

鉄道車両の乗り心地関連研究の動向調査と振動乗り心地向上に向けたバンドギャップ活用に関する基礎検討

【2025年度 KR-117】

名城大学理工学部 交通機械工学科 教授

富岡 隆弘

1. はじめに

最近、海外の研究者を中心に鉄道車両の乗り心地関連研究が増加しているように感じるが、定量的なデータとして示されたものは見当たらない。そこで本調査研究では英文技術論文を対象に、乗り心地評価や振動乗り心地・快適性向上に関連すると考えられる研究論文数の調査を行い、研究動向を明らかにすることを第一の目的とする。

また、筆者は過去にメタマテリアル関連技術の研究動向を調査し、鉄道のダイナミクス・振動問題への応用の可能性についても調べた¹⁾。本調査研究では、メタマテリアルのひとつであるバンドギャップ（構造周期性等に起因して弾性波伝搬が抑制される周波数範囲）を鉄道車両の乗り心地向上に活用するための基礎検討を第二の目的とする。

2. 鉄道車両の乗り心地関連研究の動向調査

(1) 調査の内容と方法

本調査研究では、Elsevier社の書誌・引用文献データベース Scopus を利用して乗り心地関連の英文技術論文の出版件数の年ごとの推移を調べることにする。

今回は、鉄道のダイナミクス関連の英文技術論文のうち「乗り心地」を対象としていると考えられるものを抽出することとした。また、鉄道のダイナミクスに関連する他のテーマとの動向比較も行った。具体的には「検索項目」に、「rail」「railway」「railroad」のいずれかが含まれ、かつ、「vibration」「dynamics」のいずれかが含まれる論文を抽出した。つぎに、それらの論文に対して「追加検索語」を設定し、検索項目に「ride」「riding」のいずれかと「comfort」「quality」のいずれかが含まれるものを「乗り心地

関連研究」として年ごとの件数の推移を調べた。ここで「検索項目」は「論文タイトル・抄録・キーワード」とし、検索対象論文は1955年から2025年の間に学術誌（Journal）に掲載された研究論文（Article）・総説（Review）として「フィルタ」で指定して絞り込みを行った。

(2) 調査結果の概要

図1に上記検索条件でヒットした論文数の推移を示す。検索は1955年～2025年の範囲で行っているが、ここでは1985年以降の推移を図示した。この図より、乗り心地関連の英文論文数が2010年以降大幅に増加していることが確認できる。

つぎに、この傾向が乗り心地関連テーマに特有なものかを見るため、鉄道のダイナミクス研究における他のテーマについても同様の調査を行った。ここで対象としたのは「弾性振動」「騒音・音響」「安全」「メンテナンス」「状態監視」の5つのテーマで、図1のデータ検索時の「追加検索語」の部分を変更して検索を行った。さらに鉄道のダイナミクス研究全体の英文論文数（追加検索語なし）についても調査した。表1に各テーマごとの検索結果と検索式を、各テーマの論文数の年ごとの推移を図2に示す。最近

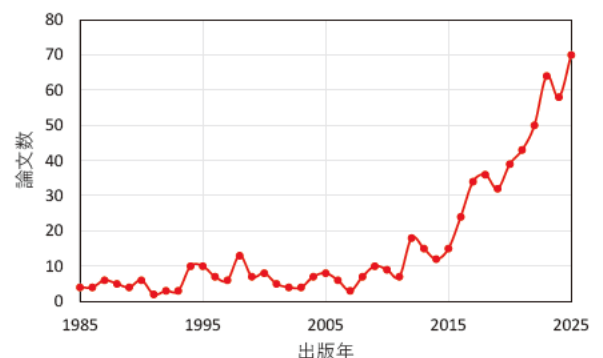


図1 ダイナミクス関連英文論文のうち乗り心地関連論文数の推移

表1 鉄道のダイナミクス関連英文論文のテーマ別の論文数と検索式
(検索対象期間：1955年～2025年)

共通検索語	テーマ (追加検索語)	ヒット数	検索式	フィルタ条件とその検索式(共通)
振動・ ダイナミクス	なし	14,655	(TITLE-ABS-KEY (rail OR railway OR railroad) AND TITLE-ABS-KEY (vibration OR dynamics))	出版年：1955-2025, 出版物タイプ：Journal, 文献タイプ：Article, Review, 出版段階：Final, 本文言語：English, AND PUBYEAR > 1954 AND PUBYEAR < 2026 AND (LIMIT-TO (SRCTYPE, "j")) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE, "ar") OR LIMIT-TO (DOCTYPE, "re")) AND (LIMIT-TO (PUBSTAGE, "final")) AND (LIMIT-TO (LANGUAGE, "English"))
	乗り心地	686	(TITLE-ABS-KEY(rail OR railway OR railroad) AND TITLE-ABS-KEY(vibration OR dynamics) AND TITLE-ABS-KEY(ride OR riding) AND TITLE-ABS-KEY(comfort OR quality))	
	弾性振動	1,481	(TITLE-ABS-KEY(rail OR railway OR railroad) AND TITLE-ABS-KEY(vibration OR dynamics) AND TITLE-ABS-KEY(elastic OR flexural OR bending))	
	騒音・音響	1,832	(TITLE-ABS-KEY(rail OR railway OR railroad) AND TITLE-ABS-KEY(vibration OR dynamics) AND TITLE-ABS-KEY(noise OR sound))	
	安全	2,495	(TITLE-ABS-KEY (rail OR railway OR railroad) AND TITLE-ABS-KEY (vibration OR dynamics) AND TITLE-ABS-KEY (safe OR safety))	
	メンテナンス	1,026	(TITLE-ABS-KEY (rail OR railway OR railroad) AND TITLE-ABS-KEY (vibration OR dynamics) AND TITLE-ABS-KEY (maintenance))	
	状態監視	3,733	(TITLE-ABS-KEY (rail OR railway OR railroad) AND TITLE-ABS-KEY (vibration OR dynamics) AND TITLE-ABS-KEY (condition OR monitoring))	

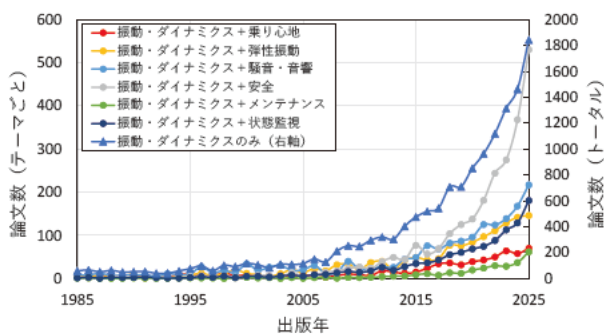


図2 ダイナミクス関連英文論文の
テーマ別論文数の推移

の急速な論文数増加は乗り心地関連テーマに限ったものではなく、「安全」や「状態監視」などの伸びが顕著なことが分かる。以上より鉄道のダイナミクスに関する研究は総じて近年大幅な増加傾向にあることが分かった。

3. 振動乗り心地向上に向けたバンドギャップ活用の基礎検討

(1) 周期構造におけるバンドギャップと構造支持部材への適用

上述のように鉄道のダイナミクス関連研究は最近活発であり、その多くが中国からの論文投稿であるが、日本発の英文論文発表割合は低下傾向であることは、筆者の以前の調査でも示されている²⁾。この状況を打開するには新たな視点の取り組みも必要と考えられるが、これに関連して筆者らの研究室では、

構造の周期性を用い、特定波長の振動波動伝搬を抑制する「バンドギャップ」と呼ばれる現象を活用する検討を行っている。

バンドギャップは構造等を工夫して天然の物質では困難な機能を実現するというメタマテリアルの一つとして扱われることも多く、メタマテリアル研究が盛んな中国や米国からの論文数が圧倒的な状況であることを以前の調査研究¹⁾で確認しているが、鉄道システムのような具体的な対象を想定した研究はまだ少ない。また、鉄道車両や鉄道システムは周期構造を階層的に持つことが特徴のひとつであると言え、バンドギャップを活用した振動抑制や乗り心地向上策の適用対象として好適であると筆者は考えている。そこで、ここでは新幹線車両の床構造への適用を想定し、構造体の支持部材にバンドギャップ特性を持たせることで振動伝搬抑制をはかる基礎的検討を行った結果について紹介する。

これまで筆者らは周期はりや周期平板の曲げ振動に関するバンドギャップ形成に取り組んできた³⁾⁴⁾が、最近では構造体の支持部材への適用を想定し、周期積層材の縦振動におけるバンドギャップ形成についても検討している。以下では、構造体支持部材にバンドギャップを持つ周期はりや周期積層材を適用する検討事例について述べる。

(2) 周期はりの曲げ振動に関するバンドギャップの構造支持部材への適用

周期はりを支持部材とした床板支持構造のイメージを図3(a)(b)に示す。その基礎検討として、被支持

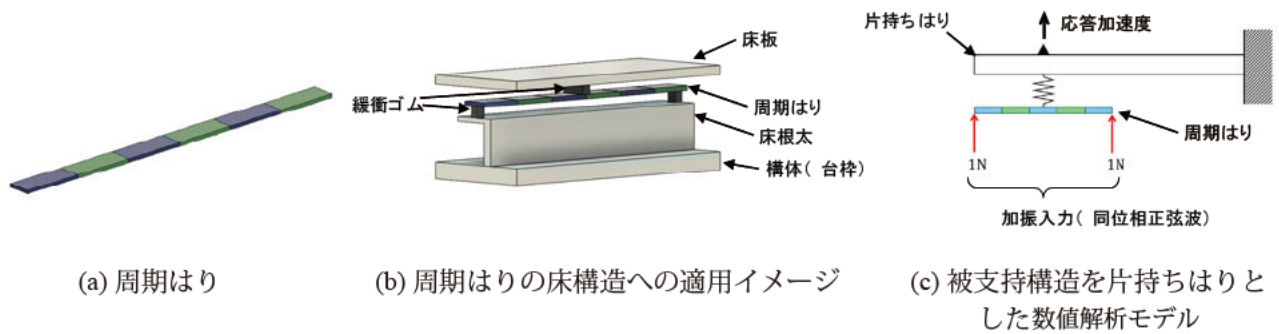


図3 周期構造はりとそれを用いた構造物の支持構造のイメージおよび今回の数値解析モデル

構造体（床板）を片持ちはりとして図3(c)のようにモデル化し、周期はり両端に同位相の正弦波加振力を与え、周期はり中央でばねを介して片持ちを支持するときの、片持ちの応答加速度を調べた。解析には汎用有限要素（FEM）ソフトウェア ANSYS を用いた。周期はりは a 相に対する b 相の質量比が 0.0844、剛性比が 0.0803 とし、単位セルの寸法は a 相、b 相とも長さ 120mm、幅 20mm、高さ 3mm で、単位セルが 6.5 周期繰り返されたもの ($N=6.5$ と表示) で、周期はり単体としてバンドギャップ特性を持つことを数値的に確認済の構造である。被支持構造体である片持ちはりは長さ 1000mm、断面積 400mm^2 、曲げ剛性 5000Nm^2 とし、1 次の曲げ固有振動数が約 450Hz（周期はりのバンドギャップ範囲）となるように密度を設定した。また周期はりとは片持ちはりの間に 1000N/m のばね要素を挿入した。

図4に、片持ちはりを $N=6.5$ の周期はりで支持した場合の加振力に対する評価点（片持ちはりのばね支持点で、先端から 300mm の位置とした）における加速度の周波数応答関数（FRF）を示す。比較のため、a 相および b 相のみから成る単一構造はりで支持した場合の FRF も併せて示した。この図から、

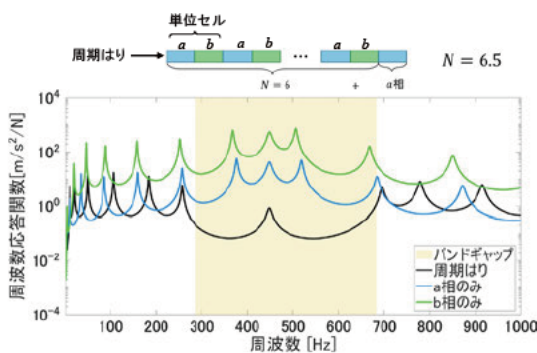


図4 支持はり両端に同位相の調和単位加振力を受け、支持はり中央で支持された単純支持はりの周波数応答関数

周期はりを介して支持した片持ちはりの応答はバンドギャップ周波数帯において単一構造はりを介して支持した場合に比べて明らかに小さいことが確認できる。

(3) 周期積層材の縦振動に関するバンドギャップの構造支持部材への適用

周期積層材を支持部材とした床板支持構造のイメージを図5(a)(b)に示す。また、被支持構造体（床板）を単純支持はりとして図5(c)のようにモデル化し、支持部材の底部に正弦波加振力を受けた場合の片持ちはりの応答加速度を調べた。解析は ANSYS を用い、支持部材はゴムと鉄の積層材で、各相は縦横各 100mm、厚さ 20mm とし、それが 6 層積層されたもの（ゴムと鉄からなる単位セルを 3 周期積層）とした。被支持構造体である片持ちはりは、長さ 1000mm、断面積 400mm^2 、曲げ剛性 5000Nm^2 とし、材料は鉄とした。また支持部材と片持ちはりの間に 1000N/m のばね要素を挿入した。

図6に、加振力に対する片持ちはりの評価点（片持ちはりのばね支持点で、先端から 300mm の位置）における応答を示す。ここでは、支持部材底面に単位加振力を与えた場合の加振点の加速度に対する評価点の加速度の比を dB 表示した振動レベル差（Vibration Level Difference: VLD）として表示しており、VLD が 0 より小さい場合は振動抑制効果があることを表す。比較のため支持部材を周期積層材のほかゴムおよび鉄のみとした場合の VLD も併せて示した。この図から周期積層材を介して支持すると、片持ちはりの応答はバンドギャップ周波数帯において顕著に低下することが分かる。

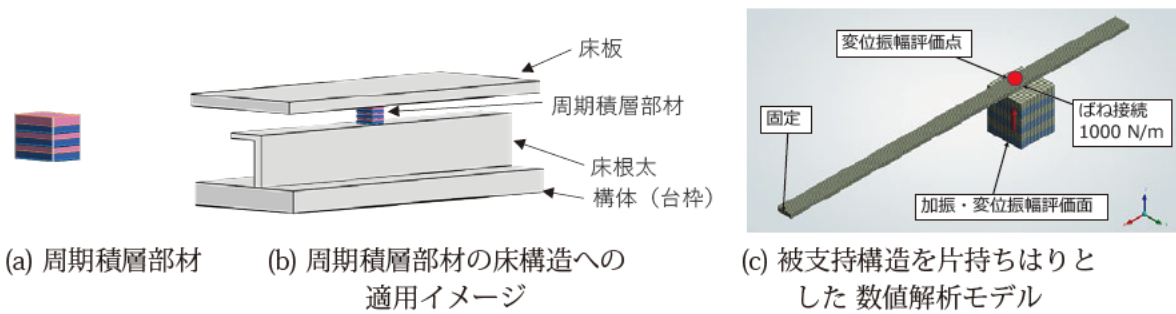


図5 周期積層部材とそれを用いた構造物の支持構造のイメージおよび今回の数値解析モデル

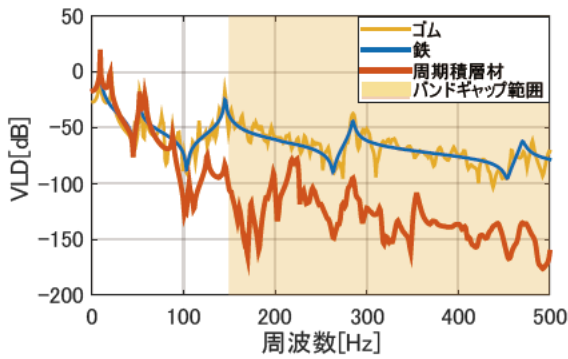


図6 支持部材底面に単位加振力を受けた単純支持はりのばね支持点における応答加速度の振動レベル差 (VLD)

4. おわりに

本調査研究では、乗り心地評価や振動乗り心地・快適性向上に関連する英文技術論文数の動向調査を行うとともに、バンドギャップを鉄道車両の車内快適性向上に活用することを目指した基礎検討結果について紹介した。前者については、近年乗り心地関連の英文論文数が大幅に増加していること、この傾向は乗り心地関連テーマに限定されるものではなく、他のテーマも含め、鉄道のダイナミクス関連研究全般についても同様であることが分かった。後者については、新幹線車両の床構造を想定した基礎検討として、片持ちはりをバンドギャップ特性を持つ周期構造部材で支持した場合の振動応答特性を検討し、バンドギャップ特性を有する周期構造部材を支持部材とすることの有望性が示された。今後は、バンドギャップ構造による振動抑制効果を実験的に検証するとともに、より実際的な支持構造の検討を進める予定である。□

謝辞

本稿のバンドギャップによる振動伝搬抑制効果検討結果は、秋田県立大学大学院機械工学専攻 猪狩温寛君の修士論文研究、名城大学交通機械工学科 野尻航輝君、松田優貴君の卒業研究の成果の一部であり、ここに記して謝意を表します。

参考文献・引用文献

- 1) 富岡隆弘：メタマテリアル関連技術の研究動向と鉄道への応用に関する調査，研友社調査研究報告書，KR-079，2021
- 2) 富岡隆弘：鉄道関連技術英語論文の国別掲載数の推移に関する調査研究，研友社調査研究報告書，KR-055，2019
- 3) 本田他：金属から成る周期的複合はりの構成とバンドギャップ特性の関係に関する検討，日本機械学会論文集 90-936 doi.org/10.1299/transjsme.24-00023，2024
- 4) 今野他：鉄道車両の固体伝搬音抑制を目指した周期的複合平板のバンドギャップ形成に関する基礎的検討，日本機械学会第33回交通物流部門大会予稿集，TL2-4-1，2024