

インターミックス混合機における混合速度

辻 川 浩 雄・浅 沼 誠
金 親 義 彦・森 芳 郎

Mixing Rate of an "Intermix" Mixer

Hiroo TSUJIKAWA, Makoto ASANUMA,
Yoshihiko KANECHIKA and Yoshiro MORI

Abstract

Mixing rates of an "Intermix" mixer of laboratory scale were measured. Two ditched-rolls gear each other, and liquids of high viscosity are mixed by the revolution of the rolls in the mixing chamber. Polyvinyl alcohol (PVA)-HCl solution was mixed with PVA-NaOH solution of the same viscosity (2.64-13.8 Pa · s). The variation of electric conductivity of the mixture was linear to the degree of mixing.

The mixing rate was analysed by a slab model with moving reacting boundary. The apparent mixing rate $K(=\ln(c_{AO}/c_A)/\theta)$ was found to be proportional to the half order of the Reynolds number ($=\rho nd^2/\mu$). The thickness of the mixing layer was calculated between 0.78-1.60 mm.

1. 緒 言

インターミックス混合機は、英国 Fransis Shaw 社の開発によるもので、我国および近隣諸国では日立機械エンジニアリング株式会社が製造販売している、ゴム・プラスチック用の混練機である。処理量に応じて数種の型があるが、実験室用の小型のものについて混合速度を測る機会を得たので結果を報告したい。

2. みかけ反応速度の解析

Fig. 1 に混合過程の概要を示す。はじめに厚さ $2l_0$ の酸を含む液の層（以下酸層という）と厚さ $2(L-l_0)$ のアルカリを含む液の層（以下アルカリ層という）が交互にいくつも並んでいるものとする。境界面からアルカリ層に向かって酸が拡散し、酸層に向かってアルカリが拡散していく。反応速度がおそい反応であれば、酸層中にアルカリが、アルカリ層中に酸が共存しうる。しかし水素イオンと水酸化物イオンの中和反応速度は非常に速いので、両者は出会ったとたんに反応により消

滅し、生成物たる塩のみが残るため、酸とアルカリが共存することはない。両者の拡散速度の違いにより、拡散量の多いほうの方が他方の層へ侵入するため、反応境界面は時間と共に移動する。

Mao と Toor¹⁾ は連続混合槽において高速反応を利用した混合速度の研究において、液量比が 1 に近い場合は平板状分布モデル（スラブモデル）が当てはまると述べている。本研究の場合は回分式の混合であるが、液量比が 1 であることから平板状混合と考えてよいであろう。

Spencer と Wiley³⁾ は混合層の斑隙厚さ（striation

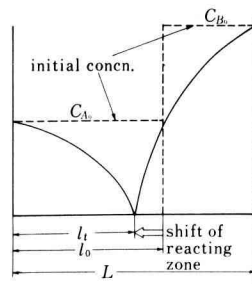


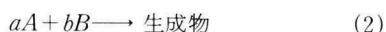
Fig. 1. Mixing Process with Very Fast Reaction

thickness) は時間に対して

$$L = L_0 / (1 + \theta / \Theta) \quad (1)$$

のように変化すると述べている。ここで Θ は斑隙厚さの減少速度に関する特性時間である。しかし本混合機に対する Θ の値は不明であるし、また混合が完了するまでの時間も数秒以内と極めて短いので、層の厚さは不変であると仮定する。

結局、高速反応を表す式は次のように書ける。酸層とアルカリ層を加えた厚さを $2L$ とし、反応を



と書くとき、それぞれの層内において

$$\frac{\partial C_A}{\partial \theta} = D_A \frac{\partial^2 C_A}{\partial x^2} \quad (0 \leq x \leq l_t) \quad (3)$$

$$\frac{\partial C_B}{\partial \theta} = D_B \frac{\partial^2 C_B}{\partial x^2} \quad (l_t \leq x \leq L) \quad (4)$$

境界条件は

$$x=0 \text{ にて} \quad \frac{\partial C_A}{\partial x} = 0 \quad (5)$$

$$x=L \text{ にて} \quad \frac{\partial C_B}{\partial x} = 0 \quad (6)$$

$$x=l_t \text{ にて} \quad C_A = C_B = 0 \quad (7)$$

初期条件は、 $\theta=0$ の時

$$0 \leq x \leq l_0 \text{ にて} \quad C_A = C_{A0}, C_B = 0 \quad (8)$$

$$l_0 \leq x \leq L \text{ にて} \quad C_A = 0, C_B = C_{B0} \quad (9)$$

解は⁵⁾

$$C_A = \frac{4}{\pi} C_{A0} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{(-1)^{m-1}}{2m-1} \cos\left(\frac{2m-1}{2} \frac{\pi x}{l_t}\right) \times \exp\left\{-\left(\frac{2m-1}{2}\right)^2 \frac{\pi^2 D_A \theta}{l_t^2}\right\} \quad (10)$$

$$C_B = \frac{4}{\pi} C_{B0} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{(-1)^{m-1}}{2m-1} \cos\left(\frac{2m-1}{2} \frac{\pi x}{L-l_t}\right) \times \exp\left\{-\left(\frac{2m-1}{2}\right)^2 \frac{\pi^2 D_B \theta}{(L-l_t)^2}\right\} \quad (11)$$

反応面の位置 l_t は次の式を解くことにより求められる。

$$\frac{8}{\pi^2} \sum_{m=1}^{\infty} \left[\frac{l_t}{l_0} \frac{1}{(2m-1)^2} \times \exp\left\{-\left(\frac{2m-1}{2}\right)^2 \frac{\pi^2 D_A \theta}{l_t^2}\right\} \right.$$

$$\left. - \frac{bC_{B0}(L-l_t)}{aC_{A0}l_0} \frac{1}{(2m-1)^2} \right] \times \exp\left\{-\left(\frac{2m-1}{2}\right)^2 \frac{\pi^2 D_B \theta}{(L-l_t)^2}\right\} - 1 + \frac{bC_{B0}(L-l_0)}{aC_{A0}l_0} = 0 \quad (12)$$

実験条件より $a=b=1$, $C_{A0}=C_{B0}=0.02 \text{ N}$, $l_0=L/2$, $D_A=3.34 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$, $D_B=1.30 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$, とし L を仮定してそれぞれの時間 θ に対する A または B の平均濃度を (10), (11) 式より計算した。平均濃度の対数を時間 θ に対してプロットすると、0.2s 以上で直線が得られる。このときの勾配より見かけ反応速度定数 k を計算した。

$$K = \frac{1}{\theta} \ln \frac{C_{A0}}{C_A} = \frac{1}{\theta} \ln \frac{C_{B0}}{C_B} \quad (13)$$

3. 実験装置および方法

インターミックス混合機は Fig. 2 に示すように、互に逆方向に回転する 2 本のロールに互にかみ合うように凹凸を設け、その間に高粘度流体をはさみ込んで混練する。ロールの外径は約 6 cm, 長さ約 8 cm, 溝の深さは 0.5 cm, 有効容積は 300 cm³ である。

混合割合の測定は、酸とアルカリの中和反応に伴う濃度変化によった。すなわち、混合機の底部に、ポリビニルアルコールを加えて増粘したカセイソーダ水溶液 (粘度 2.64~13.8 Pa·s) 150 ml を入れ、その上に同

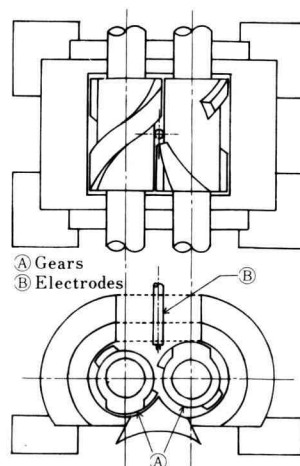


Fig. 2. The Experimental Apparatus

じ粘度にしたポリビニルアルコール+塩酸水溶液 150 ml を置き、電極を入れてローターを回転させ、濃度の変化を自作の電気伝導度計により増巾、整流し、日立 561 型記録計に記録した。ローターの回転数は 0.967 1/s に固定されている。ポリビニルアルコールの水溶液はニュートン流体に近く、溶液中の拡散係数は水中における拡散係数に等しいことがわかっている⁴⁾。

電極は外径 7 mm のアクリル管の先端に、直径 1 mm、長さ 5 mm の白金線を取付けたものである。カセイソーダおよび塩酸の濃度は、混合前の濃度でいずれも 0.02 N とした。電極の間隔がやや大きいので、一方の電極から出た電流線はカセイソーダと生成物である塩化ナトリウムの混合した層、および塩酸と塩化ナトリウムの混合した層をいくつか通って、もう一方の電極に達することになる。電流線がそれぞれの層の中にある長さは、はじめに加えた液量の比になることが期待される。本研究の場合は、等量であるから、電流線に沿ってそれぞれの層の長さを積算すれば同じ長さだけそれぞれの層にあることになる。この電流線における電気抵抗は、それぞれの層の電気抵抗の直列和であり、電気抵抗は含まれている物質の電気伝導度（濃度が稀薄なので濃度に比例すると考えてよい）の和に逆比例する。以上のことから酸アルカリ中和反応の反応進行度と電極間電気伝導度の関係を計算し、プロットしたところ、両者の間に直線関係が成立つとと考えてよいことがわかった。

また考えられる電気伝導度の変化範囲内で、電気伝導度と記録計の読みの間に直線関係が成立つことが、予備実験で確かめられた。

以上のことより、反応の進行度と記録計の読みの間に直線性が成立つことがわかったので、この結果を用いて混合速度を解析した。

4. 結 果

実測した濃度と時間の関係を半対数グラフにプロットすると Figs. 3, 4 のように直線が得られた。この勾配からみかけ反応速度定数を求めると Fig. 5 のようになり、レイノルズ数 $\rho nd^2/\mu$ の 1/2 乗でまとめることができた。これは攪拌槽においてレイノルズ数が小さい ($Re < 100$) 時の挙動⁵⁾と同じであり、層流域におけるみかけ混合速度 K が $Re^{1/2}$ にてまとめられることを示唆している。また層の厚さ $2L$ はみかけ混合速度から推測して 0.72~1.60 mm となり、攪拌槽における

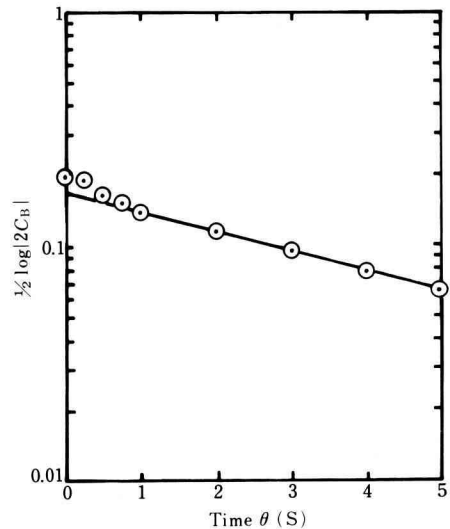


Fig. 3. Correlated Concentration vs Time (Viscosity 5.35 Pa · s)

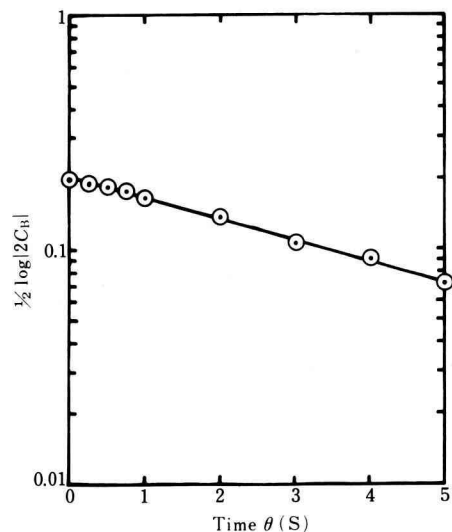


Fig. 4. Correlated Concentration vs Time (Viscosity 10 Pa · s)

混合の場合とはほぼ同じであった。

5. ま と め

ポリビニルアルコールで増粘した塩酸とカセイソーダの水溶液を混合することにより、インターミックス

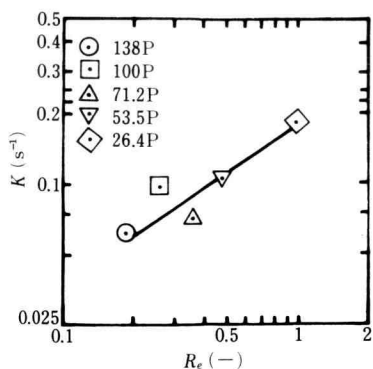


Fig. 5. Apparent Reaction Rate Constant K vs Reynolds Number Re

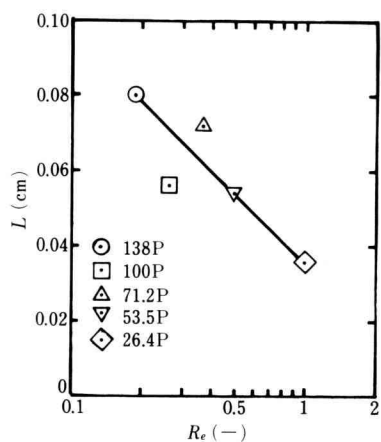


Fig. 6. Mixing Thickness L vs Reynolds Number Re

混合機の混合速度を測定した。電気伝導度計の読みと混合度の間に直線関係が成立つことを確かめ、反応面が移動する平板モデルにより混合速度を解析した。みかけ混合速度はレイノルズ数の $1/2$ 乗に比例することが確かめられ、混合層の厚さは $0.78 \sim 1.60$ mm と推測された。混合機の機械的条件により、測定できた実験範囲はやや狭かったが今後はさらに広い実験条件で実

験を行いたいと考える。

(付記) インターミックス混合機は日立機械エンジニアリング株式会社より借用したものである。ここに付記して感謝する。

記 号

- A, B = 酸および塩基の化学記号
 a, b = 酸および塩基の化学量論係数 [—]
 C_A, C_B = 酸および塩基の濃度 [mol/m^3]
 C_{A0}, C_{B0} = 加えた酸および塩基の初濃度 [mol/m^3]
 d = ロールの直径 = 0.06 m
 D_A, D_B = 酸および塩基の拡散係数 [m^2/s]
 K = みかけの混合速度 [s^{-1}]
 L = 混合層の厚さの半分 [m]
 l_0 = 混合前における酸層の厚さの半分 [m]
 l_t = 任意の時間における酸層の厚さの半分 [m]
 m = 順序数 [—]
 n = ローターの回転数 [s^{-1}]
 $Re = \rho n d^2 / \mu$ = レイノルズ数 [—]
 x = 酸層の中心から測った距離 [m]
 μ = 粘度 [$\text{Pa} \cdot \text{s}$]
 ρ = 流体の密度 [kg/m^3]
 Θ = 斑隙厚さの減少速度に関する特性時間 [s]
 θ = 時間 [s]

文 献

- 1) 日立機械エンジニアリング株式会社カタログ
- 2) K.W. Mao and H.L. Toor, AIChE J., **16**, 49 (1970)
- 3) R.S. Spencer and R.M. Wiley, J. Coll. Sci., **6**, 133 (1951)
- 4) 上和野, 斎藤, 依田, 化学工学論文集, **9**, 689 (1983)
- 5) 浅沼誠, 幾徳工業大学卒業論文, 1986