

一般論文

## 電池なし無線センサを用いた輸送包装試験

三次 仁\*、徳増 理+、中浦 裕史\*\*、和田 浩\*\*\*

### Transport Package Test using Battery-free Wireless Sensors

Jin MITSUGI\*, Osamu TOKUMASU+, Yuji NAKAURA\*\* and Hiroshi WADA\*\*\*

輸送に伴う振動・衝撃・荷重などから物品を適切に保護するためには、輸送環境と物品の機械的特性に適合した包装設計が重要である。ISO や JIS で定められた輸送包装試験によって包装設計の適切性を判断するためには、包装状態で物品に加わる振動・衝撃を測定することが望ましいが、有線加速度センサを用いた測定では、包装に穿孔して配線するなどの処理が必要となり、試験の手順が増えることに加え、包装材を多少なりとも棄損することの影響を勘案する必要がある。また物品が軽量である場合、加速度センサを取り付けることによる特性変化も問題となる。本論文では、センサの軽量化と電池なし端末を実現し、さらに複数の加速度センサデータを同期して収集することもできる無線通信方式であるバックスキャット通信を美術品レプリカの輸送包装試験に適用した。この電池なし無線センサを用いた輸送包装試験システムについて、その有効性と限界を有線加速度センサおよびレーザードップラ振動計との比較により明らかにした結果を報告する。

Transport package test is essential to confirm the mechanical integrity of packaged products subjected to vibration, shock and loads while they are in transportation. The adequacy of a package design is commonly examined by applying a standardized test procedure defined by ISO or JIS. The use of wired accelerometer is the usual practice to quantify the shocks and vibration experienced by the packaged product under testing. However, wired accelerometers demand routings of wire harness, which may damage the package. The weight of an accelerometer and its wire harness may disturb the measurement results particularly when the product under testing is lightweight. This paper examines the use of ultra-lightweight battery-free wireless accelerometer to transport package test of a replica of an art product. Exploiting the backscatter communication, the wireless accelerometer can be battery-free and lightweight. Synchronized vibration measurements at multiple points can also be realized. The pros and cons of the transport package test with the battery-free wireless accelerometer are reported through the comparisons with the results using wired accelerometers and a laser Doppler vibrometer.

キーワード：輸送包装試験、加速度センサ、バックスキャット通信、電池なしセンサ

Keywords : Transport package test, accelerometer, backscatter communication, battery-free sensor

連絡者(Corresponding author)慶應義塾大学 環境情報学部 (〒252-0882 神奈川県藤沢市遠藤 5322, Keio University  
Tel 0466-49-3447, Email [mitsugi@keio.jp](mailto:mitsugi@keio.jp))

+ 慶應義塾大学 大学院政策・メディア研究科

\*\* IMV 株式会社

\*\*\* 国立東京博物館

## 1. 序論

### 1.1 輸送包装試験の包装設計へのフィードバック

輸送包装試験あるいは包装貨物試験は、包装された物品（包装貨物）が輸送される際に受ける衝撃、振動、荷重などが、「包装貨物に損傷又は価値の低下をもたらさないこと」を確認する試験である<sup>1)</sup>。試験条件は、運搬距離や環境によってレベル分けされており、包装貨物に合わせて選択することになる。振動試験の場合、利用環境に応じた周波数範囲の振動を加えて測定することが求められる<sup>2)</sup>。例えば ISO/IEC 13355 では、200 Hz までの振動を長い場合には 7 時間以上、加えることが定められている。

こうした標準試験仕様では、「損傷又は価値の低下」をどのように評価するかは定められておらず、実際には試験後に目視や製品のテストモードなどで動作が正常であることを確認するだけ、ということもある。しかし、それでは試験結果を包装設計に活かすことができないため、輸送包装試験中あるいは実際の輸送中の包装貨物や、包装に加速度センサを取り付け、それによって包装による緩衝効果を定量化し、梱包設計の適切性や、蓄積疲労の定量評価につなげることが試みられている<sup>3) 4) 5)</sup>。

加速度センサは給電が必要であり、また多点測定やセンサデータ間の同期も求められる。このため給電とデータ取得のための配線が必要であり、試験条件の変

更を伴う場合や、包装材を複数試験する場合ごとに、包装に穿孔し、試験結果に影響が出ないように適切に配線し直すことが実態である。試験手順が増えることは望ましくなく、また加速度センサや、配線による影響が無視しうることを正確に確認することは困難であった。一般にセンサの等価質量は対象部品質量の 1/10 以下とすることが求められている<sup>6)</sup>。

輸送包装試験に無線センサを用いることは期待されているものの、前述したように試験時間が 7 時間などの連続となる場合があることや、複数測定点での同時測定が望ましいことから、低消費電力といわれている無線センサであっても、そのまま適用することは困難である。一般に ZigBee(ZigBee アライアンスが推進する 2.4 GHz 帯および 920 MHz 帯で動作する無線通信規格) や Wi-SUN(Wireless Smart Utility Network の略. Wi-SUN アライアンスが推進する 920 MHz 帯で動作する無線通信規格)などの小電力無線通信システムでは、送信・受信時間を制限することで低消費電力化を図っている。さらに電波法令で連続送信時間率が定められており、1 時間以内に 12 分以上の連続送信することはできない。また送信前には必ず他の無線機器が送信していないか確認するためにキャリアセンスと呼ばれる動作を実施する必要がある。BLE(Bluetooth Low Energy の略. Bluetooth Special Interest Group が推進する 2.4 GHz 帯で動作する無線通信規格) ではキャリアセンスは不要

であるが、連続送信時間率制限は適用される。またいずれの場合も、複数端末から収集するデータを時間同期させるためには、端末内の時計を定期的に補正する必要もある。

## 1.2 後方散乱通信を用いた無線センシング

本稿では、後方散乱通信(Backscatter communication)を用いて実現される電池なし無線加速度センサを輸送包装試験に適用し、有線センサなどを用いた結果と比較することで、その有効性と限界を定量評価する。

後方散乱通信は質問器(Interrogator)と端末で構成され、質問器から端末には無線電力伝送を行いながらコマンドを送信する。端末はアンテナに接続される無線チップ(Radio Frequency Integrated Circuit: RFIC)によって、電波の反射率を変えることで、通常の無線端末が必要とする周波数源や増幅器なしで端末から質問器方向の無線回線を実現する(Fig.1)。

端末をRFICで構成すれば、 $10\ \mu\text{W}$ 程度の電力で動作させることが可能で、無線給電による電池なし端末も実現できる。

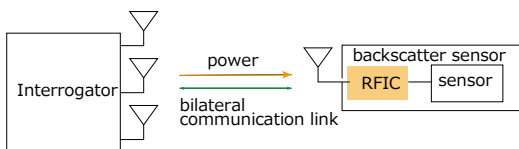


Fig.1 Basic composition of backscatter communication

さらに、端末内部に低消費電力センサを配置すれば、センサ情報を質問器に送信することもできる。

我が国の電波法令では920 MHz帯で動作する後方散乱通信の質問器に関しては、連続送信時間制限が設けられていない免許制度があり、長時間試験にも対応可能である。そして後方散乱通信の端末は、自ら電波を発することができないため、電波法令の対象外であり時間連続にセンサ情報を送信しても問題ない。

質問器の機能を電波送信と受信に分離して、携帯電話基地局や、WiFiアクセスポイントを電波送信として用いる環境バックスキッタ(ambient backscatter)も注目されている<sup>7)</sup>。

現在、後方散乱通信の最も普及している応用例は920 MHz帯域を用いた国際標準プロトコル<sup>8)</sup>によるradio frequency identification (RFID)であろう。RFIDでは一秒間に100枚以上の端末(電子タグ)の個体識別子を無線収集することができ、また標準<sup>8)</sup>では、センサデータの取得も検討されている。ところが、従来のRFIDでは端末からの送信時間を相互に調整することによって混信を回避しているため、原理的に、複数端末が同期したデータ収集はできない。

本論文の著者は、こうした連続送信、同期に関する問題を解決した新たな後方散乱無線通信方式を考案し<sup>9)</sup>、カスタムRFIC(開発コード Jupiter 1)を用いた電池なし無線加速度センサ(以下、無線センサ。

英語表記の場合には Wireless sensor) とソフトウェア無線による質問器を開発し、振動試験や輸送包装試験への適用を検討している。

和田らが実施した美術品の振動応答特性の調査<sup>3)</sup>では、屏風のレプリカを用いた加振試験の有効性は確認されている。しかし、一般的な有線センサの場合、センサ自体の質量が計測時に影響を及ぼす。例えば、屏風は表面に柔軟な素材である和紙が張られ、その部分の保護が最重要である美術品であるが、和紙表面の等価質量の1/10以下のセンサを使わない限り、正確な応答を計測できない。こうした構造と材質を有する美術品の振動応答特性をどのように捉えるのかは大きな課題であった。また、美術品の振動応答特性が把握できたとしても、梱包された状態で加振した場合に、実際にどのような挙動を示すのかを観測する手段がほぼ存在しなかった。こうした課題を解決するのが本稿で用いた無線センシング技術である。

本稿では美術品の輸送包装試験に後方散乱通信を適用し、有線加速度センサ(以下、有線センサ)やレーザードップラ振動計(Laser Doppler Vibrometer:以下 LDV)との比較により、その有効性と限界を実験によって評価した結果を報告する。

### 1.3 論文の構成

以下第2章では、実験システムの構成と、実験結果について説明する。第3章では、実験結果について考察し、第4章で結

論を述べる。

## 2 無線センサを用いた輸送包装試験

### 2.1 実験試料と実験装置

#### (1) 屏風レプリカ

実験試料は軽量美術品である屏風のレプリカ<sup>3)</sup>を用いた(Fig.2)。屏風レプリカの大きさは50 cm × 115 cm、質量は1.6 kgである。

このレプリカは木骨枠に和紙(厚さ 0.105 mm、坪量 27.5 g/m<sup>2</sup>の A 材と、厚み 0.085 mm、坪量 70 g/m<sup>2</sup>の B 材 2 枚を貼り合わせて構成。材質は A,B 材とも楮)を張って構成されている。和紙の下にも 10x12 cm の木製骨組みがあり構造強度を保持している。和紙はこの木製骨組みにも接着されている。このレプリカを美術品輸送を手がける専門の技術者によって梱包し、実際の美術品と全く同じ仕様で梱包した状況を再現した。緩衝材としてはポリウレタンフォームが使用されている。図中

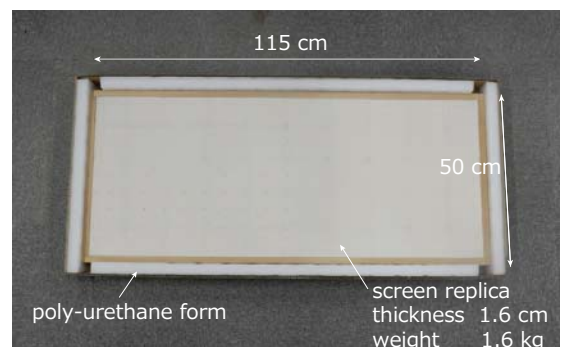


Fig.2 Physical dimension of the screen replica used in the experiments

に現れていないが、振動試験は梱包蓋をかぶせて実施した。

## (2) 振動試験機

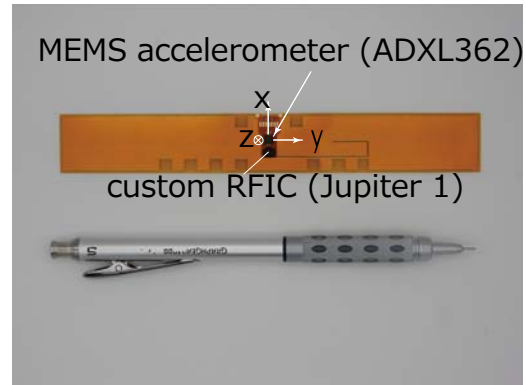
屏風レプリカは梱包した状態でも質量は 4.0 kg 程度であり軽量といえるが寸法が比較的大きいため、最大加振力 120 kN rms、最大搭載質量 1000 kg である大型加振装置 (EMK1252、IMV 社) 及びテーブルサイズ 145 x 145 cm の垂直補助テーブル (TBV-1450-K1125-A、IMV 社) を用い垂直方向加振を日本高度信頼性評価試験センターで行った。

屏風レプリカの和紙部分の振動測定に関する無線センサ計測精度の検証は小型加振器 (m060, IMV 社) と振動制御装置 (K2, IMV 社) を用いて慶応大学内実験室で実施した。

## (3) 加速度センサ

**無線センサ：**無線センサは通信と電力ハーベスタ機能を有するカスタム RFIC と三軸 MEMS 加速度センサ (ADXL362, ADI 社) (MEMS は Micro Electro Mechanical Systems の略。半導体プロセスを用いて製造したセンサを MEMS センサと呼ぶ) を SPI で接続しフレキシブル基板上に作ったアンテナにワイヤボンディングして構成している。総質量は 0.85 グラム、幅 150 mm、高さ 21 mm、厚みは 0.1 mm である (Fig.3)。

MEMS 加速度センサはカタログ値で消費電力 6  $\mu$ W、ノイズ密度 920  $\mu$ g/ $\sqrt{\text{Hz}}$ 、分解能 1 mg/LSB (Least Significant Bit の略。



**Fig.3 Battery-free backscatter accelerometer prototype**

デジタルデータ 1 ビットあたりの分解能) である。サンプリングレート 400 Hz、12 bit で加速度データを取得し 4 ビットパディング後、バックスキッタ回線速度 20 kbps でデータを Table 1 に示すパケットフレームで連続送信する。このためパケット長は 37 ビット、回線速度上の限界は 540.5 Hz (20 kbps/37 bits = 540.5 Hz) となり、MEMS 加速度センサのサンプリング周波数以上を確保できる。

MEMS 加速度センサのサンプリングレートが 400 Hz なので MEMS 加速度センサ間では最大 1 サンプル時間 (=1/400 秒)

**Table 1 Backscatter link packet frame Structure**

Data	Length (bits)	Note
Preamble	5	Fixed pattern
Zone ID	3	Interrogator ID
Sequence ID	8	Circulate from 0 to 255
Data	16	4 bit zero padding
CRC-5	5	Error detection

の同期誤差がある。このため、無線通信で位相誤差が発生しなかったとしても 200 Hz の帯域幅では位相は最大  $\pi$  ラジアン ( $2\pi \times 200 \text{ Hz} / 400 \text{ Hz}$ ) 回転する。この値を位相誤差の許容値とする。

**有線センサ：**一軸測定 MEMS 加速度センサ (VP-8021B、IMV 社) を用いた (Fig.4)。質量はセンサ 10 グラム、寸法 21.9 x 13.4 x 12.5 mm (長さ x 幅 x 高さ)、接続ケーブル 40 グラムであり、カタログ値で周波数範囲は最大 10 kHz、ノイズ密度は  $47.3 \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$  である。このセンサはアナログ出力であり、振動制御器で 24 bit ADC を行い振動制御・振動解析にデジタルデータを提供している。分解能は  $10^{-6} \text{ g/LSB}$  オーダーとなる。

屏風レプリカに対する加振方向を変更する場合には、センサ側面をアンテナ面に取り付け測定軸方向と加振方向を合致させた。

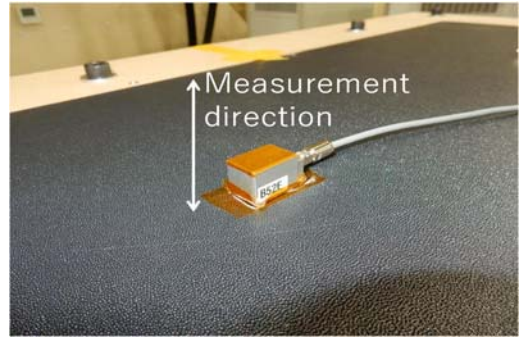


Fig.4 MEMS wired accelerometer

**レーザードップラ振動計(LDV)：**無線センサによる屏風レプリカの和紙部分の振動特性の検証には、LDV(VGO-200, Polytec 社) を用いた。LDV は測定対象物の振動速度をレーザ光のドップラーシフトで一軸測定する原理であり、軽量構造物振動計測における加速度センサの検証、薄膜振動などで用いられている<sup>10,11)</sup>。5 kHz 帯域でのノイズ密度は  $10.2 \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$  と有線センサと同等以上の性能である。

無線センサ、有線センサ、レーザードップラ振動計の特性を Table 2 にまとめる。

Table 2 Acceleration measurement sensors comparison

	Wireless sensor	Wired accelerometer	LDV
Measurement principle	Combination of a digital accelerometer and custom RFIC.	Various types are available, such as capacitance and piezoelectric.	Doppler frequency shift of laser reflection.
Disadvantage	Low accuracy and high noise in general.	Weight constraint. Wiring required.	Line of sight measurement only. Retroreflective target may be needed.
Advantage	Facilitates installation and configuration change. Lightweight and small form factor.	Robust and accurate measurement with high synchronization.	No target needed on the test subject.

(4) 質問器

無線センサに給電しながら振動データを収集するために平面アンテナ4枚を用いた。それぞれのアンテナはサーキュレータを用いて送受兼用とし、アンテナ上などの位置でも無線センサに給電・読み取りができるように工夫した(Fig.5)。

2.2 実験条件

(1) 振動試験

ISO/IEC 13355<sup>2)</sup>の周波数範囲を参考に、低周波での振幅が過大にならない10～200 Hzで一定のパワースペクトラム密度(Fig.6)でランダム加振し、加振点(excitation point)、梱包外側(on package)、屏風レプリカ骨組み(on frame)、屏風レプリカ和紙(on screen)の4点で計測した(Fig.7)。

屏風レプリカ和紙部は、有線センサを取り付けると破損する可能性があったため、大型加振装置を用いた実験では、無線センサのみで測定した。屏風レプリカ骨

組みに有線センサを配置するため、梱包に穿孔して配線を行った。なおFig.7に示すように骨組み部の無線センサと有線センサは重なりを避けるため20 mm程度取り付け位置が異なる。

この梱包を加振台に水平および垂直に

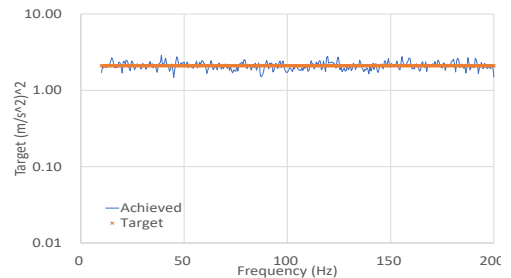


Fig.6 Power spectrum density in the random vibration experiment

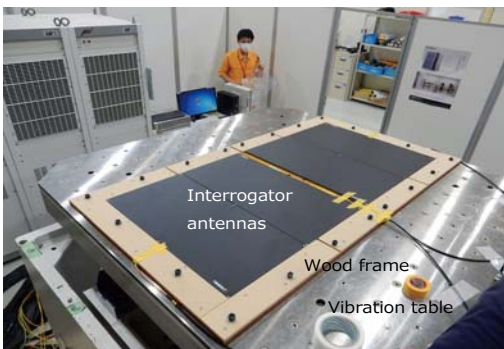


Fig.5 Antennas and their fixture attached to a vibration table

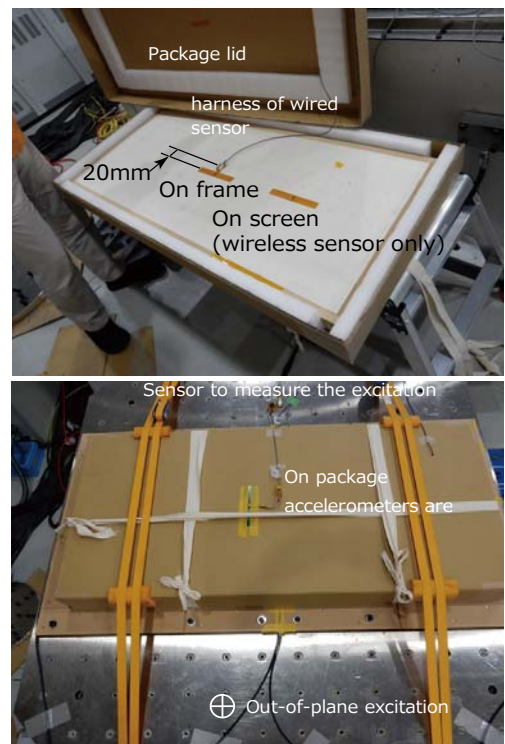


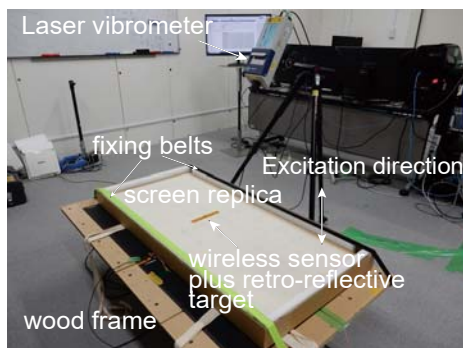
Fig.7 Sensor attachment to the packaged screen replica

ベルトで固定し、上下（重力）方向にランダム振動を加えた。**Fig.7** は水平設置の様子である。輸送包装試験では水平加振など、他の加振方法、設置方法もあるが、無線センサの有効性と限界は上記の設置変更で評価できると考えた。

## (2) 屏風和紙振動測定の見証

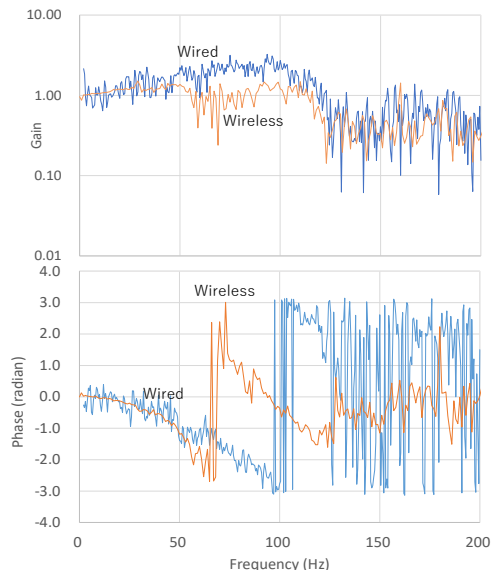
無線センサによる屏風和紙振動測定の妥当性を確認するために、LDV による非接触測定と無線センサ測定を慶応大学研究室内で比較した。実験は、振動台に質問器のアンテナ治具を固定し、その上に上蓋を外した屏風レプリカ梱包を締結ベルトで固定設置した (**Fig.8**)。

屏風レプリカの和紙部にはレトロリフレクタシールを貼付し、**Fig.3** の無線センサを貼付した状態と貼付しない状態についてレーザードップラ振動計と無線センサで加振器入力に対する和紙部分の伝達関数をランダム加振で求めた。この試験では加振器でアンテナ治具の中央部分のみ加振しており、大型加振装置の実験と

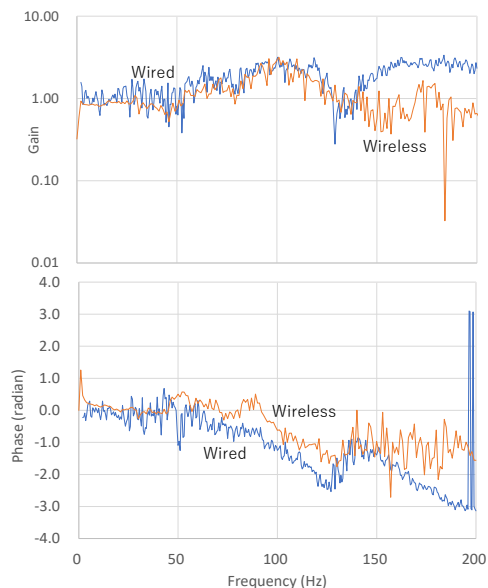


**Fig.8 Evaluation of wireless sensing using a laser vibrometer**

は加振条件が異なる。



**Fig.9 Bode diagram of on-frame sensors: horizontal setting**



**Fig.10 Bode diagram of on-package sensors: horizontal setting**



## 2.3 実験結果

### (1) 水平設置した屏風レプリカと梱包の伝達関数

測定点での伝達関数を、屏風レプリカ骨組み(Fig.9)、梱包外側(Fig.10)についてそれぞれ Bode 線図で示す。利得については、骨組み位置の無線センサが 60-70 Hz の範囲で 4 dB 程度有線センサと差異がある。梱包外側部では 120 Hz まで無線センサと有線センサの利得が合致していることから、この差異は取り付け位置の違いに関係していると考えられる。位相は屏風レプリカ骨組みでは無線センサが 60 Hz 以上で約  $\pi$  ラジアン、有線センサ位相から回転しているが、この値は第 2.1 節で説明した許容位相誤差内である。周波数 120 Hz 以上で無線センサの利得が有線センサの利得から乖離する理由は、内蔵加速度センサのナイキスト周波数に近いことと、ノイズ密度 (920  $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ ) が有線 MEMS センサのノイズ密度 (47.3  $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ ) と比較すると劣っていることに要因があると考えられる。

### (2) 垂直設置した屏風レプリカと梱包の伝達関数

次に梱包を加振台に縦置きし、ランダム振動試験を実施した (Fig.11)。

Fig.12、Fig.13 に結果を示す。水平設置と同様、梱包外側無線センサ利得は有線センサ利得と合致し、骨組み部無線センサ利得は有線センサと約 3 dB 差異がある。骨組み部の差異はセンサ位置の違いが原

因と考えられる。位相は第 2.1 節で説明した許容位相誤差  $\pi$  ラジアン内に収まっている。

水平設置と比べると、垂直設置の場合には、屏風レプリカ、梱包外側とも 100 Hz 付近で利得が大きくなっている。この周波数で位相が 90 度 ( $\pi/2$  ラジアン) 遅れとなることから共振が発生していると考えられる。

水平設置から垂直設置に変更する際には、有線センサの取り付け向きの変更および、配線変更が必要であり、設置変更には 1 時間程度を要した。一方、無線センサは測定方向を無線コマンドで変更可能であり、ベルトを外すなど配線の手間もなく試験準備や設置変更が容易であった。関連して、有線センサでは配線の変更に伴って、センサ取り付け位置と制御装置ポートの関係は配線をたどって確認せねばならない場合があったが、無線センサでは、内蔵の RFIC に標準仕様<sup>8)</sup>による 96 ビットの個体識別子が付与されているた

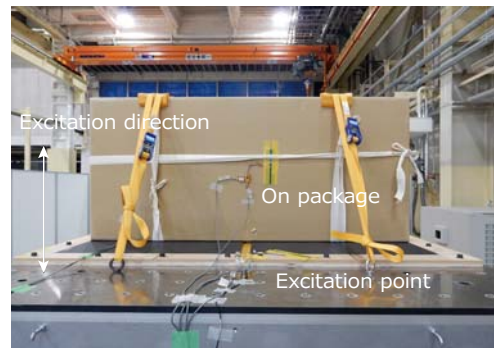
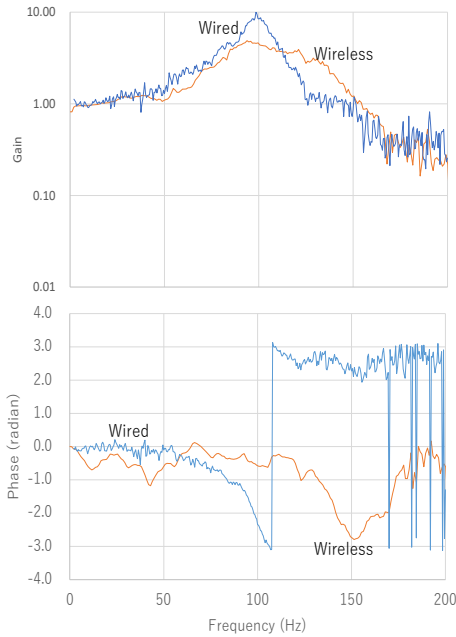
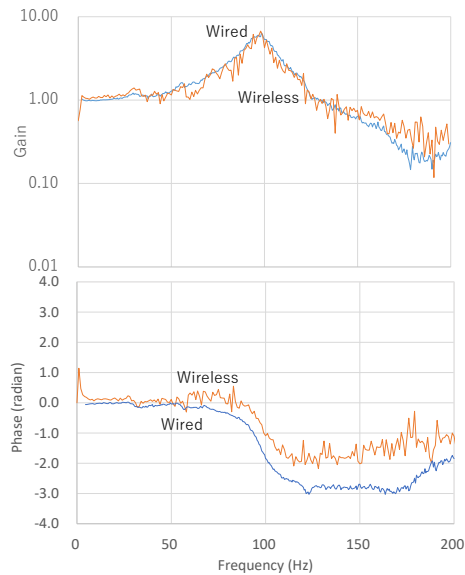


Fig.11 Vertical setting random vibration experiment



**Fig.12 Bode diagram of on-frame sensors: vertical setting**



**Fig.13 Bode diagram of on-package sensors: vertical setting**

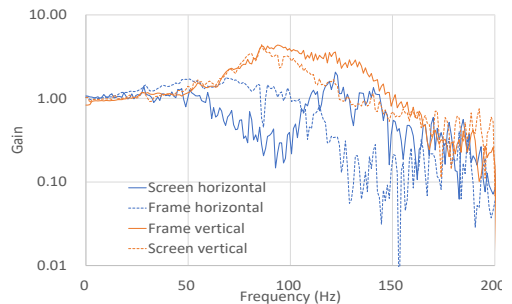
め、測定データからセンサ取り付け位置を直接特定することが容易であった。

### (3) 屏風和紙の振動特性

無線センサによる屏風和紙の面外方向振動応答を水平設置・垂直設置で比較した (**Fig.14**)。参考データとして屏風骨組み部の特性も重ね書きしてある。本測定では屏風和紙の破損が面外方向振動に起因することが多いと考え、梱包が垂直設置の場合にも屏風和紙の振動は、面外方向振動を測定した。

水平設置の場合には加振振動数が 100 Hz を超えると屏風骨組みよりも屏風和紙が大きく振動する (和紙部の利得が骨組み部の利得より大きい) 傾向が観測できる。しかし骨組みの利得が 1 以下と小さいため、結果的に和紙の利得も最大約 3 dB 程度である。

一方、垂直設置の場合には、和紙および骨組みの面外方向の振動は加振方向とは直交しているにも関わらず、共振点である 100 Hz 近傍で 6 dB 程度の利得が発生している。これに影響され屏風和紙部も



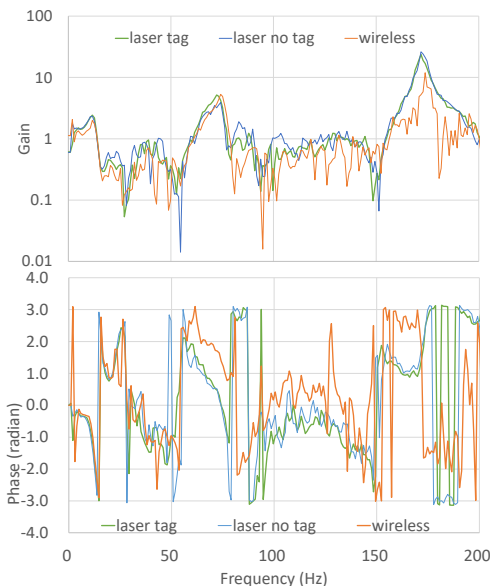
**Fig.14 Frequency response of screen paper**

同等の利得で振動している。

#### (4) 屏風和紙部の無線センサによる振動測定検証

Fig.8 の実験構成で、無線センサを貼付した状態 (laser tag) と貼付しない状態 (laser no tag) についてレーザードップラ振動計と無線センサで加振器入力に対する和紙部分の伝達関数をランダム加振で求めた結果を Fig.15 に示す。

利得特性は 160 Hz までの範囲で無線センサとレーザードップラ振動計の測定結果は一致している。位相特性も許容範囲の  $\pi$  ラジアンに収まっている。無線センサの貼付有無で特性は変わらない。



**Fig.15 Bode diagram at the screen paper measured by a laser vibrometer and wireless sensors**

### 3 考察

#### 3.1 無線センサの可用性

無線センサを用いることで、輸送包装試験の準備および設置形態変更などの手間が削減できることが確認できた。特に屏風レプリカに有線センサを設置するためには梱包に穴をあけ、試験中にも無理な力がセンサや屏風レプリカに加わらないように配線する必要があるが、無線センサではこの手順は不要である。また使用した無線センサには個体識別子が必ず付与されており、測定箇所を質問器側で識別子により特定できる。有線センサは一般に測定場所と測定チャンネルの関係を設置に応じて記録せねばならないので、個体識別機能も有効であった。

無線センサの測定精度は使用する加速度センサ(今回は ADXL362)の測定精度と、無線通信の誤りや同期誤差によって決まる。前述した様に低消費電力加速度センサはサンプリングレート、分解能やノイズ密度に制約があり、厳密な測定精度が必要とされない場合に適用可能といえる。特に加速度センサのサンプリングレートが 400 Hz である場合、200 Hz 帯域での位相誤差は最大  $\pi$  ラジアンになる可能性があり、厳密な位相精度が求められる測定には向かない。

また無線センサは軽量であることから、有線センサが取り付けられない和紙部分などの測定にも適している。和紙部分に無線センサが貼り付けられることによって和紙の振動特性が変わってしまうこと

も懸念されるが、LDV を用いた検証の結果、今回は、無線センサ貼り付けによる影響はないと言える。一般に、センサ質量が問題となる場合に用いられる LDV は見通しという制限があるため、梱包条件での測定には適さない。

今回は対象が段ボールや屏風であったため無線通信は比較的容易であり、データ取得中のパケット損失はほぼゼロであった。しかし計測対象が金属や水分を含む場合などには、無線センサや質問器アンテナの設定などに工夫や事前検討が必要な場合がある。

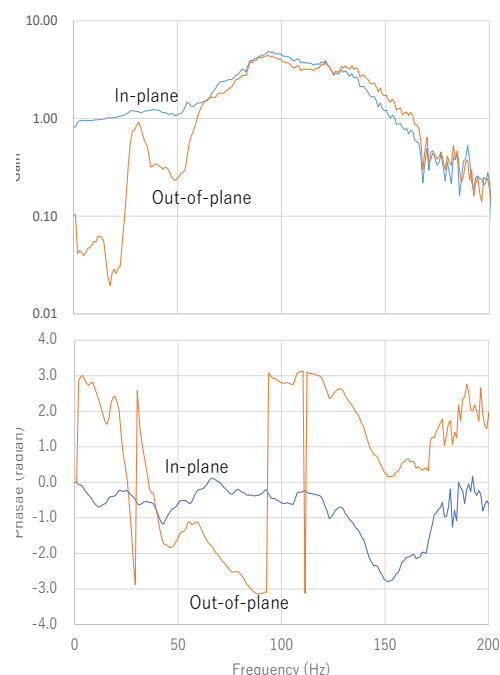
### 3.2 屏風レプリカ和紙部分の振動に関する考察

0章で述べたように、屏風レプリカでは和紙部の保護が最重要である。水平設置の和紙部分の面外振動利得を垂直設置の値と比べると、ピーク値で約 3 dB (Fig.14 で screen vertical と screen horizontal の最大利得を比較) 低いことが観測された。同一の加振条件であれば直観的には水平設置の場合に和紙の面外方向振動が大きくなると思われたため、この要因について考察する。

和紙は骨組みに接着されているため、骨組みが振動すれば和紙は振動する。垂直設置での 100 Hz 付近での骨組みの振動が加振方向である面内方向のみならず面外方向にも発生していると考えられた。そこで垂直設置の骨組みについて、面内 (in plane) 方向の振動と、面外 (out-of-

plane) 方向の振動を無線センサで同時に二軸測定した実験結果を調査した。その結果、Fig.16 に示すように、垂直設置でおよそ 70 Hz 以上では、骨組みは面内および面外方向に直交した方向にほぼ逆相に同等な大きさで振動していることがわかった。この面外方向の骨組み振動により、和紙も面外方向に振動していると考えられる。

一方、水平設置の場合は骨組みの面外方向振動利得 (Fig.9) は垂直設置 (Fig.12) に比して 5 dB 程度低く、このため和紙の面外振動が比較的小さくなったと考えられる。



**Fig.16 In-plane and out-of-plane vibration of the frame to which the screen paper is attached**

従来は計測できなかった梱包状態での振動状況であっても、このように定量評価できることは無線センサの特徴である。

#### 4 結論

輸送包装試験によって包装設計の適切性を定量評価するためには、包装貨物に加わる振動や衝撃を計測する必要がある。有線センサを用いる場合には、包装に損傷を与えないように配線するとともに有線センサや、その配線が測定結果に影響を与えないように慎重に準備する必要がある。

既存無線センサはこの問題を解決するために有効であるが、輸送包装の国際標準では試験時間が数時間連続測定となる場合があり電池駆動では継続実施が難しいケースがある。また振動特性を求めるためにはセンサ間の同期が必要となるため、既存無線センサを用いた多点計測実施は現実には容易ではない。

後方散乱通信を用いることで無線加速度センサを電池なしで実現することが可能であり、また複数の無線センサから同期振動データを取得することも可能である。無線給電で駆動できる低消費電力の無線センサはサンプリングレートやノイズ特性が有線加速度センサに比して制約されてしまうが、それでも無線センサ内で使用する加速度センサに応じた位相誤差が許容できるのであれば、ISO/IEC 13355 ランダム試験を実施できる精度は実現可能である。また 1 グラム未満など

の軽量化が可能であるため、屏風の和紙部分など従来センサ設置や振動計測が困難であった場所の計測も実現可能である。

計測精度は無線センサが用いる加速度センサの性能と無線通信品質で決まる。今回は対象物が段ボール、紙、木で構成されているため、無線通信におけるパケット損失は発生せず、加速度センサの性能で振動特性の計測精度が決まり、利得特性は少なくとも 120 Hz まで計測可能、位相特性は加速度センサのサンプリングレート 400 Hz で決まる  $\pi$  ラジアン/200 Hz の誤差範囲に収まることを確認した。

さらに、この技術によって、美術品に対してなされている現状の梱包仕様を、実際に梱包した状態でその効果を評価することが可能となる。したがって、レプリカを用いることによって、例えば緩衝材の配置等といった梱包仕様を調整しながら加振試験を繰り返し、美術品の素材と構造に応じて梱包設計を最適化できることにつながる。本稿で検証した技術が美術品梱包に大きな進展をもたらすものと期待される。

#### 5 謝辞

本研究開発は、総務省「電波資源拡大のための研究開発 (JPJ000254) および JSPS 科研費 20H01383 によって実施した成果を含む。

＜参考文献＞

- 1) JIS Z0200 (2020), 包装貨物—性能試験方法—一般通則
- 2) ISO/IEC 13355 (2016), Packaging — Complete, filled transport packages and unit loads — Vertical random vibration test
- 3) 和田浩, 屏風の振動応答特性を検証するための基礎的研究, 日本包装学会誌, **31**(2), p.169 (2022)
- 4) 和田浩, 美術品輸送の安全対策に関する研究動向, 日本包装学会誌, **31**(4), p.201(2022)
- 5) 高木 雅広, 輸送環境調査と最近の事例, 日本包装学会誌, **31**(4), p.197 (2022)
- 6) 斎藤勝彦, 長谷川 淳英, "輸送包装の基礎と実務", 幸書房, p.61(2008)
- 7) D. Bharadia, K. R. Joshi, M. Kotaru, S. Katti, Backfi: High throughput wifi backscatter, AC Conference on Special Interest Group on Data Communication, p.283(2015)
- 8) ISO/IEC 18000-63 (2021), Information technology-radio frequency identification for item management part 63: Parameters for air interface communications at 860 MHz to 960 MHz Type C
- 9) J. Mitsugi, O. Tokumasu, Y. Kawakita, Wireless Modal Testing with Multiple Battery-free Backscatter Sensors, IEEE Journal of Radio Frequency Identification, **6**, p.299(2022)
- 10) V. Thukral, M. Cahu, J. J. M. Zaal, J. Jalink, R. Roucou, R. T. H. Rongen, Assessment of Accelerometer Versus LASER for Board Level Vibration Measurements, IEEE 69th Electronic Components and Technology Conference (ECTC), p.1339(2019)
- 11) E. Herth, F. Lardet-Vieudrin, L. Valbin, G. Lissorgues, Mechanical behavior of T-shaped AlN membrane based on thin film elongation acoustic resonator, IEEE Symposium on Design, Test, Integration and Packaging of MEMS/MOEMS, p.1(2016)

(原稿受付 2023年3月31日)

(採録受理 2023年4月25日)