



# HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	Control of Concentration Boundary Layer Development by Time-Varying Electromagnetic Force Imposition near Solid-Liquid Interface [an abstract of dissertation and a summary of dissertation review]
Author(s)	XU, Guangye
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第15347号
Issue Date	2023-03-23
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/89488">https://hdl.handle.net/2115/89488</a>
Rights(URL)	<a href="https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/">https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/</a>
Type	doctoral thesis
File Information	XU_Guangye_review.pdf, 審査の要旨



## 学位論文審査の要旨

博士の専攻分野の名称 博士(工学) 氏名 XU Guangye

審査担当者 主査教授 岩井一彦  
副査教授 上田幹人  
副査教授 向井紳 (大学院総合化学院)  
副査准教授 大参達也

### 学位論文題名

#### Control of Concentration Boundary Layer Development by Time-Varying Electromagnetic Force Imposition near Solid-Liquid Interface

(固液界面近傍への振動電磁気力の印加による濃度境界層の制御)

固相-液相の化学反応では、界面近傍に形成される濃度境界層内の物質移動が律速段階となる場合が多々ある。濃度境界層内の物質移動を担うのは拡散と対流である。物性値である拡散係数は制御できないので、拡散による物質移動増加のためには濃度勾配の増加が必須である。一方、対流はバルク液相を界面近傍へ輸送することで濃度境界層厚さを減少させることで、物質移動を促進させる。そこで、バルクでの対流誘起が従来工業的に採用されてきた。バルクで対流を励起すると固液界面近傍で速度境界層が形成される。濃度境界層は低流速である速度境界層内に存在するので、物質移動速度の増加効率は必ずしも良くない。従って、バルクでの強攪拌が求められるものの、製品品質の低下を招くこととなる。例えば、金属精錬分野ではスラグの液体金属への巻き込み、表面処理プロセスではめっき層での空孔生成等が挙げられる。これらの問題を回避するために、濃度境界層へ電流と磁場とを直接重畳印加させて電磁気力を誘起させる新たな方法が提案された。本論文では、この新規手法が固液界面反応速度を向上させうることを明らかにすることを目的としている。第1章は序論である。研究背景として固液界面反応において反応速度向上を目的とした濃度境界層厚さの低減方法の現状をまとめるとともに、本論文の目的の詳細について述べている。具体的には、・電磁場の重畳印加が濃度境界層厚さに与える影響の評価、・時間変動電磁場が濃度境界層厚さの発展を抑制するメカニズムの解明、・固液界面反応速度向上のための電磁場の制御パラメータの最適化、が本論文の目的である。

第2章では、電磁場印加による濃度境界層低減効果を明らかにすることを目的として、固液界面全体にわたって濃度境界層厚さを評価した。具体的には、銅イオン含有水溶液に銅電極を通して通電することでアノード近傍に形成させた銅イオンの濃度境界層近傍での明度をカメラにより直接撮影し、ランベルト-ベールの法則によって濃度に換算した。併せて、トレーサー粒子を用いた流動観察を行い、流体力学観点から考察を行った。電流のみ印加の条件では、電極材料である銅が水溶液中に溶解することにより、濃度境界層は時間とともに増加した。一方、定常電磁場を印加すると銅イオン濃度の増加は抑制された。これは、容器全体にわたるマクロスケールの対流が誘起されたことに起因する。しかしながら、淀み領域が形成されたアノード両端の近傍では銅イオン濃度が高くなったことから、電極(固液界面)形状によっては、濃度境界層厚みが減少しない領域が存在する可能性が示唆された。時間変動電磁場を印加すると、濃度境界層の発展がさらに抑制されるととも

に、アノード表面全体にわたって、濃度分布が均一となった。加えて、淀み領域は小さくなった。これは、マクロスケールの対流に加えて、固液界面近傍でマイクロスケールの流動が誘起されたためである。

第3章では、時間変動電磁場印加による濃度境界層厚さ低減のメカニズムについてマイクロスケール流動誘起の観点から考察を行うとともに、固液界面反応速度増加のための操作変数の最適化を検討した。まず、アノード中央付近での銅イオン濃度の時間変化と1次元モデルでの理論解析とを比較することで、銅イオン濃度の時間変化が1次元モデルで近似可能なことを示した後に、電磁場印加による銅イオン濃度の低減効果を定量的に評価した。本実験系で用いた水溶液は銅イオン濃度と電気伝送度との間に正の相関があること、アノード両端では中央付近に比べて相対的に銅イオン濃度が高いこと、容器壁面では摩擦力が作用するので流動は抑制されること、から、電磁場印加により生じる電磁気力が不均一分布となり、マイクロスケール流動が誘起されたものと推定した。特に、銅イオン濃度と電気伝導度とが正の相関を有することは、マイクロスケール流動の時間発展を促したと考えられる。時間変動電磁場の振幅増大あるいは時間変動電磁場の周波数低減は銅イオン濃度の不均一分布を助長し、マイクロスケール流動の時間発展を促すので、濃度境界層厚さを低減したものと推測される。

第4章は本論文のまとめである。濃度境界層に電磁場を直接重畳印加する手法は濃度境界層厚さを低減することが可能であり、特に時間変動電磁場を採用することでその効果が一段と増加し、物質移動の更なる促進が図られるとしている。

これを要するに、物質移動律速となる固液界面化学反応へ本研究成果を適用することは反応速度の促進、ひいては生産効率向上を可能とならしめるので、材料工学の進展に大きく資する。よって著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格があるものと認める。