

機械式攪拌炉内の固液混合に及ぼす邪魔板の効果

畔柳 重義*・山本 典広*²・射場 淳*³・堀井 寛之*⁴・伊藤 公久*⁵・菊池 直樹*⁶

Effect of Baffles on the Mixing of Liquid and Particles in a Mechanically Stirred Vessel

Shigeyoshi KUROYANAGI, Norihiro YAMAMOTO, Atsushi IBA, Hiroyuki HORII, Kimihisa ITO and Naoki KIKUCHI

Synopsis : For the application of the mechanical stirring method currently used in KR process to the new refining processes, the effect of baffles on the mixing of bath liquid and solid particles was investigated using a water model. The baffle whose width is 1/10 of the vessel diameter was enough to enhance the liquid-particles mixing. The LDV measurement showed the formation of the unsteady vertical flow by the baffle. The same effect on the mixing was observed by injecting gas from the bottom into the mechanically stirred vessel.

Key words : refining; mixing; baffles; steelmaking; injection.

1. 緒言

精錬反応のさらなる高効率化を目指すには、固体粒子として添加される精錬剤とメタルとの迅速かつ十分な混合を達成する方策の開発が重要である。KR脱硫法で用いられている機械的攪拌は、コンパクトで制御性の高い利点を持つ混合方法であり、今後新しい精錬プロセスを開発する際に、応用可能な技術である。

機械的攪拌に関する研究は、化学工学の分野で数多く報告されている¹⁾が、比較的複雑な反応容器とインペラーを用いている場合が多く、その知見を高温の反応系である鉄鋼精錬に直接応用することは困難である。一方、鉄鋼分野ではKR脱硫プロセスに関連した研究が行われ²⁻⁶⁾、脱硫に及ぼすインペラー形状の効果、ガイドプレートの挿入や傾斜インペラーの有効性などについての調査が行われてきた。また、H. Sohn⁷⁾は水モデル実験によって最適な邪魔板の条件を求め、実操業に適用した場合に約2倍の脱硫効果が得られたことを報告している。しかし、これらの研究はいずれもKR脱硫を目的としているため、実験条件が限定されており、機械的攪拌技術を他の精錬プロセスに適用するためには、さらなるデータの蓄積と、メタルとフラックス粒子の混合に関する詳細な情報が必要である。近年、野村ら⁸⁾により、機械式偏心攪拌によって傾斜渦を作り、低密度粒子を浴内に分散する方法が報告され、その有効性が確認された。

本研究では、実際の鉄鋼精錬、特に連続精錬炉の設計に

おける有用な知見を得るため、水モデルを用いて、浴の液体と添加粒子との混合の促進に及ぼす邪魔板の効果をも、様々な方法を用いて系統的に調査し、最適な条件の探索を行なった。

2. 実験方法

本研究で用いたリアクターの概略と各パラメータの説明、およびインペラーの寸法ををFig. 1に示す。リアクターには円筒容器（内径400mm、高さ500mm）を用いた。インペラーは、すべて4枚羽で、その厚みは15mmであり、長方形のtype A、台形のtype B、逆台形のtype Cの3種類

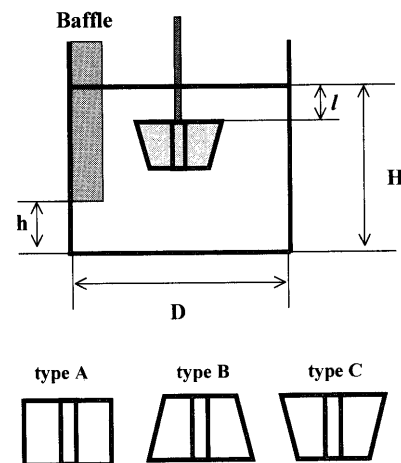


Fig. 1. Schematic drawing of experimental apparatus.

平成15年10月6日受付 平成16年1月7日受理 (Received on Oct. 6, 2003; Accepted on Jan. 7, 2004)

- * 早稲田大学大学院生 (現: (株)ブリヂストン) (Graduate Student, Waseda University, now Bridgestone Corp.)
- * 2 早稲田大学大学院生 (Graduate Student, Waseda University)
- * 3 早稲田大学大学院生 (現: 西日本旅客鉄道 (株)) (Graduate Student, Waseda University, now West Japan Railway Company)
- * 4 早稲田大学大学院生 (現: 東海旅客鉄道 (株)) (Graduate Student, Waseda University, now Central Japan Railway Company)
- * 5 早稲田大学理工学部 (School of Science and Engineering, Waseda University, 3-4-1 Okubo Shinjuku-ku Tokyo 169-8555)
- * 6 JFEスチール (株) スチール研究所 (Steel Research Lab., JFE Steel Corp.)

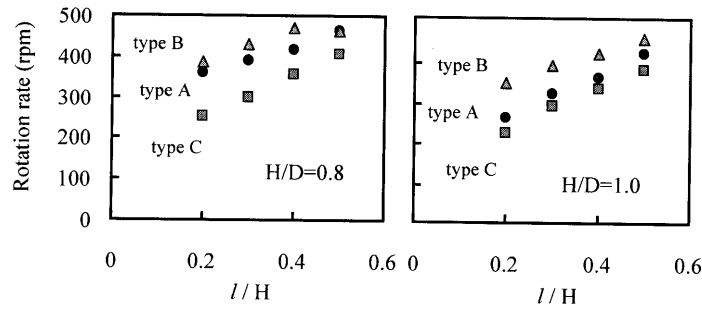


Fig. 2. Critical rotation rate for the penetration of particles.

を用いた。本研究は連続リアクターにおける機械攪拌装置を最終的な目標においているが、今回はその第一段階として、実際のKR炉を参考にして、容器やインペラーの大きさを決定した。この水モデルにおける流動特性は、攪拌レイノルズ数によって記述できる⁸⁾。邪魔板はすべて厚さ15 mm、リアクター半径方向の長さ(邪魔板の幅) $W=20, 40, 60, 80, 100$ mmの5種類を用いた。リアクター、インペラー、邪魔板はすべて流れの様子や疑似フラックスの挙動が外部から観察できるように透明アクリル板で作成した。インペラーをリアクターの中心になるように、インペラーシャフトをモーター(HEIDON製 FLV300)に取り付け、スタンドで固定した。すべての実験でインペラーの回転方向は、リアクター上部から見て時計回りとした。実験では水深 H を360 mmとし、後述する粒子吐き出しに及ぼすインペラーの浸漬深さに関する実験結果をもとに、インペラーの取り付け位置を $l/H=1/3$ となるように設置した。さらに邪魔板はクランプを用いてリアクターに固定することで、高さを自由に換えられるようにした。

疑似フラックスには黄色に着色したPE製(ポリエチレン製)の球形ボール(比重0.89、粒径5.85 mm)を使用した。粒子の選定にあたっては、識別が容易で浴中への分散状況が把握しやすいものとした。野村ら⁹⁾の詳細な考察に従えば、本実験で用いた粒子はフルード数に基づいた相似則、ウェーバー数に基づいた相似則のいずれも満たしていないので、本実験結果を実プロセスに直接適用できるかは現時点では明確ではない。また、浴内の流速測定実験には1次元LDV(カノマックス製、FLV8851)を用いた。

3. 実験結果

3.1 インペラー形状による吐き出し能力

疑似フラックスとしてPEボール1500個を投入した後、3種類のインペラーそれぞれについて、疑似フラックスが液中に侵入し始めるインペラー回転数(臨界回転数)を測定することでインペラー形状によって異なるフラックスの吐き出し能力の評価を行った。

3種類のインペラーについて、疑似フラックスが侵入する臨界の回転数を調査した結果をFig. 2に示す。浴深が増

加すると臨界回転数はすべて減少し、インペラーの浸漬深さの増大に伴って増加する。いずれの場合でもインペラー type C, A, Bの順に臨界回転数は増加しており、これは上辺の長さに対応している。観察によれば、疑似フラックスは浴面中央部に生じたくぼみに引き込まれた後、インペラーに巻き込まれて浴中に分散する。上辺の長いインペラーほど低回転で十分なくぼみを形成することができるので、フラックスの吐き出し能力ではtype Cのインペラーが最も優れていることがわかる。したがって、以降の実験では、すべてtype Cのインペラーを用いた。また、インペラーの浸漬深さが小さいと臨界回転数が減少する一方で、粒子が浴の上部のみに滞留し浴底部まで到達しないことから、粒子が浴底部に到達する最小の浸漬位置として、 $l/H=1/3$ を決定し、以下の実験ではこの位置にインペラーを固定して実験を行った。

3.2 粒子滞留時間に及ぼす邪魔板の効果

精錬剤の反応効率向上には、フラックスのメルト中の滞留時間が大きく関与すると考えられる。そこで邪魔板の効果も疑似フラックスの滞留時間で評価した。疑似フラックスとしてPE製ボール1個を投入し、300秒間(5分間)、ビデオ撮影を行った。これをコマ送り再生して疑似フラックスが液中に侵入し始める時刻と界面まで浮上したときの時刻を記録し、液中に滞留している時間を測定した。疑似フラックスが液中に滞留している時間割合を滞留時間(Residence time (-))と定義すれば、この値は(1)式によって求めることができる。

$$\text{滞留時間} = \text{液中に滞留している時間(s)} / 300(\text{s}) \cdots \cdots (1)$$

回転数150 rpm、邪魔板の幅は20 mm、40 mm、60 mm、80 mm、100 mmとして実験を行った。

邪魔板の下端と容器底面との距離 h を変化させた場合の、滞留時間および浴内に巻き込まれた回数の変化をFig. 3に示す。滞留時間、巻き込み回数のいずれも、 h の増大とともに増加し、浴深の約1/3~1/2の時に最大値を示し、その後減少する。これは、邪魔板下部に適当な隙 Δy を設けることで、上下方向の流れが促進されたためと考えられる。

Fig. 3の結果を踏まえて、 $h=120$ mmと一定にし、邪魔

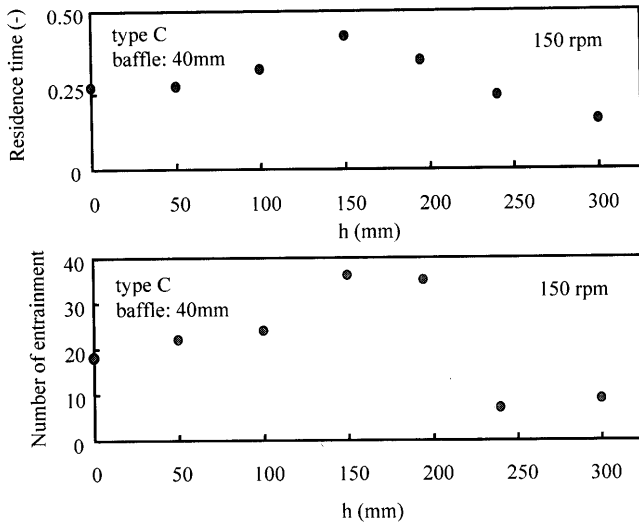


Fig. 3. Effect of the baffle position on the residence time and the entrainment of a particle.

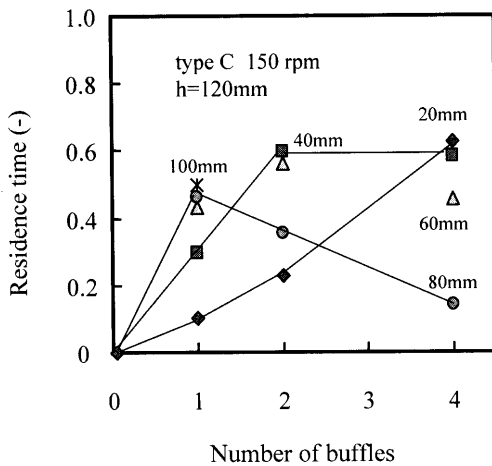


Fig. 4. Effect of the number of baffles on the residence time.

板の幅と枚数を変えた場合の結果を Fig. 4 に示す。滞留時間は邪魔板幅を大きくすることによって増大するが、60 mm、80 mm あたりで頭打ちになるということがうかがえる。また邪魔板幅 20 mm では 4 枚まで増やした方がよく、40 mm、60 mm では 2 枚で、80 mm 以上になると 1 枚で十分であるという結果が得られる。いずれの場合にも邪魔板が粒子の混合には有効であると考えられるが、邪魔板の幅や枚数が増加した結果、邪魔板の後方に発生したウェークが攪拌効果を阻害していると考えられる⁹⁾。

邪魔板設置の効果をさらに定量的に把握するために、デジタルカメラで撮影した画像を 2 値化し、浴内に巻き込まれた擬似フラックスが画像に占める割合を測定し、これを 2 次元粒子濃度として定義した。解析は 30~50 フレームの画像について行い、その平均値を求めた。結果を Fig. 5 に示すが、その結果は必ずしも Fig. 4 とは対応していない。多数の粒子を分散させるためには、40 mm の邪魔板を複数使うよりも、60 mm の邪魔板を 1 枚用いたほうが効果的な

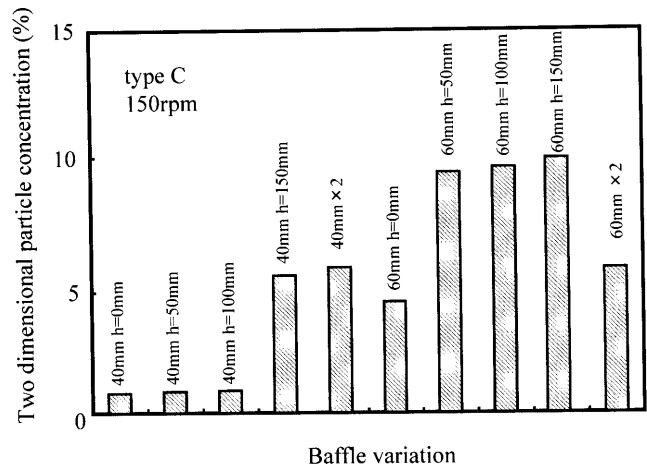


Fig. 5. The effect of the baffle on the two dimensional particle concentration

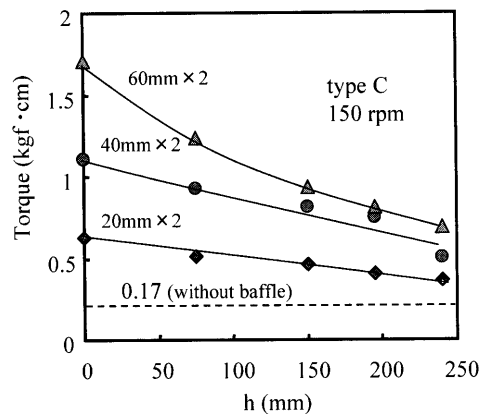


Fig. 6. Relation between the baffle position and the torque.

ことがわかる。

3.3 邪魔板によるトルクの変化

実験結果はすべて回転数をパラメータして整理されるが、浴内に投入される動力は、邪魔板の存在によって大きく変化するものと考えられる。そこで、モーターにかかるトルクに及ぼす邪魔板の影響を明らかにするため、インペラー回転数を 150 rpm に固定し、邪魔板の設置高さを変えたときのトルク値を測定した。滞留時間に関する実験結果より、20、40、60 mm の 3 種類の邪魔板をそれぞれ 2 枚用いた。Fig. 6 に実験結果を示す。図中の破線は邪魔板を挿入していないときにおけるトルク値を示しており、0.17 kgf·cm ($1.67 \times 10^{-2} \text{ N} \cdot \text{m}$) である。邪魔板と底部との距離を大きくするとトルク値が小さくなっていることがわかる。また邪魔板の幅を大きくするにつれてトルク値が大きくなっている。このことより邪魔板が中心シャフトに近づくだけインペラーにかかるトルクが大きくなるといえる。

3.4 浴内の平均流速

ビデオによる観察結果から、邪魔板を挿入することによって上下方向の流れが生じ、低回転においても液面に浮遊する固体を水中に巻き込むことが確認された。この効果

を定量的に理解するために、浴内の流速変化をLDV流速計によって測定した。

トレーサーとしてアルミナの粉末粒子を添加し、測定点は容器中心と容器壁の間点、浴深120, 195, 270 mmの3点とし、それぞれP1, P2, P3とした。測定サンプル数を1000, サンプリング周波数を0.5 MHz, シフト周波数を0.1 MHzとし、各点での円周方向の流速および上下方向の流速を測定した。

円周方向の流速を測定した結果をFig. 7に示す。邪魔板を挿入しない場合の円周方向の流速はすべての測定点においてほぼ等しい大きさが観測されているが、邪魔板を挿入すると流速が減少するのがわかる。図には邪魔板の幅が40 mmの結果のみを示したが、この効果は邪魔板幅の増大に伴って大きくなる。

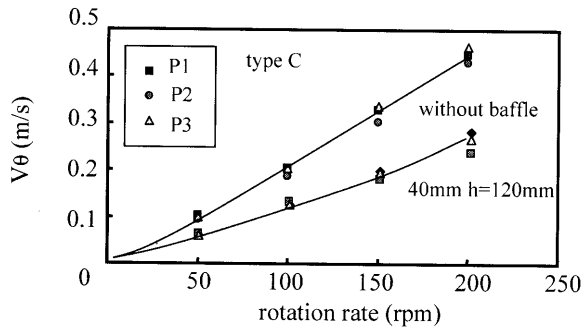


Fig. 7. Relation between the tangential velocity, V_θ and the rotation rate.

Fig. 8は、鉛直方向の流速測定の結果を示したものである。測定点を座標原点とし、鉛直上向き方向をz軸の正方向としている。邪魔板のある場合は、邪魔板なしの場合に比べて下方向の流速がおおよそ2~3倍にもなっている。

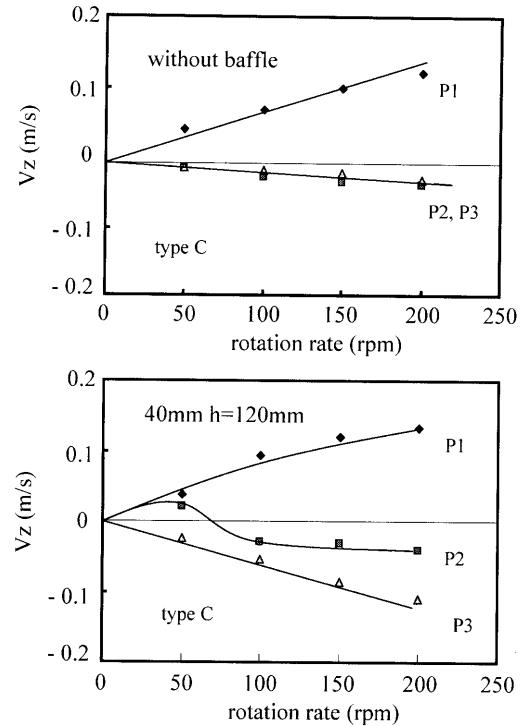


Fig. 8. Relation between the vertical velocity, V_z and the rotation rate.

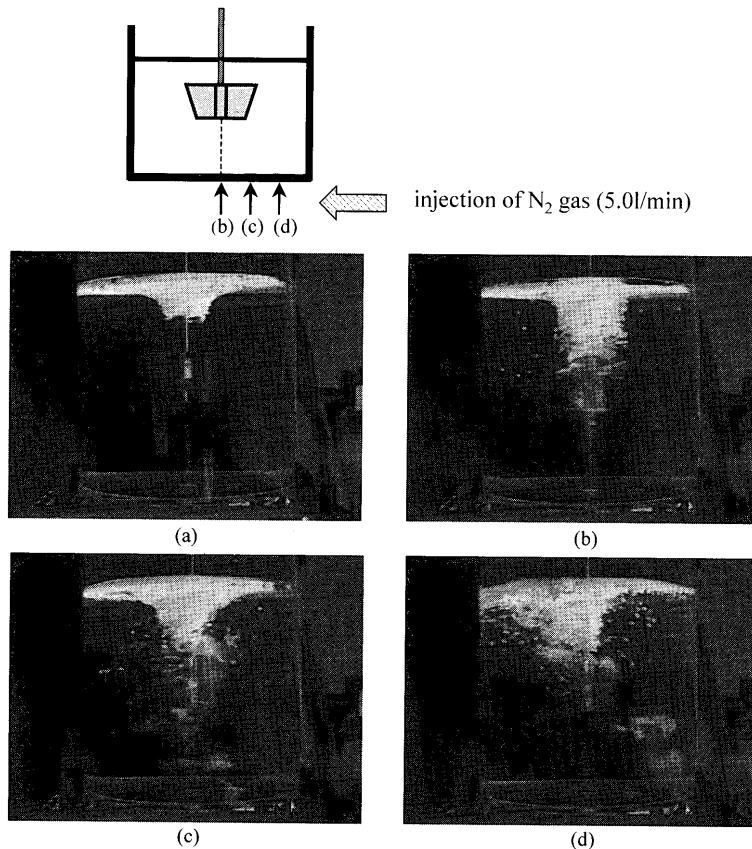


Fig. 9. Effect of gas injection on the mixing of liquid and particles.

このことが、粒子の巻き込みと混合を促進しているものと考えられる。

3.5 ガス吹込みの効果

邪魔板の効果は、非対称な鉛直方向の流れを生み出し、添加粒子の混合を促進する点にある。しかし、野村ら⁸⁾が報告しているように、偏心攪拌を用いれば邪魔板を使わなくても非対称な鉛直方向の流れを作り出し、邪魔板と同様の効果が期待できる。そこで、非対称な流れを浴内に導入するもう一つの方法として、容器底部からのガス吹込みを試みた。ガスはN₂を用い、流量は5L/minとした。Fig. 9は、吹込みなし(a)、容器底部のインペラー直下(b)、中心と壁の1/3 (c)および2/3 (d)の観察結果を示している。ガス吹込みの攪拌効果は、吹込み位置が壁に近づくにつれて大きくなっている。気泡と粒子の区別が困難であり、気泡によるレーザー光の散乱によってLDV測定も不可能であったため、混合に関する定量的評価にまでは至らなかった。モデル物質を用いた見掛けの反応速度の測定等による定量化が、今後の課題であると思われる。

4. 結言

高効率混合リアクターを開発する際の最適条件を求めるのに必要な、基礎的データを取得するための水モデル実験を行った結果、以下の結論を得た。

(1) 邪魔板を挿入することによって、流れに乱れを生

じさせ、粒子の分散と混合を促進することができた。

(2) 攪拌効果の評価法として粒子滞留時間を測定し、幅の大きい邪魔板を用いることや、邪魔板枚数を増やすことで、さらなる効果を期待できることができたことがわかった。

(3) 邪魔板を高くするとトルクが小さくなり、邪魔板の幅を長くすると大きくなる。

(4) LDV流速計を使用して浴内の流速を測定し、邪魔板によって上下の流動が発生していることを定量的に確認した。

(5) 底部からのガス吹込みによっても、添加粒子と浴との混合を促進することが可能である。

本研究の一部は、日本鉄鋼協会高効率分離・混合リアクター研究会によったことを付記し、ここに感謝する。

文 献

- 1) A.W.Nienow: *Chem. Eng. Sci.*, **23** (1968), 1453.
- 2) N.Kurokawa, S.Matsuo, H.Jouguchi, K.Yamada and Y.Watanabe: *Sumitomo Met.*, **45** (1993), 52.
- 3) N.Nakanishi, N.Bessho, S.Takada, A.Eshima, M.Kuga, J.Katsuki and M.Kawana: *Tetsu-to-Hagané*, **64** (1987), 1528.
- 4) T.Takaoka, Y.Kikuchi and K.Yamada: *CAMP-ISIJ*, **11** (1998), 141.
- 5) T.Takaoka, Y.Kikuchi and K.Yamada: *CAMP-ISIJ*, **11** (1998), 765.
- 6) Y.Kawai, T.Takaoka, Y.Kikuchi and K.Yamada: *CAMP-ISIJ*, **12** (1999), 132.
- 7) H.Sohn: *CAMP-ISIJ*, **12** (1999), 718.
- 8) T.Nomura and M.Iguchi: *Tetsu-to-Hagané*, **88** (2002), 1.
- 9) E.S.Bissell: *Chem. Eng. Prog.*, **43** (1947), 649.