

<新製品>

高効率攪拌翼『フルゾーン』の開発

(特許, 商標出願中)

The Development of Highly Efficient Mixing Impeller "FULLZONE"



技術開発本部

菊池	雅彦
Masahiko	Kikuchi
高田	一貴
Kazutaka	Takata
伊藤	久善
Hisayosi	Itoh
佐藤	栄祐
Eisuke	Satoh



九州大学工学部化学機械工学科
村上泰弘教授
Prof. Yasuhiro Murakami

In response to the increasing technical demand for high efficiency and versatile applications in mixing operations, Shinko Pantec has developed the advanced mixing impeller "FULLZONE". FULLZONE can work with higher efficiency than conventional impellers when used in such operations as blending of low to high viscosity liquid from 0.001 to 30 Pa·s, suspension of concentrated solid particles with relatively large settling velocity, liquid-liquid dispersion with large density difference or with large viscosity ratio, and jacket heat transfer. FULLZONE has been brought to market since January 1991 with expectation of improving various mixing processes.

まえがき

近年、攪拌機の性能に対する要求は高度化・多様化しており、広範な攪拌条件に対応できる攪拌機が求められている。特に、バッチプロセスでは、次のように多様かつ高度な攪拌混合条件を満たす攪拌機が望まれている。

- ・均一混合：広い粘度範囲での良好な混合
液量と粘度の大きな変化への対応
- ・伝熱性能：低動力攪拌時の良好な伝熱能力
- ・固液攪拌：比較的沈降速度の大きな粒子の分散
高濃度スラリーの均一混合
低剪断での均一浮遊
- ・液液分散：シャープな液滴径分布
低剪断と増粘液中への軽液分散の両立

これらの条件を個々に満たす攪拌機の選定はさほど難しくはないが、多項目を同時に満足させる仕様選定は経験豊富な攪拌技術者にとっても容易ではない。当社はこのたび、上記のような高機能化、多目的化、高効率化の要求を満たす攪拌翼の開発を行い、極めて広い粘度範囲において効率良く攪拌を行う攪拌翼『フルゾーン』を開発して販売を開始した。次に『フルゾーン』の特長を紹介する。

1. フルゾーンの形状

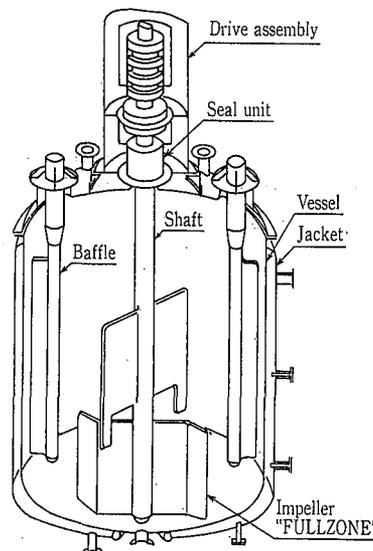
第1図に示すとおり、フルゾーンは上下にそれぞれ異なる機能を持つ特殊ワイドパドルを2段、立体的に組み合わせた形状となっている。次に示すとおり、この形状は、流体数値解析と系統的な攪拌混合実験によって性能確認を行い最適化した結果として得られた。

1.1 基本形状

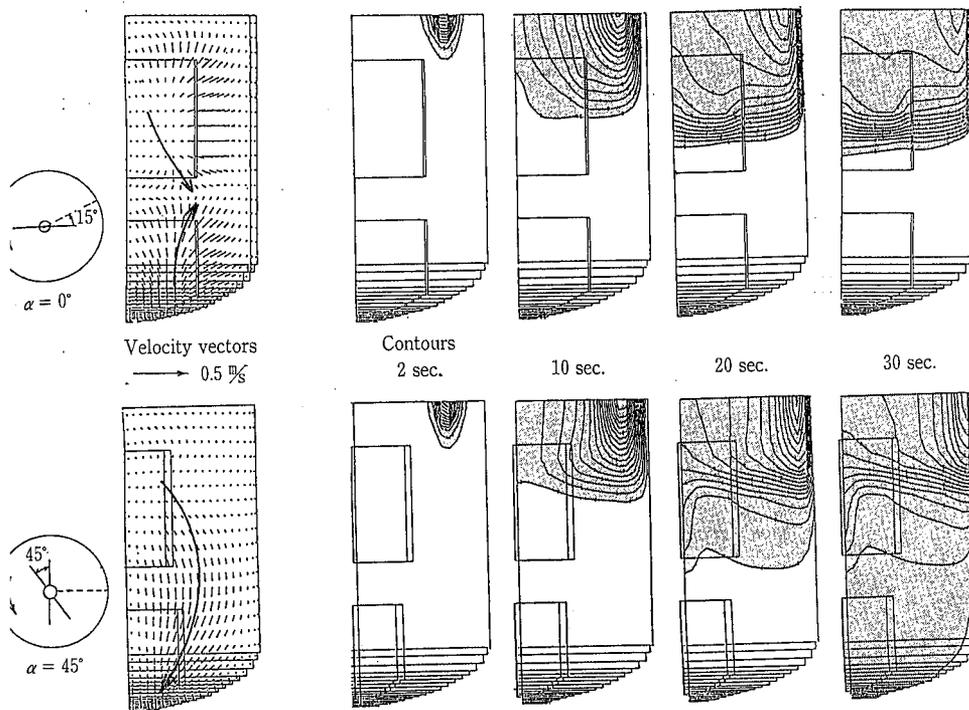
攪拌翼について次の目標を設定し、その基本形状を検討した。

- ・広い粘度範囲での効率よい均一混合
- ・タービンなど低粘度用翼やダブルヘリカルリボンなど高粘度用翼の適用しにくい中粘度領域での混合効率の向上
- ・槽内全体に及ぶ大きな一つの循環流の形成を通じての効率よい混合の達成

その結果、ワイドパドル翼を基本形状に選び、混合効率を向上させるため2段翼を採用した。さらに次の3因子の混合への影響を検討し形状寸法を決定した。



第1図
フルゾーンを装備した攪拌槽
Fig. 1
FULLZONE set into a vessel



第2図
交差角度 α の流動および混合速度
に及ぼす影響
Fig. 2
Effect of the angle α between
two paddles on flow pattern and
mixing process

- (1) 上段翼と下段翼の交差角度： α
- (2) 上段翼と下段翼の翼間隔： L
- (3) 上段翼と下段翼の吐出力バランス

1. 2 検討手法

1. 2. 1 数値実験（流体数値解析）

数値実験は、流動の数値解析とその解析結果を利用する混合のシミュレーションからなる。まず攪拌槽内の3次元流速分布を解析で求めた。次に、その結果を用いて液面から投入した拡散物質の濃度分布の経時変化をシミュレーションで求めた。この数値実験の適用は、流体数値解析結果の信頼性が高い層流域に限定した²⁾³⁾。

1. 2. 2 混合実験

混合時間の測定には、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を利用した。ヨード溶液およびチオ硫酸ナトリウム溶液は攪拌液と同じ粘度に調製したものをを用いた。またチオ硫酸ナトリウム溶液の過剰量は20%とした。混合時間は脱色過程の連続写真から決定した。本実験では、槽径0.2 m, 槽高0.4 m, 容量10 ltおよび槽径0.4 m, 槽高0.8 m, 容量80 ltの大小2種の攪拌槽を使用した。

1. 3 形状因子の検討

1. 3. 1 上段翼と下段翼の交差角度： α

上段翼と下段翼の交差角度の違いが攪拌槽内の流動と混合過程に及ぼす影響を数値実験法により評価した。計算条件を次に示す。なお、交差角度 α は、下段翼を基準とし上段翼の方向を翼回転方向に測定する。

計算条件

共通 槽径 $D=0.2$ m, 翼スパン $d=0.12$ m($d/D=0.6$),
液深 $H=0.2$ m($H/D=1.0$), 翼間隔 $L=0.02$ m
回転数 2.08 1/s, バッフルなし
粘度 5 Pa·s, 密度 1400 kg/m³, $Re=8.4$

- 計算①：上段翼と下段翼を同一平面配置 ($\alpha=0^\circ$)
- 計算②：上段翼と下段翼を 45° クロス配置 ($\alpha=45^\circ$)

第2図に流速分布および混合過程を示す。 $\alpha=0^\circ$ の時、上段翼および下段翼から吐出された流体は翼間において互いに衝突し、攪拌槽上部と下部との間の円滑な流体輸送を阻害する。一方、 $\alpha=45^\circ$ の時、槽上部から下部への流体輸送が盛んである。これに対応する混合過程の相違は次のとおりとなる。 $\alpha=0^\circ$ では投入後30秒経過しても下段翼部まで拡散物質は輸送されないのに対して、 $\alpha=45^\circ$ では投入後30秒で槽底部にまで拡散物質が輸送される。単にワイドパドルを同一平面内に配置するよりも、 45° にクロス配置する方が、上段翼と下段翼との流れがつながり、速やかな混合が行われる。本手法を用いて種々の交差角度 α を検討した結果、 $\alpha=45^\circ \sim 90^\circ$ が適切な角度範囲として見出された。

1. 3. 2 上段翼と下段翼の翼間隔： L

上下翼交差角度 $\alpha=45^\circ$ において、適切な上下翼間隔を同様の方法で検討した。計算条件を次に示す。

計算条件

共通：上段翼および下段翼を 45° クロス配置

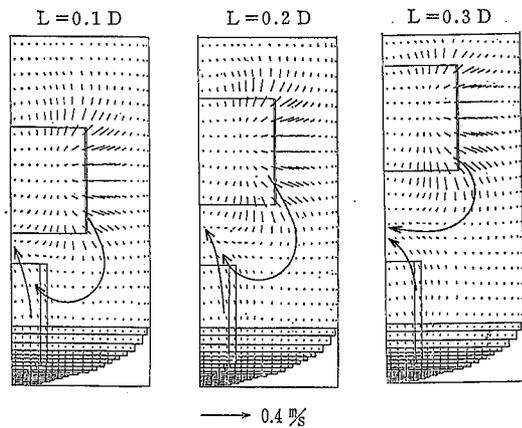
他は1.3.1と同様

計算①： $L=0.1$ D

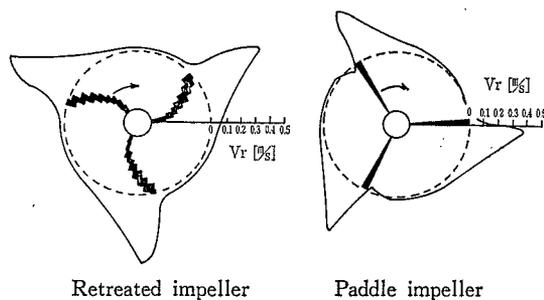
計算②： $L=0.2$ D

計算③： $L=0.3$ D

第3図に流速分布を示す。上下翼間隔が 0.1 Dから 0.3 Dまで増加するにしたがい、上段翼の吐出流が下段翼の回転域に侵入する割合が減少し、 0.3 Dではほとんど侵入することなく下段翼の吐出流に押し返されている。先に第2図で説明したように、効率よい混合を実現するには上下翼の



第3図 翼間隔による流動状態の変化 ($\alpha=45^\circ$)
 Fig. 3 Effect of the distance between upper and lower paddles on flow pattern



第4図 後退翼と平羽根翼の吐出流の比較
 Fig. 4 Comparison of a retreated-blade and flat-blade impellers in discharging flow

流れを接続することが重要である。同じ理由から、翼間隔 L としては、第3図中 $L=0.1D$ が最も好ましいと判断した。

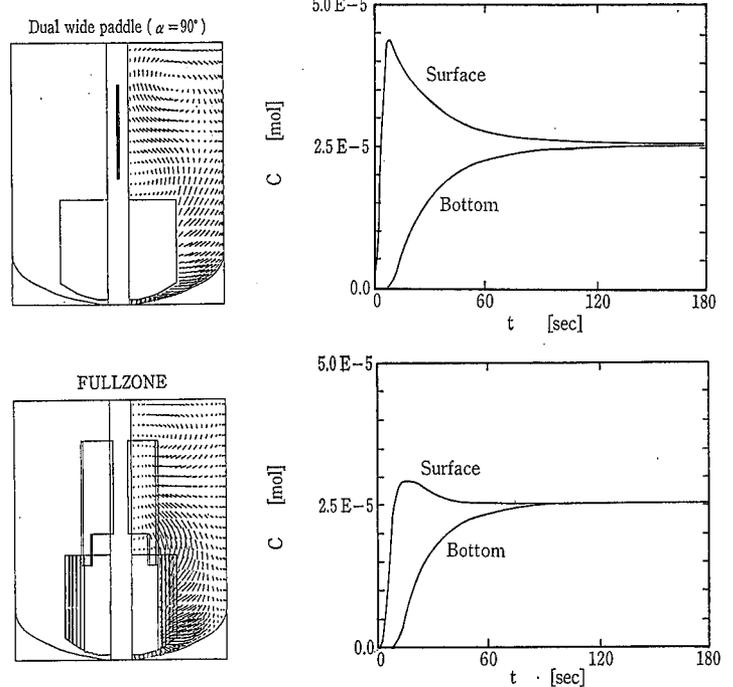
こうして $\alpha=45^\circ$, $L=0.1D$ に組み合わせた2段ワイドパドルを用いると、粘度 $2\text{ Pa}\cdot\text{s}$ 以上の層流域では槽内全体が良好に混合された。しかし $2\text{ Pa}\cdot\text{s}$ 以下の層流から乱流へ遷移する状態では、上下翼の流れのつながりが不安定になり、混合がやや遅れ気味になる傾向が見られた。そこで、上段翼の先端を下方に延長する板状のフィンにより上下翼の流れのつながりを安定化し、速やかな混合を実現した。このフィンの追加によって、遷移域や乱流域において良好な均一混合性を得ることができるばかりでなく、層流域においても一層良好な混合が可能になった。

1. 3. 3 上段翼と下段翼の吐出力バランス

多段翼で効率よい攪拌混合を行うには各翼の吐出力バランスが重要である。当社でも従来より最下段の攪拌翼の吐出力を強めることで効率のよい攪拌混合を達成してきた。本開発では、層流域と乱流域での吐出力バランスを検討し、下段翼に後退翼を採用して槽下部の吐出力を強化し粘度対応性と動力効率の向上を図った。パドル翼と後退翼周囲の半径方向吐出流速解析結果を第4図に示す²⁾³⁾。後退翼では翼全周にわたり液体が吐出されており、また最大吐出流速もパドル翼のそれに比べ約30%大きい。

1. 4 決定形状

上段にフィン付のワイドパドル、下段に後退させたワイドパドルを採用し、両翼の配置を混合に関して最適化した



第5図 フルゾーンとワイドパドル2段の流速ベクトル及び濃度応答比較
 Fig. 5 Comparison of FULLZONE with dual wide paddle ($\alpha=90^\circ$) in computed velocity vectors and concentration response

結果が第1図に示すフルゾーンの形状である。

中高粘度域での混合効率向上に対してこれらの工夫がもたらす効果を確認するため以下の数値実験を行った。直角に配置した2段ワイドパドルはこの粘度域でヘリカルリボンに比較しうる良い混合効率を持つ。この2段ワイドパドルをフルゾーンと比較した。 $Re=11.7$ の層流状態で流速ベクトル分布と拡散物質の液面および槽底での濃度応答曲線をこの2種の翼について求め、その差異を第5図に示す。2段のワイドパドルでは180秒経過しても2点での濃度に若干の差が残る混合が終わってない。これに対しフルゾーンでは約90秒で2点での濃度が一致し混合が終わる。フルゾーンを形成する工夫は直角配置の2段ワイドパドルの混合時間を半分以下に短縮する効果を持つ。

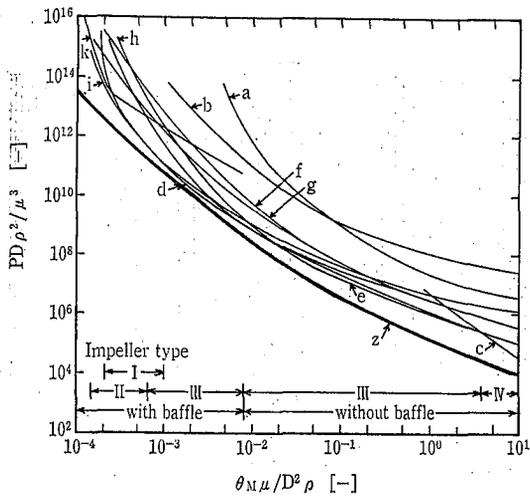
2. フルゾーンの攪拌性能

2. 1 混合特性

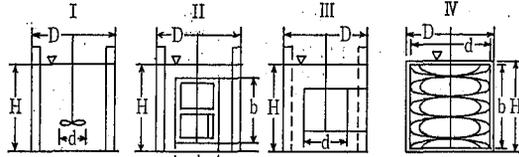
フルゾーンの混合性能を、当社の標準的な低中粘度翼であるファウドラ翼、および、代表的な高粘度翼であるダブルヘリカルリボン翼と比較し、写真1~5 (p. 11)に示す。0.001から40 $\text{Pa}\cdot\text{s}$ までの各粘度毎に攪拌動力をほぼ同一にして脱色の速さを比べた。フルゾーンでは、写真の全粘度域で混合不良部の発生がなく、しかもファウドラ翼やリボン翼に比べ効率良い混合が行われている。

上記攪拌翼の混合時間を $n\cdot\theta_M\text{-Re}$ 線図で整理し第6図に示す。さらに、後述の Zlokarnik のデータから中粘度用の翼であるアンカーと格子翼を選び、それらのデータも記入して比較した。フルゾーンは、層流域に近い $Re=25$ から完全乱流域である $Re=10^5$ 以上という広い Re 数範囲で、従来から広く用いられてきた攪拌翼よりも小さな $n\cdot\theta_M$ であり、優れた混合性能を示す。

また、第7図は、各種攪拌翼について攪拌動力と混合時間の無次元相関を行った Zlokarnik¹⁾の結果にフルゾーン



Impeller type

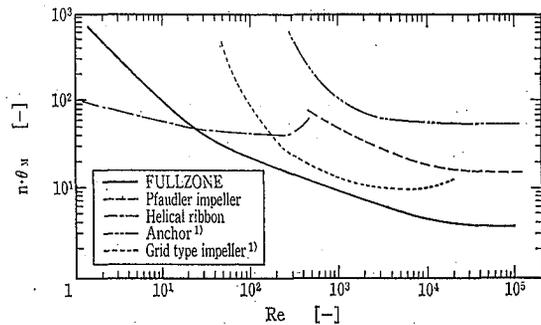


Propeller Grid type Wide paddle Double helical ribbon

z : FULLZONE (with baffle)	f : Quadruple flat paddle (with baffle)
a : 4-blade anchor (without baffle)	g : Quadruple flat paddle (without baffle)
b : 2-blade anchor (without baffle)	h : Grid type (without baffle)
c : Double helical ribbon (without baffle)	i : Grid type (with baffle)
d : Wide paddle (with baffle)	k : Propeller (with baffle)
e : Wide paddle (without baffle)	

第7図 各翼の混合効率の比較 (Zlokarnik の方法¹⁾による)

Fig. 7 Comparison of various impellers in mixing efficiency using Zlokarnik's plot¹⁾



第8図 n·θM-Re 曲線の比較

Fig. 8 Comparison of n·θM-Re curves for several impellers

の実験結果を追加し、混合効率を比較した結果である。この相関ではプロットが下方にあるほど混合効率がよい。つまり、同じ攪拌槽で同じ液体を所定の時間で混合する場合、下方にプロットされた攪拌翼ほど攪拌動力が小さく動力効率がよい。Zlokarnik は、従来から広く用いられている攪拌翼を研究した結果、液粘度 (Re 数) に応じて最適な攪拌翼が4種類 (I~IV) あることを示した。フルゾーンは、各粘度 (Re 数) 域で最適とされた攪拌翼よりも図の全ての領域で下方にプロットされ、広い粘度範囲で優れた混合性能を持つ。

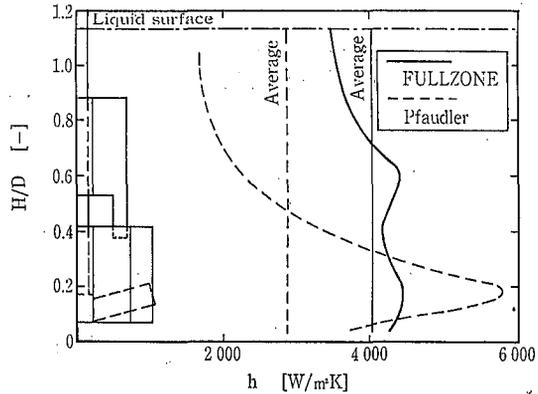
2. 2 伝熱特性

熱移動と物質移動の相似性を利用して、槽壁面で測定された物質移動係数の分布から局所伝熱係数の分布を推定することができる⁴⁾。フルゾーンとファウドラ翼の局所伝熱係数分布を推定し、等動力の条件下で比較した結果を第8図に示す。フルゾーンは槽内全域で比較的高い伝熱係数を示し、1段のファウドラ翼よりも約40%高い平均伝熱係数となる。

2. 3 異相系攪拌特性

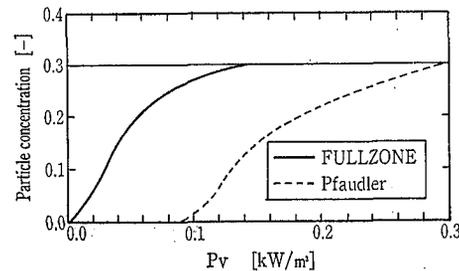
2. 3. 1 固液系攪拌

固液系攪拌の特性評価のためイオン交換樹脂の懸濁実験を行った。粒子濃度をかさ体積で30%とし、フルゾーンとファウドラ翼について攪拌動力を数段階に変化させて粒子の浮遊状態を観察比較した。各動力における浮遊状態を写真6 (p. 11) に示す。また、液面近傍での粒子濃度を動



第9図 槽壁面での局所伝熱係数分布 (水, Pv=0.15 kW/m³)

Fig. 9 Local heat transfer coefficient distribution on the vessel wall (Water, Pv=0.15 kW/m³)



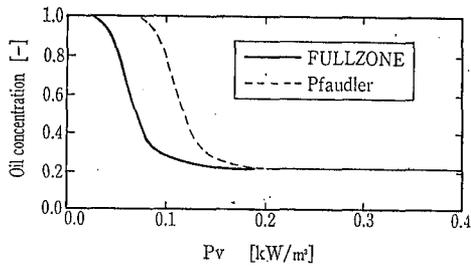
第10図 粒子均一浮遊にいたる動力の比較

Fig. 10 Comparison of two impellers in power required for uniform solids suspension

力に対してプロットした結果を第9図に示す。フルゾーンはファウドラ翼の半分以下の動力で粒子の均一浮遊が可能であり、固液攪拌においても優れた性能を持つ。

2. 3. 2 液液系攪拌

液液系攪拌の特性評価のためにも類似の実験を行った。20 vol%の白灯油 (密度 790 kg/m³) と水を攪拌槽に満たし、上記2種の攪拌翼について攪拌動力を数段階に変化させて液滴の分散状態を観察比較した。液面近傍での白灯油濃度を動力に対してプロットした結果を第10図に示す。フルゾーンはファウドラ翼の約60%の動力で均一分散が可能であり、液液分散においても優れた性能を持つ。



第10図 液滴均一分散にいたる動力の比較
Fig. 10 Comparison of two impellers in power required for uniform dispersion of liquid droplets

2. 4 動力特性

フルゾーンの広範な粘度対応性には2枚の平板バツフルとの組合せが適している。2枚バツフル時の攪拌動力線図を第11図に示す。層流域では $Np \cdot Re$ 値が約200となり、永田⁵⁾の動力式から予想される値186と概略一致する。乱流域では動力数が約5になる。

3. フルゾーンの特長と適用分野

フルゾーンの特長

形状

ワイドパドル2段の立体的配置
上段翼フィンと下段翼後退

性能

- (1)広い粘度域で効率よい均一混合が可能
100 Pa·s の高粘度まで混合可能。特に 0.001 Pa·s ~ 30 Pa·s では従来翼より混合が期待できる。
- (2)優れた伝熱性能
- (3)少ない動力で粒子の均一浮遊が可能
- (4)高効率(省エネルギー)

適用分野

- (1)多目的バッチ攪拌槽
広い粘度範囲での操作が必要な場合
高濃度スラリーの攪拌を行う場合
- (2)低剪断(低回転)で均一混合が必要な攪拌槽
晶析 乳化重合 懸濁重合
バイオリアクター など

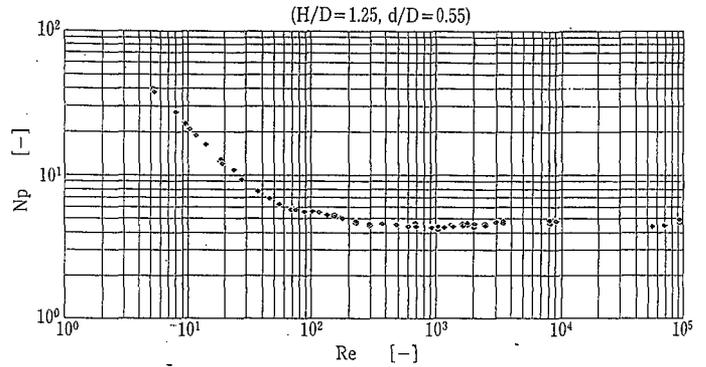
4. 従来翼に対するフルゾーンの包括的な位置付け

当社は、ガラスライニング製およびステンレス製を通じ、多様な形式の攪拌機を提供している。それらの製品とともにフルゾーンもその特長を十分に活かせる使い方を推進したいと考えている。この観点から従来翼に対するフルゾーンの位置付けを包括的に評価した。参考までにその概要を第1表に示す。

フルゾーンの採用を推奨したい状況として、適用粘度、固液および液液分散、伝熱などで攪拌負荷の厳しい場合、過剰攪拌の防止と均一性ととの両立が必要な場合、多目的の攪拌を行う場合でかつ能力的に信頼性の高い攪拌が必要な場合などが考えられる。

むすび

新型攪拌翼『フルゾーン』について、その開発過程およびテストで確認した攪拌性能をいくつか紹介した。ここに



第11図 フルゾーン攪拌動力線図
Fig. 11 Power number curve for FULLZONE

第1表 従来翼とフルゾーンとの包括的な比較
Table 1 Comprehensive comparison of various impellers including FULLZONE

Impellers	Propeller	Pfaudler impeller	Paddle	Turbine	Multiple impellers	FULLZONE	Anchor	Helical ribbon
Viscosity Range								
High	×	×	×	×	×	○	△	⊙
Medium	×	○	△	△	○	⊙	○	○
Low	○	⊙	○	○	⊙	⊙	○	△
Gas-Liquid	△	○	△	⊙	⊙	△	×	×
Solid-Liquid	△	⊙	○	△	⊙	⊙	△	×
Mixing Time								
Viscous	×	×	×	×	×	○	△	⊙
Nonviscous	○	○	○	○	○	⊙	△	△
Shaft torque								
Capital cost	⊙	⊙	⊙	⊙	○	△	△	×
Cleaning								
Maintenance	○	⊙	○	○	△	△	○	×

◎: Excellent, ○: Good, △: Permissible, ×: Not suitable

紹介したフルゾーンの性能がユーザ各位の攪拌プロセスの改善、改良の検討材料になれば幸いである。また当社では、今回の開発で用いた流体数値解析の精度を一層高めるため、最新型のレーザードップラー流速計を技術開発センターに導入した。今後、攪拌槽内流動を解析と測定の両面から捉え、高度化する攪拌技術に対応し、攪拌槽の最適設計を目指したい。

本開発に当りお力添え頂いた久留米工業高等専門学校工業化学科 藤道治助教授に感謝の意を表します。

【参考文献】

- 1) Zlokarnik, N.: Chem. Ing. Techn., 39, (1967)
- 2) 菊池ら: 化学工学会第23回秋期大会 T 307 (1990)
- 3) 高田ら: 神鋼パンテック技報 Vol. 34, No. 3 (1990)
- 4) 村上ら: 九大工学集報, 第43巻, 第6号 (1970)
- 5) Nagata, S.: "Mixing Principles & Applications", Kodansha (1975)

記号説明

b	: 攪拌翼幅	[m]
D	: 攪拌槽径	[m]
d	: 攪拌翼スパン	[m]
H	: 液深	[m]
h	: 境膜伝熱係数	[W/m²K]
N_p	: 攪拌動力数	[-]
n	: 攪拌翼回転数	[1/s]
P	: 攪拌動力	[W]
P_v	: 単位容積当りの攪拌動力	[kW/m³]
Re	: 攪拌レイノルズ数 = $\rho n d^2 / \mu$	[-]
V_r	: 半径方向流速	[m/s]
θ_m	: 混合時間	[s]
ρ	: 攪拌液密度	[kg/m³]
μ	: 攪拌液粘度	[Pa·s]

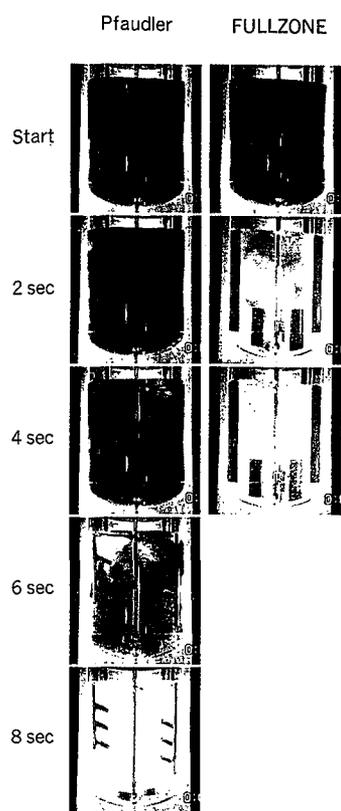


写真1 混合経過の比較、 $\mu=0.001 \text{ Pa}\cdot\text{s}$,
 $P_v=0.1 \text{ kW/m}^2$
 Photo.1 Comparison in transition of mixing.

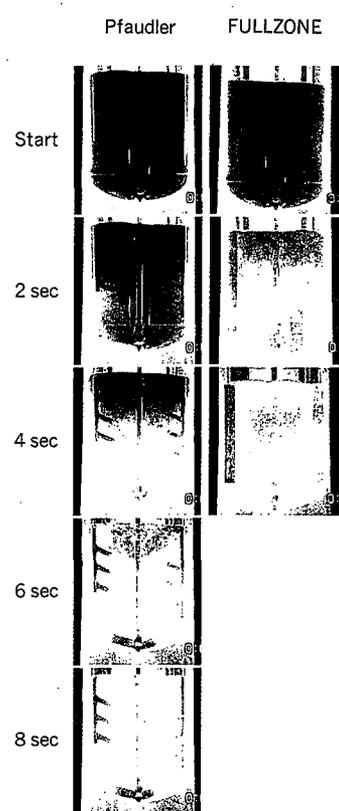


写真2 混合経過の比較、 $\mu=0.032 \text{ Pa}\cdot\text{s}$,
 $P_v=0.3 \text{ kW/m}^2$
 Photo.2 Comparison in transition of mixing.

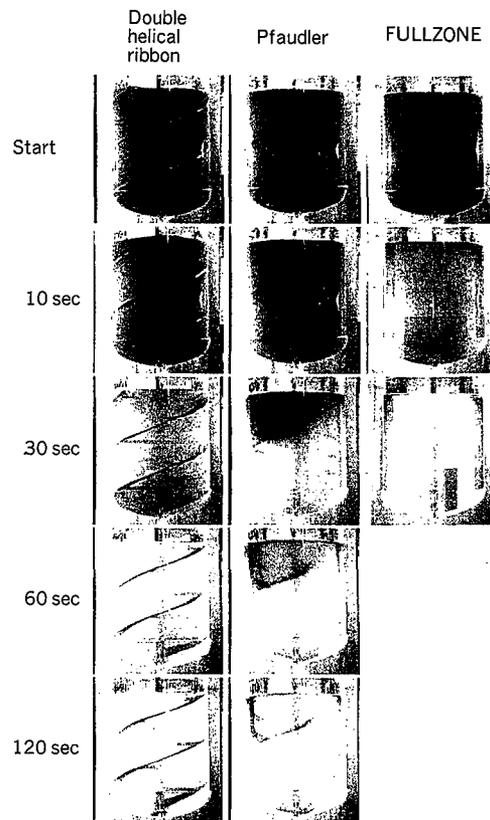


写真3 混合経過の比較、 $\mu=1.2 \text{ Pa}\cdot\text{s}$,
 $P_v=0.3 \text{ kW/m}^2$
 Photo.3 Comparison in transition of mixing.

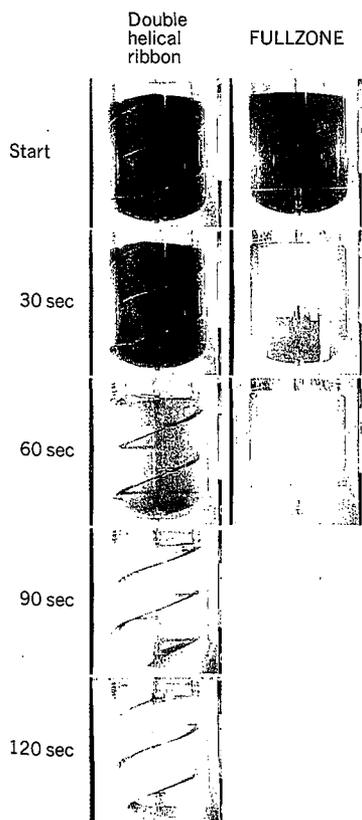


写真4 混合経過の比較、 $\mu=8 \text{ Pa}\cdot\text{s}$,
 $P_v=2.0 \text{ kW/m}^2$
 Photo.4 Comparison in transition of mixing.

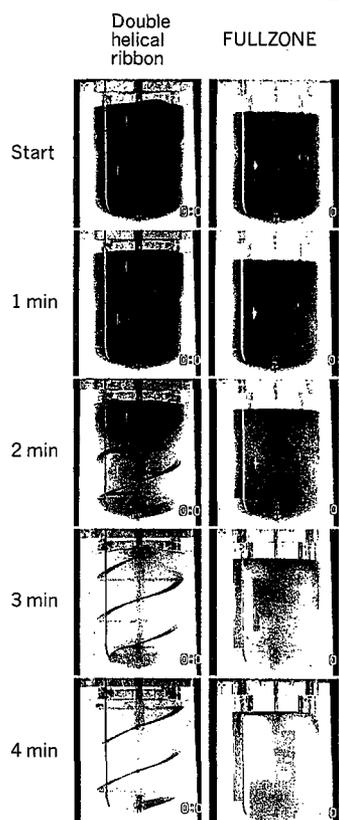


写真5 混合経過の比較、 $\mu=40 \text{ Pa}\cdot\text{s}$,
 $P_v=2.0 \text{ kW/m}^2$
 Photo.5 Comparison in transition of mixing.

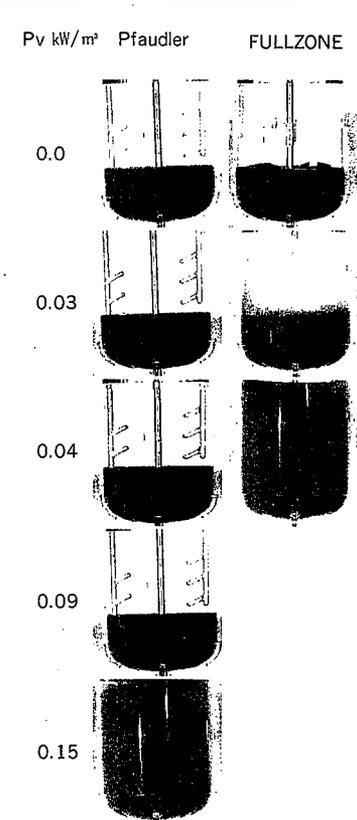


写真6 粒子懸濁性能の比較 (イオン交換樹脂-水)
 Photo.6 Comparison in solid suspension (Ion exchange resin-water)