

一般論文

鉄道コンテナ輸送における振動条件を考慮した 段ボール箱の荷擦れ発生メカニズム

梅原 康宏^{*,**}、小杉 一斗^{**}、津田 和城^{***}、細山 亮^{***}、堀口 翔伍^{***}

Mechanism of Abrasion Damage in Corrugated Boxes Considering the Vibration Condition During Railway Container Transportation

Yasuhiro UMEHARA^{*,**}, Kazuto KOSUGI^{**}, Kazuki TSUDA^{***},
Akira HOSOYAMA^{***} and Shogo HORIGUCHI^{***}

鉄道コンテナ輸送における荷擦れ発生メカニズムの解明を目的とした輸送環境調査において、12 フィートコンテナを対象とした鉄道輸送における振動加速度 PSD では、左右方向の低周波成分、上下方向の低周波成分および高周波成分が大きいことを確認していた。さらに本報では、鉄道輸送の振動加速度 PSD を用いた定置加振試験を実施し、左右方向（低周波のみ）に上下方向（高周波のみ）を加えた 2 軸同時加振で顕著な荷擦れが発生することを確認した。輸送環境調査および定置加振試験結果を踏まえ、鉄道コンテナ輸送における荷擦れ発生メカニズムは、まず貨車運動特性に起因する左右方向の低周波振動により貨物がロッキング挙動することで荷擦れが発生し、さらに貨車用まくらばね自体の共振を主とする上下方向の高周波振動によりロッキング挙動が発生しやすくなり、荷擦れ量が増大すると考察した。

In order to elucidate the mechanism of abrasion damage in corrugated boxes during railway container transportation, we previously conducted a transportation test. In the railway transportation test with a 12-ft container, we found that the power spectral density (PSD) of lateral acceleration was large in the low-frequency band, whereas that of vertical acceleration was large in both the low-frequency and high-frequency bands. Furthermore, in this paper, we conducted the vibration test with PSD of vibration acceleration during railway transportation, we found that significant abrasion damage occurred with simultaneous excitation in two axes, including the lateral direction (low-frequency only) and the vertical direction (high-frequency only). Based on the above results, we conjectured that the mechanism of abrasion damage in corrugated boxes during railway container transportation is as follows. First, low-frequency vibrations occur in the lateral direction due to the characteristics of freight car motion. These vibrations cause the freight to undergo rocking motions, causing abrasion damage. Moreover, high-frequency vibrations in the vertical direction caused by surging in secondary springs of the freight car induce rocking motions and increase the amount of abrasion damage.

キーワード：輸送、鉄道、加速度、振動試験、段ボール箱、荷擦れ

Keywords : transportation, railway, acceleration, vibration test, corrugated boxes, abrasion damage

* 連絡者 (Corresponding author) TEL: 042-573-7285, FAX: 042-573-7294, Email: yasuihiro.umechara.22@trti.or.jp

** (公財)鉄道総合技術研究所, 〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38

Railway Technical Research Institute, 2-8-38 Hikari-cho, Kokubunji-shi, Tokyo 185-8540, Japan

*** (地独)大阪産業技術研究所, Osaka Research Institute of Industrial Science and Technology (ORIST)

1. 緒言

現在の日本は、物流分野における深刻な労働力不足や温室効果ガス排出量の削減など重大な課題を多く抱えており、トラック輸送から鉄道輸送へのモーダルシフトのさらなる推進が求められている。モーダルシフトを積極的に推進していくために、低床貨車の導入による国際海上コンテナの利用、大型コンテナの鉄道輸送可能区間の拡大、他輸送形態とのシームレス化によるリードタイム短縮など多くの課題がある中で、輸送品質に関しては、トラック輸送と同等もしくはそれ以上の高品質を今後求められることが想定される。しかし、トラック輸送に比べて鉄道コンテナ輸送では段ボール箱の擦れ損（荷擦れ）が発生しやすい¹⁾と言われており、鉄道コンテナ輸送の利用が敬遠される一つの理由になっている。ただし、鉄道コンテナ輸送における段ボール箱の荷擦れ状況について、定量的に評価している事例²⁾はあるものの、報告例は少なく、発生要因となる振動成分や詳細な発生メカニズムは明確に示されていない。そこで、荷擦れ発生メカニズムを解明した上で損傷防止対策を提案できれば、鉄道コンテナ輸送の輸送品質向上に大きく寄与できると考える。

本報では、現状の鉄道コンテナ輸送およびトラック輸送における振動環境と貨物挙動の一例を示すとともに、鉄道コンテナ輸送の振動環境を考慮した定置ランダム加振試験により、振動加速度と荷擦れの関係を調査した結果を示す。そして、輸送振動環境および定置ランダム加振試験結果を踏まえて考察した、鉄道コンテナ輸送における荷擦れ発生メカニズムについて報告する。

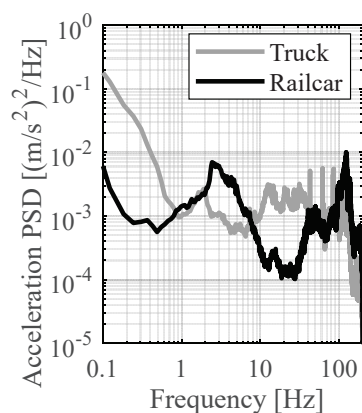
2. 振動環境と貨物挙動

2.1 鉄道輸送とトラック輸送の振動環境

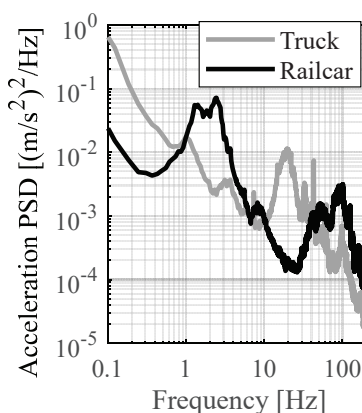
鉄道輸送において代表的な 12 フィートコンテナを用いた輸送環境調査³⁾より、トラック輸送および鉄道コンテナ輸送におけるコンテナ床面中央の 3 軸振動加速度パワースペクトル密度（PSD）の一例を Fig. 1 に示す。トラック、鉄道車両共に進行方向を前後方向と定義している。トラック輸送については、12 フィートコンテナ 1 個を搭載した 8.6t トラックが高速道路区間を走行した際の連続計測データ（計測時間：約 44 分、平均走行速度：約 60km/h）より算出した結果である。鉄道コンテナ輸送については、コキ 106 の先頭側車端部（台車直上）に供試コンテナを配置して走行した際に、振動加速度実効値が大きかった走行区間の連続計測データ（計測時間：約 34 分、平均走行速度：約 68km/h）より算出した結果である。両者とも停車時のデータはほぼ含んでいない。本解析においては車両特性を詳細に把握するため、周波数分解能は約 0.06Hz としている。

Fig. 1 において、トラック輸送、鉄道コンテナ輸送ともに、剛体モードでのばね上共振に起因する PSD ピークが、1-5Hz 付近に見られる。トラックのばね上とは、リーフサスペンションに支持されたフレーム、荷台、積荷などに該当する。また、鉄道貨車のばね上とは、前後台車のまくらばね（コイルばね）に支持された揺れまくら、車体、コンテナなどに該当する。

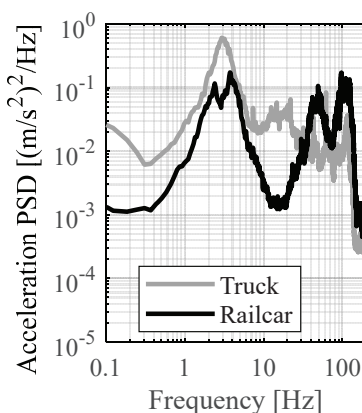
トラック輸送と鉄道コンテナ輸送の振動加速度 PSD で異なる点としては、まず、鉄道コンテナ輸送で PSD 値が小さい 10-30Hz 帯域において、トラック輸送では PSD ピークが各方



(a) Longitudinal direction



(b) Lateral direction



(c) Vertical direction

Fig. 1 PSD of 3-axis acceleration during railcar and truck transportation

向で 2 箇所ほど確認できる。これは、エンジン振動や、タイヤ剛性とばね下質量に関連するばね下共振などの振動に起因すると考えられる。なお、トラックのばね下とは、アクスル、ディスクホイールなどに該当する。

次に、鉄道コンテナ輸送において PSD 値が大きく、且つトラック輸送よりも PSD 値が大きい帯域としては、左右方向の低周波振動（1-3Hz 付近）、上下方向の高周波振動（40-130Hz 付近）に注目する。トラック輸送に比べて鉄道コンテナ輸送で段ボール箱の荷擦れが発生しやすいのであれば、上記周波数帯域の振動が要因である可能性が高い。左右方向の低周波振動については、1.3Hz 付近の PSD ピークはローリングモード、2.4Hz 付近の PSD ピークは左右並進モードおよびねじり（ローリングとピッチングの連成）モードに起因する振動と考えられる。また、上下方向の高周波振動については、40-60Hz 付近および 90-125Hz 付近で PSD 値が大きくなっている。この要因の一つとして、貨車の台車に用いられているまくらばねのサージングが考えられる。サージングとは、コイルばね加振時のねじり衝撃波によって生じる共振現象である。まくらばねに使用されているコイルばねの固有振動数 f_e は JIS B 2704-1⁴⁾の式(1)で求めることができる。

$$f_e = a \sqrt{\frac{10^3 R}{m_s}} = a \frac{22.36d}{\pi n D^2} \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (1)$$

ここで、 a は下記のように定義される。

$a = i/2$: 両端自由または固定の場合

$a = (2i - 1)/4$: 一端固定で他端自由の場合

$i = 1, 2, 3, \dots$: 次数

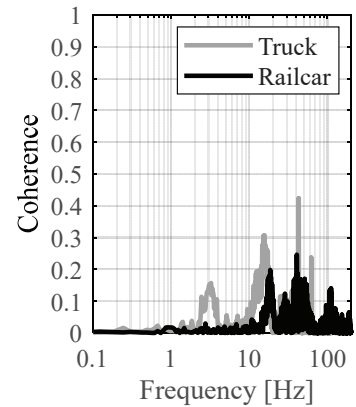
また、 R : ばね定数、 m_s : ばねの運動部分の質量、 d : 線径、 n : 有効巻数、 D : コイル平

均径、 G ：横弾性係数、 ρ ：材料の単位体積当たりの質量（密度）である。

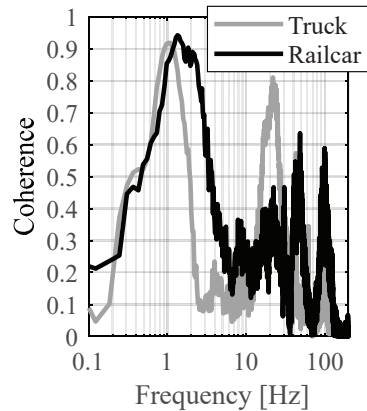
二重コイルばねを使用している本試験の貨車まくらばねでは、一端固定で他端自由における 1 次の固有振動数は 50-65Hz 付近、両端自由または両端固定における 1 次の固有振動数が 100-130Hz 付近となり、上下振動加速度 PSD でも同様の周波数帯域で大きくなっていることが確認できる。まくらばね取付条件は、基本的に両端自由であるが、輪軸-台車枠間のばね定数が大きいと、台車枠側が固定端、揺れまくら・車体側が自由端に当てはまる状態があると想定される。台車の中心ピンや側受けなど振動伝達経路による他振動の影響もあるが、輸送環境調査で確認された周波数帯域と近いことから、レール上を車輪が走行する際に生じる本帯域の振動が、まくらばねのサージングを発生させていると考えられる。

2.2 振動環境と貨物ロール挙動の関連性

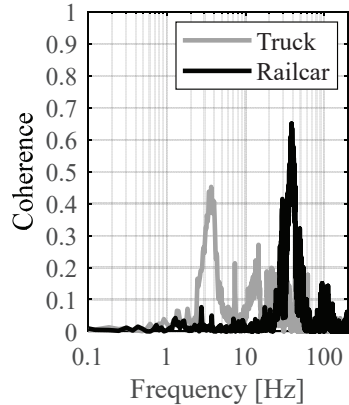
輸送環境調査³⁾では、光学式モーションキャプチャシステムを用いて輸送中の貨物挙動を測定しており、鉄道輸送では軌道変位の大きい曲線通過時などで供試貨物に著大な左右方向のロッキング挙動が確認されていた。ただし、荷擦れの発生には、単発の著大なロッキング挙動だけでなく、何回も繰り返されるロッキング挙動の影響が大きいと考えられる。ここでは、ロッキング挙動に関連する供試貨物のロール角速度と、振動加速度の発生方向および周波数の相関を特定するために算出した振幅二乗コヒーレンスの結果を示す。振幅二乗コヒーレンス C_{xy} は式(2)で求められ、各周波数における信号同士の一一致度合いを示す



(a) Longitudinal direction



(b) Lateral direction



(c) Vertical direction

Fig. 2 Coherence between roll angular velocity of test freight and 3-axis acceleration of container floor during railcar and truck transportation

値である⁵⁾。振幅二乗コヒーレンスは 0 から 1 の値をもち、値が 1 に近いほど、その周波数において信号同士の相関が高いことを示す。

$$C_{xy}(f) = \frac{|P_{xy}(f)|^2}{P_{xx}(f)P_{yy}(f)} \quad (2)$$

ここで、 $P_{xx}(f)$ ：信号 x のパワースペクトル密度、 $P_{yy}(f)$ ：信号 y のパワースペクトル密度、 $P_{xy}(f)$ ：信号 x と信号 y のクロスパワースペクトル密度であり、本報では x が供試貨物のローラ角速度、 y がコンテナ床面での各方向の振動加速度に対応する。

Fig. 2 において、前後振動加速度については、トラック輸送、鉄道コンテナ輸送ともに振幅二乗コヒーレンスの値は小さく、供試貨物のロッキング挙動との関連性は小さいと推測される。左右振動加速度については、トラック輸送において、1Hz 付近で値が大きくなっている。これは、トラックの荷台ローリングモードに起因する振動で、供試貨物はコンテナ床面と一緒に動くため、荷擦れへの影響は小さいと考える。また、17-25Hz 付近で値が大きいことに関しては、ばね下共振に起因する振動により、供試貨物で微振幅のロッキング挙動が発生している可能性が高い。一方、鉄道コンテナ輸送においては、1-2.5Hz 付近で値が大きくなっている。トラック輸送と同様に車体ローリングモードに起因する振動で値は大きい、それに加えて車体左右並進モードおよびねじりモードに起因する振動を含む周波数帯域で値が大きくなっている。さらに、他の周波数に大きな値がないことから、左右方向の低周波振動が、供試貨物のロッキング挙動に大きな影響を与えていると言える。上下振動加速度については、トラック輸送において 3.5Hz 付近、鉄道コンテナ輸送におい

て 39Hz 付近でピークは見られるが、値が 0.45-0.65 程度であり、供試貨物のロッキング挙動との直接的な関連性への言及は難しい。

以上のように、鉄道コンテナ輸送においては、荷擦れを引き起こすロッキング挙動の要因が、走行時に発生する車体左右並進モードおよびねじりモードに起因する振動を主とする左右方向の低周波振動であると推測できる。しかし、鉄道コンテナ輸送において PSD 値が大きい上下方向の低周波および高周波振動が、荷擦れの発生に影響しているかは不明である。

3. 定置ランダム加振試験による荷擦れ評価

3.1 試験方法

3.1.1 試験概要

前述の課題を受けて、振動条件と荷擦れ発生状況の関係を把握するため、鉄道コンテナ輸送の振動加速度 PSD データを用いて定置ランダム加振試験を実施した。加振試験は、3 軸同時加振が可能である大型貨物用振動試験装置⁶⁾ (振研製 G-6230L-3LT-115)、および尖度を 3.1~10 の範囲で任意に設定可能な振動制御器 (IMV 製 K2) を用いた (**Fig. 3**)。

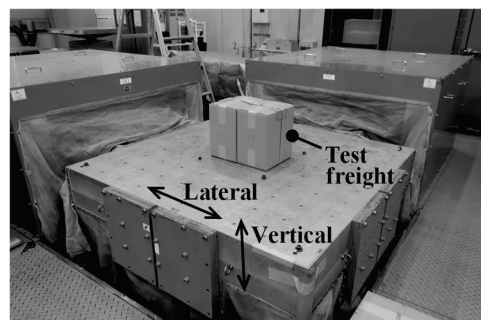


Fig. 3 Scene of vibration test

3.1.2 供試体

輸送環境調査³⁾と同様に、段ボール箱内部に直接アルミフレーム構造体を入れた供試貨物2個をPPバンドで結束したものを供試体とし、本試験では5セットを用いた。なお、PPバンドでの手締め引張力について、輸送環境調査では50Nに設定していたが、何回も緩めて、再結束を行う本試験においては、供試貨物の結束状態が安定しないことが懸念されたため、引張力が100Nとなるように計測を行いながら、供試貨物同士を結束した。

3.1.3 加振条件

加振条件は下記C1～C5に示す5条件とした。本試験においては、輸送環境調査における振幅二乗コヒーレンスの値が小さく、振動加速度PSDピーク値が上下方向や左右方向の低周波成分に比べて10分の1以下であった前後方向および左右方向の高周波成分については、荷擦れ発生への影響が小さいと考えて試験を省略した。各試番の加振時間は8時間である。ただし、試験状況および試験日程を考慮し、加振条件C3は6時間とした。

- C1: 左右方向（低周波のみ）単軸加振
- C2: 上下方向（高周波のみ）単軸加振
- C3: 上下方向（低周波＋高周波）単軸加振
- C4: 左右方向（低周波のみ）・上下方向（低周波のみ）2軸同時加振
- C5: 左右方向（低周波のみ）・上下方向（高周波のみ）2軸同時加振

3.1.4 加振データ

Fig.1 における鉄道コンテナ輸送の振動加速度PSD結果及びその結果を参考に検討したラ

ンダム加振用PSDプロファイルをFig.4からFig.7およびTable1からTable4に示す。図中の灰色線が実測PSD結果で、黒線がランダム加振用の目標PSDプロファイルである。なお、本試験では、輸送環境調査における左右方向の低周波振動から得られた尖度6.0を目標として、非ガウス分布のランダム加振で実施した。

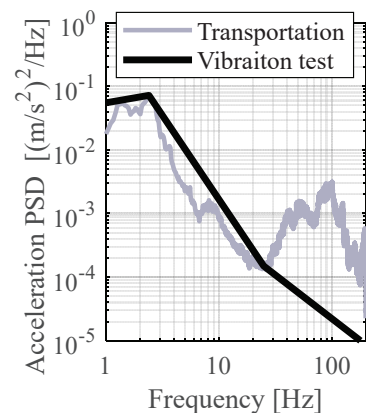


Fig. 4 PSD for vibration test
(Low-frequency lateral acceleration)

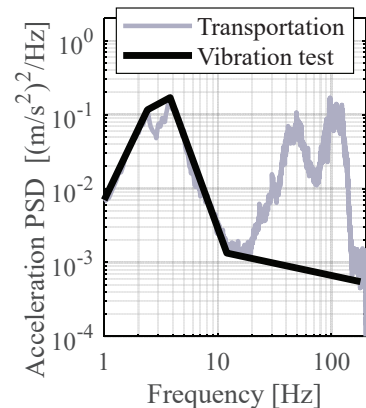
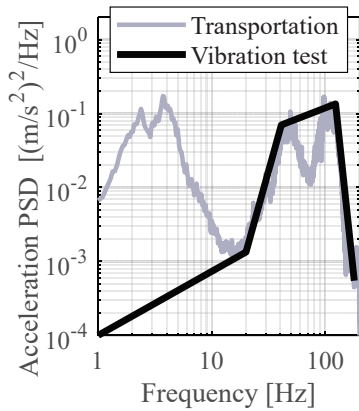
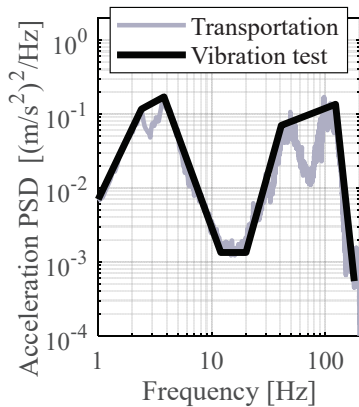


Fig. 5 PSD for vibration test
(Low-frequency vertical acceleration)



**Fig. 6 PSD for vibration test
(High-frequency vertical acceleration)**



**Fig. 7 PSD for vibration test
(Vertical acceleration)**

**Table 1 PSD for vibration test
(Low-frequency lateral acceleration)**

Frequency [Hz]	PSD [(m/s ²) ² /Hz]
1	0.055
2.4	0.072
25	0.00015
180	0.00001

**Table 2 PSD for vibration test
(Low-frequency vertical acceleration)**

Frequency [Hz]	PSD [(m/s ²) ² /Hz]
1	0.007
2.4	0.116
3.8	0.17
12	0.00134
180	0.00055

**Table 3 PSD for vibration test
(High-frequency vertical acceleration)**

Frequency [Hz]	PSD [(m/s ²) ² /Hz]
1	0.0001
20	0.00134
41	0.07
123	0.135
180	0.00055

**Table 4 PSD for vibration test
(Vertical acceleration)**

Frequency [Hz]	PSD [(m/s ²) ² /Hz]
1	0.007
2.4	0.116
3.8	0.17
12	0.00134
20	0.00134
41	0.07
123	0.135
180	0.00055

3.1.5 荷擦れ面積評価

荷擦れの発生状況を定量的に評価するために、一定時間毎に段ボール箱同士が接触していた面をスキャナ（Canon 製 imageRUNNER ADVANCE 4525F）を用いて画像データとして取得した。画像取得条件を **Table 5** に示す。

試験開始前の画像データを基準として、ズレ補正を行った一定時間毎の画像データで差分画像を作成し、フィルタ適用と 2 値化処理の後、検査領域を設定して輪郭検出を行い、荷擦れ面積を算出した。なお、画像処理を行った環境は Python3.9.12 で、主に使用したモ

ジュールは NumPy および OpenCV である。
Fig. 8 に試験後の画像に検査領域（白枠）と検
出された輪郭（黒線）を重ねた結果例を示す。

Table 5 Scanning conditions

Resolution	600×600 dpi
Magnification	100 %
Size	A3
Manuscript type	Photograph
Concentration	Initial setting
File format	JPEG color

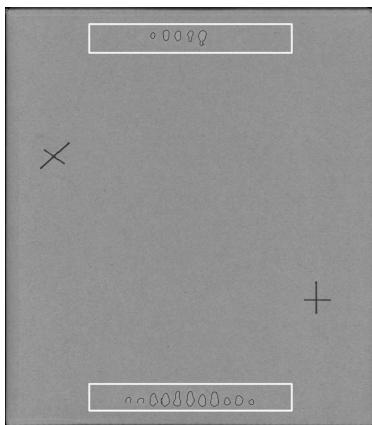


Fig. 8 Outlines of the inspection area and detected abrasion damage

3.2 試験結果

各加振条件について、試験後の供試貨物における荷擦れの有無を確認した結果を **Table 6** に示す。荷擦れが確認された加振条件について、試験後の供試貨物における荷擦れ状況を **Fig. 9** から **Fig. 11** に示すとともに、**Table 6** 内に対応する図番号を示す。

加振条件 C1 においては、**Fig. 9** に示すように、段ボール箱同士が接触していた面の下側に、輸送環境調査において見られたような荷擦れが確認された。文献 ⁷⁾にあるような正弦

波による加振でなくとも、実測程度の左右振動加速度 PSD（低周波のみ）を用いた条件において、長時間加振すれば荷擦れが発生することを確認できた。

加振条件 C2 においては、段ボール箱同士が接触していた面に荷擦れは確認されなかった。一般的にトラック輸送に比べて荷擦れの発生割合が多いとされている鉄道コンテナ輸送において、上下方向の高周波振動が荷擦れの主要因のように明示される場合もあるが、実測程度の上下振動加速度 PSD（高周波のみ）を用いた条件だけでは荷擦れが発生しにくいことを確認できた。

加振条件 C3 においては、加振条件 C2 と同様に荷擦れは確認されず、実測程度の上下振動加速度 PSD を用いた条件だけでは荷擦れが発生しにくいことを確認できた。

加振条件 C4 においては、**Fig. 10** に示すように、段ボール箱同士が接触していた面に荷擦れが確認された。

加振条件 C5 においては、**Fig. 11** に示すように、段ボール箱同士が接触していた面に顕著な筋状の擦れ傷が確認された。なお、加振条件 C5 はガウス分布に近い尖度 3.1 を目標としたランダム加振も実施したが、同様に顕著な荷擦れが確認された。

Table 6 Present or absent of abrasion damage

Vibration condition	Abrasion damage
C1	Present (Fig. 9)
C2	Absent
C3	Absent
C4	Present (Fig. 10)
C5	Present (Fig. 11)



Fig. 9 Abrasion damage caused to test freight (Vibration condition C1)



Fig. 10 Abrasion damage caused to test freight (Vibration condition C4)



Fig. 11 Abrasion damage caused to test freight (Vibration condition C5)

画像処理により求めた荷擦れ面積と加振時間の関係について、供試貨物 2 箱の平均値で整理した結果を Fig.12 に示す。図中の凡例は加振条件を示している。ただし、加振条件 C2 および C3 については、8 時間または 6 時間加振後においても荷擦れ面積がほぼ検出されない結果であったため、本図から除外した。

3.3 考察

Fig. 12 より、左右方向（低周波のみ）と上下方向（高周波のみ）の 2 軸同時加振である加振条件 C5 において、経過時間による荷擦れ面積の増加が顕著であることが定量的に確認でき、本加振条件が荷擦れに大きな影響を与えていることが考えられる。また、加振条件 C1 より加振条件 C4 の方が大きいことが確認でき、上下方向の低周波成分は損傷範囲を広げる作用があることが推測される。

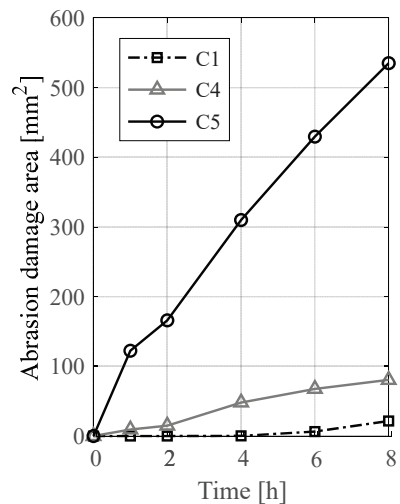


Fig. 12 Relationship between area of abrasion damage determined by image processing and vibration time

4. 鉄道コンテナ輸送における荷擦れ発生メカニズムに関する考察

輸送環境調査および定置加振試験結果を踏まえ、本試験の荷姿における鉄道コンテナ輸送での荷擦れ発生メカニズムは下記①～③が繰り返されるためと考える。

① 曲線や分岐器通過時などに軌道変位の影響を受け、貨車運動特性に起因する左右方向の

低周波振動が発生し、PP バンド等で拘束された貨物にロッキング挙動が発生する。

②ロッキング挙動により、段ボール箱角部付近が他段ボール箱の側表面を摩耗する⁷⁾。

③貨車用まくらばね自体の共振を主とする上下方向の高周波振動によって、段ボール間の等価摩擦係数（みかけの摩擦係数）が減少し、ロッキング挙動が発生しやすくなることで、摺動回数が増加し、荷擦れ量が増大する。

ロッキング挙動による摩耗については、微視的検証が今後必要であるが、金属におけるアブレシブ摩耗に近い摩耗形態である可能性が考えられる。アブレシブ摩耗の特徴を段ボール箱に合わせて記載すると以下の通りである。

- ・硬い材料（段ボール箱では角部）が柔らかい材料（隣接した段ボール箱板部）に食い込む。
- ・材料同士がすべることにより柔らかい材料（段ボール箱板部）が掘り起こされる。
- ・硬い粒子（紙粉≒表ライナ粒子）によりさらに摩耗が促進される。
- ・摩耗量は荷重（PP バンド結束力）とすべり距離に比例する。

等価摩擦係数減少の原因については、力学的要因として、振動加速度による慣性力に起因するもの、振動によって変動する摩擦力の平均化に起因するものが文献⁸⁾に示されており、鉄道コンテナ輸送においても同様の理由により、上下方向の高周波振動が貨物に作用している場合、貨物同士の接触面において等価摩擦係数が減少していると考えられる。

また、摩擦係数に関する荷擦れ対策事例²⁾として、摩擦係数を上げると荷擦れが防止で

き、逆に摩擦係数を下げると荷擦れが微増する結果が示されており、本報で考察した、等価摩擦係数が減少することで貨物同士が滑りやすくなり、ロッキング挙動および摺動回数が増加して、荷擦れ量が増えるという過程は、矛盾していないと考えられる。ただし、摺動回数と摩擦係数、高周波振動の関係については検証が必要と考えている。

本報で示した荷擦れ発生メカニズムを考慮すると、鉄道コンテナ輸送において荷擦れを防止するためには、まず貨物のロッキング挙動を抑制することが重要となる。さらに荷擦れ自体の損傷度を小さくするためには、上下高周波振動を除振することが効果的と考えられる。

5. 結言

本報では、鉄道コンテナ輸送における振動環境を考慮した定置ランダム加振試験により荷擦れ発生メカニズムの解明に取り組んだ。得られた知見は下記の通りである。

- (1) 実鉄道輸送相当の振動加速度 PSD を用いた定置ランダム加振試験により、単軸加振においては、上下加振で荷擦れはほぼ発生せず、左右方向（低周波のみ）加振で荷擦れが発生した。さらに、左右方向（低周波のみ）に上下方向（高周波のみ）を加えた 2 軸同時加振では、顕著な荷擦れが発生した。
- (2) 鉄道コンテナ輸送における荷擦れ発生メカニズムとしては、貨車運動特性に起因する左右方向の低周波振動により貨物がロッキング挙動することで荷擦れが発生し、さらに上下方向の高周波振動により

等価摩擦係数が減少し、ロッキング挙動が発生しやすくなり、摺動回数が増えて荷擦れ量が増大すると考察した。

本報では基礎的な荷姿について検討したが、実輸送における養生を含めた荷姿では異なる挙動が想定される。また、摩耗形態については、段ボール繊維の状態や紙粉の影響など微視的な検証が必要と考える。今後も引き続き、各種荷姿の挙動把握や損傷防止策の提案など、鉄道コンテナ輸送の輸送品質向上に寄与すべく研究を行っていく予定である。

- 7) 松浦一司, 斎藤勝彦, 東山哲, 段積みされた段ボール箱のロッキング運動による擦れ損の定量評価, 日本包装学会誌, **19**(4), p.289 (2010)
- 8) 横山恭男, 振動による摩擦減少効果, 日本機械学会誌, **74**(630), p.9 (1971)

(原稿受付 2024 年 1 月 19 日)

(採録受理 2024 年 5 月 24 日)

6. 謝辞

輸送環境調査にご協力頂いた日本通運株式会社、日本貨物鉄道株式会社の関係者にこの場をお借りして深く感謝する。

<参考文献>

- 1) 中嶋理志, 輸送中に起こる段ボール箱の擦れ事故のメカニズム, 日通総研ニューズレターろじたす, 第 27 回, p.1 (2017)
- 2) 平山憲一, 吉井考平, 大型 PET 飲料カートン鉄道輸送による擦れ防止対策について, 包装技術, **51**(3), p.232 (2013)
- 3) 小杉一斗, 梅原康宏, 津田和城, 細山亮, 鉄道コンテナ輸送における振動環境と貨物挙動の把握に向けた検討, 第 61 回全日本包装技術研究大会予稿集 (2023)
- 4) JIS B 2704-1 (2018), コイルばねー第 1 部: 基本計算方法
- 5) Mathworks, Signal Processing Toolbox リファレンス(R2023b), p.1-1453 (2023)
- 6) 大阪産業技術研究所, 大型貨物用振動試験機, https://orist.jp/ryokin/kiki/kiki_detail/A9275.html (2023 年 12 月 28 日)