

氏 名	Moon 文	Jong 鍾	Hoon 勲
授 与 学 位	博 士 (工 学)		
学位授与年月日	平成 7 年 3 月 24 日		
学位授与の根拠法規	学位規則第 4 条第 1 項		
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 機械工学専攻		
学 位 論 文 題 目	球カプセル潜熱エネルギー貯蔵システムに関する研究		
指 導 教 官	東北大学教授 齋藤 武雄		
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 齋藤 武雄	東北大学教授 増田 英俊	
	東北大学教授 相原 利雄	東北大学教授 新岡 嵩	

論 文 内 容 要 旨

第 1 章 緒 論

近年, 石油などの化石燃料の大量消費に起因する CO₂ による温室効果 (Greenhouse effect) が顕著となり, あらゆる地球温暖化現象が, にわかにクローズアップされている。

このような地球環境保全の高まりから, 世界各国において自然エネルギーなどのクリーンエネルギーの利用が再び脚光を浴びている。自然エネルギー利用としては, 近年, 太陽, 地熱, 風力, および波力エネルギーなどが注目されている。すでに太陽熱温水器やソーラーハウスなど太陽エネルギーの実用化は一部なされている。太陽エネルギーの利用は大別すると, 熱利用と光利用の二つに分けられる。熱利用は前述の太陽熱温水器が代表的であるが, 最近最も有望視されているのが光利用で太陽電池 (Photovoltaic cell) による発電である。

太陽から地上に降り注ぐ太陽エネルギーは, 資源的には無尽蔵に近く, 地球上の大部分の地域で利用できるエネルギーである。また, 各家庭のゴミや各種排熱等も回収再利用できる資源エネルギー源である。現在未利用または単に廃棄されているこれらのエネルギーは希薄性, 間欠性および低密度を有する低密度エネルギーであり, その実際利用にあたっては需要に対する供給の時間的整合性 (平準化; Leveling) を持たせること, および高密度化・高効率化するためのエネルギーの貯蔵技術 (Energy storage technology) の開発が急務である。

エネルギーの貯蔵方式を大別すれば, 力学的エネルギー, 熱の形のエネルギー, 電磁気エネルギーおよび化学エネルギー貯蔵などが考えられる。この蓄熱技術の中で実用的に重要とみられるのは熱の形のエネルギー貯蔵である。現在, 熱の形のエネルギー貯蔵方式は大別して, 蓄熱材の温度変化

のみを利用する顕熱エネルギー貯蔵 (Sensible heat thermal energy storage) と、相変化物質 (Phase change material : PCM) が相変化するときの融解・凝固に伴う大きな潜熱の吸収、放出を利用する潜熱エネルギー貯蔵 (Latent heat thermal energy storage) がある。顕熱エネルギー貯蔵は蓄熱容量は比較的小さいが、蓄熱材の選定が比較的容易であり、短期エネルギー貯蔵の場合には実用性が最も高い。これに対して潜熱エネルギー貯蔵は顕熱エネルギー貯蔵に比べて大幅に蓄熱空間を圧縮できること、および一様温度で潜熱が発生する質のよいエネルギー源であるという利点を有するため、エネルギー効率の大幅な改善の可能性と相まって近年各方面から関心が持たれている。

潜熱エネルギー貯蔵システム方式における蓄熱・放熱特性を理解する上で、相変化過程を解明しておくことは、その実用化の前段階としても重要な課題である。しかし、一般に相変化過程は液相の自然対流と熱伝達とが複合する多次元の移動境界問題 (Moving boundary problem:MBP) となり、本格的な数値解析的研究と実験的研究が必要である。本研究では球カプセル内の主に接触/自然対流複合溶解過程における熱伝達特性を詳細に調べ、さらに、球カプセルを多数個充填した球カプセル蓄熱ベッドの蓄熱・放熱特性を様々なパラメータを変化させて明らかにし、数値シミュレーションと実験を行い、基礎的特性を明らかにした。

第2章 単一球カプセル内の融解

本章では潜熱エネルギー貯蔵システムのエネルギー貯蔵過程において最も重要である、単一球カプセルに対する実験を行った。従来の研究は代表温度を球カプセルの外側の温度にとって整理したものが一般的であるが、正確を期すために本論文では代表温度として球カプセル内壁温度をとって実験を行い、無次元変数で整理した結果を示している。ステファン数が大きい場合の完全融解時間と融解率および接触融解部の温度変化などを明らかにした。

とくに、融点以下に保持した相変化物質を封入した球カプセルを融点より高い温度に設定した恒温槽に速やかに浸漬した場合に固槽が浮き上がる現象を初めて発見している。これは重要な知見である。

図2.1は実験装置の全体図を示す。実験装置は相変化物質を充填した球カプセル、恒温槽および測定部からなる。実験に用いた球カプセルは直径が3, 5, 10, 20, 50および78mmの6種類で、周囲温度を60℃から80℃まで変えて測定した。球カプセル内の融解形状を観察するためにカプセルをバイレックスガラスで製作した。体積膨脹を利用して融解率を測定するために、球カプセル上部に直径が10mmのメスシリンダー (ライザー) を接続した。

恒温槽内には槽内の温度を一定にするために攪拌ファンが設けられている。恒温槽内の定確な温度を測定するために、三つの熱電対を設置し、温度ロガーによって測定した。

実験は恒温槽内の水を十分に循環して設定温度に保ったのち、球カプセルを恒温槽の中にすばやく入れて実験を開始した。時間の経過とともにPCMの融解が進行し、最終的に球カプセル中のPCMがほぼ完全に融解した時点で実験をおわる。

図2.2には球カプセル直径が78mmおよび50mmのとき、無次元時間に対する融解率を示す。図か

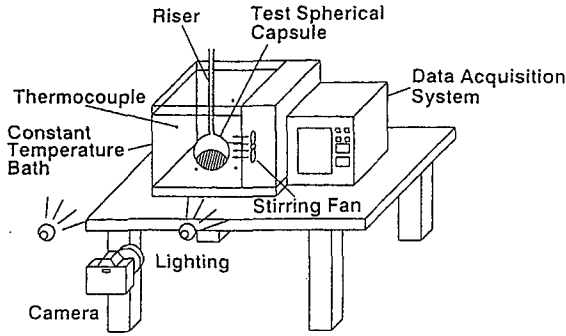


Fig 2.1 Schematic diagram of experimental apparatus

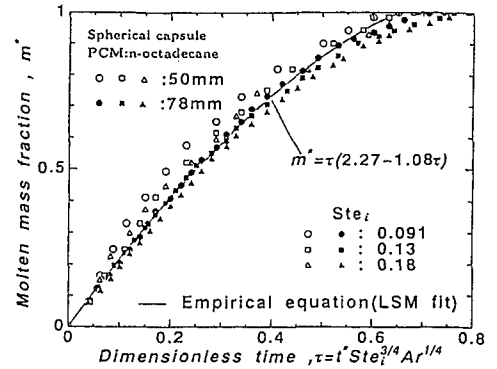


Fig 2.2 Molten mass fraction versus dimensionless time

らわかるように球カプセルの直径および周囲温度によらず、すべてのデータは無次元時間 τ の関数で示すことができる。図の中の実線は実験値から最小自乗法によって求めた値である。

第3章 球カプセル型潜熱エネルギー貯蔵システムの蓄熱・放熱性能

本章では、実用的重要な潜熱エネルギー貯蔵システムの基礎的な温度応答特性を明らかにするために、球カプセルを充填した蓄熱槽について、流入温度、球カプセル直径、流量および蓄熱槽容量をパラメータとして変化させて蓄熱・放熱特性を明らかにし実用システム設計のために重要な基礎的データを提供するため性能評価を行う。

実験装置の概略を図3.1に示す。実験装置は断熱材で覆われた二つの恒温水槽、循環系、測定系および球カプセルを充填した潜熱蓄熱タンクからなる。実験には直径が30mmと20mm、内厚がそれぞれ1.5mmと1.2mmのポリプロピレン製の球カプセルを用いた。各カプセル内には予め融点温度より高い温度に融かしたPCM (n-octadecane) を注射器を用いて球カプセル全体の体積の80%程度封入した。また、球カプセルの中心部、接触融解部およびカプセル外部の熱媒体の温度を測定するためにCu-Co熱電対を取り付けた球カプセルを各奇数段ごとに設置した。

潜熱蓄熱タンクは円筒形状で内径が240mm（または162mm）、5mm高さが500mmで厚さが5mmの透明アクリルでできている。潜熱蓄熱タンクは上下に高さ70mm程度のプレナム室を設けて蓄熱タンク内の流れが一様になるようにした。なお、流入・流出水温は上下プレナム室に熱電対を配置して測定した。蓄熱槽上部はフランジ構成として金網や球カプセルを入れた後、ボルトを用いて密封する。蓄熱槽タンクの容積は約22.6ℓであり、熱損失を抑えるため厚さが40mmのグラスウールで断熱した。さらに、蓄熱タンクを含む実験系を小さなコンパートメントに入れ熱損失を極力防いだ。

恒温水槽の水はポンプを用いて循環させ、流量調節バルブを用い流量を調節した。流量はオリフィス型の流量計を用いて測定した。また、蓄熱槽への流量を安定化させる目的でポンプから直接、恒温水槽へ戻るバイパスの水路を設けた。

図3.1に示すようにA, B 2つの恒温槽を用い、始め恒温水槽BはPCMの融点より1℃ないし2℃低い温度に設定し、タンクの中のカプセルの温度が内部まで一様に初期温度の27℃になるまで

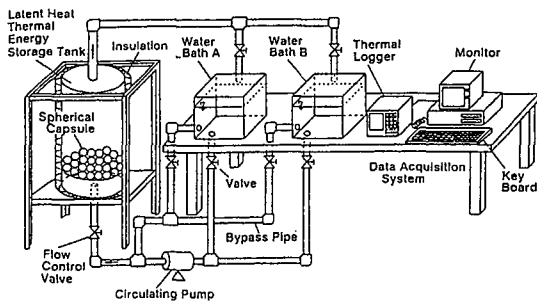


Fig 3.1 Schematic diagram of experimental apparatus

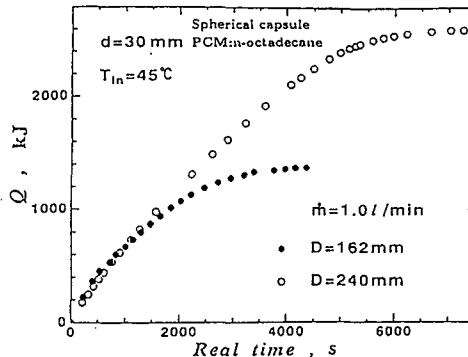


Fig 3.3 Time variation of stored heat with varying storage tank dimension

水を循環させる。この時、恒温水槽Aの温度は実験終了温度に設定しておく。各位置の熱電対により全体が一樣な温度になったことを確認した後、恒温水槽Bのバルブを閉め恒温水槽Aのバルブを開けて水を循環させ実験を開始する。奇数段の球カプセルの中心部、接触溶解部、カプセル外表面の3点の温度を測定した。タンクの流入温度と出口温度、および球カプセル中心温度が恒温水槽Aと同じ温度になったときを実験終了とした。

図 3. 2 には流量を $1.0 \text{ l} / \text{min}$ 、流入温度を 45°C に固定し、蓄熱槽容量を変えたときの、実時間に対する蓄熱量を比較したものである。蓄熱槽が小さい場合、早く蓄熱が完了するが総蓄熱量は蓄熱槽が大きい方が多い。これは蓄熱槽が大きいほど、総潜熱量が大きいためである。この結果を表 3. 3 に示す。

図 3. 3 は図 3. 2 を直径 D と高さ H を基準とした、無次元時間に対する無次元蓄熱量で整理したものである。図からわかるように蓄熱槽寸法が変わっても蓄熱完了点が一致する。このことから、このような無次元表記は蓄熱槽容量が変わる一般のエネルギー貯蔵システムの最適設計に有用である。

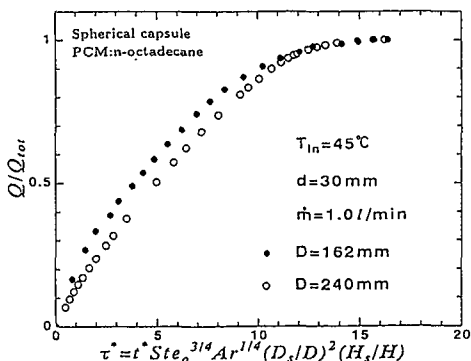


Fig 3.3 Dimensionless stored heat versus dimensionless time with varying storage tank dimension

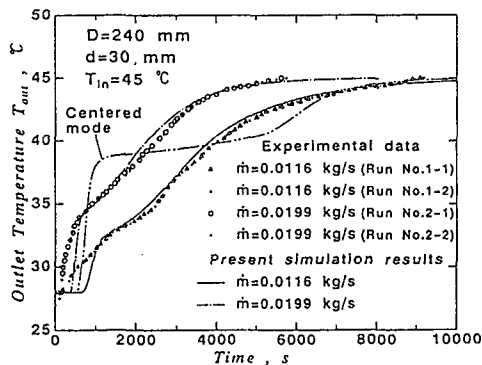


Fig 3.4 Comparison of time variation of outlet temperature between experiment and simulation

図3.4には、初期温度が27℃、流入温度が45℃、流量が0.7 l/minと1.2 l/minの場合、出口水温の変化の実験結果とシミュレーション結果、および中心固定のシミュレーション結果との比較を示す。中心固定の場合は融解初期では勾配が急になり、本実験結果と定量的に全く一致しないことがわかる。このことから、球カプセルベッドの蓄熱シミュレーションを行う場合、球カプセル内の接触融解のメカニズムを考慮することが重要であることがわかった。

第4章 球カプセル型潜熱エネルギー貯蔵/ソーラーシステムへの応用

本章では球カプセル潜熱蓄熱槽のソーラーシステムへの実際的な応用を考察する。ソーラーシステムへの応用を考える場合、律速となるのは集熱時であるから蓄熱モードについて、システムの集熱・蓄熱特性について調べた。まず、ソーラーコレクタにより集熱した太陽エネルギーを潜熱蓄熱槽へ蓄熱する場合について解析を行った。球カプセル型潜熱エネルギー貯蔵/ソーラーシステムの数値シミュレーションは、カプセル内の融解過程に熱伝導モデルを利用した場合は、すでに齋藤、広瀬によって行われており、本シミュレーションもカプセル内の接触融解買い手を新たに考慮した部分以外は、従来のシミュレーション手法に従った。このシステムは従来の空気熱源式ヒートポンプシステムの約3倍もの高効率化を図ることができる。

図4.1には流量 $\dot{m}=0.166\text{ kg/s}$ 、球カプセル直径が70mm、コレクタ枚数10のときの球カプセル潜熱蓄熱槽出入口温度の時間変化と日射量の変化、および集熱効率の時間変化を示した。気象データ(日射量、外気温)としては仙台における1月の平均値を用いた。図に示すように午前8時頃から集熱が開始され、タンクの入口・出口温度とも急激に上昇する。12時間前にはPCMの融解が完了し、タンク出口温度がさらに上昇するため、集熱効率はやや低下する。すなわち、潜熱発生領域においては低温集熱が可能であり、高い集熱効率を実現でき、潜熱エネルギー貯蔵システムユニッ

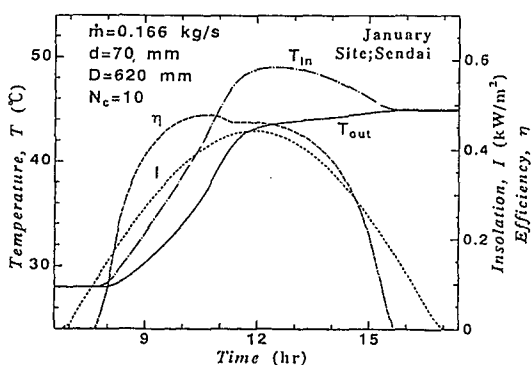


Fig 4.1 Time variation of inlet and outlet temperature, insolation, and efficiency

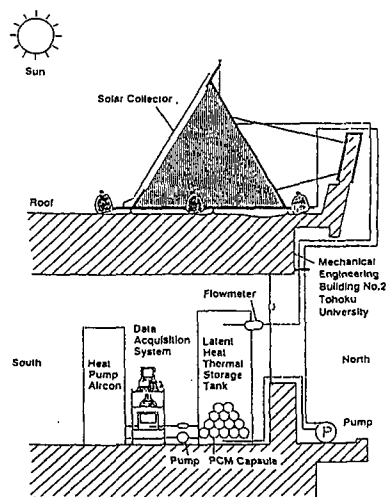


Fig 4.2 A Schematic model for LHTES/solar heat pump system at Tohoku University

トをソーラーシステムに組み込むことの有用性が示された。

図4.2に潜熱エネルギー貯蔵システムの例として、潜熱エネルギー貯蔵システム／ソーラーヒートポンプシステムの実験モデル図（東北大学工学部齋藤研究室）を示す。このシステムはすでに約4年間の稼働実績がある。本システムを用いると、比一東北ポンプに対する質の良い熱源となるため、システムの総合効率（成績係数：COP）は5～6に達し、一般の空気熱源式ヒートポンプシステムの約3倍程度の高効率化が図れることになり、極めて有用なシステムであるといえる。

第5章 結 論

本章は論文の結論である。

第2章では単一球カプセル内の接触／自然対流複合融解について実験を行い、以下のような知見を得た。

- (1) 融解率は1つの無次元数のグループ $t \cdot Ste^{3/4} Ar^{1/4}$ で整理できる。
- (2) 球カプセルの加熱条件がステップ変化に近い場合、初期の段階で固相が浮き上がる、いわゆる浮き上がり現象がみられることを見出した。これは初期に接触部の圧力が急激に高くなるためであることを数値解析結果をもとに検証した。

第3章では実用的な球カプセルを充填した蓄熱槽に対して実験および数値シミュレーションを行い、以下のような知見を得た。

- (1) 従来の熱伝導だけでなく、球カプセル内の接触融解をも考慮したカプセルベッドの潜熱エネルギー貯蔵過程の理論解析モデルを構築し、数値シミュレーションを行った。理論的シミュレーション結果を実験結果と比較することにより、理論の妥当性を検証した。流出水温の応答曲線は、従来の熱伝導モデルにもとづく理論より温度の時間勾配が急になること、すなわち、融解速度が大きくなることを示した。

第4章には球カプセル型の潜熱エネルギー貯蔵システムの応用の一環としてソーラーシステムに対する数値シミュレーションを行い、以下の知見を得た。

- (1) シミュレーションの適用例の一つである、潜熱エネルギー貯蔵／ソーラーヒートポンプシステムは、総合成績係数が5～6のCOPとなり、従来の一般的な空気熱源式ヒートポンプシステムの約2～3倍もの高効率化を図ることができる。以上要するに本論文は、球カプセルを用いた潜熱エネルギー貯蔵システムに関する要素的複合的研究を行って、その蓄熱・放熱特性を明らかにし、実用的高効率潜熱エネルギー貯蔵システムの設計に有用な指針を与えるものであり、機械工学・エネルギー工学の発展に寄与するところが少なくない。

審査結果の要旨

CO₂による地球温暖化や化石燃料枯渇の問題が顕在化する中で、エネルギーの利用効率を抜本的に高めるための潜熱エネルギー貯蔵システムの開発は重要な課題の一つである。著者は、球カプセルに相変化物質を封入した潜熱エネルギー貯蔵システムについて、まずカプセル要素内の基本的融解／凝固過程について実験的に解明し、さらに、球カプセルを多数個充填した球カプセル蓄熱ベッドの蓄熱・放熱特性をさまざまなパラメータを変化させて明らかにした。本論文はこれらの成果をまとめたもので、全編5章よりなる。

第1章は、緒論である。

第2章では潜熱エネルギー貯蔵システムのエネルギー貯蔵過程において最も重要である。単一球カプセルに対する実験を行った。従来の研究は代表温度を球カプセルの外側の温度にとって整理したものが一般的であるが、正確を期すために本論文では代表温度として球カプセル内壁温度をとって実験を行い、無次元変数で整理した結果を示している。ステファン数が大きい場合の完全融解時間と融解率および接触融解部の温度変化などを明らかにした。

とくに、融点以下に保持した相変化物質を封入した球カプセルを融点より高い温度に設定した恒温槽に速やかに浸漬した場合に固相が浮き上がる減少を初めて発見している。これは重要な知見である。

第3章では潜熱エネルギー貯蔵システムの基礎的な温度応答特性を明らかにするために、球カプセル潜熱エネルギー貯蔵システムの性能実験および解析を行っている。球カプセルを充填した蓄熱槽について、流入温度、球カプセル直径、流量および蓄熱槽容量をパラメータとして変化させて蓄熱・放熱特性を明らかにし実用システム設計のために重要な基礎的データを提供した。

第4章では、第3章を基礎にして、潜熱エネルギー貯蔵システムの代表的応用例の一つとしてソーラーシステムに適用した場合に対して、シミュレーション解析を行って、その潜熱エネルギー貯蔵性能を明らかにするとともに、従来の空気熱源式ヒートポンプシステムと比較し、約3倍ものエネルギー利用効率を得られることを示した。これは重要な成果である。

第5章は、本研究の結論である。

以上要するに本論文は、球カプセルを用いた潜熱エネルギー貯蔵システムに関する要素的複合的研究を行って、その蓄熱・放熱特性を明らかにし、実用的高効率潜熱エネルギー貯蔵システムの設計に有用な指針を与えるものであり、機械工学・エネルギー工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。