

Dynamic response of solidification process to time-varying cooling temperature

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2017-10-05 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: Kimura, Shigeo メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.24517/00034811

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



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 11650214)

平成11～平成13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14年3月



8011-05284-5

表者 木村 繁男
(工学部・工学部・教授)

平成 13 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:11650214

研究課題 :凝固過程の動的挙動とその制御に関する研究

はしがき

凝固プロセスの動的過程は工業的に広範な応用を有するのみならず、種々の環境科学や地球・惑星科学の分野においても重要な現象である。すなわち、材料開発においては液相からの固相生成速度が固相の組成や組織構造を決定することは良く知られている。また、マグマや地下水から地中熱交換器により抽熱する場合、熱交換器周囲に発生する固相の厚さを熱交換器を流れる冷媒の流量により制御し、熱抵抗の最適化を行う場合においても、結局は冷却面温度を変化させた時の固相厚さの時間応答問題に帰着する。さらにより大規模な地球・惑星物理の分野においては海や湖の結氷・融解現象、惑星の地殻厚さの変動などに関連する問題である。

本研究では凝固の動的現象の基礎的特性を理解する目的で、矩形空間内の水または水で飽和した多孔質体を上方から冷却する場合について実験的、解析的、及び数値シミュレーションにより検討を加えた。下方境界面温度は凝固点温度以上の一定値に保たれ、上方境界面温度は凝固点以下の温度に保たれる。側壁は断熱である。この時、上方の冷却面温度を時間的に変動させて固液界面位置(固相厚さ)の変動を計測した。液相部分においては一般に自然対流が発生し、固液界面においては液相からの対流熱伝達が支配的となる。このような条件下で固液界面位置の非定常な変動について、検討を加えた。その結果、特に 1 次元近似による解析の有用性について明らかにすることが出来た。

以上、本研究は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 11,12,13 年度科学研究費補助金(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(金沢大学工学部教授)

研究分担者: 岡島 厚(金沢大学工学部教授)

上野 久儀(金沢大学工学部教授)

木綿 隆弘(金沢大学工学部助教授)

研究経費

平成11年度	1,500千円
平成12年度	1,200千円
平成13年度	900千円
計	3,600千円

研究発表

(1) 学会誌など

1) S. Kimura and M. Vynnycky, Time history of ice-layer formation at the cooled top boundary and its dynamic to the time-varying cooling temperature , *Moving Boundaries* 5, Vol.5, pp.47-56, 1999.

2) Kimura, S. and Okajima, A., Natural convection heat transfer in an anisotropic porous cavity heated from the side: Part 1 Theory , *Heat Transfer Asian Res.*, Vol.29, pp.34 -41, 2000.

3) 木村繁男, 岡島 厚, 木綿隆弘「透水率に異方性を有する飽和多孔質層内の側方加熱による自然対流熱伝達」, 日本機械学会論文集, Vol.66, pp.2950-2956, 2000.

4) S.Kimura and P.T.Zubkov, Natural Convection in a Rectangular Space due to Constant Flux from the Side , *The 4th JSME-KSME Thermal Eng. Conf.*, Vol.1, pp.651-656, 2000.

5) 木村繁男, 岡島 厚, 木綿隆弘, 中村太樹「上方冷却による水層内での氷の凝固・融解特性(周期的冷却温度変化に対する氷厚さの応答)」, 日本機械学会論文集, Vol.67, pp.2762-2969, 2001.

6) 木村繁男, 岡島 厚, 木綿隆弘, 村井孝行「凝固過程の動的挙動に関する数値解析」, 日本機械学会論文集, Vol.68, pp.175-180, 2000.

7) 木村繁男, 岡島 厚, 木綿隆弘, 水島基紀「温度差を有する鉛直流路内

での混合対流熱伝達」, 日本機械学会論文集, Vol.68, pp.169-174, 2000.

(2) 口頭発表

1) 木村繁男, 木綿隆弘, 岡島 厚, 村井孝行 「多孔質と流体のレザバーを隔てる鉛直平板の熱伝達特性」 日本機械学会流体力学講演会(1999年10月)(鳥取)

2) 中村太樹, 木村繁男, 木綿隆弘, 岡島 厚 「氷の生成の動的制御に関する研究」日本機械学会2000年度全国大会講演会(2000年7月)(名古屋)

3) 木村繁男 「多孔質と流体レザバーを隔てる鉛直平板の熱伝達」日本機械学会2000年度全国大会講演会(2000年7月)(名古屋)

4) 村井孝行, 木村繁男, 木綿隆弘, 岡島 厚 「凝固過程の動的な応答」 第50回理論応用力学講演会講演論文集(2001年1月)(東京)

5) Shigeo KIMURA, "Solidification in Porous Media", Int. Summer School on Heat Transfer in Porous Media, Neptune, Romania, July 2001.

6) 若松英俊, 木村繁男, 岡島 厚, 木綿隆弘 「側壁に加熱・冷却部を有する容器内自然対流の不安定振動に関する研究」日本機械学会熱工学講演会(2001年11月)(岡山)

研究成果

目 次

第1章 総括	1
第2章 上方からの非定常冷却による氷層厚さの履歴:1次元近似解	3
第3章 冷却温度の周期的変化による固層厚さの変動:2次元数値解析	13
第4章 周期的冷却温度に対する固層厚さの変動:高 Ra 数領域での実験	19
第5章 周期的冷却温度に対する固層厚さの変動:飽和多孔質層での実験	25
第6章 多孔質層内の自然対流連成熱伝達	31
第7章 混合対流熱伝達	43

第1章 総括

この研究課題は単一成分の液相を対象として「対流—伝導連成熱伝達問題」を非定常かつ移動境界問題に拡張したものと考えることができる。したがって、基本的なアプローチおよび定式化の思想は、これまで著者等が研究してきた「連成熱伝達問題」と同じ(問題のすべての条件を含んだ)一次元問題として定式化することである。しかし、問題の非定常性と境界が移動するという事実により、結果として現れる未知の物理量(例えば固相厚さ)に関する数学的表現が代数方程式から放物型の偏微分方程式となる。このため一次元であつても計算負荷がこれまでの「連成熱伝達」問題に比べて大きくなる。しかしながら、一次元問題として定式化される場合には、その計算負荷はこれまでの検討結果によれば最近のパーソナルコンピュータで十二分に対応できる程度である。これまで実施してきた「凝固過程の動的挙動とその制御」に関する研究課題は主に、①一次元定式化、②二次元数値シミュレーションコードの開発、③実験による解析結果の妥当性についての検討という3点からなっている。

第1章においては主に一次元の定式化を試みた。一次元定式化では、固相内の熱伝導を非定常な一次元的熱拡散方程式により表現した。固液界面位置の時間的変動は空間座標を変数変換することにより、計算空間においては境界位置が不変であるように定式化した。一方、液相内の自然対流により固液界面に到達する熱流束は一定とした。これは液相の深さが十分に大きく、対流が十分に乱流になっている場合を仮定したことによる。このような条件の下で冷却面温度の時間変化に対する固液界面の変動について検討を加えた。さらに固相中の熱伝導が準定常的であると仮定すると、冷却面の温度変動振幅が冷却面温度の過冷度に比べて小さい場合には、摂動法を用いた解析解が可能であることを示した。本研究によれば、温度変動振幅が過冷度の30%以下であればこの近似解は数値解と良く一致することが確認できた。

第2章においては二次元数値シミュレーションコードの開発を主眼にした検討を行った。一次元の場合と同様に、数値計算を行う場合の困難は固液界面の空間位置が時間とともに変動することである。二次元数値解析用のシミュレーションコード開発においても、同様な座標変換を用いることにより、計算空間において固液界面位置を固定して計算を進めることができる。開発した数値解析コードの妥当性を検討するために、4℃で密度の極大値を示す水を0℃で上方より冷却(下方の温度を8℃一定とした)するときのヌッセルト数をK.Blake等の計算結果と比較した。その結果、両者はきわめて良い一致を示し、本研究で開発された数値解析コードの妥当性が検証できた。さ

らに冷却面温度を 0°C 以下として固相(氷層)を発生させて定常状態になるまで計算を行った。このときの固液界面形状は液相内での対流パターンを反映してわずかに湾曲することが確認された。しかし、平均の氷層厚さは一次元解析結果と良い一致が得られた。また、冷却面温度を時間に対して変動させたときの固液界面のダイナミックな応答について計算を行った。その結果、平均氷層厚さは一次元モデルによる計算結果と5%以内で一致することが確認できた。

第3章においては蒸留水を用いた凝固実験を行い、これまでの理論解析の妥当性について検証を加えた。一辺の長さが18cmの立方体の容器に蒸留水を入れ、下面温度を 8°C 一定とし、上面温度を凝固点(0°C)以下に冷却して氷層を上方から成長させた。液相領域に発生する自然対流の(修正)レイリー数は10の8乗程度となり、数値計算により直接シミュレートすることは困難であった。また、対流は乱流に近い状態であることが観測できた。冷却面温度を周期的に変動させて、平均氷層厚さの時間変動について調べた。平均の氷層厚さから乱流自然対流の平均熱流束を算出し、これを一次元モデルに利用することにより、同様に氷層厚さの時間変動を一次元的に計算した。実験結果と一次元計算結果は15%以内で一致することが確認できた。対流が乱流となり二次元数値シミュレーションが不可能な高レイリー数領域での一次元モデルの有用性を明らかにすることができた。

第4章においては、飽和多孔質体内での凝固プロセスについて実験的に検討を加えた。実験結果について、第1, 2章で開発した1次元近似による解析を試みた。その結果、1次元近似に基づく予測結果はほぼ妥当であることを示すことが出来た。

第5章では透水率に異方性を有する場合の飽和多孔質体内での自然対流熱伝達について理論的に検討した。本問題は2成分系凝固において発生するマッシー領域内での熱移動について有用な知見を得ることを目的としている。また、第6章においては融液からの凝固において不可避免的な自然対流熱伝達の制御という観点から、混合対流について検討した。

これらの研究成果は、関連学会の論文誌に7編の論文として発表した。また、内外の国際学会等で6回の発表を行った。