

攪拌におけるバッフル効果

Baffle Effect for Mixing



(化)技術部 設計第1課
徳岡 洋 由
Hiroyuki Tokukuoka

Baffle is inserted in almost every vessel for mixing a low viscosity liquid. Its reasons are to form flow pattern to be aimed, to control flow characteristic and to promote heat transfer. Flat plate baffles are generally used in agitated vessel, and there are many reports on the number of baffle and baffle width.

This paper describes baffle effect on basical mixing operation from the point of insert depth and clearance to vessel wall.

まえがき

攪拌槽におけるバッフルの役割は、攪拌翼に比べ地味であり扱われる関心も少なくなりがちであるが、低粘度攪拌では大抵の場合、バッフルが挿入されている。その理由として次の3点が挙げられる。

- (1) 攪拌目的に応じたフローパターンの形成
- (2) 攪拌動力、吐出流量、剪断速度等の流動特性値の制御
- (3) 伝熱面積の確保

また(2)の流動特性値からみたバッフルの作用は次の通りである。

- ① 動力数 N_p の増加
- ② 吐出循環流量係数 N_q の増加
- ③ 剪断性能 $(N_p/N_q)^{1/2} \cdot d/D$ の増加

バッフルの選定では、バッフルの形式、取付位置及びバッフル強さ（動力数 N_p を変化させる強さ）の決定を行うが、一般に用いられるバッフルは、平板バッフルが圧倒的に多い。平板バッフルの場合、バッフル幅や本数を扱った報告例は多数ある。しかし、挿入深さや槽壁とのスキマを扱った報告は極めて少ない。実際の攪拌槽型反応槽では、平板バッフルはもとよりフィンガーバッフル、D型バッフル、丸バッフルや伝熱管を兼用した蛇管コイル、ヘアピンコイルなど種々の形式が用いられている。

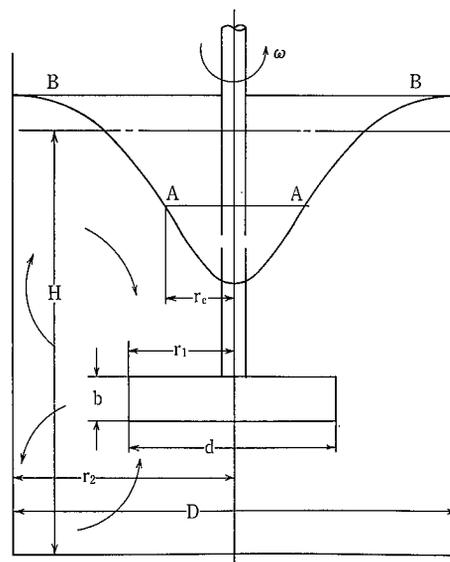
本稿では、このうち平板バッフルの挿入深さや槽壁とのスキマに着目し、動力特性、混合特性など攪拌の基本的操作に対するバッフル効果について述べる。

1. 動力数 N_p に与える影響

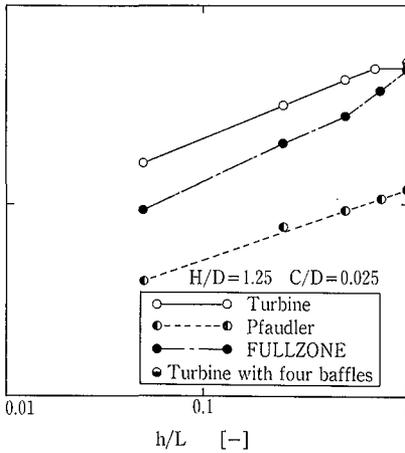
円筒型攪拌槽内においてバッフルの無い条件で翼を回転させると、第1図に示すように液自由表面中央にくぼみが生ずる。これは翼と共に回りする固体的回転部（強制渦： $\omega = \text{const}$, $r < r_c$ の領域）及びその外側に自由渦（ $ur =$

const , $r_c < r < r_2$) が形成されるため、軸中心部と槽壁部とで圧力差が生ずることによる。この状態では周方向の回転流が支配的であり上下循環流は少ない。バッフルは周方向回転流を上下循環流へ変換するために挿入され、このとき固体的回転部の領域は減少する。そして固体的回転部の領域の減少は、動力数 N_p の増加となる。

一般に挿入されるバッフルの強さはバッフル幅とバッフル本数で表されている。4枚の平板バッフルでは、 $W/D \cong 0.13$ で完全邪魔板条件となるが、通常の攪拌槽では $W/D \leq 0.1$ で選定されるケースが多い。このような完全邪魔板



第1図 バッフルの無い攪拌槽内のフローパターン
Fig. 1 Flow pattern of agitated vessel under unbaffled condition
[S. Nagata: Mixing (1975)]



第2図 バッフル挿入深さと N_p の関係
Fig. 2 Relation of insert depth of baffle and N_p

条件以内のバッフル幅 (W/D) とバッフル本数 (n_B) に対する動力数 (N_p) の関係式が永田らにより報告されている。

$$\frac{N_{p \max} - N_p}{N_{p \max} - N_{p\infty}} = \{1 - 2.9(W/D)^{1.2} \cdot n_B\}^2$$

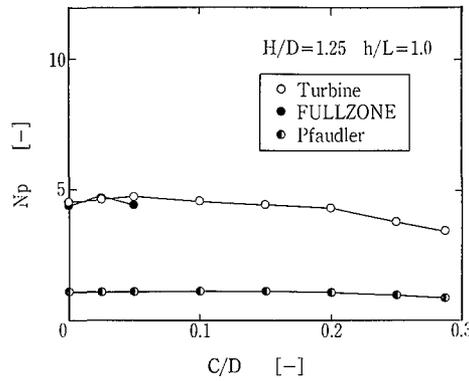
本稿ではバッフル挿入深さと槽壁とのスキマが N_p に与える影響を調べた。その結果を第2図及び第3図に示す。

攪拌翼の比較には剪断型の代表としてタービン翼、吐出循環型の代表としてファウドラ翼をそしてワイドバドルの代表としてフルゾーン翼を用いた。平板バッフルは槽径の10%幅とし、2枚設置している。 $h/L=1$ の条件がバッフルを下鏡の T.L. まで挿入した場合を示している。バッフル強さを $W/D = (n_B \times W)/(4 \times D)$ と定義すれば、 $h/L=1$ の条件が $W/D=0.05$ のバッフル強さとなる。タービン翼の場合は $W/D=0.08 \sim 0.1$ の組み合わせが一般的であるがファウドラ翼やフルゾーン翼では $W/D \leq 0.05$ のバッフル強さを標準的に選定しているため、 $W/D \leq 0.05$ のバッフル強さに主眼をおいて比較した。なお、その他の条件を次に示す。

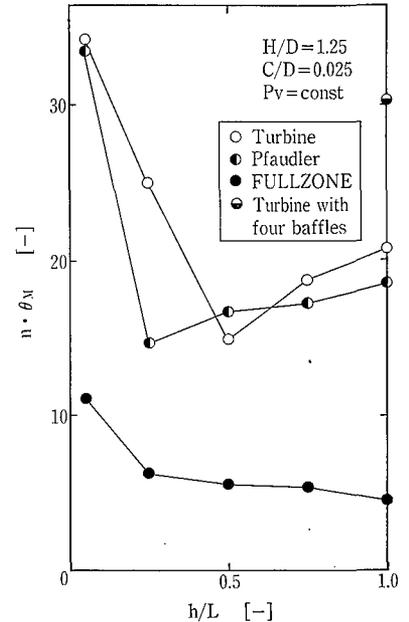
- 槽径 : $\phi 400$ mm
- 液深 : 500 mm
- H/D : 1.25
- 攪拌翼 : タービン翼 $d/D=0.4$
 ファウドラ翼 $d/D=0.55$
 フルゾーン翼 $d/D=0.6$

バッフル幅、本数の変化に伴い N_p が変化することはすでに述べたが、バッフル挿入深さによっても N_p が変化することが第2図から読み取れる。このことから N_p はバッフル幅、本数だけに依存するものではないということがいえる。なお、バッフルを引き上げていくことにより N_p が低下するのは先に述べた固体的回転部 (r_c) の増加によるものと考えられる。

第2図をもとにバッフル挿入深さと N_p の関係をまとめると次のようになる。



第3図 槽壁とのスキマと N_p の関係
Fig. 3 Relation of clearance to vessel wall and N_p



第4図 バッフル挿入深さと混合時間の関係
Fig. 4 Relation of insert depth of baffle and mixing time

- タービン翼 : $N_p \propto (h/L)^{0.44}$
- ファウドラ翼 : $N_p \propto (h/L)^{0.31}$
- フルゾーン翼 : $N_p \propto (h/L)^{0.50}$

一方、 N_p と W/D の関係について弊社の既報 (Vol. 24, No. 1 1980) を引用すると $W/D < 0.033$ では

- タービン翼 : $N_p \propto (W/D)^{0.46}$
- ファウドラ翼 : $N_p \propto (W/D)^{0.25}$

で報告されている。 h/L と W/D の両者の指数を比較してみると、タービン翼はほぼ同等であるがファウドラ翼は h/L のほうが若干大きくなっている。これはバッフル幅 (W/D) よりバッフル挿入深さ (h/L) のほうが、 N_p を減少させる固体的回転部の生成により寄与する傾向があることを示している。

次に、第3図の平板バッフルの槽壁とのスキマと N_p の関係を見ると、タービン翼、ファウドラ翼とも $C/D > 0.2$ で明かな N_p の低下が見受けられる。これは第2図に示される N_p の低下と同様に固体的回転部の増加によるものと考えられる。第3図の平板バッフルの場合、槽壁とのスキマは大抵 $C/D < 0.1$ の範囲で使用されているため、この範囲でのスキマの選定に対しては N_p の増加、減少を特に考慮する必要がないと考える。

2. 混合時間に与える影響

第4図にバッフル挿入深さと混合時間の関係を示す。また、バッフル挿入深さの変化による混合経過の比較を写真1に示す。攪拌翼、バッフル、液深は N_p の検討に用いた条件と同一である。なお、混合時間の決定はヨード澱粉の呈色をチオ硫酸ナトリウムで還元脱色する脱色法による。

タービン翼、ファウドラ翼共にバッフルを引き上げす

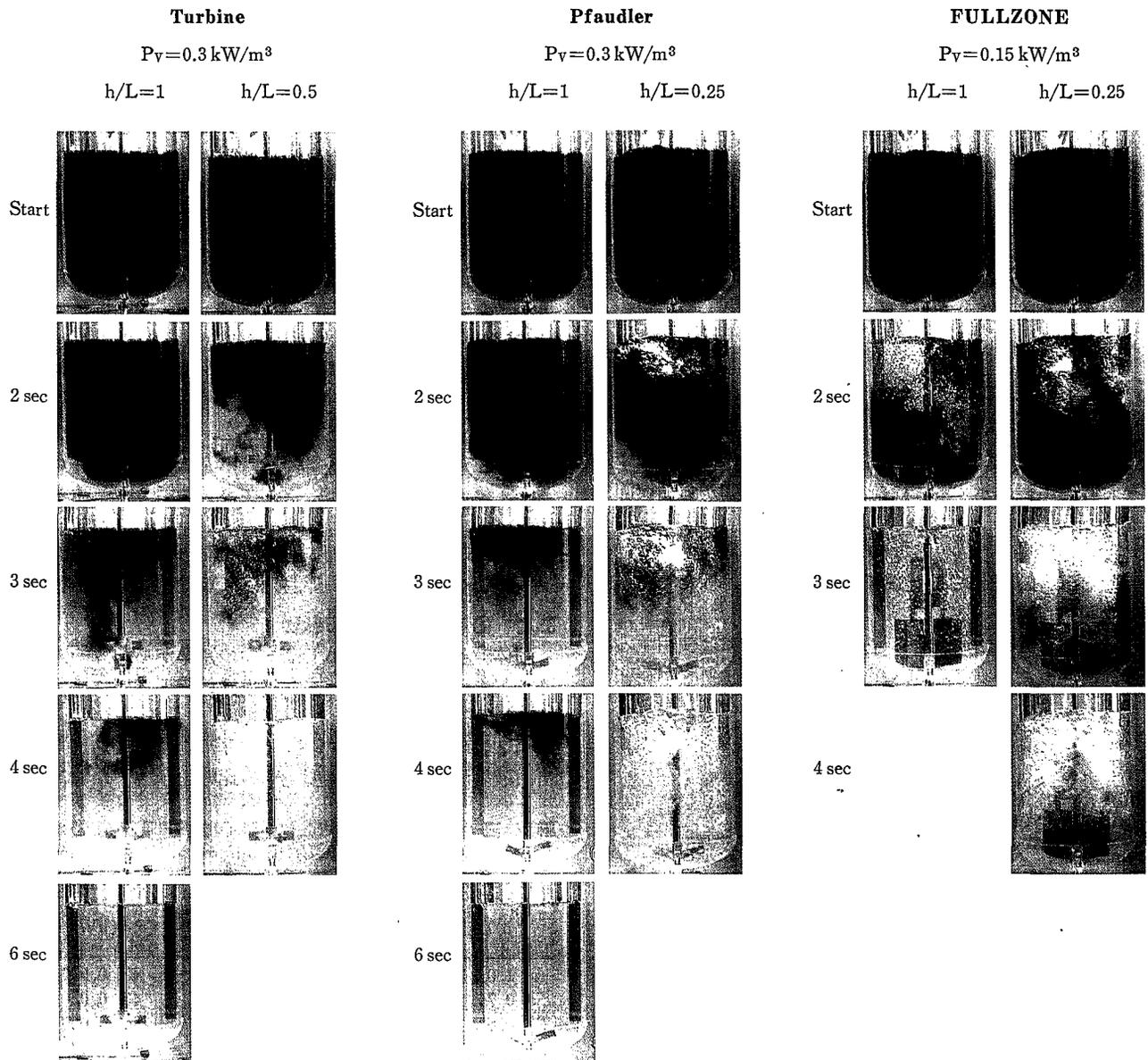


写真 1 混合経過の比較 $\mu=0.001 \text{ Pa}\cdot\text{s}$
 Photo. 1 Comparison in transition of mixing

ぎると混合時間の増大を招く。特に、 $h/L=0.05$ という条件は周方向の回転流が支配的で、上下循環流が少ないというバップル無しの流動状態に近くなっているため混合時間が増大したものとする。次に混合時間が最も小さくなるバップル挿入深さに着目すると、タービン翼の場合は $h/L=0.5$ であり、ファウドラ翼の場合は $h/L=0.25$ とタービン翼に比べバップル挿入深さの小さい方に混合時間が最小となる条件が存在している。このことは回転流を強く抑制する必要が少ないというファウドラ翼の特性を示していると考えられる。

一方、フルゾーン翼の混合時間はタービン翼、ファウドラ翼とは異なりバップルを引き上げることによってわずかなではあるが増加していく傾向がある。このことからフルゾーン翼は鏡 T.L. 付近までバップルを挿入した方が混合効率が良いということがいえる。

次に、第 5 図に槽壁とのスキマと混合時間の関係を示す。

タービン翼、ファウドラ翼共、槽壁とバップルのスキマが槽径の約 10% を越えると混合時間が増大する。一方、混合時間が最小となるスキマはタービン翼とファウドラ翼では異なる。混合時間を小さくする C/D の条件は、ファウドラ翼の方がタービン翼よりも大きい方に存在している。特に、ファウドラ翼の場合 C/D=0.1 で混合時間が最小となる。この条件をバップルの中心位置に置き換えると槽径の約 70% にあたり、ファウドラ翼でよく組合わされるフィンガーバップルや D 型バップルの取付位置にほぼ相当している。

混合時間の短縮は吐出循環流量係数 N_q の増大によるものである。一般に、2~10 回の循環で十分な混合状態が得られると言われており、この考え方をい用い混合時間から各翼の N_q を推定した。次にその推定方法を示す。

混合時間 θ_M と攪拌翼によって生ずる吐出循環流の平均循環時間 θ_c との間には次式に示すような比例関係が成立する。

$$\theta_M = k\theta_c$$

θ_c は槽内の液容量 V と吐出循環流量 Q_c を用いると次式で表される。

$$\theta_c = V/Q_c$$

ここで $Q_c = N_q n d^3$

よって N_q は次式で与えられる。

$$N_q = V \cdot k / (\theta_M \cdot n d^3)$$

よって式から N_q と $n \cdot \theta_M$ は次式に示す比例関係で表される。

$$N_q \propto 1 / (n \cdot \theta_M)$$

すなわち混合時間が小さくなれば吐出循環流量係数 N_q はその逆数に比例して増大することを表している。

第1表に代表的なバッフル条件での N_q の比較を示す。なお、第1表に示す N_q は測定した混合時間から循環回数 $k=2$ として算出した値である。

以上の結果より、2枚平板バッフルを使用した撹拌槽における混合時間からみた最適な挿入深さとスキマの関係は第6図となる。

すなわち効率よく混合を達成させるためには使用する撹拌翼に適したバッフル挿入深さや槽壁とのスキマが存在することをよく考慮し選定することが重要であると考えられる。

第1表 (a) h/L による N_q の変化

Table 1 (a) Change of N_q for h/L

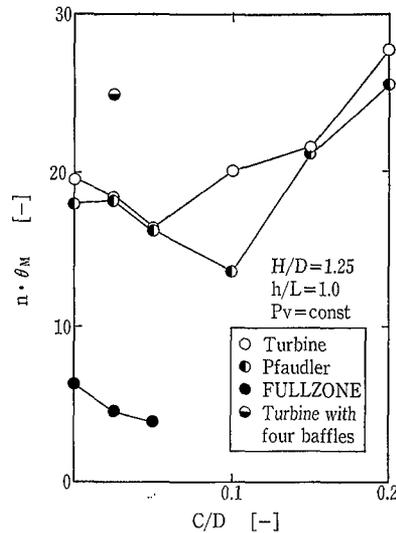
Imp.	Turbine			Pfaudler		FULLZONE	
h/L	*1	1	0.5	1	0.25	1	0.25
N_q	1.14	1.57	2.28	0.61	0.83	1.84	1.34

*平板バッフル4枚の場合を示す

第1表 (b) C/D による N_q の変化

Table 1 (b) Change of N_q for C/D

Imp.	Turbine		Pfaudler		FULLZONE	
C/D	0	0.1	0	0.1	0	0.05
N_q	1.46	1.75	0.61	0.81	1.35	2.16



第5図 槽壁とのすきまと混合時間の関係

Fig. 5 Relation of clearance to vessel wall and mixing time

3. 適用例の紹介

3.1 固液撹拌に与える影響

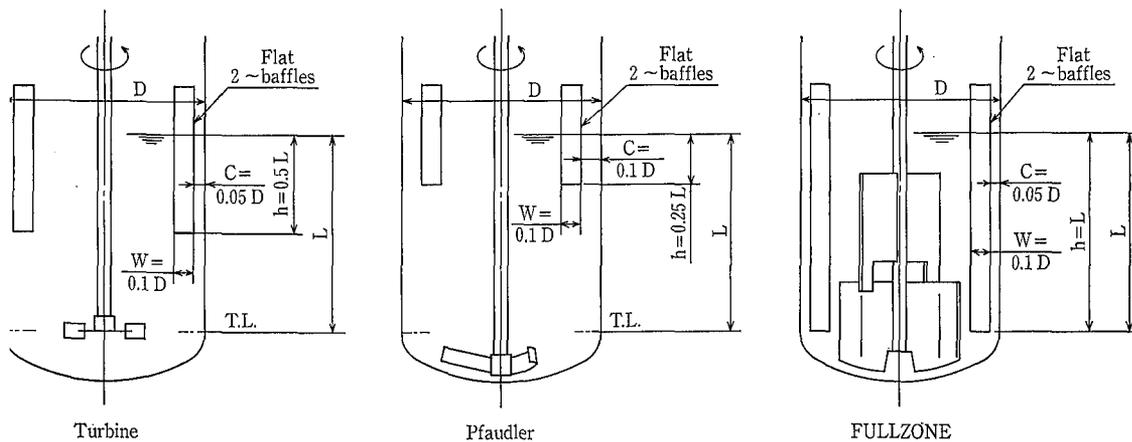
固体粒子の撹拌に関しては二つの基準がある。一方はオフボトムの撹拌であり、もう一方は粒子の均一浮遊の撹拌である。

第2表に各翼のバッフル挿入深さに対するオフボトムと自由液表面近くの粒子濃度 (ϕ) の比較を示す。なお、固体

第2表 バッフル挿入深さと粒子浮遊の比較

Table 2 Comparison of h/L for uniform solids suspension

Imp.	h/L	Turbine			Pfaudler			FULLZONE		
		n [R/M]	P_V [kW/M ³]	ϕ [-]	n [R/M]	P_V [kW/M ³]	ϕ [-]	n [R/M]	P_V [kW/M ³]	ϕ [-]
Off bottom	1.0	115	0.054	—	135	0.123	—	45	0.040	—
	0.75	115	0.050	—	133	0.105	—	45	0.039	—
	0.5	115	0.044	—	134	0.096	—	45	0.039	—
	0.25	114	0.042	—	132	0.074	—	45	0.039	—
Solids suspension	1.0	228	0.483	0.198	196	0.353	0.211	80	0.154	0.250
	0.75	229	0.489	0.223	203	0.355	0.217	87	0.157	0.288
	0.5	239	0.485	0.291	212	0.356	0.276	93	0.153	0.30
	0.25	260	0.483	0.297	222	0.354	0.284	93	0.107	0.30



第6図 混合時間からみた2枚平板バッフル使用時の最適条件

Fig. 6 Optimum condition on two flat baffles from point of mixing time

粒子は比重1.3/粒径 600～800 μ のイオン交換樹脂を使用し、嵩体積で30%投入した。したがって、自由液表面近くの粒子濃度が30%に到達すれば、一様濃度の攪拌が達成されていると考えることができる。

まず、オフボトムに必要な回転数に着目すると、各翼ともほぼ一定の回転数になっている。このことはオフボトムの攪拌がバッフル挿入深さに依存せず、翼そのものの特性に依存することを示していると考えられる。

一方、粒子の均一浮遊に対してはバッフル挿入深さの小さい方が同じ動力で比較した場合、自由液表面近くの粒子濃度を高くすることができる。すなわちバッフルを引き上げて使用したほうが、粒子の均一浮遊に対しては良いという結果が得られた。

以上のことから粒子均一浮遊に対して平板バッフルを使用する場合は、バッフル挿入深さを小さく選定する方が動力効率が良いと考える。

3. 2 表面ガス吸収性能に与える影響

第3表にバッフル挿入深さと表面ガス吸収性能の代表例の比較を示す。表面ガス吸収性能は水-空気系で、攪拌により表面から液中に巻き込まれた空気中の酸素が水に溶解していく速度を測定し、 K_{La} を算出した。

当社では過去の経験から、表面ガス吸収に対しては弱いバッフル条件下で積極的にボルテックスをつくり、表面更新を多くするよう攪拌翼、バッフルを選定してきた。その点、本データは如実にその内容を表している。特にタービン翼、ファウドラ翼は顕著で、 $h/L=1$ ではほとんど表面ガス吸収が得られないのに対して、 $h/L=0.25$ では大幅にその性能を向上させることができる。

フルゾーン翼の場合は、もともと表面ガス吸収にすぐれているためタービン翼やファウドラ翼ほどバッフルの影響を受けないが、それでもバッフルを引き上げることにより約4倍の K_{La} を得ることができる。

以上のことから表面ガス吸収に対してはボルテックスが形成されやすい挿入深さの小さい条件を選定すべきであると考えられる。

む す び

一般に、バッフルについては完全邪魔板条件に近い平板バッフルが選定されるケースが多く、攪拌目的に応じて挿入深さ等が検討されるのはまれである。特に、不必要にバッフルをきかせすぎると動力の増加と攪拌効率の低下を招くことになる。攪拌槽の設計では平板バッフルは下部T.L.まで挿入するのが一般的であるが、混合時間、粒子の浮遊懸濁、ガスの表面ガス吸収いずれの場合でも程度の差こそあれ、バッフルは引き上げて使用した方が効果的であるという結果を得た。この点で本稿がユーザ各位のバッフル選定のご参考になれば幸いである。

バッフルの役割として完全邪魔板条件に近いバッフル条

第3表 バッフル挿入深さと表面ガス吸収性能の比較
Table 3 Comparison of h/L for performance of gas absorption from surface

Imp.	Turbine		Pfaudler		FULL ZONE	
	P _v	K _{La}	P _v	K _{La}	P _v	K _{La}
1.0	1.5	4.0	1.5	3.1	0.35	14.1
0.25	1.5	88.4	1.5	94.5	0.35	54.8

件では、特に剪断特性を必要とする液滴、気泡の微細化などに有効と考えられる。また伝熱管を兼用したバッフルでは伝熱面積の確保が優先するため、攪拌技術検討の対象に挙げられるケースが多い。例として、蛇管コイルの場合は中高粘度域でのコイル～槽壁間の流動がよく問題にされる。また、ヘアピンコイルの場合は槽内に多数設置したときの N_p の推定が非常に困難となる。

今後は、強いバッフル条件や特殊なバッフルに着目し、形状、配置などが攪拌特性に与える影響を解きあかしていきたいと考えている。

[記号説明]

C	: 槽壁とバッフルのすきま	[m]
D	: 槽内径	[m]
d	: 翼径	[m]
H	: 液深	[m]
h	: 液表面からのバッフル挿入深さ	[m]
K_{La}	: ガス吸収容量係数	[1/Hr]
L	: 液表面から鏡 T.L. までの高さ	[m]
n	: 攪拌翼回転数	[1/s]
n_B	: バッフル枚数	[—]
N_p	: 動力数	[—]
N_q	: 吐出循環流量係数	[—]
P_v	: 単位容積当たりの攪拌動力	[kW/m ³]
Q_c	: 攪拌翼吐出流量	[m ³ /s]
u_r	: 周方向流速	[m/s]
V	: 槽内液容量	[m ³]
W	: バッフル幅	[m]
θ_c	: 平均循環時間	[s]
θ_M	: 混合時間	[s]
ϕ	: 自由液表面付近の粒子濃度	[—]
ω	: 角速度	[rad/s]

[参考文献]

- 1) 松本, 井上ら: 化学工場, 第26巻, 第4号
- 2) 平井等: 神鋼パンテック技報 Vol. 24 No. 1 (1980), p. 1
- 3) S. Nagata: Mixing, Kodansha, Tokyo (1975)
- 4) 橋本健治: 工業反応装置, 培風館 (1984)
- 5) 村上ら: 攪拌・混合・混練・分散技術集成, REALIZE INC. (1991)