

平成 22 年 5 月 10 日現在

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2007～2009

課題番号：19700388

研究課題名（和文） 透析器ハウジング形状が透析液流動に与える影響の検討

研究課題名（英文） Computational evaluation of dialysis fluid flow in variously-designed dialyzers

研究代表者

山本 健一郎（YAMAMOTO Kenichiro）

早稲田大学・高等研究所・助教

研究者番号：00434316

研究成果の概要（和文）：本研究では、透析器ハウジング形状に着目し、これが透析液流動に及ぼす影響について検討することで、高性能な透析器の設計についての指針を得ることを目的とした。均一な透析液流入に対して、透析液側出入口部に全周型バツフルを設けることが有効であることが確認された。また、透析液流入部をテーパ構造とすることによって中空糸束内部への透析液流入が促進され流動の均一化できることがわかった。透析性能の向上には、膜だけでなくジャケット形状による透析液流動の改善が重要である。

研究成果の概要（英文）：The objective of the present study is to evaluate by computational analysis the effects of dialyzer jacket baffle structure, taper angle, and taper length on dialysis fluid flow. The baffle fully surrounding hollow-fiber bundle and taper structure are effective for uniformizing dialysis fluid flow. Optimum design of dialysis jacket structure is essential to optimizing dialysis fluid flow and to increasing dialyzer performance.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
平成 19 年度	1,300,000	0	1,300,000
平成 20 年度	1,200,000	360,000	1,560,000
平成 21 年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,200,000	570,000	3,770,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：人間医工学 / 医用生体工学・生体材料学

キーワード：中空糸型透析器、透析液流動、ハウジング形状

1. 研究開始当初の背景

血液透析とは、円筒状のハウジングに収められた約 1 万本の中空糸透析膜（内径約 200 μ m、厚さ約 45 μ m）からなる透析器を用

いて、腎不全患者の血液中から病因物質を拡散・濾過により分離除去するプロセスである。透析器の性能は、使用される中空糸膜の溶質透過能だけでなく、血液と透析液の接触効率

すなわち流動状態に大きく依存する。そのため、除去性能を高めるためには透析液および血液の流れを最適化することが重要である。

2. 研究の目的

本研究では、コンピュータシミュレーションによる流体解析および実験により、透析器ハウジング形状（バッフル、テーパ構造、透析液出入口部位など）に着目し、これが透析液流動に及ぼす影響について検討することで、高性能な透析器設計についての指針を得ることを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 流動解析

流動解析には汎用流体解析ソフト ANSYS FLOTTRAN および CFX (ANSYS, USA) を使用した。血液透析器 APS-15SA (旭化成クラレメディカル) の形状データ (表 1) に基づき、図 1 に示すように透析液側流路をモデリングした。透析器内部の中空系充填部は、図 2 に示した透析液流路の微小領域モデルを作成し流体解析することで各方向の抵抗比を算出し、これに圧力損失の実測値を考慮することで表現した。解析条件は、入口流量を透析液流量 500 ml/min に相当する 166 mm/s、出口条件を 0 Pa とし、透析液は 37 °C の水 (粘度 0.693 mPa·s、密度 993 kg/m³) に設定した。解析結果の妥当性を評価するために、ハウジング形状 (テーパ構造) および中空系充填率の異なる 3 種類の試作透析器 (表 2) を用いて水系における測定した実測値と比較した。

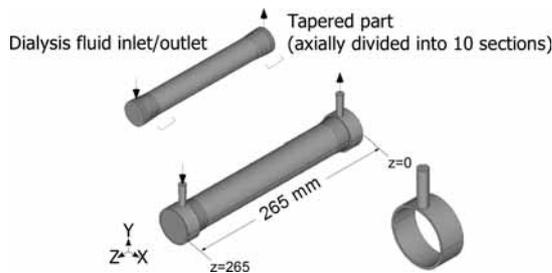


図 1 透析液側流路モデル

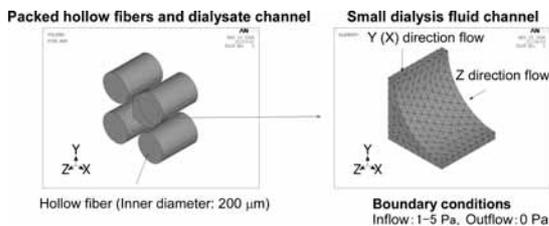


図 2 微小透析液側流路モデル

バッフル構造が透析液流動に与える影響

図 3 に示したように、透析液出入口部に中

空系束を覆うバッフルの大きさが異なるモデル (中心角が 0, 30, 120, 240, 360°) を作成し流動解析することにより、バッフル構造が透析液流動に与える影響を評価した。

表 1 透析器形状データ

		APS-15SA 型
膜素材		ポリスルホン
膜面積 [m ²]		1.5
中空系内径 [μm]		185
膜厚 [μm]		45
中空系長さ [mm]		266
ジャケット内径 [mm]		36.4
本数 [-]		9700
充填率 [-]	center	0.56
	taper avg.	0.51
	inlet/outlet	0.46
テーパ角 [°]		4.2
テーパ長さ [mm]		25.0

表 2 試作透析器の形状データ

	A	B	C
膜素材	ポリスルホン		
膜面積 [m ²]	1.54	1.44	1.19
中空系内径 [μm]	200		
膜厚 [μm]	45		
中空系長さ [mm]	266		
本数 [-]	9200	9600	7140
充填率 [-]	0.70	0.70	0.58
テーパ角 [°]	3.6	3.9	3.9
テーパ長さ [mm]	24.6		

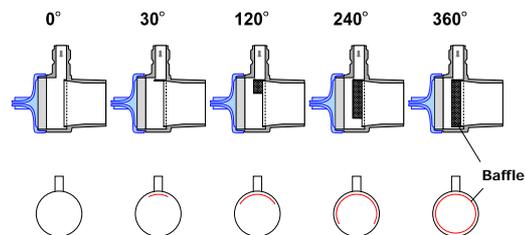


図 3 バッフルサイズが異なるモデル

テーパ構造が透析液流動に与える影響

透析液側出入口部をテーパ構造にすることで、中空系充填率を局部的に低下させることができるため、中空系束に対して透析液が流入・流出しやすくなると考えられる。そこで図 4 に示したように、透析液出入口部に設けたテーパ構造が異なるモデルを作成し解析することで、テーパ構造が透析液流動に及ぼす影響を評価した。透析器胴部内径を 13.25, 18.20, 22.90 mm、テーパ長さを 12.5, 20.0, 25.0, 33.3, 50.0 mm、テーパ角度を 2, 4, 6° と変化させたモデルとテーパなしのモデルを作成し、透析液流動を解析した。

実際のテーパ部では充填率が連続的に変化するが、今回の解析モデルでは表現できないため、テーパ部を10等分しそれぞれの部位における平均充填率をもとに流体抵抗を算出することで表現した。

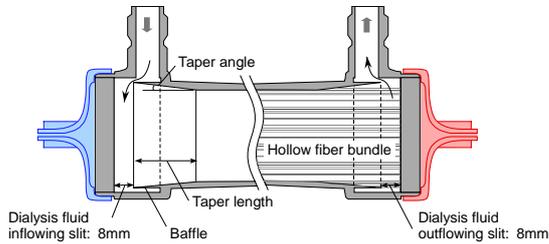


図4 テーパ構造の異なるモデル

(2)物質移動

流動解析結果に基づき透析器内における物質移動を解析した。拡散による物質移動に加え、透析器内における圧力分布をもとに内部ろ過による物質移動を解析した。物質移動については、ビタミンB₁₂を対象溶質としてそのクリアランスにより評価した。解析結果の妥当性を評価するために、ハウジング形状（テーパ構造）および中空糸充填率の異なる3種類の試作透析器を用いて水系において測定した実測値と比較した。

4. 研究成果

(1)流動解析

中空糸形状のみから計算した流体抵抗を用いた解析では十分な精度で圧力損失を推算できなかった。この理由として、シミュレーションでは、膜充填部を均一とみなしているが、実際の透析器では偏りがあることが考えられた。そこで透析液流動解析における分布流体抵抗値の算出方法を検討することで、透析液流動と物質移動の解析精度を向上させることを検討した。ハウジング形状（テーパ構造）および中空糸充填率の異なる3種類の試作透析器を用いて水系において測定した実測値と比較した結果、透析液側圧力損失に関する実測値と解析値の誤差は10%未満となり、従来法よりも精度良く解析できた。以上より、本手法により、中空糸型透析器における透析液流動を精度よく評価できることを確認した。

バッフル構造が透析液流動に与える影響

中空糸束を覆うバッフルの大きさが異なるモデルに対して流動解析した結果を図5に示す。従来のように透析液の出入口部にのみバッフルを設けた30 - 240°のモデルではバッフル背面部への透析液流れが阻害され流速が遅くなった。これに対しバッフルのないモデルおよび中空糸束全周を覆うように設けら

れた360°のモデルでは、テーパ構造の有無によらず均一に流入（流出）した。膜束への直接の流入は局所的な濾過の促進につながるため全周型バッフルが好ましいと考えられた。

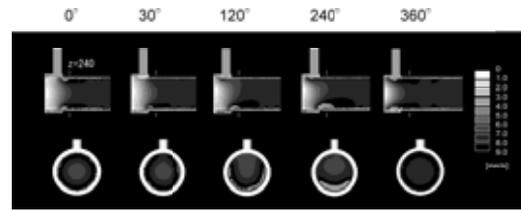
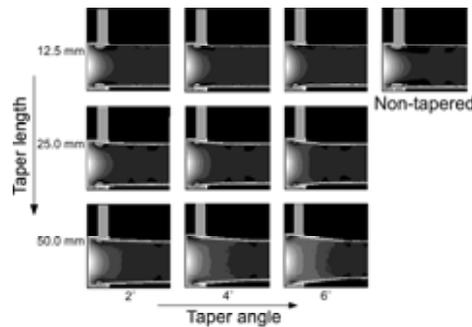


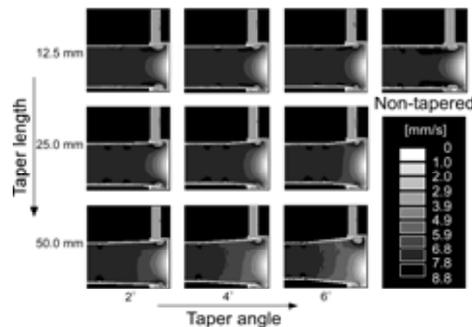
図5 バッフルサイズが透析液流動に及ぼす影響（透析液流入部、テーパ無し）

テーパ構造が透析液流動に与える影響

テーパ構造が透析液流動に及ぼす影響について解析した結果を図6に示す。テーパ構造のないモデルではジャケット壁面に沿って透析液が著しく流れやすいのに対して、テーパ構造を設けたモデルでは、透析液が流入もしくは流出しやすくなる様子が見てとれる。透析液入口付近（図6(a)）では、テーパの長さや角度を変化させても、透析液流動に大きな変化はなかった。しかし、透析液出口付近では、テーパが長く、また角度が大きくなるほど、透析液流動に顕著な偏り（偏流）が確認された。中空糸束内部への透析液流れを促進するためには充填率の変化を大きくできる、比較的短いテーパが有用であることがわかった。



(a) Inlet



(b) Outlet

図6 テーパ構造が透析液流動に及ぼす影響
(a)透析液入口部、(b)透析液出口部

(2)物質移動

流動解析の精度向上に伴い、物質移動解析の精度も向上した。ビタミン B₁₂ のクリアランスについて実験値との誤差は 10%未満となり、従来に比べて高精度に推算することが可能となった。今回は膜により透過が阻害されない小分子について評価したが、今後は膜により阻害されるより大きな物質に関する検討が必要である。

以上の結果より、均一な透析液流入に対して、透析液側出入口部に全周型パッフルを設けることが有効であることが確認できた。また、透析液流入部をテーパ構造とすることによって中空糸束内部への透析液流入が促進され流動の均一化できることがわかった。透析性能の向上には、膜だけでなくジャケット形状による透析液流動の改善が重要である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計5件)

- 1) K Yamamoto, M Matsuda, A Hirano, N Takizawa, S Iwashima, T Yakushiji, M Fukuda, T Miyasaka, K Sakai, "Computational evaluation of dialysis fluid flow in dialyzers with variously-designed jackets", *Artif. Organs*, 33(6), 481-486 (2009), 査読有
- 2) A Hirano, K Yamamoto, M Matsuda, M Inoue, S Nagao, K Kuwana, M Kamiya, K Sakai, "Flow uniformity in oxygenators with different outlet port design", *ASAIO Journal* 55, 209-212 (2009), 査読有
- 3) S Kunikata, M Fukuda, K Yamamoto, Y Yagi, M Matsuda, K Sakai, "Technical Characterization of Dialysis Fluid Flow of Newly-Developed Dialyzers Using Mass Transfer Correlation Equations", *ASAIO Journal* 55, 231-235 (2009), 査読有
- 4) 國方賢, 八木優, 松田雅人, 山本健一郎, 福田誠, 薬師寺大二, 宮坂武寛, 酒井清孝, 新型血液透析器における透析液側流動の無次元相関式による評価、腎と透析別冊 65 ハイパフォーマンスメンブレン'08, 47-50 (2008)、査読無
- 5) 滝沢夏生, 山本健一郎, 松田雅人, 薬師寺大二, 福田誠, 宮坂武寛, 酒井清孝, コンピュータシミュレーションによる透析器のハウジング形状が透析液流動に及ぼす

影響の解析、腎と透析別冊 65 ハイパフォーマンスメンブレン'08, 42-46 (2008)、査読無

[学会発表](計8件)

- 1) 平野彩香, 山本健一郎, 松田雅人, 小川武人, 薬師寺大二, 宮坂武寛, 酒井清孝, 透析液流動改善のためにテーパ部を改良した透析器の開発、第47回日本人工臓器学会大会、新潟、2009年11月12-14日
- 2) 山本健一郎, 堀之内達也, 松田雅人, 松田兼一, 酒井清孝, 救急医療のための装置開発、第47回日本人工臓器学会大会、新潟、2009年11月12-14日
- 3) 石渡祥, 山本健一郎, 松田雅人, 小川武人, 薬師寺大二, 宮坂武寛, 酒井清孝, 血液透析器における流動と物質移動のシミュレーション解析、化学工学会第41回秋季大会、広島、2009年9月16-18日
- 4) 平野彩香, 山本健一郎, 松田雅人, 小川武人, 薬師寺大二, 宮坂武寛, 酒井清孝, 透析器形状が透析液流動と物質移動に及ぼす影響、化学工学会第41回秋季大会、広島、2009年9月16-18日
- 5) A Hirano, K Yamamoto, M Matsuda, T Ogawa, T Yakushiji, T Miyasaka, K Sakai, "Dialysis fluid flow in a hollow-fiber dialyzer and its effects on dialysis performance", World Congress 2009 - Medical Physics and Biomedical Engineering, Munich, Germany, Sep. 7-12, 2009
- 6) 平野彩香, 山本健一郎, 松田雅人, 小川武人, 薬師寺大二, 宮坂武寛, 酒井清孝, テーパ部を改良したモデル透析器の試作と透析液流動の可視化、化学工学会米沢大会2009(3支部合同大会), 山形大学工学部(米沢市), 2009年8月10-11日
- 7) 石渡祥, 山本健一郎, 小川武人, 宮坂武寛, 酒井清孝, ANSYS-CFXを用いた中空糸型透析器内における透析液流動の評価、第54回(社)日本透析医学会学術集会・総会、横浜、2009年6月5-7日
- 8) 平野彩香, 松田雅人, 山本健一郎, 酒井清孝, 透析液流動の改善に効果的な透析器テーパ部の作製とその評価、日本医工学治療学会第25回学術大会、大阪、2009年4月10-12日

6. 研究組織

(1)研究代表者

山本 健一郎 (KENICHIRO YAMAMOTO)
早稲田大学・高等研究所・助教
研究者番号: 00434316