

生命・生物工学に基づく健康と疾患の研究グループ

生命・生物流体の輸送・混合過程に関する研究

山崎 博司 (機械工学科)

1. 序 説

資源循環型社会構築には、生命工学の恩恵を広く社会に還元していくことが不可欠であり、そこでは有用な生体物質を大量安価に生産するとともに、その生産性を向上させ、かつより多方面での有効利用を模索していく、「生産工学」的観点が必要である。生体の諸機能を活用する場合においては、水などの流体中に保持した状態で使用される場合が多く、生体物質の保存・生産過程においても流体の輸送・混合現象を伴っていることは周知のとおりである。生体機能を有する流体では、代謝産物として高分子物質やガスなどの発生があり、かつ生体活動自体が流体運動に影響を及ぼすなど、極めて複雑な様相を呈している。加えて、生命物質の生産性向上ではその高密度化が必至であり、その場合には前述の流体運動の複雑化は、その生産性に大きく影響してくることは明らかである。これらに加え、近年の生命科学分野での技術革新は、生命・生物工学の幅広い分野への寄与を可能にしており、それらを基盤とした、より生産工学的立場な見地からの生命科学、生命工学的取り組みが必要な段階を迎えている。そこでは、生命物質の効率的な生産や輸送技術の確立が不可欠であり、流体技術の応用が有効である。一方、生命物質を含む流体、いわゆる生命流体は、生命物質自体のみならず、培養成分や副産物などによって、流体特性が大きく変化するとともに、温度管理もまた必要である。以上のことから、生命流体の流動特性、伝熱特性の解明は今後の生命物質生産過程において重要な知見の一つといえる。初年度である本年度は、主として、生命流体の模擬流体である乳化(エマルジョン)流体について流動性、伝熱性について検討を行った。特に、エマルジョン流体を用いた伝熱制御に関する基礎的知見を得たので、以下の報告する。

2. エマルジョン流体の伝熱特性

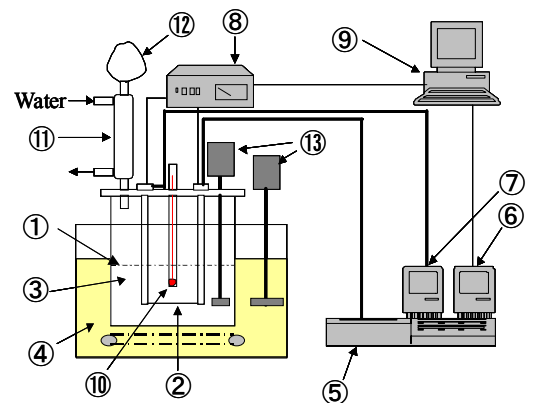
2.1 はじめに 乳化は相互に溶け合わない多成分の流体を混合・均一化し、界面活性剤等で安定化させる技術であり、食品分野から燃料分野まで幅広い分野で利用されている。この乳化技術を利用したエマルジョン(乳化)流体は人口血液など生命流体の模擬流体⁽¹⁾などに使用されるなど、その流体的性質などが生命流体に類似していたものであることも知られている。一般に混合液体では分子レベルでの混合が実現されているのに対し、乳化液体には、油中水滴型、水中油滴型などの乳化形式や分散相滴直径分布などの内部構造が存在し、流体力学的性質、熱的性質はこの内部構造に大きく依存する。かつ界面活性剤の性質

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⁽²⁾や伝熱特性⁽³⁾、発泡特性⁽⁴⁾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。

2-2 実験装置および方法 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、電極を取付



- | | |
|---------------------|-----------------------|
| ① Test emulsion | ② Test wire |
| ③ Container | ④ Oil bath |
| ⑤ DC power supply | ⑥ Controller |
| ⑦ Shunt unit | ⑧ Digital multi-meter |
| ⑨ Personal computer | ⑩ Thermometer |
| ⑪ Condenser | ⑫ Balloon |
| ⑬ Stirrer | |

Fig.1 Schematics of experimental apparatus.

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・ユニットおよびシャントを付加して補償するとともに，それら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・スキャンユニットおよびパーソナルコンピュータで構成され，両者は電源系とともに GP-IB 制御されている．温度制御系はヒータ，かくはん装置，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パラフィン系炭化水素（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エート：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 とした．供試炭化水素は n-ヘキサン（沸点 341.9K）であり，体積割合は 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添加した炭化水素の沸点直下までの範囲で変化させ，伝熱面の雰囲気温度からの過熱度 ΔT_w と熱流束を測定した．

2-3 結果および考察 図 2 は，本実験で使用した油中水滴型乳化液体の顕微鏡写真である．図から多量成分の相が少量成分の相に包含されて存在する，網目構造を有しているがわかる．すなわち，ここでは連続相が n-ヘキサン，分散相が水であり，体積割合が 20% の n-ヘキサ

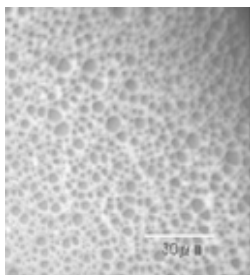


Fig. 2 Microphotograph of water in n-hexane emulsion ($c_0=0.2$)

n-連続相が 80% の水分として分散相を包含する形式で安定化していることが確認できる．ここで分散水滴直径は 1~10 μm であり，n-ヘキサンの連続層は 1~5 μm であった．このような乳化液体の粘度は高いことが知られており，本実験で使用した供試乳化液体では 1000mPa \cdot s 以上であることが確認できた．

図 3 は水中油滴型乳化液体の顕微鏡写真の例である．である．添加炭化水素および体積割合は図 2 の場合と同様であり，界面活性剤としてエーテル系活性剤を用いて作成したものである．図から多量成分の連続相に 20% の少量成分が分散相として混入した形態であることがわかる．図 2 に示された網目構造を有した乳化液体で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，図 3 の油中水滴型では長時間静置で上方への分散相の凝集が確認された．しかしながら分散油滴での合体などは確認されなかった．図 4 に水中油滴型乳化液体の動粘度の測定結果の一例を示す．測定は，細管式動粘度測定法により，逆流型キャノンフェンスケ型粘度計（柴田科学）を用いて行った．温度は室温である．図の横軸は作成終了時を原点とした時刻であり，縦軸は動粘度である．図から，乳化試料作成から 1000s 後においては動粘度に経時変化が確認できることがわかる．また 2000s においてもその動粘度にはばらつきが見られている．一方 3000s 以降では粘度に大きな変化はなく，安定した動粘度の値を

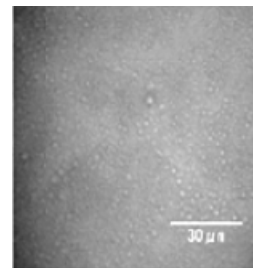


Fig. 3 Microphotograph of n-hexane in water emulsion ($c_0=0.2$).

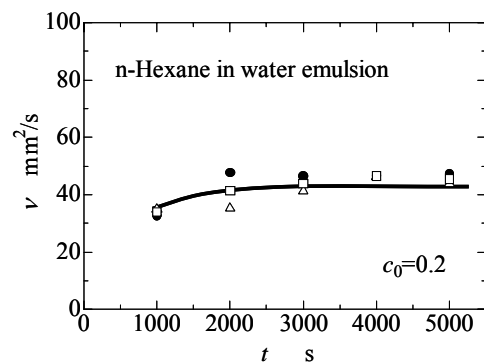


Fig. 4 An example of measured result of kinetic viscosity of n-hexane in water emulsion ($c_0=0.2$).

示していることがわかる. なおこの期間では上述の相分離が確認できるものの, 分散液滴の合体等は観察されず, 安定した乳化状態が確保された. 図から換算される供試乳化液体の粘性係数は $38\text{mPa}\cdot\text{s}$ であり, 母成分である水または n-ヘキサンの 10 倍の粘性係数を示している. 前述の油中水滴型の場合に $1000\text{mPa}\cdot\text{s}$ に比べると粘度が小さいものの, 母成分に比べると非常に高い値を示しており, 液体内に構成された相界面およびそれらが組み合わせられた構造が乳化流体の粘度に大きく影響していることがわかる. 一方, これらの構造は温度条件の影響を大きく受け, 粘度も同様に変化することが確認された.

図 5 に油中水滴型乳化液体における伝熱実験結果の一例を示す. 横軸は雰囲気乳化流体と伝熱面(細線)との温度差(過熱度) ΔT_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

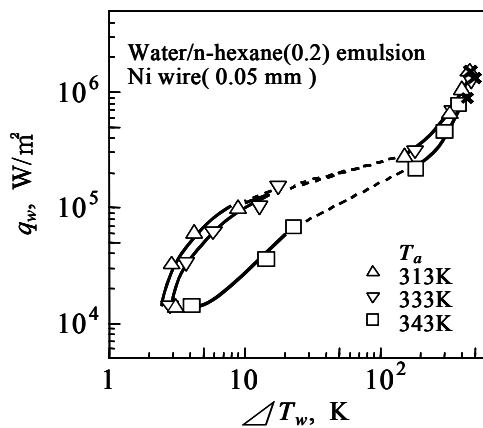


Fig5. Effect of ambient emulsion temperature on heat transfer of horizontal wire.

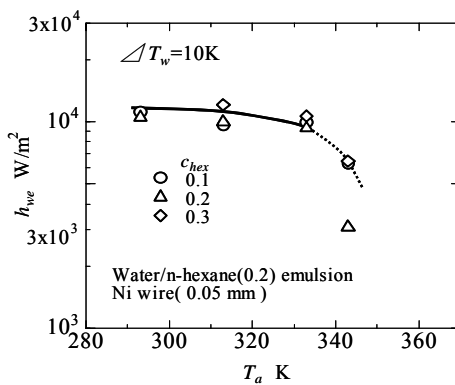


Fig. 6 Relation between the ambient emulsion temperature and heat transfer coefficient.

気温度 $T_a=313\text{K}$, 333K において, q_w は ΔT_w の増加とともに, 凸曲線で増加しているのに対し, $T_a=343\text{K}$ では全く異なる傾向を示していることがわかる. $T_a=343\text{K}$ 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⁽⁵⁾, 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 6 は伝熱面過熱度を一定とした場合の熱伝達率である. 伝熱は温度差を駆動力として行われることは周知である. その一方で伝熱量は伝熱モードによって大きく影響されており, その両者の兼ね合いによって伝熱量は支配される. 図から雰囲気温度が $T_a=333\text{K}$ より低い温度範囲では大きく変化していないのに対し, 340K を超えた範囲では熱伝達率の低下が著しい. また添加炭化水素の影響は

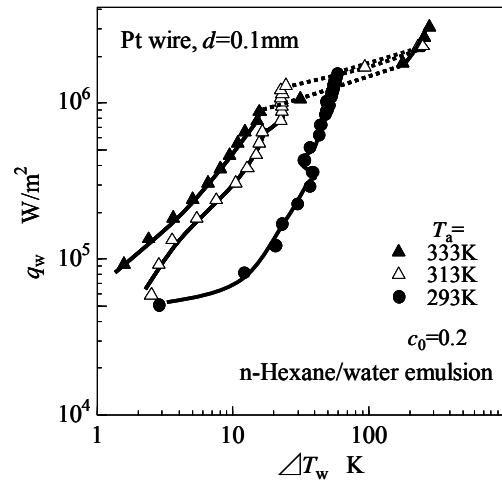


Fig7. Effect of ambient emulsion temperature on heat transfer of horizontal wire immersed in n-hexane in water emulsion of $c_0=0.2$.

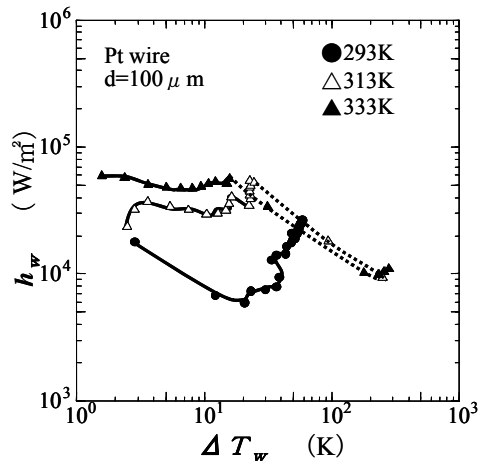


Fig.8 Heat transfer coefficient of n-hexane in water emulsion.

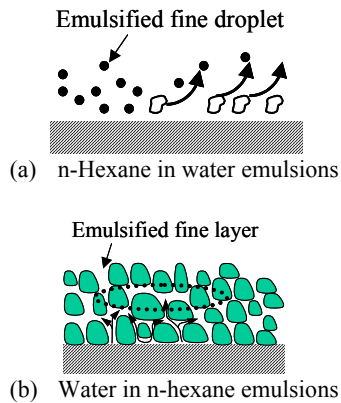


Fig.9 Heat transfer mechanisms of n-hexane and water emulsions.

$T_a=333\text{K}$ より低い範囲では大きくないことが確認できる。この伝熱モード変化の境界は添加炭化水素の沸点付近であり、添加成分の相変化が伝熱モードに大きく影響したものを考えられる。

図 7 に水中油滴型乳化流体を用いた場合の熱伝達特性を示す。図には図 5 の場合と同様に雰囲気温度を変化させた場合の結果が示されている。またここでの伝熱面はより安定な Pt 細線であり、直径には 0.1mm のものが用いられた結果である。直径変化の効果も盛り込まれた結果となっている。これらの結果の比較においては、熱伝達率の比較においては、直径変化の効果を検討する必要があり、相対的な伝熱モードの比較を行うことが妥当である。図から油中水滴型の場合に比して、低熱流速領域において伝熱面過熱度は低い値を示していることがわかる。また $T_a=293\text{K}$ の場合において $\Delta T_w=45\text{K}$ 付近において明らかな変節点を有していることがわかる。この傾向は単一成分、多成分混合系においても見受けられず、エマルジョン(乳化)流体特有の傾向であると考えられる。 $T_a=313\text{K}$ においては $\Delta T_w=25\text{K}$ 付近に小さいながら同様な傾向が確認できる。一方 $T_a=333\text{K}$ とした場合には同様な効果は確認できなかった。図 8 は図 7 における熱伝達率変化を示したものである。図から前述の括れ部の温度において熱伝達率が大きく上昇していることがわかる。 $T_a=293\text{K}$ の場合では約 2 倍程度、 $T_a=313\text{K}$ においては 30% の向上が確認できる。一方 $T_a=333\text{K}$ の変化は図 7 に示された油中水滴型の結果とほぼ同様なものである。以上の結果から得られる乳化流体の伝熱メカニズムを図 9 に示す。図(a)(b)はそれぞれ、水中油滴型、油中水滴型のモデルを示している。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。ここでは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ており、その結果として熱伝達率が複雑に変化し、その一環として局所的な向上が確認できたものと考えられる。一方油中水滴型

においては、低沸点成分は液膜を形成しており、その移動は高沸点成分によって抑制され、断熱性に高い様相を呈しているものと推察できる。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。

2-4 おわりに 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。

3. 展 望

以上の検討結果から、乳化流体として適切な伝熱媒体を組み合わせることによって、特定の温度領域において伝熱促進を実現できることが明らかとなった。生命生物流体に必要な、厳格な温度条件を実現するための基本技術として有用と考えられる。一方で、その検討過程において、乳化流体の動粘度が水に比べて非常に高いことも確認できた。これらはレイノルズ数、プラントル数に反映されることから、その特性が類似する生命流体内部での伝熱性能および混合性能は、動粘度の高さに応じて困難なものであることが予想できる。これらは連続培養などの生物生産過程の効率改善において重要な課題と成りうる。また液体に発生した微気泡離脱も伝熱を阻害する要因であり、光合成細菌などの水素生産過程において、培養液からの気体除去も課題のひとつといえる。上記に加え、高濃度培養液における微気泡の輸送についても何らかの改善策を見出す必要があるものとも考えられる。

これらの知見を踏まえて、今後、生命流体を視野に入れた高効率な混合装置、バイオリアクタなどのハードウェア設計とともに、温度管理を実現するためのより詳細な伝熱現象把握と混合・流動性の体系的な検討が重要であると考えられる。

参考文献

- (1) 例えば、中村雅英, ほか 3 名, 機論 (C 編), 61-592, (1995), pp.4593-4598.
- (2) Mori, Y., ほか 2 名, Int. J. Multiphase Flow, 6(1980), pp.255-266.
- (3) Lazarenko, B. R., ほか 2 名, Int. J. Heat Mass Transfer, 18(1975), pp.589-596.
- (4) Avedisian, C. T., Andres, R. P., J. Colloid Interface Sci., 64 (1978), pp.438-453.
- (5) Yamasaki, H., ほか 2 名, Proc. 1st ASPAC, (1997), pp.603-606.