

カラーセンサを用いた人工透析廃液中の 尿素含有量比較器の試作

Development of a comparator of urea in dialysis waste fluid
using a color sensor

○山口陽士*, 工藤隆男**
○ Takashi Yamaguchi *, Takao Kudoh**

*八戸工業高等専門学校 機械・電気システム工学専攻,

**八戸工業高等専門学校 電気情報工学科

*Hachinohe National college of Technology. Advanced Engineering Course,

**Hachinohe National college of Technology

キーワード: 人工透析(Dialysis), カラーセンサ(Color sensor),

連絡先: 〒039-1192 八戸市田面木字上野平16-1 八戸工業高等専門学校 電気情報工学科
工藤隆男, Tel.: (0178)27-7279, Fax.: (0178)27-7279, E-mail: tkudoh-e@hachinohe-ct.ac.jp

1. はじめに

人間の腎臓は血液中の老廃物の除去、電解質の維持、水分量の維持という3つの主な機能があるが、腎不全の患者は、外的な手段でこれらの機能を行う必要がある。この腎臓の機能を人工的に行う治療行為が人工透析である。

従来の透析法では、透析がどの程度進んでいるかをリアルタイムでモニタする手段がなく、透析終了後の採血・成分分析に基づいていた。そのため、透析が進んでいない場合は、やり直しをする必要があった。透析では血液を体外に出し、ダイアライザーと呼ばれる透析膜でできた多数の細いパイプの中を通す。

パイプの外側に透析液を流すと、浸透圧の差で血液中の老廃物が取り出され、透析廃液と共に体外に排出される。そこで、透析廃液中の微量物質の経時変化をモニタリングする方法として、透析廃液中に含まれる尿素窒素により色が変わる検知微小粒体（イオン交換樹脂）を用いる方法を提案し、検出に必要な感度である、 0.3mg/ml の濃度を検知可能であること、更には、目視による色の検知結果と尿素濃度がよく対応していることを確認した。

そこで、本報告ではリアルタイムでカラーセンサにより色の変化を自動比較し、人工透析の進行状況をモニタリングするシステムの試作について述べる。微小粒体の尿素含有量に依存する色情報のサンプリング毎の時間変

化をモデル化しておき、カラーセンサで検知した色と比較することにより異常を検知することを検討している。

2. 尿素含有量の比較

2.1 尿素含有量のモデル化

人工透析の概要を Fig.1 に示す。血液中の老廃物はダイアライザーで除去され廃液中に流出する。老廃物中の尿素をイオン交換樹脂に含浸させた p-ジメチルアミノシナムアルデヒドと反応させることでカラーセンサを用いた測定を可能としている。

透析のモデル化をするため、ダイアライザーの尿素除去に着目する。ダイアライザー内は中空糸膜が数万本束ねてあり中空糸膜の中を血液が通り、その周りを透析液が通る。尿素的の除去は、血液と透析液の二つの溶液の濃度勾配によって、尿素濃度の高い方から低い方へと尿素が移動して行われる。時間経過と共に血液中の尿素は除去されるので、血液と透析液の濃度勾配は時間と共に小さくなっていき、尿素的の除去はだんだんと少なくなり、ある値に収束すると考えられる。このような時間と共に減衰するモデルを考える。

濃度勾配に従って物質が移動する受動輸送の場合、拡散によって表すことができる。拡散によって、尿素が単位時間に単位面積を通して移動する量を VC_B とおき、廃液中に単位時間に流出する尿素的量を KC_B とするとき、式 (1) の拡散方程式で表すことができる。

$$\frac{dV \cdot C_B}{dt} = -K \cdot C_B \cdots (1)$$

V : 血液量[ml]

C_B : 尿素濃度[mg/ml]

K : 尿素クリアランス[ml/min]

t : 時間[min]

式 (1) より尿素含有量のモデルの式 (2) を得られる。 C_{B0} は初期値、透析前尿素濃度である。

$$C_B = C_{B0} \exp\left(-\frac{Kt}{V}\right) \cdots (2)$$

一方、血液中の尿素含有量は Gotch の考えた single-pool model に基づく式 (3) で表される。⁵⁾この場合、血液中の尿素濃度は式 (4) で表される。

$$\frac{Kt}{V_{SP}} = -\ln\left(\frac{C_E}{C_S}\right) \cdots (3)$$

$$C_E = C_S \exp\left(-\frac{Kt}{V_{SP}}\right) \cdots (4)$$

K : 尿素クリアランス[ml/min]

t : 透析時間[min]

V : 体内水分量[ml]

C_S : 透析前血液中尿素濃度[mg/ml]

C_E : 透析後血液中尿素濃度[mg/ml]

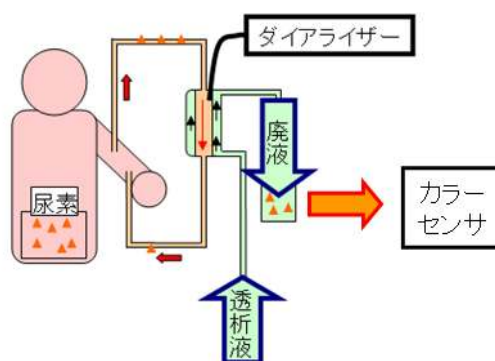


Fig.1 人工透析の流れ

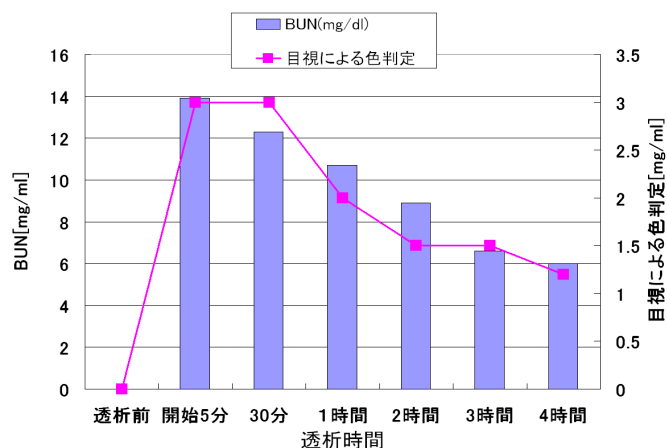


Fig.2 透析廃液中の尿素含有量の時間変化

以上のことから、血液中の尿素濃度の時間変化、すなわち、透析廃液中の尿素濃度の時間変化は式（5）のようになると考えられる。

$$C_t = C_0 \exp\left(-\frac{Kt}{V_{SP}}\right) \cdots (5)$$

C_0 ：透析開始直後の廃液中尿素濃度

C_t ：単位時間における廃液中尿素濃度

実際の臨床データを Fig.2 に示す。棒グラフは尿素含有量を表し、折れ線は色チャートを用いた目視による判定を表している。これらは指数関数のように減少していることから式（5）を用いた透析廃液中の尿素含有量のモデル化は妥当だと考えられる。式（5）の変化を単位時間ごとに示すと Fig.3 のようになるので、単位時間ごとのモニタリングが可能となる。

2.2 樹脂（検知微小粒体）の着色

透析廃液中の尿素含有量を数量化するために、透析廃液中の尿素含有量を色へと変換する。これには、p-ジメチルアミノシンナムアルデヒドを含浸させたイオン交換樹脂を使用した。樹脂上の p-ジメチルアミノシンナムアルデヒドは尿素と反応し、濃度に応じて 1 分程度で茶色の混ざった橙色から赤色に変化する。尿素的濃度が増大すると赤色の割合も増す。Fig.4 に廃液中の検知微小粒体への着色の様子を示す。樹脂には感度よく着色が可能であり、約 0.2~0.3mg/dl 程度で色の濃さが濃度に依存する。これを透析廃液中の尿素的分析に利用した。試作システムでは樹脂上の色を測定することとなる。目視では個人誤差が出てくるため、色を計測できる機器が要求される。

3. カラーセンサを用いた数量化

3.1 カラーセンサ

透析廃液中の尿素と p-ジメチルアミノシンナムアルデヒドを反応させた樹脂の色を測定するためにカラーセンサを用いた。センサへの入射光より RGB 成分を出力する。用いたカラ

ーセンサは浜松ホトニクス製の S9706 である。これは RGB に各々 12bit の分解能を持つ。データはシリアルで出力され、入射光量に比例する。3つの 12bit レジスタを内蔵しており、RGB の同時測定が可能である。また、感度設定が 2 段階あり、0.01~100000[lx] までの範囲で測光が行える。このデジタルカラーセンサを用

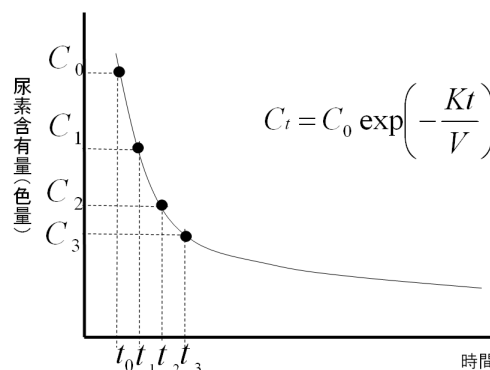


Fig.3 モデル化した尿素含有量の時間変化



Fig.4 樹脂に反応させた尿素

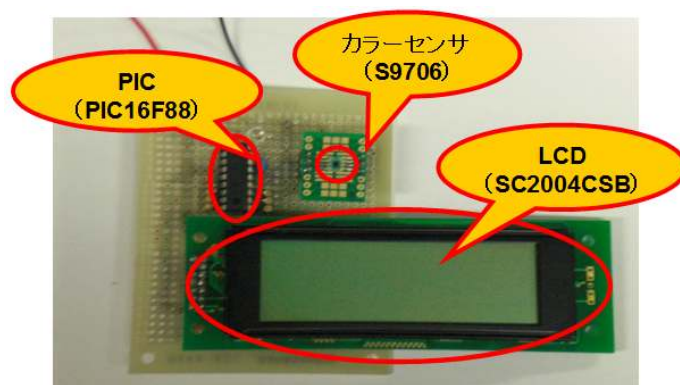


Fig.5 システム構成

いたのは、アナログ方式の場合、AD変換などによって素子が多くなってしまいがちであることから、なるべくシンプルな回路構成を心掛けたためである。

3.2 システム

Fig.5にシステムの全体図を示す。カラーセンサ(S9706)、PIC(PIC16F88)、LCD(SC2004CSB)の3素子でシステムを構成した。光源には白色LEDを用いた。システムではPICのPORTAをLCDの制御に、PORTBをカラーセンサの制御とLCDへのデータ転送に使用している。LCDに表示されるRGBデータはそれぞれ16進数で表示する。1)~4)

3.3 アルゴリズム

測定アルゴリズムを Fig.6 に示す。

- step1. 透析開始直後の透析廃液中の尿素と樹脂を反応させた色データを換算し式 (3) の C_0 とする。
- step2. 式 (3) より、単位時間後の色データ C_t を予測する。
- step3. 単位時間後の透析廃液中の尿素と樹脂を反応させた色データ C_t' を測定する。
- step4. C_t と C_t' を比較する。
- step5. 比較の結果、異常を検知すれば警告音を発し、LCD に異常を表示し知らせる。異常がなければ step2 に戻る。この動作を単位時間ごとに行う。

4. 実験

4.1 樹脂の色測定

着色されたイオン交換樹脂は、微粒子なので廃液中では Fig.4 のように沈殿している。廃液中に浮遊させるために、サーボモータを用いて容器を周期的に傾けながら、同じサンプルを 30 回測定した。白色 LED を光源として用い、反射光を測定する方法と透過光を測定する方法の評価を行った。測定回数 30 回の平均 RGB データを Table.1、時間変化を Fig.7、8 に示す。

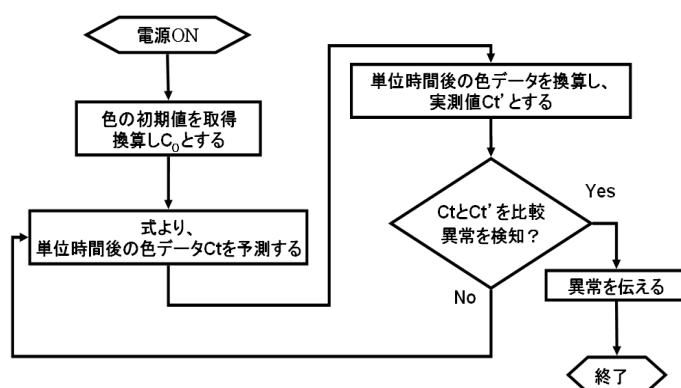


Fig.6 アルゴリズム

Table.1 樹脂の平均色データ

	反射光	透過光
R	51.3	88.53333
G	48.36667	55.36667
B	48.76667	43.36667

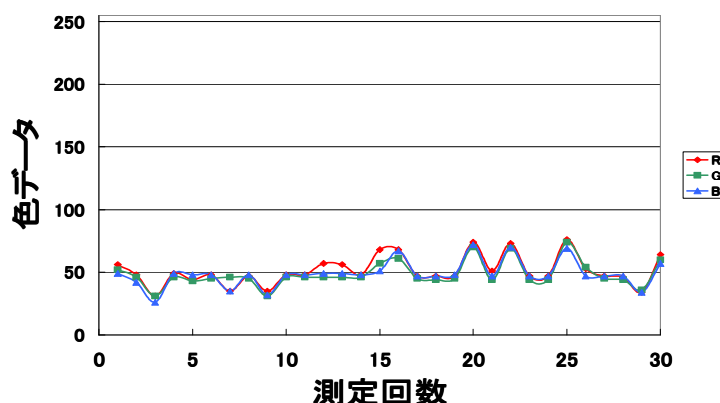


Fig.7 反射光を用いた測定

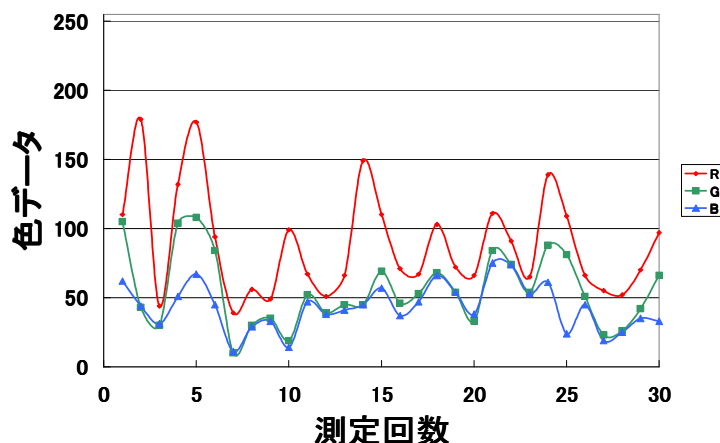


Fig.8 透過光を用いた測定

Table.1より反射光で樹脂の色を測定した時、RGBデータはほぼ均一の値であるのに対して、透過光での測定ではR成分のデータに特徴量が出ている。

Fig.7に示す反射光を用いた測定の場合、測定した光は樹脂に反射した光とプラスチック容器の表面に反射した光の両者をカラーセンサが取り込み色を測定していると考えられる。よって、RGBデータはほぼ同じ、すなわち灰色の特徴が出ている。

Fig.8に示す透過光を用いた測定の場合は、プラスチック容器に反射する光を取り込まないので、着色した樹脂間を透過する光をカラーセンサが取り込んでいるのでR成分のデータに特徴量が出ていると考えられる。

また、色データに多くのバラつきが見られる。その原因として、サーボモータでチューブを振って色の測定を行っていたので、樹脂の分布が均一でなかったためと考えられる。p-ジメチルアミノシンナムアルデヒドと尿素が反応した樹脂は茶色の混ざった橙色から赤色に変化するとわかっているため、Rデータに特徴量が出るはずであるので、透過光での測定が樹脂の色を測定するのに適しているといえる。

また、色の精度と感度を向上させるためには、雑音に強いシステムにする必要がある。これには信号 - 雑音比 (S/N 比) の考えを用いることができる。カラーセンサに入射する光量を多くすることで、多少の外乱光では影響を受けにくくすることが出来る。また、外乱光自体を減少させるために、今の剥き出しの状態のカラーセンサに外乱光が入らないような密閉型の機構にするなど考えられる。

5. まとめ

人工透析の透析廃液中の尿素含有量についてのモデル化を行った。これにより、透析のリアルタイムでのモニタを可能とした。

残された課題は、尿素と反応させた樹脂の色測定ではRGBデータのスケールが小さく色測定の感度と精度を高める必要がある。さら

には、色情報に基づく透析終了時刻の予測を行い、透析における患者の負担を軽減するシステムが必要である。

謝辞

本研究は、本校名誉教授若松義信先生よりご助言を頂き進めました。ここに記し謝意を表します。

参考文献

- 1) 浅川毅, PICアセンブラ入門, 東京電機大学出版局
- 2) 後閑哲也, 改訂版C言語によるPICプログラミング入門, 共同印刷株式会社
- 3) 篠田博之・藤枝一郎, 色彩光学入門, 森北出版株式会社
- 4) トランジスタ技術, 2009年4月号, p.84～153
- 5) 看護のための臨床医学大系10 腎・尿路系 1983年3月20日第9刷 株式会社情報開発研究所