

粉末活性炭及黏土膠羽密度函數之比較

康世芳*

佐藤敦久**

摘要

淨水廠使用粉末活性炭去除原水中之異臭味物質，發生混凝沉澱效果不佳的問題。本研究以金屬鋁鹽(硫酸鋁、多元氯化鋁)與有機高分子混凝劑探討粉末活性炭及黏土膠羽密度與沉降速度之比較，由實驗結果得知，以金屬鋁鹽為混凝劑時，粉末活性炭膠羽之有效密度及平均沉降速度皆小於黏土膠羽，因此，為減輕粉末活性炭膠羽由沉澱池溢流而出，沉澱池之滯留時間須延長1.2倍。硫酸鋁與有機高分子混凝劑合併使用，形成膠羽的密度及沉降速度皆較單獨以硫酸鋁形成之膠羽的為大，沉澱池的容量可節約50-30%，因此使用有機高分子混凝劑或採用傾斜板沉澱池，可改善粉末活性炭的投入使混凝沉澱效率不佳的問題。一般淨水程序混凝操作的範圍，膠羽密度或沉降與膠羽直徑非成2次方正比或2次方反比關係，且鋁鹽混凝劑及有機高分子混凝劑併用形成膠羽之 n 值為1.30~1.50及1.00~1.10。

一、前言

近年來由於水源優養化問題，自來水原水中含異臭味或三鹵甲烷前驅物質等微量有機物，使以混凝、沉澱及過濾為主的傳統淨水程序，必須結合高級處理技術如

*淡江大學水資源及環境工程研究所副教授

**日本國立東北大學土木工學科教授

活性炭吸附，才能確保飲用水的安全性。粉末活性炭吸附法廣泛地使用在許多淨水廠，一般直接投入沉砂池、進水井、前加氯池或快混池等既有的淨水設備，最大投入量高達100mg/l。日本仙台市茂庭淨水廠於1981年至1985年，因原水中 2-MIB 臭味物質之臭氣濃度 TO 20-30，粉末活性炭直接投入沉砂池，每間處理日數為130-246天。被添加的粉末活性炭如原水中的懸濁質一樣，必須經由混凝、沉澱及過濾等單元而去除之，但是發生(1) 混凝沉澱效果降低及(2) 濾程縮短與粉末活性炭洩漏等問題 [3]-[6]。粉末活性炭與黏土之混凝機制相異之報告以於前文[1]-[2] 指出然而混凝沉澱效果降低原因之相關研究之探討相當少，本研究乃 (1)比較粉末活性炭與黏土膠羽之有效密度及沉降速度及 (2)闡明混凝沉澱效果低原因及其改善對策。

二、膠羽密度函數

膠羽密度函數係表示單一混凝膠羽的粒徑(或沉降速度)與膠羽有效密度之關係，此函數為丹保所定義。混凝操作形成不規則形狀的膠羽，故假設其為球形及其雷諾數小於1，則以(1)式單一球形粒子沉降式Stoke's Law，實測水溫(μ)、膠羽直徑(d)與沉降速度(w)，便可求得膠羽有效密度。

$$\rho_e = \rho_s - \rho_w = \frac{18\mu}{g} \frac{w}{d^2} \quad (1)$$

w : 膠羽的沉降速度 (cm/sec)

g : 重力加速度 (980 cm/sec²)

d : 膠羽直徑 (cm)

μ : 水的黏性係數 (g/cm·sec)

ρ_s : 膠羽的密度 (g/cm³)

ρ_w : 水的密度 (g/cm³)

若再假設沉降速度(W)為膠羽直徑(d)之相關函數，則第(1)式可改寫為如第(2)式，(2)式即為膠羽密度函數。

$$\rho_e = ad^{-n} \quad (2)$$

由測得之膠羽粒徑(d)及有效密度(ρ_e)繪於雙對數方格紙上，以最小二乘法便可求得膠羽密度函數(2)式。(2)式右項 ad^{-n} 代入(1)式，則膠羽直徑與膠羽沉降速度可表如(3)式所示，可得混凝操作形成之膠羽沉降速度與膠羽粒徑非成二次方正比，而是(2-n)次方正比。

$$W = Ad^{2-n} \quad (3)$$

三、實驗材料與方法

實驗中使用的粉末活性炭及黏土與前文[1]相同，粉末活性炭與黏土的比重依(JIS A 1202-1978)粒子比重實驗法測得分別為1.58及2.63。實驗於20°C之恆溫室中進行，為防止水溫與室溫之溫差產生之對流，懸濁液先置放於恆溫室內，使其與室溫約相等，膠羽形成之混凝操作條件如表1所示，混凝劑為硫酸鋁(Alum)、多元氯化鋁(PAC)及有機高分子混凝劑。實驗設備概要如圖1所示，膠羽形成槽(A)與瓶杯實驗1公升之燒杯相同(內徑10.5cm×15cm)，形成槽(A)底部有直徑10mm之孔穴，下銜接長柱狀形(5cm×5cm×50cm)之沉降槽；膠羽形成中以圓錐狀橡膠木塞蓋住孔穴，圓錐狀橡膠木塞之底部鉛直垂掛0.37mm直徑之釣魚線，釣魚線上每5cm間隔做一刻劃，恆溫水槽內亦放置溫度計。

膠羽形成之方法與前文瓶杯試驗相同，即快混100rpm 5分鐘，慢混40 rpm，15分鐘後便測定膠羽的沉降速度及膠羽粒徑，為防止膠羽沉降，實驗進行中慢混一直維持在40 rpm。膠羽沉降速度與粒徑之測定方法如下：

(1)慢混15分鐘後，靜靜地將圓錐狀橡膠木塞往上提，使數個膠羽由孔穴落入沉降管後，立即封閉孔穴，膠羽能在水中進行單顆粒沈降。

(2) 當膠羽沈降至顯微鏡照相機 (ORIMPUS OM-4 型) 之瞳孔時, 照相機腳架緩緩下降, 同時追蹤膠羽並攝取膠羽, 以碼錶測定通過 5 cm 所需的時間, 求出沈降速度及膠羽的投影表面積。

(3) 重複 (1) 及 (2) 之步驟, 每一膠羽形成之操作條件下, 測定 10-20 個膠羽的投影面積及沈降速度。實驗追蹤膠羽時, 確認未發生膠羽破壞或再混凝現象。

(4) 膠羽粒徑之計算, 將攝影所得膠羽粒徑及 0.37mm 鈞魚線之底片直接以幻燈機投影於 Digital, 以 0.37mm 鈞魚線為基準, 計算膠羽投影面積, 即 Digital 上所覆圍投影面積之相對球的等價直徑為膠羽直徑。

四、實驗結果與討論

1. 硫酸鋁粉末活性炭膠羽密度函數

粉末活性炭濃度 50-200mg/l, 硫酸鋁加藥量 50-150mg/l (實驗編號 1-4) 實驗條件下, 膠羽粒徑與有效密度之關係式—膠羽密度函數如圖-2 所示, 實驗之混凝條件雖然不同, 但在雙對數紙上可繪在同一直線上, 顯示可以用同一膠羽密度表示。圖-2 相對的粉末活性炭膠羽之雷諾數, 由膠羽沈降速度與粒徑及水溫等實測值再計算後, 介於 0.12-1.73, 均小於 2.0, 因此膠羽密度函數 (1) 及 (2) 式於推導過程中, 單顆粒膠羽沈降式假設為 Stock's Law 可應於說明本實驗結果。膠羽粒徑愈大, 膠羽有效密度愈小; 對同一粒徑而言, 存在數個不同之有效密度值, 此種現象丹保 [8] [9] 及櫻井 [12] 等人於探討硫酸鋁黏土及鋁酸鋁纖維質膠羽時亦發現之。此原因乃計算膠羽有效密度之際, 假設膠羽形狀為球形, 實際上球形膠羽之投影表面積雖然相同, 但是膠羽真正的形狀及空隙率 (膠羽內所含水份或固體物之比率) 對同膠羽粒徑而言並不相同所致, 然而目前對構造脆弱的混凝膠羽之形狀及空隙率仍無法實測。

2. 多元氯化鋁粉末活性炭膠羽密度函數

粉末活性炭濃度50mg/l，混凝劑加藥量相當於硫酸鋁50-200mg/l(實驗編號5-8)之結果如圖-3所示，以多元氯化鋁為混凝劑之粉末活性炭膠羽密度函數亦可以(2)式表示。為比較硫酸鋁及多元氯化鋁之粉末活性炭膠羽密度，圖-2及圖-3結果繪於同一圖-4，顯示硫酸鋁形成膠羽粒徑為115 μ m-930 μ m；多元氯化鋁形成之膠羽粒徑則為250 μ m-2000 μ m，膠羽粒徑範圍較廣，且對同一膠羽粒徑而言，硫酸鋁粉末活性炭膠羽之有效密度大於多元氯化鋁粉末活性炭膠羽，此種現象亦可見於丹保[8]研究黏土膠羽之結果。由(1)式膠羽有效密度愈大，膠羽沉降速度愈大，如圖-5所示，當膠羽粒徑小於700 μ m以下，對同一粒徑而言，硫酸鋁粉末活性炭膠羽之沉降速度大於多元氯化鋁粉末活性炭。粉末活性炭膠羽粒徑與沉降速度之關係如(4)式及(5)式所示：

$$W=0.61d^{0.45} \text{ (硫酸鋁粉末活性炭膠羽)} \quad (4)$$

$$W=0.76d^{0.50} \text{ (多元氯化鋁粉末活性炭膠羽)} \quad (5)$$

實際混凝操作之粒徑分佈如圖-6所示，多元氯化鋁粉末活性炭膠羽群之平均粒徑為750 μ m，硫酸鋁粉末活性炭膠羽之平均粒徑為350 μ m，代入(4)式及(5)式計算得之，多元氯化鋁粉末活性炭膠羽之平均沉降速度為0.15cm/sec，為硫酸鋁粉末活性炭膠羽0.12cm/sec之1.2倍，因此多元氯化鋁較硫酸鋁為沉降性優良之混凝劑。

3. 硫酸鋁黏土膠羽密度函數

硫酸鋁加藥量12.5-25.0mg/l，黏土濃度50mg/l(實驗編號9-10)之結果與粉末活性炭膠羽之比較如圖-7所示，對同一粒徑而言，黏土膠羽有效密度高於粉末活性炭膠羽，此乃因實驗中使用之粉末活性炭比重1.58較黏土比重2.63較小所致。如圖-6所示，硫酸鋁形成之膠羽粒徑範圍為100-1000 μ m，對同一粒徑而言，黏土膠羽沉降速度較粉末活性炭膠羽快，且其粒徑與沉降速度之關係如(6)式所示：

$$W=0.90d^{0.40} \text{ (硫酸鋁黏土膠羽)} \quad (6)$$

黏土膠羽之平均粒徑如圖-6所示為 $250\mu\text{m}$ 代入(6)式則求得黏土膠羽群平均沉降速度為 0.15cm/sec ，為粉末活性炭膠羽 0.13cm/sec 之 1.2 倍；故粉末活性炭處理異臭味時，為減輕過濾池進流之濁度負荷，沉澱池停留時間必須延長 1.2 倍。

4. 有機高分子混凝劑併用時之膠羽密度函數

實驗編號 11 粉末活性炭 B 50mg/l 與實驗編號 1-4，雖然粉末活性炭來源不一樣，但如圖-8所示可以用同一膠羽密度函數表示之。同時粉末活性炭 B 濃度 50mg/l 、硫酸鋁 12.5mg/l ，與有機高分子混凝劑 0.10mg/l 併用時(實驗編號 2-3)之實驗結果如圖-9所示，有機高分子混凝劑之離子性雖不同，但可以用同一膠羽密度函數表示之。

有機高分子混凝劑併用與否對膠羽密度函數影響之比較如圖-10 所示，對同一粒徑而言，有機高分子混凝劑併用時膠羽之有效密度及沉降速度皆大於硫酸鋁單獨使用時，且粒徑與沉降速度關係式如(7)式：

$$W=4.09d^{0.93} \quad (\text{有機高分子混凝劑併用時之粉末活性炭膠羽}) \quad (7)$$

如圖-11 所示為有機高分子混凝劑併用時膠羽粒徑分佈，併用時之平均粒徑為 $500\mu\text{m}$ ，代入(7)式則併用時粉末活性炭膠羽之平均沉降速度為 0.25cm/sec ，因此併用時粉末活性炭膠羽粒徑較單獨使用時大，且平均沉降速度約單獨使用時之二倍。此種現象同時由圖-12 瓶杯實驗於不同靜置時間(1-15分)上澄液濁度殘留率之變化，濁度殘留率 20% 以下時，有機高分子混凝劑併用之靜置時間需 2 分鐘以上，相對地硫酸鋁單獨使用時則約需 5 分鐘以上。因此，有機高分子混凝劑併用時，膠羽粒徑大且沉降速度約為單獨使用時之 2 倍，故沉降池容積可減少 50%。

同樣地，併用時黏土膠羽密度函數如圖-13 所示，併用時膠羽之有效密度及沉降速度皆大於單獨使用時之膠羽，且膠羽粒徑與沉降速度之關係如(8)式所示：

$$W=6.91d^{0.87} \quad (\text{有機高分子混凝劑併用時之黏土膠羽}) \quad (8)$$

有機高分子混凝劑併用時粉末活性炭與黏土膠羽密度關係比較如圖-14 所示，

黏土膠羽之有效密度皆大於粉末活性炭膠羽，因此與圖-7同時考慮則得知，無論有機高分子混凝劑是否併用，粉末活性炭膠羽之有效密度與沉降速度皆小於黏土膠羽，此乃因粉末活性炭之比種較黏土為小所致。自來水原水中濁度之主要來源無機物如黏土，沉澱池設計時去除之濁度乃以黏土為主要對象；粉末活性炭係處理過程中添加入，對既有設備而言，為減少粉末活性炭膠羽由沉澱池溢留而出，必須增加停留時間或減小表面積負荷。

5. 膠羽密度函數特性值 n 之檢討

本實驗所得膠羽密度函數特性值 n 如表-2 所示，以金屬鹽(硫酸鋁及 PAC)為混凝劑時，粉末活性炭及黏土膠羽密度函數特性值 n 分別為 1.37-1.49 及 1.52；有機高分子混凝劑併用時則為 1.07 及 1.13，以金屬鋁鹽為混凝劑時黏土膠羽密度函數之 n 值與丹保 [8][9] 之結果 1.35-1.50 約相同，因此 n 值與懸濁值種類無關，約為 1.50；然而有機高分子混凝劑併用時則 n 值約 1.10。膠羽密度函數 n 值為間接表示膠羽緻密性質， n 值越小則意味著膠羽之形成越緻密且良好，本研究實驗得知有機高分子混凝劑併用時之 n 值較小於金屬鋁鹽單獨使用時，由式 (2) 及式 (3) n 值越小有效密度 (ρ_e) 及沉降速度 (W) 越大，且組成膠羽之懸濁值越多，形成越緻密之膠羽。

表-2 淨水處理對象懸濁質膠羽密度函數之 n 值

研究者	懸濁質種類	混凝劑	n
作者	粉末活性炭	Alum、PAC	1.37-1.49
作者	粉末活性炭	Alum +併用	1.07
作者	黏土	Alum	1.52
作者	黏土	Alum +併用	1.13
丹保 [8][9]	黏土	Alum、PAC	1.30-1.50

綜合上述，一般淨水廠去除對象懸濁值之膠羽密度函數之 n 值如表-3所示，金屬鋁鹽單獨使用時及有機高分子混凝劑併用時約為1.30-1.50 及1.00-1.10，因此其沉降速度約與其粒徑成0.5-0.7及0.9-1.0次方成正比關係。

五、結論

本研究比較不同混凝操作條件下形成的粉末活性炭與黏土膠羽的密度函數，並探究粉末活性炭膠羽混凝沉澱效果低的原因，實驗結果歸納如下：

- (1) 以鋁鹽為混凝劑時，對同一膠羽粒徑而言，以PAC形成之膠羽，其密度與沉降速度皆大於以硫酸鋁形成之膠羽。
- (2) 對同一膠羽粒徑而言，粉末活性炭膠羽之密度及沉降速度皆小於黏土膠羽，因此必須延長沉澱池停留時間或降低表面積水量負荷，以防止膠羽溢流而出。
- (3) 有機高分子混凝劑與硫酸鋁併用形成之膠羽的平均沉降速度大於硫酸鋁單獨使用時形成之膠羽，故沉澱池容積可節省約30-50%。
- (4) 帶電性相異之有機高分子混凝劑形成的膠羽，其粒徑與有效密度之關係，可用同一膠羽密度函數表示。
- (5) 一般淨水混凝操作，以無機鋁鹽及有機高分子混凝劑形成之膠羽，其膠羽密度函數之 n 值分別為1.30-1.50 及1.00-1.10；因此其沉降速度與膠羽粒徑分別為0.5-0.7 及0.9-1.0 次方成正比關係。

參考文獻

- 1 康世芳、佐藤敦久 “以陽離子性混凝劑探討粉末活性炭及黏土的混凝機構之比較”，第六屆自來水論文發表會論文集，民國78年，PP.97-110(1979)
- 2 康世芳 “粉末活性炭の凝集及びろ過特性に関する研究”，東北大學博士學位論文(1989)
3. 日本水道協會 “異臭味対策の指針”，昭和54年12月(1979)
4. 千葉靜夫 “仙台市における水道原水の処理対策”，第八回日本水質汚濁研究協会セミナー，昭和60年11月，pp.95-111(1985)

5. Letterman R.D., Quon I.E. and Gemmell "Coagulation of Activated Carbon Suspensions", Jour. AWWA, Vol.62, No.10, pp.652-658(1970)
6. 日本水道協会 "水道水のかび臭の原因と対策(I)", 水道協会雑誌, No. 532, pp.67-90(1976)
7. 丹保憲仁、山田浩一、穂積準 "フロック強度に関する研究", 水道協会雑誌, No.427, pp.4-15(1970)
8. 丹保憲仁、渡辺義公 "アルミウム・フロックの密度に関する研究", 水道協会雑誌, No.397, pp.2-10(1967)
9. 丹保憲仁、渡辺義公 "アルミニウム・フロックの密度に関する研究(II)", 水道協会雑誌, No.410, pp.14-17(1968)
10. 朝倉茂樹、後藤光亀、康世芳 "粉末活性炭のフロック特性に関する基礎研究", 昭和61年度東北支部技術研究発表会講演概要, pp.156-157(1987)
11. 社団法人土木学会編 "土粒子の比重試験方法", 土質実験指導書, 第3版第3刷, PP.3-5(1981)
12. 桜井正明 "マイクロセルローズ・硫酸アルミニウム系フロックの密度に関する研究", 化学工学論文集, Vol.16, No.4, pp.646-651(1978)

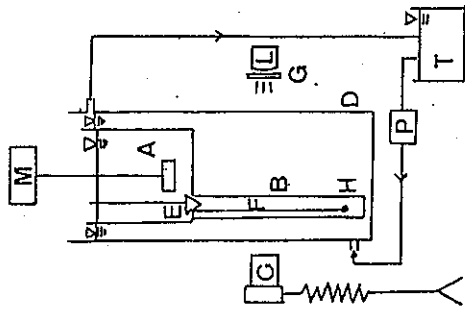
表 1 膠羽密度函數之實驗條件

實驗編號	懸濁液		凝劑種類 (-)	凝劑加藥量 (mg/l)	pH (-)
	種類 (-)	濃度 (mg/l)			
1*	粉末活性炭A	50	硫酸鋁	50	6.6
2	粉末活性炭A	50	硫酸鋁	100	6.6
3	粉末活性炭A	50	硫酸鋁	150	6.5
4	粉末活性炭A	200	硫酸鋁	100	3.5
5	粉末活性炭A	50	PAC	50	7.0
6	粉末活性炭A	50	PAC	100	6.5
7	粉末活性炭A	50	PAC	150	6.5
8	粉末活性炭A	50	PAC	200	6.5
9	黏土	50	硫酸鋁	12.5	7.0
10	黏土	50	硫酸鋁	25	7.0
11	粉末活性炭B	50	硫酸鋁	12.5	7.0
12**	粉末活性炭B	50	陽離子性高分子	0.1	7.0
13**	粉末活性炭B	50	陰離子性高分子	0.1	7.0
14**	黏土	50	陽離子性高分子	0.1	7.0
15**	黏土	50	陰離子性高分子	0.1	7.0

**試程12-15為有機高分子與硫酸鋁合併使用之混凝操作，硫酸鋁

加藥量均為12.5mg/l。

* 因粉末活性炭採樣時間不同，故以粉末活性炭A、B區分之。



- 成槽
形槽
膠沉
A
B
C
D
E
F
G
H
I
- 羽降
沉實
恒圓
A
B
C
D
E
F
G
H
I
- 鏡及照
微鏡
水樣
橡膠蓋
狀線
濾光片
攝影機
浮環
水
- 機
蓋
線
機
機
機
機
機
機
機
機
機

圖-1 膠羽沉降速度測定裝置

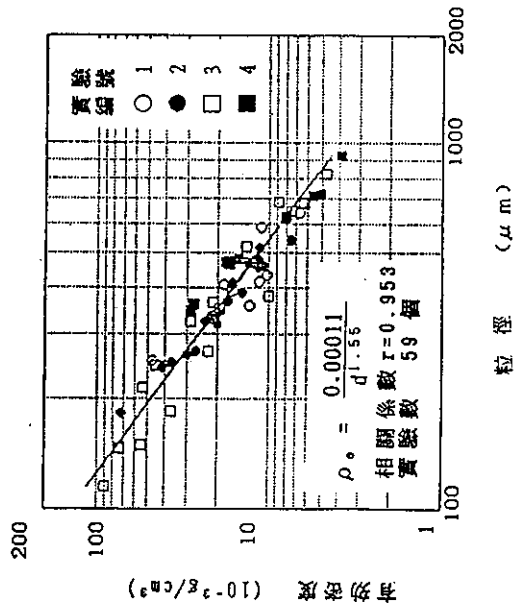


圖-2 粒徑與有效密度之關係 (實驗編號 1-4)

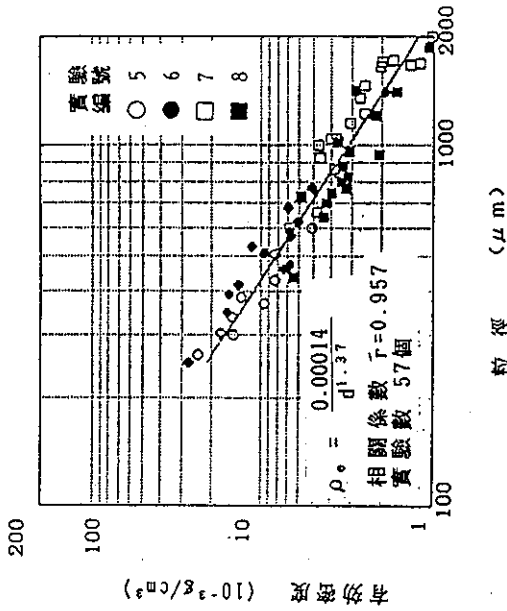


圖-3 粒徑與有效密度之關係 (實驗編號 5-8)

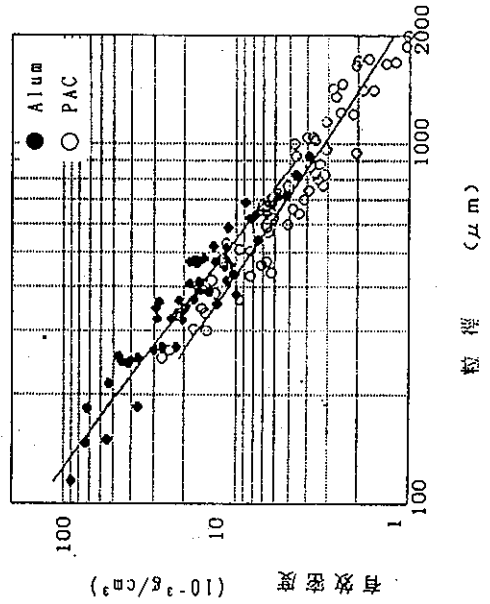


圖-4 粒徑與有效密度之關係 (實驗編號 1-8)

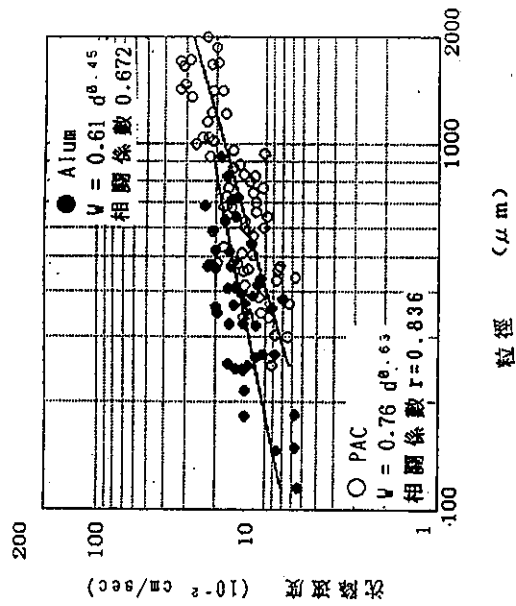


圖-5 粉末活性炭與黏土膠羽
沉降速度之比較
(實驗編號 1-8)

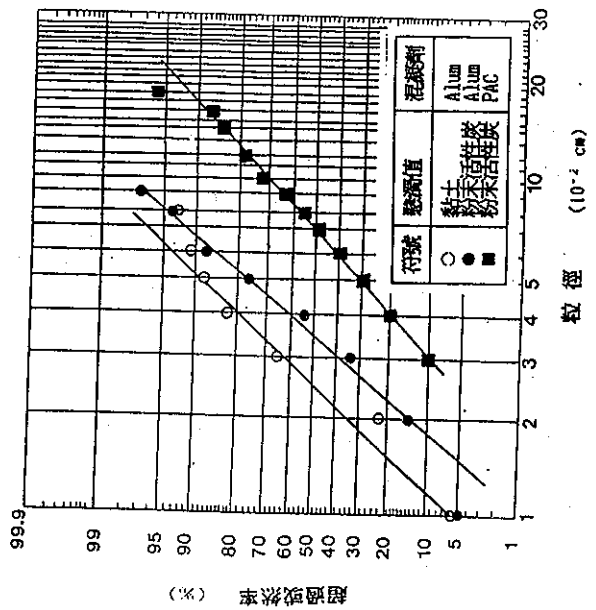


圖-6 各混凝操作之膠羽粒徑分布

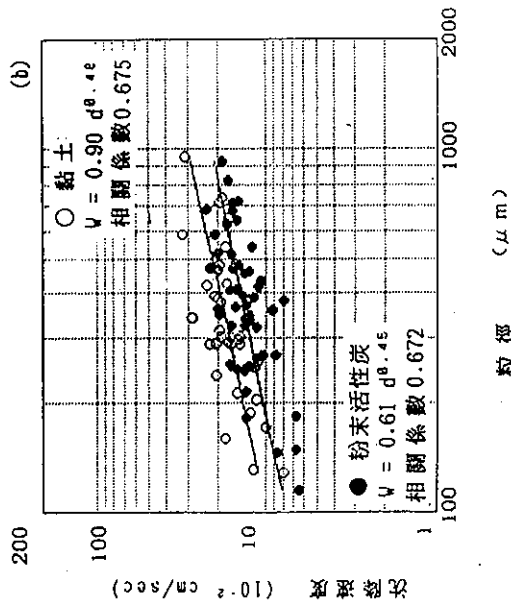
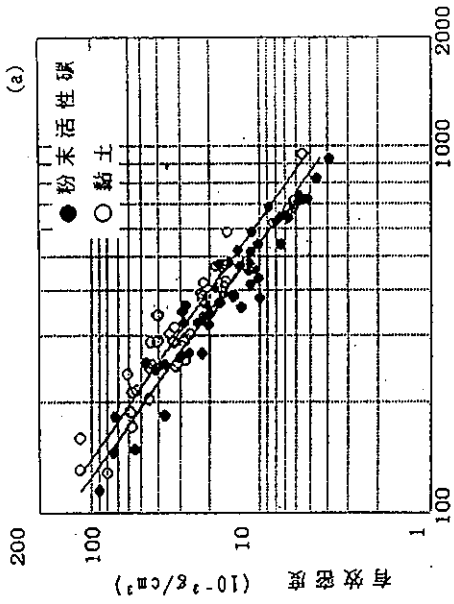


圖-7 粉末活性炭與黏土膠羽密度函數之比較
(以金屬鉍鹽為混凝劑)
(a)有效密度 (b)沉降速度

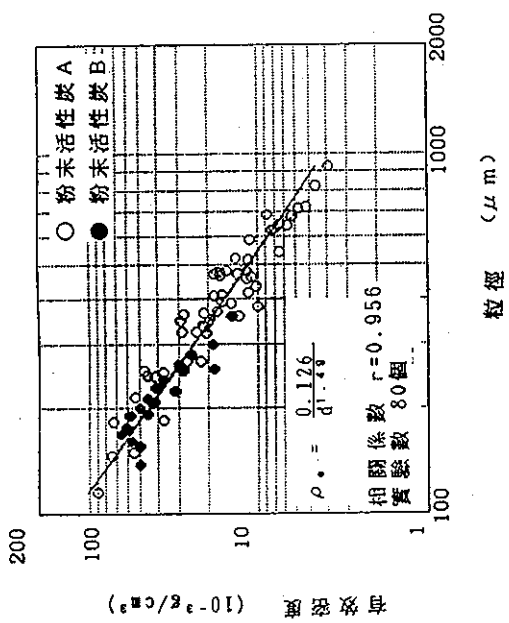


圖-8 粒徑與有效密度之關係
(粉末活性炭)

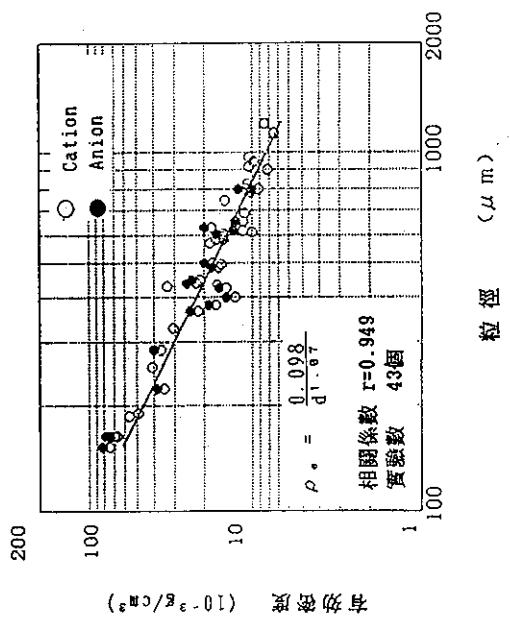


圖-9 粒徑與有效密度之關係
(實驗編號 12-13)

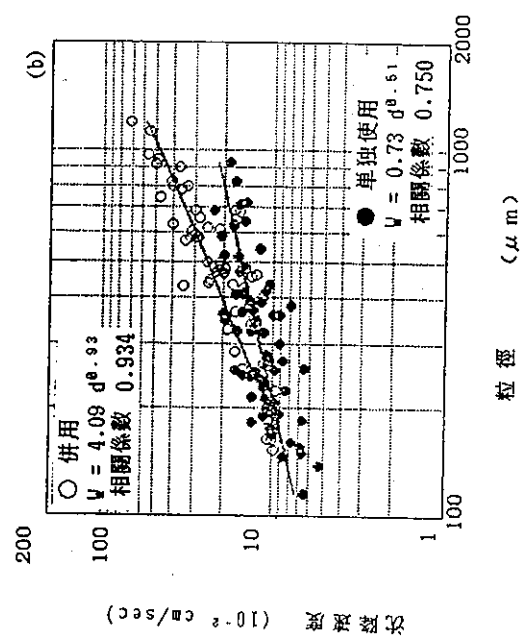
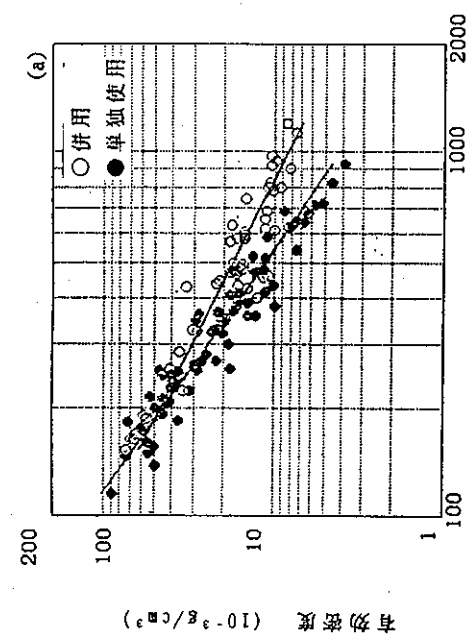


圖-10 有機高分子混凝劑併用與否對膠羽
密度函數之影響(粉末活性炭)
(a) 有效密度 (b) 沉降速度

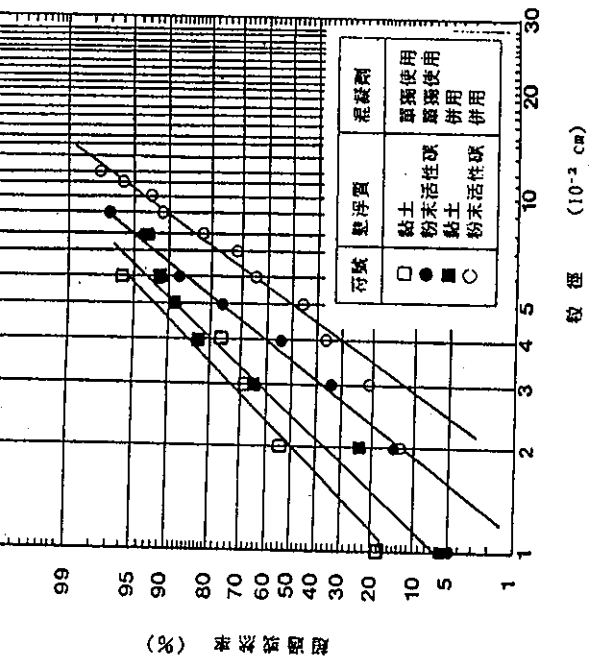


圖-11 各種絮凝操作之膠羽粒徑分佈

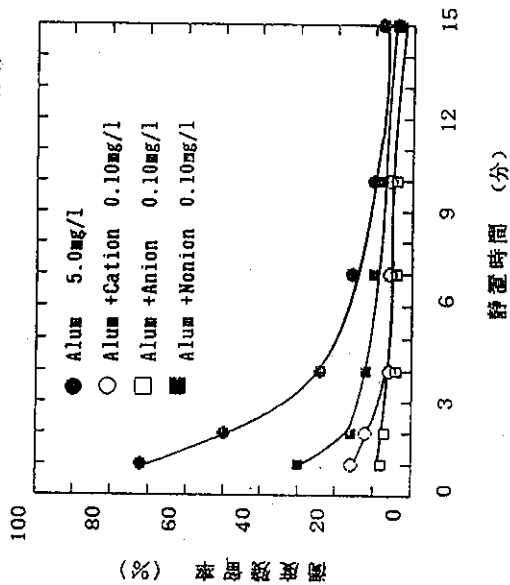


圖-12 靜置時間與濁度殘留率之關係
(粉末活性炭 5.0mg/l, 有機高
分子絮凝劑 0.10mg/l, 硫酸鋁
5.0mg/l)

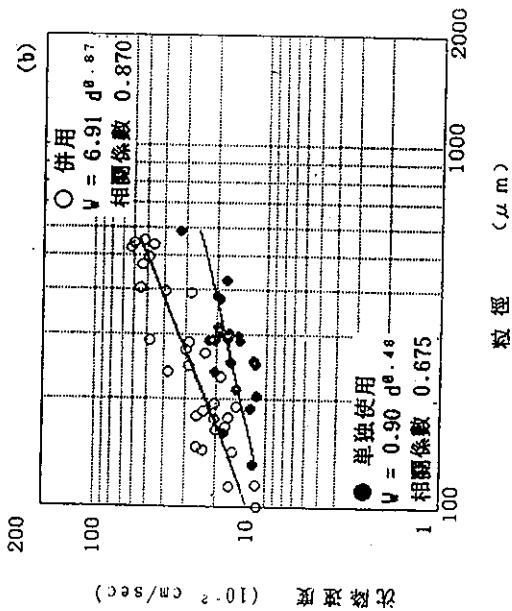
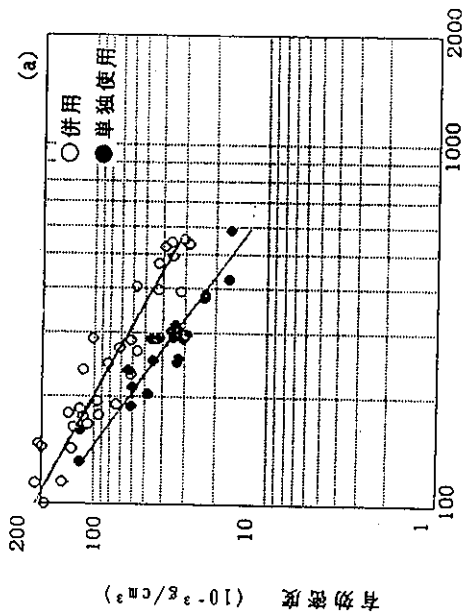


圖-13 有機高分子絮凝劑併用與否對膠羽
密度函數之影響(粘土)
(a) 有效密度 (b) 沉降速度

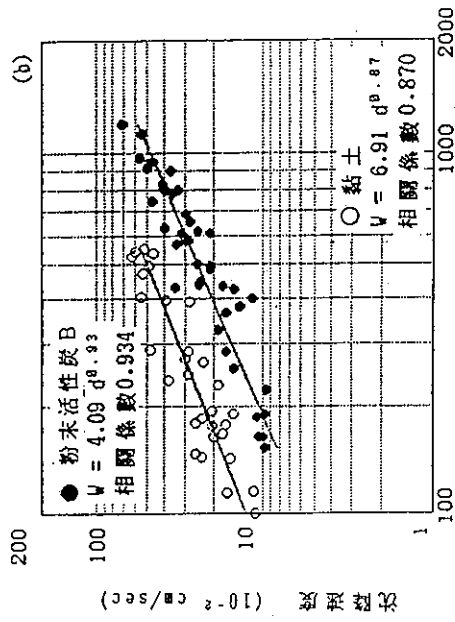
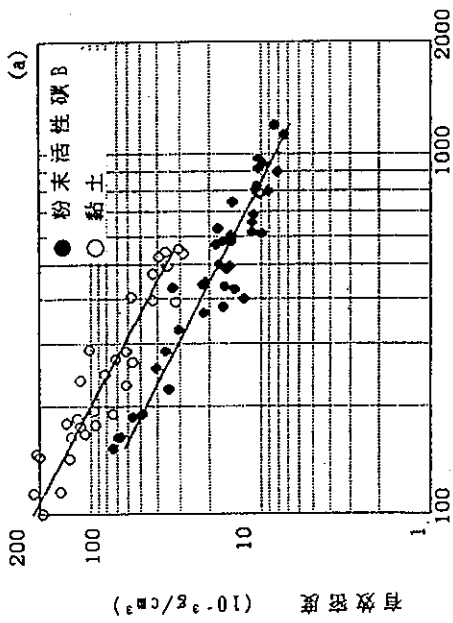


圖-14 粉末活性炭與黏土膠羽密度函數之比較
(有機高分子凝劑併用時)
(a) 有效密度 (b) 沉降速度