

学位論文（博士）

A new method of evaluation system of anterior chamber
pressure for phacoemulsification in cataract surgery

（白内障手術における超音波乳化吸引術の前房圧
評価システムの新システム）

氏名 東島 史明

所属 山口大学大学院医学系研究科

医学専攻 眼科学講座

令和 7 年 1 月

目 次

1. 要旨	2
2. 研究の背景	3
3. 目的	4
4. 方法	4
(1) 方法	4
(2) 解析	5
5. 結果	6
6. 考察	10
7. 結語	11
8. 謝辞	11
9. 参考文献	12

《要旨》

白内障手術、特に超音波乳化吸引術の進歩により、この手術の安全性は向上している。しかし、眼内炎、脈絡膜上出血、網膜剥離、後囊破損などの手術合併症は依然として起こりうる。後囊破損は比較的によくみられる白内障手術の合併症で発生率は約0.5～4.7%であり、硝子体落下水晶体片のために追加の外科的介入を必要とする。偶発的な後囊破損を防ぐためには、手術中の前房安定性が重要である。前房安定性はフェイコマシンの吸引圧やチップサイズ、灌流ボトルの高さなどの設定に大きく左右される。しかしながら前房安定性について述べた実験報告は少なく、従来法では前房内圧を測定するための器機を直接眼内に挿入する必要があった。本研究では非侵襲的に前房内圧の測定を可能とする内圧測定機能を有した新たなチューブチャンバーシステムを考案し、後囊破損を生じない前房内圧を保つことができるフェイコマシン設定に関して検討した。まずチューブチャンバーシステムを用いて、様々なフェイコマシン設定における非閉塞吸引状態でのチャンバー内圧とボトルの高さとの関係を調べた。その結果、チップサイズや吸引圧に関わらず、チャンバー内圧はボトルの高さに比例して変化した。次に、豚眼を用いて同様の実験を行ったところ、前房内圧は同様にボトルの高さに比例した。最後に、豚眼を用いた後囊破損アッセイと本チャンバーシステムを組み合わせることで、非閉塞吸引状態における安全な前房内圧を検討した。本研究によって非閉塞吸引状態で後囊破損を生じにくい推奨前房内圧およびフェイコマシンの設定が提案された。本チャンバーシステムの特性や使用法を十分に理解することで、様々なフェイコマシン設定における前房内圧を非侵襲的に測定することが可能となり、前房の不安定性を解消できる可能性が示唆された。

【研究の背景】

白内障手術、特に超音波乳化吸引術の進歩により、この手術の安全性は向上している¹。しかし、眼内炎、脈絡膜上出血、網膜剥離、後囊破損などの手術合併症は依然として起こりうる²。後囊破損は比較的によくみられる白内障手術の合併症であり、発生率は約0.5～4.7%³⁻⁴で、嚢胞様黄斑浮腫⁵⁻⁶、眼内炎⁷⁻⁸、重度の炎症や裂孔原性網膜剥離を引き起こす可能性がある。この合併症は、硝子体落下水晶体片のために追加の外科的介入を必要とする。後囊破損のかなりの割合（59.6%）が乳化吸引術中に起こると報告されている⁹。

偶発的な後囊破損を防ぐためには、フェイコマシーンの設定や流体力学を含む超音波乳化吸引術の基本を十分に理解することが不可欠である¹⁰⁻¹¹。フェイコマシーンの設定は手術の安全性と術後視力に大きく影響する¹²。超音波乳化吸引術中の前房の維持にはさまざまな要因が関わっているが、前房内への流体の流入と流出のバランスを意味するフルイディクスを調節する必要がある。流入液は灌流ボトルからプラスチックチューブを通してハンドピースに流れ、前房に流入する。流入液の量は強制的に一定の圧力で流入を行うアクティブフルイディクスを利用するフェイコマシーンも存在するが、多くはボトルの高さに基づき流入量を調整するグラヴィティフルイディクスによって適切な前房圧（Anterior Chamber Pressure: ACP）になるように維持している¹³⁻¹⁴。流出液はハンドピースに吸引され、プラスチックチューブを通してフェイコマシーンに戻される。流出液の量はポンプが作り出す吸引圧によって調節されるが、ポンプはベンチュリーポンプとペリスタルティックポンプに分類される。ベンチュリーポンプはハンドピースのチップ閉塞に関係なく一定の吸引圧を維持する¹⁵が、ペリスタルティックポンプはチップを閉塞することで吸引圧が掛かるようになる¹⁶。流出液の量は、ハンドピースチップの直径にも影響される¹⁶。これらの流入液と流出液のバランスによって術中のACPは維持される¹¹。しかし、ACPの安定性について述べた実験報告は少ない。従来の方法では人眼のACPをリアルタイムで測定するためには測定器を直接眼内に挿入する必要がある、非侵襲的に簡便にACPを測定するデバイスの開発が必要とされている。

【目的】

本研究では非侵襲的に前房内圧の測定を可能とする内圧測定機能を有した新たなチューブチャンバーシステムを考案し、様々なフェイコマシーン設定におけるチャンバー内圧と前房内圧との相関関係を調べた。さらに後嚢破損を生じる際の前房内圧を測定し、安全なフェイコマシーン設定値に関して検討した。

【方法】

(1) 方法と解析

試料

この研究では、ベンチュリーポンプモードの WHITESTAR SIGNATURE PRO 超音波乳化吸引システム (Johnson & Johnson Surgical Vision, Santa Ana, CA, USA) と圧力センサー (AP-V80; KEYENCE, Tokyo, Japan) およびデータレコーダー (NR-600; KEYENCE, Tokyo, Japan) を使用した。圧力センサーとテストチャンバー (DUAL PUMP PACK (OPO73), Johnson & Johnson Surgical Vision, Santa Ana, CA, USA) を組み合わせて、圧力測定用チャンバーを作成した。実験毎に超音波乳化吸引システムのカセットと灌流ボトルを交換した。豚眼、圧力センサー、超音波針の先端の高さは、過去の報告¹⁷⁾と同様に、地面から 85cm とした。

チャンバー内圧と ACP 測定アッセイ

20 ゲージ (黄色スリーブ) と 21 ゲージ (オレンジスリーブ) のストレートチップを、圧力測定用チャンバーにセットし実験を行った。リニアモードで吸引開始後 10 秒から 20 秒間のチャンバー内圧を測定した。20 ゲージでは吸引圧 200mmHg と 150mmHg、21 ゲージでは吸引圧 300mmHg と 250mmHg の計 4 群で測定を行った。チャンバー内圧は、非閉塞吸引時の内圧が 5~25mmHg の間はボトルの高さ 10cm 間隔で測定し、非閉塞吸引時の内圧が約 0mmHg の間は 1cm 間隔で測定した。各実験を 4 回繰り返し、平均値を算出した。

ACP の測定には豚眼を使用した。豚眼は地元の屠殺場 (広島ミートマーケット株式会社、広島、日本) から入手した。超音波乳化吸引術は上方 2.4mm の角膜切開を行い、その後連続環状嚢切開、ハイドロダイセクション、水晶体核切除を行った。虹彩の接触を防ぐため、下方の周辺部角膜に 0.9mm の角膜切開を行い圧力センサーを固定した。超音波チップには、黄色スリーブ付き 20 ゲージストレートチップとオレンジスリーブ付き 21 ゲージストレートチップを使用した。ACP は、ボトルの高さを 80cm から 10cm に下げ、吸引圧を 20 ゲージチップでは 200mmHg と 150mmHg、21 ゲージチップで 300mmHg と 250mmHg の計 4 群で、リニアモードで吸引開始 10 秒後から 10 秒間測定した。各実験を 2 匹の豚眼で繰り返し、平均値を算出した。

後嚢接触アッセイ

豚眼は前述のように処理した。超音波チップは黄色スリーブ付き 20 ゲージと 21 ゲージのストレートチップを使用した。超音波チップの先端は虹彩の高さに位置させ、20 ゲージチップでは吸引圧 200mmHg と 150mmHg、21 ゲージチップでは 300mmHg と 250mmHg で、リニアモードで 30 秒間吸引を行った。ボトルの高さを 5cm ずつ下げ、後嚢が誤ってチップに接触した高さを記録した。各実験は 10 匹の豚眼を用いて 10 回繰り返した。

後嚢接触を生じないチャンバー内圧指標値の算出

チャンバー内圧と ACP 測定アッセイおよび後嚢接触アッセイでそれぞれ得られたチャンバー内圧および推定前房内圧、ボトルの高さの近似式から、後嚢接触を生じると推定されるチャンバー内圧を算出した。

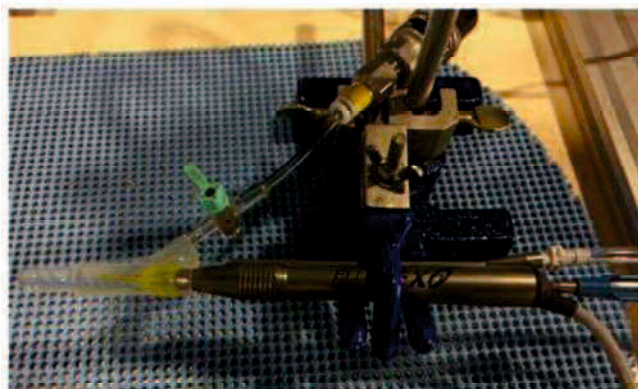
《結果》

チャンバー内圧と ACP 測定アッセイ

新たに考案したチューブチャンバーシステムを用いて、様々なフェイコマシーン設定における非閉塞吸引状態でのチャンバー内圧を測定した（図 1A）。チャンバー内圧は、20 ゲージチップで 200mmHg（図 1B）、20 ゲージチップで 150mmHg（図 1C）、21 ゲージチップで 300mmHg（図 1D）、21 ゲージチップで 250mmHg（図 1E）の吸引圧で記録した。20 ゲージチップを用いた吸引圧 200mmHg と 150mmHg では、どちらも同様にボトル高に比例してチャンバー内圧が変化した（図 1B、1C）。同様に、21 ゲージチップを用いた吸引圧 300mmHg と 250mmHg でも、同様にボトル高に比例してチャンバー内圧が変化した（図 1D、1E）。

ACP 測定アッセイでは豚眼と圧力センサーを用いて、様々なフェイコマシーン設定における非閉塞吸引状態での ACP を測定した（図 2）。ACP は、20 ゲージチップで 200mmHg（図 2A）、20 ゲージチップで 150mmHg（図 2B）、21 ゲージチップで 300mmHg（図 2C）、21 ゲージチップで 250mmHg（図 2D）の吸引圧で記録した。20 ゲージチップで吸引圧 200mmHg と 150mmHg では、どちらも同様にボトル高に比例して ACP が変化した（図 2A、B）。同様に、21 ゲージチップを用いた吸引圧 300mmHg と 250mmHg でも、同様にボトル高に比例して ACP が変化した。（図 2C、2D）。

Fig.1 A



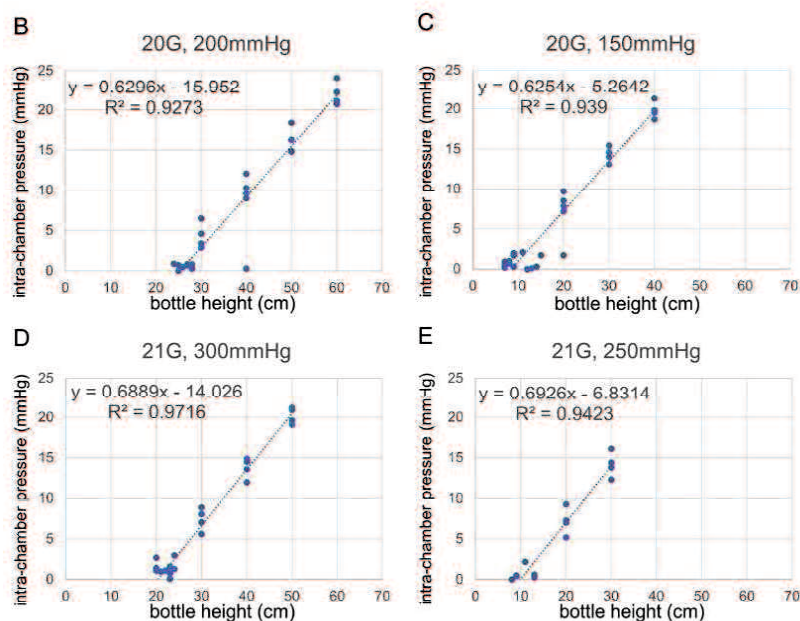


図 1.チューブチャンバーシステムを用いた様々なフェイコマシーン設定におけるチャンバー内圧の変化

A: 新たに考案したチューブチャンバーシステムを用いて、リニアモードで吸引を開始してから 10 秒後から 20 秒間、様々な設定を行った非閉塞吸引状態での平均チャンバー内圧を測定した。チャンバー内圧は、非閉塞吸引時の内圧が 5~25mmHg の間はボトルの高さ 10cm 間隔で測定し、非閉塞吸引時の内圧が約 0mmHg の間は 1cm 間隔で測定した。各実験は 4 回繰り返した。

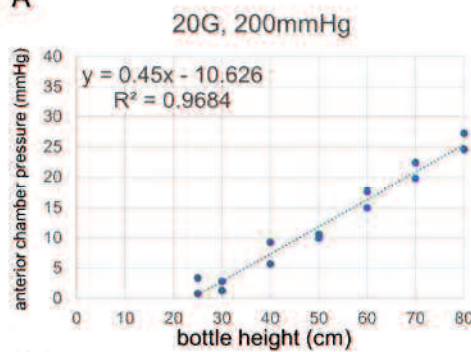
B: 20 ゲージチップを用いた吸引圧 200mmHg でのチャンバー内圧の分布は直線的で、近似直線 ($y=0.6296 \times -15.952$, $R^2=0.9273$) で表すことができた。

C: 20 ゲージチップを用いた吸引圧 150 mm Hg でのチャンバー内圧の分布は直線的で、近似直線($y=0.6254 \times -5.2642$, $R^2=0.939$)で表すことができた。

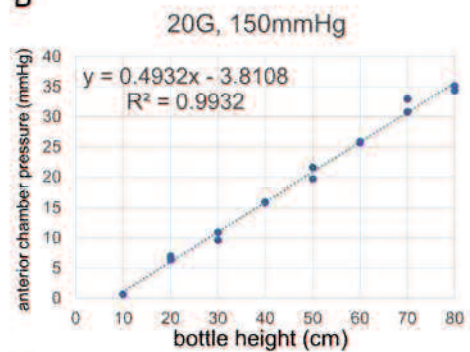
D: 21 ゲージチップを用いた吸引圧 300 mm Hg でのチャンバー内圧の分布は直線的で、近似直線($y=0.6889 \times -14.026$, $R^2=0.9716$)で表すことができた。

E: 21 ゲージチップを用いた吸引圧 250mmHg でのチャンバー内圧の分布は直線的で、近似直線($y=0.6926 \times -6.8314$, $R^2=0.9423$)で表すことができた。

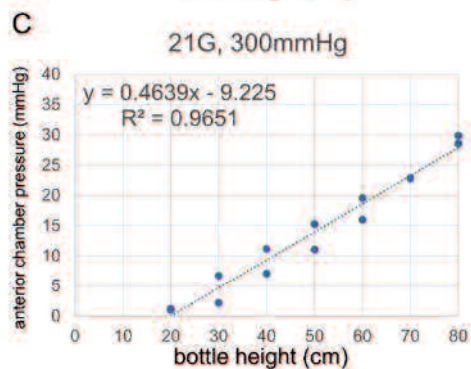
Fig.2 A



B



C



D

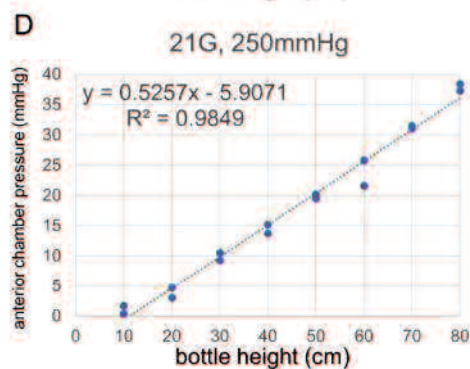


図2 豚眼を用いた様々なフェイコマシーン設定における ACP の変化

豚眼を用いて、リニアモードで吸引を開始してから 10 秒後からの 10 秒間、様々なフェイコマシーン設定による非閉塞吸引状態での平均 ACP を測定した。ACP は、80cm から 10cm のボトルの高さ間隔で測定した。各実験は 2 匹の豚眼で重複して行った。

A: 20 ゲージチップを用いた吸引圧 200 mmHg での ACP の分布は直線的で、近似直線 ($y=0.45 \times -10.626$, $R^2=0.9684$) で表すことができた。

B: 20 ゲージチップを用いた吸引圧 150 mmHg での ACP の分布は直線的で、近似直線 ($y=0.4932 \times -3.8108$, $R^2=0.9932$) で表すことができた。

C: 21 ゲージチップを用いた吸引圧 300mmHg での ACP の分布は直線的で、近似直線 ($y=0.4639 \times -9.225$, $R^2=0.9651$) で表すことができた。

D: 21 ゲージチップを用いた吸引圧 250mmHg での ACP の分布は直線的で、近似直線 ($y=0.5257 \times -5.9071$, $R^2=0.9849$) で表すことができた。ACP: 前房圧。

後囊接触アッセイ

後囊を誤って吸引してしまうフェイコマシーン設定を特定するために、20 ゲージのチップでは吸引圧 200mmHg と 150mmHg で、21 ゲージチップでは 300mmHg と 250mmHg で、チップ先端が後囊に接触した高さを測定した (図 3B、3C)。20 ゲージチップは、吸引圧 200mmHg で 57.5 ± 12.6 cm、吸引圧 150mmHg で 35.0 ± 10.0 cm のボトルの高さで後囊に接触した (図 3B)。一方、21 ゲージチップでは、吸引圧 300mmHg で

47.5±12.6cm、吸引圧 250mmHg のボトルの高さで後嚢に接触した（図 3C）。

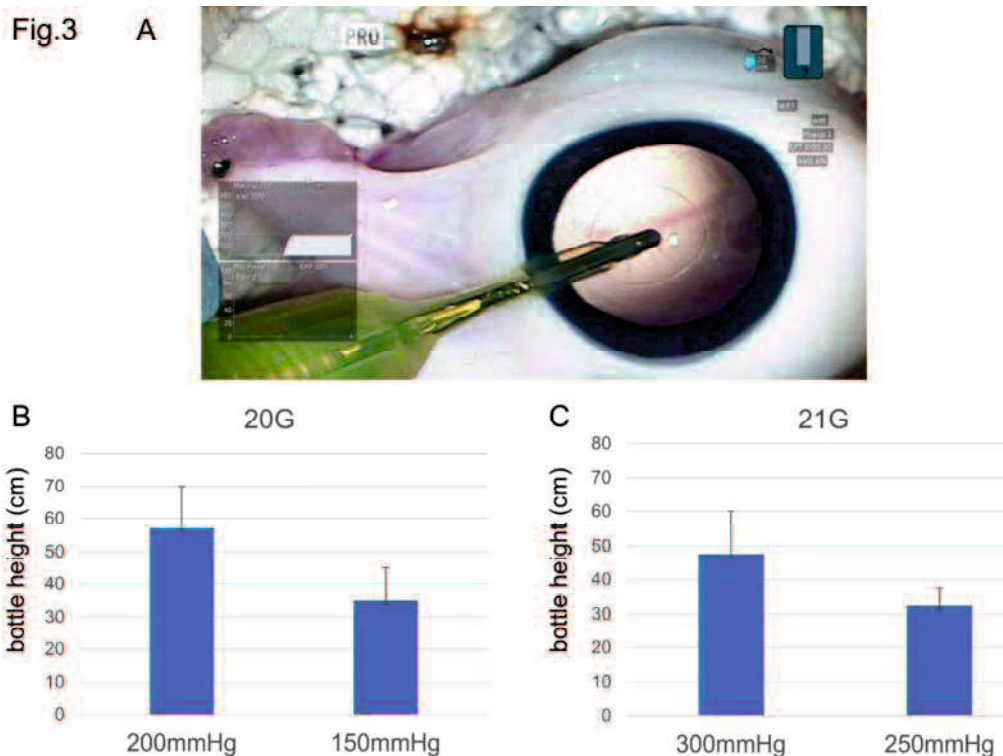


図 3 後嚢がチップ先端に接触したボトル高

豚眼を用いて、チップ先端を虹彩の高さに保持しリニアモードで 30 秒間、様々なフェイコマシーン設定で吸引を行った。ボトルの高さを 5cm 間隔で下げ、後嚢が誤ってチップに接触したボトルの高さを記録した。

A：チップを後嚢に接触させると、後嚢に皺の形成を確認された。

B：20 ゲージチップで吸引圧 200mmHg および 150mmHg における後嚢に接触した際のボトル高さを、10 回の独立した実験による平均値+SDn で示した。

C：21 ゲージチップで吸引圧 300mmHg および 250mmHg における後嚢に接触した際のボトル高さを、10 回の独立した実験による平均+SD として示した。

後嚢接触を生じないチャンバー内圧指標値の算出

本研究では、誤った後嚢接触を生じないチャンバー内圧の指標値をまとめた（表 1）。

Setting for phaco machine	Bottle height (cm)	Intrachamber pressure (mm Hg)
200 mm Hg with the 20-gauge tip	57.5±12.6	20.2±7.9
150 mm Hg with the 20-gauge tip	35.0±10.0	16.6±6.3
300 mm Hg with the 21-gauge tip	47.5±12.6	18.7±8.7
250 mm Hg with the 21-gauge tip	32.5±5.0	15.7±3.5

それぞれの近似直線（図 2）と後嚢接触アッセイで算出したボトル高（図 3）から、誤った後嚢接触を生じないチャンバー内圧を算出した。

《考察》

超音波乳化吸引術における安全性の確認と前房の不安定性の改善を目的として、内圧測定が可能なチューブチャンバーシステムを構築した。このチューブチャンバーシステムを用いて、ベンチュリーポンプモードの超音波乳化吸引システムにおける後嚢接触を生じないチャンバー内圧を算出した。また、豚眼との比較によりチューブチャンバーシステムの特性を確認した。

前房内圧は以下の方程式によって求めることができる： $\text{pressure (mm Hg)} = \text{bottle height (cm)} \times 10/13.6$ （水銀と水の密度は 13.6 g/cm^3 と 1 g/cm^3 である）¹³。したがって、グラヴィティフルイディスクによる流入量の調整においてチップ先端が閉塞状態している場合、前房内圧はボトルの高さに比例する。本研究では、チップ先端が非閉塞状態における内圧をチューブチャンバーおよび豚眼を用いて測定したが、内圧とボトルの高さは比例関係を示した（図 1、2）。しかし同様の条件下では、チャンバー内圧の変化率は、豚眼を用いた前房内圧の変化率よりも大きかった。これは、チャンバーの材質がブタ眼に比べて硬いためと考えられる。

チャンバー内圧測定アッセイでは、ボトルの高さによるチャンバー内圧の変化率は吸引圧に関係なく一定であった（図 1）。しかし、豚眼を用いた ACP アッセイでは、吸引圧が高くなるにつれて ACP の変化率が低下した（図 2）。体積流量は以下の式で計算した：体積流量＝断面積×平均流速¹⁸。吸引によるブタ前房の容積減少（断面ベクトル積の減少）は、体積流速を維持するために流速を増加させると考えた。その結果、圧力はベルヌーイの原理¹⁹に従って流速の増加とともに減少すると推定された。

ヒト角膜は豚眼よりも硬く、弾力性に乏しい²⁰。このチューブチャンバーシステムはブタ眼球よりも硬い可能性があるため、ヒト眼球に近い ACP の変化を示す可能性がある。したがって、このチャンバーシステムとヒト眼球の違いを理解するためには、剛性に関するさらなる研究が必要である。

本研究では、非閉塞吸引状態におけるチャンバー内圧および前房内圧を評価した。しかし実際の臨床では、超音波乳化吸引術中に水晶体核によるチップの閉塞状態と非閉塞状態が断続的に起こる。Khng らは水晶体核除去中の ACP の変動は $25.7 \sim 41.7 \text{ mmHg}$ 、平均 ACP は $39.9 \sim 94.3 \text{ mmHg}$ 、最大眼圧は $66.1 \sim 196.6 \text{ mmHg}$ であったと報告している¹³。Kreutzer らは、水晶体核除去中の平均 ACP は $36.5 \sim 40.1 \text{ mmHg}$ であったと報告し²¹、Zhao らは最大眼圧が $52 \sim 74 \text{ mmHg}$ であったと報告している²²。しかしながら、水晶体核除去中の断続的な閉塞/非閉塞状態を模倣するシステムを構築することは困難であることと、非閉塞状態での前房内圧に限った報告はない。偶発的な後嚢破損が生じるのは非閉塞吸引状態であるため、このチャンバーシステムを用いて非閉塞吸引状態での目標内圧を測定することは臨床的な意義が高いと考える。

超音波乳化吸引術において吸引圧を調節するポンプはベンチュリーポンプとペリスタルティックポンプの 2 種類に分類される。ベンチュリーポンプで行った超音波乳化吸引術では、ペリスタルティックポンプに比べて灌流液の使用量、手術時間、超音波エネルギーが

少なかったと報告されており、より効率的なシステムである²³。その一方で、チップ先端の閉塞に関わらず一定の吸引圧が生じるため、前房の安定性やサージによる偶発的な後嚢破損が生じやすいなどの問題がある²⁴。既報で同様のチューブチャンバーを用いたペリスタルティックポンプにおける前房安定性に関する報告はあるが²⁵、ベンチュリーポンプに関する報告はない。本研究では、独自のチューブチャンバーと豚眼を用いて、ベンチュリーポンプにおける安全な ACP とボトルの高さの関係を明らかにした。また、後嚢破損モデルを想定した後嚢接触アッセイを行い（図 3）、前房安定性を維持できる手術設定（表 1）を示した。このチャンバーシステムを用いた安全な手術設定は、前房の不安定性や偶発的な後嚢破損が生じやすいといったベンチュリーポンプの欠点を克服できる可能性がある。

この研究の限界は、サンプルサイズが大きいこと、前房深度や水晶体の厚み、後房圧、閉塞後のサージなど、前房の安定性に寄与するさまざまな因子が研究に含まれていないことである。これらの因子の役割を明らかにするためには、より多くのサンプルを用いたさらなる研究が必要である。

《結語》

本研究では非侵襲的に前房内圧の測定を可能とする内圧測定機能を有した新たなチューブチャンバーシステムを考案し、様々なフェイコマシーン設定におけるチャンバー内圧と前房内圧との相関関係を検討したものである。本チューブチャンバーは豚眼よりも吸引圧による変化の影響を受けにくいという特徴を有していた。チャンバー内圧および豚眼における前房内圧の検討では、非閉塞吸引状態でフェイコマシーンでは一貫して内圧はボトル高と比例関係を示した。後嚢接触アッセイおよびチャンバー内圧とボトル高との関連から、偶発的な後嚢破損を生じないような前房安定性を維持できる手術設定の推奨値を明らかにした。このチャンバーシステムの特性と適切な使用法を十分に理解することで、フェイコマシーンの設定のばらつきによる前房の不安定性を解消できる可能性がある。

《謝辞》

本研究にあたって、指導教官としてご指導を頂いた山口大学大学院医学系研究科眼科学講座教授 木村和博先生、実験にご協力頂いた同講座技術補佐員 水野由香里氏、片岡彩加氏に対して、ここに深謝の意を表する。

《関連論文との関係性》

本研究は、著者執筆の関連論文（A new tube chamber system for evaluation of anterior chamber pressure during phacoemulsification tested in porcine eyes）に基づいて、非侵襲的に前房内圧の測定を可能とする内圧測定機能を有した新たなチューブチャンバーシステムを考案し、後嚢破損を生じない前房内圧を保つことができるフェイコマシーン設定に関して検討したものである。

《参考文献》

- 1 Chen X, Xu J, Chen X, Yao K. Cataract: advances in surgery and whether surgery remains the only treatment in future. *Adv Ophthalmol Pract Res* 2021;1(1):100008.
- 2 Goel R, Shah S, Malik KPS, Sontakke R, Golhait P, Gaonker T. Complications of manual small-incision cataract surgery. *Indian J Ophthalmol* 2022;70(11):3803-3811.
- 3 Oladigbolu KK, Bunce C, Raji LA, Abah ER, Umar MM, Buchan JC. Visual outcome following posterior capsule rupture during manual small incision cataract surgery. *Niger J Clin Pract* 2021;24(6):948-953.
- 4 Miller DC, Christopher KL, Patnaik JL, Lynch AM, Seibold LK, Mandava N, Taravella MJ. Posterior capsule rupture during cataract surgery in eyes receiving intravitreal anti-VEGF injections. *Curr Eye Res* 2021;46(2):179-184.
- 5 Holló G, Aung T, Cantor LB, Aihara M. Cystoid macular edema related to cataract surgery and topical prostaglandin analogs: Mechanism, diagnosis, and management. *Surv Ophthalmol* 2020;65(5):496-512.
- 6 Ahmadyar G, Carlson JJ, Kimura A, Alobaidi A, Hallak J, Hansen RN. Real-world treatment patterns and economic burden of post-cataract macular edema. *BMC Ophthalmol* 2023;23(1):380.
- 7 Shi SL, Yu XN, Cui YL, Zheng SF, Shentu XC. Incidence of endophthalmitis after phacoemulsification cataract surgery: a Meta-analysis. *Int J Ophthalmol* 2022;15(2):327-335.
- 8 Sun JJ, Guo Z, Li HL, Yang BX, Wu XM. Acute infectious endophthalmitis after cataract surgery: epidemiological characteristics, risk factors and incidence trends, 2008-2019. *Infect Drug Resist* 2021;14:1231-1238.
- 9 Ti SE, Yang YN, Lang SS, Chee SP. A 5-year audit of cataract surgery outcomes after posterior capsule rupture and risk factors affecting visual acuity. *Am J Ophthalmol* 2014;157(1):180-185.e1.
- 10 Sun YX, Cao R, Liu ZY, Xia HQ, Cen YJ, Gao L, Shi DD. Comparisons of the energy efficiency and intraocular safety of two torsional phacoemulsification tips. *BMC Ophthalmol* 2022;22(1):392.
- 11 Geng WJ, Lin WL, Song P, Zhang M, Wu J, Su S, Yuan YR, Ji M, Guan HJ. Effect of anterior chamber instability during phacoemulsification combined with intraocular lens implantation. *J Ophthalmol* 2022;2022:2848565.
- 12 Boulter T, Bernhisel A, Mamalis C, Zaugg B, Barlow WR, Olson RJ, Pettet JH. Phacoemulsification in review: Optimization of cataract removal in an in vitro

- setting. *Surv Ophthalmol* 2019;64(6):868-875.
- 13 Khng C, Packer M, Fine IH, Hoffman RS, Moreira FB. Intraocular pressure during phacoemulsification. *J Cataract Refract Surg* 2006;32(2):301-308.
 - 14 Luo Y, Li HY, Chen WQ, Gao Y, Ma TJ, Ye Z, Li ZH. A prospective randomized clinical trial of active-fluidics versus gravity-fluidics system in phacoemulsification for age-related cataract (AGSPC). *Ann Med* 2022;54(1):1977-1987.
 - 15 Bu JJ, Chung J, Afshari NA. Efficient use of ultrasound in cataract surgery. *Curr Opin Ophthalmol* 2021;33(1):41-46.
 - 16 Farukhi AM, Stagg BC, Ronquillo C, Barlow WR, Pettey JH, Olson RJ. Effect of phaco tip diameter on efficiency and chatter. *J Cataract Refract Surg* 2014;40(5):811-817.
 - 17 Suzuki H, Oki K, Shiwa T, Oharazawa H, Takahashi H. Effect of bottle height on the corneal endothelium during phacoemulsification. *J Cataract Refract Surg* 2009;35(11):2014-2017.
 - 18 Katamay R, Fleischlin C, Gugleta K, Flammer J, Orgül S. Volumetric blood flow measurement in the ophthalmic artery using colour Doppler. *Klin Monbl Augenheilkd* 2009;226(4):249-253.
 - 19 Franklin WS, Deimel RF. Pressure energy in an incompressible fluid and Bernoulli's principle. *Science* 1925;62(1609):397..
 - 20 Zeng Y, Yang J, Huang K, Lee Z, Lee X. A comparison of biomechanical properties between human and porcine cornea. *J Biomech* 2001;34(4):533-537.
 - 21 Kreutzer TC, Al Saeidi R, Kampik A, Grueterich M. Real-time intraocular pressure measurement in standard and microcoaxial phacoemulsification. *J Cataract Refract Surg* 2010;36(1):53-57.
 - 22 Zhao YE, Li XY, Tao AZ, Wang JH, Lu F. Intraocular pressure and calculated diastolic ocular perfusion pressure during three simulated steps of phacoemulsification in vivo. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 2009;50(6):2927-2931.
 - 23 Hida WT, de Medeiros AL, de Araújo Rolim AG, Motta AFP, Kniggenndorf DV, de Queiroz RLF, Chaves MAPD, Carricondo PC, Nakano CT, Nosé W. Prospective randomized comparative study between venturi and peristaltic pumps in WhiteStar Signature® phacoemulsification machine. *Clin Ophthalmol* 2018;13:49-52.
 - 24 Georgescu D, Payne M, Olson RJ. Objective measurement of postocclusion surge during phacoemulsification in human eye-bank eyes. *Am J Ophthalmol* 2007;143(3):437-440.

- 25 Nicoli CM, Dimalanta R, Miller KM. Experimental anterior chamber maintenance in active versus passive phacoemulsification fluidics systems. *J Cataract Refract Surg* 2016;42(1):157-162.