

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年6月17日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06820

研究課題名(和文) 水平回転円筒面上の液膜伸張による熱と物質移動の能動制御

研究課題名(英文) Control of Heat and Mass Transfer rate by the Spread Liquid Film on Rotating Horizontal Cylinder

研究代表者

桒上 洋 (Nogami, Hiroshi)

東北大学・多元物質科学研究所・教授

研究者番号：50241584

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：水平円筒を液浴に半ば浸漬して回転させて円筒側面に形成した液膜に対する熱物質移動について検討した。まず、回転円筒により形成される液膜の液体流量を測定し、円筒の浸漬深さおよび回転数の影響を定量化した。液膜の平均速度は回転円筒の周速よりも低速となっていることを見いだした。液膜に対するガス吸収操作では、無回転の場合と比較して円筒回転により吸収速度は飛躍的に増大し、また円筒の回転数とともに吸収速度が増大した。この結果に基づき円筒外形を基準とした物質移動係数について検討し、実験範囲内で液側物質移動係数が約三倍に上昇した。即ち、物質移動速度を回転数により、能動的に制御することが可能なことを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究成果は、物質移動・熱移動を伴う機器、例えば空調機器において、熱媒体や気流の流動状態が同一でも機器の性能の制御を、これまでに無い手法により可能とするもので、新たな反応器や伝熱機器の開発・展開に資するものである。また本研究で提案する手法は、物質・熱移動速度の高速化にも有効であり、機器の高性能化のみならず、小型化に対しても有意義である。本機構を冷熱製造などに応用すれば排熱から価値の高いエネルギーへの変換も可能になり、社会全体としてのエネルギー使用量の削減を通じて持続的社会的の実現に寄与するものと考えられる。

研究成果の概要(英文)：Mass and heat transfer to a liquid film formed on the circumferential surface of a rotating cylinder which is immersed into a liquid bath was studied. Liquid flow rate passing over the rotating cylinder was measured under various immersing depths and rotating speeds. The average velocity of the liquid film was much slower than the circumferential speed of the rotating cylinder. The gas absorption rate to the liquid film was measured. The absorption rate under cylinder rotation case was much higher than that in the fixed case, and it increased with the increase in the rotation speed. The mass transfer coefficient increased up to three times in the tested conditions. These results suggested that the mass transfer rate could be controlled by the cylinder rotation.

研究分野：素材プロセス工学

キーワード：回転円柱 液膜 物質移動操作 ガス吸収 伝熱 流動

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

本研究で開発を目指すプロセスにおいては、回転面による液膜伸張と関連したいくつかの機構によって蒸発およびガス吸収が促進される。伝熱に対しては、液膜伸張による 1) 有効表面積の拡大, 2) 蒸発面への水分の連続供給, 3) 伝熱面上に存在する吸収液量 (熱容量) 低下による液膜の温度上昇が蒸発速度の増大に寄与する。物質移動に対しては、液膜伸張による 1) 有効表面積の拡大, 2) 吸収面への新鮮な吸収液の連続供給, 3) 液膜の運動に伴うガス流動生起による物質移動係数上昇などがガス吸収速度の増大に寄与する。水平円柱が液体に半ば浸漬して回転するという機構は類似の形態がドラムドライヤやコーティングなどの分野で利用されており、円柱表面での液膜形成については種々の解析が行われている。回転体表面の液膜に関連した伝熱特性については流下液膜や回転円盤状の液膜に関連した報告がなされている。しかし、近年は回転円筒により形成される液膜に関連した研究は、国内外共に、バイオリアクター等への応用を念頭に置いた回転円筒内側に存在する液体の挙動および円筒外側のコーティング時に発生する液膜の不均一性に関連したものが多く、本研究で対象とする形態での伝熱や物質移動特性については十分に検討されていない。

2. 研究の目的

液中に浸漬した水平回転円筒側面上に連続的に形成された液膜では、実質的な有効表面積拡大, 吸収面へ連続的な液体供給による駆動力確保, 熱容量の低下などにより、物質移動および蒸発操作の高速化が期待される。本研究では、吸収式冷凍機の小型化と高効率化への寄与を念頭に、液中に浸漬した水平回転円筒面上の液膜伸張によるガス吸収および蒸発促進効果について、実験および熱流体力学解析を通じた定量化および熱と物質移動の能動制御技術としての可能性検討を目的とした。

3. 研究の方法

実験装置の概略を図 1 に示す。装置は液浴と回転円筒からなる。液浴は幅 186 mm×奥行き 147 mm×深さ 80 mm の直方体であり、回転円筒は直径 48.3 mm×長さ 164 mm の塩化ビニル製である。円筒はその中心軸が浴底面から約 45 mm の高さとなるように水平に設置され、モーターと連結されて所定の回転数で回転させることが可能である。浴容器には、静止状態の円筒が所定深さまで浸漬するように水を注入し、実験中は液面を一定に保った。所定深さまで浸漬し、所定回転数で回転させた円筒側面に形成される液膜の厚さおよび液膜として流通する液の流量を測定した。液膜厚さの測定では、回転円筒の中心軸に向けて鉛直下向きにシート状のレーザー光を落射し、液膜表面付近を水平方向から撮影して液膜の表面形状を抽出した。この画像を画像解析により液膜のない条件と比較して液膜の厚さを導出した。液膜流量に関しては、薄い平板を円筒の頂点を越えた部分の側面に押し当て、この平板により円筒側面から剥ぎ取られた液膜の質量を一定時間毎に測定することで流量を求めた。

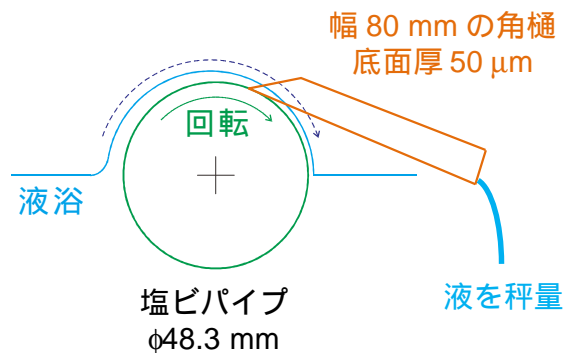


図 1 膜液流量測定方法

ガス吸収速度測定実験装置の概略を図 2 に示す。幅 198 mm×奥行き 99 mm×深さ 96 mm の液浴容器内に膜液流量測定と同様に、直径 48.3 mm×長さ 164 mm の塩化ビニル製回転円筒を水平に設置し、CO₂ を流通した容器内に静置した。液浴容器に円筒の回転軸高さまで吸収液を注入した後に円筒を所定の回転数で回転させ、吸収液の pH の経時変化を測定した。吸収液の pH から液中の CO₂ 濃度 [mol/L] を算出し吸収速度を求めた。吸収液は 0.1 mol/L の NaOH 水溶液および蒸留水の 2 種とし、円筒回転数は 0, 100, 250, 500 および 750 rpm とした。また回転円筒を伝熱管として、液膜からの蒸発速度の測定を試みた。

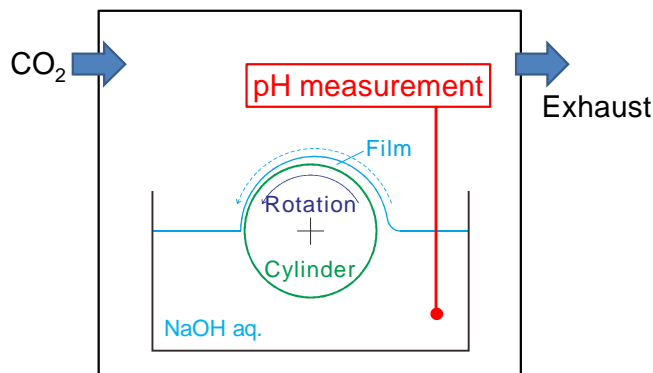


図2 ガス吸収速度測定実験装置概略

4. 研究成果

円筒回転数 500 および 1500 回転における液面高さによる液膜厚さおよび液膜流量の変化を、それぞれ図 3 および 4 に示す。図中液面高さは液面が中心軸よりも高い場合を正、低い場合を負として、またその値は円筒の半径に対する比で表した。液膜の厚さは、全体として液面高さが高くなるほど、また円筒回転数の増加と共に厚くなる傾向を示した。一方、膜液流量は低回転数で液面高さが低い場合を除いて、液面高さおよび回転数の上昇とともに大きくなった。

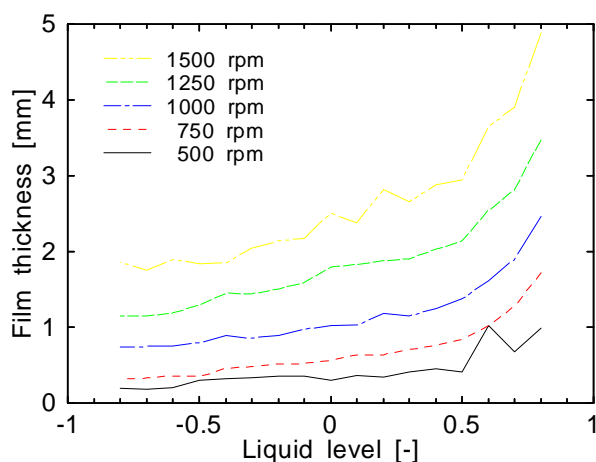


図3 円筒回転数および浸漬深さによる液膜厚さの変化

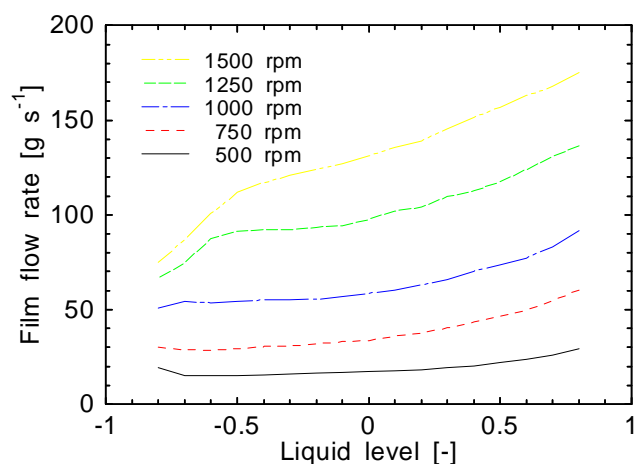


図4 円筒回転数および浸漬深さによる膜液流量の変化

円筒回転数 1000 rpm および液面高さ 0.8 [-] の条件において液膜が円筒と同じ速度で移動すると仮定するとその厚さは約 0.45 mm となり、測定した液膜厚さと比較してかなり薄くな

っている。そこで測定した液膜厚さおよび平均流量から、膜液の平均流速を求めた (図 5)。円筒の浸漬深さが浅い場合と回転数が最も遅い 500 rpm の場合を除いて、膜液流速に対する回転数の影響はわずかであり、浸漬深さが深くなると平均膜液流速が低下する傾向となった。参考のため、図中左下に三つの回転数における円筒周速を示しているが、これらの値と比較して膜液の平均速度は小さく、円筒表面に遅れて流動している。

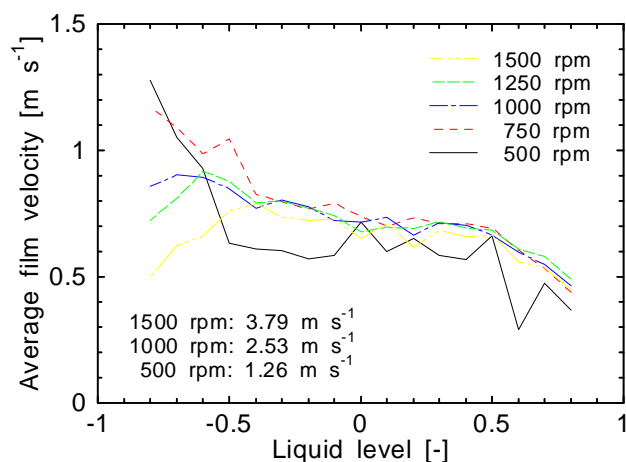


図 5 円筒回転数および浸漬深さによる膜液流速の変化

NaOH 水溶液に CO_2 を吸収させた場合の水溶液中 CO_2 濃度の経時変化を図 6 に示す。回転を行わない場合は円筒側面の液膜が形成されないため、浴表面からのみの吸収となるが、円筒を回転させて液膜を連続的に形成させた場合には、明らかに濃度上昇が早くなっている。また 1300 s 付近から無回転の場合には液浴の攪拌を行ったが、液中 CO_2 濃度の上昇はわずかであり、回転円筒側面への連続的な液膜形成によりガス吸収速度が飛躍的に上昇していることが分かる。

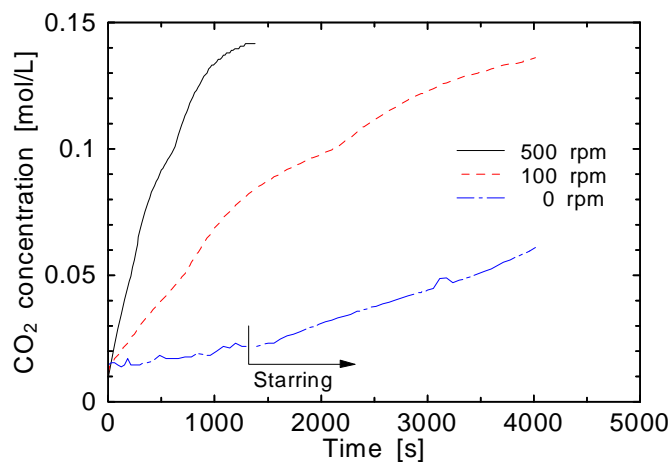


図 6 吸収液中 CO_2 濃度変化

測定した吸収液中 CO_2 濃度変化から導出した CO_2 吸収速度の経時変化を図 7 に示す。高回転ほど大きな吸収速度を示すが、時間経過とともに CO_2 吸収速度は減少した。また、吸収速度は二段階で減少した。

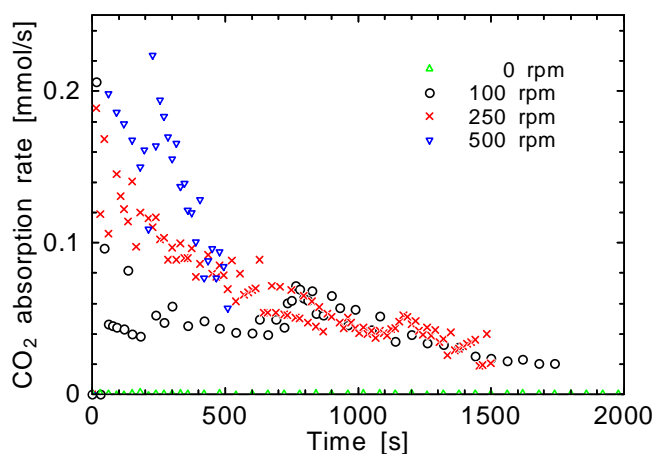


図7 CO2 吸収速度経時変化

本実験では容器内をCO₂で置換し、また常にCO₂を供給しながら測定を行っているため、ガス側物質移動抵抗が無視できると考え、液側物質移動について解析を行った。液側物質移動速度は気液界面と液膜内のCO₂濃度差に比例するものと仮定し、次式を用いて液側物質移動係数を算出した。

$$N = kA(C^* - C) \quad (1)$$

ここで、 N : CO₂ 吸収速度 [mol s⁻¹]、 k : 液側物質移動係数 [m s⁻¹]、 A : 気液界面積 [m²]、 C^* : 界面CO₂濃度 [mol m⁻³]、 C : 液膜内CO₂濃度 [mol m⁻³]である。得られた液側物質移動係数の円筒回転数による変化を図8に示す。NaOH水溶液への吸収では液浴内CO₂濃度の範囲によって、2段階に液側物質移動係数が変化した。これは液中に存在するCO₂のイオン形態が異なり、それぞれの拡散係数が異なるためと考えられる。また、ガス側物質移動係数についても気相側の条件を変更して検討したが、本実験範囲では液側が物質移動を律速していることが示された。いずれの吸収液でも物質移動係数は回転数に対して線形に増加した。

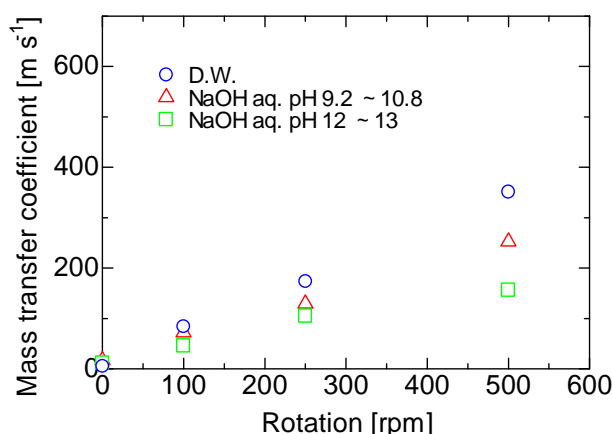


図8 円筒回転数による液側物質移動係数の変化

本研究では、液浴に半ば浸漬した回転円筒側面に形成される液膜表面の気液界面への物質移動速度について検討した結果、本機構により、物質移動速度が高速化されること、円筒回転数により物質移動速度を制御可能なことを見出した。本知見はガス吸収や排ガス処理などの気液接触プロセスおよび吸収式冷凍機のような物質移動と熱移動を伴う空調機器などの効率および制御性の向上に寄与するものであり、広い分野への応用も可能であると考えられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計0件)

〔学会発表〕(計5件)

- (1) "Acceleration of Gas Absorption Rate Using Liquid Film Formed on Rotating Horizontal Cylinder"
Hiroshi Nogami, Kenji Ishihara, Akihisa Ito, Nobuhiro Maruoka
23rd International Conference on Chemical Reactors, Ghent, Belgium, 2018 年
- (2) 「回転円筒を用いた連続的液膜伸張式ガス吸収機構における物質移動係数の評価」
石原健次, 伊藤昭久, 丸岡伸洋, 桒上 洋
化学工学室蘭大会 2018, 室蘭, 2018 年
- (3) 「回転円筒を用いた連続的液膜伸張式ガス吸収機構の物質移動係数の評価」
桒上 洋, 石原健次, 伊藤昭久, 丸岡伸洋
化学工学会第 93 年会, 大阪, 2018 年
- (4) 「液浴に浸漬した円筒の回転によるガス吸収速度の高速化」
桒上 洋, 石原健次, 伊藤昭久, 丸岡伸洋
化学工学会第 49 回秋季大会, 名古屋, 2017 年
- (5) 「回転円筒面による液膜形成挙動」
桒上 洋, 伊藤昭久, 丸岡伸洋, 石原健次
化学工学会東京大会, 東京, 2017 年

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計0件)

取得状況 (計0件)

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名: 丸岡 伸洋

ローマ字氏名: Maruoka Nobuhiro

所属研究機関名: 東北大学

部局名: 多元物質科学研究所

職名: 助教

研究者番号 (8 桁): 40431473

(2) 研究協力者

研究協力者氏名:

ローマ字氏名:

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。