

## 第22回青葉工学研究奨励賞



### マイクロチャンネル内相変化伝熱現象を利用した医療用小型冷凍デバイスに関する研究

東北大学  
流体科学研究所  
助教 岡島 淳之介

人体を加熱・冷却することによる治療は古くから数多くあり、例えば東洋医学の鍼灸などの温熱療法、ガンを局所的に加熱し壊死させるハイパーサーミア、ガン等を凍結により切除する凍結手術などがある。これらの医療技術の有効性は、施術者の技量による部分が多く、その治療効果の定量的評価や医療機器の高精度制御が必要である。その中でも、凍結手術において、皮膚のシミ切除や微小な初期乳がんの低侵襲切除のために、凍結手術用冷凍デバイスであるクライオプローブの小型化が必要とされている。

本研究では、皮下注射用の24ゲージの注射針と同程度の大きさの外径550 $\mu\text{m}$ の極細クライオプローブを開発した。クライオプローブの直径が小さくなると、内部を流れる冷媒の流量が減り、同時に体積に対する表面積割合が増加するため、既存の冷却手法では生体組織を凍結壊死できない場合がある[1]。これまでにもクライオプローブの小型化が検討されたが冷却能力は十分ではなかった[2]。小型化に伴い高熱流束冷却の必要性があるため、本研究ではマイクロチャンネル内相変化伝熱を利用した冷却機構を用いた。

図1(a)に極細クライオプローブの外観を、図1(b)に内部の冷媒の流れの概念図を示す[1]。極細クライオプローブはステンレス製の内管および外管により構成された二重管構造を有しており、内管は内径0.07mm、外径0.15mm、外管は内径0.30mm、外径0.55mmである。冷媒には代替フロンHFC-23(大気圧下の沸点 $-82.1^{\circ}\text{C}$ )を用いた。高圧・常温・液体状態の冷媒が内管へ流入し、摩擦損失により減圧される。内管出口において、膨張し低温の二相流へ変化する。冷却性能を評価する通電加熱実験を行い、伝熱性能を実験的に求めることで、内部の流れが沸騰伝熱を伴っていることを明らかにした[3]。

図1(c)に37 $^{\circ}\text{C}$ の寒天内での冷却実験における各種温度および流量の時間変化、図1(d)に凍結領域の写真を示す。クライオプローブ表面温度は二つの熱電対により計測した。寒天内においては表面温度が $-30^{\circ}\text{C}$ ～ $-35^{\circ}\text{C}$ となっており、外部では $-50^{\circ}\text{C}$ となっている。寒天外部は空気中にさらされており、内部を流れる冷媒の温度とみなすことができる。凍結領域は冷却開始120秒後で直径約5mmであった。また、凍結実験を再現する数値解析により、冷却時のクライオプローブ表面での熱流束は $150\sim 200\text{ kW/m}^2$ と推定され、凍結手術に十分な冷却能力を持つことを明らかにした[4]。

高い冷却能力を有する小型の冷凍デバイスを医療用途だけでなく他分野へも波及させるため、現在はマイクロ

チャンネル内の相変化伝熱現象の解明を進め、高発熱密度を持つ電子機器の冷却システムの研究に着手している[5]。沸騰伝熱は潜在的に冷却能力の限界があり、その限界は限界熱流束と呼ばれる。限界熱流束を超える高熱流束冷却機構[5]が実現できれば、電子機器の高性能化を後押しすることができる。

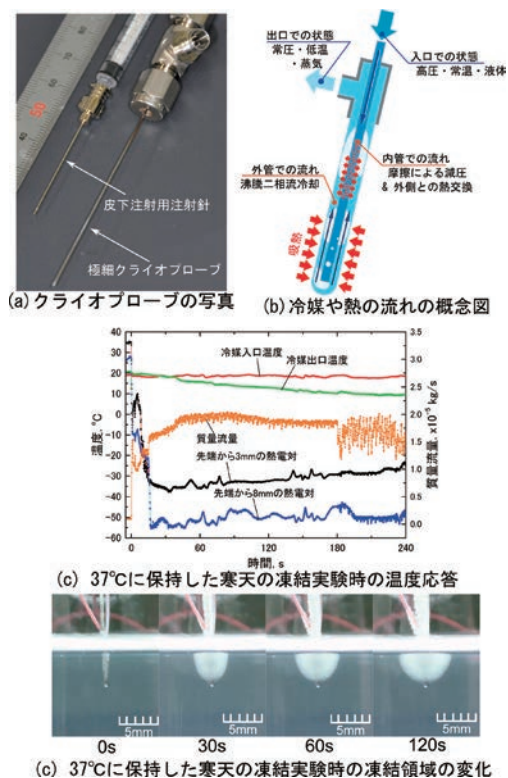


図1 (a) 極細クライオプローブの写真、(b) 極細クライオプローブ内の冷媒の流れの概念図[1]、(c) 37 $^{\circ}\text{C}$ の寒天内での冷却実験における各種温度および流量の時間変化[1]、(d) 凍結領域の写真[1]

[1] J. Okajima et al., *Cryobiology*, 69 (2014), 411.  
 [2] M. Bénita et al., *Brain Res.* 36 (1972), 133.  
 [3] J. Okajima et al., *J. Flow Contr. Meas. Visual.*, 2 (2014), 55.  
 [4] J. Okajima et al., *J. Nanotechnol. Eng. Med.* 4 (2014), 041009-1.  
 [5] J. Okajima et al., *J. Therm. Sci. Tech.* 7 (2012),