

平成29年度 修士論文

力センサの慣性力と粘性力による動的誤差の補正法の開発
～動的誤差補正機能を実装した力センサ測定ソフトウェアの開発～

指導教員 藤井 雄作 教授

群馬大学大学院理工学府 理工学専攻
電子情報・数理教育プログラム

金子 裕太

目次

第1章 序論	1
1.1 研究背景・目的	1
1.2 浮上質量法	4
1.3 レーザードップラー速度計	6
1.4 Zero-crossing Fitting Method (ZFM)	9
1.5 ひずみゲージ式力センサ	11
第2章 S字型ひずみゲージ式力センサの動的誤差測定	12
2.1 実験装置図	12
2.2 データ解析方法	15
2.3 実験結果	18
第3章 S字型ひずみゲージ式力センサの動的誤差補正	21
3.1 動的誤差補正方法	21
3.1.1 動的誤差補正方法 ～慣性力による補正～	23
3.1.2 動的誤差補正方法 ～慣性力と粘性力による補正～	24
3.2 動的誤差補正係数の算出	26
3.3 補正結果	29
3.4 不確かさ	36
3.5 考察	41
第4章 動的誤差補正機能を実装した力センサ測定ソフトウェアの開発	44
4.1 LabVIEW について	44
4.2 開発したソフトウェアについて	45
第5章 結論	48
謝辞	50
参考文献	51

第1章 序論

1.1 研究背景・目的

力センサは、力の大きさを測定するために幅広い用途や分野で利用されている。例えば、産業・研究分野においては、オートメーション製造装置におけるプロセスモニタリングや、材料試験・衝突破壊試験・動的応答試験などの各種試験に利用されている。

力センサの校正法としては、静的な荷重を用いて測定された力を比較する静的校正法が確立されている。しかし、動的な力、すなわち時間的に変化する力に対する校正法は確立されていないため、動的な力を測定した際に生じる誤差を評価することができないのが現状である。これは、産業、研究分野において大きなマイナス要因となっており、早急な動的な力の校正法の確立[1]および力センサの誤差補正方法の確立が求められている。

そこで、本研究室では浮上質量法 (Levitation Mass Method : LMM) を用いた、動的な力の校正法および誤差補正法の提案をしている[2-4]。浮上質量法とは、浮上支持した物体に働く慣性力を光波干渉計を用いて高精度に測定する、動的な力の発生・計測方法である。浮上質量法により測定した力と力センサを用いて測定した力を比較することで力センサの特性および動的誤差を測定することが可能である。この結果より導出した動的誤差係数を用いて、力センサの動的誤差補正を行うことができる。浮上質量法については次節で詳しく述べる。

これまでの研究により、力センサの動的誤差は力センサ自体の慣性質量に起因する慣性力による影響が主な要因であることが分かっている[5-7]。また、実

験で求めた動的補正係数は、同型の力センサであれば個体によらず有効であることも分かっている[8]。そのため、使用する力センサの動的誤差係数が事前に求められていれば、動的誤差を補正し正確度の高い値を得ることが可能である。さらに、力センサ自身に働く粘性力も動的誤差の要因であり、慣性力と粘性力による補正を行うことで、より正確度の高い測定が可能であると分かった[9]。しかし、力センサに働く慣性力と粘性力を考慮した補正法では、これまで一定条件下においての検証しかされていないため、より様々な条件下での補正効果を検証し、誤差補正が可能な範囲を確かめる必要がある。

また、本研究室では、力センサの動的誤差補正ソフトウェアを開発してきた。このソフトウェアは事前に浮上質量法を用いた実験により求めた動的誤差係数を入力し、力センサからの出力データファイルを読み込ませると動的誤差を補正したデータを出力するソフトウェアである。これにより、特殊な測定機器などを使用しなくとも容易に動的誤差を補正したデータを取得することが可能となる。しかし、これまでのソフトウェアでは、力センサを利用した測定装置から出力ファイルを取得後、改めて補正ソフトウェアを立ち上げてデータを読み込ませ、補正したデータを取得するという作業が必要で、非常に手間の掛かるものである。また、慣性力のみ考慮した補正しかすることができない。そのため、より実用的なソフトウェアにするためには、力センサによる測定と同時に慣性力および粘性力による補正を行い、正確度の高いデータを出力する測定ソフトウェアが求められる。

そこで、本研究では、力センサの慣性力と粘性力による動的誤差補正法における、衝突時間の異なる条件下での補正効果の検証、および動的誤差補正機能を実装した力センサ測定ソフトウェアの開発を行う。

浮上質量法を用いて力センサに発生する動的誤差を測定することで、力センサの慣性力と粘性力の影響を考慮した動的誤差係数を求め、衝突時間を変化させた場合でも動的誤差の補正効果があるかを検証する。また、より実用的で容易に、正確度の高い測定を行うことができる力センサ測定ソフトウェアを開発する。このソフトウェアは、ユーザーが利用する力センサの動的誤差係数を入力するだけで、測定と同時に、動的誤差を補正したデータを取得することができるものである。これにより、これまでの動的誤差補正ソフトウェアで必要とされた手間を掛けることなく、容易に正確度の高いデータを得ることが可能となる。将来的には、このソフトウェアを配布することで、産業・研究分野の発展に貢献することができると考えられる。

1.2 浮上質量法

この節では、浮上質量法 (Levitation Mass Method: LMM) について、詳しく述べる。浮上質量法とは、本研究室が提案する動的な力の発生および計測方法である。浮上質量法では、空気の圧力によって質量 M の剛体を浮上支持し剛体に作用する慣性力を、光波干渉計を用いて高精度に測定することができる。

浮上質量法の概略図を Fig.1 に示す。本研究室では、剛体を浮上支持するため静圧空気軸受けを用いている。静圧空気軸受けは、外部のコンプレッサーからの圧縮空気によりできる数 μm の空気層により可動部を浮上支持している。これにより、高精度な運動特性と無視できるほどの小さな摩擦特性を実現している [10]。

剛体に働く摩擦力を無視することができると仮定すると、浮上支持した剛体に働く動的な力 F は、式(1-1)に示すように、運動方程式より質量 M と物体の加速度 a の積で求めることができる。

$$F = Ma \quad (1-1)$$

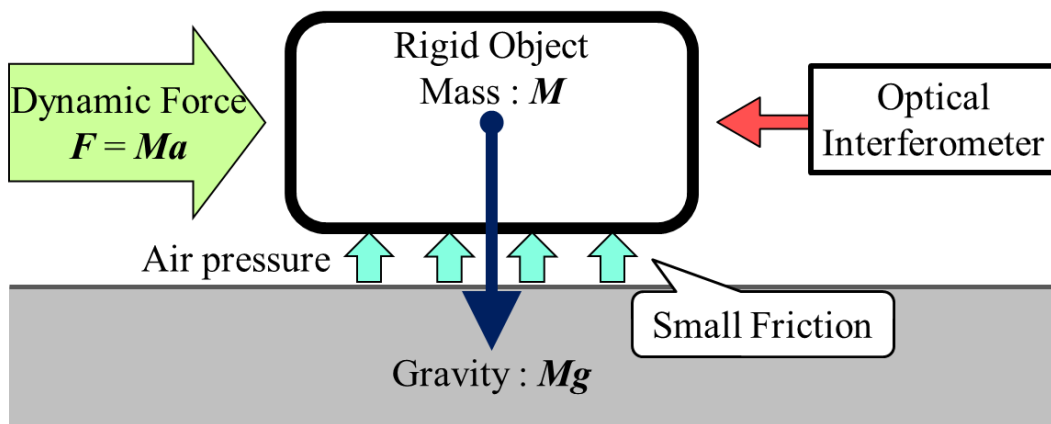


Fig. 1 浮上質量法の概略図

浮上質量法では、実験において測定するのは、浮上支持した剛体に取り付けられているコーナーキューブプリズム(Cube-Corner Prism: CC)から反射されるレーザーのドップラーシフト周波数 f_{doppler} のみである。ドップラーシフト周波数 f_{doppler} とは、剛体が動いたときのドップラー効果により変化した、レーザーの周波数の変化分である。ドップラーシフト周波数 f_{doppler} は、浮上支持した剛体の速度 v に比例するので、レーザーの波長 λ_{air} との積より求めることができる。

加速度 a は、速度 v の時間微分より求めることができる。

$$a = dv / dt \quad (1-2)$$

変位 x は、速度 v の時間積分より求めることができる。

$$x = \int v dt \quad (1-3)$$

可動部の慣性力 F は、質量 M と加速度 a の積より求めることができる。

$$F = Ma \quad (1-4)$$

質量を正確に測定する技術は確立されているため、質量 M は正確な値を得ることができる。また、ドップラーシフト周波数 f_{doppler} は、光波干渉計を用いて高精度に測定することができる。よって、数値計算により剛体に働く速度 v 、変位 x 、加速度 a 、動的な力 F を高精度かつ同期されたデータとして測定することができる。

浮上質量法は、超高精度材料試験法として、粘弾性試験法や動的 3 点曲げ試験法などの開発[11-12]や、マイクロフォース領域における材料試験法の開発[13]などに応用されている。

1.3 レーザードップラー速度計

この節では、浮上質量法において、浮上支持した剛体（可動部）の速度を求めするために利用されるレーザードップラー速度計について詳しく述べる。レーザードップラー速度計は、光波干渉計を用いた速度測定方法である。被測定物からの反射光に対して、僅かに周波数の異なる光を干渉させて、ビート信号を検出するヘテロダイン干渉法を用いる。Fig.2 に、レーザードップラー速度計の模式図を示す。

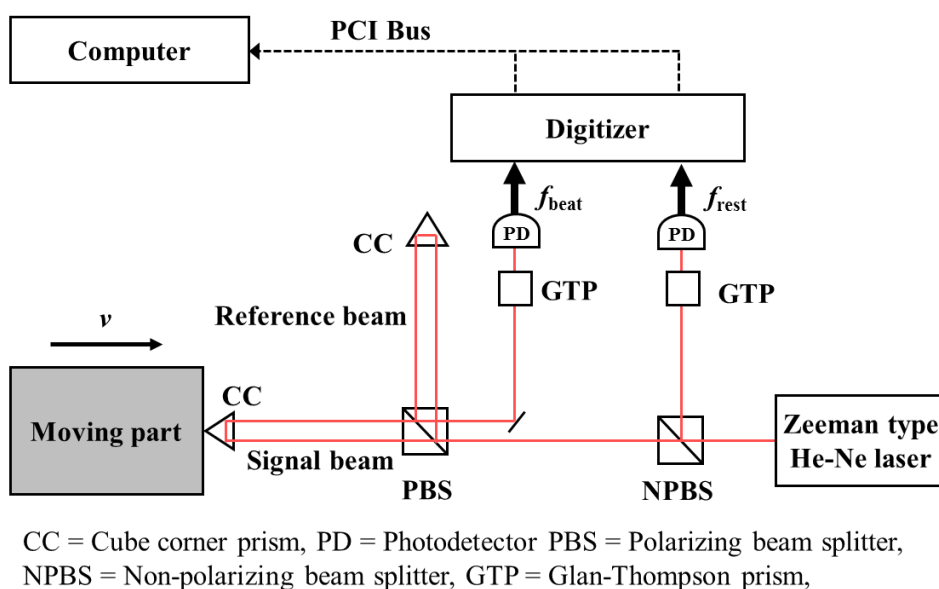


Fig. 2 レーザードップラー速度計の概略図

ヘテロダイン干渉計で用いられる 2 つレーザー光の振幅を U_1 , U_2 , 周波数を f_1 , f_2 , 位相を φ_1 , φ_2 , とすると時刻 t での 2 つのレーザー光の電界はそれぞれ次のように表される。

$$E_1(t) = U_1 \exp\{i[2\pi f_1(t) + \varphi_1]\} \quad (1-5)$$

$$E_2(t) = U_2 \exp\{i[2\pi f_2(t) + \varphi_2]\} \quad (1-6)$$

また、これら2つの光を検出器上で重ね合わせると、光の強度は以下で表される。

$$\begin{aligned} I(t) &= |E_1(t) + E_2(t)|^2 \\ &= U_1^2 + U_2^2 + U_1 U_2 \cos\{2\pi[f_1 - f_2]t + [\phi_1 - \phi_2]\} \end{aligned} \quad (1-7)$$

式(1-7)より、光の強度は周期的に変化することが分かる。通常、光の周波数を検出することはできないが、ヘテロダイン干渉法を用いることにより、間接的に周波数差 $|f_1 - f_2|$ を光の強度変化から求めることができる。

使用する光波干渉計は、マイケルソン型光波干渉計の装置を一部変更したもので、可動部の動きを測定するための装置としてミラーではなくコーナーキューブプリズム(Cube-Corner Prism: CC)を用いて、入射光に対し平行に反射光が戻るようにしている。光源には、ゼーマンタイプ二周波ヘリウムネオンレーザーを用いる。これは2つの異なる周波数を持つ直交偏光のレーザー光を出力する。光源から射出されたレーザー光は、まず無偏光ビームスプリッタ(Non-Polarizing Beam Splitter: NPBS)により透過光および反射光に二分される。反射光は、グラントムソンプリズム(Glan-Thompson Prism: GTP)に入射し、偏光が合わせられ干渉する。この干渉によって、2つの光の周波数差と等しい周波数の光強度の変動が生じる。このときの周波数を、基準周波数 f_{rest} とする。もう一方の透過光は、偏光ビームスプリッタ(Polarizing Beam Splitter: PBS)に入射し、偏光に応じて参照光(Signal beam)と信号光(Reference beam)に分けられる。参照光は定盤上に固定されたCCによって、信号光は軸受けの可動部に取り付けられたCCによってそれぞれ反射され、再びPBSを通りGTPに入射する。GTPに入射した各レーザー光は、

偏光が合わせられ干渉する。可動部が動いている場合、ドップラー効果によって信号光の周波数は変化する。このときの信号光と参照光の差周波数を、ビート周波数 f_{beat} とする。可動部が静止している場合、ビート周波数 f_{beat} は基準周波数 f_{rest} と等しくなる。

干渉により生じた強度の変動(干渉縞の明暗)はフォトディテクタ (Photodetector: PD)により電圧信号に変換され、デジタイザによりコンピュータに保存される。測定された電圧信号から、本研究室が提案する周波数推定方法である Zero-crossing Fitting Method (ZFM)[14]を用いて周波数を求める。ZFMについては次節で詳しく述べる。

光源から出力されたレーザー光の差周波数を基準周波数 f_{rest} とし、可動部が動いてドップラーシフトしたときの信号光と参照光の差周波数をビート周波数 f_{beat} とするとき、ドップラーシフト周波数 f_{doppler} は、 f_{rest} 、 f_{beat} を用いて式(1-5)で表される。

$$f_{\text{doppler}} = -(f_{\text{beat}} - f_{\text{rest}}) \quad (1-8)$$

ドップラーシフト周波数 f_{doppler} が求まると、以下の計算より、可動部の速度や加速度、変位、慣性力を求めることができる。

可動部の速度 v [m/s]は、ドップラーシフト周波数 f_{doppler} および He-Ne レーザーの波長 λ_{air} より求めることができる。

$$v = \lambda_{\text{air}} (f_{\text{doppler}}) / 2 \quad (1-9)$$

1.4 Zero-crossing Fitting Method (ZFM)

Zero-crossing Fitting Method (ZFM)とは、当研究室が提案する周波数推定方法である。ZFMを用いることで、時間分解能を犠牲にすることなく周波数分解能を向上させることができるため、一般的に利用される商用の周波数カウンタよりも、高精度・高サンプリングレートでの周波数測定が可能となる。

Fig.3 にデジタルで測定された電圧信号波形を示す。

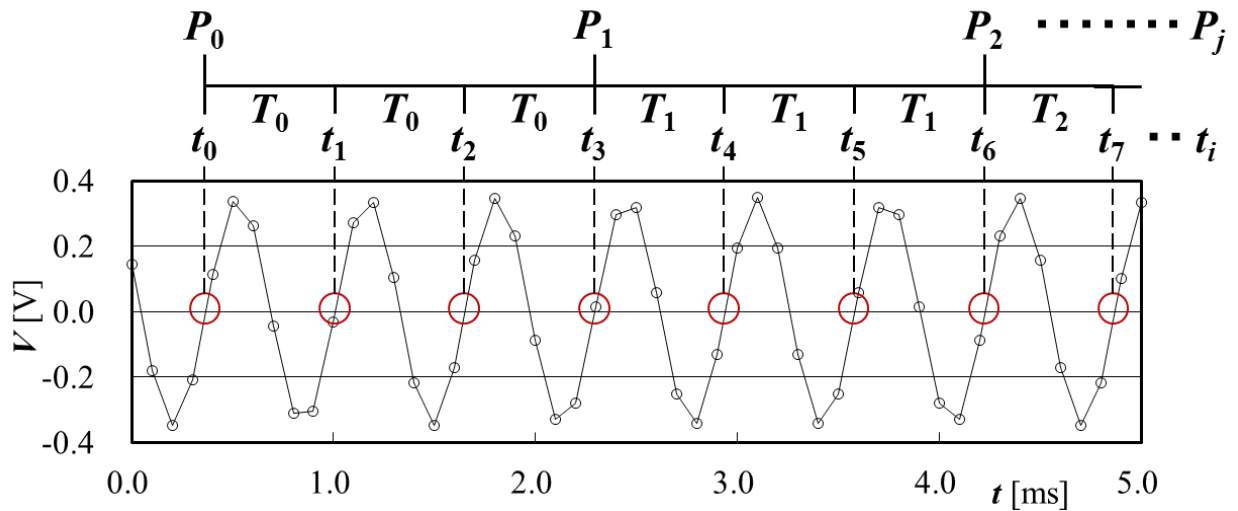


Fig. 3 デジタルで測定された電圧信号波形

ZFM では、デジタルにより取得された電圧信号から周波数を計算するために、Fig.3 の赤い丸で示した電圧値がゼロになる点(ゼロクロス点)およびその時刻(ゼロクロス時刻)を求める。ゼロクロス点は、電圧値が負から正になる 2 点について線形補間を行い求める。ここで、 i 番目のゼロクロス時刻を t_i ($i=0,1,2,3,\dots$) とする。次に、ゼロクロス時刻を任意に定めた N 個ごとの群とし、それを群数列として番号 j ($j=0,1,2,3,\dots$) を割り振る。ただし、最後の群の中のゼロクロス時刻が N 個に満たない場合、最後の群数列は除外する。

j 番目の群数列における等間隔の時間を T_j とし、その群が始まった時の時刻を P_j とすると、実際の時刻 t_i との差の二乗和 $C_j(T_j, P_j)$ は、次式で表される。

$$C_j(T_j, P_j) = \sum_{i=0}^{N-1} [t_{i+j(N-1)} - (iT_j + P_j)]^2 \quad (1-10)$$

この $C_j(T_j, P_j)$ を、最小二乗法を用いて最小にする。このときの T_j , P_j はそれぞれ次式で表される。

$$T_j = \frac{N \sum_{i=0}^{N-1} i t_{i+j(N-1)} - \sum_{i=0}^{N-1} i \sum_{i=0}^{N-1} t_{i+j(N-1)}}{N \sum_{i=0}^{N-1} i^2 - \left(\sum_{i=0}^{N-1} i \right)^2} \quad (1-11)$$

$$P_j = \frac{\sum_{i=0}^{N-1} i^2 \sum_{i=0}^{N-1} t_{i+j(N-1)} - \sum_{i=0}^{N-1} i t_{i+j(N-1)} \sum_{i=0}^{N-1} i}{N \sum_{i=0}^{N-1} i^2 - \left(\sum_{i=0}^{N-1} i \right)^2} \quad (1-12)$$

この T_j , P_j を用いて、 j 番目の群数列における中心時刻 τ_j を求めると、次式のように表される。

$$\tau_j = \left(\frac{N-1}{2} \right) T_j + P_j \quad (1-13)$$

このときの周波数 f_j は、 T_j の逆数より求められ、次式のように表される。

$$f_j = \frac{1}{T_j} \quad (1-14)$$

このようにして、時刻 τ_j のときの周波数 f_j を求めることが可能となる。

ゼロクロス点の数が N 個ごとにひとつの周波数が求まるため、一般的にこの N が大きいほど求まる周波数はノイズに強くなるが、時間分解能は悪くなる。

前節で述べた周波数 f_{rest} , f_{beat} は、この手法により求められる。

1.5 ひずみゲージ式力センサ

力センサは、力の大きさを電気信号に変換する変換器である。その構造や測定原理により様々な種類(圧電式、光ファイバ式など)があるが、今回の実験で使用するのは、ひずみゲージ式力センサである。

ひずみゲージ式力センサは、力に比例して変形する起歪体と、その変形量であるひずみを測定するひずみゲージから構成される。ひずみゲージは、薄い電気絶縁物のベースの上に、抵抗体（金属線またはエッチングされた金属箔、半導体など）が形成されたものである。ひずみゲージは起歪体に固定され、力センサが力を受けたとき起歪体と同じように変形する。ひずみゲージが変形するとき、抵抗体の伸縮により電気抵抗が変化する。この電気抵抗を測定することによりひずみを求めることができる。このときの電気抵抗の変化は非常に小さいため、一般的にはホイートストンブリッジ回路を組み、電気抵抗の変化を測定する。このホイートストンブリッジに電圧を印加したとき、ひずみに比例した電圧 V [V]が出力される。この電圧 V [V]と静的校正係数 K との積で力センサに作用する力 F_{trans} [N]を求める。

ひずみゲージ式力センサは以下のような点で優れている。(1)温度変化の影響が小さい。(2)出力が電気信号なので、コンピュータによるデータ処理や記録が容易である。(3)構造が簡単で、比較的安価である。(4)可動部や摩擦部分がないので、保守が容易で長寿命である。

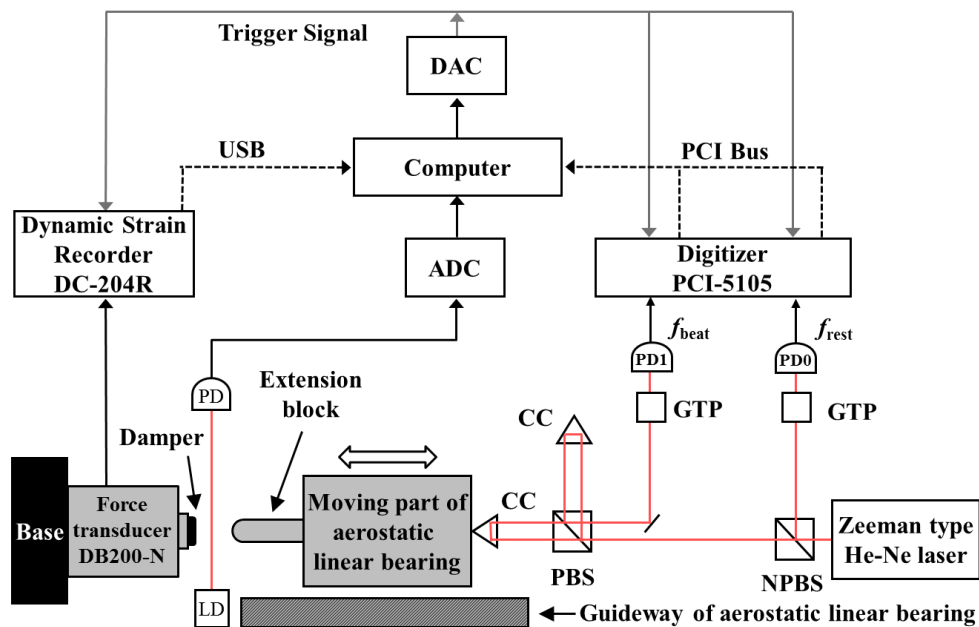
以上のような理由により、ひずみゲージ式力センサは産業・研究分野など様々な場所において利用されている。

第2章 S字型ひずみゲージ式力センサの動的誤差測定

2.1 実験装置図

第2章では、S字型ひずみゲージ式力センサの動的誤差測定を行う。

実験装置の概略図を Fig.4 に示す。実験装置は、前述のレーザードップラー速度計と S 字型ひずみゲージ式力センサ、セラミック製静圧空気軸受けで構成される。



CC = cube corner prism, PBS = polarizing beam splitter, NPBS = non-polarizing beam splitter,
GTP = Glan-Thompson prism, PD = photodetector, LD = laser diode, ADC = analog-to-digital converter,
DAC = digital-to-analog converter.

Fig. 4 実験装置の概略図

デジタイザは National Instruments 製 NI PCI-5105 を使用している。このデジタイザは、 PD_0 および PD_1 で検出される電圧信号を 8 ビットの分解能、30 [MHz] のサンプリングレートで計測を行う。本実験において、光源として用いられる

ゼーマンタイプ二周波ヘリウムネオンレーザーの波長は $\lambda_{\text{air}} = 6.33 \times 10^{-7}$ [m]であり、2周波数の差である基準周波数 f_{rest} は約 2.73 [MHz]である。

本実験では、浮上支持する剛体として静圧空気軸受の可動部を用いている。使用した静圧空気軸受は、セラミック製静圧空気軸受け（TOTO 社製 VAPB510AY）である。このセラミック製静圧空気軸受けは、主に可動部(Moving part)とガイドウェイで構成される。エクステンションブロックおよびコーナーキューブプリズムを含む可動部全体の質量は $M = 2.653$ [kg]であった。

また、Fig.5 に本実験で使用される力センサ DB-200N（昭和測器社製）を示す。(a)はカバーが付いた状態、(b)がカバーを外した状態の写真である。

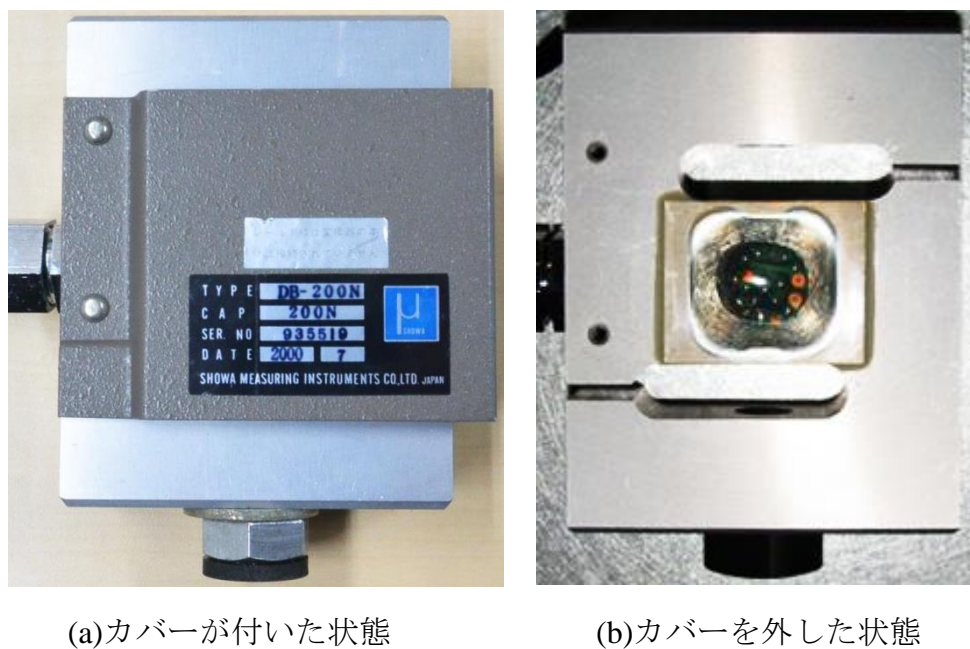


Fig. 5 DB-200N (昭和測器社製)の外観図

DB-200N は S 字型ひずみゲージ式力センサであり、S 字の形状をしている。材質はアルミで、定格容量は 200 [N]である。力センサはベース部に固定されて

いる。また、動ひずみレコーダ(東京測器研究所社製 DC-204R)を使用し、力センサのひずみ量を検出し電気信号に変換しコンピュータに保存する。

力センサと静圧空気軸受けの可動部との間には、レーザーダイオード(Laser Diode: LD)と PD により構成される光スイッチが取り付けられている。可動部が光スイッチのレーザー光を遮ると、その情報はアナログデジタルコンバータ(Analog-Digital converter : ADC)を経由しコンピュータに伝えられ、トリガー信号がデジタルアナログコンバータ(Digital- Analog converter : DAC)を通して、デジタル化と動ひずみレコーダに同時に入力される。このトリガー信号を受け取った瞬間から測定を開始する。

本実験では、衝突時間を変えるために4種類のダンパーを使用している。Fig.6に使用したダンパーを示す。ダンパーAはセロファンテープを10枚重ねたもの、ダンパーBは1 [mm]のゴム製ダンパー、ダンパーCは2 [mm]のゴム製ダンパー(1 [mm]のゴム製ダンパーを2枚重ねたもの)、ダンパーDは3 [mm]のゴム製ダンパーである。

実験では、手動で初速を与えた可動部を力センサに衝突させ、そのとき生じる力を測定する。測定は、各ダンパーでそれぞれ10回ずつ行った。



Fig. 6 使用したダンパー(左からダンパーA,ダンパーB,ダンパーC,ダンパーD)

2.2 データ解析方法

この節では、実験によって得られたデータから可動部に作用する力の解析手順を述べる。

Fig.7 に、干渉計およびデジタルイザを用いて測定された電圧信号から前述の ZFM を用いて求めた周波数、 f_{beat} [MHz]と f_{rest} [MHz]を示す。ZFM においては、 $N=400$ で周波数を求めた。

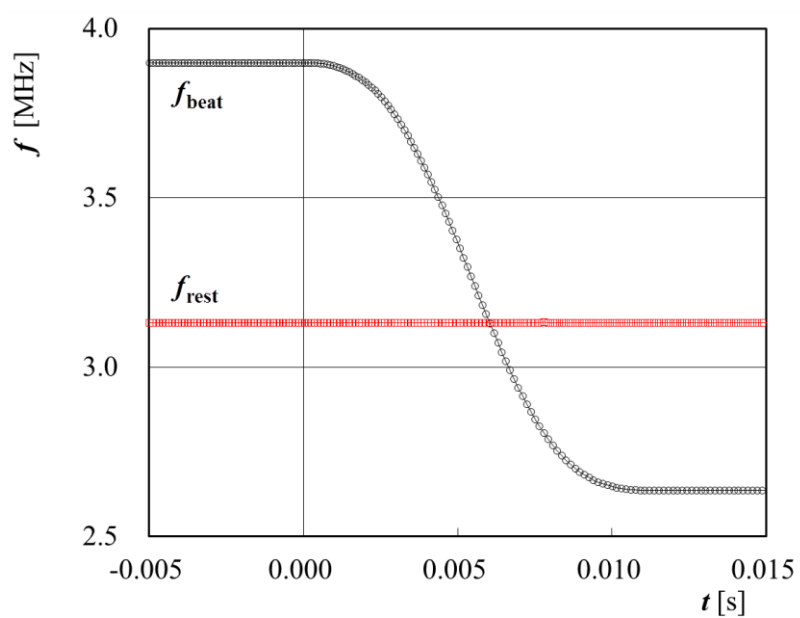


Fig.7 干渉計で測定した周波数、 f_{beat} [MHz]と f_{rest} [MHz]

また, Fig.8 に, 式(1-9)を用いて求めた可動部の速度 v [m/s]を示す. 初速を与えた方向と反対方向を正としている.

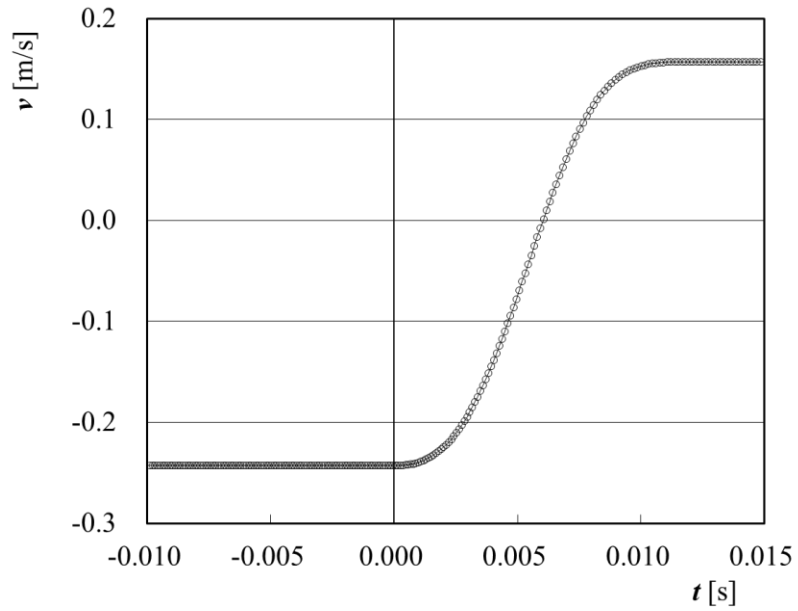


Fig. 8 速度 v [m/s]

Fig.9 に, 速度を時間微分して求めた, 加速度 a [m/s²]を示す.

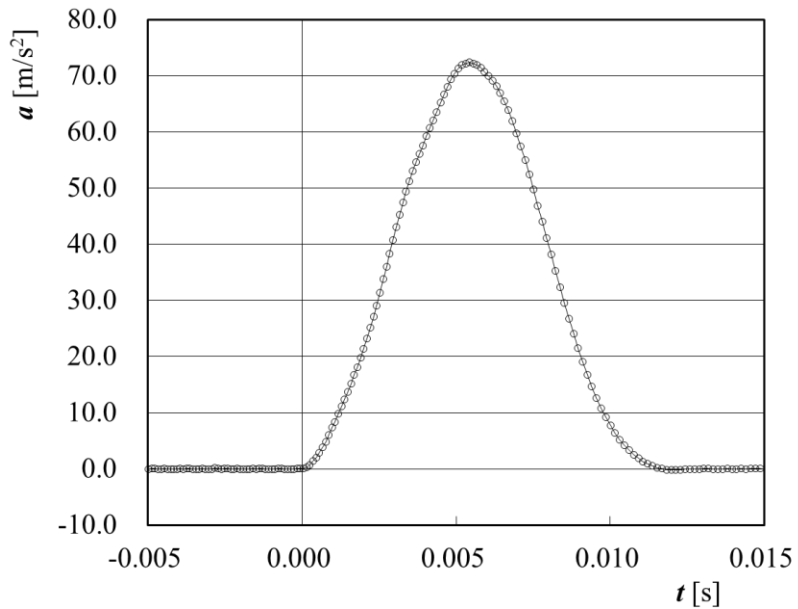


Fig. 9 加速度 a [m/s²]

Fig.10 に、加速度 a [m/s²] に質量 M [kg] を掛けて求めた、可動部に働く慣性力 F_{mass} [N] を示す。

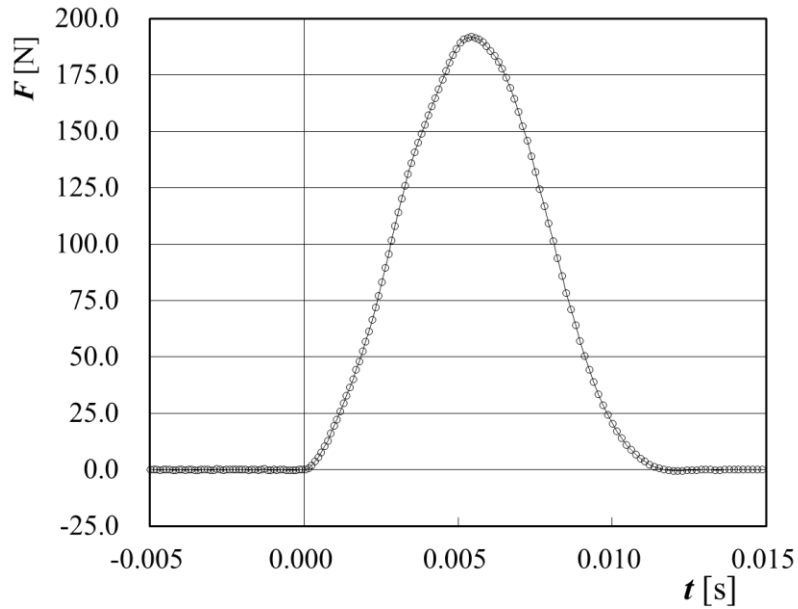


Fig. 10 可動部に働く慣性力 F_{mass} [N]

次に、力センサから得られた力 F_{trans} [N] を求める解析手順を解説する。

力センサによる測定では、力センサが力を受けたときに生じるひずみに比例した電圧 V [V] を動ひずみレコーダで測定する。この電圧 V [V] と静的校正係数 K との積で力センサに作用する力 F_{trans} [N] を求める。なお、ZFM と動ひずみレコーダはサンプリング間隔が異なるため、 F_{trans} [N] の値を線形補間することによって時間軸を合わせている。

力センサを用いて測定した力 F_{trans} [N] と、LMM を用いて測定した力 F_{mass} [N] とを比較し、力センサの動的特性評価を行う。

2.3 実験結果

実験によって得られた各ダンパーにおける測定結果を Fig.11 に示す. 各ダンパーにおいて 10 回ずつ測定を行い, そのうち最大値が 200[N]に近い結果を示している. F_{diff} [N]は, カセンサで測定した力 F_{trans} [N]と浮上質量法を用いて高精度に測定した力 F_{mass} [N]の差であり, カセンサに発生する動的誤差である.

$$F_{\text{diff}} = F_{\text{trans}} - F_{\text{mass}} \quad (2-1)$$

Fig.11 (a)~(d)の青のプロットで示すように, 全てのダンパー使用時において動的誤差 F_{diff} [N]が生じていることが確認できる. 各ダンパーにおける, その他の9回についても同様の結果が得られた. 次章では, この動的誤差を補正し, その効果を確認する. また, Fig.11 (a)では, 衝突によって発生した微細な振動が, LMM により測定されている. この振動は, 衝突によってカセンサに生じる応力波の多重反射の影響であると考えられる.

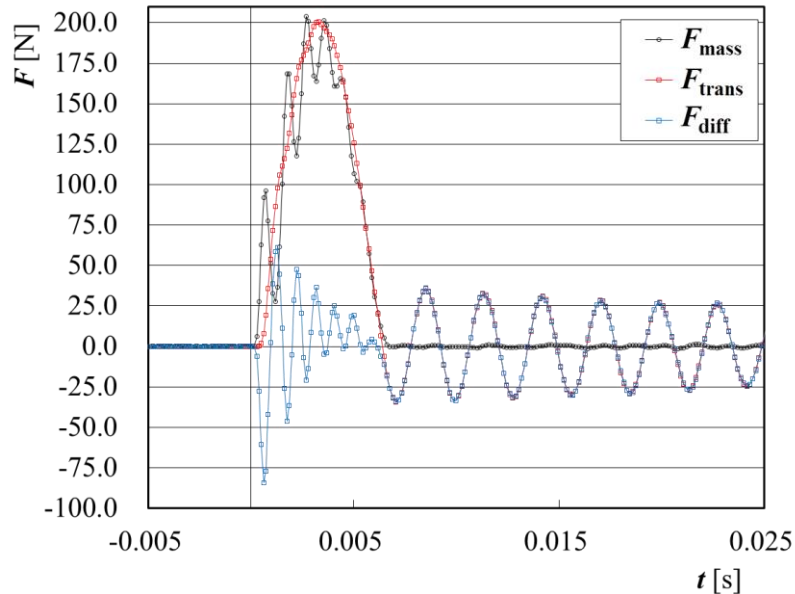


Fig. 11 (a) 時間に対する F_{trans} , F_{mass} , F_{diff} [N] (ダンパーA)

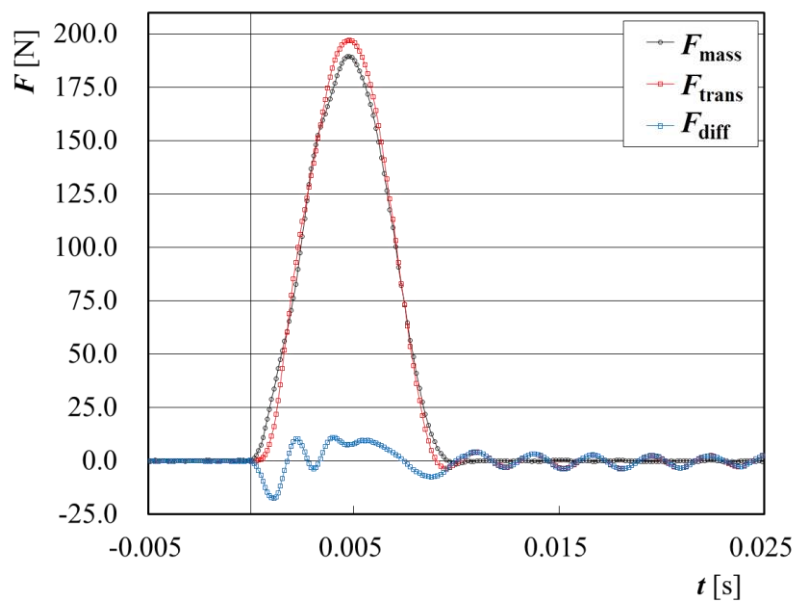


Fig. 11 (b) 時間に対する F_{trans} , F_{mass} , F_{diff} [N] (ダンパーB)

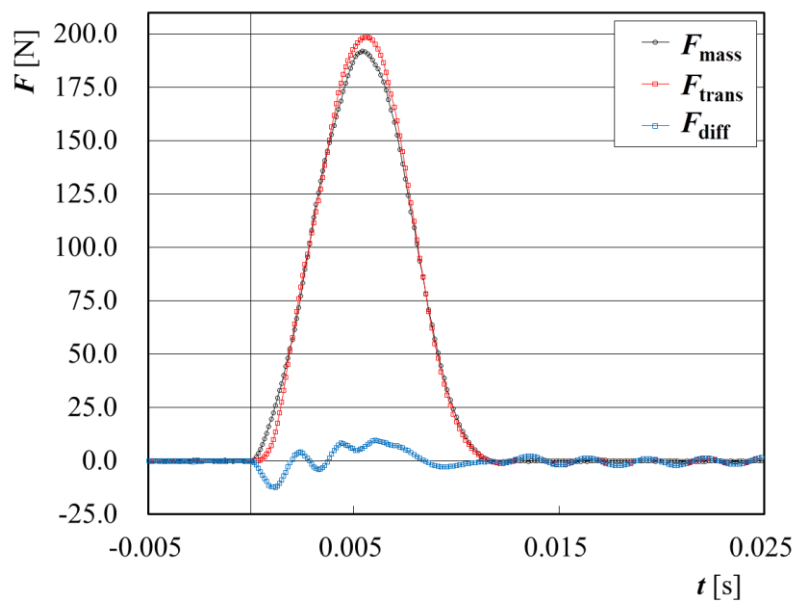


Fig. 11 (c) 時間に対する F_{trans} , F_{mass} , F_{diff} [N] (ダンパーC)

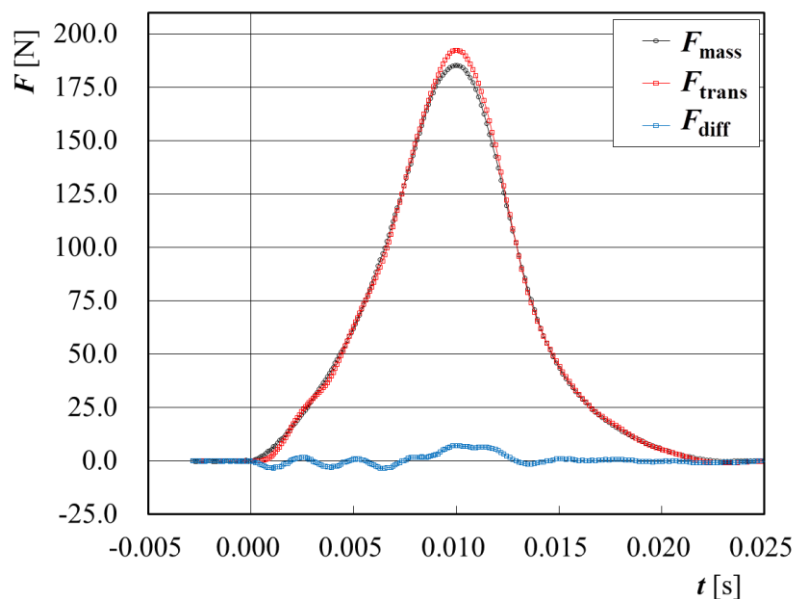


Fig. 11 (d) 時間に対する F_{trans} , F_{mass} , F_{diff} [N] (ダンパーD)

Fig.12 に、各ダンパーにおける、測定された力の半値全幅 **FWHM**(Full Width at Half Maximum) [ms]と力センサで測定した力の最大値 $F_{\text{trans,max}}$ [N]との関係を示す。図より、ダンパーを変更することで、衝突時間(パルス幅)を約 4 [ms]から 16 [ms]にわたって変更できていることが確認できる。

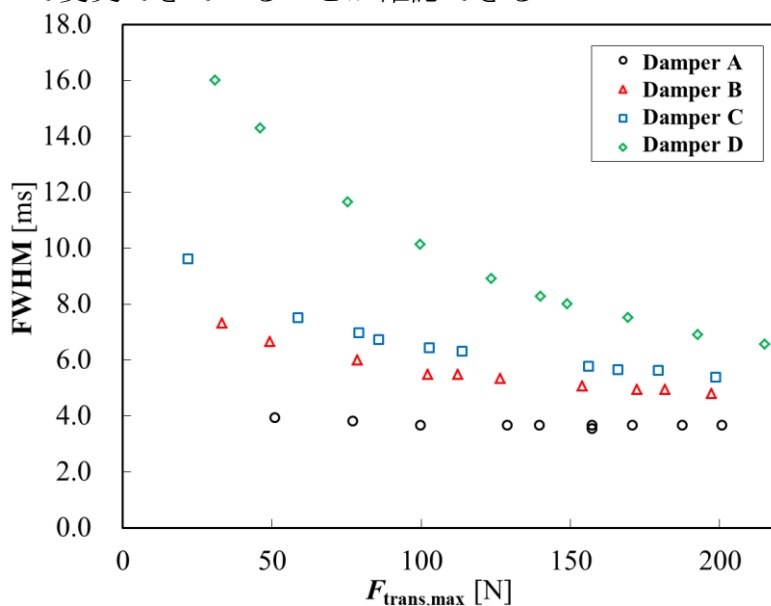


Fig. 12 各実験の衝突時間(パルス幅)

第3章 S字型ひずみゲージ式力センサの動的誤差補正

3.1 動的誤差補正方法

Fig. 11の青色でプロットされたデータで示すように、静的校正係数 K を用いて校正された力 F_{trans} [N]と浮上質量法を用いて高精度に測定した力 F_{mass} [N]には動的誤差 F_{diff} [N]が存在する。この動的誤差を補正する方法について述べる。

Fig.13にS字型ひずみゲージ式力センサの模式図を示す。

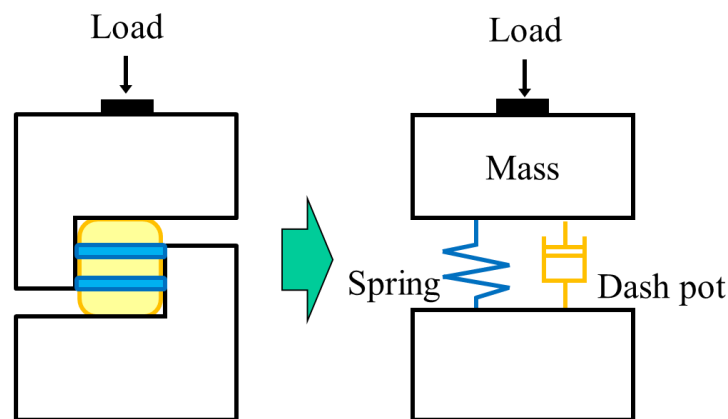


Fig. 13 カセンサの模式図

S字型ひずみゲージ式力センサは、2つの剛体がリーフスプリング繋がった構造であると考えることができる。S字型ひずみゲージ式力センサは、前章で述べた通り、受けた力に比例して起歪体が変形する。静的な力を受けている場合この変形は問題ないが、動的な力を受けた場合、変形により移動する感受部側の剛体にその質量による慣性力が生じる。また、ひずみゲージが取り付けられている部分は、ゲル状の樹脂で覆われているため、力センサが変形した際にダッシュポットとして働き、粘性力が生じていると考えられる。よって、力センサの構造は、質量・バネ・ダンパー系とすることができ、力センサ自身に生じる

慣性力と粘性力が誤差要因であると考えられる．本研究ではこの仮定のもと，誤差補正を行う．

力センサに働く慣性力は，変形により移動する感受部の質量 $M_{\text{estimated}}$ [kg] と力センサの加速度 a_{trans} [m/s²] との積により求められる．また，粘性力は，速度の反対方向に働き速度に比例するため，粘性係数 c と速度 v_{trans} [m/s] の積より求められる．求めた慣性力と粘性力を力センサの出力から引くことにより，動的誤差を補正する．

これまでの研究より，動的誤差は，慣性力による影響が支配的であり，粘性力による影響はそれほど大きくないことが分かっている．そのため，まず慣性力の動的誤差補正係数を求めて補正を行い，次に粘性力の動的誤差補正係数を求めて補正を行う．

3.1.1 では慣性力のみを考慮した補正，3.1.2 では慣性力と粘性力を考慮した補正について詳しく述べる．

3.1.1 動的誤差補正方法 ～慣性力による補正～

まず、もっとも大きな動的誤差要因である慣性力の補正について述べる。前節で述べたように、力センサの出力は起歪体の変形に比例している。力センサの変形した距離を Δx [m]、力センサのばね定数 k と置くと、力センサで測定される力 F_{trans} [N]は次式のような。

$$F_{\text{trans}} = k\Delta x \quad (3-1)$$

ここで、 F_{trans} [N]の二階微分を考えると次のように表される。

$$\frac{d^2 F_{\text{trans}}}{dt^2} = k \left(\frac{d^2 \Delta x}{dt^2} \right) \quad (3-2)$$

このとき、位置の変化の二階微分は加速度であることを考えると、式(3-2)に代入および変形して、力センサの加速度 a_{trans} [m/s²]は次のように表される。

$$\frac{d^2 F_{\text{trans}}}{dt^2} = k a_{\text{trans}} \quad (3-3)$$

$$\therefore a_{\text{trans}} = \frac{1}{k} \frac{d^2 F_{\text{trans}}}{dt^2} \quad (3-4)$$

力センサに働く慣性力 F_{inertia} [N]は、質量 $M_{\text{estimated}}$ [kg]と力センサの加速度 a_{trans} [m/s²]との積により求められる。よって、慣性力 F_{inertia} [N]は以下のように表される。ここで、 $M_{\text{estimated}}/k$ [kg m/N]を慣性力の動的補正係数 C_1 とおく。

$$F_{\text{inertia}} = M_{\text{estimated}} a_{\text{trans}} = C_1 \frac{d^2 F_{\text{trans}}}{dt^2} \quad (3-5)$$

式(3-5)から分かるように、動的補正係数 C_1 が求められれば、力センサ自身の出力 F_{trans} [N]のみで力センサに働く慣性力を算出することができる。よって、次式より力センサに働く慣性力に起因する誤差を補正することができる。

$$F_{\text{corrected1}} = F_{\text{trans}} - C_1 \frac{d^2 F_{\text{trans}}}{dt^2} \quad (3-6)$$

3.1.2 動的誤差補正方法 ～慣性力と粘性力による補正～

次に、慣性力と粘性力による補正について述べる。これまでの研究より慣性力による補正だけでは不十分であり、完全には動的誤差を補正しきれないことが分かっている。そこで、力センサに働く粘性力を求め、さらに補正を行う。

式(3-1)より力センサで測定した力 F_{trans} [N] の一階微分は以下のようなになる。

$$\frac{dF_{\text{trans}}}{dt} = k \left(\frac{d\Delta x}{dt} \right) \quad (3-7)$$

このとき、位置の変化の一階微分が速度であることを考えると力センサの速度 v_{trans} [m/s] は以下のようなになる。

$$\frac{dF_{\text{trans}}}{dt} = kv \quad (3-8)$$

$$v_{\text{trans}} = \frac{1}{k} \frac{dF_{\text{trans}}}{dt} \quad (3-9)$$

粘性力は粘性係数 c と速度 v [m/s] との積より求められる。よって、力センサの粘性力 $F_{\text{viscosity}}$ [N] は以下のように計算することができる。ここで、 c/k を粘性力の動的補正係数 C_2 とおく。

$$F_{\text{viscosity}} = cv_{\text{trans}} = C_2 \frac{dF_{\text{trans}}}{dt} \quad (3-10)$$

式(3-10)から分かるように、動的補正係数 C_2 が求められれば、力センサの出力 F_{trans} [N] からの出力のみで力センサに働く粘性力を算出することができる。

したがって、次式より力センサに働く慣性力と粘性力に起因する誤差を補正することができる。

$$\begin{aligned} F_{\text{corrected2}} &= F_{\text{trans}} - F_{\text{inertia}} - F_{\text{viscosity}} \\ &= F_{\text{trans}} - C_1 \frac{d^2 F_{\text{trans}}}{dt^2} - C_2 \frac{dF_{\text{trans}}}{dt} \end{aligned} \quad (3-11)$$

(3-6)や(3-11)の補正方法ならば、動的補正係数 C_1 , C_2 の値が一度求められれば、それを用いることにより、LMM 等の特殊な装置などを使用しなくても、力センサから得られた測定値のみで動的誤差を補正することが可能となる。

また、慣性力による補正、および慣性力と粘性力の双方による補正をした後の残渣はそれぞれ以下の式で表すこととする。

$$F_{\text{res}} = F_{\text{corrected}} - F_{\text{mass}} , \quad (3-12)$$

$$F_{\text{res2}} = F_{\text{corrected2}} - F_{\text{mass}} . \quad (3-13)$$

3.2 動的誤差補正係数の算出

第2章での実験で得られた結果から動的補正係数 C_1 および C_2 を求める。

まず、慣性力の動的補正係数 C_1 を求める。動的誤差 F_{diff} [N]の主な要因は力センサに働く慣性力 F_{inertia} [N]であると仮定すると、動的補正係数 C_1 は式(3-5)より x 軸に d^2F_{trans}/dt^2 [N/s²], y 軸に F_{diff} [N]としたときの傾きであるといえる。よって、式(3-5)より回帰直線から求めた力センサの慣性力を、次のように表すこととする。

$$F_{\text{reg}} = C_1 \frac{d^2F_{\text{trans}}}{dt^2} \quad (3-14)$$

Fig.14 に d^2F_{trans}/dt^2 [N/s²]と、 F_{diff} [N]の関係を示す。

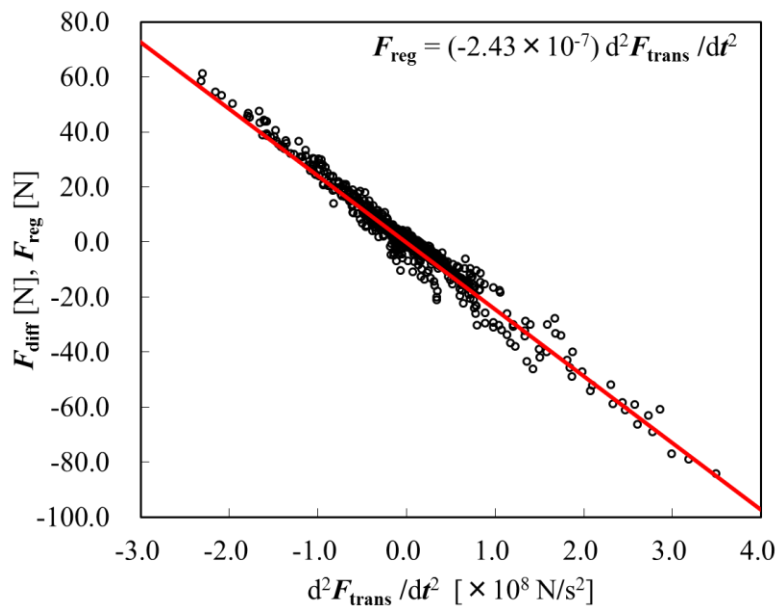


Fig. 14 d^2F_{trans}/dt^2 [N/s²]と F_{diff} [N]の関係

図より、 F_{trans} [N]の二階微分 d^2F_{trans}/dt^2 [N/s²]と動的誤差 F_{diff} [N]は、ほぼ直線状にプロットされるため線形関係にあると言える。4つのダンパーを使用した実験で得たすべてのデータより回帰直線を求めた結果、次式のようにになった。

$$F_{\text{reg}} = -2.43 \times 10^{-7} \frac{d^2 F_{\text{trans}}}{dt^2} \quad (3-15)$$

よって $C_1 = -2.43 \times 10^{-7} [\text{s}^2]$ と求められた。

次に、粘性力の動的補正係数 C_2 を求める。慣性力による補正後の残渣 $F_{\text{diff}} - C_1 d^2 F_{\text{trans}}/dt^2 [\text{N}]$ の主な要因は、力センサに働く粘性力 $F_{\text{viscosity}} [\text{N}]$ によるものであると仮定すると、動的補正係数 C_2 は式(3-10)より x 軸に $dF_{\text{trans}}/dt [\text{N/s}]$, y 軸に $F_{\text{diff}} - C_1 d^2 F_{\text{trans}}/dt^2 [\text{N}]$ としたときの傾きである。よって、式(3-10)より回帰直線から求めた力センサの粘性力を、次のように表すこととする。

$$F_{\text{reg2}} = C_2 \frac{dF_{\text{trans}}}{dt} \quad (3-16)$$

Fig.15 に $dF_{\text{trans}}/dt [\text{N/s}]$ と、 $F_{\text{diff}} - C_1 d^2 F_{\text{trans}}/dt^2 [\text{N}]$ の関係を示す。

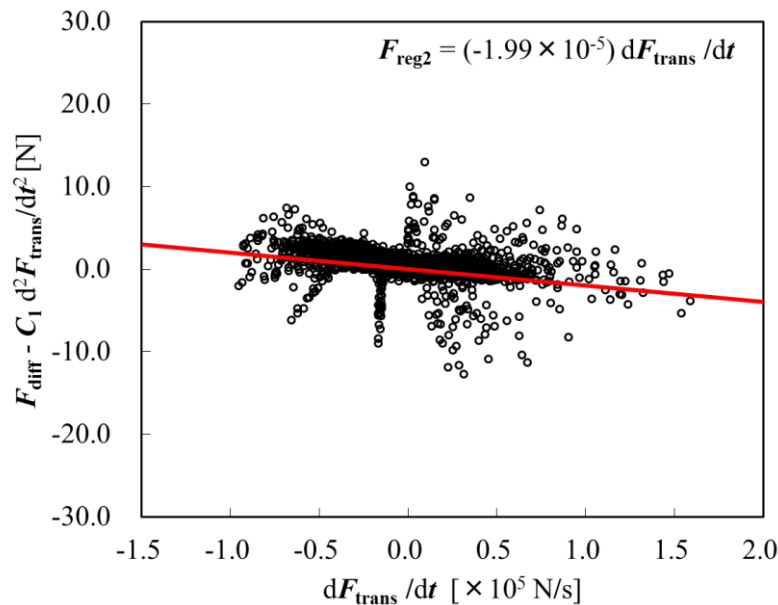


Fig. 15 $dF_{\text{trans}}/dt [\text{N/s}]$ と $F_{\text{diff}} - C_1 d^2 F_{\text{trans}}/dt^2 [\text{N}]$ の関係

図より、 $F_{\text{trans}} [\text{N}]$ の一階微分 $dF_{\text{trans}}/dt [\text{N/s}]$ と残渣 $F_{\text{diff}} - C_1 d^2 F_{\text{trans}}/dt^2 [\text{N}]$ はおおよそ線形関係にあると言える。4つのダンパーを使用した実験で得たすべてのデータより回帰直線を求めた結果、次式のようになった。

$$F_{\text{reg2}} = -1.99 \times 10^{-5} \frac{dF_{\text{trans}}}{dt} \quad (3-17)$$

よって、 $C_2 = -1.99 \times 10^{-5}$ [s]と求められた。

3.3 補正結果

前節で求めた動的補正係数 C_1 , C_2 を用いて補正行う.

Fig.16 に, 各ダンパーにおける動的誤差 F_{diff} [N], 慣性力を考慮した補正項 $(-2.43 \times 10^{-7}) \frac{d^2 F_{\text{trans}}}{dt^2}$ [N], および慣性力と粘性力を考慮した補正項 $(-2.43 \times 10^{-7}) \frac{d^2 F_{\text{trans}}}{dt^2} + (-1.99 \times 10^{-5}) \frac{dF_{\text{trans}}}{dt}$ [N] を示す. 図は, 最大値が 200 [N] 付近の回のデータの補正結果を示している.

Fig.16 より, 各ダンパーにおいて, 前述の補正方法を用いて算出した補正項が動的誤差 F_{diff} [N] とほぼ一致していることが分かる. 各ダンパーにおける, その他の 9 回についても同様の結果を得られた.

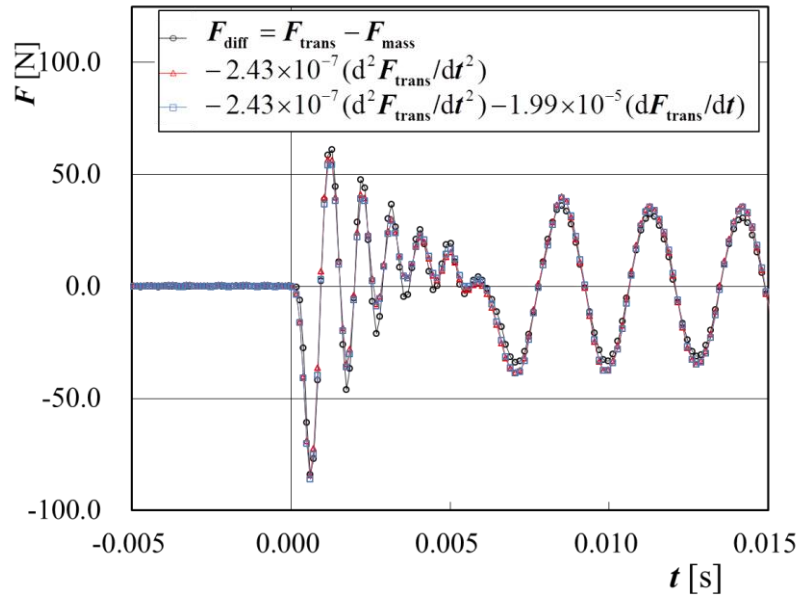


Fig. 16 (a) 動的誤差と, 動的誤差補正法を用いて算出した補正項の比較 (ダンパーA)

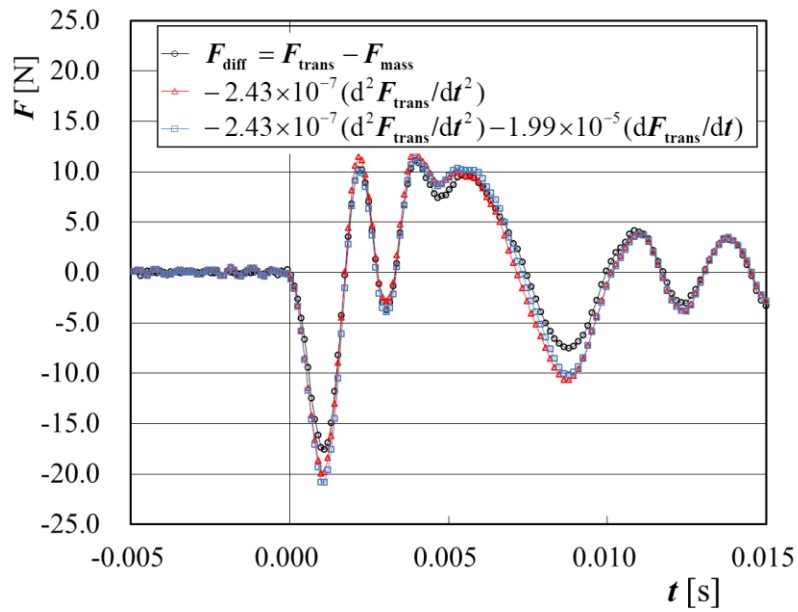


Fig. 16 (b) 動的誤差と，動的誤差補正法を用いて算出した補正項の比較 (ダンパーB)

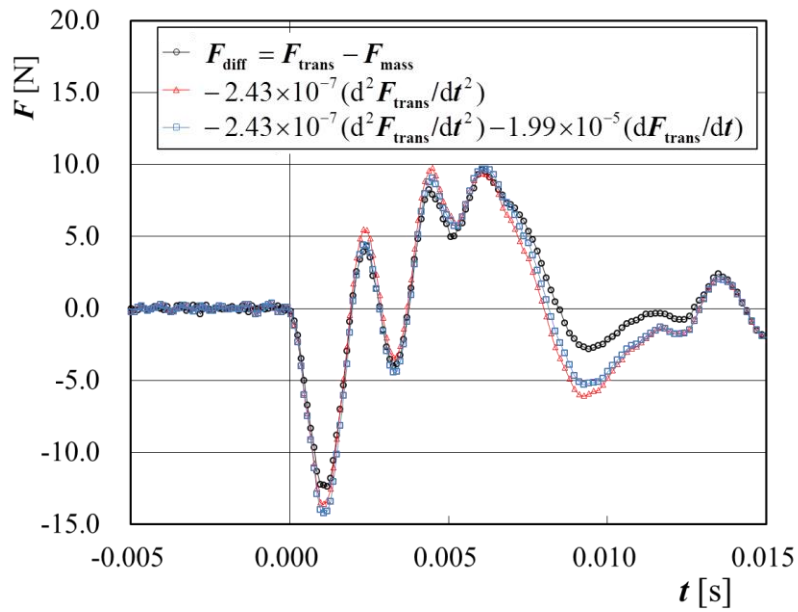


Fig. 16 (c) 動的誤差と，動的誤差補正法を用いて算出した補正項の比較 (ダンパーC)

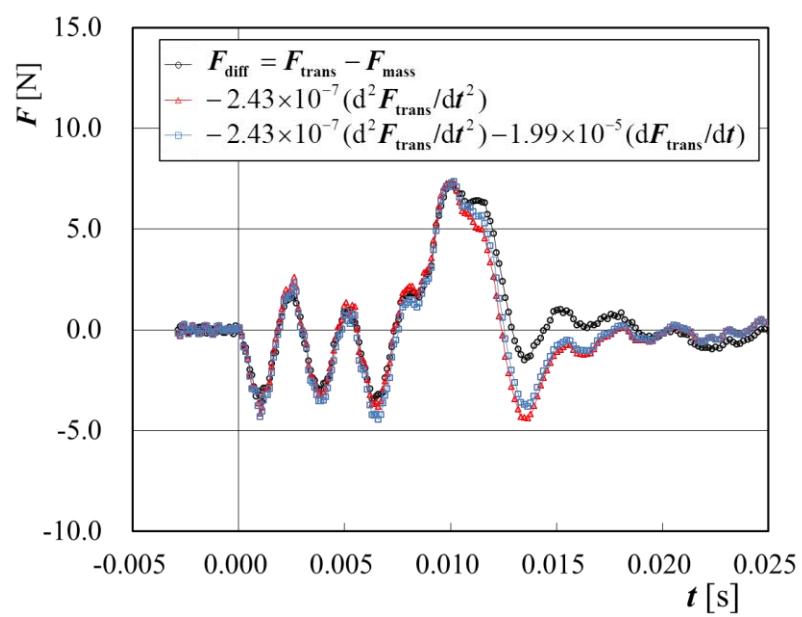


Fig. 16 (d) 動的誤差と，動的誤差補正法を用いて算出した補正項の比較 (ダンパーD)

Fig.17 に各ダンパーにおける補正前, 慣性力のみ補正後, 慣性力と粘性力による補正後の RMS 値を示す. RMS 値は以下のように計算した.

$$\mathbf{RMS}_1(F_{\text{diff}}) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum (F_{\text{trans}} - F_{\text{mass}})^2} \quad (3-18)$$

$$\mathbf{RMS}_2(F_{\text{res}}) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum \left(F_{\text{trans}} - F_{\text{mass}} - C_1 \frac{d^2 F_{\text{trans}}}{dt^2} \right)^2} \quad (3-19)$$

$$\mathbf{RMS}_3(F_{\text{res2}}) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum \left(F_{\text{trans}} - F_{\text{mass}} - C_1 \frac{d^2 F_{\text{trans}}}{dt^2} - C_2 \frac{dF_{\text{trans}}}{dt} \right)^2} \quad (3-20)$$

Fig.17 から分かるように, 慣性力による補正をすることで各ダンパーにおいて RMS 値を下げる事ができている. また, 慣性力と粘性力による補正を行うことで, さらに RMS 値を下げる事ができている.

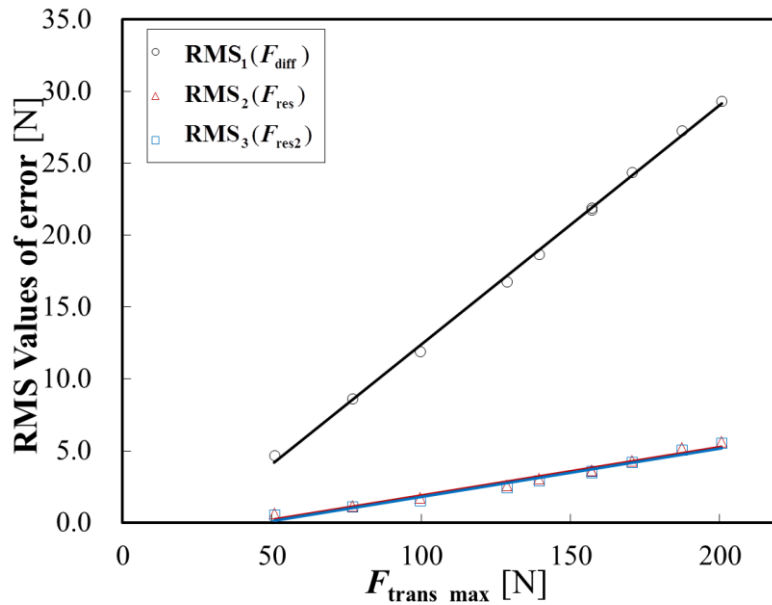


Fig. 17 (a) 補正後の RMS 値 (ダンパーA)

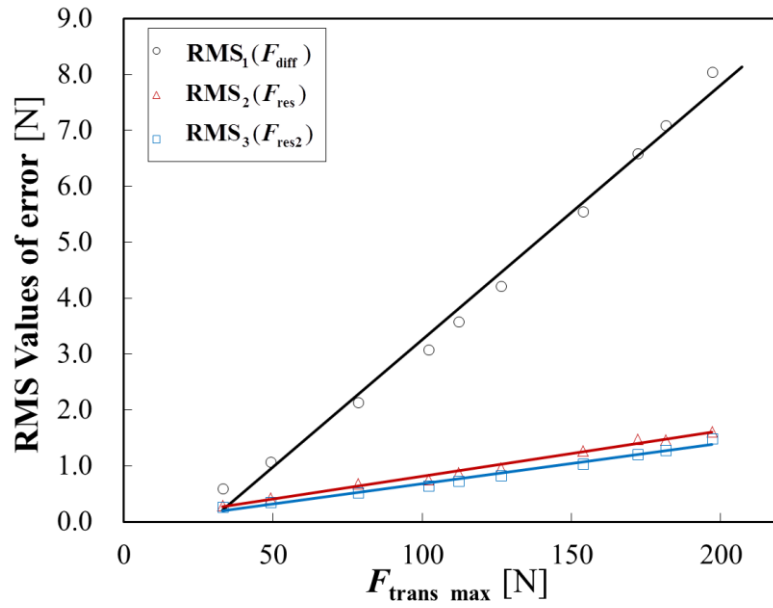


Fig. 17 (b) 補正後の RMS 値 (ダンパーB)

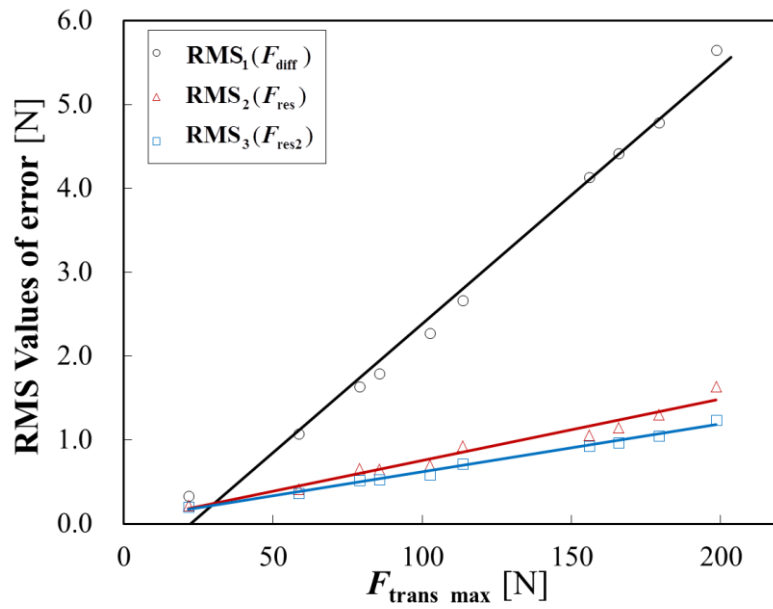


Fig. 17 (c) 補正後の RMS 値 (ダンパーC)

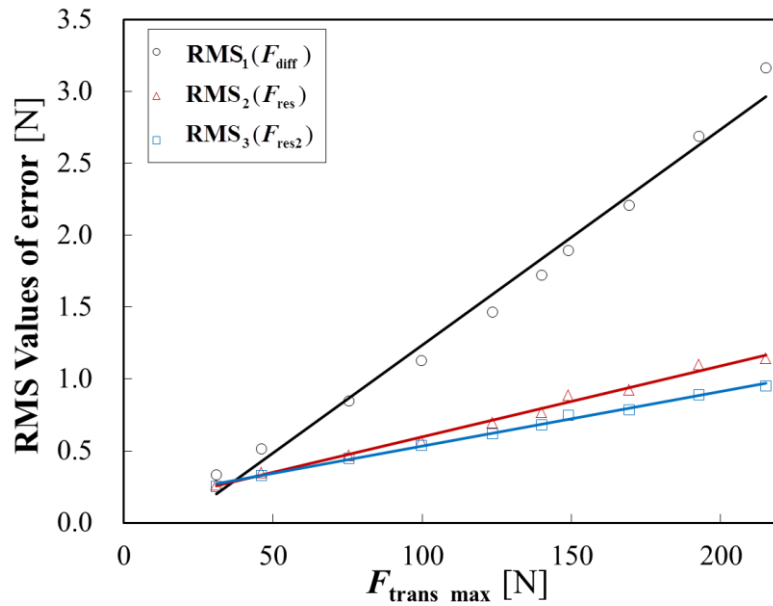


Fig. 17 (d) 補正後の RMS 値 (ダンパーD)

ここで、Fig.18 にパルス幅 w [s] に対する RMS 値を示す。図より、補正前(黒いプロット)と補正後(赤および青のプロット)を比べると、パルス幅が異なっても、慣性力および粘性力による補正をすることで RMS 値を下げられていることが分かる。

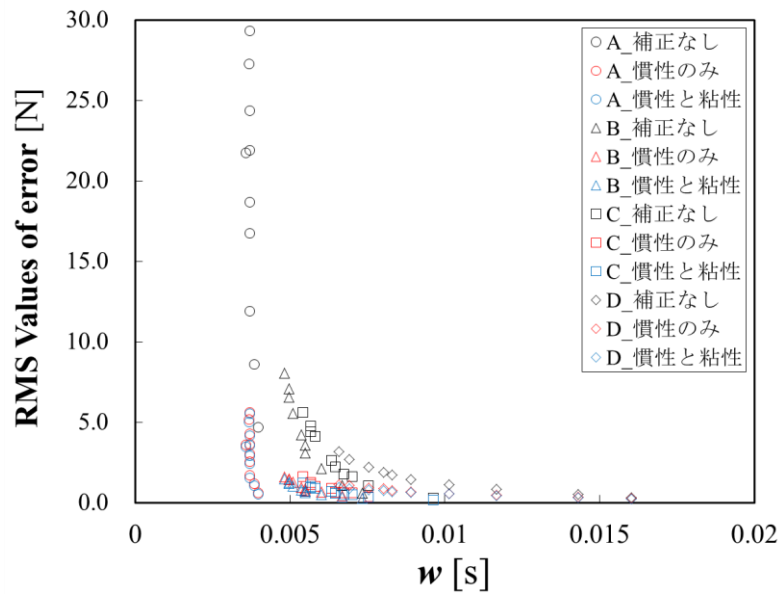


Fig.18 パルス幅 w に対する RMS 値

また、Fig.19 にパルス幅 w [s]に対する補正後の残渣の割合を示す。補正後の残渣の割合は、 $\text{RMS}(F_{\text{res}}) / \text{RMS}(F_{\text{diff}})$ および $\text{RMS}(F_{\text{res}2}) / \text{RMS}(F_{\text{diff}})$ により求めた。図より、慣性力による補正をすることで最大約 85%の補正効果があることを確認できる。また、慣性力と粘性力による補正を行うことで、さらに補正をすることができ、粘性力による補正効果は最大約 5%であった。よって、パルス幅が違っても、慣性力と粘性力による補正が可能であると言える。

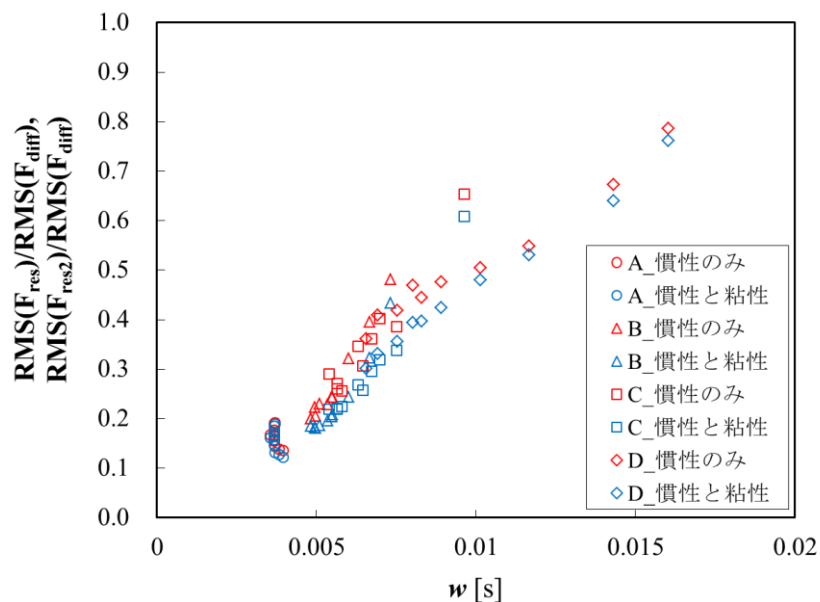


Fig.19. パルス幅 w に対する補正後の残渣の割合

3.4 不確かさ

この節では, 本実験での浮上質量法を用いて測定した力 F_{mass} の不確かさ評価, および動的誤差補正法を用いて補正したあとの力 $F_{\text{corrected}}$, $F_{\text{corrected2}}$ の不確かさ推定を行う. $F_{\text{corrected}}$, $F_{\text{corrected2}}$ の不確かさとパルス幅および力の最大値の関係から不確かさ推定の式を求めることで, 新たに力を測定しても, パルス幅と力の最大値からそのときの不確かさを推定することができる.

➤ F_{mass} の不確かさ評価

F_{mass} の不確かさ u_{LMM} を構成する要素として以下の 6 つが考えられる.

- (1) 軸受け内部に作用する動摩擦力
 - (2) 光学アライメント
 - (3) 質量測定
 - (4) 光学系のノイズ
 - (5) ZFM を使用した周波数推定
 - (6) 周波数からの数値計算
- (1) 軸受け内部に作用する動摩擦力

軸受け内部に作用する動摩擦力は, セラミック製静圧空気軸受けの摩擦特性評価より決定され, u_1 は次のようになる.

$$u_1 = Av \tag{3-21}$$

$$A = 3.6 \times 10^{-2} [\text{Nm}^{-1}\text{s}]$$

本実験での最大速度は約 $0.2 [\text{ms}^{-1}]$ であるので, 式(3-21)より可動部に作用する外力の不確かさ u_1 は約 $7.2 [\text{mN}]$ と算出される.

(2) 光学アライメント

光学アライメントの不確かさの主な要因は、レーザーの光軸とスライダの可動軸との角度 θ のずれである。この不確かさが実験結果に及ぼす相対的な不確かさ Δ は、アッペの原理より次のように表される。

$$\begin{aligned}\Delta &= (1 - \cos\theta) \\ &\simeq 1 - \left(1 - \frac{1}{2}\theta^2\right) = \frac{1}{2}\theta^2 \quad (\text{if } \theta \rightarrow 0)\end{aligned}\tag{3-22}$$

本実験での θ はレーザーの仕様より $\theta = 1 \times 10^{-3}$ [rad] であるので、光学アライメントの不確かさが実験結果に及ぼす相対的な不確かさ Δ は約 5×10^{-5} [%]となる。よって、これは非常に微小なものであるので光学アライメントの不確かさ u_2 は無視することができる。

(3) 質量測定

本実験で質量を測定するために使用した電子天秤の不確かさは約0.01 [g]である。これは可動部の全質量2.653 [kg] の約 3.7×10^{-4} [%]に相当している。これは、本実験における最大値約(200 [N])の約0.7 [mN]に相当する。よって、これは非常に微小であるので質量測定の不確かさ u_3 は無視できる。

(4), (5), (6)の不確かさ

これらは複合的なものであり、別々に推定することは困難である。しかし、これらの不確かさをすべてまとめたものは、実験において衝突中と衝突前後で変わらないと考えられるため、衝突前後の不確かさを考えることで、衝突中の不確かさを推定することができる。すべての測定における衝突前後の力 \mathbf{F} のRMS値 u_4 は、0.12 [N]であった。

上記に述べた不確かさ要素から、合成標準不確かさ u_{LMM} は、次式で表される。

$$u_{\text{LMM}} = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2} \quad (3-23)$$

本実験における合成標準不確かさ u_{LMM} は、0.12 [N]と算出され、最大値(約200[N])の約0.06 [%]に相当する。これは十分に小さいので、無視できる。

➤ $F_{\text{corrected}}$ の不確かさ推定

動的誤差を補正した後の力 $F_{\text{corrected}}$ の不確かさを $u_{\text{corrected}}$ とする。この不確かさ $u_{\text{corrected}}$ を次式に示す。ただし、 u_{LMM} は3.5.1の結果より無視できる。

$$u_{\text{corrected}} = \sqrt{(\text{RMS}(F_{\text{corrected}} - F_{\text{mass}}))^2 + u_{\text{LMM}}^2} \quad (3-24)$$

Fig.17 より、 $\text{RMS}(F_{\text{corrected}} - F_{\text{mass}})$ の値(つまり $\text{RMS}_2(F_{\text{res}})$ の値)はパルス幅 w [s]に依存していると考えられる。そこで、RMS 値を次式のように近似した。

$$\text{RMS}(F_{\text{corrected}} - F_{\text{mass}}) = A_1 F_{\text{trans_max}} + B_1 \quad (3-25)$$

ここで、パルス幅 w と A_1 の値の関係を Fig.20 に示す。図より、傾き A_1 はパルス幅 w [s] (FWHM)に依存していることが分かる。また、このときの関係を次式のように近似した。

$$A_1 = aw + \beta \quad (3-26)$$

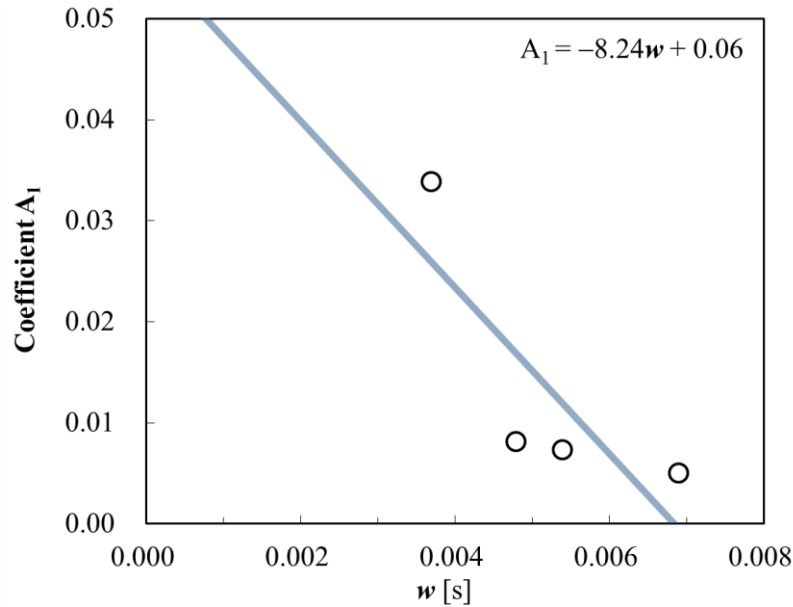


Fig. 20 パルス幅 w と A_1 の値の関係

したがって、 $u_{\text{corrected}}$ は次式のように表される。 B_1 は各実験結果の平均より求め、 -0.33 であった。

$$u_{\text{corrected}} = \text{RMS}(F_{\text{corrected}} - F_{\text{mass}}) = (-8.24w + 0.06) F_{\text{trans_max}} - 0.33 \quad (3-27)$$

➤ $F_{\text{corrected2}}$ の不確かさ推定

動的誤差を補正した後の力 $F_{\text{corrected2}}$ の不確かさを $u_{\text{corrected2}}$ とする。この不確かさ $u_{\text{corrected2}}$ を次式に示す。ただし、 u_{LMM} は 3.5.1 の結果より無視できる。

$$u_{\text{corrected2}} = \sqrt{(\text{RMS}(F_{\text{corrected2}} - F_{\text{mass}}))^2 + u_{\text{LMM}}^2} \quad (3-28)$$

Fig.17 より、 $\text{RMS}(F_{\text{corrected2}} - F_{\text{mass}})$ の値(つまり $\text{RMS}_3(F_{\text{res2}})$ の値)はパルス幅 w [s] に依存していると考えられる。そこで、RMS 値を次式のように近似した。

$$\text{RMS}(F_{\text{corrected2}} - F_{\text{mass}}) = A_2 F_{\text{trans_max}} + B_2 \quad (3-29)$$

ここで、パルス幅 w と A_2 の値の関係を Fig.21 に示す。図より、傾き A_2 はパルス幅 w [s] (FWHM) に依存していることが分かる。また、このときの関係を次式のように近似した。

$$A_2 = \alpha w + \beta \quad (3-30)$$

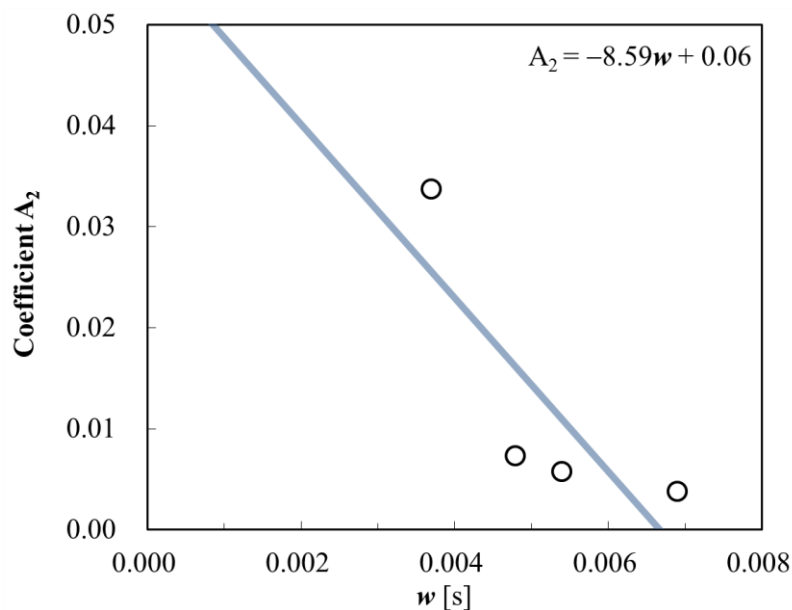


Fig. 21 パルス幅 w と A_2 の値の関係

したがって、 $u_{\text{corrected2}}$ は次式のように表される。 B_2 は各実験結果の平均より求め、-0.35 であった。

$$u_{\text{corrected2}} = \text{RMS}(F_{\text{corrected2}} - F_{\text{mass}}) = (-8.59w + 0.06)F_{\text{trans_max}} - 0.35 \quad (3-31)$$

3.5 考察

本実験では、慣性力による動的補正係数 C_1 、および粘性力による動的補正係数 C_2 を求め、動的誤差の補正を行った。慣性力による動的補正係数 C_1 は、 d^2F_{trans}/dt^2 [N/s²]と F_{diff} [N]の関係性より求めた。また、粘性力による動的補正係数 C_2 は、 dF_{trans}/dt [N/s]と残渣 $F_{\text{diff}} - C_1 d^2F_{\text{trans}}/dt^2$ [N]の関係性より求めた。しかし、Fig.15 より、 dF_{trans}/dt [N/s]と残渣 $F_{\text{diff}} - C_1 d^2F_{\text{trans}}/dt^2$ [N]はおおよそ線形関係にあると言える一方、回帰直線から外れたデータも存在することが分かる。

ここで、各ダンパーごとの dF_{trans}/dt [N/s]と残渣 $F_{\text{diff}} - C_1 d^2F_{\text{trans}}/dt^2$ [N]の関係を Fig. 22 に示す。図より、回帰直線から外れたデータは、ダンパーA における測定によるものであることが分かる。前章の Fig.11 (a)で確認できるように、ダンパーA を使用した測定では、衝突により微細な振動が発生しており、これにより回帰直線から外れたデータが増えたと考えられる。しかし、Fig.17(a)から分かるように、他のダンパーを使用したときなど複数の条件下で求めた動的補正係数を使用することで、動的誤差補正は可能であると考えられる。

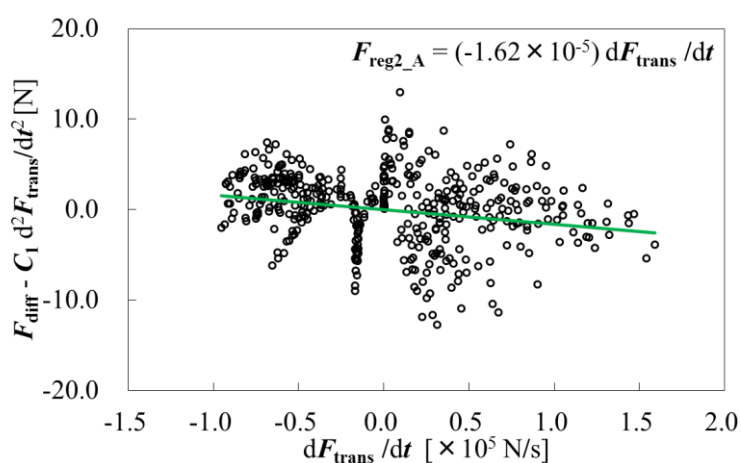


Fig. 22 (a) dF_{trans}/dt [N/s]と残渣 $F_{\text{diff}} - C_1 d^2F_{\text{trans}}/dt^2$ [N]の関係 (ダンパーA)

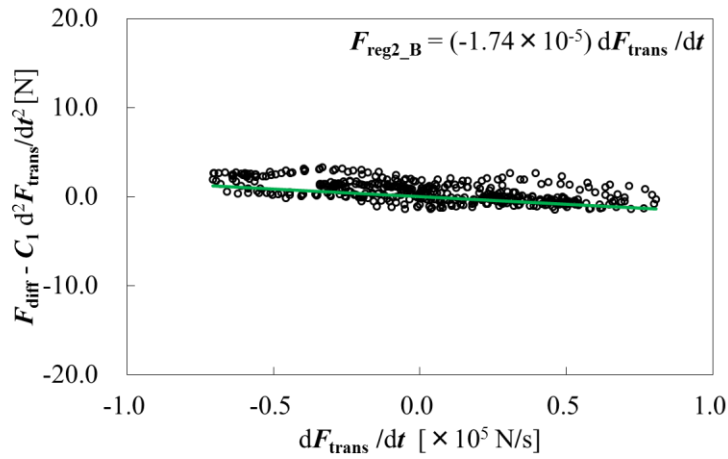


Fig. 22 (b) dF_{trans}/dt [N/s]と残渣 $F_{\text{diff}} - C_1 d^2 F_{\text{trans}}/dt^2$ [N]の関係 (ダンパーB)

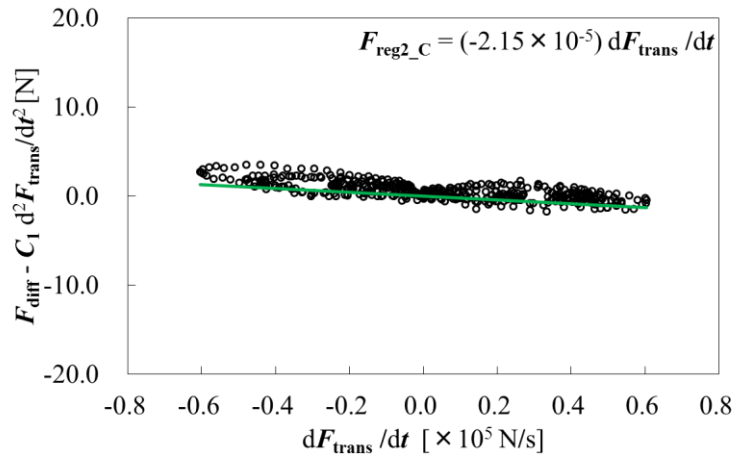


Fig. 22 (c) dF_{trans}/dt [N/s]と残渣 $F_{\text{diff}} - C_1 d^2 F_{\text{trans}}/dt^2$ [N]の関係 (ダンパーC)

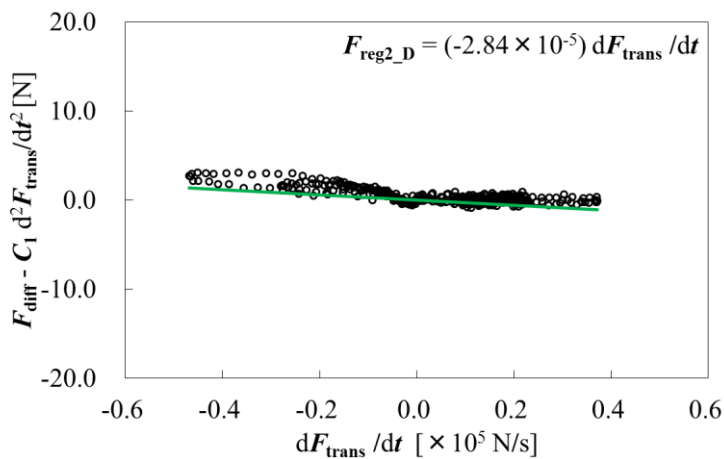


Fig. 22 (d) dF_{trans}/dt [N/s]と残渣 $F_{\text{diff}} - C_1 d^2 F_{\text{trans}}/dt^2$ [N]の関係 (ダンパーD)

また、Fig.19 より、異なるパルス幅であっても、慣性力および粘性力による補正が可能であることが確認した。図より、慣性力による補正効果は最大で約 85% ほどであり、粘性力による補正効果は最大で約 5% ほどであった。これより、力センサの動的誤差の要因は慣性力による影響が大きく、粘性力による影響は僅かであると考えられる。また、Fig.17 より、これらの補正を行ったあとでも、まだ残渣が存在していることが分かる。よって、力センサに働く慣性力と粘性力以外にも何らかの誤差要因があると考えられる。特に、Fig.16 の衝突によるパルスの後半部分において、動的誤差と動的誤差補正法を用いて算出した補正項の間に乖離があることから、この部分に働く何らかの力が、残渣の主な要因となっていることが考えられる。そのため、この誤差要因やその他の誤差要因を説明することができれば、さらなる動的誤差の補正が可能になると考えられる。

第4章 動的誤差補正機能を実装した力センサ測定ソフトウェアの開発

この章では、動的誤差補正機能を実装した力センサ測定ソフトウェアの開発について述べる。このソフトウェアは、力センサから出力される電気信号を処理し力に変換したあと、測定時に発生する慣性力および粘性力に起因する動的誤差を補正し、データを出力するものである。前述の力センサの動的誤差係数を事前に求め入力しておくことで、測定と同時に動的誤差を補正した正確度の高い測定データを測定と同時に取得することが可能となる。ソフトウェアはLabVIEWを用いて開発を行った。

4.1 LabVIEW について

LabVIEWはNational Instruments社によって開発された、計測・制御アプリケーション向けのシステム開発ソフトウェアである。LabVIEWは、グラフィカルなプログラミングを特徴とし、VI (Virtual Instruments)を平面上に配置しVIとVIを配線することでプログラミングを行う。一般的なプログラミング言語と比べデータフローが分かりやすく、直感的にプログラミングを行うことができる。

4.2 開発したソフトウェアについて

Fig. 23 に今回、開発したソフトウェアの外観を示す。

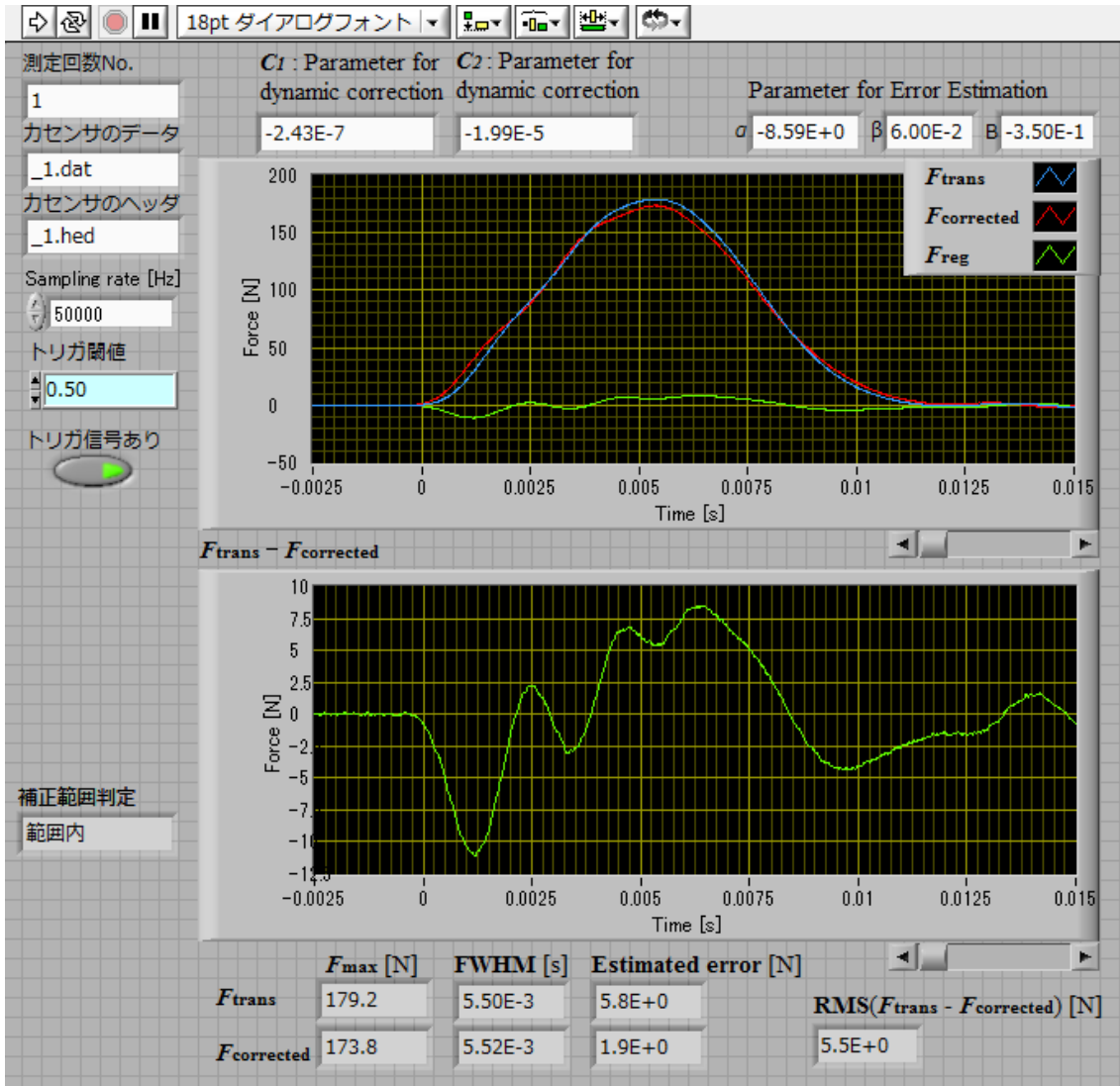


Fig. 23 ソフトウェアの外観

力を測定する際には、事前に求められた動的誤差補正係数 C_1 、および C_2 を上段の欄に入力する。また、誤差評価のためのパラメータや力センサのサンプリングレート、測定回数 No.などの各種値を必要に応じて入力する。そして、実行ボタンを押すと測定待機状態になり、トリガー信号が送られてくると同時に測定を開始する。測定が終了すると測定結果を表示するとともに、測定結果ファイルを出力する。ソフトウェア上に表示される測定結果については、力センサにて測定された波形(動的誤差補正をする前の波形) F_{trans} 、動的誤差を補正した後の波形 $F_{corrected}$ 、動的誤差 $F_{trans} - F_{corrected}$ の3つが上段に表示され、動的誤差のみが下段に表示される。さらにその下のエリアでは、補正前・補正後、それぞれの最大値 F_{max} [N]、半値幅 $FWHM$ [s]、推定不確かさ **Estimated error** [N]及び $RMS(F_{trans} - F_{corrected})$ が表示される。また、事前の実験により補正効果が確認されている範囲にあるか判定を行い、結果を表示する。出力される測定結果ファイルは、時間と動的誤差補正前後の値を記載した csv ファイルである。また、力センサからの生データファイルも出力する。Fig. 24 に、このソフトウェアの処理の流れをフローチャートで示す。

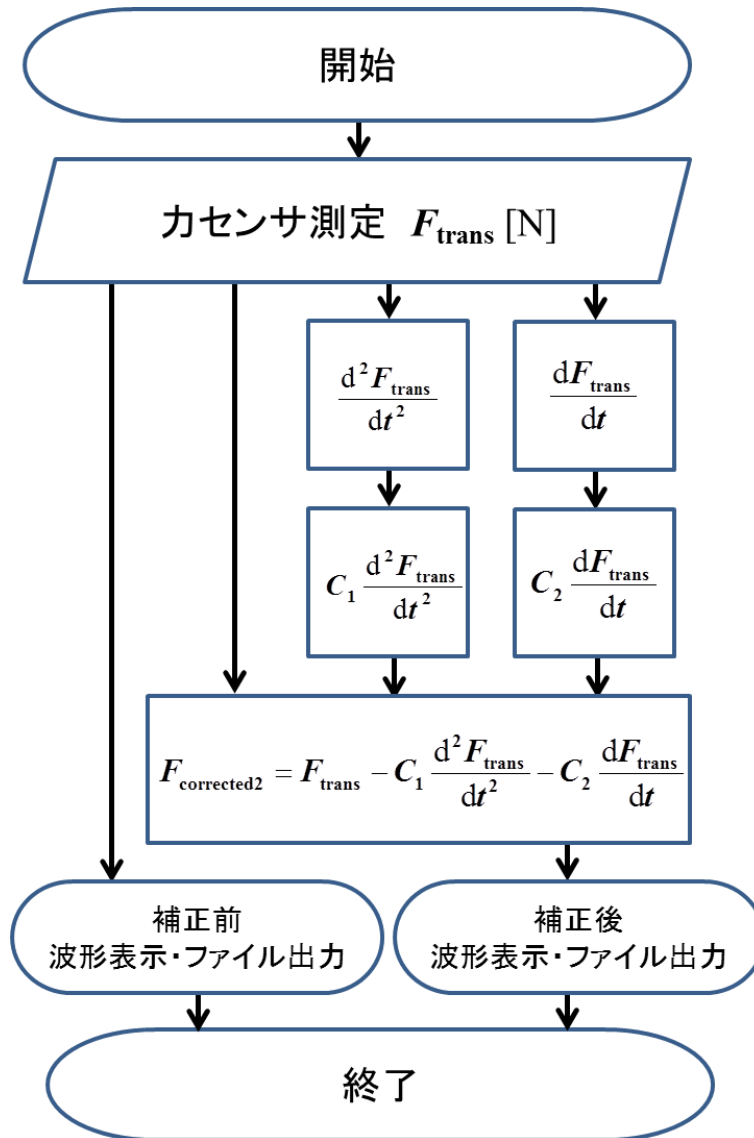


Fig. 24 ソフトウェアのフローチャート

第5章 結論

本研究では、浮上質量法を用いた力センサの動的誤差補正法の異なる条件下での補正効果の検証、および動的誤差補正機能を実装した力センサ測定ソフトウェアの開発を行った。その結果、以下のような結論となった。

- 測定する力のパルス幅が異なっても、力センサに働く慣性力および粘性力を考慮した動的誤差補正を適用し、動的誤差を補正することが可能であることを確認した。
- 慣性力および粘性力による動的誤差の補正機能を実装した力センサ測定ソフトウェアを開発したことで、ユーザーが容易に正確度の高い測定データを取得することが可能となった。

実験により、力センサに働く慣性力および粘性力を考慮した動的誤差補正係数 C_1 、 C_2 を求めた。動的誤差補正係数 C_1 、 C_2 を用いて慣性力および粘性力による補正をすることで動的誤差を補正することができた。また、異なるパルス幅であっても補正効果があることを確認した。

さらに、動的誤差補正機能を実装した力センサ測定ソフトウェアを開発した。このソフトウェアにより、測定と同時に、慣性力および粘性力の影響に起因する誤差を補正することが可能となった。また、ユーザーはこれまでの補正ソフトウェアで必要だった手間を掛けることなく、容易に正確度の高い測定データを取得することができる。

本研究により，提案された動的誤差補正法および測定ソフトウェアを使用することで，産業・研究分野の発展に大きな貢献をすることができると考えられる．

今後は，さらに様々な条件下での補正効果を検証し，補正可能な範囲を拡大していくとともに，補正ソフトウェアを改良していく必要がある．また，慣性力と粘性力以外の誤差要因を明らかにすることで，力センサの完全な誤差補正を目指す．

謝辞

本研究論文をまとめるにあたり、的確なご指導、ご鞭撻を賜りました群馬大学大学院理工学府の藤井雄作教授、田北啓洋助教に深く感謝いたします。

また、研究室の皆さんとは共に支えあい、大きな心の支えとなりました。

これらの方々、また、本研究に関わっていただいたすべての方々に深く感謝いたします。ありがとうございました。

参考文献

- [1] 梅田章,動的力計測の現状と問題点,計測と制御,Vol.27,No.6,pp.537-542,1988.
- [2] Y. Fujii, "Measurement of Force Acting on a Moving Part of a Pneumatic Linear Bearing." *Rev. Sci. Instrum*, Vol.74, No. 6, 3137–3141, 2003.
- [3] Y. Fujii, "Measurement of the electrical and mechanical responses of a force transducer against impact force. ", *Rev. Sci. Instrum*, Vol. 77, Number, 085108, 2006.
- [4] Y. Fujii, "Toward establishing dynamic calibration method for force transducers", *IEEE Trans. Instrum. Meas*, Vol. 58, 2358–2364, 2009.
- [5] Y. Fujii, "Measurement of the electrical and mechanical responses of a force transducer against impact forces.", *Rev. Sci. Instrum*, Vol. 77, 085108, 2006.
- [6] Y. Fujii, "Method for correcting the effect of the inertial mass on dynamic force measurements", *Meas. Sci. Technol*, Vol. 18, N13–N20, 2007.
- [7] Y. Fujii, K. Maru, "Self-correction method for dynamic measurement error of force sensors", *Exp. Tech*, Vol. 35, 15–20, 2011.
- [8] 小林将大, "光波干渉計とデジタイザを活用した力の高精度計測に関する研究", 平成25年度群馬大学大学院修士論文
- [9] 小野好喜, "力センサの動的補正に関する研究及び補正用ソフトウェアの開発", 平成25年度群馬大学大学院修士論文
- [10] Y. Fujii, "Frictional characteristics of an aerostatic linear bearing", *Tribol. Int*, Vol. 39, 888–896, 2006.
- [11] Y. Fujii and T.Yamaguchi, "Proposal for material viscoelasticity evaluation method under impact load," *Journal of Material Science*, vol.40, no.18, pp.4785–4790, 2005.

- [12] Y. Fujii, "Dynamic three-point bending tester using inertial mass and optical interferometer" , *Optics and Lasers in Engineering*, Vol.38, No.5, pp.305-318, 2002.
- [13] Y. Fujii, "Microforce materials tester", *Rev. Sci. Instrum.* Vol.76, No.6, 065111-1-7, 2005.
- [14] Y. Fujii, Hessling, J.P., "Frequency estimation method from digitized waveform", *Exp. Tech*, Vol. 33, 64–69, 2009.

学会発表リスト

Yuta Kaneko, Akihiro Takita, Yusaku Fujii, “Improved Self-Correction Method for dynamic error of force transducers,” *International Conference on Mechanical, Electrical and Medical Intelligent System 2017*, 2017/11/29, Gunma, Japan