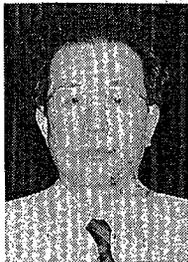


流れ学的観点からみた攪拌操作と羽根の開発

New Impeller Development and Mixing Technology from a View Point of Fluid Dynamics (Strömungslehre)



講師：九州大学工学部化学機械工学科
教授 工学博士
村上 泰弘
Prof. Yasuhiro Murakami,
Dr. Eng.
Chemical Engineering,
Kyushu University



抄録：技術開発本部
伊藤 久 善
Hisayoshi Itoh
高田 一 貴
Kazutaka Takata

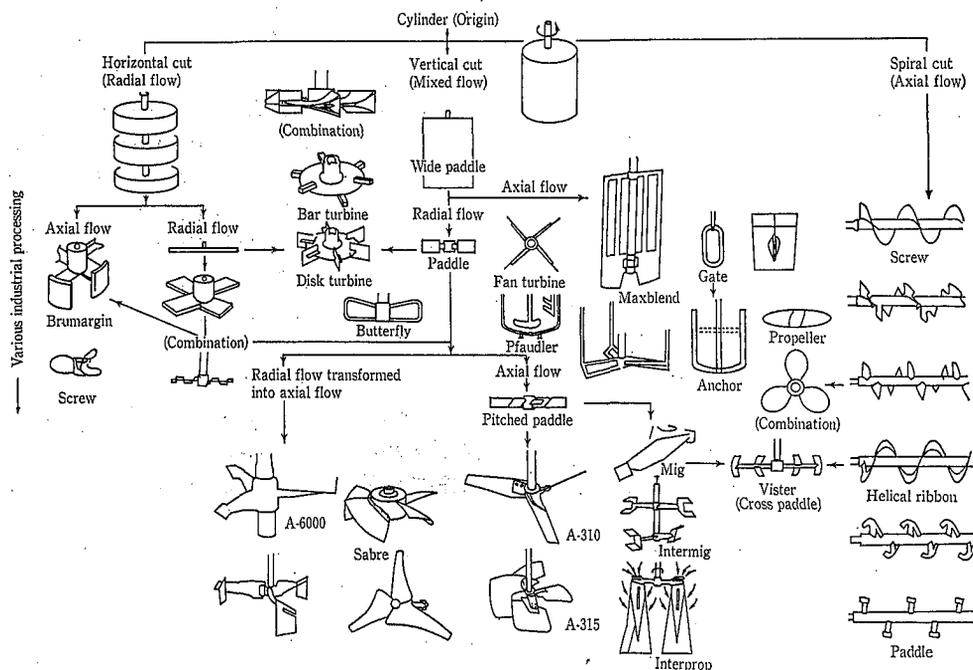
A genealogy of impellers has been constructed with various conventional and new impellers classified into radial flow type, axial flow type, and mixed flow type. The genealogy suggests some possible directions in new impeller development. Recent studies on mixing fluid dynamics have also been reviewed about impeller flow, droplet dispersion, numerical analysis, and chemical reaction in turbulence. However fluid-dynamic behavior of impellers is not fully understood enough to predict suitable design in new impeller development. At present the development still requires experimental decision of impeller design by the trial-and-error method.

まえがき

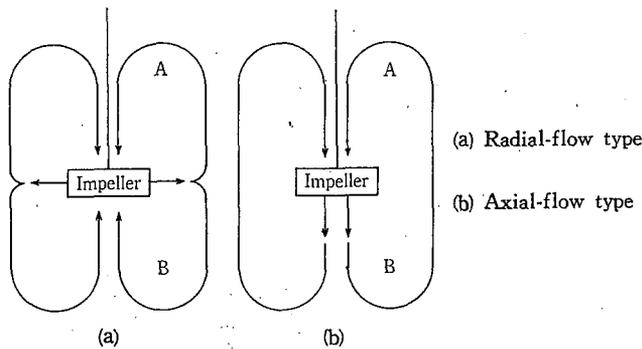
1990年8月31日、村上教授を当社にお迎えしてご講演いただいた。村上教授は現在、化学工学会九州支部長（平成元年、2年度）および高分子学会反応工学研究会のアセスメントシリーズレポート(12)リアクティブプロセッシングの主査をつとめられ、この分野の第一人者として研究、教育に尽力されている。今回は永年研究を続けられておられる攪拌装置の開発に関連して「流れ学的観点からみた攪拌操作と羽根の開発」の演題にてご講演いただいた。本報はそのご講演内容の抄録である。

1. 放射流、軸流に基づく羽根の系譜から何が読めるか

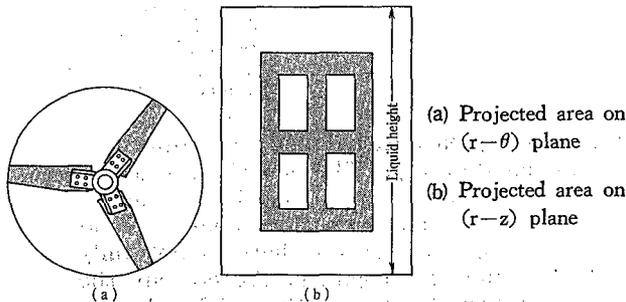
攪拌羽根の仮想の元祖として周方向、軸方向に均等回転要素を持つ円柱を考える。この円柱の切断方法と切断要素の加工段階に応じて、現在商業化されている基本羽根を系譜的にまとめると第1図のようになる。加工の方法としては水平型切断、垂直型切断、らせん型切断がある。水平切断は放射流形式の原型である。垂直切断は槽内の上から下まで羽根自体の物理的性能によって軸流的な性能を出すと同時に放射流的な要素も持つ。らせん切断も比



第1図 羽根の基本系譜
Fig. 1 A basic genealogy of impellers



第2図 攪拌槽内の基本的フローパターン
Fig. 2 Typical flow patterns



第4図 羽根の面積比率
Fig. 4 Solidity ratio

較的軸流の要素が大きい。ここでは系譜図の各羽根に加え、これらを組み合わせる既存の多様な羽根を概観し、低中粘度の攪拌について推論できることを次の5項にまとめる。

1) 大型パドルの有効性

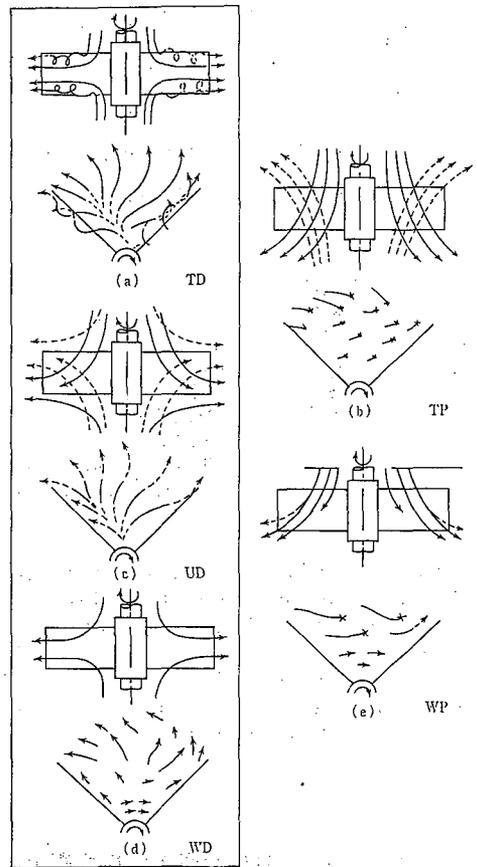
上記の垂直切断の注目すべき特性は大型パドルの有効性を示唆する。さらに他形式の問題点からその有効性を補足する。

放射流および軸流形式の典型的なフローパターンを第2図に示す。放射流形式では羽根の上下A、Bに二つの循環流が形成され、軸流形式ではA、Bを順に通過する単一の大きな循環流が形成される。昭和40年代中頃のある講演会で大阪大学の伊藤教授が試算しておられたと記憶するが、領域Aでの濃度が平衡値の1%に近づく時間を混合時間 t_m とすると、放射流では t_m が平均循環時間 V/Q の4.6倍になるのに対し、軸流では1.2倍となり軸流が有利である。しかし実装置では軸流羽根といえども放射流と軸流が混在し、槽内全体を効率的に循環するフローパターンの実現は容易ではない。

小型のパドル系の羽根では、吐出が間欠的に停止し流体が羽根を通り抜けるパスフローの問題がある。長瀬ら¹⁾によればパドル羽根の場合、第3図でパスフロー状態b、eの時間は全体の25%程度になる。小さな羽根が回転して周りの流体を吸引、吐出する時、流れの大きな縮流と拡大があり大きな圧損が生じる。流体工学的にも小さな羽根では吸い込みと吐出に無理を生じ、パスフロー発生のおそれ示唆される。このことから大型の羽根が有効と考えられる。

2) Solidity ratio の重視

Mixing Equipment 社の第4図に示す solidity ratio は top view solidity ratio (TVSR) が槽内の循環流に対し



(a) Discharge pattern, TD
(b) Cross pass pattern, TP; × mark indicates disappearance of a particle from the impeller
(c) Asymmetric discharge pattern, UD
(d) Mustration of weak discharge pattern, WD
(e) Mustration of weak cross-pass pattern, WP

第3図 吐出とパスフローの形態¹⁾
Fig. 3 Various patterns of discharge flow and cross pass flow

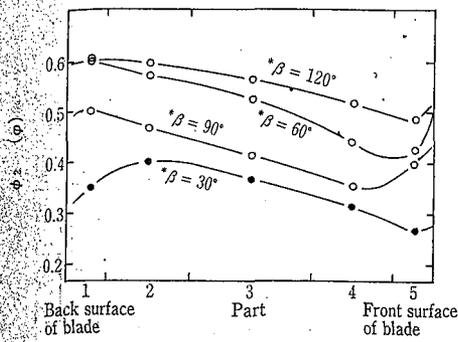
て重要であることを示唆する。放射流および軸流的な流の共存する垂直切断系で今後は演者の見解では side view solidity ratio (SVSR), すなわち、垂直断面で羽根の占る割合および形状が重要視されてくると考えている。

3) Trailing vortex による分散機能

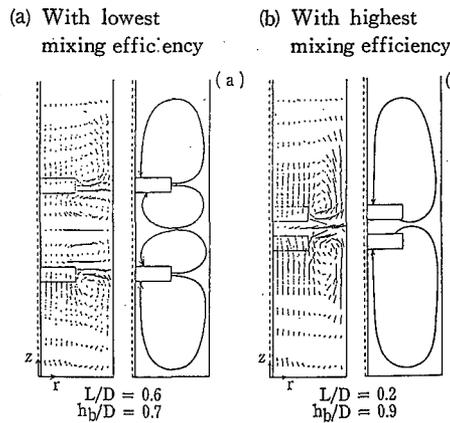
攪拌では循環作用による全体の均一化機能に加えて液分散、気泡微細化、マイクロ混合などの分散機能も必要である。循環機能と分散機能の比率を評価し良好なバランス実現するには、羽根の回転によって生じる trailing vortex の挙動を明らかにする必要がある。この問題については章で解説する。

4) 大型多段羽根と変曲羽根の可能性

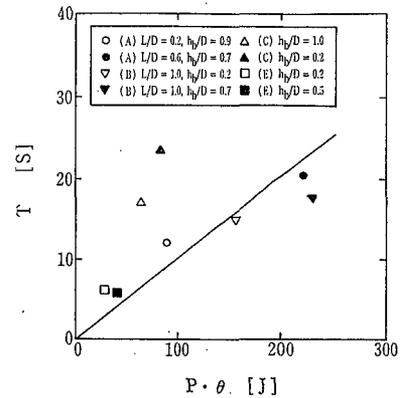
新しい攪拌羽根の開発方向の一つに上下大型羽根の組み合わせ法を工夫する方向があり、上下の羽根の適当な間と適切な交差配置により槽内全体に行きわたるフローパターンを形成する方法が考えられる。高嶋ら³⁾によれば変曲羽根の吐出流量は直角羽根に比べて約22%程度増大し(5図) 加えて吐出が一樣になる。全体の循環には下段を曲羽根とする多段羽根が推奨される。また混合に要するエネルギー(動力 $P \times$ 混合時間 θ)を小さくするには羽根



第5図 吐出流量の変化²⁾
Fig. 5 Effect of blade angle on discharge flow²⁾



第6図 多段羽根の流速ベクトル及びフローパターン²⁾
Fig. 6 Velocity vectors and flow patterns in a double-impeller tank, $H=2D$, $n=150\text{rpm}$ ²⁾



第7図 循環時間Tと消費エネルギー $P\cdot\theta$ との関係
Fig. 7 Relationship between circulation time T and energy consumption $P\cdot\theta$, $n=150\text{rpm}$

距離を小さくする方がよい²⁾。第6図に示すように羽根間距離が大きい時は多数の循環流路ができ、槽上部より注入したトレーサーが槽下部に達するまでにより多くの時間を必要とする。第7図に示すように混合エネルギー $P\cdot\theta$ は全流路の循環時間Tにはほぼ比例するので、循環流路数の増加は混合効率の低下をもたらす恐れが強い。

5) 耐付着性への考慮

攪拌羽根の評価として耐付着性が実用的に重要な場合がある。付着性物質に対しては循環流を増やし流速を増加させてセルフクリーニングの効果を出す方法と、付着する面積を絶対的に少なくするため羽根外枠のみで構成し攪拌軸を除く方法がある。後者の実績は I. E. M. Technoglass 社 (イタリア) のゲート (第1図参照) にみられる。このタイプは動力が他の羽根に比べて少ないが、循環流が少く槽内全体にわたる循環流を形成できない点が問題で、改良の余地がある。先に述べた side view solidity ratio と関連させた耐付着性の検討が今後の課題である。

2. 羽根近傍の渦 (Trailing vortex) の挙動研究から何が読めるか

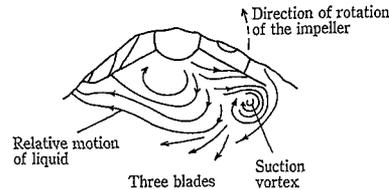
2.1 渦の流動機構

攪拌槽内の羽根近傍の流動を詳細に検討した例を引用しながら標記の問題を説明する。槽内で羽根を回転させると、羽根先端の背面に複雑な渦が形成される。この渦は trailing vortex と呼ばれ、第8図に示す羽根内部の流れを撮影した竹田ら⁴⁾によって最初に見いだされた。次いで高島ら³⁾の研究により羽根近傍の渦と循環の関係が論じられ、吐出流の挙動を説明するのに第9図に示すような vortex model が提案された。

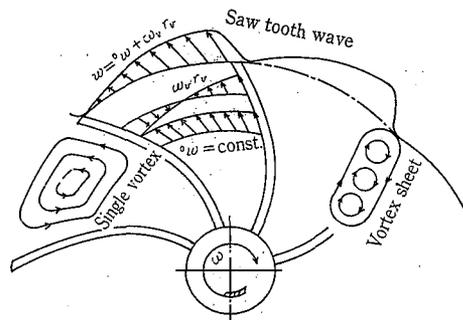
長瀬ら⁵⁾はパドル羽根での渦度の伝達に着目し、2次循環流Qについて

$$N_p \propto (d/D) \cdot N_q^2$$

の関係を示した。この関係は渦度と変動流れの関係および Reynolds 応力方程式による羽根面での消散を考慮した次の関係から導かれる。



第8図 羽根内の流れ⁴⁾
Fig. 8 Flow pattern between blades⁴⁾



第9図 攪拌翼間の渦のモデル化
Fig. 9 Vortex model in the impeller region³⁾

$$\begin{aligned} \tau &\propto \rho \cdot (Q/d^2)^2 \\ Q &\propto N_q \cdot d^3 \cdot n \\ P &\propto (\tau \cdot d^2) \cdot d \cdot n \end{aligned}$$

また吐出流が羽根の外で消散する動力は

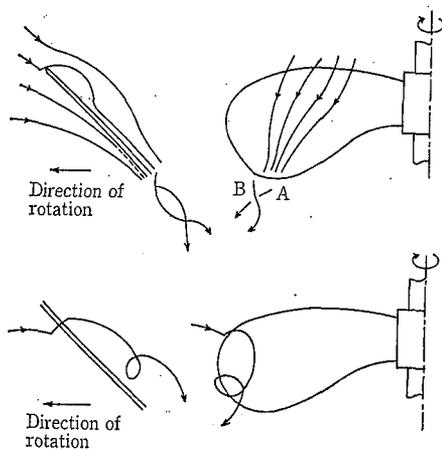
$$P \propto \rho \cdot Q \cdot (n \cdot d)^2$$

と表せることから

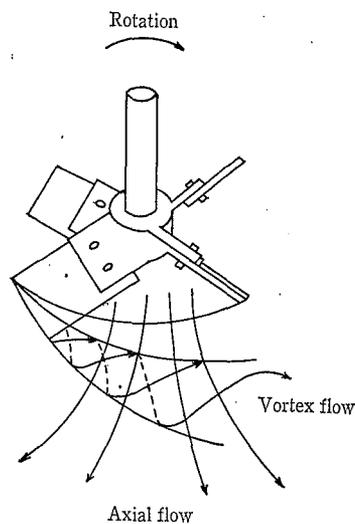
$$N_p \propto N_q$$

を得られる。両者の寄与比率を f_1 として単純化すると

$$N_p = f_1 \cdot N_q + (1 - f_1) \cdot N_q^2 \propto N_q^2$$



第10図 羽根上下面での流れ
Fig. 10 Flow patterns in the lower and upper parts of the impeller



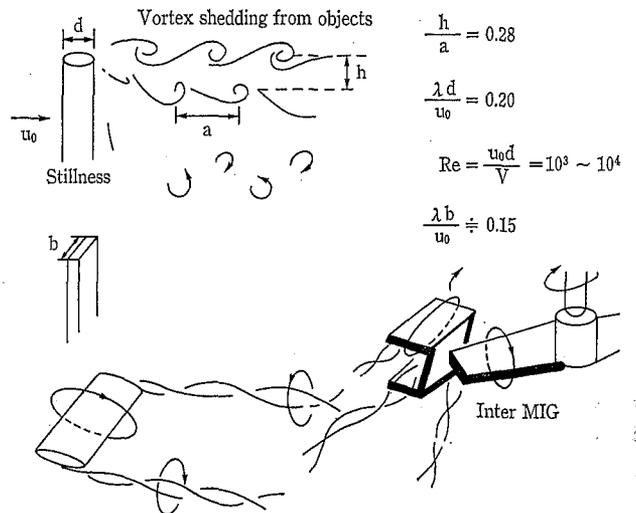
第11図
傾斜パドルの trailing vortex¹⁸⁾
Fig. 11
Trailing vortex caused by a pitched blade

となる。 f_1 を0.2~0.5で設定して x を求めると $x=1.16 \sim 1.38$ が得られ、佐野らの $Np=a \cdot Nq^{1.34}$ に一致する(タービン $a=6.6$, パドル $a=4.3$)。また長瀬ら⁶⁾は軸流型(プロペラ)についても trailing vortex が生じるがこれは、第10図に示すように羽根上下面の速度差によるものであるとしている。この結果は第11図に示す傾斜パドル翼の Tatterson¹⁸⁾らの形態とは異なる挙動を示している。さらに長瀬ら^{7), 8)}はパドル型の trailing vortex につき、渦部周辺速度は羽根先端速度(V_{tip})と同程度(平均 $1.1 \times V_{tip}$)、渦径は平均値として $0.26 \times$ 羽根幅、渦吐出流は全体の4.2%、動力伝達の12~15%を分担していることを明らかにした。

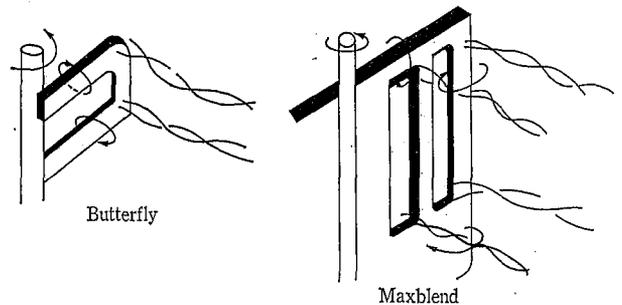
このように、羽根近傍の渦に着目した流れの解明は進んでいるが、実用的な攪拌羽根の開発という観点ではまだ課題が多い。比較的進展が認められる液滴化の研究を次に説明し具体的な課題に触れる。

2. 2 渦の挙動を羽根の高機能化に結びつけるには —液滴化の例—

攪拌槽内の乱流状態と液滴化を最も端的に結びつけた例として、望月、高島ら⁹⁾のヘリカル流モデル、すなわち、



Where do the impellers shed the vortices from?



第12図 いろいろな物体からの流出渦の挙動(一部推定)
Fig. 12 Vortex-shedding from objects in flow and impeller blades (Observed and imagined)

羽根の上下端付近に循環をもつ渦が発生するモデルに基づく研究例がある。従来、同一系統の羽根だと十分に発達した乱流に対してはウェーバー数でよくまとまるが、羽根の幾何形状が変わると完全には合わないことが知られている。望月らは、槽内流体に投入されるエネルギーとヘリカル流によって生じる循環との積を用いて、幾何形状が異なる羽根についても平均液滴径が精度よく相関できる普遍的な整理法を提案した。斉藤ら¹⁰⁾は、液滴化が羽根近辺の特性値(変動速度のRMS値、液滴系のオーダーの相対変動速度差のRMS値など)で決まることを示し、相対変動速度差のRMS値については山本¹¹⁾らの推算式が使えることを示した。

今後の課題として、羽根形状と trailing vortex の因果関係を定量化すること、その関係を上記の研究に結び付けること、羽根の分散効率を評価し開発の方向を示すことが望まれる。特に流出端を持つ渦の挙動に関連し、いろいろな羽根の場合、どこに、どの程度の強さの trailing vortex が流出するのかを明らかにする必要がある。演者の推定する例を含め第12図にこれを示した。

3. 旋回乱流系フローパターンの推算問題から何を読むか

攪拌槽内の乱流数値シミュレーションについては、Placeckら¹²⁾による等方性乱流を仮定した2方程式モデル($k-\epsilon$ モデル)による解析例がある。しかし、旋回乱流

に等方性を仮定しても実測値と一致しないことはよく知られている。従って、 $k-\epsilon$ モデルに基づく渦粘性の等方性の仮定に代えて、Lilley ら¹³⁾の異方性の考慮

$$\nu_{\text{res}} = \nu_{\text{res}} \left[r \frac{\partial}{\partial r} (\bar{w}/r) + (\bar{u}/r)^2 \right]^{1/2}$$

を適用した小林ら¹⁴⁾の研究に注目したい。しかし攪拌槽内の流動数値シミュレーションに乱流モデルを適用することは、解くべき現象が極めて複雑であることや、等方性の仮定が使えないことから、乱流モデルの攪拌流動系への適用には限界がある。一方、流れにならば仮定を施さない直接計算 (direct simulation) およびそれに近い LES (large eddy simulation) を用いてフローパターンを求める問題に対して、現状ではスーパーコンピュータをもってしてもメモリサイズおよび演算速度が小さいため、実際の羽根の開発に計算結果を反映させることは困難である。現状では、基本的な羽根の構成 (これは理論計算からは出てこない) を既往の研究結果をよく調べ、深い洞察力による独創的発想と実験により定め、数値計算は羽根の最適な相対位置などを決定するときの指針として活用されるべきである。

4. 反応と乱流混合

化学装置 (反応機) 内では、乱流流動と化学反応を伴う現象が混在しており、これらの現象を解明することは装置の最適設計・操作を行う上で重要である。しかし実際は、さきに述べたように反応機内部の高レイノルズ数流動に関する解析もほとんど進んでいないことから、ここでは、実際問題への適用を踏まえた基礎研究の紹介を行うことにより、現実の問題解決への足がかりとしたい。

乱流研究については特に壁面の拘束を受ける壁面剪断乱流が重要であるが、Bossinesq (約100年前)、Prandtl の混合距離理論 (Mixing Length Theory)、Taylor, von Karman, Deissler, van Driest らの理論的扱い (乱流境界層、流速分布の相関法、流体摩擦係数など) に始まり、乱流現象の偶然性 (ランダム性) に着目した乱流現象への統計理論の導入 (統計量からの乱流渦の定量化など) の時代を経て約20年前、Kline ら (1967) による乱流の組織的渦構造の発見による、乱流構造研究の時代に入る。ランダムと考えられていた乱流中のこの秩序の発見は特筆すべきものであった。これは可視化実験の成果である。これら乱流構造にはインジェクション、スイープ、ストリーク、バースティングなどさまざまな現象がある。化学工学上重要な気液界面を通してのスカラー量 (熱・物質) の輸送機構、特にバースト現象による上昇渦の自由表面更新現象はガス吸収理論の流れとの関連を解明するポイントとして注目さ

れている^{15),16)}。

また、反応を伴う乱流現象では、速度定数 k 、平均濃度 C 、濃度変動 c により反応速度 R が次式で表される。

$$R = k(\bar{C}_A \bar{C}_B + \overline{c_A c_B})$$

濃度変動の相関項 $\overline{c_A c_B}$ が乱流混合の反応に及ぼす効果となる。しかし、乱流場で二成分物質の瞬間濃度を同時測定することに成功した例はなかった。この分野における先駆的研究¹⁷⁾が実際問題を解決する手段になることを望む。当研究室ではこの分野で、先駆的研究が小森助教授を中心に行われている。

む す び

実際に使われている羽根の系譜を調べた。これらの羽根を放射流タイプ、軸流タイプ、および放射流と軸流が混在するタイプの三つに分類することにより、羽根が進化していく過程を明らかにした。これらの羽根についての流体工学的研究はある程度進展しており、これからの羽根の開発に流体工学に基づく理論的、数値的手法を適用することが期待される。

しかしながら、現状での羽根の開発をこれらの手法に頼るには不十分で、実際的には実験に基づく試行錯誤法を併用する必要がある。工学研究者は、研究結果を新しい羽根の開発にもっと結びつけていく必要がある。研究の精密化は基本的に優れた羽根にのみ有効である。

【参考文献】

- 1) Nagase, Y., et al.: J. of Chem. Eng. J., 21, 503 (1988)
- 2) Komori, S., Murakami, Y.: A. I. Ch. E. J., 34, 6 (1988)
- 3) Takasima, I., et al.: J. of Chem. Eng. J., 4, 66 (1971)
- 4) 竹田邦彦ら: 化学工学, 30, 544 (1966)
- 5) 長瀬洋一: 化学工学, 38, 519 (1974)
- 6) 長瀬洋一ら: 化工第52年年会, N-109 (1987)
- 7) 長瀬洋一ら: 化工第53年年会, K-109 (1988)
- 8) 長瀬洋一: 化工第54年年会, I-114 (1989)
- 9) 望月雅文ら: 化学工学論文集, 10, 49 (1984)
- 10) Saito, S., et al.: J. of Chem. Eng. J. 10, 325 (1977), 13, 67 (1980)
- 11) Yamamoto, K., et al.: J. of Chem. Eng. J., 6, 495 (1973)
- 12) Placek, J., et al.: A. I. Ch. E. J., 31, 113 (1985)
- 13) Lilley, D. G., et al.: Int. J. Heat Transfer, 14, 573 (1971)
- 14) 小林俊雄ら: 生産研究, 38, No. 1, 38 (1986)
- 15) Komori, S., Murakami, Y., et al.: J. Fluid Mech. 203, 103 (1989)
- 16) Komori, S., Murakami, Y., et al.: A. I. Ch. E. J., 36, 957 (1990)
- 17) Komori, S., Murakami, Y., et al.: Physics of Fluids A, 1, 349 (1989)
- 18) Tatterson, G. B., et al.: Chem. Eng. Sci., 35, 1369 (1980)