

(12) 回転円板処理槽内の流れ特性と物質移動について

東京大学工学部 松尾 友矩

〇伊藤 和夫

I. はじめに

好気性処理の回転円板装置では、円板が回転しながら空気中と水中を交互に移動するが、そのために処理槽内の流れは特異なものとなっている。特に円板が水中から空中に出る部分で、円板近傍から生じる渦流は、直観的には、生物膜のはく離や物質移動に大きく関与しているように思える。このような観点から、処理槽内の流れ特性を明らかにすることは意義のあることと考える。ここでは円板浸漬深さ、円板回転数などをパラメータとして、槽内の流れ特性を調べ、さらに生物反応がない単純な系での物質移動を調べた結果を報告する。

II. 実験装置および方法

実験装置は、図-1に示す。A型槽は壁面を円板に沿って作っており、B型槽は箱型で、円板と壁面との間を大きくあけてある。

主な実験は以下の三通りで、それぞれで測定項目及び方法を示す。

(a) 流れ特性を調べる実験

主流方向の平均流速 . . . 高感度ひずみ流速計（動圧円板径 5 mm）で測定

全体の流れ . . . 比重 1.02 の粒子をトレーサにして可視化する。

円板近傍から生じる流れ . . . 円板上にコンデンスミルクに染料を混ぜたものを薄く塗り可視化する。

(b) 酸素移動実験

酸素移動液膜係数 K_L . . . 非定常法で DO センサを使って測定し、対数差法で算出する。（脱酸素は N_2 曝気で行った。）

(c) 円板水中部での物質移動実験

みかけの物質移動係数 K^* . . . 円板面にコンデンスミルクを比較的厚く一様に塗り、液側に溶けてくるミルク中の電解質の濃度を、白金センサを用いて測定する。

水表面の位置は、図-2に示すように、円板半径で無次元化した座標 H を用いて表す。また円板が水中から空中に出る方側を出口部、空中から水中に入る方側を入口部と命名する。

主実験の条件一覧を表-1に示す。

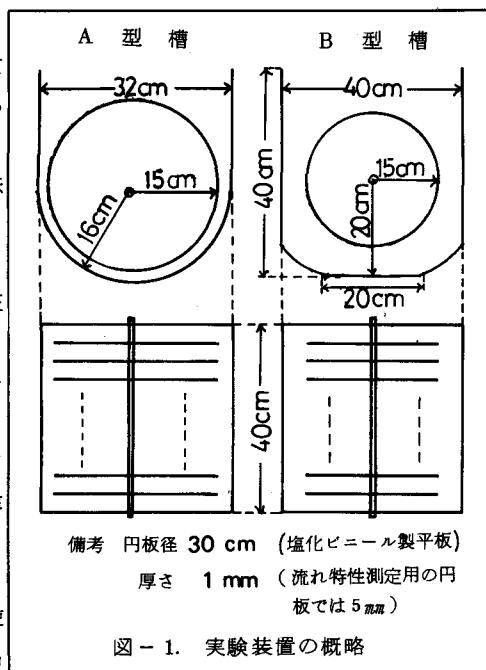


図-1. 実験装置の概略

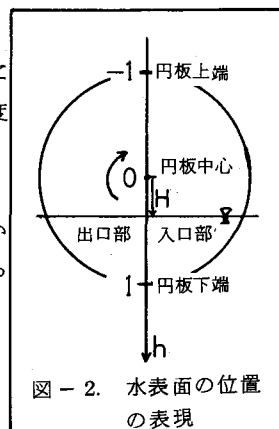


図-2. 水表面の位置の表現

III. 実験結果および考察

(a) 槽内流れ特性

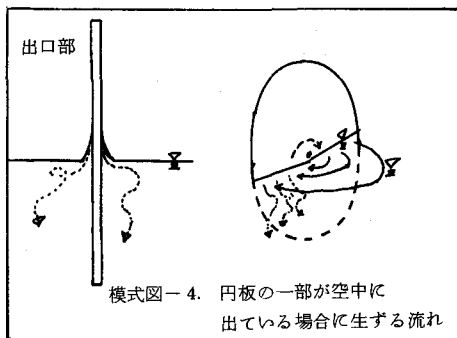
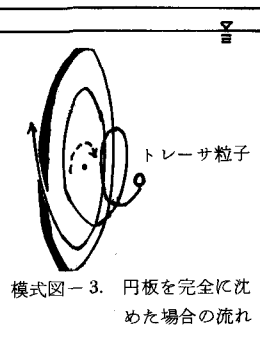
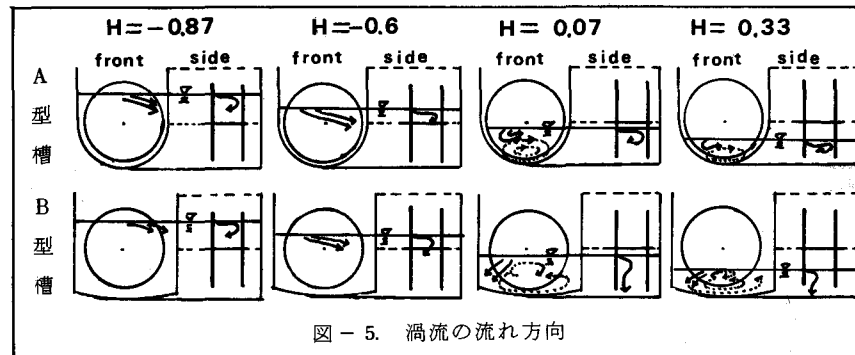
① 処理槽内の流れの記述

円板が完全に水中に没している場合は、トレーサ粒子を追跡することにより、全体の流れの様子は、ほぼ Von Kármán らのモデル¹⁾に合った流れとなることが観察された。すなわち、円板回転方向には、同心円状の流れが生じ、円板半径方向には遠心力により外に向かう流れとなり、このため円板垂直方向には、円板側に向かう流れが生じる。一つの粒子を追跡すると、円板回転方向に同心円がだんだん広がるように回わっていき、円板面に吸い込まれるように近づきながら、ついには遠方に掃き出される。このことを模式図-3に示す。これが円板を回転させた時に生じる基本的な流れである。

次に円板を空中に一部出すことによって生じる特徴的な流れは、模式図-4に示すように、入口部円板近傍から生じる表面流と、出口部円板近傍から、円板面にほぼ垂直な方向に生じ、巻き込むようにして下方に向かう渦流である。渦流の典型例を写真1に示す。表面流は、円板付着水膜の一部が、空中から水中に入るときに液本体の方に移ることによって生じているのではないと思われる。また渦流は、円板近傍の円板回転方向に沿った流れが、円板出口部少し上方で推進力を失い、逆に重力落下することにより生ずると考えられる。このような特徴的な流れに、回転による基本的な流れが加わり、全体の流動は、複雑な挙動を示す。

② 渦流に及ぼす浸漬深さ、側壁形状の影響

出口部円板近傍から生じる渦流が、どのような方向に流れていくか観察した結果を図-5に示す。浸漬深さが大きい場合 ($H = -0.87$, $H = -0.6$) は、回転に沿った流れが卓越して渦流はすぐその流れにのせられる。また鉛直下方に巻き込まれていくよりはむしろ、円板面垂直方向に、向かいの円板に達するような渦の流れとなる。



浸漬深さが小さくなると ($H = 0.07$, $H = 0.33$) 渦流の流れ方は、側壁の形状の違いを顕著に受ける。A型槽の場合、壁面がすぐ近くにあるため、回転に沿った流れは、上方に逆流していき、全体としては円板回転方向と同方向の循環流が生じ、それが主流となっている。渦流はその主流にのるため、浸漬深さの大きい場合と同様の傾向を示す。B型槽の場合は、上述の循環流よりはむしろ、槽底部を戻る循環流が主流となる。渦流もその流れにのるため、鉛直下方への動きはさまたげられない。また、向かいの円板に達すること

表-1. 主実験一覧

	槽型式	円板回転数 (rpm)	円板枚数	水温℃
RUN I	A 型	$5.1 \pm 0.2, 13.4 \pm 0.4, 28.2 \pm 0.2$	11	25 ± 1
RUN II	B 型	$13.4 \pm 0.3, 28.3 \pm 0.3$	11	23.1 ± 0.1
RUN III	A 型	$5.1 \pm 0.2, 13.3 \pm 0.5, 28.5 \pm 0.3$	11	25.0 ± 0.5
RUN IV	A 型	$13.2 \pm 0.5, 28.5 \pm 0.3$	5, 8, 10, 12	24 ± 0.5
RUN V	B 型	$13.4 \pm 0.3, 28.2 \pm 0.2$	11	23.0 ± 1
RUN VI	B 型	13.6 ± 0.1	5	19.7 ± 0.3

もまれである。

③ 表面流速に及ぼす円板回転数の影響

円板間かく3.3 cmのときの表面流速を、浮遊粒子をトレーサとして回転軸位置を中心に10 cmのスパンで測定した結果を表-6に示す。高回転数では、出口部の水流の乱れにより、測定不能となる場合が多かった。結果をみると、円板回転数を上げると、表面流速は若干小さくなる傾向にあることがわかる。これは円板回転により形成される主流とは逆方向に表面流が流れるため、回転数が高くなると、水面下の主流が強くなり、その影響が表面流に及ぶためと考えられる。

表-2. 表面流速と円板回転数

水表面の位置 回転数	槽型式	H=-0.86	H=-0.6	H=0.03	H=0.33
5 RPM	A	6.9	11.9	11.4	8.8
	B	—	11.7	11.2	11.7
13 RPM	A	*	10.8	10.2	7.9
	B	—	10.6	9.9	9.4
28 RPM	A	*	*	9.3	*
	B	—	*	9.6	8.6

流速の単位は cm/sec

*印は測定不能を示す

④ 回転主流の流速分布

円板回転方向の流れの深さ方向の流速分布を、円板間かく3.3 cmの中心で測定した結果を図-6に示す。

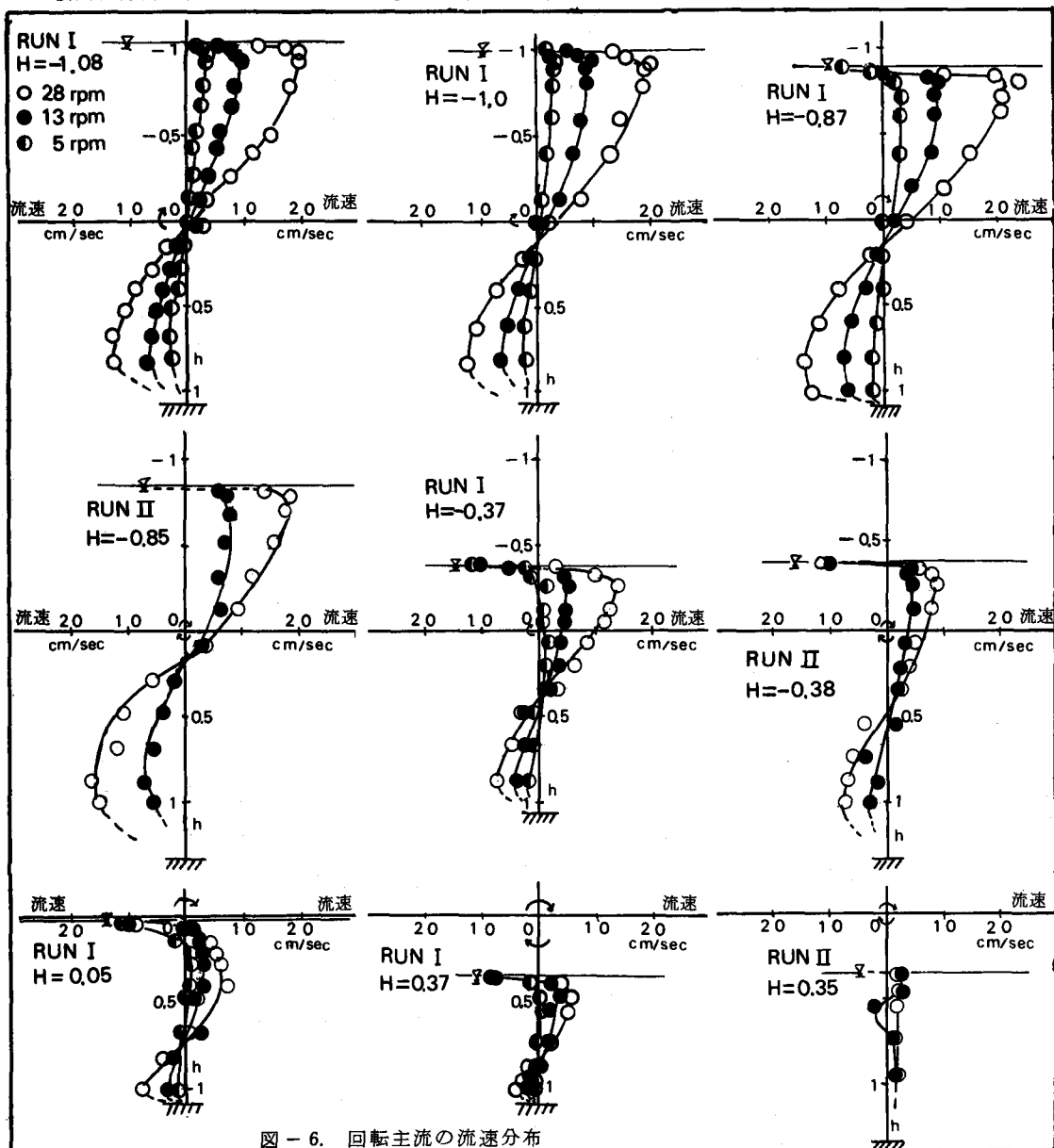


図-6. 回転主流の流速分布

なお便宜上、測定点は円板回転軸中心より1 cm出口部側へずらしてある。結果をみると、浸漬深さによらず、水面下1 cm程度で最大流速が得られるようである。また水面の位置 $H = -0.87$ で、全体としての流れが一番速くなっていた。壁の影響を強く受けるA型槽(Run I)では、流速分布が上下非対称で、自由表面側の方が速い。逆に壁の影響が少ないB型槽(Run II)では、ほぼ上下対称の流速分布となっている。また主流方向とは逆に流れる表面流の層は薄く、数mm程度と考えられる。

(b) 酸素移動特性

酸素に関する物質移動係数 K_L と円板浸漬深さの関係を図-8に示す。 K_L の算出にあたっては、気液接触面積の評価が問題となるが、ここでは円板空中部の円板ぬれ面積(空中部のうち再び水中に入る部分)と槽内自由表面の面積の和で評価してある。

① DOセンサに関する検討

使用したDOセンサは規格として10 cm/sの流速を必要とするため、センサの追従性の確認実験を行なったところ、Maximumの応答は、低速時8割程度に落ちるが、濃度と出力に線形性が保たれていたため、対数差法を用いて K_L を算出する上では問題ないといえる。

② 気液接触面積の評価に関する検討

空中部円板ぬれ面積の気液接触面積に占める割合を図-9に示す。浸漬深さが中間の領域($-0.4 < H < 0.8$)では、円板ぬれ面積の比率が大きいので、もしこの評価が過大なものならば、 K_L 値が低く算出されてしまう。そこで円板枚数を変えて、評価の妥当性を検討する実験を行なった結果を図-10に示す。空中部円板ぬれ面積と総括酸素移動容量係数 $K_L a$ は、ほぼ比例しているといえるので、浸漬深さの浅い領域では、空中から円板付着水膜を経由して液側に移る酸素移動が主な移動機構であり、気液接触面積の評価も妥当であると考えられる。

以上のことをふまえて図-8の結果をみると、 K_L は円板回転数の影響を受けるが、いずれの場合も、 $H = -0.8$ 付近で K_L は最大となっている。また $H > -0.4$ では、側壁の影響をほとんど受けないといえる。

③ K_L に及ぼす槽内流動特性の影響(浸漬深さの大きい領域)

円板間かくを変えることによって、槽内の流動特性を変え、それを水面下1 cmでの円板回転方向の主流速で代表させ、 K_L と比較したものを図-11に示す。浸漬深さが大きい場合は K_L と代表流速がほぼ見あう形となっており、 K_L は槽内の流動特性に支配されていると考えられる。空中部円板ぬれ面積の比率の大きい浸漬深さ($H = -0.4$)の場合でも K_L が槽内流動特性の影響を受けている。これは槽内流動特性が付着水膜と液側の交換を左右する因子になっているためと思われる。図-12に水面下1 cmでの代表流速と K_L の関係を示す。この図から水面の位置 $H \leq -0.4$ の領域では、浸漬深さの違いや、回転数の違いは、槽内の流動特性を通じて K_L と結びついていると言うことができる。

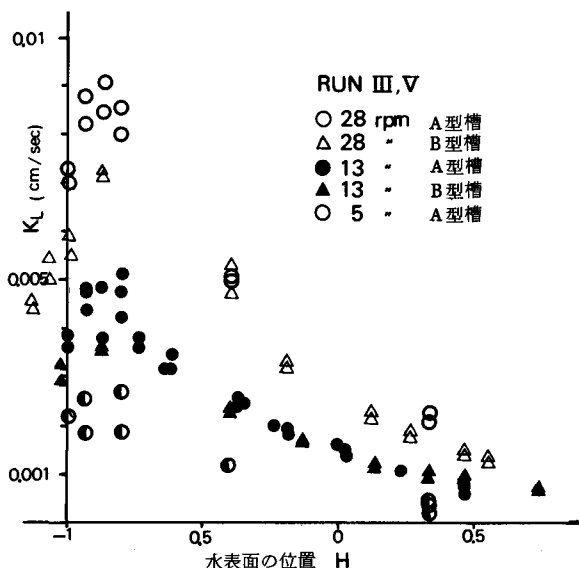


図-8. 円板浸漬深さと K_L

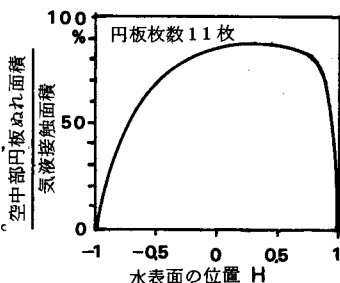


図-9. 空中部ぬれ面積の比率

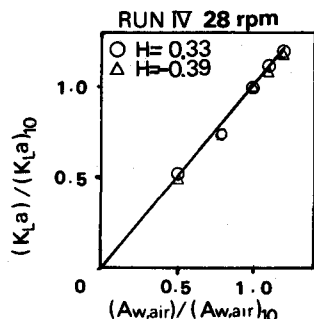


図-10. 円板10枚の時を基準とした比 Ka と比円板ぬれ面積

④ K_L に及ぼす円板回転数の影響（浸漬深さの小さい領域）

図-13 に浸漬深さの小さい場合の K_L と円板回転数の関係を示す。この領域では、円板回転数は主として付着水膜の気相との接触時間や、付着水膜厚さに関与し、 K_L と関係していると思われるが、なお検討を要する。

⑤ $K_L a$ と浸漬深さ

図-14 に示すように、実質的な酸素移動能を示す $K_L a$ は浸漬深さが小さくなるにつれて、増大する傾向にある。

(c) 円板水中部での物質移動特性

液中から生物膜内への物質移動は付着水膜を通る分子拡散のみならず付着水膜の更新にもよると考えられ、また円板出口部では特に更新の機会が多くなると思われる。このような観点から、浸漬深さを変えて、コンデンスミルクの溶出実験を行ない、円板が空中に出ることによって生じる特異的な流れが、物質移動に影響を及ぼすのかどうかを調べてみた。

図-15 にコンデンスミルクの溶出パターンを示す。円板面に塗ったコンデンスミルクの初期量によらず、同様な溶出パターンを示し、ほぼ対数的な溶出となっている。そこで、溶出速度は残存量と円板浸漬面積に比例すると仮定して、比例定数 K^* をみかけの物質移動係数と考える。

$$\frac{dm}{dt} = -K^* A_w m$$

m ; 円板に残存しているミルク量

A_w ; 円板浸漬面積

K^* ; みかけの物質移動係数

図-16 にミルク残存率の推移を示す。初期の攪乱や流れの非定常性を考慮して、比較的直線に乗る残存率 20～50 % 域での傾きを、最小 2 乗法により算出したものを表-3 に示す。

表-3. 残存率曲線の傾き ($K^* A_w$)

水面の位置	$-K^* A_w$ (1/Sec)	回帰係数
$H = -1.07$	-8.73×10^{-3}	-0.993
$H = -0.87$	-1.05×10^{-2}	-0.993
$H = -0.67$	-1.22×10^{-2}	-0.992
$H = -0.4$	-1.12×10^{-2}	-0.985
$H = 0.07$	-1.11×10^{-2}	-0.967

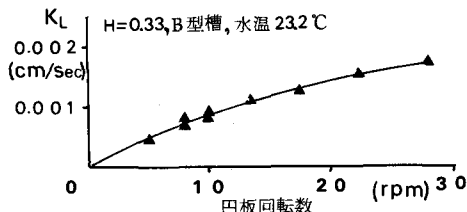


図-13. 円板回転数と K_L

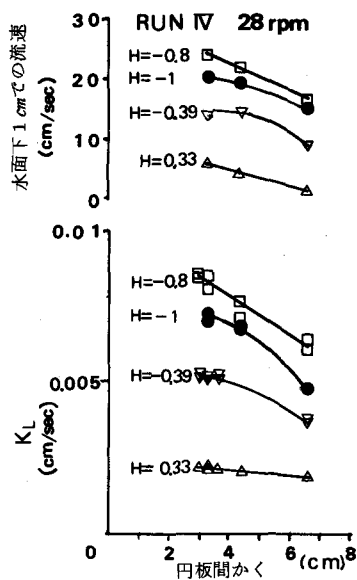


図-11 円板間かくと K_L

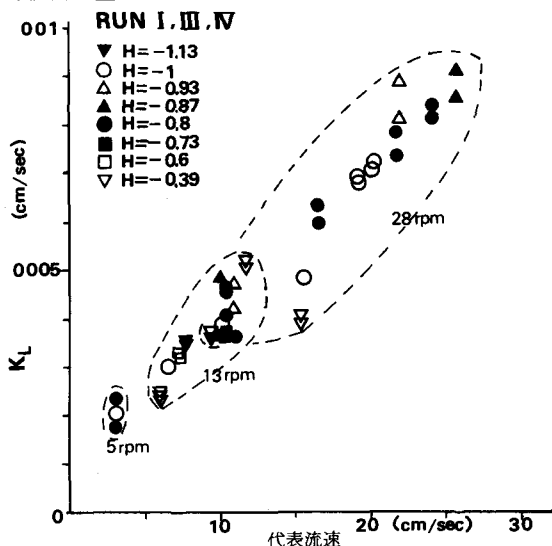


図-12. 水面下 1 cm での代表流速と K_L

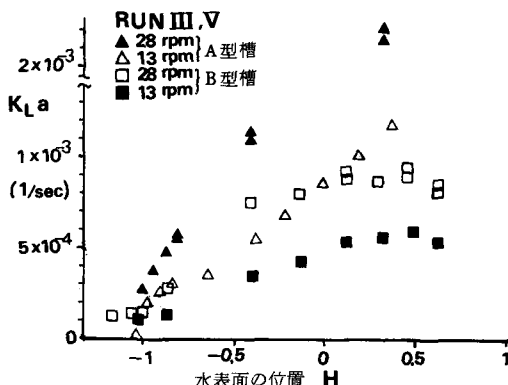


図-14. 浸漬深さと $K_L a$

図-17 は、円板浸漬深さと K^* , K^*A_w の関係を示したものである。みかけの物質移動係数は、やはり円板を完全に沈めた状態から、円板を空中に出すに従って大きくなる。しかし円板を沈めた方が面積的には有利であるので、実質的な物質移動能の最大値は、浸漬率 50～100 % の間に存在するということを示唆している。

Ⅳ. まとめ

- ① 回転円板処理槽内の流れは複雑な挙動を示すが、基本的には、円板回転により形成される循環流と、円板入口部より生じ、出口部に向かう表面流、そして、出口部円板近傍から生じる渦流の三つによりなっている。
- ② K_L の最大値は浸漬深さの大きいところ ($H \cong -0.8$) で得られた。
- ③ 浸漬深さが大きい場合は、 K_L と主流方向の流速がよく対応していた。
- ④ K^* は浸漬率 50～100 % の間では、浸漬率が小さい方が大きく、やはり円板出口部で生じる渦流が、物質移動に大きく関与していると考えられる。
- ⑤ 実質的な物質移動能を示すと思われる K^*A_w の最大値は、浸漬率 50～100 % の間に存在するようである。

参考文献 1) P.A. ロングウェル, 化学技術者のための流れ学, 共立出版

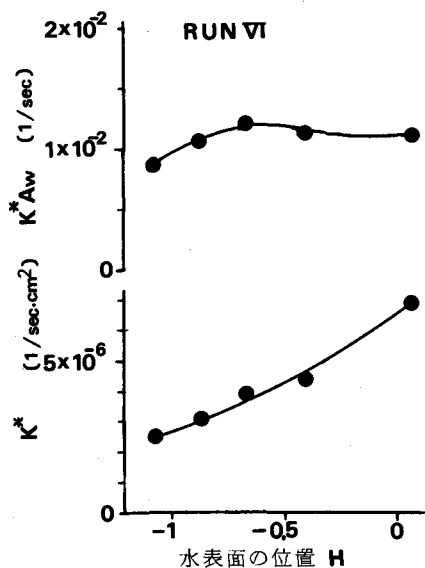


図-17. 円板浸漬深さと K^* , K^*A_w

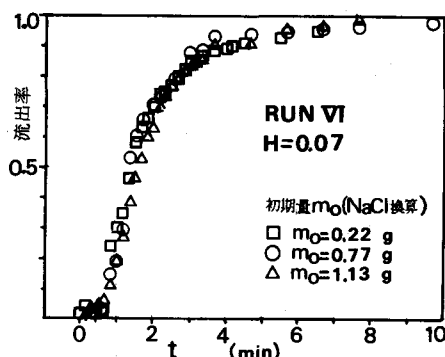


図-15. コンデンスミルクの溶出パターン

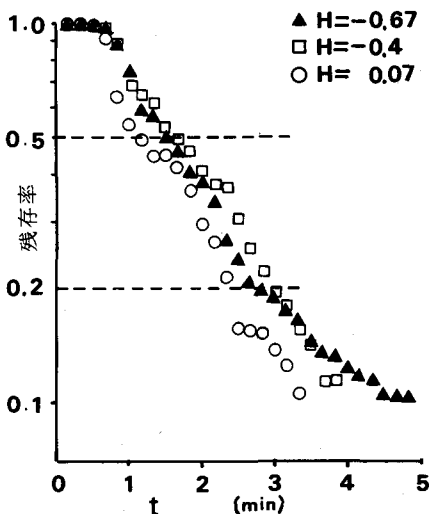
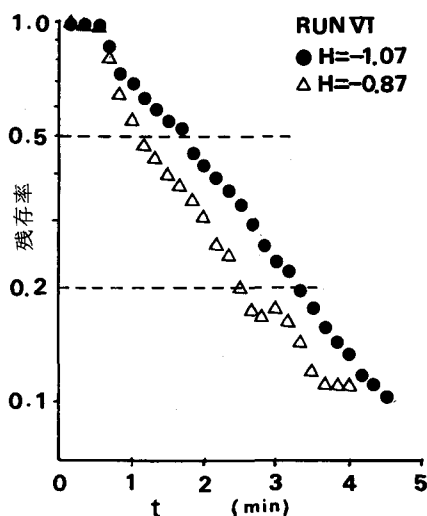


図-16. コンデンスミルク残存率の推移