

愛媛大学[院]

愛媛大学

愛媛大学

○横石都慶

高橋 学

朱 霞

愛媛大学

愛媛大学

愛媛大学[院]

岡部永年

黄木景二

安藤健次

1. 緒 言

最も効果的な肝臓ガンの治療法として、再発防止や完治の観点から切離手術がある。しかし、従来の切離手術では、肝臓内に張り巡らされている大小無数の血管を一本ずつ縫合しながら行うため、長い手術時間を要し、患者および医師の体力的負担・ストレスの問題につながっている。これらの負担を軽減するために、肝臓ガン切離手術の時間短縮を目的とした「肝臓ガン周囲局部凍結による切離技術」の開発を行っている。局部を凍結することにより半冷凍部での切離行い時間短縮ができ、さらに手術時の出血量を軽減できる。本研究では、冷却針の開発および豚肝臓による冷却機能調査を行った。また、冷却実験により得られた豚肝臓の冷却特性データから有限要素法を用いて逆解析し、豚肝臓の熱物性値を検討した。さらに、豚肝臓の部位における冷却特性の違い、血管による冷却能力の違いについて検討を行った。最後に、冷却時間に基づき冷却針からの距離と温度の関係を表す推定式の検討を行った。

2. 実験装置

Fig.1に、豚肝臓における冷却特性の実験で用いた装置を示す。この装置は、液体窒素用圧力容器の口に栓をし、コンプレッサにより圧力容器内に空気を入れ、液体窒素を冷却針に送るシステムである。冷却針は、熱伝導率を考慮し、銅を用いて銅管の内径より小さい外径のステンレス管を銅管内に挿入した二重構造である。液体窒素をステンレス管内に流しステンレス管先端部から排出させ、銅管内を戻るというシステムである。その間に銅管を冷し、銅管壁を通して冷却するという原理である。

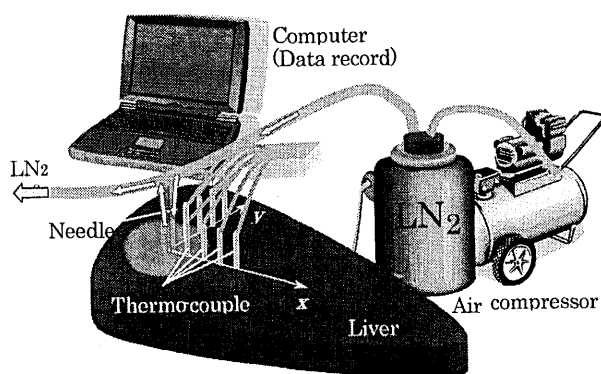


Fig.1 Schematic illustration of cooling system for heat transfer test

3. 実験方法

3.1 冷却特性

豚肝臓の冷却特性を調べる実験を行った。実験は、熱電対を冷却針自身と冷却針から5mm, 10mmの豚肝臓の位置に刺し込み温度測定を行った。なお血管内に流す生理食塩水の圧力が20mmAqと120mmAqでは、冷却能力においてどの程度影響があるかを見るため肝臓を小片に切り取り実験を行った。

3.2 実験条件

部位別に分けた肝臓に生理食塩水を含ませ、血管内に流量がない状態における熱物性値の比較実験を行った。各部位の分類

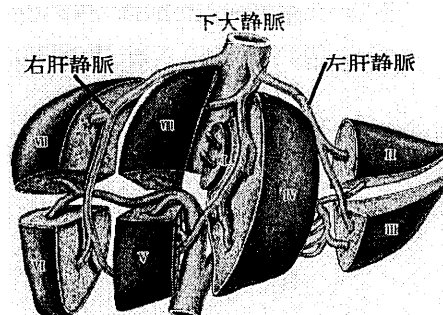


Fig.2 Liver zone of Couinaud

方法は、Fig.2に示す中間静脈、右肝静脈、左肝静脈を境界として分けられるCouinaudの分類法を用いた。実験では、肝臓の外側左葉において、仮想切離ラインを決め、そのライン状を径が太い静脈を境界にし部位別に分けた。また、実験に用いる肝臓の状態を以下に示す。

- 血管内に生理食塩水を流した状態での豚肝臓中央部
- 血管内に生理食塩水を流した状態での豚肝臓端部
- 模擬肝臓に生理食塩水を流した後、水分を含んだ状態での豚肝臓の部位別
- 血管内圧力の異なる豚肝臓の部位別

4. 模擬肝臓の質量密度

豚肝臓の中心部と端部の質量密度を実測した。結果をFig.3に示す。豚肝臓のすべての部位において測定を行ったが、ほぼ体積と質量は、比例の関係が得られ、

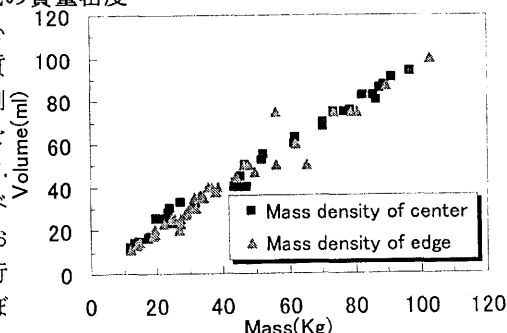


Fig.3 Mass density of center

豚肝臓の部位に関係なく質量密度 1050kg/m^3 である。

5. 実験および解析結果

Fig.4は、豚肝臓中央部において血管内に生理食塩水を120mmAqで流した場合の温度勾配を各位置で測定した結果である。同時に、有限要素解析による結果を示す。得られた解析結果を実験データと一致させることにより、逆解析的に熱物性値が推定できる。なお、解析に用いる初期条件として、冷却針の直径3mm、豚肝臓の初期温度を293Kとし、冷却針から10mmまでの近距離内での豚肝臓の熱物性値を測定した。その結果をTable 1に示す。ここで(a)は、冷却針を豚肝臓中央部に刺し込み血管内に

生理食塩水を流した場合の値であり、(b)は、同様の条件で豚肝臓端部である。また、(c)は、各部位における値のうち、端部側と中央部側の部位における物性値である。さらに、(d)は、血管内圧力が120mmAqと20mmAqの場合における熱物性値である。なお、豚肝臓において冷却特性の依存性を調べるため比熱を一定とした解析を行った。

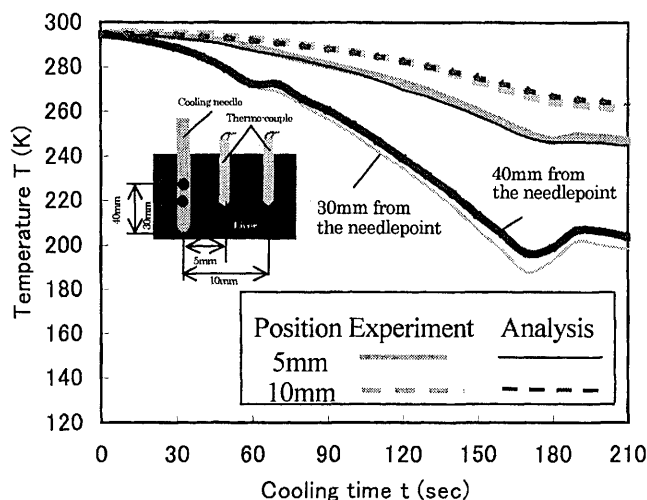


Fig.4 Comparison of experimental and analysis data
cross-section view of the experiment (d)

Table 1. Estimation value of liver analyzed by FEM

Condition	Thermal conductivity [W/(m·K)]	Specific heat [J/(kg·K)]	Mass density [kg/m ³]	Thermometric conductivity [m ² /s]
(a)	2.20	1000	1050	2.10×10^{-6}
(b)	0.57	1000	1050	0.54×10^{-6}
(c)	0.10	1000	1050	0.09×10^{-6}
	0.12	1000	1050	0.19×10^{-6}
(d)	0.15	1000	1050	0.14×10^{-6}
	0.16	1000	1050	0.15×10^{-6}

(a) Nearby the center of the liver	— The flow of physiological saline
(b) End of the liver	— The flow of physiological saline
(c) Blood pressure of 120mmAq	— The flow of physiological saline
Blood pressure of 20mmAq	— The flow of physiological saline
(d) Nearby the center of the liver	— Including physiological saline (non-flow)

6. 考 察

6. 1 模擬肝臓中央部および端部

得られた中央部(a)、端部(b)の物性値について比較すると、温度伝導率が中央部の方が高くなっていた。これは、端部には毛細血管が多数存在するため、流れが複雑になる。そのため、伝熱の妨げになると考えられる。

6. 2 水分を含んだ状態での模擬肝臓の各部位

熱伝導は、組織内の血流状態または、血管の太さに依存性が高いと考えられるため、血流の影響を受けない状態での純肉片の測定を行った。それぞれの方向の物性値も値は同じであった。これから血流がない純肉片では、冷却による異方性はないことがわかった。(d)の物性値は、端部側と中心部側との値であるが、部位別に行った実験では、値もほぼ同値であった。部位分けした肝臓において径1mm以下の血管以外存在せず、

同様に熱物性値は部位による違いがないことがわかった。以上のことから熱物性値は血流、血管の違いにより影響を受けやすいと考えられる。

6. 3 血圧の違いによる物性値の違い

血圧20mmAqと血圧120mmAqでは、得られた温度伝導率は、血圧20mmAqの値が高くなっていた。これは、血圧が低いいため単位時間当たり血管内に流れる流量が、120mmAqより少ないため血流による熱の移動が小さいためであると考えられる。したがって、血圧が低いほど温度伝導率は高く、熱が伝わりやすい。切離位置の血圧は約10mmAq～60mmAqであるため、肝臓の物性値は血圧20mmAqに近い値になると考えられる。

6. 4 豚肝臓の温度推定式

時間と温度の影響を同時に考慮するパラメータPを次式によりを用いる。

$$P = T(c + \log t) \quad (1)$$

T: 温度[K], t: 時間[s], c: 材料定数(c=1)
解析により得られた冷却針からの各距離での時間と温度の関係によりパラメータPの値を得る。式(1)より得られたPの値を式(2)に代入し、材料定数Pmax, A, d₀およびα値を(T_i, t_i)の実測データをもとに求める。

$$P = P_{\max} \left[1 - \exp \left\{ -A \left(\frac{d}{d_0} \right)^\alpha \right\} \right] \quad (2)$$

Pmax, d₀, A, α: 材料定数, d: 距離[m]

材料定数Pmax, A, d₀およびα値は、簡単な関数により得られる値である。なおd₀は、パラメータPが最大をPmaxとときの距離dである。このことから、データ(T_i, t_i, d_i)の実測データを与えれば求めたい冷却時間、温度、冷却針からの距離が算出できる。それぞれの肝臓の状態における算出結果のうち、任意の位置における算出結果をFig. 5に算出結果を示す。

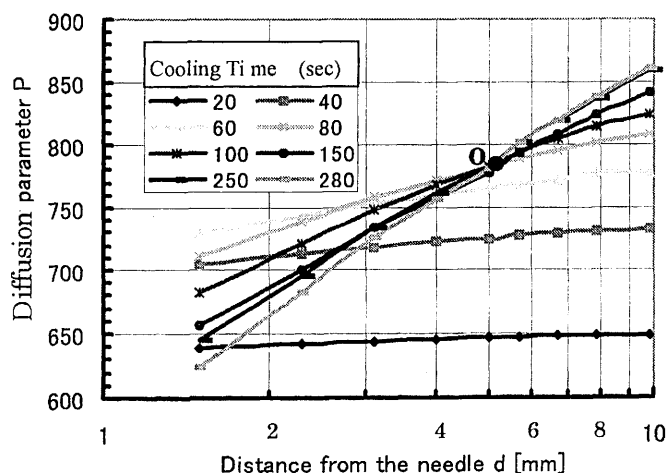


Fig.5 Relation between P and d on experimental condition

7. 結 言

肝臓の冷却実験結果に基づき、FEMによる逆解析を用いて、諸条件における豚肝臓の各部位の熱物性値を求めることができた。さらに豚肝臓の温度推定式を用いることにより冷却時間、温度、冷却針からの距離が算出できる。