

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

Evaluation of Infiltration Water through the Upper Cover Soil
in Trench Type Disposal Facility for Low Level Radioactive Wastes Generated
from Research, Industrial and Medical Facilities

黒澤 亮平 坂井 章浩 仲田 久和 天澤 弘也
坂本 義昭

Ryohei KUROSAWA, Akihiro SAKAI, Hisakazu NAKATA, Hiroya AMAZAWA
and Yoshiaki SAKAMOTO

埋設事業推進センター

Low-level Radioactive Waste Disposal Project Center

June 2014

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは独立行政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。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp>)
より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 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.
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency.
2-4 Shirakata Shirane, 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の上部覆土内への浸透水量の評価

日本原子力研究開発機構 埋設事業推進センター

黒澤 亮平^{*}、坂井 章浩、仲田 久和、天澤 弘也、坂本 義昭

(2014年3月28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充填固化体・均質固化体をトレンチ処分するために廃棄物層を囲むように遮水シートを設置したトレンチ処分施設を設計している。

トレンチ処分施設の安全評価では、廃棄物層を地下水位より上部に設置するため、放射性物質の環境中への流出は、降雨による浸透水が廃棄体層へ浸透することにより生じることが想定される。このため、トレンチ処分施設の被ばく線量評価では、廃棄体層への浸透水量の適切な評価が重要であるとともに、廃棄物処分の安全性を確保するためには、トレンチ処分施設の上部覆土の層構成により浸透水量を抑制することが重要となる。

そこで本報告書では、トレンチ処分施設の上部覆土内に遮水シート又は低透水土壌層を設置した場合における廃棄体層への浸透水量を評価し、その効果について検討を行った。検討にあたっては、浸透水量の評価に必要な気象データを設定するため、国内の任意の地点における日単位の降水量、気温及び日射量データから100年間の疑似気象データを作成した。作成した疑似気象データを用いて、遮水シート及び低透水土壌層等の層構成を設定した上部覆土において、差分法に基づく計算コードにより100年間の日別の表面流出量、蒸発散量、上部覆土内への浸透水量及び廃棄体層への浸透水量を求めた。また、求めた廃棄体層への浸透水量を使用して、トレンチ処分施設から流出した放射性物質による被ばく線量評価を行い、トレンチ処分施設の上部覆土の層構成による被ばく線量への影響についてまとめた。

その結果、上部覆土内に遮水シート又は低透水土壌層を設置することにより、廃棄体層への浸透水量を抑制することができ、トレンチ処分施設の周辺環境における被ばく線量の低減に効果的であることが分かった。また、廃棄物処分の安全性を確保するのに有効であることが示された。

Evaluation of Infiltration Water through the Upper Cover Soil in Trench Type Disposal Facility for
Low Level Radioactive Wastes Generated from Research, Industrial and Medical Facilities

Ryohei KUROSAWA✳, Akihiro SAKAI, Hisakazu NAKATA,
Hiroya AMAZAWA and Yoshiaki SAKAMOTO

Low-level Radioactive Waste Disposal Project Center

Japan Atomic Energy Agency

Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received March 28, 2014)

Japan Atomic Energy Agency is now designing an “additional functions trench disposal facility” in which a geomembrane is installed covering a disposed waste layer consisting of “homogeneous solidified waste” and “filling solidified waste” generated from research, industrial and medical facilities.

In the safety assessment for the trench disposal facilities, outflow of radioactive material to the environment is assumed to be due to the percolating rain water into the waste layer, because the waste layer is established above the groundwater level. Therefore, in dose assessment of trench type disposal facilities, it is important to evaluate how the structure of the upper cover soil layers affects the suppressed amount of water infiltration to the waste layer due to rainfall.

In this report, the amounts of water infiltration to the waste layer of an additional functions trench disposal facility with low-permeability soil in the upper cover soil was evaluated for two scenarios, one with and one without an installed geomembrane. As input data for the evaluation, pseudo-weather conditions were generated by daily precipitation, temperature, and solar radiation for one hundred years at one selected measurement point in Japan. Using the pseudo-weather data as input for a calculation code based on the Finite Difference Method, daily amounts of runoff, evapotranspiration, and water infiltration to the upper cover soil and waste layer for one hundred years were calculated. Subsequently, dose assessment of radioactive materials flowed out from the additional functions trench disposal facility was conducted using the amount of infiltration water.

As a result, by providing a low-permeability soil layer or geomembrane in the upper cover soil, it is possible to suppress the water infiltration into the waste layer, it is effective in reducing the dose in the surrounding environment of trench type disposal facilities it has been found that it is. Also, to be effective in ensuring the safety of trench type disposal facilities has been shown.

Keyword: Near Surface Disposal, Evaluation of Infiltration Water, Upper Soil

✳ Collaborating Engineer

目次

1. はじめに	1
2. 本書の構成	2
3. 付加機能型トレンチ処分施設における浸透水量評価の概要	3
3.1. 浸透水量評価について	3
3.2. HELP コードについて	3
3.3. SYNGEN の評価モデル	4
3.3.1. 降水量	4
3.3.2. 気温及び日射量	5
3.4. HELP の評価モデル	8
3.4.1. 表面流出量	8
3.4.2. 蒸発散量	9
3.4.3. 上部覆土内への浸透水量	10
3.4.4. 廃棄体層内への浸透水量及び横排水量	10
4. 付加機能型トレンチ処分施設における上部覆土内及び廃棄体層への浸透水量の評価	17
4.1. 評価フロー及び評価ケース	17
4.2. 気象データの作成	17
4.2.1. 疑似気象ケース	17
4.2.2. 降水量固定ケース	18
4.2.3. その他の気象データの設定	18
4.3. 浸透水量の評価	18
4.3.1. 土層条件	18
4.3.2. 評価結果	19
5. 浸透水量の気象条件及び上部覆土の表層条件に係るケーススタディ	22
5.1. 評価フロー及び評価ケース	22
5.2. 疑似気象条件の設定	22
5.2.1. 実気象データの入手	22
5.2.2. 疑似気象データの作成結果	22
5.2.3. その他の気象データの設定	22
5.3. 浸透水量の評価	23
5.3.1. 土層条件	23
5.3.2. 評価結果	23
6. 被ばく線量評価	25
6.1. 評価条件	25
6.1.1. 廃棄体層への浸透水量	25
6.1.2. 評価対象核種	25
6.1.3. 評価モデル及びパラメータ	25

6.2. 評価コード	25
6.3. 評価結果	25
7. おわりに	27
謝辞	28
参考文献	29
付録 HELP コードの整備と改良	71

Contents

1. Introduction	1
2. Organization of document	2
3. Outline of evaluation of infiltration water	3
3.1. Evaluation of infiltration water	3
3.2. HELP code	3
3.3. Evaluation model of SYNGEN	4
3.3.1. Precipitation	4
3.3.2. Temperature and solar radiation	5
3.4. Evaluation model of HELP	8
3.4.1. Runoff	8
3.4.2. Evapotranspiration	9
3.4.3. Infiltration water to the upper cover soil	10
3.4.4. Infiltration water and horizontal drainage	10
4. Evaluation of permeability function in the upper cover soil in the addition function in trench type disposal facility	17
4.1. Evaluation flow and evaluation case	17
4.2. Creation of weather data	17
4.2.1. Pseudo-weather case	17
4.2.2. Constant precipitation case	18
4.2.3. Other weather conditions	18
4.3. Evaluation of infiltration water	18
4.3.1. Soil layer conditions	18
4.3.2. Result	19
5. Case study of the surface layer conditions of the upper cover soil and weather conditions related to infiltration water	22
5.1. Assessment flow and case evaluation	22
5.2. Conditions to create pseudo-weather data	22
5.2.1. Sourcing of real weather data	22
5.2.2. Resulting pseudo-weather data	22
5.2.3. Other weather conditions	22
5.3. Evaluation of infiltration water	23
5.3.1. Soil layer conditions	23
5.3.2. Result	23
6. Evaluation of dose	25
6.1. Evaluation conditions	25
6.1.1. Infiltration water into the waste layer	25

6.1.2. Evaluated nuclide	25
6.1.3. Parameters and model	25
6.2. Computer code used for evaluation	25
6.3. Result	25
7. Conclusion	27
Acknowledgements	28
References	29
Appendix Improvement and improvement of code HELP	71

図表リスト

表 3-1	SYNGEN の入力パラメータとなる実気象データから作成した統計情報	31
表 3-2	HELP における土層のセグメント分割方法	31
表 3-3	処分施設の植生状態における回帰定数	32
表 3-4	HELP における層の透水係数の区分	32
表 3-5	湿潤面積または界面流の半径を求める場合に使用する x、y、z の係数	32
表 4-1	土壌パラメータの感度解析ケース表	33
表 4-2	A 地点の実気象データと疑似気象データの比較	33
表 4-3	A 地点のその他の気象データ	33
表 4-4	土壌パラメータ（基本ケース）	34
表 4-5	トレンチ処分施設の環境状態（基本ケース）	35
表 4-6	感度解析を実施する土壌パラメータ	35
表 4-7	疑似気象ケースの評価結果	36
表 4-8	降水量固定ケースの評価結果	37
表 4-9	実気象ケースの評価結果	38
表 5-1	種々の環境条件の感度解析ケース表	39
表 5-2	各地点の実気象データと疑似気象データの比較	40
表 5-3	各地点のその他の気象データ	40
表 5-4	感度解析を実施するトレンチ処分施設の環境状態	40
表 5-5	A 地点：種々の環境条件の感度解析結果	41
表 5-6	B 地点：種々の環境条件の感度解析結果	42
表 5-7	C 地点：種々の環境条件の感度解析結果	43
表 6-1	廃棄体層への浸透水量	44
表 6-2	概念設計で設定された核種と放射能インベントリ	44
表 6-3	被ばく線量評価に使用した評価パラメータ	45
表 6-4	元素依存パラメータ：トレンチ施設、帯水層土壌の分配係数	46
表 6-5	核種依存パラメータ：内部被ばく線量換算係数	47
表 6-6	環境影響中（河川水飲用）の管理期間（50 年）終了後の最大被ばく線量	47
図 3-1	浸透水量評価のフロー図	48
図 3-2	HELP コードの概念図	49
図 3-3	HELP コードの構造	50
図 3-4	日射量を残差へ帰着させる方法	51
図 3-5	遮水シートに傷のある場合の界面流による漏洩の概念図	52
図 4-1	土層構成	53
図 4-2	土層パラメータの感度解析における評価フロー	54
図 4-3	A 地点の実気象データ（年降水量、年平均気温及び年平均日射量）	55

図 4-4	疑似気象ケース：SYNGEN で作成した A 地点の疑似気象データ（年水量、年平均気温及び年平均日射量）	55
図 4-5	A 地点：実気象と疑似気象の降水量データの比較	56
図 4-6	A 地点：実気象と疑似気象の気温データの比較	56
図 4-7	A 地点：実気象と疑似気象の日射量データ比較	57
図 4-8	降水量固定ケースの気象データ（年水量、年平均気温及び年平均日射量）	57
図 4-9	疑似気象ケースの評価結果	58
図 4-10	降水量固定ケースの評価結果	58
図 4-11	疑似気象ケースと降水量固定係数における日別の浸透水量の比較（Model2：粘土層の透水係数=1×10 ⁻⁸ m/sec）	59
図 4-12	実気象ケースの評価結果	59
図 4-13	疑似気象ケースと実気象ケースにおける月別の平均蒸発散量の比較	60
図 5-1	種々の環境条件の感度解析における評価フロー	61
図 5-2	B 地点の実気象データ（年降水量、年間平均気温及び年間平均日射量）	62
図 5-3	C 地点の実気象データ（年降水量、年間平均気温及び年間平均日射量）	62
図 5-4	SYNGEN で作成した B 地点の疑似気象データ（年降水量、年間平均気温及び年間平均日射量）	63
図 5-5	SYNGEN で作成した C 地点の疑似気象データ（年降水量、年間平均気温及び年間平均日射量）	63
図 5-6	B 地点（日本平均年間降水量地点）の降水量データ	64
図 5-7	B 地点（日本平均年間降水量地点）の気温データ	64
図 5-8	B 地点（日本平均年間降水量地点）の日射量データ	65
図 5-9	C 地点（日本最大年間降雨量地点）の降水量データ	65
図 5-10	C 地点（日本最大年間降雨量地点）の気温データ	66
図 5-11	C 地点（日本最大年間降雨量地点）の日射量データ	66
図 5-12	A 地点：年間平均降水量に対しての各水量の割合	67
図 5-13	B 地点：年間平均降水量に対しての各水量の割合	67
図 5-14	C 地点：年間平均降水量に対しての各水量の割合	68
図 5-15	葉面積指数 1：各地点における蒸発ゾーン深さ別の年間平均降水量と年間平均浸透水量	68
図 5-16	葉面積指数 2.5：各地点における蒸発ゾーン深さ別の年間平均降水量と年間平均浸透水量	69
図 5-17	葉面積指数 5：各地点における蒸発ゾーン深さ別の年間平均降水量と年間平均浸透水量	69
図 6-1	被ばく線量評価の概念図	70
図 6-2	環境影響中（河川水飲用）の被ばく線量の経時変化	70

1. はじめに

(独)日本原子力研究開発機構(以下、「原子力機構」という)埋設事業推進センターでは、改正独立行政法人日本原子力研究開発機構法(平成20年法律第51号)に基づき、原子力機構及び国内の研究施設などから発生する低レベルの放射性廃棄物(研究施設等廃棄物)の浅地中埋設処分を計画している。浅地中埋設処分形態として、地下水位より上に設置するトレンチ処分施設と地下水位より深く透水性の低い岩盤中に設置するコンクリートピット処分施設を検討している。

研究施設等廃棄物の浅地中処分施設の概念設計¹⁾(以下、「概念設計」という)では、コンクリート、金属などの安定五品目に相当する廃棄物を処分するトレンチ処分施設と安定五品目以外の廃棄物(主に充填固化体又は均質固化体)を処分する付加機能型トレンチ処分施設を設計した。付加機能型トレンチ処分施設は産業廃棄物の管理型処分場と同じく廃棄体層の底部及び側部に遮水シートを設置するとともに、廃棄体層からの浸出液の処理量を低減させるため、廃棄体層の上部にも遮水シートを設置する構造とした。

トレンチ処分施設からの放射性物質の環境中への流出は、降雨からの浸透水が廃棄体層へ浸透し廃棄物と接触することに起因して生じる。そのため、トレンチ処分施設の上部覆土内の層構成を設定して、廃棄体層への浸透水量を評価し、抑制することが安全評価上重要となる。

概念設計で実施した管理期間終了後の安全評価において、付加機能型トレンチ処分施設の廃棄体層への浸透水量は、遮水シートによる降雨の遮水機能を考慮せず、地下水ハンドブック²⁾に示された我が国の平均的な浸透水量の値を使用した。実際には、立地場所の降雨量、覆土及び遮水シートの透水性により、浸透水量は制限されるため、それらの条件を考慮して付加機能型トレンチ処分施設の廃棄体層への浸透水量を評価しておくことが必要と考えられる。

以上から、国内の降雨量、日射量及び気温の気象条件を用いて、蒸発散量及び表面流出量を除いたトレンチ処分施設の上部覆土内への浸透水量を評価した。更に付加機能型トレンチ処分施設の低透水土壤層と排水層を備えた上部覆土内を移行して廃棄体層に至る浸透水量の評価を実施した。上部覆土及び廃棄体層への浸透水量の評価にあたっては、米国の Risk Reduction Engineering Laboratory で開発された計算コード The Hydrologic Evaluation of Landfill Performance model³⁾(以下、「HELP コード」という)を使用した。また、HELP コードで求めた浸透水量を入力条件と使用して線量評価を行った。線量評価では、概念設計と同様にトレンチ処分施設から流出した放射性物質が土壤中へ移行し河川へ流入するモデルを想定し、放射性物質が流入した河川水の飲用による線量を評価した。

2. 本書の構成

トレンチ処分施設の安全評価では、降雨からの浸透水が廃棄体層へ浸透し、廃棄物と接触すること起因して放射性物質の環境中への流出が生じる。そのため、トレンチ処分施設の上部覆土内の層構成を設定して、廃棄体層への浸透水量を評価し、抑制することが安全評価上重要となる。

概念設計の安全評価では、付加機能型トレンチ処分施設における廃棄体層の浸透水量を上部覆土及び遮水シートの透水性を考慮しないで、日本の平均地下水流出量²⁾(年間400mm)を設定したが、遮水シート等の透水性を考慮するとその値とは異なると考えられる。そのため、本評価ではHELPコードを使用し、国内の気象データ(降雨、日射量、気温)を用い、地表面の植生の効果等による蒸発散量や地表面の流出量を計算して、付加機能型トレンチ処分施設上部覆土内への浸透水量を計算した。次に、上部覆土内に低透水土壤層、排水層、遮水シート層等を設定し、それぞれの層における浸透水の移行を計算して、廃棄体層への浸透水量を評価した。また、求めた廃棄体層への浸透水量を線量評価のパラメータとして使用し、付加機能型トレンチ処分施設から流出した放射性物質が河川へ流入し、その河川水を飲用するシナリオの線量を評価した。

本書の構成は、以下の通りである。

① 付加機能型トレンチ処分施設における浸透水量評価の概要(第3章)

国内の降水量、日射量、気温の気象データ及び地表面の植生等の条件を用いたトレンチ処分施設における降雨による上部覆土内への浸透水量の評価モデルを示す。次に上部覆土内に低透水土壤層、排水層、遮水シート層等を設定し、それらの層中を通過して廃棄体層へ移行する浸透水量の評価モデルについて示す。また、これらの評価に使用したHELPコードの評価モデルについて示す。

② 付加機能型トレンチ処分施設における上部覆土内及び廃棄体層への浸透水量の評価(第4章)

国内の気象データを用い、地表面の植生等の条件を設定して、トレンチ処分施設における上部覆土内への浸透水量の評価について示す。また、上部覆土に低透水土壤層、排水層、遮水シート層等を設定し、それらの層中を通過して廃棄体層へ移行する浸透水量の評価について示す。

③ 浸透水量の気象条件及び上部覆土の表層条件に係るケーススタディ(第5章)

気象条件及び地表面の植生等の条件を変化させたときの、トレンチ処分施設における上部覆土内及び廃棄体層への浸透水量の変化を評価した結果について示す。

④ 被ばく線量評価(第6章)

②で評価した廃棄体層への浸透水量を入力条件とし、トレンチ処分施設から流出した放射性物質が河川へ流入し、その河川水の飲用シナリオの線量評価について示す。

3. 付加機能型トレンチ処分施設における浸透水量評価の概要

本章では浸透水量評価モデルの概要について示す。また、評価に使用する HELP コードの概要及び評価モデルについても示す。

3.1. 浸透水量評価について

本評価における浸透水量評価のフロー図を図 3-1 に、概念図を図 3-2 に示す。図 3-2 に示すように、本評価の手順は以下のとおりである。

- (1) 浸透水量評価の気象条件として設定する疑似気象データを作成する。疑似気象データとは、日単位の降水量、気温及び日射量の特定の期間における実データから、計算を行う年数における日単位のデータを擬似的に生成するものである。
- (2) 上部覆土内への浸透水量を評価する。評価のために設定するパラメータは、表面流出量・蒸発散量を計算する際に使用する処分施設の植生状態を示す葉面積指数及び土中からの蒸発を考慮する深さを示す蒸発ゾーン深さである。これらのパラメータと降雨量、日射量、気温の気象データから、「蒸発散量」と地表面における「表面流出量」及び「上部覆土内への浸透水量」が計算される。
- (3) 廃棄体層への浸透水量の計算のために上部覆土内の各層のレイヤタイプ、層厚さ及び透水係数等のパラメータを設定し、「排水層における横排水量」、「廃棄体層への浸透水量」を計算する。

上記(2)及び(3)における「蒸発散量」、「表面流出量」、「上部覆土内への浸透水量」、「排水層における横排水量」及び「廃棄体層への浸透水量」の値は、それぞれのパラメータを設定することにより、1回の計算で全て算出される。

疑似気象データの作成は、HELP コードに付属している SYNthetic weather GENerator (以下、「SYNGEN」という)を使用した。SYNGEN は、実気象データをガンマ分布及びフリーエ級数により関数化して日単位の降水量、気温及び日射量である疑似気象データを作成するプログラムである。作成した疑似気象データは、HELP の気象条件として使用することにより、土層条件の設定と合わせて表面流出量、蒸発散量及び土壌への浸透水量を長期間に渡って評価を行う際に利用される。

3.2. HELP コードについて

HELP コードは、Risk Reduction Engineering Laboratory で開発されたコードであり、米国の Waste Control Specialists 社の低レベル放射性廃棄物の浅地中処分に対する許可申請⁴⁾で、廃棄体層への浸透水量の評価に使用されている実績がある。HELP コードは、US Army Corps of Engineers の Environmental Laboratory⁵⁾において公開されている HELP Version 3.07 を使用した。HELP コードは米国の気象・地質環境を基に開発されたコードであり、デフォルトの気象データ及び入出力単位等は米国仕様となっている。このため、日本の Microsoft Windows7 及び 8 のコンピューターで動作するようにし、かつ、日本の気象データを入力できるように整備・改良を行い、本評価で使用した。HELP コードの整備・改良については付録に示す。

HELP コードの構造を図 3-3 に示す。HELP コードは、日単位の実気象データから算出した表 3-1 に示す統計情報を基にガンマ分布及びフーリエ級数より関数化して日単位の降水量、気温及び日射量の疑似気象データを作成し、HELP の気象入力ファイルを生成する SYNGEN と、気象条件及び土層条件の設定から日別／月別／年別の表面流出、蒸発散量、横排水量及び浸透水量を計算し結果を出力する HELP から構成されている。

HELP の浸透水量の計算では、土層条件である土層構成を最大 20 層まで設定することが可能である。土層は HELP のレイヤタイプ「垂直浸透層」、「横排水層」、「バリア土層」、「遮水シート」の 4 種類から設定する。各土層には層の厚さ、透水係数、空隙率、圃場含水量及びしおれ点等のパラメータを設定する必要がある。また、表層土には土壌からの蒸発散を考慮する蒸発ゾーン深さを設定する。HELP では、ユーザが設定した各層の厚さから表 3-2 に示す方法でセグメントに分割して、表面流出量、蒸発散量、横排水量及び浸透水量を計算する。

SYNGEN では、表 3-1 に示す日単位の実気象データである降水量、気温及び日射量から算出した統計情報を基に、ガンマ分布及びフーリエ級数により関数化して、任意に指定した期間（最大 100 年間）の疑似的な日単位の降水量、気温及び日射量の気象データを作成する。SYNGEN で作成した疑似的な気象データは、HELP の気象入力データとして使用する。

HELP コードの SYNGEN 及び HELP の評価モデルを次節以降に示す。

3.3. SYNGEN の評価モデル

SYNGEN における、日単位の実気象データの統計情報から作成される疑似気象データである降水量、気温及び日射量の評価モデルを以下に示す。

3.3.1. 降水量

日単位の降水量の疑似気象データは、表 3-1 に示す実気象データの統計情報から作成される。日単位の降水量における降水有り／無しとの二つの状態は、第一次マルコフ連鎖モデル⁶⁾ (first order Markov chain) を用いて設定される。ある日の降水量が 0 でない場合を降水有り、0 の場合を降水無しとする。ここで、 $P_i(W/W)$ を前日と翌日で雨の日が続く確率 ($i-1$ 日目において降水有り、 i 日目においても降水有りとする確率) とし、 $P_i(W/D)$ を前日が雨で翌日は晴れの確率 ($i-1$ 日目において降水有り、 i 日目において降水無しとする確率) とする。この二つの量を定義することによって、前日が晴れで翌日が雨の確率 ($i-1$ 日目において降水無し、 i 日目において降水有りとなる確率) $P_i(D/W)$ は、以下の式で表すことができる。

$$P_i(D/W) = 1 - P_i(W/W) \quad (1)$$

また、前日と翌日で晴れの日が続く確率 ($i-1$ 日目において降水無し、 i 日目でも降水無しとなる確率) $P_i(D/D)$ は、以下の式で表すことができる。

$$P_i(D/D) = 1 - P_i(W/D) \quad (2)$$

これより、すべての状態の推移確率は、実気象データの統計情報から与えられる $P_i(W/W)$ と $P_i(W/D)$ により完全に表現することができる。

降水量は、確率密度関数によって与えられる。ここでは、2つのパラメータで与えられるガンマ分布を用いて決定する。

$$f(p) = \frac{p^{\alpha-1} \exp\left(-\frac{p}{\beta}\right)}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)}, p, \alpha, \beta > 0 \quad (3)$$

$$p = \beta(-\ln(r))^{1/\alpha} \quad (4)$$

ここで、

- p : 降水量 $p(\text{mm})$
- $f(p)$: 降水量 p に関する密度関数
- α : ガンマ分布の分布形状パラメータ
- β : ガンマ分布のスケールパラメータ
- $\Gamma(\alpha)$: α に関するガンマ関数
- r : 0 から 1 までの乱数

である。

$0 < \alpha < 1$ のとき、 p の増加とともに $f(p)$ は減少する。これは、降水量が多いほど発生頻度が小さくなることを意味し、この分布形状は降水量を表すのに適している。

$P_i(W/W)$ 、 $P_i(W/D)$ 、 α 、 β はほとんどの地域では年間を通じて連続的に変化するが、SYNGEN では、降水量を決定するこれら 4 つのパラメータを月ごとに与え、その月内では一定値としている。

3.3.2. 気温及び日射量

日単位の気温及び日射量の疑似気象データは、表 3-1 に示す実気象データの統計情報から作成される。最高気温、最低気温及び日射量は、降水有りの日と降水無しの日ごとに定義される周期的な平均値や標準偏差の変動による影響を除いた残差の確率過程を考えて設定される。気象の物理量（最高気温、最低気温、日射量）を残差へ帰着させる手法を、図 3-4 で日射量の経時変化を例に説明する。日単位の日射量データ数年間分を用い、降水有り/無しの日に区別して日射量の季節ごとの平均や標準偏差を計算する。1 年間周期の周期的な変動の振幅は、1 年を 28 日間×13 期間で区切った期間ごとに集計した気象データの平均値を、フーリエ級数を用いて平滑化する。降水有り/無しの日ごとに平滑化された季節平均を図 3-4a に、降水有り/無しの日ごとに平滑化された標準偏差を図 3-4b に示す。降水有りの場合に比べ、降水無しの場合には平均値が大きく、標準偏差は小さいことが分かる。残差 ε は、降水無し (dry) と降水有り (wet) のそれぞれに対して、降水無し/有りの場合の気象の物理量の季節平均値 $\overline{t_i^{dry}}$ 及び $\overline{t_i^{wet}}$ と標準偏差 s_i^{dry} 及び s_i^{wet} を用いて、以下の式から表される。

$$\varepsilon_i^{dry}(j) = \frac{t_i(j) - \overline{t_i^{dry}}}{s_i^{dry}(j)} \quad (5)$$

$$\varepsilon_i^{wet}(j) = \frac{t_i(j) - \overline{t_i^{wet}}}{s_i^{wet}(j)}$$

ここで、

- ε_i^{dry} : 降水無し (dry) の残差(-)
- ε_i^{wet} : 降水有り (wet) の残差(-)
- t_i : 気温または日射量(°C or MJ/m²)
 - : 降水無しの (dry) の季節平均値(°C or MJ/m²)
 - : 降水有りの (wet) の季節平均値(°C or MJ/m²)
 - : 降水無しの (dry) の標準偏差(°C or MJ/m²)
 - : 降水有りの (wet) の標準偏差(°C or MJ/m²)
- j : $j=1$ のとき、最高気温(°C)
 $j=2$ のとき、最低気温(°C)
 $j=3$ のとき、日射量(MJ/m²)

である。

このようにして得られた残差を図 3-4c に示す。平均や標準偏差の周期変動を除いた残差の時系列 $x(j)$ は、Matalas (1967)⁷⁾ による弱定常の生成過程に基づいている。

$$x_i(j) = A \cdot x_{i-1}(j) + B \cdot \varepsilon_i(j) \quad (6)$$

ここで、 $x_i(j)$ は 3 行×1 列の行列であり、各要素は、 i 日目における最高気温の残差 ($j=1$)、最低気温の残差 ($j=2$)、日射量の残差 ($j=3$) である。 ε_i は 3 行×1 列の行列であり、各要素にはランダムな値を与える。 A と B は 3 行×3 列の行列であり、前日の情報から決められる次の日の量が、ある系列相関と相互相関を持つように各要素を決める。ここで、 A と B は以下のように表すことができる。

$$A = M_1 \cdot M_0^{-1} \quad (7)$$

$$BB^T = M_0 - M_1 \cdot M_0^{-1} \cdot M_1^T$$

ここで、 M_0 と M_1 は、以下の式となる。

$$M_0 = \begin{pmatrix} 1 & p_0(1,2) & p_0(1,3) \\ p_0(1,2) & 1 & p_0(2,3) \\ p_0(1,3) & p_0(2,3) & 1 \end{pmatrix} \quad (8)$$

$$M_1 = \begin{pmatrix} p_1(1) & p_1(1,2) & p_1(1,3) \\ p_1(2,1) & p_1(2) & p_1(2,3) \\ p_1(3,1) & p_1(3,2) & p_1(3) \end{pmatrix}$$

$p_d(j,k)$ は、物理量 j と物理量 k の間の d 日の遅れの相関係数、 $p_1(j)$ は物理量 j の 1 日遅れの自己相関係数である。これらの相関係数は、日本国内のデータを調査していないため

SYNGENに取り込んでない。よって、本評価では、SYNGENの既存のデータである米国の31地点における20年間の温度と日射量のデータから決められた値を用いる(Richardson, et al(1984)⁸⁾、Richardson(1981)⁹⁾)。それぞれの相関係数に各地点の平均値を用いると、 M_0 と M_1 は以下の通りとなる。

$$M_0 = \begin{pmatrix} 1.000 & 0.633 & 0.186 \\ 0.633 & 1.000 & -0.193 \\ 0.186 & -0.193 & 1.000 \end{pmatrix} \quad (9)$$

$$M_1 = \begin{pmatrix} 0.621 & 0.445 & 0.087 \\ 0.563 & 0.674 & -0.100 \\ 0.015 & -0.091 & 0.251 \end{pmatrix}$$

また、式(7)から A と B は以下の通りとなる。

$$A = \begin{pmatrix} 0.567 & 0.086 & -0.002 \\ 0.253 & 0.504 & -0.050 \\ -0.006 & -0.039 & 0.244 \end{pmatrix} \quad (10)$$

$$B = \begin{pmatrix} 0.781 & 0 & 0 \\ 0.328 & 0.637 & 0 \\ 0.238 & -0.341 & 0.873 \end{pmatrix}$$

ここで、 i 日目における最高気温を $u_i(1) = T_i^{MAX}$ 、 i 日目における最低気温を $u_i(2) = T_i^{min}$ 、 i 日目における日射量を $u_i(3) = R_i$ とくと、日々の残差と標準偏差 $s_i(j)$ 、平均値 $m_i(j)$ から、 i 日目の T_i^{MAX} 、 T_i^{min} 、 R_i が以下の式から得られる。 $s_i(j)$ と $m_i(j)$ は降水量の有無によって条件づけられた値である。

$$u_i(j) = x_{i-1}(j) \cdot s_i(j) + m_i(j) \quad (11)$$

以上から、平均値や分散の季節変動による気象に関する物理量は、以下の式で表すことができる。

$$u_i(j) = \bar{u}_i(j) + C(j) \cos\left(\frac{2\pi}{365}(i - T(j))\right) \quad (12)$$

ここで、

- $u_i(j)$: $j=1$ のとき i 日目における最高気温(°C)
- $j=2$ のとき i 日目における最低気温(°C)
- $j=3$ のとき i 日目における日射量(MJ/m²)
- $\bar{u}_i(j)$: $j=1, 2, 3$ の年間平均値
- $C(j)$: $j=1, 2, 3$ における、1年間で1周期とする季節変動の振幅(フーリエ級数により求められる)
- T : $j=1, 2, 3$ における、1年間のうちでそれぞれの物理量の値が最も大きくなる日を意味する位相のズレ

である。

米国の 31 地点における T の比較では、場所による違いはあまりなかったため、SYNGEN では、気温については $T=200$ に、日射量については $T=172$ に固定している。

3.4. HELP の評価モデル

HELP における、表面流出量、蒸発散量、上部覆土内への浸透水量、廃棄体層内への浸透水量及び横排水層の評価モデルを以下に示す。

3.4.1. 表面流出量

表面流出量は、米国の United States Department of Agriculture (以下、「USDA」という) で開発された SCS curve-number method¹⁰⁾ (以下、「流出カーブ番号」という) を使用して求められている。流出カーブ番号は、USDA が行った小さな流域及び斜面からの表面流出の実証分析から開発された計算方法であり、特定の領域における降雨事象からの表面流出量を評価するのに効率的な方法である。流出カーブ番号は 30~100 までの範囲であり、100 に近い値になるほど表面流出量は大きくなり、30 に近い値になるほど表面流出量は発生せず高透水性の土壌となる。表面流出は以下の式から求まる。

$$Q = \begin{cases} 0 & \text{for } P \leq I_a \\ \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} & \text{for } P > I_a \end{cases} \quad (13)$$

$$S = \frac{1000}{CN} - 10 \quad (14)$$

ここで、

- Q : 表面流出(mm)
- P : 降水量(mm)
- I_a : 降雨無しの場合における土壌水分量(mm) ($I_a=0.2S$)
- S : 表面流出開始時の土壌の潜在的な最大土壌水分量(mm)
- CN : 流出カーブ番号

である。

流出カーブ番号は以下の式(15)~式(17)から求まる。式(17)で使用する植生の回帰係数は HELP コード³⁾の値を引用し、表 3-3 に示す値を使用した。植生の回帰係数は、処分施設の上部覆土の植生状態に合わせた平均土壌水分率を算出するのに使用し、USDA の実証分析から設定されたパラメータである。

$$CN = 3.751 \times 10^{-1} \cdot CN_{II} + 2.757 \times 10^{-3} \cdot CN_{II}^2 - 1.639 \times 10^{-5} \cdot CN_{II}^3 + 5.143 \times 10^{-7} \cdot CN_{II}^4 \quad (15)$$

$$CN_{II} = 100 - (100 - CN_{II0}) \cdot \left(\frac{L^2}{S} \right)^{CN_{II0}^{-0.81}} \quad (16)$$

$$CN_{II0} = C_0 + C_1 \cdot IR + C_2 \cdot IR^2 \quad (17)$$

ここで、

CN_{II} : ユーザが指定した排水層長さ、排水勾配から調整した平均土壌水分率(-)

L : 規格化された無次元長さ (排水層長さ/152.4m) (-)

S : 規格化された無次元勾配 (排水勾配/0.04) (-)

CN_{II0} : 平均土壌水分率(-)

$C_{0,1,2}$: 植生の回帰係数 (表 3-3 参照) (-)

IR : 表層土の浸透相関パラメータ(-)

である。

3.4.2. 蒸発散量

蒸発散量は、植物からの蒸散量と土壌からの蒸発量を合わせたものであり、以下の式より求まる。

$$ET_i = ETS_i + ESS_i \quad (18)$$

ここで、

ET_i : i 日における蒸発散量(mm)

ETS_i : i 日における土中からの蒸発散量(mm)

ESS_i : i 日における土層表面からの蒸発散量(mm)

である。

土中からの蒸発散量 ETS_i は、蒸発散を考慮する土壌層に蒸発ゾーン深さを設定し、その蒸発ゾーン深さを 7 セグメントに分割した評価モデルを用いて、以下の式(19)～式(22)から求める。式(21)に示すように土中からの蒸発量は、土壌が深くなるにつれて減少するため土壌深さの重み係数を設定する。同様に植物からの蒸散量も、式(22)に示すように可能蒸発散量に土壌深さの重み係数を乗じて求める。

$$ETS_i = \sum_{j=1}^7 ET_i(j) \quad (19)$$

$$ET_i(j) = ES_i(j) + EP_i(j) \quad (20)$$

$$ES_i(j) = \frac{(PENR_i + K_{Ei} \cdot PEN A_i) \cdot \exp(-0.000029 \cdot CV_i)}{L_v} \cdot W(j) \quad (21)$$

$$EP_i(j) = \frac{LAI_i}{3} \cdot E_i \cdot W(j) \quad (22)$$

ここで、

$ET_i(j)$: i 日セグメント j における土中からの蒸発散量(mm)

$ES_i(j)$: i 日セグメント j における土中からの蒸発量(mm)

$EP_i(j)$: i 日セグメント j における植物からの蒸散量(mm)

- $PENR_i$: i 日におけるペンマン式の放射コンポーネント(MJ/m²)
 $PENA_i$: i 日におけるペンマン式の空力コンポーネント(MJ/m²)
 K_{Ei} : 空力コンポーネントが土壌からの蒸発散量に寄与する割合(-)
 CV_i : i 日における地上バイオマス量(kg/ha)
 L_v : 蒸発潜熱または融解潜熱(MJ/m² per mm)
 LAI_i : i 日における葉面積指数(-)
 E_i : i 日における可能蒸発散量(mm)
 $W(j)$: セグメント j の重み係数(-)

である。

土層表面からの蒸発散量 ESS_i は土層表面に溜まっている表面水量を考慮して求める評価モデルとなっている。 ESS_i は、以下の式より求まる。

$$ESS_i = \begin{cases} E_i & \text{for } E_0 \leq INT_i + PW_i(1 - PRF) \\ INT_i + PW_i(1 - PRF) & \text{for } E_0 > INT_i + PW_i(1 - PRF) \end{cases} \quad (23)$$

ここで、

- E_i : i 日における可能蒸発散量(mm)
 INT_i : i 日における植生による降雨遮断量(mm)
 PW_i : i 日における土中への浸透及び表面流出することができずに溜まっている土層表面水量(mm)
 PRF : 表面流出が潜在的に発生する可能面積割合(-)

である。

3.4.3. 上部覆土内への浸透水量

上部覆土内への浸透水量は、降水量から表面流出量及び蒸発散量を差し引いた値となる。評価式を以下に示す。

$$q_i = P_i - Q_i - ET_i \quad (24)$$

ここで、

- q_i : i 日における上部覆土内への浸透量(mm)
 P_i : i 日における降水量(mm)
 Q_i : i 日における表面流出量(mm)
 ET_i : i 日における蒸発散量(mm)

である。

3.4.4. 廃棄体層内への浸透水量及び横排水量

廃棄体層内への浸透水量は、上部覆土の土層を4種類のレイヤタイプ（1：垂直浸透層、2：横排水層、3：バリア土壌層、4：遮水シート）を組み合わせて設定することにより求める。

なお、土層構成の設定は任意に各レイヤタイプを設定することができるが、以下に示す層構成を設定することはできない。

- レイヤタイプ 2 : 横排水層の下層にレイヤタイプ 1 : 垂直浸透層を設定すること
- レイヤタイプ 3 : バリア土壤層を連続して設置すること
- レイヤタイプ 3 : バリア土壤層が上下層にあり、その間にレイヤタイプ 4 : 遮水シートを設定すること
- レイヤタイプ 4 : 遮水シートが上下層にあり、その間にレイヤタイプ 3 : バリア土壤層を設定すること

各レイヤタイプの評価モデル及び性質を以下に示す。

(1) レイヤタイプ 1 : 垂直浸透層

垂直浸透層は、浸透水が土層に対して垂直方向にのみ流れるように設定されており、下層へ浸透水が流れる層である。この層は、表層土、土壤層及び廃棄体層に設定される。評価モデルは、垂直浸透層内の各セグメント内の圧力水頭は一定であると想定している。垂直浸透層の浸透水量の評価式を以下に示す。

$$DR_i(j+1) = K_s(j) \cdot h \cdot DT \cdot \left(\frac{SM_i(j) - RS(j)}{UL(j) - RS(j)} \right)^{3 + \frac{2}{\lambda(j)}} \quad (25)$$

ここで、

$DR_i(j)$: i 日におけるセグメント j への浸透量(mm)

$K_s(j)$: i 日における透水係数(mm/day)

h : 水頭勾配(-)

DT : タイムステップサイズ(day)

$SM_i(j)$: i 日におけるセグメント j の土壤水分量(mm)

$RS_i(j)$: i 日におけるセグメント j の残留土壤水分含量(mm)

$UL_i(j)$: i 日におけるセグメント j の飽和土壤水分含量(mm)

である。

(2) レイヤタイプ 2 : 横排水層

横排水層は、土壤に対して垂直方向に不飽和水を浸透させ、水平方向に飽和水を排水する層である。水平方向の排水は、Dupuit-Forchheimer¹¹⁾の仮定から水平方向の水の流れを一定とし、流速は横排水の勾配に比例するものと想定して、ブシネスク方程式¹¹⁾によってモデル化されている。排水機能は、横排水層が厚い場合より薄い場合の方が効果的であり、横排水層の長さも短い方が効果的となる評価モデルとなっている。横排水層における排水量の評価式を以下に示す。

$$q_D = K_D \cdot \cos^2 a \cdot \frac{d}{dx} \left(y \cdot \frac{dh}{dx} \right) \quad (26)$$

ここで、

q_D : 処分施設の単位面積当たりの流量で横方向における排水量(mm/day)

K_D : 排水層の重力平均飽和透水係数(mm/day)

y : 排水層の厚さ(cm)

x : 排水層からの水平距離(cm)

h : 排水層の下端からの水頭(cm)
 a : 排水層の勾配(-)

である。

(3) レイヤタイプ 3 : バリア土壤層

バリア土壤層は保水機能を持ち、上層の水頭により浸透水が下層へ流れる層であり、常に飽和状態であることを前提としている。バリア土壤層の浸透水量は、バリア土壤層の上層に含まれる水分の割合によって決まる。評価モデルでは、バリア土壤層にダルシーの法則を適用し、拡散係数は透水係数と等価としている。バリア土壤層の浸透水量の評価式を以下に示す。

$$q_p(k)_i = \begin{cases} 0 & \text{for } h_w(k)_i = 0 \\ K_s(k) \frac{h_w(k)_i + TS(k)}{TS(k)} & \text{for } h_w(k)_i > 0 \end{cases} \quad (27)$$

ここで、

$q_p(k)_i$: i 日におけるバリア土壤層 k からの浸透量(mm/day)
 $K_s(k)$: バリア土壤層 k の透水係数(mm/day)
 $h_w(k)_i$: i 日におけるバリア土壤層 k に作用する平均水頭(mm)
 $TS(k)$: バリア土壤層 k の厚さ(mm)

である。

(4) レイヤタイプ 4 : 遮水シート

遮水シートからの漏洩量の評価モデルでは、遮水シートと下層との接触状態、遮水シートの損傷状態及び遮水シートの上下層の透水性を考慮している。遮水シートの上下層の透水性は高、中、低の 3 つに分類し表 3-4 のように定義している。HELP で定義されている遮水シート下層との接触状態は以下に示す 5 種類がある。

- ① 遮水シートと下層の土壤に全く隙間がない状態。この状態は一般的とは考えられていない。(以下、「perfect」という)
- ② 遮水シートの下層の土壤が中透水性の場合。表 3-4 に示される中透水性に区分される土壤は一般的に非凝集性であるので遮水シートにきわめてよく接触する。遮水シートと下層には若干の隙間は生じる。(以下、「excellent」という)
- ③ 遮水シートの下層の土壤の圧縮がしっかりされており、遮水シートに若干のたわみがある状態。(以下、「good」という)
- ④ 遮水シートの下層の土壤の圧縮が不十分であり、遮水シートに一定のたわみがある状態。(以下、「poor」という)
- ⑤ 遮水シートが劣化しており、遮水性の機能を有していない状態。(以下、「worst」という)

遮水シートの損傷状態は、傷のない状態、遮水シートに傷がつき穴がある状態及び遮水シートに設置不具合がある状態の3つの状態を定義し、それぞれの状態についてモデル式を設定している。

遮水シートからの漏洩量は、以下の式に示すように損傷の程度別に求めた漏洩量を合わせて求める。

$$q_{LT} = q_{L1} + q_{L2} + q_{L3} \quad (28)$$

ここで、

- q_{LT} : 遮水シートからの漏洩量(mm)
- q_{L1} : 遮水シートの損傷が無い箇所からの漏洩量(mm)
- q_{L2} : 遮水シートにある穴からの漏洩量(mm)
- q_{L3} : 遮水シートにある設置不具合からの漏洩量(mm)

である。

遮水シートの損傷が無い箇所からの漏洩量は、バリア土壌層の浸透量評価モデルと同様に遮水シートを通り抜けて移動する水の割合に支配され、拡散係数は透水係数と等価としている。評価式を以下に示す。

$$q_{L1}(k)_i = \begin{cases} 0 & \text{for } h_g(k)_i = 0 \\ K_g(k) \frac{h_g(k)_i + T_g(k)}{T_g(k)} & \text{for } h_g(k)_i > 0 \end{cases} \quad (29)$$

ここで、

- $q_{L1}(k)_i$: i 日における拡散による遮水シートからの漏洩量(mm/day)
- $K_g(k)$: 遮水シート k の透水係数(mm/day)
- $h_g(k)_i$: i 日における遮水シート k に作用する平均水頭(mm)
- $T_g(k)$: 遮水シート k の厚さ(mm)

である。

遮水シートの穴及び設置不具合から漏洩量を評価する際に、遮水シートと下層の接触状態が excellent、good、poor の場合は、図 3-5 に示す遮水シートと下層との隙間に生じる界面流を考慮する。一方で、接触状態が perfect の場合は、遮水シートと下層が密着して隙間が無い想定であることから界面流は考慮しない。また、worst の場合も、水が遮水シートを自由に通り抜けてしまう状態にあることから、界面流は考慮しない。各接触状態による遮水シート穴及び設置不具合からの漏洩量の評価モデルを以下に示す。

① perfect

接触状態が perfect の場合は、遮水シートの穴からの漏洩量に対する評価モデルは、球面座標系のダルシー法則の式を基本式としており、以下の式となる。

$$q_{L2}(k)_i = \frac{\pi \cdot n_2(k) \cdot k_s \cdot h_g(k)_i \cdot 0.001}{10,000} \quad (30)$$

ここで、

- $q_{L2}(k)_i$: i 日における遮水シート k の穴からの漏洩量(mm/day)
- $n_2(k)$: 遮水シート k の穴の個数(個/ha)
- $k_s(k)$: 遮水シート k の下層の透水係数(m/day)
- $h_g(k)_i$: i 日における遮水シート k に対する平均水頭(mm)
- 0.0001 : 遮水シート穴の直径(m)
- 10,000 : 単位変換(m² 個/ha)

である。

遮水シートの設置不具合による漏洩量の評価モデルも同様に、球面座標系のダルシー法則の式を基本式としており、以下の式となる。

$$q_{L3}(k)_i = \frac{\pi \cdot n_3(k) \cdot k_s \cdot h_g(k)_i \cdot 0.0113}{10,000 \cdot \left(1 - \frac{0.5 \cdot 0.0113}{T_s(k)}\right)} \quad (31)$$

ここで、

- $q_{L3}(k)_i$: i 日における遮水シート k の設置不具合からの漏洩量(mm/day)
- $n_3(k)$: 遮水シート k の設置不具合の個数(個/ha)
- $T_s(k)$: 遮水シート k の下層の土壌層厚さ(mm)
- 0.0113 : 設置不具合による傷の穴の直径(m)

である。

② excellent、good、poor

接触状態が excellent、good、poor の状態は遮水シートと下層との間に隙間があるため、遮水シートの傷からの浸透は一般に図 3-5 に示すように界面を抜ける放射状流と下層への鉛直方向の流れを含む。遮水シートの穴及び設置不具合からの界面流による漏洩量の評価式を以下に示す。式において、 $h=L2$ の場合が遮水シートの穴から、 $h=L3$ の場合が遮水シートの設置不具合からの漏洩量となる。

$$q_h(k)_i = K_s(k) \cdot i_{avg}(k)_i \cdot n(k) \cdot \pi \cdot R(k)_i^2 \cdot \left(\frac{\eta_{20}}{\eta_{15}}\right) \cdot \frac{1}{10,000} \quad (32)$$

ここで、

- $q_h(k)_i$: i 日における遮水シート k にある傷からの遮水シートからの界面流による漏洩量(mm/day)
- $k_s(k)$: 遮水シート k の下層の透水係数(mm/day)
- $i_{avg}(k)_i$: i 日における遮水シート k の下層の界面領域 (図 3-5 参照) に対する平均動水勾配(-)
- $n(k)$: 遮水シート k の穴または設置不具合の個数(個/ha)
- $R(k)_i$: i 日における遮水シート k にある穴または設置不具合周囲の界面領域の半径(m)
- η_{20} : 20°Cでの水の動粘性係数 : 1×10^{-3} (kg/m s)
- η_{15} : 15°Cでの水の動粘性係数 : 1.14×10^{-3} (kg/m s)
- 10,000 : 単位変換(m² 個/ha)

である。

式(32)における平均動水勾配 $i_{avg}(k)$ は、式(33)より求める。遮水シートの穴及び設置不具合に対する界面領域の半径 (図 3-5 参照) を求める評価モデルを式(34)に示す。式(34)は遮水シートの穴及び設置不具合に対して同じ評価モデルを適用しており、対象とする傷の種類及び接触状態に応じて表 3-5 に示すように x 、 y 、 z の係数を設定している。HELP では遮水シートの穴の大きさは遮水シートの厚み以下と想定しており、遮水シートの厚みは米国において一般的に 40mil (ミル) (≒1.0mm) であるため、式(33)、式(34)で使用する傷の半径は 0.5mm、損傷面積は $7.84 \times 10^{-7} \text{m}^2$ としている。遮水シートの設置不具合は、HELP において保守的に 100mm^2 (20mm×5mm) の使用を推奨しているため、式(33)、式(34)で使用する半径は 5mm、損傷面積は 0.0001m^2 としている。

$$i_{avg}(k)_i = 1 + \left(\frac{h_g(k)_i}{2 \cdot T_s(k) \cdot \ln\left(\frac{R(k)_i}{r_0}\right)} \right) \quad (33)$$

ここで、

$h_g(k)_i$: i 日における遮水シート k にある傷からの遮水シートに対する平均水頭(mm)

$T_s(k)$: 遮水シート k の下層の厚さ(mm)

r_0 : 遮水シート k の傷の半径 (穴の場合=0.5mm、設置不具合の場合=5.0mm)

である。

$$R = \alpha \cdot a_0^x \cdot h_g^y \cdot K_s^z \quad (34)$$

ここで、

R : 遮水シート k における傷の湿潤領域または界面流の半径(m)

α : 遮水シートと下層の接触状態に対する係数(sec/m³)
 excellent=0.97 (下層が中透水性)、0.5 (下層が低透水性)

good=0.26

poor=0.61

h : 遮水シートの損傷面積 (穴の場合= $7.84 \times 10^{-7} \text{m}^2$ 、設置不具合の場合= 0.0001m^2)

h : 遮水シートの水頭の合計(m)

h : 遮水シートの下層の透水係数(m/sec)

x, y, z : 係数 (表 3-5 を参照)

である。

③ worst

接触状態が worst の場合における、遮水シートの穴からの漏洩量の評価モデルは、以下の式となる。

$$q_{L2}(k)_i = \frac{1.755 \times 10^{-4} \cdot n_2(k) \cdot h_g(k)_i}{10,000 \cdot T_g(k)} \quad (35)$$

ここで、

$q_{L2}(k)_i$: i 日における遮水シート k の穴からの漏洩量(mm/day)

$n_2(k)$: 遮水シート k の穴の個数(個/ha)

$h_g(k)_i$: i 日における遮水シート k に対する平均水頭(mm)

$T_g(k)$: 遮水シート k の厚さ(m)

: 単位変換 : $1.755 \times 10^{-4}(\text{m}^3/\text{day})$

10,000 : 単位変換(m^2 個/ha)

である。

遮水シートの設置不具合からの漏洩量の評価モデルは、開口部を通る自由流れに対するベルヌーイの式を基本式としており、以下の式となる。

$$q_{L3}(k)_i = 0.0356 \cdot n_3(k) \sqrt{h_g(k)_i} \quad (36)$$

ここで、

$q_{L3}(k)_i$: i 日における遮水シート k の設置不具合からの漏洩量(mm/day)

$n_3(k)$: 遮水シート k の設置不具合の個数(個/ha)

: 定数 : $0.0356(\text{mm}^{0.5} \text{ ha/day 個})$

である。

4. 付加機能型トレンチ処分施設における上部覆土内及び廃棄体層への浸透水量の評価

本章では、トレンチ処分施設に異なる透水性機能の上部覆土を設定して、上部覆土内及び廃棄体層への浸透水量を評価した結果について示す。評価で使用する気象条件は、SYNGEN で作成した疑似気象データを使用するケース（以下、「疑似気象ケース」という）と概念設計の安全評価で地下水ハンドブック²⁾から設定した廃棄体層への浸透水量（400mm/year）が上部覆土内へ浸透するように降水量を固定したケース（以下、「降水量固定ケース」という）を設定した。土層条件は、トレンチ処分施設の上部覆土内に遮水シート設置する層構成（以下、「Model1」）と遮水シートを設置しない層構成（以下、「Model2」）の2種類想定した。

評価にあたって、上部覆土内の土層パラメータを変化させて上部覆土から廃棄体層への浸透水量の評価を行い、廃棄体層への浸透水量が降雨による上部覆土内への浸透水量に対して十分に低減する土層パラメータの条件を評価した。

4.1. 評価フロー及び評価ケース

気象条件は疑似気象ケースと降水量固定ケースを設定し、土層構成は図 4-1 に示すように Model1（上部覆土内に遮水シート設置）と Model2（上部覆土内に遮水シートを設置しない）を設定した。Model1 及び Model2 の土層条件で変化させる土層パラメータは遮水シートの状態及び低透水土壌層の透水係数とした。評価フローを図 4-2 に、評価ケースを表 4-1 に示す。計算ケースは、気象条件 2 ケース×土層条件 25 ケースで 50 ケースとなる。

降水量固定ケースで設定する年間降水量 400mm は廃棄体層への浸透水量であるため、全ての降水が土壌へ浸透する必要がある。よって、降水量固定ケースの評価時には、全ての降水が土壌へ浸透するように、植物及び土壌からの蒸発散量を考慮しないこととした。

遮水シートと下層との接触状態は 3.4.3 項(4)から perfect、good、poor、worst の 4 種類を想定した。低透水土壌層の透水係数は、「廃棄物最終処分場整備の計画・設計要領」¹²⁾に記載されている、砂質土から粘土にあたる値（ 1×10^{-5} から 1×10^{-9} m/sec）に変化させて評価を行った。

4.2. 気象データの作成

4.2.1. 疑似気象ケース

(1) 実気象データの入手

評価対象地点は、関東地方の 1 地点のデータを使用した（以下、「A 地点」という）。疑似気象データの作成に使用した降水量、気温及び日射量の日単位の実気象データは、独立行政法人農業環境技術研究所が公開している農業環境情報データセンター¹³⁾のデータのうち 1978 年から 2009 年までの 32 年間のデータとした。入手した実気象データの経年変化を図 4-3 に示す。

(2) 疑似気象データの作成

実気象データから SYNGEN を使用して 100 年間の疑似気象データを作成した。作成し

た疑似気象データの経年変化を図 4-4 に示す。A 地点の実気象データと疑似気象データの年間降水量及び年間平均気温、年間平均日射量の比較を表 4-2 に示す。表 4-2 より、A 地点の 1978 年から 2009 年までの 32 年間の実気象データは、年間平均降水量は約 1,230mm、年間平均気温は 13.6℃、年間平均日射量は 12.4MJ/m² となっている。SYNGEN から作成した 100 年間の疑似気象データは、年間平均降水量は約 1,260mm、年間平均気温は 13.5℃、年間平均日射量は 12.6MJ/m² となり、実気象データをよく再現しており、作成した 100 年間分の疑似気象データは妥当であると考えられる。

実気象データ及び SYNGEN で作成した疑似気象データの年間月別平均降水量、年間月別平均気温及び年間月別平均日射量の比較を図 4-5、図 4-6 及び図 4-7 に示す。これらの図より、年間月別降水量及び年間月別平均気温の疑似気象データは、実気象データをよく再現しているが、年間月別平均日射量は、実気象では 5 月と 8 月の 2 点でピークを持つが、疑似気象データは 6 月に最高値となりピークは 1 つだけとなっており再現ができていない。2 つのピークを再現できていない理由は、疑似的な気象データを生成する計算モデルが米国の気象環境を対象としているため日本特有の気候である梅雨を考慮しておらず、1 年間の変動をフーリエ級数で表現するのに、1 つのハーモニクスで表現するモデルだからである。ただし、ピーク時期の再現はできていないが、それ以外の時期の再現はできていることが分かる。よって、SYNGEN で作成した疑似気象データを使用して浸透水量評価を行った。

なお、上記に示す疑似気象データの日射量が実気象データのピーク値を再現できていないことによる評価への影響を確認するため、実気象データを使用して 32 年間の浸透水量評価を行い（以下、「実気象ケース」という）、疑似気象データを使用した場合の評価結果との比較を 4.3.2 項(3)で行った。

4.2.2. 降水量固定ケース

降水量固定ケースでは、廃棄体層への浸透水量 400mm/year が上部覆土内へ浸透することを想定して、日別降水量を 1.1mm に固定した。期間は、疑似気象ケースと同様に 100 年間分のデータを作成した。気温及び日射量のデータは、疑似気象ケースで作成したものを使用した。降水量固定ケースの気象データを図 4-8 に示す。また、降水量が全て土壌へ浸透するように、評価では蒸発散量を考慮しないこととした。

4.2.3. その他の気象データの設定

浸透水量の評価に必要な降水量、気温及び日射量以外のその他の気象データについては、A 地点近傍の気象台で公開されている旬ごとの平年値から設定した。旬ごとの平年値は 1981 年から 2010 年までの 30 年間のデータを基に作成されている。その他の気象データを表 4-3 に示す。なお、表 4-3 に示した気象データは、各ケースで共通の値を設定した。

4.3. 浸透水量の評価

4.3.1. 土層条件

トレンチ処分施設の上部覆土内の土層構成は、遮水シートを設置する Model1 と遮水シートを設置しない Model2 の 2 種類を想定した。土層構成を図 4-1 に、土層パラメータを表

4-4 に示す。トレンチ処分施設的环境状態である蒸発ゾーン深さ及び植物の植生状態（葉面積指数）を表 4-5 に示す。解析を実施する土層パラメータを表 4-6 に示す。

Model1 で設置する遮水シートの透水係数は、遮水工協会の自主規準¹⁴⁾に $1 \times 10^{-11} \text{m/sec}$ 以下と記載されているため、その上限である $1 \times 10^{-11} \text{m/sec}$ を設定した。また、遮水シートの厚さは、遮水工協会の自主規準に 1.5mm 以上と記載されているため、最低値である 1.5mm を設定した。遮水シートの上層には横排水層を設置する構造とした。横排水層の最大排水長さは、概念設計で検討したトレンチ処分施設における短辺の半分の長さとした。排水勾配は、WCS 社処分場の安全評価書⁴⁾を参考に 4% に設定した。遮水シートの下層には低透水土壌層を設置した。低透水土壌層の厚さは、概念設計の中間覆土の厚さと同じ 25cm とし、透水係数は砂質土から粘土にあたる値に変化させることとした。

Model2 では、遮水シートの代わりに 50cm 厚の低透水土壌層を設置した。低透水土壌層の厚さは、「廃棄物最終処分場整備の計画・設計要領」より粘性土透水係数 $1 \times 10^{-8} \text{m/sec}$ 以下の場合には厚さ 50cm 以上が必要と記載されているため、最低値の 50cm とした。低透水土壌層の透水係数は、Model1 と同様に砂質土から粘土にある値に変化させることとした。また同様に、低透水土壌層の上層に横排水層を設置する構造とし、その仕様は、Model1 で設置した条件と同じとした。

4.3.2. 評価結果

(1) 疑似気象ケース

評価結果を表 4-7 及び図 4-9 に示す。表 4-7 より土層構成、遮水シートの状態及び低透水土壌層の透水係数に関わらず各ケースにおいて、年間平均表面流出量、年間平均蒸発散量、及び降雨による上部覆土内への年間平均浸透水量は、それぞれ 85.5mm、627.8mm、550.7mm となった。これは、上部覆土内の遮水シート及び低透水土壌層のパラメータは変化させているが、上部覆土内の表層条件のパラメータが各ケース一定であるため、上部覆土内の表層で評価される表面流出量、蒸発散量及び降雨による上部覆土内への浸透水量は各ケースで同じ評価結果となった。

表 4-7 及び図 4-9 より、上部覆土から廃棄体層への年間平均浸透水量は、Model1 において遮水シートの状態が perfect の場合は低透水土壌層の透水係数に関わらず 5mm 以下となり、good 及び poor の場合は低透水土壌層の透水係数が粘土質にあたる値（good : $1 \times 10^{-7} \text{m/sec}$ 、poor : $1 \times 10^{-8} \text{m/sec}$ ）以下のときに 10mm 以下となった。Model1 の遮水シートが遮水性の機能を有していない状態である worst の場合及び Model2 において、低透水土壌層の透水係数が粘土にあたる値（ $1 \times 10^{-9} \text{m/sec}$ ）のときに、上部覆土から廃棄体層への年間浸透水量は約 30mm となった。Model1 の worst の場合は、遮水シートが劣化しており遮水性の機能を有していないため、遮水シートを設置していない Model2 とほぼ同様の評価結果となった。

低透水土壌層の透水係数を粘土にあたる値（ $1 \times 10^{-9} \text{m/sec}$ ）に設定すると、上部覆土から廃棄体層への年間平均浸透水量は、遮水シートの遮水性の機能を有している状態である perfect、good 及び poor の場合では、降雨から上部覆土内への年間平均浸透水量 550.7mm の 1/100 以下に低減できることを確認できた。また、遮水シートが遮水性の機能を有して

いない状態である worst または遮水シートを設置しない場合も、降雨から上部覆土への年間平均浸透水量 550.7mm の 1/10 以下に低減できることを確認できた。

(2) 降水量固定ケース

評価結果を表 4-8 及び図 4-10 に示す。降水量固定ケースでは、全ての降水量が土壌へ浸透するように蒸発散量の計算を考慮していない。また、上部覆土内への年間平均浸透水量を約 400mm (401.8mm) に設定し、全ての降水量が土壌へ浸透するので表面流出量は 0mm である。

降雨から上部覆土内への年間平均浸透水量が疑似気象ケースの計算結果である 550.7mm より少ない 401.8mm に設定したため、降水量固定ケースにおける上部覆土から廃棄体層への年間平均浸透水量は、疑似気象ケースより少なくなる傾向が分かった。ただし、Model1 の worst 及び Model2 において低透水土壌層の透水係数が $1 \times 10^{-8} \text{m/sec}$ の場合では、降水量固定ケースの方が、上部覆土から廃棄体層への年間平均浸透水量は大きくなった。これは、低透水土壌層がレイヤタイプ 3 の「バリア土壌層」であり、降水量固定ケースでは毎日降水があるため土層は飽和状態となり常にバリア土壌層に作用する水頭圧があるため、式 (27) に示す通り定常的に浸透水量が発生することにより、低透水土壌層の透水係数 $1 \times 10^{-8} \text{m/sec}$ を年換算した 315mm 以上が年間浸透水量として廃棄体層へ浸透したためである。一方、疑似気象ケースでは、降水が無い日があるため、廃棄体層への浸透水量は一定ではなく、浸透水量が多い日は、排水量も多くなるため、年間で平均すると、廃棄体層への浸透水量は、降水量固定ケースより小さくなる。ただし、低透水土壌層の透水係数が $1 \times 10^{-7} \text{m/sec}$ 以上の場合になると、降水量固定ケースが疑似気象ケースより廃棄体層への浸透水量が少なくなるのは、降水量固定ケースの年間平均浸透水量は 400mm に設定しており、それ以上の浸透がないためである。疑似気象ケースと降水量固定ケースの日別の廃棄体層への浸透水量を図 4-11 に示す。疑似気象ケースでは、降水が無い日があるため、廃棄体層への浸透水量は一定しておらず、降水量固定ケースでは、常に降水があるため土層が飽和状態となり、廃棄体層への浸透水が一定して生じていることが分かる。なお、降水量固定ケースにおいて 40 日目以前までは、廃棄体層への浸透水量は一定していない。これは、この期間は冬 (1 月から 2 月) にあたり氷点下の日があるため処分施設に氷が生じて、土壌への浸透が一定となっていたためである。

これより、遮水シートを設置しないケースにおいて、毎日降水がある場合は土層が飽和状態となり常にバリア土壌層に作用する水頭圧があるため、低透水土壌層の透水係数を年換算した水量以上が廃棄体層へ浸透していくため、過大評価となることが分かった。

(3) 確認計算：実気象ケース

疑似気象データと実気象データの月別平均日射量の推移に差がみられたため、その差が浸透水量の評価に与える影響を検討するため、実気象データを使用して評価を実施した。その評価結果について表 4-9 及び図 4-12 に示す。表 4-9 より土層構成、遮水シートの状態及び土壌の透水係数に関わらず各ケースにおいて、年間平均値は表面流出は 131.0mm、蒸発散量は 592.3mm、降雨から上部覆土内への浸透水量は 512.7mm となった。

疑似気象ケースと比較して、年間平均表面流出量は約 40mm 多くなり年間平均蒸発散量は約 40mm 少なくなった。図 4-13 に疑似気象ケースと実気象ケースの月別の平均蒸発散量を示す。図 4-13 より、各ケースによる月別の平均蒸発散量の経時変化は、図 4-7 に示す月別の平均日射量とほぼ同じとなっている。これは、蒸発散量を評価する際に、式(21)に示すように日射量の影響を受けるためであり、実気象ケースと疑似気象ケースのピーク時期の違いにより約 40mm の蒸発散量の差が生じたと考えられる。よって、実気象ケースでは、蒸発散量は疑似気象ケースより少なくなり、その分の表面流出量が多くなっている。上部覆土内への浸透水量は、土壌層の透水係数等により計算され、それ以上大きくならないため、蒸発散量が減少した分が表面流出量として計算されたと考えられる。

上部覆土への浸透水量及び廃棄体層への浸透水量は、疑似気象ケースとほぼ同様の結果となった。これより、疑似気象ケースの日射量が実気象ケースのピーク値を再現できていないことによる影響はわずかであることがわかった。また、疑似気象ケースの上部覆土への浸透水量及び廃棄体層への浸透水量の評価結果が妥当であることが確認できた。

5. 浸透水量の気象条件及び上部覆土の表層条件に係るケーススタディ

本章では、4章で実施したトレンチ処分施設における上部覆土内への浸透水量及び廃棄体層への浸透水量について、気象条件及び上部覆土の表層条件を変化させた時の浸透水量の評価を行った。変化させるパラメータは、気象条件、上部覆土表層の植生状態及び蒸発ゾーン深さとした。

5.1. 評価フロー及び評価ケース

評価は、Model1 及び Model2 の両方の土層モデルについて行った。

変化させるパラメータは、気象条件（評価地点）、トレンチ処分施設の植生状態（葉面積指数）及び土壌中からの蒸発散を考慮する蒸発ゾーン深さを対象とした。気象条件は A 地点の他に、日本全国の年間平均降水量約 1,800mm とほぼ同様の降水量となる B 地点及び地下水ハンドブックにおいて、日本の最大に近い年間平均降水量約 2,300mm とする C 地点の 3 地点のデータとした。

評価フローを図 5-1 に、評価ケースを表 5-1 に示す。評価ケースは 54 ケースとなる。

5.2. 疑似気象条件の設定

5.2.1. 実気象データの入手

B 地点及び C 地点の日単位の降水量、気温及び日射量は、A 地点と同様に農業環境情報データセンターから 1978 年から 2009 年までの 32 年間の実気象データをダウンロードして入手した。B 地点と C 地点の実気象データの経年変化を図 5-2 及び図 5-3 に示す。

5.2.2. 疑似気象データの作成結果

実気象データから SYNGEN を使用して 100 年間の疑似気象データを作成した。B 地点と C 地点の疑似気象データの経年変化を図 5-4 及び図 5-5 に示す。各地点の実気象データと疑似気象データの年間降水量及び年間平均気温、年間平均日射量の比較を表 5-2 に示す。表より、疑似気象データは実気象データをよく再現していることが分かる。

実気象データ及び SYNGEN で作成した疑似気象データについて、B 地点及び C 地点における年間月降水量、年間月別平均気温及び年間月別平均日射量を、図 5-6 から図 5-11 に示す。図より、年間月降水量及び年間月別平均気温の疑似気象データは実気象データをよく再現しているが、地点 A の疑似気象データと同様に年間月別平均日射量の疑似気象データは実気象データのピーク時期を再現できていない。ただし、年間平均日射量は、疑似気象データにより良く再現できているとともに、地点 A の評価では、上部覆土内及び廃棄体層への浸透水量の評価に大きな影響を与えていないことから、作成した疑似気象データを HELP の気象条件に使用した。

5.2.3. その他の気象データの設定

浸透水量の評価に必要な降水量、気温及び日射量以外のその他の気象データについては、各地点の地方气象台で公開されている旬ごとの平年値から設定した。各地点のその他の気

象データを表 5-3 に示す。

5.3. 浸透水量の評価

5.3.1. 土層条件

トレンチ処分施設の上部覆土内の土層構成は、4.2.1 項(2)の土層構成を設定した。土層構成を図 4-1 に、土層パラメータを表 4-4 に示す。なお 4 章の結果より、Model1 における遮水シートの状態は、遮水シートの遮水性の機能を最低限維持している poor とした。Model1 及び Model2 の低透水土壌層の透水係数は、上部覆土から廃棄体層への平均年間浸透水量が降雨から上部覆土への平均年間浸透水量の 1/100 以下及び 1/10 以下となる粘土にあたる値 (1×10^{-9} m/sec) とした。

葉面積指数は基本ケースの 2.5 の他に、文献 17) で記載されている畑地の最小葉面積指数である 1 及び最大葉面積指数である 5 を設定した。蒸発ゾーン深さは、Model1 及び Model2 の表層土は砂/砂質土を設定しているため、HELP コードに同梱しているマニュアル³⁾に記載されている砂/砂質土の蒸発ゾーン深さの最小値、中央値及び最大値である 10cm、30cm 及び 50cm を設定した。ケーススタディを実施する葉面積指数及び土壌中からの蒸発散を考慮する蒸発ゾーン深さを表 5-4 に示す。

5.3.2. 評価結果

各地点の種々の環境条件の評価結果を表 5-5 から表 5-7 に示す。表より、各地点の上部覆土から廃棄体層への浸透水量は、Model1 の全てのケースにおいて降雨から上部覆土への浸透水量の 1/100 以下となった。同様に Model2 の全てのケースにおいて、降雨から上部覆土への浸透水量の 1/10 以下となった。

各地点の葉面積指数及び蒸発ゾーン深さと年間平均降水量に対しての年間平均表面流出量、年間平均蒸発散量及び上部覆土への浸透水量との関係を図 5-12 から図 5-14 に示す。図より各地点とも、葉面積指数が大きくなるにつれて（トレンチ処分施設の植物が群生するにつれて）降水量に対する表面流出の割合は小さくなった。各地点とも、葉面積指数 5 のときの表面流出は葉面積指数 1 のときの 1/5 以下となった。これは、地表を植物で覆うと、植生は表面流出を遅くし上部覆土への浸透を促す効果があるため、葉面積指数が大きくなると表面流出量が小さくなる結果となっている。また、各地点ともに蒸発ゾーン深さが大きくなると蒸発散量が大きくなっている。具体的には、蒸発ゾーン深さが 50cm のときの蒸発散量は、蒸発ゾーン深さが 10cm のときの約 1.8 倍となっている。これは、蒸発ゾーン深さが大きく深くなることによって土中からの水分の蒸発を考慮する領域が多くなるためである。

葉面積指数毎の各地点における年間平均降水量と年間平均浸透水量の関係図を図 5-15 から図 5-17 に示す。図より各地点において、降雨から上部覆土への浸透水量が最低値となるのは表面流出が多く蒸発散量が多くなる条件（葉面積指数 1、蒸発ゾーン深さ 50cm）のときであり、降雨から上部覆土への浸透水量が最大値となるのは表面流出が少なく蒸発散量が少なくなる条件（葉面積指数 5、蒸発ゾーン深さ 10cm）のときであることが分かった。

上部覆土への年間平均浸透水量の変動幅は、年間平均降水量 1,260mm の A 地点では

270.8mm～847.3mm、年間平均降水量 1,875.3mm の B 地点では 390.0mm～1295.3mm、年間平均降水量 2427.3mm の C 地点では 509.6mm～1718.4mm となった。これより、各地点における上部覆土への年間平均浸透水量は、種々の環境条件により年間平均降水量の約 0.2 倍～約 0.7 倍の水量が上部覆土へ浸透していくことが分かった。これは、文献 18) で示されている土壌への浸透割合（蒸発散も含む）0.2～0.6 とほぼ整合しており、評価結果の妥当性を確認できた。

地点別では、日本の平均降水量地点及び最大降水量地点である B 地点及び C 地点の年間平均浸透水量は、A 地点と比較して B 地点では約 1.3 倍～1.7 倍となり、C 地点では約 1.6 倍～2.0 倍となり、年間平均浸透水量は年間降水量と概ね比例関係にあることが分かった。

また、上部覆土から廃棄体層への年間平均浸透水量は、Model1 では約 2mm～約 15mm となり、Model2 では約 30mm となることが分かった。これより、4 章の結果と同様に、上部覆土から廃棄体層への年間平均浸透水量は、Model1 では上部覆土への年間平均浸透水量の 1/100 以下となり、Model2 では上部覆土への年間平均浸透水量の 1/10 以下となることが分かり、廃棄体層への年間平均浸透水量は、覆土内に遮水シートや低透水土壌層及び横排水層を設置することによって、気象条件及びトレンチ処分施設の表層条件の影響は少ないことが分かった。

したがって、覆土内の遮水シートや低透水土壌層及び横排水層を適切に設置することにより、気象条件や表層条件に依存せずに廃棄体層への浸透水量を抑制することが可能であると考えられる。

6. 被ばく線量評価

トレンチ処分施設からの放射性物質の環境中への流出は、降雨が上部覆土へ浸透し、さらに上部覆土から廃棄体層へ浸透することに起因している。4章で評価した上部覆土から廃棄体層への浸透水量を入力条件として使用して、線量評価を行った。線量評価は、概念設計と同様にトレンチ処分施設から流出した放射性物質が土壤中へ移行し河川へ流入するモデルを想定し、放射性物質が流入した河川水を飲用するシナリオの線量を評価した。

6.1. 評価条件

6.1.1. 廃棄体層への浸透水量

廃棄体層への浸透水量は、4章の評価結果である表 4-7 から各土層モデルの年間平均浸透水量の最大値と最小値をそれぞれ選定した。なお、Model1 において遮水シートが劣化しており遮水機能を有していない状態の worst は選定対象外とした。よって、廃棄体層への年間平均浸透水量は、表 6-1 に示す 550mm、220mm、30mm 及び 4mm の 4 種類を設定した。

6.1.2. 評価対象核種

評価対象核種は、概念設計と同じ核種とした。核種の種類と放射能を表 6-2 に示す

6.1.3. 評価モデル及びパラメータ

概念設計と同じ評価モデル及びパラメータとした。評価モデルの概念を図 6-1 に示す。図 6-1 に示すように本評価では、降雨浸透水がトレンチ処分施設の廃棄体層に浸透することにより、廃棄体層から放射性物質が帯水層へ流出し、流出した放射性物質は帯水層中を移行して河川に流出するモデルであり、流出した放射性物質を含む河川水を飲用した場合の線量を求める。

河川水飲用の線量評価に用いる評価パラメータを表 6-3 に、元素依存パラメータを表 6-4 に、核種依存パラメータを表 6-5 に示す。

6.2. 評価コード

評価コードは、原子力機構で開発された GSA-GCL コード¹⁹⁾を使用した。GSA-GCL コードは、低レベル放射性廃棄物に対する 3 種類の処分方法（トレンチ処分、ピット処分、余裕深度処分）の濃度上限値評価のために開発されたコードであり、トレンチ処分及びピット処分の跡地利用に関する評価シナリオ（建設シナリオ、居住シナリオ）と、3 つの処分方法に共通な地下水による核種移行に関するシナリオに対する解析が可能である。

6.3. 評価結果

トレンチ処分施設から流出した放射性物質による環境影響中（河川飲用）の管理期間（50 年）終了後の最大線量を表 6-6 に、被ばく線量の経時変化を図 6-2 に示す。

概念設計で設定した廃棄体層への年間平均浸透水量（400mm）の最大被ばく線量と比較し

て、各ケースの管理期間終了後の最大被ばく線量は、case1 (500mm)では約 1.3 倍、case2 (220mm)では約 0.6 倍、case3 (30mm)では約 0.1 倍、case4 (4mm)では約 0.03 倍となった。概念設計で設定した土壤中の地下水流速が 100m/year と速く、トレンチ施設から河川までの距離が 100m であり、トレンチ施設から流出した放射性物質が帯水層から河川へ流入しやすい計算条件となっているため、最大被ばく線量と廃棄体層への浸透水量が比例関係になっていることが分かる。したがって、廃棄体層への浸透水量を小さくすることにより、埋設地の周辺環境における線量の低減が期待できると考えられる。

7. おわりに

本報告書では、国内の降水量、日射量、気温の気象データ及び地表面の植生等の条件を用いて、付加機能型トレンチ処分施設における降雨による上部覆土内への浸透水量及び上部覆土から廃棄体層への浸透水量の評価を実施した。また、求めた廃棄体層への浸透水量を使用して、トレンチ処分施設から流出した放射性物質が土壤中から河川へ移行し、放射性物質を含んだ河川水を飲用することによる被ばく線量を評価した。

評価にあたって、上部覆土内の土層構成は遮水シートを設置する層構成と遮水シートを設置しない層構成を想定し、上部覆土内の遮水シートの状態設定及び低透水土壌層の透水係数を変化させた。また、国内の気象条件及び上部覆土表層の植生状態と蒸発ゾーン深さを変化させた。被ばく線量評価では、概念設計で設定した評価モデル・パラメータを使用した。

評価結果として、降雨からの上部覆土内への浸透水量は、降水量が多い地点であるほど浸透水量が多くなるため、降水量と上部覆土内への浸透水量は比例関係にあることが分かった。また、上部覆土表層の植生状態及び蒸発ゾーン深さの影響により、上部覆土へは降水量の約 0.2 倍～0.7 倍の水量が浸透していくことが分かった。上部覆土から廃棄体層への浸透水量は、低透水土壌層の透水係数を粘土にあたる値を設定することで、上部覆土に遮水シート設置した場合では降雨から上部覆土への浸透水量の 1/100 以下(約 4mm/year)に、遮水シートが劣化した場合又は遮水シート設置しない場合では 1/10 以下(約 30mm/year)に低減できることが分かった。被ばく線量評価では、概念設計で設定した土壤中の地下水流速が 100m/year と速いため、廃棄体層への浸透水量の変動が、被ばく線量に大きく影響を与えることが分かった。

これらの結果から、付加機能型トレンチ処分施設から流出した放射性物質が土壤中から河川等へ移行した場合における被ばく線量を低減するには、廃棄体層への浸透水量を低減・抑制することが効果的であると考えられる。それには、付加機能型トレンチ処分施設の上部覆土内に遮水シート、低透水土壌層及び横排水層を設置することを検討することが必要であると考えられる。また、地点における気象条件及び上部覆土表層の植生状態と蒸発ゾーン深さにより、上部覆土内への浸透水量が変化するため、立地場所における気象データの設定、及び地域の植生状態と土壤の蒸発特性を適切に設定することが必要であるが、上部覆土内の層構成及び各層の透水性を適切に設計することで、廃棄体層への浸透水量に及ぼす影響を小さくできると考えられる。

今後の課題として、付加機能型トレンチ処分施設の浸透水量抑制のための機能検証試験や、上部覆土への浸透水の野外試験を行い、計算結果と比較することでコードの適用性を検討する必要がある。また、HELP コードの入力パラメータによる被ばく線量の評価に対する感度を確認し、評価における不確かさを把握することが重要である。

謝辞

本報告書を取りまとめるにあたり、貴重なご意見をいただいた宗像雅弘研究副主幹（安全研究センター環境影響評価グループ）に感謝いたします。また、HELP コードの調査・整備をしていただいた（株）ヴィジブルインフォメーションセンターの菅野光大氏、石崎修平氏、朝日良光氏、黒澤直弘氏に感謝いたします。

参考文献

- 1) 天澤弘也 他, 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) 建設産業調査会：“改訂 地下水ハンドブック”, (1998).
- 3) Schroeder, P.R. et al., “The Hydrologic Evaluation of Landfill Performance (HELP) Model”, EPA/600/R-94/168b, (1994), 128p
- 4) Waste Control Specialists LLC.：“APPLICATION FOR LICENSE TO AUTHORIZE NEAR-SURFACE LAND DISPOSAL OF LOW-LEVEL RADIOACTIVE WASTE Revision 12a”, (2007).
- 5) US Army Corps of Engineers：“Environmental Laboratory”, (online) available from <<http://el.erdc.usace.army.mil/products.cfm?Topic=model&Type=landfill>>(accessed on 2014-01-17).
- 6) Caskey J. E., “A Markov chain model for the probability of precipitation occurrence in intervals of various lengths”, Monthly Weather Rev. vol.91, (1963), pp.298-301.
- 7) Matalas, N.C. “Mathematical assessment of synthetic hydrology Waste Resources Research”, vol.3, no. 4, (1967), pp.937-945.
- 8) Richardson, C.W. et al., “WGEN: A Model for Generating Daily Weather Variables”, United States Department of Agriculture, (1984).
- 9) Richardson, C.W. et al., “Stochastic Simulation of Daily Precipitation, Temperature, and Solar Radiation”, Water Resources Research, vol.17, no.1, (1981), pp.182-190.
- 10) USDA, Soil Conservation Service.：“National engineering handbook, section 4, hydrology”, US Government Printing Office, Washington D.C., (1985).
- 11) Forchheimer, P.：“Hydraulik. 3rd ed”, Teuber, Leipzig and Berlin, (1930).
- 12) 全国都市清掃会議：“廃棄物最終処分場整備の計画・設計要領”, (2001).
- 13) 農業環境技術研究所：“農業環境情報データセンター(gamsDB)”, (online) available from <<http://agrienv.dc.affrc.go.jp/>>(accessed on 2014-01-17).
- 14) 日本遮水工協会：“遮水シート（自主）規格解説”, 技術部会設計耐久性分科会, (1998).
- 15) 原子力安全委員会：“主な原子炉施設におけるクリアランスレベルについて”, (1999).
- 16) 青森県「攻めの農林水産業」推進本部：“「健康な土づくり」技術マニュアル～環境にやさしい農業の拡大をめざして～”, (2008).
- 17) 石井孝：“衛星データを用いた森林の葉面積指数の推定および炭素固定量の算定と水収支解析への応用”, (2007).
- 18) 登坂博行：“地下水循環の水理”, 東京大学出版会, p.64, (2006).
- 19) 武田聖司 他, 低レベル放射性廃棄物処分に対する濃度上限値評価コード GSA-GCL 第2版の開発, JAEA-Data/Code 2011-008, (2001), 166p.
- 20) IAEA：“Handbook of Parameter Values for the Prediction of Radionuclide Transfer in Temperate Environments”, IAEA Technical Reports Series No.364 (1994).
- 21) IAEA：“Generic of Models and Parameters for Assessing the Environmental Transfer of Radionuclides from Routine Releases”, IAEA Safety Series No.57(1985).
- 22) IAEA：“Exemption of Radiation Sources and Practices from Regulatory Control – INTERIM REPORT”, IAEA-TECDOC-401 (1987).
- 23) 日本原子力研究開発機構：“日本原子力研究所東海研究所廃棄物埋設事業許可申請書”, 平成5年10月.
- 24) 日本原子力学会：“極めて放射能レベルの低い放射性廃棄物処分の安全評価手法：2006”, 2006.

- 25) C. F. Baes III, R. D. Sharp, A. L. Sjoreen, R.W. Shor : “A Review and Analysis of Parameters for Assessing Transport of Environmentally Released Radionuclides through Agriculture”, ORNL-5786(1984).
- 26) ICRP: “Age-dependent Doses to the Members of the Public from Intake of Radionuclides: Part 5. Compilation of Ingestion and Inhalation Coefficients” , ICRP Publication 72, (1996).

表 3-1 SYNGEN の入力パラメータとなる
実気象データから作成した統計情報

	パラメータ	
	単位	内容
降水量	mm	月別の平均降水量
	—	月別の前日が雨で翌日は晴れの確率
	—	月別の前日が雨で翌日は晴れの確率
	—	月別のガンマ分布の分布形状パラメータ
	—	月別のガンマ分布のスケールパラメータ
気温	°C	月平均気温
	°C	年間で降水無しの日の最高気温の平均
	°C	年間で降水有りの日の最高気温の平均
	°C	年間の最低気温の平均
	°C	1日当たりの最高気温の年変動幅
	°C	1日当たりの最低気温の年変動幅
	—	1日当たりの最高気温の共分散
	—	1日当たりの最高気温の共分散の振幅
	—	1日当たりの最低気温の共分散の振幅
日射量	MJ/m ²	年間で降水無しの日の日射量の平均
	MJ/m ²	年間で降水有りの日の日射量の平均
	MJ/m ²	降水無しの日の日射量の年変動幅

表 3-2 HELP における土層のセグメント分割方法

レイヤ タイプ	セグメント数	セグメント分割方法
蒸発ゾーン深さ	7	最上部のセグメントは、蒸発ゾーンの 1/36 と設定 2 番目のセグメントは、蒸発ゾーンの 5/36 と設定 3~7 番目のセグメントは、蒸発ゾーンの 1/6 と設定
垂直浸透層	最大 3	①層厚さ ≤ 45.72cm → 1 セグメントを割り当て ②45.72cm < 層厚さ ≤ 91.44cm → 2 セグメントに分割 ・層の上部が 30.48cm のセグメント ・残りの下部の 1 セグメント
横排水層	最大 3	③91.44cm < 層厚さ → 3 セグメントに分割 ・層の上部が 30.48cm のセグメント ・層の下部が 30.48cm のセグメント ・層の上下部を除いた中部が 1 セグメント
バリア土壌層	1	セグメントに分割せず、1 セグメントが割り当て
遮水シート	1	

表 3-3 処分施設の植生状態における回帰係数

処分施設の 植生状態	葉面積指数	C_0	C_1	C_2
Bare Ground	1.0	96.77	-20.80	-54.94
Poor Ground	2.0	93.51	-24.85	-71.92
Fair Ground	3.0	90.09	-23.73	-158.4
Good Ground	4.0	86.72	-43.98	-151.2
Excellent Ground	5.0	83.83	-26.91	-229.4

表 3-4 HELP における層の透水係数の区分

透水性	透水係数の区分
高透水性	$1 \times 10^{-3} \text{ m/sec} \leq \text{透水係数}^*$
中透水性	$1 \times 10^{-6} \text{ m/sec} \leq \text{透水係数}^* < 1 \times 10^{-3} \text{ m/sec}$
低透水性	$\text{透水係数}^* < 1 \times 10^{-6} \text{ cm/sec}$

※ ユーザが設定した層の透水係数(m/sec)

表 3-5 湿潤面積または界面流の半径を求める場合に使用する x、y、z の係数

遮水シートの傷	遮水シートと下層の接触状態	x	y	z
穴	excellent (下層が中透水性)	0.38	0.38	-0.25
	excellent (下層が低透水性)	0.05	0.5	-0.06
	good	0.05	0.45	-0.13
	poor	0.05	0.45	-0.13
設置不具合	excellent (下層が中透水性)	0.38	0.38	-0.25
	excellent (下層が低透水性)	0.05	0.5	-0.06
	good	0.05	0.45	-0.13
	poor	0.05	0.45	-0.13

表 4-1 土壌パラメータの感度解析ケース表

case	土層	遮水シート の状態	粘土層の透水係数 (m/sec)
1	土層 Modell	perfect	1.E-05
2			1.E-06
3			1.E-07
4			1.E-08
5			1.E-09
6		good	1.E-05
7			1.E-06
8			1.E-07
9			1.E-08
10			1.E-09
11		poor	1.E-05
12			1.E-06
13			1.E-07
14			1.E-08
15			1.E-09
16		worst	1.E-05
17			1.E-06
18			1.E-07
19			1.E-08
20			1.E-09
21	土層 Model2	—	1.E-05
22			1.E-06
23			1.E-07
24			1.E-08
25			1.E-09

表 4-2 A 地点の実気象データと疑似気象データの比較

	実気象データ (32 年間)	疑似気象データ (100 年間)
年間降水量(mm)	1234.7	1264.1
年間平均気温(°C)	13.6	13.5
年間平均日射量(MJ/m ²)	12.4	12.6

表 4-3 A 地点のその他の気象データ

気象パラメータ	入力値
平均風速(km/h)	7.9
植物生育期の開始日※	104
植物生育期の終了日※	310
第 1 期相対湿度(%)	65.0
第 2 期相対湿度(%)	75.7
第 3 期相対湿度(%)	81.7
第 4 期相対湿度(%)	74.3

※ A 地点の気象台に記載されている霜の終日及び初日を設定

表 4-4 土壌パラメータ (基本ケース)

No.	層	レイヤタイプ	パラメータ		根拠
			パラメータ	値	
1	土壌層	1	空隙率(-)	0.3	原子炉CL報告書 ¹⁵⁾ から設定 「健康な土づくり」技術マニュアル ¹⁶⁾ 「健康な土づくり」技術マニュアル 廃棄物最終処分場整備の計画・設計要領 ¹²⁾ 記載；表 4.3-1 の砂から設定
			圃場容水量(-)	0.117	
			しおれ点(-)	0.091	
			透水係数(m/sec)	1.E-04	
			空隙率(-)	0.417	
2	横排水層	2	圃場容水量(-)	0.021	HELPコードから設定 HELPコードから設定 HELPコードから設定 排水層のため、土壌層の透水係数の10倍の値を設定 概念設計：トレンチ処分施設の短辺の半分の長さを設定 WCSの土層構成から設定
			しおれ点(-)	0.015	
			透水係数(m/sec)	1.E-03	
			最大排水長さ(m)	100	
			排水勾配(-)	4%	
3	遮水シート	4	空隙率(-)	0	HELPコードから設定 HELPコードから設定 HELPコードから設定 遮水工協会による遮水シートの透水係数の基準値から設定 HELPコード：poorの状態を設定 HELPコード：poorの状態を設定 HELPコードから設定、遮水シートの機能を最低限維持している状態を使用 原子炉CL報告書から設定
			圃場容水量(-)	0	
			しおれ点(-)	0	
			透水係数(cm/sec)	1.E-09	
			ピンホール密度(個/ha)	25	
4	低透水土壌層	3	設置不備(個/ha)	25	原子炉CL報告書から設定 「健康な土づくり」技術マニュアル 「健康な土づくり」技術マニュアル 廃棄物最終処分場整備の計画・設計要領 ¹²⁾ 記載；表 4.3-1 の粘質土から設定 原子炉CL報告書から設定 「健康な土づくり」技術マニュアル 「健康な土づくり」技術マニュアル
			遮水シートの状態	poor	
			空隙率(-)	0.3	
			圃場容水量(-)	0.263	
			しおれ点(-)	0.180	
5	廃棄体層	1	透水係数(m/sec)	1.E-07	廃棄物最終処分場整備の計画・設計要領 ¹²⁾ 記載；表 4.3-1 の粘質土から設定 原子炉CL報告書から設定 「健康な土づくり」技術マニュアル 「健康な土づくり」技術マニュアル 廃棄物最終処分場整備の計画・設計要領 ¹²⁾ 記載；表 4.3-1 の砂から設定
			空隙率(-)	0.3	
			圃場容水量(-)	0.117	
			しおれ点(-)	0.091	
			透水係数(m/sec)	1.E-04	

表 4-5 トレンチ処分施設の環境状態 (基本ケース)

パラメータ		根拠
蒸発ゾーン深さ(cm)	30	HELP コード(1)に同梱しているマニュアル ³⁾ より、砂/砂質土の蒸発ゾーン深さ(約10cm~50cm)の中央値を設定
葉面積指数(-)	2.5	「衛星データを用いた森林の葉面積指数の推定および炭素固定量の算定と水収支解析への応用 ¹⁷⁾ 」より畑地/牧草地(1~5)の中央値から設定

表 4-6 感度解析を実施する土壌パラメータ

層	パラメータ	根拠	
遮水シート層 (ModeII の場合)	遮水シートの状態	perfect	HELP ライブラリから設定
		good	
		poor	
		worst	
		1.E-05	
低透水土壌層	透水係数(m/sec)	1.E-06	廃棄物最終処分場整備の計画・設計要領：砂質土から粘土の透水係数を設定
		1.E-07	
		1.E-08	
		1.E-09	

表 4-7 疑似気象ケースの評価結果

case	気象条件	土層	遮水シート の状態	透水係数 (m/sec)	年間平均水量 (mm)					
					降水量	表面流出	蒸発散量	上部覆土： 浸透水量	横排水量	廃棄体層： 浸透水量
1	疑似気象 ケース	土層 Model1	perfect	1.E-05	1264.0	85.5	627.8	550.7	545.8	4.6
2				1.E-06	1264.0	85.5	627.8	550.7	546.4	4.0
3				1.E-07	1264.0	85.5	627.8	550.7	546.4	4.0
4				1.E-08	1264.0	85.5	627.8	550.7	546.5	4.0
5			1.E-09	1264.0	85.5	627.8	550.7	546.5	4.0	
6			1.E-05	1264.0	85.5	627.8	550.7	486.6	63.9	
7			1.E-06	1264.0	85.5	627.8	550.7	534.6	15.8	
8			1.E-07	1264.0	85.5	627.8	550.7	544.3	6.1	
9			1.E-08	1264.0	85.5	627.8	550.7	546.1	4.3	
10			1.E-09	1264.0	85.5	627.8	550.7	546.4	4.0	
11		1.E-05	1264.0	85.5	627.8	550.7	322.6	228.4		
12		1.E-06	1264.0	85.5	627.8	550.7	486.8	63.7		
13		1.E-07	1264.0	85.5	627.8	550.7	534.6	15.7		
14		1.E-08	1264.0	85.5	627.8	550.7	544.3	6.1		
15		1.E-09	1264.0	85.5	627.8	550.7	546.1	4.3		
16		1.E-05	1264.0	85.5	627.8	550.7	43.0	508.1		
17		1.E-06	1264.0	85.5	627.8	550.7	43.0	508.1		
18		1.E-07	1264.0	85.5	627.8	550.7	49.6	501.4		
19		1.E-08	1264.0	85.5	627.8	550.7	301.0	250.0		
20		1.E-09	1264.0	85.5	627.8	550.7	516.9	33.4		
21		1.E-05	1264.0	85.5	627.8	550.7	0.5	550.5		
22		1.E-06	1264.0	85.5	627.8	550.7	4.7	546.3		
23		1.E-07	1264.0	85.5	627.8	550.7	63.0	488.0		
24		1.E-08	1264.0	85.5	627.8	550.7	327.1	223.8		
25		1.E-09	1264.0	85.5	627.8	550.7	518.2	31.9		

表 4-8 降水量固定ケースの評価結果

case	気象条件	土層	遮水シート の状態	透水係数 (m/sec)	年間平均水量 (mm)					廃棄体層： 浸透水量
					降水量	表面流出	蒸発散量	上部覆土： 浸透水量	横排水量	
1	降水量固定 ケース	土層 Model1	perfect	1.E-05	401.8	0.0	0.0	401.8	397.9	3.2
2				1.E-06	401.8	0.0	0.0	401.8	398.4	2.8
3				1.E-07	401.8	0.0	0.0	401.8	398.4	2.7
4				1.E-08	401.8	0.0	0.0	401.8	398.4	2.7
5				1.E-09	401.8	0.0	0.0	401.8	398.4	2.7
6			1.E-05	401.8	0.0	0.0	401.8	352.3	48.9	
7			1.E-06	401.8	0.0	0.0	401.8	389.2	11.9	
8			1.E-07	401.8	0.0	0.0	401.8	396.7	4.4	
9			1.E-08	401.8	0.0	0.0	401.8	398.1	3.0	
10			1.E-09	401.8	0.0	0.0	401.8	398.3	2.8	
11		1.E-05	401.8	0.0	0.0	401.8	228.0	173.7		
12		1.E-06	401.8	0.0	0.0	401.8	352.4	48.8		
13		1.E-07	401.8	0.0	0.0	401.8	389.2	11.8		
14		1.E-08	401.8	0.0	0.0	401.8	396.7	4.4		
15		1.E-09	401.8	0.0	0.0	401.8	398.1	3.0		
16		1.E-05	401.8	0.0	0.0	401.8	14.6	387.2		
17		1.E-06	401.8	0.0	0.0	401.8	14.6	387.2		
18		1.E-07	401.8	0.0	0.0	401.8	14.6	387.2		
19		1.E-08	401.8	0.0	0.0	401.8	83.5	318.2		
20		1.E-09	401.8	0.0	0.0	401.8	368.3	32.8		
21		1.E-05	401.8	0.0	0.0	401.8	0.0	401.7		
22		1.E-06	401.8	0.0	0.0	401.8	0.3	401.5		
23		1.E-07	401.8	0.0	0.0	401.8	2.5	399.2		
24		1.E-08	401.8	0.0	0.0	401.8	85.8	315.9		
25		1.E-09	401.8	0.0	0.0	401.8	369.2	31.7		

表 4-9 実気象ケースの評価結果

case	気象条件	土層	遮水シート の状態	透水係数 (m/sec)	年間平均水量 (mm)					廃棄体層： 浸透水量
					降水量	表面流出	蒸発散量	上部覆土： 浸透水量	横排水量	
1	実気象 データ	土層 Model1	perfect	1.E-05	1236.0	131.0	592.3	512.7	507.5	2.9
2				1.E-06	1236.0	131.0	592.3	512.7	508.0	2.3
3				1.E-07	1236.0	131.0	592.3	512.7	508.1	2.3
4				1.E-08	1236.0	131.0	592.3	512.7	508.1	2.3
5				1.E-09	1236.0	131.0	592.3	512.7	508.1	2.3
6				1.E-05	1236.0	131.0	592.3	512.7	452.1	58.2
7				1.E-06	1236.0	131.0	592.3	512.7	497.0	13.1
8				1.E-07	1236.0	131.0	592.3	512.7	506.0	4.3
9				1.E-08	1236.0	131.0	592.3	512.7	507.7	2.6
10			1.E-09	1236.0	131.0	592.3	512.7	508.0	2.3	
11			1.E-05	1236.0	131.0	592.3	512.7	299.3	212.7	
12			1.E-06	1236.0	131.0	592.3	512.7	452.4	58.0	
13			1.E-07	1236.0	131.0	592.3	512.7	497.0	13.1	
14			1.E-08	1236.0	131.0	592.3	512.7	506.0	4.2	
15			1.E-09	1236.0	131.0	592.3	512.7	507.7	2.6	
16			1.E-05	1236.0	131.0	592.3	512.7	39.5	472.8	
17			1.E-06	1236.0	131.0	592.3	512.7	39.5	472.8	
18			1.E-07	1236.0	131.0	592.3	512.7	46.1	466.2	
19			1.E-08	1236.0	131.0	592.3	512.7	272.1	240.1	
20			1.E-09	1236.0	131.0	592.3	512.7	478.4	32.0	
21			1.E-05	1236.0	131.0	592.3	512.7	0.5	511.9	
22			1.E-06	1236.0	131.0	592.3	512.7	4.4	507.9	
23			1.E-07	1236.0	131.0	592.3	512.7	59.4	452.9	
24			1.E-08	1236.0	131.0	592.3	512.7	298.2	214.1	
25			1.E-09	1236.0	131.0	592.3	512.7	479.9	30.2	

表 5-1 種々の環境条件の感度解析ケース表

case	評価地点	土層	遮水シートの状態	土壌の透水係数 (m/sec)	葉面積指数 (-)	蒸発ゾーン深さ (cm)
1	A 地点	Model1	poor	1.E-09	1	10
2						30
3						50
4					2.5	10
5						30
6						50
7					5	10
8						30
9						50
10		Model2	-	1.E-09	1	10
11						30
12						50
13					2.5	10
14						30
15						50
16					5	10
17						30
18						50
19	B 地点	Model1	poor	1.E-09	1	10
20						30
21						50
22					2.5	10
23						30
24						50
25					5	10
26						30
27						50
28		Model2	-	1.E-09	1	10
29						30
30						50
31					2.5	10
32						30
33						50
34					5	10
35						30
36						50
37	C 地点	Model1	poor	1.E-09	1	10
38						30
39						50
40					2.5	10
41						30
42						50
43					5	10
44						30
45						50
46		Model2	-	1.E-09	1	10
47						30
48						50
49					2.5	10
50						30
51						50
52					5	10
53						30
54						50

※ 土層 Model1：低透水土壌層を対象、土層 Model2：粘土層を対象

表 5-2 各地点の実気象データと疑似気象データの比較

	実気象データ (32 年間)			疑似気象データ (100 年間)		
	A 地点	B 地点	C 地点	A 地点	B 地点	C 地点
年間降水量(mm)	1234.7	1838.1	2399.3	1264.1	1875.3	2427.3
年間平均気温(°C)	13.6	15.6	17.1	13.5	15.6	17.1
年間平均日射量(MJ/m ²)	12.4	13.1	13.8	12.6	13.3	14.2

表 5-3 各地点のその他の気象データ

	A 地点	B 地点	C 地点
平均風速(km/h)	7.9	9.0	11.5
植物生育期の開始日	104	93	77
植物生育期の終了日	310	324	331
第 1 期相対湿度(%)	65.0	63.3	66.7
第 2 期相対湿度(%)	75.7	65.3	75.0
第 3 期相対湿度(%)	81.7	71.7	78.3
第 4 期相対湿度(%)	74.3	67.3	72.7

表 5-4 感度解析を実施するトレンチ処分施設の環境状態

パラメータ	根拠	
蒸発ゾーン深さ (cm)	10	HELP コードに同梱しているマニュアル ³⁾ より、砂/砂質土の蒸発ゾーン深さの最小値、中央値、最大値を設定
	20	
	50	
葉面積指数(-)	1	「衛星データを用いた森林の葉面積指数の推定および炭素固定量の算定と水収支解析への応用 ¹⁷⁾ 」より、畑地(牧草地を含む)の最小値、中央値、最大値を設定
	2.5	
	5	

表 5-5 A 地点：種々の環境条件の感度解析結果

case	評価地点	土層	遮水シート の状態	透水係数 (m/sec)	葉面積 指数 (-)	蒸発ゾーン 深さ (cm)	年間平均水量 (mm)				廃棄体層： 浸透水量	
							降水量	表面流出	蒸発 散量	上部覆土： 浸透水量		横排水量
1	A 地点	Model1	poor	1.E-09	1	10	1264.0	304.3	387.7	572.0	567.2	4.5
2						30	1264.0	314.8	637.7	311.5	309.0	2.2
3						50	1264.0	325.4	667.8	270.8	268.6	1.9
4					2.5	10	1264.0	82.8	386.9	794.3	787.5	6.5
5						30	1264.0	85.5	627.8	550.7	546.1	4.3
6						50	1264.0	91.1	680.3	492.6	488.5	3.8
7					5	10	1264.0	24.6	392.1	847.3	840.0	7.0
8						30	1264.0	24.7	621.6	617.7	612.5	4.9
9						50	1264.0	26.5	681.3	556.2	551.5	4.4
10		Model2	-	1.E-09	1	10	1264.0	304.3	387.7	572.0	539.4	32.1
11						30	1264.0	314.8	637.7	311.5	279.9	31.1
12						50	1264.0	325.4	667.8	270.8	239.5	30.6
13					2.5	10	1264.0	82.8	386.9	794.3	761.1	32.7
14						30	1264.0	85.5	627.8	550.7	518.2	31.9
15						50	1264.0	91.1	680.3	492.6	460.6	31.4
16					5	10	1264.0	24.6	392.1	847.3	814.1	32.8
17						30	1264.0	24.7	621.6	617.7	585.1	32.0
18						50	1264.0	26.5	681.3	556.2	523.9	31.6

表 5-6 B 地点：種々の環境条件の感度解析結果

case	評価地点	土層	遮水シート の状態	透水係数 (m/sec)	葉面積 指数 (-)	蒸発ゾーン 深さ (cm)	年間平均水量 (mm)				廃棄体層： 浸透水量	
							降水量	表面流出	蒸発 散量	上部覆土： 浸透水量		横排水量
19	B 地点	Model1	poor	1.E-09	1	10	1875.3	611.7	492.4	771.2	764.5	6.3
20						30	1875.3	623.0	801.1	451.2	447.5	3.5
21						50	1875.3	640.2	845.1	390.0	386.8	2.9
22					10	1875.3	217.9	491.4	1166.0	1155.8	9.8	
23					30	1875.3	219.3	783.5	872.5	865.0	7.2	
24					50	1875.3	229.1	863.1	783.2	776.5	6.4	
25					10	1875.3	83.3	496.7	1295.3	1284.0	11.0	
26		30	1875.3	81.2	773.7	1020.4	1011.6	8.5				
27		50	1875.3	84.6	868.6	922.2	914.2	7.7				
28		10	1875.3	611.7	492.4	771.2	738.1	32.6				
29		30	1875.3	623.0	801.1	451.2	419.1	31.7				
30		50	1875.3	640.2	845.1	390.0	358.2	31.3				
31		10	1875.3	217.9	491.4	1166.0	1131.9	33.7				
32		30	1875.3	219.3	783.5	872.5	839.2	32.9				
33	50	1875.3	229.1	863.1	783.2	750.1	32.6					
34	10	1875.3	83.3	496.7	1295.3	1260.9	34.0					
35	30	1875.3	81.2	773.7	1020.4	986.7	33.2					
36	50	1875.3	84.6	868.6	922.2	888.8	32.9					

表 5-7 C地点：種々の環境条件の感度解析結果

case	評価地点	土層	遮水シート の状態	透水係数 (m/sec)	葉面積 指数 (-)	蒸発ゾーン 深さ (cm)	年間平均水量 (mm)				廃棄体層： 浸透水量		
							降水量	表面流出	蒸発 散量	上部覆土： 浸透水量		横排水量	
37	C地点	Model1	poor	1.E-09	1	10	2427.3	1002.5	498.2	926.6	918.7	7.7	
38						30	2427.3	1015.0	829.5	582.8	578.0	4.6	
39						50	2427.3	1035.7	882.0	509.6	505.4	4.0	
40					2.5	10	2427.3	440.2	497.4	1489.6	1476.7	12.7	
41						30	2427.3	442.8	807.7	1176.9	1166.8	9.9	
42						50	2427.3	457.9	903.4	1066.0	1057.0	8.9	
43						5	10	2427.3	208.8	500.2	1718.4	1703.5	14.6
44		30	2427.3	205.7	800.9		1420.6	1408.4	12.0				
45		50	2427.3	212.3	911.4		1303.6	1292.5	10.9				
46		Model2	-	1.E-09	1	10	2427.3	1002.5	498.2	926.6	893.2	33.0	
47						30	2427.3	1015.0	829.5	582.8	550.4	32.0	
48						50	2427.3	1035.7	882.0	509.6	477.5	31.6	
49						2.5	10	2427.3	440.2	497.4	1489.6	1454.8	34.5
50							30	2427.3	442.8	807.7	1176.9	1142.9	33.6
51	50						2427.3	457.9	903.4	1066.0	1032.6	33.3	
52	5					10	2427.3	208.8	500.2	1718.4	1683.0	35.1	
53		30	2427.3	205.7	800.9	1420.6	1386.0	34.3					
54		50	2427.3	212.3	911.4	1303.6	1269.6	33.7					

表 6-1 廃棄体層への浸透水量

case	廃棄体層への 年間平均浸透水量 (mm/year)	備考
1	550	Model2 の上部覆土から廃棄体層への年間平均浸透水量の最大値
2	220	Model1 の上部覆土から廃棄体層への年間平均浸透水量の最大値
3	30	Model2 の上部覆土から廃棄体層への年間平均浸透水量の最低値
4	4	Model1 の上部覆土から廃棄体層への年間平均浸透水量の最低値

表 6-2 概念設計で設定された核種と放射能インベントリ

No.	核種名	半減期 (年)	インベントリ (Bq)	No.	核種名	半減期 (年)	インベントリ (Bq)
1	H-3	1.2E+01	1.5E+12	28	Po-210 ^{*)}	3.8E-01	0.0E+00
2	Be-10	1.5E+06	1.0E+07	29	Ra-226	1.6E+03	2.0E+02
3	C-14	5.7E+03	1.5E+10	30	Ra-228	5.8E+00	3.4E+07
4	Al-26	7.2E+05	1.2E+07	31	Ac-227	2.2E+01	1.3E+03
5	Cl-36	3.0E+05	2.3E+08	32	Th-228 ^{*)}	1.9E+00	0.0E+00
6	Ca-41	1.0E+05	4.2E+08	33	Th-229	7.3E+03	1.9E+02
7	Co-60	5.3E+00	1.9E+12	34	Th-230	7.5E+04	2.3E+04
8	Ni-59	1.0E+05	2.4E+09	35	Th-232	1.4E+10	9.9E+04
9	Ni-63	1.0E+02	3.5E+11	36	Pa-231	3.3E+04	3.2E+03
10	Se-79	3.0E+05	1.6E+05	37	U-232	6.9E+01	1.3E+07
11	Sr-90	2.9E+01	1.2E+10	38	U-233	1.6E+05	3.2E+05
12	Zr-93	1.5E+06	1.4E+06	39	U-234	2.5E+05	3.8E+09
13	Nb-94	2.0E+04	2.5E+07	40	U-235	7.0E+08	1.7E+08
14	Mo-93	4.0E+03	7.5E+07	41	U-236	2.3E+07	8.6E+07
15	Tc-99	2.1E+05	7.8E+08	42	U-238	4.5E+09	3.2E+09
16	Ag-108m	4.2E+02	2.2E+08	43	Np-237	2.1E+06	8.9E+05
17	Cd-113m	1.4E+01	1.0E+07	44	Pu-238	8.8E+01	4.2E+08
18	Sn-126	2.3E+05	1.4E+06	45	Pu-239	2.4E+04	3.3E+08
19	I-129	1.6E+07	4.1E+03	46	Pu-240	6.6E+03	2.2E+08
20	Cs-135	2.3E+06	3.8E+06	47	Pu-241	1.4E+01	3.3E+07
21	Cs-137	3.0E+01	6.4E+10	48	Pu-242	3.8E+05	7.3E+05
22	Ba-133	1.1E+01	2.5E+09	49	Am-241	4.3E+02	5.1E+09
23	Eu-152	1.4E+01	2.5E+10	50	Am-242m	1.4E+02	1.3E+06
24	Eu-154	8.6E+00	3.6E+09	51	Am-243	7.4E+03	5.2E+06
25	Ho-166m	1.2E+03	3.2E+06	52	Cm-243	2.9E+01	5.8E+06
26	Hf-182	9.0E+06	2.7E+04	53	Cm-244	1.8E+01	6.9E+08
27	Pb-210	2.2E+01	6.2E+01	54	Cm-245	8.5E+03	5.1E+04

*) 初期インベントリがゼロの核種は埋設処分後、親核種の崩壊連鎖で生成される子孫核種。上記の2核種以外は、線量換算係数で他の系列核種に含まれている。

表 6-3 被ばく線量評価に使用した評価パラメータ

区分	評価パラメータ	設定値	単位	根拠
埋設施設	施設形状	P埋設地：200×400×4 S埋設地：400×200×4	m ³	概念設計の施設の配置設計から設定。
	施設条件： トレンチ処分			
	廃棄体：真密度	2600	kg/m ³	帯水層土壌の真密度と同じとする。
	廃棄体：間隙率	0.3	—	帯水層土壌の間隙率と同じとする。
	廃棄体：分配係数	表 6-4 参照	m ³ /kg	帯水層土壌の分配係数と同じとする。
	施設浸透水量	400	mm/y	原子炉 CL 報告書を参考にする。
	真密度	2600	kg/m ³	原子炉 CL 報告書を参考にする。
	間隙率	0.3	—	原子炉 CL 報告書を参考にする。
	分配係数	表 6-4 参照	m ³ /kg	帯水層土壌の分配係数を参考にする。
	地下水流速(ダルシー流速)	100	m/y	概念設計の地下水流動解析の結果から設定する。
天然バリア 及び 自然環境	厚さ	2	m	季節変動を考慮した土壌層中の地下水位が岩盤面から 2m に達することから、2m に設定する。
	流水方向の分散長	0	m	原子炉 CL 報告書を参考にする。
	河川水流量	1.0×10 ⁸	m ³ /y	原子炉 CL 報告書を参考にする。
	河川までの距離	100	m	原子炉 CL 報告書を参考にする。
	人の年間飲料水摂取量	0.61	m ³ /y	原子炉 CL 報告書を参考にする。
人間活動				

表 6-4 元素依存パラメータ：トレンチ施設、帯水層土壌の分配係数

元素名	選定値 (m ³ /kg)	選定根拠
H	0.00E+00	IAEA-TECDOC-401
Be	2.40E-01	IAEA TRS 364(砂)
C	2.00E-03	IAEA-TECDOC-401
Al	1.50E+00	ORNL-5786 (VLLW 学会標準)
Cl	1.00E-03	Iと同じ値に設定
Ca	9.00E-03	IAEA TRS 364(砂)
Co	6.00E-02	IAEA TRS 364(砂)
Ni	4.00E-01	IAEA TRS 364(砂)
Se	1.50E-01	IAEA TRS 364(砂)
Sr	1.30E-02	IAEA TRS 364(砂)
Zr	6.00E-01	IAEA TRS 364(砂)
Nb	1.60E-01	IAEA TRS 364(砂)
Mo	7.40E-03	IAEA TRS 364(砂)
Tc	1.40E-04	IAEA TRS 364(砂)
Ag	9.00E-02	IAEA TRS 364(砂)
Cd	7.40E-02	IAEA TRS 364(砂)
Sn	1.30E-01	IAEA TRS 364(砂)
I	1.00E-03	IAEA TRS 364(砂)
Cs	2.70E-01	IAEA TRS 364(砂)
Ba	6.00E-02	ORNL-5786 (VLLW 学会標準)
Eu	3.10E-02	原研事業許可申請書
Ho	2.40E-01	IAEA TRS 364(砂)
Hf	4.50E-01	IAEA TRS 364(砂)
Pb	2.70E-01	IAEA TRS 364(砂)
Po	1.50E-01	IAEA TRS 364(砂)
Ra	4.90E-01	IAEA TRS 364(砂)
Ac	4.50E-01	IAEA TRS 364(砂)
Th	3.00E+00	IAEA TRS 364(砂)
Pa	5.40E-01	IAEA TRS 364(砂)
U	3.30E-02	IAEA TRS 364(砂)
Np	4.10E-03	IAEA TRS 364(砂)
Pu	5.40E-01	IAEA TRS 364(砂)
Am	2.00E+00	IAEA TRS 364(砂)
Cm	4.00E+00	IAEA TRS 364(砂)
設定手順：①IAEA-TRS-364 ²⁰⁾ から砂の値を設定 ②IAEA S.S No.57 ²¹⁾ ③IAEA-TECDOC-401 ²²⁾ ④上記文献に記載がない元素の設定は下記のとおり Eu：原研事業許可申請書 ²³⁾ Cl：化学的類似性を考慮して I と同じ値に設定 Al 及び Ba：VLLW 学会標準 ²⁴⁾ を参考にし、ORNL-5786 ²⁵⁾ より設定		

表 6-5 核種依存パラメータ：内部被ばく線量換算係数

核種名	ICRP Pub.72 ²⁶⁾ (Sv/Bq)	放射平衡を仮定 した子孫核種	核種名	ICRP Pub.72 (Sv/Bq)	放射平衡を仮定 した子孫核種
	経口			経口	
H-3	4.2E-11		Ra-226	2.8E-07	
Be-10	1.1E-09		Ra-228	6.9E-07	Rn-222,Po-218,At-218, Rn-218,Pb-214,Bi-214, Po-214,Tl-210
C-14	5.8E-10		Ac-227	1.1E-06	Ac-228,Fr-224
Al-26	3.5E-09		Th-228	1.4E-07	Fr-223,At-219
Cl-36	9.3E-10		Th-229	4.9E-07	Ra-224,Rn-220,Po-216, Pb-212,Bi-212,Po-212, Tl-208
Ca-41	1.9E-10		Th-230	2.1E-07	
Co-60	3.4E-09		Th-232	2.3E-07	
Ni-59	6.3E-11		Pa-231	7.1E-07	
Ni-63	1.5E-10		U-232	3.3E-07	
Se-79	2.9E-09		U-233	5.1E-08	
Sr-90	3.1E-08	Y-90	U-234	4.9E-08	
Zr-93	1.1E-09		U-235	4.7E-08	
Nb-94	1.7E-09		U-236	4.7E-08	Th-231
Mo-93	3.2E-09	Nb-93m	U-238	4.5E-08	
Tc-99	6.4E-10		Np-237	1.1E-07	
Ag-108m	2.3E-09	Ag-108	Pu-238	2.3E-07	
Cd-113m	2.3E-08		Pu-239	2.5E-07	
Sn-126	5.1E-09	Sb-126m,Sb-126	Pu-240	2.5E-07	
I-129	1.1E-07		Pu-241	4.8E-09	
Cs-135	2.0E-09		Pu-242	2.4E-07	U-237
Cs-137	1.3E-08	Ba-137m	Am-241	2.0E-07	
Ba-133	1.5E-09		Am-242m	1.9E-07	
Eu-152	1.4E-09		Am-243	2.0E-07	Am-242,Np-238
Eu-154	2.0E-09		Cm-243	1.5E-07	Np-239
Ho-166m	2.0E-09		Cm-244	1.2E-07	
Hf-182	3.0E-09		Cm-245	2.1E-07	
Pb-210	6.9E-07	Bi-210			
Po-210	1.2E-06	Hg-206,Tl-206			

表 6-6 環境影響中（河川水飲用）の管理期間（50年）終了後の最大被ばく線量

case	廃棄体層への年間平均浸透水量 (mm/year)	最大線量 (μ Sv/year)	ピーク時期 (year)
参考	400 (概念設計で設定した浸透水量)	2.7E-03	300
1	550	3.6E-03	300
2	220	1.7E-03	310
3	30	3.3E-04	50
4	4	8.6E-05	50

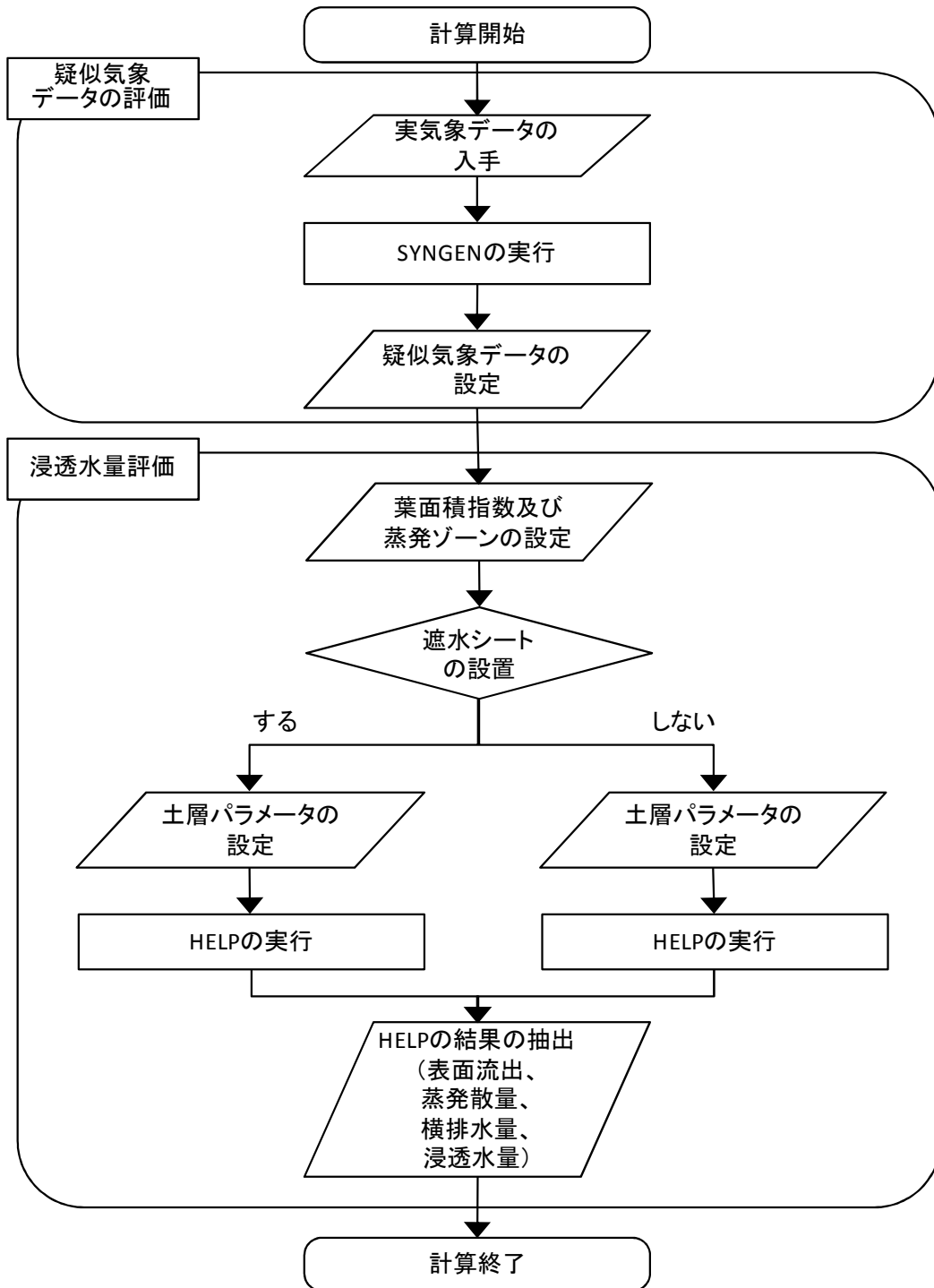


図 3-1 浸透水量評価のフロー図

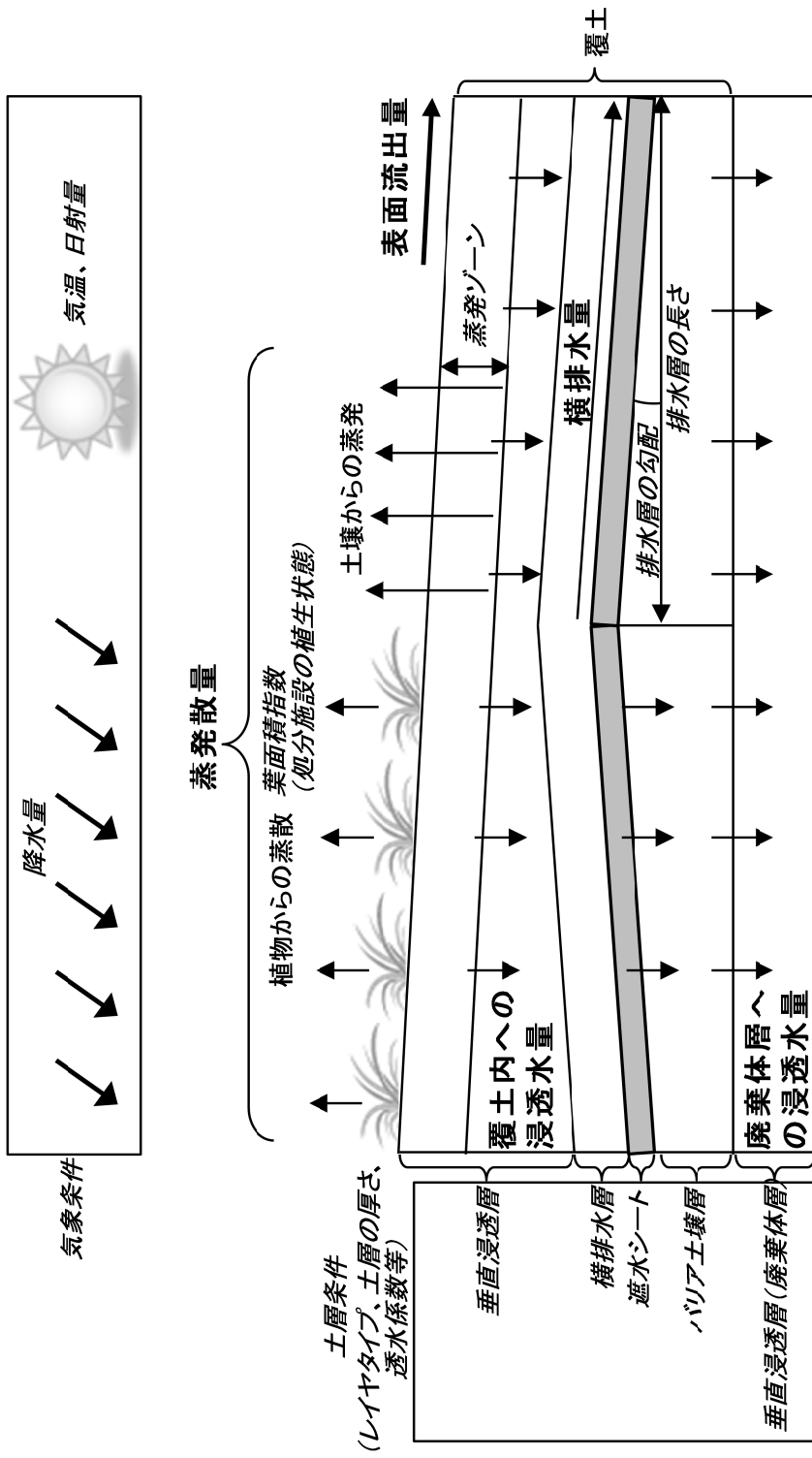


図 3-2 HELP コードの概念図

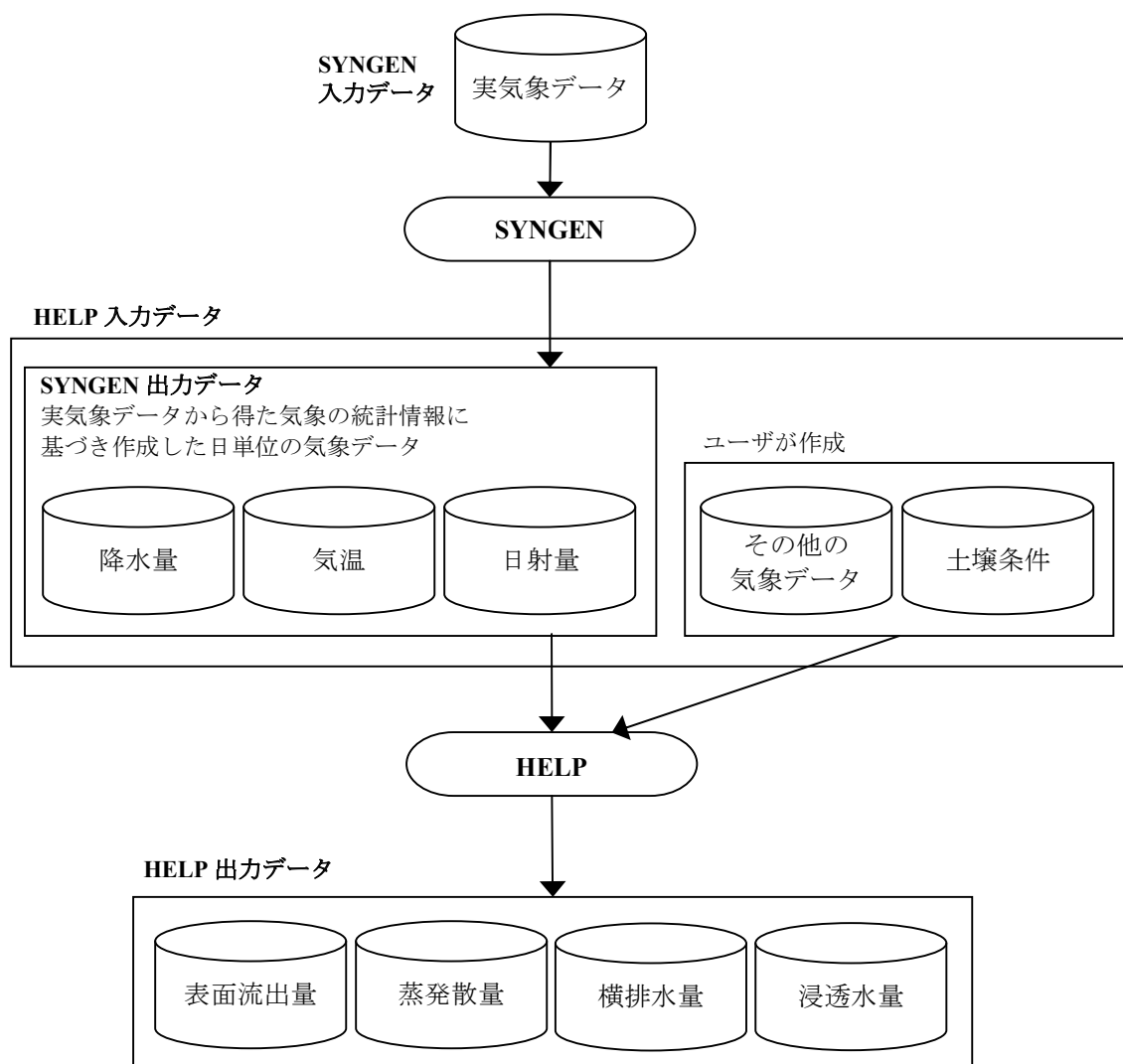


図 3-3 HELP コードの構造

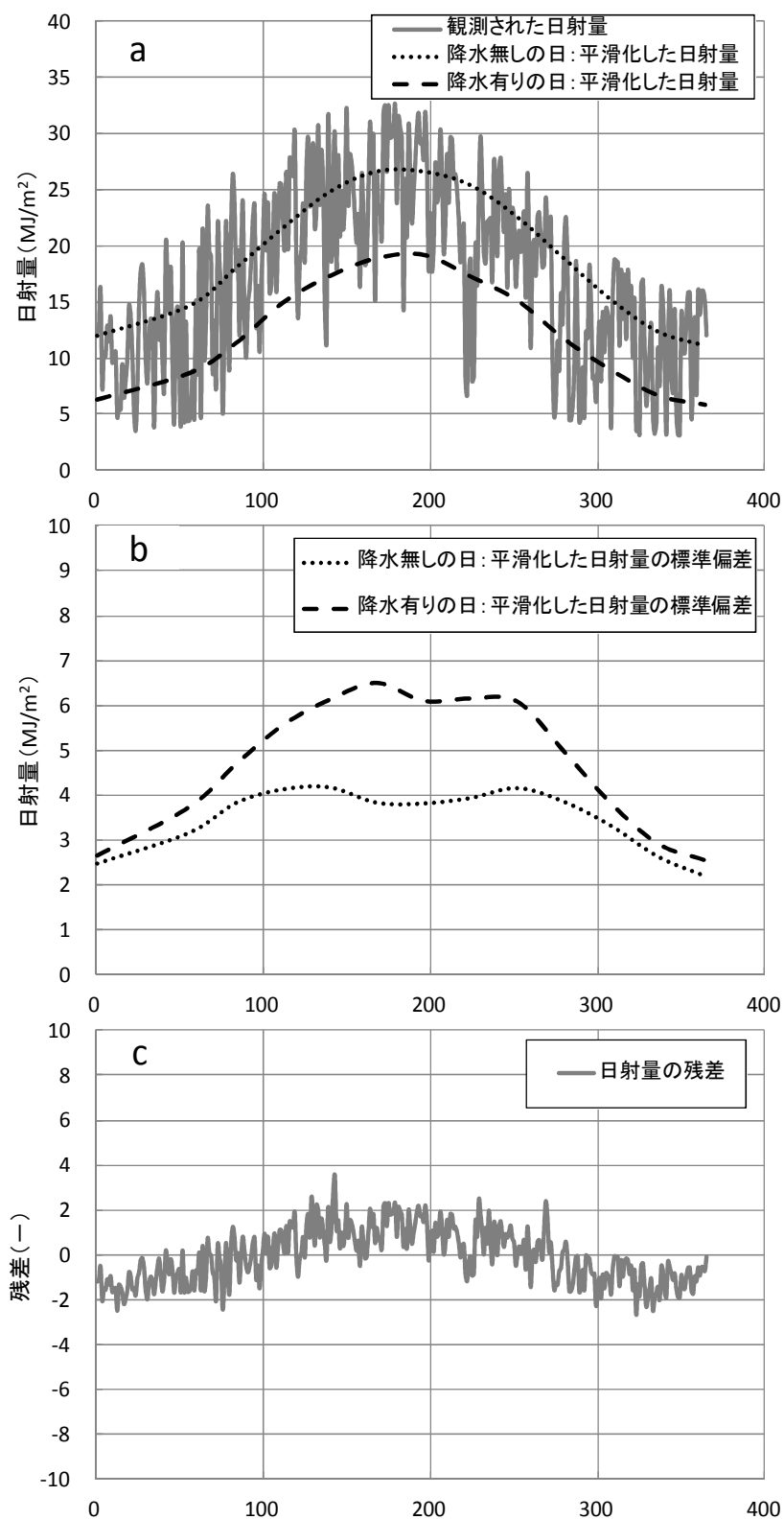
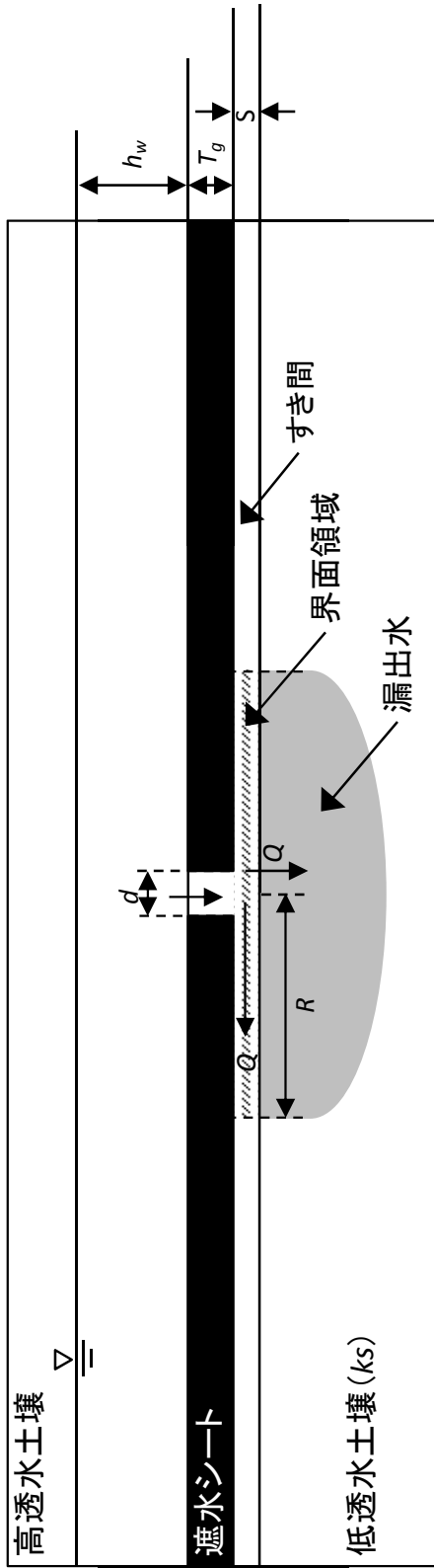


図 3-4 日射量を残差へ帰着させる方法 (Richardson(1981)⁹⁾を基に作成)



Q : 遮水シートの傷からの漏洩量(mm/day)

h_w : 平均水頭(mm)

T_g : 遮水シートの厚さ(cm)

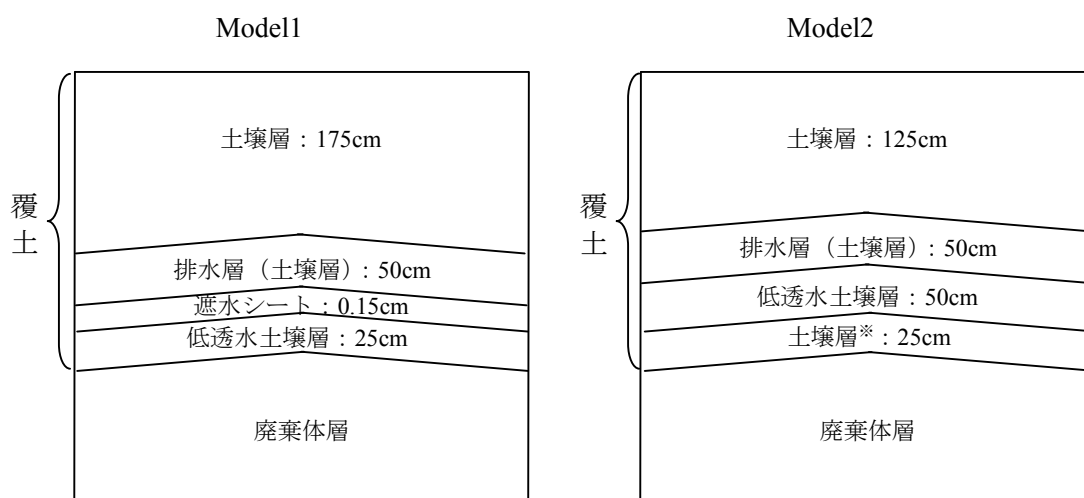
d : 遮水シートの傷の直径(mm)

R : 界面領域の半径

S : 遮水シートと下層のすき間の厚さ(mm)

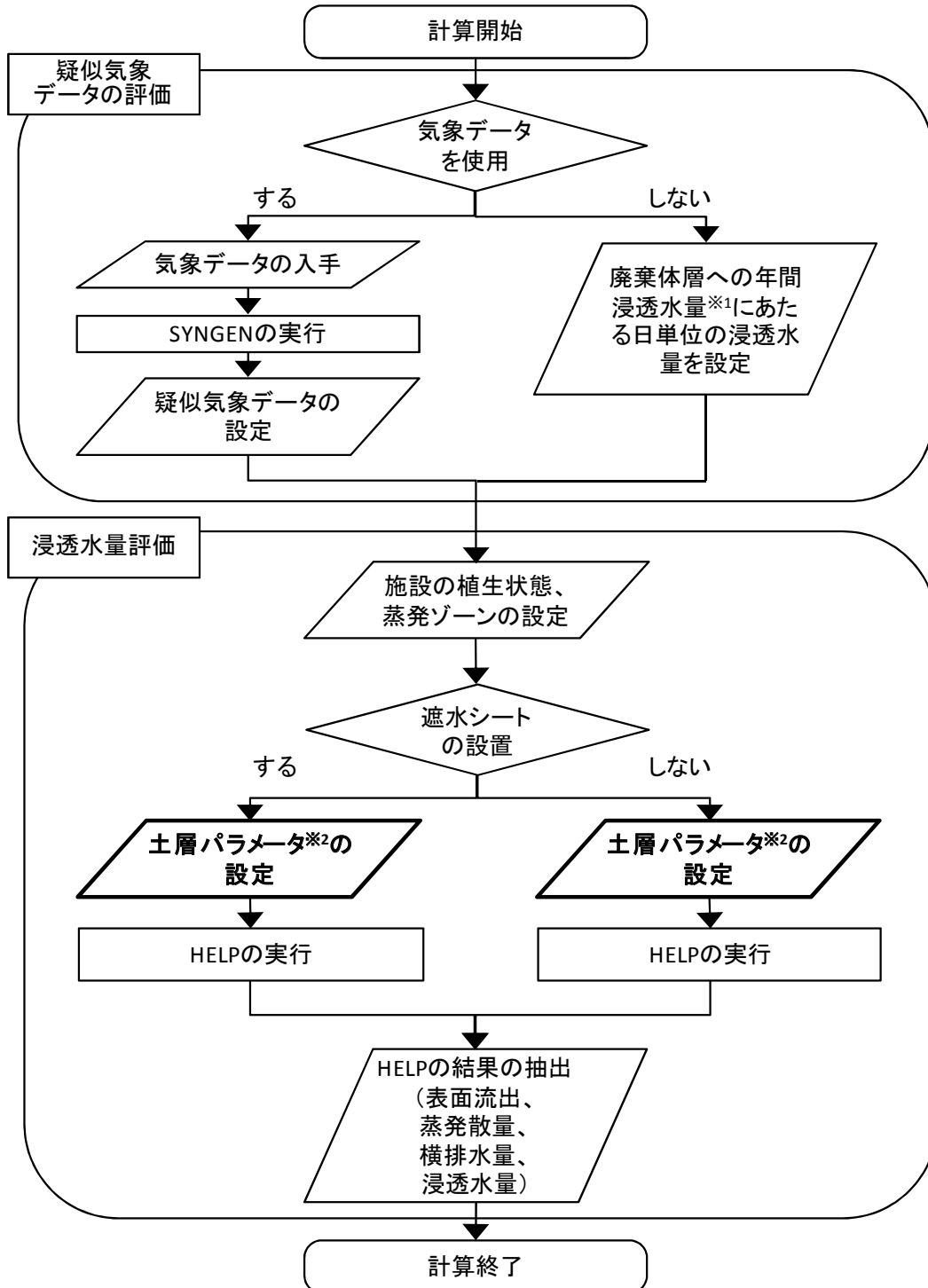
ks : 遮水シート下層の透水係数(cm/sec)

図 3-5 遮水シートに傷のある場合の界面流による漏洩の概念図



※ Model2 はレイヤタイプが「3：バリア土壌」となる土壌層（低透水性土壌層→土壌層）が連続して続くモデルとなっているが、HELP ではレイヤタイプが「3：バリア土壌」の層が連続した計算は想定しない。よって、Model2 では低透水土壌層の下層の土壌層はレイヤタイプを「垂直浸透層」に設定した。

図 4-1 土層構成



※1 概念設計の被ばく線量評価に使用した廃棄体層への浸透水量：400mm/year

※2 太枠太字のパラメータについて感度解析を行う

図 4-2 土層パラメータの感度解析における評価フロー

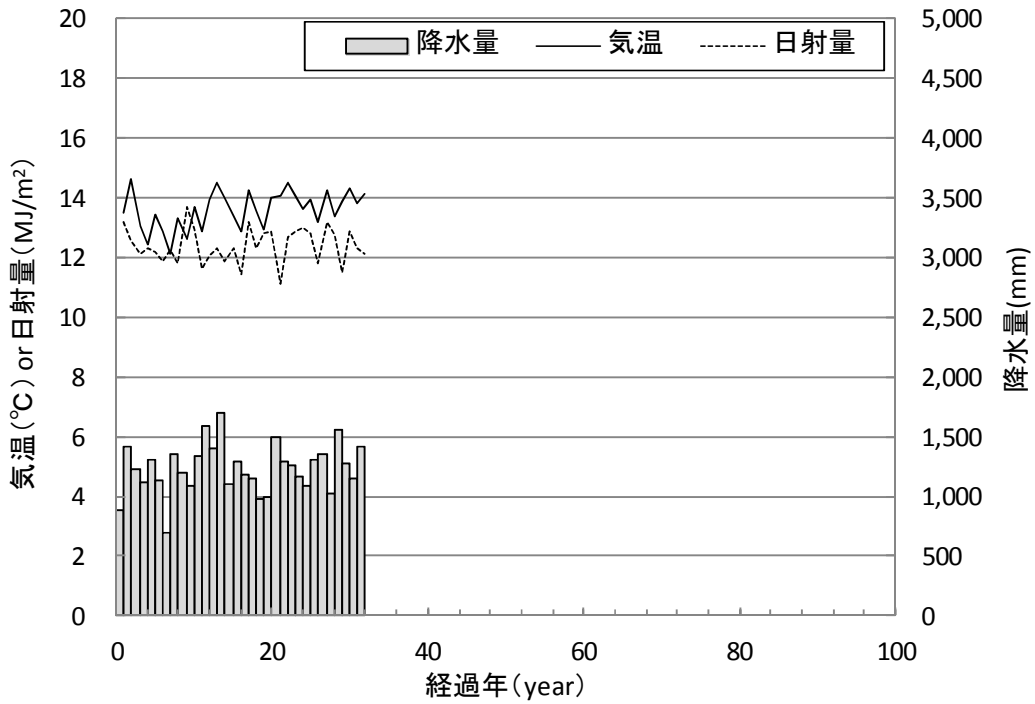


図 4-3 A 地点の実気象データ
(年降水量、年平均気温及び年平均日射量)

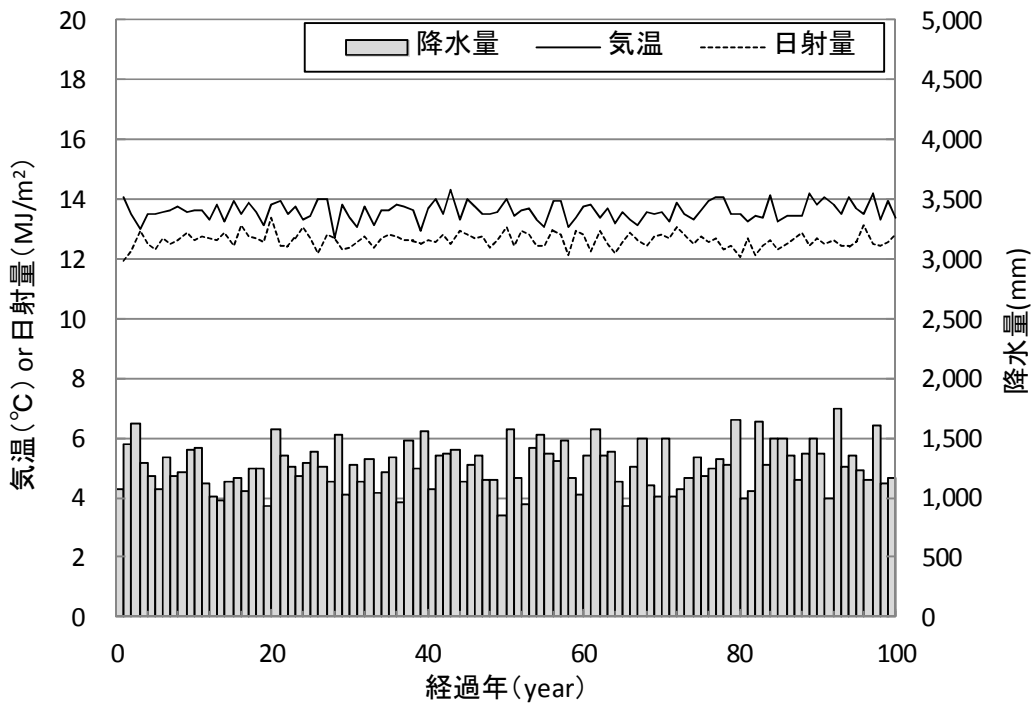


図 4-4 疑似気象ケース：SYNGEN で作成した A 地点の疑似気象データ
(年降水量、年平均気温及び年平均日射量)

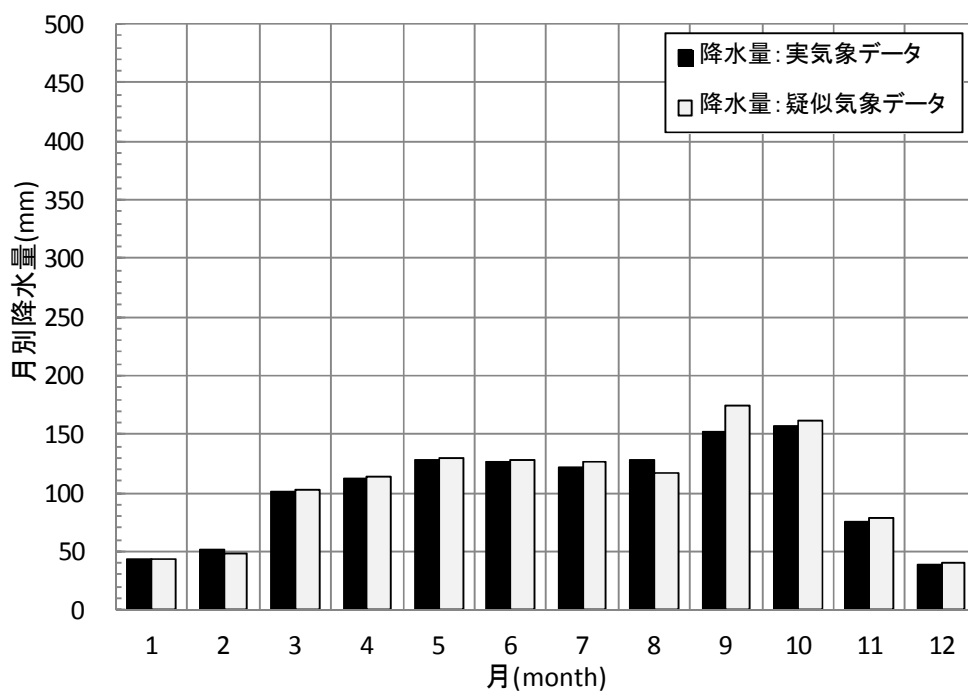


図 4-5 A 地点：実気象と疑似気象の降水量データの比較

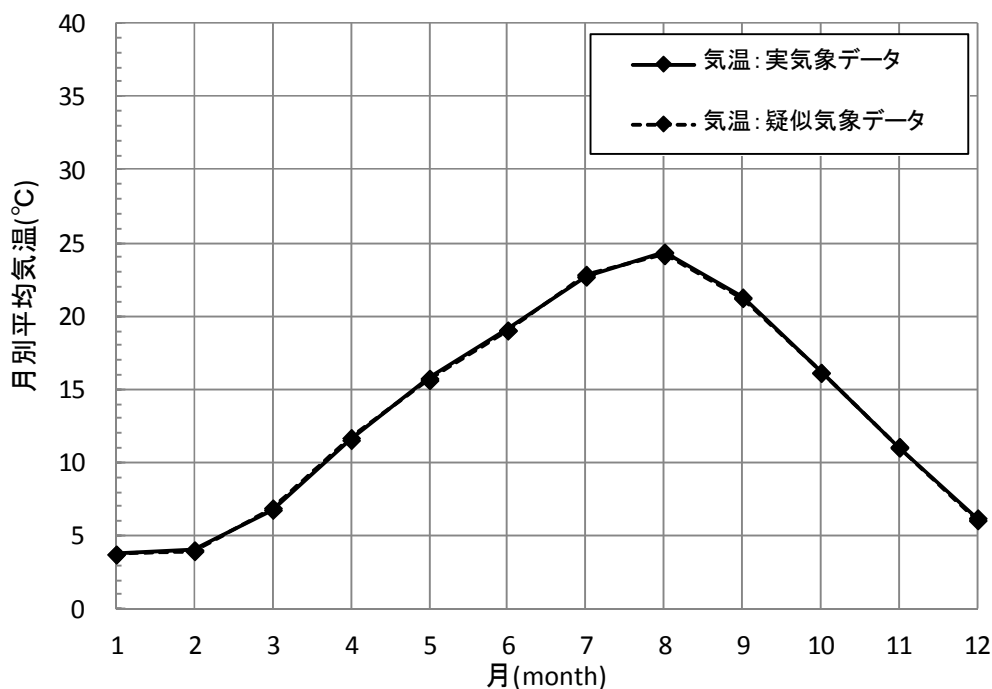


図 4-6 A 地点：実気象と疑似気象の気温データの比較

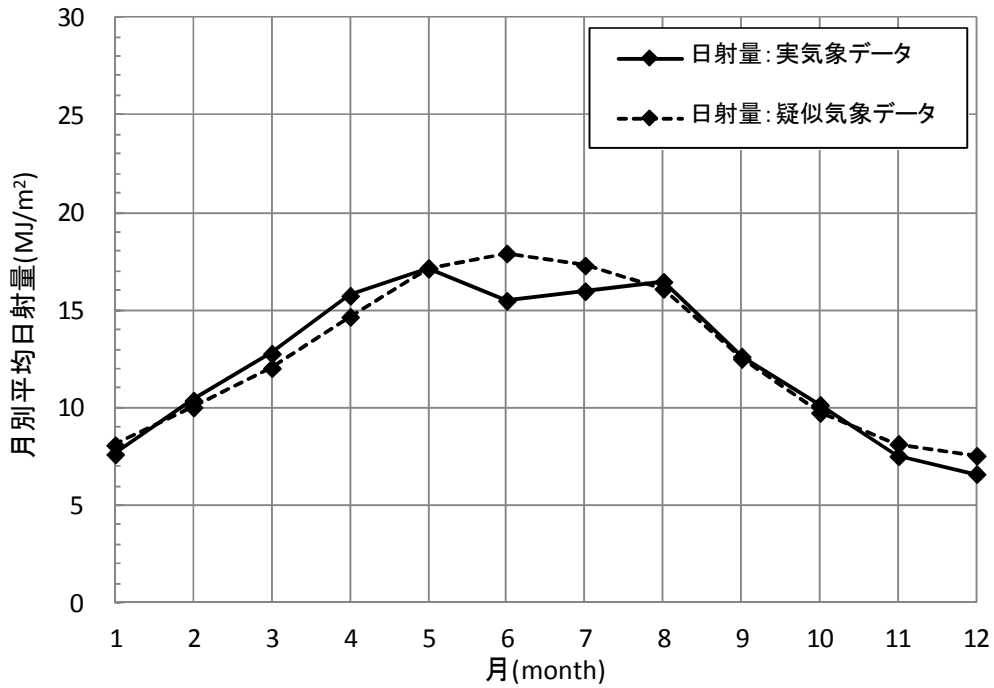


図 4-7 A 地点：実気象と疑似気象の日射量データ比較

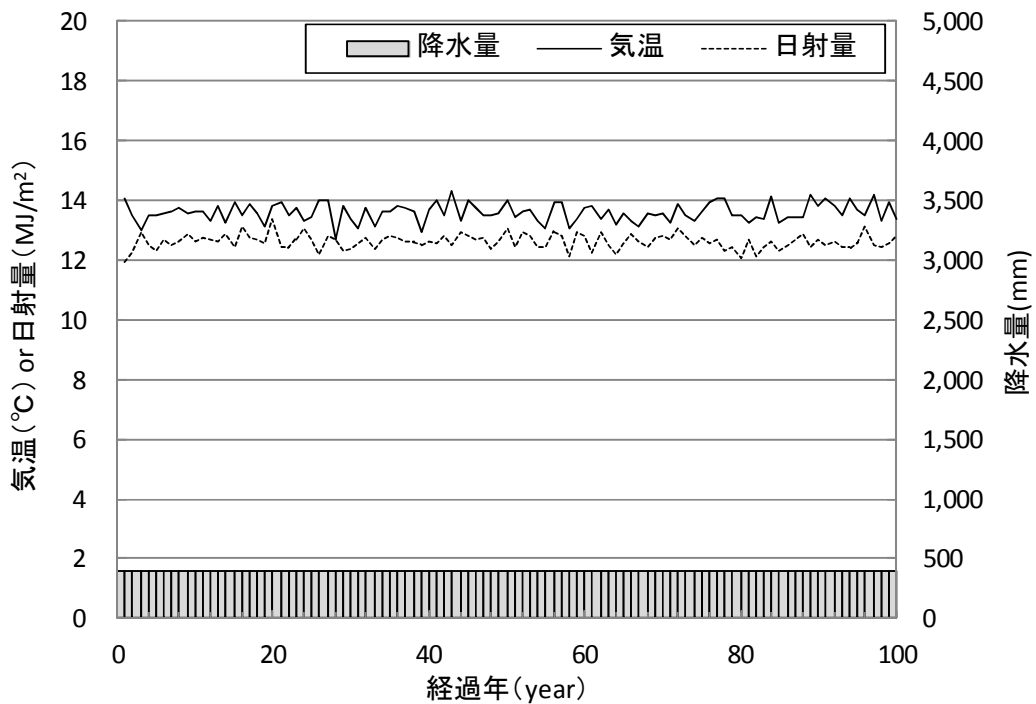


図 4-8 降水量固定ケースの気象データ
(年水量、年平均気温及び年平均日射量)

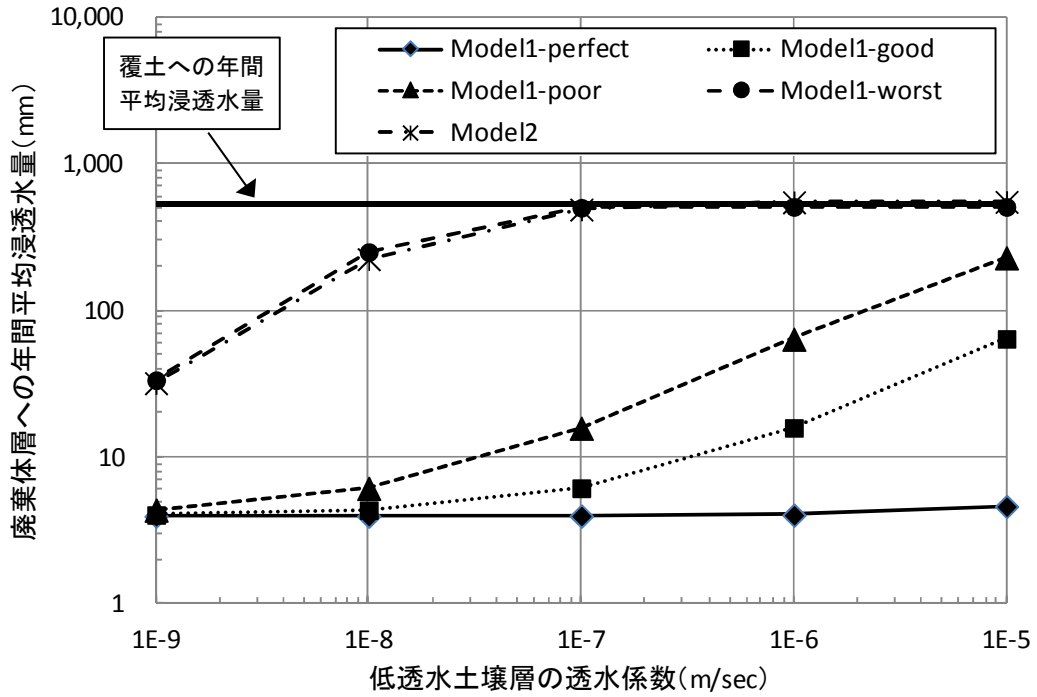


図 4-9 疑似気象ケースの評価結果

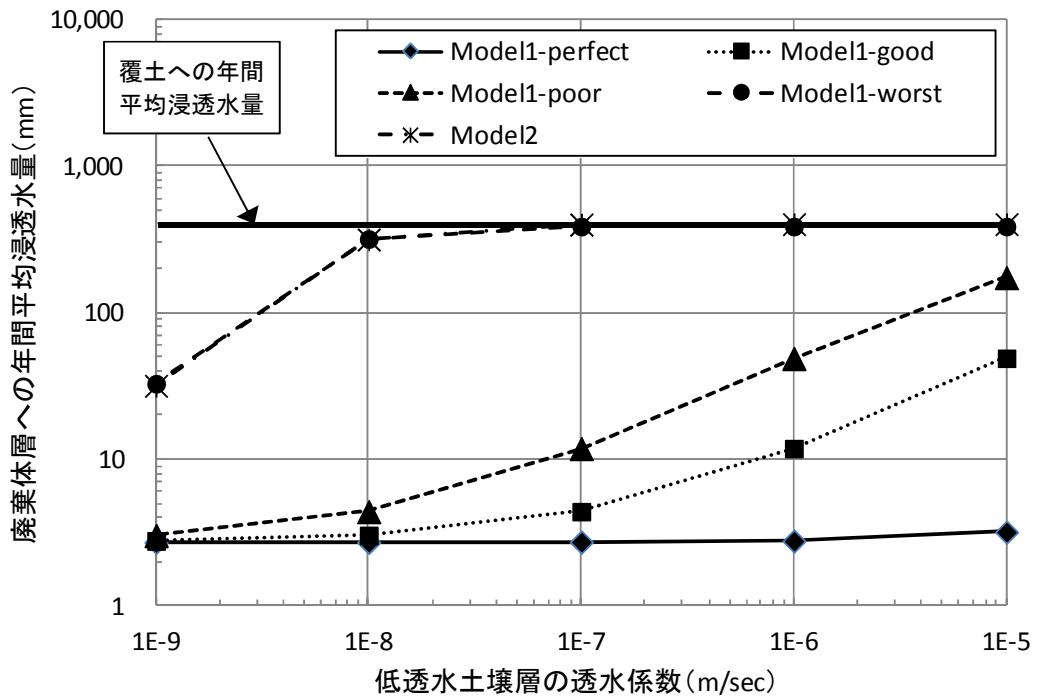


図 4-10 降水量固定ケースの評価結果

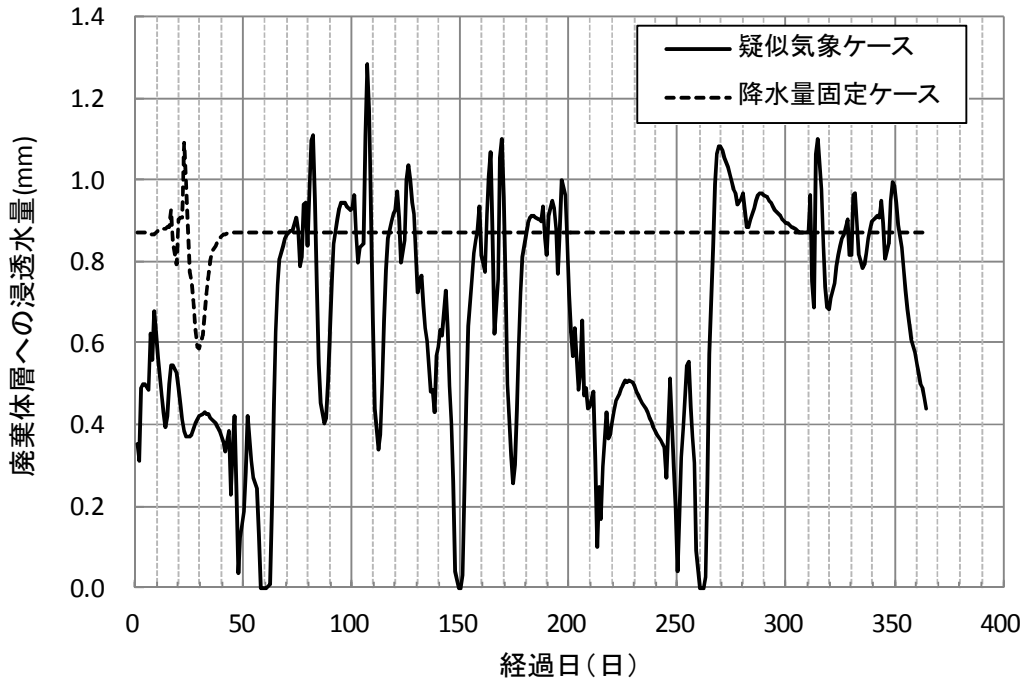


図 4-11 疑似気象ケースと降水量固定係数における日別の浸透水量の比較 (Model2: 粘土層の透水係数= 1×10^{-8} m/sec)

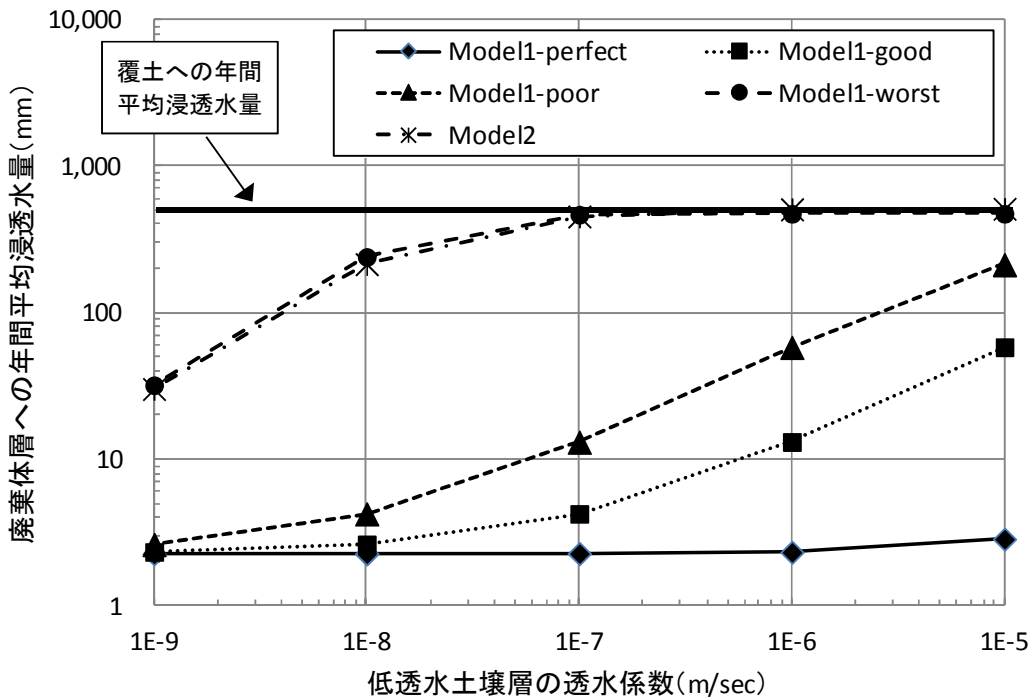


図 4-12 実気象ケースの評価結果

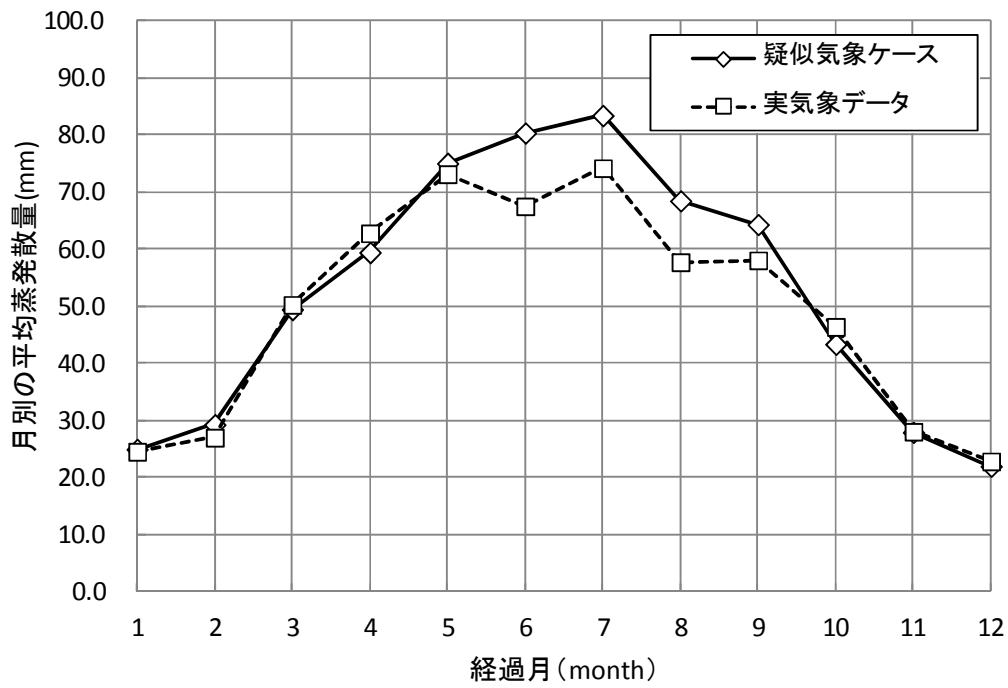
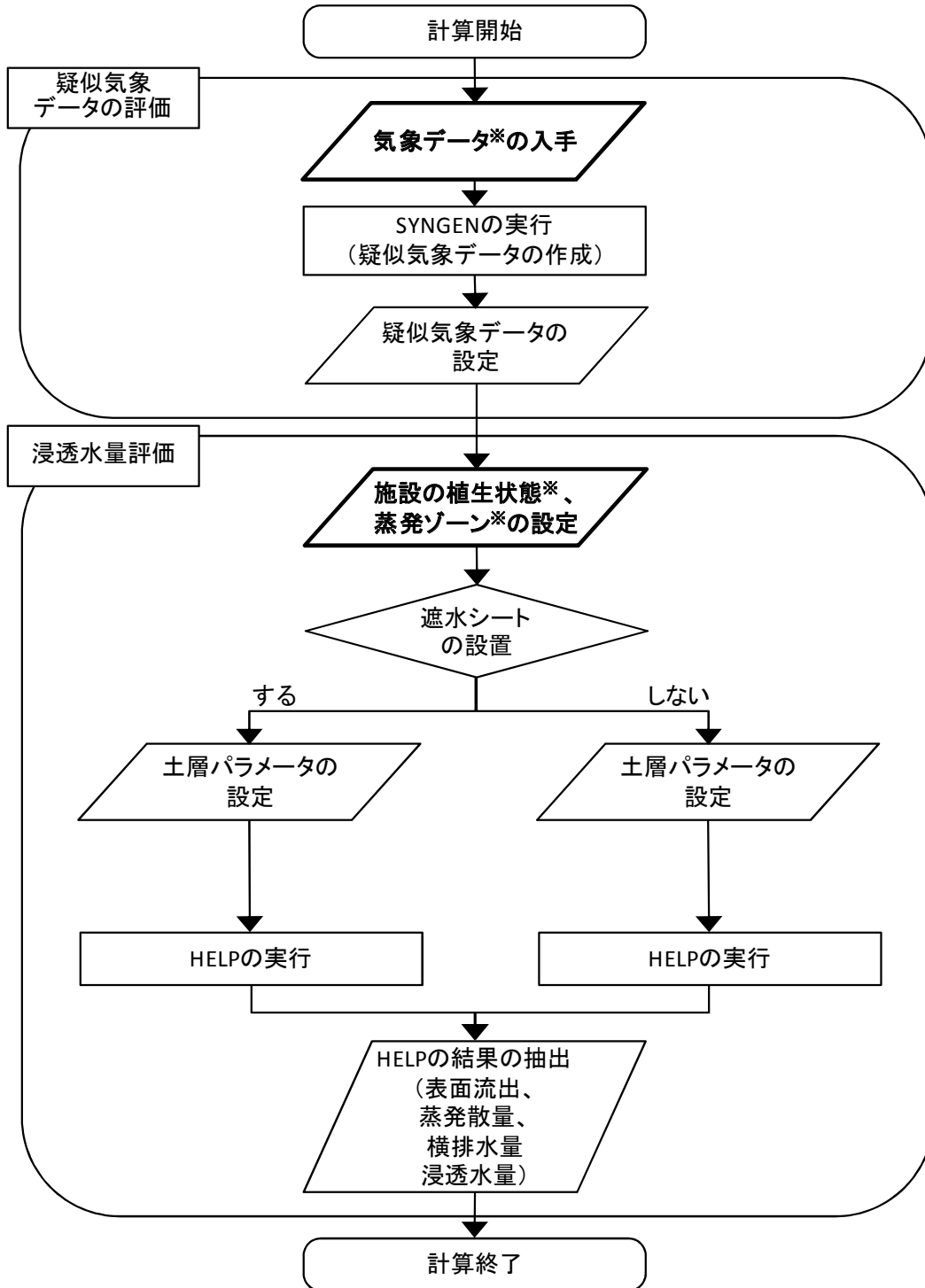


図 4-13 疑似気象ケースと実気象ケースにおける
月別の平均蒸発散量の比較



※ 太枠太字のパラメータについて感度解析を行う

図 5-1 種々の環境条件の感度解析における評価フロー

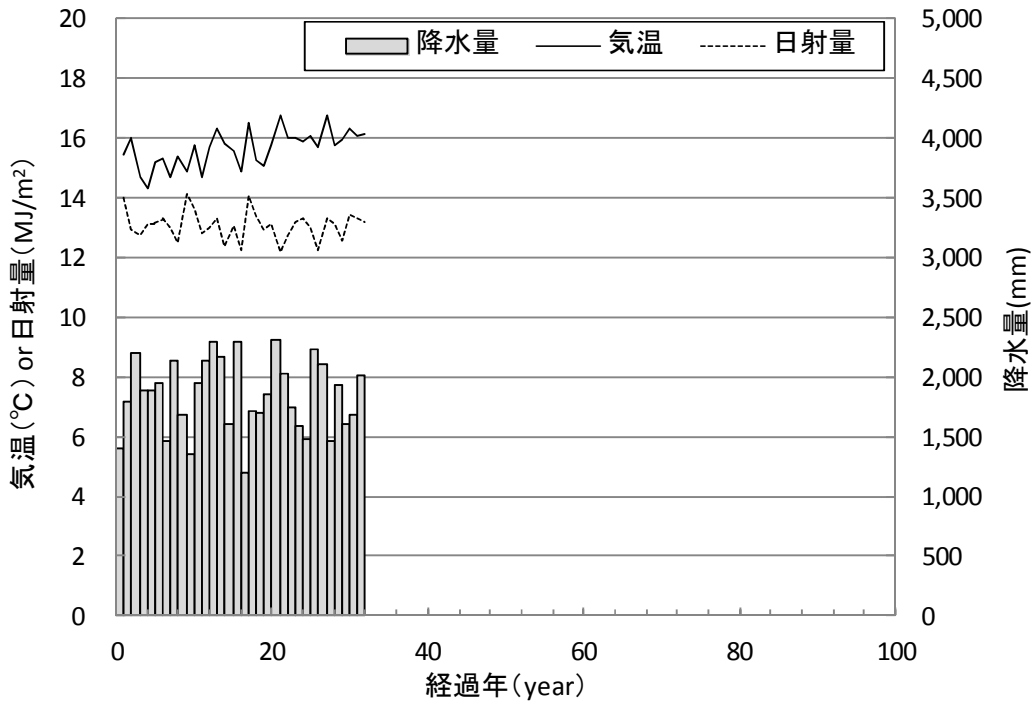


図 5-2 B 地点の実気象データ
(年降水量、年間平均気温及び年間平均日射量)

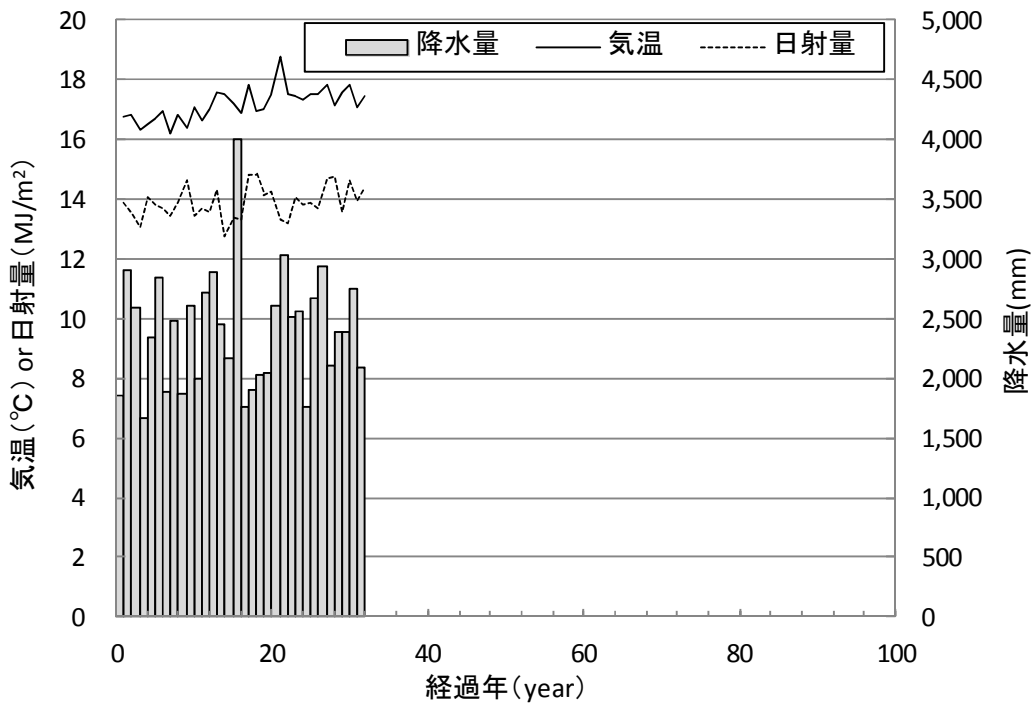


図 5-3 C 地点の実気象データ
(年降水量、年間平均気温及び年間平均日射量)

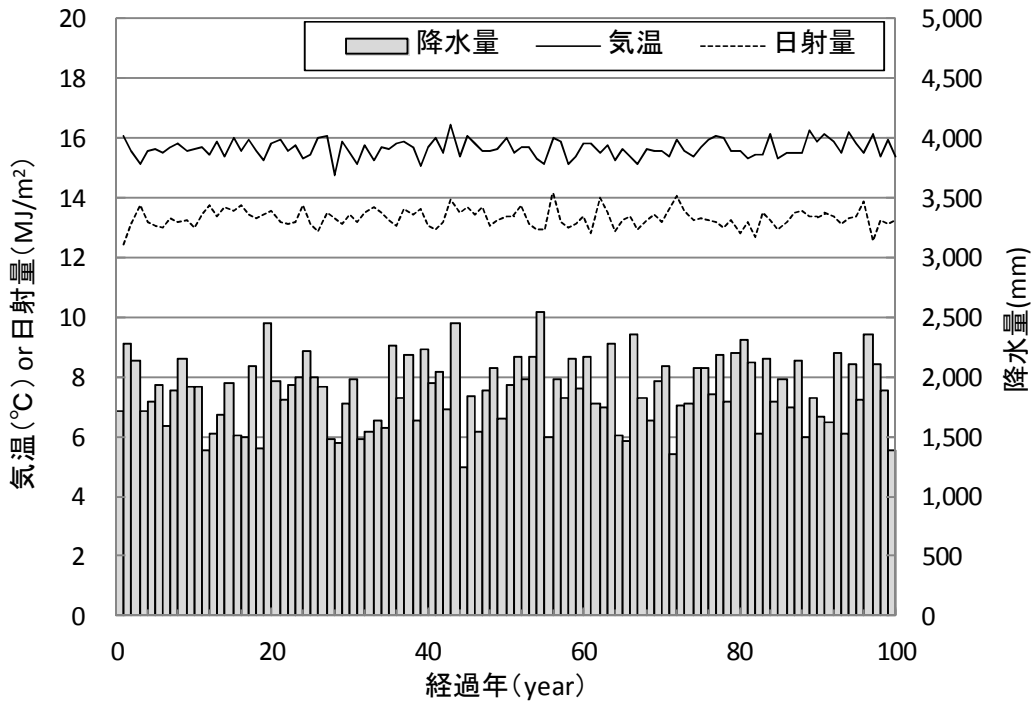


図 5-4 SYNGEN で作成した B 地点の疑似気象データ
(年降水量、年間平均気温及び年間平均日射量)

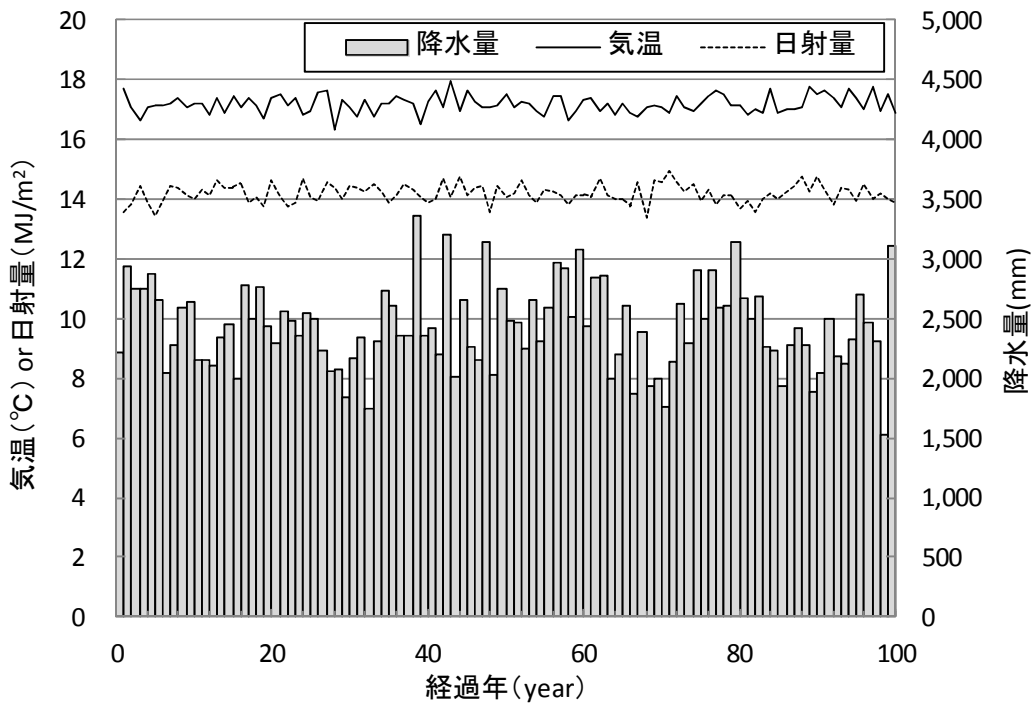


図 5-5 SYNGEN で作成した C 地点の疑似気象データ
(年降水量、年間平均気温及び年間平均日射量)

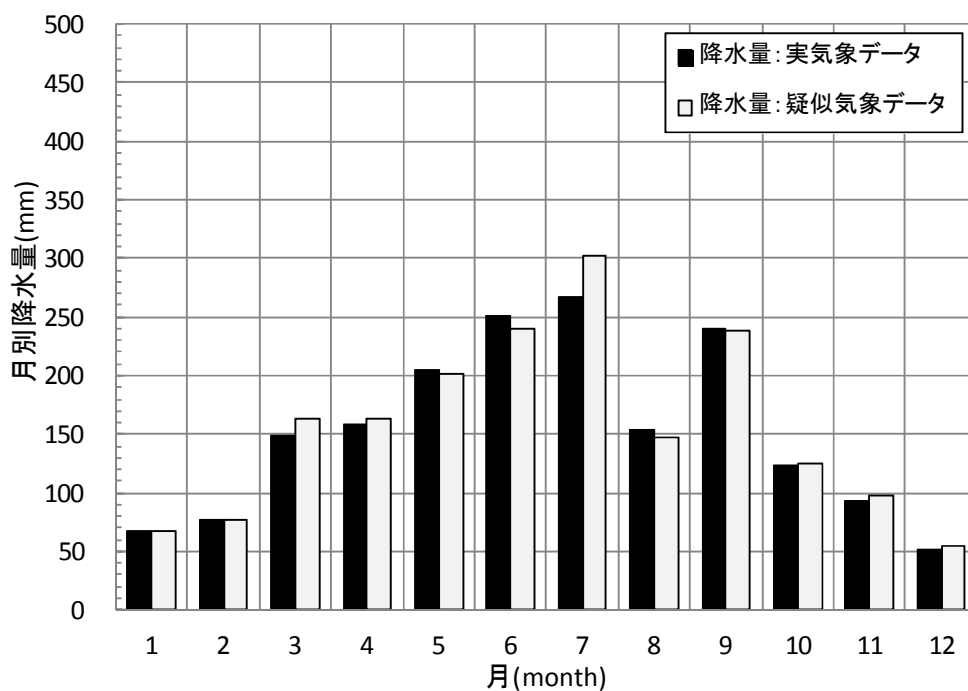


図 5-6 B 地点（日本平均年間降水量地点）の降水量データ

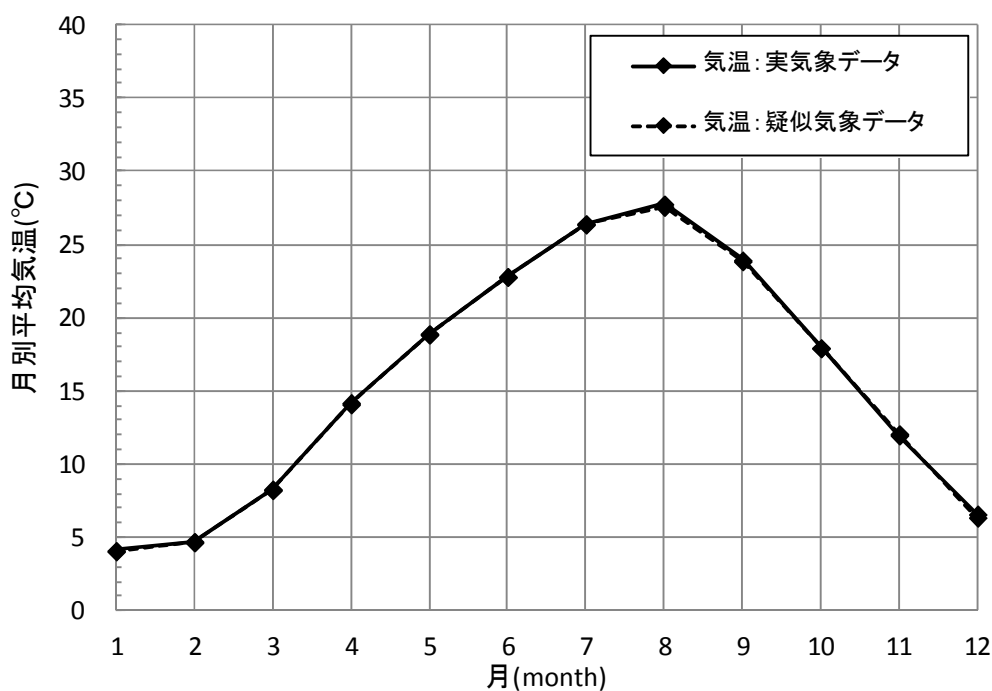


図 5-7 B 地点（日本平均年間降水量地点）の気温データ

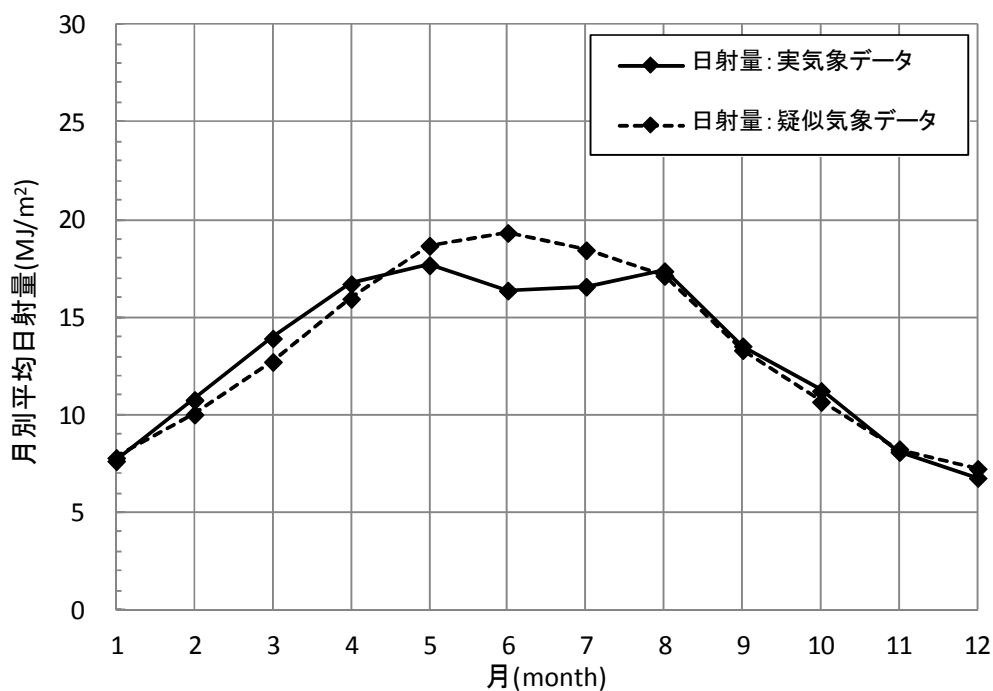


図 5-8 B 地点（日本平均年間降水量地点）の日射量データ

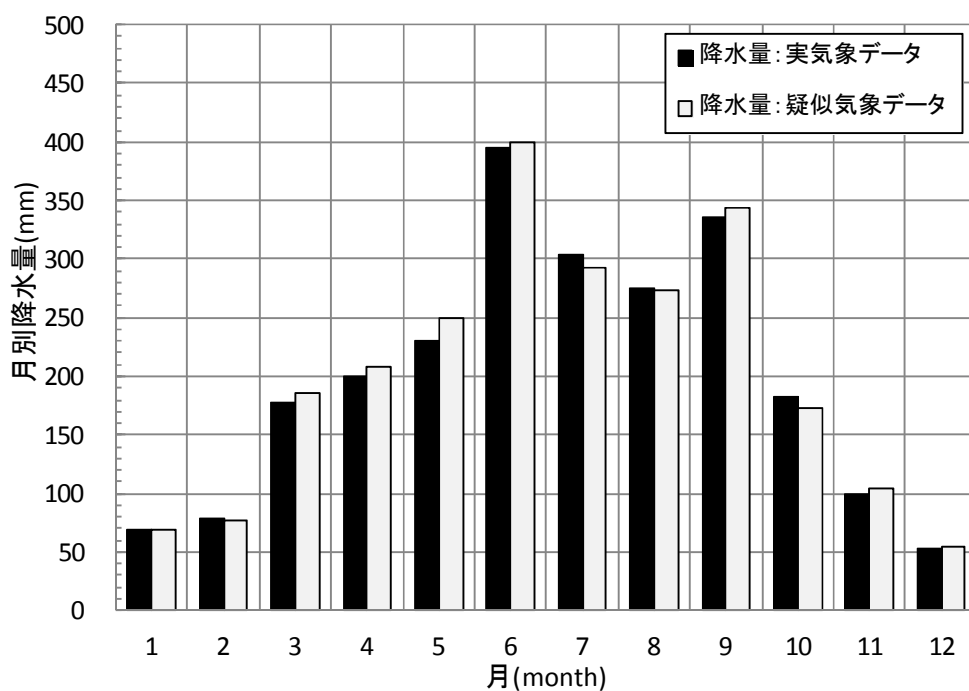


図 5-9 C 地点（日本最大年間降雨量地点）の降水量データ

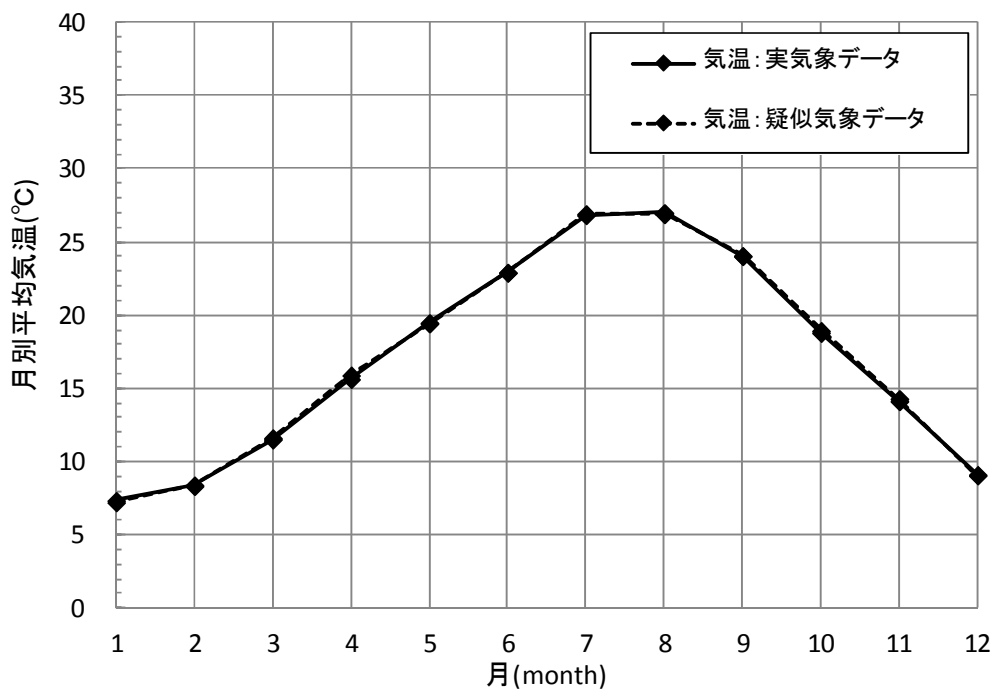


図 5-10 C 地点（日本最大年間降雨量地点）の気温データ

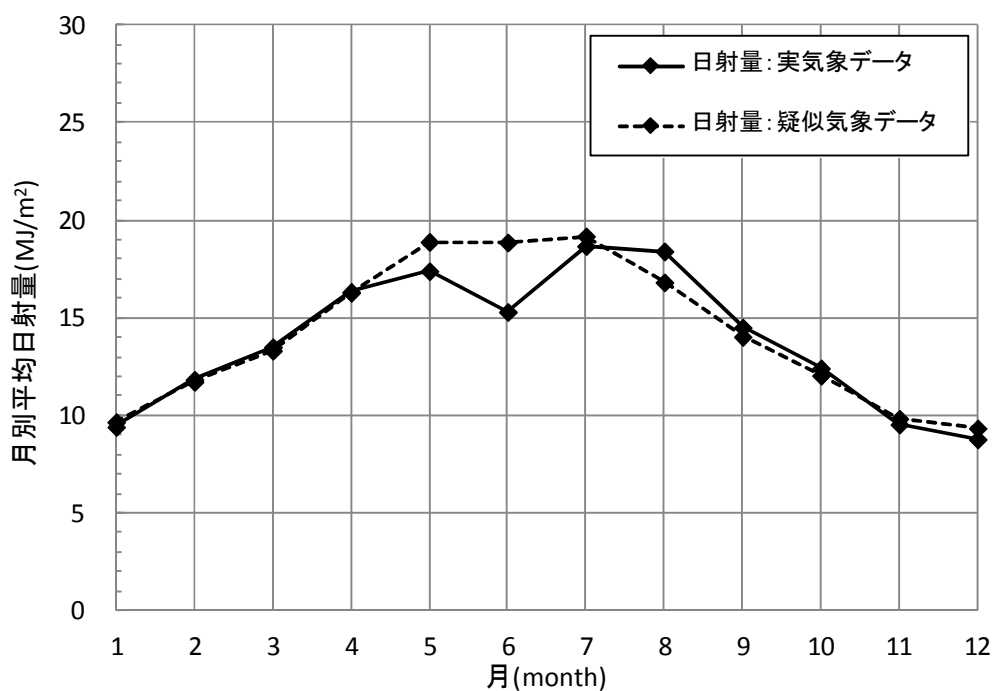


図 5-11 C 地点（日本最大年間降雨量地点）の日射量データ

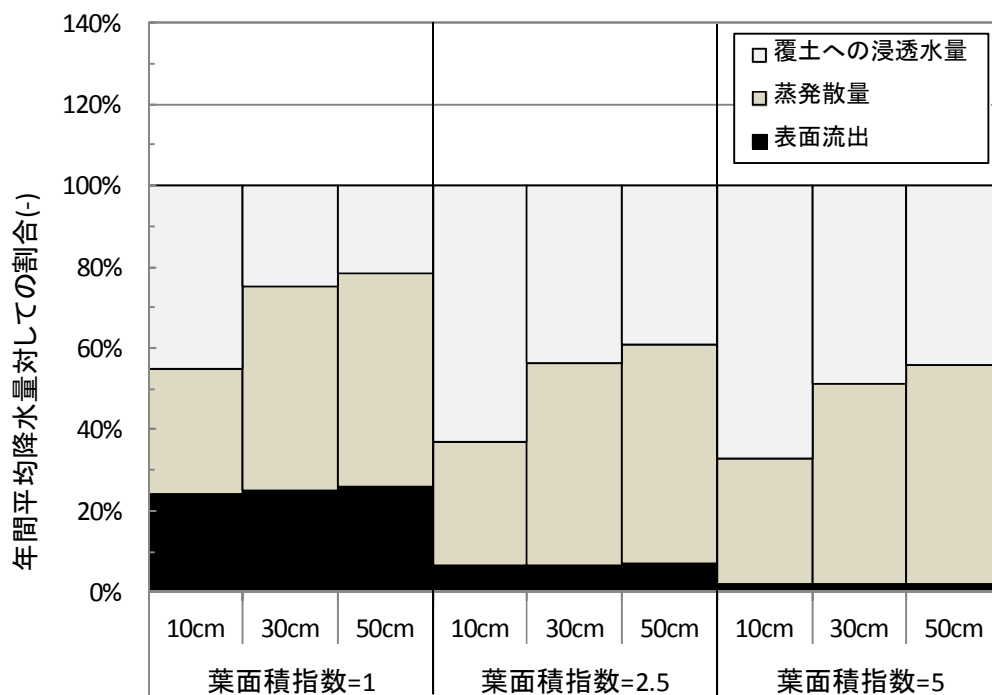


図 5-12 A 地点：年間平均降水量に対する各水量の割合

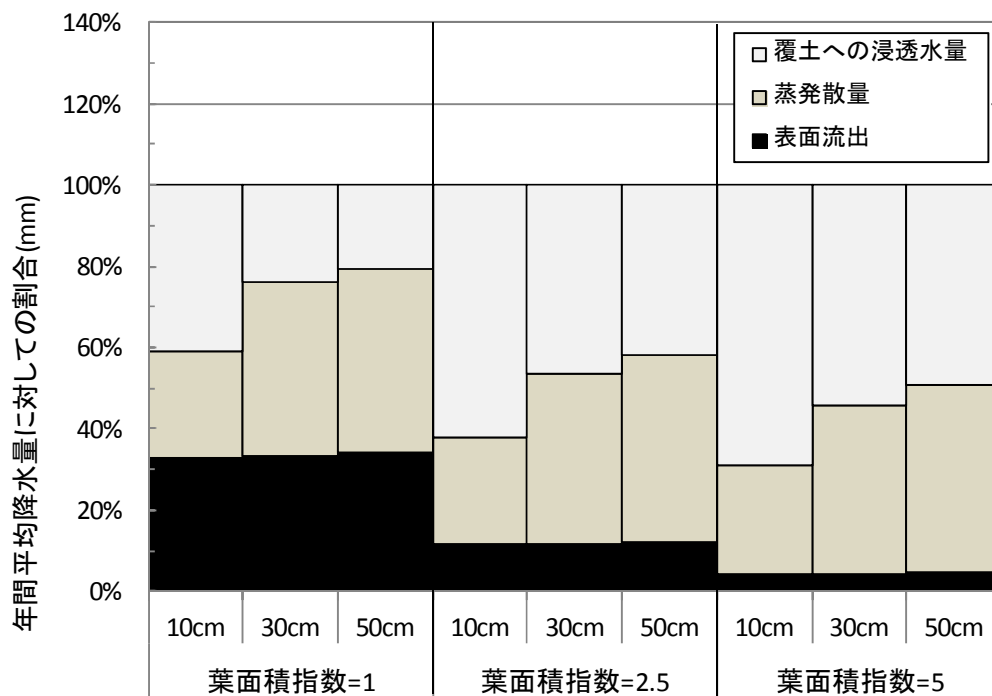


図 5-13 B 地点：年間平均降水量に対する各水量の割合

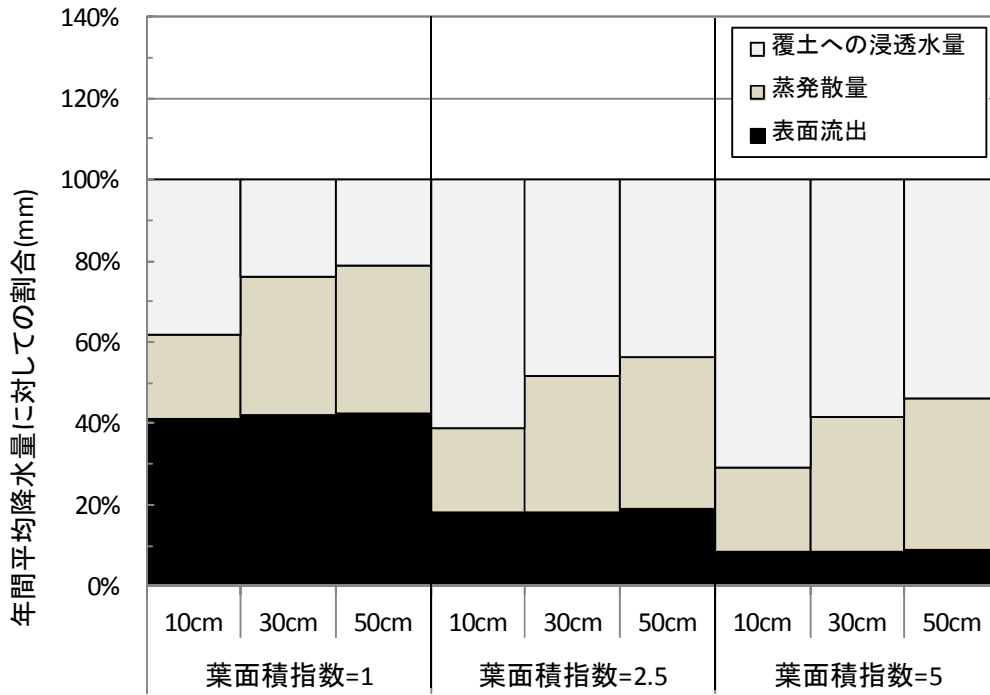


図 5-14 C 地点：年間平均降水量に対する各水量の割合

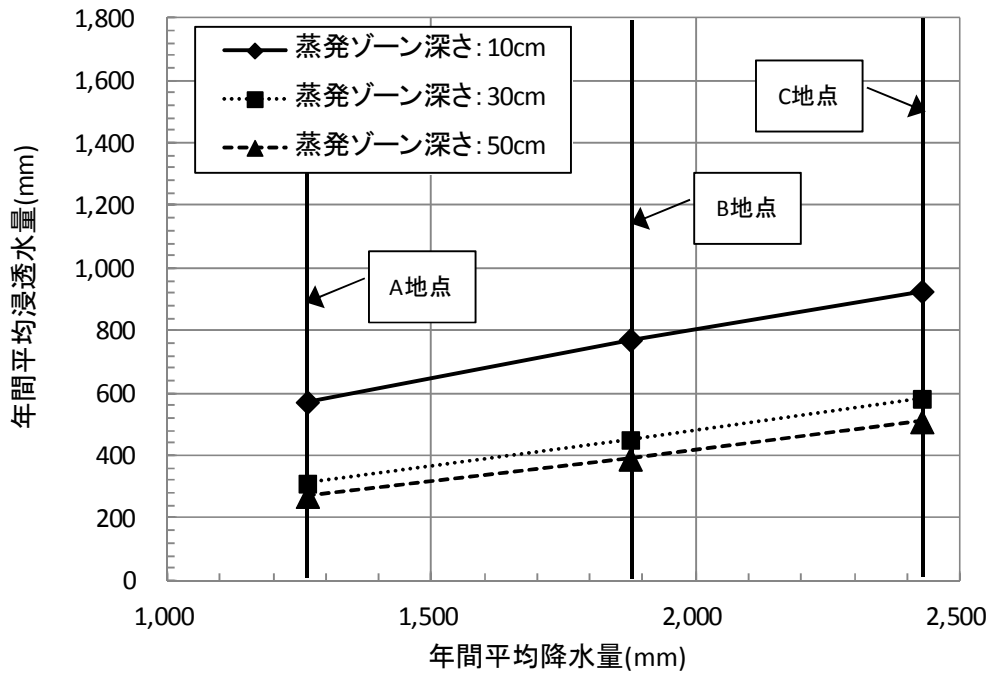


図 5-15 葉面積指数 1：各地点における蒸発ゾーン深さ別の年間平均降水量と年間平均浸透水量

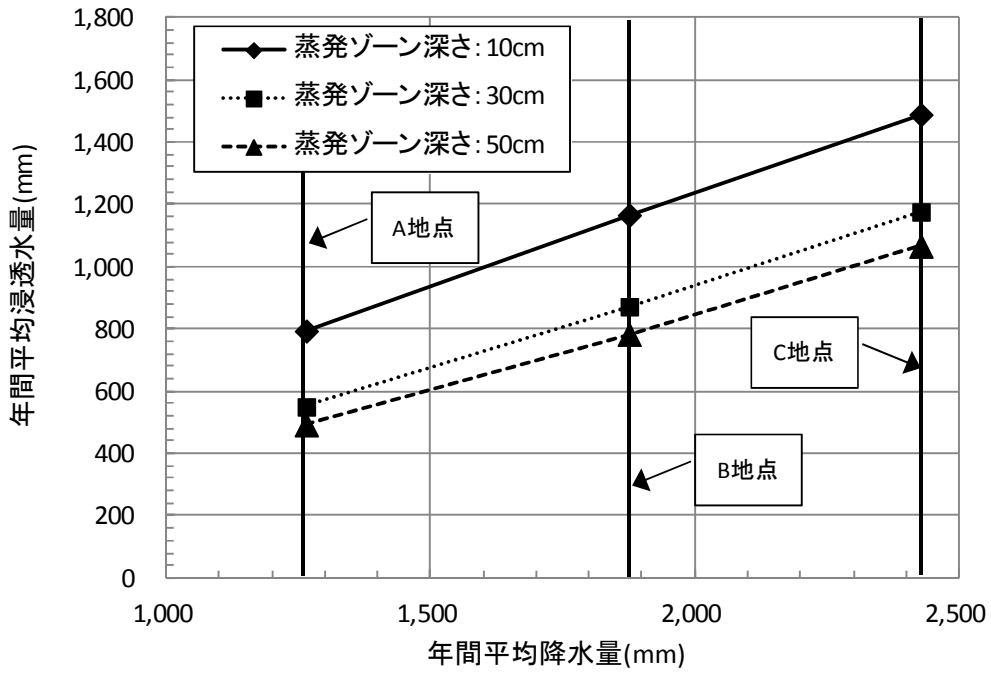


図 5-16 葉面積指数 2.5 : 各地点における蒸発ゾーン深さ別の年間平均降水量と年間平均浸透水量

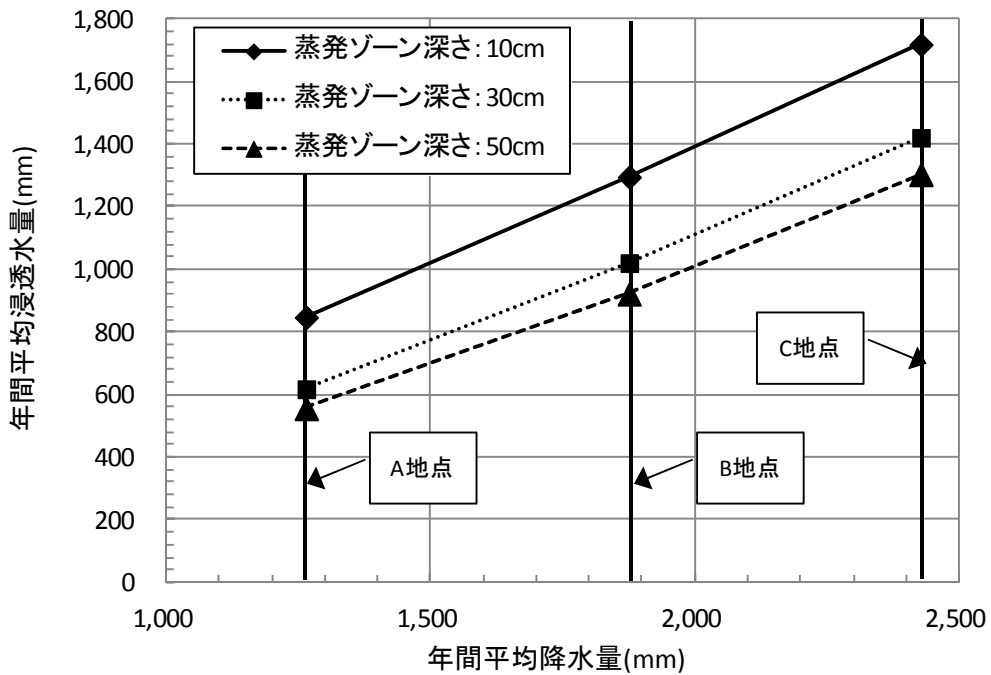


図 5-17 葉面積指数 5 : 各地点における蒸発ゾーン深さ別の年間平均降水量と年間平均浸透水量

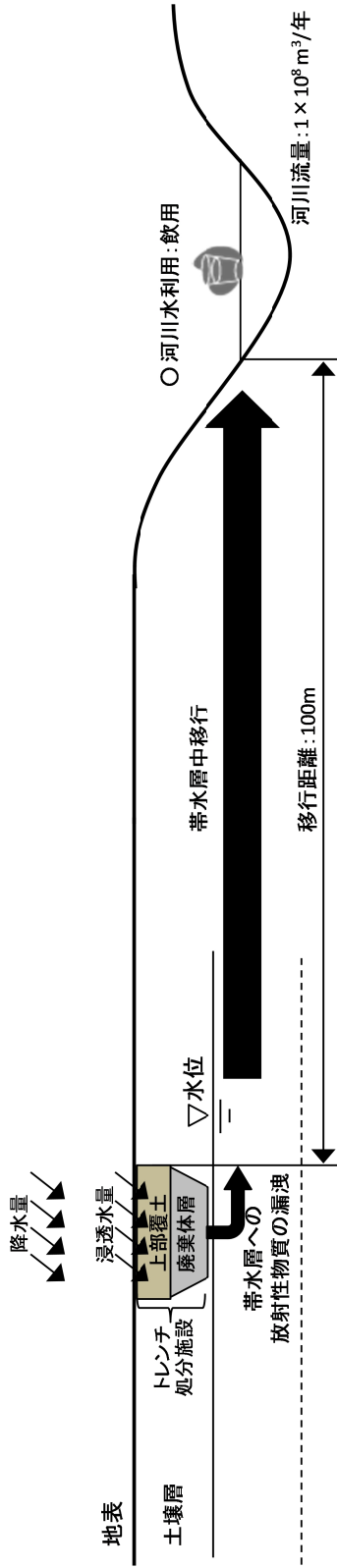


図 6-1 被ばく線量評価の概念図

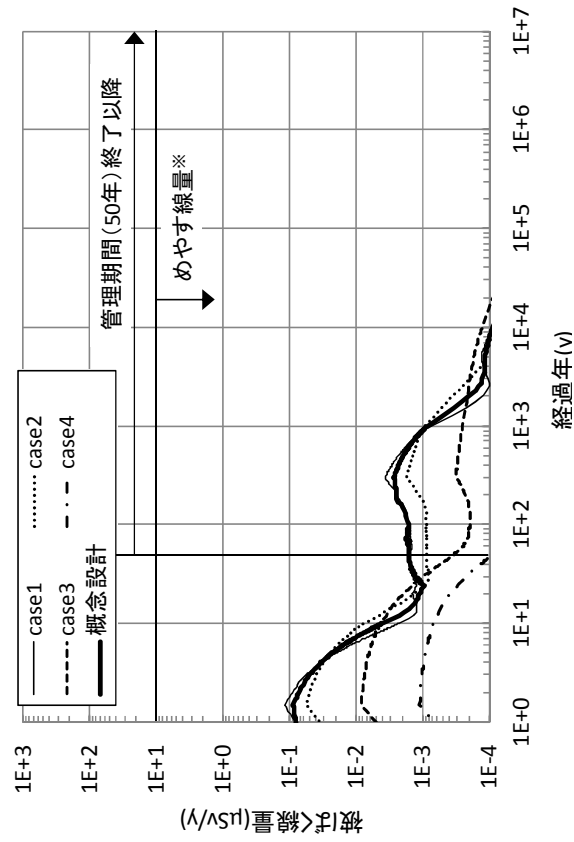


図 6-2 環境影響中（河川水飲用）の被ばく線量の経時変化
 ※ 第二種廃棄物埋設事業の基本シナリオのめやす線量 $10 \mu\text{Sv/y}$

付録

HELP コードの整備と改良

1. 概要

HELP コードは、土壌への浸透水量を計算する HELP プログラム、疑似気象データを作成する SYNGEN プログラム、米国の気象及び土壌のデータベースで構成されている。計算条件の設定、使用する気象データの作成及び浸透水量の計算が GUI で一括管理されている。HELP コードは HELP Version3.07 が無料公開されており、US Army Corps of Engineers の Environmental Laboratory¹⁾から入手した。HELP Version3.07 には、実行形式ファイル、ソースプログラム及び必要な入出力データの一式が同梱されている。

HELP コードは米国で開発されたコードであるため、デフォルトの地域・地名、気象データおよび入出力単位等は米国仕様となっている。また、動作環境は Microsoft Windows XP (以下、Windows XP という) 以前の OS まで対応しているが、Microsoft Windows7 及び 8 (以下、Windows7/8 という) 以降の OS では動作しなかった。

本作業では、HELP コードを日本の Windows7/8 のコンピュータで動作するようにし、かつ、日本の気象データや簡易なデータが入力できるように整備・改良を行った。

2. 作業内容

既存の HELP コードの構造を付図 2-1 に示す。HELP コードの HELP プログラム及び SYNGEN プログラムの整備・改良について以下の作業を実施し、付図 2-2 に示す HELP コードを整備した。各項目に対する作業内容の詳細は次章以降に示す。

(1) HELP プログラムの整備

- ① Microsoft Windows7/8 環境での HELP プログラムの整備
- ② 入出力単位の改良
- ③ 出力機能の改良
- ④ 浸透水量及び排水量の計算のみ行うオプションの追加
- ⑤ HELP 出力ファイルのフォーマットを整備するコード ExtractedPara の新規整備

(2) SYNGEN プログラムの改良・整備

- ① Microsoft Windows7/8 環境での SYNGEN プログラムの整備
- ② 入出力単位の改良
- ③ 日本の気象データから SYNGEN の気象入力ファイルを作成する計算コード SetParamSYNGEN の新規整備

3. HELP プログラムの改良・整備

HELP プログラムの整備・改良の作業について説明する。まず、HELP プログラムを Windows7/8 で実行できるように行った作業について第 3.1 節に示す。次に、出力単位系を SI 単位系に統一するために行った作業について、第 3.2 節で示す。第 3.3 節では、全ての層について浸透水量及び排水量を出力させる改良作業について説明する。第 3.4 節では、蒸発散量を計算せずに浸透水量及び排水量を計算するオプションの作成作業を示す。第 3.5 節では、HELP プログラムの出力結果を経時変化が容易に確認できる書式に変換するプログラムの整備作業を示す。

3.1. Windows7/8 環境での HELP プログラムの整備

既存の HELP コード内に同梱されている HELP の実行形式ファイルは Windows7/8 の環境で動作しないことが確認された。そこで、プログラムの改良等を行う前に、Windows7/8 の環境で改めてオリジナルのソースのコンパイルを行い、HELP プログラムの実行形式ファイルを作成した。

(1) HELP コードのコンパイル時のエラー

コンパイル時にエラーを確認した。これは、サブルーチン UTLTY がソースファイル内に存在しないために発生したエラーである。引数として使用されている変数は、それ以降の計算で使用されていないため、サブルーチン UTLTY の call 部をコメントアウトして対応した。

(2) HELP コードの実行時のエラー

実行時のエラーはコンパイルオプションで「配列と文字列範囲のチェック」を「はい (/check:bounds)」に設定すると発生する。配列の寸法宣言子にゼロが設定されるエラーが発生した。これに対応するために修正を行った。

(3) コンパイルオプションについて

事前の検討の結果、数値計算の過程で浮動小数点の丸め方法にコンパイラ間の違いがある可能性があった。その違いが結果に与える影響を低減するため、コンパイルの際、整数型及び単精度実数型変数を 8 バイトに、倍精度実数型変数を 16 バイトにするオプションを設定した。

3.2. 入出力単位の変換

HELP の入出力単位は、米慣習単位又は SI 単位のどちらかを選択可能であるが、常に SI 単位で出力するように改良を行った。具体的には以下に示すように、出力の単位指定の変

数 IU8 が、米慣習単位 (IU8=1) で設定されている場合は値を 2 に置換えるようにした。

3.3. 出力機能の改良

HELP プログラムは蒸発ゾーンから下層の浸透水量等の計算結果が出力される。これを常に各層の浸透水量及び排水量が出力されるように HELP プログラムを改良した。

HELP プログラムは、バリア土層またはジオメンブレン層を区切りとするサブプロファイルを計算単位とし、更に蒸発ゾーンは 7 つ、それ以外の縦浸透層と横排水層は厚さにより 1 土層を最大 3 つに分割したセグメントとなっている。なお、HELP プログラムは、20 土層、6 サブプロファイル、67 セグメントまで扱うことができる。また、バリア土層と遮水シートが連続している場合は 1 土層として処理される。例として CWF の土壌構造モデル図を付図 3-1 に示す。

本改良では、各層の最深セグメントの結果を出力するように改良し、蒸発ゾーンは全てのセグメントについて出力した。具体的なプログラムの改良を以下に示す。

(1) メインプログラム

新規に COMMON /BLK60/ を設定した。変数の構成を付表 3-1 に示す。セグメントの番号は蒸発ゾーンの最初の層から通し番号となっている。配列 rcrs を導入したのは、後述するサブルーチン outday2 で必要になるためである。この COMMON /BLK60/ を、メインプログラム、サブルーチン SGMNT、サブルーチン DRAIN、サブルーチン OUTMO2、サブルーチン OUTYR、サブルーチン outday2 (新規整備) に追加した。サブプロファイル 1 について、セグメント毎の日循環水量を計算し、セグメント毎の月/年排水量及び月/年浸透水量の算出式を各サブプロファイルに追加した。

またデフォルトの HELP の出力ファイルとは別に、装置番号 9 で割り当てた新規の出力用ファイルに、層の排水量及び浸透水量を出力させるよう改良した。

(2) サブルーチン DRAIN

サブルーチン DRAIN の引数として付表 3-2 に示す変数を新規設定した。セグメント毎の日排水量及び日浸透水量の算出式を追加した。

(3) サブルーチン setidseg

排水量及び浸透水量について、全ての情報の層を出力するように変更した。蒸発ゾーンでは全てのセグメントについて出力し、蒸発ゾーン以外では土層の一番下のセグメントについて出力させる。そのために、土層と土層の一番下のセグメントを対応させるサブルーチン setidseg を新規に作成した。

(4) サブルーチン outday2

各層における排水量及び浸透水量の日別出力用サブルーチン outday2 を新規に作成した。

(5) サブルーチン OUTMO2

月別における各セグメント毎の排水量及び浸透水量を出力させるために、ソースを改良した。

(6) サブルーチン OUTYR

新規に COMMON /BLK62/を設定した。変数の構成を付表 3-3 に示す。付表 3-3 に示す変数を SI 単位へ換算するためにソースを改良した。

3.4. 浸透水量及び排水量の計算のみ行うオプションの追加

(1) 改良の流れ

蒸発散量の計算を行わず浸透水量及び排水量の計算のみ実行するためには、本報告書記載の式(21)の土壌からの蒸発量 ES_i 及び式(22)の植物からの蒸散 EP_i の値に 0 を設定することにより可能であると考えた。

HELP において浸透水量及び排水量の計算のみ行うオプション機能を追加するために、フラグ ipotet を新規に作成した。フラグ ipotet を使用して、可能蒸発散量の計算を実行するかを判断を行う。フラグ ipotet は以下に示すように設定した。

- ipotet に 0 以下の値を設定した場合は、HELP の蒸発散量の計算をこれまで通り実行する。
- ipotet に 1 以上の値を設定した場合は、土壌からの蒸発量及び植物からの蒸散の計算を行わず ES_i 及び EP_i に 0 を設定し蒸発散量が発生しないようにし、浸透水量及び排水量の計算のみ実行する。

(2) プログラムソースの修正

新規に追加した変数 ipotet を COMMON /BLK6/ に追加した。また、HELP のソースを改良した。

3.5. 出力フォーマットの整備

HELP の日別／月別／年別データにおける計算結果は、1 年ごとに各項目の一覧を出力しているため、経時変化が読み取りにくい。そこで、経時変化の確認を容易にするために、離れた位置に出力されていた物理量を、時刻が連続的に並ぶよう出力する後処理プログラムを作成した。

(1) 後処理プログラムの処理の流れ

後処理プログラムの処理の流れを付図 3-2 に示す。入力ファイル (ExtractedPara.inp) を読み込み、日別／月別／年別データのフラグにしたがって処理を実行し、出力ファイル (ExtractedPara.dat) へ処理結果を出力する。

(2) 後処理プログラムの入力ファイルの構成

ユーザーが後処理プログラムの設定を自由に変更できるように、入力ファイル (ExtractedPara.inp) を用意した。入力ファイルの例を付図 3-3 に示す。また、入力ファイルの構成を付表 3-4 に示す。

4. SYNGEN プログラムの改良・整備

HELP コードは、気象データ（降水量、気温、日射量）をもとに、数十年の長期間にわたる水の浸透水量や蒸発散量を計算する。この計算において、実際に観測された気象データを与える代わりに、計算期間を通じて人工的に生成した疑似的な気象データを与えて計算する方法が用意されている。長期にわたる疑似的な気象データを生成する手法は、Richardson (1981) ²⁾によって確率論的に生成する手法が提案されており、WGEN コード Richardson, et al. (1984) ³⁾として実装されている。HELP コードでは、WGEN と同様の機能を持つコードとして、SYNGEN が利用可能である。

この章では、SYNGEN プログラムを改良した作業について示す。SYNGEN はもともと、Windows XP 以前の OS 上で動作することを想定した実行形式ファイルが用意されている。SYNGEN を Windows7/8 で実行できるようにするために行った作業について第 4.1 節に示す。また、入出力において使用される単位系は、一部の入力パラメータで SI 単位による入力が可能であるものの、主に米慣習単位であった。全ての入出力単位系を SI 単位系に統一するために行った作業について、第 4.2 節で示す。第 4.3 節では、日本の気象データから SYNGEN の入力ファイルを作成する計算コードの整備作業について示す。

4.1. Windows7/8 環境での SYNGEN プログラムの整備

既存の HELP コードに同梱している SYNGEN プログラムの実行形式ファイルは、Windows XP 用に作成されていたため、Windows7/8 の環境では実行することができなかった。そこで、Windows7/8 の環境用にプログラムをソースコードからコンパイルし、SYNGEN の実行形式ファイルを生成した。コンパイルの際は HELP プログラムと同様に、整数型及び単精度実数型変数を 8 バイトに、倍精度実数型変数を 16 バイトにするオプションを設定した。コンパイル及び実行においてはエラー等の問題は発生しなかった。

4.2. 入出力単位の改良

SYNGEN の入力については、入力値を米慣習単位と SI 単位のどちらで入力するか選択可能とするが、出力値の単位は SI 単位に統一した。それぞれの改良内容は以下に示す。また、SYNGEN プログラムのフローを付図 4-1 に示す。

(1) 入力値に対する単位変換

SYNGEN プログラムでは、コード内で使用される係数は、変数が米慣習単位であることを前提にしている。本作業では、SI 単位で作成された日本の気象データを入力値として与えることができるように、計算ルーチンへ入る前に SI 単位の入力値を米慣習単位へ変換してから計算ルーチンへ与えるようにプログラムを改良した。

SYNGEN の入力パラメータと、その入出力単位についてまとめた表を付表 4-1 に示す。「行」

の列は、SYNGEN への入力ファイル ‘SYNGEN_PRE.TMP’ または ‘SYNGEN_TMP.TMP’ または ‘SYNGEN_RAD.TMP’ の中でそれぞれのパラメータが記述されている行の位置を意味している。「SYNGEN2013 内での変数名」の列は、コード内に記述された変数名である。“if (ITYPE=…) …” で示されている要素は、入力ファイル ‘SYNGEN_PRE.TMP’ では 5 行目が RM であり、‘SYNGEN_TMP.TMP’ では 5 行目が TM であることを意味し、‘SYNGEN_RAD.TMP’ では 5 行目が ULAT であることを意味している。既存の HELP コードシステムで生成される SYNGEN プログラムの入力データにおける単位系を「改良前の入力単位」の列に示している。本作業によって入出力単位を変更した結果が「改良後入力単位」の列に示された単位である。「単位変換」の欄の「○」は、プログラム内部で単位変換を行う変数であることを意味する。

オリジナルの SYNGEN であっても、第 2 行目の IUNITS を 2 に指定することで月間降水量及び月平均気温 (RM と TM) は SI 単位系で与えることが可能であった。しかし、それ以外の入力値は IUNITS=2 を指定しても米慣習単位で入力しなければならなかった。そこで本作業では、疑似的な気象データの生成のために必要な入力値については、すべて SI 単位系の数値を読み込んだ後、一括で単位変換を行うサブルーチン si2cus (新規作成) を通すことで、米慣習単位の入力を前提とした既存の疑似的な気象データ生成ルーチンと矛盾することなく、SI 単位系の入力値を与えることができるようになった。

付表 4-1 において網かけで表示されているパラメータは、SYNGEN プログラムにおける気象データ作成に使用されないパラメータであることを示している。これらの使用されないパラメータに含まれる TEMP (10 行目)、IBG、IFG、IEG (11 行目)、RAIN (14 行目)、WIND (15 行目) は、プログラム内部での SI 単位から米慣習単位へ変換しないこととした。

(2) 出力値に対する単位変換

SYNGEN で計算により生成された気象データを出力する箇所については、入出力単位を選択するパラメータである IUNITS のいかに依らず、SI 単位へ換算するように改良した。

4.3. 日本の気象データから SYNGEN の入力ファイルを作成する計算コードの整備

SYNGEN は米国で開発されたコードであるため、既存の気象データファイルは米国仕様となっている。そこで、日本の気象データから、付表 4-1 に示す SYNGEN の入力パラメータを作成する計算コード SetParamSYNGEN を整備した。SetParamSYNGEN で整備した出力ファイルは、SYNGEN の入力ファイルをして使用することが可能となる。計算コードの整備作業についてを以下に示す。

(1) 概要

SYNGEN を用いて疑似的な気象データを作成するためには、まず、元となる気象観測データをサンプリングし、このサンプルを特徴づけるパラメータを算出する。これをもとに、

サンプルと同じ統計的な性質を持つ疑似気象データを確率論的に生成する。特に米国の気候については、Richardson (1981)²⁾によって詳細に調査され、気象を特徴づけるパラメータが地域ごとに米国国土のほぼ全域において示され、また、最高気温、最低気温、日射量の相互相関係数が示されている。ここでは、疑似気象データを日本の気候に合わせて生成できるようにするため、気象観測データのサンプルを特徴づけるパラメータを算出するコード SetParamSYNGEN を作成した。

(2) SetParamSYNGEN の整備

日本の気象データから SYNGEN の入力パラメータを作成するにあたり、計算する必要があるパラメータの計算手法は、WGEN コード (Richardson, et al. (1984)³⁾) の前処理プログラムとして提供されている PAR コードに従った。ここで算出する特徴的なパラメータとは、付表 4-1 において白い背景で示されている量のうち、RM、TM、ULAT、TXMD、TXMW、TN、ATX、CVTX、ACVIX、CVTN、ACVTN、RMD、RMW、AR、PWW、PWD、ALPHA、BETA の 18 個である。

SetParamSYNGEN では、計算に必要な気象観測データのサンプルとして、1 地点以上の場所それぞれにおける 1 月 1 日から 12 月 31 日までの日々の気象データを 1 年間以上の期間分用意することを前提とした。気象データとは、1 日の平均気温、最高気温、最低気温、降水量、日射量であり、入力ファイルは付表 4-2 の書式で用意する。入力ファイルの名前や単位系などの入力パラメータは、SetParamSYNGEN.inp ファイルに付表 4-3 の書式に従って記述する。

(3) SetParamSYNGEN のオプション機能の整備

SetParamSYNGEN2013 のオプション機能として、ユーザーが用意した気象データを HELP 用フォーマットの入力データに変換する機能を作成した。この機能を使うためには、SetParamSYNGEN.inp において気象データの種類 KDAT を 2 に設定する必要がある。同様に、気象データのファイル名および作成したい HELP 用の入力データの期間を設定する。ユーザーが用意する気象データのファイル構成を付表 4-4 に示す。

参考文献

- 1) US Army Corps of Engineers : “Environmental Laboratory”, (online) available from <<http://el.erdc.usace.army.mil/products.cfm?Topic=model&Type=landfill>>(accessed on 2014-01-17).
- 2) Richardson, C.W. et al., “Stochastic Simulation of Daily Precipitation, Temperature, and Solar Radiation”, Water Resources Research, vol.17, no.1, (1981), pp.182-190.
- 3) Richardson, C.W. et al, “WGEN: A Model for Generating Daily Weather Variables”, United States Department of Agriculture, (1984).

付表 3-1 COMMON /BLK60/の変数の構成

変数 (month =12, segment = 67)	内容
drnms(month, segment)	セグメント毎の月排水量
drnas(segment)	セグメント毎の年排水量
prcms(month, segment)	セグメント毎の月浸透水量
prcas(segment)	セグメント毎の年浸透水量
rcrs(segment)	セグメント毎の日循環水量
nsegs	セグメント数 (subroutine SGMNT のローカル変数を組み込んだ)

付表 3-2 サブルーチン DRAIN のローカル変数

変数 (segment = 67)	内容
drns(segment)	セグメント毎の日排水量
prcs(segment)	セグメント毎の日浸透水量

付表 3-3 COMMON /BLK62/の変数の構成

変数 (segment = 67)	内容
tdrnas(segment)	セグメント毎の排水量 (立法フィート)
fdrnas(segment)	セグメント毎の降水量に対する排水量の割合
tprcas(segment)	セグメント毎の浸透水量 (立法フィート)
fprcas(segment)	セグメント毎の降水量に対する浸透水量の割合

付表 3-4 後処理プログラムの入力ファイルの構成

Card	変数	書式	内容	
A	fdat	i1	読み込むデータを選択する。 0：デフォルトの HELP の出力データ 1：改良後の HELP の出力データ	
B	cdat	a200	デフォルトの HELP の出力ファイル名	
	ddat	a200	改良後の HELP の出力ファイル名	
C	dflag	free	日別データの処理の実行フラグ	0：実行しない 1：実行する
	mflag		月別データの処理の実行フラグ	
	yflag		年別データの処理の実行フラグ	
日別データ				
1	mskey	—	日別データの処理に対する入力条件の開始文字列として[日別]と入力する。	
1	skey	a200	後処理対象となる範囲の開始文字列	
2	nkey	free	キーワード文字列の総数	
	keyword(i,1)	a200	上段のキーワード文字列 (HEAD, DRAIN, LEAK)	
	keyword(i,2)	a200	下段のキーワード文字列 (#1, #2, #3, . . .)	
月別データ				
1	mskey	—	月別データの処理に対する入力条件の開始文字列として[月別]と入力する。	
1	skey	a200	後処理対象となる範囲の開始文字列	
2	nkey	free	キーワード文字列の総数	
	keyword(i,1)	a200	上段のキーワード文字列	1 つのキーワード文字列 を上段と下段に分割
	keyword(i,2)	a200	下段のキーワード文字列	
年別データ				
1	mskey	—	年別データの処理に対する入力条件の開始文字列として[年別]と入力する。	
1	skey	a200	後処理対象となる範囲の開始文字列	
2	ekey	a200	後処理対象となる範囲の終了文字列	
3	nkey	free	キーワード文字列の総数	
	keyword(i)	a200	キーワード文字列	

付表 4-1 SYNGEN 入力ファイル内のパラメータに関する説明 (その1)

行	SYNGEN コード内での 変数名	内容	改良前入力単位	改良後入力単位	単位 変換
1	ITYPE	作成する気象データ (1=降水量、2=気温、3=日射量)	-	-	-
2	IUNITS	入力単位 (1=米慣習単位、2=SI 単位)	-	-	-
3	KNAME	州と都市の名前	-	-	-
4	NYRS	疑似的な気象データを生成する期間 (最大 100 年間)	-	-	-
5	if (ITYPE=1) RM	選択した都市の月間降水量 (1~12 月)	米慣習 (inch) / SI (mm)	米慣習 (inch) / SI (mm)	○
	if (ITYPE=2) TM	選択した都市の月平均気温 (1~12 月)	米慣習 (°F) / SI (°C)	米慣習 (°F) / SI (°C)	○
	if (ITYPE=3) ULAT	選択した都市の緯度	度	度	-
6	ALAT	択した都市のデフォルトの緯度	度	度	-
	TXMD	年間で降水無しの日における 1 日当たりの最高気温の平均	米慣習単位 (°F) のみ	米慣習 (°F) / SI (°C)	○
	TXMW	年間で降水有りの日における 1 日当たりの最高気温の平均	米慣習単位 (°F) のみ	米慣習 (°F) / SI (°C)	○
	TN	年間の最低気温の平均	米慣習単位 (°F) のみ	米慣習 (°F) / SI (°C)	○
	ATX	1 日当たりの最高気温の年変動幅	米慣習単位 (°F) のみ	米慣習 (°F) / SI (°C)	○
	ATN	1 日当たりの最低気温の年変動幅	米慣習単位 (°F) のみ	米慣習 (°F) / SI (°C)	○
	CVTX	1 日当たりの最高温度の変動係数	-	-	-
	ACVIX	1 日当たりの最高気温の変動係数の振幅	-	-	-
	CVTN	1 日当たりの最低温度の変動係数	-	-	-
	ACVTN	1 日当たりの最低気温の変動係数の振幅	-	-	-

※網かけは SYNGEN プログラムでの疑似的な気象データ作成に使用されない入力を示す。

付表 4-1 SYNGEN 入力ファイル内のパラメータに関する説明 (その2)

行	SYNGEN コード内での 変数名	内容	改良前入力単位	改良後入力単位	単位 変換
	RMD	年間における降水無しの日の日射量の平均	米慣習単位(Langley)のみ	米慣習(Langley)/ SI(MJ/m ²)	○
7	RMW	年間における降水有りの日の日射量の平均	米慣習単位(Langley)のみ	米慣習(Langley)/ SI(MJ/m ²)	○
	AR	降水無しの日の日射量の振幅	米慣習単位(Langley)のみ	米慣習(Langley)/ SI(MJ/m ²)	○
8	PWW	降水有りの翌日に降水有りとなる確率 (1~12月)	-	-	-
9	PWD	降水無しの日翌日に降水有りとなる確率 (1~12月)	-	-	-
10	TO	選択した都市の通常時の月平均気温 (1~12月)	米慣習単位(°F)のみ	米慣習(°F)/SI(°C)	-
	IPL	植物群の生育期の開始日	day (1月1日からの日数)	day (1月1日からの日数)	-
	IHV	植物群の生育期の終了日	day (1月1日からの日数)	day (1月1日からの日数)	-
11	BLAJ	選択した都市の最大葉面積指数 (LAI)	-	-	-
	IBG	選択した都市の蒸発ゾーン深さの BARE 値	米慣習単位	米慣習単位	-
	IFG	選択した都市の蒸発ゾーン深さの FAIR 値	米慣習単位	米慣習単位	-
	IEG	選択した都市の蒸発ゾーン深さの EXCELLENT 値	米慣習単位	米慣習単位	-
12	ALPHA	ガンマ分布の形状パラメータ (1~12月)	-	-	-
13	BETA	ガンマ分布の形状パラメータ (1~12月)	-	-	-
14	RO	選択した都市の通常時の月平均降水量, 単位: inch, mm	米慣習単位	米慣習単位	-
15	WIND	選択した都市の平均風速[mile/h], [km/h]	米慣習単位	米慣習単位	-
	HUM	選択した都市の四半期ごとの相対湿度	[%]	[%]	-

※網かけは SYNGEN プログラムでの疑似的な気象データ作成に使用されない入力を示す。

付表 4-2 気象観測データ入力ファイルの書式

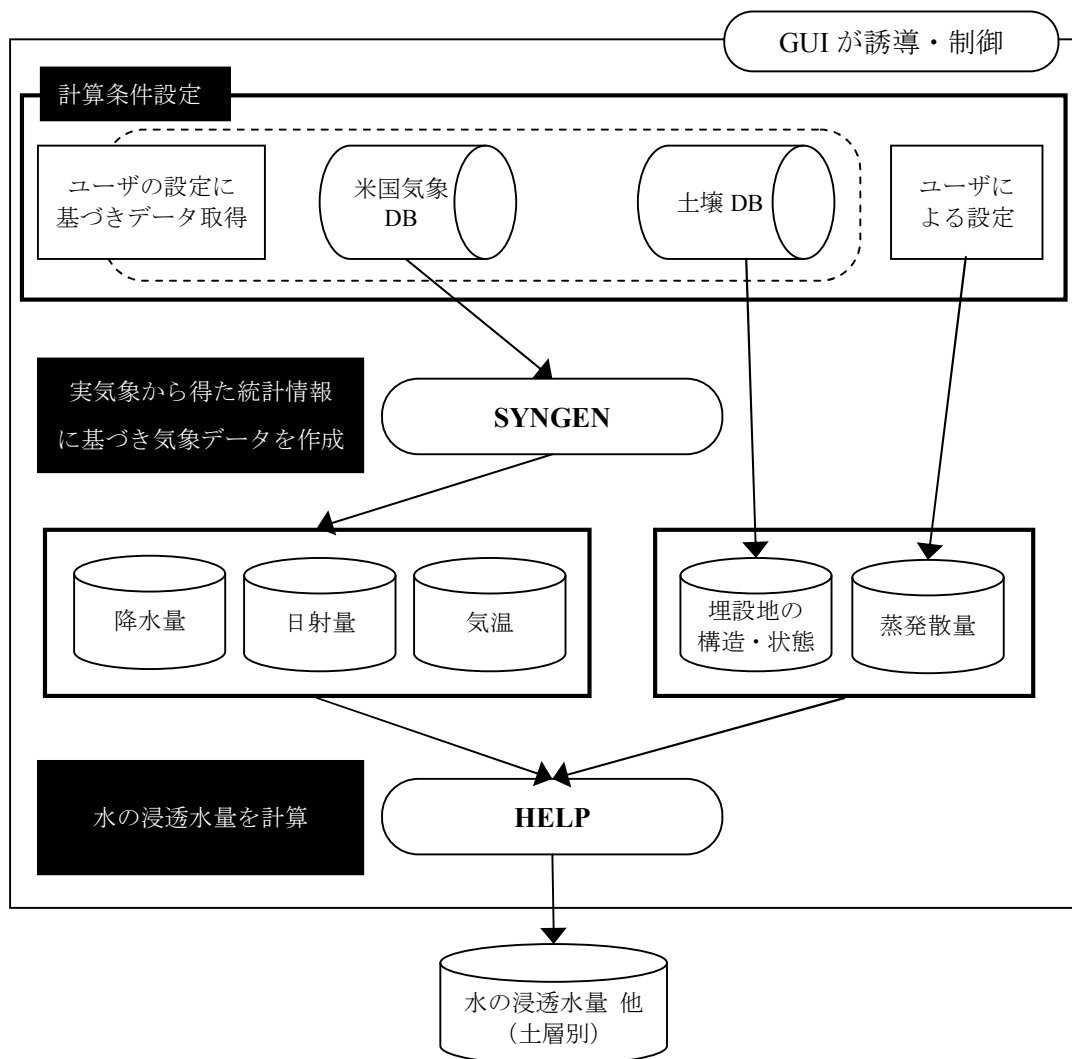
行 No.	フィールド No.	説明
1	-	コメント
2	-	コメント
3	1	3次メッシュ コード
	2	観測年 (西暦)
	3	観測月
	4	観測日
	5	1日間の平均気温[°C]
	6	1日間の最高気温[°C]
	7	1日間の最低気温[°C]
	8	1日間の降水量[mm]
	9	1日間の日照時間[h] (ダミーのデータ)
	10	1日間の日射量[MJ/m]
行 No.3 を 365 日×数年分×メッシュ数の数だけ繰り返す。(うるう年の 2 月 29 日は自動的に読み飛ばされ、計算には使われない。)		

付表 4-3 SetParamSYNGEN の入力パラメータ設定用ファイル (SetParamSYNGEN.inp)

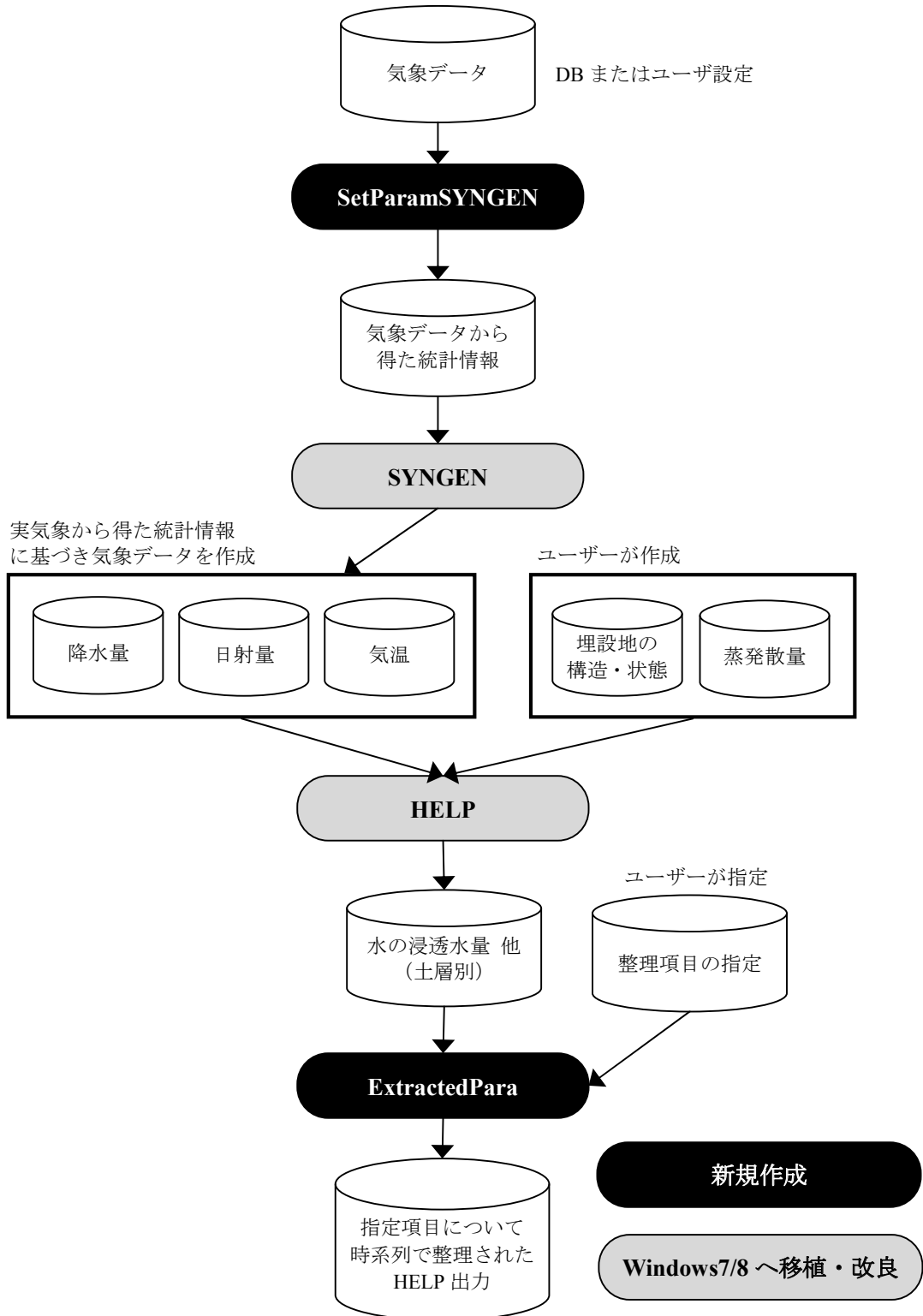
行 No.	変数名	書式	説明
1	KDAT	I	気象データの種類 =1: 農業環境情報統合センターダウンロードデータ(CSV) =2: ユーザーが設定した自由書式のデータ
2	IUNITS	I	unit converion =1: 入力された気象データを米慣習単位系の数値と解釈する。 =2: 入力された気象データを SI 単位系の数値と解釈する。
3	NFILE	A60	気象観測データのファイル名
4	MYEAR	I	データを生成する年数(最大 100 年) (KDAT=2 の場合に使用)

付表 4-4 ユーザーが用意する気象データのファイル構成

Card	変数名	書式	説明
1	ODAYS	FREE	用意した気象データの日数 (最大 36525 日)
2	ALAT	FREE	緯度
Card3 は平均気温, 降水量, 日射量の順で入力する。			
3	obsTemp	FREE	毎日の平均気温
	obsRain		毎日の降水量
	obsRad		毎日の日射量
Card3 を用意したデータの日数分だけ繰り返す。			



付図 2-1 既存の HELP コードの構造



付図 2-2 整備した HELP コードの構造

土層 No. (厚さ)	レイヤ タイプ	サブプロ ファイル	セグメント
1 (30.48 cm)	1	1	1
			2
			3
			4
2 (60.96 cm)	1		5
			6
			7
			8
3 (30.48 cm)	1	9	
4 (91.44 cm)	2	10	
		11	
5 (548.64 cm)	3	12	
6 (60.96 cm)	2	2	13
			14
7 (91.44 cm)	3		15
8 (320.04 cm)	1	3	16
			17
			18

レイヤタイプ

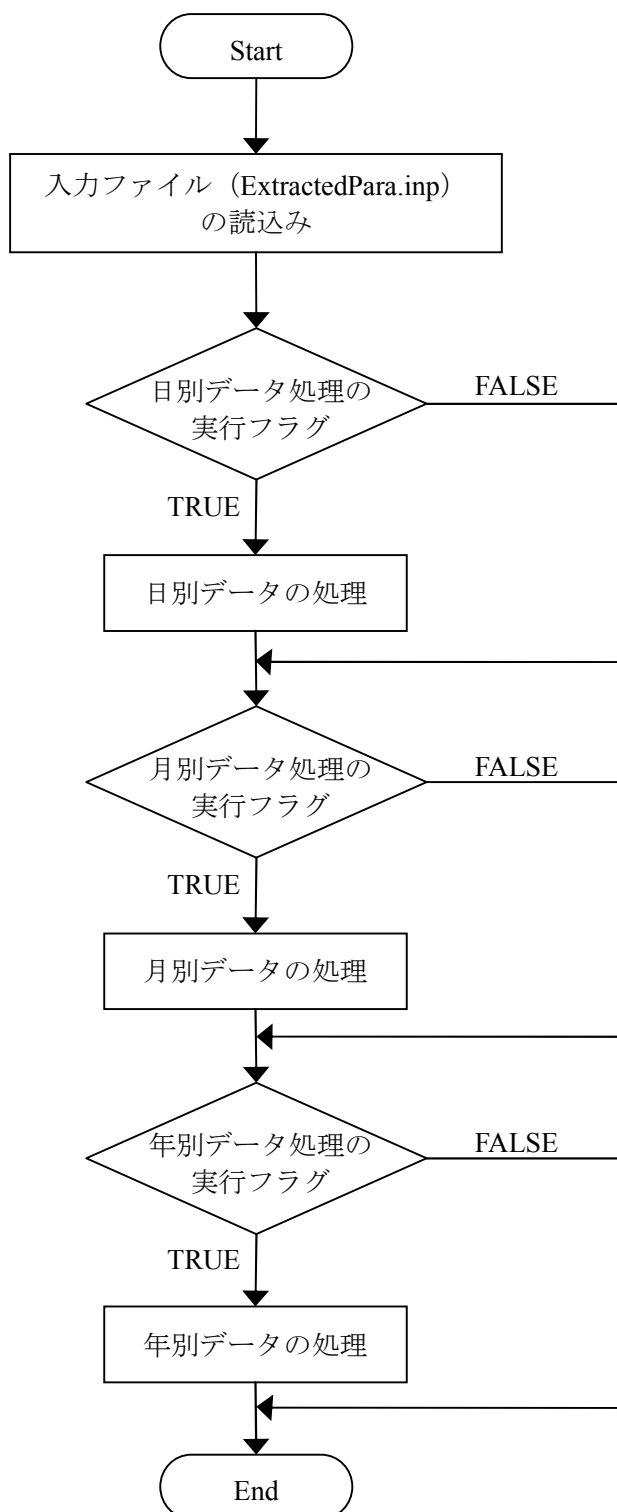
1=垂直浸透層
2=横排水層
3=バリア土壌層
4=遮水シート

セグメント分割数は、土層の厚さ(cm) で決定
(レイヤタイプ 1 または 2)

土層厚さ ≤ 45.72 → 1
45.75 < 土層厚さ ≤ 91.44 → 2
土層厚さ < 91.44 → 3

※ 蒸発ゾーンは必ず 7 分割
セグメント = 厚さ
1 = 1/36 × EDEPTH
2 = 5/36 × EDEPTH
3 ~ 7 = 1/36 × EDEPTH

付図 3-1 CWF の土壌構造モデル



付図 3-2 後処理プログラムのフローチャート

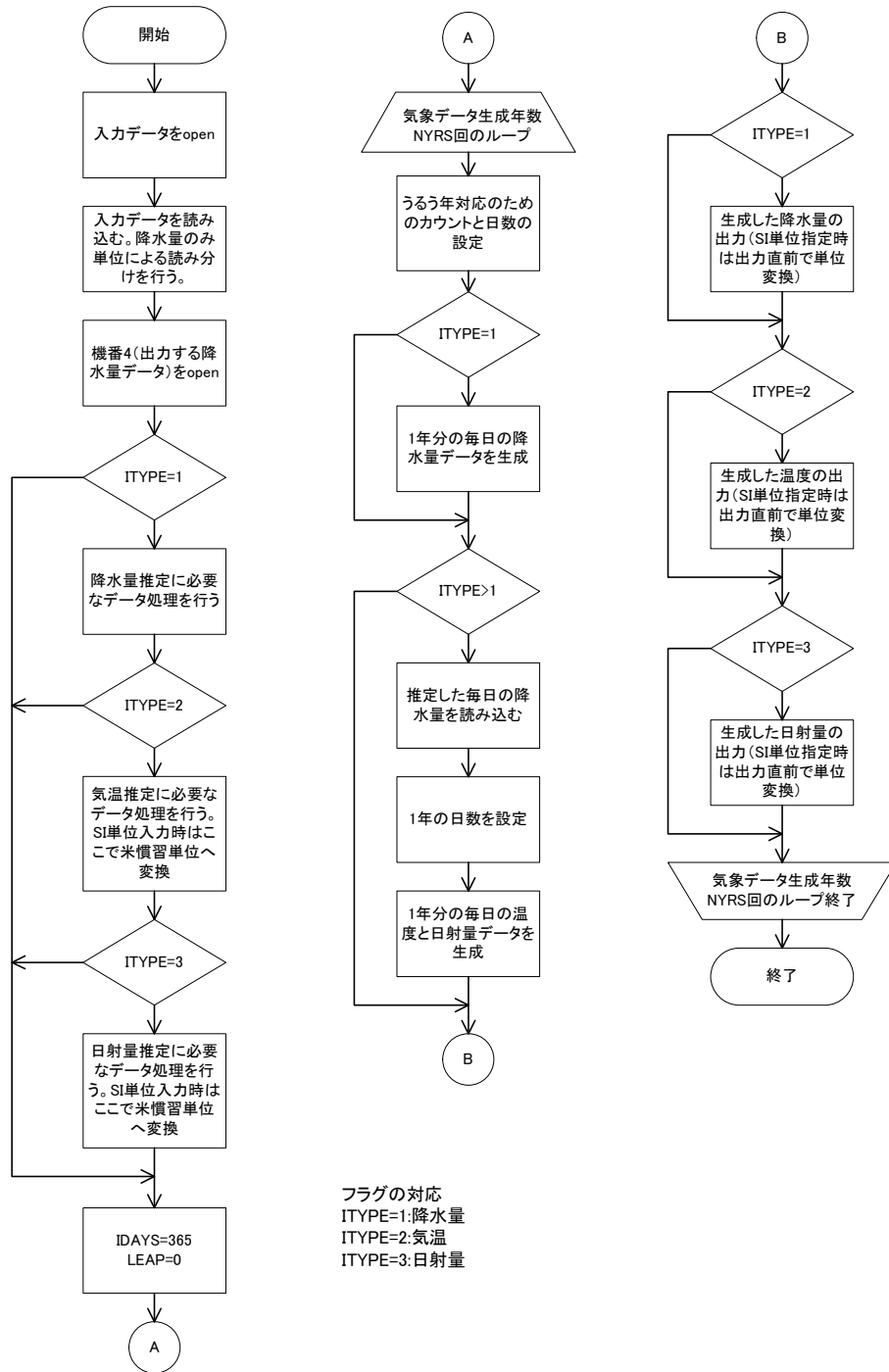
```

*-----
* card A: 読み込むデータの選択
*           0 : デフォルトの HELP の出力データ
*           1 : 改良後の HELP の出力データ
0
*-----
* card B: data file
HELP_DEF.OUT
HELP_NEW.OUT
*-----
* card C: 後処理の実行フラグ
*           日別, 月別, 年別
*           0 : 実行させない 1 : 実行させる
1 1 1
*-----
[日別]
*-----
* card 1: skey   キーワードの検索を開始する文字列
DAILY OUTPUT FOR YEAR
*-----
* card 2: nkey   キーワードの個数
*           keyword(i,1)  上段のキーワード文字 (nkey 回繰り返し)
*           keyword(i,2)  下段のキーワード文字 (nkey 回繰り返し)
3
HEAD
#2
DRAIN
#2
LEAK
#2
*-----
[月別]
*-----
* card 1: skey   キーワードの検索を開始する文字列
MONTHLY TOTALS (MM) FOR YEAR
*-----
* card 2: nkey   キーワードの個数
*           keyword(i,1)  上段のキーワード文字 (nkey 回繰り返し)
*           keyword(i,2)  下段のキーワード文字 (nkey 回繰り返し)
3
PRECIPITATION

LATERAL DRAINAGE COLLECTED
FROM LAYER 6
PERCOLATION/LEAKAGE THROUGH
LAYER 8
*-----
[年別]
*-----
* card 1: skey   キーワードの検索を開始する文字列
*           ekey   キーワードの検索を終了する文字列
ANNUAL TOTALS FOR YEAR
ANNUAL WATER BUDGET BALANCE
*-----
* card 2: nkey   キーワードの個数
*           keyword   キーワード文字 (nkey 回繰り返し)
3
PRECIPITATION
DRAINAGE COLLECTED FROM LAYER 6
PERC./LEAKAGE THROUGH LAYER 7
*-----
* card 3: format
*           フォーマットの指定
a36, f17.6

```

付図 3-3 後処理プログラムの入力ファイル例



付図 4-1 既存の SYNGEN プログラムのフロー図

This is a blank page.

国際単位系 (SI)

表1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質の量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
体積	立法メートル	m ³
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²
波数	毎メートル	m ⁻¹
密度, 質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m ²
比体積	立方メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 ^(a) , 濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
質量濃度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率 ^(b)	(数字の)	1
比透磁率 ^(b)	(数字の)	1

(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) ともよばれる。
 (b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	他のSI単位による表し方
平面角	ラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)
立体角	ステラジアン ^(b)	sr ^(c)	1 ^(b)
周波数	ヘルツ ^(d)	Hz	s ⁻¹
力	ニュートン	N	m kg s ⁻²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s
電荷, 電気量	クーロン	C	s A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラド	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V
磁束	ウエーバ	Wb	Vs
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C	K
光照射度	ルーメン	lm	cd sr ^(c)
放射線量	グレイ	Gy	J/kg
放射性核種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq	s ⁻¹
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト ^(g)	Sv	J/kg
酸素活性	カタール	kat	s ⁻¹ mol

(a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。
 (b) ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明示されない。
 (c) 測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
 (d) ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
 (e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の間には100の差がある。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。
 (f) 放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
 (g) 単位シーベルト (PV.2002.70,205) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

表4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘力のモーメント	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹
表面張力	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
角速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ = s ⁻¹
熱流密度, 放射照度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²	m m ⁻¹ s ⁻² = s ⁻²
熱容量, エントロピー	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg s ⁻³
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m ² kg s ⁻² K ⁻¹
比エネルギー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m ² s ⁻² K ⁻¹
熱伝導率	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² s ⁻²
体積エネルギー	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
電界の強さ	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²
電荷密度	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m kg s ⁻³ A ⁻¹
電表面積	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ s A
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
誘電率	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
透磁率	ファラド毎メートル	F/m	m ⁻³ kg ⁴ s ⁴ A ²
モルエネルギー	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ²
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル	J/mol	m ² kg s ⁻² mol ⁻¹
照射線量 (X線及びγ線)	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m ² kg s ⁻² K ⁻¹ mol ⁻¹
吸収線量率	ジュール毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ s A
放射線強度	グレイ毎秒	Gy/s	m ² s ⁻³
放射輝度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ⁴ m ⁻² kg s ⁻³ = m ² kg s ⁻³
酵素活性濃度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m ² sr)	m ² m ⁻² kg s ⁻³ = kg s ⁻³
	カタール毎立方メートル	kat/m ³	m ³ s ⁻¹ mol

表5. SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 ²⁴	ヨタ	Y	10 ¹	デシ	d
10 ²¹	ゼタ	Z	10 ²	センチ	c
10 ¹⁸	エクサ	E	10 ³	ミリ	m
10 ¹⁵	ペタ	P	10 ⁶	マイクロ	μ
10 ¹²	テラ	T	10 ⁹	ナノ	n
10 ⁹	ギガ	G	10 ¹²	ピコ	p
10 ⁶	メガ	M	10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ³	キロ	k	10 ⁻¹⁸	アト	a
10 ²	ヘクト	h	10 ⁻²¹	ゼプト	z
10 ¹	デカ	da	10 ⁻²⁴	ヨクト	y

表6. SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648000) rad
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
リットル	L, l	1 L=11=1 dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1 t=10 ³ kg

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位で表される数値
電子ボルト	eV	1 eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J
ダルトン	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg
統一原子質量単位	u	1 u=1 Da
天文単位	ua	1 ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ m

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1 MPa=100 kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg=133.322 Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1 nm=100 pm=10 ⁻¹⁰ m
海里	M	1 M=1852 m
バイン	b	1 b=100 fm ² =(10 ¹² cm) ² =10 ⁻²⁸ m ²
ノット	kn	1 kn=(1852/3600) m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的関係は、 対数量の定義に依存。
ベール	B	
デジベル	dB	

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
エル	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1 Pa s
ストークス	St	1 St=1 cm ² s ⁻¹ =10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹
スチルブ	sb	1 sb=1 cd cm ⁻² =10 ⁴ cd m ⁻²
フオト	ph	1 ph=1 cd sr cm ⁻² =10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal=1 cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²
マクスウェル	Mx	1 Mx=1 G cm ² =10 ⁻⁸ Wb
ガウス	G	1 G=1 Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T
エルステッド ^(c)	Oe	1 Oe _e =(10 ³ /4π) A m ⁻¹

(c) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「△」は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位で表される数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1 cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
フェルミ	f	1 フェルミ=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1メートル系カラット=200 mg=2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr=(101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm=101 325 Pa
カロリ	cal	1 cal=4.1858 J (「15°C」カロリ), 4.1868 J (「IT」カロリ), 4.184 J (「熱化学」カロリ)
マイクロン	μ	1 μ=1 μm=10 ⁻⁶ m

