攪拌槽におけるタービン翼の混合領域

八幡 寿雄・安藤 公二*
小松 藤男・遠藤 一夫**

室蘭工業大学 工業化学科†

攪拌槽内の軸方向混合領域を評価するため、液高さと槽径の比 H/D_t が 1~5 の攪拌槽につき、水および水飴水溶液の混合時間の測定を行った。幾何学的に相似な 3 種の攪拌槽を用い、液高さの中央にタービン翼を取付けている。

液高さの大きな槽について、呈色反応法により液の混合過程を写真観測し、混合過程の解析を行った。

実験結果；1) 呈色境界が伝播する軸方向速度は、攪拌翼よりある距離以上では著しく低下し、この結果より、翼の攪拌効果の及ぶ領域、 H_{ic} の存在することが推察された。2) ある液高さ以下では混合時間は液高さに比例するが、比例関係を保つ液高さの最大値は、上述の混合領域 H_{ic} とほとんど一致した。したがって液高さの大きい槽においては、この最大値は軸方向混合領域の長さの目安とみなすことができる。3) 混合領域 H_{ic} と操作条件との関係は次のように表された。

$$H_{ic}/D_t = 0.45 \cdot N_{Re}^{-0.1} : N_{Re} = 2.9 \times 10^2 \sim 1.7 \times 10^4$$

緒 言

攪拌槽に関する研究の多くは、液高さが槽径とほぼ等しい場合について行われている。液高さが槽径に比べて大きい槽に数個の攪拌翼を取付けた多段攪拌槽についての研究も^{1,2,3)}、翼 1 個当りの液高さと槽径の比がほぼ等しい槽を用いている場合が多くみられる。すなわち、各攪拌翼の相対的位置が、所要動力、混合時間、フローバタン等に及ぼす効果と翼相互の影響について検討を行っているが、攪拌槽の液高さと槽径の比および多段翼攪拌槽の翼間隔決定の基礎となる攪拌翼の攪拌効果の及ぶ領域は必ずしも明らかではない。

本研究は、攪拌翼の攪拌効果の及ぶ領域を実験的に明らかにするため、反応呈色法^{3,5)}によって槽内の混合過程を観測した。さらに、液高さの異なる攪拌槽について混合時間を測定し、混合時間と液高さとの関係が比例関係を保つ液高さの最大値が攪拌効果の及ぶ混合領域の一つの指標となることを見出した。

1. 実験装置および実験方法

Fig. 1 に実験装置の概略を示した。攪拌槽①は透明アクリル製円筒形で、攪拌槽内径 D_t は 0.1, 0.14, 0.17 m、槽長 L と槽径の比 $L/D_t = 5.3$ の 3 個の幾何学的に相似な装置を用いた。邪魔板は攪拌槽内径 D_t の 1/10 の幅のものを 4 枚対称に取付けた。攪拌翼は図示のよう

な 6 枚羽根タービン翼を用いた。その寸法比を図中に示した。液高さの 1/2 の高さの位置に攪拌翼を 1 個取付けた。

攪拌槽内に水および水飴水溶液を入れ、これと同じ粘度の KCl 溶液をトレーサーとして用い、上和野ら²⁾の電極法に準じて、槽内液の混合時間を測定した。トレーサーの注入法は安藤ら¹⁾の方法を準用した。すなわち、攪拌槽内の溶液と同粘度に調製した 1 kmol/m³ の KCl

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

† 〒050 室蘭市水元町 27-1

* 室蘭工業大学 化学工学科

** 北海道大学工学部 合成化学工学科

Fig. 2 Photograph of mixing process and θ_p

溶液をトレーサーとして用い、トレーサータンク⑥にコンプレッサー⑧で空気圧をかけ、電磁弁③を、タイマー⑤を用いて 0.2~0.6 秒間開き、槽内液 1 l につき 0.2~0.6 ml のトレーサーを注入する。トレーサー注入が終了直後に電磁弁③は閉じ、同時に電磁弁④が開き、トレーサー注入ノズル内に残留している KCl 溶液は攪拌槽内の液の圧力で系外に排出される。トレーサーを、攪拌槽上部から注入した場合と攪拌槽下部から注入した場合とを比較したところ、混合時間はほとんど同一であったが、ノズル内に残留しているトレーサーの排出が上部から注入するよりスムーズであった下部注入を採用した。

槽内の混合過程を反応呈色法^{3,5)}により観測し、写真撮影により検討した。すなわち、攪拌槽内の攪拌液（水および水飴水溶液）にはあらかじめ、でんぷん溶液の少量を加え、均一に混合しておく。注入沃度溶液は、攪拌液と同密度に調製した沃度・沃度カリ溶液を用いた。これを攪拌槽の上部より注入した場合と、下部から注入した場合とを比較すると、呈色状況や、呈色に至る時間の両者の差はほとんどなかったため、前述の混合時間測定のとトレーサー注入法と同様、攪拌槽下部より沃度溶液の注入を行った。写真撮影には、Fig. 1 に示したごとく、散光紙⑩で攪拌槽の半分を覆い、2 個の写真用フラッドランプ⑨で照射し、カメラ⑪で呈色状態の変化を時間の経過に従って撮影した。

2. 実験結果および考察

2.1 反応呈色法による観測

混合過程を示す連続写真の代表例として、攪拌液が水 ($N_{Re}=1.25 \times 10^4$) の場合を Fig. 2 に示した。各写真の下にはトレーサー注入後の経過時間 θ_p を示した。カラ

Fig. 3 Relationship between h and θ_p

ー写真の呈色状態を観察し、攪拌槽の呈色部に未反応の透明部分が観察されなくなった領域の高さを呈色した高さ h と判定した。呈色部分の槽底からの高さ h と経過時間 θ_p との関係を Fig. 3 に示した。○印で示した攪拌液が水のデータ ($N_{Re}=1.25 \times 10^4$) に着目すると、呈色高さ h が 0.15 m (Fig. 3 の a 点) 付近から呈色速度が急激に速くなり、槽上部に向かって呈色が急速に進み、呈色高さ h が 0.35 m (Fig. 3 の b 点) 付近から、呈色速度が急に遅くなっている。なお、攪拌翼の位置 $h=0.25$ m では Fig. 2 に示されるごとく呈色の境界が一時静止し、その境界が上部へ移行後も翼の上下で呈色の濃淡がしばらく明瞭に観察された。

△印で示した水飴水溶液 ($N_{Re}=1.35 \times 10^3$) についても同様の傾向が見られるが、呈色速度の変化点 a', b' は水の場合に比べて長い経過時間後に現れており、また変

Fig. 4 An example chart for response curve of concentration in mixing

Fig. 5 Relationship between displacement of pen Δx and mixing time θ

化点の a' , b' 間の高さも ab 間の高さに比べ若干小さくなっている。

2.2 電極法による混合時間と攪拌翼の混合領域

Fig. 1 の電極⑭, ⑮間の抵抗差 (トレーサー濃度の差) に起因する電橋⑪の不均衡電圧信号とトレーサー注入時を基点とした経過時間 θ との関係を記録計⑬に画かせた。その代表例を Fig. 4 (a), (b) に示した。ペンの位置 x はトレーサー注入前と注入後十分大きい時間経過後と多少異なるが、十分大きい時間経過後のペンの位置を基準とした混合過程内のそれぞれの時間 θ におけるペンの偏位を Δx とする。本実験範囲では、ペンの偏位 Δx は Fig. 1 の電極⑭, ⑮間の濃度差にほとんど比例している。 Δx とペンの最大偏位 $\Delta x_{\max}$ との比 $\Delta x/\Delta x_{\max} = 0.02$ を与える最大時間を混合時間 θ_M と定義した。

$\Delta x_{\max}$ は約 20~40 mm であるので、 $\Delta x/\Delta x_{\max} = 0.02$ を与える Δx は 0.4~0.8 mm となり非常に小さい。また、 $\Delta x/\Delta x_{\max} = 0.02$ 近傍では、 Δx の減少率も小さいので、 $\Delta x/\Delta x_{\max} = 0.02$ を $x \sim \theta$ 曲線より直接求

Fig. 6 Relationship between θ_M and H

めると基準の位置が混合時間の値に影響し、 $\Delta x_{\max}$ の小さい時にその影響が特に著しい。Fig. 4 に示したデータよりペンの偏位 Δx と経過時間 θ との関係を求め Fig. 5 に示した。本実験で得られた Δx と θ との関係のほとんどは、Figs. 4, 5 で示されたように、指数関係 Eq. (1) で近似できた。

$$\Delta x = K \exp(-\theta/\tau) \quad (1)$$

指数関係で近似できたデータについては、Fig. 5 のように混合過程内のそれぞれの時間 θ におけるペンの偏位 Δx を約 2 mm までプロットし、直線の勾配より Eq. (1) の τ を求め、 $\exp(-\theta/\tau) = 0.02$ に対応する θ として 3.9τ を混合時間 θ_M とした。 $\Delta x_{\max}$ の比較的大きなデータについて $\Delta x/\Delta x_{\max} = 0.02$ を与える時間として直接 $x \sim \theta$ 曲線より読み取った混合時間と、 3.9τ とを比較すると、10% 以内で一致した。

$H/D_t \leq 1.5$ の場合には前述のような指数関数では近似できないデータも現れた。指数関数で近似できないデータについては $\Delta x/\Delta x_{\max} = 0.02$ を与える時間を直接求めた。

Fig. 6 に実測した混合時間 θ_M と液高さ H との関係の代表例を示した。混合時間 θ_M は 10 回の測定の平均値である。また θ_M は液高さの小さい領域では液高さ H に比例して増加するが、図中の $\times$ 印の個所から急激に増加の割合が大きくなっている。これは水、水飴水溶液ともに同様の傾向を示しているが、高粘度になるほど増加の割合は大きくなっている。槽径 $D_t = 0.14, 0.17$ m の攪拌槽の測定結果も θ_M と H が比例関係からずれる液高さ以上で混合時間は著しく増大した。

Fig. 7 Relationship between H_{ic}/D_t and N_{Re}

Fig. 3 の $N_{Re}=1.25 \times 10^4$ のデータの a~b 間の高さはおよそ 0.2 m であり, a~b 間の時間はおよそ 7 秒である。これに対して Fig. 6 の $N_{Re}=1.7 \times 10^4$ のデータにおいて, θ_M が H に比例しなくなる点を示す×印に対応する液高さは約 0.22 m, 混合時間は 6 秒である。Fig. 3 の a~b 間の高さおよび時間は, レイノルズ数の若干の差を考慮すれば, Fig. 6 の混合時間と液高さとの関係のデータが示す変化点の液高さ H_c とそれに要する時間にはほぼ対応している。すなわち $H > H_c$ の攪拌槽では攪拌翼からの距離 H_i が $1/2 H_c$ に対応する距離 H_{ic} 以上の部分と H_{ic} 以内に含まれる部分とでは, 混合状態が異なることが推定される。

上述のごとく, 攪拌翼からある距離以内に含まれる, 翼による混合が有効に作用する領域を仮定して, 翼からの距離 H_{ic} 以内の部分をも混合領域と定義する。Rushton 型タービン翼を持つ幾何学的に相似な攪拌槽について, 混合領域 H_{ic} と槽径 D_t との比 H_{ic}/D_t とレイノルズ数との関係を, Fig. 7 に示した。 H_{ic}/D_t と N_{Re} との関係は, 上述の呈色反応法および混合時間法による 2 種類の測定法による結果につき, 異なる粘度, 攪拌速度, 装置規模を含めて, 次式で示される同一の相関関係が現れている。

$$\begin{aligned} H_{ic}/D_t &= 0.45 \cdot N_{Re}^{0.1} & (2) \\ D_t &= 0.1 \sim 0.17 \text{ m} \\ W_i/D_i &= 0.2 \\ n &= 5.0 \sim 6.7 \text{ s}^{-1} \\ \mu &= 0.001 \sim 0.07 \text{ Pa} \cdot \text{s} \\ N_{Re} &= 2.9 \times 10^3 \sim 1.7 \times 10^4 \end{aligned}$$

Fig. 3 の○印の条件について上式による計算値を, Fig. 3 左図に $H_{ic,cal}$ として示した。

混合領域 H_{ic} に及ぼす攪拌翼幅 W_i の影響を Fig. 8 に示した。 H_{ic}/D_t は, W_i/D_i の増加とともに増加している。 W_i/D_i の小さい場合は, 増加の程度は大きい, 通常的设计条件である $W_i/D_i=0.2$ 近傍では, 増加の程度は大きくない。すなわち, 混合領域を大きくする目的で W_i/D_i を大きくすることは有効でないことを示している。 W_i/D_i を大きくとって H_{ic} を増大させるよりも, 翼間隔を $2 H_{ic}$ 以内として多段化することが, 実用上好

Fig. 8 Relationship between H_{ic}/D_t and W_i/D_i

ましいことになる。

結 言

槽径 $D_t=0.1, 0.14, 0.17 \text{ m}$ の幾何学的に相似な攪拌槽を用いて, 水および水飴水溶液 ($\mu=0.001 \sim 0.07 \text{ Pa} \cdot \text{s}$) を液高さの $1/2$ の位置に取付けたタービン翼で攪拌し, 種々の液高さについて混合時間を測定した。また液高比 $H/D_t=5$ の槽について, 槽内の混合過程を反応呈色法により観測し, 写真撮影によって検討した結果次の結論を得た。

1) 呈色境界が伝播する軸方向速度は, 攪拌翼よりある距離以上では著しく低下し, この結果より, 翼の攪拌効果の及ぶ軸方向混合領域, H_{ic} の存在することが推察された。

2) ある液高さ以下では混合時間は液高さに比例するが, 比例関係を保つ液高さの最大値は, 上述の混合領域 H_{ic} とほとんど一致した。したがって液高さの大きい槽においては, この最大値は軸方向混合領域の長さの目安とみなすことができる。

3) 混合領域 H_{ic} と操作条件との関係は Eq. (2) で表された。

【謝 辞】 本研究を遂行するにあたり実験にご協力いただきました五十嵐一夫, 島崎晋也の両氏に深く感謝いたします。

Nomenclature

D_i	= diameter of impeller	[m]
D_t	= diameter of vessel	[m]
H	= height of liquid	[m]
H_c	= region of mixing	[m]
H_i	= height of liquid from impeller	[m]
H_{ic}	= critical region of mixing	[m]
h	= height of colored liquid	[m]
L	= total length of vessel	[m]

N_i	= number of impeller	[—]
N_{Re}	= Reynolds number ($\rho \cdot n^2 \cdot D_i^2 / \mu$)	[—]
n	= rotation speed of impeller	[s ⁻¹]
W_i	= width of impeller	[m]
x	= position of pen on recording chart	[m]
Δx	= displacement of pen on recording chart	[m]
$\Delta x_{\max}$	= maximum value of Δx	[m]
θ	= time	[s]
θ_M	= mixing time	[s]
θ_p	= time elapsed after color reaction is started	[s]
μ	= viscosity of liquid	[Pa·s]
ρ	= density of liquid	[kg·m ⁻³]

Literature cited

1) Ando, K., T. Fukuda and K. Endou: *Kagaku Kōgaku*,

- 38, 460 (1974)
 2) Kamiwano, M., K. Yamamoto and S. Nagata: *ibid.*, 31, 365 (1967)
 3) Kamiwano, M., U. Sato and K. Yamamoto: "Kemikaru Enginiyaringu", 14, 797, Kagaku Kogakusha, Tokyo (1969)
 4) Murakami, Y., T. Hirose and A. Yoshida: Preprints of the 47 th Annual Meeting of The Soc. of Chem. Engrs., Japan, I, 206, Tokyo (1982)
 5) Nagata, S., M. Yanagimoto and T. Yokoyama: *Kagaku Kōgaku*, 21, 278 (1957)
 6) Nishikawa, M., K. Ashiwake, N. Hashimoto and S. Nagata: *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, 2, 426 (1976)
 7) Sato, T. and I. Taniyama: *Kagaku Kōgaku*, 29, 38 (1965)
 8) Taniyama, I. and T. Sato: *ibid.*, 30, 354 (1966)
 9) Takeda, K., T. Hoshino, H. Taguchi and T. Fujii: *ibid.*, 32, 376 (1968)

(1984 年 7 月 23 日受理; 化学工学協会新潟大会 (新潟, 1982 年 7 月) にて一部発表)

Mixing Region Affected with Turbine Impeller in Stirred Vessel

Toshio Yahata, Koji Ando,* Fujio Komatsu
and Kazuo Endoh**

Dept. of Ind. Chem., Muroran Inst. of Tech., Muroran 050

Key Words: Agitation, Mixing, Mixing Process Photograph, Mixing Region, Mixing Time, Turbine Impeller

To evaluate the axial mixed region of a stirred vessel, the mixing time of water and corn syrup of various liquid heights-to-diameter ratio ($H/D_t=1-5$) was measured. Three geometrically similar stirred vessels, equipped with a turbine impeller, positioned at 1/2 the height of liquid, were used.

The mixing process of liquid where liquid height was high was observed by the color reaction method, and photographs of the mixing process were taken and analysed.

The results obtained were: 1) The axial velocity of the color boundary propagation was remarkably slow in the region over a certain distance away from a mixing impeller, and from this fact the existence of the region affected by stirring with an impeller, H_{ic} , was estimated. 2) The maximum value of liquid height under which mixing time is proportional to liquid height approximately agreed with that of the above-mentioned mixing region, H_{ic} . Accordingly, in a vessel whose liquid height is high the maximum height can be regarded as a measure of the length of the axial mixed region. 3) The relation between a mixing region, H_{ic} , and the operational condition can be expressed as follows:

$$H_{ic}/D_t = 0.45 \cdot N_{Re}^{0.1}; N_{Re} = 2.9 \times 10^2 - 1.7 \times 10^4$$

* Dept. of Chem. Eng., Muroran Inst. of Tech.

** Dept. of Chem. Process Eng., Hokkaido Univ.