

緩衝材性能最適化に関する 方法論の基礎的研究

技 術 資 料		
開示区分	レポ ー ト No.	受 領 日
ㄨ	J1222 96-008	1997. 1. 13.
この資料は技術管理室保存資料です 閲覧には技術資料閲覧票が必要です 動力炉・核燃料開発事業団 技術協力部技術管理室		

(動力炉・核燃料開発事業団 研究委託内容報告書)

1996年3月

この資料は、動燃事業団の開発業務を進めるため、特に限られた関係者だけに開示するものです。ついては、複製、転載、引用等を行わないよう、また第三者への開示又は内容漏洩がないよう管理して下さい。また今回の開示目的以外のことには使用しないよう特に注意して下さい。

This document is not intended for publication. No public reference nor disclosure to the third party should be made without prior written consent of Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation.

本資料についての問い合わせは下記に願います。

〒107 東京都港区赤坂1-9-13

動力炉・核燃料開発事業団

技術協力部 技術管理室

緩衝材性能最適化に関する 方法論の基礎的研究

大久保博生*

要 旨

前年度に試行した緩衝材機能の評価結果をもとに、まず、各評価指標の定量評価式を求めるため、ケイ砂混合率、含水比、締固め圧力の3変数を説明変数とする多変数回帰式の同定を試みた。その入力データとのフィッティング状況の検討を通じ、これらの定量評価式を組み込んだ緩衝材機能総合評価解析を試行した。

本報告書は、株式会社三菱総合研究所が動力炉・核燃料開発事業団の委託により実施した研究内容結果である。

契約番号：070D0389

事業団担当部課及び担当者：環境技術開発推進本部 処分研究グループ 担当役

梅木 博之 殿

* 地球環境研究センター エネルギー・資源研究部

A Fundamental Study on Optimization
for Performance of Buffer Material

Hiroo Ohkubo*

Abstract

Based on the previous report of a preliminary assessment for performance of buffer material, we tackled a problem of identifying each quantitative assessment indicator by multivariate regression analysis where the contents of silica sand and water, and tightening pressure have been chosen as explanatory variables. Then, after a discussion on the data fitting goodness, an illustrated analysis on the total value of performance of buffer material using these regression equations has been made.

This report is the result of research conducted by Mitsubishi Research Institute, Inc. under contract with Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation.

Contract No.:070D0389

Department, section, and the name of staff in charge:

Hiroyuki Umeki, Isolation System Research Program, Radioactive Waste Management Project, Environmental Technology Development Division

* Energy and Natural Resources Dept., Research Center for Environment and Development.

目 次

	頁
まえがき	1
1. 多変数最適化フレームの作成	3
2. 緩衝材の機能に関する諸データの検討	6
3. 緩衝材の機能の最適化に関する解析評価の試行	2 4
3.1 各定量評価指標の多変量解析	2 4
3.2 総合評価の試行	4 3
まとめ	5 3
参考文献	5 5
付録	付 - 1
A. 緩衝材の機能に関する試験データの解析	付 - 3
B. 多変量解析結果と前年度推計結果との比較	付 - 34
C. 含水比をパラメータとした場合の各定量的評価指標の ケイ砂混合率依存特性の変化	付 - 45

表 目 次

	頁
表 1 各評価項目に対する定量評価指標とその評価対象領域	4
表 2 多変量解析用同定式	5
表 3 測定データ	7
表 4 最適ケイ砂混合率の変化(但し、締固め圧力 $P = 20\text{MPa}$)	5 1
付・表 1 (1) 乾燥密度 1.8g/cm^3 での含水比と飽和度の関係	付 - 11
付・表 1 (2) 初期飽和度と平衡膨潤圧力	付 - 11
付・表 2 最大乾燥密度を得た試料の一軸圧縮試験結果	付 - 25
付・表 3 最大乾燥密度を得た試料の熱伝導率	付 - 27
付・表 4 (1) クニゲル V 1 交換性陽イオン量測定結果	付 - 28
付・表 4 (2) クニピア F 交換性陽イオン量測定結果	付 - 28
付・表 5 ベントナイトの鉱物組成	付 - 29
付・表 6 緩衝材性能評価試験で得られた主な知見等	付 - 33

目 次

	頁
図 1 一軸圧縮強さ推計式の適合性 -〈6式〉の場合-	3 3
図 2 熱伝導率推計式の適合性 -〈6式〉の場合-	3 4
図 3 平衡膨潤圧力推計式の適合性 -〈5式〉の場合-	3 5
図 4 水分拡散係数推計式の適合性 -〈4式〉の場合-	3 6
図 5 透水係数推計式の適合性 -〈2式〉の場合-	3 7
図 6 (1) ^3H の見かけの拡散係数推計式の適合性	3 8
図 6 (2) ^{99}Tc の見かけの拡散係数推計式の適合性	3 9
図 6 (3) ^{237}Np の見かけの拡散係数推計式の適合性	4 0
図 6 (4) ^{241}Am の見かけの拡散係数推計式の適合性	4 1
図 7 乾燥密度推計式の適合性 -〈6式〉の場合-	4 2
図 8 (1) 各定量評価指標 α 値のケイ砂混合率依存特性	4 4
図 8 (2) 各評価項目の効用値のケイ砂混合率依存特性	4 5
図 9 総合評価値 Φ のケイ砂混合率依存特性	4 6
-基準ケース ($w = 10\%$, $P = 20\text{MPa}$, $w_i = 1/6$) -	
図 10 (1) 含水比の変化に対する総合評価値の変化	4 8
-基準ケース-	
図 10 (2) 含水比の変化に対する総合評価値の変化	4 9
-熱伝導性重視ケース-	
図 10 (3) 含水比の変化に対する総合評価値の変化	5 0
-核種吸着性重視ケース-	
付・図 1 乾燥密度と一軸圧縮強さ	付- 3
付・図 2 乾燥密度とヤング率	付- 4
付・図 3 含水比と一軸圧縮強さ	付- 5
付・図 4 含水比とヤング率	付- 6
付・図 5 含水比と熱伝導率	付- 7
付・図 6 ケイ砂混合率と熱伝導率	付- 8
付・図 7 試料温度と熱伝導率	付- 9

付・図 8	乾燥密度と平衡膨潤圧力	付 - 10
付・図 9	モンモリロナイト含有量と膨潤圧力	付 - 12
付・図10(1)	乾燥密度と近似解より求めた水分拡散係数	付 - 13
付・図10(2)	乾燥密度と見掛けの水分拡散係数	付 - 14
付・図10(3)	初期飽和度と水分拡散係数	付 - 15
付・図11	乾燥密度と透水係数	付 - 16
付・図12	ケイ砂混合率と透水係数	付 - 17
付・図13	透過液中NaCl濃度と透水係数	付 - 18
付・図14(1)	締固め試験結果 (P = 20MPa)	付 - 19
付・図14(2)	締固め試験結果 (P = 50MPa)	付 - 20
付・図14(3)	ベントナイト単体による締固め曲線 (ケイ砂混合率 = 0)	付 - 21
付・図15	ケイ砂混合率と最大乾燥密度との関係	付 - 22
付・図16	乾燥による含水比の変化と一軸圧縮強さの関係	付 - 23
付・図17(1)	各ケイ砂混合率で最も締固まった試料の 一軸圧縮強さ	付 - 24
付・図17(2)	各ケイ砂混合率で最も締固まった試料のヤング率	付 - 24
付・図18	各ケイ砂混合率で最も締固まった試料の熱伝導率	付 - 26
付・図19	ケイ砂混合率とモンモリロナイト含有量の関係	付 - 30
付・図20(1)	乾燥密度と見かけの拡散係数 (クニピア F)	付 - 31
付・図20(2)	乾燥密度と遅延係数 (クニピア F)	付 - 31
付・図20(3)	乾燥密度と分配係数 (クニピア F)	付 - 31
付・図21	乾燥密度と見かけの拡散係数 (クニゲル V 1)	付 - 32
付・図22	一軸圧縮強さ推計結果 (< 6 式 > の場合) の 前年度推計結果との比較	付 - 35
付・図23	熱伝導率推計結果 (< 6 式 > の場合) の前年度推計結果 との比較	付 - 36
付・図24	平衡膨潤圧力推計結果 (< 5 式 > の場合) の 前年度推計結果との比較	付 - 37

付・図25	水分拡散係数推計結果（＜4式＞の場合）の 前年度推計結果との比較	付-38
付・図26	透水係数推計結果（＜2式＞の場合）の前年度推計結果 との比較	付-39
付・図27(1)	^3H の見かけの拡散係数推計結果の前年度推計結果 との比較	付-40
付・図27(2)	^{99}Tc の見かけの拡散係数推計結果の前年度推計結果 との比較	付-41
付・図27(3)	^{237}Np の見かけの拡散係数推計結果の前年度推計結果 との比較	付-42
付・図27(4)	^{241}Am の見かけの拡散係数推計結果の前年度推計結果 との比較	付-43
付・図28	乾燥密度推計結果（＜6式＞の場合）の前年度推計結果 との比較	付-44
付・図29(1)	含水比をパラメータとした場合の各定量的評価指標 α 値のケイ砂混合率依存特性 — 一軸圧縮強さと最高温度 —	付-46
付・図29(2)	含水比をパラメータとした場合の各定量的評価指標 α 値のケイ砂混合率依存特性 — 平衡膨潤圧力と再冠水時間 —	付-47
付・図29(3)	含水比をパラメータとした場合の各定量的評価指標 α 値のケイ砂混合率依存特性 — 透水係数と線量当量率 —	付-48

まえがき

高レベル放射性廃棄物地層処分における人工バリアシステムを構成する緩衝材の候補材料として、現在ではベントナイトが有望視されている。しかし、ベントナイトのみで構成するよりもケイ砂を混合した方が、熱伝導性や経済性などの点で有利であるとも言われている。そこで、緩衝材の最適設計を行うためには、その機能、技術、経済性など複数の評価項目を総合的に検討することが必要であり、そのための方法論を確立していくことが重要である。

これまでに、ベントナイトにケイ砂を混合することによって変化し得る緩衝材の様々な特性を総合的に定量評価し、最適なケイ砂混合率を具体的に算定し得る予備的综合評価フレームを作成・試行した。その計算フレームでは、含水比、締固め圧力をパラメータとして扱い、ケイ砂混合率のみを最適化の対象としているなど、総合評価フレーム概念の基本的考え方を確認することを第一義と考えて評価式やデータの適用性などに関しては簡略化されたものとなっている。しかし、より一般には含水比や締固め圧力といった製造特性も制御変数に加え、また、データの不確実性について考慮しておくことが重要である。

そこで、本研究では、統計解析手法などのより一般化された計算方法を援用することにより、ケイ砂混合率、含水比、締固め圧力を同時に決定し得る多変数最適化フレームへの拡張を行う。さらに、適用データを整備・検討の上、改良された計算フレームによる具体的な解析を試みる。これによって、我が国の高レベル放射性廃棄物地層処分の人工バリアシステムにおける緩衝材の仕様の検討に資することとする。

1. 多変数最適化フレームの作成

前年度の報告書⁽⁷⁾では、効用関数法とAHP法を用いて、表1で設定した複数の定量的評価指標から構成される総合評価関数を構築するフレームを提案した。この総合評価フレームに基づいて総合評価関数を構築するには、まず、個々の評価指標（これを α_i ($i=1, 2, \dots, n$)とする)毎に効用関数 $u_i(\alpha_i)$ を求め、これらの効用関数に各評価項目間の重要度（これを w_i ($i=1, 2, \dots, n$)とする)を乗じて加算する必要がある。即ち、総合評価関数 $\Phi(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$ は、

$$\Phi(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n) = \sum_{i=1}^n w_i u_i(\alpha_i) \quad \dots \dots (1)$$

$$\text{但し, } \sum_{i=1}^n w_i = 1 \quad , \quad w_i > 0 \quad (i=1, 2, \dots, n)$$

となる。なお、定量的評価指標 α_i の増加が効用値 u_i の低下を招く評価項目については、 u_i のかわりに $1-u_i$ （これを不効用関数と呼ぶ）を上式(1)でおきかえ、評価するものとする。

さらに前年度の試計算用に設定した定量的評価指標 α_i （このうち、機械的安定性に関するものを一軸圧縮応力 σ に変更した以外は前年度の試計算用に設定したものと同一）に示されるように、表1で設定した独立パラメータ（ケイ砂混合率 R_s 、含水比 w 、温度 T 、締固め圧力 P 等）の関数型となっているため、(1)式を通じ、総合評価関数 Φ もこれらのパラメータの関数型となって表現される。従って、これのパラメータの増減変化を与えることにより、総合評価値 Φ の変化を解析することが可能となる。

前年度は、付録Aに示すように、各独立パラメータ（一変数）毎に他の変数を固定して評価指標の関数を求めたが、今回は、これらの変数を同時に含んだ多変数系の回帰式を求めるための方法（多変量解析の適用）を検討した。具体的な関数型を表2に示す。

表1 各評価項目に対する定量評価指標とその評価対象領域

評価項目	定量評価指標 α	α の増加に伴う効用／不効用	α の 評 価 対 象 領 域		備 考 (前年度 ⁽⁷⁾ 使用データ)
			α_{min}	α_{max}	
(1)機械的安定性 (含、製作後の機械的健全性)	一軸圧縮強さ： $\sigma(w, \rho_d, R_s)$	効用型	0	σ_{max}	(付・図8 [*] , 付・図9 [*] 付・図1, 付・図17(1) (付・表2))
(2)熱伝導性	最高温度： $=$ $T_0 + \frac{\lambda(w=6\%, \rho_d=1.8g/cm^3, R_s=0)}{\lambda(w, \rho_d, R_s)} (100 - T_0)$	不効用型	T_0	$T_{max} (=100^\circ C)$	(付・図5, 付・図6)
(3)(自己)シール性	平衡膨潤圧力： $P_s(w, \rho_d, R_s)$	効用型	0	> 1 (MPa) (但し、地圧30(MPa)以下)	(付・図8 [*] , 付・図9 [*])
(4) 不飽和時 止 水 性	再冠水時間： $=100 \cdot \frac{A(w=10\%; \rho_d=1.8g/cm^3, R_s=0\%)}{A(w, \rho_d, R_s)}$ ここで、 $A = D / (100 - S_r)^2$ $S_r = w / \{(0.99910 / \rho_d) - (1/2.7)\}$	効用型	0	≥ 100 (年)	(付・図10)
	飽和時 (再冠水後)	透水係数： $K(w, \rho_d, R_s)$	不効用型	0	10^{-11} (m/s)
(5)化学的緩衝性	緩衝性維持時間 等	効用型	-	-	今回はデータ不十分につき未考慮とする
(6)核種吸着性	m種の放射性核種の緩衝材出口(岩盤側)での線量当量率 $\sum_{i=1}^m \eta_i F_i / W ; F_i = \begin{cases} C_{i0} D_{a1}(\rho_d, R_s) / z_f & \text{(難溶性核種)} \\ J_s f_i & \text{(可溶性核種)} \end{cases}$ $W = 10^4 \sim 10^9 \text{ m}^3 / \text{y}^{(2)}$	不効用型	0	1 mSv/年 (但し、生態圏でのMPCあるいはリスク基準値をもとに、対応する緩衝材出口(岩盤側)での許容レベルへの換算値：EX. $6.06 \times 10^{-3} \sim 6.06 \times 10^{-2}$ (sv/年)を使うことも考えられる)	(付・図20 [*] , 付・図21 [*])

*クニピアFデータ利用

表2 多変量解析用同定式

(1) 一軸圧縮強さ

$$\sigma = a_0 + a_1 w + a_2 \rho_d + a_3 R_s + a_4 w \rho_d + a_5 R_s \rho_d + a_6 w R_s + a_7 w \rho_d R_s$$

(2) 熱伝導率

$$\lambda = (1) \text{と同じ}$$

(3) 平衡膨潤圧力

$$\ln P_s = a_0 + a_1 R_s + a_2 \rho_d + a_3 R_s \rho_d + \ln(a_4 + a_5 w)$$

(但し、今回は、右辺の対数項を $w = 0$ のまわりにテイラー展開した線形式を採用)

(4) 水分拡散係数

$$\ln D = a_0 + a_1 w + a_2 \rho_d + a_3 R_s + a_4 w \rho_d + a_5 R_s \rho_d + a_6 w R_s + a_7 w \rho_d R_s$$

(5) 透水係数

$$\ln K = (4) \text{と同じ (但し、前年度検討のデータ群}^{(7)} \text{には } w \text{ 可変データがなく、 } w = 10\% \text{ ケースのみ)}$$

(6) 見かけの拡散係数 (i : 核種)

$$\ln D_{a,i} = a_{0i} + a_{1i} \rho_d + a_{2i} R_s + a_{3i} \rho_d R_s$$

(7) 乾燥密度

$$\rho_d = a_0 + a_1 R_s + a_2 w + a_3 P + a_4 w^2 + a_5 w^3$$

2. 緩衝材の機能に関する諸データの検討

前年度の総合評価の試行に用いた評価指標は、基本的に、以下の諸量から構成されている。即ち、

- 1) 一軸圧縮強さ σ
- 2) 熱伝導率 λ
- 3) 平衡膨潤圧力 P_s
- 4) 水分拡散係数 D
- 5) 透水係数 K
- 6) 見かけの拡散係数 D_a

他方、これらの諸量は、以下の変数と実験的に関係のあることが一変数系の統計解析により示されている(1)(4)(5)(6)。

- 1) 乾燥密度 ρ_d
- 2) ケイ砂混合率 R_s
- 3) 含水比 w
- 4) 締固め圧力 P

さらに、前年度の解析では、乾燥密度 ρ_d は、 R_s, w, P の関数としての構築を試みた(7)。

そこで、本年度は、第1章で検討した多変数最適化フレームに適合するようなデータ群の整理を表3のような形で整理した。

表3 測定データ

説明変数 一軸圧縮強さ σ (MPa)	ρ_d (g/cm ³)	R_s (%)	w (%)	P (MPa)	図表データ
0.89	1.4	0	10		付・図1
1.65	1.5	0	10		付・図1
2.43	1.6	0	10		付・図1
3.91	1.7	0	10		付・図1
5.65	1.8	0	10		付・図1
7.61	2.0	0	10		付・図1
5.13	1.8	0	4		付・図3
5.44	1.8	0	4		付・図3
6.02	1.8	0	8		付・図3
6.29	1.8	0	8		付・図3
6.84	1.8	0	10		付・図3
6.95	1.8	0	10		付・図3
6.65	1.8	0	12		付・図3
6.75	1.8	0	12		付・図3
6.03	1.8	0	15		付・図3
6.10	1.8	0	15		付・図3
3.16	1.8	0	18		付・図3
1.85	1.8	0	20		付・図3
3.53	1.86	0	15.3	20	付・図16, 17 付・表2
3.58	1.86	0	15.3	20	付・図16, 17 付・表2
3.33	1.93	15	13.1	20	付・図16, 17 付・表2
3.26	1.93	15	13.1	20	付・図16, 17 付・表2
3.05	2.00	30	10.4	20	付・図16, 17 付・表2
3.17	2.00	30	10.4	20	付・図16, 17 付・表2
2.22	2.10	50	9.0	20	付・図16, 17 付・表2
2.23	2.10	50	9.0	20	付・図16, 17 付・表2
1.07	2.14	70	7.2	20	付・図16, 17 付・表2
1.00	2.14	70	7.2	20	付・図16, 17 付・表2

測定データ

説明変数 一軸圧縮強さ σ (MPa)	ρ_d (g/cm ³)	R_s (%)	w (%)	P (MPa)	図表データ
19.87		0	0	20	付・図16, 17 付・表2
17.28		15	0	20	付・図16, 17 付・表2
14.97		30	0	20	付・図16, 17 付・表2
13.18		50	0	20	付・図16, 17 付・表2
13.08		70	0	20	付・図16, 17 付・表2
6.50	1.95	0	13.0	50	付・図16, 17 付・表2
6.29	1.95	0	13.0	50	付・図16, 17 付・表2
5.27	1.99	15	11.5	50	付・図16, 17 付・表2
5.48	1.99	15	11.5	50	付・図16, 17 付・表2
5.57	2.06	30	9.0	50	付・図16, 17 付・表2
5.72	2.06	30	9.0	50	付・図16, 17 付・表2
5.04	2.13	50	7.5	50	付・図16, 17 付・表2
4.63	2.13	50	7.5	50	付・図16, 17 付・表2
1.61	2.18	70	7.1	50	付・図16, 17 付・表2
1.61	2.18	70	7.1	50	付・図16, 17 付・表2
28.38		0	0	50	付・図16, 17 付・表2
22.00		15	0	50	付・図16, 17 付・表2
20.38		30	0	50	付・図16, 17 付・表2
15.93		50	0	50	付・図16, 17 付・表2
8.75		70	0	50	付・図16, 17 付・表2

測定データ

熱伝導率 λ (W/m $^{\circ}$ C)	説明変数	ρ_d (g/cm 3)	R_s (%)	w (%)	P (MPa)	図表データ
0.275		1.4	0	0		付・図5
0.404		1.4	0	5		付・図5
0.483		1.4	0	7.5		付・図5
0.574		1.4	0	10		付・図5
0.631		1.4	0	12.5		付・図5
0.691		1.4	0	15		付・図5
0.417		1.6	0	0		付・図5
0.595		1.6	0	4.9		付・図5
0.687		1.6	0	6.4		付・図5
0.787		1.6	0	9.1		付・図5
0.955		1.6	0	12		付・図5
1.073		1.6	0	14.7		付・図5
1.307		1.6	0	19.8		付・図5
1.438		1.6	0	23.7		付・図5
0.556		1.8	0	0		付・図5
0.835		1.8	0	4.7		付・図5
0.916		1.8	0	6.7		付・図5
1.092		1.8	0	9.3		付・図5
1.191		1.8	0	11.8		付・図5
1.363		1.8	0	13.8		付・図5
1.585		1.8	0	17.0		付・図5
0.777		2	0	0		付・図5
1.023		2	0	4.3		付・図5
1.262		2	0	7.4		付・図5
1.348		2	0	8.7		付・図5
1.410		2	0	10.9		付・図5
0.787		1.6	0	10		付・図6
1.092		1.8	0	10		付・図6
1.348		2.0	0	10		付・図6
0.920		1.6	20	10		付・図6
1.330		1.8	20	10		付・図6
1.792		2.0	20	10		付・図6
1.042		1.6	30	10		付・図6
1.421		1.8	30	10		付・図6
1.965		2.0	30	10		付・図6
1.202		1.6	40	10		付・図6
1.650		1.8	40	10		付・図6
2.198		2.0	40	10		付・図6

測定データ

熱伝導率 λ (W/m $^{\circ}$ C)	説明変数	ρ_s (g/cm 3)	R_s (%)	w (%)	P (MPa)	図表データ
1.633		1.86	0	1.53	20	付・図18, 付・表3
1.793		1.93	15	13.1	20	付・図18, 付・表3
2.063		2.00	30	10.4	20	付・図18, 付・表3
2.513		2.10	50	9.0	20	付・図18, 付・表3
2.479		2.14	70	7.2	20	付・図18, 付・表3
1.042			0	0	20	付・図18, 付・表3
1.144			15	0	20	付・図18, 付・表3
1.265			30	0	20	付・図18, 付・表3
1.472			50	0	20	付・図18, 付・表3
1.427			70	0	20	付・図18, 付・表3

測定データ

説明変数 平衡膨潤圧力 P_s (MPa)	ρ_d (g/cm ³)	R_s (%)	w (%)	P (MPa)	図表データ
0.99	1.5	0	10		付・図8
0.71	1.5	0	10		付・図8
0.45	1.5	0	10		付・図8
1.08	1.6	0	10		付・図8
0.90	1.6	0	10		付・図8
0.83	1.6	0	10		付・図8
0.84	1.6	0	10		付・図8
1.11	1.6	0	10		付・図8
3.72	1.8	0	10		付・図8
3.85	1.8	0	10		付・図8
3.61	1.8	0	10		付・図8
3.51	1.8	0	10		付・図8
3.57	1.8	0	10		付・図8
3.68	1.8	0	10		付・図8
3.45	1.8	0	10		付・図8
3.82	1.8	0	10		付・図8
3.50	1.8	0	10		付・図8
3.50	1.8	0	10		付・図8
3.93	1.8	0	10		付・図8
4.32	1.8	0	10		付・図8
3.68	1.8	0	10		付・図8
3.71	1.8	0	10		付・図8
3.91	1.8	0	10		付・図8
3.18	1.8	0	10		付・図8
3.69	1.8	0	10		付・図8
4.13	1.8	0	10		付・図8
18.9	2.0	0	10		付・図8
14.7	2.0	0	10		付・図8
4.2	1.5	-98	10		付・図8
37.3	1.8	-98	10		付・図8
76.3	2.0	-98	10		付・図8
3.1	1.5	-50	10		付・図8
24.7	1.8	-50	10		付・図8
60.2	2.0	-50	10		付・図8
5.08	1.8	0	0		付・表1(2)
3.72	1.8	0	9.26		付・表1(2)
3.24	1.8	0	13.89		付・表1(2)

測定データ

説明変数 水分拡散係数 D (m^2/s)	ρ_d (g/cm^3)	R_s (%)	w (%)	P (MPa)	図表データ
3.5×10^{-10}	1.6	0	10		付・図10(1)
4.2×10^{-10}	1.8	0	10		付・図10(1)
9.2×10^{-10}	2.0	0	10		付・図10(1)
5.6×10^{-10}	1.6	-50	10		付・図10(1)
9.3×10^{-10}	1.8	-50	10		付・図10(1)
3.5×10^{-9}	2.0	-50	10		付・図10(1)
4×10^{-10}	1.6	0	10		付・図10(2)
5×10^{-10}	1.8	0	10		付・図10(2)
1×10^{-9}	2.0	0	10		付・図10(2)
2.2×10^{-10}	1.43	-50	10		付・図10(2)
3×10^{-10}	1.75	-50	10		付・図10(2)
3.4×10^{-10}	1.6	0	0		付・図10(3)
3.6×10^{-10}	1.8	0	0		付・図10(3)
4.1×10^{-10}	2.0	0	0		付・図10(3)
4.4×10^{-10}	1.6	0	13.11		付・図10(3)
4.2×10^{-10}	1.8	0	9.26		付・図10(3)
1.0×10^{-9}	2.0	0	6.86		付・図10(3)
4.4×10^{-10}	1.6	0	19.66		付・図10(3)
5.5×10^{-10}	1.8	0	13.89		付・図10(3)
9.2×10^{-10}	2.0	0	10.29		付・図10(3)

測定データ

説明変数 透水係数 K (m/s)	ρ_d (g/cm ³)	R_s (%)	w (%)	P (MPa)	図表データ
1.1×10^{-12}	1.2	0	10		付・図11
1.3×10^{-12}	1.2	0	10		付・図11
1.2×10^{-12}	1.2	0	10		付・図11
1.2×10^{-12}	1.2	0	10		付・図11
7.5×10^{-12}	1.2	0	10		付・図11
4.6×10^{-13}	1.4	0	10		付・図11
4.1×10^{-13}	1.4	0	10		付・図11
4.3×10^{-13}	1.4	0	10		付・図11
3.8×10^{-13}	1.4	0	10		付・図11
5.5×10^{-13}	1.4	0	10		付・図11
5.1×10^{-13}	1.4	0	10		付・図11
6.0×10^{-13}	1.4	0	10		付・図11
3.7×10^{-13}	1.6	0	10		付・図11
3.7×10^{-13}	1.6	0	10		付・図11
5.5×10^{-13}	1.6	0	10		付・図11
5.3×10^{-13}	1.6	0	10		付・図11
1.3×10^{-13}	1.8	0	10		付・図11
9.5×10^{-14}	1.8	0	10		付・図11
1.7×10^{-13}	1.8	0	10		付・図11
5.2×10^{-14}	2.0	0	10		付・図11
5.0×10^{-14}	2.0	0	10		付・図11
5.7×10^{-14}	2.0	0	10		付・図11
1.1×10^{-12}	1.2	0	10		付・図12
1.6×10^{-12}	1.2	30	10		付・図12
1.8×10^{-12}	1.2	50	10		付・図12
2.2×10^{-12}	1.2	50	10		付・図12
4.8×10^{-13}	1.4	0	10		付・図12
1.1×10^{-12}	1.4	30	10		付・図12
9.9×10^{-13}	1.4	30	10		付・図12
9.0×10^{-13}	1.4	30	10		付・図12
1.4×10^{-12}	1.4	50	10		付・図12
1.7×10^{-12}	1.4	50	10		付・図12
2.1×10^{-12}	1.4	60	10		付・図12
3.2×10^{-12}	1.4	60	10		付・図12

測定データ

乾燥密度 ρ_d (g/cm ³)	説明変数 ρ_d (g/cm ³)	R_s (%)	w (%)	P (MPa)	図表データ
1.59		0	6	20	付・図14(1)
1.61		0	7.73	20	付・図14(1)
1.67		0	9.76	20	付・図14(1)
1.77		0	12.64	20	付・図14(1)
1.84		0	15.12	20	付・図14(1)
1.86		0	15.87	20	付・図14(1)
1.72		0	21.00	20	付・図14(1)
1.72		15	8.16	20	付・図14(1)
1.77		15	9.12	20	付・図14(1)
1.87		15	11.33	20	付・図14(1)
1.91		15	12.96	20	付・図14(1)
1.92		15	13.2	20	付・図14(1)
1.88		15	15.6	20	付・図14(1)
1.85		15	16.8	20	付・図14(1)
1.77		15	19.36	20	付・図14(1)
1.58		30	1.25	20	付・図14(1)
1.77		30	5.31	20	付・図14(1)
1.93		30	7.6	20	付・図14(1)
1.98		30	10.0	20	付・図14(1)
2.0		30	10.48	20	付・図14(1)
1.97		30	12.24	20	付・図14(1)
1.89		30	15.33	20	付・図14(1)
1.76		50	0.4	20	付・図14(1)
1.91		50	5.12	20	付・図14(1)
2.06		50	7.73	20	付・図14(1)
2.09		50	8.77	20	付・図14(1)
2.08		50	9.36	20	付・図14(1)
1.99		50	12.45	20	付・図14(1)
1.86		50	15.12	20	付・図14(1)
1.94		70	3.28	20	付・図14(1)
2.13		70	7.4	20	付・図14(1)
2.11		70	7.8	20	付・図14(1)
2.09		70	10.0	20	付・図14(1)
1.9		70	14.0	20	付・図14(1)

測定データ

乾燥密度 ρ_d (g/cm ³)	説明変数 ρ_d (g/cm ³)	R_s (%)	w (%)	P (MPa)	図表データ
1.88		0	11.28	50	付・図14(2)
1.91		0	12.48	50	付・図14(2)
1.92		0	13.04	50	付・図14(2)
1.88		0	15.2	50	付・図14(2)
1.86		0	15.73	50	付・図14(2)
1.87		15	7.28	50	付・図14(2)
1.93		15	9.41	50	付・図14(2)
1.97		15	11.6	50	付・図14(2)
1.92		15	13.57	50	付・図14(2)
1.91		30	4.24	50	付・図14(2)
1.96		30	6.56	50	付・図14(2)
2.03		30	9.12	50	付・図14(2)
1.99		30	11.6	50	付・図14(2)
2.03		50	4.56	50	付・図14(2)
2.10		50	6.74	50	付・図14(2)
2.09		50	9.25	50	付・図14(2)
2.0		50	11.73	50	付・図14(2)
2.13		70	4.72	50	付・図14(2)
2.16		70	7.04	50	付・図14(2)
2.08		70	9.52	50	付・図14(2)
1.95		0	8.14	100	付・図14(3)
1.98		0	8.66	100	付・図14(3)
1.98		0	11.8	100	付・図14(3)
2.02		0	12.1	100	付・図14(3)

測定データ

説明変数 (最大) 乾燥密度 ρ_d (g/cm ³)	ρ_d (g/cm ³)	R_s (%)	w (%)	P (MPa)	図表データ
1.86		0	15.3	20	付・図14(3), 付・図15
1.95		0	13.0	50	付・図14(3), 付・図15
2.03		0	10.5	100	付・図14(3)
1.93		15	13.1	20	付・図15
1.99		15	11.5	50	付・図15
2.00		30	10.4	20	付・図15
2.06		30	9.0	50	付・図15
2.10		50	9.0	20	付・図15
2.13		50	7.5	50	付・図15
2.14		70	7.2	20	付・図15
2.18		70	7.1	50	付・図15

測定データ

見かけの 拡散係数 D_a (m^2/s): 3H	説明変数 ρ_d (g/cm^3)	R_s (%)	w (%)	P (MPa)	図表データ
9.9×10^{-10}	0.8	0			付・図21
5.8×10^{-10}	1.4	0			付・図21
4.2×10^{-10}	1.6	0			付・図21
2.3×10^{-10}	2.0	0			付・図21
1.1×10^{-9}	0.2	-98			付・図20(1)
6.9×10^{-10}	0.4	-98			付・図20(1)
4.8×10^{-10}	0.8	-98			付・図20(1)
1.8×10^{-10}	1.2	-98			付・図20(1)
9.5×10^{-11}	1.6	-98			付・図20(1)

測定データ

見かけの 拡散係数 $D_a(\text{m}^2/\text{s}) : ^{\circ\circ} T_c$	説明変数 ρ_a (g/cm ³)	R_s (%)	w (%)	P (MPa)	図表データ
8.0×10^{-10}	0.6	0			付・図21
7.2×10^{-10}	0.8	0			付・図21
4.7×10^{-10}	1.0	0			付・図21
1.8×10^{-10}	1.6	0			付・図21
1.2×10^{-10}	1.8	0			付・図21
4.4×10^{-11}	2.0	0			付・図21
6.9×10^{-10}	0.2	-98			付・図20(1)
3.1×10^{-10}	0.6	-98			付・図20(1)
1.3×10^{-10}	1.0	-98			付・図20(1)
3.2×10^{-11}	1.4	-98			付・図20(1)
1.2×10^{-11}	1.8	-98			付・図20(1)
1.0×10^{-11}	2.0	-98			付・図20(1)

測定データ

見かけの 拡散係数 $D_a(\text{m}^2/\text{s}):^{137}\text{Cs}$	説明変数 ρ_d (g/cm ³)	R_s (%)	w (%)	P (MPa)	図表データ
1.8×10^{-11}	0.4	0			付・図21
1.4×10^{-11}	0.8	0			付・図21
7.8×10^{-12}	1.4	0			付・図21
5.2×10^{-12}	2.0	0			付・図21
1.6×10^{-11}	0.2	-98			付・図20(1)
1.2×10^{-11}	0.4	-98			付・図20(1)
8.1×10^{-12}	0.6	-98			付・図20(1)
6.6×10^{-12}	0.8	-98			付・図20(1)
4.8×10^{-12}	1.0	-98			付・図20(1)
3.2×10^{-12}	1.2	-98			付・図20(1)
2.2×10^{-12}	1.4	-98			付・図20(1)
1.3×10^{-12}	1.6	-98			付・図20(1)
7.9×10^{-13}	1.8	-98			付・図20(1)
4.0×10^{-13}	2.0	-98			付・図20(1)

測定データ

見かけの 拡散係数 D_a (m^2/s): ^{237}Np	説明変数 ρ_d (g/cm^3)	R_s (%)	w (%)	P (MPa)	図表データ
5.0×10^{-11}	0.4	0			付・図21
7.0×10^{-12}	0.8	0			付・図21
1.5×10^{-12}	1.4	0			付・図21
2.0×10^{-13}	2.0	0			付・図21
1.2×10^{-11}	0.2	-98			付・図20(1)
5.2×10^{-12}	0.6	-98			付・図20(1)
5.0×10^{-12}	0.8	-98			付・図20(1)
2.0×10^{-12}	1.0	-98			付・図20(1)
1.0×10^{-12}	1.2	-98			付・図20(1)
3.0×10^{-13}	1.4	-98			付・図20(1)
2.0×10^{-13}	1.6	-98			付・図20(1)
1.0×10^{-13}	1.8	-98			付・図20(1)
3.0×10^{-14}	2.0	-98			付・図20(1)

測定データ

見かけの 拡散係数 $D_a (\text{m}^2/\text{s}) :^{24} \text{A}_m$	説明変数 ρ_d (g/cm ³)	R_s (%)	w (%)	P (MPa)	図表データ
1.7×10^{-14}	0.4	0			付・図21
7.5×10^{-15}	0.8	0			付・図21
2.8×10^{-15}	1.4	0			付・図21
7.2×10^{-14}	0.2	-98			付・図20(1)
1.9×10^{-14}	0.6	-98			付・図20(1)
9.0×10^{-16}	1.55	-98			付・図20(1)

測定データ

見かけの 拡散係数 $D_a(\text{m}^2/\text{s}) : ^{90}\text{Sr}$	説明変数 ρ_d (g/cm ³)	R_s (%)	w (%)	P (MPa)	図表データ
5.1×10^{-11}	0.2	-98			付・図20(1)
3.4×10^{-11}	0.4	-98			付・図20(1)
2.5×10^{-11}	0.6	-98			付・図20(1)
1.7×10^{-11}	0.7	-98			付・図20(1)
7.6×10^{-12}	1.0	-98			付・図20(1)
7.6×10^{-12}	1.2	-98			付・図20(1)
5.4×10^{-12}	1.5	-98			付・図20(1)
4.6×10^{-12}	1.7	-98			付・図20(1)
5.2×10^{-12}	1.9	-98			付・図20(1)
4.3×10^{-12}	2.0	-98			付・図20(1)

測定データ

見かけの 拡散係数 D_a (m^2/s): ^{129}I	説明変数 ρ_d (g/cm^3)	R_s (%)	w (%)	P (MPa)	図表データ
8.4×10^{-10}	0.2	-98			付・図20(1)
2.6×10^{-10}	0.8	-98			付・図20(1)
8.5×10^{-11}	1.4	-98			付・図20(1)
2.4×10^{-11}	2.0	-98			付・図20(1)

3. 緩衝材の機能の最適化に関する解析評価の試行

3.1 各定量評価指標の多変量解析

ここでは、表2の関数型と表3のデータに対し、各定量評価指標に関する多変量解析を試行した。その結果を以下に示す。ここで、上段の数値は、各項の係数値を、また、下段の()内の数値は、t値を、それぞれ表している。(なお、関数型とデータ数とがうまくマッチングしないために計算できなかったものもあるため、そのようなケースは除いている。)

(1) 一軸圧縮強さ

<1式>

$$\sigma = a_0 + a_1 \times w + a_2 \times \rho_d + a_3 \times R_s$$

19.0543	-0.4133	-4.7544	-0.0687
(17.7024)	(-2.7624)	(-5.2149)	(-3.3698)

重相関係数 0.8913

<2式>

$$\sigma = a_0 + a_1 \times w + a_2 \times \rho_d + a_3 \times R_s +$$

21.5618	-3.8401	-6.8362	-0.1285
(26.8707)	(-7.9697)	(-10.09949)	(-8.0291)

$$a_4 \times w \times \rho_d$$

1.9328
(7.2726)

重相関係数 0.9534

<3式>

$$\sigma = a_0 + a_1 \times w + a_2 \times \rho_d + a_3 \times R_s +$$

21.8813	-0.2695	-7.4757	-0.1512
(16.0034)	(-1.8512)	(-6.0482)	(-4.5381)

$$a_4 \times R_s \times \rho_d$$

0.0623
(2.9935)

重相関係数 0.9114

< 4 式 >

$$\begin{aligned} \sigma &= a_0 + a_1 \times w + a_2 \times \rho_d + a_3 \times R_s + \\ & \quad 23.2546 \quad -3.4842 \quad -8.4909 \quad -0.1789 \\ & \quad (24.6260) \quad (-7.5524) \quad (-10.0158) \quad (-7.8238) \\ & \quad a_4 \times w \times \rho_d + a_5 \times R_s \times \rho_d \\ & \quad 1.7860 \quad 0.415 \\ & \quad (7.1325) \quad (2.8879) \end{aligned}$$

重相関係数 0.9615

< 5 式 >

$$\begin{aligned} \sigma &= a_0 + a_1 \times w + a_2 \times \rho_d + a_3 \times R_s + \\ & \quad 23.2370 \quad -3.7812 \quad -8.4662 \quad -0.1779 \\ & \quad (25.2198) \quad (-7.8618) \quad (-10.2343) \quad (-7.9739) \\ & \quad a_4 \times w \times \rho_d + a_5 \times R_s \times \rho_d + a_6 \times R_s \times \rho_d \times w \\ & \quad 1.9589 \quad 0.1004 \quad -0.0081 \\ & \quad (7.4347) \quad (2.7566) \quad (-1.7525) \end{aligned}$$

重相関係数 0.9643

< 6 式 >

$$\begin{aligned} \sigma &= a_0 + a_1 \times w + a_2 \times \rho_d + a_3 \times R_s + \\ & \quad 23.2364 \quad -3.7826 \quad -8.4656 \quad -0.1779 \\ & \quad (24.9023) \quad (-7.7595) \quad (-10.1049) \quad (-7.8725) \\ & \quad a_4 \times w \times \rho_d + a_5 \times R_s \times \rho_d + a_6 \times w \times R_s + \\ & \quad 1.9598 \quad 0.0940 \quad -0.0088 \\ & \quad (7.3364) \quad (0.9616) \quad (-0.0697) \\ & \quad a_7 \times R_s \times \rho_d \times w \\ & \quad -0.0032 \\ & \quad (-0.0449) \end{aligned}$$

重相関係数 0.9643

(2) 熱伝導率

< 1 式 >

$$\begin{aligned} \lambda &= a_0 + a_1 \times w + a_2 \times \rho_d + a_3 \times R_s \\ & \quad -2.0925 \quad 0.042 \quad 1.5682 \quad 0.0138 \\ & \quad (-8.6403) \quad (7.8174) \quad (11.6606) \quad (8.3154) \end{aligned}$$

重相関係数 0.9545

$$\begin{aligned}
 < 2 \text{ 式} > \\
 \lambda &= a_0 + a_1 \times w + a_2 \times \rho_d + a_3 \times R_s + \\
 &\quad -1.5128 \quad -0.0281 \quad 1.2243 \quad 0.0135 \\
 &\quad (-3.1621) (-0.5585) \quad (4.382) \quad (8.1451) \\
 &\quad a_4 \times w \times \rho_d \\
 &\quad 0.0419 \\
 &\quad (1.3992)
 \end{aligned}$$

重相関係数 0.9568

$$\begin{aligned}
 < 3 \text{ 式} > \\
 \lambda &= a_0 + a_1 \times w + a_2 \times \rho_d + a_3 \times R_s + \\
 &\quad -1.8761 \quad 0.0423 \quad 1.445 \quad -0.0182 \\
 &\quad (-7.6746) (8.371) \quad (10.6111) \quad (-1.3847) \\
 &\quad a_4 \times R_s \times \rho_d \\
 &\quad 0.0166 \\
 &\quad (2.4524)
 \end{aligned}$$

重相関係数 0.9608

$$\begin{aligned}
 < 4 \text{ 式} > \\
 \lambda &= a_0 + a_1 \times w + a_2 \times \rho_d + a_3 \times R_s + \\
 &\quad -1.2835 \quad -0.0292 \quad 1.0935 \quad -0.0188 \\
 &\quad (-2.8065) (-0.6179) \quad (4.0984) \quad (-1.4507) \\
 &\quad a_4 \times w \times \rho_d + a_5 \times R_s \times \rho_d \\
 &\quad 0.0427 \quad 0.0167 \\
 &\quad (1.523) \quad (2.5122)
 \end{aligned}$$

重相関係数 0.9632

$$\begin{aligned}
 < 5 \text{ 式} > \\
 \lambda &= a_0 + a_1 \times w + a_2 \times \rho_d + a_3 \times R_s + \\
 &\quad -1.4255 \quad 0.006 \quad 1.1829 \quad -0.0442 \\
 &\quad (-3.2749) (0.128) \quad (4.6507) \quad (-2.7227) \\
 &\quad a_4 \times w \times \rho_d + a_5 \times R_s \times \rho_d + a_6 \times R_s \times \rho_d \times w \\
 &\quad 0.0206 \quad 0.0171 \quad 0.0014 \\
 &\quad (0.7352) \quad (2.7306) \quad (2.3729)
 \end{aligned}$$

重相関係数 0.9683

< 6 式 >

$$\lambda = a_0 + a_1 \times w + a_2 \times \rho_d + a_3 \times R_s +$$

-1.4125	-0.0039	1.1746	0.0919
(-3.1971)	(0.0810)	(4.5473)	(0.2587)

$$a_4 \times w \times \rho_d + a_5 \times R_s \times \rho_d + a_6 \times w \times R_s +$$

0.0220	-0.0472	-0.0137
(0.7689)	(-0.2812)	(-0.3837)

$$a_7 \times R_s \times \rho_d \times w$$

0.0079
(0.4690)

重相関係数 0.9684

(3) 平衡膨潤圧力

< 1 式 >

$$\ln(P_s) = a_0 + a_1 \times R_s + a_2 \times \rho_d$$

-9.9530	-0.0229	6.2829
(-19.2398)	(-16.0388)	(21.3572)

重相関係数 0.9778

< 2 式 >

$$\ln(P_s) = a_0 + a_1 \times R_s + a_2 \times \rho_d + a_3 \times R_s \times \rho_d$$

-10.2212	-0.0334	6.4360	0.0060
(-16.2882)	(-2.4203)	(18.0142)	(0.7651)

重相関係数 0.9782

< 3 式 >

$$\ln(P_s) = a_0 + a_1 \times R_s + a_2 \times \rho_d + a_3 \times \ln(w)$$

-8.7326	-0.0230	6.2743	-0.5252
(-8.0268)	(-16.2141)	(21.5147)	(-1.2718)

重相関係数 0.9788

< 4 式 >

$$\ln(P_s) = a_0 + a_1 \times R_s + a_2 \times \rho_d + a_3 \times R_s \times \rho_d +$$

-9.0054	-0.0332	6.4235	0.0058
(-7.8055)	(-2.4249)	(18.1255)	(0.7517)

$$a_4 \times \ln(w)$$

-0.5203
(-1.2514)

重相関係数 0.9792

< 5 式 >

$$\ln(P_s) = a_0 + a_1 \times R_s + a_2 \times \rho_d + a_3 \times R_s \times \rho_d + a_4 \times w + a_5 \times w^2 + a_6 \times w^3$$

-9.9549	-0.0334	6.4334	0.0059
(-13.9997)	(-2.3611)	(17.4828)	(0.7428)
-0.3569	0.058	-0.0025	
(-0.3070)	(0.2895)	(-0.2962)	

重相関係数 0.9793

(4) 水分拡散係数

< 1 式 >

$$\ln(D) = a_0 + a_1 \times w + a_2 \times \rho_d + a_3 \times R_s$$

-26.8065	0.0379	2.8301	-0.0085
(-27.0939)	(1.9329)	(5.4524)	(-2.0640)

重相関係数 0.8155

< 2 式 >

$$\ln(D) = a_0 + a_1 \times w + a_2 \times \rho_d + a_3 \times R_s + a_4 \times w \times \rho_d$$

-24.2059	-0.2478	1.3543	-0.0079
(-11.4466)	(-1.1929)	(1.1458)	(-1.9509)
	0.1644		
	(1.3811)		

重相関係数 0.8383

< 3 式 >

$$\ln(D) = a_0 + a_1 \times w + a_2 \times \rho_d + a_3 \times R_s + a_4 \times R_s \times \rho_d$$

-25.3767	0.0321	2.0646	0.0726
(-24.1024)	(1.8445)	(3.7131)	(2.1383)
			-0.0466
			(-2.4017)

重相関係数 0.8706

< 4 式 >

$$\ln(D) = a_0 + a_1 \times w + a_2 \times \rho_d + a_3 \times R_s + a_4 \times w \times \rho_d + a_5 \times R_s \times \rho_d$$

-23.5234	-0.1838	1.0091	0.0665
(-12.3003)	(-0.9797)	(0.9464)	(1.9559)
			0.1245
			(1.1554)
			-0.0428
			(-2.1992)

重相関係数 0.8827

(5) 透水係数

< 1 式 > w = 10% のとき

$$\ln(K) = a_0 + a_1 \times \rho_d + a_2 \times R_s$$

	-22.8026	-3.8005	0.0172
	(-45.2801)	(-11.5248)	(4.5759)

重相関係数 0.9317

< 2 式 > w = 10% のとき

$$\ln(K) = a_0 + a_1 \times \rho_d + a_2 \times R_s + a_3 \times \rho_d \times R_s$$

	-22.5854	-3.9431	-0.0726	0.0664
	(-45.8230)	(-12.2154)	(-1.6134)	(2.0022)

重相関係数 0.9400

(6) 見かけの拡散係数

① ³H

$$\ln(D_{a1}) = a_0 + a_1 \times \rho_d + a_2 \times R_s + a_3 \times R_s \times \rho_d$$

	-19.6972	-1.2062	0.0060	0.0054
	(-82.9444)	(-7.6866)	(2.2123)	(2.6812)

重相関係数 0.9913

② ⁹⁹Tc

$$\ln(D_{a2}) = a_0 + a_1 \times \rho_d + a_2 \times R_s + a_3 \times R_s \times \rho_d$$

	-19.5837	-1.9362	0.0092	0.0057
	(-74.7432)	(-10.363)	(2.7051)	(2.3201)

重相関係数 0.9914

③ ¹³⁷Cs

$$\ln(D_{a3}) = a_0 + a_1 \times \rho_d + a_2 \times R_s + a_3 \times R_s \times \rho_d$$

	-24.4025	-0.8004	-0.0013	0.0120
	(-135.529)	(-5.7788)	(-0.5995)	(7.0391)

重相関係数 0.9920

④ ²³⁷Np

$$\ln(D_{a4}) = a_0 + a_1 \times \rho_d + a_2 \times R_s + a_3 \times R_s \times \rho_d$$

	-22.6485	-3.3209	0.0124	0.0008
	(-53.8866)	(-10.272)	(2.3390)	(0.2044)

重相関係数 0.9873

$$\begin{aligned} \textcircled{5} {}^{241}\text{Am} \\ \ln(D_{a5}) &= a_0 + a_1 \times \rho_d + a_2 \times R_s + a_3 \times R_s \times \rho_d \\ &\quad \begin{matrix} -31.0275 & -1.7908 & -0.0143 & 0.0148 \\ (-392.082) & (-21.706) & (-14.2610) & (14.2097) \end{matrix} \end{aligned}$$

重相関係数 0.9997

$$\begin{aligned} \textcircled{6} {}^{90}\text{Sr} \\ \ln(D_{a6}) &= a_0 + a_1 \times \rho_d \\ &\quad \begin{matrix} -23.7255 & -1.3543 \\ (-121.612) & (-8.8468) \end{matrix} \end{aligned}$$

重相関係数 0.9525

$$\begin{aligned} \textcircled{7} {}^{129}\text{I} \\ \ln(D_{a7}) &= a_0 + a_1 \times \rho_d \\ &\quad \begin{matrix} -20.4919 & -1.9640 \\ (-469.258) & (-57.947) \end{matrix} \end{aligned}$$

重相関係数 0.9997

(7) 乾燥密度

$$\begin{aligned} < 1 \text{ 式} > \\ \rho_d &= a_0 + a_1 \times R_s + a_2 \times w + a_3 \times P \\ &\quad \begin{matrix} 1.5650 & 0.0050 & 0.0106 & 0.0034 \\ (33.3148) & (10.3368) & (3.6853) & (7.3752) \end{matrix} \end{aligned}$$

重相関係数 0.8154

$$\begin{aligned} < 2 \text{ 式} > \\ \rho_d &= a_0 + a_1 \times R_s + a_2 \times w + a_3 \times P + \\ &\quad \begin{matrix} 1.5305 & 0.0061 & 0.0136 & 0.0034 \\ (26.0254) & (4.9079) & (3.2388) & (7.4034) \end{matrix} \\ &\quad \begin{matrix} a_4 \times R_s \times w \\ -0.0001 \\ (-0.9757) \end{matrix} \end{aligned}$$

重相関係数 0.8184

< 3 式 >

$$\rho_d = a_0 + a_1 \times R_s + a_2 \times w + a_3 \times P + a_4 \times w \times P$$

1.5533	0.0049	0.0118	0.0038	
(24.3124)	(10.0269)	(2.2119)	(2.1861)	
				0.0000
				(-0.2717)

重相関係数 0.8156

< 4 式 >

$$\rho_d = a_0 + a_1 \times R_s + a_2 \times w + a_3 \times P + a_4 \times R_s \times P$$

1.5647	0.0050	0.0106	0.0034	
(32.0918)	(5.6818)	(3.6568)	(6.3533)	
				0.0000
				(-0.0192)

重相関係数 0.8154

< 5 式 >

$$\rho_d = a_0 + a_1 \times R_s + a_2 \times w + a_3 \times P + a_4 \times w^2 + a_5 \times w^3$$

1.3821	0.0047	0.0667	0.0028		
(23.6108)	(11.522)	(3.7028)	(6.9482)		
				-0.0037	0.0001
				(-2.0081)	(0.9533)

重相関係数 0.8785

< 6 式 >

$$\rho_d = a_0 + a_1 \times R_s + a_2 \times w + a_3 \times P + a_4 \times w^2 + a_5 \times w^3 + a_6 \times w^4$$

1.3945	0.0047	0.0560	0.0028			
(19.9421)	(11.436)	(1.4992)	(6.8631)			
				-0.0016	0.0001	0.0000
				(-0.2262)	(0.2120)	(0.3281)

重相関係数 0.8787

以上の各定量評価指標の推計式のうち、主に重相関係数の高さの観点から、今回の計算に採用するものの測定データとの適合性を図1～図7にそれぞれ示した。

なお、前年度に求めた各定量評価指標の推計結果⁽⁷⁾との比較を付録Bに示しているが、統計解析対象とした測定データ数が多いことや、想定した関数型の一般化、などの観点より、今回求めた推計式の方を以下の計算フレームに用いるものとする。

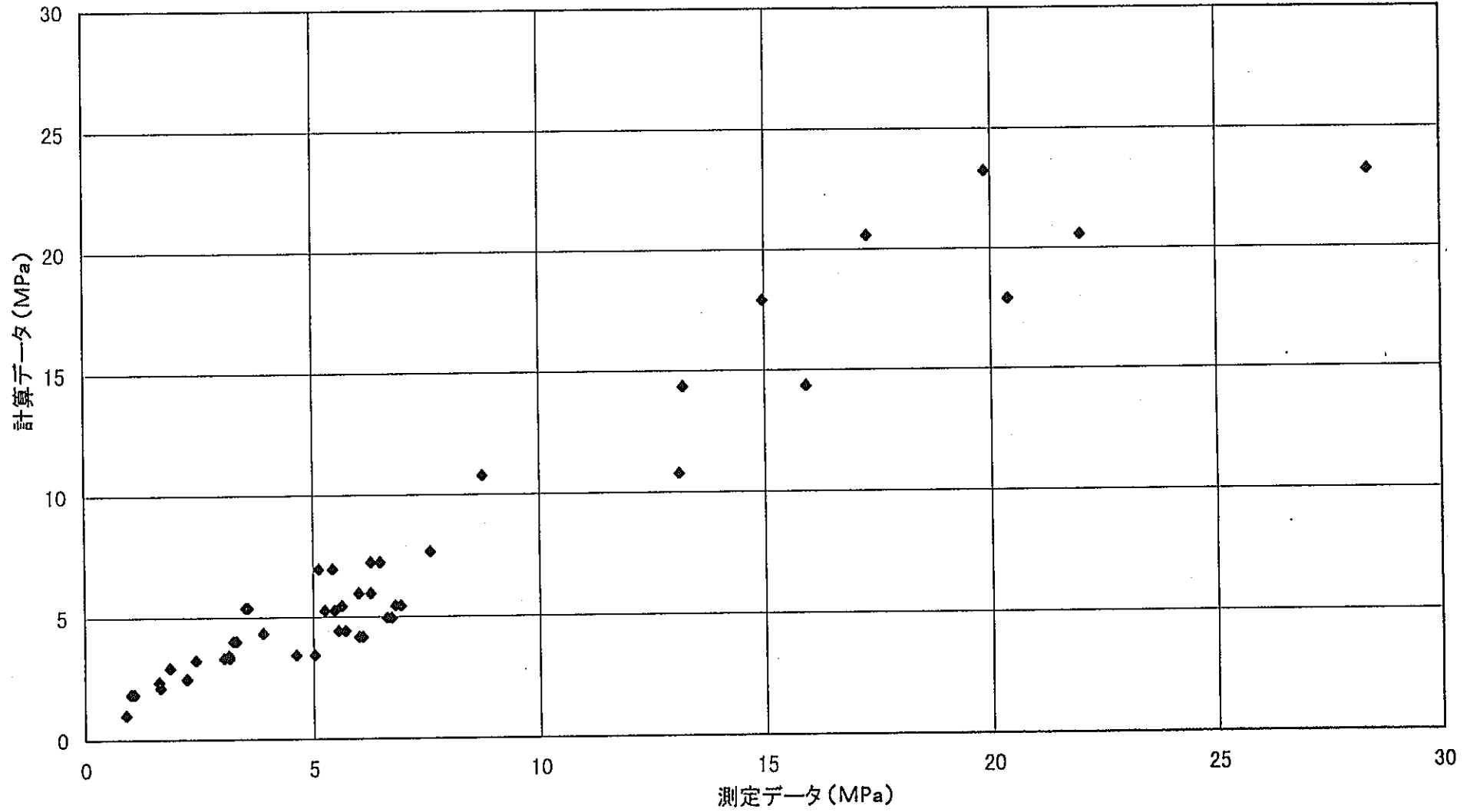


図1 一軸圧縮強さ推計式の適合性 - < 6 式 > の場合 -

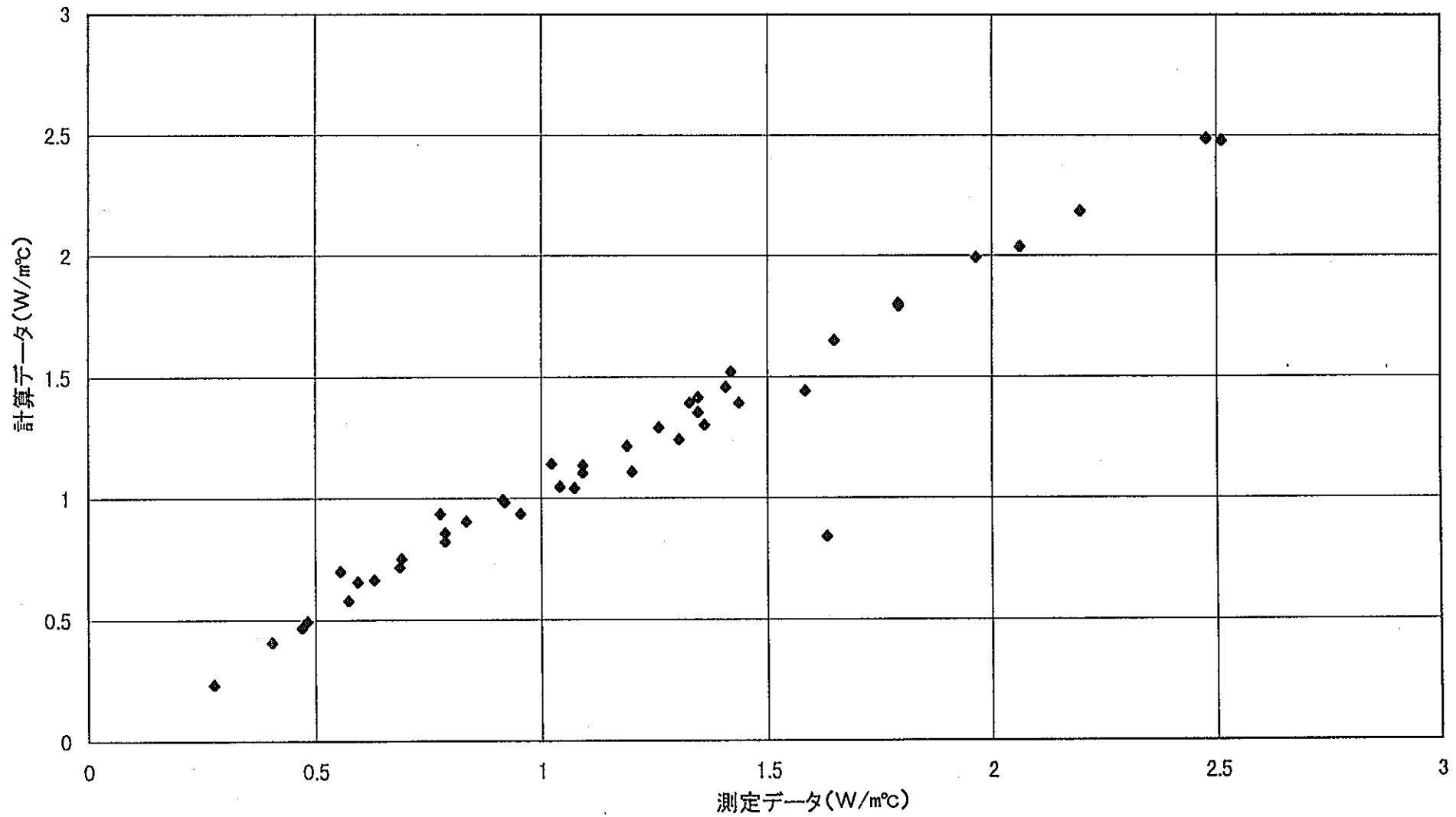


図2 熱伝導率推計式の適合性—〈6式〉の場合—

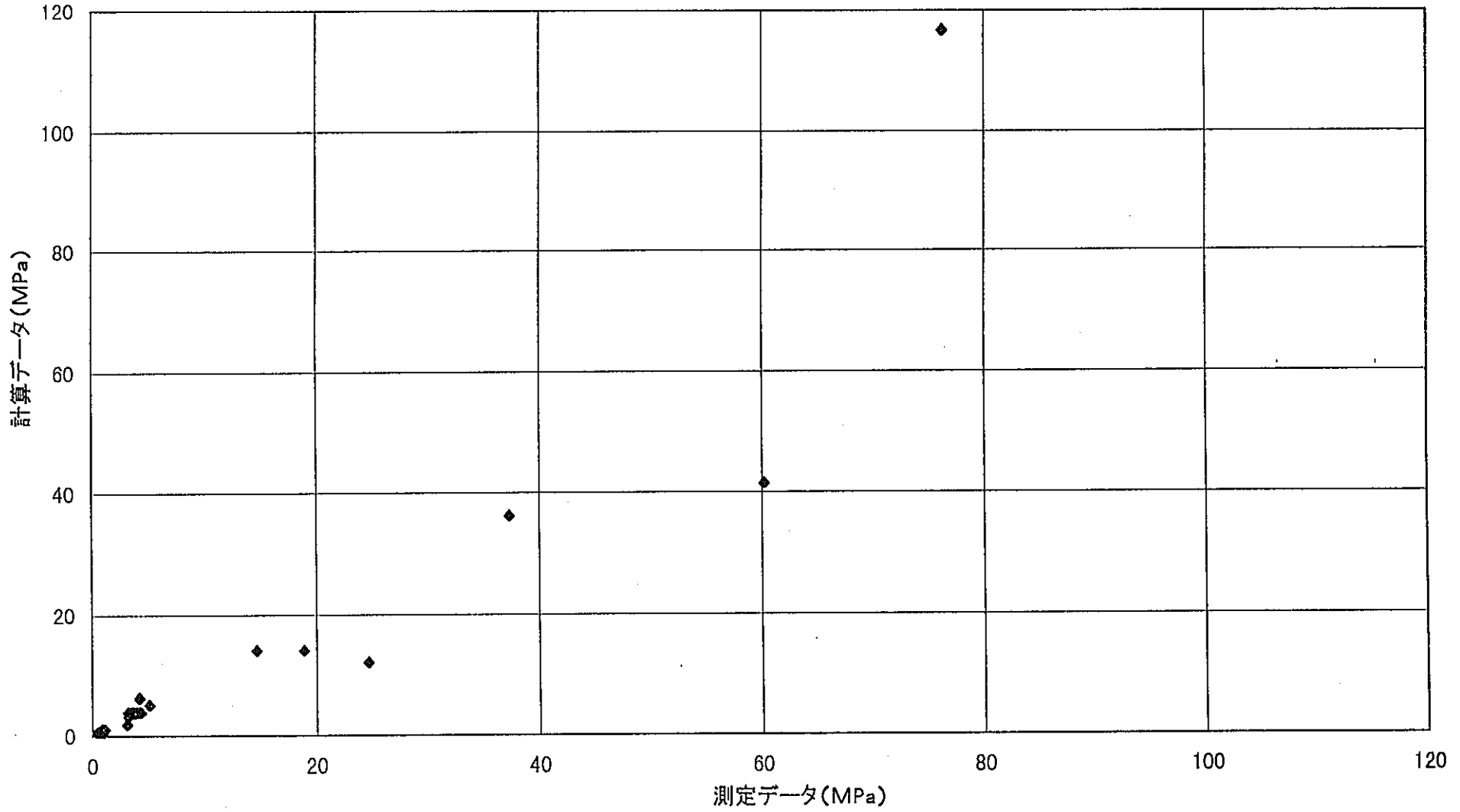


図3 平衡膨潤圧力推計式の適合性 - <5式>の場合 -

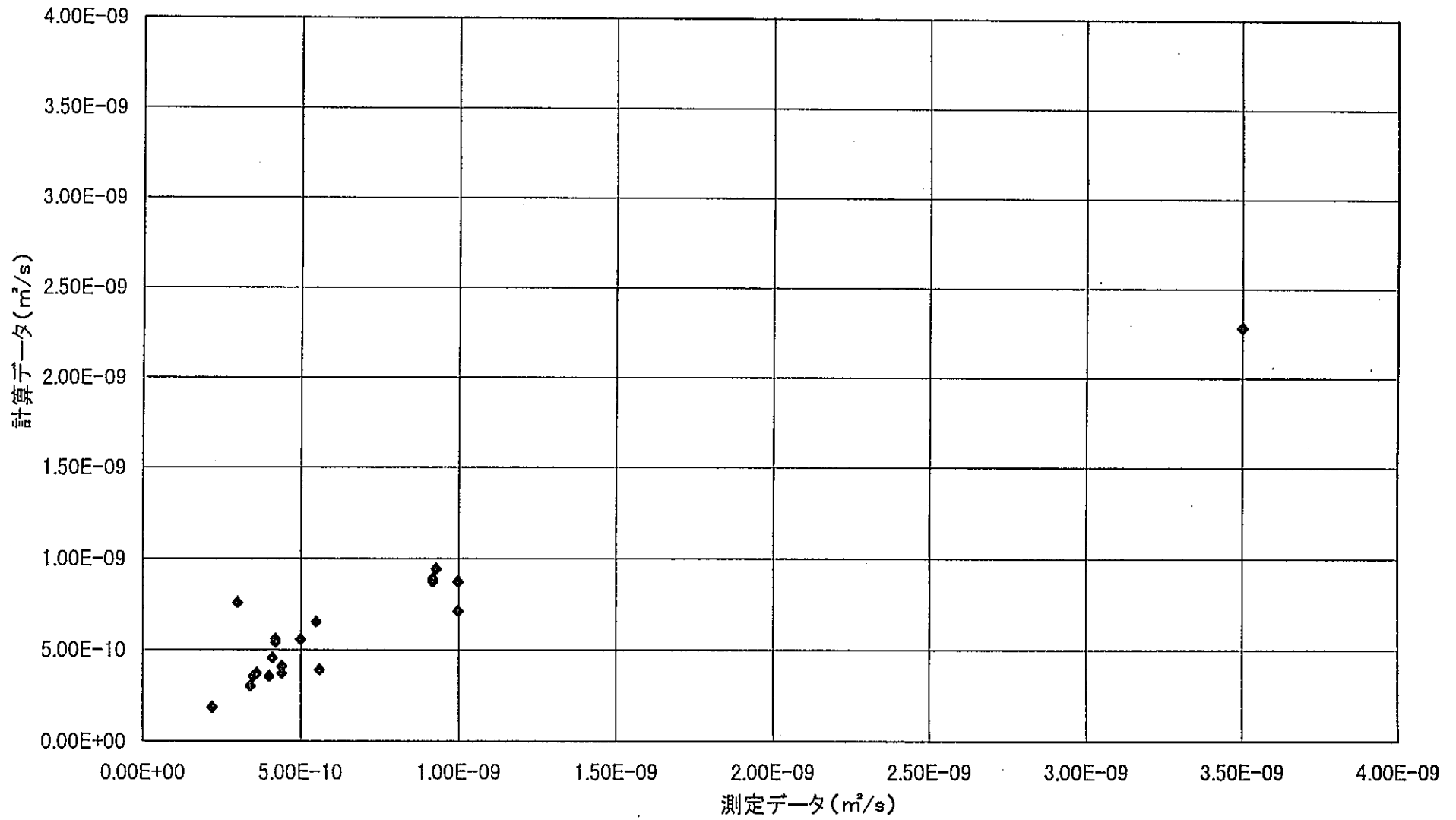


図4 水分拡散係数推計式の適合性 - < 4式 > の場合 -

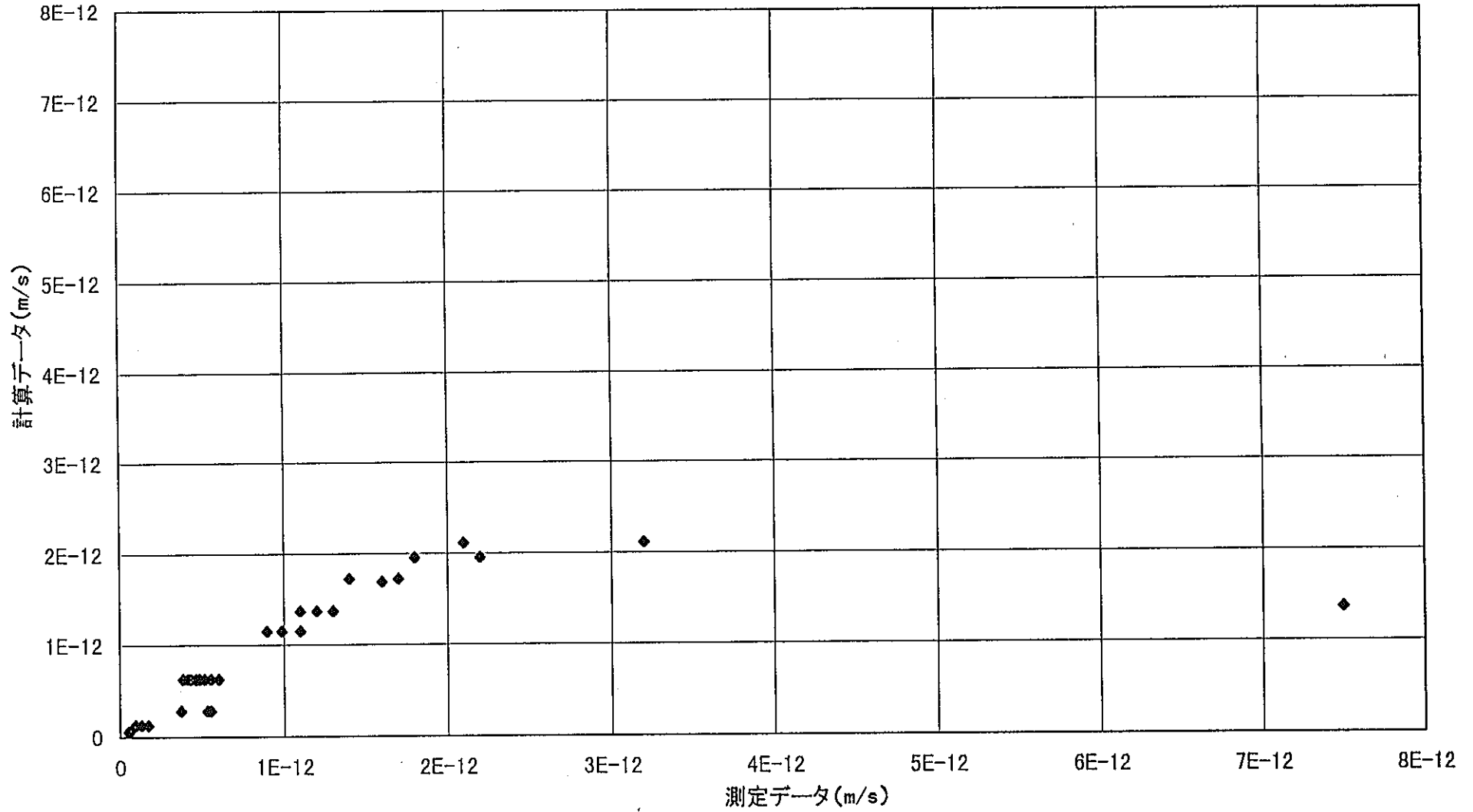


図5 透水係数推計式の適合性 - < 2式 > の場合 -

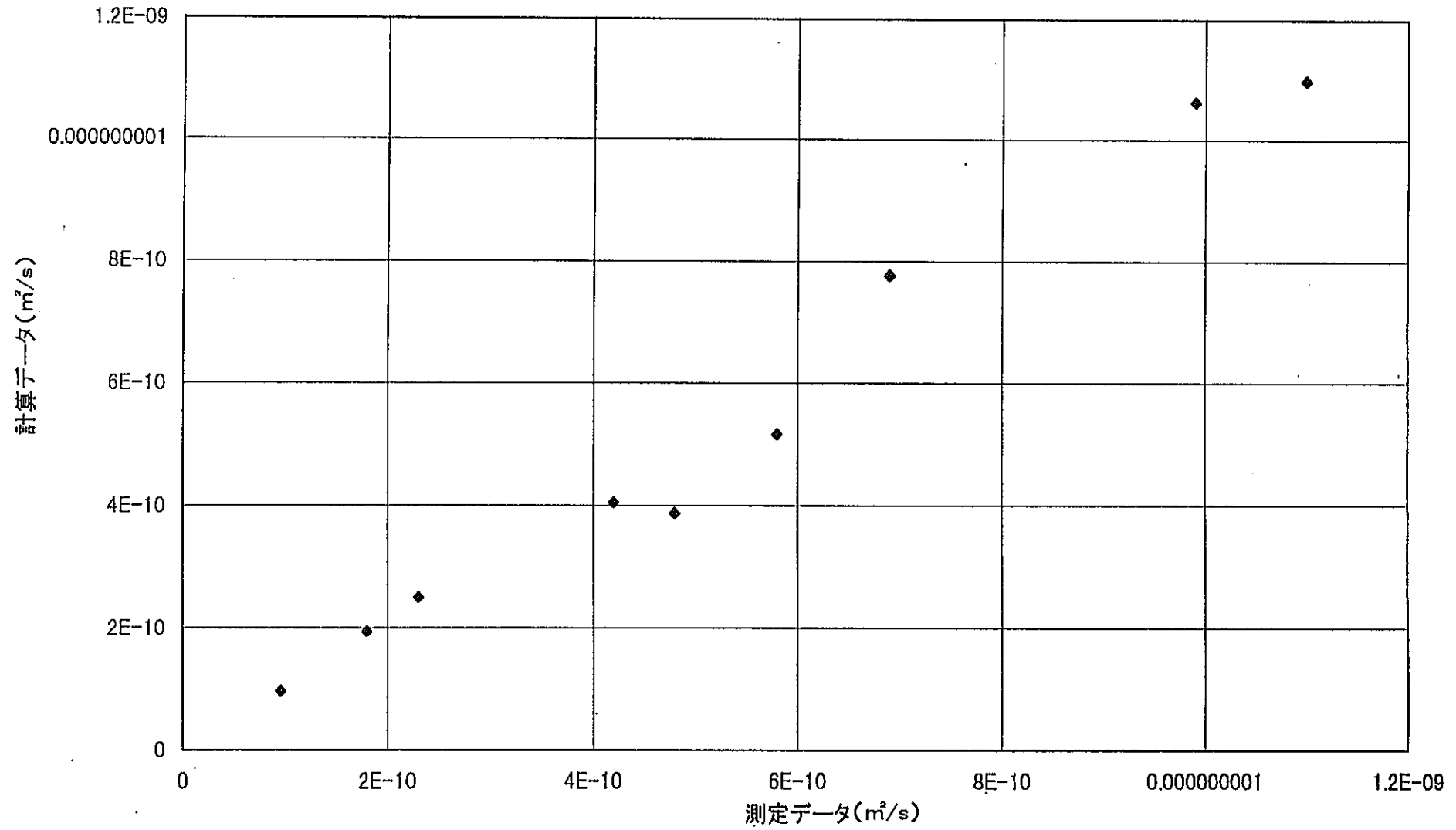


図 6 (1) ³H の見かけの拡散係数推計式の適合性

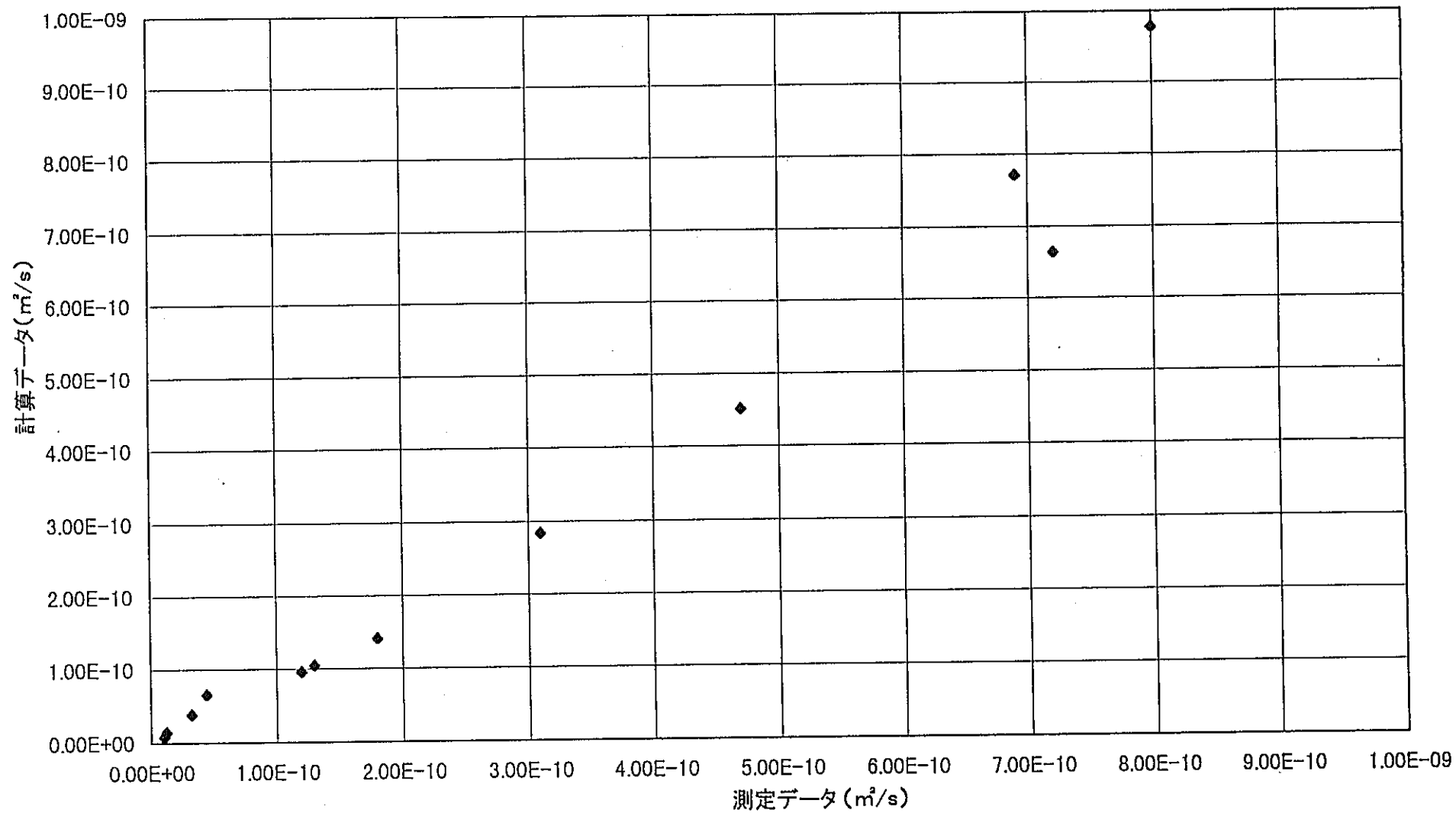


図 6 (2) ⁹⁹Tc の見かけの拡散係数推計式の適合性

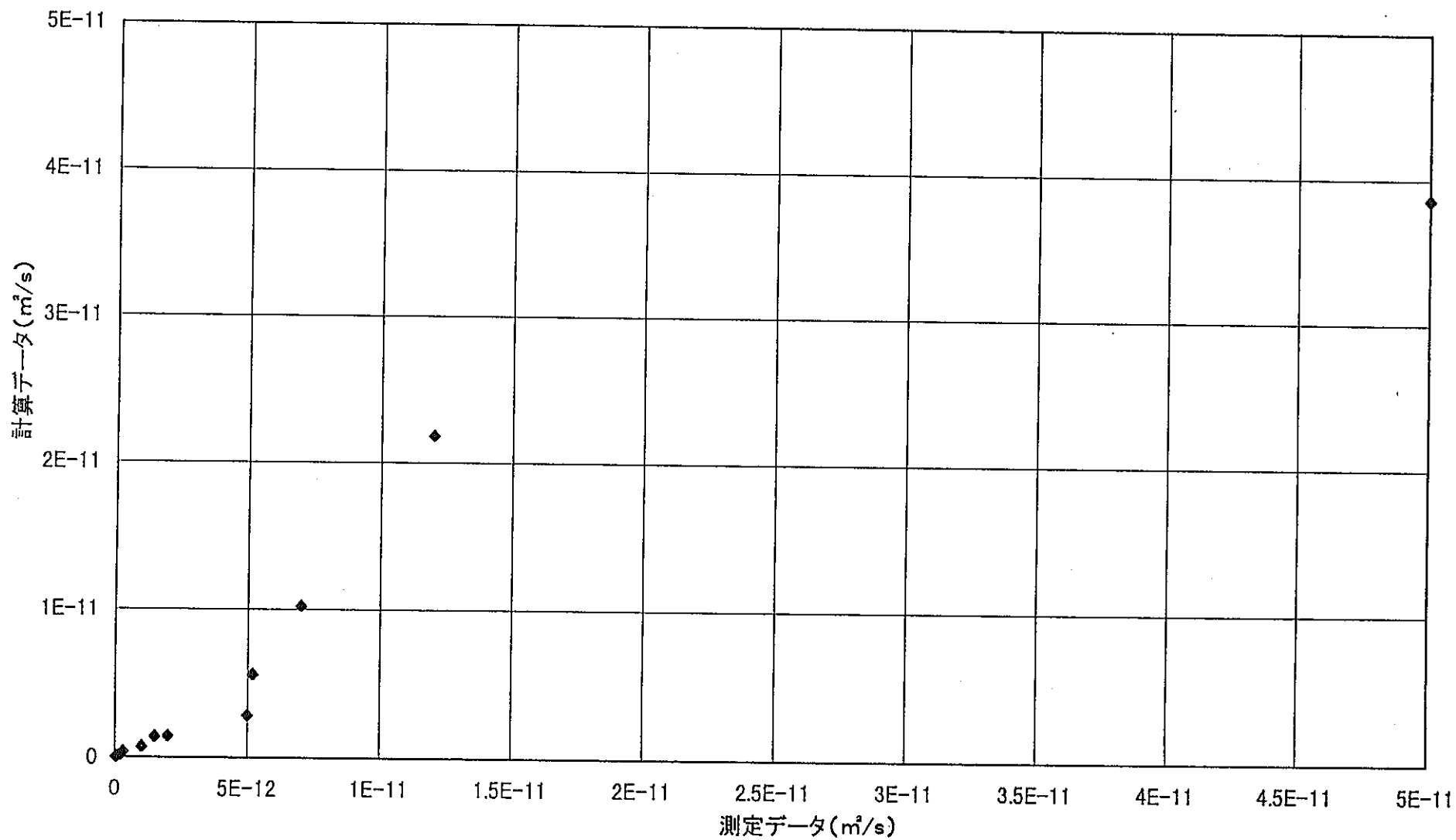


図 6 (3) ^{237}Np の見かけの拡散係数推計式の適合性

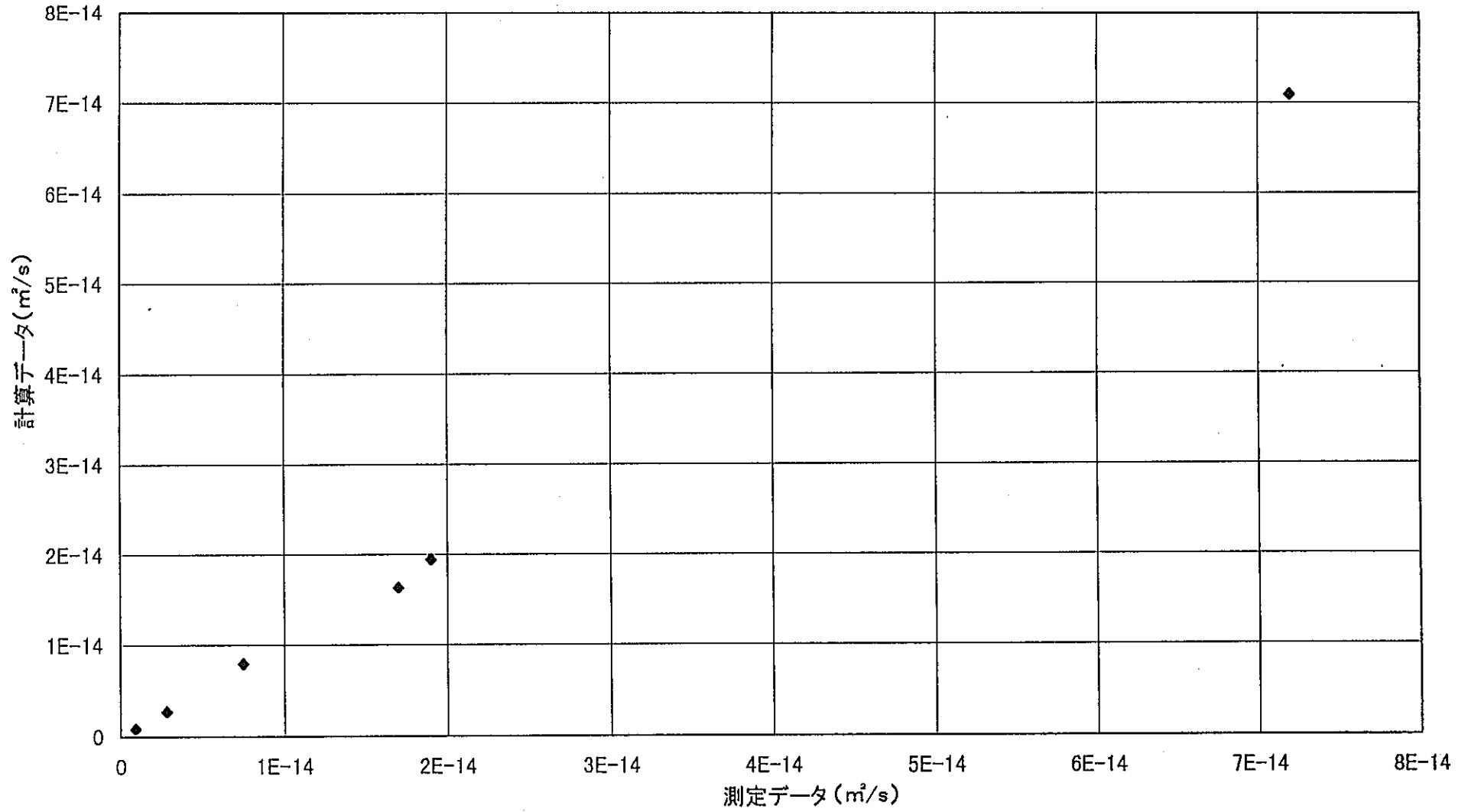


図6(4) ²⁴¹Amの見かけの拡散係数推計式の適合性

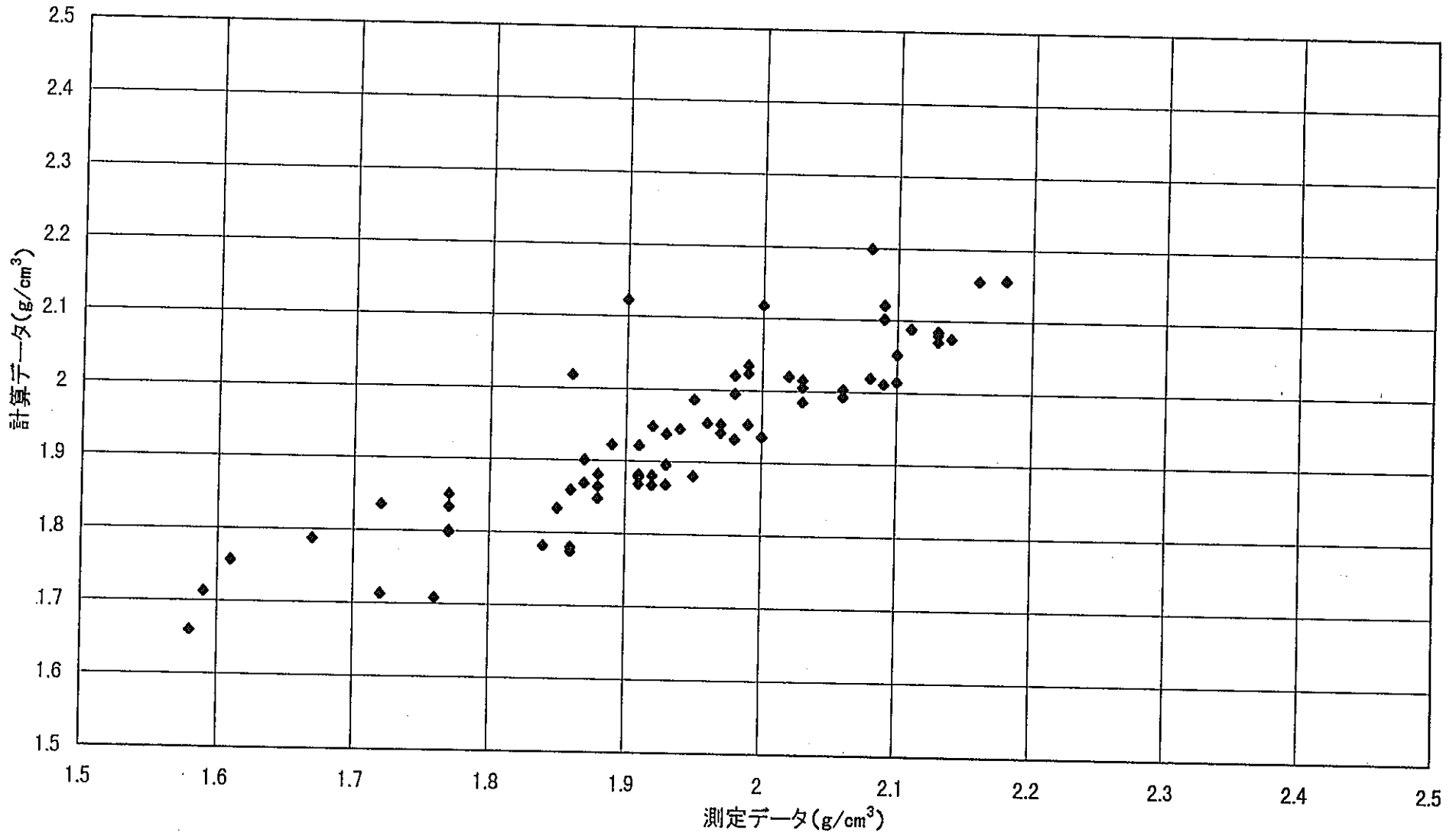


図7 乾燥密度推計式の適合性 - <6式>の場合 -

3.2 総合評価の試行

(1) 基準ケース

3.1節で求めた各定量評価指標の多変量解析結果の推計式を用いて、前年度と同様、緩衝材の機能に関する総合評価値 Φ の計算を行った。前年度との比較を行うため、まず、含水比 $w=10\%$ 、締固め圧力 $P=20\text{MPa}$ に固定したときのケイ砂混合率 R_s ($0\% \leq R_s \leq 40\%$) での各定量評価指標 α_i 並びに効用値 u_i ($i=1 \sim 6$) の変化特性を求めた。その結果をそれぞれ図8(1)(2)に示す。また、各評価項目の重みを均等化して与えたケース(基準ケース)での総合評価値 Φ のケイ砂混合率依存特性を図9に示す。

前年度との大きな違いは、機械的安定性の評価指標 α_1 を一軸圧縮さ σ ($0\text{MPa} \leq \sigma \leq 10\text{MPa}$) 自身に変更した点であり、ケイ砂混合率の増加に伴う効用値の低下が前年度結果よりも緩慢になっている。その結果、全体的にケイ砂混合率の増加に伴う総合評価値の低下への寄与が強まっており、 $R_s^* = 12.5\%$ (再冠水時間が上限値200年に達する(即ち、 $u_4(R_s) = 1$ となる) R_s の値)付近に最大値 Φ^* が存在する結果となった。これは、再冠水時間に対する効用値 u_4 の総合評価値 Φ に与える寄与が大きいことによると考えられる。

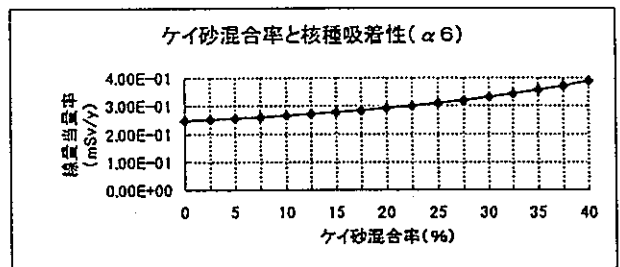
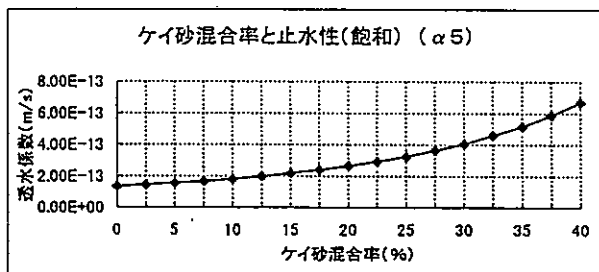
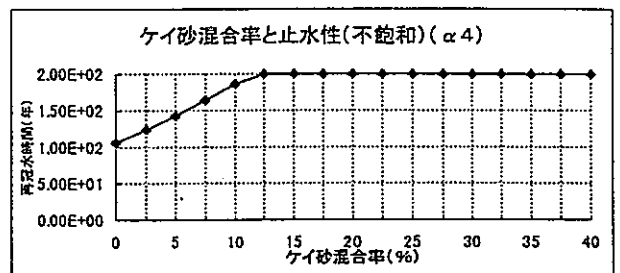
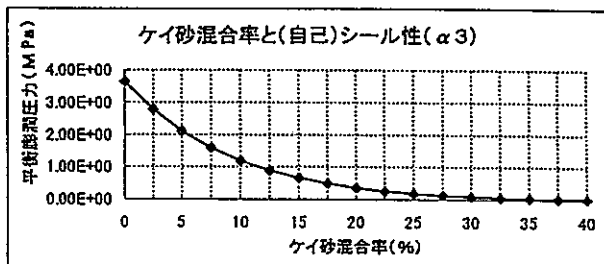
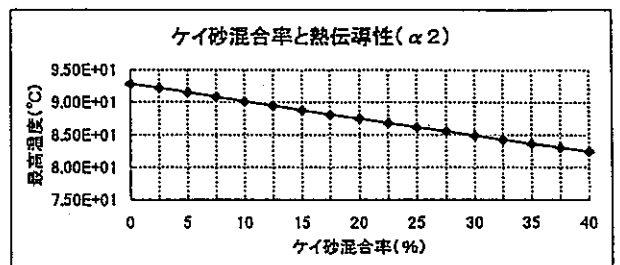
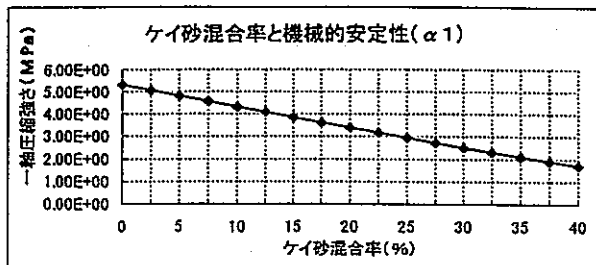


図 8 (1) 各定量評価指標 α 値のケイ砂混合率依存特性

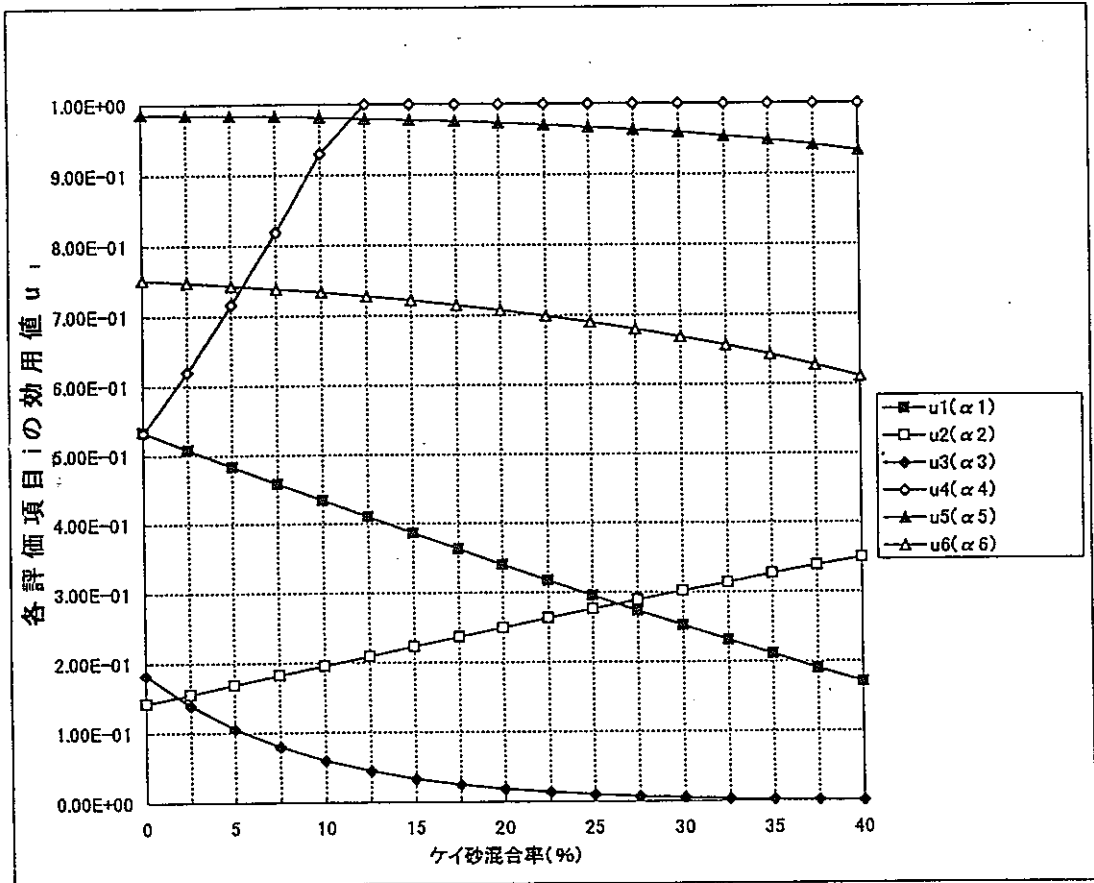


図 8 (2) 各評価項目の効用値のケイ砂混合率依存特性

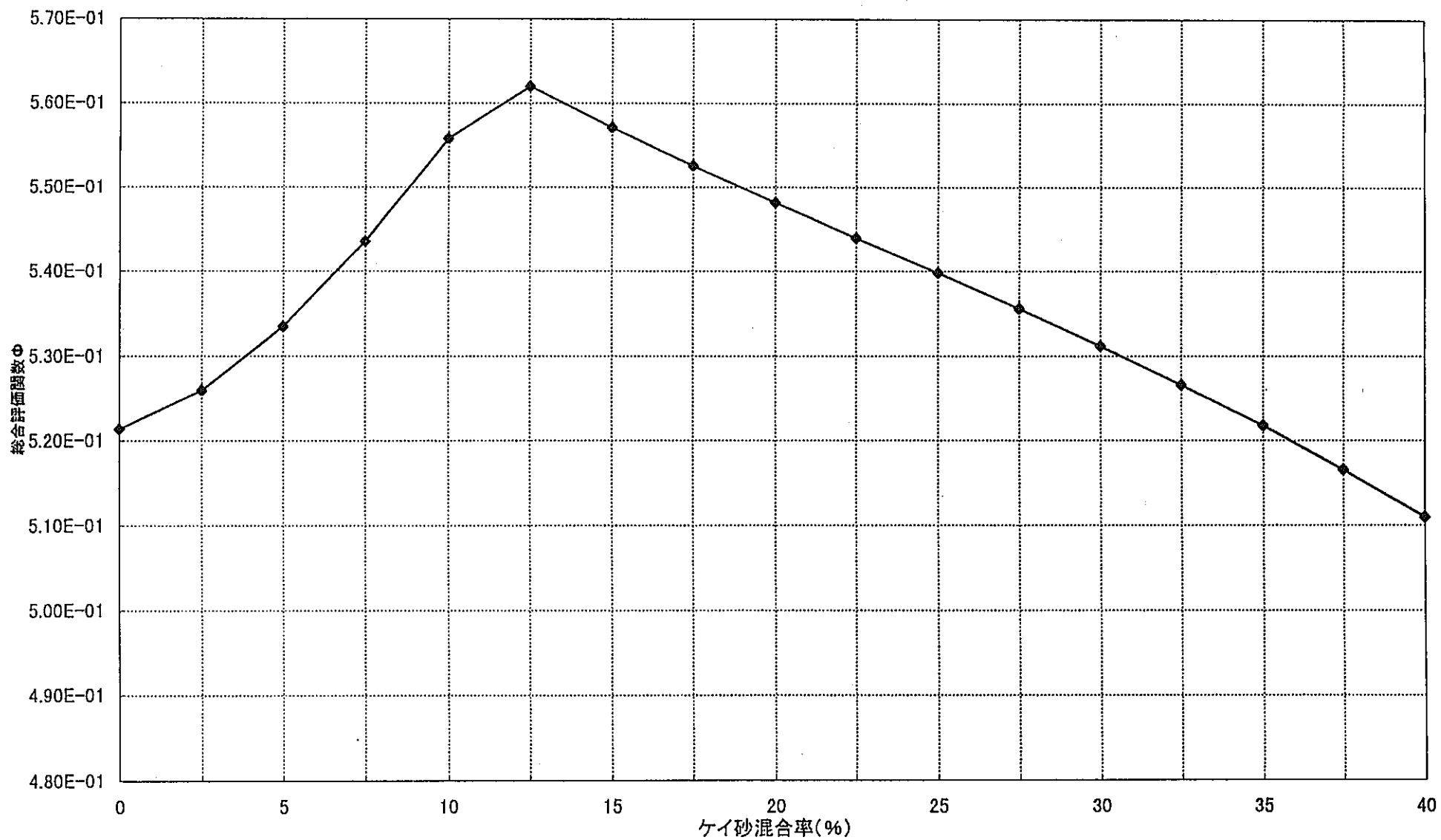


図9 総合評価値 Φ のケイ砂混合率依存特性-基準ケース ($w = 10\%$, $P = 20\text{MPa}$, $w_i = 1/6$) -

(2) ケース・スタディ

前項で求めた基準ケース ($w=10\%$ 、 $P=20\text{MPa}$; 評価項目均等ウェイト) との比較を行うため、前年度に設定した2つのケース、即ち、熱伝導性重視ケース ($w_2=2/7$ 、 $w_i=1/7$ ($i \neq 2$)) と核種吸着性重視ケース ($w_6=2/7$ 、 $w_i=1/7$ ($i \neq 6$)) に対し、締固め圧力 $P=20\text{MPa}$ において、含水比 w を $0\% \sim 20\%$ (2.5% 刻み) の範囲で変化させ、ケイ砂混合率 R の関数 (総合評価関数) Φ の変化の様子を調べた。(但し、透水係数 K の含水比 w に対する変化を直接測定したデータはないが、前年度同様の考え方で、乾燥密度 ρ_d への変化を通じて反映されるものと考えた。) その結果を図10(1)~(3)にそれぞれ示す。また、これより、最適ケイ砂混合率 R_s^* とそれに対応する総合評価値 Φ^* のおよその値をまとめて示したものが表4である。含水比が大きくなると、主に、一軸圧縮応力、再冠水時間の低下による効用値減と、最高温度の低下による効用値増の効果がみられる(各定量的評価指標 α 値の変化は付録C参照) が、その結果、ケイ砂混合率を増やすときに再冠水時間が上限に達するケイ砂混合率の値が大きい方にシフトするため、 R_s^* は大きい方にシフトすると考えられる。この場合、基準ケースに比べ、核種吸着性を重視しても、含水比増加に伴う R_s^* 低下への影響はあまり大きくないこと、他方、熱伝導性を重視すると、含水比が 12.5% 前後以下ならば R_s^* への影響はあまり大きくないが含水比が 15% 前後より大きくなると R_s^* の増加が明らかになってくること、などが示される。

なお、締固め圧力 P の影響を直接測定しているデータは、一軸圧縮応力と乾燥密度以外得られていないので、今回のケース・スタディではその点についての解析は行わなかった。

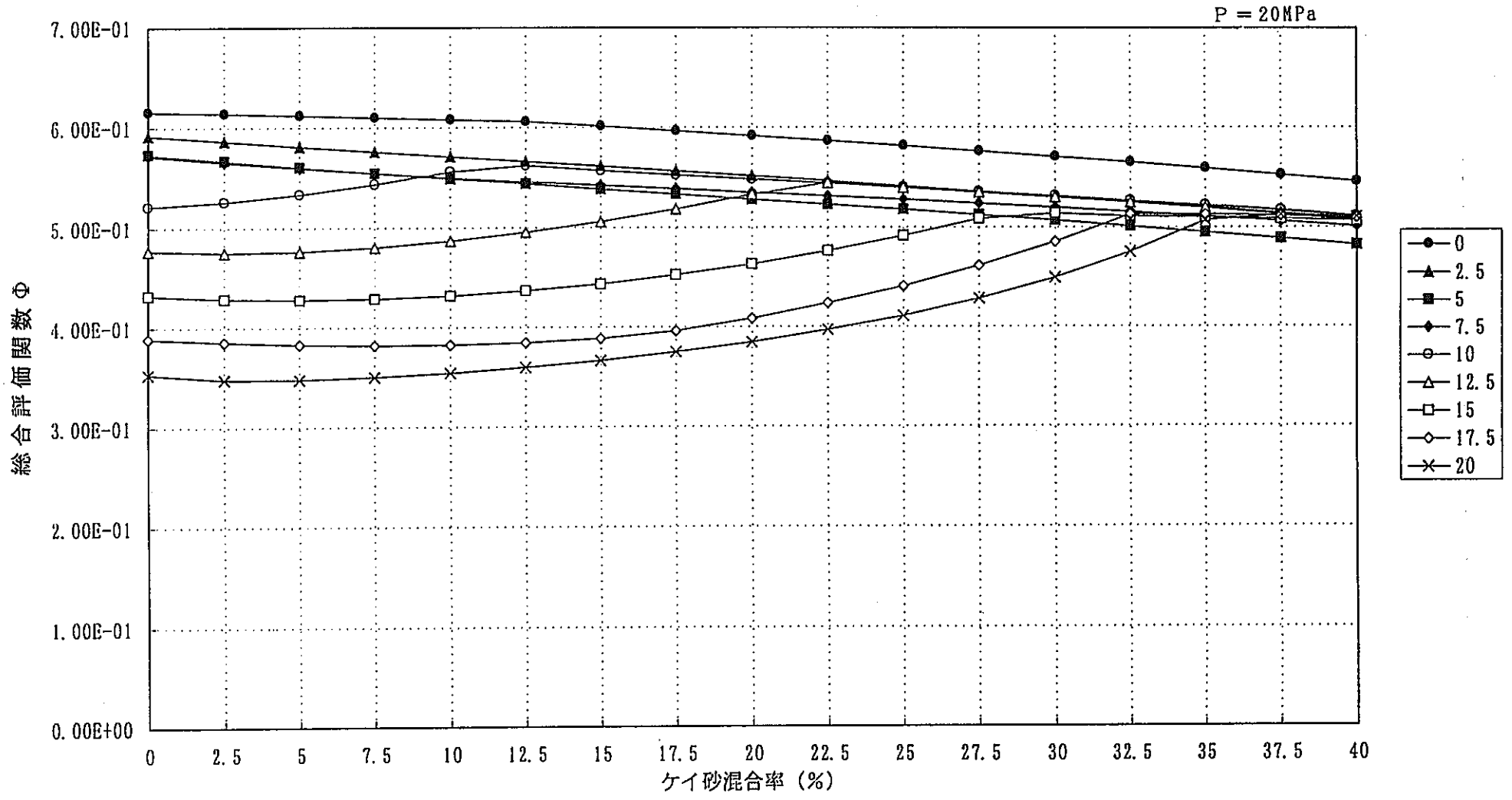


図10(1) 含水比の変化に対する総合評価値の変化－基準ケース－

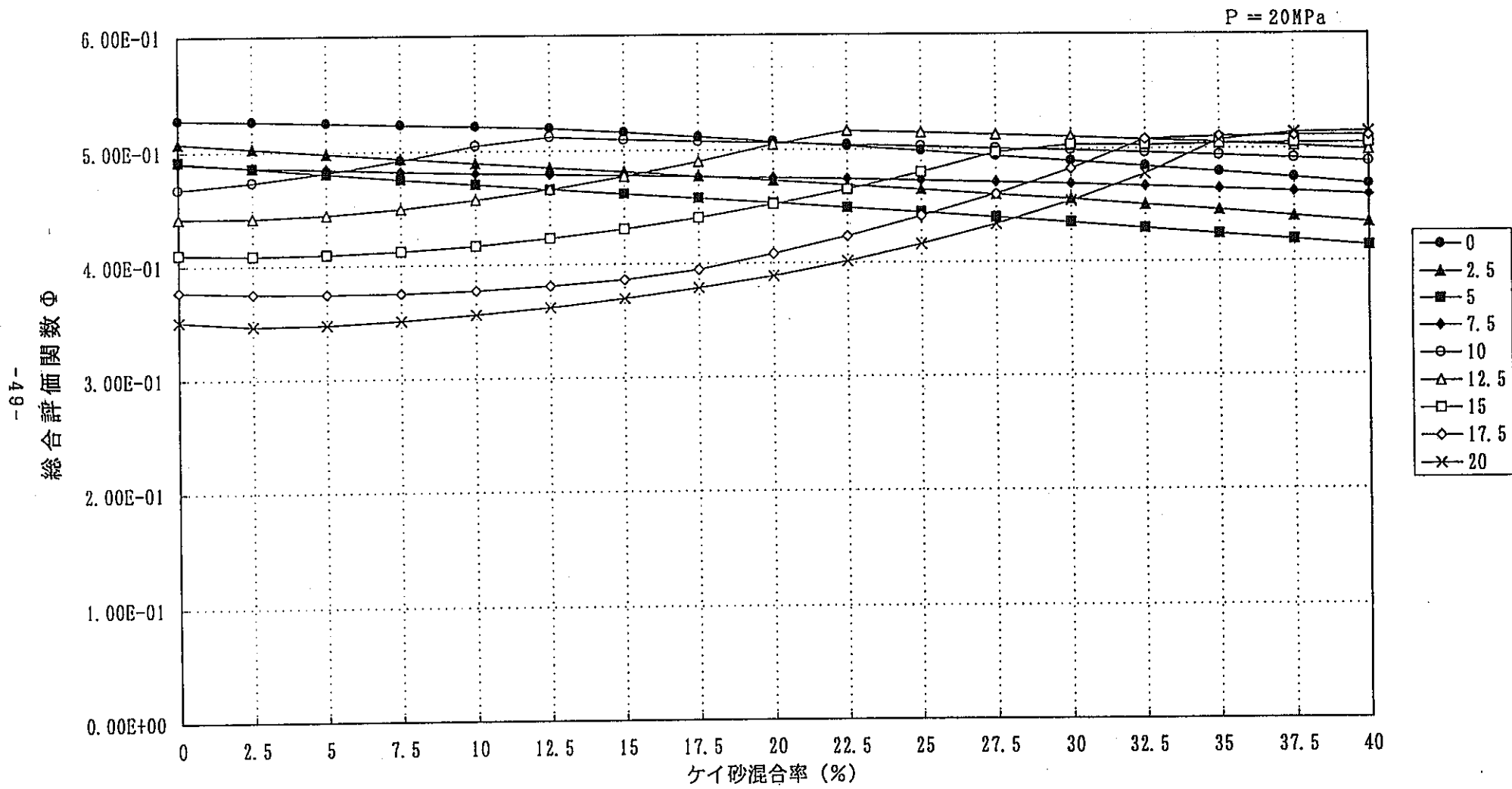


図10(2) 含水比の変化に対する総合評価値の変化—熱伝導性重視ケース—

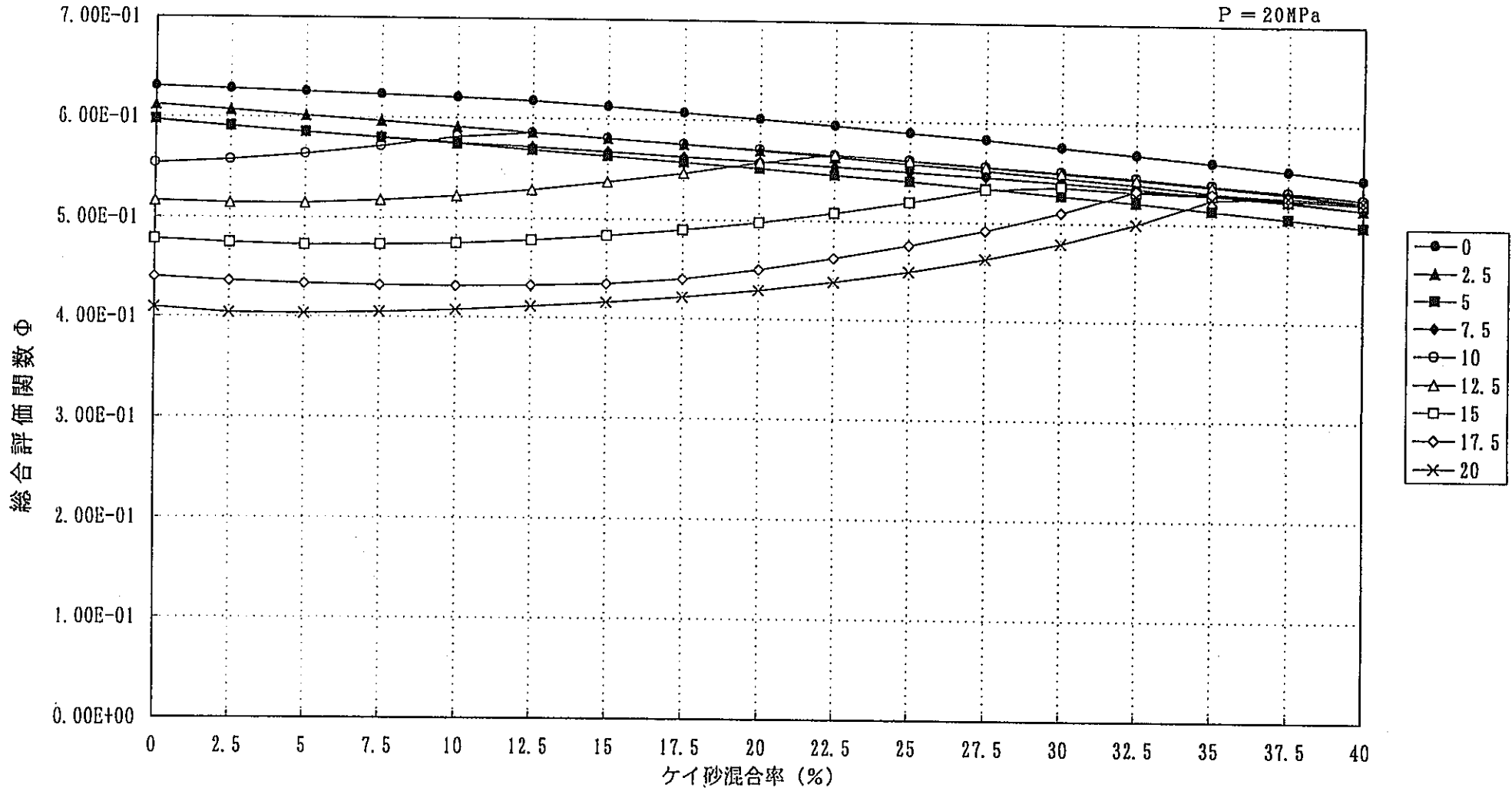


図10(3) 含水比の変化に対する総合評価値の変化－核種吸着性重視ケース－

表4 最適ケイ砂混合率の変化(但し、締固め圧力 P = 20MPa)*

含水比 w (%)	基準ケース	熱伝導性重視ケース	核種吸着性重視ケース
0	0 (0.616)	0 (0.528)	0 (0.631)
2.5	0 (0.592)	0 (0.508)	0 (0.612)
5	0 (0.574)	0 (0.492)	0 (0.598)
7.5	0 (0.571)	0 (0.490)	0 (0.597)
10	12.5 (0.562)**	12.5 (0.512)	12.5 (0.586)
12.5	22.5 (0.544)	22.5 (0.516)	22.5 (0.567)
15	30 (0.514)	40 (0.505)	30 (0.536)
17.5	32.5~35(0.513)	37.5~40(0.511)	32.5 (0.532)
20	37.5 (0.512)	37.5~40(0.514)	37.5 (0.527)

* () 内は最適ケイ砂混合率 R* における総合評価値 Φ^* の値

** 図9の結果に対応したケース

ま と め

前年度までに開発・検討した緩衝材総合評価フレームをもとに、以下の改良化等の検討を行った。

- 1) ケイ砂混合率、含水比、締固め圧力の3変数を同時に決定し得る多変数最適化フレームへの拡張
- 2) 緩衝材の機能に関する諸データの検討
- 3) 緩衝材の機能の最適化に関する解析評価の試行

今後は、含水比並びに締固め圧力の変化に対する測定データの充実のもとに、緩衝材性能の総合評価値を最大化する変数を直接求める非線形最適化計算コードの開発とそれに基づくケース・スタディによる緩衝材最適設計のためのより綿密な分析が望まれる。

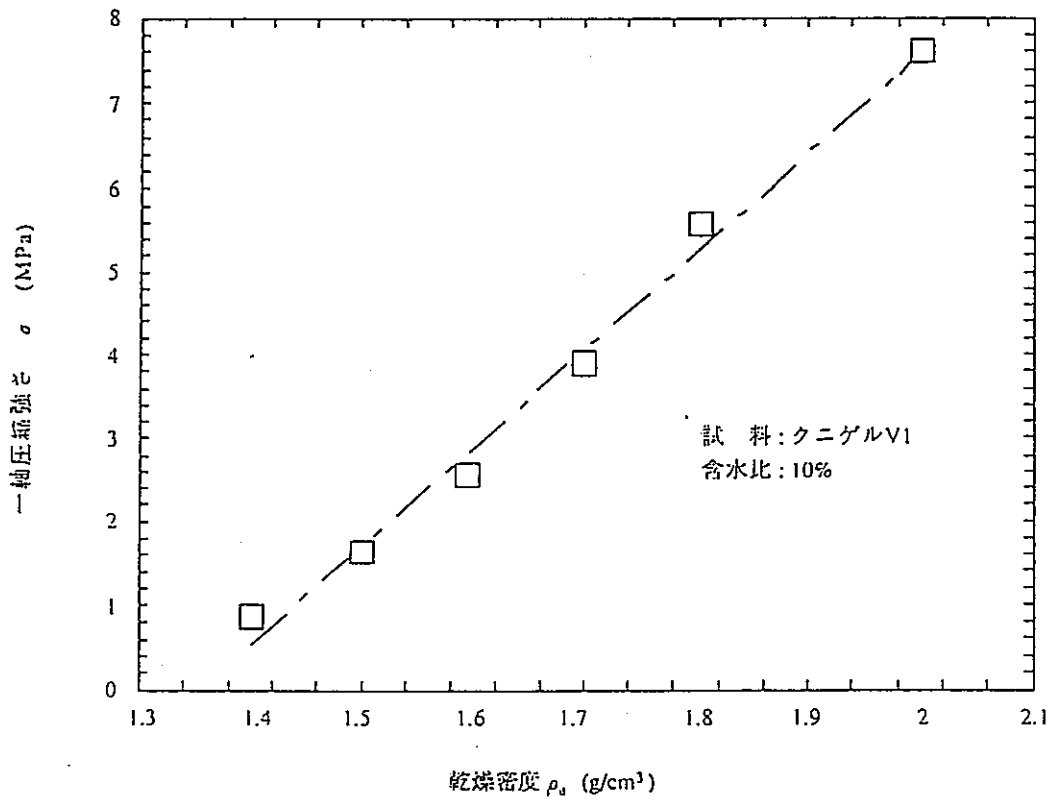
参 考 文 献

- (1) 動力炉・核燃料開発事業団
「緩衝材の特性試験(I)」 PNC TN 8410 92-057(1992).
- (2) 動力炉・核燃料開発事業団
「高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の技術報告書－平成3年度」
PNC TN 1410 92-081(1992).
- (3) 動力炉・核燃料開発事業団
「高レベル放射性廃棄物地層処分の人工バリアシステムによる地下水の化学
的緩衝作用とモデル化」 PNC TN 8410 92-162(1992).
- (4) H. Sato et al.
「Effect of Dry Density on Diffusion of Some Radionuclides in
Compacted Sodium Bentonite」 J. Nucl. Sci. Tech., 29(9),
pp873-882(1992).
- (5) H. Sato et al.
「Study on Retardation Mechanism of ^3H , ^{99}Tc , ^{137}Cs , ^{237}Np and ^{241}Am
in Compacted Sodium Bentonite」 Mat. Res. Soc. Symp. Proc., Vol.294,
pp403-408(1993).
- (6) 動力炉・核燃料開発事業団
「緩衝材の特性試験(II)」 PNC TN 8410 92-169(1992).
- (7) (株)三菱総合研究所
「緩衝材性能に関する予備的評価フレームの試行」 動力炉・核燃料開発事
業団 成果報告書 (1995).

付 録

A. 緩衝材の機能に関する試験データの解析

前年度までに文献(1)～(6)をもとに整理した緩衝材性能試験データに対する単回帰式を以下に示す。



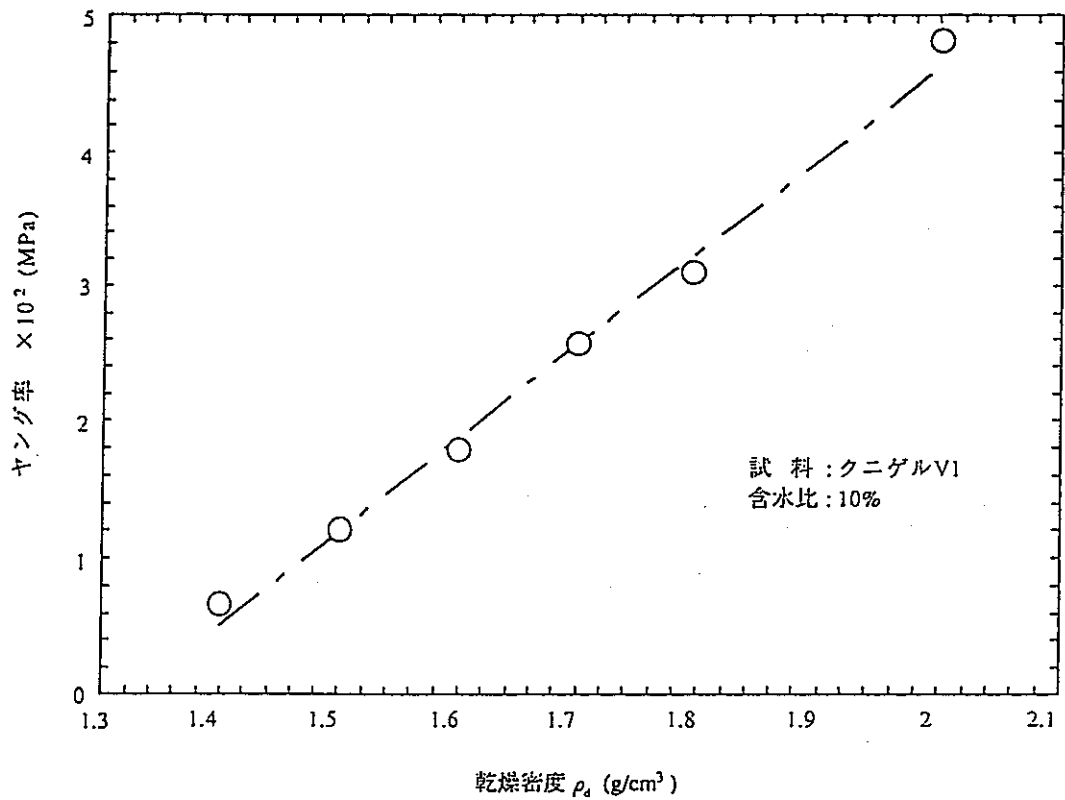
付・図1 乾燥密度と一軸圧縮強さ

出典(1)

乾燥密度1.4～2.0 g/cm³の範囲で、

$$\sigma = 11.769 \rho_d - 15.924$$

ここで、 σ は一軸圧縮強さ (MPa)、 ρ_d は乾燥密度 (g/cm³)



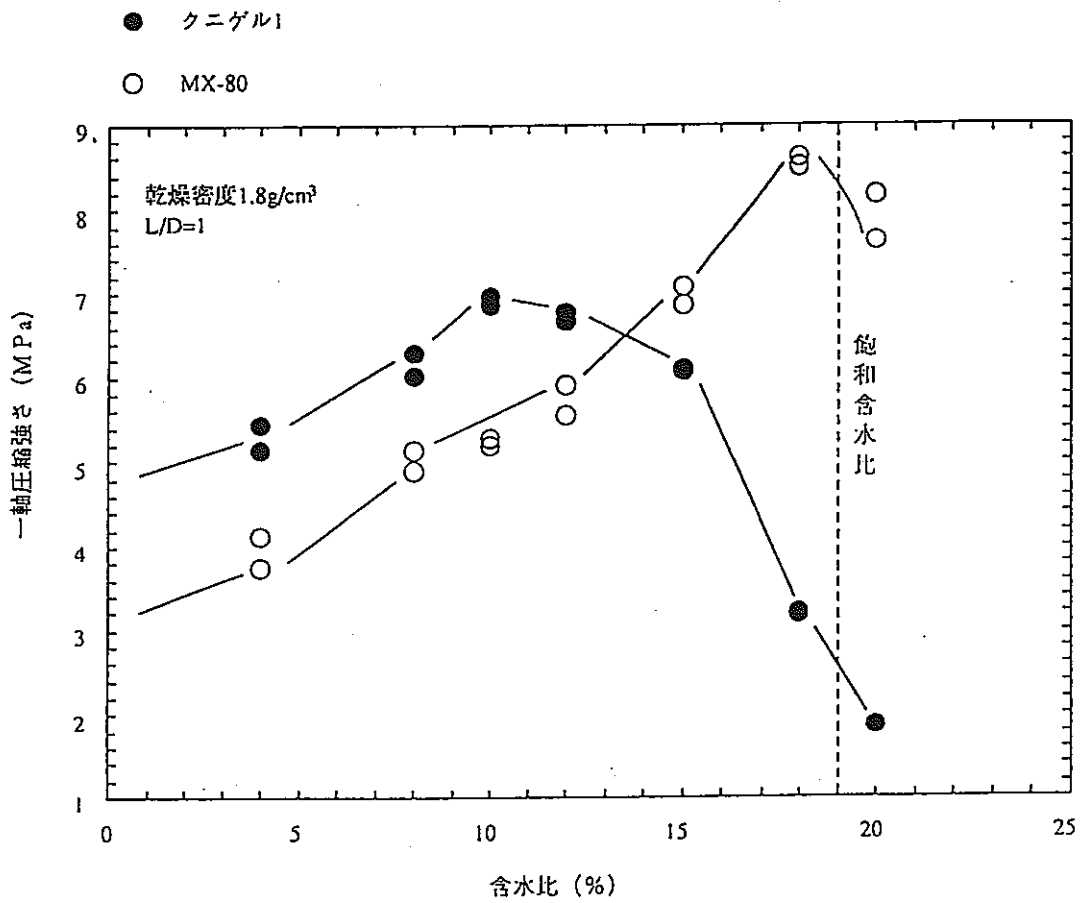
付・図2 乾燥密度とヤング率

出典(1)

乾燥密度1.4~2.0 g / cm³の範囲で、

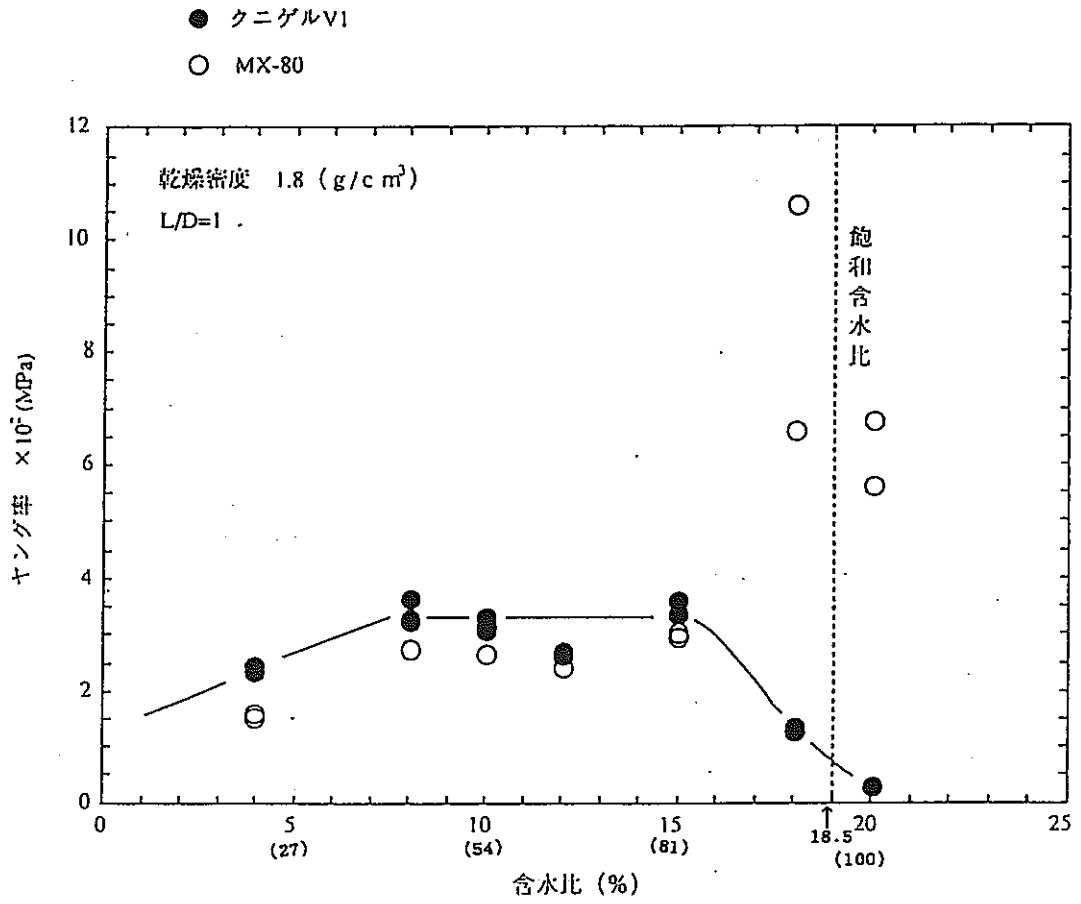
$$E = 6.891 \rho_d - 9.131$$

ここで、Eはヤング率 ($\times 10^2$ MPa)、 ρ_d は乾燥密度 (g / cm³)



付・図3 含水比と一軸圧縮強さ

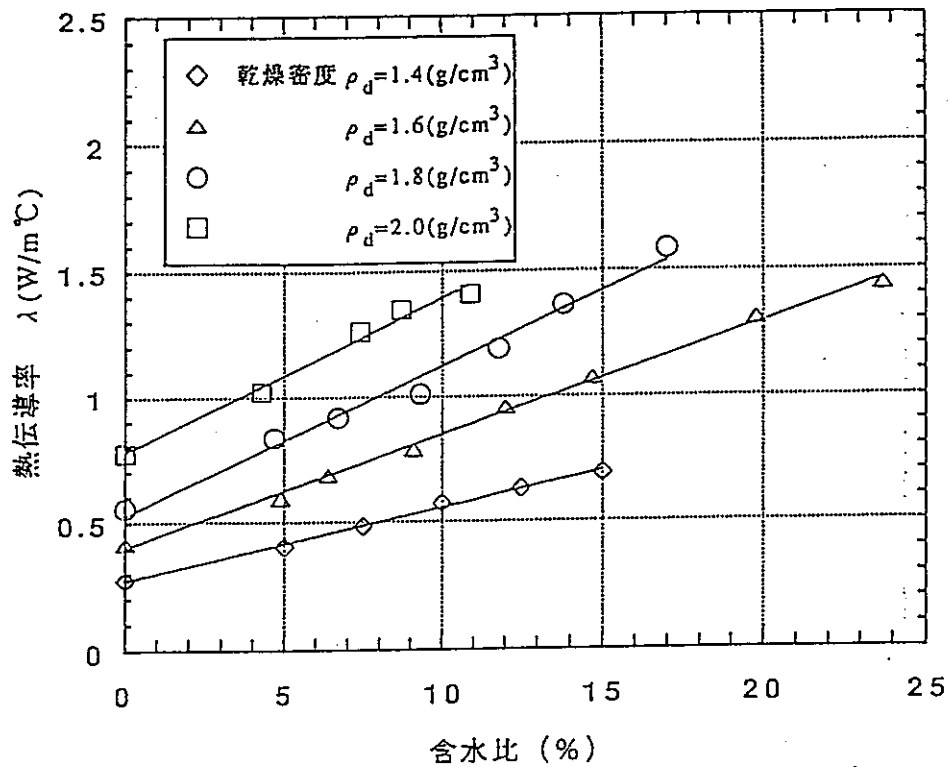
出典(1)



付・図4 含水比とヤング率

但し、() の数値は、文献(1)p13の式に基づいて算出した飽和度(%)

出典(1)



付・図5 含水比と熱伝導率

出典(1)

試験範囲内で、

$$\text{乾燥密度 } 1.4 \text{ (g/cm}^3\text{)} \quad \lambda = 0.028w + 0.272$$

$$\text{乾燥密度 } 1.6 \text{ (g/cm}^3\text{)} \quad \lambda = 0.045w + 0.401$$

$$\text{乾燥密度 } 1.8 \text{ (g/cm}^3\text{)} \quad \lambda = 0.062w + 0.527$$

$$\text{乾燥密度 } 2.0 \text{ (g/cm}^3\text{)} \quad \lambda = 0.061w + 0.780$$

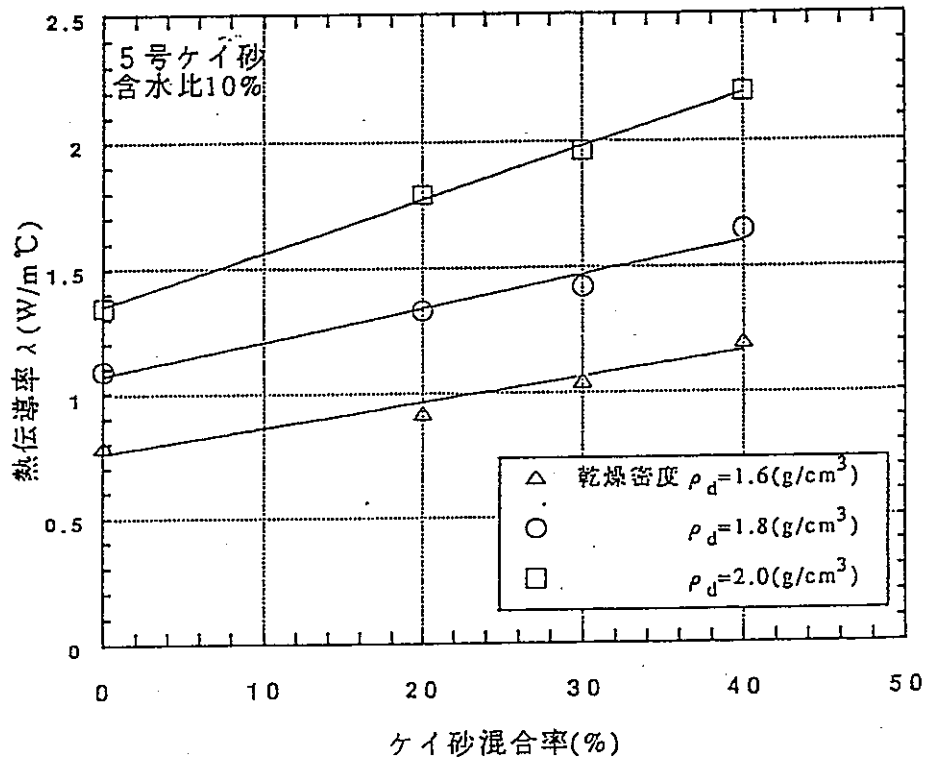
ここで、 λ は熱伝導率 (W/m°C)、 w は含水比 (%)

また、上記の式を乾燥密度 ρ_d の関数としても表現すると以下のようなになる。

$$\lambda = \alpha w + \beta$$

$$\text{但し、} \alpha = -0.0496 + 0.058 \rho_d$$

$$\beta = -0.9075 + 0.825 \rho_d$$



付・図6 ケイ砂混合率と熱伝導率

出典(1)

ケイ砂混合率0～40%の範囲で、

$$\text{乾燥密度 } 1.6 \text{ (g/cm}^3\text{)} \quad \lambda = 0.0101 R_s + 0.7604$$

$$\text{乾燥密度 } 1.8 \text{ (g/cm}^3\text{)} \quad \lambda = 0.0133 R_s + 1.074$$

$$\text{乾燥密度 } 2.0 \text{ (g/cm}^3\text{)} \quad \lambda = 0.0210 R_s + 1.353$$

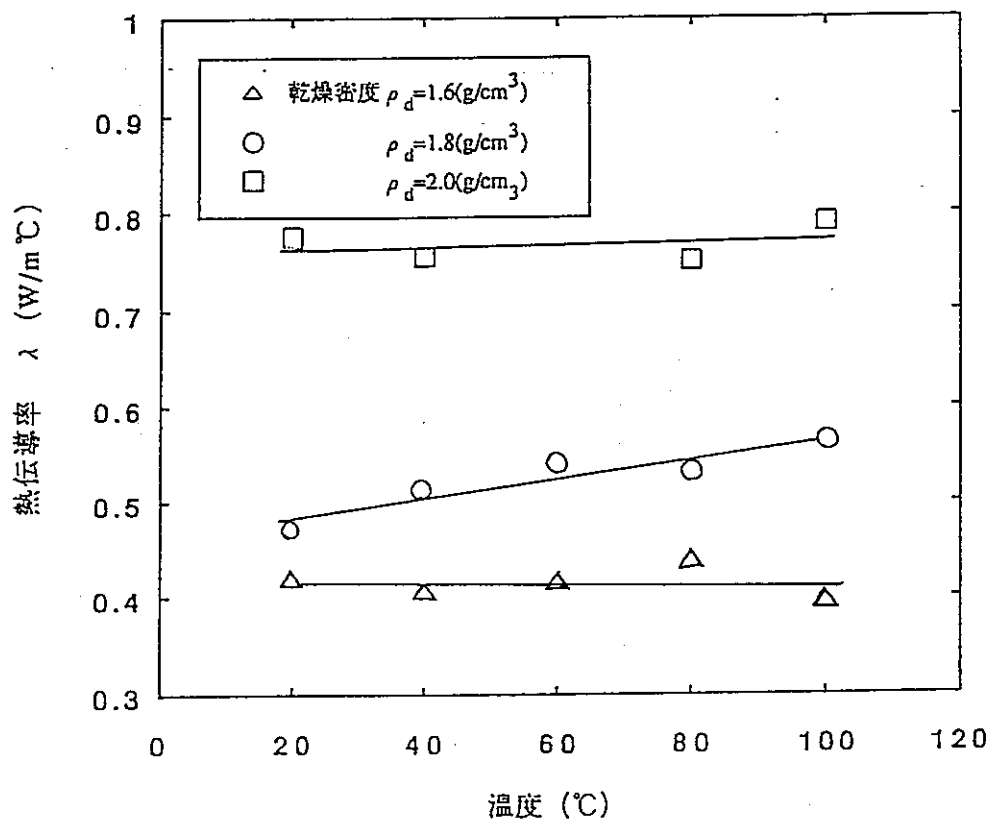
ここで、 λ は熱伝導率 (W/m°C)、 R_s はケイ砂混合率 (%)

また、上記の式を乾燥密度 ρ_d の関数としても表現すると以下のような
る。

$$\lambda = \omega \cdot R_s + \lambda_0$$

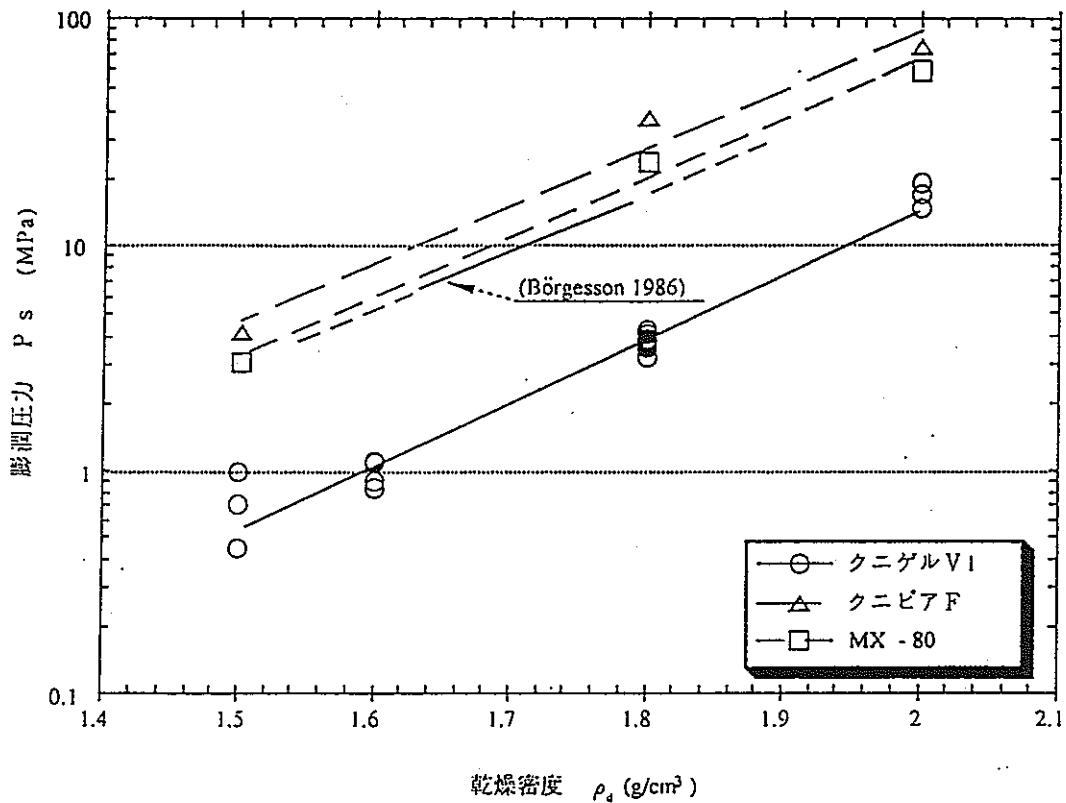
$$\text{但し、} \omega = 0.02725 \rho_d - 0.03425$$

$$\lambda_0 = 1.4815 \rho_d - 1.6042$$



付・図7 試料温度と熱伝導率

出典(1)



付・図8 乾燥密度と平衡膨潤圧力

出典(1)

乾燥密度1.5~2.0 g / cm³の範囲で、

$$\text{クニゲルV1} \quad P_s = 3.990 \times 10^{-5} \times \exp(6.376 \rho_d)$$

$$\text{クニピアF} \quad P_s = 6.608 \times 10^{-4} \times \exp(5.916 \rho_d)$$

$$\text{MX-80} \quad P_s = 4.072 \times 10^{-4} \times \exp(6.010 \rho_d)$$

ここで、 P_s は平衡膨潤圧力 (MPa)、 ρ_d は乾燥密度 (g / cm³)

また、クニゲルV1とクニピアFのモンモリロナイト含有量を $x = 50\%$ ($R_s = 0\%$)、 99% と考えると、付・図15の関係式より、ケイ砂混合率 R_s の関数としても表現すると以下のようなになる。

$$P_s = q \cdot \exp(r \cdot \rho_d)$$

$$\text{但し、} \quad q = 3.990 \times 10^{-5} \exp(-0.02864 R_s)$$

$$r = 6.376 + 4.694 \times 10^{-3} R_s$$

付・表 1 (1) 乾燥密度1.8 g / cm³での含水比と飽和度の関係

ベントナイト粉末含水比 (%) x	試料初期飽和度 (%) x'
0. 0 0	0
9. 2 6	5 0
1 3. 8 9	7 5

(クニゲル V 1)

$$x' = 5.399568159 x$$

但し、文献(1)p13の式に基づくと、

$$\text{間隙率 } n = \left(1 - \frac{1.8}{2.7 \times 0.99910} \right) \times 100 = 33.27327928\%$$

$$\begin{aligned} \text{飽和度 } S_r &= \left(\frac{100}{n} - 1 \right) \times 2.7 \times (\text{含水比}\%) \\ &= 5.414619473 \times (\text{含水比}\%) \end{aligned}$$

出典(1)

付・表 1 (2) 初期飽和度と平衡膨潤圧力

含水比 (%) x	試料初期飽和度 (%) x'	平衡膨潤圧力 (MPa) y
0. 0 0	0	5. 0 8
9. 2 6	5 0	3. 7 2
1 3. 8 9	7 5	3. 2 4

(クニゲル V 1)

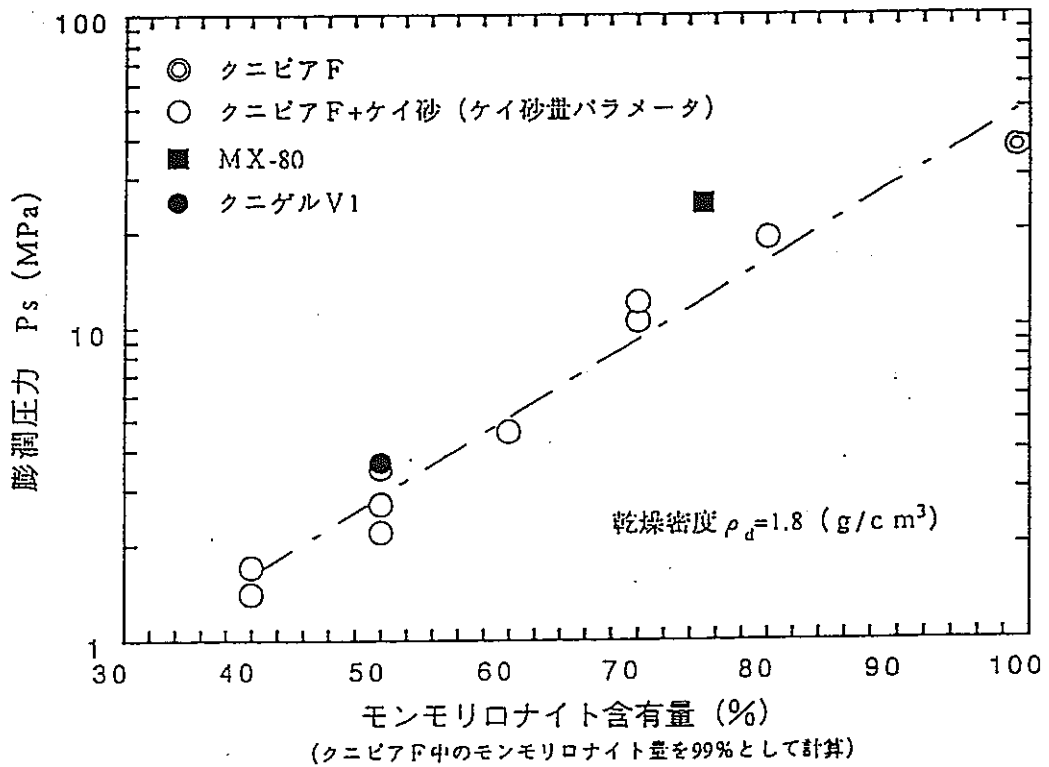
出典(1)

ベントナイト粉末含水比 0 ~ 13.89% (試料初期飽和度 0 ~ 75%) の範囲で、乾燥密度 1.8 (g / cm³) のとき、

$$P_s = -0.1345w + 5.051, \quad z = 5.40 \times w$$

ここで、P_sは平衡膨潤圧力 (MPa)、wは含水比 (%)、

zは初期飽和度 (%)



付・図9 モンモリロナイト含有量と膨潤圧力

出典(1)

クニピアFについては、乾燥密度 1.8 g/cm^3 、モンモリロナイト含有量40～99(%)の場合、

$$P_s = 0.1596 \times \exp(0.05776 X)$$

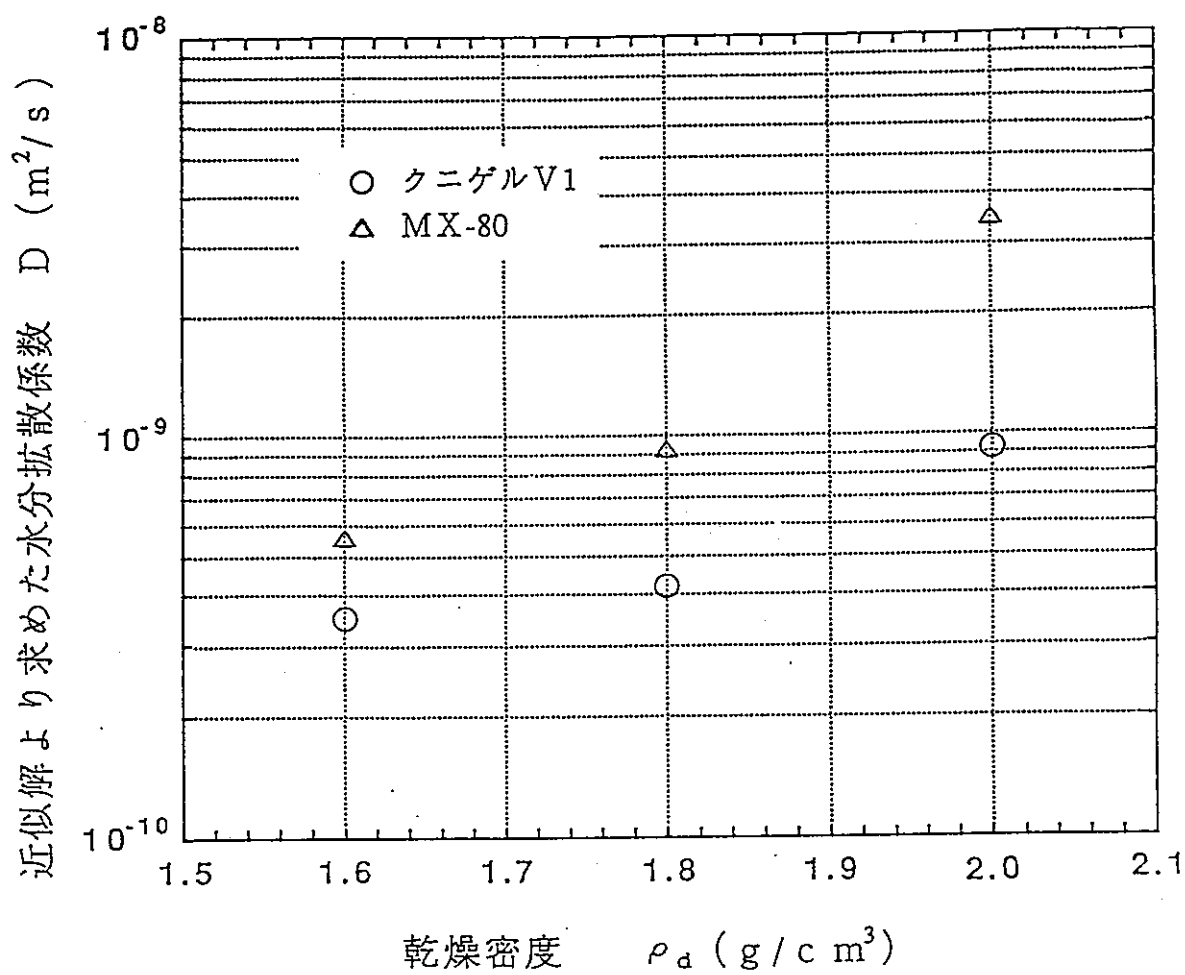
ここで、 P_s は平衡膨潤圧力(MPa)、

X はモンモリロナイト含有量(%)

また、クニゲルV1については、 $x = 50\%$ ($R_s = 0\%$ に対応)で $P_s = 3.71 \text{ MPa}$ の一点を通り、上図のクニピアFケースの直線の傾きと同じと考え、 $\rho_d = 1.8 \text{ g/cm}^3$ のとき、

$$P_s = 3.71 \exp(-0.02888 R_s) \quad \text{on} \quad 0 \leq R_s \leq 10$$

となる。



付・図10(1) 乾燥密度と近似解より求めた水分拡散係数

出典(6)

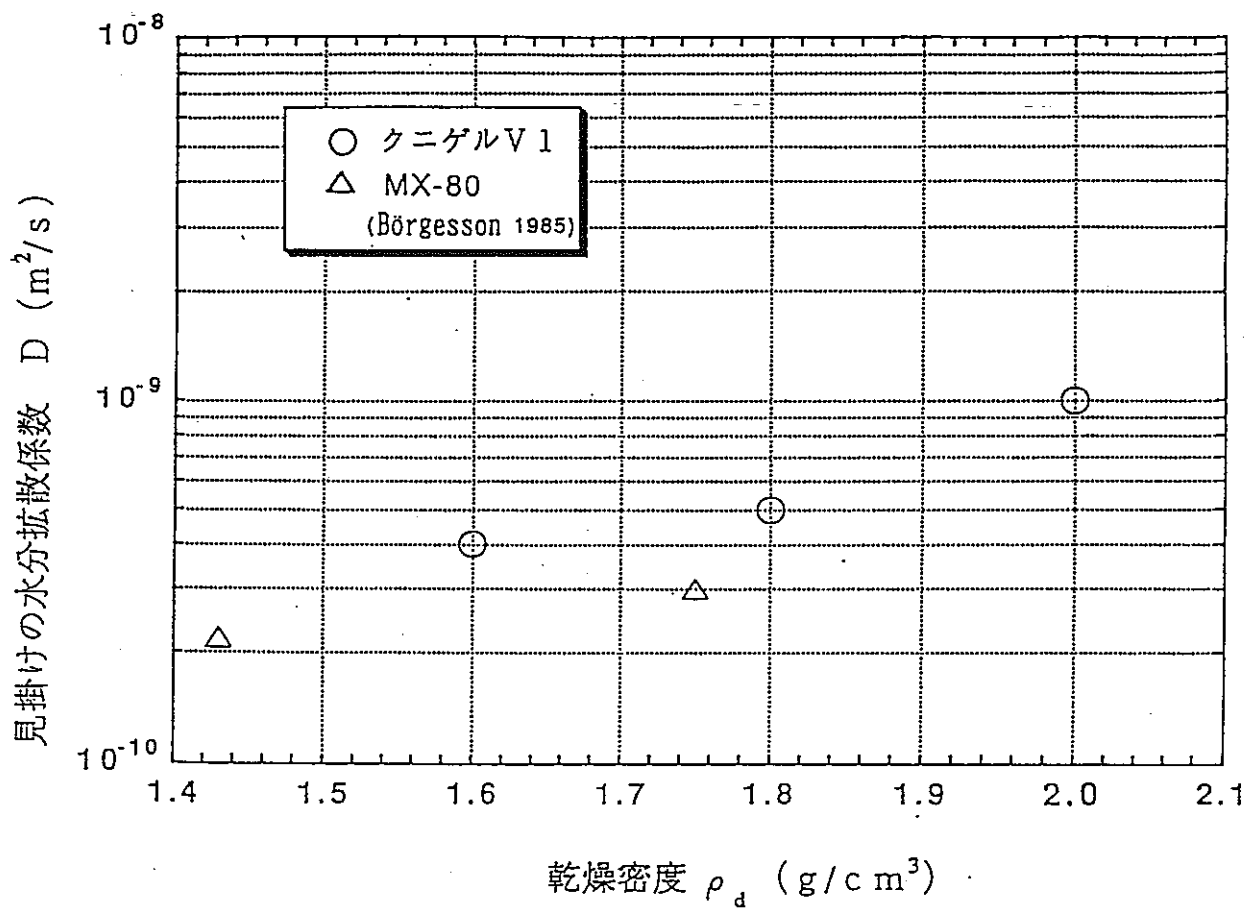
乾燥密度1.6~2.0 g/cm³の範囲で、

クニゲルV1 : $D = 6.6318 \times 10^{-12} \times \exp(2.416 \rho_d)$

MX-80 : $D = 3.2022 \times 10^{-13} \times \exp(4.5815 \rho_d)$

ここで、Dは水分拡散係数 (m²/s)、

ρ_d は乾燥密度 (g/cm³)



付・図10(2) 乾燥密度と見掛けの水分拡散係数

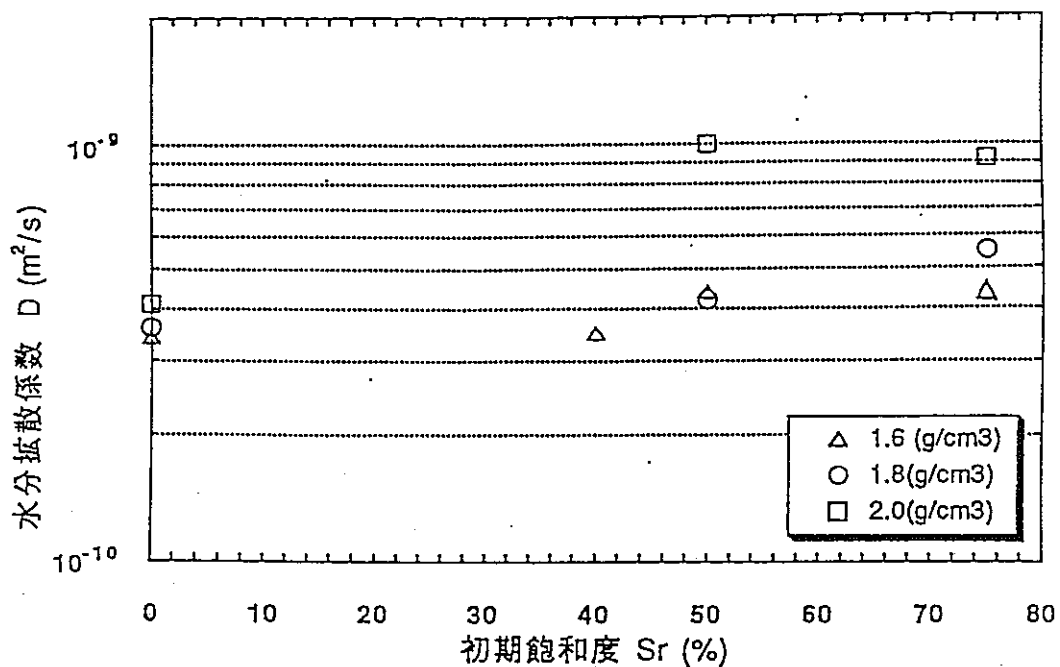
出典(6)

乾燥密度1.6~2.0 g / cm³ の範囲で、

$$\text{クニゲルV1} : D = 9.469 \times 10^{-12} \times \exp(2.291 \rho_d)$$

ここで、 D は水分拡散係数 (m² / S)、

ρ_d は乾燥密度 (g / cm³)



付・図10(3) 初期飽和度と水分拡散係数

出典(6)

初期飽和度0~75%の範囲で、

乾燥密度1.6 (g / cm³) : $D = 3.463 \times 10^{-10} \times \exp(3.683 \times 10^{-3} \cdot S_r)$

乾燥密度1.8 (g / cm³) : $D = 3.502 \times 10^{-10} \times \exp(5.284 \times 10^{-3} \cdot S_r)$

乾燥密度2.0 (g / cm³) : $D = 4.422 \times 10^{-10} \times \exp(1.178 \times 10^{-2} \cdot S_r)$

ここで、Dは水分拡散係数 (m² / s)、 S_r は初期飽和度 (%)

また、含水比wと水分拡散係数Dの関係は、含水比と初期飽和度の関係を表す次表より推定可能。

初期飽和度 (%)	含 水 比 (%)		
	乾 燥 密 度 (g / cm³)		
	1. 6	1. 8	2. 0
0	0. 0 0	0. 0 0	0. 0 0
5 0	1 3. 1 1	9. 2 6	6. 8 6
7 5	1 9. 6 6	1 3. 8 9	1 0. 2 9

また、上記の式を乾燥密度 ρ_d の関数としても表現すると以下のようになる。

$$D = a \cdot \exp(b \cdot S_r)$$

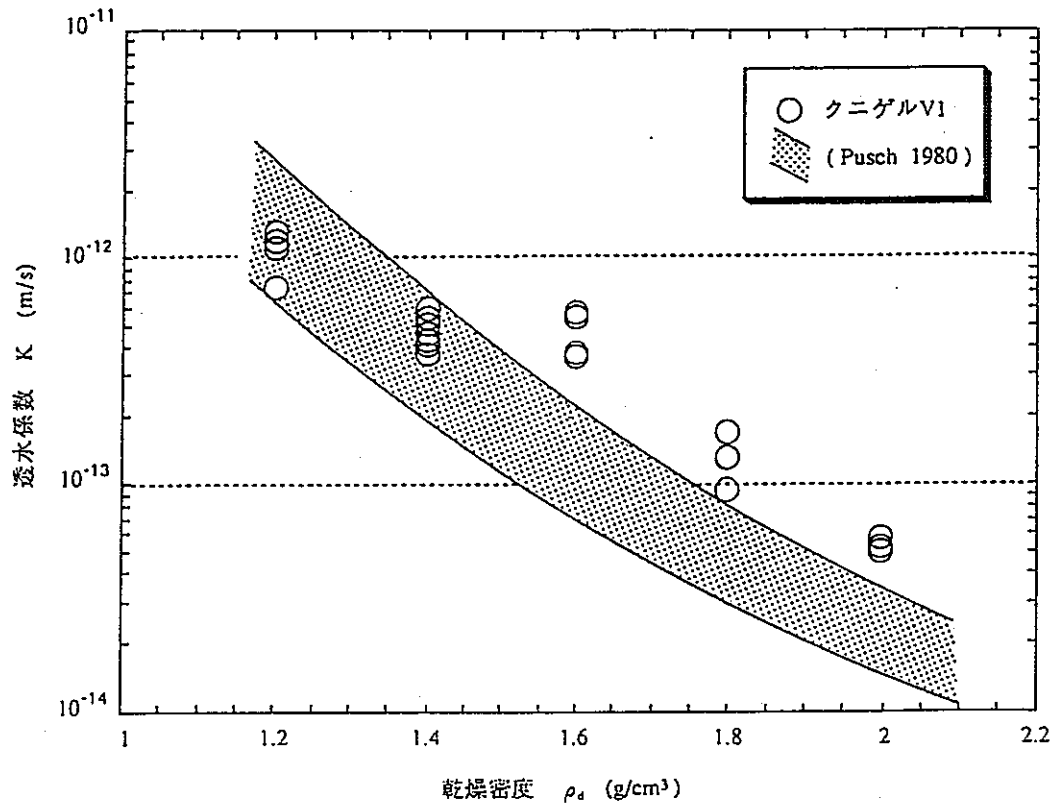
ここで、 $a = 1.255 \times 10^{-10} \exp(0.6111 \rho_d)$

$$b = -0.02952 + 0.02024 \rho_d$$

但し、 $S_r = w / \left(\frac{\rho_w}{\rho_d} - \frac{1}{G_c} \right)$

G_c : ペントナイトの真比重2.7,

ρ_w : 15℃の水の単位体積重量0.99910 g / cm³



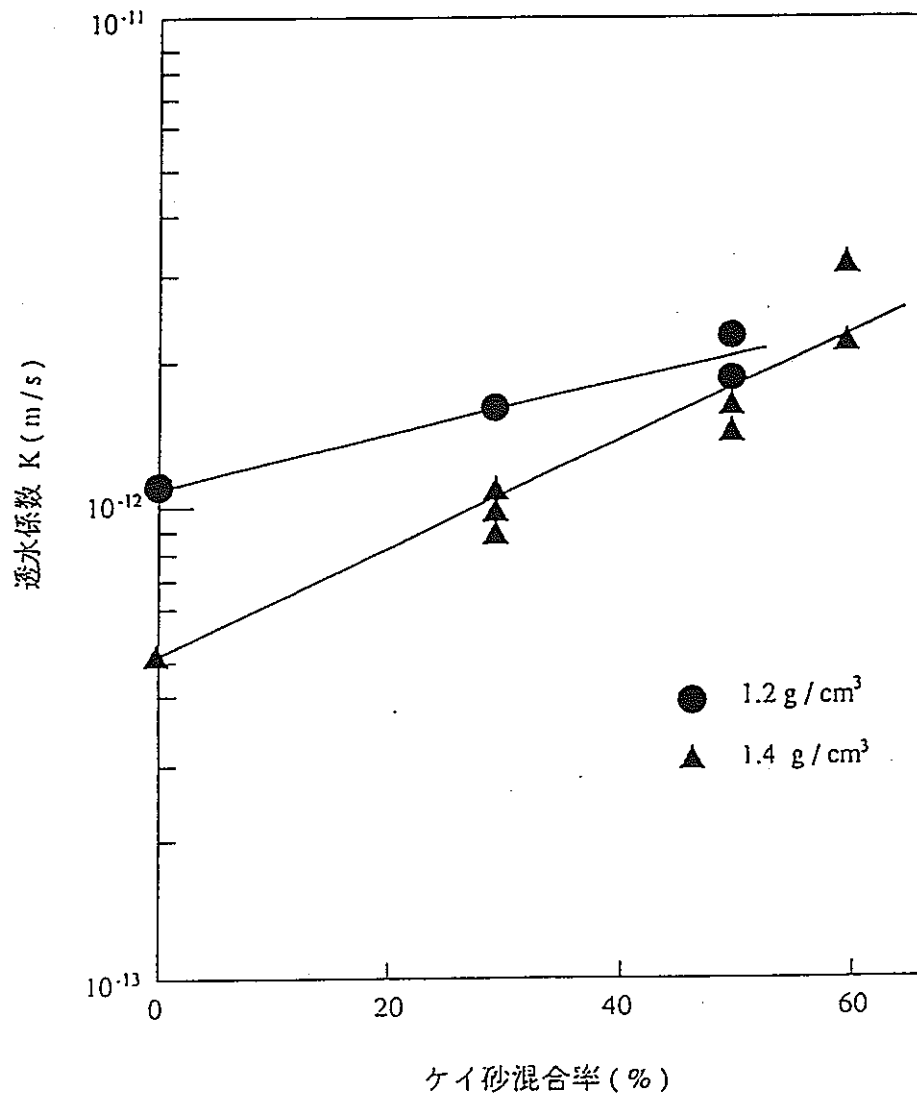
付・図11 乾燥密度と透水係数

出典(1)

乾燥密度 $1.2 \sim 2.0 \text{ g/cm}^3$ の範囲で、

$$K = 7.99 \times 10^{-11} \times \exp(-3.55 \rho_d)$$

ここで、 K は透水係数 (m/s)、 ρ_d は乾燥密度 (g/cm³)



付・図12 ケイ砂混合率と透水係数

出典(1)

ケイ砂混合率 0 ~ 50 (もしくは60) % の範囲で、

$$\text{乾燥密度 } 1.2 \text{ (g / cm}^3\text{)} \quad K = 1.105 \times 10^{-12} \times \exp(0.01200 R_s)$$

$$\text{乾燥密度 } 1.4 \text{ (g / cm}^3\text{)} \quad K = 4.606 \times 10^{-13} \times \exp(0.02697 R_s)$$

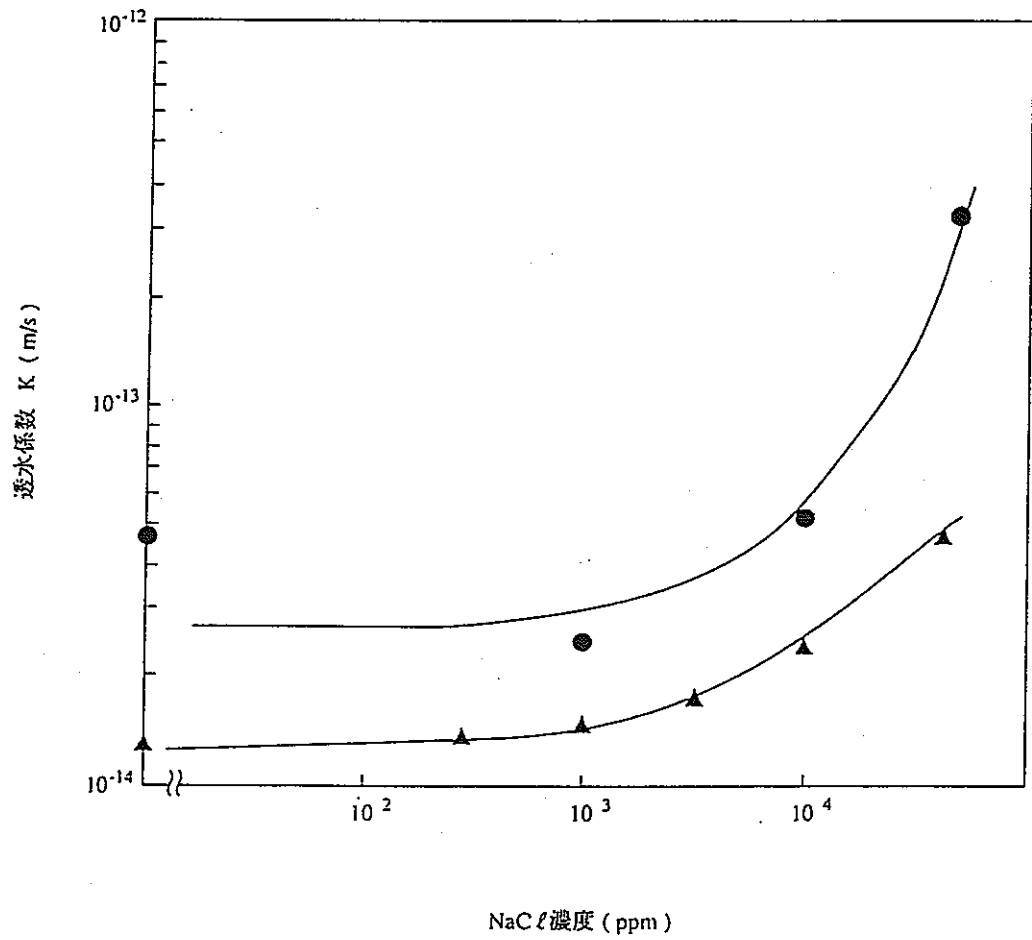
ここで、K は透水係数 (m / s)、R_s はケイ砂混合率 (%)

また、上記の式を R_s = 0 での推計式 (付・図11) をベースに乾燥密度 ρ_d の関数としても表現すると以下のようなになる。

$$K = A \cdot \exp(B \cdot R_s)$$

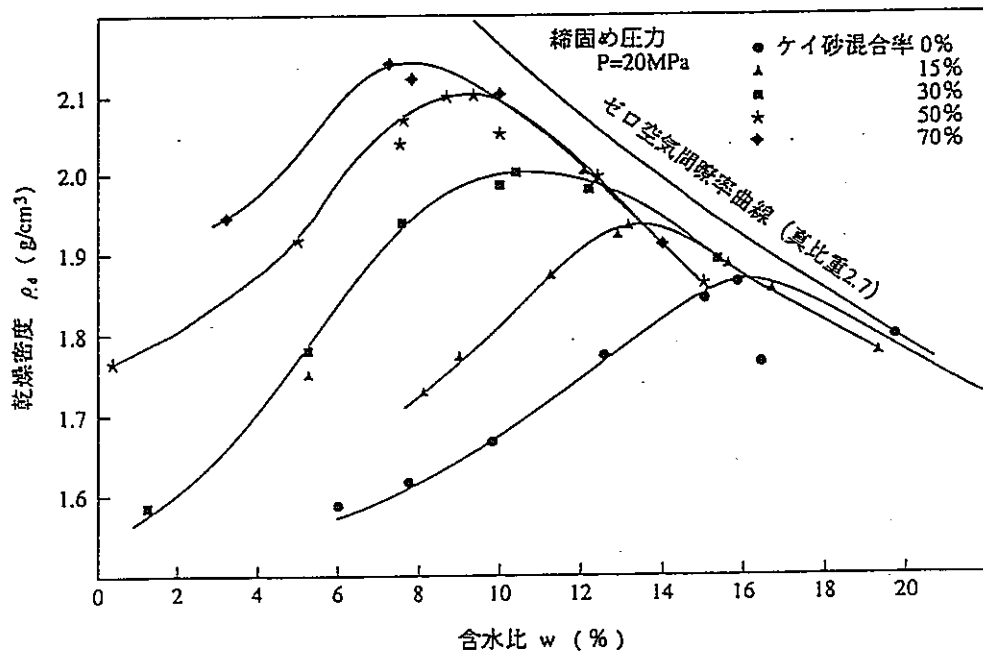
$$\text{但し、} A = 8.266 \times 10^{-11} \exp(-3.582 \rho_d)$$

$$B = -0.07782 + 0.07485 \rho_d$$



付・図13 透過液中NaCl濃度と透水係数

出典(1)



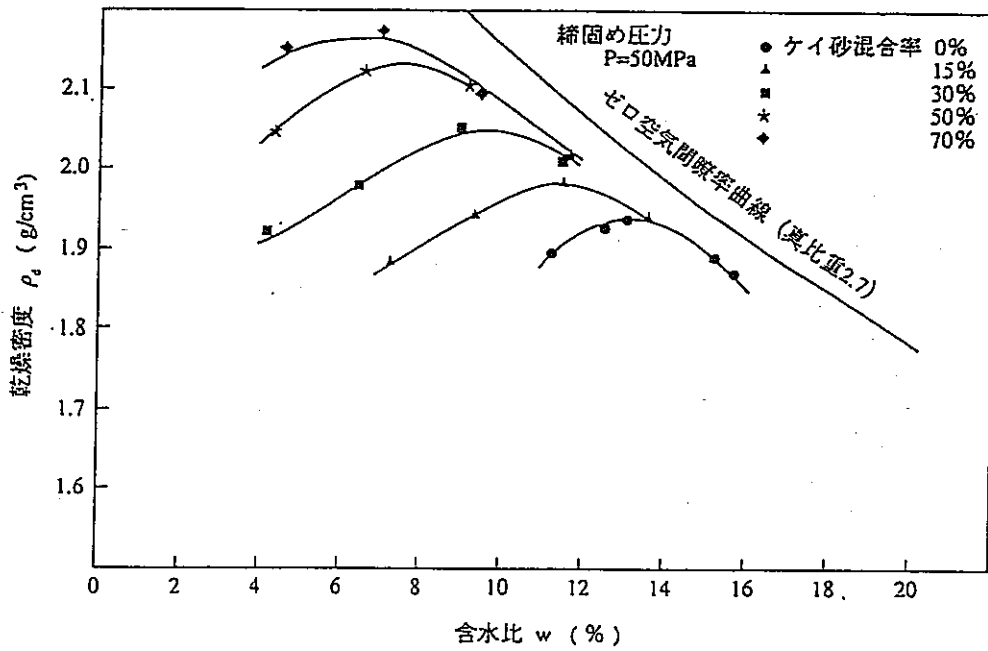
付・図14(1) 締固め試験結果 ($P = 20\text{MPa}$)

出典(1)

$P = 20\text{MPa}$ に対する数値データ*

R_s	(w, ρ_d)の値
0	(6, 1.59) (7.73, 1.61) (9.76, 1.67) (12.64, 1.77) (15.12, 1.84) (15.87, 1.86) (21, 1.72)
15	(8.16, 1.72) (9.12, 1.77) (11.33, 1.87) (12.96, 1.91) (13.2, 1.92) (15.6, 1.88) (16.8, 1.85) (19.36, 1.77)
30	(1.25, 1.58) (5.31, 1.77) (7.6, 1.93) (10, 1.98) (10.48, 2) (12.24, 1.97) (15.33, 1.89)
50	(0.4, 1.76) (5.12, 1.91) (7.73, 2.06) (8.77, 2.09) (9.36, 2.08) (12.45, 1.99) (15.12, 1.86)
70	(3.28, 1.94) (7.4, 2.13) (7.8, 2.11) (10, 2.09) (14, 1.9)

* 付・図18(1)より読み取ったもの(但し、曲線から大きくずれている点は無視)



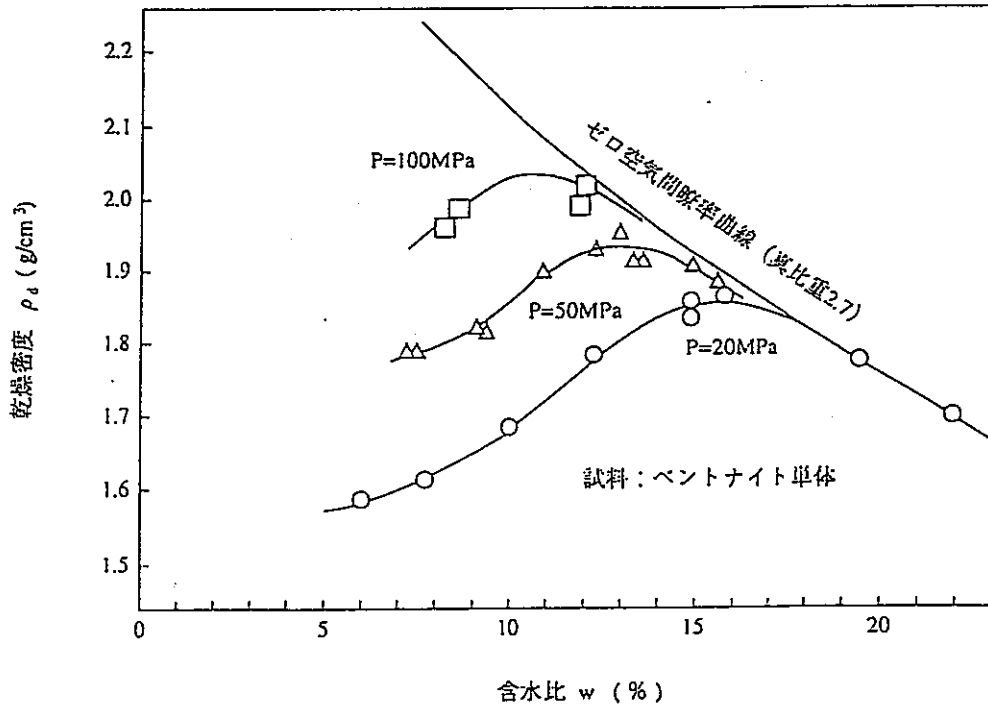
付・図14(2) 締固め試験結果 ($P = 50\text{MPa}$)

出典(1)

$P = 50\text{MPa}$ に対する数値データ*

R_s	(w, ρ_d)の値
0	(11.28, 1.88) (12.48, 1.91) (13.04, 1.92) (15.2, 1.88) (15.73, 1.86)
15	(7.28, 1.87) (9.41, 1.93) (11.6, 1.97) (13.57, 1.92)
30	(4.24, 1.91) (6.56, 1.96) (9.12, 2.03) (11.6, 1.99)
50	(4.56, 2.03) (6.74, 2.10) (9.25, 2.09) (11.73, 2)
70	(4.72, 2.13) (7.04, 2.16) (9.52, 2.08)

* 付・図18(2)より読み取ったもの



付・図14(3) ベントナイト単体による締固め曲線 (ケイ砂混合率 = 0)

出典(1)

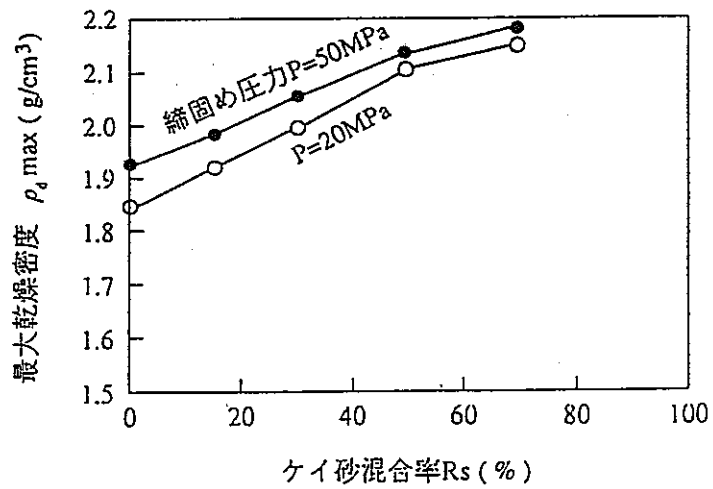
締固め圧力20~100MPaの範囲で、ケイ砂混合率0のとき、

$$\rho_{dmax} = 2.071 \times 10^{-3} P + 1.829$$

$$w_{opt} = -0.05898 P + 16.276$$

ここで、 ρ_{dmax} は最大乾燥密度 (g / cm³)、 w_{opt} は最適含水比 (%)、

Pは締固め圧力 (MPa)



付・図15 ケイ砂混合率と最大乾燥密度との関係

出典(1)

ケイ砂混合率 0 ~ 70% の範囲で、

$$\text{締固め圧力 } 20 \text{ (MPa)} \quad \rho_{d \max} = 4.143 \times 10^{-3} R_s + 1.869$$

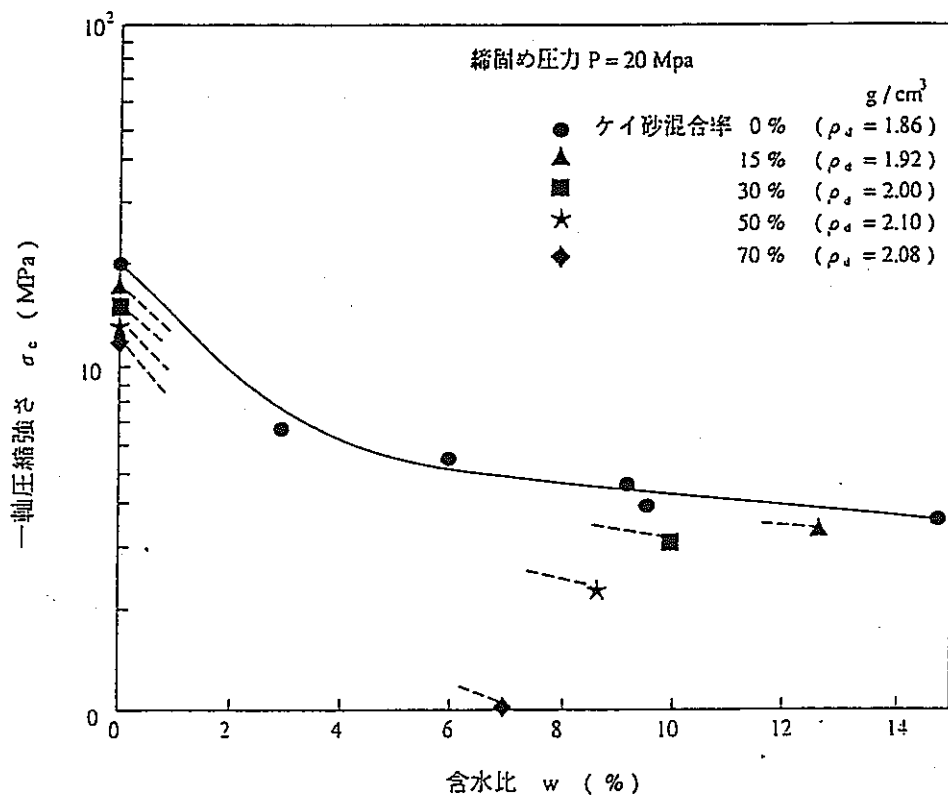
$$w_{opt} = -0.1144 R_s + 14.777$$

$$\text{締固め圧力 } 50 \text{ (MPa)} \quad \rho_{d \max} = 3.416 \times 10^{-3} R_s + 1.949$$

$$w_{opt} = -0.08857 R_s + 12.543$$

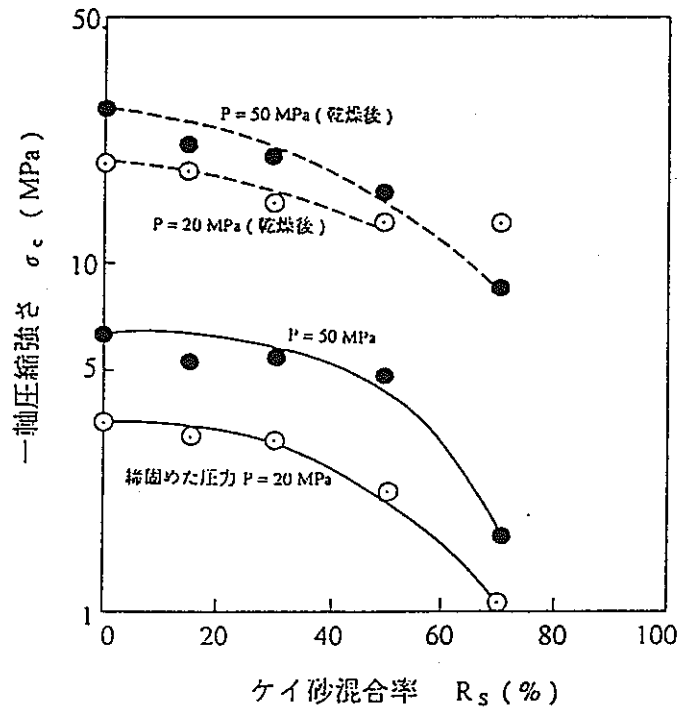
ここで、 $\rho_{d \max}$ は最大乾燥密度 (g/cm³)、 w_{opt} は最適含水比 (%)、

R_s はケイ砂混合率 (%)

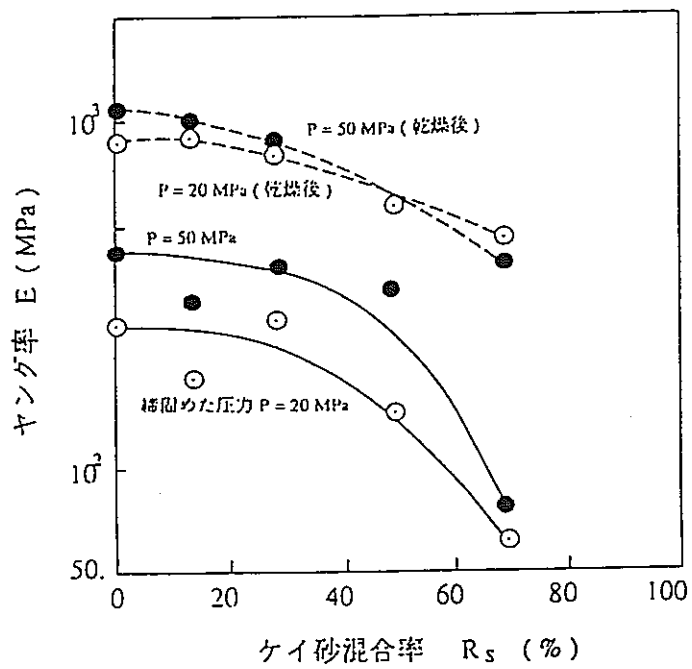


付・図16 乾燥による含水比の変化と一軸圧縮強さの関係

出典(1)



付・図17(1) 各ケイ砂混合率で最も締固まった試料の一軸圧縮強さ
出典(1)



付・図17(2) 各ケイ砂混合率で最も締固まった試料のヤング率
出典(1)

付・表2 最大乾燥密度を得た試料の一軸圧縮試験結果

締固め 圧力 (MPa)	ケイ砂 混合率 (%)	乾燥前		乾燥後	
		一軸圧縮強さ (MPa)	ヤング率 ×10 ² (MPa)	一軸圧縮強さ (MPa)	ヤング率 ×10 ² (MPa)
20	0	3.53 3.58	2.62 2.56	19.87	9.01
	15	3.33 3.26	1.72 1.81	17.28	8.88
	30	3.05 3.17	2.50 2.83	14.97	8.10
	50	2.22 2.23	1.44 1.34	13.18	5.60
	70	1.07 1.00	0.60 0.55	13.08	4.42
50	0	6.50 6.29	4.31 4.34	28.38	10.70
	15	5.27 5.48	— 2.99	22.00	9.95
	30	5.57 5.72	3.93 3.79	20.38	8.59
	50	5.04 4.63	3.49 3.19	15.93	5.59
	70	1.61 1.61	0.68 0.77	8.75	3.89

出典(1)

ケイ砂混合率0～50%の範囲で、

$$\sigma_c = g_c - h_c \cdot R_s$$

$$\sigma_{c0} = g_0 - h_0 \cdot R_s$$

ここで、 $g_c = 1.968 + 0.08462 P$ (乾燥前; $w = w_{opt}$)

$$g_0 = 14.36 + 0.2577 P$$
 (乾燥後; $w = 0$)

$$h_c = 0.02525 + 3.151 \times 10^{-5} P$$
 (乾燥前; $w = w_{opt}$)

$$h_0 = 0.06719 + 3.346 \times 10^{-3} P$$
 (乾燥後; $w = 0$)

但し、 σ_c : 最大乾燥密度 $\rho_d = \rho_{dmax}$ に対する一軸圧縮強さ (MPa)

σ_{c0} : 最大乾燥密度を得た試料の乾燥後の一軸圧縮強さ (MPa)

R_s : ケイ砂混合率 (%)

P : 締固め圧力 (MPa)

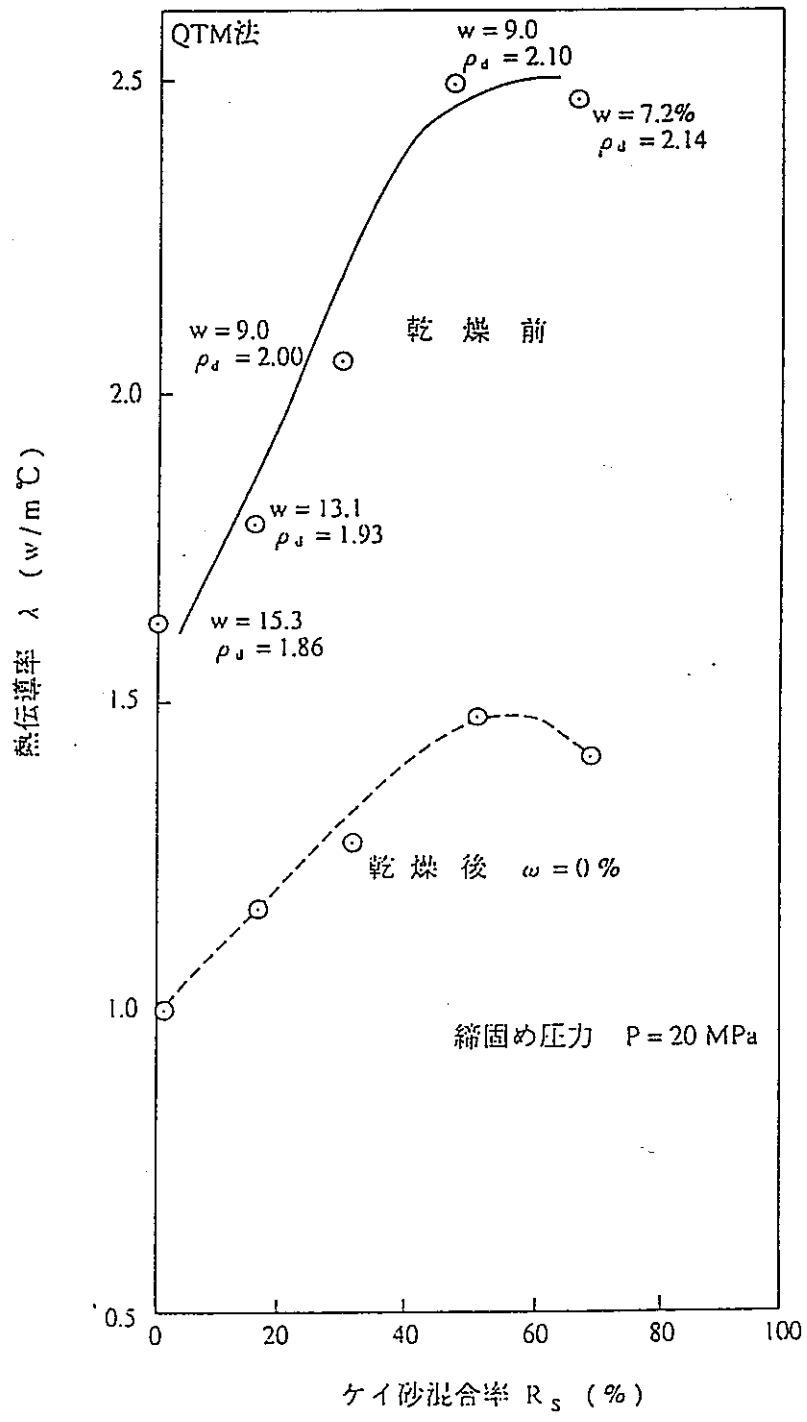
なお、含水比 w もパラメータと考える場合には、次式のような線形補間も考えられる。

$$\sigma = \sigma_0 + \sigma_1 R_s$$

但し、 $\sigma_0 = -12.39(w/w_{opt}) + 14.36 + \{-0.1731(w/w_{opt}) + 0.2577\} P$

$$\sigma_1 = -0.04194(w/w_{opt}) + 0.06719$$

$$+ \{-3.314 \times 10^{-3}(w/w_{opt}) + 3.346 \times 10^{-3}\} P$$



付・図18 各ケイ砂混合率で最も締固まった試料の熱伝導率
出典(1)

付・表3 最大乾燥密度を得た試料の熱伝導率

締固め圧力 (MPa)	ケイ砂混合率 (%)	熱伝導率 (W/m°C)	
		乾燥前	乾燥後
20	0	1.633	1.042
	15	1.793	1.144
	30	2.063	1.265
	50	2.513	1.472
	70	2.479	1.427

P = 20MPa及びケイ砂混合率0~50%の範囲で、

$$\lambda_c = 1.577 + 0.01782 R_s \text{ (乾燥前; } w = w_{opt} \text{)}$$

$$\lambda_{c0} = 1.026 + 8.613 \times 10^{-3} R_s \text{ (乾燥後; } w = 0 \text{)}$$

但し、 λ_c : 最大乾燥密度 $\rho_d = \rho_{dmax}$ に対する熱伝導率 (W/m°C)

λ_{c0} : 最大乾燥密度を得た試料の乾燥後の熱伝導率 (W/m°C)

R_s : ケイ砂混合率 (%)

なお、含水比 w もパラメータと考える場合には、次式のような線形補間も考えられる。

$$\lambda = \lambda_0 + \lambda_1 R_s$$

但し、 $\lambda_0 = 0.5511 (w / w_{opt}) + 1.026$

$$\lambda_1 = 9.205 \times 10^{-3} (w / w_{opt}) + 8.613 \times 10^{-3}$$

on P = 20MPa, $0 \leq R_s \leq 50$

付・表 4 (1) クニゲル V 1 交換性陽イオン量測定結果

層間	Na	Ca	K	Mg	合計 (meq/100g)
陽イオン種					
測定値	50.9	44.9	0.92	10.1	106.8
	50.9	49.4	0.92	12.6	113.8
	50.0	37.4	0.89	6.37	94.7
	53.3	34.9	0.83	6.16	95.2
平均	51.3	41.7	0.89	8.8	102.6
	49.9%	40.6%	0.9%	8.6%	100%

付・表 4 (2) クニピア F 交換性陽イオン量測定結果

層間	Na	Ca	K	Mg	合計 (meq/100g)
陽イオン種					
測定値	107.2	19.5	1.3	4.2	132.2
	108.3	19.5	1.2	4.0	133.0
	108.7	17.5	1.2	2.1	129.4
	106.5	17.4	1.1	2.7	127.7
	108.7	17.5	1.2	2.5	129.9
平均	107.9	18.3	1.2	3.1	130.5
	82.7%	14.0%	0.9%	2.4%	100%

出典(1)

付・表5 ベントナイトの鉱物組成

(1) クニゲルV1

構成鉱物等	含有量
モンモリロナイト	50 ~ 55 %
石英	30 ~ 35 %
長石	5 ~ 10 %
方解石	1 ~ 3 %
沸石(7A付)	1 ~ 2 % 以下
ドロマイト	1 ~ 2 % 以下
黄鉄鉱	1 ~ 2 % 以下
雲母(黒雲母)	1 ~ 2 % 以下

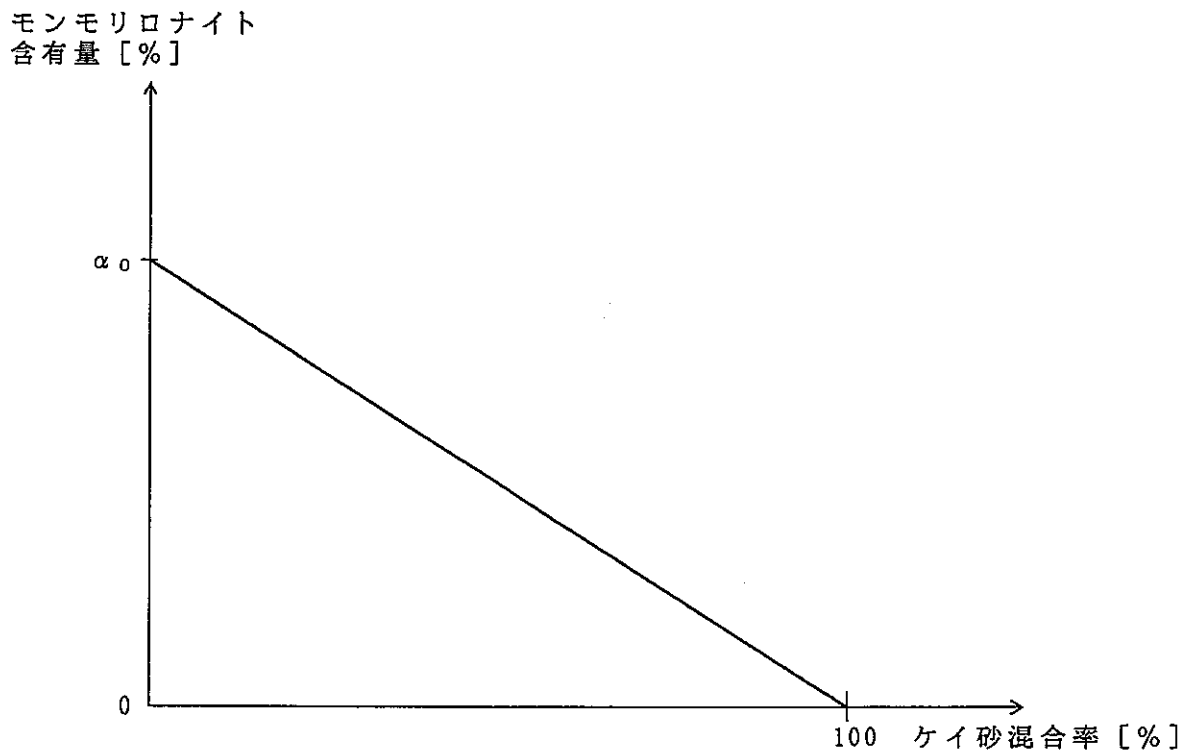
出典(1)

(2) クニピアF

鉱物	含有量 (%)
モンモリロナイト	99 %
石英	0.5 %
カルサイト	0.5 %

X線回折および化学分析値からの総合評価による。

出典(3)

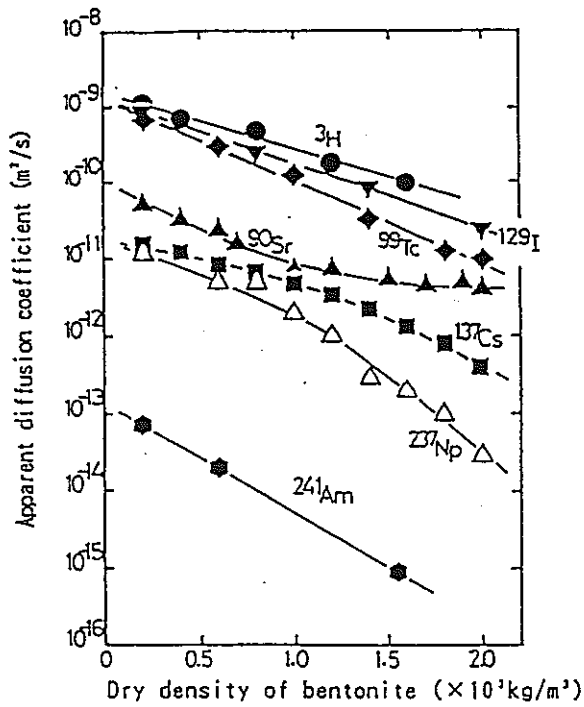


付・図19 ケイ砂混合率とモンモリロナイト含有量の関係
 (α_0 は、純粋ベントナイト中のモンモリロナイト含有量 [%] で、
 クニゲルV1では $\alpha_0 = 50$ 、クニピアFでは $\alpha_0 = 99$)

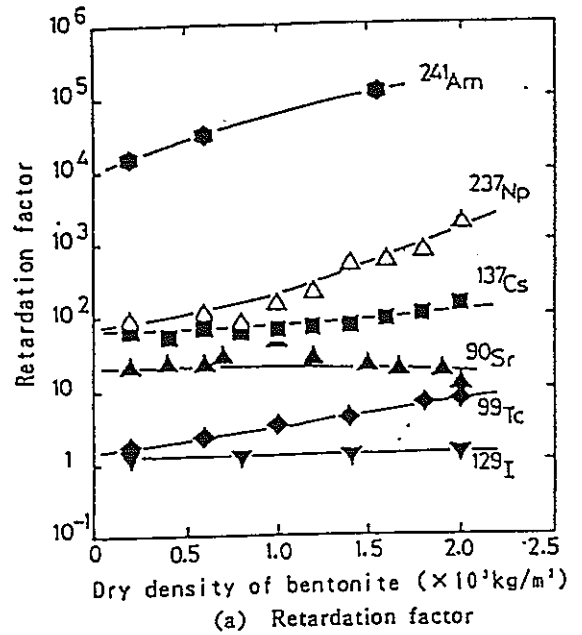
$$x = \alpha_0 \left(1 - \frac{R_s}{100} \right) \quad \text{on} \quad 0 \leq R_s \leq 100$$

ここで、 x : モンモリロナイト含有量 (%)

R_s : ケイ砂混合率 (%)

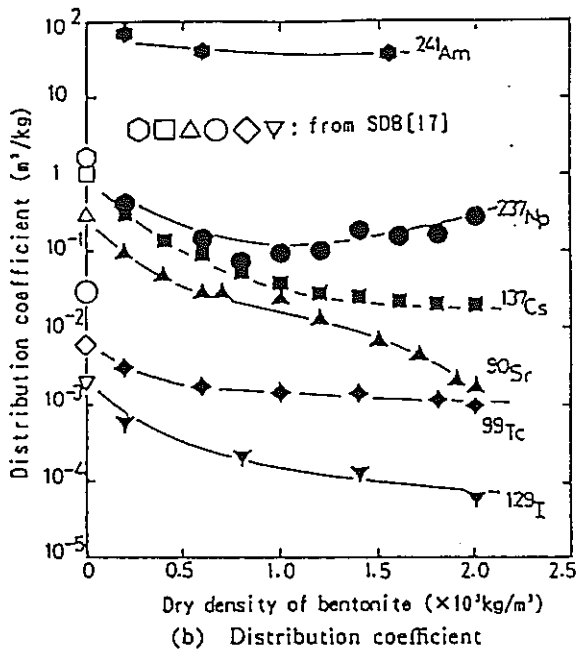


付・図20(1) 乾燥密度と見かけの拡散係数
(クニピアF)



付・図20(2) 乾燥密度と遅延係数
(クニピアF)

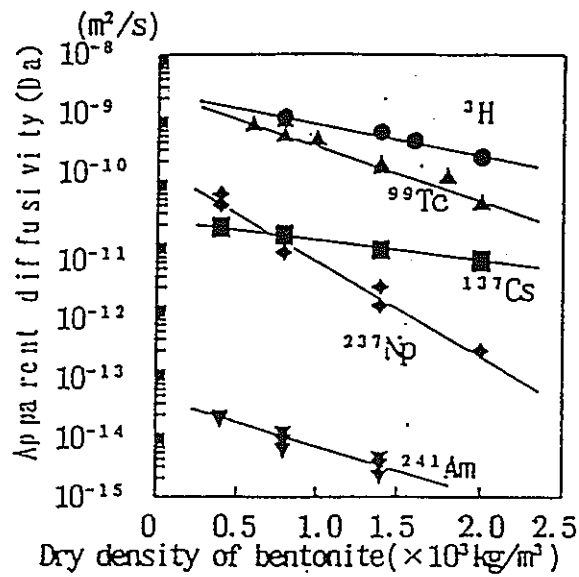
出典(4)



付・図20(3) 乾燥密度と分配係数
(クニピアF)

$D_a = A \cdot \exp(-B \cdot \rho_d)$
 ここで、 D_a : みかけの拡散係数 (m^2/s)
 ρ_d : 乾燥密度 (g/cm^3)
 A, B : 核種別係数

核種	A	B
3H	1.55×10^{-9}	1.73
^{90}Sr	4.97×10^{-11}	1.35
^{99}Tc	1.27×10^{-9}	2.50
^{129}I	1.26×10^{-9}	1.96
^{137}Cs	2.87×10^{-11}	1.97
^{237}Np	4.32×10^{-11}	3.40
^{241}Am	1.36×10^{-13}	3.24



付・図21 乾燥密度と見かけの拡散係数
(クニゲルV1)

$$D a = A \cdot \exp(-B \cdot \rho_d)$$

ここで、 $D a$: みかけの拡散係数 (m^2/s)

ρ_d : 乾燥密度 (g/cm^3)

A, B : 核種別係数

核種	A	B
3H	2.8×10^{-9}	1.2
^{99}Tc	3.1×10^{-9}	2.0
^{137}Cs	2.5×10^{-11}	0.8
^{237}Np	1.6×10^{-10}	3.4
^{241}Am	3.3×10^{-14}	1.8

出典(5)

また、クニゲルV1とクニピアFのモンモリロナイト含有量を $x = 50\%$ ($R_s = 0$)、99%と考えて、付・図15の関係式より、ケイ砂混合率 R_s の関数としても表現すると以下のようなになる。

みかけの拡散係数 $D a = A \cdot \exp(-B \cdot \rho_d)$ の係数のケイ砂混合率依存性

核種	A	B
3H	$2.8 \times 10^{-9} \exp(6.034 \times 10^{-3} R_s)$	$1.2 - 5.408 \times 10^{-3} R_s$
^{99}Tc	$3.1 \times 10^{-9} \exp(9.106 \times 10^{-3} R_s)$	$2.0 - 5.102 \times 10^{-3} R_s$
^{137}Cs	$2.5 \times 10^{-11} \exp(-1.408 \times 10^{-3} R_s)$	$0.8 - 0.01194 R_s$
^{237}Np	$1.6 \times 10^{-10} \exp(0.01336 R_s)$	3.4
^{241}Am	$3.3 \times 10^{-14} \exp(-0.01445 R_s)$	$1.8 - 0.01469 R_s$

付・表6 緩衝材性能評価試験で得られた主な知見等

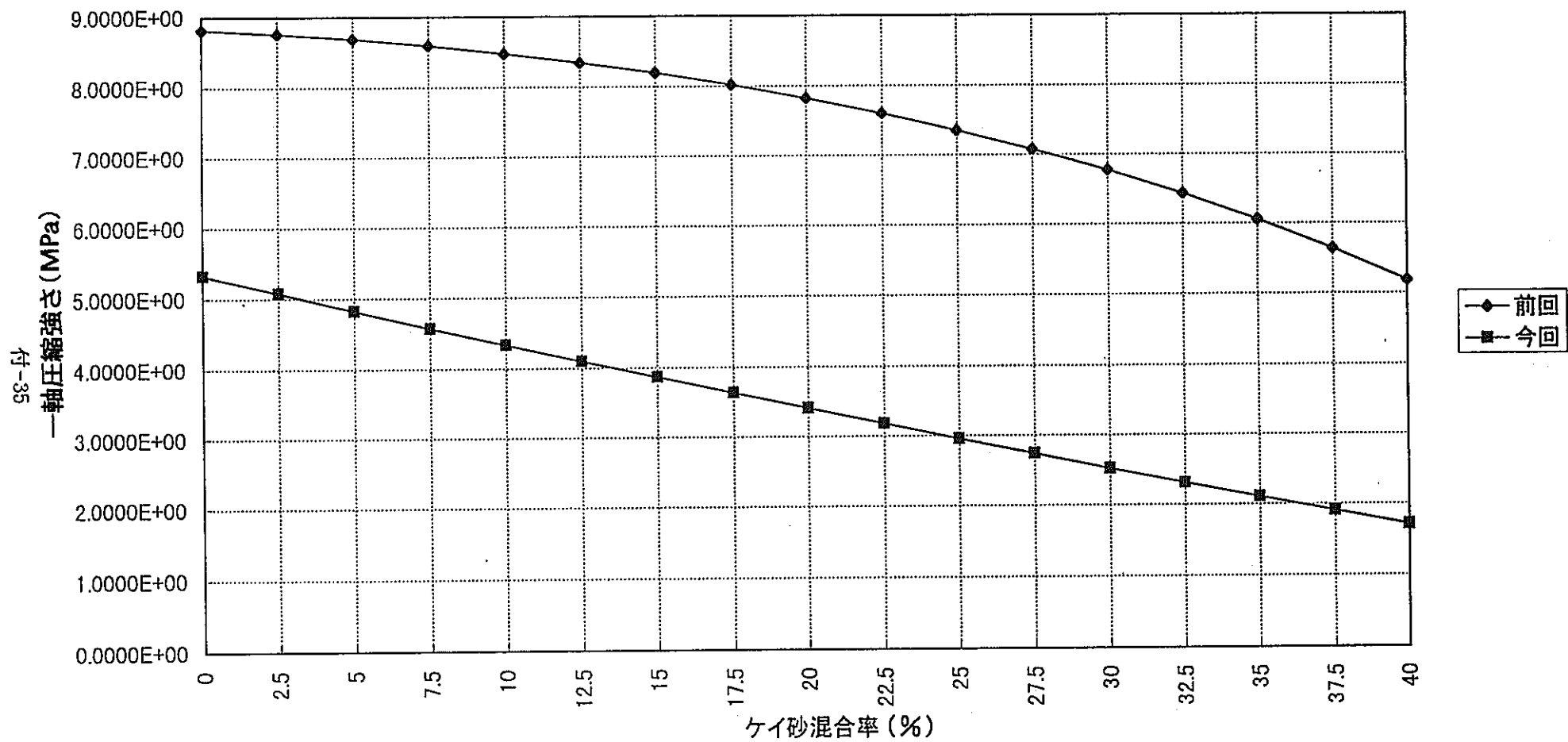
①	<p><u>乾燥密度の増加</u></p> <ul style="list-style-type: none"> →○機械的安全性向上 →○自己シール性向上 →○止水性向上 →○<u>モンモリロナイト含有量増加</u> <ul style="list-style-type: none"> →○核種吸着性向上 →○バントナイト流出抑制向上 →△炭素鋼α-Fe₂O₃腐食に伴うH₂透気性低下 →△腐食生成物の蓄積膨張に伴う体積変化の緩衝性低下
②	<p><u>ケイ砂混合率増加</u></p> <ul style="list-style-type: none"> →○熱伝導性向上 →△<u>有効粘度密度</u>*低下 <p style="text-align: center;">→モンモリロナイト含有量に依存する特性 (膨潤性、透水係数等)低下</p> <p style="text-align: center;">乾燥ベントナイトの重量</p> <p>*有効粘度密度 = $\frac{\text{乾燥ベントナイトの重量}}{\text{試料体積} - (\text{試料中のケイ砂体積})}$</p>
③	<p><u>緩衝材の厚さを大きくする</u></p> <ul style="list-style-type: none"> →○<u>物理的・化学的緩衝性</u>の向上化 →△廃棄体の発熱による温度上昇抑制効果は低下 →△コスト増加 →厚さによって動水勾配を変化させても透水係数への影響なし
④	<p>人工バリアの<u>形状・寸法は、廃棄体の設置方式や坑道の掘削可能な直径並びに操業性等に依存する。</u></p>

注) ①, ②は、文献(1)より、又、③, ④は、文献(2)の各記述内容を参照。

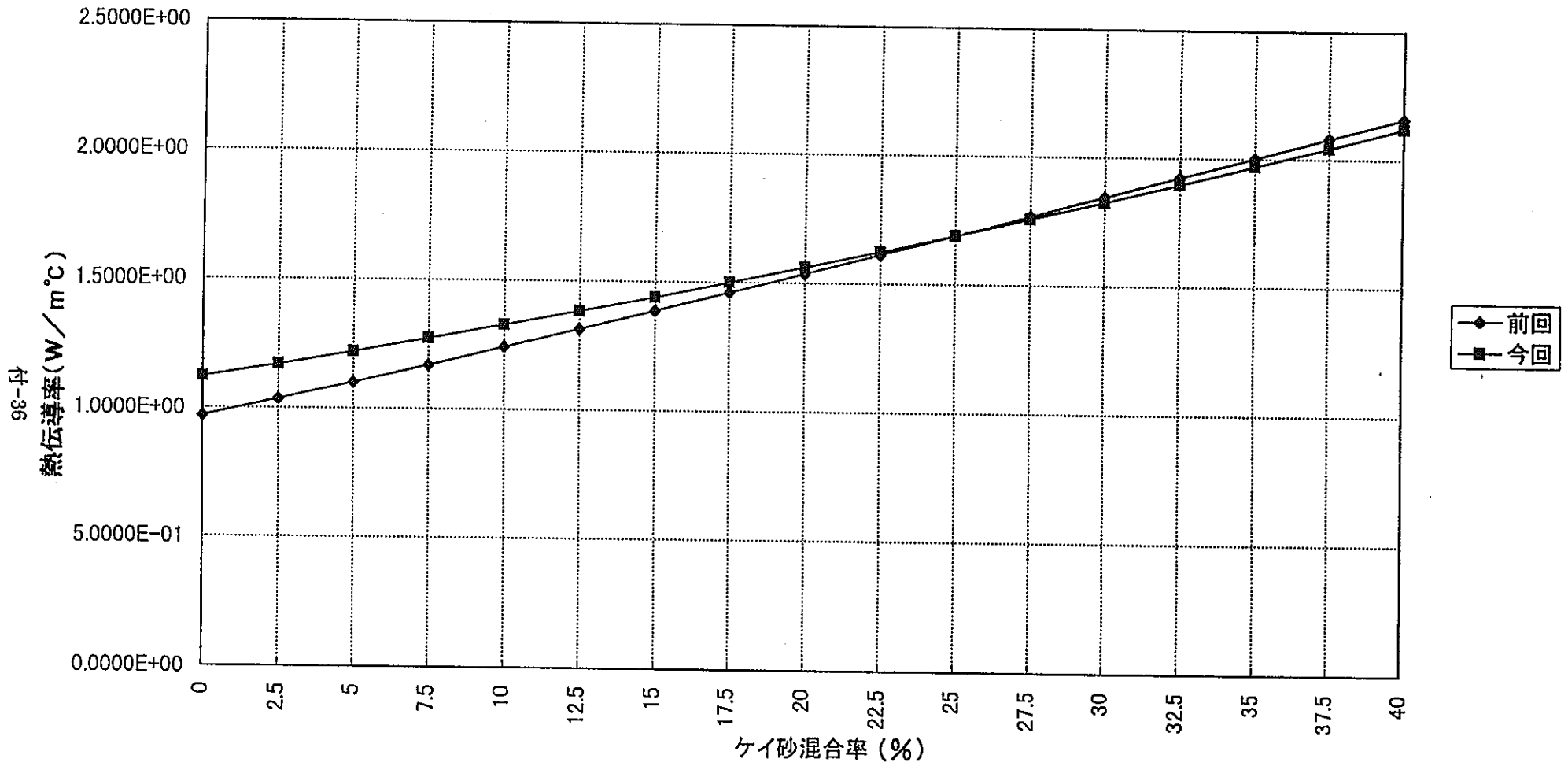
B. 多変量解析結果と前年度推計結果との比較

本文3.1節に述べた今回の多変量解析によって求められた各定量評価指標の推計結果を、前年度に求めた推計式（付録A参照）による解析結果⁽⁷⁾との比較（含水比 $w = 10\%$, 締固め圧力 $P = 20\text{MPa}$, ケイ砂混合率 $R_s : 0\% \leq R_s \leq 40\%$ ）を付・図22～付・図28に示す。

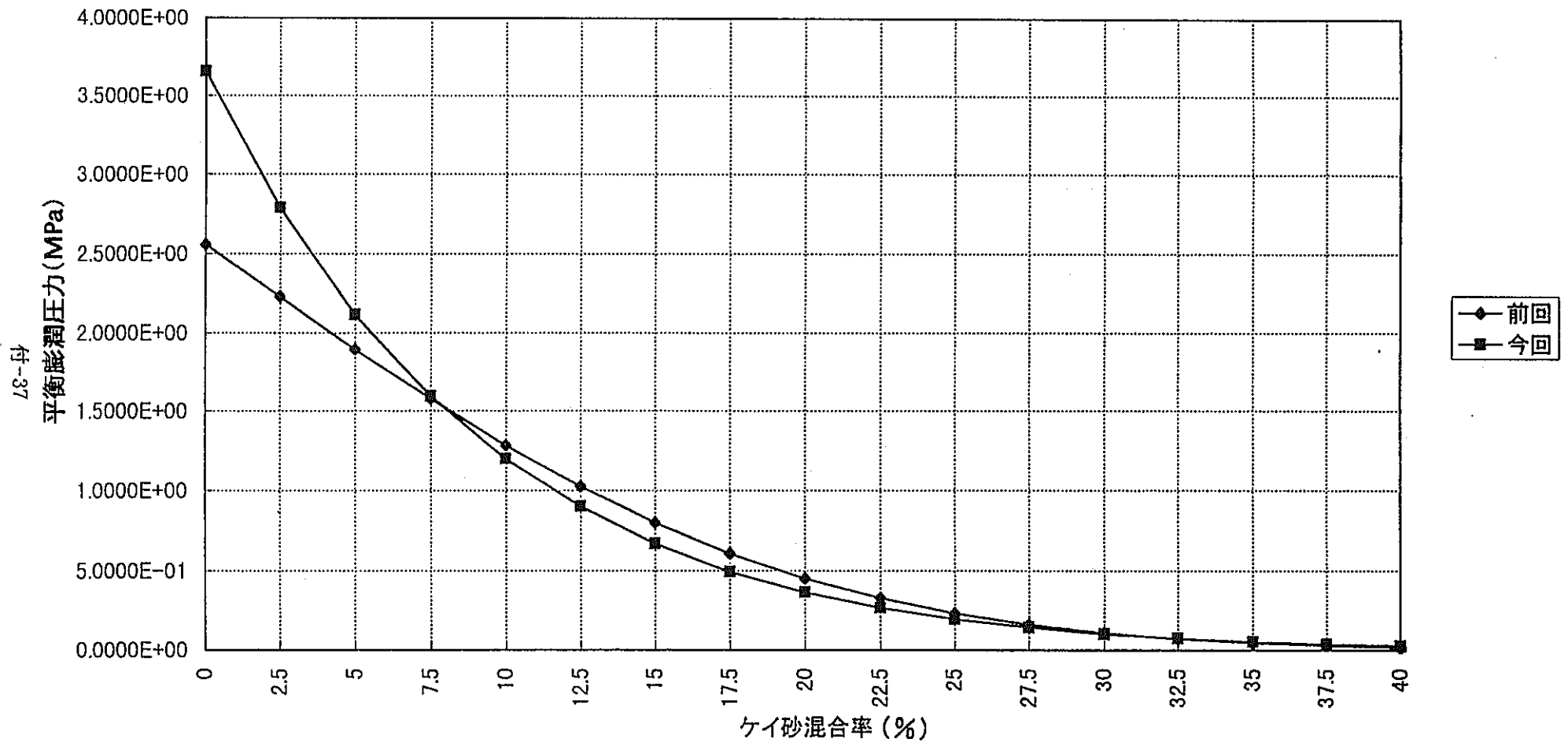
今回の統計解析に用いた測定データ数は、前年度に用いたものよりも多くなっているにもかかわらず、両者の適合度は比較的高いと考えられる。なお、一軸圧縮強さの不一致については、前回の推計式が含水比に関して2点間の補間式（付・表2の下に示す推計式を参照）といった精度の悪さが原因と考えられる。



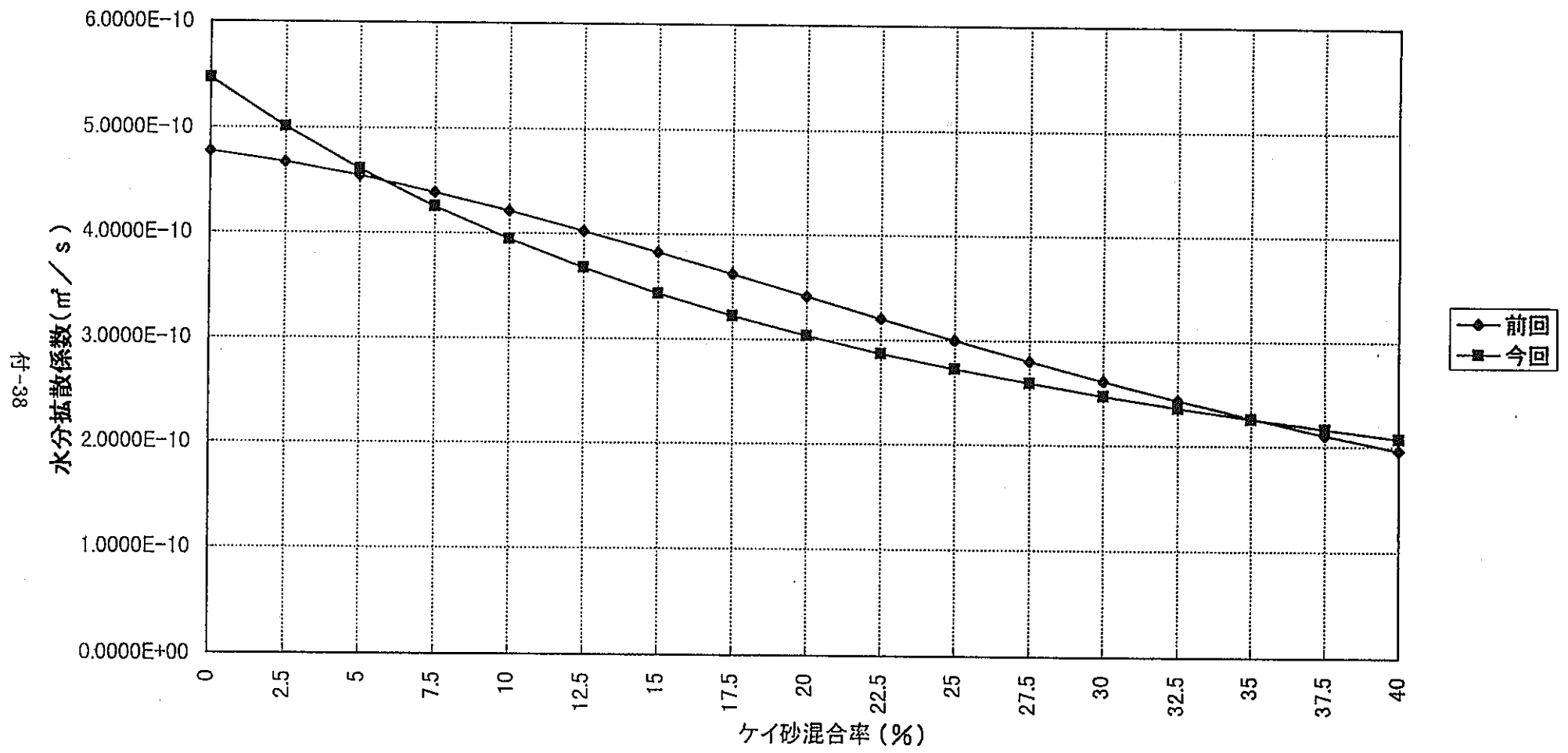
付・図22 一軸圧縮強さ推計結果 (<6式>の場合) の前年度推計結果との比較



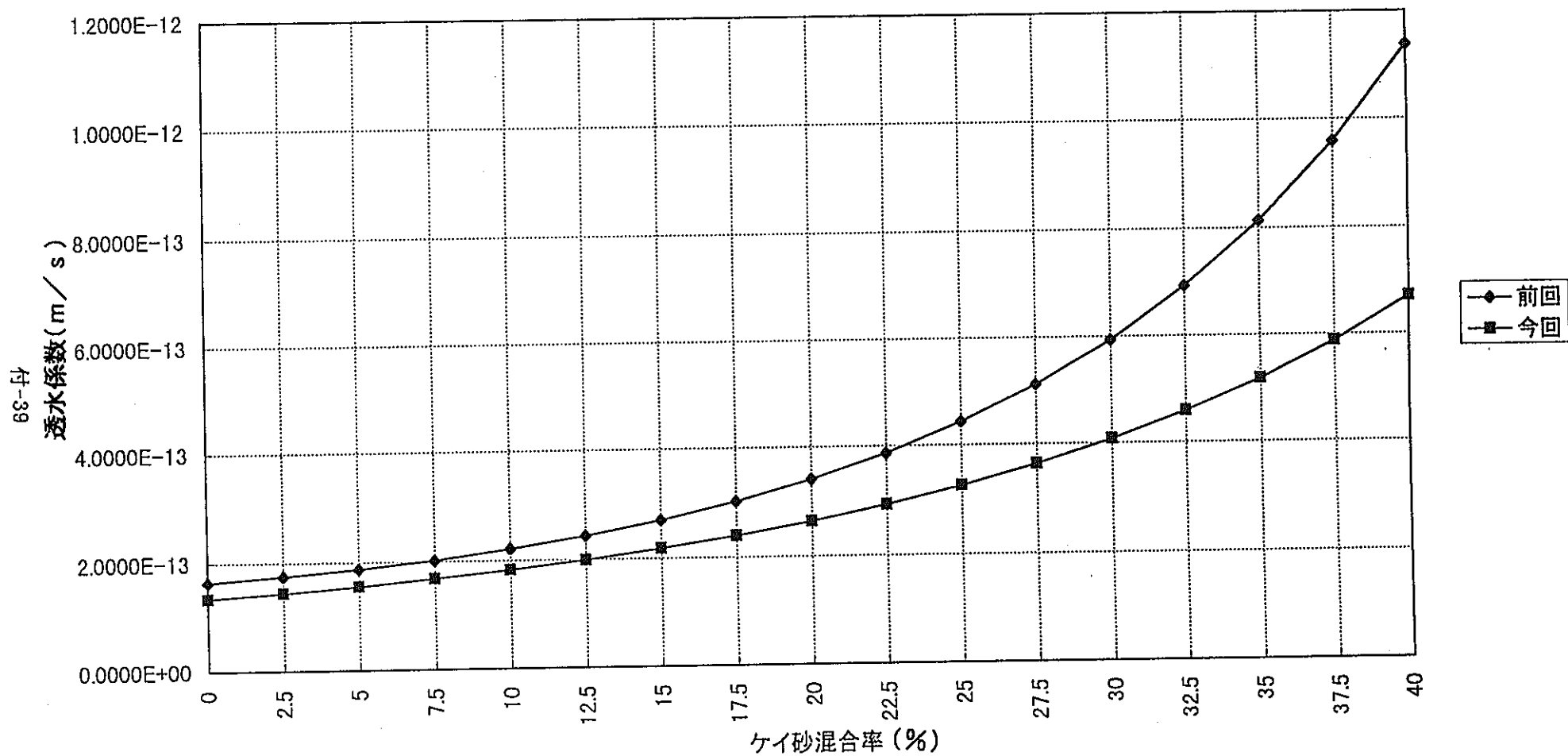
付・図23 熱伝導率推計結果 (<6式>の場合) の前年度推計結果との比較



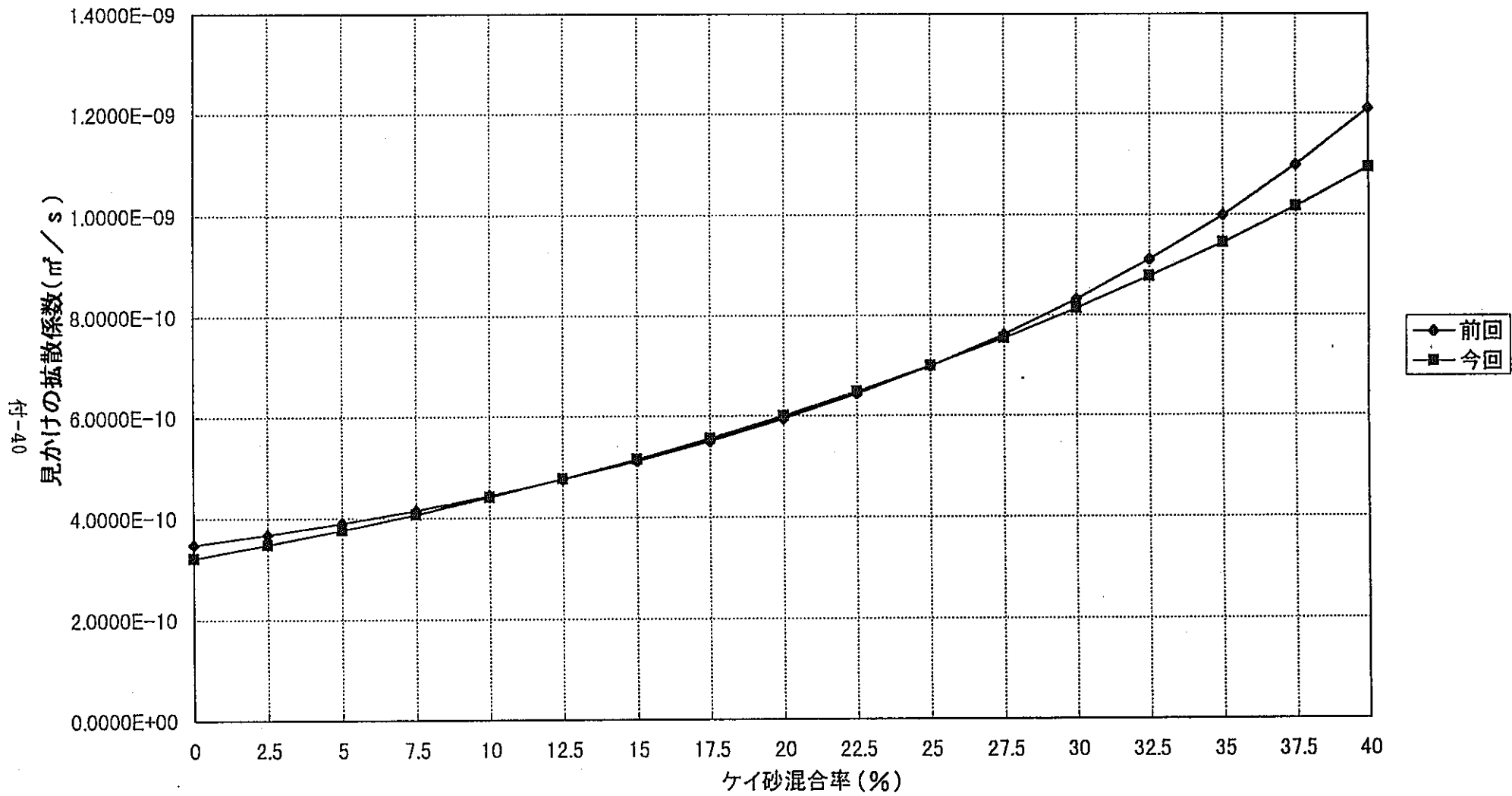
付・図24 平衡膨潤圧力推計結果 (<5式>の場合) の前年度推計結果との比較



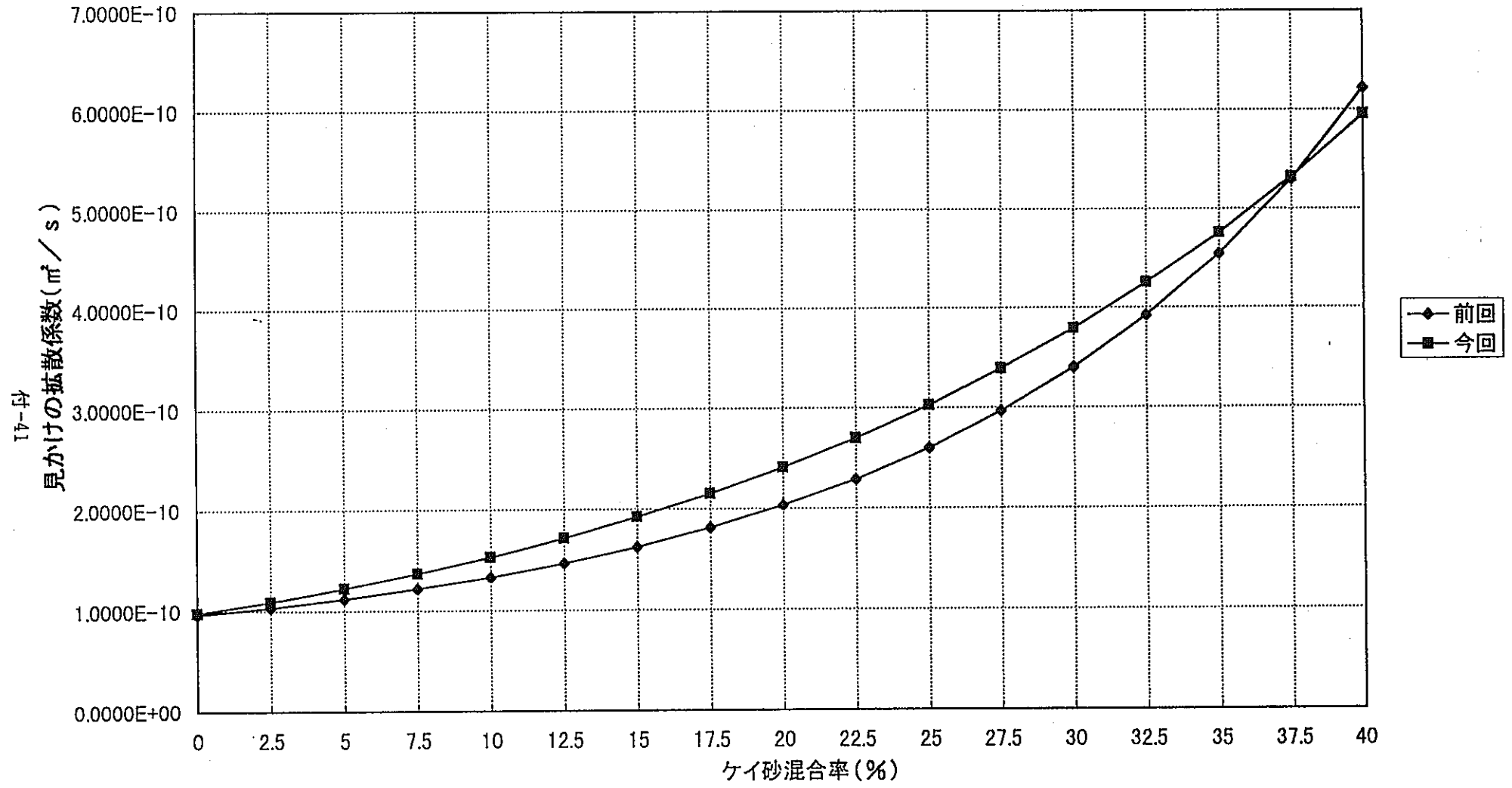
付・図25 水分拡散係数推計結果 (<4式>の場合) の前年度推計結果との比較



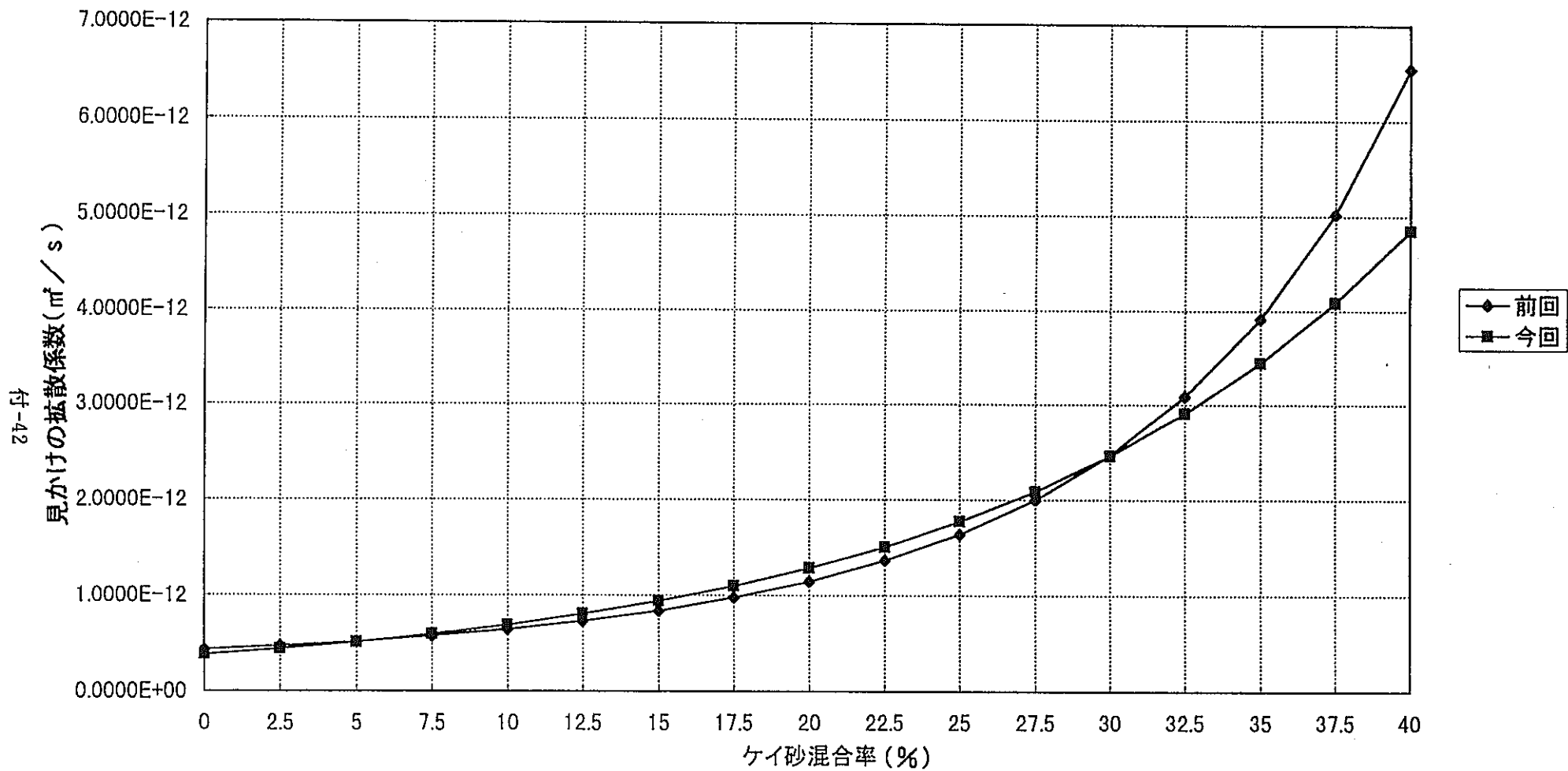
付・図26 透水係数推計結果 (<2式>の場合) の前年度推計結果との比較



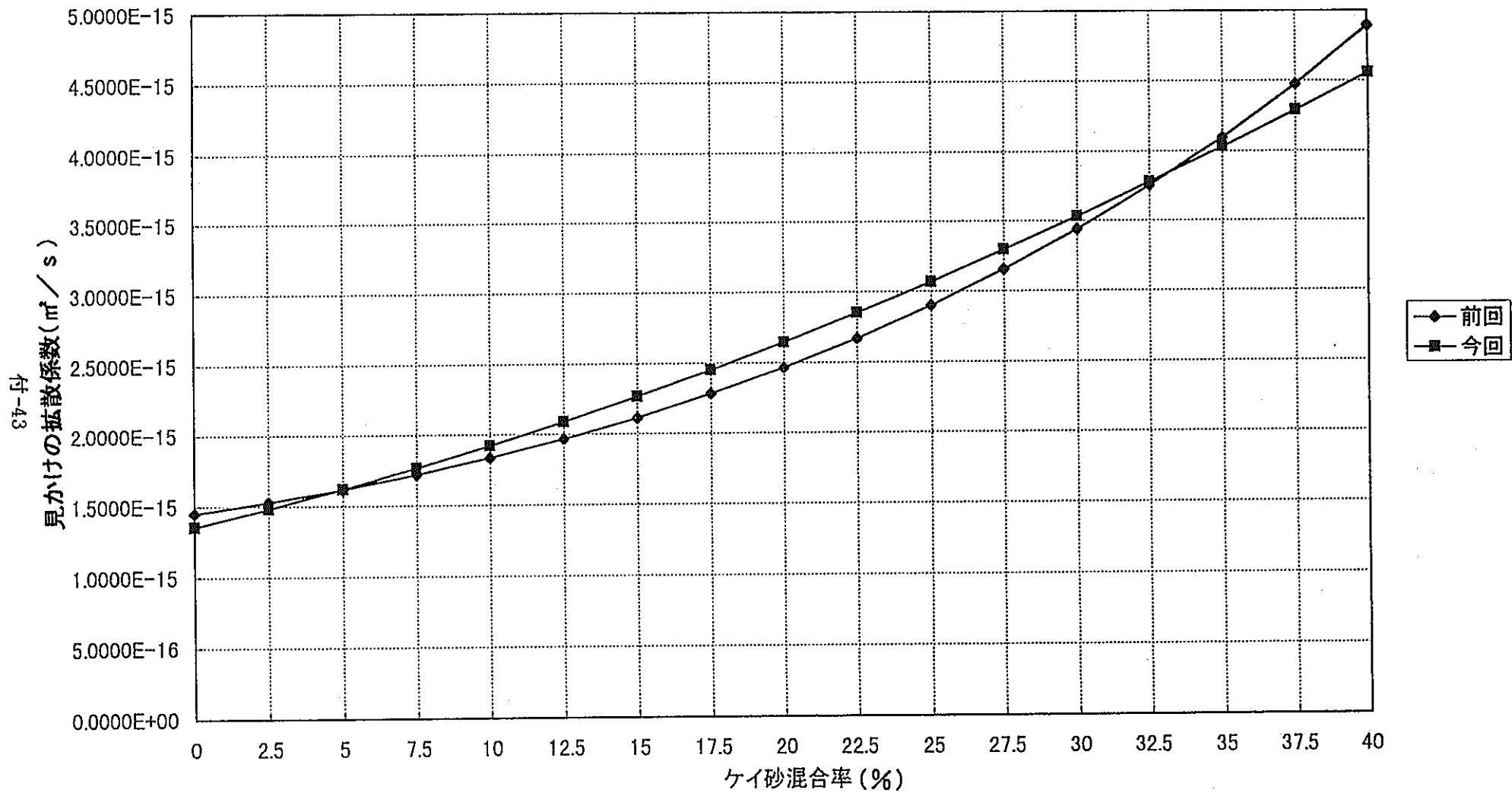
付・図27(1) ^3H の見かけの拡散係数推計結果の前年度推計結果との比較



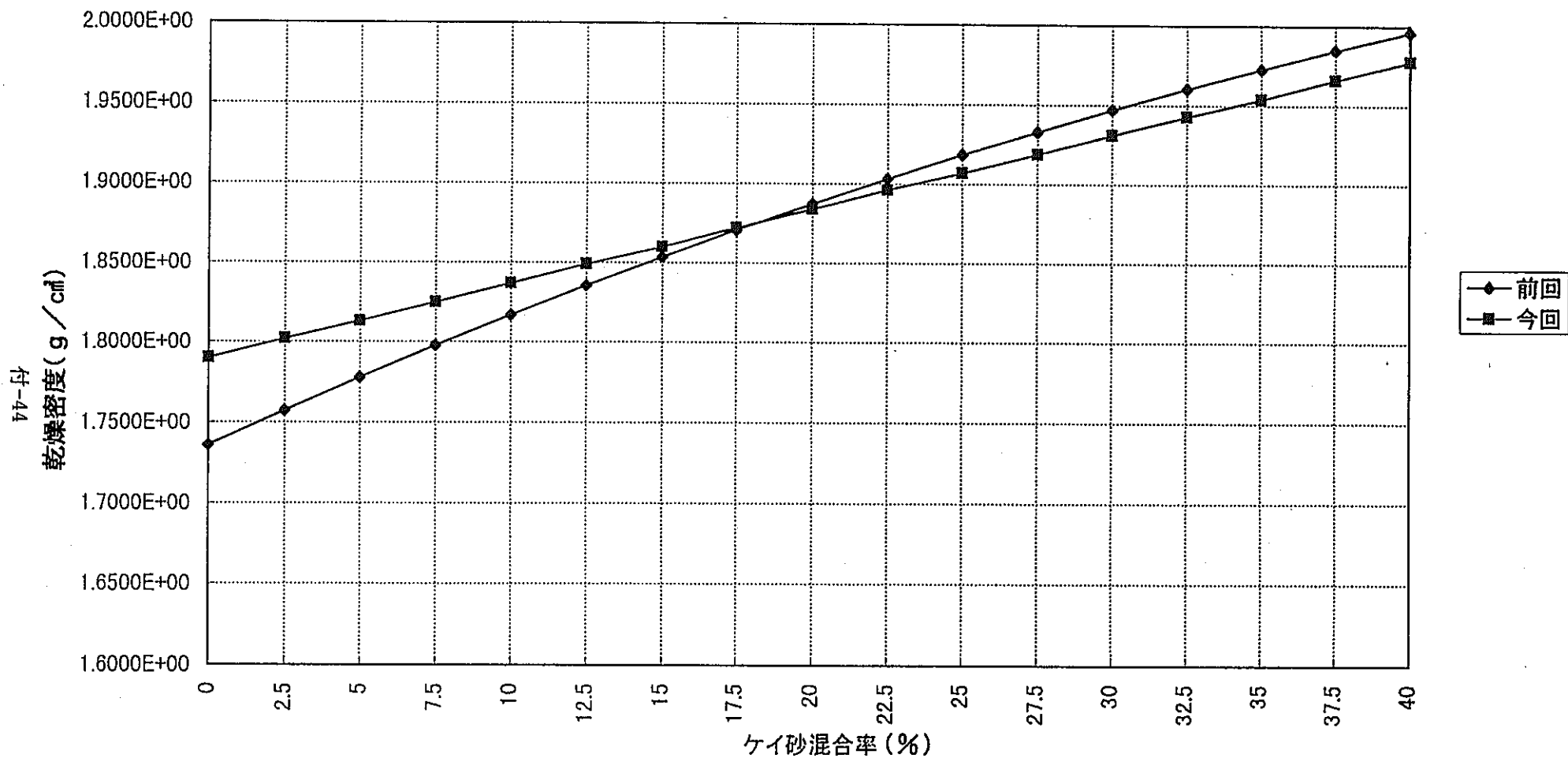
付・図27(2) ^{99}Tc の見かけの拡散係数推計結果の前年度推計結果との比較



付・図27(3) ^{237}Np の見かけの拡散係数推計結果の前年度推計結果との比較



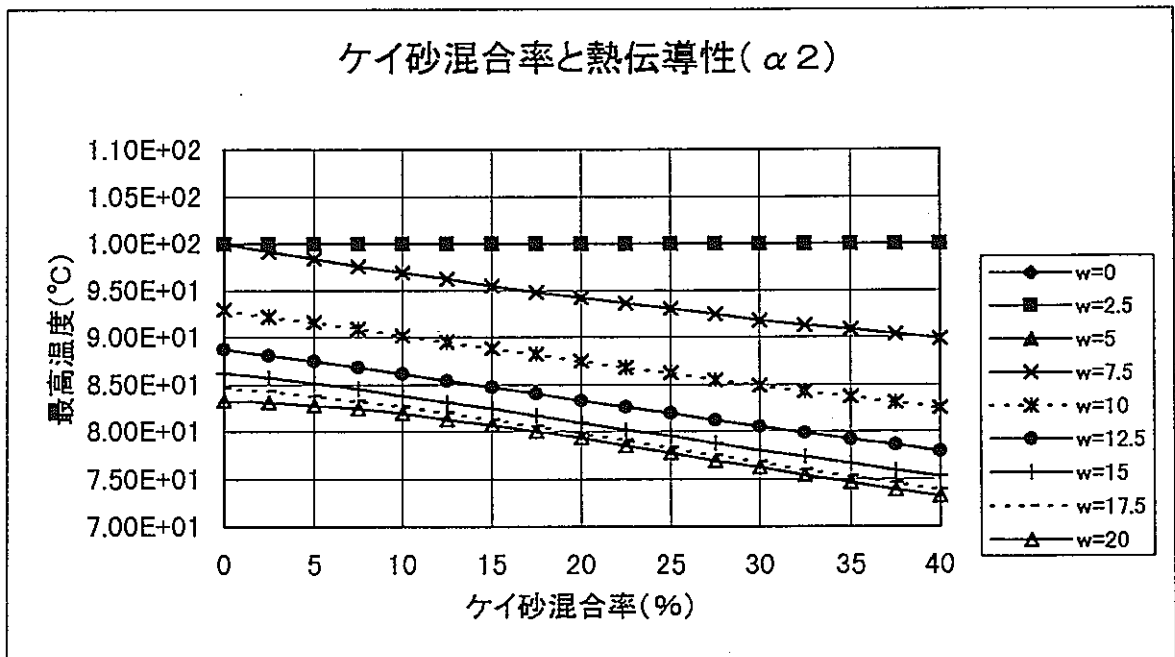
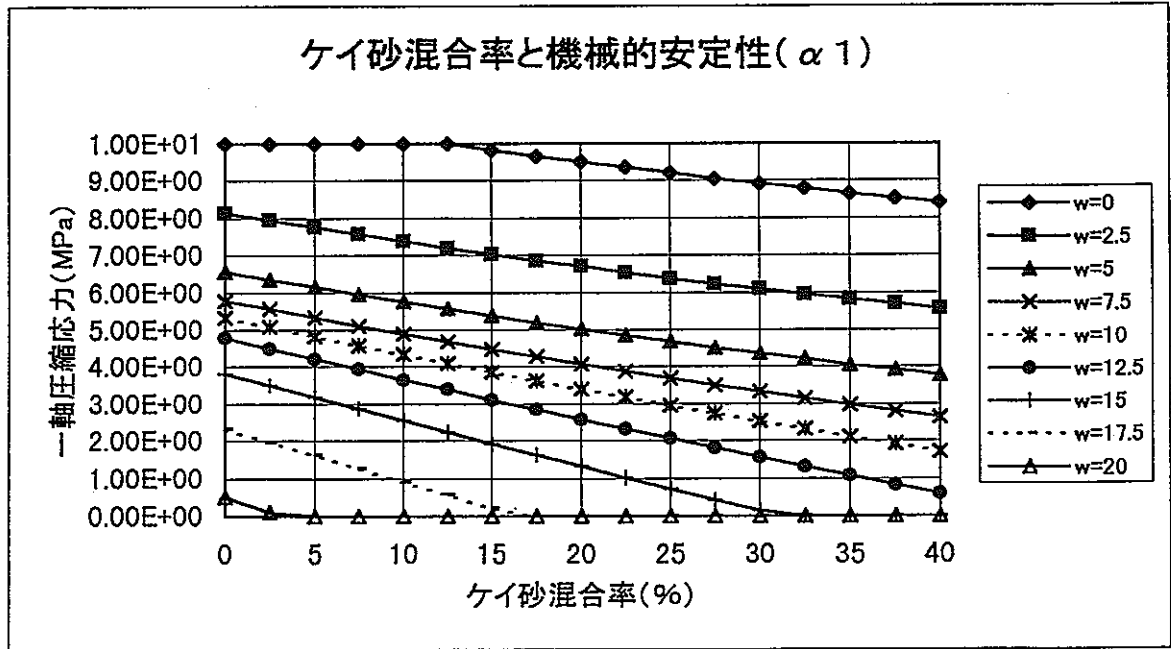
付・図27(4) ^{241}Am の見かけの拡散係数推計結果の前年度推計結果との比較



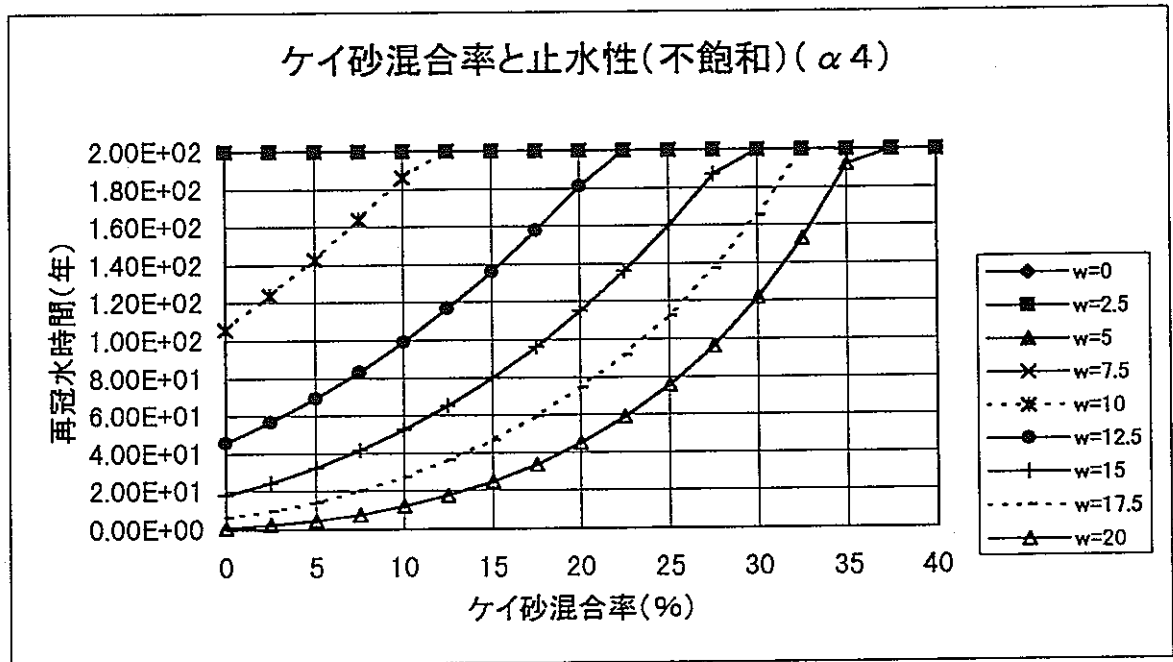
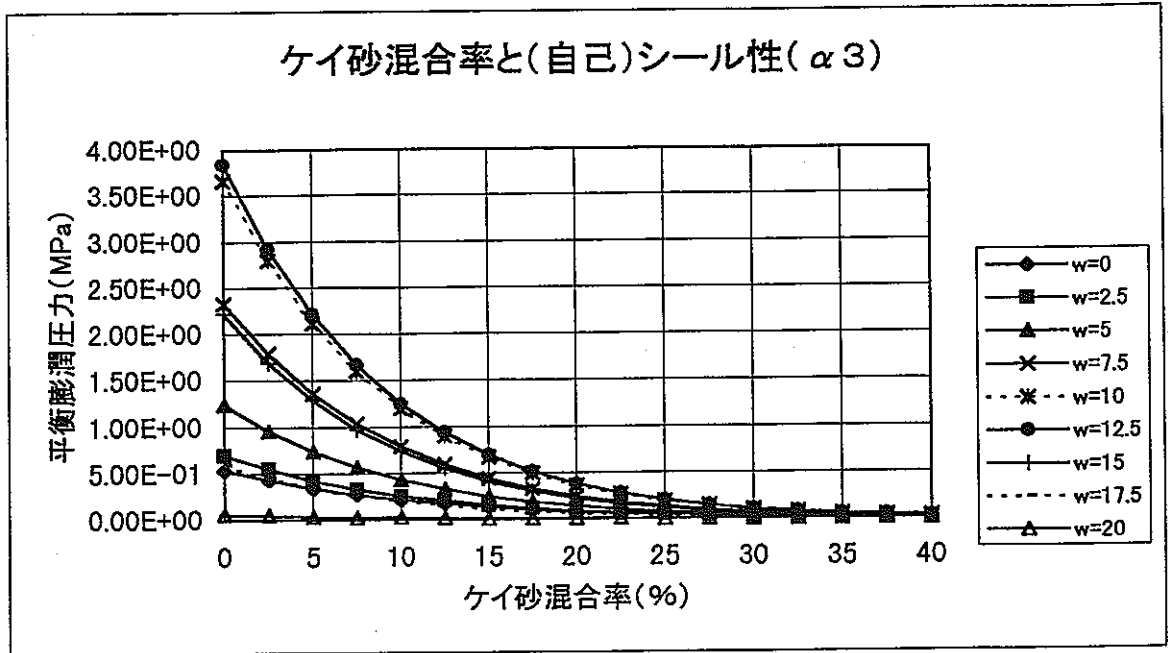
付・図28 乾燥密度推計結果 (<6式>の場合) の前年度推計結果との比較

C. 含水比をパラメータとした場合の各定量的評価指標のケイ砂混合率依存特性
の変化

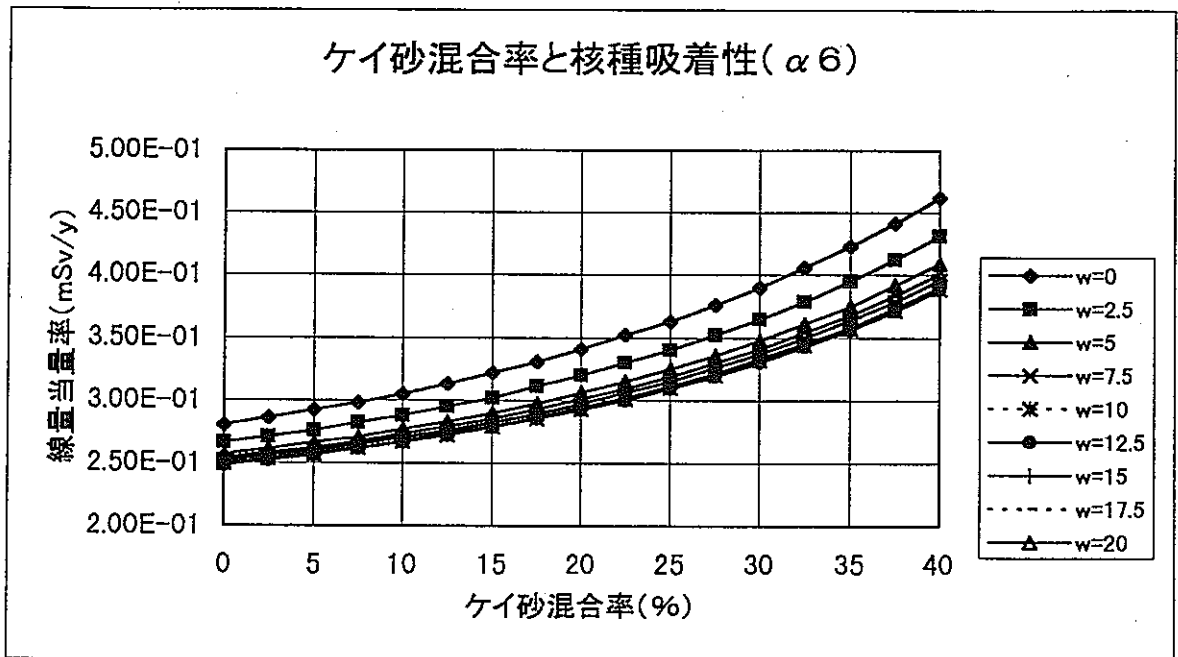
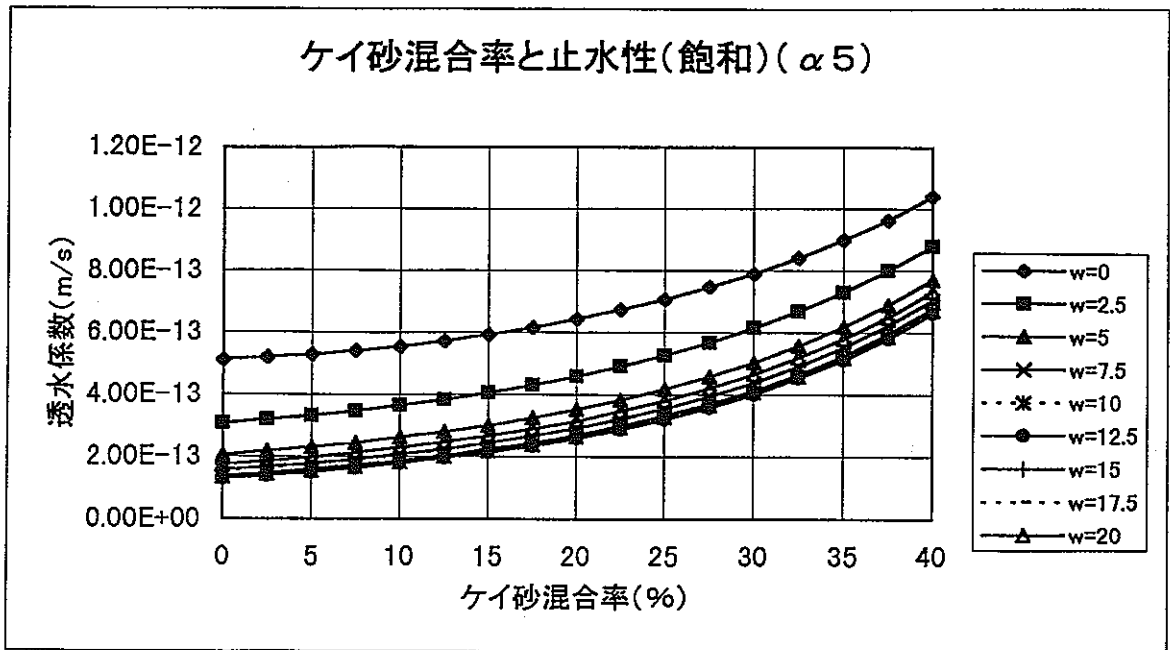
締固め圧力 $P = 20\text{MPa}$ に固定した場合、含水比 $w = 10\%$ ケースについての各定量的評価指標 α_i ($i = 1 \sim 6$) のケイ砂混合率依存特性の計算結果を今回求めた推計式を用いて計算した結果は、本文3.2節(1)項の図8(1)に示した通りである。同じ条件で含水比 w を $0\% \sim 20\%$ (2.5% 刻み) に変化させた場合の各定量的評価指標 α_i ($i = 1 \sim 6$) のケイ砂混合率依存特性の計算結果を付・図29(1)~(3)に示す。但し、推計結果の限界も考慮し、ここでは各効用関数 $u_i(\alpha_i)$ の値域が $0 < u_i(\alpha_i) < 1$ に存在する α_i の範囲 (即ち、 $\alpha_{i\min} \leq \alpha_i \leq \alpha_{i\max}$) を図示した。(w の変化の影響をチェックするだけならばこれで十分と考えられるので)



付・図29(1) 含水比をパラメータとした場合の各定量的評価指標
 α 値のケイ砂混合率依存特性
 - 一軸圧縮強さと最高温度 -



付・図29(2) 含水比をパラメータとした場合の各定量的評価指標
 α 値のケイ砂混合率依存特性
 - 平衡膨潤圧力と再冠水時間 -



付・図29(3) 含水比をパラメータとした場合の各定量的評価指標
 α 値のケイ砂混合率依存特性
 - 透水係数と線量当量率 -