

柔軟構造物のマルチモード制振検討のための計測プラットフォームの構築

富岡隆弘¹¹ 秋田県立大学システム科学技術学部機械工学科

航空機の機体や鉄道車両など大型で柔軟な機械構造物の弾性振動のマルチモード制振手法を検討するための計測プラットフォームとして、振動測定対象となる構造体と、その構造体を加振し弾性振動を測定する計測システムの構築を行った。振動測定対象は、複数の弾性振動モードが励起されやすく、鉄道車両や航空機等に見られる弾性支持された薄板筒状の構造体とし、鉄道車両の約 1/10 サイズの角筒状構造体を製作した。材料はステンレス鋼で長さ×幅×高さは 2.0m×0.3m×0.27m であり、台枠は実際の鉄道車両に準じた構造を持つ。また、加振・測定システムとしては動電型加振器と圧電式加速度ピックアップ・ロードセルを用い、拡張性を考慮したモジュール型データ計測システムを採用した。この角筒構造体の台枠を対象として加振試験を行った結果、加振力に対する応答加速度の周波数応答関数には、200Hz 以下の周波数領域に複数の弾性振動に対応した明確なピークが生じ、この構造体がマルチモード制振の対象構造として適した振動特性を有していることが確認できた。

キーワード：柔軟構造物，弾性振動，制振，マルチモード制振，振動計測

機械の高性能化・信頼性向上・付加価値向上のためには振動・騒音の低減が重要となる。とくに、航空機や鉄道車両などの輸送機械や移動体において振動問題は本質的である。

航空機や鉄道車両は細長い柔軟構造をもつため弾性振動が問題となり（瀧上ら，2011，Tomioka et al., 2012，相田ら，2015），複数の弾性振動モードの同時制振（マルチモード制振と呼ぶ）が必要となることが多い。鉄道車両に関してはこれまで、車体に制振材を貼付する提案（鈴木ら，1996）やピエゾ素子を用いた制振法の提案（Takigami et al., 2008）などがあるが、マルチモード制振については国内外とも実用化された事例は知られていない。

このように弾性振動のマルチモード制振は未解決で重要性の高い課題である。また、構造体の弾性振動が床・側面・天井などの各面から音として放射される「固体伝播音」も快適性の観点から重要な問題であり、解決が求められている。これらの状況は、鉄道車両や航空機、自動車、船舶などの移動体のほか、建築構造物の室内環境についても同様である。

ところで、人体の挙動を模擬した粘弾性体の活用によりマルチモード制振を実現できる可能性が、鉄道車両の実車を対象とした最近の検討で示されている（富岡ら，2013，Tomioka et al., 2015）。このような検討を大学において実施するには、実際の機械構造物で問題となる振動・騒音を適切に模擬できる実験用構造体と、その振動を測定するための機材が必要となる。そのため著者らは、鉄道車両の車体構造を模擬した角筒状構造体を製作するとともに、その弾性振動を測定するための加振・振動計測システムの構築を進めている。ここではこれらを「計測プラットフォーム」と呼ぶことにする。本稿では、現在構築中の計測プラットフォームの概要と、その振動測定結果の一例を紹介する。

鉄道車両の車体を模擬した角筒状構造体

計測プラットフォームの対象構造物として、複数の弾性振動モードが励起されやすく、鉄道車両や航空機等に見られる薄板筒状構造体を弾性支持して用いることとし、図1に示すような構造体を設計した。構造体は、材料の入手性と加工性およびコストを勘案してステンレス鋼製とし、部材の詳細設計と製作を(株)三栄機械に依頼し、構造体への組み立ては学内で機械知能システム学科3年生の「課題研究」の一環として行った(図2)。作成した角筒構造体を図3に示す。

この構造体は、台枠と、側面-天井を構成する上枠、前後の面を構成する妻の4ピースで構成され、それらをボルトで結合することで角筒状構造となる。台枠は長手方向の2本の側はりりと左右方向の21本の横はりがラダー状に組み合わせられたものの上に薄板が張られた構造で、それらの部材を金属用接着剤を併用したリベットにより結合している。なお台枠を4箇所の金属とゴム併用ばね(ブリヂストンハイブリッドエアダンパーEZ)で支持することとし、支持部は台枠下面にもステンレス鋼製の平板を張って剛性を高めたボックス構造としている。この台枠構造と上部の構造体の形状・寸法は基本的には鉄道車両のものを約1/10スケールで模擬しているが、例えば上部の角筒形状を円筒形状とすることで航空機の機体を模擬することもできる(図4)。

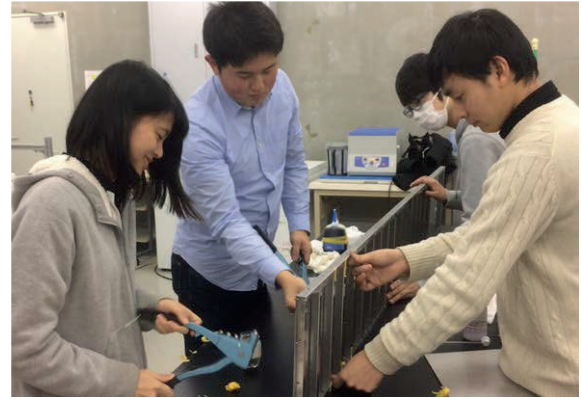


図2 角筒状構造体の製作



図3 完成した振動測定用角筒状構造体

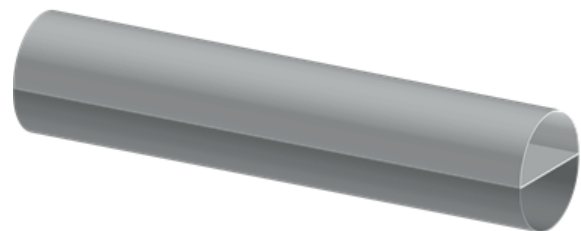


図4 航空機の機体を想定した円筒状構造体

加振・振動測定システム

加振システムとして動電型の小型加振器(旭製作所 SL-0505, 最大加振力 49N)を導入した。また、振動測定系は National Instrument (NI) 社の cDAQ システムを採用した。これはセンサからの入力や加振信号出力などを行うインターフェイスモジュールと、それらを装着し外部ホスト PC との同期・データ転送を行うシャーシで構成され、計測はシャーシと LAN ケーブルで接続されたノート PC 上でソフト的に行う。計測制御用ソフトウェアは NI LabVIEW を用いた。また、振動測定用センサは圧電式加速度ピックアップ PCB352C65 を採用し、加振力の測定は圧電式ロードセル PCB208C02 を導入した。今回選

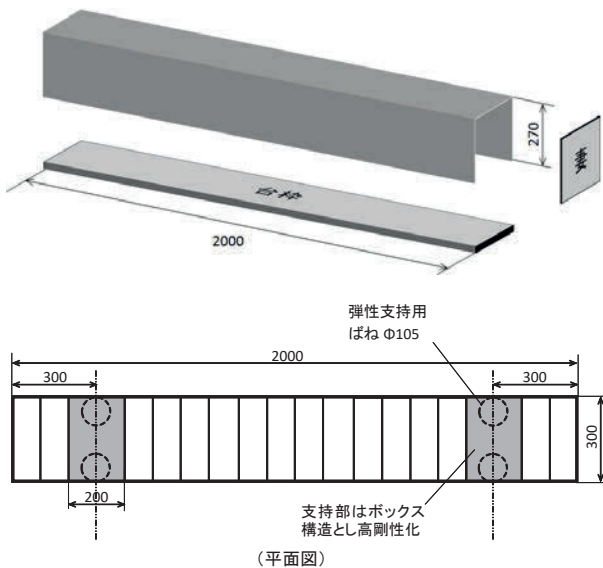


図1 振動測定用角筒状構造体 (単位: mm)

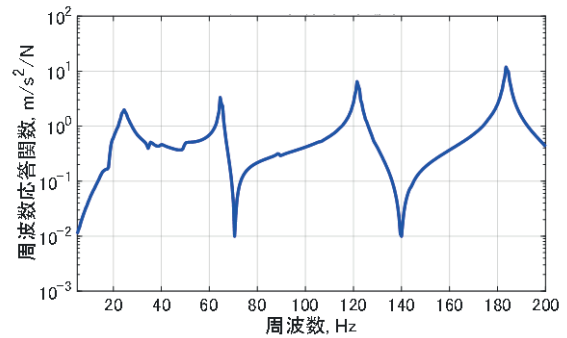
定した圧電式センサはいずれもアンプ内蔵型センサ (IEPE センサ) であり, チャージアンプ不要の代わりに駆動電流の供給が必要となるが, NI cDAQ システムの NI-9234 (音響/振動入力モジュール) を用いることで必要な駆動電流を供給しながら加速度・力の測定が可能である. これまでに構成した加振・振動測定システムを表 1 に示す. 現状で最大 6ch の加速度測定と 1ch の力を同時に測定可能である. AD 変換モジュールを追加することで, 1 つのシャーシで最大 32ch に拡張可能であり, シャーシを LAN ケーブルで接続することでさらに多 ch の計測にも対応できる拡張性を確保している.

表 1 加振・振動測定システムの構成

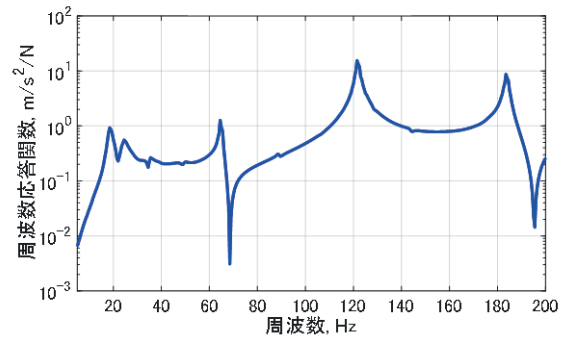
機器等	型番等	数量
加振システム	49N 動電型加振器	旭製作所 SL-0505 1
データ収録系	AD 変換モジュール	4ch 音響/振動入力モジュール NI 9234 2
	加速度センサ	PCB352C65 6
	カセンサ	PCB208C02 1
データ出力系	DA 変換モジュール	4ch 電圧出力モジュール NI 9263 1
PC 同期・データ転送	AD・DA 変換モジュール装着用シャーシ	8 スロットシャーシ NI cDAQ-9186 1
機器制御・データ保存	計測用 PC	東芝 dynabook RZ73 1
	機器制御ソフトウェア	NI LabVIEW -

製作した角筒状構造体の弾性振動特性

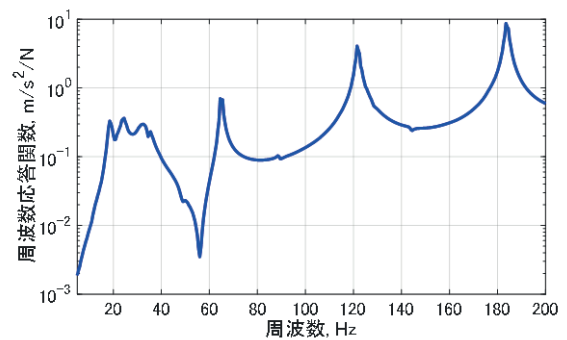
この計測プラットフォームを用いた振動測定例として, 台枠を単体で加振して得られた周波数応答関数を図 5 に示す. これは, ばねで弾性支持した台枠端部の中央付近を上下加振して, 台枠の中央と両支持点直上における上下加速度, および加振力を測定して求めたものである. ここでは加振信号として, 5 から 205Hz まで 200sec で変化する正弦波スイープ波を用いた. この図のうち 18, 22Hz 付近の 2 つのピークは支持ばね上で台枠が上下併進およびピッチング振動する剛体振動モードに対応し, 122Hz 付近のピークは台枠が弾性支持されたはりとして曲げ振動する弾性振動モードに対応していることをそのピー



(a) 加振点側の支持点直上



(b) 台枠中央



(c) 加振点と逆側の支持点直上

図 5 台枠端部中央付近を加振した場合の加振力に対する台枠上下加速度の周波数応答関数 (5~205Hz の正弦波スイープ加振)

クにおける台枠の振動形状から確認した. また 65, 180Hz 付近のピークについては, 現状では同時計測可能な計測点の限界から十分な調査ができていないが, 台枠がはりではなく平板として変形する弾性振動モードに対応しているものと推察される.

台枠単体の条件ではあるが, この結果から複数の弾性振動モードに対応した明確なピークが認められ, マルチモード制振を検討するための制振対象として適した振動特性を有していることが確認できた.

まとめと今後の進め方

航空機の機体や鉄道車両など大型の機械構造物の弾性振動のマルチモード制振手法を検討するための計測プラットフォームとして、鉄道車両の約 1/10 スケールの角筒状構造体を設計製作し、その弾性振動を加振・測定する計測システムの構築を行った。今回製作した角筒構造体の台枠を対象として加振試験を行った結果、加振力に対する応答加速度の周波数応答関数には、200Hz 以下の周波数領域に複数の弾性振動に対応した明確なピークが生じ、この構造体がマルチモード制振の対象構造として適した振動特性を有していることが確認できた。

本稿で紹介したとおり、現状で計測可能な加速度および力は最大 8 点 (4ch モジュール 2 台) であり、詳細な弾性振動モード特性を把握するには、特定の測定点を固定し、他の測定点はセンサを順次移動しながら同一条件で加振を行うなど、さまざまな工夫が必要である。200Hz あるいはそれ以上の周波数範囲におけるそのような計測法の有効性については検討の余地があるため、極力同時測定可能なチャンネル数を増やす方向で取り組みたい。なお、今回選定した NI cDAQ シャーシはモジュールを取り付けるスロットを 8 つ装備しており、表 1 の入力モジュールおよび加速度センサであれば 32 チャンネルまで拡張でき、さらにシャーシを追加すればそれ以上の多チャンネル化も可能である。

今後は、側面と屋根に相当する上枠および前後の妻を取り付けた条件で加振試験を行い、立体構造物としてのマルチモード振動特性を把握する。そしてそれらの振動特性に応じたマルチモード制振デバイスの検討を進める計画である。

文献

相田 健一郎, 富岡 隆弘, 瀧上 唯夫, 秋山 裕喜 (2015). 「鉄道車両の走行時車体上下振動における弾性振動の影響」『日本機械学会機械力学・計測制御 USB 論文集』, 734.

鈴木康文, 長南征二 (1996). 「鉄道車両の車体曲げ振動制振法に関する理論解析」『日本機械学会論

文集 (C 編)』62 (598), 2132-2139.

Takigami, T. and Tomioka, T. (2008). Bending Vibration Suppression of Railway Vehicle Carbody with Piezoelectric Elements (Experimental Results of Excitation Tests with a Commuter Car). *Journal of Mechanical Systems for Transportation and Logistics*, 1(1), 111-121.

瀧上唯夫, 相田健一郎, 富岡隆弘 (2011). 「車体曲げ振動の実態を探る」『Railway Research Review』68 (12), 6-9.

Tomioka, T., Takigami, T. and Aida, K. (2012). Modal Vibration Characteristics of Flexural Vibrations in Railway Vehicle Carbodies. *Proceedings of the First International Conference on Railway Technology: Research, Development and Maintenance (Railways 2012)*, Paper 33.

富岡隆弘, 瀧上唯夫, 相田健一郎, 秋山裕喜 (2013). 「乗客による鉄道車両の車体弾性振動低減効果とそれを活用した制振デバイス検討のためのモデリング」『日本機械学会論文集 (C 編)』79 (803), 2298-2313.

Tomioka, T. and Takigami, T. (2015). Experimental and numerical study on the effect due to passengers on flexural vibrations in railway vehicle carbodies. *Journal of Sound and Vibration*, 343(12), 1-19.

〔平成 30 年 6 月 30 日受付〕
〔平成 30 年 7 月 10 日受理〕

Development of a Vibration Measurement Platform to Study Multi-modal Vibration Reduction in Flexible Structures

Takahiro Tomioka¹

¹ *Department of Mechanical Engineering, Faculty of Systems, Science and Technology, Akita Prefectural University*

The "vibration measurement platform" has been developed to study the multi-modal reduction of elastic vibrations in large and flexible structures such as the bodies of aircrafts or railway vehicles. The platform consists of data measurement equipment and a flexible structure which is a thin shell made of stainless-steel. With dimensions of $L = 2.0$ m, $W = 0.3$ m $H = 0.27$ m, the system is approximately built on a 1:10 scale of an actual rail vehicle. The data measurement equipment includes an electro-dynamic exciter, IEPE acceleration pickups, a load cell, AD converter modules, and a chassis component between the control PC and the AD converter modules. The equipment has been selected considering its future expandability. The results of the vibration measurement test for the floor part of the test structure confirm that the test structure has appropriate vibration characteristics for the study of the reduction of multimodal vibration.

Keywords: flexible structure, elastic vibration, multi-modal vibration reduction, vibration measurement