

タイトル	鉄道貨物ヤードにおけるアスファルト舗装の維持管理指標に関する研究
著者	上浦，正樹； Kamiura, Masaki
引用	工学研究：北海学園大学大学院工学研究科紀要(17): 3-13
発行日	2017-09-30

鉄道貨物ヤードにおける アスファルト舗装の維持管理指標に関する研究

上 浦 正 樹*

Development of Management Maintenance Index for Asphalt Pavement
in Railway Container Yards

Masaki Kamiura*

要 旨

貨物駅のコンテナホームの維持管理では維持費と改良費とのトータルコストを抑えるために効率よく投資が行われていた。しかし近年、コンテナの取り扱いにおいて荷傷みがに対する荷主などの要求に加えて、フォークリフト運転者の労働力不足と高齢化により運転者が受ける路面の凹凸による運転疲労に対する対策が必要となった。そこで本研究の目的は、コンテナユーザーの要求とフォークリフトの運転者の疲労の視点から面的に利用されるコンテナホームの舗装管理の手法を検討するにある。研究の最初に、鉄道コンテナ用フォークリフトに対し積み卸しをする軌跡を数値化し、これをポータブル路面プロファイル測定装置(DAM)により測定されたプロファイル(路面の凹凸)に合わせてフォークリフトの積み卸しをする軌跡に対するプロファイルを求めた。次にフォークリフトの上下振動をタイヤによるバネ効果とダンパー効果を考慮した解析モデルを構築し、このモデルにフォークリフトの軌跡に対応するプロファイルを入力することで車軸の変位と上下加速度を推定した。以上から、車軸の上下最大加速度が運転席の上下最大加速度に直接関係していることからフォークリフトの運転者における疲労の検討に車軸の上下最大加速度が利用できることと、さらに車軸とコンテナの中の荷物のそれぞれの上下最大加速度の関係を求め、車軸の最大加速度より荷物の上下加速度の一定程度の予測が可能なことの結論が得られた。

Key Words : container yard, forklift, profile, acceleration, wheel, axle, spring constant, damping constant

1. はじめに

鉄道貨物の駅構内ではコンテナ列車が到着すると、一連の荷役作業としてフォークリフトによってコンテナは鉄道車両からトラックへ積み替えられる。また、さらに列車の乗り継いで他の列車に移動する必要があるコンテナは、フォークリフトにより移動して当該の列車に積み込まれることになる。この際駅構内ではフォークリフトの速度はトラックと同様に 15 km/h に制限されている。このような作業が行なわれるコンテナホームは、1 ホーム平均で 400 m×20 m である。北海道の代表的な貨物駅である札幌貨物ターミナルのコン

テナホーム数は 8 ホームであり、全国では 100 駅以上のコンテナ取扱貨物駅が平均 4 ホーム程度で分散配置している。これらのコンテナホームはほぼアスファルト舗装であり、一見すると、一般の道路舗装に似ている。しかし、舗装構造は道路舗装とは異なる鉄道貨物コンテナホーム特有の特徴を有する。それは、フォークリフトの輪荷重がトラックの最大輪荷重の 2～3 倍に達する点や道路のように 1 方向交通ではなく巡回運動を伴う荷役作業のため面的交通である点、また移動速度が最大 15 km/h の低速度である点などである。

この舗装面を管理する手法として JR 貨物では平坦性とひび割れ率から換算する KMI (Kamotsu

* 北海学園大学大学院工学研究科建設工学専攻(社会環境系)教授・博士(工学)
Graduate School of Engineering (Civil and Environmental Eng.), Hokkai-Gakuen University

Maintenance Index）を用いていた。これは重荷重で面的な交通を考慮したもので、一般的に道路で使用されている舗装の維持管理指標（MCI）では、ひび割れ率と平坦性に加えわたち掘れとからなる点が異なっている。だが、これらの指標は舗装体の各層で使用されている材料の耐久性を考慮して定められたものであることが共通している。

一方、JR貨物が発足して30年になるが、近年コンテナの取り扱いに対する荷主や消費者（コンテナユーザーとする）の要求に加えフォークリフト運転者の路面の凹凸による運転疲労の対策が必要となってきている。それはコンテナ内の荷物のパッケージ方法に技術革新が進み、荷傷みが緩和されているものの、フォークリフトの荷役作業などで発生する損傷に対して社会の要求が厳しくなってきたこととフォークリフトの運転者における労働力不足と高齢化により運転時の疲労が問題視されてきたことによる。

そこで本研究の目的は、コンテナユーザーの要求とフォークリフトの運転者の疲労の視点から鉄道貨物のコンテナホームの特徴を生かした舗装管理の手法を検討することとした。

2. 現行のアスファルト舗装の維持管理指標

国鉄の貨物輸送では様々なタイプの貨車を所有し、各駅で大規模な仕分け用の線路を数多く擁して行き先方面別に個々の貨車を編成していた。また、貨車から荷物の積み卸しに対する機械化が進んでいなかった。このような輸送方式は非効率であるとして、1970年ごろから単一タイプであるコンテナ貨車を用い、コンテナの積み卸しには大型フォークリフトによる貨物輸送方式の導入が始まった。国鉄民営化後にJR貨物ではさらにコンテナ輸送方式を主流とする大幅な輸送システムの変更を行った。そのため貨物駅では大規模な仕分け用線路に代わって、コンテナホームが主要な設備となった。このシステム変更に伴い、短期間に建設する必要があるなどで、コンテナホームでは主にアスファルト舗装が採用されて現在に至っている。

国鉄がコンテナ輸送を導入するにあたり、コンテナホームにおける舗装の設計は道路舗装を参考にした。しかし、コンテナ輸送が試行されるとコンテナホームの特殊な条件に適した舗装断面の設計とはなっていないために舗装の補修に多大な費

用が掛かるなどが予想された。そこで、国鉄は1970年に貨物設備アスファルト舗装設計マニュアル（旧マニュアル）を策定した¹⁾。当時は12フィート用コンテナを扱うフォークリフトと20フィート用コンテナを扱うフォークリフトの2種類が使用されていた。そこで交通量算定に当たっては12フィート用コンテナの最大輪荷重（約100 kN）を基本に20フィート用コンテナを扱うフォークリフトの最大輪荷重（約200 kN）の比の4乗が舗装の破壊量に比例するもの（4乗則）とした。また、舗装厚の構造設計では当時のアスファルト舗装要綱²⁾に準じて等値換算係数によるTA法を採用していた。

JR貨物に移行後、30フィート用コンテナや40フィート用コンテナが投入された。よって最大輪荷重約400 kNになるフォークリフトでこれらコンテナを荷役することとなった。その結果、国鉄で定めた舗装設計マニュアルにある4乗則を舗装断面厚の設計に用いると非経済に大きな舗装厚となった。そこで新たに多層弾性理論に基づく理論設計法を用いて実情に即した舗装厚が設計できるような研究が進められた³⁾。さらに舗装の設計だけでなく、その補修に関する項目を付加しコンテナホーム舗装の設計から補修までの一貫したマニュアルが求められた。以上からこれらを網羅したアスファルト舗装設計補修の手引き（新マニュアル）が1993年に策定された⁴⁾。

さらに、貨物駅に旧マニュアルで敷設したアスファルト舗装の一斉調査がなされ、破損の状況が確認された。これに基づき、統計的に処理されて考案された評価方法がKMI（Kamotu Maintenance index）である。これを式(1)に示す。

$$KMI = 2.939 - 0.051C - 0.071\sigma \quad (1)$$

ここに、C：ひび割れ率（％）

σ ：平坦性（mm）

一方、アスファルトの道路の維持管理指標ではMCI（Maintenance Control Index）を使用するのが一般的であった⁵⁾。ここでの評価に使用する項目は、ひびわれ率、わたち掘れ量、平坦性（縦断凹凸量）であった。MCIの評価式には、これらの項目を複数もしくは単独で使用する4つの式があり、特定の項目が顕著な場合にも対応できるようになっていた。なお、一般的な評価区間は20 m、100 m単位である。以下にMCIの評価式を示す。

$$\left. \begin{aligned} MCI &= 10 - 1.48C^{0.3} - 0.29D^{0.7} - 0.47\sigma^{0.2} \\ MCI_0 &= 10 - 1.51C^{0.3} - 0.3D^{0.7} \\ MCI_1 &= 10 - 2.23C^{0.3} \\ MCI_2 &= 10 - 0.54D^{0.7} \end{aligned} \right\} (2)$$

ここに、 C ：ひびわれ率（％）

D ：わだち掘れ量（mm）

σ ：平坦性（mm）

以上の式のより計算された4つのMCI値のうち最も小さいものをその区間の代表MCI値とし、供用性の評価を行う。算出されたMCI値より下記の評価基準によりその路線の供用性を評価する。

このような管理手法は、維持管理コストと部分的なリニューアルを含む建設コストを合算したトータルコストの適正化を目的とした設備保守サイドに必要な手法⁶⁾である。

3. 利用側の維持管理指標による既往の研究

3.1 クォータカーモデル

路面プロファイルとは、進行方向における路面の基準点に対する相対的な高さのことで路面の凹凸を示す。ここを走行する一般の自動車では車体を支え路面の凹凸を緩和する役目を果たすものには、並列に配置された「バネとダンパー」からなるサスペンションと「バネ」の役目をするゴムタイヤがある。これによりサスペンション上の車体はおよそ1 Hzで共振すると言われている⁷⁾。一方、舗装利用側の維持管理指標では自動車の車種の違いの影響を切り離す必要がある。そこで米国において自動車の1輪分に相当するクォータカーモデル（図1）が考案された。車体の振動には長波長から短い波長や衝撃波に至るまで多くの種類があるが、このクォータカーモデルにより車両に生じる振動のおよそ75%を説明することができるとされている⁸⁾。

3.2 ラフネスと道路利用者による舗装の管理

舗装利用側が好ましくない車両の振動を引き起こす路面の状態を示す指標をラフネスと称している。この指標は、自動車が移動するときのサス

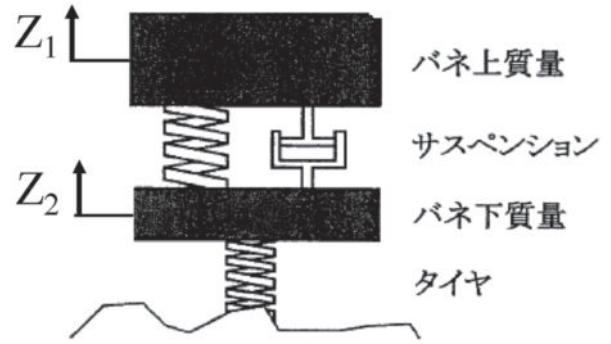


図1 クォータカーモデル

$$IRI = \left(\int_0^L \left| \dot{Z}_1 - \dot{Z}_2 \right| dt \right) / L \quad (3)$$

ンションの動きを「cm」単位で測定して累積し、これを移動した距離によって標準化したものがある。この単位はm/kmである。また、周波数分析におけるこの指標の算出結果と車体加速度の測定結果は非常に似ている⁹⁾ことから、ラフネスが舗装利用側の維持管理指標に活用可能であることが明らかになった。

そこで、対象区間で測定されたプロファイルをクォータカーモデルの計算システムに入力することで自動車の車種の違いの影響を切り離してラフネスを求めることができる。この方法を実現したものに世界銀行が開発した国際ラフネス指数（IRI）がある。その方式は、図1に示されるようにバネ上質量（位置を Z_1 とする）とバネ下質量（位置を Z_2 とする）に速度計を取り付け、その結果を積分してある距離（ L ）で割ることで式(3)から求めるものである¹⁰⁾。

実際のIRIの推定では、これらの測定装置の影響が大きいことが考えられる。そこで國分ら¹¹⁾は（独）土木研究所内の1周が約870mであるループ状の舗装走行実験場で路面凹凸の測定試験を行った。その結果、レーザー式プロファイラーは路面の凹凸を直接測定する水準測量とよく一致していた。また、IRIは舗装のプロファイルが急激に変化する箇所で大きくなり、振動加速度もこの急激な変化箇所で大きくなっていることで、車両の振動加速度で路面の凹凸を評価することの可能性を示した。さらに、制振装置が下側の振動を上側に伝えないように設計されることに加え、制振装置下側の振動加速度が路面凹凸に対して感度が良いことを考えるならば、IRIを求めるクォー

タカーモデルがばね上の振動を考慮しているといっても、ばね下側のみの振動加速度の計測で十分であるといえる。これにより、ばね下側の振動加速度の平均値（ A_{rms} ）を提案している。

$$A_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T A^2(t) dt} \quad (4)$$

ここで T：平均時間

A(t)：加速度の瞬間値

3.3 コンテナホームに対する利用者側の舗装管理

フォークリフトの構造は搭載されたコンテナが重さで前方に転倒しないように前輪が支点となつて後輪上のウェイトで支えるヤジロベイ形式となっている。そのため、フォークリフトの前軸構造はリジッドタイプである。よつて前軸は自動車のようなサスペンションのバネ係数とダンパーの減衰係数が設定できない。これを考慮して 12 フィート用コンテナを扱うフォークリフトに対してクォータカーモデルを採用して検討した研究がある¹²⁾。この研究では、フォークリフトの後軸に加速度計と変位計を設置し、後軸を落下させたときのバネ係数と減衰係数を求めている。よつて道路の路面性状評価のための汎用ソフト IRI を応用して図1のタイヤに相当するバネ係数を剛体と仮定した。このようなフォークリフトモデル型の解析モデルを FRI (Freight Roughness Index) としている。FRI は開発されたプログラムまた、荷物の上下方向の加速度の平均値で約 3.5 m/s^2 であり、最大 8.5 m/s^2 が示されていた。

さらに、コンテナを搭載した 12f フォークリフトが線路と平行に 200～400 m 間を走行した際の荷物の上下変位はフォークリフトの車軸の上下変位の 2 倍程度であることが示されている。また、ISO 2631 に定義される上下加速度 25 分以下の基準限界加速度は 2.83 m/s^2 として評価ランクを定めている¹³⁾。一方、FRI は演算の方法からコンテナホーム（延長 400 m 程度）の長手方向のプロファイルに適しており、データ数が不十分な直角方向のプロファイルには適していない。



図2 フォークリフトの方向転換



図3 フォークリフトとトラックの関係

4. フォークリフト軌跡上のプロファイルの評価

4.1 フォークリフトの軌跡の推定

鉄道貨物駅に到着したコンテナ貨車はコンテナホームに接する荷役線に横づけされる。フォークリフトはこのコンテナを取卸して搭載し、図2に示すように方向を転回させてトラックに積み込む。これとは逆にフォークリフトでトラックから取り卸して（図3）コンテナ貨車に積み込むケースもある。これらの一連に荷役作業を「コンテナのハンドリング」とする。一般の自動車交通では交通は道路の中心に沿った1方向であり、コンテナのハンドリングに見られるような面的に舗装を使用することはない。すなわち道路舗装では凹凸に関係するプロファイルは1方向の測定が行われている。一方、コンテナのハンドリングでは方向転換が必要のため、その軌跡は複雑である。そこで、コンテナのハンドリングでのフォークリフトの軌跡を調査した結果が報告されている¹⁴⁾。

その方法は、貨物ヤード内に 2 m 間隔の白線を引き、2 m 間隔メッシュとした。このスペースに 12 ft フォークリフトによるコンテナを貨車から

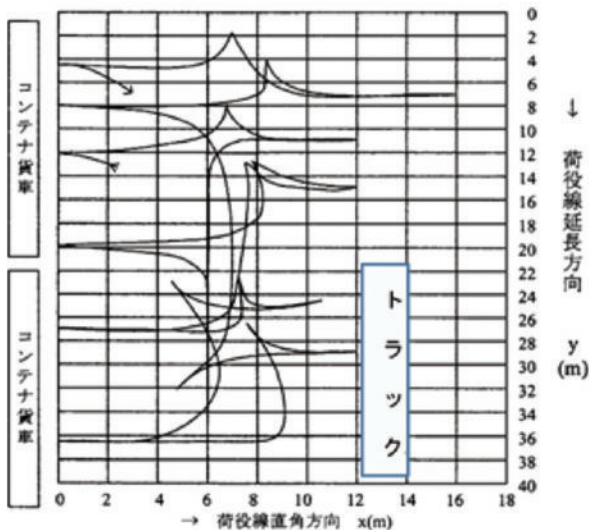


図4 フォークリフトの軌跡（一部加工）

取り出し、旋回してトラックまで積み込むまでの荷役作業をビデオで撮影し、コンテナのハンドリングによるフォークリフトの軌跡を求めた。

次に2両で5個のコンテナをハンドリングするときにメッシュ内を通過するフォークリフトの車輪数を求めた。これから荷役線直角方向で分布を取った結果を図4に示す。このようにコンテナ貨車からコンテナを取り出すときの車輪の角度は貨車側面と直角になるが、トラックに搭載するときにはフォークリフトは180°方向転換する必要がある。

以上を考慮して1メッシュ内の通過台数を求めた結果、荷役線直角方向で6m～8mのメッシュでは方向転換のため約4.6倍の輪数となることが明らかになった（図5）。

本研究では、コンテナのハンドリングにおけるフォークリフトの平均的な軌跡（平均値）から荷役線延長方向（y）で最大4.3mで5次曲線の式としてこの軌跡を定めた。

$$y = 0.0051x^5 - 0.0617x^4 + 0.261x^3 - 0.430x^2 + 0.2722x \quad (5)$$

ただし $0 \leq x \leq 6.5 \text{ m}$

以上からフォークリフトの軌跡の平均値と推定値の比較を図6に示す。この結果より相関は十分認められることから(5)の推定式を採用することとした。

次に、荷役線直角方向xの最大値を12mとして $x = 6.5 \text{ m}$ を境として対称にフォークリフトの

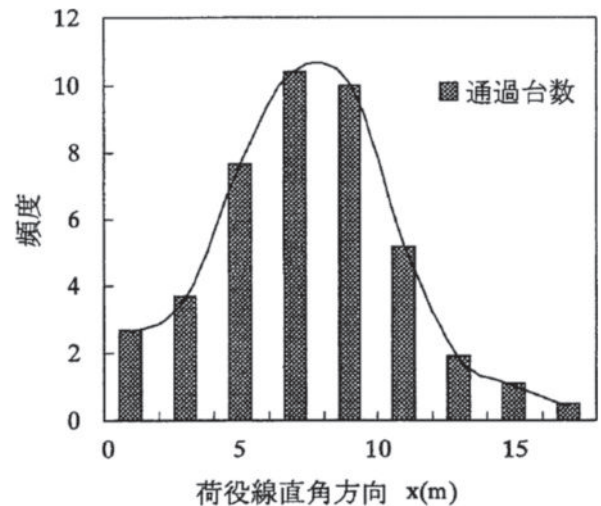


図5 メッシュ内の通過分布

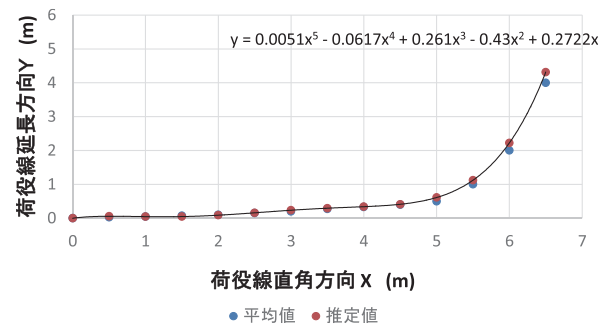


図6 軌跡の平均値と推定値の比較

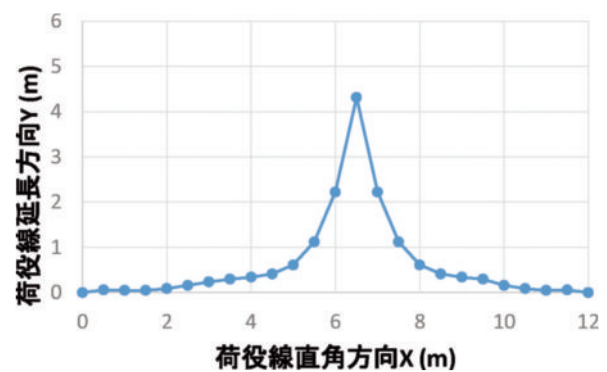


図7 フォークリフトの軌跡推定図

軌跡を求めた（図7）。これによりフォークリフトの軌跡の数値解析が可能となった。

4.2 コンテナホームにおけるアスファルト舗装のプロファイル

コンテナホームの舗装のプロファイルは、路面性状測定車またはポータブル路面プロファイル測定装置（DAM）により測定される。本研究ではこのうちの簡易に測定できるDAMを使用した。

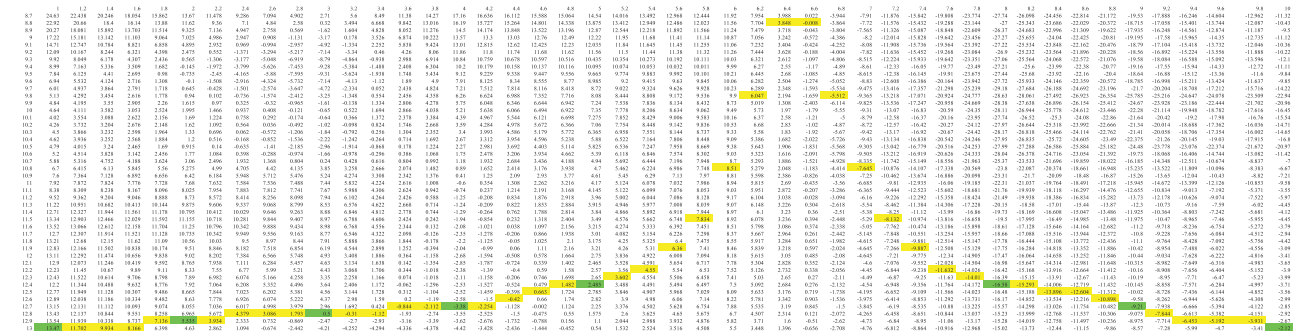


図8 面的プロファイル（例：宮城野貨物駅）

DAMは本体部の両端に固定輪を持ち、一方を基準側とし他方を未知側とする。基準側と未知側の水平距離を求めておき、本体本装置に内蔵した傾斜計（1軸ジャイロ）により、この固定輪間の傾斜を計測することで基準側と未知側の高低差を求める。よって測定開始時の基準側の高さを与えることで、移動しながら路面の形状を推定することができ。この際、データサンプリングは1cm毎に行っており、最小1cm単位の路面形状計測が可能となっている。

荷役線に隣接してコンテナホームが設置されている。JR貨物では5年おきに線路から垂直距離で7mを確保して、線路と平行にコンテナホームのアスファルト舗装のプロファイル調査を行っている。

本研究ではJR貨物の宮城野貨物駅のコンテナホームにおいて、線路から直角に1m, 3m, 4m, 6m, 8m, 10mの距離を確保した測定データ群の提供をうけ、これから面的なプロファイルの推定した。面的なプロファイルの推定方法を以下に示す。最初にコンテナホームに対し0.2m間でx軸（線路に直角方向）と0.1m間隔でy軸（線路に平行方向）にメッシュを作成す。次に、既知分のデータから比例配分により面的なプロファイルを作成する上で不足するデータを補完することとした。例えば、メッシュの交差位置 (x_i, y_i) での高低差 (z_i) を求める場合、メッシュの交差位置が $(1.1, 1.2)$ での高低差 z_i を求めるケースを提示する。測定データ群の中から、横（線路に直角）方向xで2m間隔である「線路から1mの測定結果で $y=1.2$ mでの高さ $z_{1,1,2}$ 」と「線路から3mの測定結果で $y=1.2$ mでの高さ $z_{3,1,1,2}$ 」を用いる。以上から、求めたいメッシュのx方向の位置は「線路から1m」から0.1mであることから、直線の比例配分により近似的にメッシュの交差位

置が $(1.1, 1.2)$ での高低差 z_i を求めるものである。

この結果の例を図8に示す。さらに、このデータを3D化した結果を図9に示す。この図は高さ方向で $-80\text{mm} \sim 80\text{mm}$ まで高低差を示している。既知のデータに対し補完したデータでは折れ角が生じているようにひずみが想定されるが、面的プロファイルの概要を確認できると考えられる。

4.3 フォークリフトの軌跡上のプロファイルの推定

コンテナのハンドリングにおけるフォークリフトの平均的な軌跡を推定した結果（図7）を用いて図8における線路に平行な方向y軸として $y=13\text{m}$ を起点にして貨車からコンテナをフォークリフトで取り卸し、線路に直角な方向x軸として $x=12\text{m}$ までトラックまで積み込むまでの軌跡上にあるコンテナホームにプロファイル（図8）および3D化した図（図9）を重ねることとした。ここでフォークリフトの軌跡は凹凸のある舗装表面をフォークリフトが移動する状態を示している。

次に、フォークリフトの移動する軌跡を軸として、その軌跡上の色付けしたメッシュ内の舗装表面のプロファイルの値を収集し、フォークリフト軌跡プロファイル曲線とする。その結果を図10に示す。これは面的に移動するフォークリフトの軌跡上のプロファイルと見なすことができる。

最初にフォークリフト軌跡プロファイル曲線上を走行することによって生ずるフォークリフトの上下振動を推定することとする。

次に、フォークリフト軌跡上のプロファイル曲線の卓越周波数をFFT解析により推定した。そ

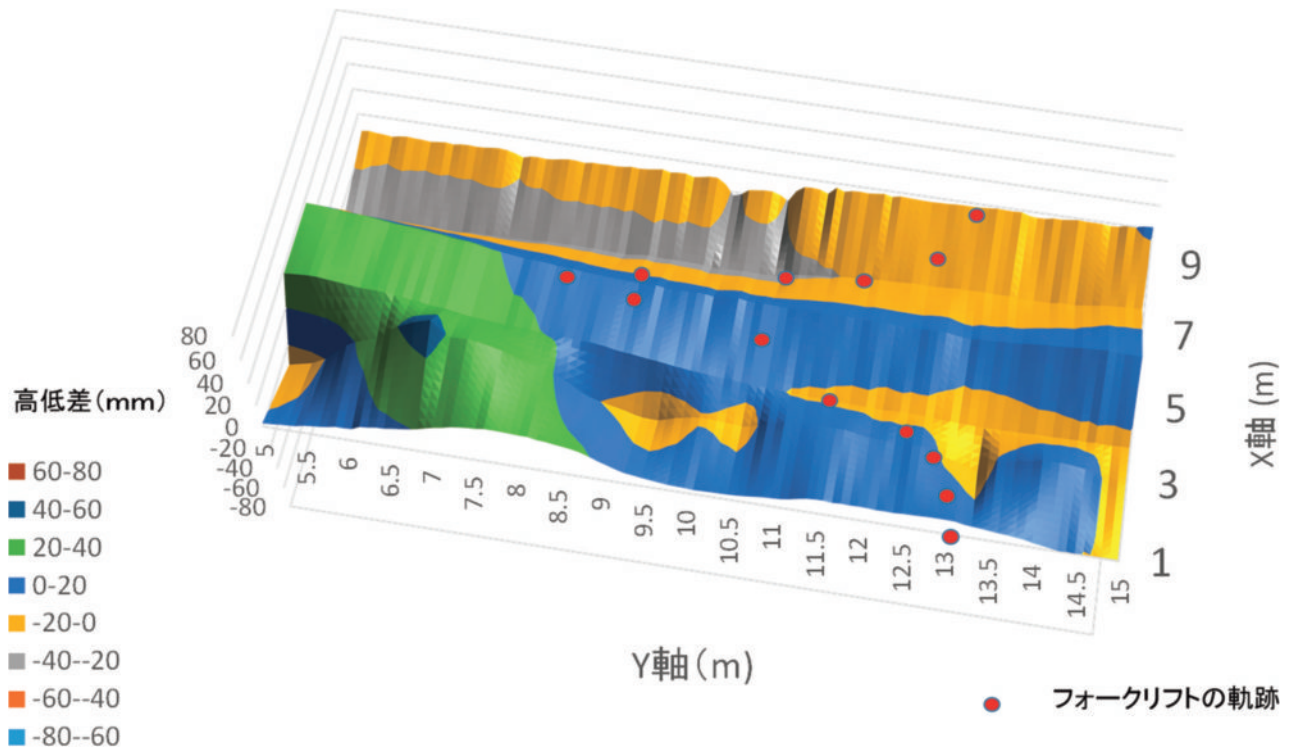


図9 3D化した面的プロファイル

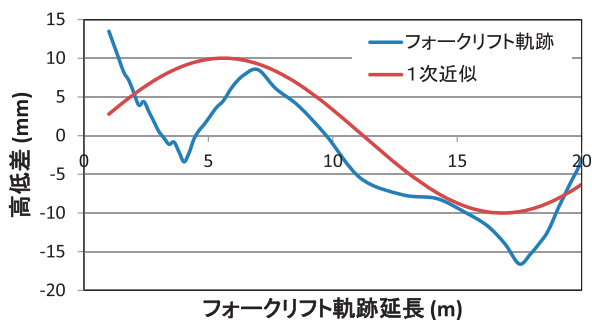


図10 フォークリフト軌跡上のプロファイル

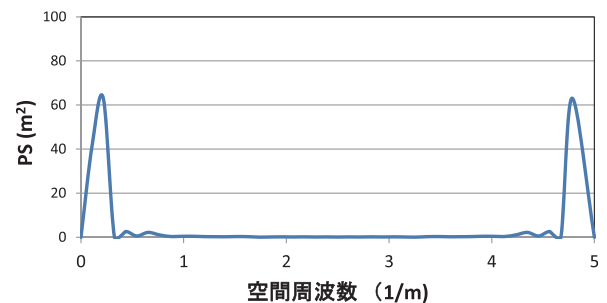


図11 フォークリフト軌跡プロファイル曲線のFFT解析

の結果を図11に示す。この結果から、この曲線の1次の近似式を求めることとした。その手順は以下になる。まず、卓越した最も成分の多い空間周波数は0.28(1/m)である。フォークリフトの速度を駅構内の最大速度15 km/h(4.17 m/s)として時間周波数 f (1/s)は

$f = 0.28 \times 4.17 = 1.17$ (1/s)である。

よって、 $\omega = 2\pi f$ (1/s)により $\omega = 7.35$ (rad/s)

$$y(t) = 10 \sin(2\pi \times 1.17t) \cong 10 \sin(7.35t) \quad (6)$$

となる。

5. 荷役作業におけるフォークリフトの上下振動推定法の構築

5.1 フォークリフトの車両動揺成分

フォークリフトが舗装面を移動すると路面プロファイルの性状、フォークリフトの旋回運動などでフォークリフトに動揺が生じる。この動揺を三次元空間で分析すると、その自由度は上下動、左右動、前後動の3項目と進行方向(X軸)に対する回転運動(ローリング)、左右方向(Y軸)に対する回転運動(ピッチング)、鉛直方向(Z方向)に対する回転運動(ヨーイング)の3項目が存在することになる(図12)。これらの6つの運動を分類すると、①前後動はアクセルやブレーキに

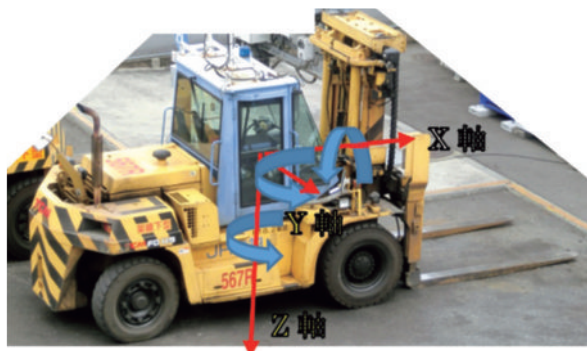


図12 フォークリフトの車両動揺成分

よって生じる動揺，②上下動とピッチングは舗装面のプロファイルに直接関係している動揺，③左右動とローリングは左右の車輪のプロファイルの差と曲線を描く運転時に発生する遠心力に関する動揺，④ヨーイングは主に操舵による回転運動と考えることができる。

ほとんどの場合，コンテナ内の荷物は十分にパッキングされコンテナ本体と一体化している。従って フォークリフトによるコンテナのハンドリングでは，これらの荷物に影響を与える主な動揺は，重力方向である上下動揺と考えられる。上記の三次元の動揺に関する6項目のうち上下動揺に関するものは，①各車輪が舗装表面に生じる高低差を通過するときに発生する上下動揺，②左右の車輪で路面の高低差の違いによって生じるケースや左右のタイヤがバネ効果を発揮して生じる自由振動のケースによるローリング，③前輪と後輪で路面の高低差の違いによって生じるケースや前後のタイヤがバネ効果を発揮して生じる自由振動によるピッチングが考えられる。

本研究では，これらの上下動揺の主な成分と考えられる「車輪が舗装表面に生じる高低差を通過するときに発生する上下動揺」を対象に検討を加えることとした。

5.2 解析モデルと解析方法の構築

本研究では面的な高低差に基づき荷役作業中のフォークリフトに対する上下振動を推定することとする。ここで前述したように FRI は道路の路面性状評価のための汎用ソフト IRI を応用して開発されたプログラムにより数 100 m 以上にわたって測定されてデータが必要である。一方，コンテナの積み卸によるフォークリフトの移動量は 20 m 程度である。そこで，路面の凹凸によって

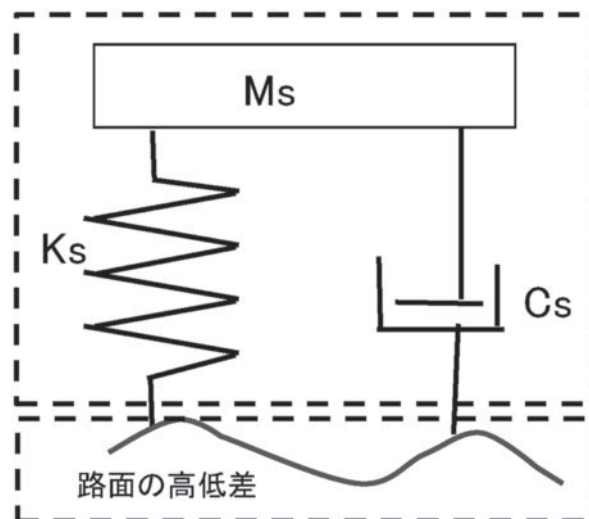


図13 フォークリフトの上下振動の解析モデル

発生するフォークリフトの上下振動を解析するモデルとしてフォークトモデルである図13を使用し，FRIで使用されているフォークリフトに関する各係数を導入することとした。ここで3.3で示したように，フォークリフトの前軸にはサスペンション機構がない。よって凹凸な路面走行で発生するフォークリフトの動揺はタイヤによるバネ効果とダンパー効果によって主に緩和される。フォークリフトの振動を評価するにあたり，一定速度 v (m/s) で移動する場合に路面の高低差の空間周波数 F (1/m) と時間周波数 f (1/s) の間には $f = v \times F$ の関係を活用することとした。一方，時間領域の角振動数 ω を用いると $\omega = 2\pi f$ である。ここで扱うのはフォークリフトの上下振動であるので，以下では時間領域を対象とする。

全体の系の絶対変位として鉛直方向軸を x 軸とし，タイヤと舗装表面の接する点から半径方向を x_b 軸とする局所座標を用いる。解析モデル図において力のつり合い条件から式(7)を導くことができる。

$$M_s \ddot{x} + c_s \dot{x} + k_s x = c \dot{x}_b + k_s x_b = B(k_s + j c_s \omega) e^{j \omega t} \quad (7)$$

ここで路面の高低差によってフォークリフトに発生する作用力の係数を複素指数関数で表示する。

式(7)は一般的な2次関数の微分方程式なので解は次式となる。

$$B(k_s + j c_s \omega) = D_b e^{j \eta} \quad (8)$$

ここで

$$D_b = B\sqrt{k_s^2 + c_s^2\omega^2}, \quad \tan \eta = c_s\omega/k_s$$

以上から 式(8)は次式へ変換できる¹⁴⁾.

$$M_s\ddot{x} + c_s\dot{x} + k_sx = D_be^{j(\omega t + \eta)} \quad (9)$$

この2階の微分方程式の解は次式となる.

$$x = \frac{D_b}{k_s\sqrt{(1-\beta^2)^2 + (2\zeta\beta)^2}} e^{j(\omega t + \eta + \varphi)} \quad (10)$$

ここで $\tan \varphi = -\frac{2\zeta\beta}{1-\beta^2}$ とする.

$$\text{なお, } \beta = \frac{\omega}{\sqrt{\frac{M_s}{k_s}}}, \quad \zeta = \frac{c_s}{2\sqrt{M_s k_s}} \text{ とする.}$$

次に フォークリフトにおける車軸の変位を y とすると $y = x - x_b$ となる. 式(10)により

$$y = \frac{B\beta^2}{(1-\beta^2 + 2j\zeta\beta)} e^{j(\omega t)} \quad (11)$$

となる.

これから車軸の変位の最大値は式(12)となる.

$$|y|_{\max} = \frac{B\beta^2\sqrt{(1-\beta^2)^2 + 4\zeta^2\beta^2}}{(1-2\beta^2 + \beta^4 + 4\zeta^2\beta^2)} \quad (12)$$

また, 式(11)よりフォークリフトの車軸上の質量の加速度は式(13)となる.

$$\ddot{y} = \frac{-B\beta^2\omega^2}{(1-\beta^2 + 2j\zeta\beta)} e^{j(\omega t)} \quad (13)$$

以上から式(13)より車軸上の質量の上下加速度の最大値は式(14)により導かれる.

$$|\ddot{y}|_{\max} = \frac{B\beta^2\omega^2\sqrt{(1-\beta^2)^2 + 4\zeta^2\beta^2}}{(1-2\beta^2 + \beta^4 + 4\zeta^2\beta^2)} \quad (14)$$

5.3 解析結果の検討

本研究で対象としたフォークリフトの諸元は FRI で採用されている値を用いた (表1). この諸元を用いることで上記の各係数である β と ζ のなかで, フォークリフトの関係する M_s , K_s , C_s が確定できる. 一方, 路面の高低差の大きさ (式(11)における B) は場所ごとに变化する. そこで今回は 4.3 に示した近似曲線で求めた値より $B=0.1$ m とした. また, 路面の高低差による時間領域の角振動数 ω は, フォークリフトの速度と

表1 フォークリフトの諸元

項目	記号	数値	単位
車体質量	M_s	10700	kg
バネ係数	k_s	2.52×10^5	N/m
減衰係数	C_s	2×10^3	N · s/m
前後車輪間隔		2.8	m
左右車輪間隔 (前輪)		1.7	m
左右車輪間隔 (後輪)		1.89	m
フォーク長さ		2.3	m
マスト高さ (最低)		3.35	m
運転席高さ		1.79	m
最小半径		4.2	m

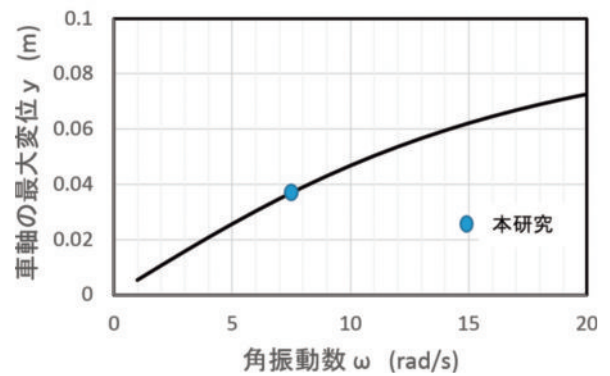


図14 角振動数に対する車軸の最大変位

空間周波数領域での路面の高低差の卓越周波数に影響を受ける. そこで, フォークリフトの速度は貨物ヤード構内最大速度である 15 km/h とした. 以上から, 時間領域の角振動数 ω の範囲は 4.3 で求めた $\omega = 7.35$ rad/s を参考に $\omega = 1 \sim 20$ rad/s とした. この範囲でフォークリフトにおける車軸の変位と加速度を推定することとした.

図14は, 角振動数に対する車軸の最大変位の関係を示している. これから本研究の角振動数 7.35 rad/s では, 車軸の最大変位は 0.38 m で路面の高低差 0.1 m に比べ, 上下方向の移動が 4 倍近くになることが推定される.

次に, 式(12)により, 角振動数に対する車軸の上下最大加速度を求めた (図15). この結果から, 1 g (重力加速度 = 9.8 m/s²) を超える角振動数約 13 rad/s では車軸は浮き上がることになる. 本研究の角振動数 7.35 rad/s では上下最大加速度 2.0 m/s² である. この値は文献13で示した ISO 2631 に定義される上下加速度 25 分以下の基準限界加速度である 2.83 m/s² よりも小さく基準を満たしていることになる.

よって車軸の上下最大加速度が運転席における

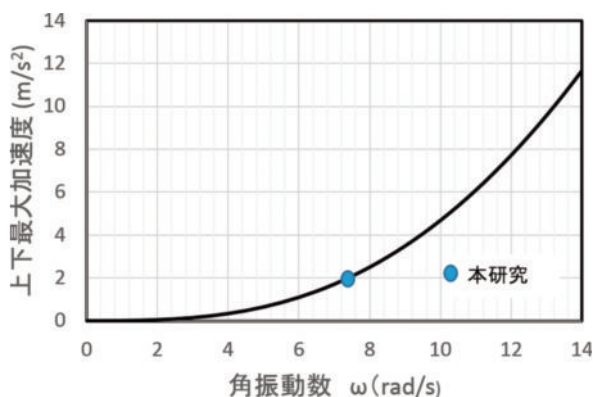


図15 角振動数に対する車軸の上下最大加速度

上下最大加速度に直接関係していることから、本研究の解析手法はフォークリフトの運転者における疲労の検討に利用できると考えられる。

次に、コンテナユーザーの要求であるコンテナの振動の評価について考察する。文献13によると「荷物の上下変位はフォークリフトの車軸の上下変位の2倍程度である」とされている。従って、本研究における車軸の上下変位の式(11)で、Bに代えて2Bを導入することで荷物の上下変位の予測が可能である。以上から荷物の上下最大加速度は式(13)においてBに代えて2Bとすることで一定程度予測が可能と考える。

6. まとめ

本研究ではコンテナの取り扱いで生ずる荷傷みに対するコンテナユーザーの要求とフォークリフトの運転者の疲労の視点から、旋回運動を伴う荷役作業のため面的交通として使用されるコンテナホームの舗装管理の手法を検討することで取り組んだ。

その結果から得られた知見を以下に示す。

- ・FRIは道路の路面性状評価のための汎用ソフトIRIを応用して開発されたプログラムにより数100m以上にわたって測定されてデータが必要である。一方、コンテナの積み卸しによるフォークリフトの移動量は20m程度である。そこで、路面の凹凸によって発生するフォークリフトの上下振動を解析するモデルをバネとダンパーの並列に設置された解析モデル（フォークトモデル）を使用し、FRIで使用されているフォークリフトに関する各係数を導入することとした。
- ・コンテナを貨車から取り卸し、トラックへの積

み込みまで旋回を伴うフォークリフトの軌跡を数値化した。また、線路から1m, 3m, 4m, 6m, 8m, 10mの距離を確保した測定データ群から面的なプロファイルを推定した。

- ・これらに基づき、コンテナのハンドリングによるフォークリフト軌跡上のプロファイルを作成した。このプロファイルを曲線としてFFT解析により卓越周波数を検出した。この卓越周波数から主成分の周波数を抽出してプロファイルの1次近似式を作成した。
- ・このプロファイルの1次近似式を本研究で使った解析モデル（フォークトモデル）に入力して車軸の上下最大加速度を推定した。
- ・この最大加速度が運転席における上下最大加速度に直接関係していることから、本研究の解析手法はフォークリフトの運転者における疲労の検討に利用できるとの結論を得た。また、コンテナ内の荷物の最大上下変位の予測も既往の研究から車軸の最大加速度の2倍と仮定することで一定程度予測が可能との結論を得た。

参考文献

- 1) 土木学会編：国鉄貨物設備アスファルト舗装設計に関する研究，土木学会，1971
- 2) 日本道路協会編：アスファルト舗装要綱，日本道路協会，1967
- 3) 上浦正樹ら：鉄道貨物ヤードにおけるアスファルト舗装設計に関する研究，土木学会論文集，No.520，pp.47-54，1995
- 4) 日本貨物鉄道(株)編：貨物設備アスファルト舗装設計補修の手引き，1993
- 5) 社) 日本道路協会：道路維持修繕要綱，日本道路協会，1978
- 6) Ralph Haas/W. Ronald Hudson/John Zaniewski, Modern Pavement Management, Krieger Publishing Company, pp.203-205, 1994
- 7) 富山和也他：共通試験結果に基づく路面プロファイルの有効性とその検証方法，土木学会論文集E1，Vol.71，pp.1-16，2015
- 8) M. W. Sayers/M. Karamihas：The little Book of Profiling, 土木学会舗装工学委員会訳，舗装工学ライブラリー1，pp.38-40，2003
- 9) 上野慎一郎：都道におけるIRI（国際ラフネス指数）に関する調査，都土木技術支援年報，2014
- 10) 富山和也他：高速道路における絶対プロファイルの推定，土木学会論文集E1，Vol.70，pp.41-48，2014
- 11) 國分修一他：車両振動加速度によるIRIと舗装の評

- 価，舗装，Vol.45，pp.8-15，2010
- 12) 阿部長門他：タイヤのバネ及び減衰率に基づく荷役装置の乗り心地モデル，土木学会第 57 回年次学術講演会，pp.117-118，2002
- 13) 中藺裕他：コンテナヤードの路面凹凸が荷役機械及び荷物に与える影響，土木学会舗装工学論文集第 14 巻，pp.1-16，2009
- 14) 長松昭男：モード解析，コロナ社，pp.63-65，1993