

# 低沸点炭化水素-水乳化流体の伝熱特性（雰囲気温度の影響）

日大生産工 山崎 博司 日大生産工 小幡 義彦 日大生産工 氏家 康成

## 1. 緒言

乳化は相互に溶け合わない多成分の流体を混合・均一化し、界面活性剤等で安定化させる技術であり、食品分野、燃料分野をはじめ多くの分野で利用されている。混合液体では分子レベルでの混合が実現されているのに対し、乳化液体には、油中水滴型、水中油滴型などの乳化形式や分散相滴直径分布などの内部構造が存在し、流体力学的性質、熱的性質はこの内部構造に大きく依存する。かつ界面活性剤の性質が温度によって変化するため、温度条件によっても複雑な様相を呈する。しかしながら乳化は、液体の組合せ自由度が混合液体の場合に比べて広範であり、かつその内部構造を設計パラメータとして利用することができるため、目的に合わせた最適伝熱媒体設計を実現するうえで有効な手法のひとつになり得るものと考えられる。

乳化流体の伝熱現象については、その沸騰特性に着目し光学的観察によりその特性を明らかにした研究<sup>(1)</sup>や伝熱特性<sup>(2)</sup>、発泡特性<sup>(3)</sup>などについての検討がなされてきた。また鉄鋼の焼入れ時の冷却制御を行うことを対象とした実験的検討も行われている。しかしながら、その複雑性のゆえに、伝熱媒体設計に資するに十分な基礎的知見が得られているとは言い難いのが現状である。

本研究は、液体の物性、種類によらず、様々な組合せを実現できる乳化流体の特徴を利用した伝熱制御技術確立のための基礎的知見を得ようとするものである。ここではその初期段階として水に、より沸点の低いn-ヘキサンを混入させた乳化流体について雰囲気温度および乳化形式を変化させて伝熱実験を行い、伝熱制御の可能性について検討した。

## 2. 実験方法および数値解析手法

伝熱実験は密閉液槽内に浸漬された水平細線について行った。図1に実験装置の概略を示す。実験装置は、

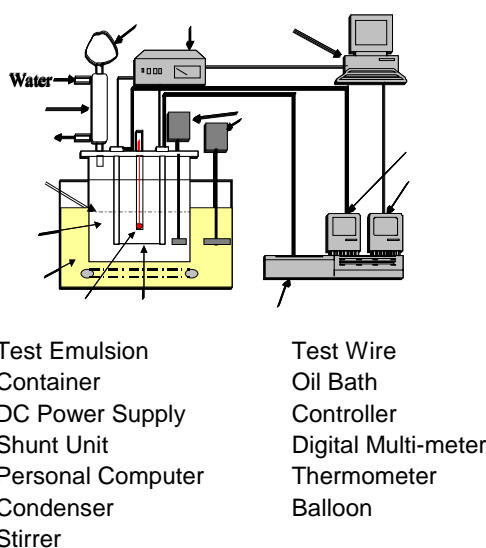


Fig.1 Schematics of experimental apparatus.

電極を取付けた実験液槽、電流供給系、計測系、および温度制御系で構成される。実験液槽は、パイレックスガラス製容器（外径 107mm, 内径 98mm）またはステンレス容器である。上蓋には、電極、標準温度計、および凝縮器への導管が取り付けられている。容器内で発生した蒸気は凝縮器により凝縮されて、導管より滴下、還流する。凝縮器の上部には空気袋が取り付けられており、容器内は大気圧に保たれている。伝熱面には Ni 細線または Pt 細線を用い、定電流回路により直接電気加熱された。電流供給系は直流安定化電源、パワーサプライコントローラで構成し、パーソナルコンピュータによって GP-IB 制御されている。電源装置にはシャント・ユニットを付加して補償するとともに、そのリードバック値を計測することによって電流値を求めた。細線温度は、抵抗値の変化から決定し、その抵抗値は細線間の電圧・電流値から求めた。計測系はデジタルマルチメータとパーソナルコンピュータで構成され、同系列で GP-IB 制御されている。温度制御系はヒータ、かくはん器、温度制御装置および変圧器で構成した。

乳化流体は純水および n-ヘキサン（試薬特級）で構成した。界面活性剤にはソルビタン系 [ソルビタンモノオレート: HLB=4.3] およびエーテル系 [ポリオキシエチレンノニルフェニルエーテル: HLB=10.4] を使用した。供試流体は所定の体積比率で混合し、スクリュウ型攪拌器を用いて混合・安定化させて作成した。界面活性剤の体積割合は 0.02 とし、n-ヘキサンの体積割合を 0.2 とした。

実験は、実験液槽内の温度が所定の温度となったことを確認した後、電流値を変化させて行った。電圧測定は 10 s 間隔で 60 s 間について行い、測定終了後、電流値を変化させて実験を繰り返した。実験範囲は熱流束  $q=10^4 \text{W/m}^2 \sim 1.1 \times 10^6 \text{W/m}^2$  の範囲であり、雰囲気温度を室温から n-ヘキサンの沸点直下までの範囲で変化させ、伝熱面過熱度と熱流束を測定した。

## 3. 結果および考察

図2に本実験で使用した乳化流体の顕微鏡写真を示す。図2(a)は油中水滴型の例である。ここでは連続相が n-ヘキサン、分散相が水である。体積割合が 20% の連続相が分散相 (80%) の水を包含する形式で安定化しており、網目状の油中水滴型構造が確認できる。ここで分散水滴直径は 1~10  $\mu\text{m}$  であり、n-ヘキサンの連続層は 1~5  $\mu\text{m}$  程度である。図2(b)は水中油滴型であ

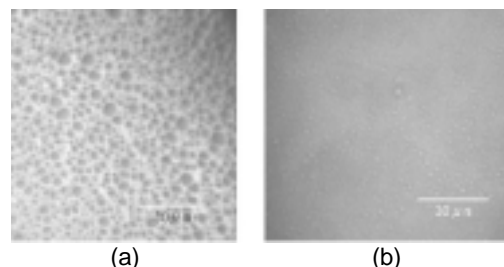


Fig. 2 Microphotograph of water in n-hexane and n-hexane in water emulsions ( $c_o=0.2$ )

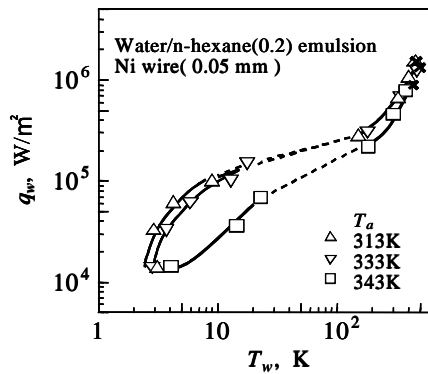


Fig3. Effect of ambient emulsion temperature on heat transfer of horizontal wire.

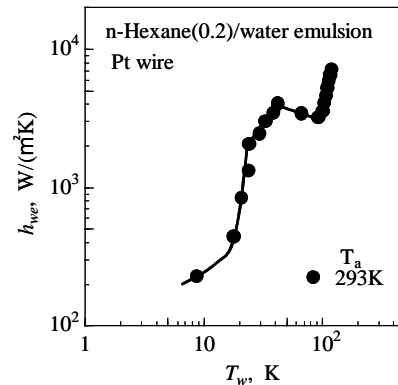


Fig.5 Heat transfer coefficient in n-hexane/water emulsion.

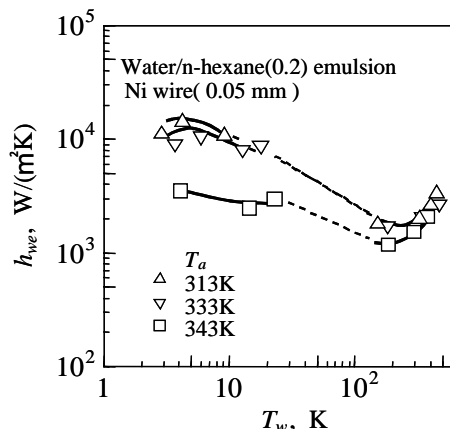


Fig.4 Heat transfer coefficient in water/n-hexane emulsion.

る。体積割合 80%の連続相に 20%の n-ヘキサン分散相が混在した形態である。前者の乳化液体は室温で長時間静置しても明らかな相分離は観察されないのに対し、後者は長時間静置で上方への分散相の凝集が確認された。またそこでの分散滴の合体などは確認されなかった。一方、対流伝熱の支配因子の一つである粘性係数は、前者では非常に高く、1000mPa・s 以上であることを確認した。後者では 293Kにおいて 38mPa・s であり、単一成分の約 10 倍の粘性係数であった。

図 3 に伝熱実験結果の一例を示す。横軸は乳化流体と伝熱面(細線)との温度差(過熱度)  $T_w$ 、縦軸は熱流束  $q_w$  であり、雰囲気温度を変化させた場合の結果が示されている。図中の破線は状態遷移を、x 印は細線の焼損を示している。図から伝熱面温度の増加とともに、熱流束は連続的に増大し、その後伝熱面温度が不連続では急増する。そして再び連続的に熱流束が増大した後、焼損する。雰囲気温度  $T_a=313K$ ,  $333K$  において、 $q_w$  は  $T_w$  の増加とともに、凸曲線で増加しているのに対し、 $T_a=343K$  では全く異なる傾向を示していることがわかる。 $T_a=343K$  では、すでに乳化流体中の n-ヘキサンは沸点より高い過熱状態に保たれており、それらが伝熱面の周囲で蒸気膜を形成した可能性が高い。乳化燃料に関する実験では温度上昇に伴い内部構造の変化とそれに伴う粘性の低下が計測されており<sup>(4)</sup>、粘性係数や内部構造変化が影響しているものと推察できる。図 3 の結果における熱伝達率の変化を図 4 に示す。図から雰囲気温度が低い場合、熱伝達率は  $T_w$  の低い領域で比較して大きな値を示しているのに対し、

$T_a=343K$  では熱伝達率が低い。これらの変化は通常の水・炭化水素を用いた場合とは全く異なる傾向である。

図 5 に水中油滴型乳化流体を用いた場合の熱伝達率変化を示す。油中水滴型と比べて過熱度の低い領域で熱伝達率は低い値を示しているものの、過熱度の上昇とともに熱伝達率は急激に増加していることがわかる。その後増加率は減少し、極大値を示した後に減少し、また単調増加を示す。また過熱度 50K 付近で沸騰音の発生を確認した。以上に示すとおり水中油滴型乳化流体では熱伝達率変化にいくつかの変節点を有している。これらの結果はいずれも低沸点添加成分を分散層として内在させたことによる熱輸送変化および低沸点成分の相変化と再凝縮、および蒸気膜形成とその離脱などによって伝熱モードが変化し、その結果として発現したものと考えられる。図 4 および図 5 の結果から、同じ混合組成の乳化流体を用いた場合でも、その乳化構造によりまったく異なる伝熱特性、伝熱モードを示すことが明らかとなった。以上の結果は、今後更なる現象解明を行うことにより、乳化流体が媒体による伝熱制御の有効な一手法となりうる可能性を示唆するものと考えられる。

#### 4. 結論

水に n-ヘキサンを混入・安定化させた油中水滴型および水中油滴型乳化流体について雰囲気温度および乳化形式を変化させて伝熱実験を行った結果、次の結論を得た。

- (1) 乳化流体を伝熱媒体として使用する場合、熱伝達率は乳化形式により異なる様相を呈する。
- (2) 油中水滴型乳化流体においては過熱度の低い領域で熱伝達率は高く、過熱度上昇とともに熱伝達率は低下する。また雰囲気温度の上昇に伴い、熱伝達率は低下する。
- (3) 水中油滴型乳化流体は、低過熱度領域において熱伝達率は低く、過熱度上昇に伴う熱伝達率変化には、いくつかの伝熱モードを有していることが確認された。

#### 参考文献

- (1) Mori, Y., ほか 2 名, Int. J. Multiphase Flow, 6 (1980), pp.255-266
- (2) Lazarenko, B.R., ほか 2 名, Int. J. Heat Mass Transfer, 18(1975), pp.589-596.
- (3) Avedisian, C. T., Andres, R. P., J. Colloid Interface Sci., 64 (1978), pp.438-453
- (4) Yamasaki, H., ほか 2 名, Proc. 1<sup>st</sup> ASPAC, (1997), pp.603-606.