

輸送条件の変化がヤードトレーラーの燃料消費量に与える影響の分析

村野 昭人¹・鈴木 武²

1 正会員 工博 東洋大学 地域産業共生研究センター (〒350-8585 埼玉県川越市鯨井 2100)

E-mail : murano-a@eng.toyo.ac.jp

2 正会員 工博 国土交通省 国土技術政策総合研究所 (〒239-0826 神奈川県横浜須賀市長瀬 3-1-1)

E-mail : suzuki-t92y3@ysk.nilim.go.jp

地球温暖化ガスの排出量削減など、環境問題への取り組みがますます重要視されつつあり、それは港湾整備事業においても例外ではない。港湾施設のように運用期間の長いインフラ施設の影響を評価する場合、その建設段階だけでなく、運用段階や解体廃棄段階も含めたライフサイクル全体を対象として評価する視点が必要となる。そこで本研究では、港湾のライフサイクルの中から、ヤードトレーラーによるコンテナ輸送を対象として、港湾整備が燃料消費量に与える影響を推計するモデルを構築した。さらに港湾整備による走行経路の変化など輸送条件の変化が、ヤードトレーラーの燃料消費量に与える影響を定量的に把握することを試みた。その結果、同距離を走行した場合でも、燃料消費量に最大で 26%の差が生じることが明らかとなった。

Key Words : Life Cycle Assessment, Yard Trailer, Fuel Economy, Running Resistance

1. はじめに

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場合、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)。

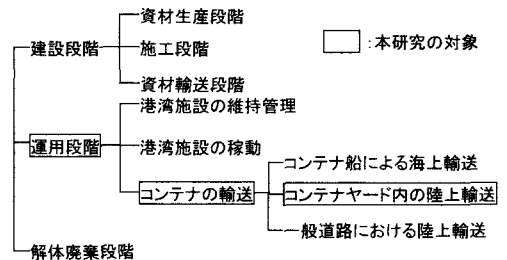


図-1 港湾のライフサイクルにおける本研究の対象

国土交通省では、自動車の燃費基準を作成する際には、運転パターンをモード化し、それに基づいて燃料消費量や排出ガス成分を測定して行っている。しかし、実際の走行が想定したモード走行となることは稀であり、実際の燃費は公表された燃費とは必ずしも一致しない。

そこで、実際の運転パターンが燃費に及ぼす影響について研究が行われてきた。例えば、瞬間的な速度や加速度が燃費に与える影響について、乗用車や軽トラックを対象に調査が行われた¹⁾。また、そのような調査を容易にするために、自動車排ガスと走行動態を車載型機器を用いて計測するシステムが開発された²⁾。

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^{3) 4) 5)}。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⁶⁾。

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-2)。

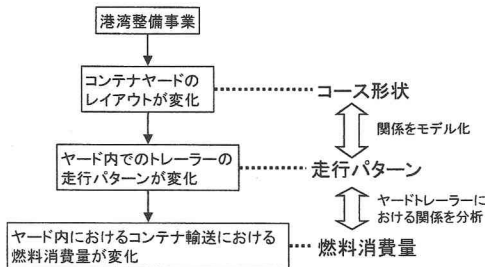


図-2 本研究の位置づけ

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-3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-3 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31日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、整備工場にて燃費計、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ことはない。

燃料消費量を測定するための燃費計(図-4.5)、速度を測定するためのGPS装置(図-6)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

レンジャル測位精度と 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る精度を有しているとなすことができる。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。

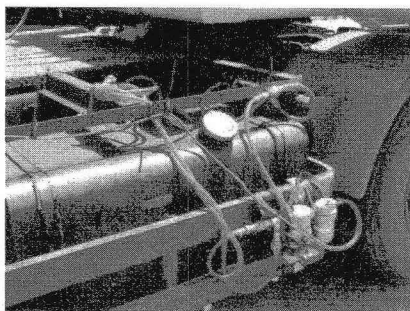


図-4 燃費計（車両側）

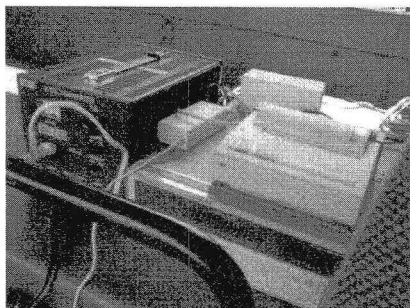


図-5 燃費計（計測器側）



図-6 GPS 装置

走行実験によって得られた速度変化の例を図-7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-8に示す。

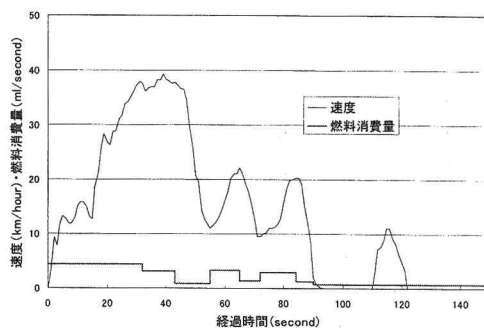


図-7 実測データの例

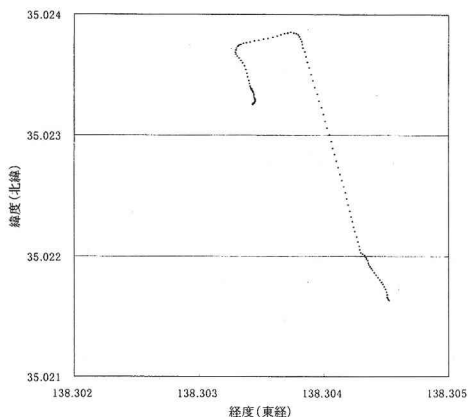


図-8 トレーラーの軌跡の例

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 秒経過時以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) 走行抵抗

自動車の燃費性能を改善するためには、走行中に生じる様々な抵抗を少なくすることが必要となる。

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⁷⁾。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、勾配抵抗については考慮しない。

a) 転がり抵抗
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、

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

で求まる。

b) 空気抵抗
自動車の前面面積を A [m²]、空気密度を 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、

$$R_a = \frac{\rho}{2} C_d A V^2 \text{ [N]} \cdots (2)$$

となる。

c) 加速抵抗
自動車の重量を W [ton]、自動車の加速度を α [m/s²] とすると、加速抵抗 R_{ac} [N] は次式で求まる。

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

ここで、 σ は回転部分相当質量係数で、乗用車の場合には、トップ状態で 0.08、低速状態で 0.7 前後である。

d) 走行抵抗
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、

$$R = R_r + R_a + R_{ac} \\ = 1000 \times g \times W \left\{ \mu_r \cos \theta + (1 + \sigma) \frac{\alpha}{g} \right\} + \frac{\rho}{2} C_d A V^2 \cdots (4)$$

となる。

(2) 消費エネルギー量と走行抵抗に対する仕事量の比較

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。

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

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。

$$W_L = \frac{\sum_{i=1}^T (R_i \times V_i)}{\sum_{i=1}^T V_i} \cdots (6)$$

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、 $R_{ac} \times V_i$ の

値は $\alpha_i \times V_i$ 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量を算出する。算出に用いた抵抗係数を表-2 に示す^{8), 9)}。回転部分相当質量係数 σ はギア比によって変化するため、車両総重量が約 15 トンの車両を対象に行った分析¹⁰⁾に基づき、平均速度を変数とする数式で近似した (表-3)。

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
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	—	平均速度により変化

表-3 回転部分相当質量係数の設定

平均速度	σ
10~20km/hour	$\sigma = -0.0161 \times V + 0.75$
20~30km/hour	$\sigma = -0.0154 \times V + 0.736$

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¹¹⁾に基づいて $3.82[10\text{GJ}/\text{kL}]$ 、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ので、資料⁷⁾に基づいて 0.30 とする。

$$E = k \times \frac{1}{F} \cdots (7)$$

算出した走行抵抗に対する仕事量の値と、消費エネルギー量の実測値を比較した結果を図-9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 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。

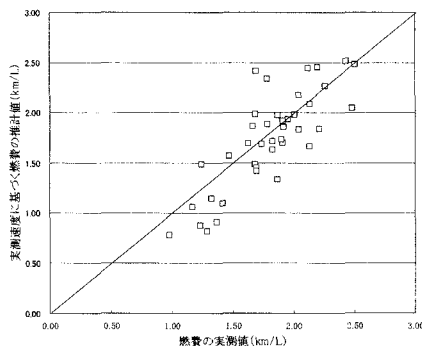


図-9 消費エネルギーの実測値と速度の実測値に基づいて算出した走行抵抗の比較

(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-10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。

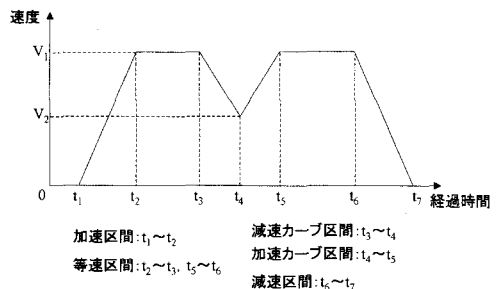


図-10 走行パターンのモデル化

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-11、図-12)。

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る。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-4に示す。

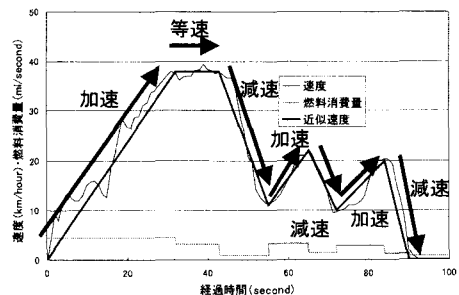


図-11 速度の推移データ上の区間分割

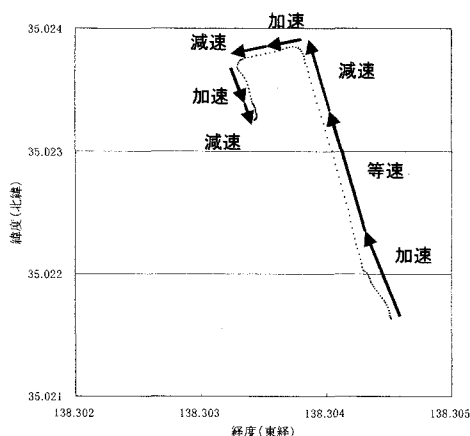


図-12 トレーラーの軌跡上の区間分割

表-4 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	m/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定するため、ドライバーの運転特性について分析を行った。表-5 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-5 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-6 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。そこで次節以降の分析においては、加速度を 0.50 $[\text{m}/\text{second}^2]$ 、カーブでの加速度を 0.35 $[\text{m}/\text{second}^2]$ 減速度を -0.60 $[\text{m}/\text{second}^2]$ カーブでの減速度を -0.50 $[\text{m}/\text{second}^2]$ と設定した。

表-6 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となる。

図-12 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-13）。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、その形が一次的に決定されることになり、決定された例を図-14に示す。

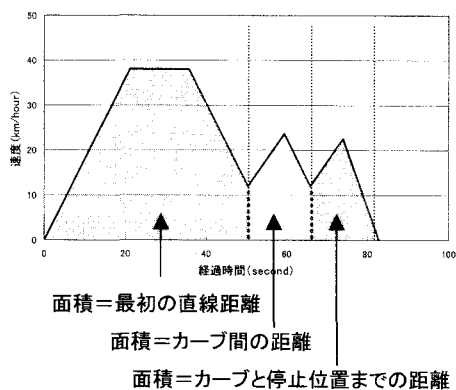


図-13 コース形状と運転パターンとの関係

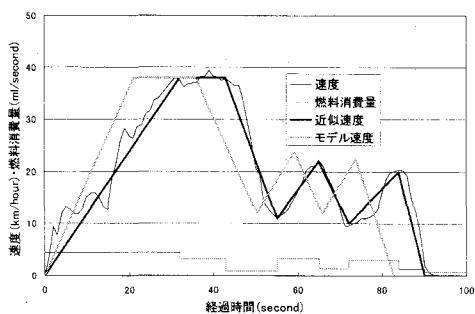


図-14 近似した速度とモデルによる速度

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算出した仕事量と、モデルに基づいて推計した仕事量の値を比較したところ(図-15)、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。

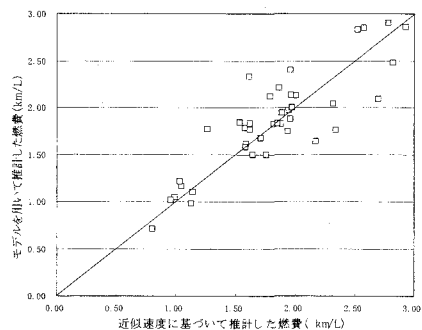


図-15 近似速度に基づいて推計した燃費とモデルを用いて推計した燃費の比較

最後に、実測された燃費の値と、モデルに基づ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-16)。

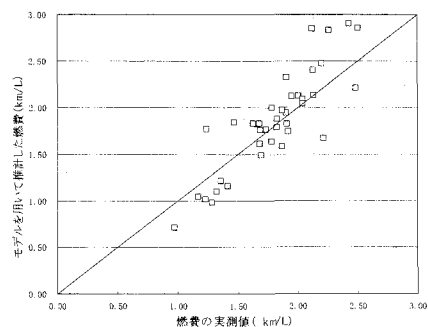


図-16 燃費の実測値と構築したモデルに基づく推計値の比較

4. 輸送条件の変化が燃料消費量に与える影響

(1) コース形状が変化した場合の燃料消費量の変化

最後に、本論文で構築したモデルを用いて、輸送条件が変化した場合の、燃料消費量の変化を分析した。全長を900mで一定とした上で、各直線の距離を変化させた(図-17)。ケース3は、途中の直線において、一度停止するケースを示している。

それぞれのケースを対象に、前章で構築したモ

ケース1	ケース2
ケース3	ケース4
ケース5	ケース6

ケース	燃費 (km/L)
ケース1	1.85
ケース2	1.85
ケース3	1.70
ケース4	2.15
ケース5	2.00
ケース6	3.10

(2) 港灣施設の配置が変化した場合の燃料消費量の变化

コンテナの積み降ろし位置の組み合わせごとに燃料消費量をモデルを用いて推計し、その値に各組み合わせが発生する確率を乗じて相乗平均を取ることで、クレーンの台数、ヤードの規模別の平均燃費を算出した。その結果、クレーン台数を増加させたり、ヤードの規模を大きくしたりしても、燃料消

等速運転状態に入るためには一定の直線距離が必要となる。しかし、今回のケーススタディーでは、いずれのケースでも、それだけの直線距離を保持することが無かったことが、大きな差を生じなかった原因と考えられる。

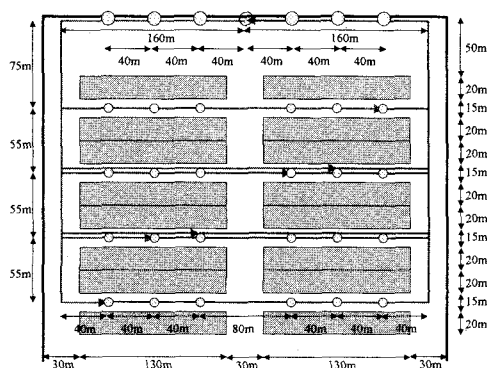


表-7 ヤード規模別の平均燃費 (km/L)

		輻(=m)	17.55t	22.55t	27.55t	32.55t	37.55t	42.55t
1系列	全二列	150~200	1.71	1.47	1.29	1.15	1.04	0.94
	全三列	200~250	1.72	1.48	1.30	1.15	1.04	0.95
	全四列	250~300	1.72	1.48	1.30	1.16	1.04	0.95
	全二列	150~200	1.68	1.44	1.27	1.13	1.02	0.92
2系列	全三列	200~250	1.69	1.46	1.28	1.14	1.02	0.93
	全四列	250~300	1.70	1.47	1.29	1.14	1.03	0.94

5. 結論と今後の課題

本稿では、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した。そして港湾整備による走行経路の変化など輸送条件の変化が、ヤードトレーラーの燃料消費量に与える影響を定量的に把握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。

- コンテナヤードの大きさと形状から、燃料消費量を推定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。
- 同距離を走行した場合でも、コース形状の違いによって、燃料消費量に最大で 26% の差が生じた。
- クレーン台数やヤードの規模を変化させても、燃料消費量には大きな変化は見られなかった。

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今後の課題となる。

謝辞： 走行実験の実施にあたり、鈴与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) Ahn,K., Rakha,h., Trani,A ,Van Aerde,M. :

Estimating Vehicle Fuel Consumption and Emissions based on Instantaneous Speed and Acceleration Levels, Journal of Transportation Engineering Vol.128, No.2, pp182-190, 2002

- 2) 近藤美則, 小林伸治, 森口祐一: 車載型機器を用いた自動車排ガスと走行動態の計測, 環境研究 2003, No.129, pp92-99, 2003
- 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) 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ー運輸分科会報告書ー, 2000
- 5) 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
- 6) 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
- 7) 竹花有也: 自動車工学概論, 理工学社, pp176-190, 1995
- 8) 今泉哲夫, 田中雅文, 細井賢三: 重量ディーゼル車の燃費推定法の検討ー空気抵抗係数の推定ー, 自動車研究第 20 巻 11 号, pp493-496, 1998
- 9) 藤川達夫, 加賀美公彦, 浅野幸子: 重量ディーゼル車の燃費推定法の検討ーころがり抵抗係数の推定ー, 自動車研究第 20 巻 11 号, pp497-500, 1998
- 10) 赤井泉明, 平井洋, 細井賢三: 重量ディーゼル車の燃費推定法の検討ー走行抵抗推定値とエンジン燃費マップによる車両燃費の推定ー, 自動車研究第 20 巻 11 号, pp501-504, 1998
- 11) 今泉哲夫, 田中雅文, 細井賢三: 重量ディーゼル車の燃費推定法の検討ー空気抵抗係数の推定ー, 自動車研究第 20 巻 11 号, pp493-496, 1998

An Analysis of the influence of the Transportation Conditions on the Fuel Economy of the Trailers in Container Yard

Akito Murano, Takeshi Suzuki

Because port development consumes huge amounts of energy and materials, ports are one of the main sources of CO₂ emissions. In this study the relationship between the fuel economy of a container trailer in container yard and the running resistances of it was analyzed. Based on the analysis result, a model for estimating the fuel economy was developed, and its effectiveness was proved. The results are 1) The calculation of the running resistances led to the estimation of the fuel economy of the container trailers. 2) A model for estimating the fuel economy from the sizes and the shapes of container yards was developed. 3) The difference of running pattern resulted in the difference of the fuel economy up to 26%.