2成分系溶液内凝固過程の動的挙動とその制御に関する研究

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 公開日: 2017-10-05 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 木村, 繁男, Kimura, Shigeo メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/2297/46872

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0 International License.

２成分系溶液内凝固過程の動的挙動とその制御に関する研究

（研究課題番号 14550174）

平成 14～平成 16 年度科学研究費補助金（基盤研究（C）(2)）研究成果報告書

平成１７年３月

研究代表者　木村繁男

（金沢大学・自然計測応用研究センター・教授）

金沢大学附属図書館

0500-04133-4

2004
27

平成16年度科学研究費補助金(基盤研究 (C)(2))
研究成果報告書

研究課題番号:14550174

研究課題　:2成分系溶液内凝固過程の動的挙動とその制御に関する研究

はしがき

本研究では、2成分溶液内での凝固過程の動的挙動に着目し、そのプロセス(固化領域の厚さ及び凝固速度)を制御するために、簡便でかつ実用的に十分な精度を有する非定常一次元凝固解析モデルを提案することを目的とした。2成分溶液内での凝固はマッシー層(一種の多孔質層)を形成するため、まず水で飽和した多孔質層内での凝固過程について検討した。冷却面温度を変化させた時の固相厚さの変動について1次元モデルを提案し、2次元数値シミュレーションと実験結果と比較して良く一致することが確認できた。1次元モデルは液相域で対流が活発な場合も熱伝導が支配的な場合も共に凝固層の厚さ変動をよく説明することを確認した。次に2成分水溶液を用いた凝固現象について検討を行なった。18cm×18cm×18cm の矩形水槽と硝酸ナトリウムを用いた室内実験を併せて行い、同モデルの妥当性を検証した。境界条件は上方冷却と下方冷却の二種類について実験と解析を行なった。上方冷却の場合は水溶液の密度分布は不安定となり、活発な自然対流が発生する。また、固相の成長に伴い溶質の排出があるため、液相内ではほぼ一様に濃度が増加して行くのが認められた。これは液相部が自然対流により活発に撹拌されていることを示している。実際液相内での鉛直方向温度分布は典型的な逆S字形となっており、温度差に基づく対流が支配的であることが確認できた。また、固液界面の不安定現象により固相は針状結晶の集合体でマッシー層を形成することになる。マッシー内の固相率が一定であると仮定して鉛直方向の1次元モデルを提案し、固相成長の経時変化を精度良く予測することが出来た。下方冷却についても同様のモデルを提案し、下方冷却面から成長する固相(マッシー層)の成長を予測することが出来た。さらに地中熱交換器の集熱量予測に関連して、鉛直円柱周りの凝固と自然対流を解析した。最後に対流熱伝達が関与する1次元凝固モデルと同様の考えに基づいて、熱伝導と対流が同時に存在する連成熱伝達問題を検討し、有限の熱伝導率を有する壁が2つの温度の異なるレザバーを

ている時の平均熱流束を予測する簡便なモデルを提案し、実験によりその有用性を確認した。

以上、本研究は2成分系溶液の凝固プロセスの非定常問題について基礎的研究を行ったものであり、平成 14,15,16 年度科学研究補助金(基盤研究(C)(2))の援助を受けた。

研究組織

研究代表者：木村　繁男（金沢大学自然計測応用研究センター教授）

研究分担者：岡島　厚（金沢大学大学院自然科学研究科教授）

木綿　隆弘（金沢大学大学院自然科学研究科助教授）

研究経費

	直接経費	間接経費
平成14年度	1，800千円	0 千円
平成15年度	1，400千円	0 千円
平成16年度	800千円	0 千円
計	4，000千円	0 千円

研究発表

（1）学会誌など

1）Shigeo Kimura, Atsushi Okajima, Takahiro Kiwata and Takahiro Fusaoka
Time History of ice-layer thickness in a saturated porous medium due to time-varying cooling temperature, *Proc. of the 6th ASME-JSME Thermal Engineering Joint Conference* (CD-ROM C6-584), pp.1-4, 2003.

2）Kimura, S. and Li, L.,"Mixed Convection around a Heated Vertical Cylinder in a Saturated Porous Medium: an Application to Ground Water Velocimeter", *Proceedings of CMFF'03(Conference on Modelling Fluid Flow)*, pp.684-685, 2003.

3）S. Kimura, "Conjugate Heat Transfer through a Conductive Partition Separating Two Reservoirs at Different Temperatures", *Int .J. of Energy Res.*, **Vol.27**, pp.891-906, 2003.

4）Kimura, S., Okajima, A., Kiwata, T. and Nakamua, T, "Characteristics of Solidification and Melting in the Water-Saturated Porous Medium Cooled from the Top", *Heat Transfer Asian Res.*, **Vol.33**, **No.5**, pp.330 –341, 2004.

5）木村繁男，岡島　厚，木綿隆弘，房岡高広「対流が存在する飽和多孔質体における凝固特性」，日本機械学会論文集, **Vol.71**, **No.703**, pp.931-938, 2005.

6）Nohara, Y., Kimura, S., Okajima, A. and Kiwata, T., "Solidification Processes of Two Component Solution", *The 6th KSME-JSME Thermal and Fluids Eng. Conf.,* CDROM, pp. 1-2, 2005.

7）Kimura, S., Dynamic Solidification in a Water-Saturated Porous Medium Cooled from Above, *Transport Phenomena in Porous Media III*, edited by Ingham and Pop, to be published, 2005.

8) Li, L. and Kimura, S., "Numerical Simulation on Mixed Convection in a Porous Medium Heated by a Vertical Cylinder", *J. Mechanical Engineering*, accepted for publication, 2005.

(2) 口頭発表

1) 房岡高広, 木村繁男, 岡島　厚, 木綿隆弘 「周期的凝固プロセスの数値シミュレーション」 日本機械学会熱工学講演会(2002 年 11 月)(沖縄)

2) 房岡高広, 木村繁男, 岡島　厚, 木綿隆弘 「飽和多孔質体における凝固・融解の数値シミュレーション」2002 年度日本冷凍空調学会講演論文集(2002 年 11 月)(岡山)

3) 房岡高広, 木村繁男, 岡島　厚, 木綿隆弘 「周期的凝固プロセスの数値シミュレーション」2003 年度日本冷凍空調学会講演論文集(2003 年 10 月)(東京)

4) 房岡高広, 木村繁男, 岡島　厚, 木綿隆弘 「飽和多孔質体における周期的凝固プロセスの数値シミュレーション」日本機械学会熱工学コンファレンス(2003 年 11 月)(金沢)

5) 野原庸平, 木村繁男, 岡島　厚, 木綿隆弘 「2成分系水溶液における凝固プロセス」 2004 年度年次大会講演論文集(2004 年 9 月)(札幌)

6) 野原庸平, 木村繁男, 岡島　厚, 木綿隆弘 「2成分系水溶液における凝固プロセスにおける自然対流の影響」 2004 年度日本冷凍空調学会講演論文集(2004 年 9 月)(札幌)

研究成果

目　次

第1章　総括　1

第2章　有限熱伝導率を有する鉛直平板に隔てられた温度の異なる2つの流体レザバー間の熱伝達:1次元近似解　4

第3章　周期的冷却温度変動によるによる飽和多孔質体内での凝固・融解:熱伝導支配の場合　19

第4章　周期的冷却温度変動によるによる飽和多孔質体内での凝固・融解:対流支配の場合　31

第5章　下方冷却による2成分系水溶液の凝固プロセス:拡散支配　53

第6章　上方冷却による2成分系水溶液の凝固プロセス:対流支配　57

第7章　加熱円柱周りの混合対流熱伝達　59

第1章 総 括

この研究課題はこれまでの単一成分の液相を対象として、冷却面温度を周期的に変動させた時の固相厚変動に関するものを2成分系水溶液へ拡張しようとするものである。本研究による成果は、①「対流—伝導連成熱伝達問題」の1次元定式化による近似解析、②多孔質層内での凝固現象の解析、③2成分系水溶液の凝固プロセスに関する実験と1次元解析モデルの提案、④混合対流熱伝達に関する数値解析の4つにまとめられる。「対流—伝導連成熱伝達問題」は凝固・融解プロセスを1次元的に定式化する基本的考えを示している。多孔質層内での対流と凝固は、2成分水溶液凝固で発生するマッシー層内での熱・物質移動現象を明らかにする上での基礎的知見を提供してくれる。本研究課題の主目的である2成分系水溶液の凝固は上方からの冷却と下方からの冷却の二つ場合について検討を行なった。また、鉛直円柱周りの混合対流熱伝達は地中熱交換器を利用して、地下帯水層から採熱を行なう際の抽熱量を評価する上で極めて重要である。熱交換器表面温度を凝固点以下にしたとき、表面は氷層に覆われることになる。この現象は②で行なった水で飽和した多孔質層内での凝固にほかならない。

第1章においては、有限の熱伝導率を有する鉛直な仕切り版が温度の異なる2つの流体レザバーを隔てているとき、高温レザバーから低温レザバーへの熱伝達について検討した。一次元の定式化では、壁内での熱伝導を定常な一次元解として近似し、表面温度もそれぞれ鉛直方向に平均化した値を仮定した。流体に接している面では境界層近似から導かれる対流熱伝達に関する相関式を利用した。このような考察から、仕切り版の表面温度についての3次または6次の多項式が導かれ、これを解くことにより未知であった表面温度が得られる。表面温度が決定されると熱伝達率が決まり、レザバー間の熱移動が求まる。レザバーは共にニュートン流体で満たされているか、一方が飽和多孔質体、他方がニュートン流体で満たされている2つの場合について解析と実験を行った。

第2章においては矩形空間が水で飽和した多孔質で満たされている時の上方冷却による凝固過程について検討した。下面温度は8℃に固定して、上面の冷却面温度を凝固点以下の温度とし、上方より氷層を発達させた。定常状態に達した後、冷却面温度を周期的に変動させて、氷層厚さの変動を計測した。液相部の上下方向温度勾配が比較的小さいため対流は非常に弱く、ほとんど無視できる程度であった。一般に氷層厚さの変動は冷却面温度の変動に対して、ある位相遅れを持っていることが確認さ

れた。位相遅れと氷層厚さの変動振幅は冷却面温度の変動周波数に大きく影響されることがわかった。境界固定法による1次元モデルを提案し、実験結果と比較し、その有用性を明らかにした。

第3章においては、第2章の問題で下面の温度を25℃に上昇させ、液相部に活発な対流を発生させた。その結果固液界面における液相側からの対流による熱伝達が増加した。1次元モデルではその影響を固液界面における液相側からの熱流量の増加として与えた。冷却面温度に対する固相厚さ変動については、定性的には液相部に対流がない場合と同じ傾向がみられた。すなわち、固相厚さ変動の位相遅れと変動振幅は、冷却面温度の変動周波数に大きく影響される。

第4章は2成分水溶液の凝固過程に関するものである。2成分系としては硝酸ナトリウム水溶液を用いた。水溶液濃度は共晶濃度以下とした。したがって、固相としては氷が生成される。しかし、固液界面は不安定となり針状の氷が多数発生し、所謂マッシー層を形成する。下方冷却により下面から固相が成長し、結果として排出された溶質は下部領域に蓄積される。溶質の拡散は非常に緩慢である為、凝固点降下が顕著に現れる。マッシー層の固相率が空間的に一定として、マッシー内温度は非定常熱伝導式で記述できると仮定して1次元モデルを提案した。このモデルは最終的にマッシー層の無次元厚さに関する超越方程式を解くことに帰着される。提案した1次元モデルは実験結果を良く説明することが確認できた。

第5章では同じ2成分水溶液を用いて上方冷却による実験を行った。この場合はマッシー層は上部から成長し、液相部に活発な対流が発生する。このため固相の成長と共に排出された溶質は液相内でほぼ均一に分散される。ただし、一部は下層部に蓄積されて下面近傍の溶質濃度が他の部分よりやや高くなる。したがって、固液界面と下面との温度差から推定される自然対流による熱流量より実際は小さな値(約50%)を取ることがわかった。しかし、このことを考慮すれば第4章で提案した1次元モデルを適用することができる。この1次元モデルはマッシー層の成長過程やマッシー層の平均固相率等の実験結果を良く説明することができた。

第6章では飽和多孔質層内に置かれた鉛直加熱円柱周りの混合対流熱伝達に関する数値解析を行なった。強制流れは鉛直円柱と直角な水平方向の一様流れである。パラメータは強制流の強度を示すペクレ数、自然対流の強度を示すレイリー数、円柱の直径に対する長さの幾何学的アスペクト比である。これらのパラメータを変化させて無次元熱伝達率である平均ヌッセルト数を求めた。その結果、アスペクト比による影響は少なく、ペクレ数に対するレイリー数の比が重要であることを見出した。この比が1よ

り小さい場合は強制対流とみなすことが出来、これが1より大きいと自然対流の影響が顕著である。数値計算結果をまとめることにより、平均ヌッセルト数をペクレ数とレイリー数の関数とする相関式を提案した。

これらの研究成果は、関連学会の論文誌に8編（3編のプロシーディング論文を含む）の論文として発表した。また、内外の国際学会等で8回（3つの国際会議）の発表を行った。