

光降濃縮過程に及ぼす温度の影響

東京大学工学部 学 ○ 大垣真一郎
正 松尾友矩

1. はじめに. 水処理における固液分離操作においては、種々の初期濃度に対する光降濃縮現象を取り扱わなければならない。光降濃縮にあらわれる界面光降に関する理論として適用されているのは、非凝集性粒子群の単粒子光降速度を基礎とする Richardson¹⁾ らの方法や、光降速度を局所濃度のみの関数としてあらわした Kynch の方法など²⁾ である。しかし、凝集性を有し、広い粒径分布を持ち、さらにその体積濃度などを正確に定義しえない活性汚泥懸液などについては、その表相懸液としての現象論的知識も少ない現況では、Kynch や Richardson らの式の仮定をどの程度満足するものであるかは明らかではない。

本研究は、活性汚泥およびカオリンフロクの界面光降曲線に及ぼす温度の影響を調べることにより、これらフロク状粒子群の界面光降の機構を実験的に探ることを目的とするものである。活性汚泥の界面光降に関しては、第一次の解析をオーストラリア大会で発表³⁾ したが、その後の高濃度域の実験から、光降から濃縮の過程と温度との関係はより複雑なことが明らかとなった。そこで、本報告では前報告の不完全な点を指摘すると共に、より現象に忠実な記述と整理を示そうとするものである。

温度の影響については、水処理全体にわたって悪化地を対象とした研究が少なく、日本においては特に注意を払われていないのが現状である。しかし、参考までに示すと、日本国内各地の処理場の処理水水温は、図-1 に示す様に、3ヶ月平均値相当の値においても季節と場所によって大きく変動(10℃程度)し、月平均値に対して最高最低水温は±4℃のバラツキがある⁴⁾ といわれることから、変動巾は20℃近くに達することになる。最終光降池、濃縮槽などの水温変動もこれとほぼ同じはずである。2次処理水からの再利用のための高度淨化処理、または、水系汚濁防止のための3次処理のいずれにしても、2次処理水の水质の改善と安定化がオーソドックスであり、プロセス設計に当って、温度の影響も看過できないものと考えられる。

2. 実験方法. 試料の活性汚泥は、実験室内においてスキムミルクで育てた活性汚泥(1日1回バッチ式, $MLSS \approx 4000 \text{ mg/l}$, $SVI = 50 \sim 90$) である。カオリンフロクは、水道水に、カオリン約10000 mg/l, アルギン酸ソーダ約400 mg/l を混合したものを、硫酸バンド(約10000 mg/l)で凝集させた後使用した(カオリン・アルギン酸混合液1 l に対し、18~20 ml を要した)。

実験に用いた光降筒は、図-2 の様なもので、保温水槽中に設置した内径7.7 cm, 長さ120 cm のガラス製円筒管である。初期水深は、115~118 cm である。光降特性試験に通常使用される1 l シリンダー(水深30 cm)ではなく、この長さ(120 cm)を用いた理由は、活性汚泥の界面光降において水深の影響を実験的に検討した Dick⁵⁾ が、8 feet (240 cm) までの高さにおいて、3 feet (90 cm) 以上であれば界面等速光降速度はその絶対値がほぼ同じになるが、3 feet 以下では底の影響を受け小さくなること、従って、通常の1 l シリンダー試験では不十分であることを指摘していることによる。

実験方法、所定濃度に調整(活性汚泥、カオリンフロク共、稀釈に当ってはそれぞれの上

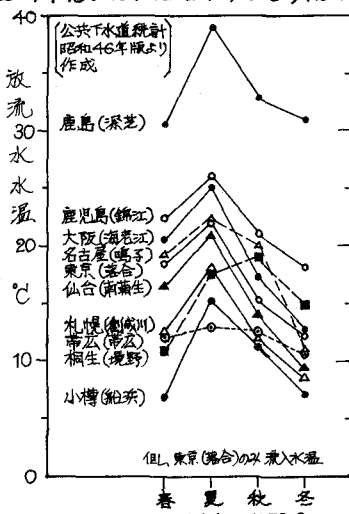


図-1. 下水処理場放流水水温変化

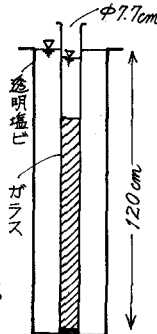


図-2. 光降筒

溶液を使用)した試料を、所定温度に加熱または冷却した。但し、沈降筒注入直前に 400~450 rpm (直径 9 cm タービン翼, 1 辺 2.5 cm 正方形断面容器内) で、5 分間程度の攪拌を行い、フロックを一定のレベルまで一層分散せよという操作を行っている。界面の位置は、肉眼で 1 分毎または 5 分毎に測定した。

濃度指標としては、全懸濁固形物濃度 (T.S.) と最終沈降性率 (V_f) を用いた。最終沈降性率とは、500 ml シリンダー (水深 30 cm) で約 20 時間静置した時、汚泥の示す容積の全容積に対する割合である。最終沈降性率を主に用いた理由は、通常の界面沈降式が容積率という体積濃度で表現されていることと、 V_f が懸濁液の初期の粘度と関係が深い⁹⁾ ことによる。両者の関係を図-3 に示す。実験時期の相違により、関係は 2 グループに分かれている。測定範囲は、 $T.S. = 2180 \sim 9280 \text{ mg/l}$ ($V_f = 0.102 \sim 0.518$) である。カオリンフロックは、4 サンプルのみであるが、その範囲は、 $T.S. = 6680 \sim 13280 \text{ mg/l}$ ($V_f = 0.0756 \sim 0.227$) である。温度は、沈降筒内の実験水温として測定したものである。範囲は、活性汚泥 $5.8 \sim 39.6^\circ\text{C}$ 、カオリンフロック 39.9°C である。

3. 実験結果

3-1. 沈降曲線のパターン 沈降、濃縮の全体像についてまず述べる。種々の初期濃度および温度によって、沈降曲線のパターンは変化し、図-4 に示す様に、大きく分けて 3 種類に分類できる。3 種のパターンは、主に初期濃度によって決定されるが、同一濃度においても、温度により、I と II、または、II と III の 2 種のパターンにわたることがある。界面下の粒子群高の考察は、I においては、粒子相互が相対的に運動し、複雑な渦を形成しながら、全体として下方へ移動する。

I から II においては、この渦の動きが弱まり、下降以外の方向への相対的な動きが小さくなる。II から III においては、肉眼観察の限りでは、粒子群の内部の相対運動は消滅し、全体の下降のみが生じている。

濃度と温度についてパターン分類を図式化すると図-5 の様になる。図中のプロットは実験点を示す。各沈降パターンの具体例を、図-6, 7, 8 に示す (次頁)。非生物系のカオリンフロックにおいても、同様のパターンが認められ、生物フロック特有のものではないことがわかる。

沈降曲線は二のように種々の非定常パターンをとるために、一律に、等速界面沈降速度を定義することはできないが、本研究では、ある程度継続する最大界面沈降速度をもって、その試料の等速界面沈降速度とした。以下、界面沈降速度とは、この方法により算定したものを言う。

3-2. 界面沈降速度の濃度依存性 濃度依存性を表わすために、同一温度とみなされるデータ ($18.5 \sim 21.9^\circ\text{C}$) を初期濃度に対してプロットしたものが、図-9 である。カオリンのデータも同図に示す。活性汚泥

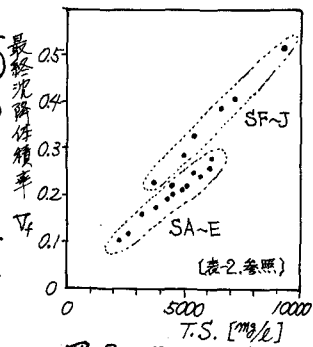


図-3. V_f vs. T.S.

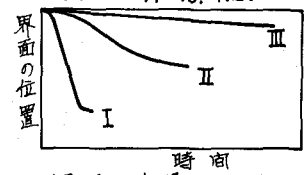


図-4. 沈降パターン

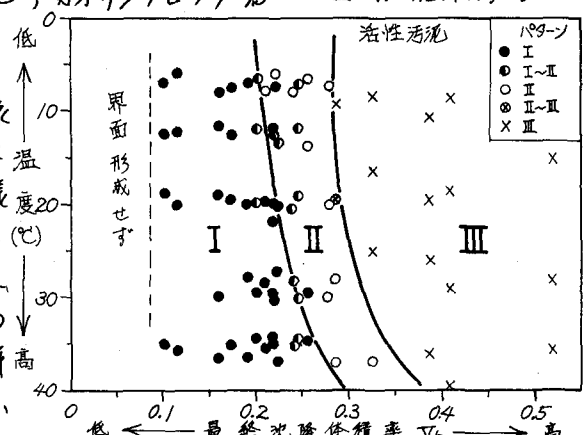


図-5. 沈降曲線パターンの分類

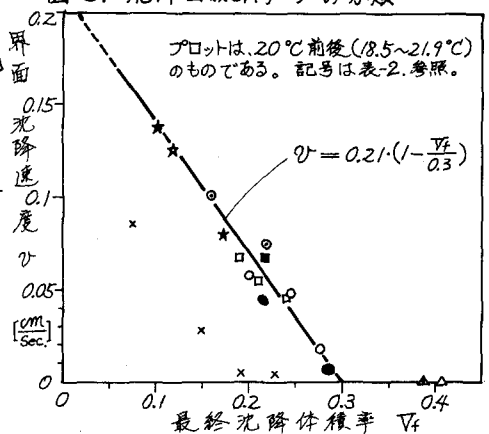


図-9. 沈降速度の濃度依存性

では、 $V_4 < 0.3$ では、界面沈降速度 v_i と V_4 は、ほぼ直線関係を示し、 V_4 が大きくなるに従い v_i は小さくなる。 $V_4 > 0.3$ においては、絶対速度が極端に小さくなる。20℃でパターンⅢに入るものである。

℃	100μm %
0	1.792
5	1.519
10	1.308
15	1.140
20	1.005
25	0.894
30	0.801
35	0.723
40	0.656

3-3. 界面沈降速度の温度依存性 同一濃度における界面沈降曲線の温度による変化は、下図、図-6~8. に示す通りである。これを界面沈降速度という形で定量化し、その温度依存性を調べてみる。温度変化の影響を受ける因子は、いくつか考えられ、後の考察において検討するが、最大の影響を受けるのは液の粘度(μ)であり、その変化も大きい(表-1)ことから、粘度に則して整理表-1. 粘度

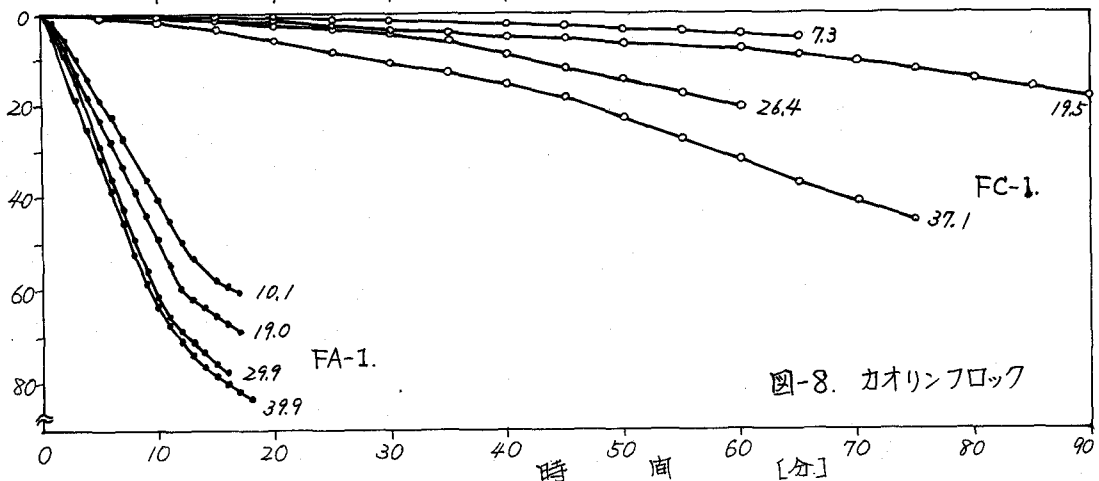
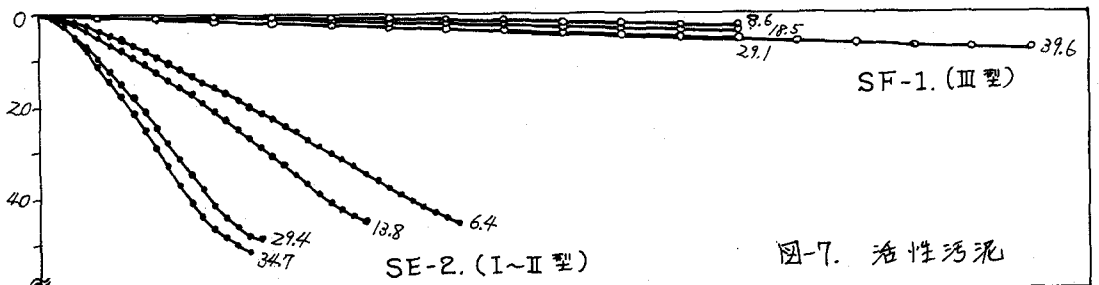
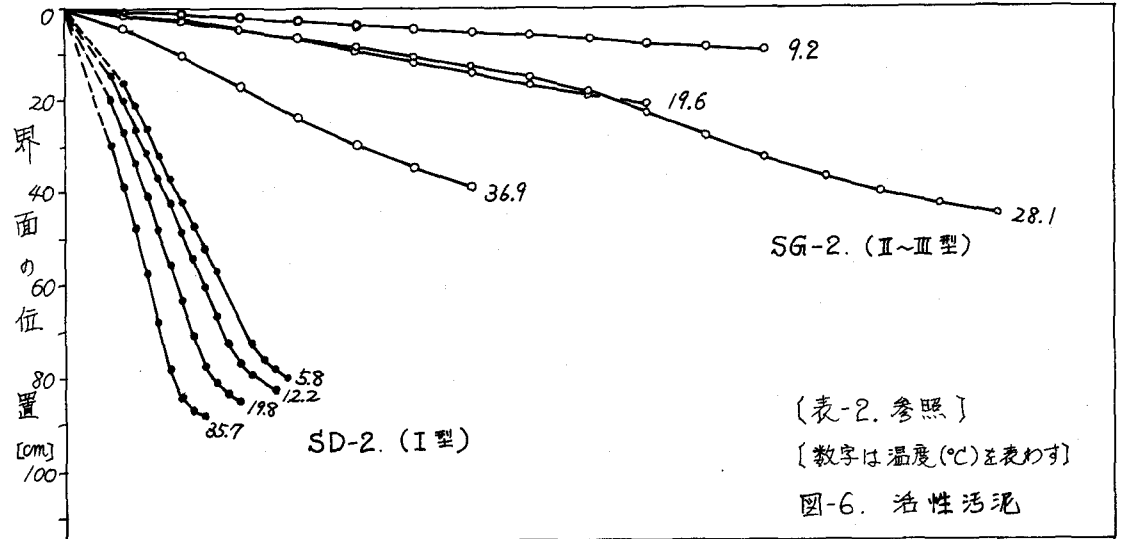


図-6, 7, 8. 濃度と温度による沈降曲線の変化

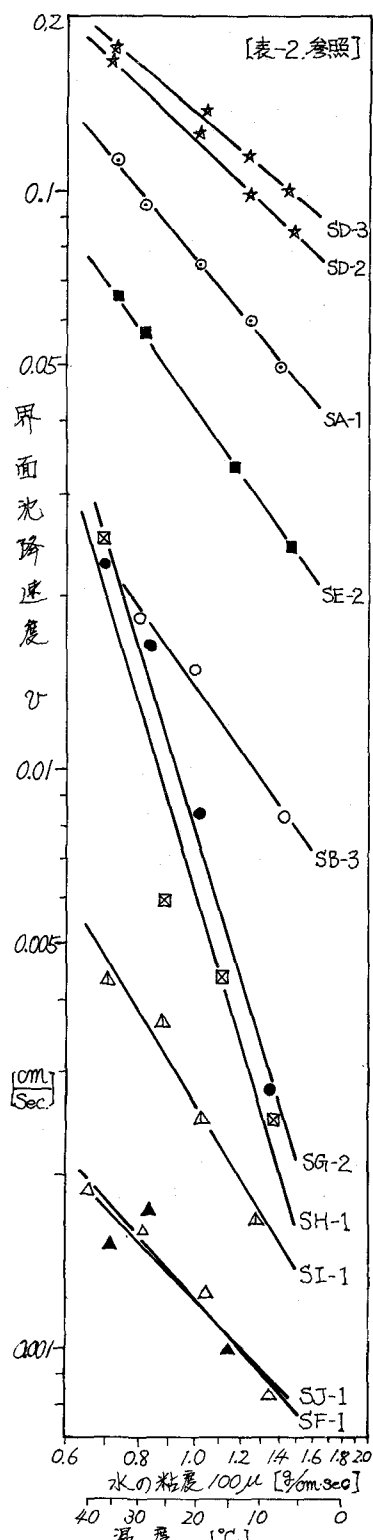


図-10. 沈降速度の温度依存性

界面沈降速度と液(水)の粘度を対数グラフにとると、図-10の様に、ほぼ直線関係を示す。これを $v \propto \mu^m$ の形で整理し、最小二乗法により m を求めたものが、表-2である。サンプル名の同一アルファベットは同一日の試料を意味する。指数 m の変化を濃度 (V_f) に対して表現したものが、図-11である。この図の示す所は、同一濃度内における温度による界面沈降速度の変化の程度は、濃度が小さい内 ($V_f < 0.2$) は、親粘度の $-0.8 \sim -1.0$ 乗程度であるが、濃度の増加につれて m の絶対値が大きくなり、 $V_f \approx 0.3$ 付近では不連続的に大きくなる。みかけ上の温度依存性が非常に大きくなることを意味する。さらに濃度の大きな $V_f \approx 0.4$ 付近で再び1乗にもどる。但し、この高濃度域は絶対沈降速度が非常に小さくデータはやや不安定である。濃度の位置は異なるが、参考として示したカオリンフロックにおいても似たような m の絶対値の増大傾向を示している。

これらを現象的に説明すれば、濃度が、 $V_f \approx 0.3$ に近づくにつれ、同一初期濃度においても沈降曲線パターンが温度によって、I から II のパターンに近くなるためである。不連続領域は、温度変化による II から III へのパターン移行によるものである。このために m の絶対値が1をはるかに超えるのである。このような m の変化によって、濃度と温度による沈降機構の変化を明確にあらわすことができる。

4. 考察、実験結果の記述において、沈降速度の変化をパターンの変化として説明したが、素朴な疑問は、なぜ温度によってパターンの変化が生ずるのかということである。この疑問は、単粒子沈降の諸式(ストークス式など)では粘度に関する指数の絶対値は1より小さい値であるのに、ここにはなぜ1より大きくなるのかという疑問と同じことである。この疑問の解決は、初期濃度によってパターンの変化が生じる機構を解くことに関係する。

Sample	T.S. mg/l	V_f	m
① SA-1	4520	0.218	-1.19
② SB-1	3150	0.158	-0.88
③ SC-1	4460	0.202	-1.05
④ SD-1	5360	0.245	-1.24
⑤ SE-1	6230	0.277	-1.41
⑥ SF-1	4270	0.190	-0.85
⑦ SG-1	4920	0.210	-1.14
⑧ SH-1	5680	0.241	-1.04
⑨ SI-1	3800	0.172	-0.99
⑩ SJ-1	2620	0.116	-0.94
⑪ KA-1	2180	0.102	-0.84
⑫ KA-2	5060	0.217	-1.30
⑬ KA-3	6060	0.257	-1.44
⑭ KA-4	7190	0.407	-1.13
⑮ KA-5	3650	0.224	-0.96
⑯ KA-6	4980	0.284	-3.28
⑰ KA-7	5410	0.325	-3.25
⑱ KA-8	6640	0.386	-1.64
⑲ KA-9	9280	0.518	-1.03
⑳ KA-10	6680	0.076	-0.73
㉑ KA-11	11490	0.148	-0.87
㉒ KA-12	16030	0.191	-1.86
㉓ KA-13	13280	0.227	-2.38

表-2. 濃度と粘度項の指数 m

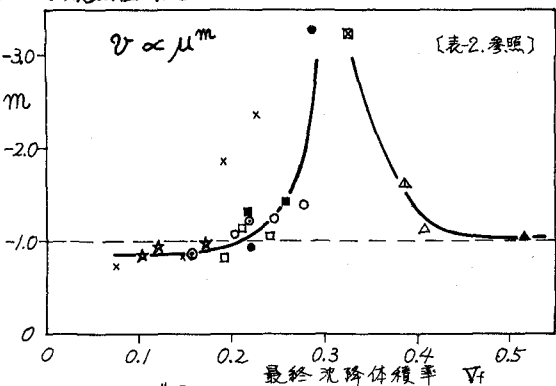


図-11. 濃度による粘度項の指数 m の変化

4-1. 既存の研究. 1はじめに、にも述べた様に、界面沈降に関する諸式は、活性汚泥のような粒子群には適用できず、最終沈降池や濃縮槽の設計には直接使えないことが種々の形で報告されている。臨界濃度は一定ではなく初期濃度によって変化すること⁷⁾や、初期水厚の影響が大きいことから、1ℓシリンダーなどによる“沈降特性”の考察は一般性をもたないこと⁸⁾などは、既に成書に述べられていることである。具体的には、現場の活性汚泥と関し、Dickら⁵⁾は、濃度以外の因子である初期水厚によって沈降速度が変化することを実験的に調べ、Kynch理論が設計には適用できないことを示し、また、古畑ら⁹⁾は、130cm沈降管による解析結果(初期濃度が低い方が臨界濃度が高い)と実際の濃縮槽による解析から、界面沈降速度によるオーバーフローレートによって設計した方がFitch式やCoe-Clevenger式よりも実際的であることを示している。

以上は、因子として初期濃度、初期水厚についての検討であるが、温度因子に関する定量的な研究は少ない。温度依存関係に関する記述は、Fischerstromら¹⁰⁾、古畑ら⁹⁾、Reedら¹¹⁾と見られる。Fischerstromらは、150cm沈降筒による現場活性汚泥の沈降性を検討し、その中で、沈降速度は水温変化による水の粘度変化にほぼ逆比例($m=-1$)し、Stokes則に従ったと述べている。また、Reedらは、寒冷地における活性汚泥の沈降性を1ℓシリンダー(35.1cm水深)において実験的に考察し、低濃度域ではStokes型の $v \propto \mu^{-1}$ であるが、高濃度になるに従いAllen型の $v \propto \mu^{-1/2}$ になり、圧密段階では温度の影響を受けないとしている。Reedらの実験結果の表より、本実験結果の図-10と同様な形で整理を行なったものの図-12である。低濃度では、 $v \propto \mu^{-1}$ を示している。しかし、臨界濃度(6647%)図-12、Reed¹¹⁾の実験結果に近い高濃度では、 $v \propto \mu^{-1/2}$ の関係があるというよりは、温度に対して不安定性を示していると言えよう。Reedらの記述は、本実験結果($1ml > 1$)とは逆のものである。一方、古畑らは、前述した実際濃縮槽の研究において、水温13.3~25.0℃の間に特に温度による影響はなかったと記載している。

4-2. 温度依存性に関する考察. 一般に、懸濁液の粒子群の凝集を伴う沈降における工学的考察においては、懸濁液内の凝集機構、および、形成されたフロック粒子群の固液分離過程における挙動の解明が重要である。ところで、温度変化は、この両者に影響を与えるため定量的な考察は容易ではない。

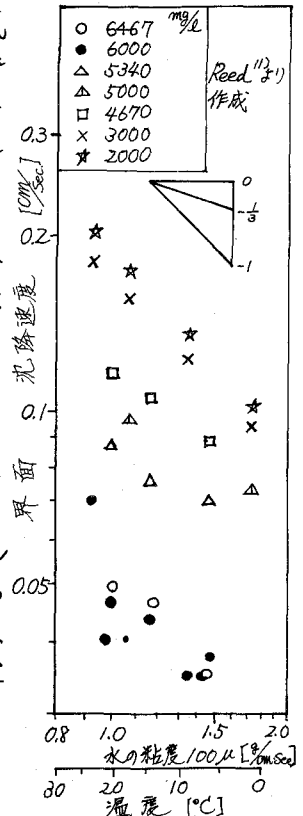
両挙動に関する因子を列記すると、

- (1). 液体の性質 …… 粘度, 密度.
- (2). 固体(粒子)の性質 …… 粒子密度, 粒子径, 粒子の弾性変形.
- (3). 粒子群の相互作用 …… 衝突, 粒子相互による構造形成, 凝集.

などである。これらの因子に対して、温度変化がどのような影響を与えるかについて考察を行なってみる。

まず、(2)の固体粒子の性質に関しては、粒子の弾性的性質は圧密の極く終期に問題となるものであり、またその温度依存性は大きいものではないであろう。粒子密度と粒子径は、凝集性フロックであるから、(3)の凝集性によって定まるものであろう。しかし、二の凝集性の定義は定まっておらず、従って、定量的に表現する方法もない。但し、フロック粒子群の動きが明瞭な低濃度のI型パターンにおける肉眼観察では、粒子群の形状の温度による変化は認められなかったことから、凝集性というものが、本実験結果を説明する主要因であるとは言いがたい。

(1)の液体の性質は、実験結果のところで述べた様に水の粘度というものが温度によって大きく変化することから、二の粘度の変化が沈降濃縮槽全体へ大きな影響を与えていることは明らかである。単粒子沈降速度の式



においては、沈降速度 v と粘度 μ の関係関数として、Stokes式は $v \propto \mu^{-1}$ 、Allen式は $v \propto \mu^{-1/2}$ などが知られているが、粘度の指数の絶対値が1よりも大きく、3以上になるような本実験結果は、このような単粒子沈降の粘度項変化のみでは説明できない。二ニにおいて、液体の性質の内残る因子である密度変化によって、 $V_f < 0.3$ の部分の実験結果を説明しようとしたのが、著者らのオ28回年次講演会の報告³⁾である。内容を簡単に述べれば、界面沈降に単粒子沈降の力学的アナロジーを用いて次元解析的に次式を得た。

$$v = K \cdot (S_s - S) \cdot w \cdot \eta^{-1/2}$$

二ニに、 v : 界面沈降速度, K : 主に濃度の関数, S_s : 粒子群を代表する密度(温度に対して一定)

S : 水の密度, η : 水の粘度, w : 指数

活性汚泥フロックのように粒子密度が小さいものの場合、液側(水)の温度による密度変化が微小(5~35℃で0.5%程度の变化)でも、密度差($S_s - S$)は大変大きく変化することになるとして、 $S_s = 1.0147 \text{ g/cm}^3$ として、実験的に w, K を求めた。その結果、粘度の指数部($1 - \frac{w}{20}$)が $-\frac{1}{2}$ から -1 の間に入り、一般に知られている単粒子沈降の関数と比較して矛盾のないような数値となることを示した。しかし、本報告の実験結果に示した様に、 $V_f > 0.3$ 以上のようなデータ($|m| > 3$)を加え考察すると、 $V_f < 0.3$ のデータは、沈降曲線パターン変化の一部であり、上述のような密度に関する解析は、高濃度条件下を含めた全体的な説明としては不十分であることがわかる。すなわち、 $V_f \approx 0.2$ というそれほど高くない濃度においても、いわゆる単粒子沈降の振盪としての、“沈降”という概念だけでは説明し切れない現象が生じ始めているということである。

結局、(3)の粒子群の相互作用に原因を求めなければならない。すなわち、粒子相互の衝突による粒子の沈降の阻害や粒子相互の接触による構造体の形成過程などが温度の影響を受け、単純な沈降機構の変化に加えて、沈降曲線パターンをより複雑な形に変化させているものと考えられる。界面沈降と粒子の構造体形成が関与していることは、Dickらの初期水深(汚泥高)が沈降速度と関係していることから指摘していることである。粒子群内部の相互作用に温度変化が影響を及ぼす機構は明らかではない。粒子群の下方向移動(沈降)の機構と同様、液の粘度が大まな役割をもっているのではないかと想像される。この機構の解析には、粒子相互作用を含めた混相流としての微視物理学的な考察が必要であろう。通常用いられる“沈降特性”とは、粒子群の下方向移動の機構と相互作用の機構の両者を含めた現象をあらわした言葉であると言うことができる。

5. おわりに. 活性汚泥の沈降沈縮過程を初期濃度と温度を変えて実験的に調べ、そこから得られた現象論的知識の提示と、その定性的な説明を示した。結果を応用的に表現すれば、粒子群内部相互作用が顕著にあらわれてくるような初期濃度(二ニの例では、 $V_f \approx 0.25 \sim 0.3$)では、わずかな濃度変動や温度変動によって、“沈降特性”が大変大きく変化(悪化)する可能性があるということである。最後に、実験を一手手伝っていた松岡、岩井英夫氏に感謝する。

- 参考文献
- 1). Richardson, J.F. et al.; *Sedimentation and Fluidisation, Part I*, Trans. Instn. Chem. Engrs. 32, 1954.
 - 2). 吉田直哉; 沈降濃縮, 森芳郎編「詳論・化学工学・単位操作I」, 朝倉, 1962.
 - 3). 大垣, 松尾; 界面沈降の機構に関する実験的考察, オ28回年次大会, II-191, 1973.
 - 4). 萩原, 理男; 熱回収, 気調和, 衛生工学会セミナーテキスト「排水の再利用と熱回収」, 1973.
 - 5). Dick, R.I. et al.; *Evaluation of Activated Sludge Thickening Theories*, ASCE, 93, SA4, 1967.
 - 6). 大垣, 松尾; 高濃度懸濁液の流動特性について, 土木学会論文報告集, 210号, 1973.
 - 7). エッセンフェルター・オゴア(岩井重久訳); 「废水の生物学的処理」, p162, コロナ社, 1965.
 - 8). 吉野善弥; 泥水沈降理論, 用排水処理叢書 No.3 「泥水沈降」, p14, 工学図書, 1966.
 - 9). 古畑義臣ら; 低濃度汚泥の沈降濃縮, オ10回水処理研究大会, 11-8, 1973.
 - 10). Fischerström, et al.; *Settling of Act. Sludge in Horizontal Tanks*, ASCE, 93, SA3, 1967.
 - 11). Reed, S.C. et al.; *Low Temperature Activated Sludge Settling*, ASCE, 95, SA4, 1969.