

コンテナヤードを走行するトレーラーの 燃料消費量推計モデルの構築

THE MODEL FOR ESTIMATION OF FUEL EFFICIENCY
BY TRAILER RUNNING IN CONTAINER YARD

村野 昭人¹・鈴木 武²
Akito MURANO, Takeshi SUZUKI

- 1 正会員 工博 国土交通省 国土技術政策総合研究所 沿岸海洋研究部 沿岸域システム研究室 研究官
(〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1)
- 2 正会員 工博 国土交通省 国土技術政策総合研究所 沿岸海洋研究部 沿岸域システム研究室 室長
(〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1)

To develop ports consumes huge energy and materials, so it becomes one of the main origin of CO₂ emissions. For accurate estimation of the environmental impact from goods it is necessary to assess them through life cycle from material production, construction, usage, maintenance, to demolition. As infrastructures have long life cycle, the stage of usage plays an important part in their life cycle. In this study to estimate the energy from a trailer running in a container yard, the relation between fuel efficiency and running resistance is analyzed. Based on the analysis, the model for the estimation of fuel efficiency is constructed, and its accuracy is verified.

Key Words : Life Cycle Assessment, Container Yard, Fuel Efficiency, Running Resistance

1. はじめに

発効の時期が近づいている京都議定書において、日本は2008年から2012年の5年間で、1990年に比べ6%の温暖化ガスの排出削減を義務付けられた。しかし、2000年度の排出量は1990年比で8.0%増となっており、早急な対策を講じることが求められている。大規模な施設整備を伴う港湾整備は、大量の資材やエネルギーを消費し多くの温暖化ガスを排出するため、その低減のための努力が求められる。温暖化ガス排出の低減を実行に移してゆくためには、資材生産・輸送・施工からなる建設段階から、維持管理・稼動・コンテナ輸送からなる運用段階、解体廃棄段階に至るライフサイクル全般にわたる温暖化ガス排出量を適切に推計することが前提となる。しかも港湾施設などのインフラストラクチャーは一般の工業製品と比較してライフサイクル期間が長いため、運用時の評価がより重要となる。さらに港湾施設の運用時に排出される温暖化ガスの中では、コンテナ輸送に由来するものが大きな位置を占めるため、輸送時の温暖化ガス発生量を正確に把握することが不可欠である。コンテナ輸送には、コンテナ船による海上輸送から、コンテナヤード内でのヤードトレーラー等による輸送、コンテナトレーラーによる陸上輸送までが含まれる。本研究では、走行する車両、走行パターンともに特殊であり、先行研究例が

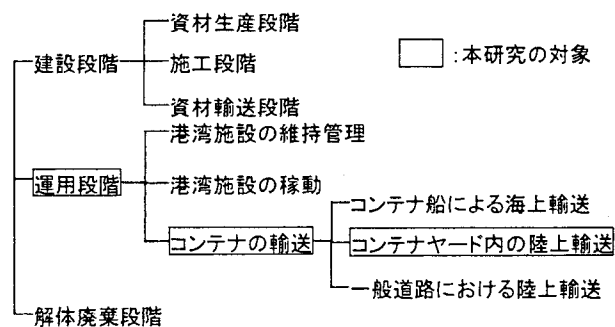


図-1 港湾のライフサイクルにおける本研究の対象

ほとんど見られないコンテナヤード内の輸送を研究の対象とする(図-1)。

国土交通省では、車両総重量2.5トンを超えるディーゼル車について燃費基準を作成する際には、負荷率、すなわち最大軸トルクに対する試験時の軸トルクの割合(%)と、エンジン回転数比、すなわち最高出力時のエンジン回転数に対する試験時のエンジン回転数の割合(%)を、一定の順序及び割合で組み合わせてモード化し(図-2)、それに基づいて燃料消費量を測定して行っている。

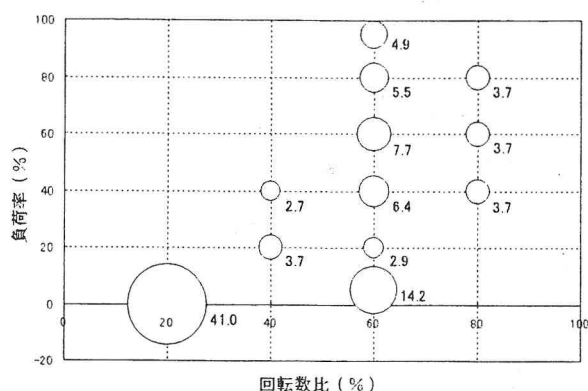


図-2 ディーゼル車の燃費基準作成に用いるモード (13モード)

一方、大型車両の燃料消費量特性について分析した従来の研究としては、一般的なトラックの走行時の環境負荷原単位について数多くの研究報告がある^{1), 2)}。例えば、(独)交通安全環境研究所においては、エンジンの回転数比や負荷率の組み合わせに対する燃料消費量の理論値を算出し、その値に各走行モードにおけるエンジン回転数比と負荷率の使用頻度を掛け合わせることで、平均速度と燃費の関係についてシミュレーションを行っている³⁾。また、筆者らは過去に、総重量が10トンを超えるコンテナトレーラーを対象として一般道路や高速道路において走行実験を行い、走行抵抗を算出することで燃料消費量を推計することが可能であることを示した⁴⁾。

これらの研究成果により、速度から燃料消費量を推計することは可能となった。しかし、港湾整備事業がコンテナ輸送に伴う環境負荷の発生量に与える影響を定量的に把握するためには、コンテナヤードの形状がヤード内を走行するヤードトレーラーの走行パターンに与える影響を明らかにする必要がある。そこで本研究では、コンテナヤードの形状が走行パターンに与える影響について分析を行う、(図-3)。

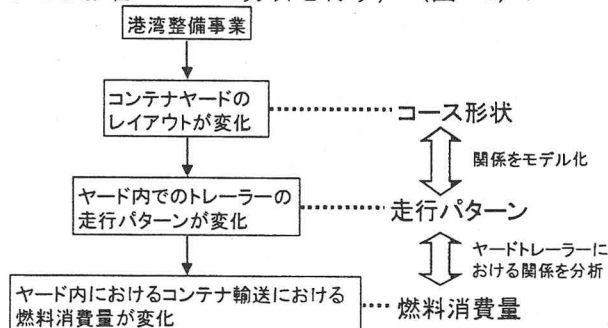


図-3 本研究の位置づけ

コンテナヤードの形状や走行パターンには、多種多様な形態が考えられる。従って、厳密に考えるならば、すべてのコンテナヤード、すべてのドライバー、すべての車両を対象として走行実験を行い、その燃料消費量を調査することが求められる。しかし、そのようなことは現実的に不可能であるため、コンテナヤードの形状、走行パターンを少ない変数で表現し、様々なケースに適用可能なモデルを構築することが求められる。

そこで本研究では、コンテナヤードを走行するトレーラーを対象として、一定の規則に基づいた走行パターンを想定し、パターンに基づいて走行抵抗を算出することによって燃料消費量を推計するモデルを構築することを目的とする。このようなモデルを構築することにより、走行実験を行わなくても、コンテナヤードの形状のデータや、車両のデータを入力することで燃料消費量が推計可能となる。

2. コンテナヤードにおける走行実験の概要

(1) 走行実験に用いた車両

走行実験に用いた車両は、重量が6.35トンのヤードトレーラーである。その外観を図-4に、諸元を表-1に記す。キャビンの上部には、空気抵抗を減らすウィンドデフレクターを取り付けている場合がある。この装置は特に高速運転時に効果を発揮し、現在では多くのトレーラーに取り付けられているが、対象車には取り付けられていなかった。主に使用したシャーシの重量は40フィートで6.2トン、空コンテナの重量は2.0〜5.0トンであった。



図-4 実験に用いたコンテナトレーラー

表-1 実験に使用した車両の諸元

型番	TH92平成7年式	幅	2490mm
車体重量	6350kg	高さ	2870mm
シャーシ重量	6200kg	長さ	5530mm
エンジン形式	EXR-72D	変速器	6速マニュアル

(2) 走行実験の概要

実験は平成15年7月に清水港の袖帥埠頭において、同一の車両を使用して行い、複数のドライバーが運転した。実験当日に、埠頭内の整備工場において燃費計、GPS装置を取り付けた。運送会社の通常業務に同乗する形で実験を行い、実験のために特別な走行ルートを設定するという事はしていない。

燃料消費量を測定するための燃費計、速度を測定するためのGPS装置を取り付け、各データを計測しデジタルデータとして取得した。実験で使用した燃費計はディーゼル車用のもので、エンジンに入った燃料の流量とエンジンから出てきた燃料の流量を計測し、その差を取って燃料消費量を算出する。実験で使用したGPS装置にはディファレンシャル補正機能が付いており、サブメートルのディファレンシャル測位精度と0.16km/hour以下のディファレンシャル速度精度を保持している。すなわち、今回の走行実験での使用に

耐えうる精度を有しているとみなすことができる。一般に町中を走行中には、高層ビルや信号、陸橋などが電波受信の障害となるため、GPS 装置を用いて速度のデータを取得することは困難である。しかし、今回の実験のように港湾エリアのみを走行する場合には、障害物が少ないため速度データを取得できた。また、走行状況についてビデオ撮影を行い、取得したデータのチェックを行った。

走行実験によって得られた速度変化の例を図-5に示す。さらに、GPS データから読み取ったトレーラーの軌跡を図-6 に示す。

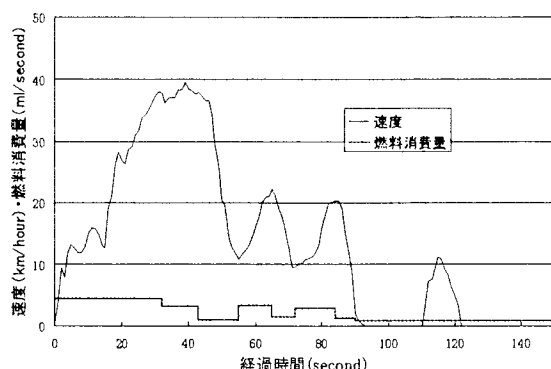


図-5 実測データの例

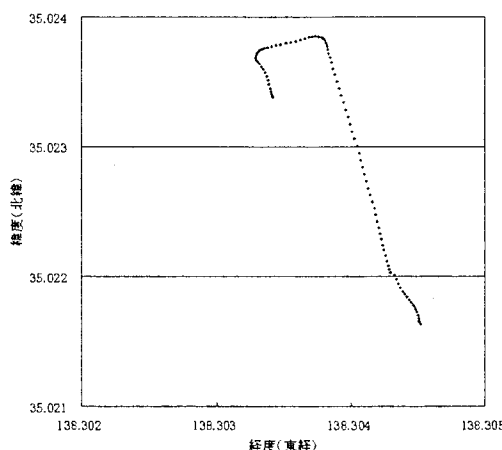


図-6 GPS によるトレーラーの軌跡の例

これらより、まず時速 40km 前後まで加速し、しばらく等速移動した後、カーブのために 2 回加減速を繰り返したあと、停止したことが分かる。100 秒経過時に降に若干移動しているのは、コンテナの積み降ろし作業のための停止位置の修正によるものである。以後の分析においては、このような小移動については分析対象外とし、スタートから停止するまでを対象とした。

3. 燃料消費量推計モデルの構築

(1) 消費エネルギー量と走行抵抗に対する仕事量の比較

a) 走行抵抗式

自動車は、走行中に生じる様々な抵抗力に対抗するためにエネルギーを消費する。この抵抗する力の総称を走行抵抗といい、転がり抵抗、空気抵抗、勾配抵抗、

加速抵抗が含まれる⁵⁾。しかし、走行実験を行ったコンテナヤードは、一般にほぼ平坦であると考えられることから、本稿では勾配抵抗については考慮しない。

転がり抵抗とは、タイヤが路面上を転がることによって起こるすべての抵抗の和である。自動車の総重量を W [ton]、転がり抵抗係数を μ_r 、重力加速度を g [m/s²] とすると、転がり抵抗 R_r [N] は、

$$R_r = 1000 \times g \times \mu_r \times W \quad (1)$$

となる。

空気抵抗とは、自動車が走行するとき、ボディーに空気の力が作用して受ける力である。自動車の前面面積を A [m²]、空気の密度を ρ [N・s²/m⁴]、自動車の速度を V [m/s]、ボディーの空気抵抗係数を C_d とすると、空気抵抗 R_a は、

$$R_a = \frac{\rho}{2} C_d A V^2 \quad (2)$$

となる。

加速抵抗とは、等速走行している自動車の慣性及び、自動車のエンジンから駆動輪までの回転部分の速度を増加させるための慣性に打ち勝つために必要となる力である。自動車の重量を W [ton]、自動車の加速度を α [m/s²]、回転部分相当質量係数を σ とすると、加速抵抗 R_{ac} [N] は、

$$R_{ac} = 1000 \times (1 + \sigma) \times W \times \alpha \quad (3)$$

となる。

自動車が道路を加速しながら走行している場合に働く全走行抵抗 R [N] は、空気抵抗、勾配抵抗、加速抵抗の総和となる。すなわち式 (1)、式 (2)、式 (3) から、

$$\begin{aligned} R &= R_r + R_a + R_{ac} \\ &= 1000 \times g \times W \left\{ \mu_r + (1 + \sigma) \frac{\alpha}{g} \right\} + \frac{\rho}{2} C_d A V^2 \end{aligned} \quad (4)$$

となる。

b) 消費エネルギー量と走行抵抗に対する仕事量

速度 V_i [m/s] (t [s] は経過時間を表す) で走行する自動車が、走行抵抗 R_i [N] に逆らって $t=1 \sim T$ [s] の間走行した際に発生する仕事量 W_T [J] は、式 (5) で求められる。

$$W_T = \sum_{i=1}^T (R_i \times V_i) \quad (5)$$

平均速度を V [m/s] とすると、 $t=1 \sim T$ [s] の間に自動車は $V \times T$ [m] 走行するので、単位距離を走行する際に発生する仕事量 W_L [J/m] は、式 (6) で求められる。

$$\begin{aligned} W_L &= \frac{\sum_{i=1}^T (R_i \times V_i)}{(V \times T)} \\ &= \frac{\sum_{i=1}^T (R_i \times V_i)}{\sum_{i=1}^T V_i} \end{aligned} \quad (6)$$

式 (4)、(6) より、 W_L を求める。式 (2) より、空気抵抗 R_a は速度 V_i の二乗に比例する。従って、 $R_a \times V_i$ の値は V_i^3 に比例する。また、式 (3) より、加

速抵抗 R_{ac} は加速度に比例する。従って、 $R_{ac} \times V_t$ の値は $\alpha_t \times V_t$ に比例する。加速抵抗が車両に加わるのは、加速時のみであることから、等速時・減速時の加速度はすべて0とみなして集計した。集計した結果を基に、各抵抗に逆らって単位距離を走行する際に発生する仕事を算出する。算出の際に用いた抵抗係数等を表-2に示す。表中の重量の値は、シャーシ、コンテナを除いた車両の重量を表している。

表-2 算出に用いた抵抗係数			
	記号	単位	設定値
転がり抵抗係数	μ_r	—	0.01
重量	W	ton	12.55
空気抵抗係数	C_d	—	0.75
空気密度	ρ	kg/m ³	1.225
前面面積	A	m ²	7.15
重力加速度	g	m/s ²	9.8
回転部分相当質量係数	σ	—	0.45

次に、燃費が F [km/L]であった場合、1km 走行するために消費された燃料のエネルギー量 E [J]は、式(7)で求められる。 k はエネルギー効率を示す係数であり、燃料の単位発熱量やエンジンの熱効率により変化する。ここでは、軽油の発熱量を、資源エネルギー庁の資料⁶⁾に基づいて3.82[10GJ/kL]、ディーゼルエンジンの熱効率は、実験に用いた車両のデータを入手できなかったため、資料⁵⁾に基づいて0.30とする。

$$E = k \times \frac{1}{F} \tag{7}$$

以上の式により算出した燃費の値と、燃費の実測値を比較した結果を図-7に示す。相関係数は0.82となり、高い相関が認められた。このことにより、走行抵抗を算出することを通じて燃料消費量を推計することが可能であることが明らかとなった。

なお、走行抵抗に占める各抵抗の割合は、加速抵抗が全体の約72%となり、加速の影響を分析することが重要であることが分かった。一方で空気抵抗は、平均速度が約20km/hourと低速であったことから、走行抵抗全体の3%程度にとどまった。

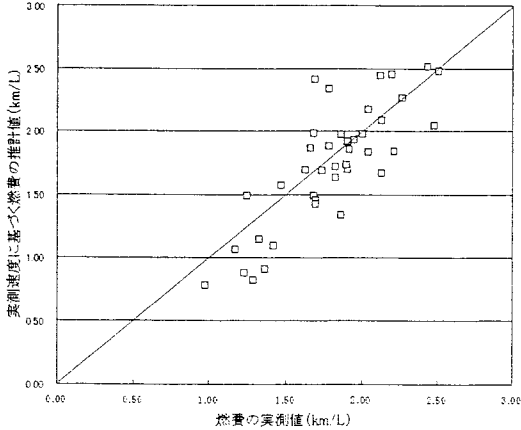


図-7 燃費の実測値と速度の実測値に基づいて推計した燃費の比較

(3) 速度推移データの区間分割

燃料消費量を推計するモデルを構築するためには、走行パターンをモデル化することが必要となる。そのイメージを図-8に示す。すなわち、全体を加速区間、等速区間、減速区間、及びカーブのための減速区間、加速区間に分割する。

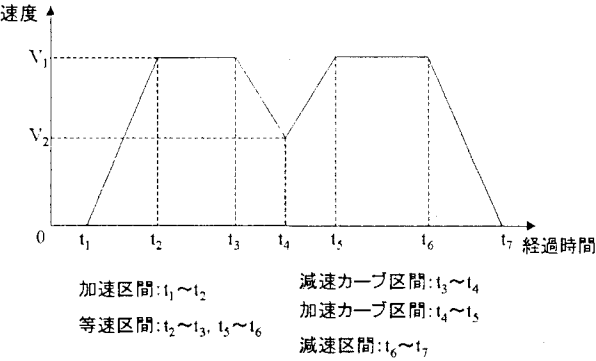


図-8 走行パターンのモデル化

速度の推移を示すグラフと、トレーラーの軌跡を対照させることにより、走行区間全体を加速区間、等速区間、減速区間、等に分割することが可能である(図-9、図-10)。

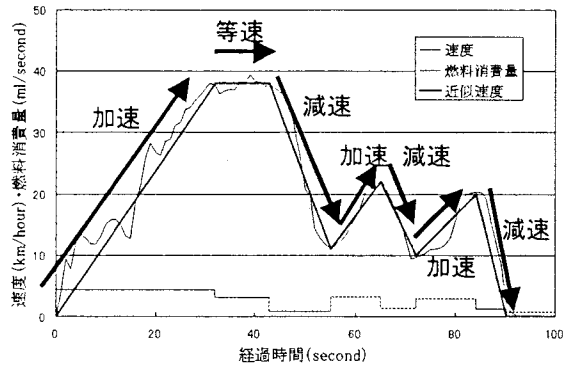


図-9 速度の推移データ上の区間分割

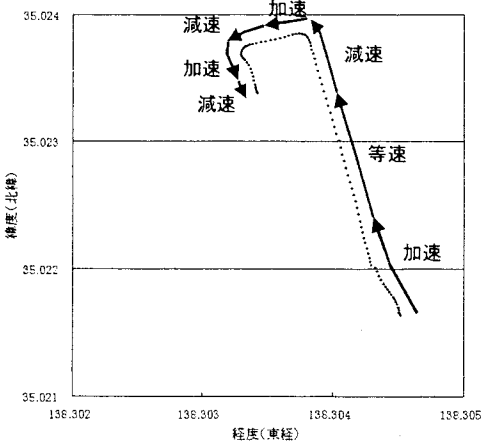


図-10 トレーラーの軌跡上の区間分割

次に、分割した区間ごとに、速度を近似して当てはめることを試みた。区間分割及び速度の近似は、以下の原則に基づいて行った。まず、発車から最初にピークに達するまでを加速区間とし、直線で近似した。次に、最後のピークから停車するまでを減速区間とし、

直線で近似した。最後に、ピークとピークとの間をカーブ区間とし、最も速度が遅くなった点を頂点として直線で近似した。分割した結果の例を表-3に示す。

表-3 走行パターンの区間分割

区間特性	初期時刻	初速	終了時刻	終速	経過時間	燃料消費率
	second	km/hour	second	km/hour	second	ml/second
加速	0	0	32	38	32	4.41
等速	32	38	43	38	11	3.20
減速カーブ	43	38	55	11	12	0.92
加速カーブ	55	11	65	22	10	3.25
減速カーブ	65	22	72	10	7	1.36
加速カーブ	72	10	84	20	12	2.91
減速	84	20	90	0	6	1.32

(4) ドライバーごとの運転特性

走行パターンのモデル化の際に使用する変数を決するため、ドライバーの運転特性について分析を行った。表-4にドライバーごとの速度特性を示す。これによると、最高速度、カーブ通過時の速度とともに、ドライバーごとの大きな変化は見られないことが分かった。すなわち、モデル化においては、それらの値を平均値で代表させることが可能である。モデル化においては、最高速度を 38 [km/hour]，カーブ通過時の速度を 12 [km/hour] と設定した。

表-4 ドライバーごとの速度特性

	速度 (km/hour)		
	DriverA	DriverB	DriverC
平均速度	19.73	19.54	20.00
最高速度	36.60	40.71	37.38
最高速度の標準偏差	3.51	6.68	2.31
カーブ通過時の速度	10.25	12.56	12.21
カーブ通過速度の標準偏差	4.09	6.74	4.60

次に、表-5にドライバーごとの加速度特性を分割した区間ごとに示す。これによると、加速度、減速度とともに、ドライバーごとの顕著な違いは見られなかった。すなわち、モデル化においては、それらの値を平均値で代表させることが可能である。唯一、Driver Bの減速度がやや高い値となっているが、これは車両重量が関係している可能性がある。しかし、本稿においては、モデルが過度に複雑になることを防ぐためにも、加速度を 0.50 [m/second²]，カーブでの加速度を 0.35 [m/second²]，減速度を-0.60 [m/second²]，カーブでの減速度を-0.50 [m/second²] と設定し、車両速度の影響は考慮していない。この点については、今後のさらなる分析を進める上での課題となる。

表-5 ドライバーごとの加速度特性

		加速度 (m/sec ²)		
		DriverA	DriverB	DriverC
区間	加速	0.56	0.51	0.50
	加速カーブ	0.34	0.35	0.36
	減速	-0.53	-0.66	-0.55
	減速カーブ	-0.45	-0.48	-0.54
	等速	0.00	0.00	0.00

(5) 推計モデルの精度の検証

前節までの分析を基に、燃料消費量推計モデルを構築する。モデルに含まれる変数は、直線距離やカーブの数・配置といったコースに起因する要素と、最高速度、加速度などのドライバーに起因する要素の2種類に分けられる。このモデルが有効に機能するためには、コースに起因する要素を外生的に与えた時に、走行パターンが一意的に求まることが必要条件となる。

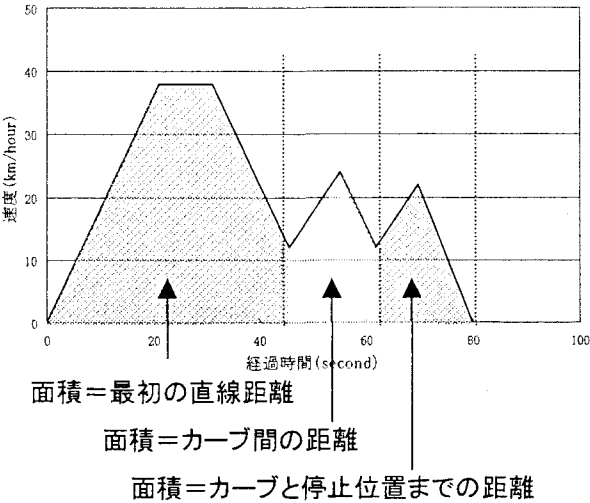


図-11 コース形状と運転パターンの関係

図-10において、長い直線の距離は、最初の加速区間、次の等速区間、減速カーブ区間での走行距離の合計とみなすことができる。走行距離は、速度の推移を示す直線で囲まれる面積で表される。すなわち、直線距離を与えるとその面積が決定される(図-11)。直線の傾き、すなわち加速度・減速度、及び最高速度は前節で設定した通りなので、面積が与えられれば、その形が一意的に決定されることになり、決定された例を図-12に示す。

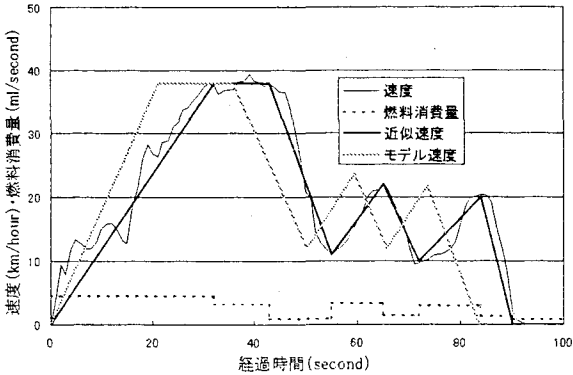


図-12 近似した速度とモデルによる速度

決定された走行パターンを基に、転がり抵抗、空気抵抗、加速抵抗を算出し走行抵抗を求める。次に、求められた走行抵抗の値から、単位距離を走行するために必要となる仕事量を算出する。最後に、式(7)に基づいて仕事量から燃費を算出する。

近似速度に基づいて推計した燃費と、モデルを用いて推計した燃費の値を比較したところ(図-13)、相

関係数は 0.86 となり、モデルによる速度が近似速度をほぼ再現できていることが示された。

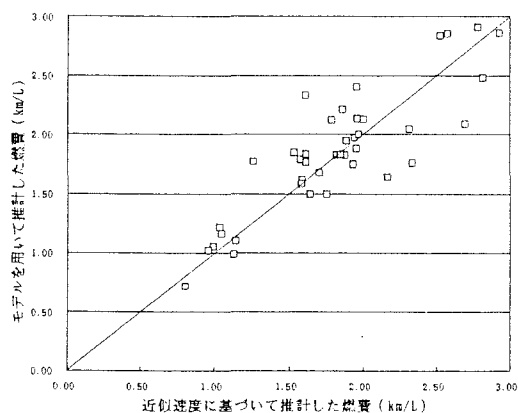


図-13 近似速度に基づいて推計した燃費とモデルを用いて推計した燃費の比較

最後に、燃費の実測値と、モデルを用いて推計した燃費の値を比較したところ、相関係数は 0.87 となり、モデルの有効性を示すことができた (図-14)。

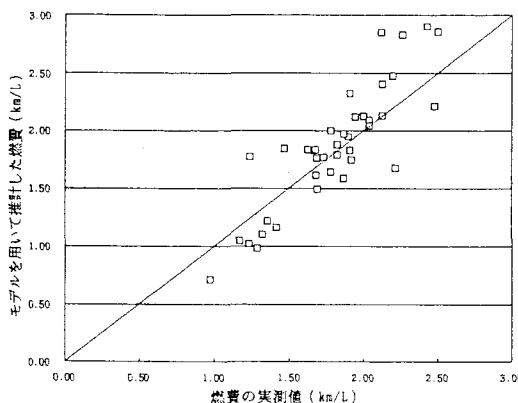


図-14 燃費の実測値と構築したモデルに基づく推計値の比較

以上のことから、本研究で構築した燃料消費量推計モデルを用いることによって、直線距離やカーブの配置といったコースの形状を入力すると、そこを走行するヤードトレーラーの燃料消費量を推計することが可能であることを示すことが出来た。

4. 結論

港湾荷役作業中にコンテナヤードを走行するトレーラーを対象として、燃料消費量を把握することが可能なモデルを構築することを目的に研究を行った。主な結論は以下の通りである。

速度・加速度の実測データより、転がり抵抗・空気抵抗・加速抵抗の各走行抵抗を算出したところ、加速抵抗が全体の約 72% となり、加速の影響を分析する

ことが重要であることが分かった。一方で空気抵抗は、平均速度が遅いことから、全体の 3% 程度にとどまった。

走行抵抗に対する仕事量と、燃料消費に伴う熱量の間には高い相関が認められ、走行抵抗を算出することにより燃料消費量を推計することが出来ることが明らかとなった。

ドライバーごとに走行パターンを数値化したところ、直線距離・カーブの配置といったコース形状に起因する要素と、最高速度・平均加速度などドライバーに起因する要素によって走行パターンが決定されることを示すことができた。

コンテナヤードの大きさと形状から、燃料消費量を推計するモデルを構築した結果、推計結果と実測値との間にはよい相関が認められ、推計モデルの有効性を示すことが出来た。

本研究で構築したモデルを実際の港湾整備計画に適用し、コンテナヤードにおける施設配置を変更することが、どの程度ヤードトレーラーの燃料消費量を削減するか分析し、最適な港湾施設の配置を提案することが今後の課題となる。

また、本研究で構築したモデルでは、急なカーブ、緩やかなカーブといった、カーブの質の違いや、車両重量が加速度に与える影響について考慮していない。これらの要素についても分析を加え、より精度の高いモデルとすることが不可欠となる。

謝辞：走行実験の実施にあたり、鈴木コンテナエンジニアリング (株) の岡村正昭様を始め、多くの方の御助言・御協力をいただきました。この場を借りて厚く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 環境庁温室効果ガス排出量算定方法検討会：温室効果ガス排出量算定方法に関する検討結果—運輸分科会報告書—, 2000
- 2) 東京都環境保全局：都内自動車走行量及び自動車排出ガス量算出調査報告書, pp36-46, 1996
- 3) 野田明：新しい大型ディーゼル車の排出ガス及び燃費性能の評価手法について, (独)交通安全環境研究所講演会 講演概要集, pp37-59, 2003
- 4) 村野昭人, 鈴木武：陸上輸送における燃料消費特性の把握, 第 31 回環境システム研究論文発表会講演集, pp421-429, 2003
- 5) 竹花有也：自動車工学概論, pp176-190, 理工学社, 1995
- 6) 資源エネルギー庁長官官房企画調査課：平成 12 年度総合エネルギー統計, 通商産業研究会, 2001