

博士論文の要旨及び審査結果の要旨

氏名 中倉 満帆
学位 博士 (工学)
学位記番号 新大院博 (工) 第 487 号
学位授与の日付 平成 31 年 3 月 25 日
学位授与の要件 学位規則第 4 条第 1 項該当
博士論文名 A Study on Volumetric Receiver under Beam-down Concentrated Irradiation
(ビームダウン集光照射を受ける体積型レシーバの研究)

論文審査委員 主査 教授・松原 幸治
副査 教授・藤澤 延行
副査 教授・鳴海 敬倫
副査 教授・平元 和彦
副査 准教授・櫻井 篤

博士論文の要旨

本論文では、ビームダウン集光装置と組み合わせた体積型ソーラーレシーバ (ボリュームトリックソーラーレシーバ) を取り上げ、実験と数値解析によってふく射・対流・熱伝導が連成した複雑伝熱現象を検討した。

第 1 章では、多孔質およびハニカム流路に集光照射を与える応用例として、金属粉末のレーザー焼結、生体のレーザー治療、ならびに、体積型ソーラーレシーバが示されている。その上で、論文では特にビームダウン集光を伴うソーラーレシーバについて議論することが述べられている。

第 2 章では、新潟大学に設置された大型ビームダウン太陽集光シミュレータを利用したレシーバ評価技術と実験結果について述べている。レシーバの実験に先立って、太陽シミュレータの熱流束分布を測定した。その積分によって集光照射量は最大で約 30kWh であることを確認した。レシーバ本体には炭化ケイ素製ハニカムを利用し、ブロワーで空気を吸引してハニカム内部の微小流路内に空気を流動させた。ソーラーレシーバによって集光をレシーバ表面に照射して、集光照射量と空気流量を変化させて実験を行った。レシーバ出口での空気温度は、最大で約 560°C に達した。

第 3 章では、ビームダウン集光を与えたハニカムレシーバについて、ハニカム流路内の流れ場と温度場を連続体モデルによって解析した。それによって浮力がレシーバの性能に与える影響を調査した。この解析では、熱伝達率には経験式からの推算値を与え、見かけの吸収率 (放射率) には実験との比較によって適正と思われる値を選択した。このような連続体解析によって、ビームダウン集光を与えた場合 (レシーバを垂直に設置した場合) と、タワー型集光を与えた場合 (レシーバを水平に設置した場合) について計算を行なった。それによると水平設置の場合は、浮力による対流が起こりやすく、レシーバ内部の高温部分が上方に偏り、レシーバ側面からの熱損失が大きくなる。いっぽう、垂直設置の場合 (ビームダウン集光) は、浮力による対流が抑制され、レシーバ内部の温度場は対称に保たれ、熱損失は小さい。このため、垂直設置の場合の方がレシーバ効率が高くなる。

第 4 章では、第 3 章と同様な系について、レシーバ形状を厳密に取り扱う直接シミュレーションを行なった。この解析では、熱伝達率および圧力損失の経験式を用いず、流れ場

と温度場の支配方程式を解くことで、壁面近傍の流れ場と温度場の境界層を直接計算した。ただし、固体表面の光学的特性については、灰色面かつ拡散反射を仮定して簡略化を行なった。計算時間を短縮するため、ハニカムを構成する単一流路のみを解析した。このような解析によって、平面状の表面を有するハニカムチャンネルと、表面に切り欠きを有するチャンネルを解析し、後者の優位性を示した。

第5章では、第4章で開発した直接シミュレーションを利用して、レシーバ表面における切り欠きの効果をより詳細に検討した。レシーバのエネルギー収支を見かけの吸収、見かけの反射、および透過で評価する方法を提案した。これにより、切り欠きによるレシーバ効率の増大は、見かけの反射が低減することに基づくことを明らかにした。

第6章では、さらに直接シミュレーションを利用して、POMを固定した場合の空気質量流束（熱流束）の影響と、セルサイズの影響を検討した。空気質量流束の限界を超えて大きくするとレシーバ効率は低下するが、セルサイズを小さくすることで効率が回復することを明らかにした。

第7章では、以上の結果を総合的にまとめて、連続体解析と直接シミュレーションのそれぞれの得失を議論した。さらに、今後の展望として、これらの解析技術は、ソーラーレシーバだけでなく、燃料電池の電極の熱移動、3Dプリンティング技術における金属粉末のレーザー焼結に応用できることを述べた。

審査結果の要旨

本論文は、ビームダウン集光を受けるソーラーレシーバを取り上げ、そのふく射・対流・熱伝導連成問題を実験と解析によって研究した。縦型のソーラーレシーバを実現するため、ビームダウン式太陽集光シミュレータによる実験が行なわれた。集光照射量と空気流量を変化させて、レシーバ効率と空気出口温度等の実験結果を得ている。従来のソーラーレシーバの研究のほとんどは、タワー型集光を想定して、レシーバを水平配置したものであった。このため、縦型ソーラーレシーバの実験結果はほとんど行なわれていなかった。本論文で採取した実験結果は、縦型レシーバの設計と数値解析の検証に役立てることができる。

さらに本論文では、連続体モデルを基本とした解析によって、縦型レシーバに対する浮力の影響を議論した。連続体モデルでは、熱伝達率やレシーバの見かけの光学特性に経験値が必要となるが、大きな領域を取り扱うことができること、したがって浮力によるレシーバ効率への影響を検討できることが示された。論文では、連続体モデルによる解析を行うための熱伝達率や見かけの光学特性の値を記載されており、同種の問題を取り扱う上での参考資料とできる。

本論文では、もう一つの解析手法として、レシーバ形状を厳密に取り扱った直接シミュレーションが行なわれた。この解析は計算負荷が高いため、連続体解析のように大きな領域を取り扱うことは困難であった。しかし、レシーバを構成する単一流路を解析することは可能で、熱伝達率やレシーバの見かけの光学特性が不要となり、切り欠きを有する新しい形状のレシーバを解析することができた。このように、直接シミュレーションの設計ツールとしての優位性が明らかにされた。また、レシーバ集光面に切り欠きを与えることでレシーバ効率を向上できるメカニズムは、固体表面のふく射熱流束の分布によって分析する方法を示した。

以上のように、本論文はソーラーレシーバの研究開発に役立つ実験法と数値解析手法、分析法を提案して有効性を示した。これらは集光照射を受ける多孔質ないしハニカムの応用問題の研究においても有用である。よって、本論文は博士（工学）の博士論文として十分であると認定した。