

「きぼう」での静電浮遊炉を利用した非平衡溶融合金の熱物性計測に向けて

小島秀和（同志社大），小澤俊平，清宮優作，殿岡和己，伊藤輝（千葉工大），
杉岡健一（富山県大），白鳥英（都市大），下西里奈，小山千尋，織田裕久，石川毅彦（JAXA）

Thermophysical Properties Measurements of Non-Equilibrium Molten Alloys Using the Electrostatic Levitation Furnace in the International Space Station

Hidekazu Kobatake*, Shumpei Ozawa, Yusaku Seimiya, Kazuki Tonooka Hiraku Ito
Ken-ichi Sugioka, Suguru Shiratori, Rina Shimonishi, Chihiro Koyama, Hirohisa Oda,
Takehio Ishikawa

*Doshisha Univ., 1-3 Miyakodani Tatara Kyotanabe, Kyoto 610-0394
E-Mail: sagamihara@ut.ac.jp

Abstract: use of renewable energy, such as solar or solar thermal power generation could be one of the fundamental infrastructures for space plant society without fossil fuels. These power generation systems have also attractive because they can produce energy semi-permanently. However, these systems have a critical disadvantage in that the electric power supply is intermittent. The thermal energy storage is attractive for the stabilization of the energy supply. In this study, the thermal storage materials of metallic alloys are focused to design the heat storage system. The thermophysical properties of the liquid alloy will be measured by use of the electrostatic levitator in Kibo module of ISS. Here the recent progress of the preliminary experiment for the ISS experiment.

Key words; Thermal storage, Levitation, liquid alloy

1. はじめに

SDGs 実現のためには再生可能エネルギーの普及が必要とされている。しかし、太陽光・風力などの再生可能エネルギーは自然状況に発電量を左右されるため安定してエネルギーを供給できない。これまでの個別の発電では、これ以上のシェアを伸ばすことは難しい。このような現状を克服するためにはエネルギー貯蔵設備が必要である。

の、そのエネルギー貯蔵は数 MW-h 付近に集中しているのに対し、熱エネルギー貯蔵(Thermal Energy Storage: TES)はその5-6倍のエネルギーを貯蔵する方法と期待されていることが分かる。

蓄熱材は、エネルギーを熱として貯蔵できる有用な材料であり、未利用の熱エネルギーを有効に利用することが可能である。蓄熱材を利用した貯蔵システムでは、再生可能エネルギーを“熱エネルギー”として貯蔵する。そして必要時に必要に応じて発電、暖房、スチームの生成などに利用する。そのなかでもこの熱エネルギーを利用して蒸気タービンを回す蒸気発電を行う蓄熱発電が近年注目されてきている[1]。熱貯蔵材料として金属を用いる潜熱型の蓄熱材料では、融解時・凝固時に潜熱の入排出を利用して熱エネルギーの貯蔵、放出することができる。

エネルギーを熱として貯蔵する材料として、近年合金の潜熱を利用した材料が検討されている[2]。合金では 1) 金属の高い融解潜熱を利した高いエネルギー貯蔵密度の達成、2) 共晶温度などを利用した様々な熔融温度での使用が可能、3) 高い熱伝導率の維持、4) 高温での安定相を構造材料として利用することで融解・凝固を繰り返す低温安定相である熱エネルギー貯蔵部の化学反応による劣化の防止などの機能が期待されている。

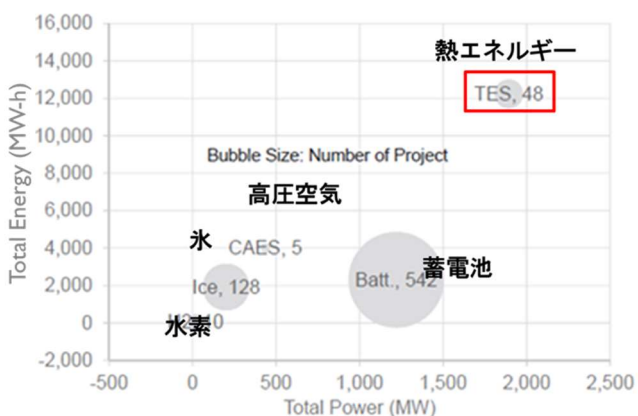


Fig. 1 World's energy storage station in October 2015 from reference [1] with addition.

Fig.1 に示されているのは揚水を除く全世界における2015年のエネルギー貯蔵システムの全貯蔵エネルギーと電力容量を比較したものである。世界的にバッテリーによるエネルギー貯蔵施設の数が多いもの

以上の事から本研究では相分離系の合金に着目した。より効率的な蓄熱材料を設計するには、この融解凝固の過程を詳細に明らかにする必要がある。しかし地上での実験では、容器壁面からの不均質核形成や不純物の混入が引き起こされるため、物性測定や融解凝固過程の観察が困難である。

これらの問題を解決するためには、宇宙空間を利用した微小重力環境での 1) 凝固過程の観察や 2) 密度や粘性、表面張力などの物質移動現象を支配する溶融状態の熱物性値の非接触での測定が必要である。そこで本研究では、「きぼう」実験棟に搭載された ELF を利用した溶融合金の物性計測を行い、融体の熱物質輸送をシミュレーションできるようにし、熱エネルギー貯蔵材料に適した組織の設計・制御に資することを目的としている。本稿で ELF での実験に向けた研究体制および予備実験の進捗状況について紹介する。

2. 静電浮遊炉を用いた物性計測

微小重力環境下で静電浮遊法によって液滴を浮遊させた場合、液滴はその表面張力により真球の形状を保つことができる。そのため軸対象を仮定することで取得した試料の画像からその体積 V を求めることができる。測定前後で試料の質量 M を求めておくと、試料の密度 ρ は画像から得られた体積を用いて

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (1)$$

で与えられる[3]。

さらにこの時、表面振動モードは縮退して表面振動周波数は一つのピークを持つ。このような条件下で液滴の表面振動を励起させると、その表面張力 σ (Nm^{-1}) は表面振動周波数 f_R を用いて

$$\sigma = \frac{3}{8} \pi f_R^2 M \quad (2)$$

と表される[4]。ここで M は試料の重量(kg)である。

また振動を励起させた液滴は外力が加わらない場合、液滴の振動は減衰するが、この緩和時間 τ を用いて液滴の粘性 η は、

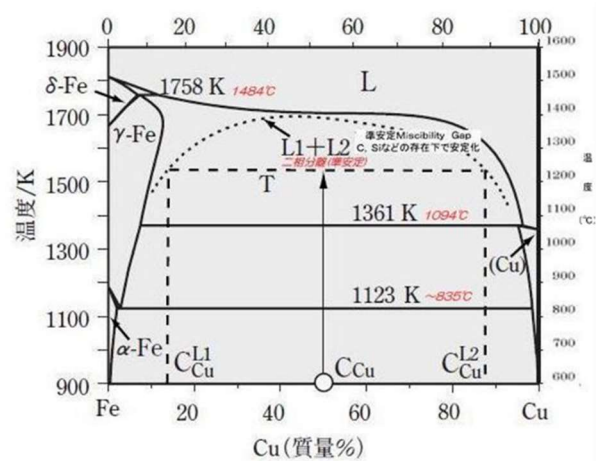
$$\eta = \frac{3}{20\pi} \frac{M}{r\tau} \quad (3)$$

と表される[5]。ここで r は液滴の半径を示す。

3. 地上予備実験結果と今後の課題

著者らはきぼうに搭載されている静電浮遊炉での実験に先立ち、地上での静電浮遊炉、電磁浮遊炉を用いた予備実験を進めている。試料としては、Al-Si 系合金、Fe-Cu 合金を用いる予定である。特に Fe-Cu 系合金に対して静電浮遊炉を用いた地上予備実験を行

った。この Fe-Cu 系合金の相平衡状態図を Fig. 2 に



示す。

Fig. 2 Phase diagram of binary Fe-Cu system from reference [6]

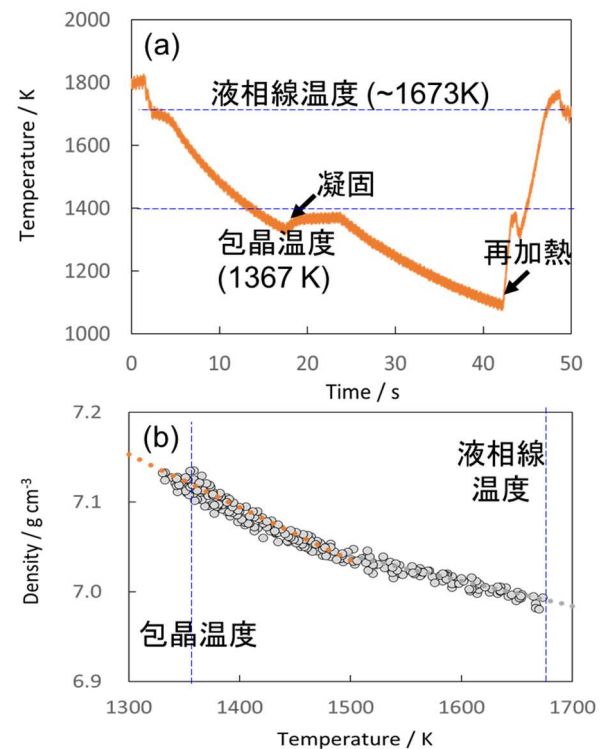


Fig. 3 (a) Temperature profile and (b) temperature dependence of the density of liquid Fe50Cu50 liquid alloy obtained by electrostatic levitator underground.

この二元系合金では液相線温度より低い温度で Fe-Cu 融体の液液分離が生じる。Fig. 3 に地上において静電浮遊炉を用いて測定した際の温度履歴および溶融 Fe-Cu 合金の密度の温度依存性を示す。レーザーで液相線温度以上の温度まで浮遊した状態で Fe50Cu50 合金を加熱した。その後レーザーでの加熱を停止し、試料を放射冷却させた。その後、包晶温度まで冷却された試料が凝固したことが確認で

きた。この冷却過程で取得した試料の画像から密度を求めた。

しかし、地上での静電浮遊炉を用いた実験では重力に打ち勝つために大きな電圧を印加する必要がある。そこで電極間の放電を防ぐために測定は高真空下で行う必要がある。高真空下では合金の蒸発が促進されるため、試料の質量変動が大きく、密度測定における不確かさ要因となる。また蒸気圧の違いにより合金試料の組成が変動する可能性がある。今回の地上予備実験でも試料の重量は実験前後で 55.97 mg から 49.67mg と試料の重量は約 11% 減少していた。この結果からも合金に対する正確な物性計測では、高い圧力で蒸発を防ぎながら測定できる「きぼう」実験棟での測定が重要であることが分かる。

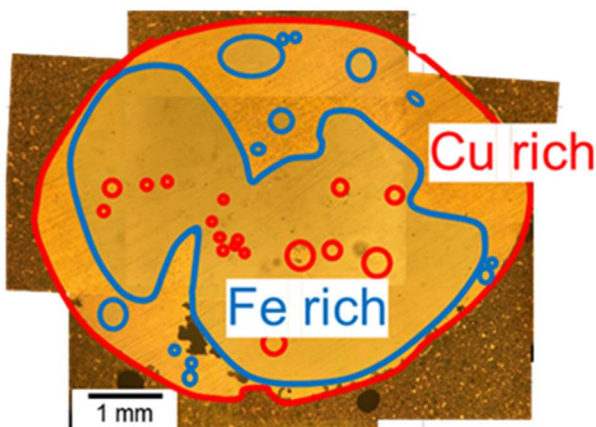


Fig.4 Cut section of Fe50Cu50 alloy formed by use of electromagnetic levitator underground.

一方、電磁浮遊炉での実験で得られた試料の顕微鏡写真を Fig. 4 に示す。地上での電磁浮遊装置を用いた実験では、地上での静電浮遊装置を用いた実験とは異なり雰囲気ガスを制御しながら実験を行うことができる。回収した試料を顕微鏡写真で観察したところ、Fe リッチの領域と Cu リッチの領域に分離していることが確認できる。また試料表面を Cu リッチの相が覆っていることが分かる。

この試料を作製した時の温度履歴を Fig.5 に示す。浮遊液滴を放射温度計で測定した場合、その温度は融点などの相転移温度を利用して、放射温度計に入力した放射率を校正することで補正される。

温度履歴を解析したところ、液相線温度に相当すると考えられる変曲点が実験開始後 80 秒後にみられる。また、試料の冷却曲線において、リカレスのピークが 220 秒後、相転移に対応するプラトーが 235 秒後に観察された。これらの温度をそれぞれ液相線温度(80 秒後)、包晶温度(220 秒後、235 秒後)に対応すると考え温度補正を行ったところ、それぞれの温度は大きく異なることが分かった。これは Fig. 4 で観察されるように、試料が二相分離を起こし、表面に Cu

が偏析した結果、融体にも関わらず表面の放射率が途中で変化したためであると考えられる。

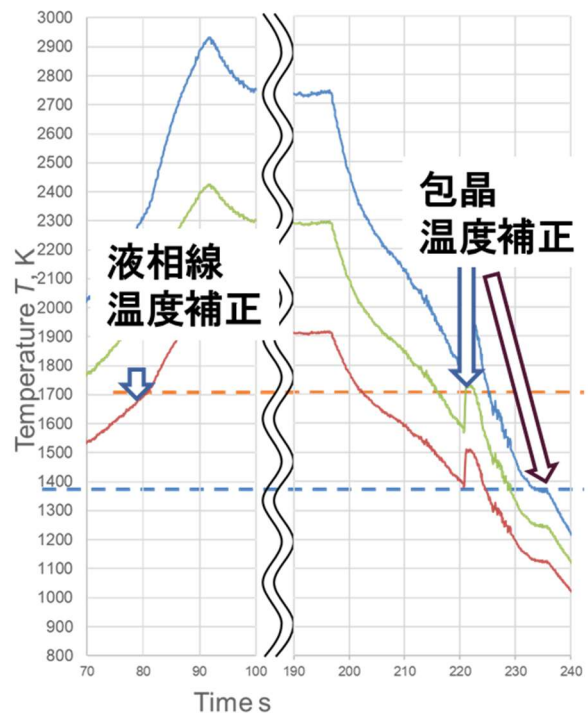


Fig. 5 Temperature profile of the electromagnetically levitated Fe50Cu50. Temperatures have calibrated using liquidus temperature, or encapsulation temperature.

これらの地上予備実験の結果、ISS に搭載されている静電浮遊装置を使ったガス雰囲気での蒸発を抑えた測定が溶融合金の熱物性測定には有効であることが分かった。また本視聴の様に相分離が発生する系では温度計測が難しく、あらかじめ密度などの物性データと温度の関係を取得した上で、宇宙実験で得られた試料の温度を補正する必要があると考えられる。

また本稿では割愛したが、著者らは実測した熱物性データを用いて数値シミュレーションを用いることで液-液分離の核形成過程や、相分離した液相の挙動を明らかにしようと試みている。これら実測した物性値とシミュレーションを組み合わせることで、最適な熱エネルギー貯蔵材料の設計に向けて研究を進める予定である。

参考文献

- 1) Okazaki T.; Electric thermal energy storage and advantage of rotating heater having synchronous inertia, Renewable Energy 151, 563-574 (2020).
- 2) Rawson A., Kisi E. Sugo H. Fiedler T.; Effective conductivity of Cu-Fe and Sn-Al miscibility gap alloys, Int. J. Heat. Mass. Trans. 77, 395-405 (2014).

- 3) Rhim K.W. Ohsaka K.; Thermophysical properties measurement of molten silicon by high-temperature electrostatic levitator: density, volume expansion, specific heat capacity, emissivity, surface tension and viscosity, *J. Crys. Grow.* 208, 313-321 (2000).
- 4) Rayleigh L.; On the capillary phenomena of jets, *Proc R Soc London* 29, 71–97 (1879).
- 5) Lamb H.; *Hydrodynamics*, 6th ed., Cambridge University Press, (1932).
- 6) <https://www.infokkna.com/ironroad/2015htm/iron11/1504feroots03.htm>