

図-1 金武ダム排水路概略図

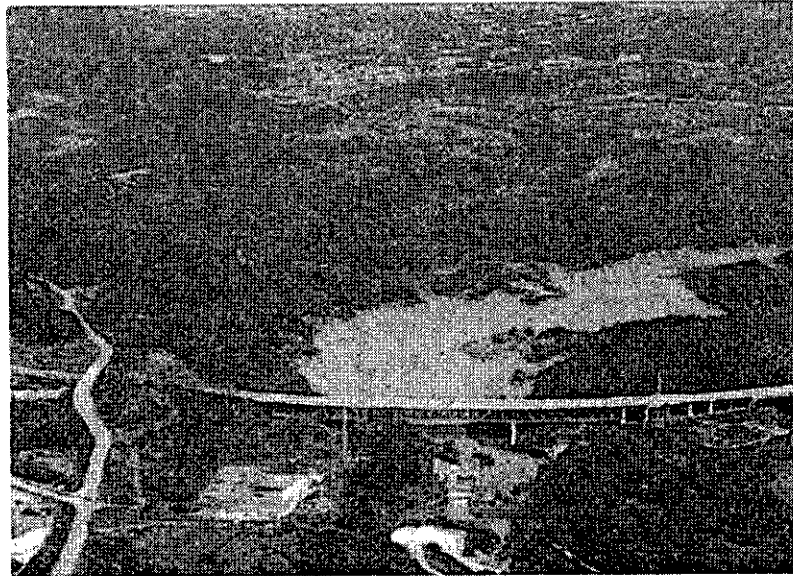


図-2 金武ダム鳥瞰写真

## 2. 3. 実験装置

### (1) 精密ろ過 (MF) 膜、前処理装置

ナノろ過膜透過実験の主処理であるナノろ過膜分離に適した濁度成分の低い原水を供給する目的で、MF 膜による前処理を行った。装置はダム湖水揚水設備、MF 膜分離設備及び MF 膜ろ過水貯留・移送設備の 3 設備より構成される。図-3 に前処理装置の水流れ図を示す。

また、金武ダム湖水及び MF 膜を用いた処理による処理水の水質の違いについて表-1 に示す。この表より懸濁物質はほぼ除去されていることがわかる。

表-1 MF 膜処理前後の水質 (例)

成分	Sb [ $\mu\text{g/L}$ ]	Na [mg/L]	K [mg/L]	Ca [mg/L]	Mg [mg/L]	濁度 [NTU]
ダム湖水	19.2	18.0	3.01	30.1	3.68	21.4
MF 膜処理水	21.2	17.3	2.81	29.4	3.62	0.071

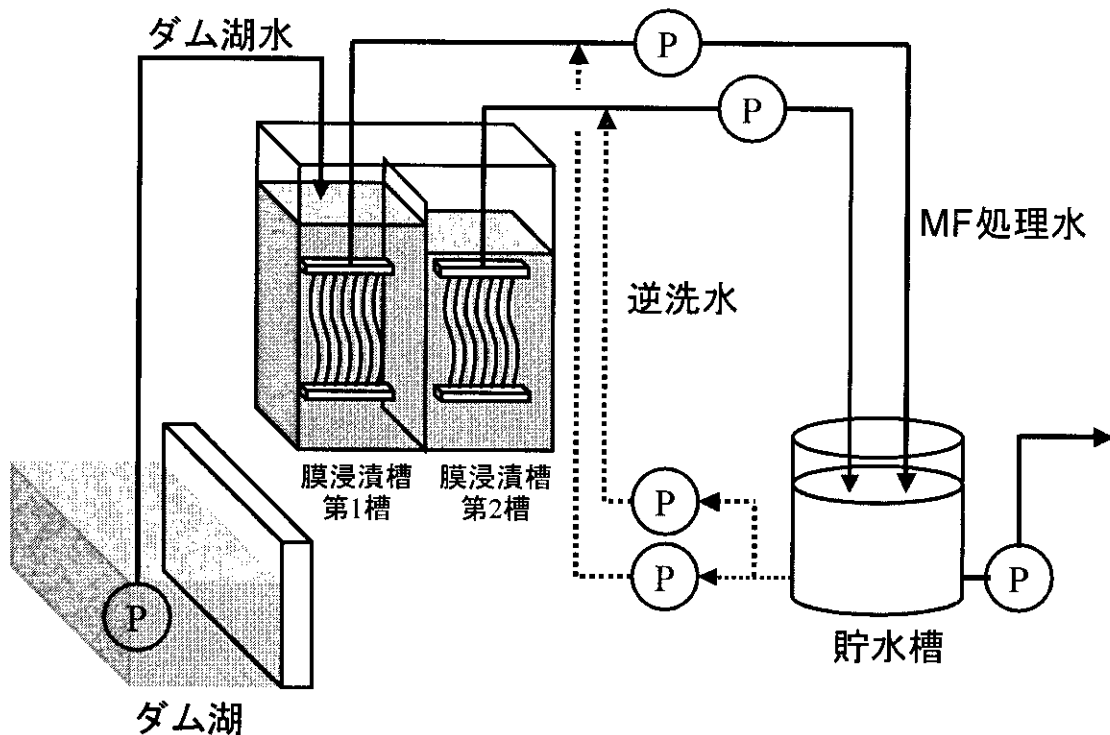


図-3 MF 膜前処理装置フロー

**(2) ナノろ過 (NF) 膜実験装置**

実験装置の基本フローを図-4に示す。本研究ではエレメントを1本ずつ充填されたベッセル2本を配管によって直列につないだ装置である。それによって実験目的により装置の配管を組替え、エレメント単体での実験を行うことができる。装置は透過水流量を任意に決定することによって運転を制御することができ、条件の設定は濃縮水流量バルブ及び循環水流量バルブの開閉の程度によって決定される。

また、NF膜は、SU-600及び610(4インチスパイラルモジュール：公称NaCl阻止率63%、グルコース阻止率88%、東レ社製)を用いた。今回の実験で用いた膜の標準運転範囲を表-2に性能を表-3に示す。

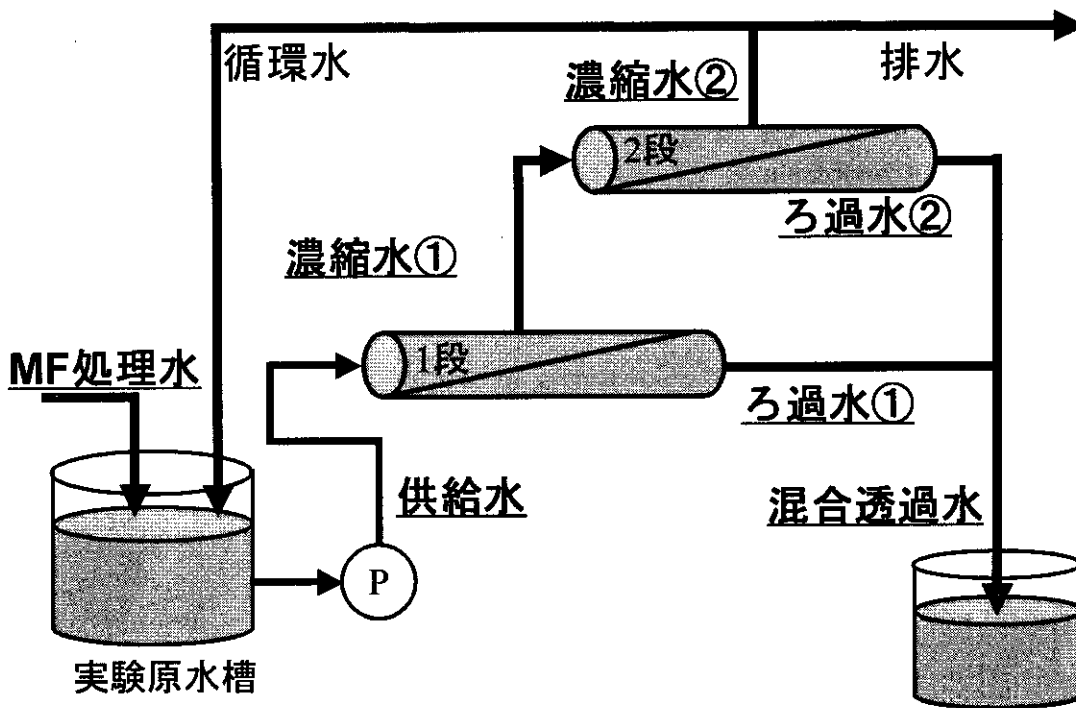


図-4 NF膜実験装置フロー

表-2 NF膜標準運転範囲

	標準運転範囲
給水圧力	<1 kg/cm <sup>2</sup>
給水温度	<35 °C
給水濁度(FI 値)	<4
濃縮水量/透過水量比	>6
供給水量(エレメント当り)	<50L/min
濃縮水量(エレメント当り)	>10L/min

表-3 NF膜性能表

		SU-600
評価圧力(MPa)		0.3
NaCl (500ppm)	阻止率(%)	68.4
	Flux (m/d)	0.83
MgSO <sub>4</sub> (500ppm)	阻止率(%)	97.3
	Flux (m/d)	0.82
グルコース (1000ppm)	阻止率(%)	87.6
	Flux (m/d)	0.91

## 2. 4. サンプル採取方法および測定項目

装置のサンプル採取弁が流量測定計や圧力測定計より膜装置側に設置されている箇所もあり、その場合弁の開閉によって圧力や流量も変化し、それに伴い設定した条件が変化することもありうるため、弁の開閉は条件の安定に影響の出ない採取弁から採取し、影響が出やすい採取弁については、極力条件へ影響が出ないように配慮し1箇所ずつ採取し、また設定した条件へ影響が出ないように少量ずつ採取した。

測定項目および分析方法については、表-4に示す。

表-4 測定項目及び分析方法

項目	分析方法
PH	ガラス電極法
電気伝導度	交流二電極法
温度	サーミスタ法
Sb, Na, K, Ca, Mg	ICP-MS法
Cl, SO <sub>4</sub>	イオンクロマトグラフ法
溶性ケイ酸	モリブデン黄法
E260	吸光光度法
TOC	燃焼酸化法
色度	積分球式吸光光度法
有機物等	過マンガン酸カリウム消費量

## 2. 5. 阻止率の表現方法について

阻止率は、膜供給水濃度及び濃縮水濃度の平均をとった平均阻止率を用いる。(図-5)

$$R_{obs} = 1 - \frac{C_p}{\frac{C_f + C_c}{2}}$$

$R_{obs}$  : 見かけの(平均)阻止率、 $C_f$  : 膜供給水濃度、 $C_p$  : ろ過水濃度、 $C_c$  : 濃縮水濃度

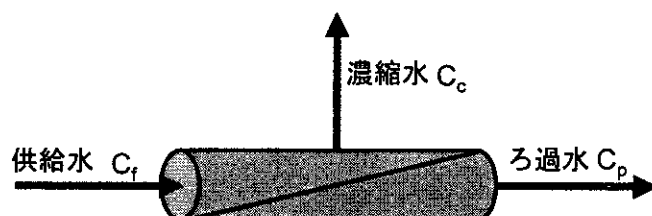


図-5 阻止率の表現方法について

## 2. 6. 実験内容

### (1) NF 膜の水理特性

膜エレメントの水理特性を明らかにするため、

- (1)平均圧力-ろ過水流量の関係性
- (2)平均流量-圧力損失の関係性

について検討した。

(1)の実験では濃縮水流量を一定にし、入口側の圧力を変化させた。エレメント内部を流れる水量の変化による影響を見るため、濃縮水流量を 10, 20L/min と設定した。膜供給水の水質を一定とするため循環水を発生させなかった。実験結果の図では濃縮水流量 10, 20L/min をそれぞれ条件 1,2 として表現する。

(2)の実験ではろ過水流量を一定にして、供給水流量を変化させた。以上の実験では供給水水質による影響をなくすため循環水を発生させずに実験を行った。装置中にある配管の圧力損失については実験より流量-圧力損失の関係式を求めて計算の際に加味してある。

### (2) NF 膜の除去特性

膜エレメントの除去特性を明らかにするため、

- (a)阻止率-平均圧力(=ろ過水流量)の関係性
- (b)阻止率-物質濃度の関係性

について実験を行った。

(a)の実験では、(1)の実験と同様に濃縮水流量を一定として、入口側の圧力を変化させた。供給水水質を一定とするため、循環水は発生させなかった。実験結果の図では濃縮水流量

10, 20L/min をそれぞれ条件 1,2 として表現する。

(b)の実験では、膜供給水中物質濃度以外の変化をなくすため、入口圧力及び供給水流量を一定とし、濃縮水の一部を循環させ膜供給水の濃縮を行い、排水流量と循環水流量の割合を変化させることで濃縮率の変化を図った。また、この実験では濃度影響についてろ過水流量の違いをみるため、直列2段エレメントの装置を用いて実験を行った。

阻止率の濃度依存性についての実験条件は以下の通りである。それぞれ設定したエレメント回収率及びシステム回収率となるようフラックス 0.5m/d で一定にし流量の調整を行った。

条件 a : エレメント回収率 10%

システム回収率 40、60、75、85%

条件 b : エレメント回収率 12%

システム回収率 40、60、75、85、90%

条件 c : エレメント回収率 14%

システム回収率 45、65、80、90%

## 2. 7. 実験結果

### 2. 7. 1. 水理特性

エレメント本体についての特性を検討するため、エレメント入口側圧力計及び出口側圧力計の間での配管の圧力損失及びベッセル出入り口の急拡大急縮による圧力損失を差し引いた結果を(図-6,7)に示す。配管の圧力損失については、実験により流量-圧力損失曲線を求めた(図-8~10)。急拡大急縮についてはボルダの式を用いて算出した。

実験結果から NF 膜の水理特性について関係式を求める。

#### 平均圧力-ろ過水流量の関係性について

ろ過水流量と膜にかかる圧力は1次式の関係にあり、以下の式で表すこととする。

$$Q_{per} = k \left( \frac{P_{in} + P_{out}}{2} \right) \cdot \dots \cdot (1)$$

$Q_{per}$  : ろ過水流量

$P_{in}$  : 供給水圧力

$P_{out}$  : 濃縮水圧力

k : 係数

#### 平均流量-圧力損失の関係性について

膜の圧力損失はモジュール内の流量に依存し、以下の2次式で表される。

$$P_{loss} = P_{in} - P_{out} = a \left( \frac{Q_{in} + Q_{out}}{2} \right)^2 + b \left( \frac{Q_{in} + Q_{out}}{2} \right) \dots \dots (2)$$

$P_{loss}$  : 膜の圧力損失  
 $Q_{in}$  : 供給水流量  
 $Q_{out}$  : 濃縮水流量  
 a、b : 係数

以上の2式から、ろ過水流量及び濃縮水圧力を求める式が算出される。

$$Q_p = \frac{-4 + 2abQ_{in} + bk + \sqrt{16 - 16akQ_{in} - 8bk + b^2k^2 + 8ak^2P_{in}}}{ak} \dots \dots (3)$$

$$P_{out} = \frac{-8 + 4akQ_{in} + 2bk + ak^2P_{in} + 2\sqrt{16 - 16akQ_{in} - 8bk + b^2k^2 + 8ak^2P_{in}}}{ak^2} \dots \dots (4)$$

図より得られた以上の式群に対する係数を以下に示す。エレメント 2 本の平均値を係数とした。

表-4.1.1.1 実験式の係数

k	1.24
a	$8.30 \times 10^{-5}$
b	$2.63 \times 10^{-3}$

## 2. 7. 2. 除去特性

### (1) ろ過水流量依存性について

結果を図-11 (a)~21 (a)に示した。濃縮水流量を変化させることにより、膜面の濃度分極が変化し、それによる阻止率への影響が考えられたが、その差はあまり見られなかった。Na 及び K の一価のカチオン同士、Ca 及び Mg の二価カチオン同士それぞれ似たような傾向を示すことがいえる。

### (2) 濃度依存性について

阻止率の濃度依存性結果を図-11 (b) ~21 (b) に示した。条件毎に1段目及び2段目の阻止率の回帰直線が異なるのは、ろ過水流量が異なるためである。システム回収率の変化は濃縮水流量と循環水流量の割合による変化であり、膜への供給水流量及び圧力は変化しな

い。しかし、エレメント回収率を変化させるには、本研究の場合ろ過水流量を一定としているので、供給水流量を変化させなければならない。それにより 1 段目と 2 段目の平均流量及び平均圧力の割合も変化し、総ろ過水流量が一定であっても 1 段目及び 2 段目のろ過水流量の割合が変化するためである。これによりろ過水流量が異なる値をとっても、濃度影響は変化がないことがいえる。また実験時期により、供給水水質の変化も影響していると考えられることから、実験式の係数についてはエレメント回収率ごとに算出した。

阻止率の圧力 (=ろ過水流量) 依存性、濃度依存性に関する理論について研究されているが<sup>14,15)</sup>、室内実験を主としたものであり、本研究では環境試料水を用いていること、また実施設では使用範囲がおおよそ決まってくることなどから、阻止率に対するろ過水流量依存性及び濃度依存性について、本研究では以下の 2 式で近似することとした。

$$y = \alpha Q^2 + \beta Q + \chi \cdots \cdots (5)$$

$$y = mC + n \cdots \cdots (6)$$

ろ過水流量依存性は濃度が一定であれば、その濃度によらず成り立つと考えられ<sup>17,18)</sup>、多段エレメントを想定した際のエレメント各段の阻止率予測方法については(5)(6)を組み合わせた以下の式を用いて算出する。

$$y = \alpha Q^2 + \beta Q + \chi + m(C - C_0) \cdots \cdots (7)$$

$C_0$  : ろ過水流量依存性についての実験時濃度

$C$  : 膜供給水濃度

図-16 (b) より、塩素イオン阻止率の濃度依存性については、一定の傾向が見られなかったため、濃度依存性関係式の係数が求められなかった。これについては塩素イオン自体の濃度影響よりも、共存物質の濃縮による影響が大きいものと考えられる。

### (3) NF 膜によるアンチモンの阻止特性について

図-11 (a), (b)よりアンチモンについては、ほぼいかなる状況においても 99%以上の阻止率を確保することができた。ただし、図-11 (b)においては、供給水中アンチモン濃度が高くなるにつれて少しずつではあるが阻止率が低下していく傾向が見られている。



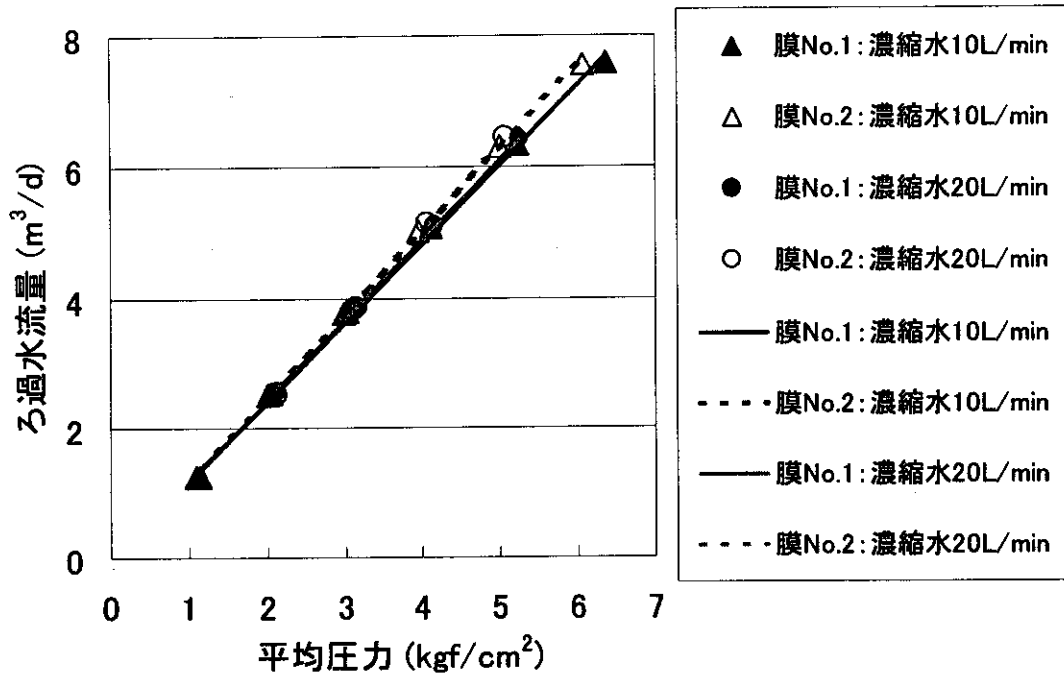


図-6 平均圧力-ろ過水流量の関係性

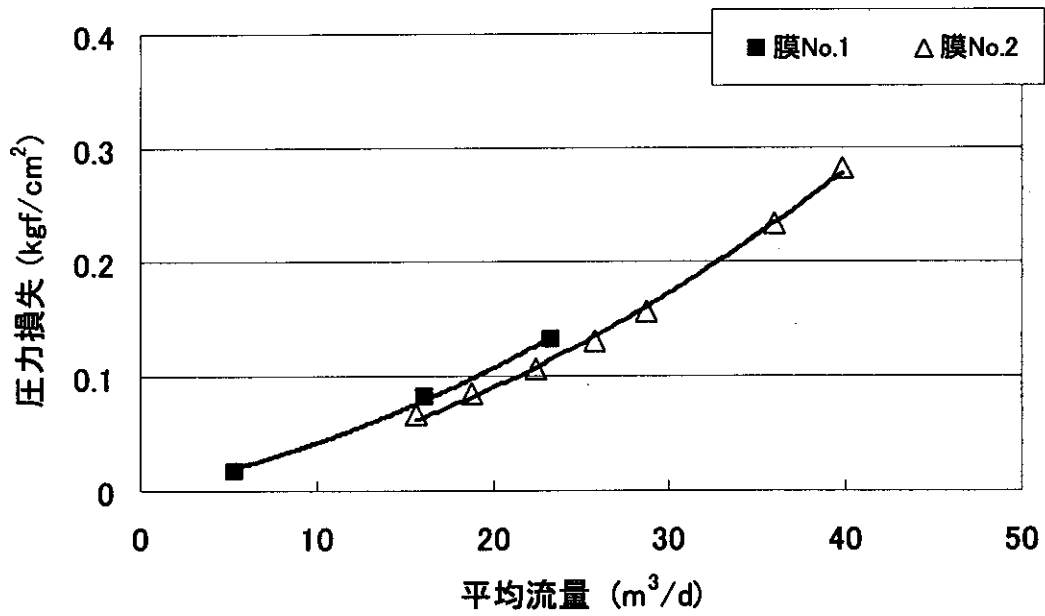


図-7 平均流量-圧力損失の関係性

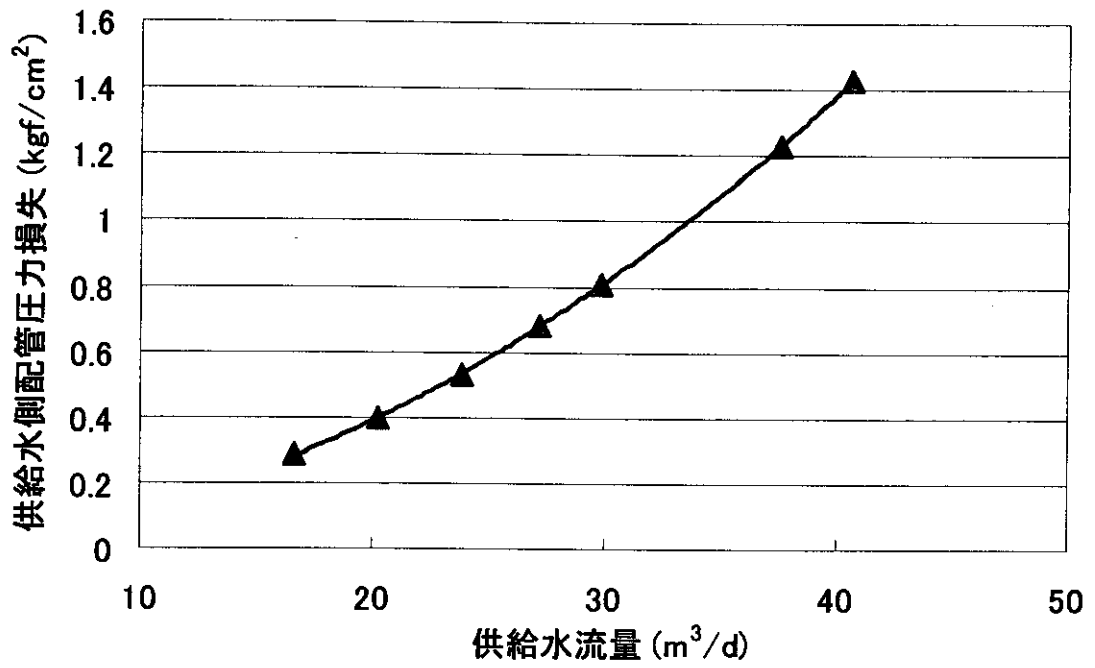


図-8 供給水側配管の圧力損失について

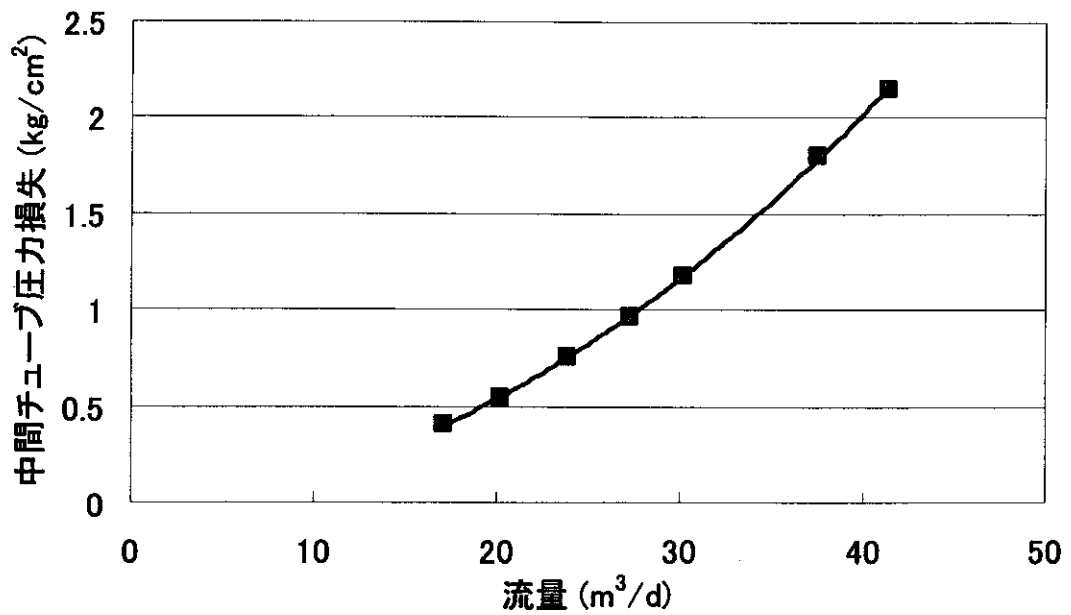


図-9 中間チューブの圧力損失について

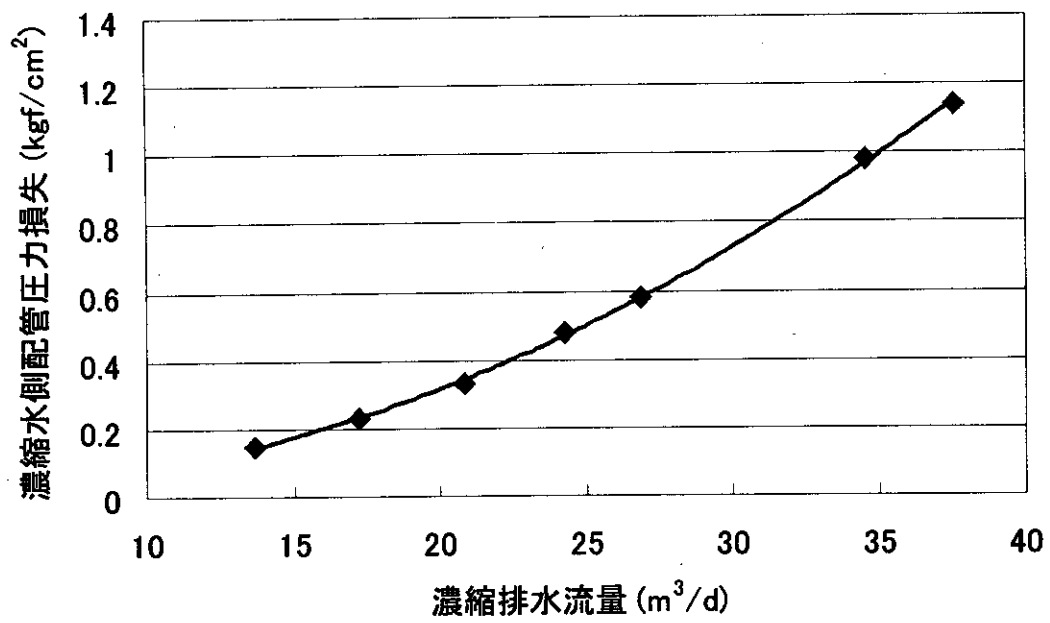


図-10 濃縮水側配管の圧力損失について

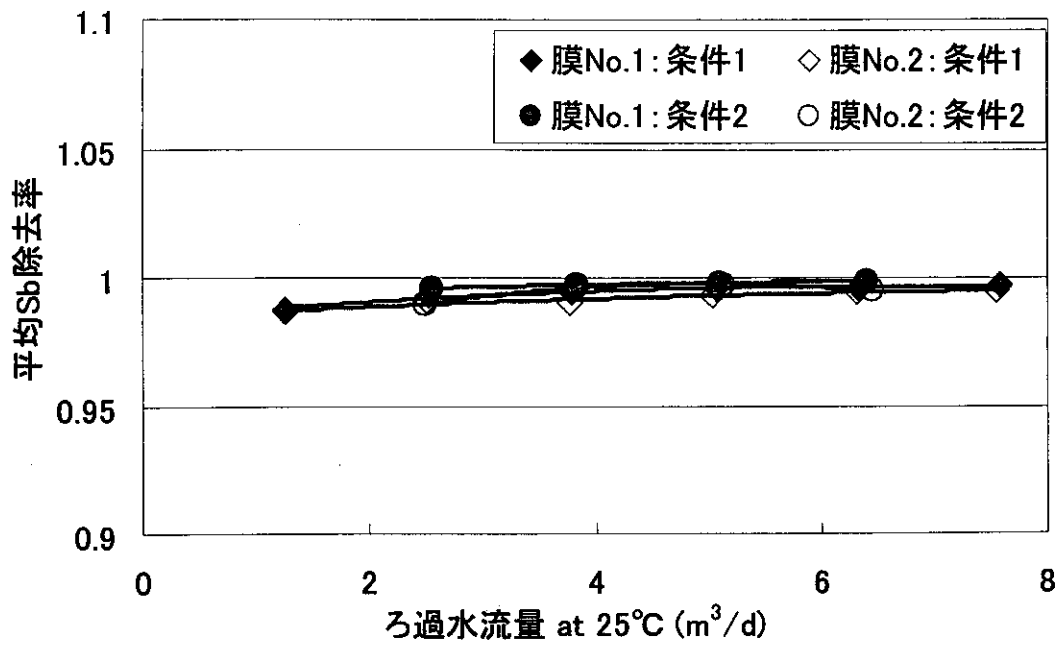


図-11 (a) Sb 阻止率のろ過水流量依存性

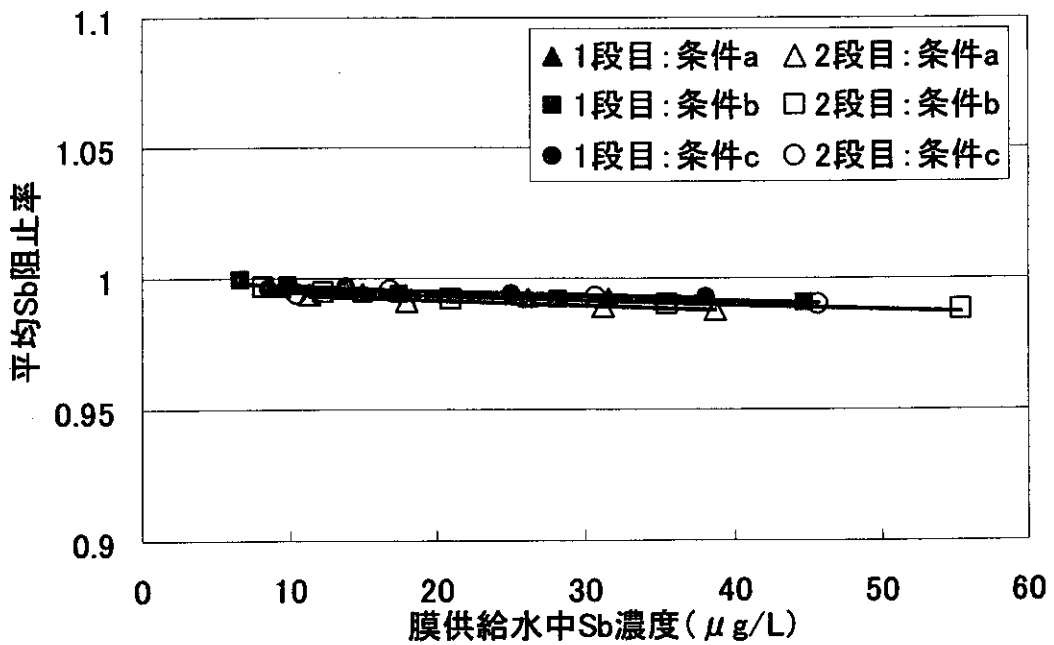


図-11 (b) Sb 阻止率の濃度依存性

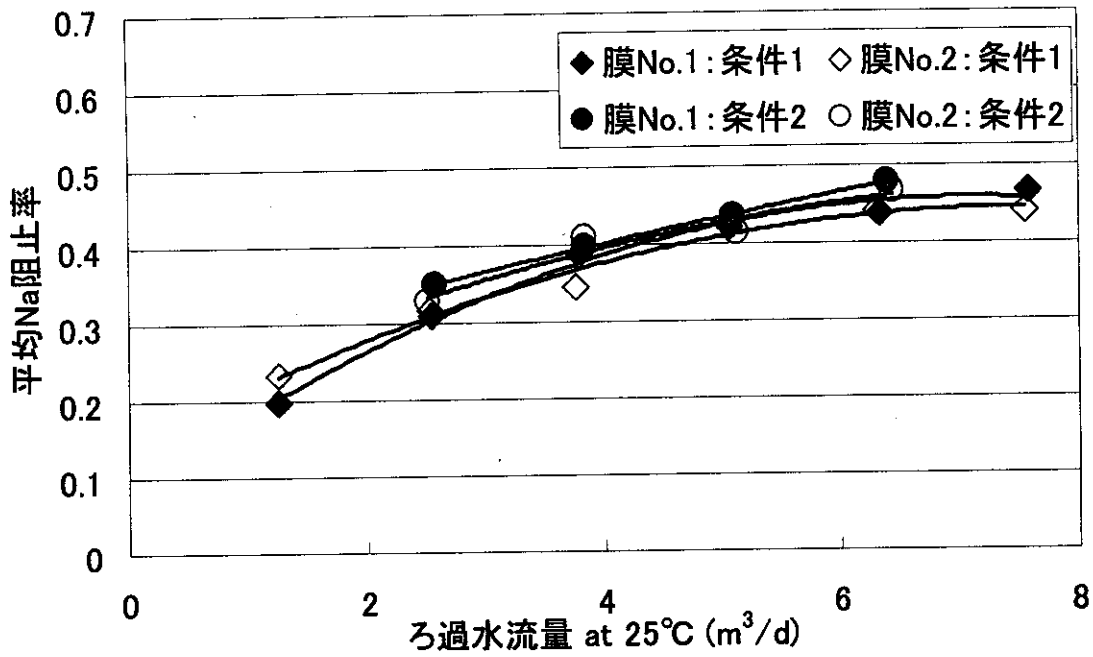


図-12 (a) Na 阻止率のろ過水流量依存性

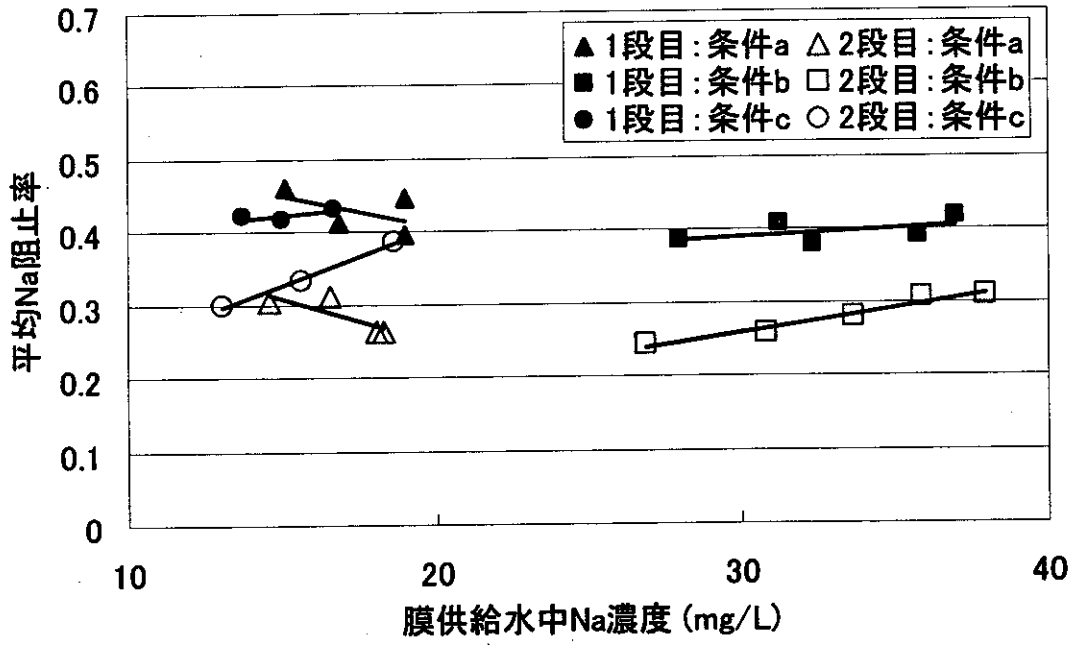


図-12 (b) Na 阻止率の濃度依存性

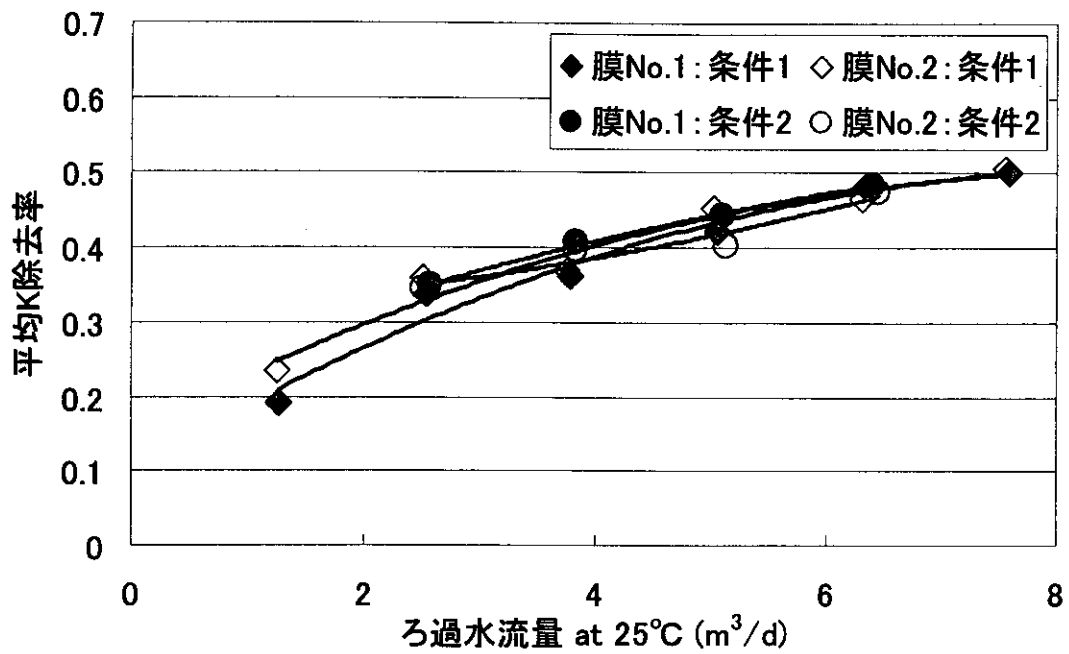


図-13 (a) K 阻止率のろ過水流量依存性

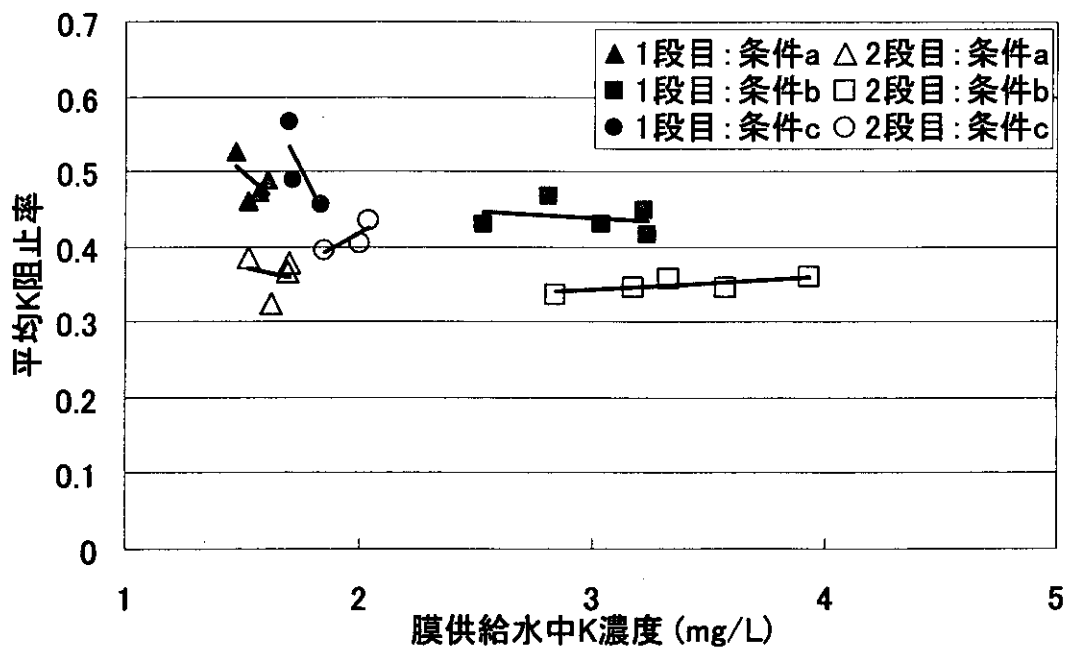


図-13 (b) K 阻止率の濃度依存性

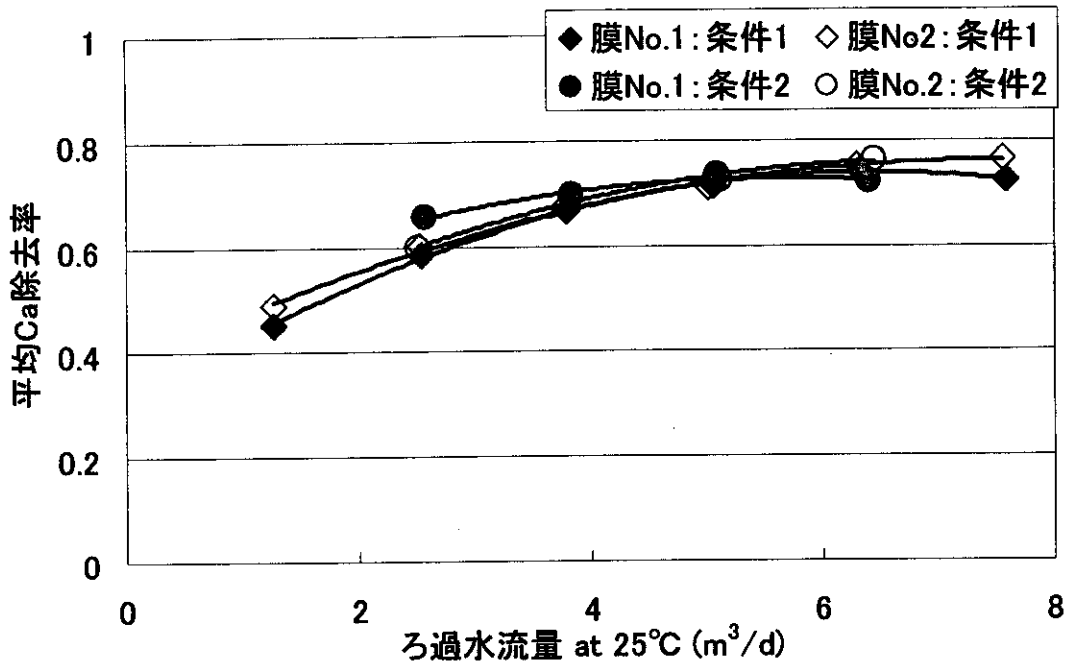


図-14 (a) Ca 阻止率のろ過水流量依存性

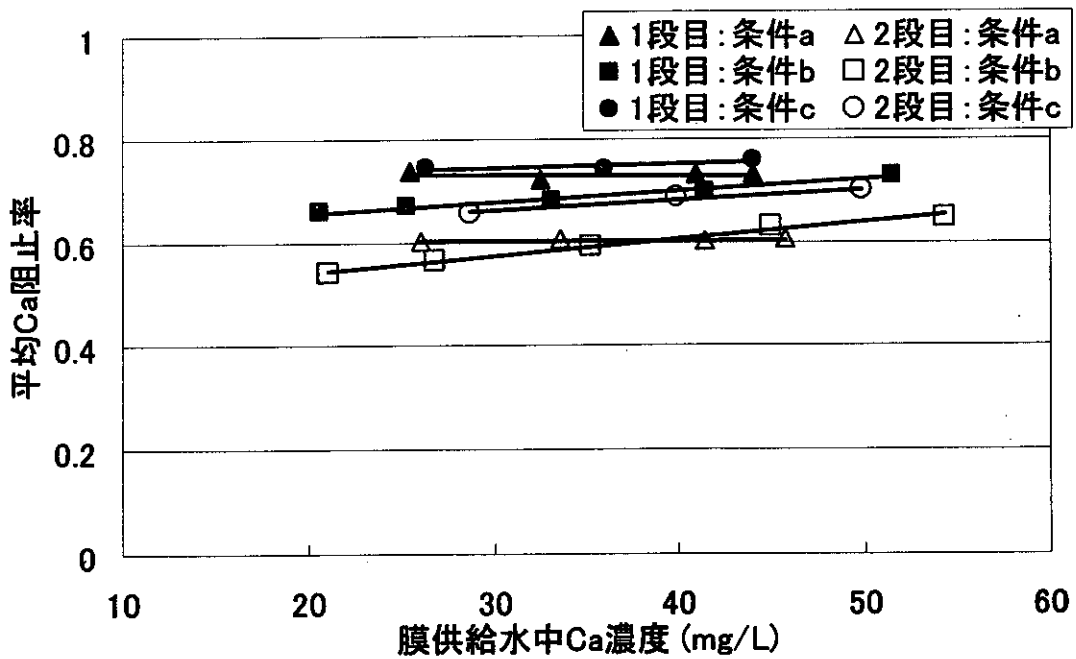


図-14 (b) Ca 阻止率の濃度依存性

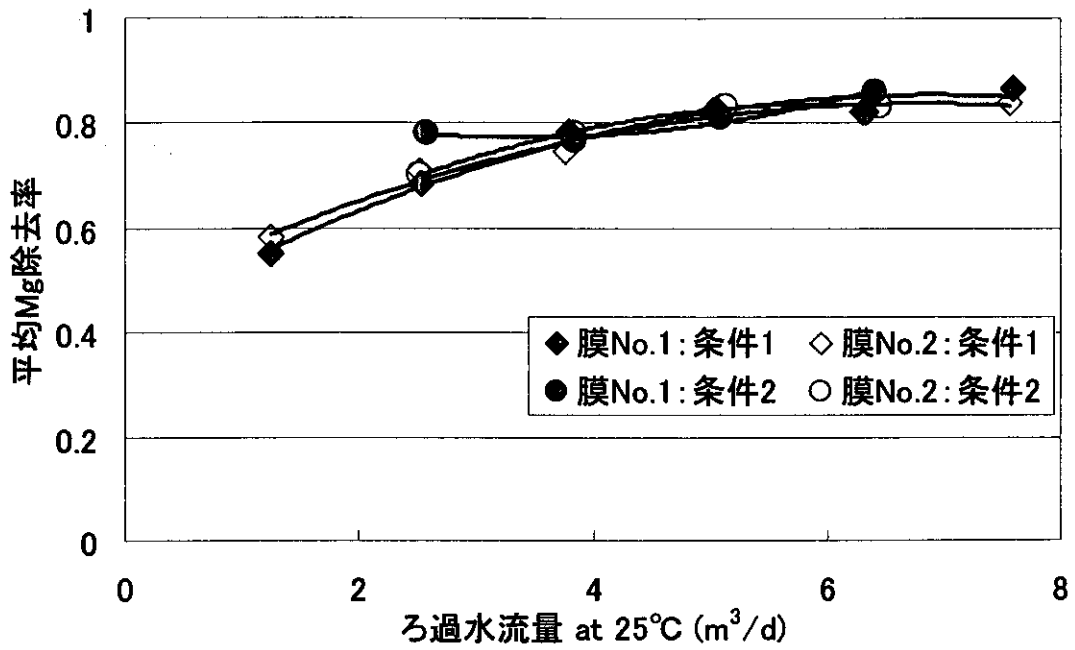


図-15(a) Mg 阻止率のろ過水流量依存性

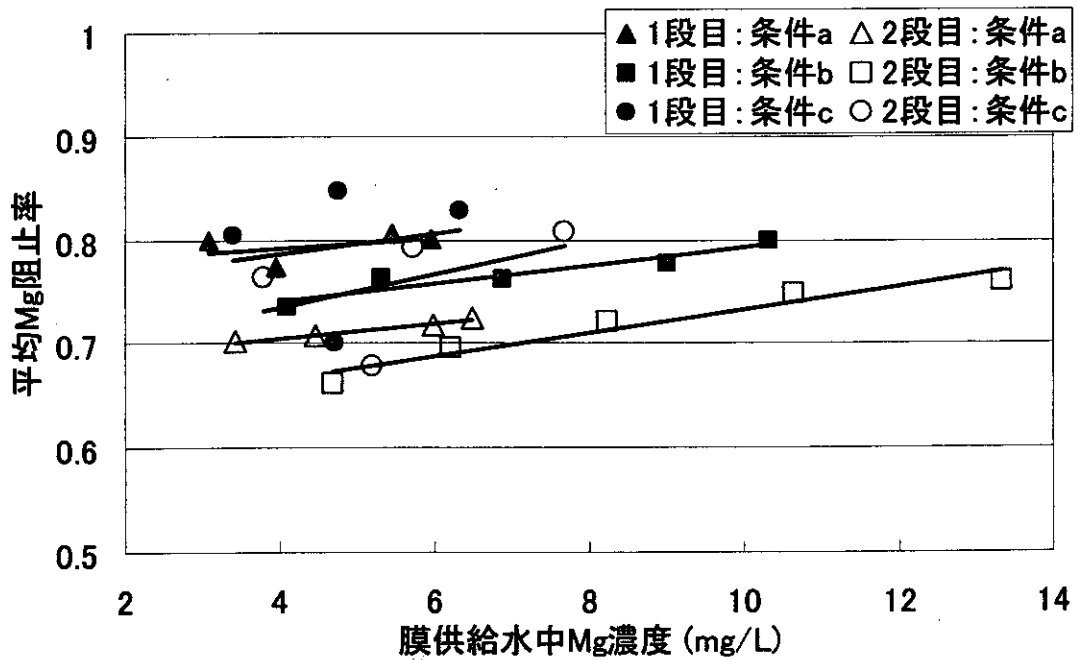


図-15(b) Mg 阻止率の濃度依存性



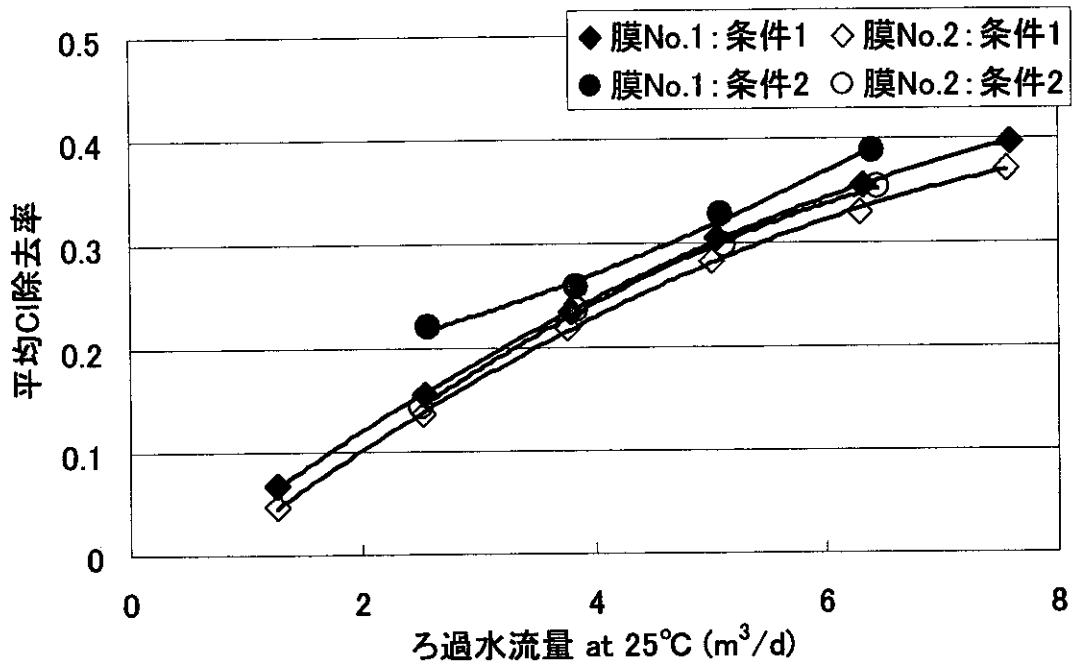


図-16(a) Cl 阻止率のろ過水流量依存性

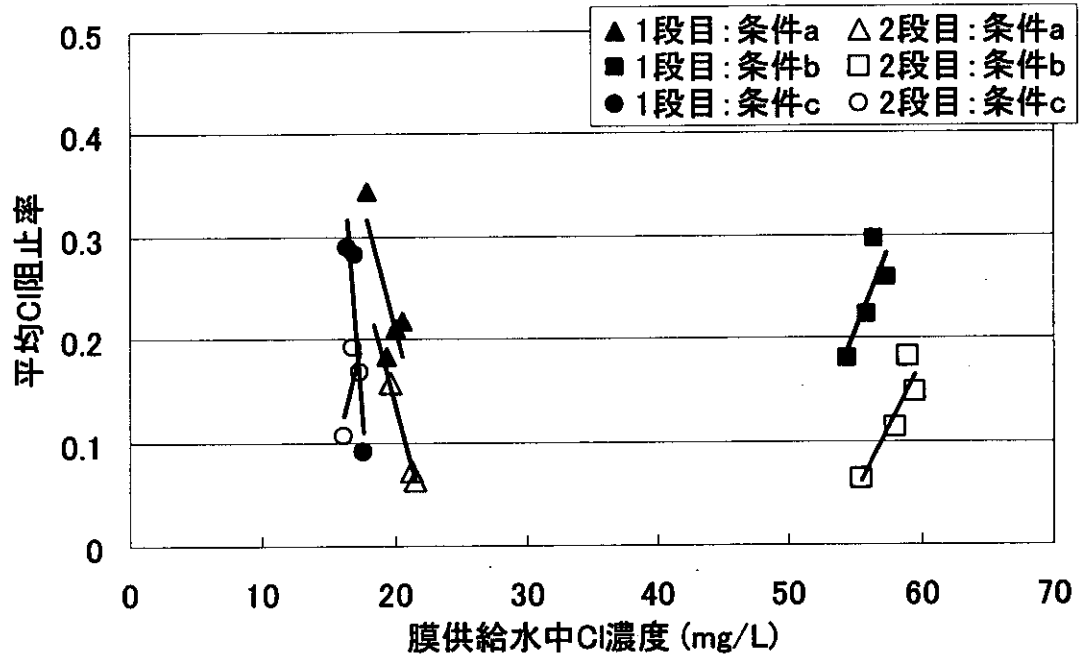


図-16(b) Cl 阻止率の濃度依存性

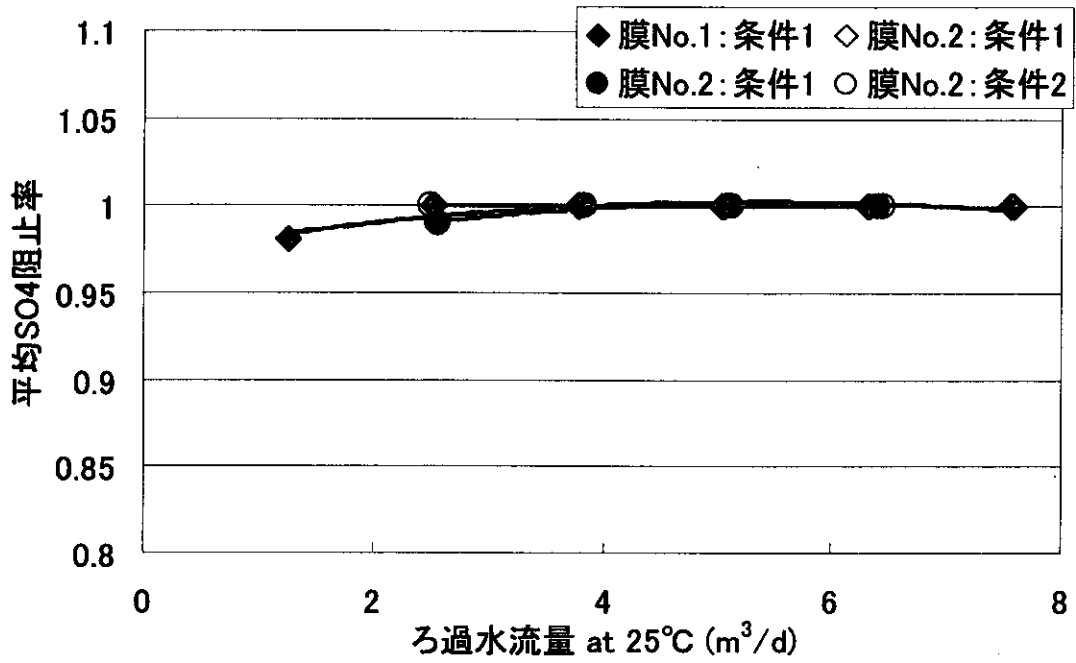


図-17 (a)  $\text{SO}_4$  阻止率のろ過水流量依存性

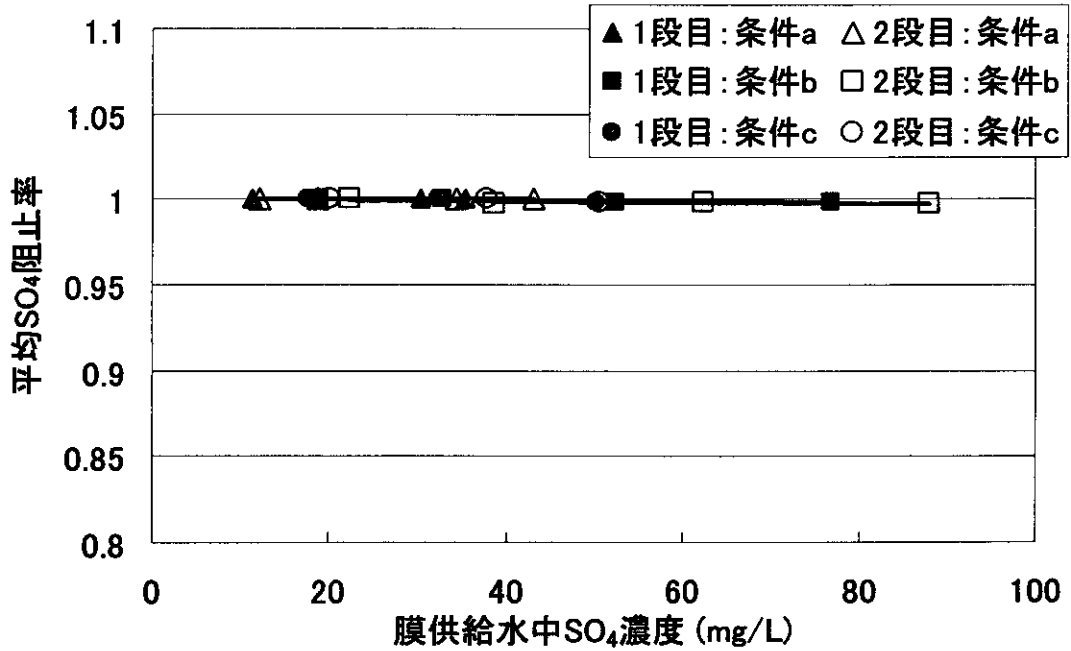


図-17 (b)  $\text{SO}_4$  阻止率の濃度依存性

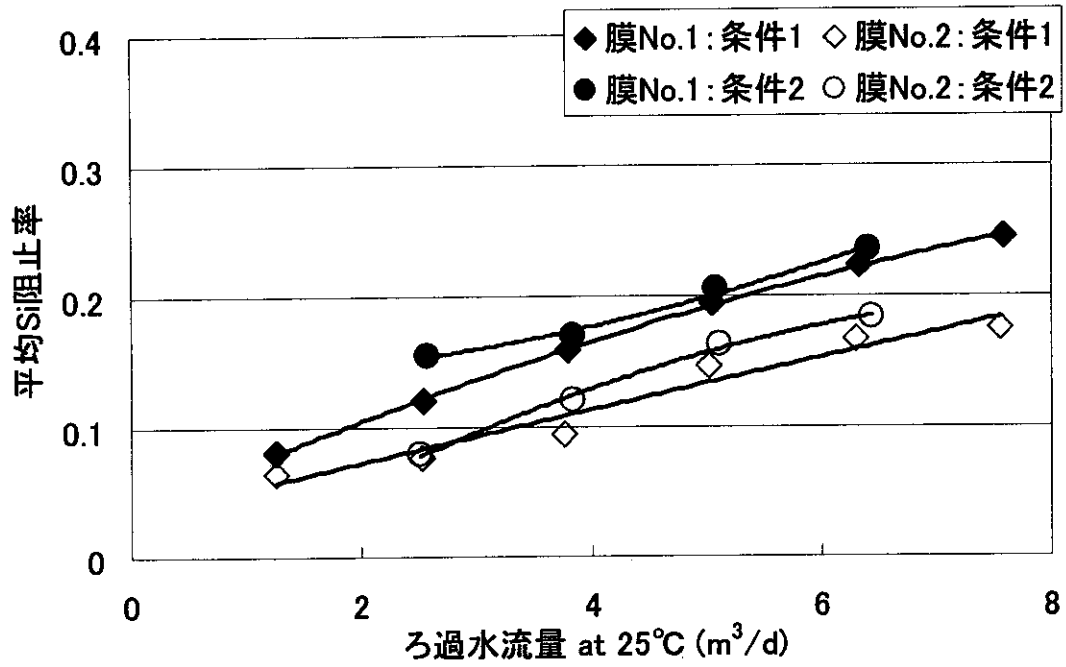


図-18(a) Si 阻止率のろ過水流量依存性

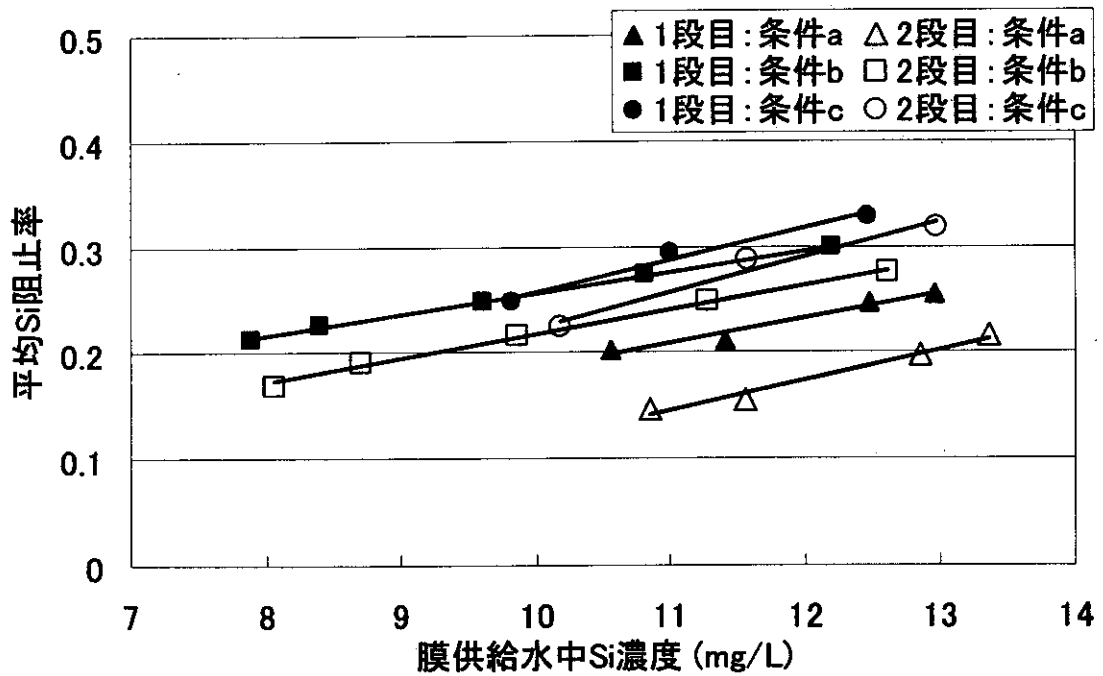


図-18(b) Si 阻止率の濃度依存性

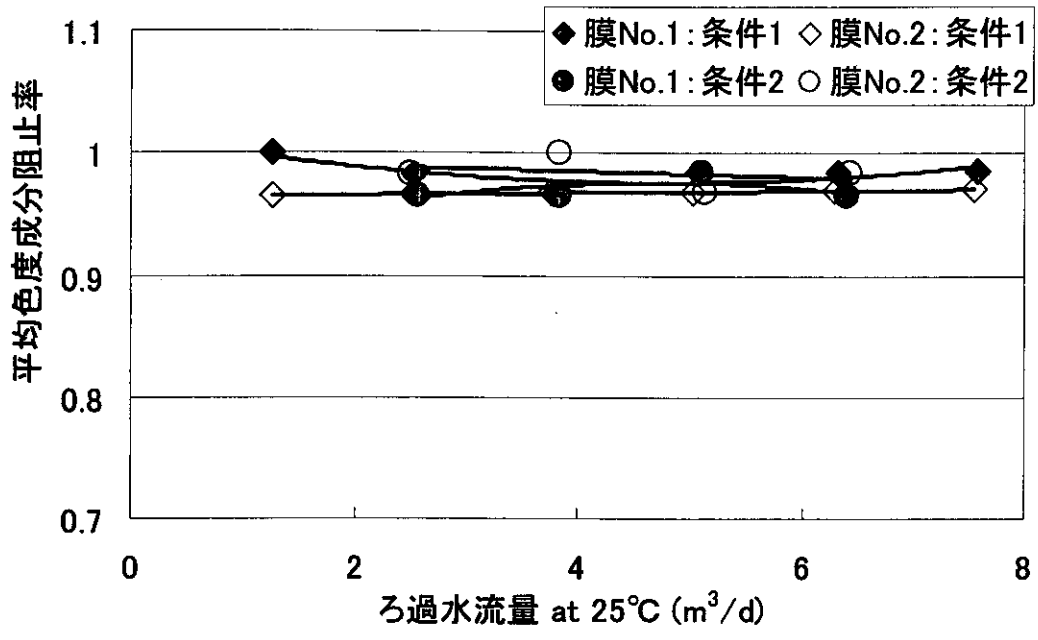


図-19(a) 色度阻止率のろ過水流量依存性

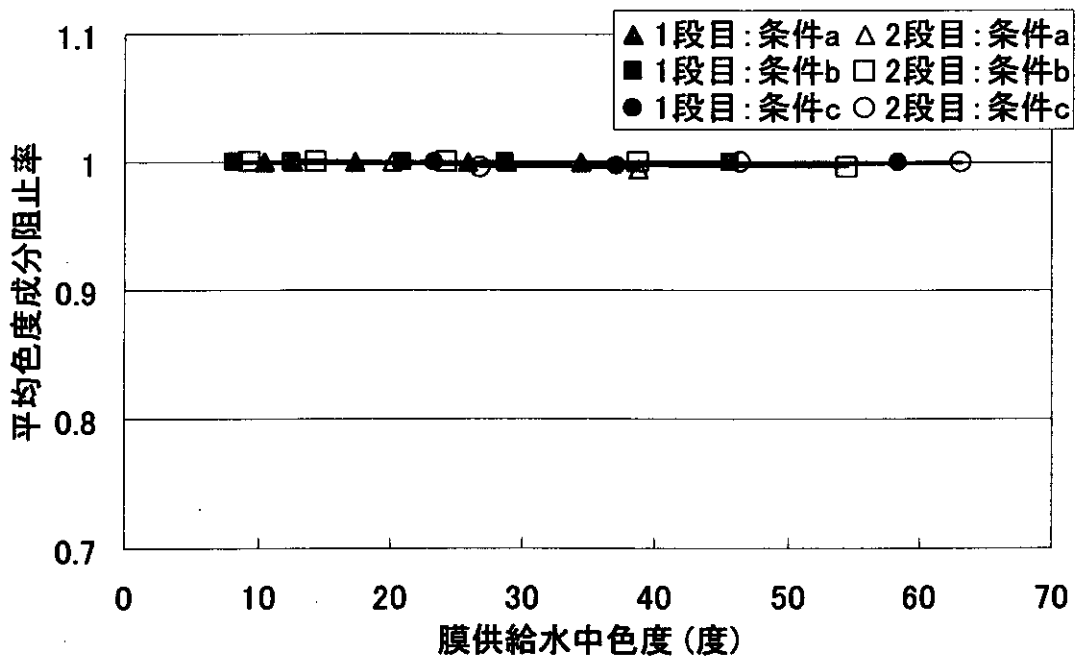


図-19(b) 色度阻止率の濃度依存性