



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	ソフトアクチュエータを応用した構造加振/振動制御技術の構築 [全文の要約]
Author(s)	比留田, 稔樹
Description	この博士論文全文の閲覧方法については、以下のサイトをご参照ください。 https://www.lib.hokudai.ac.jp/dissertations/copy-guides/
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第14877号
Issue Date	2022-03-24
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/85317
Type	doctoral thesis
File Information	Toshiki_Hiruta_summary.pdf



学位論文 全文の要約

学位論文題名

ソフトアクチュエータを応用した構造加振/振動制御技術の構築 Novel Application of Soft Actuators to Vibration Excitation and Vibration Control

人間機械システムデザイン専攻 博士（工学） 比留田 稔樹

1. 緒言

機械構造物が有する諸問題を解決するための振動抑制技術が数多く開発されており、目的に応じた様々な振動制御手法がこれまでに提案されている。その中でもアクティブ制振技術は対象構造物に生じた有害な振動に対して、制振用アクチュエータによる発生力を利用することにより大きな制振効果を発揮する。この制御手法はこれまで多くの機械構造物への適用が検討されてきたが、制振用アクチュエータを柔軟かつ軽量な特性を有するソフトアクチュエータとすることにより、従来のアクチュエータでは実現が難しかった構造物の振動制御が可能となる。特に、柔軟構造物や曲面構造物に対して、従来では成し遂げられなかった性能向上や長寿命化に貢献することが期待できる。

代表的な柔軟構造物として膜構造が挙げられる。膜構造とは非常に薄い膜材料とその他部材を組み合わせた構造物であり、ドームやスタジアムなどの建築構造において大型の屋根として用いられているほか、ソーラーセイルに代表される宇宙構造物にも用いられている。ソーラーセイルは折り畳まれた状態でロケットなどにより宇宙空間に運搬され、その後展開して活動する大型の宇宙構造物である。

曲面を有する構造物では、非常によく見られる構造物としてパイプ構造が挙げられ、水道やガスの配管など生活において身近に確認することができる。鉄道や自動車などの乗り物において空気圧や油圧を伝えるためのパイプが数多く使用されており、工場などでは様々な大きさの配管が張り巡らされているのを目にすることができる。

構造物は様々な原因によって振動を生じることがあり、しばしばその機能に悪影響を与える。例えばソーラーセイルでは生じた振動はその姿勢制御に影響を与えることが考えられ、パイプ構造においては発生した振動が騒音の原因になることや、最悪の場合材料の破損に繋がることも考えられる。ソフトアクチュエータ用いたアクティブ制振はこれらの課題を解決することに貢献できる手法である。ソフトアクチュエータは柔軟構造物に取り付けても構造物の柔軟性を損なうことがなく、曲面構造物に対してはあらゆる

形状の曲面に対応して取り付けが可能であり、また確実に力を伝達することができる。

一方で、ソフトアクチュエータを振動子として扱うことにより対象に加振力を与えることができ、新たな振動計測技術を提案することが可能となる。振動計測技術は現在、機械構造物の動特性評価をはじめ損傷検知技術や締結部分の緩み検知などに応用されているが、この技術は工業のみならず農業にも応用されている。農業生産の分野において、青果物の品質を機械的に測定する技術の一つに振動計測が用いられている。

農業の分野では担い手の高齢化や不足などから、近年では農業の機械化や自動化に関する検討が活発に行われている。例えば青果物の選定の機械化に関して、振動試験に基づく青果物の品質評価手法が提案されており、加振器を用いて対象に振動を与える方法などが用いられている。この評価手法はメロンや洋ナシなどの追熟という過程を有する青果物に対して有効であるとされている。ここで、振動試験装置にソフトアクチュエータを適用することにより装置の小型化や持ち運びなどの点において利便性が向上し、農業の機械化と自動化の進展に貢献することができると考えられる。

以上のような研究背景から本研究では、ソフトアクチュエータを適用した振動制御技術および振動計測技術を提案する。振動制御においては、柔軟構造物である膜構造の振動制御および曲面構造物であるパイプ構造を対象としたアクティブ制振を行う。振動計測においてはソフトアクチュエータ加振に基づく振動試験を農業の分野に応用することを提案し、青果物の品質評価を行う。

2. 振動制御手法

本章では、振動試験に適用するソフトアクチュエータの動作原理について述べる。次に振動制御に関して、モデルベースによるアクティブ制振を行うための制御系設計手法を示す。

本研究で適用するソフトアクチュエータには PVDF フィルムアクチュエータと、誘電エラストマーアクチュエータ(DEA)の2種類を提案する。いずれも高分子アクチュエータの一つであり、軽量さと高い柔軟性を有している。PVDF フィルムは圧電材料の一つでありその動作原理は圧電効果と逆圧電効果に基づく。Fig. 1(A)に示すように、分極処理をされた PVDF フィルムに電圧を印加することにより、面内方向と面外方向にそれぞれひずみが発生する。本研究ではこの面内方向に発生するひずみによる力を制御入力として利用する。一方で DEA は、エラストマーと柔軟な電極によって構成されており、電圧を印加することによりマクスウェル応力 P がエラストマーの厚さ方向に圧縮応力として発生する。DEA は高い伸縮性や応答速度を有していることから、本研究で扱う対

象構造物に対してより効果的な振動制御及び加振効果が得られることが期待できる。

モデルベースによる振動制御を遂行するにあたり、 H_∞ 制御理論に基づく制御系の設計を行う。まず、実験モード解析の手法に基づいて対象をモデル化する。モデル化は対象構造物の振動試験によって得られた周波数応答に対して多点偏分反復法を適用することにより、対象のモード特性を同定して状態空間モデルを得る。次に、得られた状態空間モデルを用いて Fig.2 に示す制御系を構築する。ここで、 \mathbf{z} , \mathbf{w} , \mathbf{u} はそれぞれ評価応答, 外乱, 制御入力である。 \mathbf{y}_1 , \mathbf{y}_2 はそれぞれ制御量および観測出力である。 $\mathbf{P}'(s)$ は得られた状態空間モデルであり、 $\mathbf{G}(s)$ は一般化制御対象である。 \mathbf{Q} , \mathbf{R} はそれぞれ評価応答 \mathbf{z} , 制御入力 \mathbf{u} にかかる行列である。そして $\mathbf{K}(s)$ はコントローラであり、線形行列不等式(Linear Matrix Inequality: LMI)に基づいて、外乱 \mathbf{w} から制御量 \mathbf{y}_1 までの H_∞ ノルムを最小にする H_∞ 制御問題により設計される。

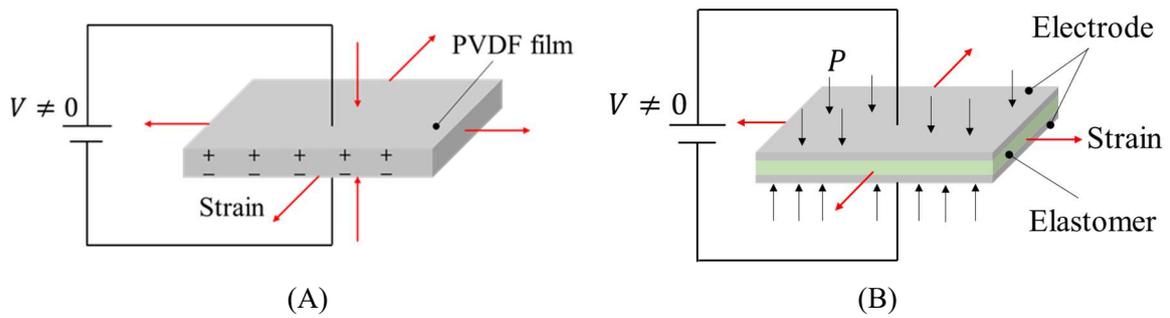


Fig. 1. Activation mechanism of (A) PVDF actuator and (B) DEA.

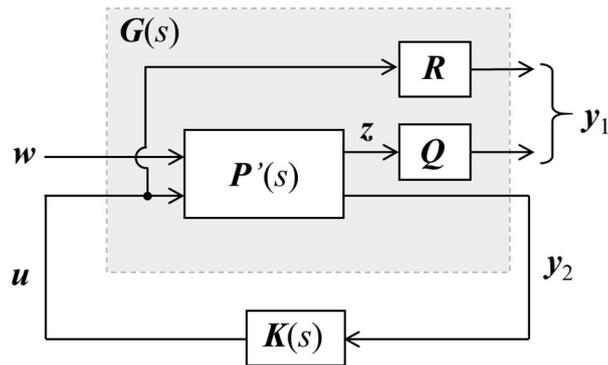


Fig. 2. Block diagram of the generalized plant.

3. PVDF フィルムを用いた膜構造の振動制御

本章では PVDF アクチュエータを制振用アクチュエータとして膜構造の振動制御を行う。まず、膜構造と PVDF アクチュエータの構成を示す。次に、レーザー加振技術を適用した膜構造の振動試験システムを構築する。膜構造のアクティブ制振を行うため、同定した対象のモデルを用いて制御系を構築し、 H_{∞} 制御理論に基づくコントローラを設計する。設計したコントローラを用いて振動制御実験を行い、提案する振動制御手法の有効性を検証する。

対象構造物である膜構造はポリイミドフィルム(東レ・デュポン, Kapton, 厚さ: 50 μm)を材料としており、寸法は 200 mm \times 200 mm である。質量は 3.0 g である。本研究では、膜材料に張力を与えるため膜構造の四辺隅に、それぞれ重り付きのワイヤーを取り付け、膜材料に 6.9 N の張力を与える。膜材料の底面には PVDF アクチュエータが貼付されており、振動制御において制御入力加わることにより制振力を発生する。PVDF アクチュエータの材料には厚さ 80 μm の PVDF フィルム(クレハ, KF ピエゾフィルム)を用いており、電圧を印加して動作させるために、フィルム両面に導線をそれぞれ取り付けている。

振動制御実験を行うための振動試験システムを Fig. 3 に示す。実験装置は Nd: YAG レーザー(Continuum, Surelite III), 凸レンズ(焦点距離: 100mm), 膜構造, LDV(Polytec, NLV-2500), および FFT アナライザ(A/D: National Instruments, NI PXI-4472B, Software: キャテック, CAT-System)で構成される。ここで、Nd: YAG レーザーにより生成されるレーザーの波長, 1 パルスあたりの最大出力およびパルス幅は, それぞれ 1064 nm, 1 J および 5 ns である。Nd: YAG レーザーは光学定盤上に固定されており, 生成されたレーザー光は凸レンズで集光されレーザーブレイクダウン(Laser-induced breakdown: LIB)に基づく加振力が発生する。LIB とは, レーザービームを気体中に集光することによりプラズマを形成させる現象である。このプラズマエネルギーの一部が消費されることで生成された衝撃波が LIB による音源となる。本研究ではレーザービームを集光させるために凸レンズを用いる。LIB による点音源はほぼ理想的なインパルス波形であり, 加振力特性の再現性が極めて高いことから, 出力の周波数スペクトルにより, 対象の周波数特性を評価することができる。振動計測について, 膜構造上部に設置した LDV により計測点における膜面垂直方向の振動速度を計測する。LDV から出力される速度信号は FFT アナライザに入力され, 解析される周波数スペクトルを用いて振動特性を評価する。またレーザー加振において発生するプラズマ光が LDV による振動計測に影響を及ぼすことを防ぐため, 膜構造の下方で LIB を発生させる。また, 提案する振動試験システム

は LIB に基づく加振源と LDV を用いた計測方法を適用していることから、完全非接触での振動計測を実現している。

膜構造へのアクティブ制振について、単一モード制振と複数モード同時制振を行う。制御系は H_∞ 制御理論に基づいて、出力フィードバック系として設計する。1 次モード単一制振、1 次、2 次モード同時制振についての振動制御実験結果を、Fig. 4 に示す。Fig. 4(A) より 1 次モードの共振ピークの応答が約 20 dB 低減していることが確認でき、Fig. 4(B) より、1 次モードの共振ピークの応答が 15 dB 低減し、2 次モードの共振ピークの応答が 25 dB 低減していることが確認できる。以上の結果より、振動試験において提案する振動制御方法は柔軟構造物である膜構造の制振に対して有効であることが示された。

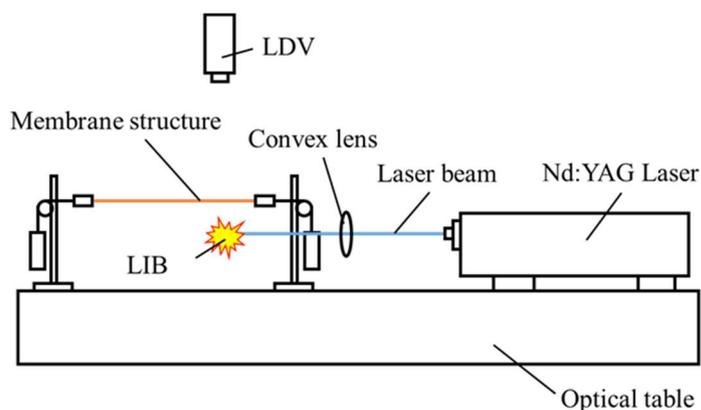


Fig. 3. Experimental system for the LIB.

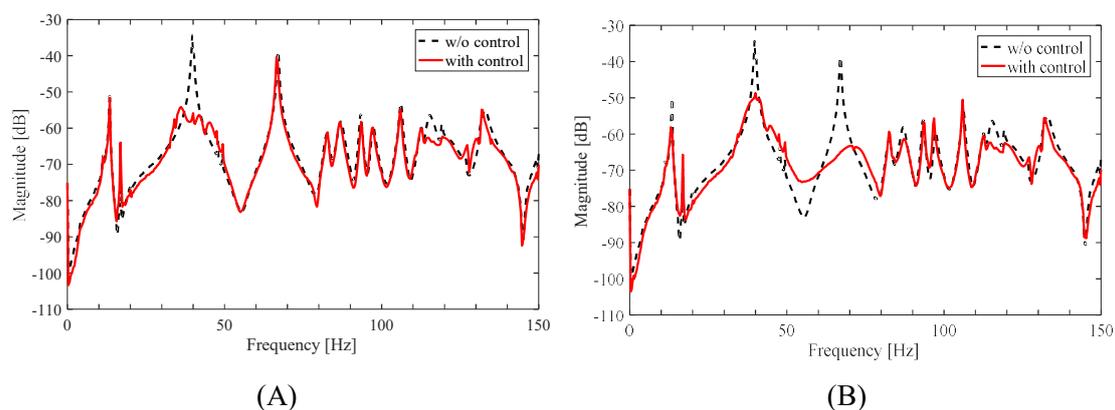


Fig. 4. Measured frequency spectra of the velocity response of the membrane for (A) 1st mode control and (B) 1st and 2nd modes control.

4. DEA を用いた真空環境における膜構造の振動制御

PVDF アクチュエータを膜構造に適用することで膜構造のアクティブ制振を実現したが、逆圧電効果により動作する PVDF フィルムは変形量が小さく、発生力や制振可能な周波数帯域に制限があることが考えられる。そこで、本章では膜構造の振動制御に用いる制振用アクチュエータとして、誘電エラストマーアクチュエータ (Dielectric elastomer actuator: DEA)を適用する。また、膜構造は宇宙構造物において実際に利用されていることから、真空環境下での振動制御の有効性を検証する。

対象構造物は前章で示した構成と同様の膜構造である。真空環境において振動試験を行うため、膜構造は真空チャンバ内部に設置してある。膜構造は非常に軽量で柔軟な構造物であることから、大気環境において周囲の空気の質量効果と減衰効果の影響を受けやすい。真空チャンバを用いて大気の影響を取り除くことで、膜構造の共振周波数や振動の大きさなどの振動特性が変化すると考えられる。本研究では、0.001 MPa を真空環境として扱う。

本章では制振用アクチュエータとして DEA を適用する。本研究ではエラストマーおよび柔軟な電極を積層することにより DEA を構成する。エラストマーの材料には厚さ 0.5 mm のアクリル(3M, VHB-4905J)を、電極にはカーボンナノチューブ (Carbon nanotubes: CNTs)を適用する。使用するアクリルエラストマーは表面に粘着性を有しており、接着剤などを用いずに貼付および積層が可能である。積層した DEA の構成を Fig. 5 に示す。ここで、エラストマーには予ひずみが与えられており、80 mm × 80 mm の寸法から 320 mm × 320 mm に引き延ばされた状態のものを用いる。

振動制御実験を行うための振動試験システムを Fig. 6 に示す。実験装置は Nd:YAG レーザー、凸レンズ、膜構造、LDV、および FFT アナライザで構成される。Nd:YAG レーザーは光学定盤上に固定されており、YAG レーザーから生成されたレーザー光はミラーを経由して、膜構造に対して垂直に照射される。そして、凸レンズで集光されたレーザー光が膜面に取り付けられたアルミプレートに照射されることでレーザーアブレーション(Laser ablation: LA)に基づく加振力が発生する。LA とは、高エネルギーのレーザー光を物体に照射した際に高温のプラズマが発生し、物体から大量の粒子群が放出される現象であり、これによりインパルス力を得ることができる。LA による加振力は LIB と同様に再現性が高く、出力の周波数スペクトルによる振動特性の評価が可能となる。

真空環境の膜構造へのアクティブ制振について、複数モード同時制振を行う。対象振動モードは、低周波数帯域に存在する 1 次、2 次剛体モードおよび 1-14 次弾性モードである。制御系は H_{∞} 制御理論に基づいて、出力フィードバック系として設計する。振

動制御実験結果を Fig. 7 に示す. 剛体モードに関しては 1 次モードが 3 dB 低減し, 弾性モードに関しては 1 次, 2 次モードの共振ピークがそれぞれ 17 dB, 12 dB 低減, 7 次モードの共振ピークが 3 dB 低減, 13, 14 次モードの共振ピークがそれぞれ 2 dB ずつ低減した. 他の制振対象モードにおいても制振効果が確認できている. 以上より, 真空環境において DEA を用いた膜構造の振動制御が有効であることが示された.

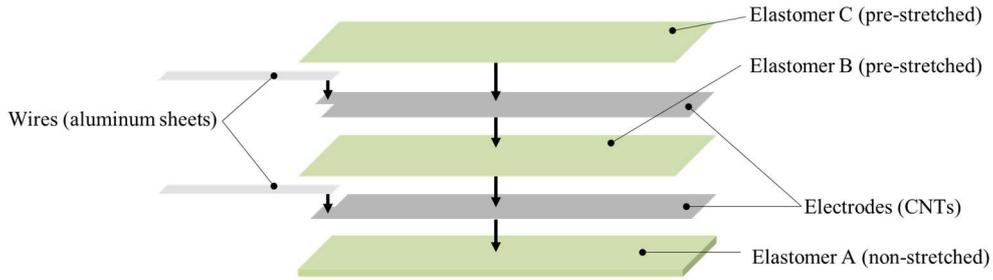


Fig. 5. Fabrication procedure of the laminated DEA.

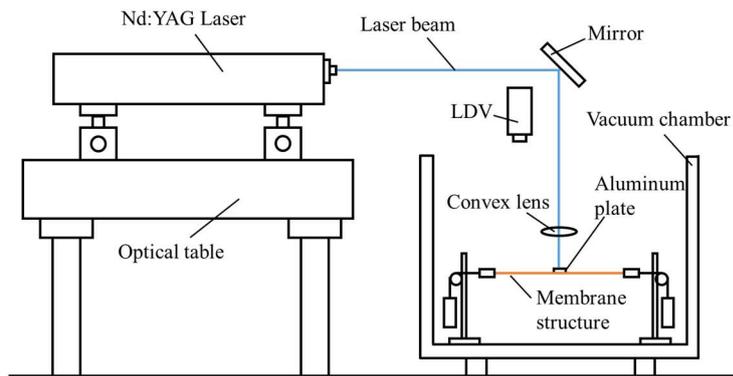


Fig. 6. Setup for the control experiment with the laser excitation.

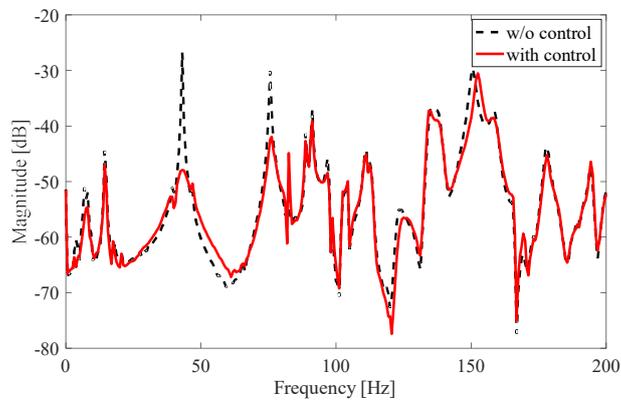


Fig. 7. Measured frequency spectra of the velocity response for the external disturbance due to laser ablation in the control experiment under a vacuum environment.

5. DEA を用いた曲面を有する構造物の振動制御

本章では DEA を制振用アクチュエータとした振動制御を曲面構造物に適用する。対象は代表的な曲面構造物であるパイプ構造とし、その構成と適用する DEA の作成方法を示す。次に、パイプ構造のアクティブ制振を行うための制御系設計にあたり、パイプの振動特性を実験モード解析の手法により同定してモデル化する。同定した対象のモデルを用いて制御系を構築し、 H_{∞} 制御理論に基づくコントローラを設計する。設計したコントローラを用いて、振動制御実験を行い提案する振動制御手法の有効性を検証する。

対象構造物であるパイプは長さ 200 mm、外径 50 mm であり、厚さは 1.0 mm である。材料はポリ塩化ビニル(Polyvinyl chloride: PVC)である。パイプは、自由状態を仮定するためにエアクッションの上に設置されている。パイプの表面には制振用 DEA が貼付されている。

制振用アクチュエータとして DEA を適用する。本研究ではエラストマーおよび柔軟な電極を積層することにより DEA を構成する。エラストマーの材料には厚さ 50 μm のシリコーン(Dow Toray Co. Ltd., PDMS film 50micron thick)を用いるが、最下層の DEA のみ厚さ 0.5 mm のアクリル(3M, VHB-4905J)を用いる。アクリルエラストマーは表面に粘着性を有しており、接着剤などを用いずに対象構造物に貼付することが可能である。また、使用するシリコーンエラストマーは厚さが十分に薄く、安定した動作が可能な材料で構成されているため予ひずみは与えない。シリコーンエラストマーの積層には液状粘着剤(セメダイン, BBX)を用いた。

振動制御実験を行うための振動試験システムはパイプ、エアクッション、制振用および加振用 DEA, LDV (Polytec, NLV-2500), FFT アナライザ(A/D : National Instruments, NI PXI-4472B, Software : キャテック, CAT-System)で構成される。加振用 DEA は振動制御実験時に対象構造物に外乱を与えるために用いられ、構成および寸法は制御用 DEA と同様である。加振用 DEA はパイプの内面下部に貼付されている。対象構造物の上部に設置した LDV により、計測点におけるパイプの半径方向の振動速度を計測する。

パイプ構造へのアクティブ制振について、1-7 次モード同時制振を行う。制御系は H_{∞} 制御理論に基づいて、出力フィードバック系として設計する。振動制御実験を行った結果、1 次、3 次モードの共振ピークがそれぞれ 12 dB, 6 dB 低減、6 次モードの共振ピークが 5 dB 低減したことが確認できた。また、他の制振対象モードにおいても制振効果が確認できた。これより、本研究で提案する振動制御手法は、曲面を有する構造物の制振に対して有効であることが示された。

6. DEA 加振に基づく振動計測による果物の硬さ評価

本章では DEA を用いた青果物の硬さ評価を洋ナシに対して行う。まず、振動試験に基づく青果物の評価手法を示す。加えて、貯蔵に伴う青果物の硬さの変化のモデル化手法を示す。次に、振動試験装置の構成を示す。振動試験により得られた周波数応答より、対象の共振周波数を確認して硬さを評価する。さらに、青果物の貯蔵に伴う硬さの変化を検証する。

青果物の硬さを評価するにあたり、弾性指標 $FI = f^2 m^{2/3}$ を用いる。ここで、 f は振動試験によって得られる対象青果物の弾性 1 次モードの共振周波数である。 m は対象青果物の質量である。

振動試験において 11 個の洋ナシを計測対象にする。洋ナシは貯蔵に伴い追熟と呼ばれる過程を経て、その硬さが低下していくと同時に味覚などの意味での品質が向上することが知られている。すなわち、硬さの変化と熟度に相関があると考えられている。対象の品種はラ・フランス(佐藤農場, 山形県)である。洋ナシの貯蔵に伴う硬さの変化を計測するため、納入後の洋ナシはインキュベータ(AS ONE, KMH-130)により気温 15°C で貯蔵される。振動試験時のみインキュベータから対象の洋ナシが取り出され、室温環境下となる。

洋ナシの周波数特性を解析するための DEA 加振に基づく振動試験システムを Fig. 8 に示す。対象の洋ナシは自由状態を仮定するために、エアクッション上に設置されている。入力信号として信号発生器によりスイープ波を生成し、電圧アンプを用いて増幅した信号を加振用 DEA に入力することで洋ナシを加振する。LDV を用いて、洋ナシの表面に対して垂直方向の振動を計測する。LDV から洋ナシの振動の速度信号が出力され、FFT アナライザに入力される。また、増幅前の入力信号も同時に FFT アナライザに入力され、周波数特性を解析する。

振動試験に基づき得られたそれぞれの洋ナシの貯蔵に伴う弾性指標の変化を Fig. 9 に示す。図より、0 日目のそれぞれの洋ナシの弾性指標は $(21.6 \pm 2.5) \times 10^6 \text{ Hz}^2 \text{ g}^{2/3}$ であり、それぞれの弾性指標の値は貯蔵に伴い低下していることが確認できる。これにより、洋ナシの硬さが貯蔵に伴い低下していることが分かる。ここで、Fruit A と Fruit E に着目すると、Fruit A は 0 日目と 14 日目の弾性指標がそれぞれ $22.9 \times 10^6 \text{ Hz}^2 \text{ g}^{2/3}$ と $7.89 \times 10^6 \text{ Hz}^2 \text{ g}^{2/3}$ であり、65.5% の減少を示している。同様に、Fruit E については $22.5 \times 10^6 \text{ Hz}^2 \text{ g}^{2/3}$ と $5.23 \times 10^6 \text{ Hz}^2 \text{ g}^{2/3}$ であり、76.8% の減少を示している。洋ナシの硬さの変化に関する先行研究について、Terasaki (2006) らによると、気温 20°C で貯蔵されたラ・フランスの 0 日目と 14 日目の弾性指標はそれぞれ $24.0 \times 10^6 \text{ Hz}^2 \text{ g}^{2/3}$ と $5.50 \times 10^6 \text{ Hz}^2 \text{ g}^{2/3}$ とな

ったことを示しており、77.1%の減少を示している。これらの値は本研究で得られた結果と類似しており、提案する手法により洋ナシの硬さの値が有効に得られたことを示している。

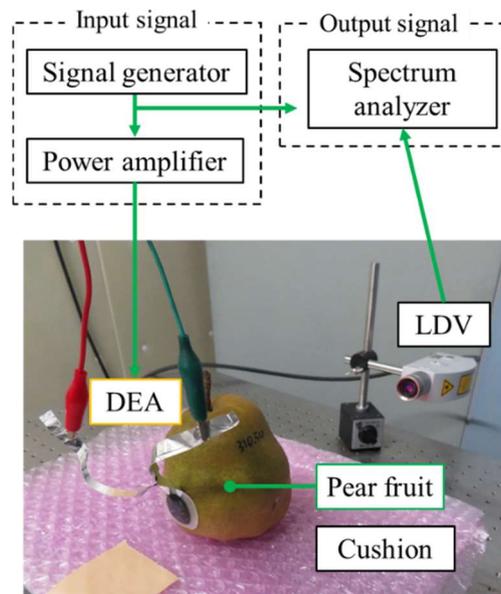


Fig. 8. Vibration experiment system.

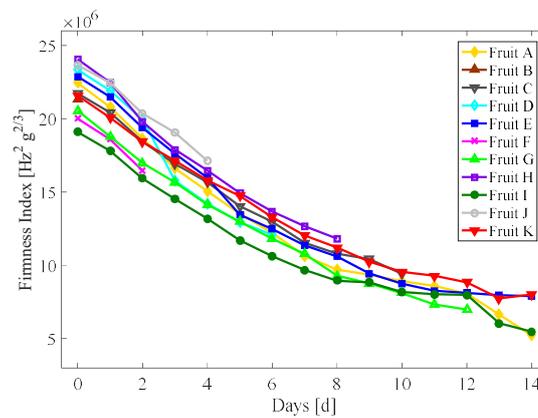


Fig. 9. Variations in the measured firmness indices of the 11 target fruits during storage.