

原著論文

在宅・災害時での利用を想定した嚥下調整食の粘度評価システム
：MEMS センサーと直線往復運動機構による新しいアプローチ

松尾 小百合¹⁾, 黒瀬 雅之²⁾

A Novel Approach for Viscosity Assessment System of Dysphagia-friendly foods for
Home and Disaster Settings:

Utilizing a MEMS Sensor and Linear Reciprocating Motion Mechanism

Sayuri Matsuo¹⁾, Masayuki Kurose²⁾

- 1) 岩手医科大学歯学部 口腔保健育成学講座 小児歯科学・障害者歯科学分野
- 2) 岩手医科大学歯学部 生理学講座 病態生理学分野
- 1) Division of Pediatric and Special Care Dentistry, Department of Developmental Oral Health Science, School of Dentistry, Iwate Medical University
- 2) Department of Physiology, School of Dentistry, Iwate Medical University
- 1) 岩手県盛岡市内丸 19-1
- 2) 岩手県紫波郡矢巾町医大通 1-1-1

指導者：岩手医科大学歯学部 生理学講座 病態生理学分野 教授 黒瀬 雅之

代表著者：黒瀬 雅之 岩手県紫波郡矢巾町医大通 1-1-1 kurose@iwate-med.ac.jp

ランニングタイトル：6軸センサーとモーメントを用いた簡易粘度計

Runing Title: Portable Viscometer Utilizing 6-Axis Force-Moment

Abstract

With the rapid aging of the population and the promotion of integrated community care, effective management of dysphagia in home-care settings has become increasingly important. Although thickened foods are widely used to reduce aspiration risk, viscosity assessment remains qualitative and insufficiently standardized. Moreover, conventional viscometers are bulky and expensive, limiting their use in home care.

This study aimed to develop a miniature, portable viscometer integrating a MEMS-based six-axis force sensor with a linear reciprocating mechanism and to evaluate its accuracy. The prototype was validated against a standard cone-plate viscometer using Newtonian and non-Newtonian fluids, including xanthan gum solutions and thixotropic food samples. Correlation with the reference viscometer, measurement stability, and hardware effects were assessed.

Among the measured parameters, the rotational moment around the x-axis (M_x) showed a strong correlation with the reference viscometer ($R^2 > 0.97$) across all tested fluids. M_x also exhibited the largest output magnitude, indicating efficient detection of viscous resistance during reciprocating motion.

Measurement stability was highest at low speeds, and the standard head geometry provided the greatest sensitivity.

The developed portable six-axis viscometer enables objective viscosity assessment with accuracy comparable to conventional viscometers and supports standardized evaluation in home care.

Key words: viscometer, viscosity, thickening agent, dysphagia, rheology

抄録

急速な高齢化と地域包括ケアの推進に伴い、在宅での嚥下障害ケアの重要性が高まっている。摂食嚥下障害者の誤嚥リスク軽減のため、とろみ調整食が広く用いられるが、その粘度評価は依然として定性的であり、標準化が進んでいない。

本研究では、この課題を解決するため、小型の MEMS 6 軸力覚センサーと直線往復運動機構を組み合わせた小型・ポータブルな粘度計を開発し、その計測精度と有用性を検証することを目的とした。

開発した試作粘度計の計測精度を検証するため、ニュートン流体（グリセリン水溶液）および非ニュートン流体（キサントガム系水溶液、チキソトロピー性食品）を対象とし、コーンプレート型回転式粘度計の測定値との相関性、測定安定性、およびハードウェア条件（検出ヘッドの移動速度・形状）の影響を検討した。

試作粘度計の多軸出力のうち、特に回転モーメント出力 (M_x) は、ニュートン流体および非ニュートン流体において、コーンプレート型回転式粘度計の測定値と極めて高い相関関係 ($R^2 > 0.97$) を示した。 M_x は、他の高相関成分と比較しても最も高い出力値（感度）を示し、往復運動による流体の粘性抵抗を効率的に捉えることが示唆された。測定安定性の検証では、低速域（1.5 Hz-2.0 Hz）で最もばらつきが小さく、高い安定性が確認された。また、検出ヘッドの形状は出力値に影響を及ぼし、標準型となるオール型が最も高い感度を示すことが明らかになった。

開発した小型の 6 軸力覚センサー搭載粘度計は、既存の精密粘度計に匹敵す

る精度で粘度を客観的かつ定量的に評価できる。本装置は、小型かつポータブルな特性から、在宅・小規模施設・災害時などにおける粘度評価を標準化し、安全で一貫した嚥下ケアの提供に貢献する可能性を秘めている。

キーワード：粘度計 粘度 とろみ調整食品 嚥下障害 レオロジー

緒言

急速な高齢化が進む現代社会において、嚥下障害は誤嚥性肺炎などの重篤な合併症を引き起こすリスクがあることから、主要な健康課題の一つとなっている¹⁻²⁾。嚥下障害を持つ患者のケアにおいて、水分や食物に適切なとろみをつけることは、口から食道への食塊の通過時間を遅延させることから³⁻⁴⁾、誤嚥のリスク軽減のために不可欠とされてきた⁵⁻⁶⁾。このため、とろみ付け粉末を溶解しての使用が一般的であるが、従来の食品テクスチャ分類は非標準的であり、その曖昧な定義が患者の安全に悪影響を及ぼす可能性が指摘されている⁷⁾。

この課題に対応するため、本邦では2021年に日本摂食嚥下リハビリテーション学会嚥下調整食分類2021が規程され、嚥下障害患者に対する食事形態の国内基準として広く用いられている。本分類では、とろみの評価に従来から用いられてきたコーンプレート型回転式粘度計に加えて、現場で実施可能な簡易測定法として Line Spread Test (LST) および シリンジテスト (IDDSI Flow Test) が取り入れられた⁸⁻¹⁰⁾。しかし、コーンプレート型回転式粘度計は装置が大型で高価であり、操作も煩雑で測定に時間を要するため、病院や介護施設、在宅などの食事提供現場に日常的に配置して使用することは困難である。また、LSTは溶媒やとろみ調整食品の種類に大きく影響を受け、特に油脂を含む溶媒では評価が難しいとされる¹¹⁻¹²⁾。一方、シリンジテストは飲料やソース、栄養補助食品など幅広い液体に適応可能であるが、150 mPa·s以上の試料では、ずり速度の低下により実際の粘度との乖離が生じる。このように、広く知られている評価方法であっても、それぞれ適応範囲や再現性に限界がある¹³⁻¹⁴⁾。そのため現場では依然として主観的評価（官能評価）に依存することが多く、とろみによる嚥下機能改善効果や誤嚥性肺炎予防のエビデンスが十分に確立されていな

い要因の一つとなっている^{7,15)}。

国外においても、嚥下調整食の標準化を目的として、IDDSI (International Dysphagia Diet Standardisation Initiative) フレームワークが開発されている²⁾。しかし、IDDSI フレームワークが推奨する測定方法は、主にベッドサイドでの簡易的な評価を目的としており、その性質上、定性的かつ主観的な側面が強く、食品産業の品質管理に求められる客観性や定量性には依然として課題が残っている。また、嚥下障害を持つ患者のケアで用いられるキサントガム系をはじめとする増粘剤は、せん断速度・温度・時間によって粘度が変動する非ニュートン流体であり、とろみ付けされた液体が調理直後と摂取時で異なる粘度特性を持つことは、患者の安全性を損なう要因となっている¹⁶⁾。このような背景から、在宅ケアや臨床現場で簡便かつ客観的に粘度を測定できる小型デバイスの開発が強く求められている。

近年、これらの課題を解決するため、様々な小型粘度計が開発されてきた¹⁷⁻
¹⁹⁾。例えば、DC モーターをアクチュエーターおよびセンサーとして利用したハンドヘルド型回転式粘度計¹⁷⁾や、小型粘度計に応用可能な基礎技術として、水晶振動子マイクロバランス (QCM) を用いた微量粘度計¹⁸⁾が提案されてきた。しかし、これらのデバイスは計測原理の複雑さや高コスト、非ニュートン流体に対する十分な評価能力の不足といった課題を抱えており、在宅や介護現場で誰もが簡便かつ客観的に使用できるデバイスとは言えない。そこで、直流モーターとローターを直接結合させ、モーターにかかるトルクから粘度を検出するマドラー型の簡易粘度測定機器が開発され¹⁹⁾、高精度且つ低コストとして市場展開されているが十分に浸透しているとは言えない。

本研究は、これまでの先行開発研究で明らかになった課題である、簡便性と客観性の不足そして複雑な流動特性への対応の困難さの解決を目指し、小型かつ簡便な粘度計開発に着手した。従来の簡易的粘度計測では、主として一方向の抵抗力のみを計測値としてきたが、非ニュートン流体の持つ複雑な流動特性を詳細に把握するには、単一の物理量では十分な情報量を提供できない。そこで、本研究では、従来の計測原理を一新し、多軸方向の物理量を計測できる MEMS チップを使用した小型 6 軸力覚センサーをシステムの核として採用した。このシステムは、流体内で感圧ヘッドが直線往復運動を行う際、流体から受ける抵抗は、感圧ヘッドの進行方向の抗力に留まらず、流体の粘性抵抗や不均一な流動挙動に伴う微細な回転モーメントとしても現れるという仮説に基づいている。流体内で感圧ヘッドに作用する多軸方向の力およびモーメントを検出することで、単軸測定では不足した情報を補完し、流体の粘性抵抗をより詳細に評価することが可能であると想定される。本論文では、この仮説のもと、開発した粘度計を用いて、ニュートン流体と非ニュートン流体を対象に、コーンプレート型回転式粘度計との比較検証を行った結果を報告する。

材料と方法

1. MEMS 6 軸力覚センサーを組み込んだ小型粘度計

1.1 従来の粘度測定法の課題

粘度測定は、JIS 規格より、細管粘度計・落球粘度計・回転式粘度計・振動粘度計が定められている。特に、食品に代表される非ニュートン流体の粘度測定には、ずり速度（せん断速度）の制御が可能なコーンプレート型回転式粘度計

が広く用いられてきた。この装置は、円錐状のコーンローターと平板状のプレートの上に試料を充填し、コーンローターを回転させて生じるせん断応力とずり速度から粘度を算出する。高い測定精度を持つ一方、その複雑な構造から、小型化や簡便化には技術的な制約がある。

1.2 試作装置の構成

本研究で開発した装置は、直流モーター（Gearmotor HP 6V 75:1, Las Vegas, USA）の回転運動を直線往復運動に変換する機構部（アクチュエーター）を備え、この直線運動によって検出ヘッドを流体内で往復移動させる（図 1-A）。検出ヘッドに作用する流体からの抗力は、MEMS 技術を用いた小型 6 軸力覚センサー（S02C1-WM155-K1-P4I, Touchence, 横浜市, 神奈川）によって検出される²⁰⁻²¹。採用したセンサーは、9 x 9 x 3 mm と非常に小型である。検出ヘッドの往復運動時に流体から受ける 6 軸方向の力 (F_x, F_y, F_z) およびモーメント (M_x, M_y, M_z) をセンサーで検出し、これらの出力値から流体の粘度と高い相関性を持つ特性値を算出する。測定時には、検出部カバーを流体容器の底面に接触させることで、流体の量・流動経路・浸漬深さによる測定値のばらつきを抑制し、高い再現性を確保した（図 1-B）。

1.3 粘度検出メカニズム

従来の粘度計が回転トルクや流下時間といった単一の物理量を測定するのに対し、本装置の核となる小型 6 軸力覚センサーは、三次元空間における力とモーメントを同時に、かつ高感度に検出することが可能である。粘性流体中を物体が移動する際、流体の粘度・物体の形状および移動速度に依存する抵抗力（抗力）とモーメントが発生する。本装置では、検出ヘッドの往復運動方向を x

軸と設定し、流体からの抵抗を6軸で検出する。本研究では、単一の力だけでなく、6軸の力およびモーメントを同時に取得することで、非ニュートン流体特有のせん断速度依存性や、流体の不均一性といったより複雑なレオロジー特性を捉えることを意図した。

1.4 電気回路構成とデータ処理

本研究で開発した装置の電気回路構成を図2に示す。本装置は、外部から供給される直流電源でモーターを駆動し、検出ヘッドの往復運動を行う。6軸力覚センサーからのアナログ出力信号は、制御基板に搭載されたマイクロコントローラによりデジタル信号に変換され、USBケーブルを介して外部のパーソナルコンピュータ（PC）に出力される。PC上では専用のグラフィカルユーザーインターフェース（GUI）ソフトウェアを用いて、センサーの出力値をリアルタイムで記録する。センサーからの出力は100 HzのCSVデータとしてPCに保存される。データ解析には、解析ソフトウェア（Spike 2 ver.10.0, CED, Cambridge, UK）を off-line mode で使用し、CSVデータをインポートした後、測定開始10秒後から30秒後までの20秒間の波形を抽出した。この抽出された波形データから各軸の連続20ストロークの peak to peak 値を検出し、その平均値を分析に使用した。本装置は、力並びにモーメントを測定しているため、測定単位は Nmm とした。

2. 検証実験

2.1 共通の測定条件

計測精度の比較対象として、コーンプレート型回転式粘度計（TV-100E 東機産業、港区、東京）を用いた。コーンローターは、半径14 mm コーン角度3度

を使用した。測定中の試料温度は、TV-100E に接続した低温循環型恒温槽 (VM-150F II 東機産業, 港区, 東京) を用いて各検証の指定温度に維持し, 測定開始 90 秒後の粘度を記録した。1 試料につき 3 回測定を実施し, その平均値を各試料の粘度値とした。

2.2 ニュートン流体を対象とした計測精度検証

ニュートン流体として, グリセリン水溶液の濃度を 80% から 100% まで 2% 刻みとした 11 種類の溶液を準備した。測定対象試料は, $23.0 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ に恒温保持した状態で測定を実施した。コーンプレート型回転式粘度計のずり速度は, 各試料において粘度値が安定する条件に設定した。小型粘度計に接続した直流安定化電源の電圧は, 検出ヘッドの往復周期が 4 Hz になるように固定し, 測定開始 10 秒後から 30 秒後までの 20 秒間の波形のうち, 連続した 20 ストロークを解析に用いた。

2.3 キサンタンガム系流体を対象とした計測精度検証

非ニュートン流体として, キサンタンガム系のとろみ調整食品 (トロミアップパーフェクト, 日清オイリオ, 中央区, 東京) を用い, 溶媒を水としたとろみ調整食品入り水溶液を準備した。試料は, ずり速度 50 s^{-1} において 50-1100 $\text{mPa}\cdot\text{s}$ の範囲となるように, とろみ調整食品入り水溶液の濃度を 0.5% から 4.6% まで 0.1% 刻みで調製した 42 種類を測定対象とした。試料の調整は, あらかじめ $23.0 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ に温度調整しておいた溶媒に, とろみ調整食品を一気に加え, 匙を用いて 30 秒間攪拌し, 23.0°C に設定した室温下で 60 分間静置後, 各種測定を実施した。コーンプレート型回転式粘度計のずり速度は, 50 s^{-1} に設定した。小型粘度計に接続した直流安定化電源の電圧は, 検出ヘッドの往復周期が 4

Hzになるように固定し、測定開始 10 秒後から 30 秒後までの 20 秒間の波形のうち、連続した 20 ストロークを解析に用いた。

2.4 チキソトロピー流体を対象とした計測精度検証

日常で用いる流体での計測精度を検証するため、チキソトロピー流体となる、とんかつソース（ブルドッグソース株式会社，中央区，東京都）とトマトケチャップ（カゴメ株式会社，名古屋市，愛知県）を対象とした。試料はそれぞれ、 $20 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 、 $30 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 、 $40 \pm 0.5^\circ\text{C}$ の 3 段階に調整した。コーンプレート型回転式粘度計のずり速度は、トマトケチャップ測定時には 40 s^{-1} 、とんかつソース測定時には 50 s^{-1} に設定した。小型粘度計に接続した直流安定化電源の電圧は、検出ヘッドの往復周期が 4 Hz になるように固定し、測定開始 10 秒後から 30 秒後までの 20 秒間の波形のうち、連続した 20 ストロークを解析に用いた。

2.5 ハードウェア調整が計測結果に及ぼす影響の検証

最適の測定条件を検証するため、検出ヘッドの移動速度と形状が出力値に与える影響を評価した。比較対象とするコーンプレート型回転式粘度計は、ずり速度を 50 s^{-1} に設定した。

1) 検出ヘッドの移動速度の検証：2-3 と同様のキサントタンガム系水溶液 42 種類を準備した。小型粘度計に接続した直流安定化電源の電圧を可変させ、検出ヘッドの移動速度を 1.5 Hz から 5.0 Hz まで 0.5 Hz 刻みの 8 条件とし、測定開始 10 秒後から 30 秒後までの 20 秒間の波形のうち、連続した 20 ストロークを解析に用いた。

2) 検出ヘッドの形状の検証：キサントタンガム系水溶液を、濃度 0.75%、1.5%、

2.0%, 3.0%の4種類準備した。測定対象試料は、 $23.0 \pm 0.5^\circ\text{C}$ に恒温保持した状態で測定を実施した。検出ヘッドの形状は、 $12 \times 12 \times 3 \text{ mm}$ の正方形の標準型を基準に、表面に凸加工を施したヘッド、表面に数カ所の穴を開けた加工型ヘッド、ヘッド部を八角形とした合計3種類を新たに3Dプリンタで造形した(図3)。検出ヘッドの移動速度は1.5 Hzに固定し、測定開始10秒後から30秒後までの20秒間の波形のうち、連続した20ストロークを解析に用いた。

3. 統計学的検定

試作粘度計の出力値とコーンプレート型回転式粘度計の粘度測定値間の線形関係进行评估するため、各条件において単回帰分析を実施した。各分析では、決定係数(R^2)とピアソン相関係数(r)を算出し、相関の統計的有意性については、 $p < 0.05$ を有意水準として検定を行った。単回帰分析は、Microsoft Excelに搭載された統計機能を使用した。

各検出ヘッドの移動速度が出力値のばらつきに与える影響の評価には、繰り返しのある一元配置分散分析を実施した。統計的有意性の水準を $p < 0.05$ とし、有意な差が認められた際は、Tukey-Kramerの多重比較検定を用いて、個々の条件間の比較を行った。検出ヘッドの形状および溶液種が出力値に及ぼす影響の評価には、繰り返しのある二元配置分散分析を実施した。統計的有意性の水準を $p < 0.05$ とし、交互作用を含めて有意な差が認められた際は、Tukey-Kramerの多重比較検定を用いて、個々の条件間の比較を行った。検出ヘッドの移動速度と形状に関する分散分析、多重比較検定は、統計解析ソフトJMP(SAS Institute Inc., Cary, NC, USA)を用いて実施した。

結果

1. ニュートン流体を対象とした計測精度検証

ニュートン流体であるグリセリン水溶液（80%-100%）を用いた測定において、試作粘度計の出力は、その多くが検出ヘッドの移動速度に即した周期的な変動を示した（図 4）。測定された 6 軸出力値は、試料濃度の上昇に伴い増加傾向を示したが、この増加傾向は F_x , F_y , M_x , M_y の各軸に限定され、 F_z と M_z では濃度依存性は認められなかった（表 1）。

各軸の出力のうち、 F_z は検出ヘッドの往復運動に対して垂直方向の力を、 M_z は z 軸周りの回転モーメントを検出する軸である。 F_z と M_z の出力値は周期性が不明瞭であり、計測中の値も他の軸と比較して不安定な出力を示した（図 4）。これは、往復直線運動を基本とする本装置において、流体から検出ヘッドに作用する主要な抗力（ F_x ）や回転モーメント（ M_x , M_y ）と比較して、ノイズやシステムの微細な振動の影響を受けやすかったためと考えられる。

コーンプレート型回転式粘度計による粘度測定値と各軸出力との線形関係を評価するため、単回帰分析を実施した。その結果、 M_x と M_y が濃度に対して最も顕著な直線的増加を認め、 M_x は M_y よりも大きな変化量を示した（図 5）。単回帰分析の結果、 F_x ($R^2 = 0.989$, $r = 0.995$) および F_y ($R^2 = 0.858$, $r = 0.927$) , M_x ($R^2 = 0.974$, $r = 0.987$) および M_y ($R^2 = 0.986$, $r = 0.993$) は、いずれも極めて強い正の相関 ($p < 0.001$) が示された。また、 F_x , F_y , M_x , M_y の各軸において、出力値に対する標準偏差の割合が低く、特に高粘度域において出力値のばらつきが小さかった（表 1）。これに対して、 F_z は高い相関係数を示したものの ($R^2 = 0.957$, $r = 0.978$)、 M_z では直線的関係は有意ではなかった ($R^2 = 0.057$, p

= 0.48). この結果により, F_x , F_y , M_x , M_y の各軸が, ニュートン流体の粘度変化を正確に捉えることが可能であると確認された.

2. キサンタンガム系流体を対象とした計測精度検証

非ニュートン流体であるキサンタンガム系とろみ調整食品入り水溶液を用いた測定では, F_z と M_z を除き, 検出ヘッドの移動速度に即した周期的な値を示した (図 6). 物質が均一に混ざっていない非ニュートン流体においても, 解析対象とした 20 ストロークにおける出力値は安定しており, 出力値のばらつきは小さかった (表 2). 各軸の出力値は, 試料濃度の上昇に伴い増加傾向を示したが, この増加傾向はニュートン流体と同様に, F_x , F_y , M_x , M_y の各軸に限定された (図 7). 特に, M_x が顕著な直線的増加を示し, M_y および F_x , F_y も試料濃度に対する直線的増加傾向を示したが, M_y は M_x と比較し変化量は小さく, F_x と F_y の出力は微小であった. 一方, F_z および M_z は, 濃度に対する明確な依存性は認められなかった.

コーンプレート型回転式粘度計による粘度測定値と各軸出力との線形関係を評価するため, 単回帰分析を実施した (図 7). その結果, F_x ($R^2 = 0.947$, $r = 0.973$), F_y ($R^2 = 0.981$, $r = 0.990$), M_x ($R^2 = 0.983$, $r = 0.992$) および M_y ($R^2 = 0.801$, $r = 0.895$) は, いずれも極めて強い正の相関 ($p < 0.001$) が示された. これに対して, F_z ($R^2 = 0.302$, $r = 0.549$), M_z ($R^2 = 0.154$, $r = 0.392$) は, 統計的有意水準 $p < 0.05$ で有意ではあるものの, 弱い正の相関にとどまった.

この結果, F_x , F_y , M_x , M_y の主要な 4 軸が非ニュートン流体に対しても極めて高い線形性を有することが確認され, 特に回転モーメント M_x は, せん断力を直接検出する F_x 軸や, 他の力成分と同等以上の非常に高い相関を示した. この

ことは、往復直線運動という測定原理において、回転モーメントが非ニュートン流体の粘度特性を捉える上で最も効率的な指標の一つであることを示している。

3. チキソトロピー流体を対象とした計測精度検証

チキソトロピー性流体であるとんかつソースおよびトマトケチャップについて、3段階の温度条件（20°C, 30°C, 40°C）で測定した結果を表3に示す。トマトケチャップの測定結果では、温度上昇に伴い、コーンプレート型回転式粘度計の粘度測定値および試作粘度計の出力値（Mx）はともに明確な低下傾向を示し、一般的に流体が示す温度依存的な粘度変化の挙動と一致した。一方、とんかつソースでは、粘度測定値は温度変化に対する低下が認められたが、試作粘度計の出力値（Mx）は、温度依存的な変化を示さなかった。

コーンプレート型回転式粘度計の粘度測定値と試作粘度計の出力値（Mx）との線形関係について単回帰分析を実施した結果、トマトケチャップでは極めて強い正の相関（ $R^2 = 0.969$, $r = 0.984$ ）が確認されたが、とんかつソースでは相関が弱く（ $R^2 = 0.474$, $r = 0.689$ ）、対象による相関の差が確認された。この結果は、流体の物性によっては本装置の計測精度に課題が残ることを示唆している。

4. ハードウェア調整が計測結果に及ぼす影響の検証

4-1. 検出ヘッドの移動速度の検証

本検証では、キサントガム系のとろみ調整食品を用いて調整した42種類の試料を測定対象とした。検出ヘッドの移動速度を1.5 Hzから5.0 Hzまで可変させた際の出力値（Mx）を表4に示す。全ての速度条件において、溶液の濃度

上昇に伴って試作粘度計の出力値 (Mx) が上昇する傾向が確認された。

コーンプレート型回転式粘度計の粘度測定値と試作粘度計の出力値 (Mx) との関係の評価するため、各移動速度において単回帰分析を行った結果、どの移動速度においても決定係数 (R^2) は 0.97 を超え、ピアソンの相関係数 (r) は 0.99 を超える非常に高い値を示し、統計的有意水準 $p < 0.001$ で両者間に強い正の相関を認めた。続いて、検出ヘッドの移動速度の違いが出力値 (Mx) のばらつきに与える影響を評価するため、標準偏差を応答変数、検出ヘッドの移動速度を固定効果、とろみ調整食品入り水溶液の種類を变量効果とした繰り返しのある分散分析を行った。結果、出力値 (Mx) のばらつきにおいて、検出ヘッドの移動速度間に有意な差が認められ ($F(7,327) = 148.40, p < 0.001$)、Tukey-Kramer の多重比較検定の結果、低速 (1.5-2.5 Hz) と高速 (4.5-5 Hz) 間で有意な差があった。特に、1.5 Hz と 2.0 Hz の低速域では、その他の高速条件に比べて出力値 (Mx) のばらつきが小さく、高い安定性を持つことが示された。最も安定した条件である 1.5 Hz の結果を図 8-A に、最も不安定な条件の一つである 5.0 Hz の結果を図 8-B に示す。

4-2. 検出ヘッドの形状の検証

異なる形状の検出ヘッドを用いて、キサントガム系のとろみ調整食品 4 種類 (0.75%, 1.5%, 2.0%, 3.0%) を測定した際の試作粘度計の出力値 (Mx) を表 5 に示す。全ての形状の検出ヘッドにおいて、粘度増加に伴う出力値 (Mx) の増加が見られた。溶液種と検出ヘッドを因子とした繰り返しのある二元配置分散分析を実施した結果、検出ヘッドの形状間に統計的に有意な差が認められた ($F(3, 304) = 447.67, p < 0.001$)。加えて、検出ヘッドの形状ととろみ調整食品

入り水溶液の間に有意な交互作用が認められた ($F(9, 304) = 103.41, p < 0.001$). この有意な交互作用に基づき, Tukey-Kramer の多重比較検定を用いて, 水溶液の種類ごとに検出ヘッド間の出力値 (M_x) を比較した結果, 標準型の検出ヘッドは, 低粘度域 (0.75%) では他の非標準型ヘッドと有意差は認められなかったが, 中粘度から高粘度域 (1.5%-3%) にかけて, 他の非標準型ヘッドよりも高い出力値 (M_x) を示した. 特に, 最も高粘度の 3%水溶液においては, 他の 3 種類全ての検出ヘッドとの間に有意差を認めた ($p < 0.001$). この結果は, 標準型の検出ヘッドが, 広範囲の粘度計測において最も高い感度と安定した出力を有することを示唆している.

考察

嚥下調整食の粘度調整は, 誤嚥性肺炎を予防し, 患者の安全を確保するために重要な要素である. しかし, その客観的かつ定量的な評価は依然として大きな課題であり, これまで開発・展開されてきた粘度計は, 高価で操作が煩雑であるという理由から, 介護現場や在宅での十分な普及には至っていない¹⁹⁾. 本研究は, MEMS 6 軸力覚センサーを用いた新しいアプローチによる小型・簡便な粘度計の開発を試み, その有効性を実証した.

1. 測定原理の優位性と粘度検出メカニズム

検出ヘッドの往復運動によって流体に生じるせん断応力とそれに伴う回転モーメントを反映する値である M_x が, ニュートン流体および非ニュートン流体を用いた検証において, 溶液粘度の上昇に伴う顕著な直線的増加を示し, コーンプレート型回転式粘度計の測定値と高い相関性を持つことが確認された. ま

た、 M_x は、高い相関性を示した他の成分と比較して最も高い出力値（感度）を示した。これは、検出ヘッドの往復直線運動という本測定原理の特性上、流体の粘性抵抗が M_x 方向のモーメントを最も効率的に発生させたことを示唆している。すなわち、 M_x 成分は、流体抵抗の作用点が検出ヘッドの x 軸から構造的に離れた位置にずれることで、粘度変化に対する応答を最大化することができ、これにより高い計測分解能と優れた測定安定性が実現できたと考えられる。 F_x 、 F_y といった抗力成分ではなく、高感度なモーメント成分を利用することで、流体せん断特性の指標となる高精度な値を得ることが可能になった点が本研究の独自の知見である。

2. 測定安定性向上のためのハードウェア最適化

本研究では、出力値のばらつきを最小限に抑えるための最適なハードウェア条件を探索した。まず、検出ヘッドの移動速度が出力値のばらつきに与える影響を評価した結果、移動速度間に統計学的な有意な差が認められ ($p < 0.001$)、特に、1.5 Hz と 2.0 Hz の低速域が最も安定性が高く、高速域 (4.5-5 Hz) と比較して出力値のばらつきが有意に小さかった。この結果は、高速域では流体の慣性力や乱れが増大しノイズとして寄与したのに対し、低速域では流体抵抗（粘性）を静穏に検出できたためと考えられる。この結果に基づき、実用化において最適な計測条件を確立できたことは、計測の再現性を担保する上で重要である。

また、検出ヘッドの形状が出力値に与える影響についても検討を行った。オール形状の標準型において十分な計測精度が確保されているが、検出ヘッドの往復運動中に流体内で不均一なせん断や局所的な乱れを生じさせることで、よ

り高い感度を得ることを目指し、標準型の表面を凸状に加工した表面凸状型や、穴を開けた穴加工型の複雑な形状の検出ヘッドをデザインし計測を行った。さらに、八角形型については、直方体の鋭い角部を滑らかにすることで、流体抵抗を均一化し、かつ検出ヘッドの往復運動によって発生する局所的な渦の発生を抑制し、測定の安定性を高めることを意図した。

しかし、面積をほぼ同一に保ちながら作製し評価した結果、標準型が他の形状に比べて最も高い感度を示す一方で、八角形型を含む複雑な形状の方が測定値のばらつきが小さく、高い安定性を有するというトレードオフの関係が明らかになった。この結果は、標準型が最もシンプルな直方体として流体抵抗を最大効率で受け止めることで、最も大きな粘性抵抗を発生させ、最大出力値を得られたことを示す一方で、八角形型をはじめとする複雑な形状においてばらつきが小さくなった現象は、検出ヘッドの往復運動中に、穴や凹凸、あるいは角を滑らかにした形状が、流体内で特定の整流効果やダンピング効果を生じさせ、ノイズ源となる微小な不規則な振動や乱れを抑制したためと考えられる。このことから、検出ヘッドの実用化にあたっては、感度か再現性のどちらを優先するか、また、測定対象とする流体の種類によって採用すべき形状が異なると結論づけられる。検出ヘッドの形状の最適化は、開発した小型粘度計の実用的な測定安定性を確保するための重要な要素であると言える。

3. 複雑な非ニュートン流体への対応と課題

チキソトロピー性を有するトマトケチャップにおいて、温度依存的な粘度変化を、コーンプレート型回転式粘度計と高い相関性を持つ精度で検出することができた ($R^2 = 0.969$, $r = 0.984$)。一方、とんかつソースについては、熱依存的な

粘度特性を持つにもかかわらず、本検証の測定条件下での出力値からは明確な温度依存性は認められなかった ($R^2 = 0.474$, $r = 0.689$). トマトケチャップは、トマト固形分を主体とした比較的安定したネットワーク構造を持つため²²⁻²³⁾、温度変化に伴う粘性低下をコーンプレート型回転式粘度計と試作粘度計の両方で明確に検出できた。一方、とんかつソースは、多種のスパイス、油脂、および増粘多糖類を含む複雑で不均一なエマルジョン構造を持つ²⁴⁻²⁵⁾。この不均一性により、試作粘度計の往復直線運動では流体全体に対して均一なせん断を効率的に与えることができず、検出ヘッド周辺の局所的な不規則な抵抗が M_x 出力のノイズを増大させ、結果として熱依存的な粘度変化がデータ上で統計的に検出されなかった可能性が示唆される。この結果は、本装置をより複雑な食品（油脂を含む食品、粒状成分の多い食品など）に応用する際には、流体のレオロジー的特性に応じて検出ヘッドの形状や往復速度をさらに最適化する必要があることを示唆している。

4. 開発原理の限界と今後の展望

本研究では、主にキサントガム系の増粘剤を用いて調整した流体および特定の食品を対象に検証を行ったが、とんかつソースの検証結果に見られるように、流体の物性や構造が異なると、試作粘度計の出力値とコーンプレート型回転式粘度計の測定値間の相関関係が低下する可能性が示された。これは、検出ヘッドの往復運動が特定の流体構造を崩し、出力値に影響を与えているためと考えられる。したがって、開発した試作粘度計の適用範囲を拡大し、その汎用性を確立するためには、より複雑な粘弾性を持つ食品など、多様な物性を持つ流体を対象とした詳細な比較検証を今後の重要な研究課題として取り組む必要がある。

結論

本研究は、MEMS 6 軸力覚センサーと往復直線運動機構を活用した小型ポータブルな簡易粘度計を開発し、その有効性を実証した。この装置は、検出ヘッドの往復運動により生じるモーメント成分を利用することで、ニュートン流体および非ニュートン流体に対して極めて高い粘度相関性と優れた安定性を示すことを確認した。モーメント成分は、流体抵抗の作用点を最適化し応答を最大化することで、高い計測分解能を可能にする。本粘度計の小型化とバッテリー駆動によるポータブル化は、介護現場や在宅だけでなく、災害時においても、誰もが簡便かつ客観的にとろみの粘度を測定できる道を開き、安全で一貫した嚥下ケアの普及に貢献するものである。

謝辞

試作粘度計の開発・試作にご協力いただいた株式会社タッチエンスの中井亮仁 代表取締役社長に深く感謝申し上げます。

著者の貢献

松尾 小百合：実験手法設計，データ収集，解析手法の設計，データ管理，論文本文の執筆，投稿論文の最終化

黒瀬 雅之：研究の着想，全体設計，研究全体の管理，進捗調整，原稿の推敲，原稿の修正，研究資金の獲得

研究助成

本研究は、公益財団法人 JKA からの研究助成金（個別研究 2022M-180, ステップアップ研究 2024M-513）および公益財団法人日本食品化学研究振興財団（研究助成 28-13）を受けて実施された。

利益相反

著者らは本研究に関して開示すべき利益相反（Conflict of Interest）はない。

参考文献

- 1) Langmore, S. E., Terpenning, M. S., Schork, A., Chen, Y., Murray, J. T., Lopatin, D., and Loesche, W. J.: Predictors of Aspiration Pneumonia: How Important Is Dysphagia? *Dysphagia*, 13: 69-81, 1998.
- 2) Manabe, T., Teramoto, S., Tamiya, N., Okochi, J., and Hizawa, N.: Risk factors for aspiration pneumonia in older adults. *PLoS One*, 10: e0140060, 2015.
- 3) Hamlet, S., Choi, J., Zormeier, M., Shamsa, F., Stachler, R., Muz, J., and Jones, L.: Normal adult swallowing of liquid and viscous material: Scintigraphic data on bolus transit and oropharyngeal residues. *Dysphagia*, 11: 41-47, 1996.
- 4) Dantas, R. O., Kern, M. K., Massey, B. T., Dodds, W. J., Kahrilas, P. J., Brasseur, J. G., Cook, I. J., and Lang, I. M.: Effect of swallowed bolus variables on oral and pharyngeal phases of swallowing. *Am J Physiol*, 258: 675-681, 1990.
- 5) Kuhlemeier, K. V., Palmer, J. B., and Rosenberg, D.: Effect of liquid bolus consistency and delivery method on aspiration and pharyngeal retention in dysphagia patients. *Dysphagia*, 16: 119-122, 2001.
- 6) Leonard, R. J., White, C., McKenzie, S., and Belafsky, P. C.: Effects of bolus rheology on aspiration in patients with dysphagia. *J Acad Nutr Diet*, 114: 590-594, 2014.
- 7) Cichero, J. A., Steele, C., Duivesteyn, J., Clavé, P., Chen, J., Kayashita, J., Dantas, R., Lecko, C., Speyer, R., Lam, P., and Murray, J.: The Need for International Terminology and Definitions for Texture-Modified Foods and

Thickened Liquids Used in Dysphagia Management: Foundations of a Global Initiative. *Curr Phys Rehabil Rep*, 24: 280-291, 2013.

8) Mann, L. L., and Wong, K.: Development of an objective method for assessing viscosity of formulated foods and beverages for the dysphagic diet. *J Am Diet Assoc*, 96: 585-588, 1996.

9) Cichero, J. A. Y., Lam, P., Steele, C. M., Hanson, B., Chen, J., Dantas, R. O., Duivesteyn, J., Kayashita, J., Lecko, C., Murray, J., Pillay, M., Riquelme, L., and Stanschus, S.: Development of international terminology and definitions for texture-modified foods and thickened fluids used in dysphagia management: The IDDSI Framework. *Dysphagia*, 32: 293-314, 2017.

10) 日本摂食嚥下リハビリテーション学会嚥下調整食分類 2021. *日摂食嚥下リハ会誌*, 25: 135-149, 2021.

11) 山縣誉志江, 栢下淳: 性質の異なるとろみを使用した学会分類 2013(とろみ)の検証. *日摂食嚥下リハ会誌*, 19: 109-116, 2015.

12) Nicosia, M. A., and Robbins, J.: The usefulness of the line spread test as a measure of liquid consistency. *Dysphagia*, 22: 306-311, 2007.

13) 佐藤光絵, 山縣誉志江, 栢下淳: とろみ液の簡易評価法としてのシリンジテストの検証. *日摂食嚥下リハ会誌*, 25: 102-113, 2021.

14) 渡辺英美, 山縣誉志江, 小切間美保, 栢下淳: 異なるとろみ調整食品でとろみづけした飲料を用いた簡易粘度評価方法の比較. *日摂食嚥下リハ会誌*, 23: 19-29, 2019.

- 15) Hansen, T., Beck, A. M., Kjaersgaard, A., and Poulsen, I.: Second update of a systematic review and evidence-based recommendations on texture modified foods and thickened liquids for adults (above 17 years) with oropharyngeal dysphagia. *Clin Nutr ESPEN*, 49: 551-555, 2022.
- 16) Dewar, R. J., and Joyce, M. J.: Time-dependent rheology of starch thickeners and the clinical implications for dysphagia therapy. *Dysphagia*, 21: 264-269, 2006.
- 17) Hamada, Y., Yoshida, T., Kurihara, Y., and Watanabe, K.: Handy Kitchen Liquid Food Viscometer Using a DC Motor as Actuator and Sensor. *IEEE Access*, 11: 79096-79104, 2023.
- 18) Liao, S., Ye, P., Chen, C., Zhang, J., Xu, L., and Tan, F.: Comparing of Frequency Shift and Impedance Analysis Method Based on QCM Sensor for Measuring the Blood Viscosity. *Sensors*, 22: 3804, 2022.
- 19) 宮城翠, 森本博, 海老原覚: 臨床現場で実用可能なマドラー型粘度測定機器の開発. *日摂食嚥下リハ会誌*, 25: 44-51, 2021.
- 20) Nakai, A., Morishita, Y., Matsumoto, K., and Shimoyama, I.: 6-axis Force-torque Sensor Chip Composed of 16 Piezoresistive Beams. *The 28th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems*, 730-731, 2015.
- 21) Nakai, A., Kuwana, K., Saito, K., Dohi, T., Kumagai, A., and Shimoyama, I.: MEMS 6-axis force-torque sensor attached to the tip of grasping forceps for identification of tumor in thoracoscopic surgery. *The 30th IEEE International*

Conference on Micro Electro Mechanical Systems, 546-548, 2017.

22) Nakamura, M., Yoshida, S., Nishioka, Y., Hayashi, S., and Suzuki, Y. A.: Categorization of Commercial Thickeners on the Basis of their Effects on the Physical Properties of Foods. *The Japanese journal of nutrition*, 70: 59-70, 2012.

23) Kanichi, S., Imaoka, K., Keawkaika, S., and Hagura, Y.: Two element Model Analysis of the Viscoelastic Behavior of Liquid Food Materials by Means of the Non rotational Concentric Cylinder Method. *Japan Journal of Food Engineering*, 8: 73-80, 2007.

24) Sikora, M., Badrie, N., Deisingh, A. K., and Kowalski, S.: Sauces and dressings: a review of properties and applications. *Crit Rev Food Sci Nutr*, 48: 50-77, 2008.

25) Park, S. Y., Seol, K. H., and Kim, H. Y.: Effect of Dry-Aged Beef Crust Levels on Quality Properties of Brown Sauce. *Food Sci Anim Resour*, 40: 699-709, 2020.

図説

図 1. 試作粘度計の構造と外観

A. 試作粘度計の構造図: 試作粘度計は, 6 軸力覚センサー・モーターモジュール・回転直線運動変換機構, および検出ヘッドを組み込んだ構造とした. 検出ヘッドは測定対象流体中に挿入され, モーターモジュールからの駆動力により, 回転直線運動変換機構を介して水平方向 (前後) に往復運動を行う. 6 軸力覚センサーは, この往復運動中に流体から検出ヘッドに加わる力を検出し, PC に出力する.

B. 試作粘度計の外観写真と寸法: 試作粘度計の全体寸法は, 長さ 150 mm 直径 40 mm である. 上部の計測ユニット (60 mm) と, 下部の検出ヘッドユニット (90 mm) で構成される. 検出ヘッドの先端部は直径 30 mm であり, ビーカー内の流体に挿入して使用する.

図 2. 試作粘度計の電気構成回路図

直流電流からの電力は, モーター駆動回路に入力され, DC モーターを駆動し, 試作粘度計の検出ヘッドを往復運動させる. 6 軸センサーからのアナログ信号は, アンプ基板を介してマイクロコントローラ (マイコン) に入力される. マイコンによりデジタル信号に変換された後, USB ケーブルを介して PC に出力される.

図 3. 試作粘度計の検出ヘッド形状

試作粘度計の検出ヘッドには, 4 種類の異なる形状を用いた. A はオール型 (標準型), B は表面凸状型, C は穴加工型, D は八角形型である. 基本形状であるオール型は, 12 x 12 x 3 mm の直方体であり, 他の 3 種類も同様の寸法で製作した.

図 4. ニュートン流体計測時の試作粘度計からの出力波形

100%グリセリン計測時における, 6 軸力覚センサーからの出力波形を示す. 上段より, 検出ヘッドの動きの方向である前後方向の力 (F_x), 水平方向の力 (F_y), 垂直方向の力 (F_z), およびそれら 3 方向それぞれの回転モーメント (M_x , M_y , M_z) を示す.

図 5. ニュートン流体におけるコーンプレート型回転式粘度計と試作粘度計の出力値との関係

グリセリン溶液を対象とした, コーンプレート型回転式粘度計による粘度測定値と, 試作粘度計の出力値との関係を示す. A は F_x , B は F_y , C は F_z , D は M_x , E は M_y , F は M_z の出力結果である. 横軸はコーンプレート型回転式粘度計による粘度値 ($\text{mPa}\cdot\text{s}$) であり, 縦軸は試作粘度計により計測された各軸の力およびモーメントの出力値 (Nmm) を示す. 各プロットは試作粘度計の出力値と標準偏差 ($n = 20$) を示す. 単回帰分析の結果を重ねて示し, 決定係数 (R^2) と統計的有意性 (p 値) を併記した.

図 6. キサンタンガム系流体測定時の試作粘度計からの出力波形例

キサントガム系流体（1% とうもろこし調整食品入り水溶液）測定時における、6 軸力覚センサーからの出力波形例を示す。上段より、検出ヘッドの動きの方向である前後方向の力 (F_x)、水平方向の力 (F_y)、垂直方向の力 (F_z)、およびそれら 3 方向それぞれの回転モーメント (M_x , M_y , M_z) を示す。

図 7. キサントガム系流体におけるコーンプレート型回転式粘度計と試作粘度計の出力値との関係

キサントガム系流体を対象とした、コーンプレート型回転式粘度計による粘度測定値と、試作粘度計の出力値との関係を示す。A は F_x , B は F_y , C は F_z , D は M_x , E は M_y , F は M_z の出力結果である。横軸はコーンプレート型回転式粘度計による粘度値 ($\text{mPa}\cdot\text{s}$) であり、縦軸は試作粘度計により計測された各軸の力およびモーメントの出力値 (Nmm) を示す。各プロットは試作粘度計の出力値と標準偏差 ($n = 20$) を示す。単回帰分析の結果を重ねて示し、決定係数 (R^2) と統計的有意性 (p 値) を併記した。

図 8. 移動速度の違い によるコーンプレート型回転式粘度計と試作粘度計の出力値との関係

キサントガム系流体を対象とした、検出ヘッドの移動速度が粘度測定に与える影響を示す。図 A は低速条件 (1.5 Hz), 図 B は高速条件 (5.0 Hz) におけるコーンプレート型回転式粘度計 (横軸: $\text{mPa}\cdot\text{s}$) と試作粘度計の M_x 出力値 (縦軸: Nmm) との関係である。各プロットは試作粘度計の出力値と標準偏差 ($n =$

20) を示す. 単回帰分析の結果を重ねて示し, 決定係数 (R^2) と統計的有意性 (p 値) を併記した.

表 1. グリセリン溶液（ニュートン流体）測定時における出力値

濃度 (w/v%)	粘度 (mPa·s)	試作粘度計の出力値±SD (Nmm)					
		F _x	F _y	F _z	M _x	M _y	M _z
80	65.94	0.09±0.02	0.25±0.06	0.10±0.07	16.32±2.28	0.58±0.17	0.19±0.08
90	220.83	0.12±0.02	0.44±0.06	0.11±0.06	26.19±2.08	0.88±0.10	0.16±0.14
100	966.73	0.30±0.02	0.87±0.09	0.34±0.27	60.92±2.86	2.05±0.11	0.19±0.10

11 種類（80%から 100%までの 2%刻み）の溶液の代表値を示す。

粘度値は各試料につき 3 回測定した平均値を示す。測定値のばらつきが小さかったため、SD は本表では省略した。

試作粘度計出力値の SD は、peak-to-peak 値（n = 20）に基づいて算出した。

表 2. 非ニュートン流体（キサントガム系流体）測定時における試作粘度計の出力値

試料	粘度 (mPa·s)	試作粘度計の出力値±SD (Nmm)					
		F _x	F _y	F _z	M _x	M _y	M _z
A	162.10	0.04±0.03	0.19±0.05	0.17±0.06	12.13±0.78	0.17±0.07	0.09±0.06
B	384.87	0.10±0.04	0.54±0.05	0.31±0.04	28.76±0.70	0.48±0.07	0.05±0.04
C	671.13	0.18±0.03	1.13±0.03	0.21±0.15	53.07±1.98	1.13±0.04	0.08±0.05
D	918.83	0.23±0.03	1.34±0.04	0.20±0.09	66.47±2.45	1.58±0.10	0.15±0.08

42 種類（0.5%から 4.6%まで 0.1%刻み）の溶液の代表値を示す。

粘度値は各試料につき 3 回測定した平均値を示す。測定値のばらつきが小さかったため、SD は本表では省略した。

試作粘度計出力値の SD は、peak-to-peak 値（n = 20）に基づいて算出した。

表 3. 非ニュートン流体（チキソトロピー流体）測定時における試作粘度計の出力値

種類	温度 (°C)	粘度 (mPa·s)	試作粘度計の出力値±SD (Nmm)
とんかつソース	20	550.50	30.08±1.15
	30	478.97	30.13±1.81
	40	454.33	27.09±1.87
トマトケチャップ	20	1411.33	69.04±2.46
	30	1258.33	62.32±2.15
	40	991.87	56.09±1.92

粘度値は各試料につき 3 回測定した平均値を示す. 測定値のばらつきが小さかったため, SD は本表では省略した.

試作粘度計出力値の SD は, peak-to-peak 値 (n = 20) に基づいて算出した.

表 4. 検出ヘッドの移動速度の違いによる試作粘度計の出力値

試料	粘度 (mPa·s)	試作粘度計の出力値±SD (Nmm)							
		1.5 Hz	2 Hz	2.5 Hz	3 Hz	3.5 Hz	4 Hz	4.5 Hz	5 Hz

A	162.10	11.02±0.16	10.83±0.29	10.68±0.31	10.93±0.33	11.24±0.42	11.84±0.83	12.52±2.13	13.38±3.58
B	384.87	32.12±0.26	32.71±0.33	32.31±0.89	31.09±0.41	30.43±0.27	28.80±0.87	27.55±1.25	26.33±2.34
C	671.13	57.23±0.64	57.56±0.71	57.19±0.97	55.86±1.26	55.50±1.40	54.15±0.68	50.84±3.12	48.96±5.72
D	918.83	69.32±0.85	69.84±1.07	69.73±1.41	68.81±1.42	68.03±1.76	66.31±2.46	64.39±3.77	61.03±7.26

42 種類 (0.5%から 4.6%まで 0.1%刻み) の溶液の代表値を示す。

粘度値は各試料につき 3 回測定した平均値を示す。測定値のばらつきが小さかったため、SD は本表では省略した。

試作粘度計出力値の SD は、peak-to-peak 値 (n = 20) に基づいて算出した。

表 5. 異なる検出ヘッド形状における試作粘度計の出力値

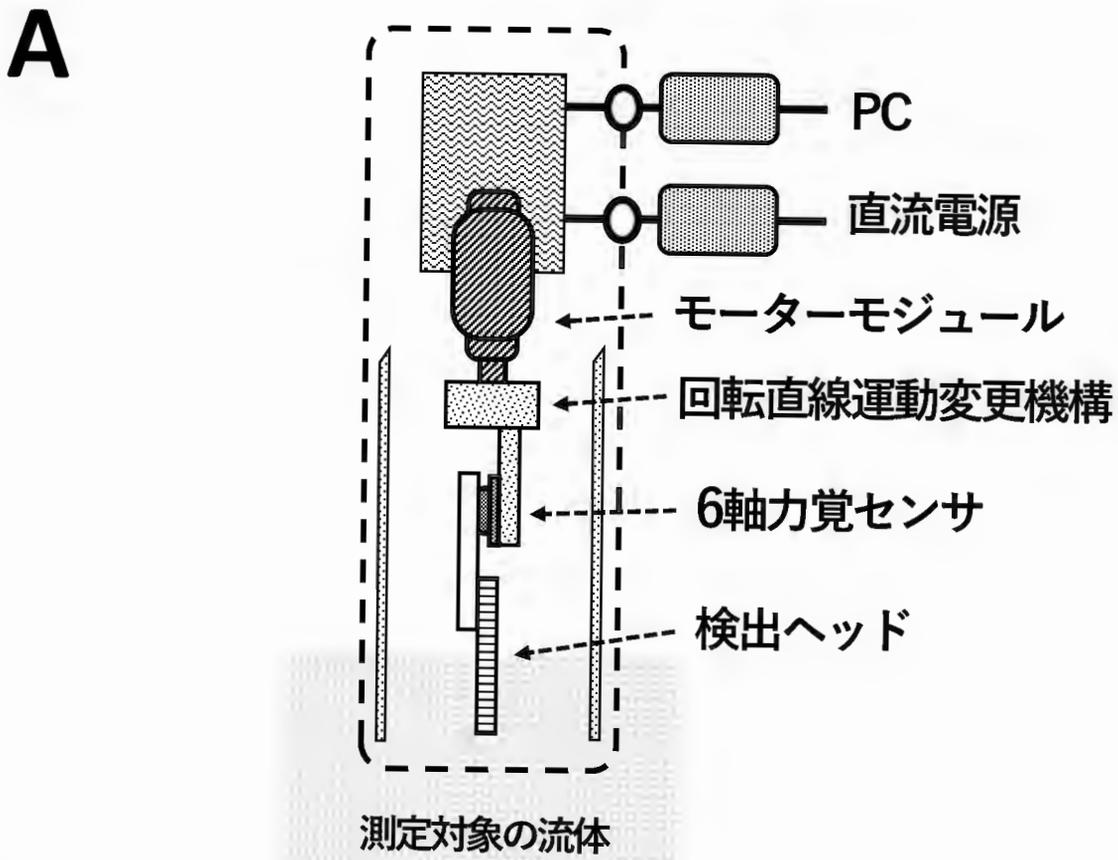
試料	濃度 (w/v%)	粘度 (mPa·s)	試作粘度計の出力値±SD (Nmm)			
			標準型	表面凸加工型	穴加工型	八角形型
A	0.75	45.35	1.86±0.17	1.56±0.20	1.84±0.16	1.62±0.22

B	1.5	233.8	14.79 ± 0.42	13.84 ± 0.26*	14.47 ± 0.21	11.19 ± 0.23*
C	2	345.6	22.46 ± 0.63	22.16 ± 0.49	20.78 ± 0.37*	18.60 ± 0.51*
D	3	594.4	38.87 ± 0.73	37.36 ± 0.37*	35.00 ± 0.50*	33.13 ± 0.69*

粘度値は各試料につき 3 回測定した平均値を示す。測定値のばらつきが小さかったため、SD は本表では省略した。

試作粘度計出力値の SD は、peak-to-peak 値 (n = 20) に基づいて算出した。

* Tukey-Kramer の多重比較検定において、標準型 (オール型) と比較して統計的に有意差が認められたことを示す (p < 0.001)。



B

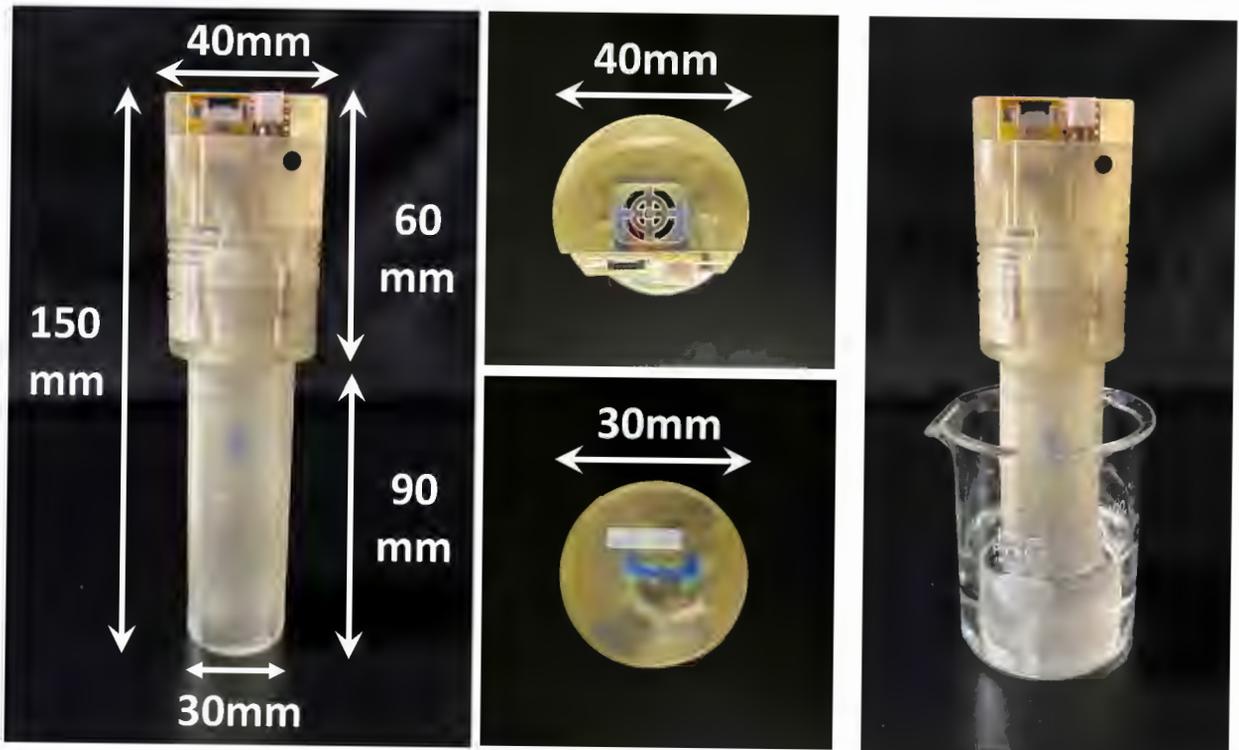


図1

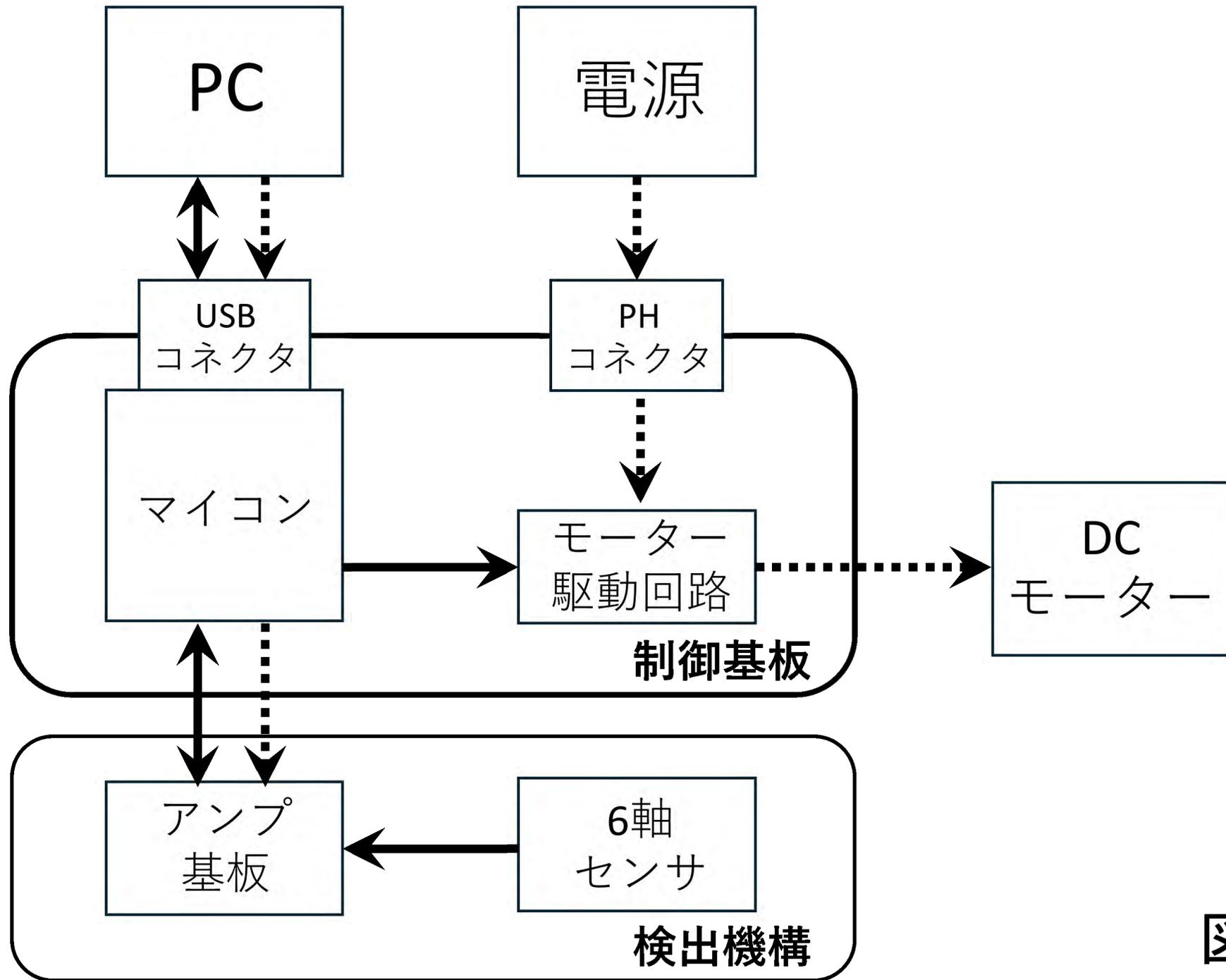
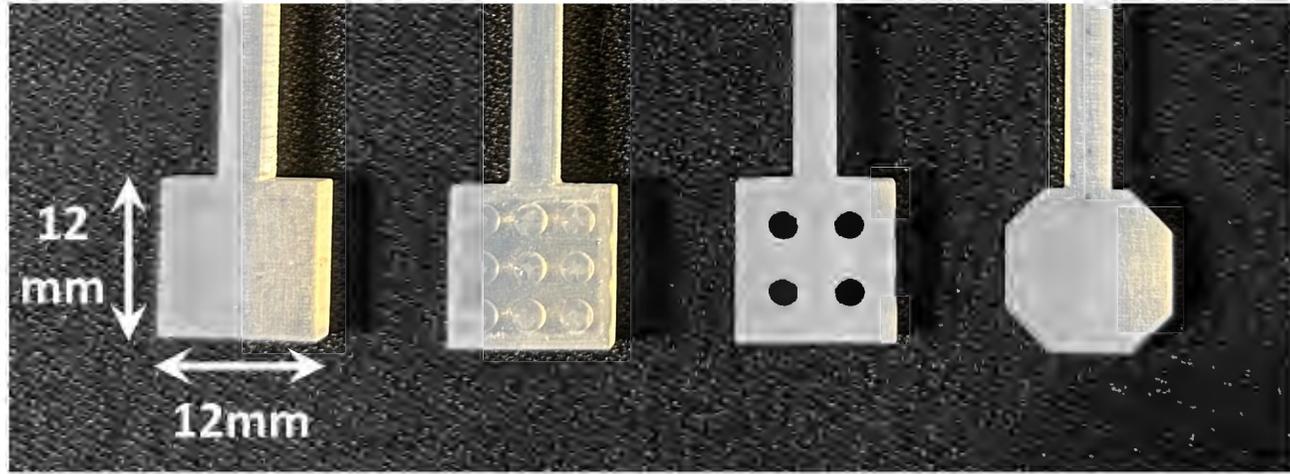


図2



A

B

C

D

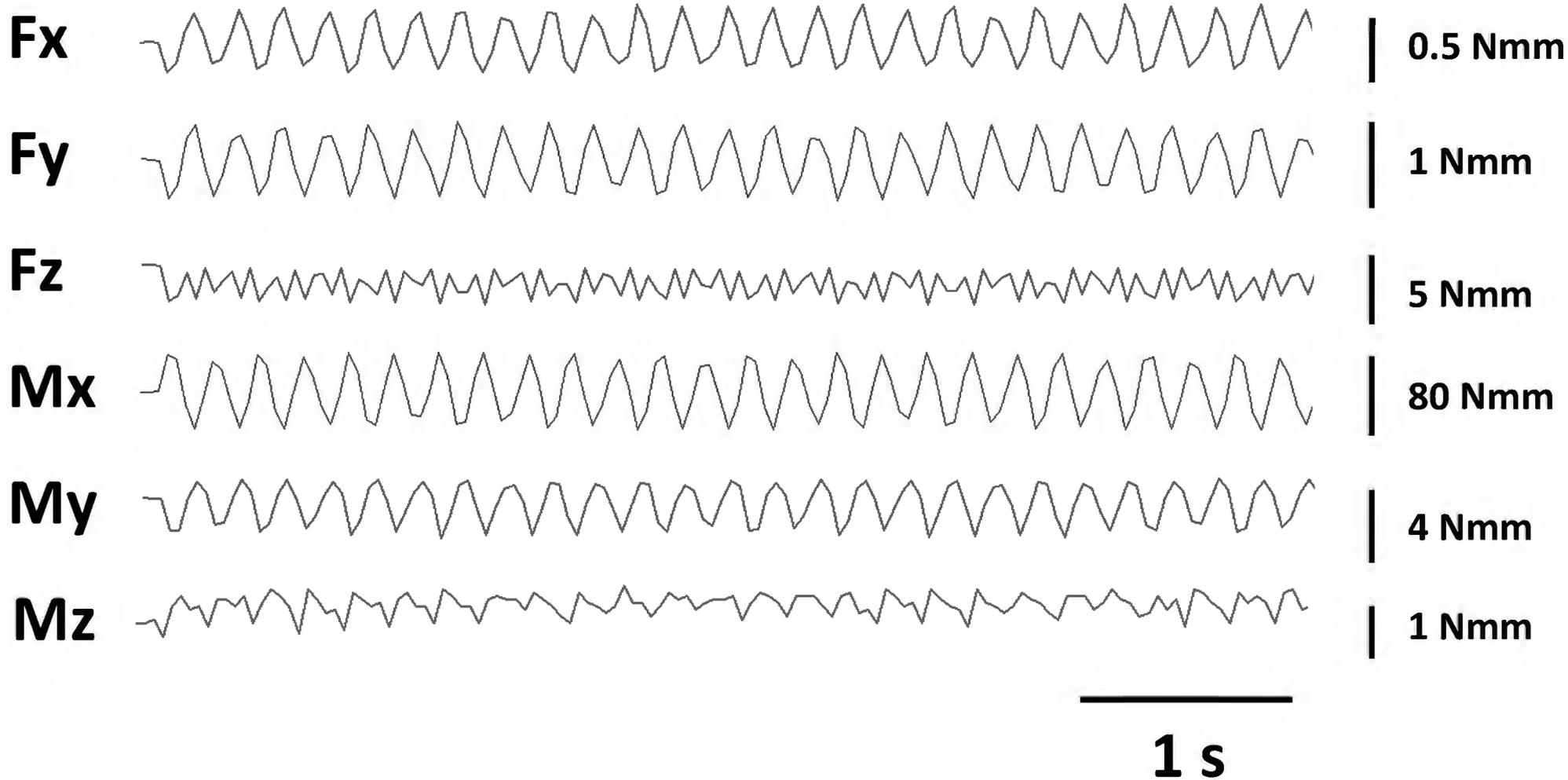
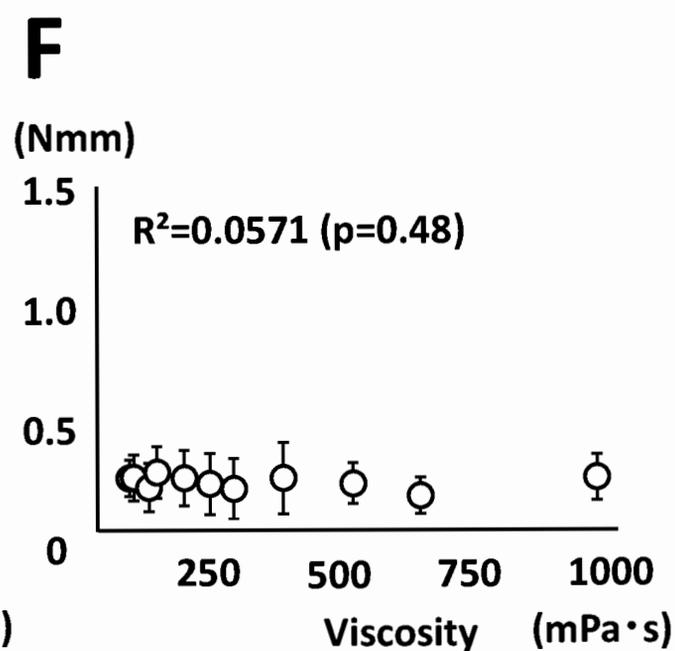
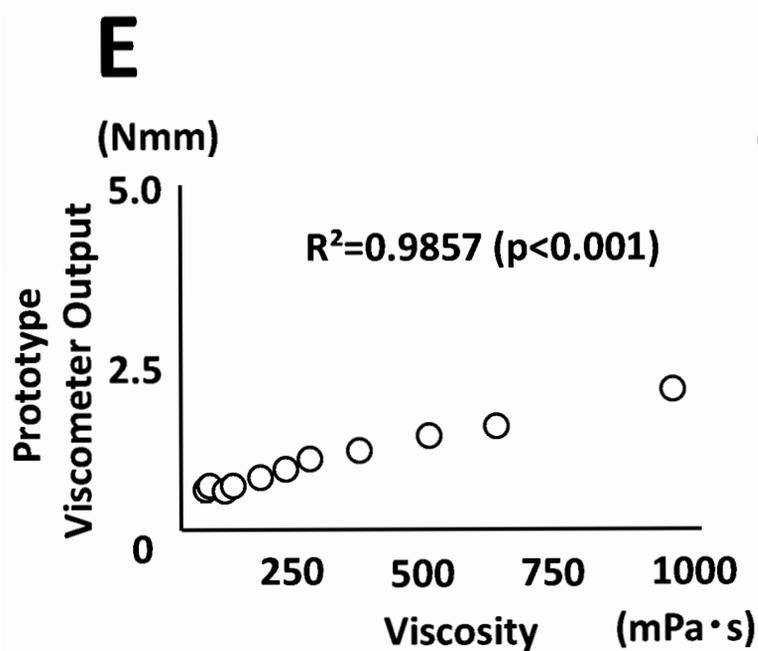
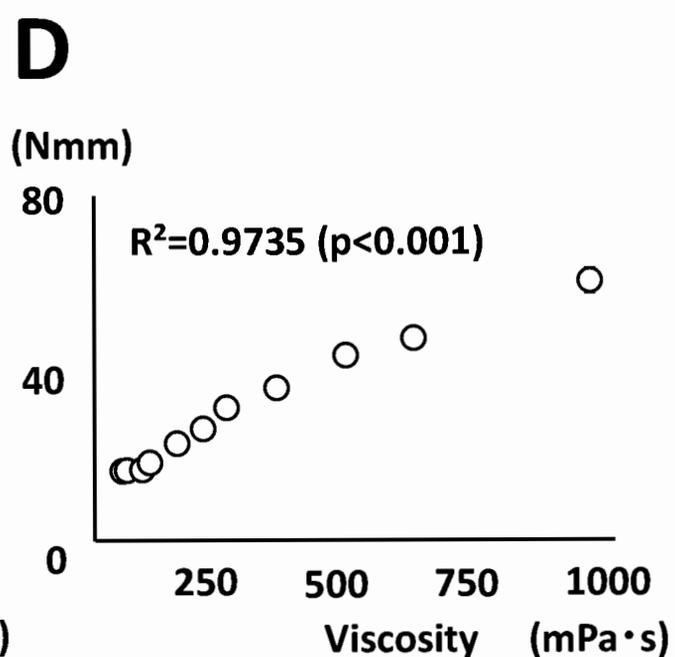
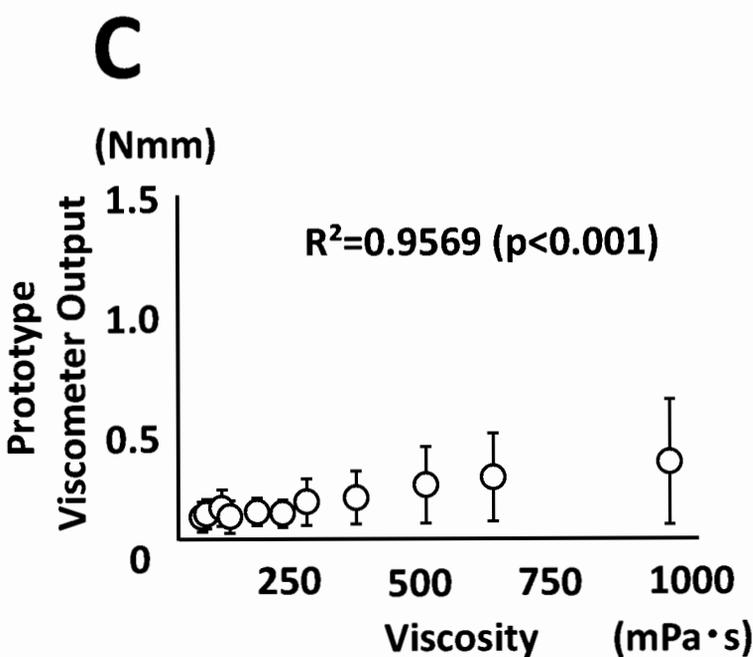
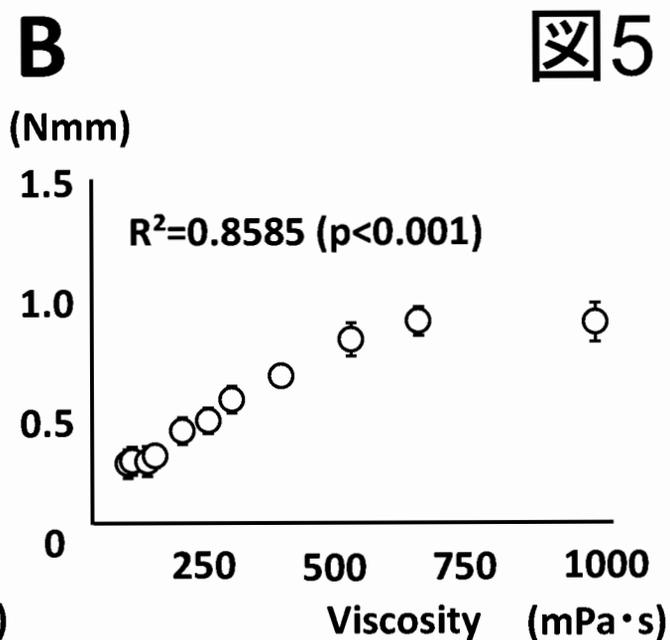
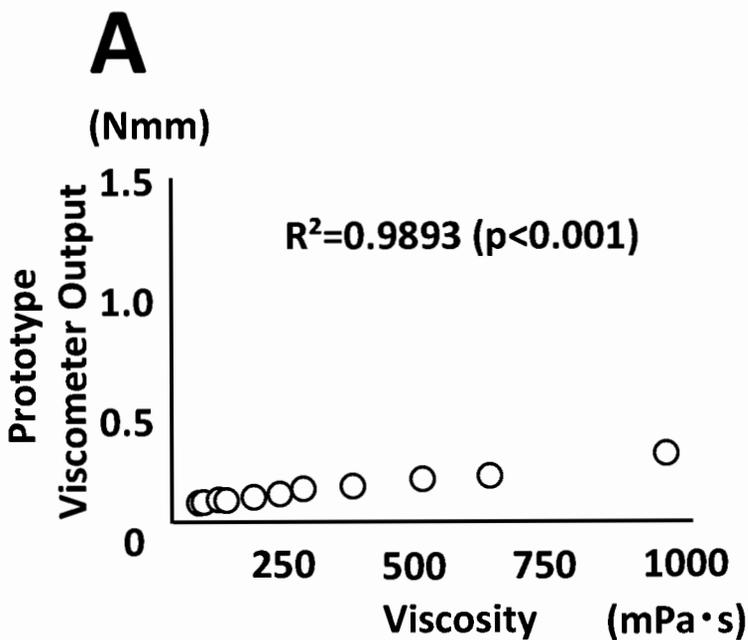
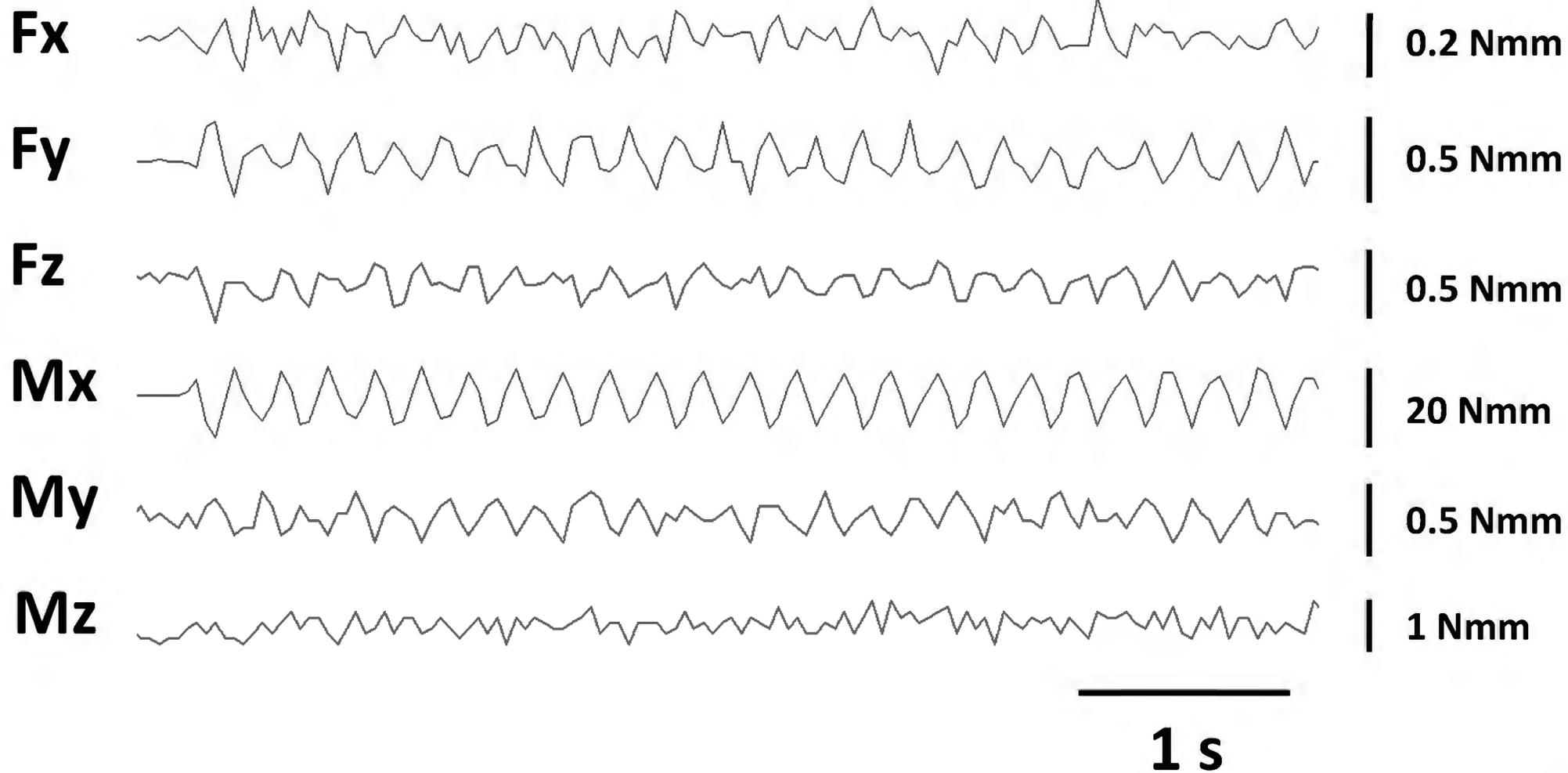
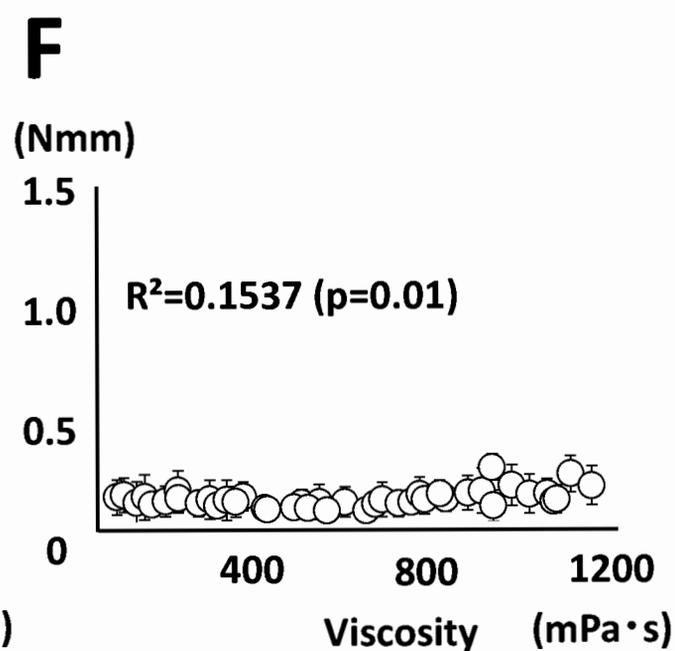
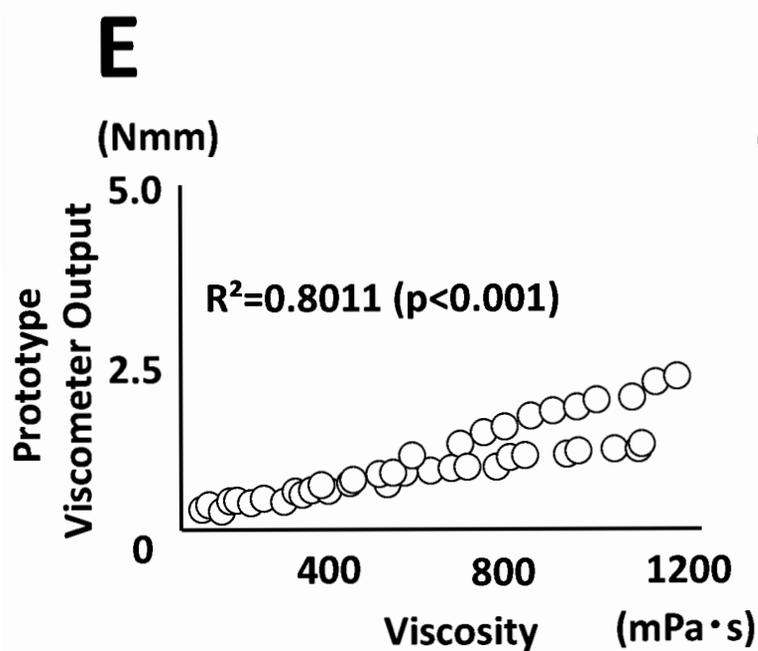
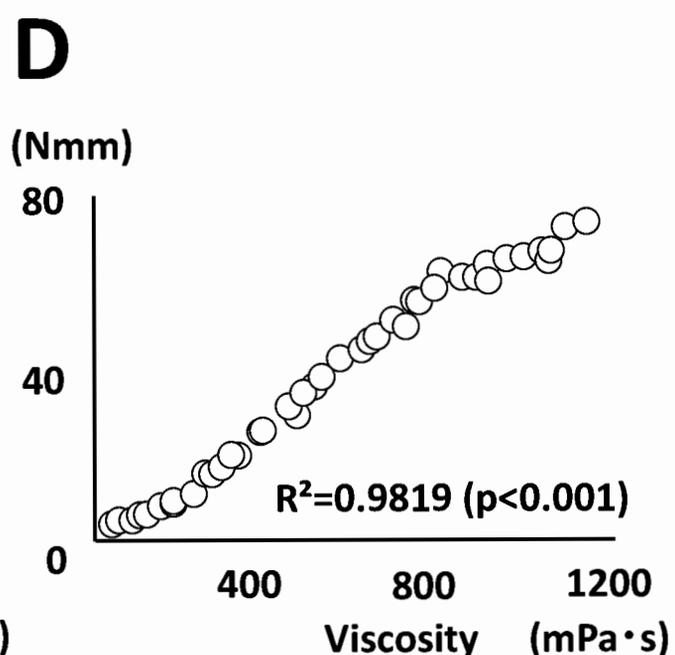
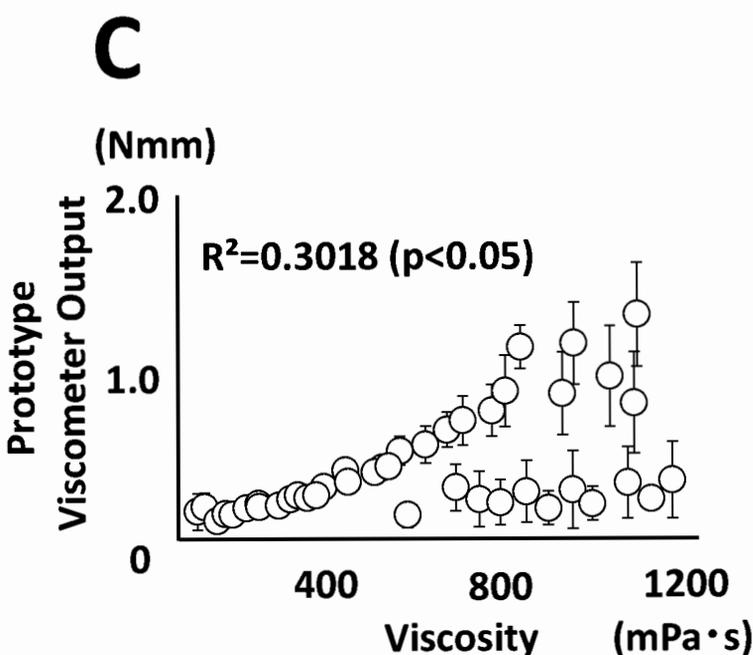
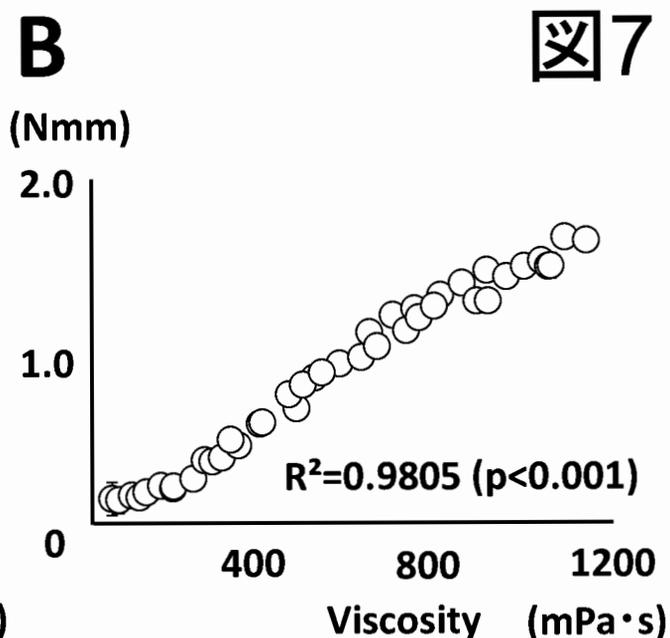
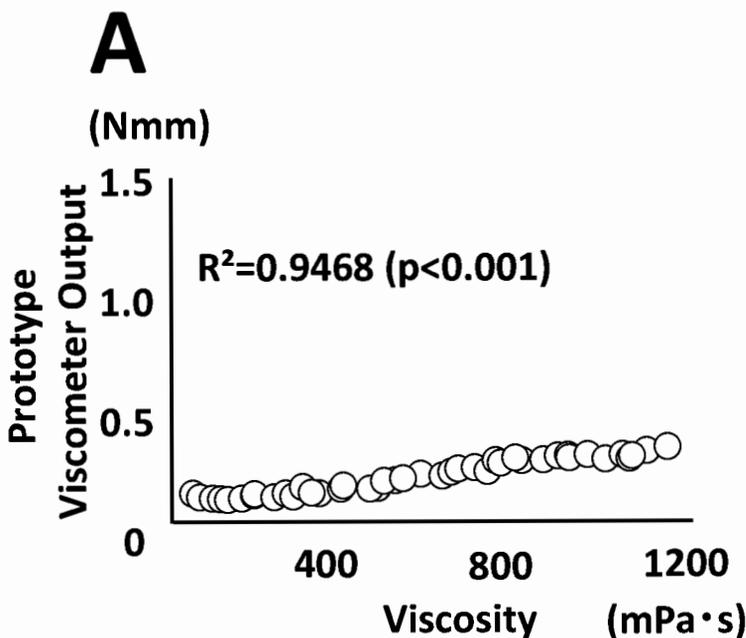
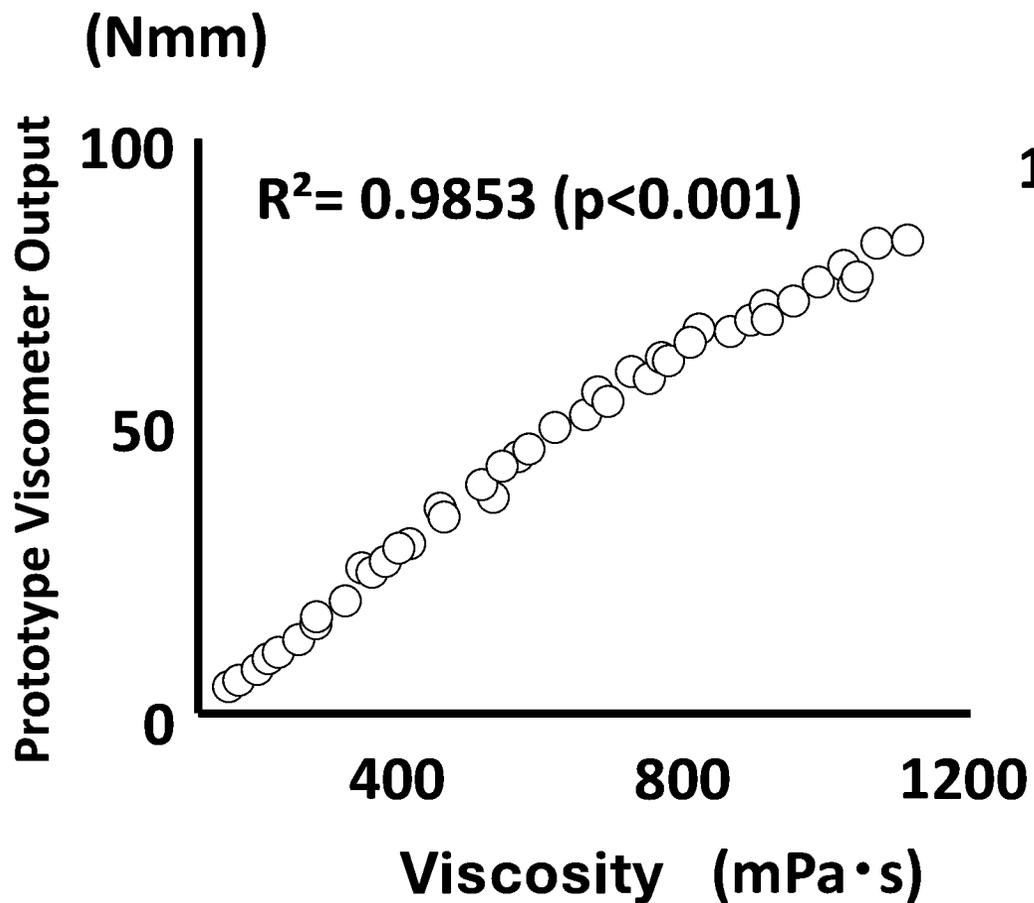


图4







A**B**