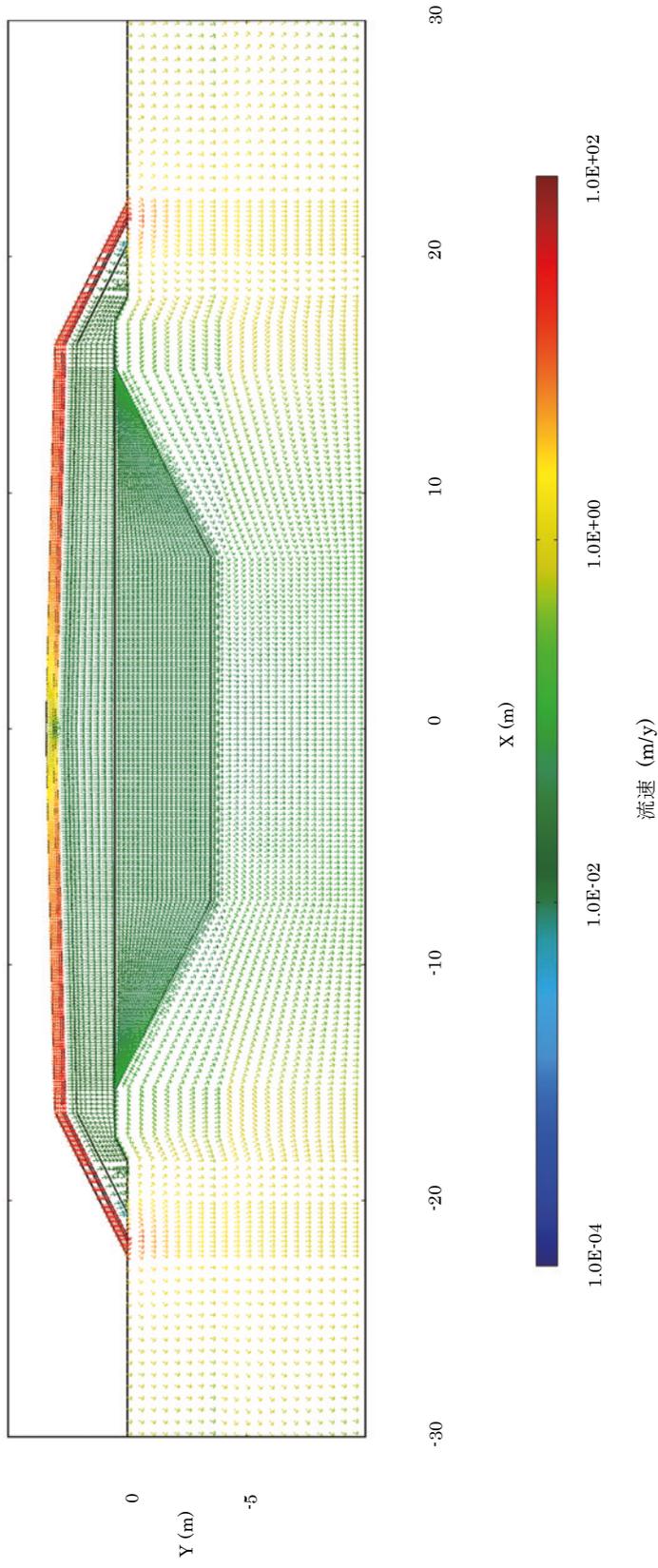


図 6-15 排水層の厚さ 0.1m、透水係数 $3.0 \times 10^{-4} \text{m/s}$ の場合の流速及び流向

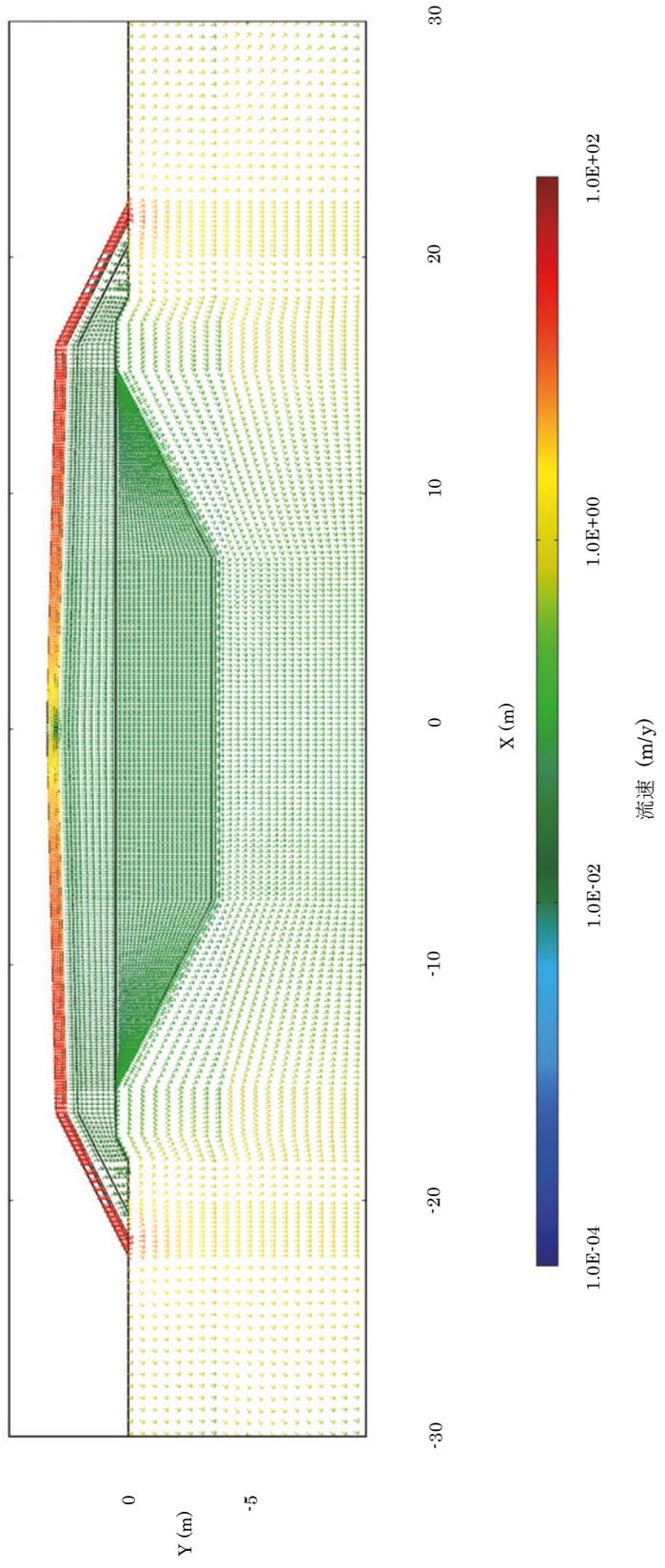


図 6-16 排水層の厚さ 0.1m、透水係数 $1.0 \times 10^{-4} \text{m/s}$ の場合の流速及び流向

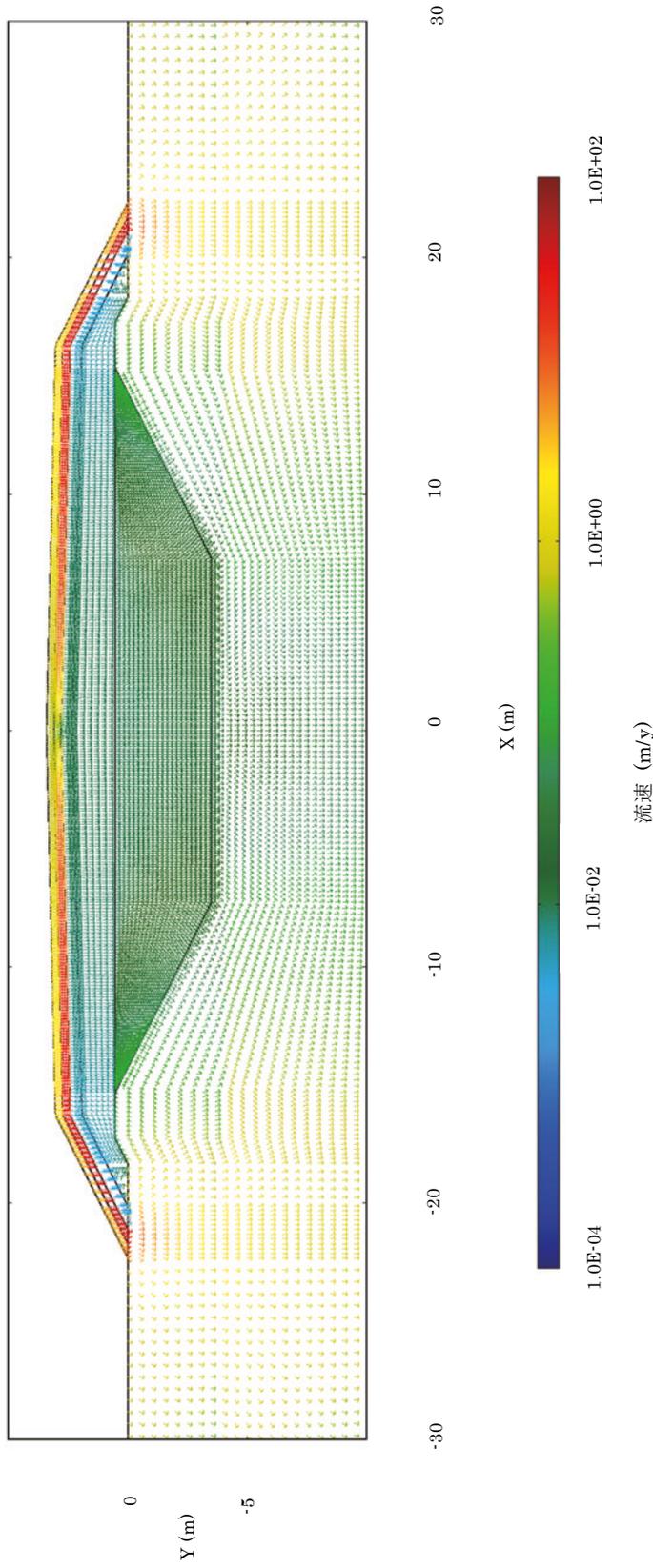


図 6-17 排水層の厚さ 0.3m、透水係数 $1.0 \times 10^{-3} \text{m/s}$ の場合の流速及び流向

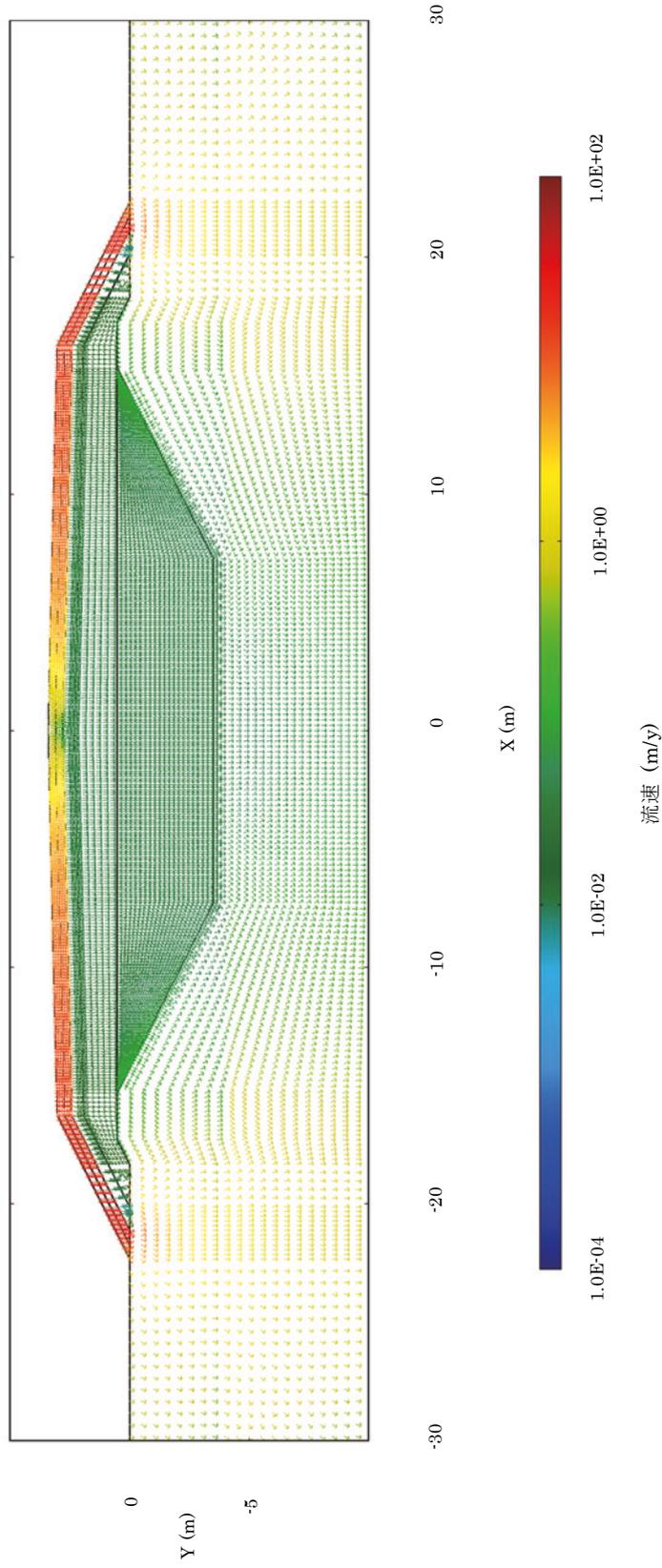


図 6-18 排水層の厚さ 0.3m、透水係数 $1.0 \times 10^{-4} \text{m/s}$ の場合の流速及び流向

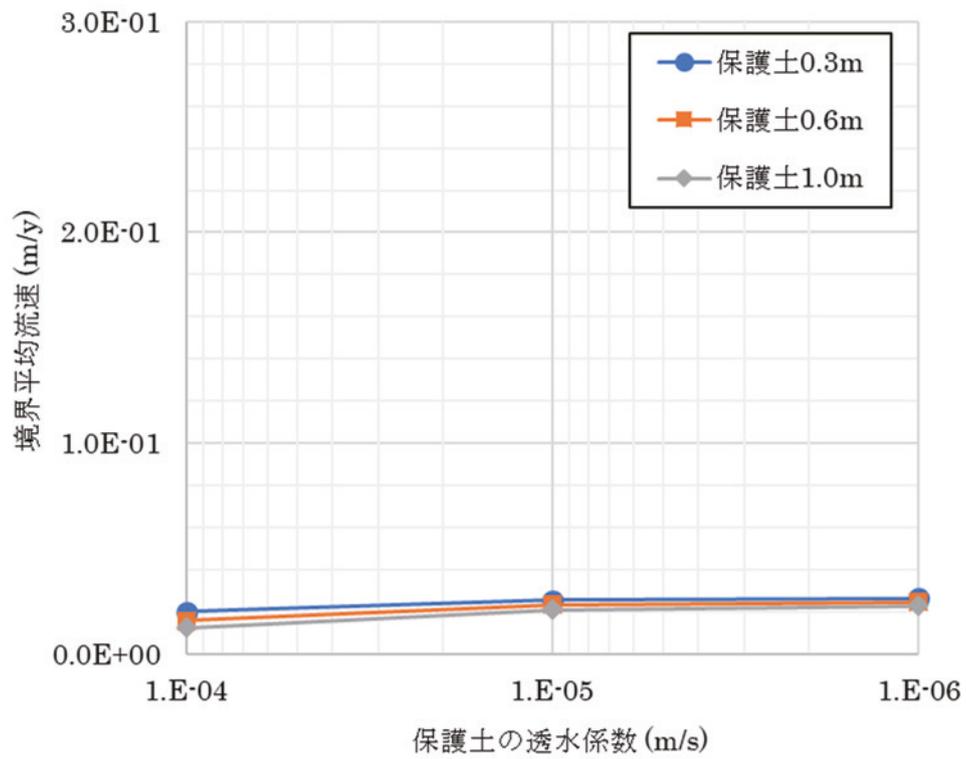


図 6-19 保護土のパラメータスタディにおける境界平均流速

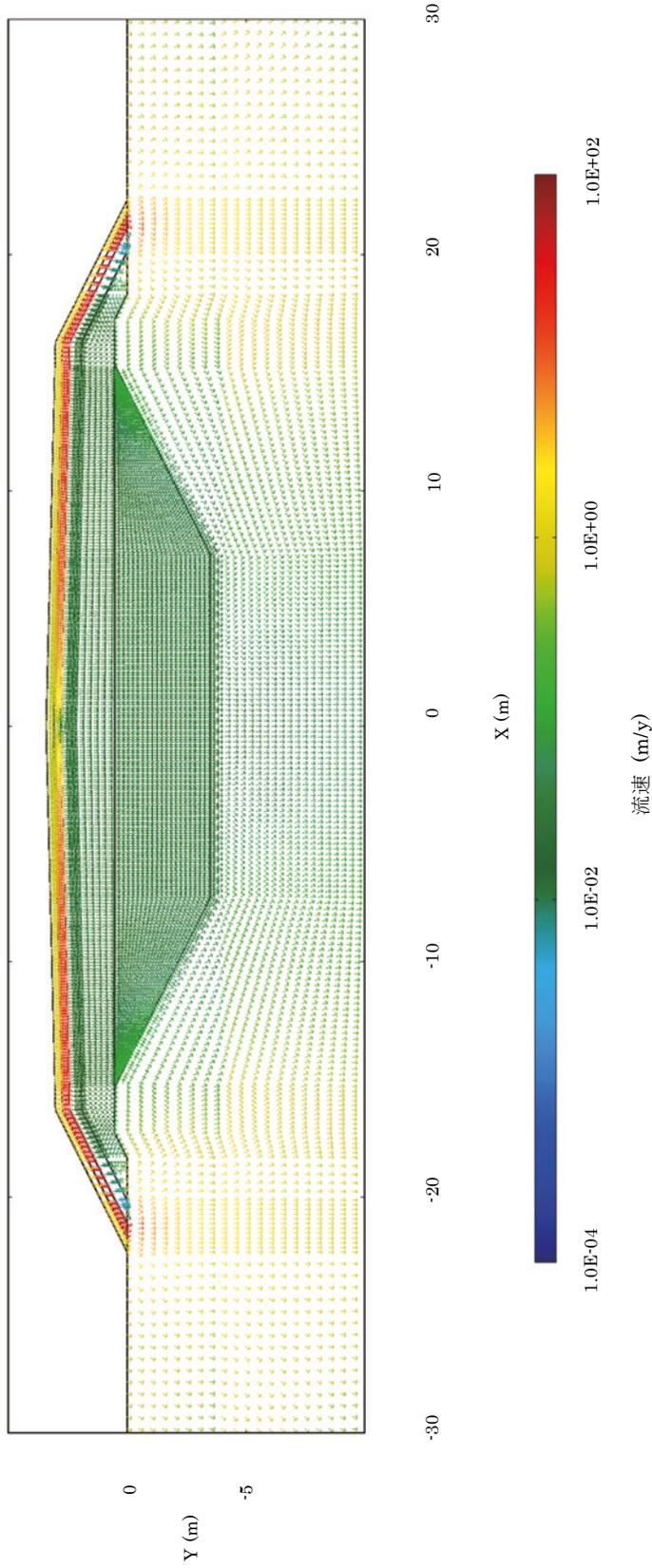


図 6-20 保護土の厚さ 0.3m、透水係数 $1.0 \times 10^{-5} \text{m/s}$ の場合の流速及び流向

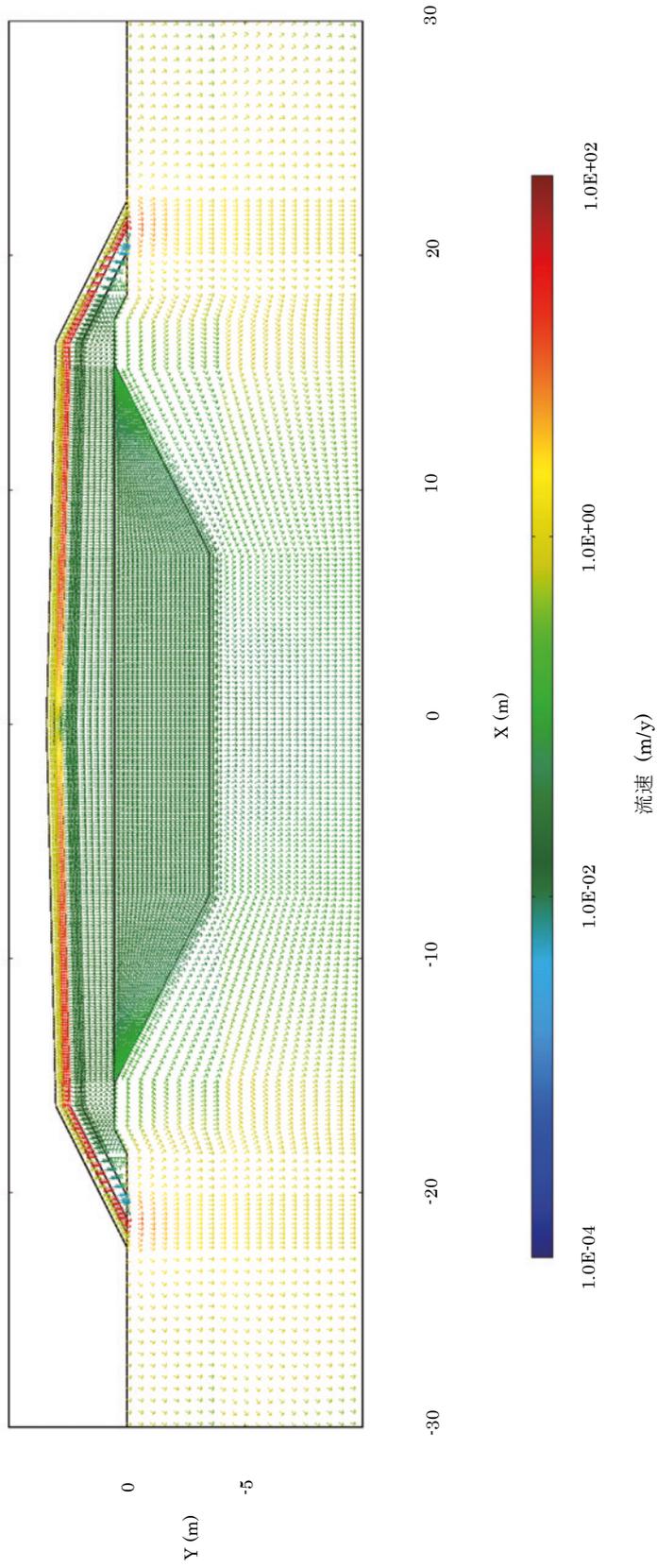


図 6-21 保護土の厚さ 0.3m、透水係数 $1.0 \times 10^{-6} \text{m/s}$ の場合の流速及び流向

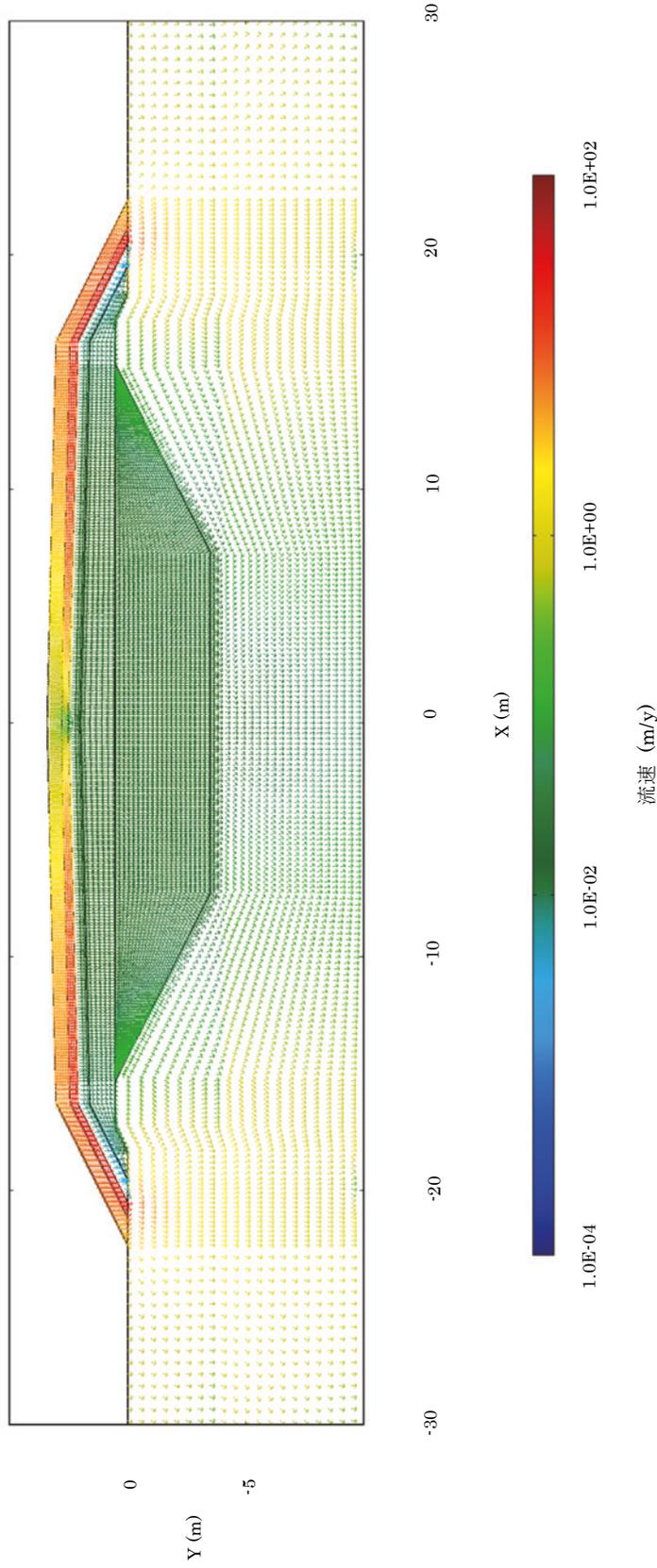


図 6-22 保護土の厚さ 0.6m、透水係数 $1.0 \times 10^{-4} \text{m/s}$ の場合の流速及びび流方向

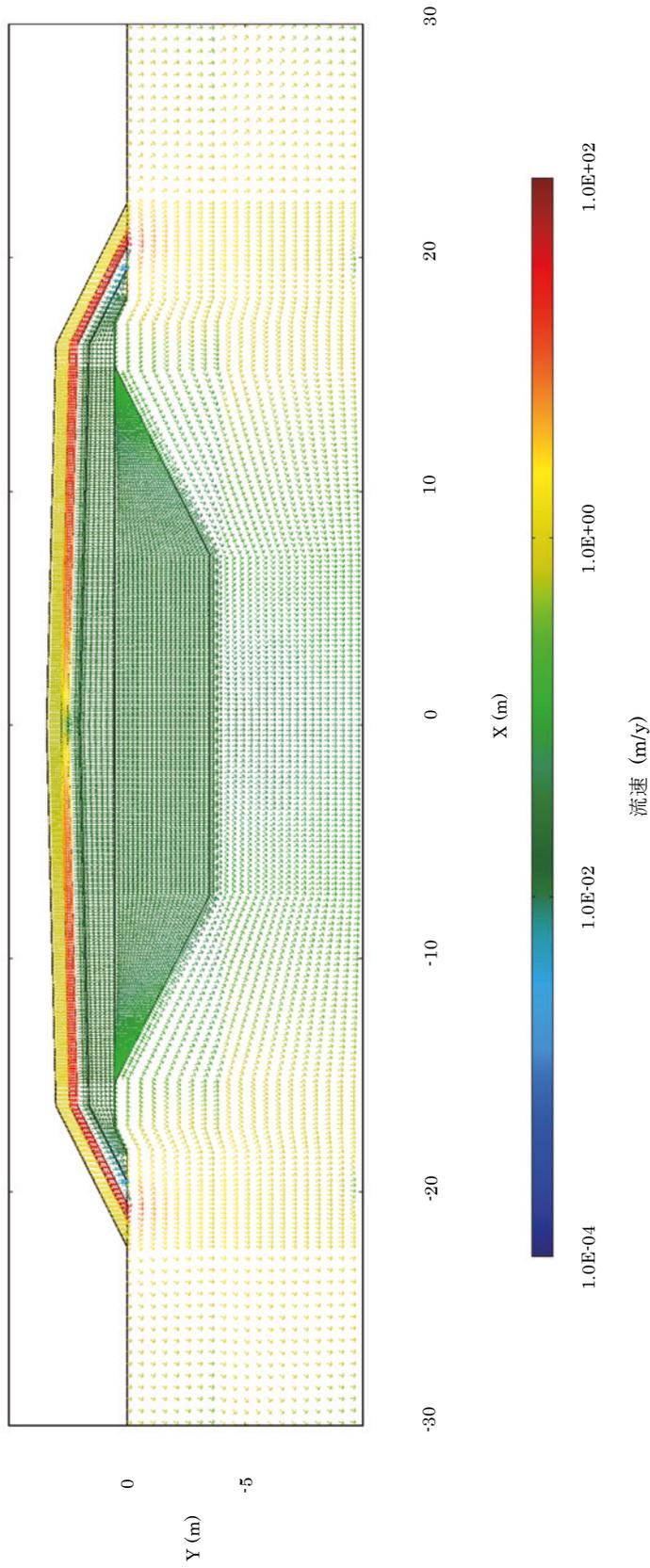


図 6-23 保護土の厚さ 0.6m、透水係数 $1.0 \times 10^{-5} \text{m/s}$ の場合の流速及び流向

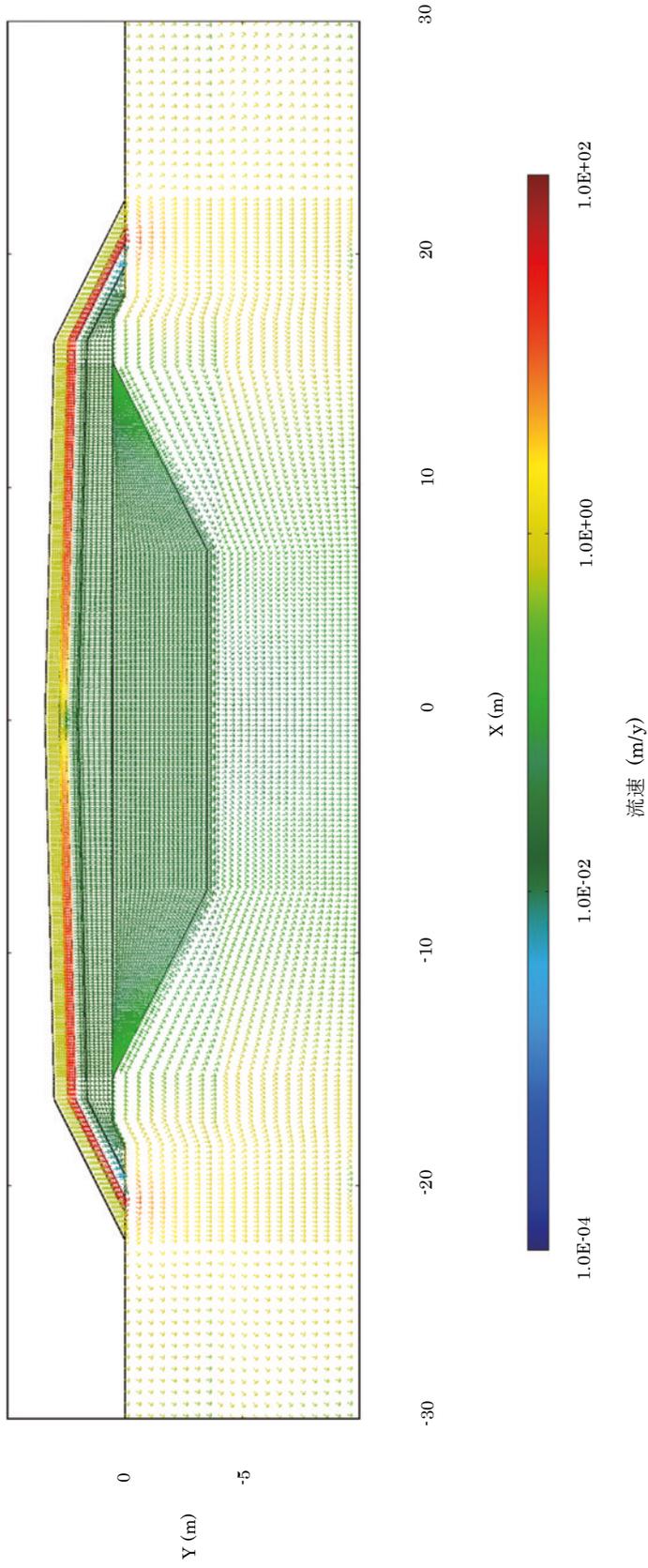


図 6-24 保護土の厚さ 0.6m、透水係数 $1.0 \times 10^{-6} \text{m/s}$ の場合の流速及び流向

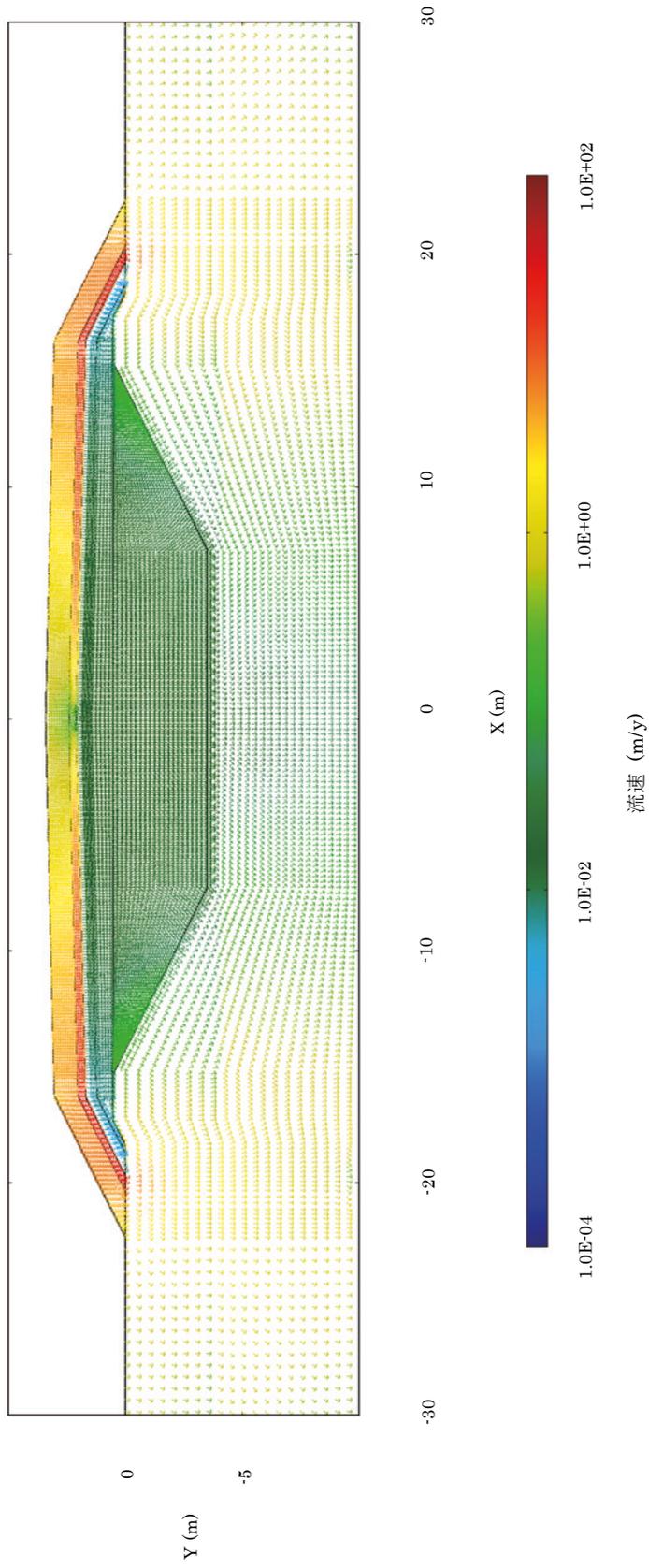


図 6-25 保護土の厚さ 1.0m、透水係数 $1.0 \times 10^{-4} \text{m/s}$ の場合の流速及び流向

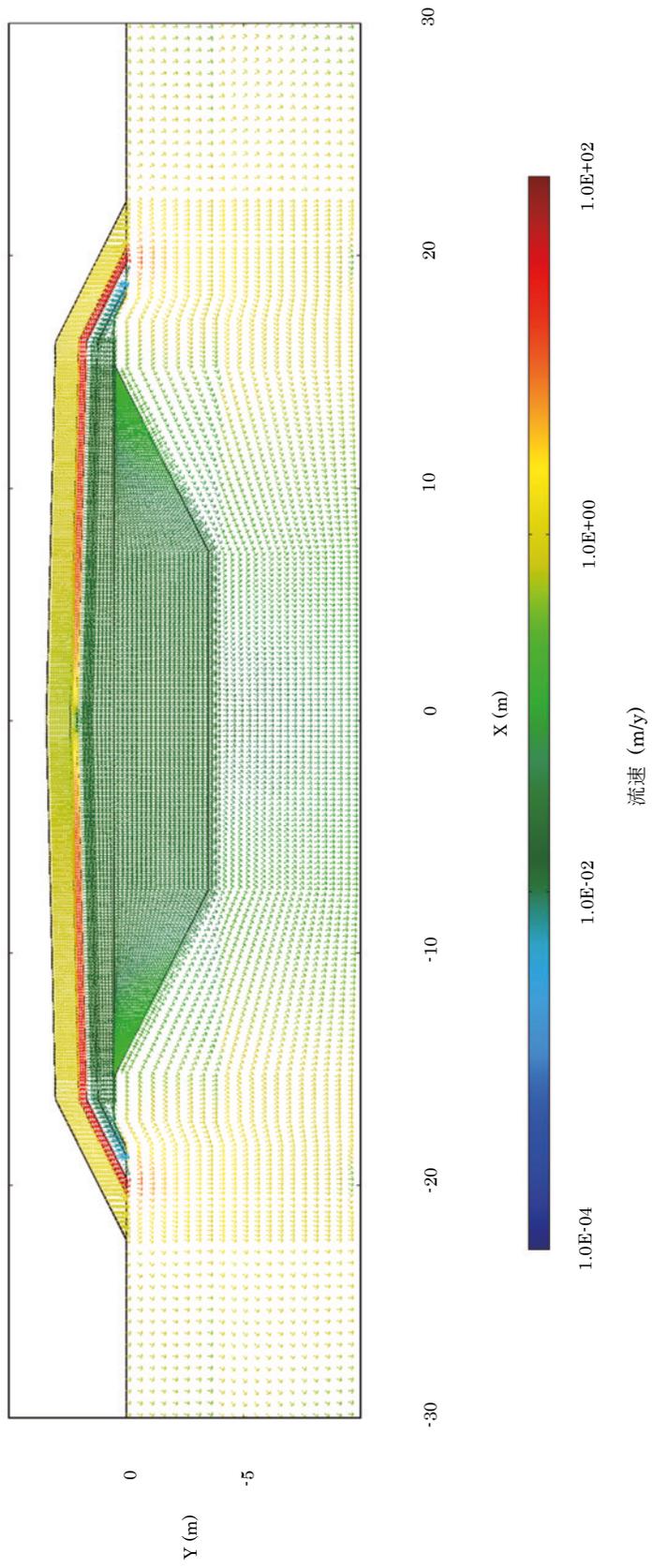


図 6-26 保護土の厚さ 1.0m、透水係数 $1.0 \times 10^{-5} \text{m/s}$ の場合の流速及び流向

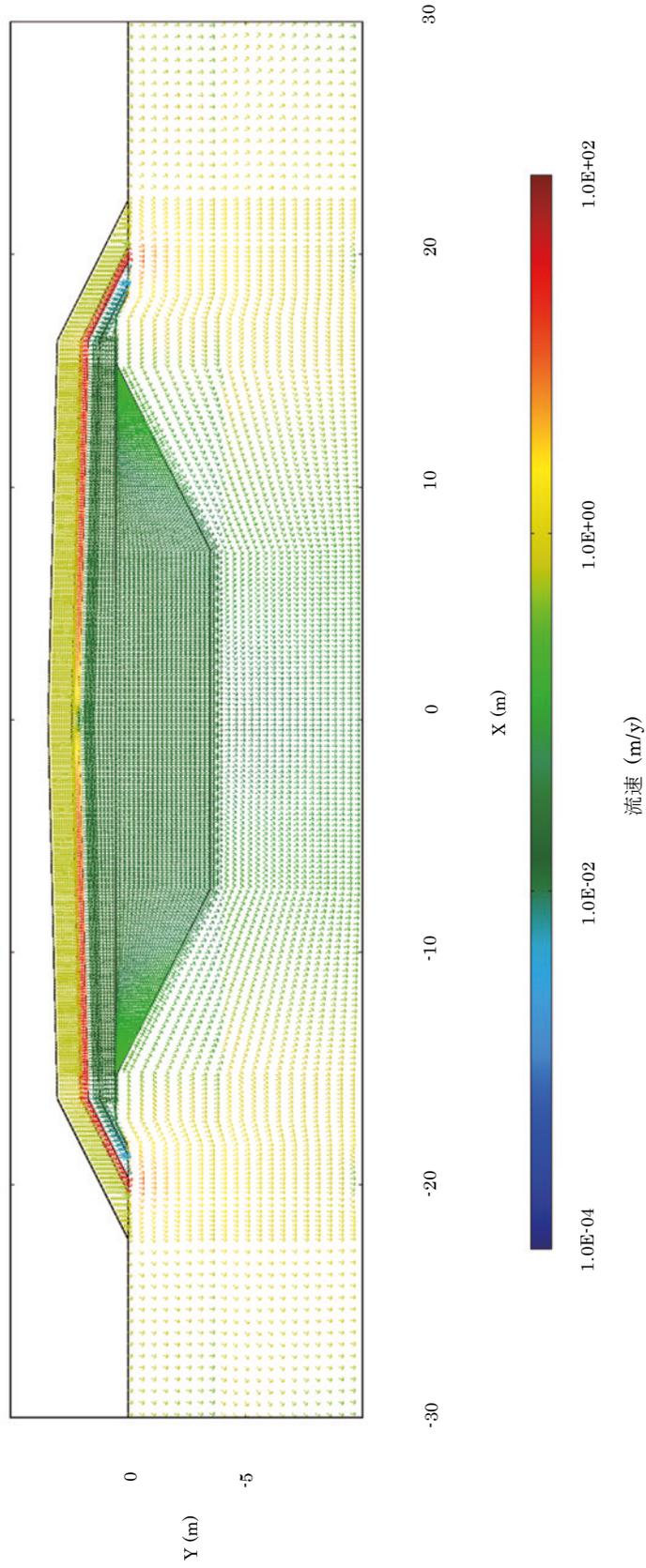


図 6-27 保護土の厚さ 1.0m、透水係数 $1.0 \times 10^{-6} \text{m/s}$ の場合の流速及び流向

謝 辞

本報告書をまとめるにあたり、貴重なご意見をいただきましたバックエンド統括本部埋設事業センター事業計画室 技術副主幹 齋藤龍郎様に心より感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 天澤弘也ほか, 研究施設等廃棄物浅地中処分施設の概念設計, JAEA-Technology 2012-031, 2012, 338p.
- 2) 原子力規制委員会, 第二種廃棄物埋設施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則.
- 3) 黒澤亮平ほか, 研究施設等廃棄物のトレンチ処分施設の上部覆土内への浸透水量の評価, JAEA-Technology 2014-013, 2014, 89p.
- 4) 坂井章浩ほか, 研究施設等廃棄物のトレンチ処分施設における遮水機能の設計検討(共同研究), JAEA-Technology 2016-019, 2016, 134p.
- 5) H. Kimura, The MIG2DF Computer Code User's Manual, JAERI-M 92-115, 1992, 48p.
- 6) 高井静霞ほか, 地下水流動解析コードMIG2DF第2版の開発, JAEA-Data/Code 2020-007, 2020, 174p.
- 7) 齊藤宏ほか, 人形峠鉱山夜次鉱さいたい積場上流側「廃砂たい積場」の跡措置, JAEA-Technology 2015-063, 2016, 119p.
- 8) 日本原子力研究所, (平成10年度科学技術庁委託事業) 極低レベル固体廃棄物合理的処分安全性実証試験報告書 平成11年3月, 1999, 373p.
- 9) 坂井章浩ほか, 浅地中処分施設の周辺環境における予備的な三次元地下水流動解析, JAEA-Technology 2016-032, 2017, 117p.

