

平成26年度 修士論文

竹刀の衝撃吸収特性の評価
～ホームロボットの構造体への応用を目指して～

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

北畑 考基

目次

第1章 序論.....	1
1.1 研究背景・目的	1
1.2 浮上質量法	3
1.3 光波干渉計	5
第2章 セラミック製静圧空気直動軸受の摩擦特性評価	8
2.1 研究背景・目的	8
2.2 実験装置	9
2.3 データ解析方法	12
2.4 セラミック製静圧空気直動軸受摩擦評価試験	16
2.5 金属製軸受とセラミック製軸受の実験状況比較	18
2.6 回帰式の算出	19
2.7 結論	22
第3章 竹刀の衝撃応答試験	23
3.1 実験装置	23
3.2 データ解析方法	26
3.3 竹刀について	30
3.4 実験結果	34
第4章 不確かさ評価	50
4.1 可動部に作用する慣性力の測定の不確かさ	51
4.1.1 周波数カウンタ	51
4.1.2 光軸のアライメント	52
4.1.4 質量	53
4.2 可動部に作用する外力の不確かさ	54

4.3 総合相対標準不確かさ	55
第5章 結論	56
謝辞	58
参考文献	59

第1章 序論

1.1 研究背景・目的

近年、ロボットアームは工場など製造業用を中心に生産性の向上、品質の安定化を目的とし発展してきた。将来的には医療、福祉、農業、看護の分野での活躍が期待されている。特に、少子高齢社会に向けて介護ロボットアーム技術への期待は高く、実用化が徐々に推進されている。2015年には4人に1人が65歳以上の高齢者となり、ロボットも介護保険の適用の対象になるなど、ロボット技術が社会に広がる機会となる。これらの理由から、今後介護に用いられる家庭用ロボットアームの需要は高まっている。

安全性を考え、人が生活している環境下で作動するロボットが動作中人と接触することは避けなければならない。しかしながら、現在の技術ではロボットが全ての可能性を予想し、人間と衝突せずに目的の動作を遂行することは難しい。このためロボットには衝突した場合の人間への傷害を防ぐため、衝撃を軽減する構造の実装が急務である。

本研究室では、ロボットが人間に衝突した場合に、衝突の衝撃を軽減するロボットアームの構造として、竹刀に注目した。竹刀は安全に剣術を練習するため、打撃時の衝撃力を低減するような構造をしている。竹刀は4本の竹片で構成されており、打撃を受けたとき、物体と衝突した1片が竹刀の中に入り込むような構造をしている。このような竹刀の構造は人が感じる痛みを少なくするような構造なのではないかと考えた。

そこで本研究は竹刀の衝撃応答特性評価を行った。衝撃を受けた竹片1片が

中に入り込むという竹刀の構造特性を打ち消すために竹刀を紐で縛り，その紐で縛った状態の竹刀と紐で縛っていない竹刀，つまり，通常の状態の竹刀の衝撃応答特性を測定し比較を行う．

竹刀の特性評価を行うためには，高精度な力の測定をすることが重要となる．そこで当研究室がこれまで研究してきた浮上質量法を用いて測定することを提案する．浮上質量法とは，質量を静圧空気直動軸受で浮上支持し，光波干渉計を用いて質量の慣性力を高精度に測定する，力の発生・計測方法である．浮上質量法に関して詳しい説明は次項で述べる．浮上質量法を用いることにより，竹刀に作用する動的な力を高精度に測定することが可能である．

衝突試験において，静圧空気直動軸受の耐久性は無視できない非常に重要な要因である．静圧空気直動軸受は非常に複雑な構造であるため，決して安価なものではなく，破損しても修復することが困難である．そこで，より高い耐久性を持つ静圧空気直動軸受を衝突試験に用いる必要がある．そこで本研究室で従来用いられてきた金属製静圧空気直動軸受より高い硬度を持ち，耐久性に優れたセラミック製静圧空気直動軸受を用いて衝突試験を行う．しかし，本実験で用いるセラミック製静圧空気直動軸受の摩擦特性評価がなされていない．そのため，セラミック製静圧空気直動軸受に作用する摩擦力が十分に小さく，無視できることを示した後，竹刀の衝撃応答試験を行う．

1.2 浮上質量法

浮上質量法 (Levitation Mass Method, 以下 LMM と表記) [1] は図 1 に示されるように、質量 M の剛体を空気の圧力によって浮上支持し、この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手法である。これによって動的な力を発生し、またその力を測定することが可能である。LMM で用いられている静圧空気軸受は、外部のコンプレッサーによって圧縮された空気によってできる数 μm のエアフィルムで可動部を浮上支持する。これにより、可動部に生じる摩擦力を 10^{-4} [N] オーダー程度の非常に小さなものにできる。実際に測る力の大きさはそれよりも非常に大きいので、この摩擦力は無視できるといえる [7]。

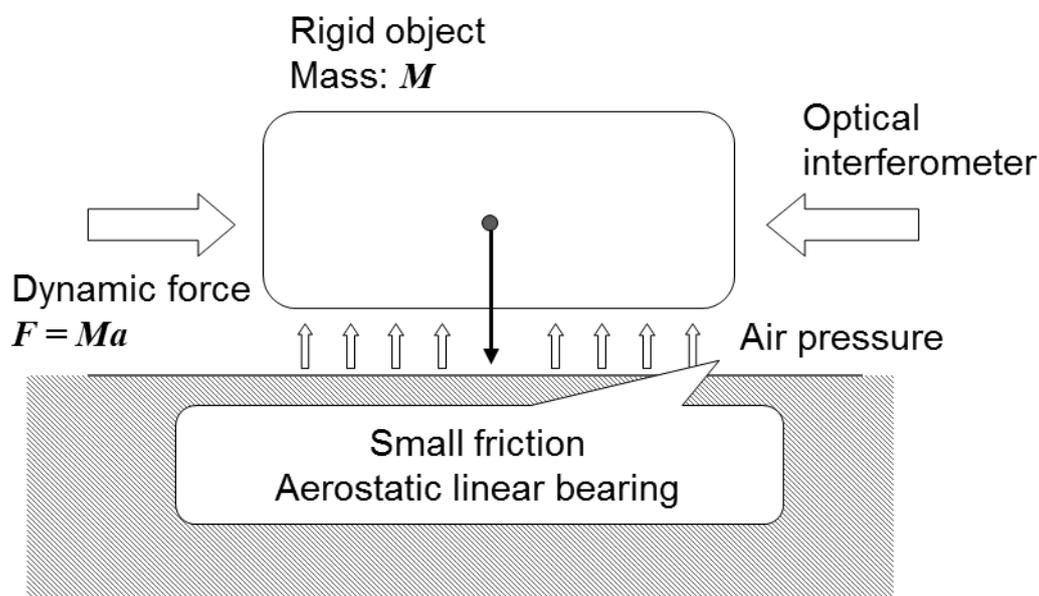


Fig.1 浮上質量法の概略図

光波干渉計からは剛体の速度に応じたドップラーシフト周波数が測定される。その周波数から物体の速度 v を求め、それを時間で微分、または積分することで加速度 a と位置 x を求めることができる。また、ニュートンの第 2 法則 $F = Ma$ を用いることで、加速度 a と質量 M の積からその物体にかかる動的な力 F を求めることができる。このようにして、動的な運動に関する種々のデータを高精度に求めることができ、それらのデータを用いてその運動の高精度な解析を行うことが可能となる。また、LMM は材料の動的特性評価などにも利用されている [2-6]。

1.3 レーザードップラー速度計

浮上質量法で加速度を求めるために利用される，光波干渉計を用いた速度測定法について述べる．被測定物からの反射光に対して，わずかに周波数の異なる光を干渉させ，ビート信号を検出するヘテロダイン干渉法を用いる．通常，光の周波数は検出できないが，ヘテロダイン干渉法を用いることにより，光の強度，位相，周波数変化を間接的に求めることができる．光波干渉計による測定方法の模式図を図2に示す．

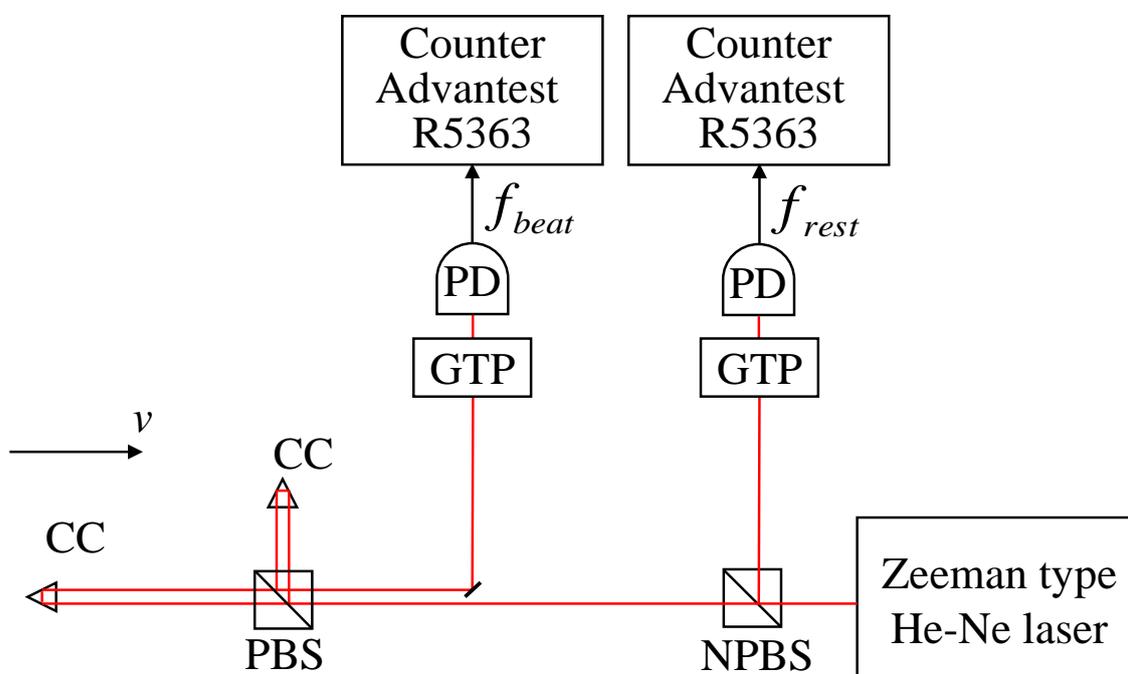


Fig.2 光波干渉計の概略図

Code: PD = photo diode, CC = corner cube prism, PBS = polarizing beam splitter, GTP = Glan-Thompson prism.

本実験で使用する光波干渉計は，マイケルソン型干渉計の装置を一部変更したものである．通常，マイケルソン型干渉計では光の反射に鏡を使用するが，その代わりにコーナーキューブプリズム(CC)を用いる．

光源には，ゼーマンタイプ2周波レーザーを用いることが想定されている．こ

これは、二つの異なる周波数を持つ直交偏光のレーザー光を出力し、この二つのレーザーはまず無偏光ビームスプリッター(Non-Polarizing Beam Splitter: NPBS)によって分光される。分光されたレーザー光のうち 1 つはグラン・トムソンプリズム(Glan-Thompson Prism: GTP)を通して方位 45°に偏光され干渉する。その干渉した光の強度をフォトダイオード(Photo Diode: PD) で検出し電圧信号に変え、周波数カウンタで f_{rest} として測定する。NPBS で分光されたもう一つのレーザー光は偏光ビームスプリッター(Polar Beam Splitter: PBS)により、信号光(Signal Beam)と参照光(Reference Beam)に分けられる。信号光は可動部に取り付けられた CC によって、また、参照光は固定された CC によって、それぞれ反射され、再び PBS に入射する。可動部が動いている場合、ドップラーシフトが起きるため、信号光の周波数は変化する。その後、GTP によって、信号光と参照光の偏光角 45°に合わせる。それによって、信号光と参照光が干渉し合い、その干渉した光の強度をフォトダイオード PD によって電圧信号に変換し、周波数カウンタを用いて周波数として測定する。参照光がドップラーシフトした信号光と干渉するとき、周波数の差によりビートが発生する。

二つの直光偏光の振幅を 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 での二つのレーザー光の電界は

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

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

と表せる。二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せる。

$$\begin{aligned} I(t) &= |E_1(t) + E_2(t)|^2 \\ &= U_1^2 + U_2^2 + U_1 U_2 \cos \{2\pi [f_1 - f_2] t + [\varphi_1 - \varphi_2]\} \end{aligned} \quad (3)$$

式(3)より、PD 上で $|f_1 - f_2|$ [Hz] のビートが生じることがわかる

ドップラーシフトした信号光と参照光の差周波数をビート周波数 f_{beat} と呼び、

可動部が止まっているときの信号光，つまりドップラーシフトしていないときの信号光と参照光との差周波数を基準周波数 f_{rest} と呼ぶことにする．基準周波数 f_{rest} を基準にしてビート周波数 f_{beat} がどのように変化したか，つまり基準周波数とビート周波数の差 f_{Doppler} から，物体の速度に比例した周波数のシフト量が決まる． f_{Doppler} から可動部の速度 v を求め，その他のデータを求めることができる．

$$v = \lambda_{\text{air}} (f_{\text{Doppler}}) / 2 \quad (4)$$

$$f_{\text{Doppler}} = - (f_{\text{beat}} - f_{\text{rest}}) \quad (5)$$

第2章 セラミック製静圧空気直動軸受の摩擦特性評価

2.1 研究背景・目的

静圧空気直動軸受には高い運動性能と限りなく小さい摩擦特性を持つという2つの性能がある。金属製静圧空気直動軸受の摩擦特性評価は本研究室が既に行っており、可動部に作用する摩擦力は非常に小さく無視できる事が確認されている[8]。それと同時に速度 v [ms^{-1}], 位置 x [m]の値が分かれば可動部に作用する摩擦力を算出できる回帰式も考案され、その回帰式と実験値を比較することでその回帰式の有効性も確認されている。

衝突試験において、静圧空気直動軸受の耐久性は無視できない非常に重要な要因である。静圧空気直動軸受は非常に複雑な構造であるため、決して安価なものではなく、破損しても修復することが困難である。そこで、より高い耐久性を持つ静圧空気直動軸受を衝突試験に用いる必要がある。そこで本研究室において従来用いられてきた金属製静圧空気直動軸受より高い硬度を持ち、耐久性に優れたセラミック製静圧空気直動軸受を用いて衝突試験を行う。しかし、まだセラミック製静圧空気直動軸受の摩擦特性評価がなされていない。そのため、セラミック製静圧空気直動軸受に作用する摩擦力が十分に小さく、無視できることを本章で示す。

第2章は、セラミック製静圧空気直動軸受の摩擦特性を計測し、金属製静圧空気直動軸受の摩擦特性と比較することで評価を行う。さらに、セラミック製静圧空気直動軸受にも以前に考案された摩擦力を算出する回帰式を導入し、セラミック製静圧空気直動軸受にその回帰式が有効であるか、実験値と回帰式を比較することで回帰式の評価を行う。

2.2 実験装置

本実験で用いた実験装置の模式図を Fig.3 に示す。実験装置は、マイケルソン型ヘテロダイン光波干渉計及びセラミック製静圧空気直動軸受の可動部から成り立つ。可動部が動いた時の速度，変位などを間接的に測定している。

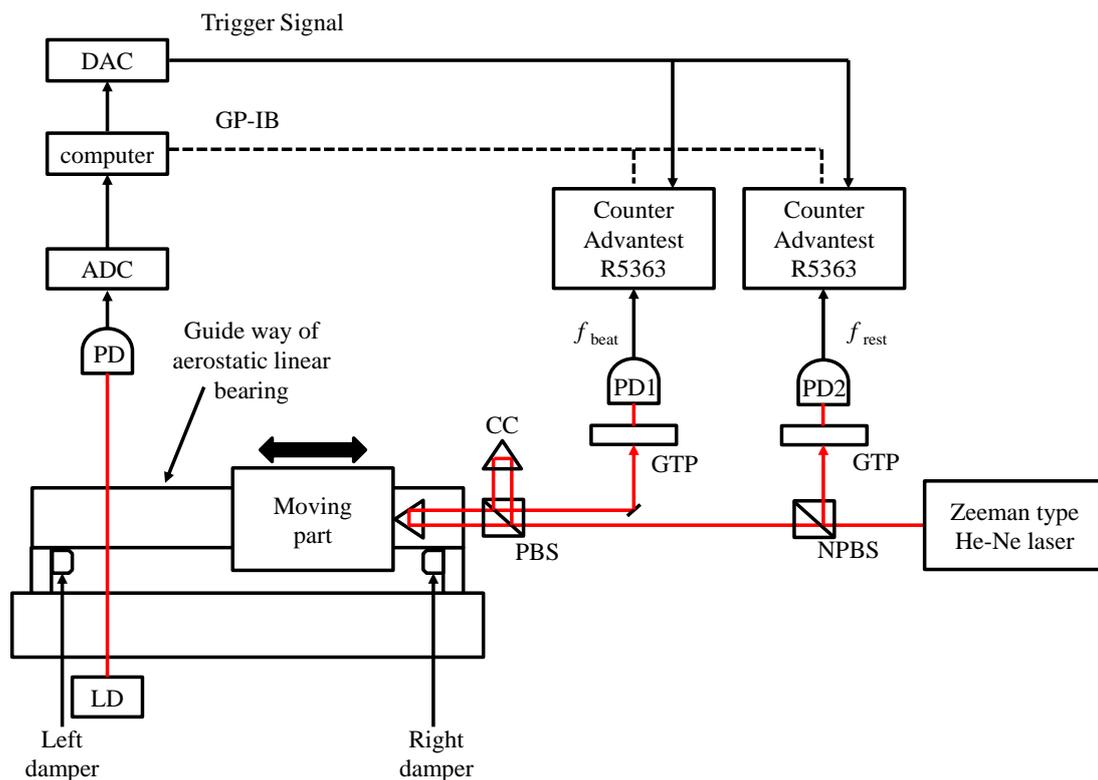


Fig.3 摩擦特性評価の実験装置

PBS = Polarizing Beam Splitter, NPBS = Non-Polarizing Beam Splitter, CC = Cube Corner Prism, GTP = Gland-Thompson Prism, PD = Photo Diode, ADC = Analog-to-Digital Converter, LD = Laser Diode.

まず、本実験で使用する静圧空気直動軸受(Air-Slide-Mini VAPB510AY ; TOTO 社製)について説明する。この軸受は Fig.3 に示すように、可動部とガイドウェイで構成されている。箱状のガイドウェイの内部が空洞になっており、外部に設置してあるエアコンプレッサから圧縮した空気を送り込むことで、内部に可動部との間で空気膜を形成することができる。その状態では、棒状の可動部は浮上して完全な非接触状態にあるので、摩擦が非常に少なく、かつ、前後方向のみに移動が制限される。可動部がガイドウェイと衝突する際の衝撃を緩和するために、両方向共にガイドウェイ下部に緩衝材を取り付けている。

次に、光波干渉計について説明する。光源にはゼーマンタイプ 2 周波 He-Ne レーザーを用いている。光源から発射された二つの直交偏光を持つレーザー光は無偏光ビームスプリッタ(Non-Polarizing Beam Splitter: NPBS)で 2 分される。2 分された一方の信号は GTP を経て PD2 で検出される。PD2 により検出された電圧信号は、周波数カウンタ(R5363; ADVANTEST 社製)を用いて周波数として測定される。可動部が止まっているときの信号光、つまりドップラーシフトしていないときの信号光と参照光との差周波数を基準周波数 f_{rest} とする。NPBS で 2 分されたもう一方の信号は偏光ビームスプリッタ(Polarizing Beam Splitter: PBS)により信号光と参照光に分けられる。信号光は被測定物に取り付けられた CC で反射し、再び PBS に入射する。参照光は固定された CC で反射され PBS に戻る。戻ってきた二つの信号は GTP で変更され PD1 で電圧信号として検出される。検出された信号光と参照光の差周波数をビート周波数 f_{beat} とする。検出されたビート周波数を周波数カウンタで測定する。

測定に使用された 2 台の周波数カウンタは設置されている半導体レーザー(Laser Diode: LD)から PD に入射する光が遮られた瞬間に同時に測定が開始されるように設定した。これは、光が遮られた時に、AD コンバーターからコンピュ

ータを通して，トリガー信号に変換した後，DA コンバータを通して，周波数カウンタにトリガーが掛かる光スイッチ計測システムを組んだためである．

2.3 データ解析方法

光波干渉計から得られたデータの解析方法について述べる。

光波干渉計によって測定したビート周波数 f_{beat} と中心周波数 f_{rest} から、可動部の速度や位置、加速度、慣性力を求めることができる。可動部の速度 v は光波干渉計の信号光のドップラーシフト周波数 f_{Doppler} から測定され、次式で表される。

$$v = \lambda_{\text{air}} (f_{\text{Doppler}}) / 2 \quad (6)$$

$$f_{\text{Doppler}} = - (f_{\text{beat}} - f_{\text{rest}}) \quad (7)$$

速度 v の時間微分、時間積分によって加速度 a 、変位 x を求めることが出来る。

$$a = dv / dt \quad (8)$$

$$x = \int v dt \quad (9)$$

可動部の慣性力 F は、その物体の慣性質量 M と加速度 a の積により求められる。

$$F = Ma \quad (10)$$

実験によって得られたデータを用い可動部に作用する力の解析手順を解説する。Fig.4 に光波干渉計より得られた f_{beat} [Hz] と f_{rest} [Hz] の値を示す。今回、He-Ne レーザーの波長 $\lambda_{\text{air}} = 6.32 \times 10^{-7}$ [m] とし、最初に初速を与えた方向と反対方向を正の速度としている。

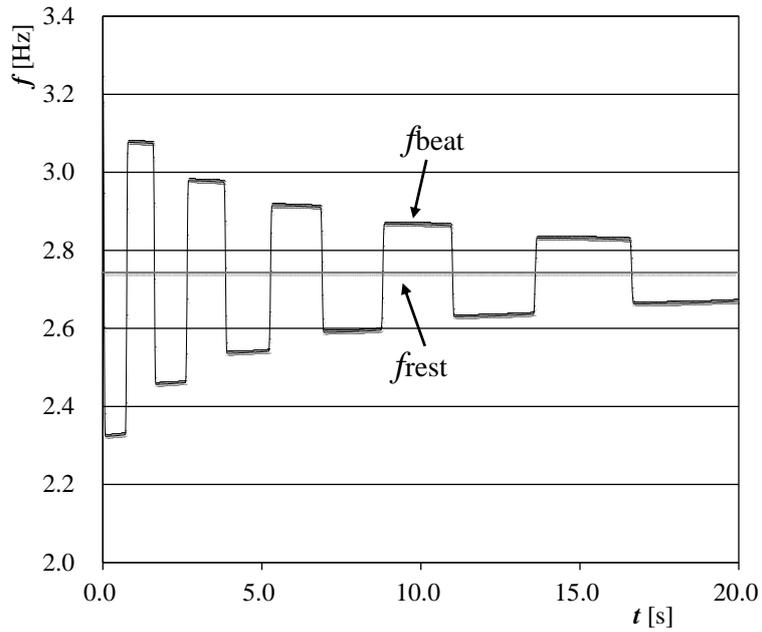


Fig.4 干渉計より得られたビート周波数

Fig.5 に式(5)より計算したドップラーシフト周波数 f_{Doppler} を用い, 式(4)で求めた可動部の速度 v [m/s^1] の速度を示す.

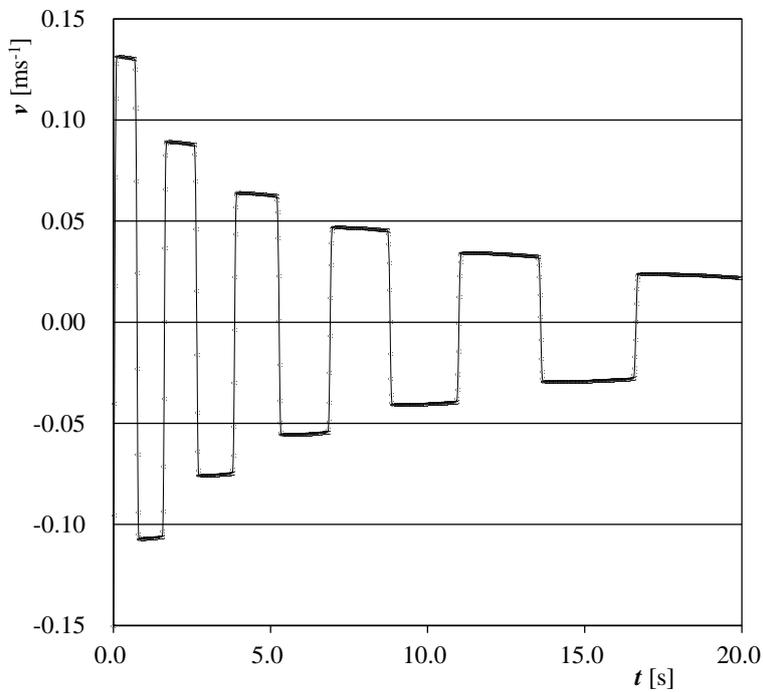


Fig.5 ビート周波数より計算した可動部の速度

Fig.6 に速度を時間積分して計算された変位 x [m]を示す. また Fig.7 に速度を時間微分して計算された加速度 a [m/s²]を示す.

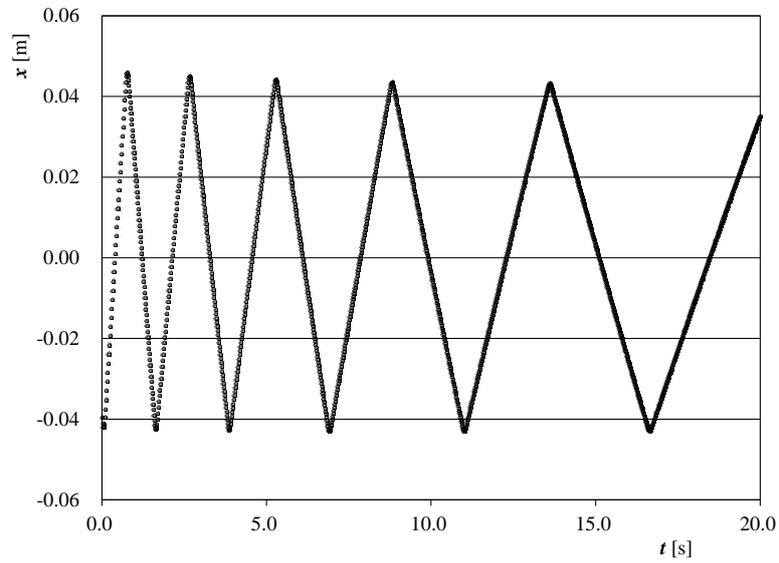


Fig.6 速度を時間積分して計算した変位

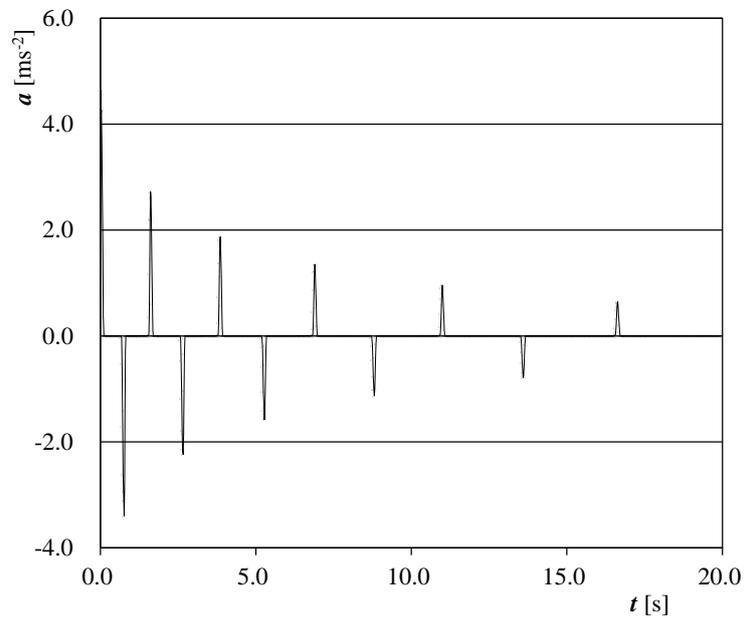


Fig.7 速度を時間微分して計算した加速度

また, Fig.8 に加速度 a [m/s²] に質量 M [kg] を掛け合わせて計算した慣性力 F_{mass} [N] を示す. 質量 M はおよそ 2.737 [kg] である. ガイドウェイ下部両端に取り付けられた緩衝材のうち, 20 秒間で Left damper に 6 回, Right damper に 5 回衝突していることがわかる.

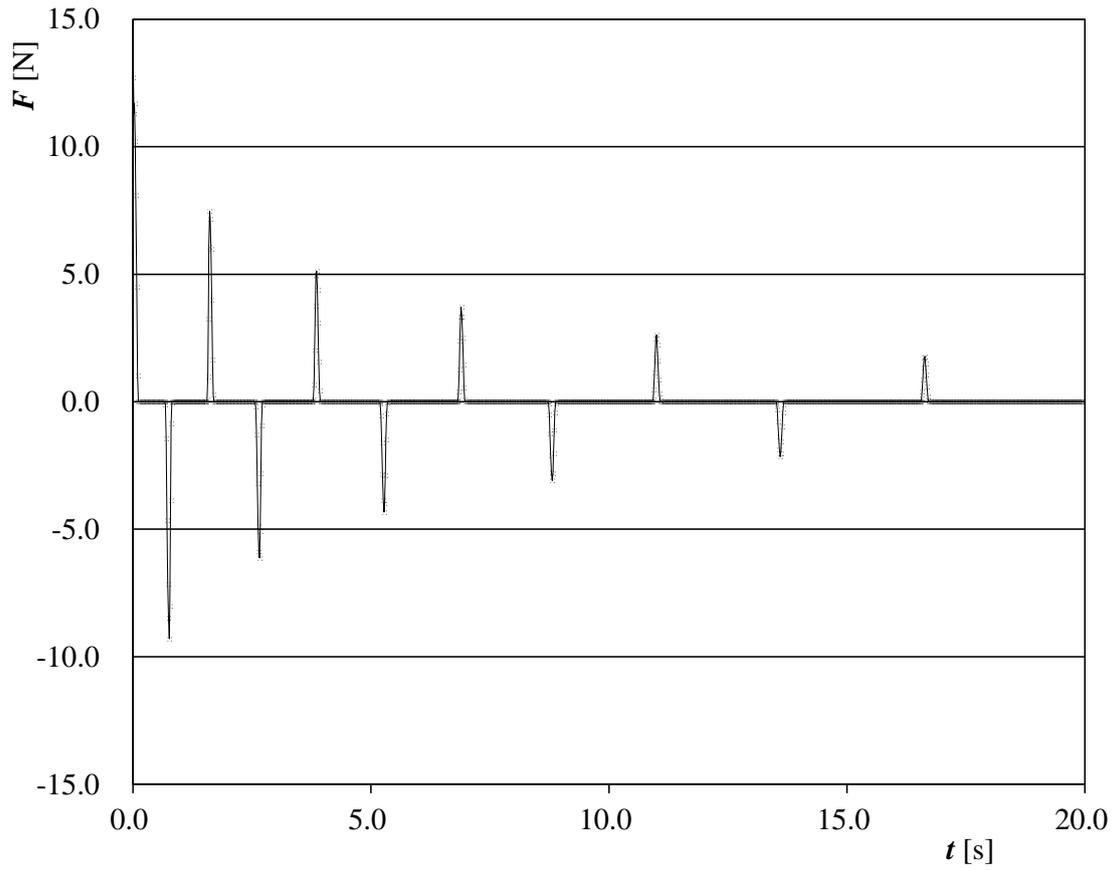


Fig.8 加速度より計算した慣性力

2.4 セラミック製静圧空気直動軸受摩擦評価試験

Fig.9 に時間に対する力の変化を示す. Fig.9 と Fig.8 は同じデータであるが Fig.8 は縦軸が-15 [N]~15[N]の範囲であるのに対し, Fig.9 は縦軸が-0.01 [N]~0.01 [N]の範囲で表されている. 20 秒間で左右の緩衝材に計 11 回衝突していることがわかる.

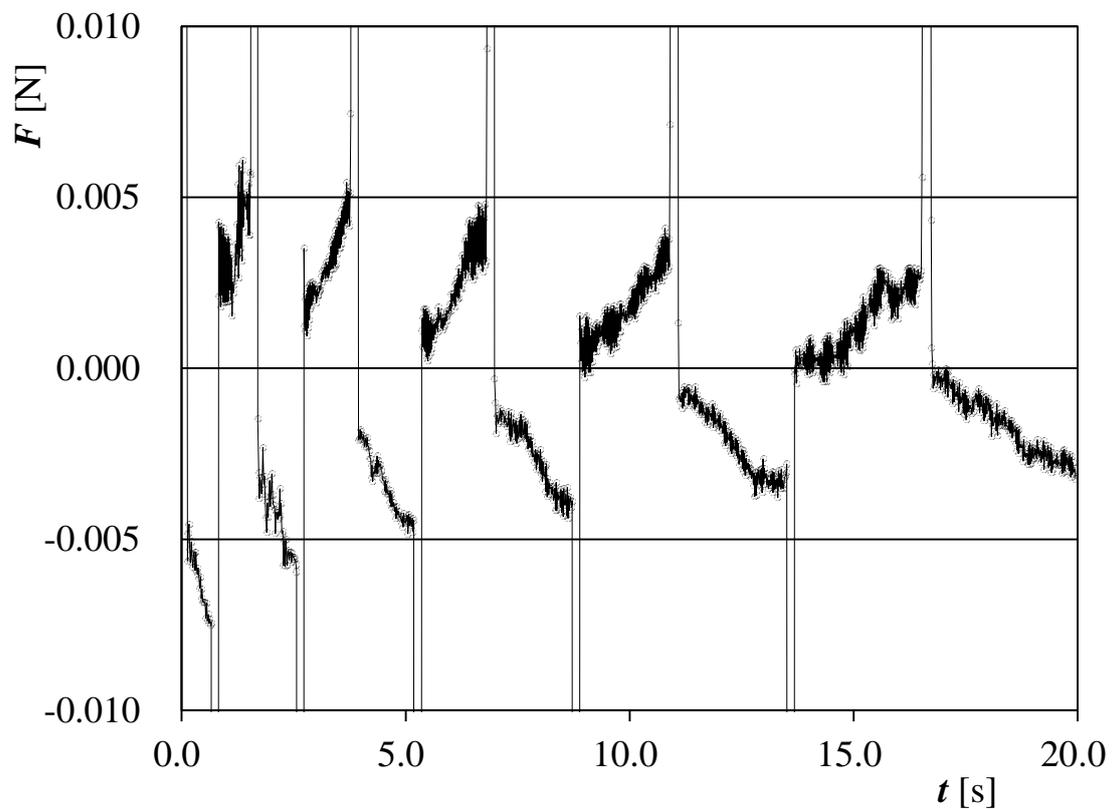


Fig.9 時間に対する力の変化(-0.01 [N] < F < 0.01 [N])

Fig.10 に時間に対しての可動部分に作用している力の変化を示す. Fig.10 は可動部分が緩衝材と衝突する力を取り除かれており, 可動部分がガイドウェイ上を動いている間の力のみを示す. この Fig.10 の値をセラミック製静圧空気直動軸受の摩擦力 F_{meas} と定義する.

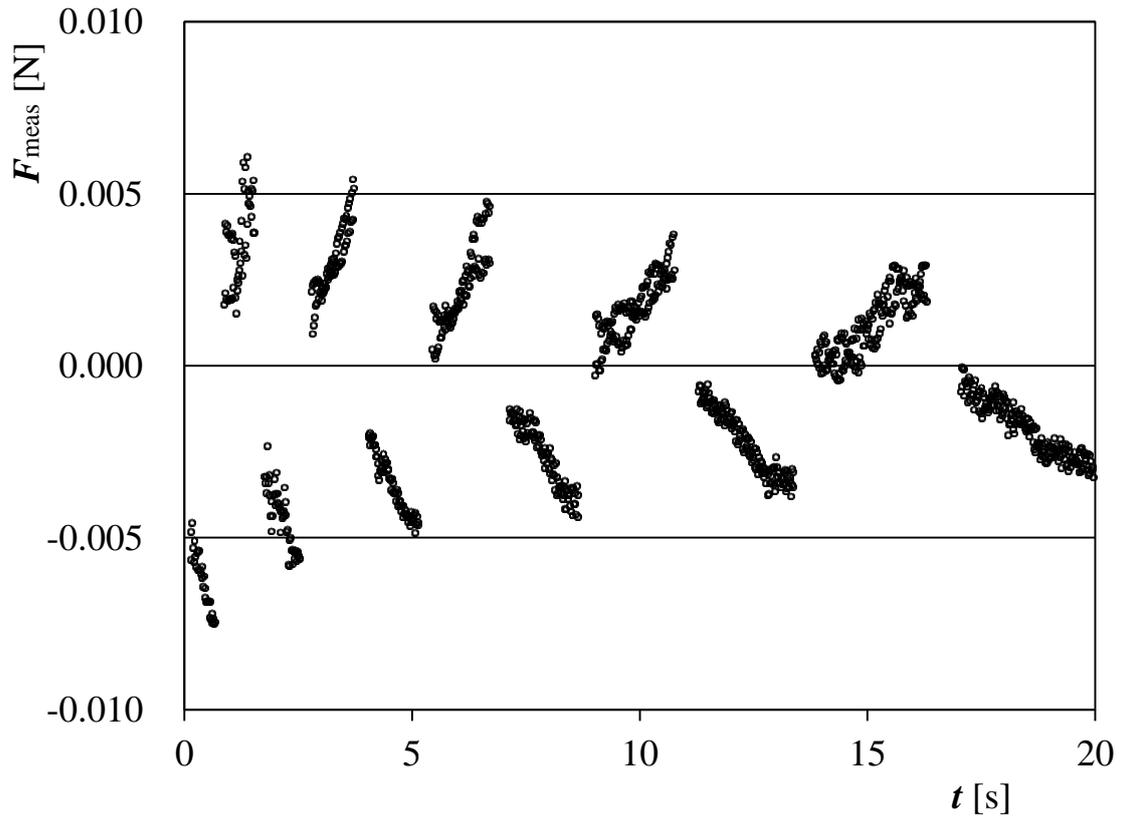


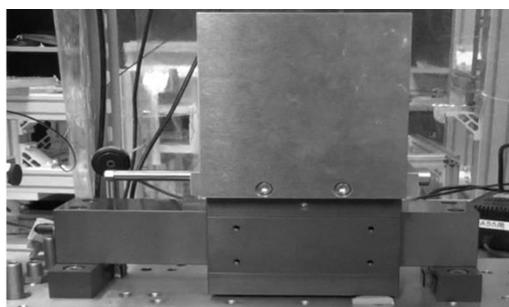
Fig.10 可動部分に作用している力

2.5 金属製軸受とセラミック製軸受のデータ比較

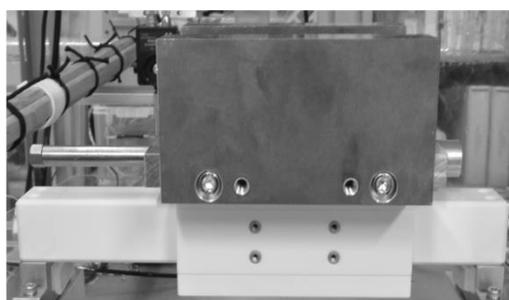
金属製静圧空気直動軸受の摩擦評価と回帰式の有効性は既に本研究室によって、確認されていることは2.1で述べた。ここでは金属製静圧空気直動軸受とセラミック製静圧空気直動軸受のデータの比較を行う。Table 1に金属製静圧空気直動軸受とセラミック製静圧空気直動軸受の体積、質量、速度範囲を示す。Fig.11に金属製軸受とセラミック製軸受の実際の写真を示す。

	Aluminum alloy	Ceramic
Size (mm ³)	3.6×10^5	10.5×10^5
Mass (kg)	4.111	2.737
Speed range (m/s)	$-1.1 \times 10^{-1} \sim 1.3 \times 10^{-1}$	$-0.8 \times 10^{-1} \sim 1.1 \times 10^{-1}$

Table 1 金属製軸受とセラミック製軸受のデータ



(a) 金属製軸受



(b) セラミック製軸受

Fig.11 金属製軸受とセラミック製軸受の写真

2.6 回帰式の算出

可動部分に作用している力が位置に比例した構成要素，速さに比例した構成要素，速度の方向に依存する構成要素，そして，軸受の傾斜に依存する要素の合計であると仮定すると，可動部に作用する力は

$$F = A_1x + A_2v + A_3(v / |v|) + A_4 \quad (11)$$

と表すことができる．式(11)の係数 A_1, A_2, A_3, A_4 を算出するために

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^n x_i^2 A_1 + \sum_{i=1}^n x_i v_i A_2 + \sum_{i=1}^n x_i \left(\frac{v_i}{|v_i|} \right) A_3 + \sum_{i=1}^n x_i A_4 = \sum_{i=1}^n x_i F_i \\ \sum_{i=1}^n x_i v_i A_1 + \sum_{i=1}^n v_i^2 A_2 + \sum_{i=1}^n v_i \left(\frac{v_i}{|v_i|} \right) A_3 + \sum_{i=1}^n v_i A_4 = \sum_{i=1}^n v_i F_i \\ \sum_{i=1}^n \left(\frac{v_i}{|v_i|} \right) x_i A_1 + \sum_{i=1}^n \left(\frac{v_i}{|v_i|} \right) v_i A_2 + \sum_{i=1}^n \left(\frac{v_i}{|v_i|} \right)^2 A_3 + \sum_{i=1}^n \left(\frac{v_i}{|v_i|} \right) A_4 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{v_i}{|v_i|} \right) F_i \\ \sum_{i=1}^n x_i A_1 + \sum_{i=1}^n v_i A_2 + \sum_{i=1}^n \left(\frac{v_i}{|v_i|} \right) A_3 + \sum_{i=1}^n A_4 = \sum_{i=1}^n F_i \end{array} \right. \quad (12)$$

を用いる．式(12)を用いて衝突実験により得られた x [m], v [m/s²], $(v / |v|)$, F [N] を代入し A_1, A_2, A_3, A_4 を算出する．

式(12)により得られたセラミック製軸受の回帰式係数 A_1, A_2, A_3, A_4 の値と金属製軸受の回帰式係数の値を Table2 に示す．金属製軸受の回帰式係数は既に本研究室により(12)を用いて同じ方法で算出されている[8]．金属製軸受とセラミック製軸受の係数の値はほぼ同等である．

	Aluminum alloy	Ceramic
A1 (Nm)	-1.7×10^{-1}	-4.2×10^{-1}
A2 (Nm ⁻¹ s ⁻¹)	-5.6×10^{-2}	-3.6×10^{-2}
A3 (N)	-7.6×10^{-4}	-5.0×10^{-4}
A4 (N)	1.2×10^{-4}	-4.0×10^{-4}

Table2 金属製軸受とセラミック製軸受の回帰式係数

Fig.12 は実験で計測された力 F_{meas} と回帰式(11)によって算出された力 F_{cal} の関係を示す. Fig.12 の結果については, データの評価として誤差の指標である RMS 値を用いる. F_{meas} と F_{cal} の差を(13)式を用いて計算する二乗平均平方根 RMS 値で示した. N は 1 回の実験でのプロット数である.

$$\text{RMS}(F_{meas} - F_{cal}) \quad [\text{N}] = \sqrt{\sum(F_{meas} - F_{cal})^2 / N} \quad (13)$$

F_{meas} と F_{cal} の RMS 値は 0.00046 [N] であり, これは可動部に作用している力の最大値約 0.006 [N] の 7.6% に相当する. 金属製軸受における F_{meas} と F_{cal} の RMS 値は 0.00035 [N] であることが確認されている[8]. これは可動部に作用している力の最大値約 0.006 [N] の 7.6% に相当する. この結果は力測定の正確さと回帰式の有効性を示す. しかしながら, Fig.12 の実験値は $0.002 \text{ [N]} < F < 0.007 \text{ [N]}$ の範囲, すなわち, 正方向に速度が大きい範囲において, バラつきが生じている. これはセラミック製静圧空気直動軸受全体の傾斜が原因の 1 つだと考えられる. 実際に, Fig.10 より, 可動部に作用している力の中心が 0 [N] ではなく負の範囲に存在していることがわかる. これはセラミック製静圧空気直動軸受全体の傾斜によって引き起こされた可動軸方向の重力によるものと予想される. その可動軸方向の重力は

$$Fg = Mg \sin \theta \quad (14)$$

と表される. g は重力加速度, θ はセラミック製静圧空気直動軸受全体の傾斜で

ある. Fg は Table2 の A4 なので, 重力加速度 g と質量 M をすると

$$\theta = -1.42 \times 10^{-5} [\text{rad}] \quad (15)$$

と算出される.

結論としては, 実験値の大きなバラつきはセラミック製静圧空気直動軸受全体の傾斜にあると予想されるが, それには確証がない. (15)より, セラミック製静圧空気直動軸受全体の傾斜はとても小さいので, 調整が困難である.

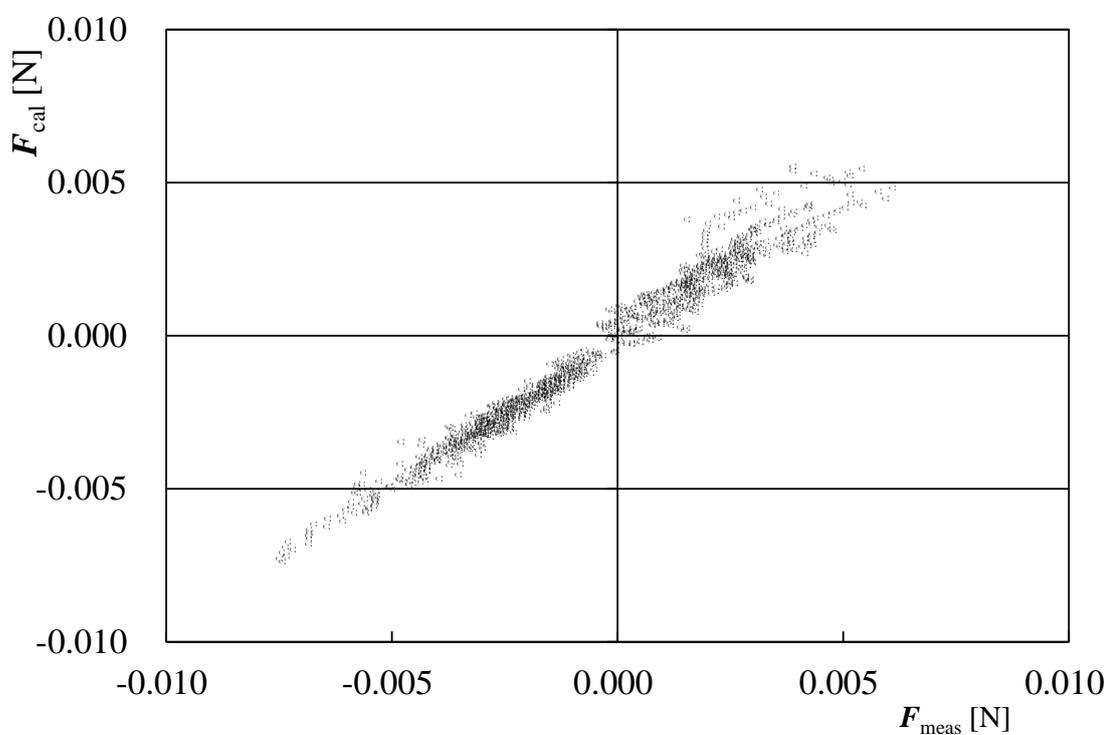


Fig.12 回帰式を用いて計算された力と実験で求められた力の関係

2.7 結論

セラミック製静圧空気直動軸受を用いて可動部分に作用している力を非常に正確に測定することができた。金属製静圧空気直動軸受とセラミック製静圧空気直動軸受の実験結果を比較し、回帰式の有効性を示した。セラミック製静圧空気直動軸受の内部に働く摩擦力は金属製静圧空気直動軸受と同様に小さい。したがって、セラミック製静圧空気直動軸受は金属製静圧空気直動軸受と同様に衝撃応答試験の軸受として利用できると考える。

第3章 竹刀の衝撃応答試験

3.1 実験装置

セラミック製静圧空気直動軸受の内部に働く摩擦力は小さく，セラミック製静圧空気直動軸受は竹刀の衝撃測定に用いることが可能であることは第2章で示した．以下，本紙における本題である竹刀の衝撃吸収測定を行う．

本実験で用いた実験装置の模式図を Fig.13 に示す．実験装置は，マイケルソン型ヘテロダイン光波干渉計及び可動部から成り立つ．可動部が動いた時の速度，変位などを間接的に測定している．

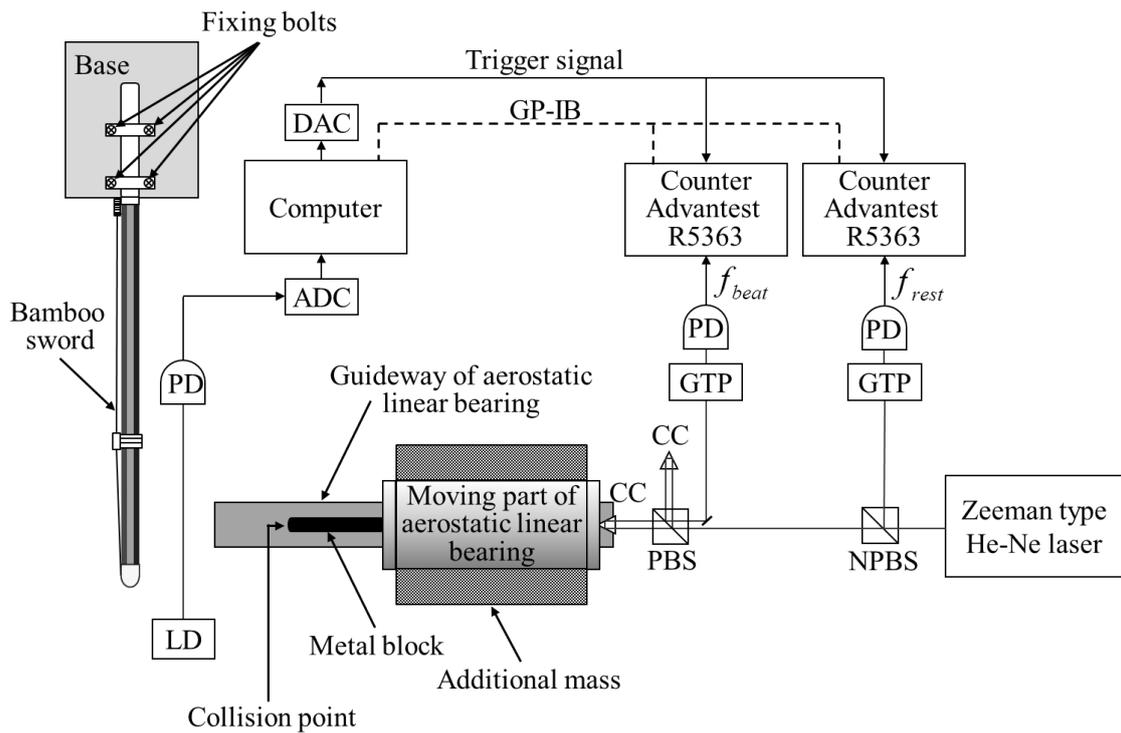


Fig.13 実験装置図

CC = cube corner prism, PBS = polarizing beam splitter, NPBS = non-polarizing beam splitter, GTP = Glan-Tompson prism, LD = laser diode, PD = photo diode.

竹刀は地面と水平に定盤に固定されており，刀身が静圧空気直動軸受の可動部(Moving part)の動く方向と垂直になっている。

本研究では，セラミック製静圧空気直動軸受を用いた．軸受にはコンプレッサーにより 0.4 [MPa]の圧縮空気が供給されている．送り込んだ圧縮空気により軸受の可動部とガイドウェイの間に空気膜が形成される．可動部は浮上支持されており，完全な非接触状態であるので前章で示した通り可動部に作用する摩擦力の影響を衝撃力と比較して無視できる程度に抑えることができる．浮上支持された可動部の先端と後端にはそれぞれ金属製の衝突用ブロック (Metal block)とコーナーキューブプリズム(CC)が取り付けられている．ブロックと CC を含む可動部全体の質量は 2.737 [kg]である．

次に，光波干渉計について説明する．光源にはゼーマンタイプ 2 周波 He-Ne レーザーを用いている．光源から発射された二つの直交偏光を持つレーザー光は無偏光ビームスプリッタ(Non-Polarizing Beam Splitter: NPBS)で 2 分される．2 分された一方の信号は GTP を経て PD2 で検出される．PD2 により検出された電圧信号は，周波数カウンタ(R5363; ADVANTEST 社製)を用いて周波数として測定される．可動部が止まっているときの信号光，つまりドップラーシフトしていないときの信号光と参照光との差周波数を基準周波数 f_{rest} とする．NPBS で 2 分されたもう一方の信号は偏光ビームスプリッタ(Polarizing Beam Splitter: PBS)により信号光と参照光に分けられる．信号光は被測定物に取り付けられた CC で反射し，再び PBS に入射する．参照光は固定された CC で反射され PBS に戻る．戻ってきた二つの信号は GTP で変更され PD1 で電圧信号として検出される．検出された信号光と参照光の差周波数をビート周波数 f_{beat} とする．検出されたビート周波数を周波数カウンタで測定する．

可動部に手動で初速を与え，竹刀に衝突させる．竹刀を紐で縛った状態と縛

っていない通常の状態での比較実験を行うため各 30 回ずつ、計 60 回衝突実験を行った。

測定に使用された 2 台の周波数カウンタは設置されている半導体レーザーから PD に入射する光が遮られた瞬間に同時に測定が開始されるように設定した。これは、光が遮られた時に、AD コンバーターからコンピュータを通して、トリガー信号に変換した後、DA コンバータを通して、周波数カウンタにトリガーが掛かる光スイッチ計測システムを組んだためである。

3.2 データ解析方法

物体を衝突させた際の、光波干渉計から得られたデータの解析方法について述べる。

光波干渉計によって測定したビート周波数 f_{beat} と中心周波数 f_{rest} から、可動部の速度や位置、加速度、慣性力を求めることができる。可動部の速度 v は光波干渉計の信号光のドップラーシフト周波数 f_{Doppler} から測定され、次式で表される。

$$v = \lambda_{\text{air}} (f_{\text{Doppler}}) / 2 \quad (16)$$

$$f_{\text{Doppler}} = - (f_{\text{beat}} - f_{\text{rest}}) \quad (17)$$

速度 v の時間微分、時間積分によって加速度 a を求めることができる。

$$a = dv / dt \quad (18)$$

$$x = \int v dt \quad (19)$$

可動部の慣性力 F は、その物体の慣性質量 M と加速度 a の積により求められる。

$$F = Ma \quad (20)$$

実験によって得られたデータを用い可動部に作用する力の解析手順を解説する。Fig.14 に光波干渉計より得られた f_{beat} [Hz] と f_{rest} [Hz] の値を示す。今回、He-Ne レーザーの波長 $\lambda_{\text{air}} = 6.32 \times 10^{-7}$ [m] とし、最初に初速を与えた方向と反対方向を正の速度としている。

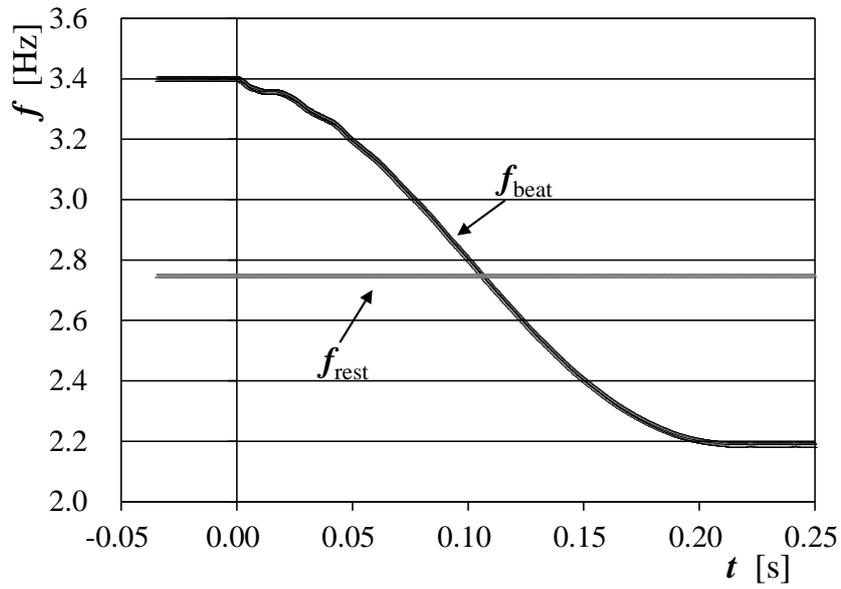


Fig.14 干渉計より得られたビート周波数

Fig.15 に式(17)より計算したドップラーシフト周波数 f_{Doppler} を用い、式(16)で求めた可動部の速度 v [m/s^1] の速度を示す.

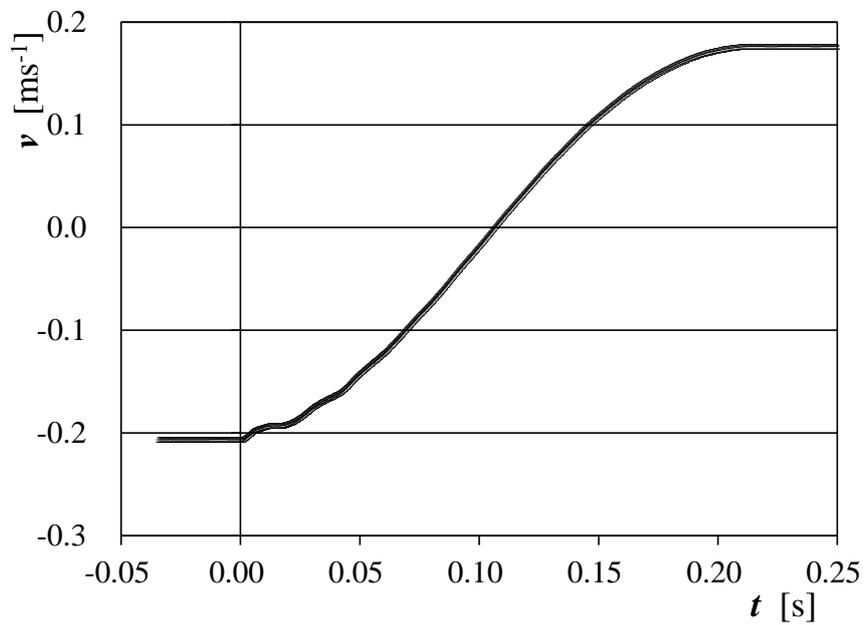


Fig.15 ビート周波数より計算した可動部の速度

Fig.16 に速度を時間積分して計算された変位 x [m]を示す. また Fig.17 に速度を時間微分して計算された加速度 a [m/s²]を示す.

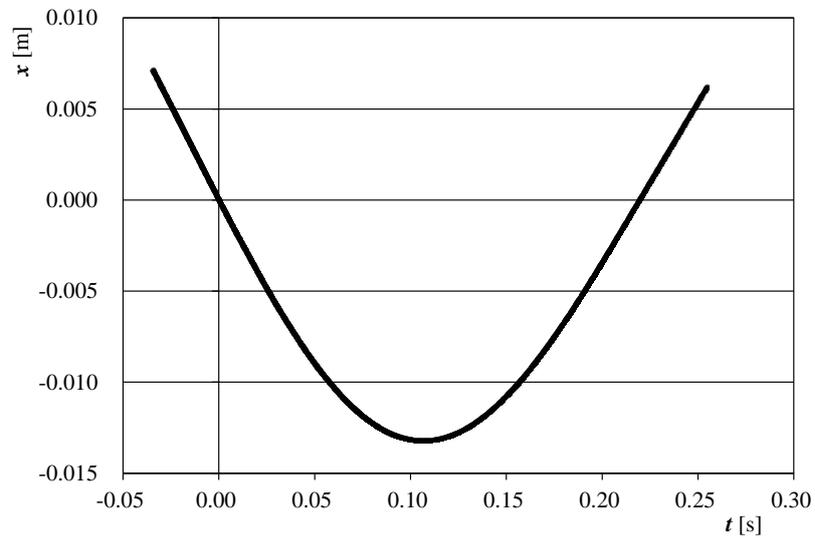


Fig.16 速度を時間積分して計算した変位

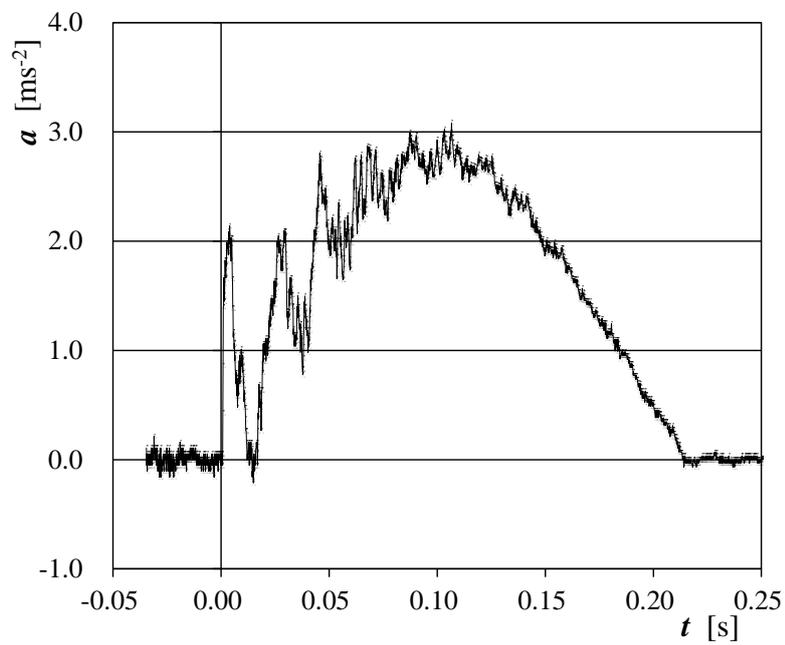


Fig.17 速度を時間微分して計算した加速度

また, Fig.18 に加速度 a [m/s^2]に質量 M [kg]を掛け合わせて計算した慣性力 F_{mass} [N]を示す. 質量 M はおよそ 2.737 [kg]である.

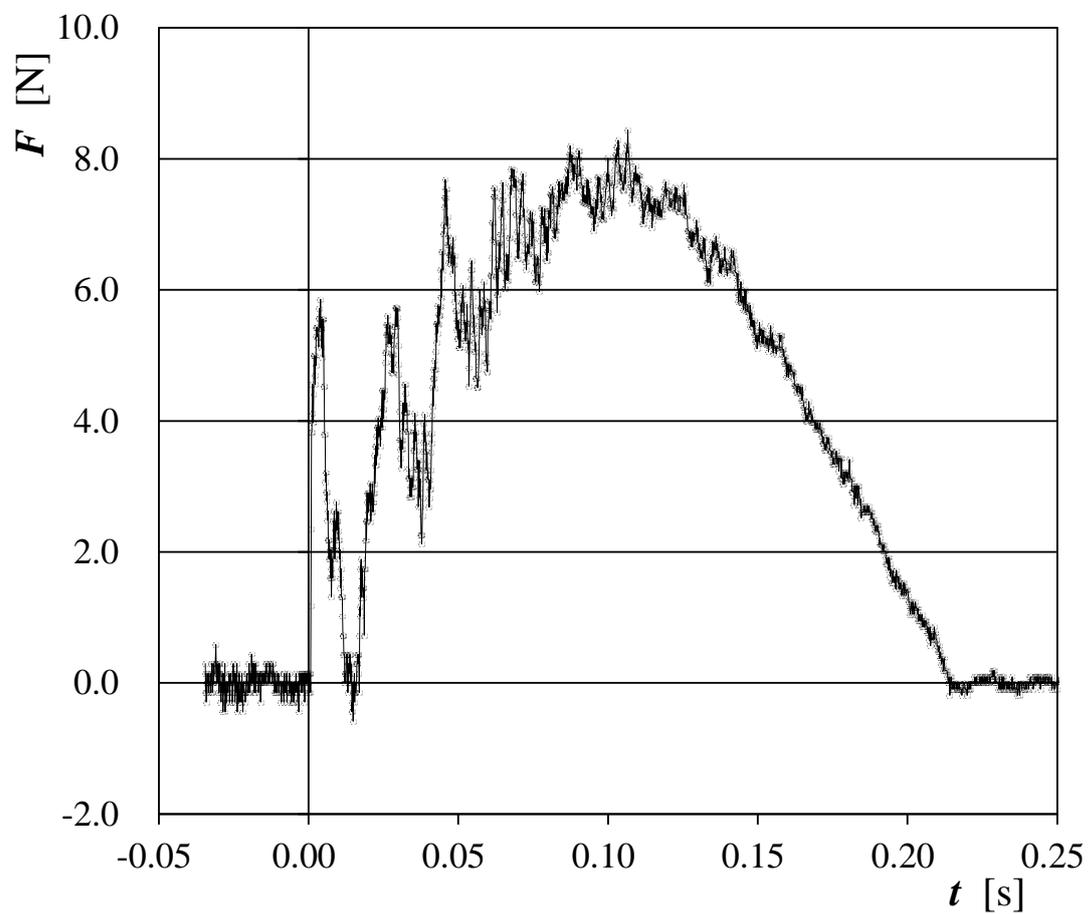


Fig.18 加速度より計算した慣性力

3.3 竹刀について

竹刀は、剣術・剣道の稽古で防具に打突するための、竹で作られた日本刀の代替品である。縦に 8 分割した竹片 4 本を合わせ、鹿の皮などで出来た部品で纏めて作る(これを 4 つ割り竹刀という)。剣先から柄までに 1 本の弦(つる)を張り、弦が張られた側を峰、その反対側を刃、左右を鎧に見立てる。剣先に短い鞣革で包みこれを先革という。竹刀の峰にあたるところに、柄から先革にかけて弦を張り、剣先から約 30 [cm]のところを細い革できつく縛る。これを中結という。剣先から中結までの部分を物打と呼ぶ。竹刀は 4 つの片で構成されており、接触面は台形で、中は空洞になっている。竹刀が物体と衝突したとき、接触した一片が中の空洞に入り込む構造になっている。この竹刀の構造が衝撃を吸収し、人間が感じる痛みを軽減させると考える。竹刀全体の長さは 1170 [mm]であり、重さは 0.487 [kg]である。Fig.19 に紐で拘束していない状態の竹刀の写真、断面図を示す。Fig.20 に体重計の上に竹刀を乗せた写真を示す。Fig.21 は実際の実験装置図付近の写真を示す。竹刀は紐で拘束していない状態である。

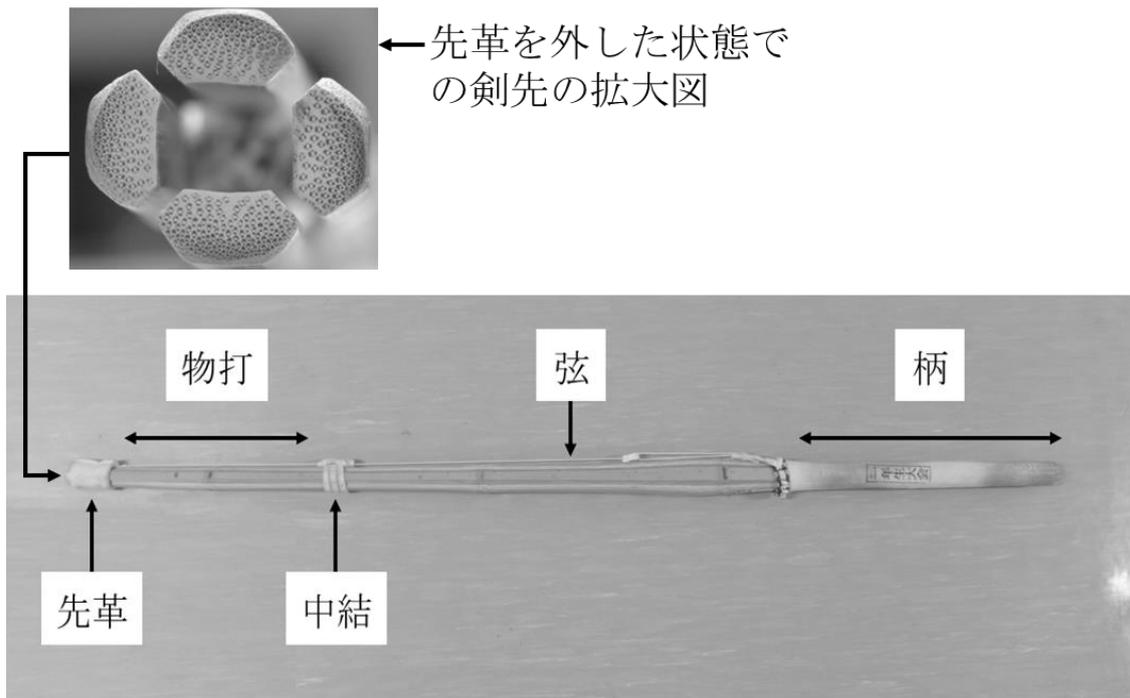


Fig.19 竹刀の写真(紐で拘束していない状態)

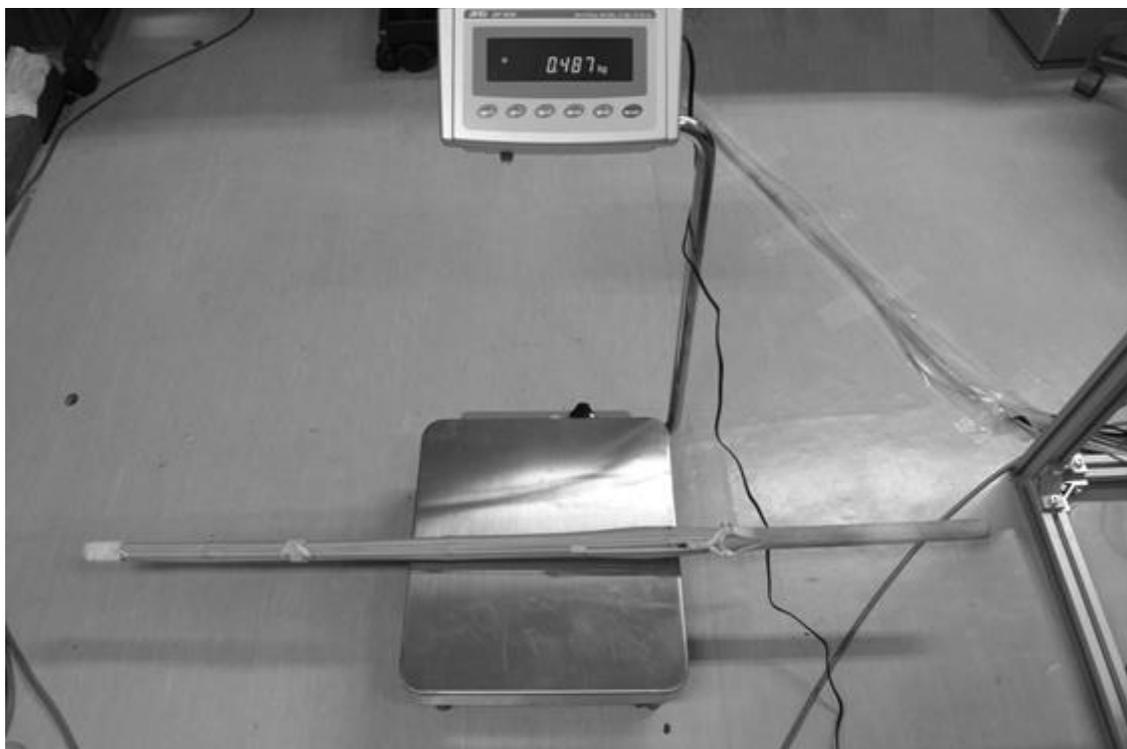


Fig.20 竹刀の質量写真

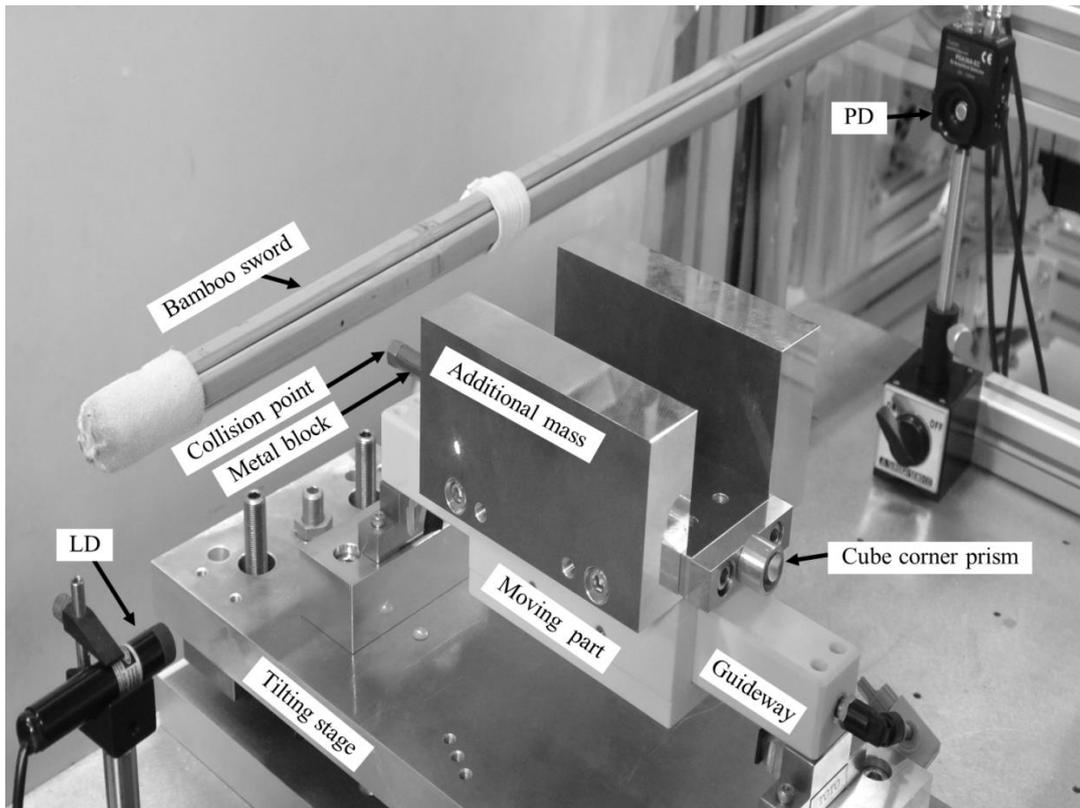


Fig.21 実験装置付近の写真(紐で拘束していない状態)

Fig.22 には竹刀を紐で縛った際の写真である．竹刀を紐で先端から 150 [mm] 間隔で縛っている．

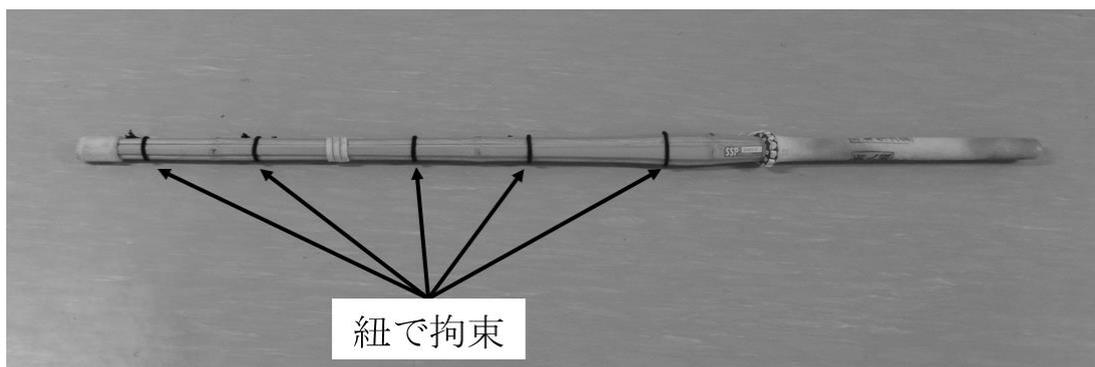


Fig.22 竹刀の写真(紐で拘束している状態)

Fig.23 は竹刀を紐で縛った際の実験装置図付近の写真である。Fig.24 に衝突点付近の写真を示す。衝突点は竹刀を紐で縛っていない状態、竹刀を紐で縛っている状態、共に先端から約 120 [mm]付近である。

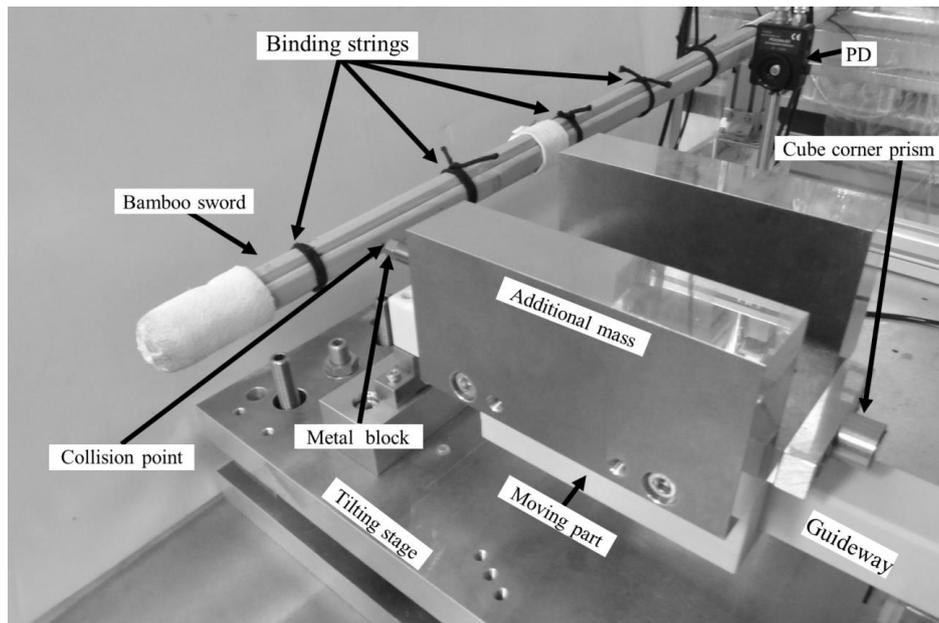


Fig.23 実験装置図付近の写真(紐で拘束している状態)

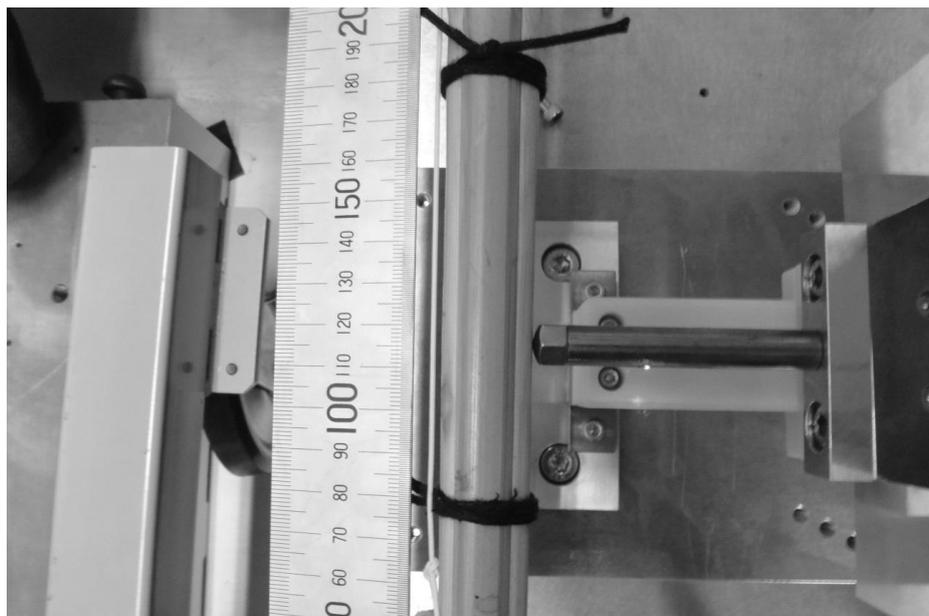


Fig.24 衝突点付近の写真

3.4 実験結果

以下，竹刀を紐で縛った状態を **Bound-state**，紐で縛らない通常の状態を **Original-state** とし，データを示す．尚，各 30 回ずつ，計 60 回の実験結果のうち初速が 0.2 [m/s] に近いものを示した．Fig.25 に時間に対する力の変化を示す．

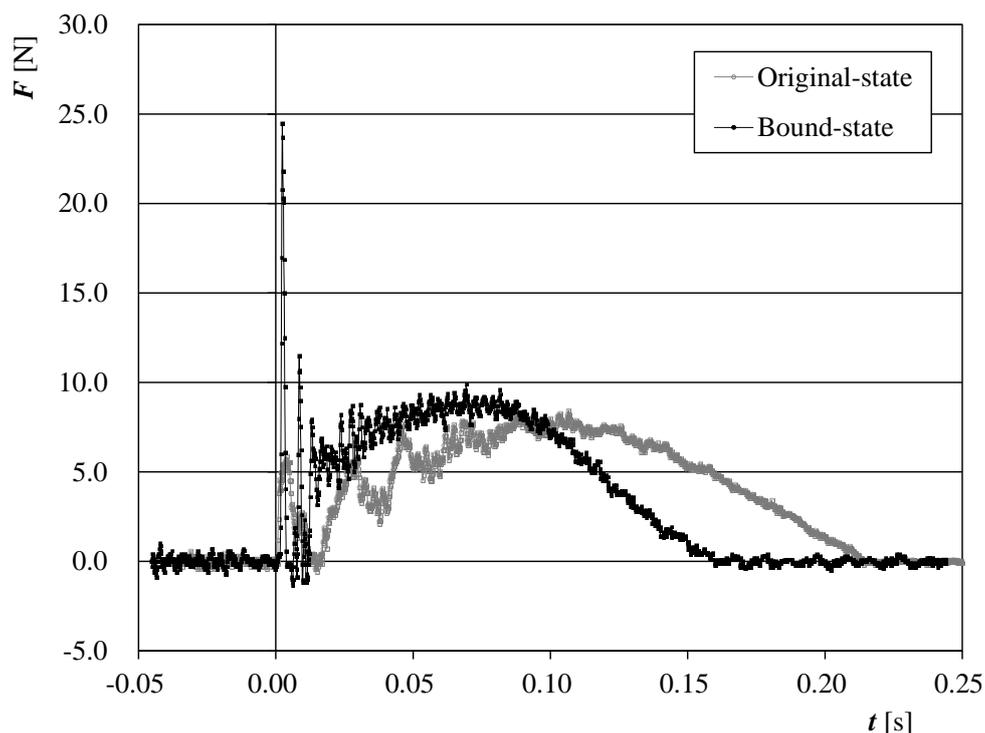


Fig.25 時間に対する力の変化

Fig.25 より，**Original-state** の衝突力の最大値は約 0.1 [s] 付近に存在し，衝突力の最大値に達する前に 3 つの短いパルスが生じている．これは衝突力が増加した後，減少していることから，可動部により衝撃を加えられた 1 つの竹片が竹刀の内部に入り込んでいるためと考えられる．その一方で，**Bound-state** の衝突力は可動部が竹刀に衝突した瞬間に急激に増加し最大値に達した後，約 0.005 [s] で 0 [N] に急激に減少する．これは可動部が竹刀から瞬間的に離れるためだと考えられる．また，**Bound-state** は約 0.15 [s] の衝突時間の中に，最大で約 24 [N] の

衝突力が竹刀に作用している，その一方で，Original-state は約 0.22 [s]の衝突時間の中に，最大で約 8 [N]の衝突力が竹刀に作用している． Fig.26~Fig.30 に Original-state の時間に対する力の変化の実験結果 30 回すべてのデータを示す．

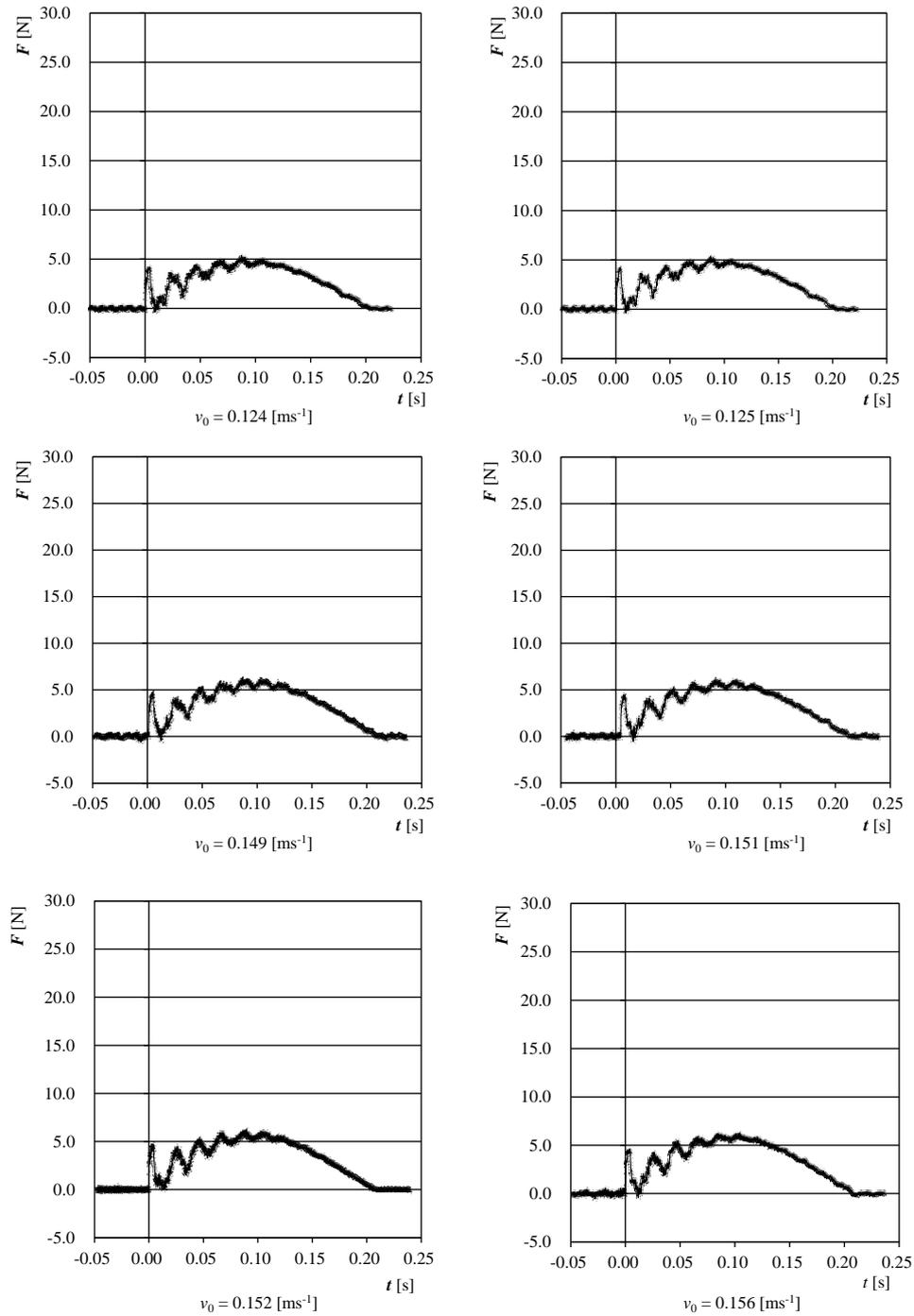


Fig.26 時間に対する力の変化($v_0 = 0.124 \text{ ms}^{-1} \sim 0.156 \text{ ms}^{-1}$)

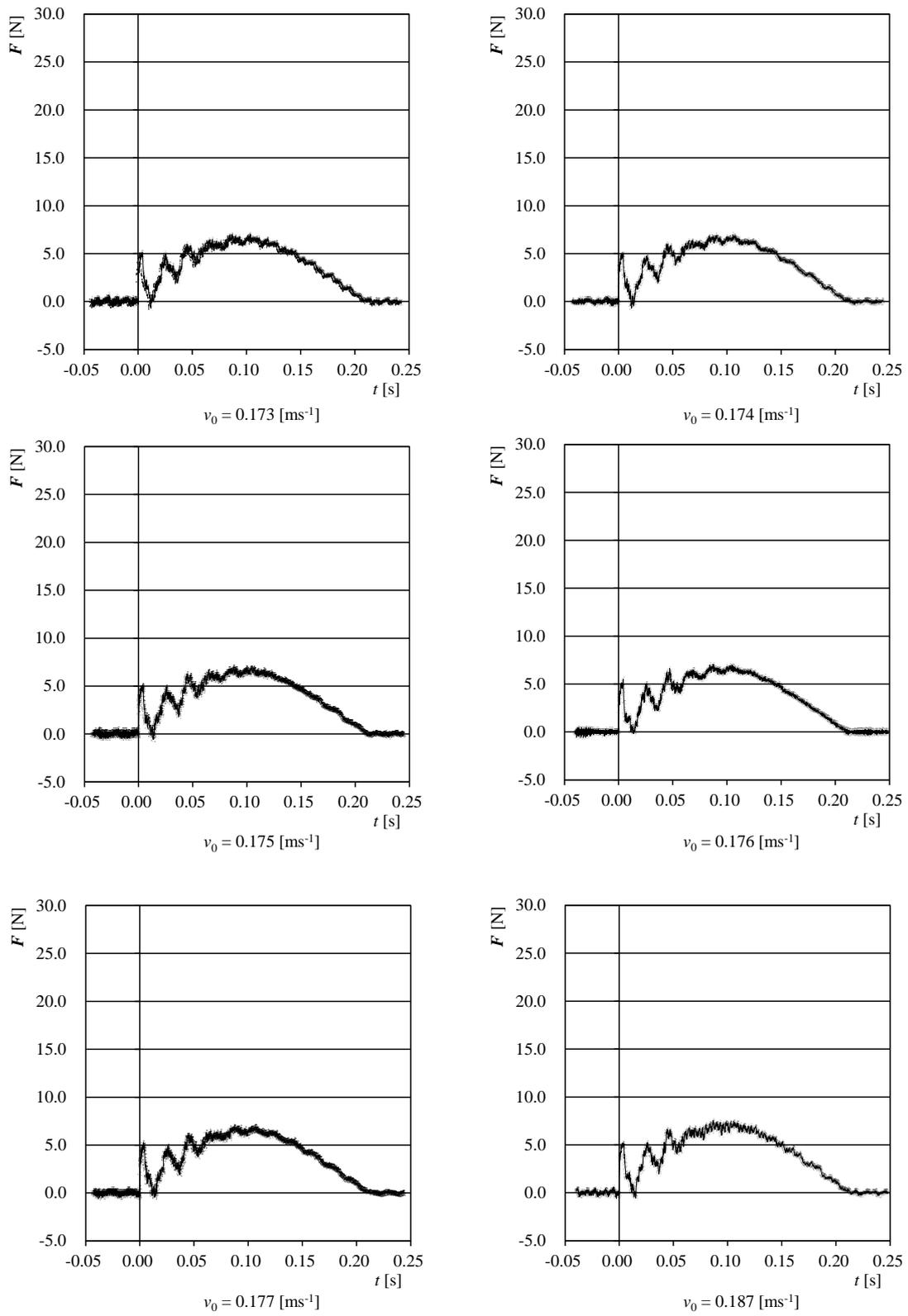


Fig.27 時間に対する力の変化($v_0 = 0.173 \text{ ms}^{-1} \sim 0.187 \text{ ms}^{-1}$)

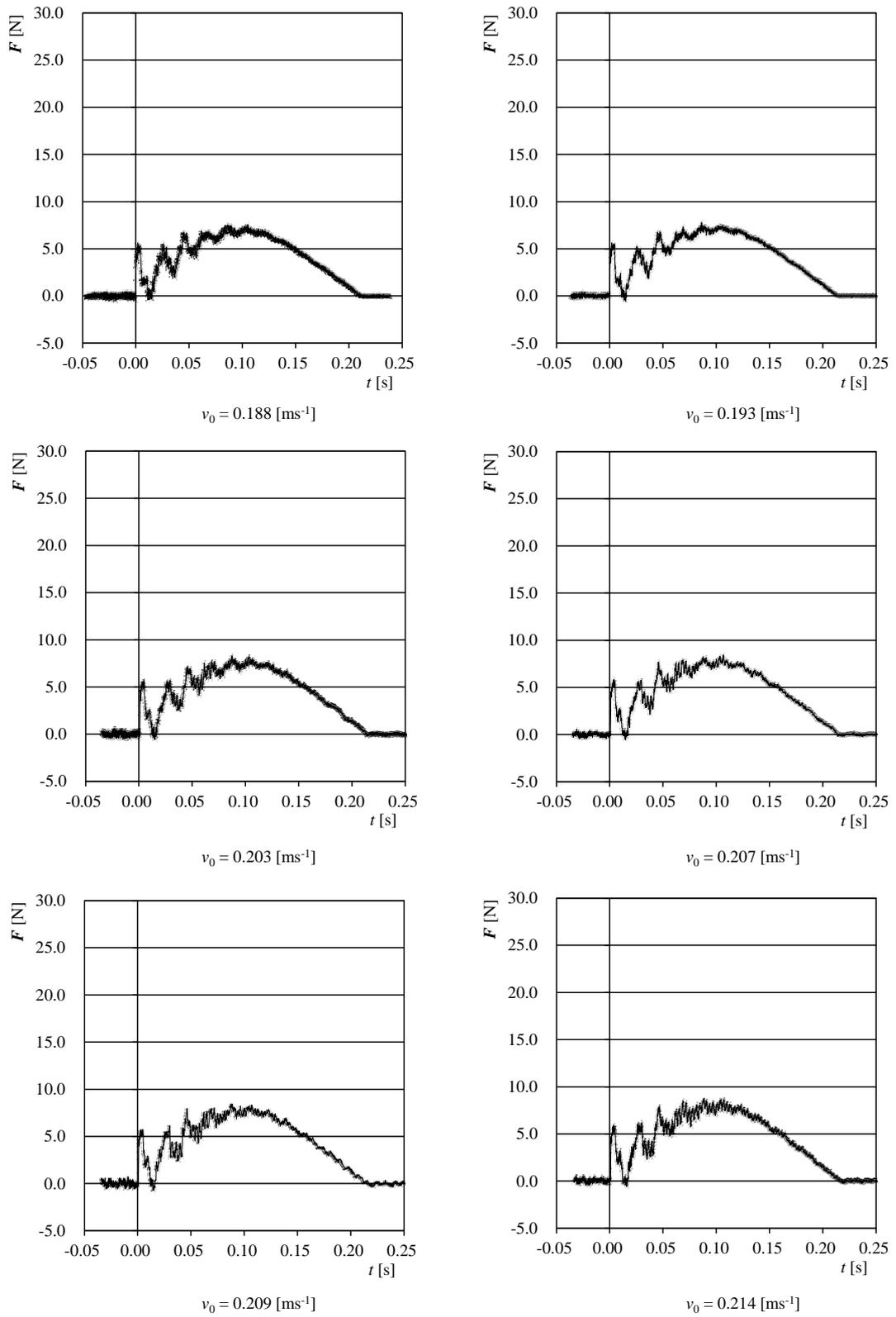


Fig.28 時間に対する力の変化($v_0 = 0.188 \text{ ms}^{-1} \sim 0.214 \text{ ms}^{-1}$)

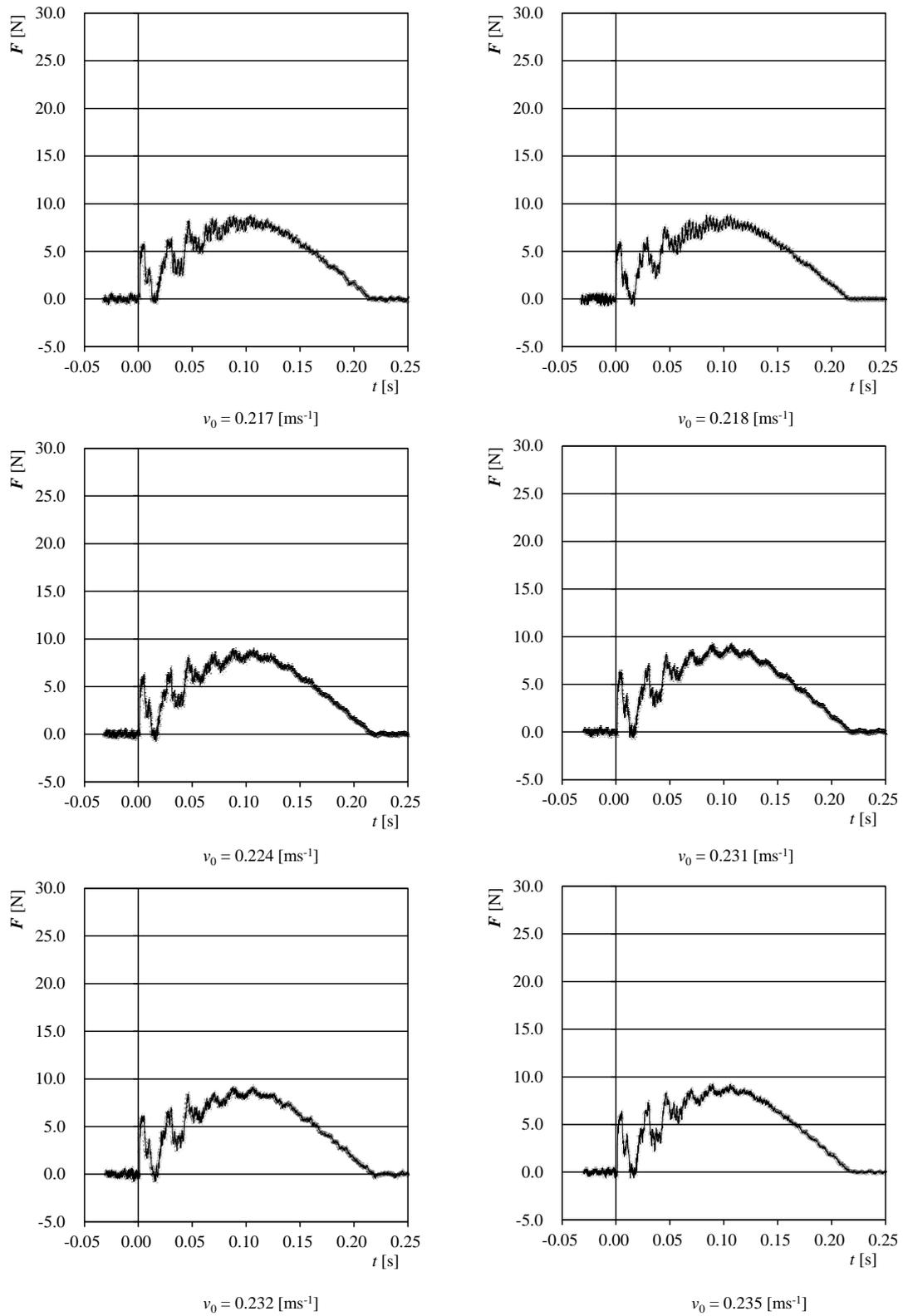


Fig.29 時間に対する力の変化($v_0 = 0.217$ ms⁻¹ ~ 0.235 ms⁻¹)

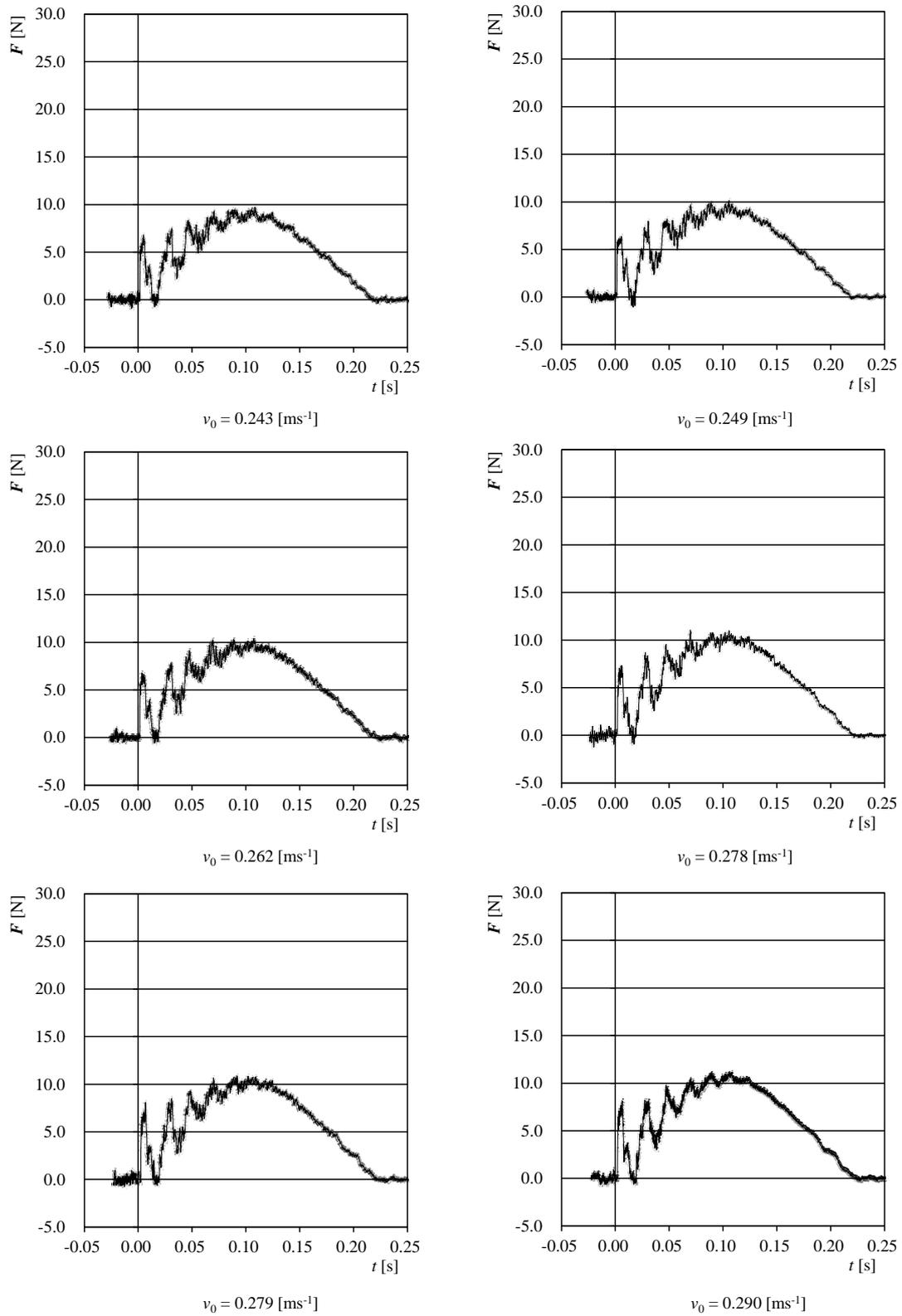


Fig.30 時間に対する力の変化($v_0 = 0.243 \text{ ms}^{-1} \sim 0.290 \text{ ms}^{-1}$)

Fig.31~Fig.35に Bound-state の時間に対する力の変化の実験結果 30回すべてのデータを示す.

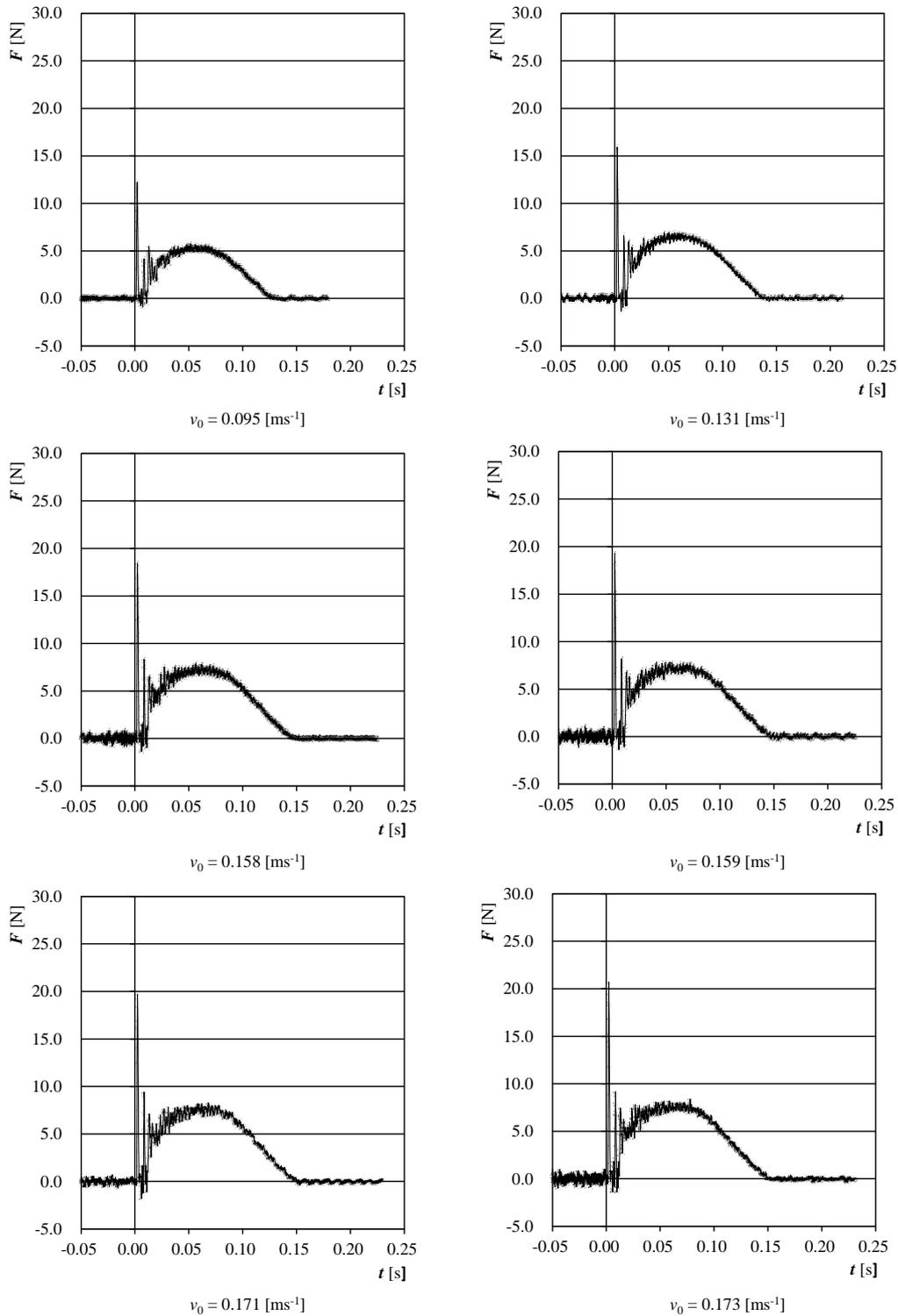


Fig.31 時間に対する力の変化($v_0 = 0.095 \text{ ms}^{-1} \sim 0.173 \text{ ms}^{-1}$)

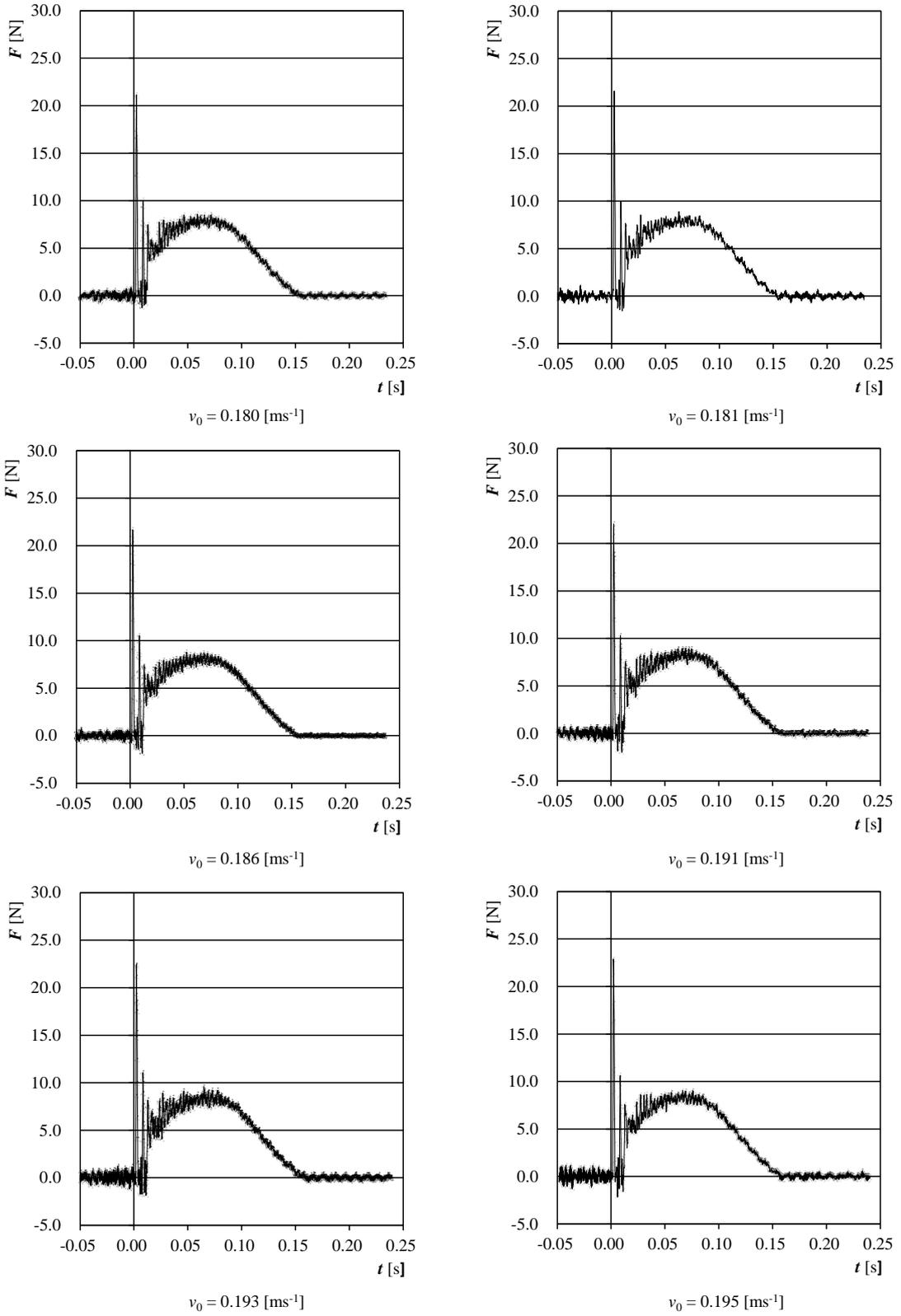


Fig.32 時間に対する力の変化($v_0 = 0.180 \text{ ms}^{-1} \sim 0.195 \text{ ms}^{-1}$)

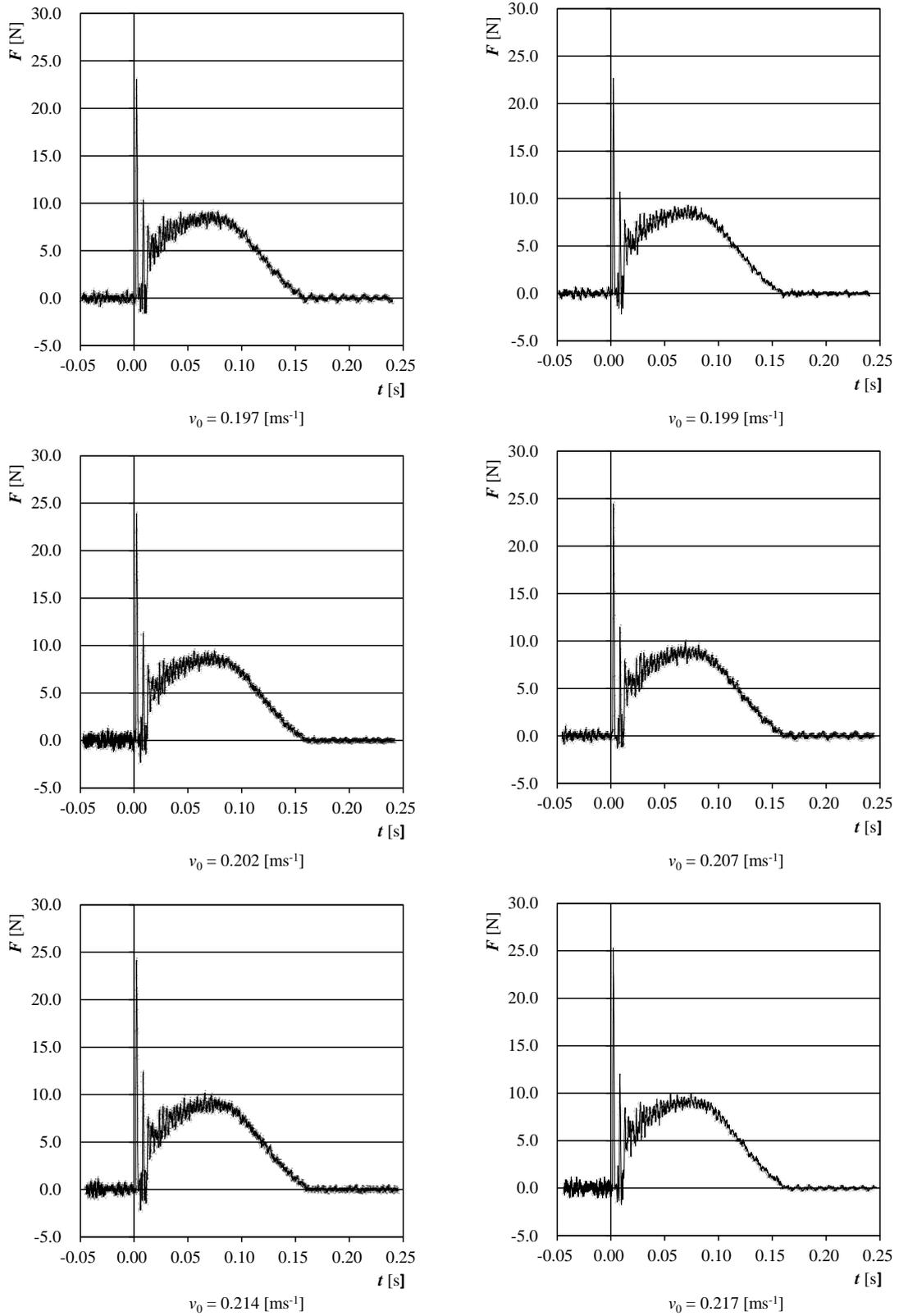


Fig.33 時間に対する力の変化($v_0 = 0.197 \text{ ms}^{-1} \sim 0.217 \text{ ms}^{-1}$)

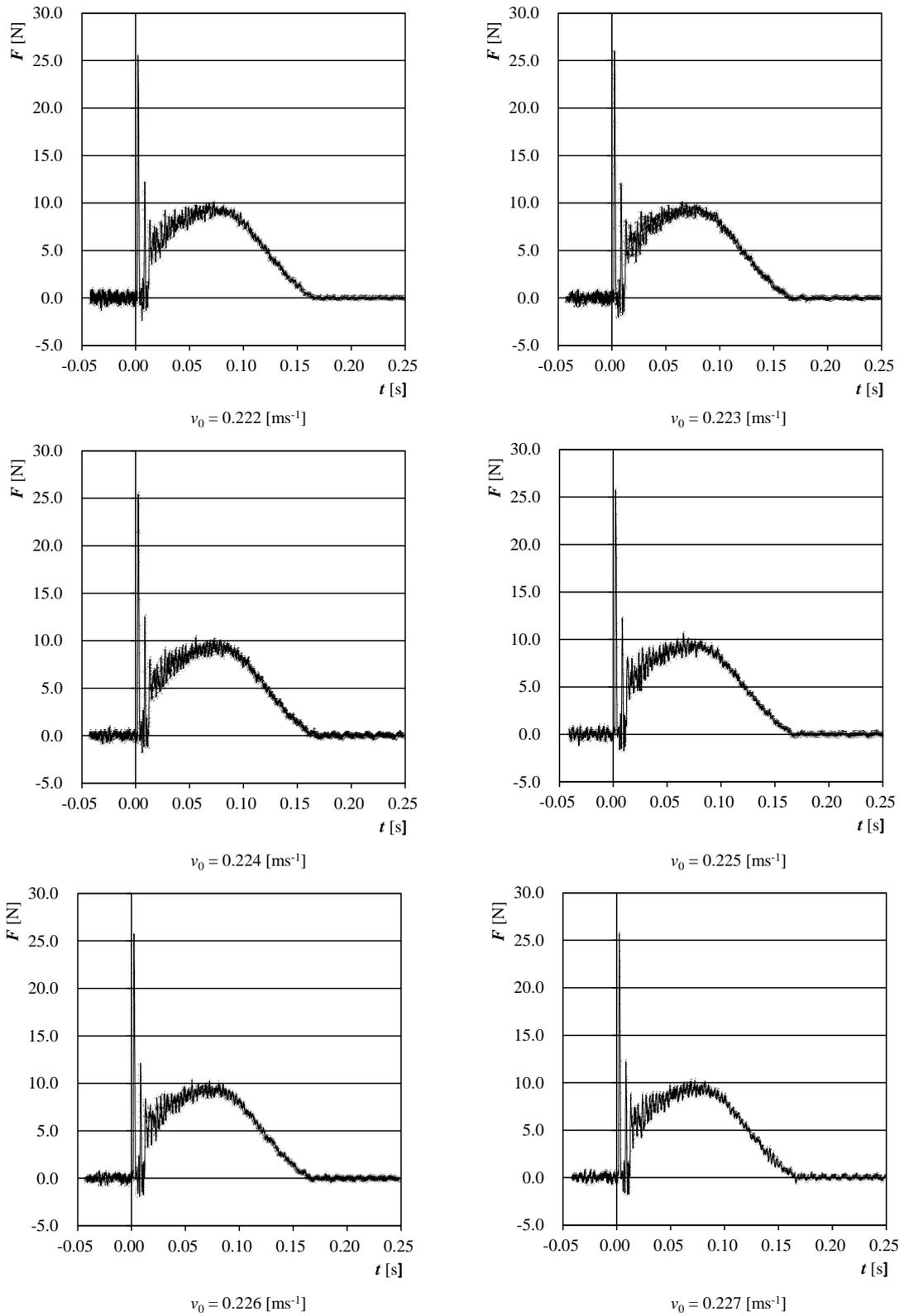


Fig.34 時間に対する力の変化($v_0 = 0.222 \text{ ms}^{-1} \sim 0.227 \text{ ms}^{-1}$)

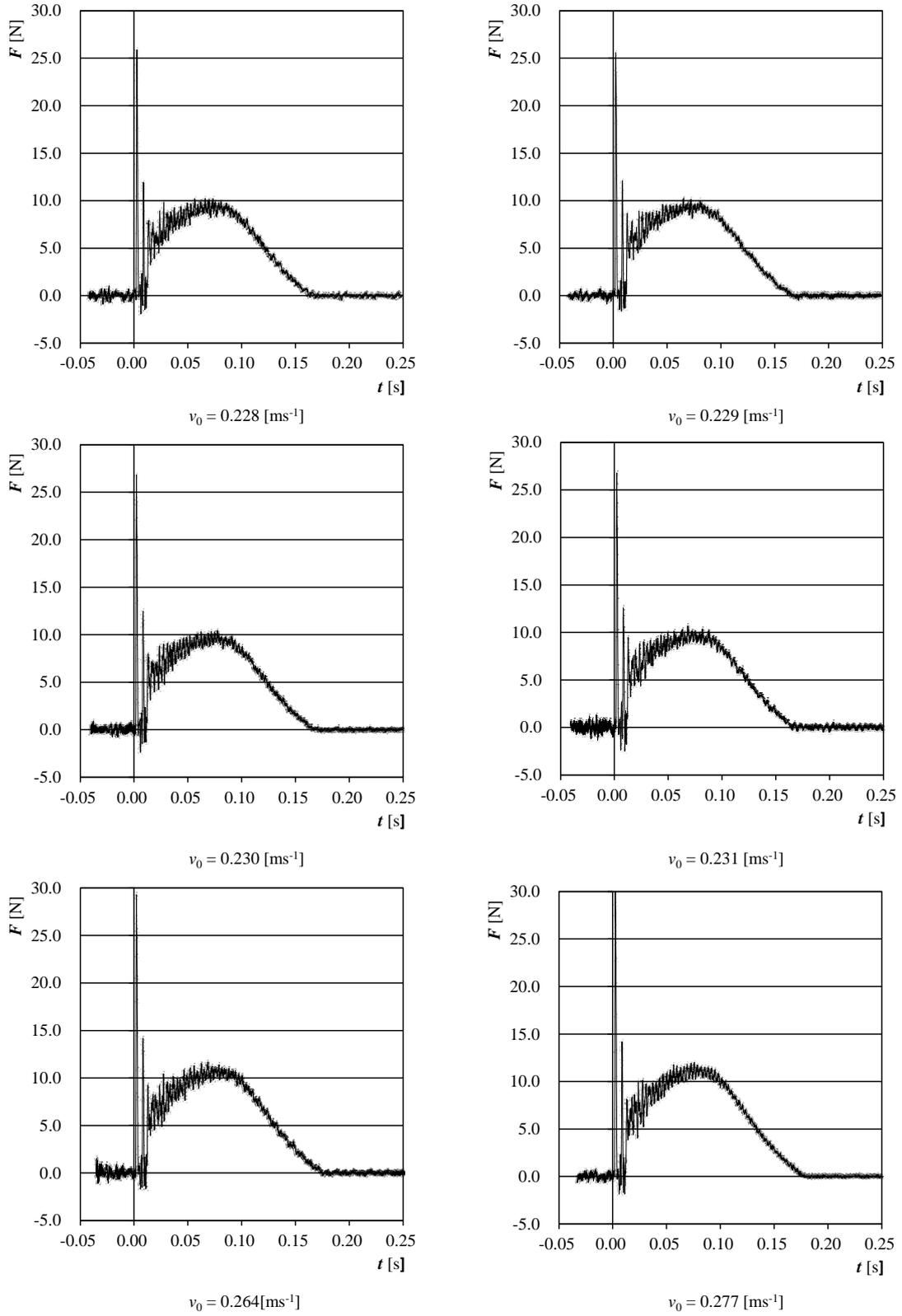


Fig.35 時間に対する力の変化($v_0 = 0.228 \text{ ms}^{-1} \sim 0.277 \text{ ms}^{-1}$)

Fig.36 に速度に対する力の変化のグラフを示す.

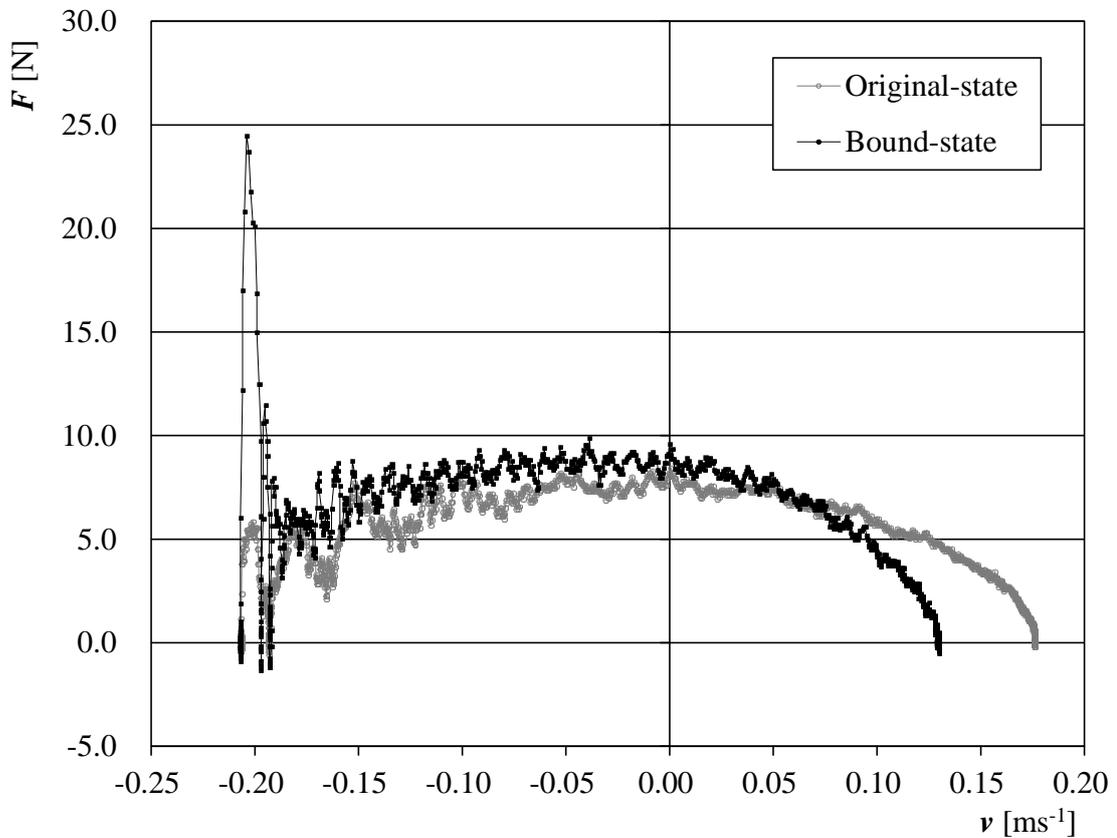


Fig.36 速度に対する力の変化

Fig.36 より, 可動部の初速は Original-state と Bound-state 等しく約 $v_0 = -0.24$ [ms^{-1}]で竹刀に衝突し, Original-state は約 $v_1 = 0.18$ [ms^{-1}], Bound-state は約 $v_1 = 0.13$ [ms^{-1}]で竹刀から離れている. この時, 運動エネルギーの変化量 ΔE は

$$\Delta E = Mv_1^2/2 - Mv_0^2/2 \quad (21)$$

で表せる. 式(19)より Bound-state の運動エネルギーの変化量は約-0.056 [J], Original-state の運動エネルギーの変化量は約-0.03 [J]である. これより, Bound-state と比較して, Original-state のほうが弾性衝突に近いことがわかる.

Fig.37 に変位に対する力の変化のグラフを示す.

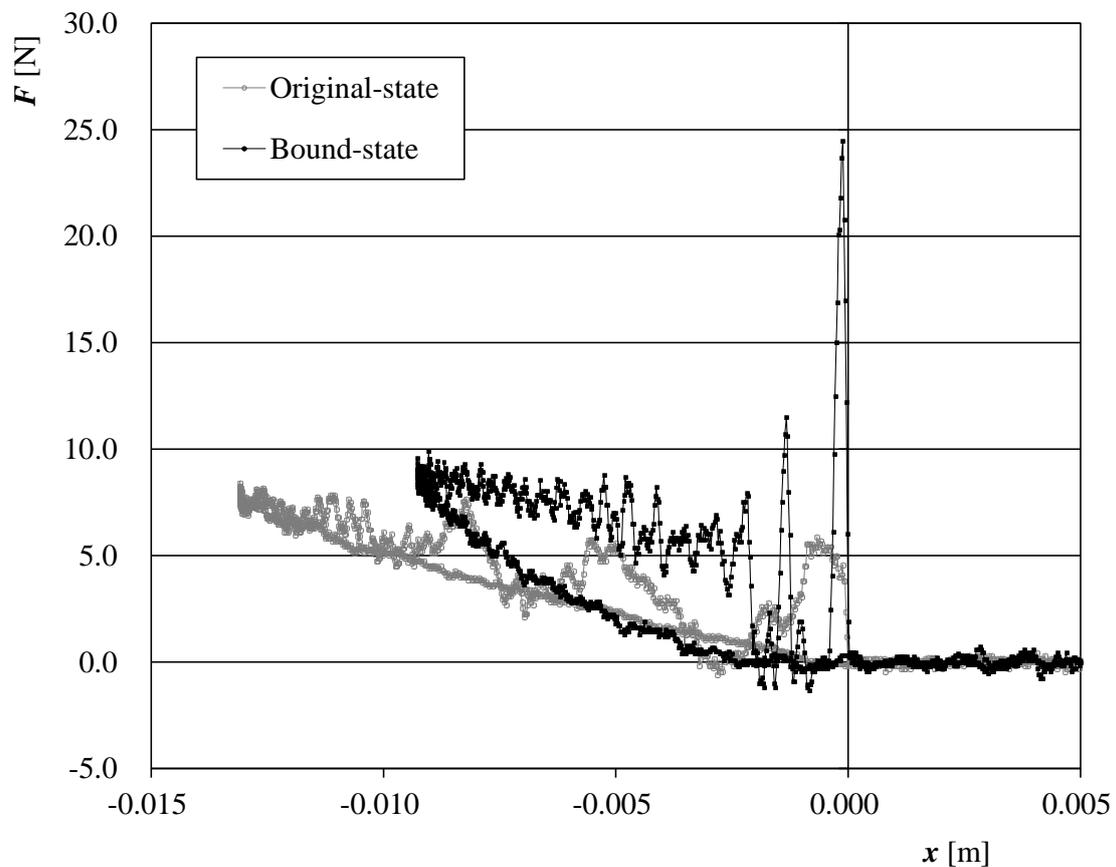


Fig.37 変位に対する力の変化

Fig.37 より, Bound-state と Original-state の変位の差は約 0.004 [m]である. この差は衝撃が加えられた竹片 1 片が竹刀の中に入り込むという特性を打ち消すことで生じたと考えられるが, Bound-state に比べ, Original-state は柔らかくなっているため, 衝撃が加わった際, 変位が Original-state のほうが大きくなっているという要因も考えられる. しかし, この実験値だけでは, 変位の差はどのような要因から生じているか不明である.

以下 Fig.38~40 には各, 30 回ずつ計 60 回すべての実験データを示す.

Fig.38 に初速に対する半値全幅のグラフを示す.

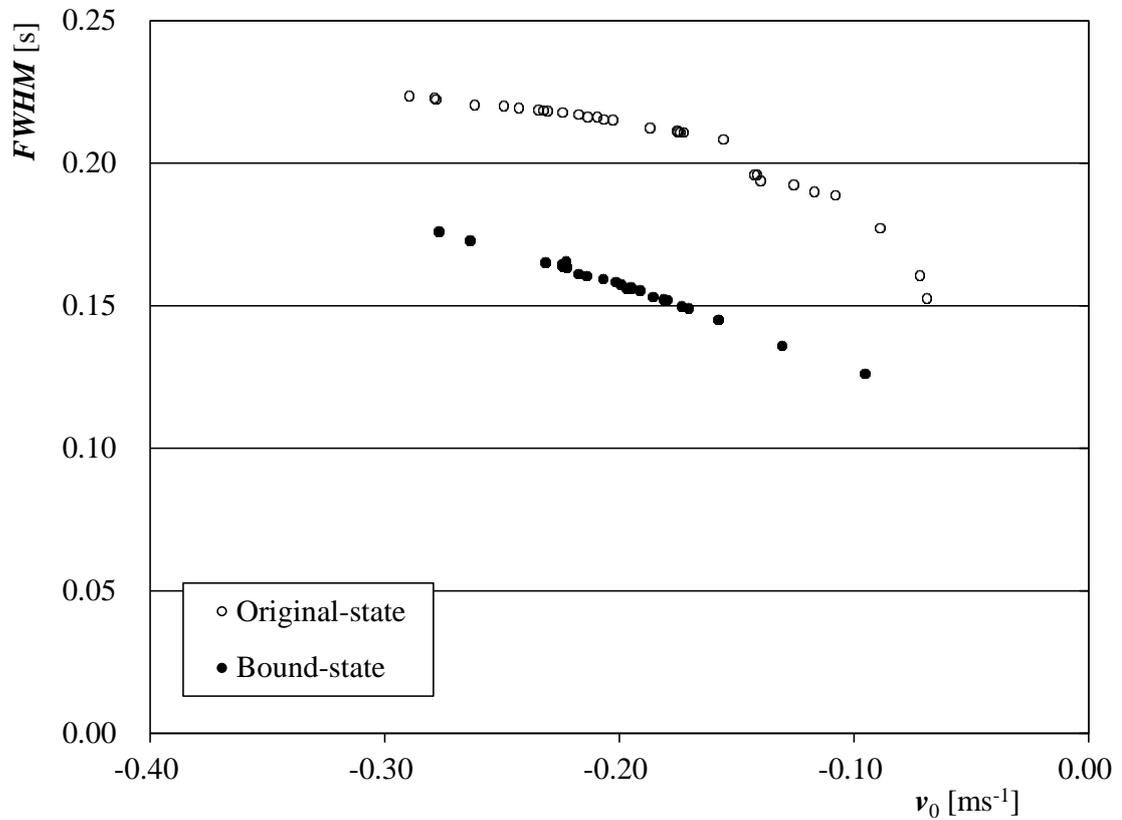


Fig.38 初速に対する半値全幅

Fig.38 より, 初速がどのような値であっても, Bound-state よりも Original-state のほうが半値全幅が大きく, 竹刀と軸受が接触する時間が長いことがわかる. その差は約 70%である.

Fig.39 に初速に対する力の最大値のグラフを示す.

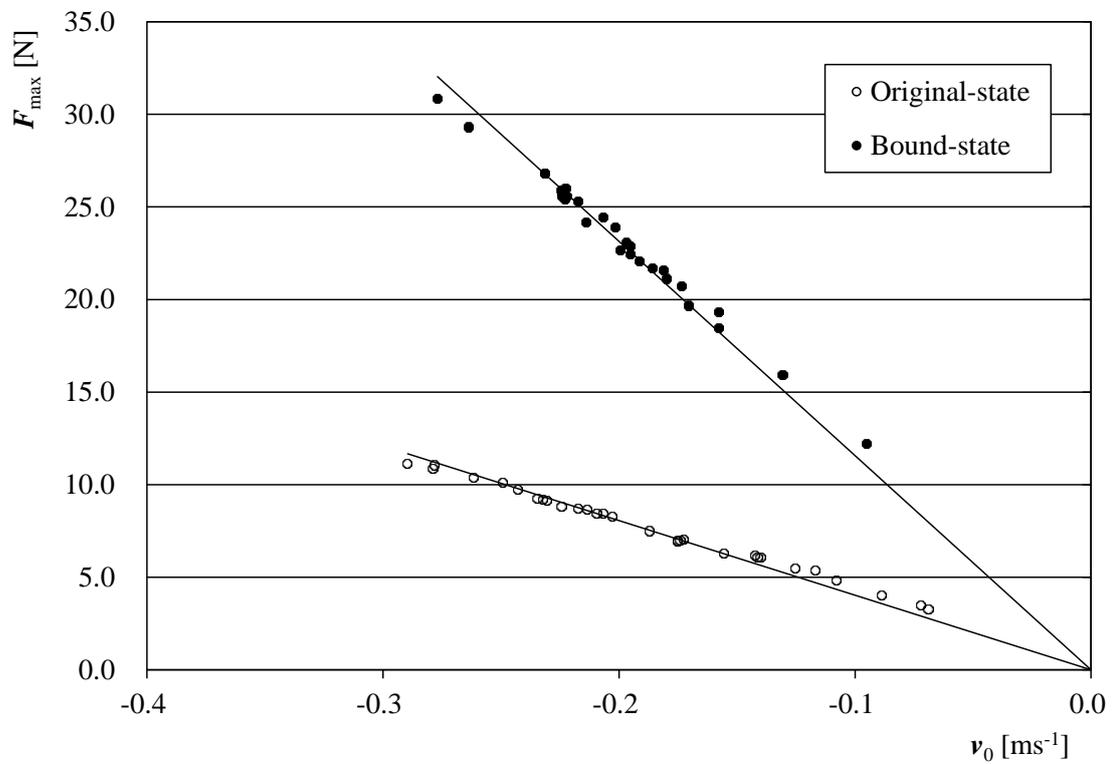


Fig.39 初速に対する力の最大値

Fig.39 より, 初速がどのような値であっても, 力の最大値は Original-state より, Bound-state のほうが大きいことがわかる. 衝突力の最大値は速度の大きさに比例し, Bound-state の衝突力の最大値は Original-state の約 3 倍である.

Fig.40 に初速に対する力積のグラフを示す.

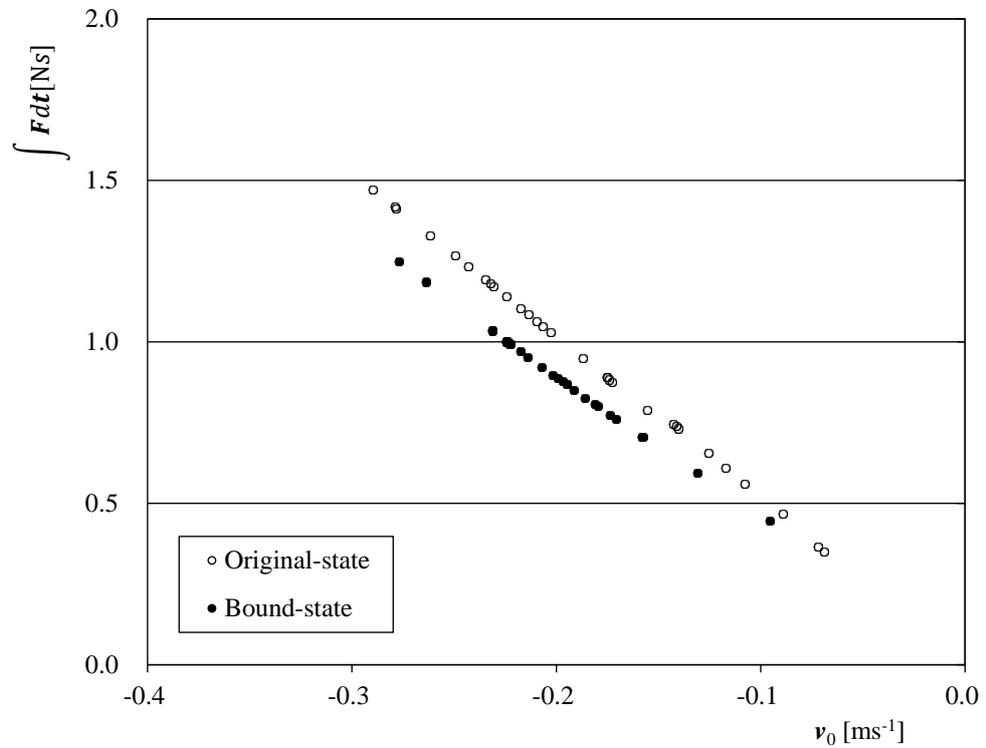


Fig.40 初速に対する力積

Fig.40 より, 力積は速度の大きさに比例するが, 半値全幅や, 衝突力の最大値に比べて, Original-state と Bound-state の差は小さい.

力積は力の大きさと力が働く時間を掛け合わせたものであるため, 通常時は力の最大値は小さいが, 力が働く時間が長く, 拘束時は力の最大値は大きい, 力が働く時間が短いことがわかる.

第4章 不確かさ評価

本実験において、可動部に作用する慣性力 F_{inertial} は、材料から可動部に作用する F_{material} と可動部に作用する摩擦などの外力 F_{external} の和で表される。

$$F_{\text{inertial}} = F_{\text{material}} + F_{\text{external}} \quad (22)$$

本実験において、試料(竹刀)から可動部に作用する力 F_{material} の不確かさ評価が必要であり、 F_{material} の不確かさは、慣性力 F_{inertial} と外力 F_{external} の不確かさの合成である。よって、本実験の力測定の不確かさ構成要素は次の2つの要素となる。

- (A) 可動部に作用する慣性力(F_{inertial})の測定の不確かさ。
- (B) 可動部に作用する外力(F_{external})の不確かさ。

4.1 可動部に作用する慣性力の測定の不確かさ

F_{material} の不確かさを構成する要素として以下の3つが考えられる。

(4.1.1) 周波数カウンタにおける不確かさ: u_1

(4.1.2) 光軸あわせにおける不確かさ: u_2

(4.1.3) 質量における不確かさ: u_3

4.1.1 周波数カウンタに起因する不確かさ

周波数カウンタにおける不確かさは測定に使用した周波数カウンタの分解能に起因する。平均サンプリング間隔約 $\Delta t = 1.5$ [ms] の周波数カウンタ R5363 における周波数測定の標準不確かさはカタログ値より $u_f = 10$ [Hz] と見積もられる。

λ_{air} は約 -6.33×10^{-7} である。この周波数の不確かさから、関係式より

$$u_v = -\lambda_{\text{air}} (f_{\text{beat}} - f_{\text{rest}}) / 2 \quad (23)$$

ここで周波数測定の標準不確かさ u_f なので u_v は

$$u_v = -\lambda_{\text{air}} \sqrt{2} u_f / 2 \quad (24)$$

と表せられる。式(24)にそれぞれ値を代入すると、可動部速度の不確かさ約 4.5×10^{-6} [ms^{-1}] と換算される。

次に可動部速度の不確かさを用いて、可動部加速度の不確かさ u_a は

$$u_a = \sqrt{2} u_v / \Delta t \quad (25)$$

と表され、式(25)より、可動部加速度の不確かさ約 4.2×10^{-3} [ms^{-2}] と換算される。

次に、可動部加速度の不確かさと可動部質量 ($M = 2.737$ [kg]) から力の不確かさは

$$u_1 = M u_a \quad (26)$$

と表され、可動部に作用する力の不確かさ u_1 に換算すると約 12×10^{-3} [N] に相当する。

4.1.2 光軸のアライメントのずれに起因する不確かさ

光軸合わせにおける最大の誤差要因はレーザーの光軸とスライダの可動軸との角度のずれである。2つの軸が θ だけ傾いているとすれば、そのときの誤差(Δv)はアッペの原理より

$$\Delta v = (1 - \cos \theta) \quad (27)$$

と表される。仮に、光軸のずれが 5 [mrad]だとすると、約 1.25×10^{-5} [ms⁻¹]の速度の相対不確かさが算出される。これは可動部質量($M=2.737$ [kg])に作用する力の不確かさ u_2 に換算すると約 116 [μN]に相当する。

4.1.3 質量測定に起因する不確かさ

可動部質量の標準不確かさは使用した電子天秤によって決定され、カタログ値より $\Delta M = 0.01$ [g]である。質量に起因する力の不確かさは $F = Ma$ より

$$u_3 = \Delta M a \quad (28)$$

と表され、相対的な標準不確かさを算出するために本実験で可動部に作用した力の最大値(約 30 [N])と加速度(約 9 [ms⁻²]), 質量の標準不確かさ 0.01 [g]を代入すると質量における不確かさ約 0.26 [μN]が u_3 として算出される。

4.2 可動部に作用する外力の不確かさ

軸受を支持している 10 [μm]の空気膜が破れていないと仮定すると、軸受内部に作用する動摩擦力が不確かさ要因と考えられる。可動部に作用する外力の不確かさ uF_{df} は

$$uF_{\text{df}} = Av \quad (29)$$

と表され、空気軸受の摩擦特性は、第 2 章で測定され

$$A = 3.6 \times 10^{-2} \text{ Nm}^{-1} \text{ s}^{-1} \quad (30)$$

と算出される。式(29)に式(30)の値と本実験での最大速度である約 0.2 [ms^{-1}]の速度を代入すると、可動部に作用する外力の不確かさ uF_{df} は約 7.2×10^{-3} [N]と算出される。動摩擦による影響は小さいので、補正は可能であるが、無視する。

4.3 合成標準不確かさ

上記に述べた 4.1, 4.2 の不確かさ要素から, 本実験における合成標準不確かさ U は

$$U = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + uF_{df}^2} \quad (28)$$

と表され, 式(28)に値を代入すると, 本実験における合成標準不確かさは約 0.014 [N]と算出される. これは, 本実験で可動部に作用した力の最大値(約 30N)の約 0.05%に相当する.

第5章 結論

本研究では、竹刀の構造が衝撃吸収に有効であるかを検証した。竹刀は紐で縛った状態の時よりも、縛らなかった状態のほうが同様の初速では衝撃力が小さいことがわかった。また、竹刀を紐で縛らない通常時のほうが縛った状態のときよりも弾性衝突に近いことがわかった。これは通常時の竹刀のほうが紐で拘束した状態の竹刀よりエネルギーの損失が少なく、衝突前のエネルギーがそのまま衝突後のエネルギーに伝わる事を意味する。竹刀を紐で縛った状態と通常時の力積を比較しても若干ながら通常時のほうが大きいという結果になった。しかし、これは竹刀を人に衝突させた際、人に与える痛みを竹刀を紐で縛った状態の時より、通常時のほうが大きくするというわけではないと考察する。竹刀を紐で縛った場合、通常時に対して約3倍の衝突力が瞬間的に発生している。それに対して、通常時は竹刀を紐で縛った状態と比較して衝突力は小さくなり、衝突時間は長くなっている。人が感じる痛みというのは弱い力が長時間かかるよりも強い力が瞬間的にかかるほうが痛みとして大きく感じるのではないかと著者は考察する。つまり人が感じる痛みは衝突力の最大値が重要な要因であると考えられる。衝突力の最大値は初速がどのような値であっても通常時の竹刀のほうが小さい。これにより、4本の竹片の間の隙間が、衝撃力の軽減に重要な役割を果たしていることがわかる。竹刀は物体に接触した際に接触した一片が中に入り込み、物体と衝突した一片は両隣の竹片を左右に広げる。竹刀の先端と根本は縛ってあるので、両隣の竹片を広げる力は竹片を湾曲させる力となる。衝突エネルギーは竹片を湾曲させることに使われエネルギーは両隣の竹片に蓄えられる。さらに、竹刀を紐で縛らなかった状態よりも、竹刀を紐で縛った状

態のほうが変位が小さくなった。これは紐で縛った事により竹刀が固くなり、竹刀のしなりが少なくなったためだと考察する。この竹刀全体のしなりと衝撃が加わった竹片 1 片の両隣の竹片に衝突エネルギーが蓄えられる構造が衝撃軽減メカニズムなのではないかと予想する。この結果より、竹刀の構造は衝撃軽減性能を有しており、ロボットアームの腕や脚の構造に応用しても衝撃を軽減させるのではないかと、言い換えると、ロボットアームが人に衝突した際、人が感じる痛みを軽減させるのではないかと考える。

今後、今回の精密計測データを、数値解析結果と比較することにより、竹刀の構造がどのように優れてた衝撃吸収特性を發揮するのかを明らかにしていく。さらに、素材を合金などにし、竹刀と同形状のもので衝撃吸収に有効であるか調べた後、竹刀の高い衝撃吸収特性を家庭用ロボット、介護ロボットの構造に応用していくことを検討する。

謝辞

本研究をまとめるにあたり、あたたかい励まし、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教員の藤井雄作教授、田北啓洋助教、薊知彦技術職員に深く感謝いたします。

また、論文の審査をしていただいた、主査の群馬大学大学院理工学府教員の山口誉夫教授、副査の群馬大学大学院理工学府教員の高田和正教授に深く感謝致します。

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]Y. Fujii, “The Levitation Mass Method: A Precision Mass and Force Measurement Technique”, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 9, No. 3, pp. 46-50, 2008.
- [2]Y. Fujii, “Method for evaluating material viscoelasticity”, *Review of Scientific Instruments*, Vol. 75, No. 1, pp. 119-123, 2004.
- [3]Y. Fujii, “Impact force measurement using an inertial mass and a digitizer”, *Measurement Science and Technology*, Vol. 17, No. 4, pp. 863-868, 2006.
- [4]Y. Fujii, “Method for generating and measuring the micro-Newton level forces”, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 20, No. 6, pp. 1362-1371, 2006.
- [5]Y. Fujii, “Measurement of force acting on a moving part of a pneumatic linear bearing”, *Review of Scientific Instruments*, Vol. 74, No. 6, pp. 1362-1371, 2006.
- [6]Y. Fujii, “Microforce materials tester”, *Review of Scientific Instruments*, Vol.76, No.6, pp. 065111 1-7, 2005.
- [7]Y. Fujii, “Frictional characteristics of an aerostatic linear bearing”, *Tribol. Int*, Vol 39, No. 9, pp. 888-896, 2006.
- [8]M. Negishi, A. Deguchi, M. Ando, M. Takimoto, N. Nakamura, “A high-precision coordinate measuring system for super-smooth polishing”, *Nanotechnology*, No. 6, pp. 139–47, 1995.
- [9]S. Hosoe, T. Yoshida, “Applied measurements of multipurpose precise interferometer“, *Nanotechnology*, No. 4, pp. 206–12, 1993.
- [10]H. Onda, “Development of a unique high precision linear motor integrated air slide table and its application to laser beam writers“, *Opt Rev*, No. 6, pp.88–92, 1999.
- [11]T. Egami, T. Nishiyama, “Optimal preview repetitive control for air slide linear

motor“, *Trans Soc Instrum Control Eng* , No. 30, pp.118–20, 1994.

[12]I. Watanabe, H. Aoyama, A. Shimokohbe, “An active air bearing, ultraprecision control of the floating position and vibration“ *JSPE*, No. 54, pp.329–34, 1988.