

国土技術政策総合研究所 研究報告

RESEARCH REPORT of National Institute for Land and Infrastructure Management

No.73

October 2023

リーファーコンテナエリアへのルーフシェード設置効果の
評価手法の提案

杉村佳寿・篠田岳思

Proposal for a Method to Evaluate the Effectiveness of Roof Shade Installation in
Reefer Container Areas

SUGIMURA Yoshihisa, SHINODA Takeshi

国土交通省 国土技術政策総合研究所

National Institute for Land and Infrastructure Management
Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Japan

リーファーコンテナエリアへのルーフシェード設置効果の 評価手法の提案

杉村佳寿*
篠田岳思**

要 旨

港湾においてエネルギー消費の大きな割合を占めるリーファーコンテナ（RC）の省エネ・脱炭素化対策に関する実証研究は少なく、研究と実践のギャップが港湾の意思決定者の課題となっている。本稿では、博多港の RC エリアに設置されたルーフシェードの設置効果を評価するシミュレーションモデルにより省エネ効果を推計し、その結果を用いて経済性を分析する方法を提案し、他地域への適用の可能性について評価した。気象庁データを用いることで季節別、地域別の省エネ効果の算定が可能となり、省エネ率は夏季より冬季が、温暖な地域より寒冷な地域が大きい可能性があることが明らかとなった。本稿の成果は港湾の意思決定者がルーフシェード導入の事前評価を行うための有力なツールとなるため、世界の港湾の省エネ・脱炭素化に貢献することが期待される。

キーワード：省エネ，脱炭素，リーファーコンテナ，ルーフシェード，コンテナターミナル

* 港湾・沿岸海洋研究部 港湾新技術研究官（港湾システム研究室長併任）
** 九州大学大学院工学研究院 教授
〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 国土交通省国土技術政策総合研究所
電話：046-844-5019 Fax：046-842-9265 e-mail: ysk.nil-46pr@gxb.mlit.go.jp

Proposal for a Method to Evaluate the Effectiveness of Roof Shade Installation in Reefer Container Areas

SUGIMUTA Yoshihisa*
SHINODA Takeshi**

Synopsis

Few empirical studies have examined energy conservation and decarbonization measures for reefer containers (RCs), which account for a particularly large share of energy consumption in ports, and the gap between research and practical application is a challenge for port decision makers. In this paper, a simulation model for evaluating the effect of installing roof shades in RC areas at Hakata Port was used to estimate the energy saving effect, which was then used to evaluate the economic benefits, and the possibility of applying the model to other areas was evaluated. The results indicated the possibility that the energy conservation rate would be larger in winter than in summer and in cold regions than in warm regions, because the effect of solar radiation is relatively small in summer and in warm regions. The results of this paper are expected to contribute to energy conservation and decarbonization in ports around the world, as they provide a powerful tool for port decision makers when making preliminary assessments of roof shade installation.

Key Words: Energy conservation, Decarbonization, Reefer container, Roof shade, Container terminal

* Research Coordinator for Advanced Port Technology, Port, Coastal and Marine Department

** Professor, Department of Marine Systems Engineering, Faculty of Engineering, Kyushu University
3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan

Phone : +81-46-844-5019 Fax : +81-46-842-9265 e-mail: ysk.nil-46pr@gxb.mlit.go.jp

目 次

1. はじめに	1
2. 先行研究の整理	1
3. ルーフシェードの概要と設置効果検証実験	2
3.1 博多港の概要	2
3.2 ルーフシェードの設計と運用システム	2
3.3 ルーフシェード設置効果の検証実験	3
4. 温熱シミュレーションモデル	5
5. 博多港における夏季の省エネ効果の推計	7
6. シミュレーションモデルの他季節及び他地域への適用	8
7. 経済性分析	9
8. おわりに	11
参考文献	12

1. はじめに

港湾は旅客や貨物の輸送の拠点であるためエネルギー消費量が多く、外部購入電力の消費を含めると化石燃料の消費、すなわち CO₂ 排出量も多い (Iris and Lam, 2019; Martínez-Moya et al, 2019; PIANC, 2019; Sifakis and Tsoutsos, 2021). このため、港湾における気候変動対策が注目されている (Alamoush et al, 2020). 港湾運営における環境への配慮は、もはや港湾競争力の重要な要素であり、港湾は計画と管理に社会的・環境的な配慮を取り入れることなく運営することはできない(Hales et al., 2016).

こうした背景から、港湾が取り得る気候変動対策についてはすでに多くの先行研究が行われており、アントワープ、ロッテルダム、ロサンゼルス/ロングビーチ、ハンブルク、シンガポールなど、環境に配慮した戦略を掲げる先進港もある (Acciaro, 2015; Aregall et al., 2018). 最新の研究を踏まえれば、港湾における気候変動対策がある程度整理されてきているが (Alamoush et al., 2020), 現実社会では、港湾業界で広く採用されている対策は依然存在せず、現在の気候変動対策の採用状況と国際機関が表明している野心的な排出削減目標との間には大きなギャップが残っている (Sornn-Friese et al., 2021). 港湾における環境対策にはかなりのコストがかかるが (Woo et al., 2018), そのコストを誰が負担するかが大きな課題であり (Martínez-Moya et al., 2019), 各国の環境政策アプローチや港湾ガバナンスに基づいた実施方法と役割分担が必要であるが、各港湾の特性に応じた効果や実施コストを踏まえた対策の組み合わせも重要となる (PIANC, 2019).

本稿では、省エネ・脱炭素対策に関連するリーファーコンテナ (RC) に着目する。港湾における RC のエネルギー消費の割合は大きいにもかかわらず (Martínez-Moya et al., 2019), RC に関する先行研究は少なく、研究課題となり得ることが指摘されている (Iris and Lam, 2019). また、Bjerkkan and Seter (2019) がサステイナブル港湾に関する詳細なレビューの中で主張しているように、実証的知見に基づく先行研究が少なく研究と実践のギャップが港湾の意思決定者を十分にサポートしていないため、対策導入時の課題、対策の実際の評価等の実証研究が必要とされている。本稿は、博多港の RC エリアへのルーフシェード (RS) 導入効果を実証的に示し、その効果を推計するシミュレーション手法を提案し、RS 導入の経済性を検証することで、他港での RS 導入の事前評価のための有力なツールを提供するものである。博多港では 2010 年に RS を導入し、その効果について実験計測を行っており、実験結果と比較することでシミュレーションの妥当

性が検証可能となる。本稿の新規性及び学術的貢献は、RC エリアへの RS 導入効果を実証的にまとめ、事前評価のための汎用的なシミュレーション手法を提案し、導入の経済分析に基づいて RS 導入の実現可能性を提示したことである。本稿の成果は、RS 導入を検討する港湾管理者やターミナルオペレーターなどの港湾の意思決定者を強力にサポートし、日本および世界の港湾における省エネルギー・脱炭素化に貢献するものである。

2. 先行研究の整理

Chen et al. (2013) や Sornn-Friese et al. (2021) は、港湾関連の CO₂ 排出を船舶、港湾、背後圏輸送によるものとしているが、コンテナターミナル (CT) でのエネルギー消費と CO₂ 排出量を詳細に検証した先行研究は少ない (Martínez-Moya et al., 2019). Peng et al. (2018) と Martínez-Moya et al. (2019) は、CT の CO₂ 排出量を詳細に検討しているが、荷役機械に焦点を当てたものであった。

港湾における環境対策については様々な先行研究があるが、エネルギー効率に焦点を当てた Iris and Lam (2019), 気候変動対策に焦点を当てた Bjerkkan and Seter (2019), Alamoush et al. (2020) など、包括的なレビュー研究が既に存在する。国際港湾協会 (IAPH) は港湾における気候変動関連問題に取り組むためのツールキットを公表しており (IAPH, 2020a; IAPH, 2020b), 国際航路協会 (PIANC) はエネルギー効率に関する報告書を公表している (PIANC, 2019). こうした文献から、潜在的な対策はある程度整理されていると見ることができ、Sornn-Friese and Poulsen (2016) は、港湾による環境対策の導入レベルは国や港湾によって異なるとし、Lam and Notteboom (2014) は、これらの違いには、地理的、経済的、規制、政治的文脈が重要であることを指摘している。

Acciaro et al. (2014) や Lam and Li (2019) は、環境課題に対応するためには港湾管理者の積極的な役割が必要であると主張したが、これは港湾ガバナンスモデルが環境への取組みに大きな影響を与えていることを背景としている (Munim et al., 2020). 1980 年代以降、世界中で港湾改革が進み (Brooks et al., 2017), 港湾管理者の役割の変化や Landlord モデルによる港湾運営の民営化が起こる中 (Monios, 2019), Landlord モデルの採用は CO₂ 排出量削減の重要なドライバーとなっている (Munim et al., 2020; Sornn-Friese et al., 2021). これは、コンセッション契約の 85% が環境条項を含んでいることから (Notteboom and Verhoeven, 2010), コンセッション契約が環境ガバナンスとしても機能しているためである (Van den Berg and De

Langen, 2014; Lam and Notteboom, 2014; Notteboom and Lam, 2018; Martínez-Moya et al, 2019).

また、個々の対策についても様々な先行研究があり、例えば最も有名な対策とされる陸電供給 (Bjerkkan and Seter, 2019) については、その実施効果や経済性を詳細に検討した文献として、既に Dai et al. (2019), Zis (2019) などが存在する。しかし一般的に RC エリアは CT におけるエネルギー消費の約 20~45% を占めているにも関わらず (Acciario and Wilmsmeier, 2015; van Duin et al., 2018; Iris and Lam, 2019), RC に関する先行研究は少ない (Iris and Lam, 2019). RC のエネルギー効率は、港湾やターミナルの戦略でほとんど言及されておらず、実際、ISO 50001 (エネルギーマネジメントシステム) の認証を受けている港湾は僅かである (Acciario and Wilmsmeier, 2015). 数少ない先行研究の中で、Rijsenbrij and Wieschemann (2011) は、カバーエリアが RC の加熱を避けることを示し、Werner (2014) は、RC エリアの屋根をソーラーパネルで覆うことを提案し、遮光と自家発電の相乗効果を主張している。van Duin et al. (2018) や Iris and Lam (2019) は、季節や時間帯によって必要な電力量が変動する RC に対してピークシェーピングを導入することで、効率的な港湾運営が実現すると主張している。RS に関する直接的な先行研究の中には、実験やシミュレーションによって定量的なエネルギー消費削減効果を示したものもあるが (Shinoda and Budiyo, 2016; Budiyo and Shinoda, 2020), 省エネメカニズムの詳細や CO₂ 排出削減効果、導入時の経済性については言及されていない。

3. ルーフシェードの概要と設置効果検証実験

3.1 博多港の概要

博多港は 1982 年に CT の運営を開始し、現在では国内第 6 位の約 100 万 TEU のコンテナ取扱量を誇る。国内では比較的新興港湾であり、柔軟な施策展開が特徴である (Sugimura et al., 2022). 例えば、1994 年に port community system を導入し、業務の効率化を図っている。また、博多港は日本でいち早く CT の運営を民営化した港でもある。第三セクターとして設立された博多港ふ頭株式会社は、2004 年に港湾管理者である福岡市から港湾施設の長期リースを受けている。しかし、博多港の最大の特徴は環境に配慮した港湾運営にある。気候変動対策としてカーボンニュートラルポート (CNP) 政策が推進される以前から、博多港はエコターミナルの実現を目指しており、日本を先導する形で環境への取組みを進め、2013 年には IAPH 港湾環境賞を受賞している。具体的な取組み例とし

て、ゴムタイヤ式ガントリークレーン (RTG) の電動化やハイブリッドストラドルキャリアの導入に加え、RC エリアに RS システムを導入している。RS が設置されたのは、博多港に 2 つある CT のうちアイランドシティ CT (HICCT) であり、政府による実証事業として実施された。

3.2 ルーフシェードの設計と運用システム

HICCT では、図-1 に示すように岸壁や RTG クレーン、RC、管理棟、照明施設等で電力が消費される。RC の電力消費増加の主な原因は、強い日射による熱貫流である。そのため夏場の周囲からの RC 壁面への熱侵入や日射を低減することで、電力消費を削減することができる。

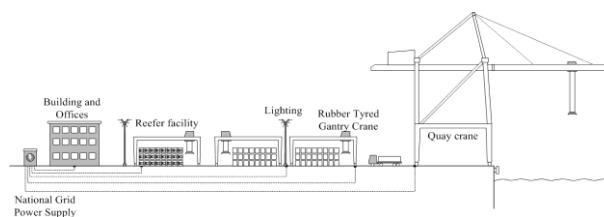


図-1 HICCT における電力消費先

オペレーション中、RC エリアは、ドライコンテナ蔵置ヤードと同様の条件に保たれ、すなわち RC は直射日光に晒される。晴天時には、この直射日光によって RC の表面温度が上昇する。その結果、熱が RC 内に侵入し、冷蔵システムによる余分な熱の除去が必要となる。除熱に必要なエネルギーは、冷蔵システムの負荷率によって消費されるエネルギーに等しい。

RS は、直射日光から RC を保護するために設計された。RS の基本設計は、建物で使用される通常の日除けに似ているが、この技術の革新的な点は、RC 蔵置エリア用の開閉式屋根として設計されていることである。屋根は布製キャンバスでできており、フレーム構造体に取り付けられている。さらに、フレーム構造体は互いに連結された 6 組の折り畳み式屋根に分割され、水平軌道の機械的な移動によって屋根を格納する。このフレーム構造の移動は、端末操作システムによって制御される電動ウィンチによって駆動される。

通常、屋根は閉じられており、ターミナルオペレーションシステム (TOS) からの作業指示を受けて開く。HICCT には、RC 蔵置ヤードの 2 つのスロットに開閉式 RS が導入された。図-2 に RS の外観と機能設計を示す。RS の操作は、図-3 に示すように CT で使用されている TOS と統合されている。コンテナトレーラーがゲートでチェックされると、コンテナデータが TOS に送られ、TOS

は自動的に荷役機械を配置し、コンテナの位置を決定する。その後、TOS は、適切な荷役機械に作業指示を送り、荷役機械の到着前に屋根が自動的に開く仕組みとなっている。



図-2 RS の外観と機能設計

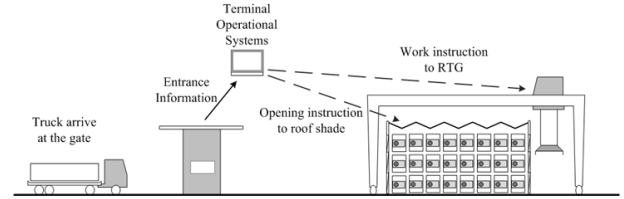


図-3 RS のオペレーションメカニズム

3.3 ルーフシェード設置効果の検証実験

HICCT では、RS 設置効果を検証し、コンテナの熱移動特性を評価するため、2 種類の実験を行った。実験の概要を表-1 と図-4 に示す。また、図-5 に示す通り、リーファークラウドが西向き、ドアが東向き、一方の側壁は南向き、もう一方の側壁は北向きである。

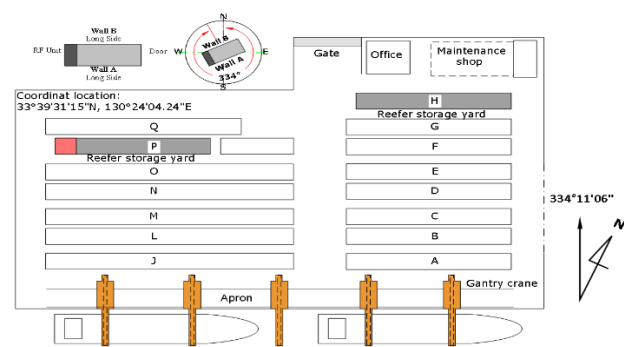
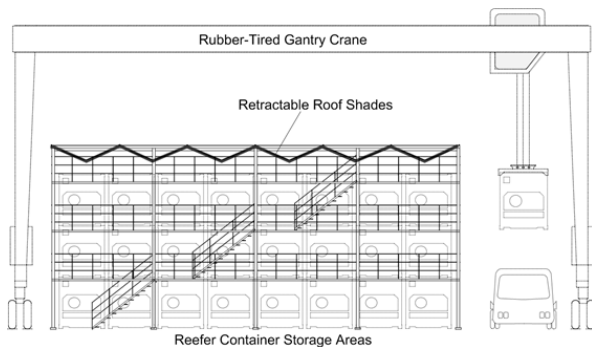
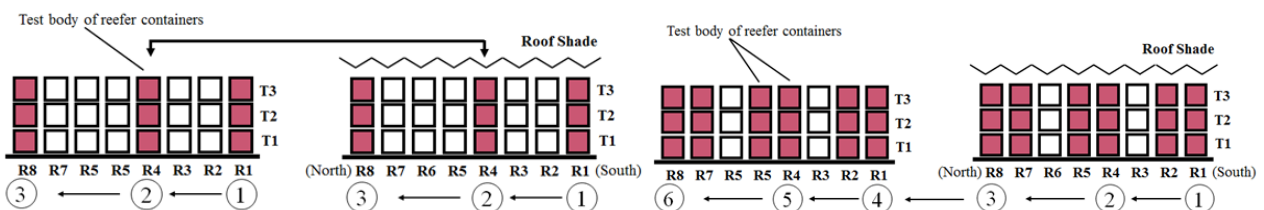


図-5 HICCT のレイアウトと向き

表-1 RS 設置効果検証のための実験概要

	実験 1	実験 2
目的	RC エリアへの RS 設置効果を、RS の有無の場合を直接比較することで検証。	RC 間の熱移動特性を検証。
期間	2013 年 7 月～10 月 2014 年 7 月～10 月	2015 年 7 月～10 月
手順	6 つの RC で 3 段の RC で構成される 2 つのグループを作成。 1 番目のグループを RS のない RC 保管ヤードに設置、2 番目のグループを RS のあるヤードに設置。 - 位置を南側(R1)、中側(R4)、北側(R8)の順に移動。 - 気象要因を考慮してデータを取得、保存。	6 つの RC で 3 段の RC で構成される 2 つのグループを作成。 - 最初に RS のある RC 保管ヤードに 2 つのグループを設置。 - 位置を南側(R1&R2)、中側(R4&R5)、北側(R7&R8)の順に移動。 - 気象要因を考慮してデータを取得、保存。 - RS ありの実験終了後、RS なしで同様の実験。



実験 1

実験 2

図-4 実験の手順

測定対象として、同じメーカー、製造年の長さ 40 フィートの 6 つのハイキューブ RC が使用された。構造は天井壁、側壁、床、隅の金属鋳造基礎で構成されており、RC の内部空間は主に貨物倉として機能し、床には端に取り付けられた冷蔵システムからの空気を循環させる機能を有する T 型グレーチングが備えられていた。RC の壁は、アルミニウム、ポリウレタン、ステンレス鋼の 3 つの材料層で構成され、厚さはそれぞれ 0.8, 90, 0.9mm、熱伝導率はそれぞれ 204, 0.03, 16 W/mK であった。メーカーから入手可能な設計デー

タによると、最低内部温度は -18°C 、最高外部温度は 38°C である。全体の熱伝達率は $1,904\text{ kcal/h}$ 、総括伝熱係数は 34 kcal/h である。外面は平らなアルミニウムパネルで構成されており、全ての表面は白色に塗装されている。

実験で環境データを収集するために使用される装置は、日射センサー、電力計、熱電対、気象計であり、全ての装置からの測定データは、様々な気象条件下で毎分記録された。実験結果を図-6～図-9 に、実験結果のまとめを表-2 に示す。

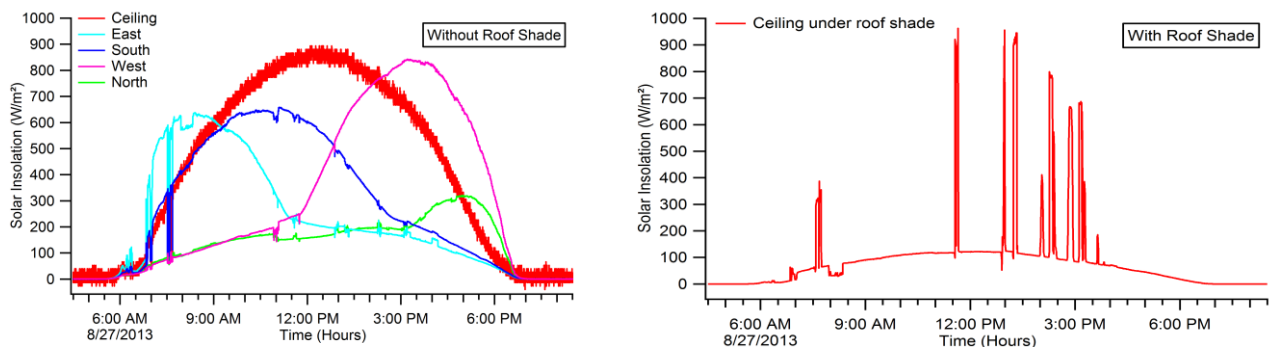


図-6 RS ありなしの場合の日射量の比較 (左：なし、右あり)

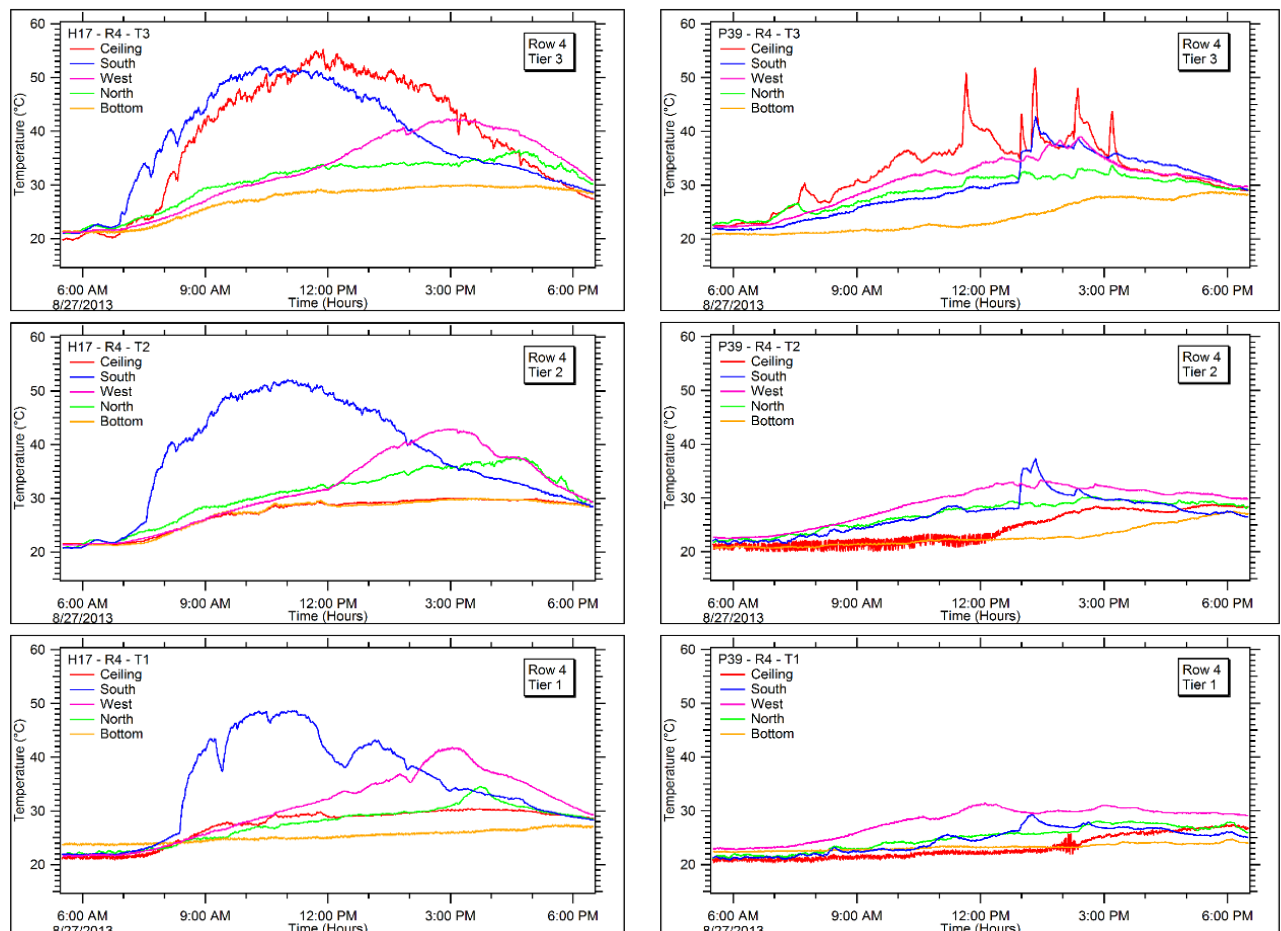


図-7 RS 有り無しの場合の温度プロファイルの比較 (左：なし、右あり)

表-2 実験結果のまとめ

項目	実験結果
日射量	- RS がない場合、最大日射量は天井面と西面で測定された。最も日射量が多かったのは天井面で午後 12 時、西面では午後 3 時 30 分。東面と南面では、それぞれ午前 8 時 30 分と午前 10 時 30 分にはほぼ同じ最大日射量を計測。 - RS の折畳み構造の隙間から太陽光が入り込むため、午後には日射強度の変動が発生。
コンテナ壁面温度	- RS がない場合、表面温度の上昇は最上段で顕著。最下段を除く全ての表面温度が著しく上昇し、ピークに到達。天井面は午前 8 時から午後 6 時までほぼ終日高温を示し、他面よりも高温。底面の温度は最も低く、気温とほぼ同じ。 - RS がある場合、全ての RC 層で表面温度が低下。最上段では、天井面の表面温度の低下が顕著。各表面は主に RS 上の日射量の傾向と同様。RS フレームの隙間から入る日射量が高いため、温度変動が数回発生。下面の平均温度は気温と同じであるため、RS 導入による大きな温度低下はなし。
電力消費	- 消費電力は高域と低域に分類され、RS なしの場合の最上段と中段の RC の消費電力は高域、それ以外の RC の消費電力は低域。したがって、RS はエネルギー消費を削減する。 - 中間層が最も消費電力を削減したのは、上下の位置から熱保護が有利に働いたことが理由。
RC 間の熱相互作用	- RC 間の熱相互作用を 2 列の隙間で観察。熱成層は上面から下面にかけて顕著。向かい合う面は、上段から下段にかけて熱成層が発生する傾向。 - 暖かい空気は浮力の影響を受けて上昇する傾向があり、床と天井の間に正の垂直温度勾配が発生。

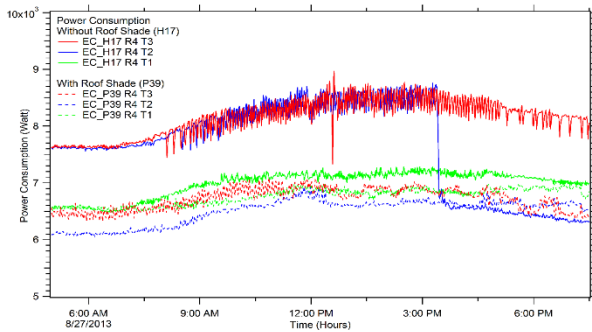


図-8 RS ありなしの場合の消費電力

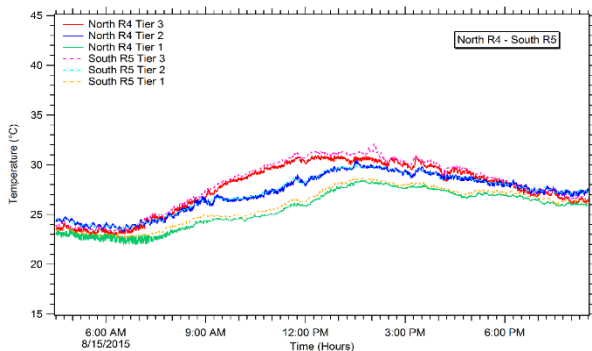


図-9 RC 壁面の熱特性

4. 温熱シミュレーションモデル

モデルでは、RC の表面と周辺環境との間の熱力学的相互作用を熱伝導プロセスを用いて表現する。RC の熱影響要因には、日射による輻射熱伝達、暖められた空気による対流熱伝達、RC 筐体や断熱材の熱伝導、RC 庫内の対流熱伝達があり、更に RS が吸収した熱を RC 側に再輻射

する熱影響、RC 間の相互の熱の授受も考慮する必要がある。シミュレーション対象及び熱影響要因が課題となる箇所を図-10 に、考慮する構成材及び熱移動の特徴について表-3 に示す。モデルは、計算領域を RC の内外部にある空気の流れと RC を構成する内外材、断熱材等の部分に分けて相互の熱の授受を考慮した 2 次元の流体固体熱連成モデルとなる。支配方程式は以下に示す通りである(Patankar, 1980)。

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{v} + \mathbf{f}_B \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \int_V \rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla T \right) dV \\ = \int_V k \nabla^2 T dV + \int_S (q_R + q_S) dS \end{aligned} \quad (3)$$

式(1)は連続の式、式(2)は運動方程式、式(3)はエネルギー保存式であり、 $\mathbf{v}$ は流速ベクトル、 $\mathbf{f}_B$ は外力、 μ は粘性係数、 p は静圧、 ρ は密度、 C_p は比熱容量、 T は気体及び固体の温度、 t は時間、 k は熱拡散係数、 q_R は輻射による内部エネルギー、 q_S は日射エネルギーである。式(2)では、乱流には k-ε 乱流モデルを考慮し、 $\mathbf{f}_B$ には流体の冷温熱による浮力を考慮するために式(4)に示す熱膨張による密度の変化を温度の変化として表すブシネスク近似を用いる (Spalding, 2013)。

$$\mathbf{f}_B = -\Delta \rho \mathbf{g} = -\rho_{ref} \beta (T - T_{ref}) \mathbf{g} \quad (4)$$

ここに、 β は熱膨張係数、 ρ_{ref} 及び T_{ref} は境界壁面での密度と温度、 $\mathbf{g}$ は重力加速度である。

また、式(3)に含まれる q_R は、路面や他の RC からの輻射、RS からの再輻射を考慮するために式(5)を用いる。

$$q_R = \varphi_R \varepsilon_R \sigma (T_R^4 - T^4) \quad (5)$$

ここに、 φ は形態係数、 ε は放射率、 σ はステファン・ボルツマン定数を示し、サフィックスなしは輻射を受ける側、サフィックス R は輻射側を示している。

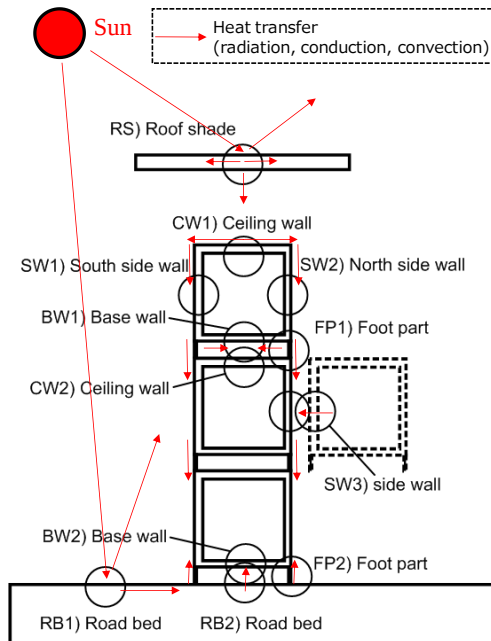


図-10 熱影響要因が課題となる箇所

シミュレーションの計算領域は、図-11に示すように、外気、外枠、断熱材、内枠の3つの構造層からなるコンテナ構造物、コンテナ内の冷氣、地面で構成され、350,200セルに分割する。空気、RS、RCの外枠、断熱材、内枠、地盤の材料特性、放射特性、初期温度等のパラメータを設定し、気温、日射量、風速を入力値とすることで、コンテナ外表面の温度の経時変化が予測可能となる。

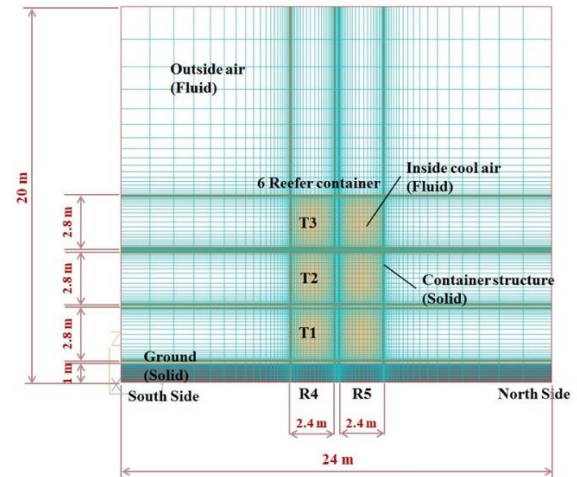


図-11 シミュレーションモデルの計算領域

表-3 シミュレーションで考慮される構成材及び熱移動の特徴

略	構成材	素材	熱移動の特徴
RS	ルーフシェード	キャンパス布地	日射エネルギーを吸収し布地内部では熱伝導により拡散。近傍外気は対流熱伝達を考慮し、RSが吸収した熱エネルギーは天井壁体や側面壁体に再輻射。
CW1	上段の天井壁体	外壁材はアルミ合金のパネル材で、表面に白色系塗装。内壁材は無塗装のステンレスのパネル材。両壁材内部空間は断熱用ポリウレタンが充填。	日射エネルギー及びRSからの再輻射エネルギーを吸収し壁体内部に熱拡散。近傍外気は対流熱伝達と外部への輻射熱伝達を考慮。コンテナ内部の空気は壁体との対流熱伝達と内部壁面への輻射熱伝達を考慮。
CW2	中段の天井壁体		外壁材とコンテナ底部壁体の輻射熱伝達とこれらの間の空気との対流熱伝達を考慮。
SW1	南側壁体		熱移動は天井壁体と同様だが、外壁材の輻射はRSと日射により暖められた路盤表面からの影響も考慮。
SW2	北側壁体		
SW3	相対コンテナの壁体		熱移動は天井壁体と同様だが、外壁材は相対コンテナの輻射熱伝達、コンテナの間の空気との対流熱伝達を考慮。
FP1	上段の足元材		RS及び日射により暖められた路盤表面からの輻射の影響を考慮。足元材、天井壁体、底部壁体、路盤表面との輻射熱伝達と空気との対流熱伝達を考慮。
FP2	下段の足元材		
BW1	上段の底部壁体	内壁材はT字型材で押出し成形されたアルミ合金、外壁材はコルゲート状のアルミ合金で防熱塗装。両壁材の内部空間にウレタン材が充填。	壁体内では熱拡散、底部壁体から下段の天井壁体への輻射、両壁体間の空気との対流熱伝達を考慮。最下段のRCは、底部壁体と路盤表面との輻射熱伝達とこれらの間の空気の対流熱伝達を考慮。
BW2	下段の底部壁体		
RB1	蔵置ヤード路盤	コンクリート	路盤が日射エネルギーを吸収し路盤内部では熱拡散。近傍空気は対流熱伝達を考慮し、路盤が吸収した熱エネルギーはRC側面の壁体に再輻射。路盤と底部壁体の間の輻射熱伝達とこれらの間の空気の対流熱伝達を考慮。
RB2	外部路盤	アスファルト	

周囲のRCにはディリクレ境界条件を用い、均一な入力速度を設定した。RCのすべての壁には滑止めの境界条件を仮定し、入口温度は時間と共に変化し壁は断熱的であると仮定した。さらに、支配方程式を閉じるためにk-ε乱流モデルを使用した。シミュレーションには流体の流速、圧力、温度変化等の数値計算汎用ソフトウェアPHOENICS (CHAM-Japan社) を用い、有限体積法 (スハス, 2009) により数値解析を行う。結果の一例として、RSありなしの場合の最上段のRC外表面の温度の経時変化を図-11に示す。日射量等のシミュレーションの入力値は実験計測値を用い、図-12の結果は計測値との比較を示している。特に天井面や午後の時間帯において差が生じている部分もあるものの、シミュレーション結果は概ね計測値と近い傾向を示している。

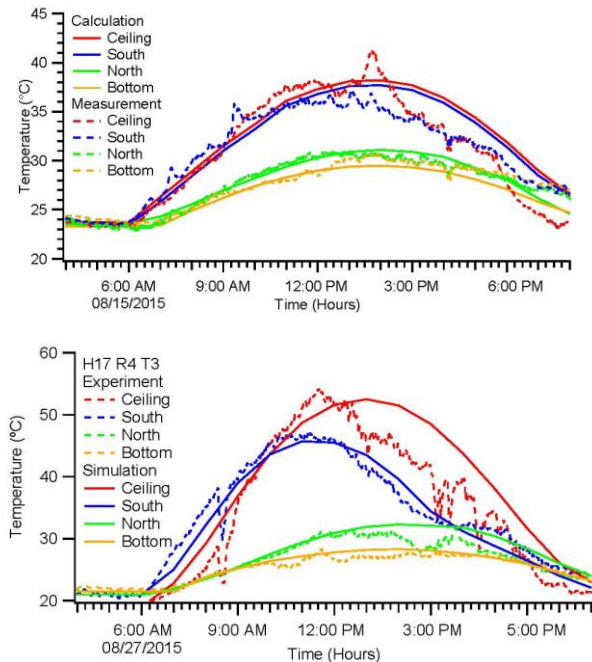


図-12 シミュレーション結果例
(上：RSあり，下：RSなし)

5. 博多港における夏季の省エネ効果の推計

RC 壁面からの熱貫流量は設定温度を維持するためにRCが消費するエネルギーに等しく、RC壁面の外面と内面の温度差から求めることができる。RC壁面の熱貫流量は式(6)-(8)を用いて算出する。

$$q_{wall} = K \times A \times (\Delta T) \quad (6)$$

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha} + \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_0}} \quad (7)$$

$$q_{total} = q_{Ceiling} + q_{South} + q_{North} + q_{Bottom} \quad (8)$$

式(6)において q_{wall} はあるRC壁面の熱貫流量(W)であり、 A は壁面の面積 (m^2)、 ΔT はRCの内面と外面の温度差を表す。RC壁面全体の熱貫流量 K は式(7)で算出され、 λ_i は各材料の熱伝導率、 x_i は断熱材の厚さ、 α_0 と α はそれぞれ外気層と内気層の対流熱伝達係数で、それぞれ $23W/m^2K$ と $9W/m^2K$ である。計算により、 K は $0.44W/m^2K$ となる。式(8)において、 $q_{Ceiling}$ 、 q_{South} 、 q_{North} 、 q_{Bottom} は、それぞれ天井、南壁、北壁、底壁からの熱貫流量であり、式(8)により各壁からの総熱貫流量 q_{total} を算出することができる。シミュレーションで得られるRSがある場合とない場合のRC表面温度の経時変化から熱貫流量を算出し、RC内の温度を維持するために必要な消費電力を求めることができる。RSのありなしでの消費電力の差が省エネ効果となる。ただし、本研究においては、冷凍機の成績係数(Coefficient of Performance ; COP)の外気温依存性については明示的に考慮していない点には留意が必要となる。

RSの設置により段積み方向への温熱影響があることが実験計測からも確認されているため、省エネ効果の算定に当たっては、RCの蔵置場所による消費電力の違いを考慮する必要がある。ベイの中央に位置するスロットR4の最上段T3に蔵置されたRCは、天井からの日射影響を強く受け、かつベイの境界に当たるスロットR1やR8からの温熱影響が小さいため(図-13参照)、この蔵置位置を基準値とし、各蔵置位置での消費電力に関しては式(9)に示す消費電力比 RE_{t4} として算出し、式(10)に示す RE_{t4} を段積み方向に平均したTREのRSありなしの場合の差(TREの差)を省エネ率として算出する。

$$RE_{t4} = \frac{EC_{t4} - EC_{34}}{EC_{34}} \times 100 \quad (9)$$

$$TRE = \sum_{t=1}^3 \frac{RE_{t4}}{3} \quad (10)$$

ここに、 t は蔵置場所での段数、 EC_{t4} はスロットR4、 t 段目のRCの消費電力である。

なお、消費電力費はスロット毎に詳細に計算することも当然可能であるが、消費電力の減少はスロットR1(南側)で最小、スロットR8(北側)で最大となり、スロットの平均は中央に位置するR4の値と概ね一致することが実験計測で確認されていることから、汎用化に向けてできる限り簡易な方法とすることを念頭に、このような方法としている。

以上より、シミュレーションモデルを用いてRS設置の省エネ効果を算定するが、有効性の確認には実験結果

との比較が必要となる。しかし、実験設備の制約から、RS ありとなしの場合の実験日を別日にせざるを得ず、RS ありの実験は 2015 年 8 月 15 日に、RS なしの実験は同年 8 月 27 日に実施したが、共に晴天であったとはいえ日射量等の条件が異なるため、厳密には実験結果との比較によりシミュレーションによる RS の省エネ効果算定の有効性を確認できる訳ではない。したがって、シミュレーションの有効性と実際の省エネ率は、実験結果と 2 つの日の入力値を用いたシミュレーション結果を組合せながら検証する必要がある。表-4 には実験とシミュレーションから得られた省エネ効果の推定値を示す。

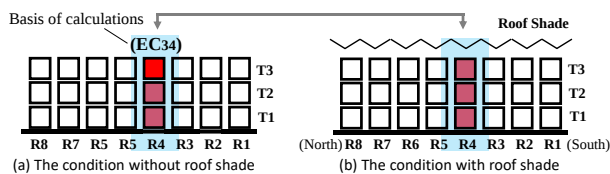


図-13 省エネ効果の算定に用いる RC の位置図

表-4 実験とシミュレーションから得られた省エネ効果

		実験結果		シミュレーション 1	
RS なし		2015 年 8 月 27 日		2015 年 8 月 27 日	
RS あり		2015 年 8 月 15 日		2015 年 8 月 15 日	
項目		q_{total}	RE	q_{total}	RE
RS	T3	2,094	0	2,068	0
なし	T2	1,770	-15.5	1,780	-13.9
し	T1	1,749	-16.5	1,773	-14.3
RS	T3	1,816	-13.3	1,785	-13.7
あ	T2	1,620	-22.6	1,587	-23.3
り	T1	1,425	-31.9	1,481	-28.4
TRE の差			-12.0		-12.4
		シミュレーション 2		シミュレーション 3	
RS なし		2015 年 8 月 15 日		2015 年 8 月 15 日	
RS あり		2015 年 8 月 15 日		2015 年 8 月 15 日	
項目		q_{total}	RE	q_{total}	RE
RS	T3	2,179	0	2,157	0
なし	T2	1,808	-17.0	1,838	-14.8
し	T1	1,789	-17.9	1,786	-17.2
RS	T3	1,785	-18.1	1,662	-22.9
あ	T2	1,587	-27.2	1,630	-24.4
り	T1	1,481	-33.0	1,606	-25.5
TRE の差			-14.1		-13.6

実験結果では、RS なしとありの場合の実験（ただし別日に実施）結果から直接測定されたTREの差は 12.0%であった。シミュレーション 1 は、実験日に測定した気温、日射量、風速を入力値とした RS ありとなしの場合のシミュレーション結果であるが、TREの差は 12.4%と実験結果と近い値となっており、これによりシミュレーション

の有効性が確認できる。続いて、シミュレーション 2 は、入力値である気温、日射量、風速の測定値を RS なしとありで同日とした場合のシミュレーション結果であるが、このTREの差 14.1%がシミュレーションに基づく最終的な RS 設置による省エネ効果となる。シミュレーション 3 は、汎用性を高めるため、実験による測定値ではなく容易に入手できる気象庁の気温、日射量（福岡観測所、北緯 33 度 34.9 分、東経 130 度 22.6 分）を入力値（気温は式(3)左辺の、日射量は式(3)右辺の入力値）とした場合のシミュレーション結果である。シミュレーション 2 と比較すると、 q_{total} が段積み方向に平均化されているが、TREの差は 13.6%とシミュレーション 2 と近い値となる。以上より、気象庁のデータは RS の省エネ効果の推定に使用できると判断した。

6. シミュレーションモデルの他季節及び他地域への適用

博多港の夏季の省エネ効果を推計する本稿のモデルを他港でのRS導入の事前評価のためのツールとするためには、気候条件の異なる他の季節や他の地域の省エネ効果を推計できることが前提となる。前章で説明したシミュレーションモデルは博多港における夏季の計測データを入力値とし、実験結果と比較することで妥当性を確認した上で、気温と日射量について気象庁データを入力値とした場合でも概ね同様の結果が得られることからモデルの汎用性の可能性を示している。本章では気象庁データを用いて、シミュレーションモデルを他の季節及び他港に適用し、省エネ効果の変化について計算する。博多港の夏季計測データのように詳細な各種入力値がないため、複雑な気候特性を考慮できる訳ではなく、簡易的な推計にならざるを得ないという限界はあるものの、季節特性や地域特性について一定の傾向を把握できる可能性はある。本章では、博多港を含む気候特性が異なると考えられる図-14に示す6港について、1, 4, 7, 10月の中日に最も近い晴天時の1日分の気温、日射量の気象庁データ（図-14に示す観測所のデータ）を用いたシミュレーションを実施する。

まず、6港の入力値の違いを確認するため、各月の気温を図-15に、日射量の最高値を図-16に示す。なお、いずれについても最高値が記録される時刻は港湾によって異なる。気温は7月、10月、4月、1月の順に、日射量は7月、4月、10月、1月の順に高く、緯度が低いほど気温、日射量共に高い傾向にある。

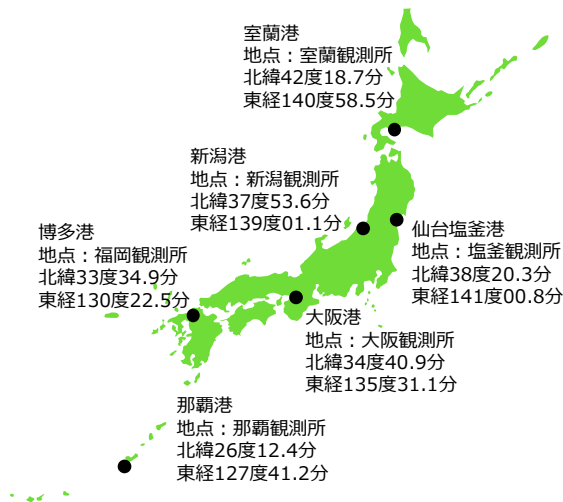


図-14 分析対象港湾

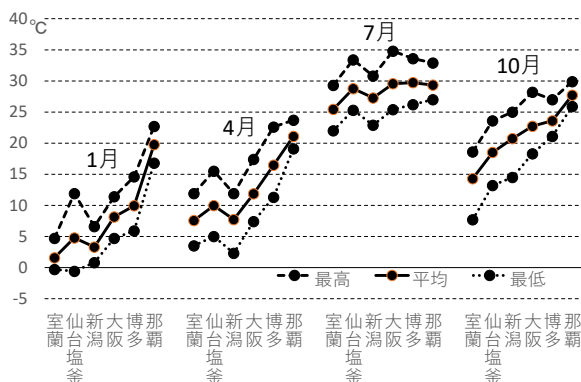


図-15 各港湾における月別の気温

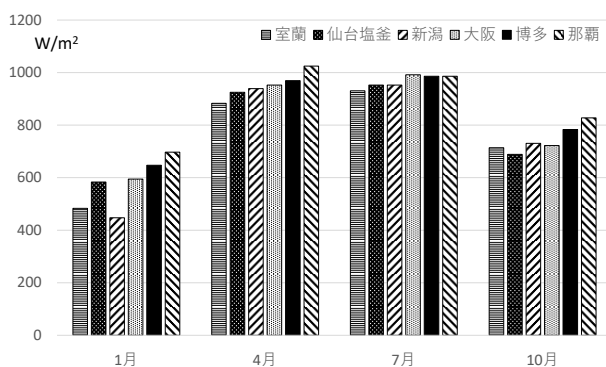


図-16 各港湾における月別の日射量の最高値

シミュレーション結果として TRE の差を図-17示す。省エネ率である TRE の差は、季節別では1月が最も大きく、4月及び10月が同程度で続き、7月が最も小さい。地域別では、室蘭港が最も大きく、概ね緯度が下がるに連れて小さくなり、那覇港が最も小さい。すなわち、RSによる省エネ効果は夏季よりも冬季のほうが割合としては大

きく、温暖な地域よりも寒冷な地域のほうが大きい。

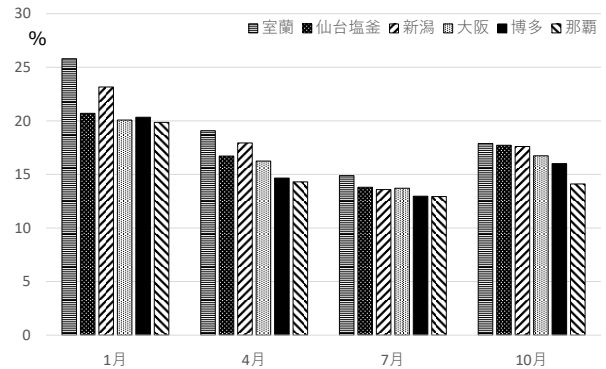


図-17シミュレーションによる季節別港別の TRE の差

なお、本章では、アクセスが容易な気象庁データとして、気温、日射量を用いてモデルを他の季節や他地域へ適用しているが、雲量や風速、降水量、積雪などの様々な気象要素が季節や地域により異なる中、季節や地域ごとの異なる気候条件を詳細に考慮できている訳ではない点には留意が必要となる。

7. 経済性分析

RS設置の可否を判断するためには、その経済的な効果と費用を比較衡量して評価する必要がある。そのため、本節では、博多港におけるRS設置による季節別の省エネが電気料金とCO₂排出量に与える影響について検証する。電気料金についてはRSが設置されたHICCT全体を考慮する。

まず、RSの設置による省エネ量は以下の式で算定できる。

$$ES = \sum_{i=1}^{12} es_i = \sum_{i=1}^{12} (P_i \cdot TRE_i \cdot S_i) \quad (11)$$

$$RES = \frac{ES}{\sum_{i=1}^{12} TP_i} \quad (12)$$

ここで、 ES はRS設置による年間省エネ量(kWh)、 es_i は*i*月の省エネ量(kWh)、 P_i は*i*月のRCの消費電力(kWh)、 TRE_i は*i*月のRS設置による省エネ率(%)、 S_i は*i*月の日照時間の割合(%)、 RES は年間の省エネ割合(%)、 TP_i は*i*月の全体の消費電力(kWh)である。

電気料金は、30分間の消費電力に応じて契約電力が決まる基本料金と消費電力に応じて徴収される電力量料金からなり、ICCTの場合電力量料金単価は、ピーク（夏季7月から9月の13時から16時）15.32円/kWh、夏季昼間（夏

季の8時から22時までのピーク時間以外) 13.13円/kWh, 昼間 (8時から22時までのピーク時間以外) 12.28円/kWh, 夜間 (ピーク及び昼間以外) 8.59円/kWhと時間帯や季節によって異なる。RS設置による省エネが電気料金の削減は以下の式で算定できる。

$$CB = \sum_{i=1}^{12} \left(C_i^b \cdot \frac{P_x}{TP_x} \cdot TRE_x + es_i \cdot U_i \right) \quad (13)$$

$$RCB = \frac{CB}{\sum_{i=1}^{12} (C_i^b + C_i^u)} \quad (14)$$

ここで、 CB はRS設置による電気料金削減量(円), C_i^b は*i*月の基本料金(円), P_x , TP_x 及び TRE_x はRS設置後に消費電力が最大となる*x*月の全体の消費電力(kWh), RCエリアの消費電力(kWh)及びRS設置による省エネ率(%), U_i は*i*月の日照時間の各料金を考慮した加重平均電力量料金 (円/kWh), RCB はRS設置による電気料金削減率(%), C_i^u は*i*月の電力量料金(円)である。なお、基本料金の削減効果は本来であれば日単位でのピーク消費電力量が考慮されるべきであるが、月別データを使用している関係上、式(13)の計算方法としている。

CO₂排出削減量は以下の式で算定できる。

$$REM = \sum_{i=1}^{12} es_i \cdot ef \quad (15)$$

ここで、 REM はRS設置によるCO₂排出削減量(t-CO₂), ef は電力のCO₂排出係数(t-CO₂/kWh)である。

前節では季節毎の代表月の TRE_i しか算出していないため、 TRE_i として12月～2月 (冬季) は TRE_1 , 3月～5月 (春季) は TRE_4 , 6月～8月 (夏季) は TRE_7 , 9月～11月 (秋季) は TRE_{10} を用いることとし、 S_i としても月別ではなく3カ月間毎の値を用いることとする。また、同様に4分割した際にRS設置後消費電力が最大となる期間は6月～8月であるため、 TRE_x としては TRE_7 を、 S_{rx} としても6～8月のRCエリアの電力消費割合を用いることとする。なお、現在ICCTではRSシステムは稼働しておらず、入手したICCTの消費電力と電気料金はRSがない場合のものとなる。結果を表-5に示す。

RSの消費電力は夏場のほうが大きい、省エネ率は夏場が最も小さい。さらに、日照時間の割合も影響するため、RSによる省エネ量の大きさは、冬季を除けば大きな違いはないものの、春季、秋季、夏季、冬季の順となる。当然、電力量料金やCO₂排出の削減量もこの順となるが、基本料金の削減はRS設置後消費電力が最大となる夏季の削減量が年間を通じて適用されることになる。結果的に、年間4.1%、454万円の電気料金の削減、1.3%、49.9t-CO₂のCO₂排出削減量に繋がるのが分かった。RS設置による電気料金の削減に関しては、ピークカットを通じた基本料金の削減インパクトのほうが大きい。CTの消費電力は、RC以外は季節によって大きく変動しないが、RCはもともとシェアが大きいことに加え、夏場にはさらに増加するため、電気料金の削減への影響という点では、

表-5 ICCTの省エネ、電気料金削減、CO₂削減効果

項目	12～2月	3～5月	6～8月	9～11月	年間	根拠
ICCT全体の電力消費 (a)	1,554,389 kWh	1,700,084 kWh	1,841,513 kWh	1,687,980 kWh	6,783,966 kWh	ICCTの2020実績
うちRCの電力消費 (b)	707,622 kWh	897,515 kWh	1,055,265 kWh	887,274 kWh	3,547,676 kWh	ICCTの2020実績
割合	45.5 %	52.8 %	57.3 %	52.6 %	52.3 %	b/a
RSによる省エネ率 (c)	20.3 %	14.7 %	13.0 %	16.0 %	15.5 %	図-17
日照時間の割合 (d)	16.3 %	28.4 %	24.0 %	24.5 %	23.3 %	気象庁データ
RSによる省エネ量 (e)	23,461 kWh	37,367 kWh	32,823 kWh	34,803 kWh	128,454 kWh	b×c×d
割合	1.5 %	2.2 %	1.8 %	2.1 %	1.9 %	e/a
ICCT全体電気料金 (f)	25,937,937円	27,194,943円	30,040,350円	27,751,893円	110,925,123円	ICCTの2020実績
うち基本料金 (g)	10,105,286円	10,105,286円	10,105,286円	10,105,286円	40,421,146円	ICCTの2020実績
うち電力量料金 (h)	15,832,651円	17,089,657円	19,935,064円	17,646,606円	70,503,978円	ICCTの2020実績
加重平均電力量料金 (i)	12.00 円/kWh	11.67円/kWh	12.24円/kWh	12.18円/kWh	12.01円/kWh	*1
RSによる基本料金削減 (j)	750,712円	750,712円	750,712円	750,712円	3,002,849円	e×g×b/a
割合	7.4 %	7.4 %	7.4 %	7.4 %	7.4 %	j/g
RSによる電力量料金削減 (k)	274,593円	437,507円	402,770円	423,751円	1,538,621円	e×i
割合	1.7 %	2.6 %	2.0 %	2.4 %	2.2 %	k/h
RSによる電気料金削減 (l)	1,025,305 円	1,188,220円	1,153,482円	1,174,463円	4,541,470円	j+k
割合	4.0 %	4.4 %	3.8 %	4.2 %	4.1 %	l/f
ICCT全体CO ₂ 排出量 (m)	858.5 t-CO ₂	919.1 t-CO ₂	954.2 t-CO ₂	891.9 t-CO ₂	3,623.6 t-CO ₂	ICCTの2020実績
RSによるCO ₂ 排出削減 (n)	8.6 t-CO ₂	13.6 t-CO ₂	12.0 t-CO ₂	12.7 t-CO ₂	49.9 t-CO ₂	e×CO ₂ 排出係数
割合	1.0 %	1.5 %	1.3 %	1.4 %	1.3 %	n/m

*1 (期間内の各月・各時間帯別の電力料金×当該月・時間帯における日照時間) / 期間内の全日照時間

夏場の省エネ率が最も重要となる。この点、夏季は省エネ率が季節別では最も小さいため、ピークカットへの影響も相対的に小さくなる。逆に、夏場の省エネ率が大きければ、年間を通じて基本料金の削減効果が高まることになる。

本研究では、博多港以外の詳細な消費電力を入手していないが、以上を踏まえると、高温となる低緯度の港湾程ももとのRCの消費電力が大きい一方で、RS設置による省エネ率は小さくなるため、省エネ量の割合では均一化される方向となると考えられる。電気料金やCO₂排出量でも同様の傾向となると考えられるが、基本料金への影響は夏季の省エネ率が重要となる点を踏まえれば、省エネ率の高い高緯度の港湾ほど、RS設置による電気料金への影響は大きいことになる。

省エネの観点からは、他に実務的な対策が学術的にも十分に示されていないことから、HICCTの場合1.9%の省エネとはいえ、RSの設置は数少ないRC関係の省エネ対策として政策的に推進する価値は高い。ただし、設置の経済性次第で、その推進方法が変動する。表-5の結果が示す通り、ピークカットを通じた基本料金の低減には日照割合が影響しないため、RS設置の効果は電気料金に最も顕著に現れる。電気料金の削減はCT運営者にとっての経済効果となるが、初期投資との関係でビジネススペースでの設置の可否が検証できる。電気料金の削減は、3.5万TEUのRCを取扱うHICCTの場合で454万円であり、社会的割引率を4%、維持管理費用がないと仮定して耐用年数12年（設置者へのヒアリングに基づくもの）で回収できる初期投資額は4,262万円となる。HICCTではRC全体面積に設置した場合は20億円（実際にはRCエリアの13%に相当する2ベイ分の設置で2.6億円の初期投資）と想定されるため、約50分の1の費用、1ベイ当たり278万円でなければビジネススペースでの導入が困難となる。なお、設置当時の担当者へのヒアリングによれば、安全面等に配慮して重厚な設計となっているため、構造的な簡素化は可能とのことであり、費用低減の可能性は十分にある。

博多港のRS設置は国土交通省の実証実験として実施され、必要経費は全て国費で賄われた。港湾運営会社である博多港ふ頭株式会社が実証実験以降、自らの負担でRSを追加的に設置していないことから、現実的にはビジネススペースでの設置は困難である。省エネ効果の存在とビジネススペースでの導入は困難という課題が明確になったことに加え、RS導入のためには研究による安価な構造の開発、あるいは公共の支援のいずれかが必要となることについても実証事業の成果として捉える必要があるだろう。今後は、効果的な構造・材料による省エネ効果の

最大化と初期費用低減のための技術開発への支援や、それでも経済性が確保できない場合の財政的な支援を政策として担保していくことが必要となる。

また、CO₂削減効果としては、既に電化の進んでいる博多港ICCTでさえ表-3に示す通り1.3%とかなり限定的であり、電化が進んでいない他港のCTではRCが占めるCO₂排出量の割合が小さくなることから、この値はさらに下がることが想定される。しかし、RCのCO₂排出は、現時点では購入電力のCO₂排出係数に大きく依存しており、むしろ使用電力を再生可能エネルギー由来とすることがCO₂排出削減量の面からは効果が大きい。RSをソーラーパネルで覆う構造が可能となれば、遮光と自家発電の相乗効果が得られることになり（Werner, 2014）、こうした面からも技術開発への政策的支援の必要性が強調される。

8 おわりに

RCはCTにおける主要なエネルギー消費源であるにも関わらず、その省エネ対策は殆どの港湾やCTにおける戦略策定時に考慮されず、先行研究も殆ど存在しなかった。こうした背景の下、本稿では、博多港に設置されたRSの導入効果について、シミュレーションモデルにより省エネ効果を推計し、その結果を用いて経済性を分析する方法を提案するとともに、全季節や他地域への適用の可能性について検証した。

本稿では、アクセスが容易な気象庁データを入力値とし、博多港での実験結果、計測結果を入力値としたシミュレーション結果と比較することで、モデルの汎用性を検証した。気候特性の異なる各港湾の季節別の気象庁データ（気温、日射量）を用いたシミュレーション結果から、夏季や温暖な地域では主要因が気温であり、相対的に日射による影響が小さくなるため、大きな傾向としてはRSによる省エネ効果は夏季よりも冬季のほうが割合としては大きく、温暖な地域よりも寒冷な地域のほうが大きいことを明らかにした。ただし、他地域への適用を含むモデルの汎用化の検証に当たっては、気候条件を明示的に反映できるモデルへの改良やCOPの外気温依存性の明示的かつ効果的な考慮方法の検討は今後の研究の方向性と言える。

博多港の実際の消費電力、電気料金を用いた分析では、RCの消費電力のシェアが高まる夏場のピークカットを通じた基本料金の削減インパクトの面から、夏場の省エネ率が最も重要となることが明らかとなった。この点、夏場の省エネ率が大きな寒冷地域では、年間を通じて基本料金の削減効果が高まることになる。一方で、初期投

資費用との関係で、ビジネススペースでの設置が困難であり、数少ない RC 関係の省エネ対策として政策的に推進するためには、効果的な構造・材料による省エネ効果の最大化と初期費用低減のための技術開発への支援や、それでも経済性が確保できない場合の財政的な支援が必要となる。

世界的に環境への配慮が港湾運営の重要な要素となる中、今後は各港湾での自主的な取組みが重要となる。一方で、CT では RS 以外にも多くの省エネ、脱炭素対策が採用可能であり、その選択と組合せ、対策導入の優先順位は難しい判断となる。しかし、こうした意思決定をサポートする実証的な研究の蓄積は少なかった。実務的にも、政府が公表している「CNP 形成に資する取組事例集」は、導入費用や他港湾での適用効果を推計できるものではない。このため、CNP の実現に向けては、各港湾での対策導入検討に当たり、効果や費用を事前に確認可能とする研究が実務的にも求められている。この点、本稿の学術的貢献として実証的な分析を提示していることが挙げられるが、同時に、本稿で紹介したシミュレーション手法は対策導入の事前評価のための有力なツールになるという点で、実務的な貢献もある。今後、港湾における省エネ、脱炭素対策が推進されるためには、本稿のような、港湾における意思決定を支援する研究の蓄積が重要となってくる。

(2023 年 8 月 30 日受付)

参考文献

- 1) 気象庁：地域気象観測所一覧，2023.
- 2) 気象庁：過去の気象データ検索，<https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>.
- 3) 国土交通省港湾局：CNP 形成に資する取組事例集，2021.
- 4) スハス V. パタンカー：コンピュータによる熱移動と流れの数値解析，森北出版，2009.
- 5) Acciario, M., 2015. Corporate responsibility and value creation in the port sector. *International Journal of Logistics Research and Applications*. 18, 291–311.
- 6) Acciario, M., Ghiara, H., Cusano, M.I., 2014. Energy management in seaports: A new role for port authorities. *Energy Policy*. 71, 4–12.
- 7) Acciario, M., Wilmsmeier, G., 2015. Energy efficiency in maritime logistics chains. *Research in Transportation Business & Management*. 17, 1–7.
- 8) Alamoush, A.S., Ballini, F., Ölçer, A.I., 2020. Ports' technical and operational measures to reduce greenhouse gas emission and improve energy efficiency: A review. *Marine Pollution Bulletin*. 160.
- 9) Aregall, M.G., Bergqvist, R., Monios, J., 2018. A global review of the hinterland dimension of green port strategies. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 59, 23–34.
- 10) Bjerkan, K.Y., Seter, H., 2019. Reviewing tools and technologies for sustainable ports: Does research enable decision making in ports? *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 72, 243–260.
- 11) Brooks, M.R., Cullinane, K.P.B., Pallis, A.A., 2017. Revisiting Port Governance and Port Reform: A Multi-country Examination. *Research in Transportation Business & Management*. 22, 1–10.
- 12) Budiyo, M.A., Shinoda, T., 2020. Energy efficiency on the reefer container storage yard; an analysis of thermal performance of installation roof shade. *Energy Reports*. 6.
- 13) Chen, G., Govindan, K., Golias, M.M., 2013. Reducing truck emissions at container terminals in a low carbon economy: Proposal of a queuing-based bi-objective model for optimizing truck arrival pattern. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 55, 3–22.
- 14) Dai, L., Hu, Hao, Wang, Z., Shi, Y., Ding, W., 2019. An environmental and techno-economic analysis of shore side electricity. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 75, 223–235.
- 15) Hales, D., Lam, J.S.L., Chang, Y.T., 2016. The Balanced Theory of Port Competitiveness. *Transportation Journal*. 55, 168–189.
- 16) IAPH, 2020a. IAPH Tool Box for Greenhouse Gasses. International Association of Ports and Harbours. <http://iaphtoolbox.wpci.nl/DRAFT%20IAPH%20GHG%20TOOL%20BOX%20dea.pdf>.
- 17) IAPH, 2020b. IAPH Tool Box for Clean Air Programs. International Association of Ports and Harbours. <http://iaphtoolbox.wpci.nl/DRAFT%20IAPH%20TOOL%20BOX%20%20dea.pdf>.
- 18) Iris, Ç., Lam, J.S.L., 2019. A review of energy efficiency in ports: operational strategies, technologies and energy management systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 112, 170–182.
- 19) Lam, J.S.L., Li, K.X., 2019. Green port marketing for sustainable growth and development. *Transport Policy*. 84, 73–81.

- 20) Lam, J.S.L., Notteboom, T., 2014. The greening of ports: A comparison of port management tools used by leading ports in Asia and Europe. *Transport Reviews*. 34, 169–189.
- 21) Martínez-Moya, J., Vazquez-Paja, B., Maldonado, J.A.G., 2019. Energy efficiency and CO2 emissions of port container terminal equipment: Evidence from the Port of Valencia. *Energy Policy*. 131, 312–319.
- 22) Monios, J., 2019. Polycentric port governance. *Transport Policy*. 83, 26–236.
- 23) Munim, Z.H., Sornn-Friese, H., Dushenko, M., 2020. Identifying the appropriate governance model for green port management: Applying Analytic Network Process and Best-Worst methods to ports in the Indian Ocean Rim. *Journal of Cleaner Production*. 268.
- 24) Notteboom, T., Lam, J.S.L., 2018. The Greening of Terminal Concessions in Seaports. *Sustainability*. 10., 3318.
- 25) Notteboom, T., Verhoeven, P., 2010. The awarding of seaport terminals to private operators: European practices and policy implications. *European Transport*. 45, 83–101.
- 26) Patankar, S., 1980. Series in computational methods in mechanics and thermal sciences. *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*.
- 27) Peng, Y., Li, X., Wang, W., Liu, K., Li, C., 2018. A simulation-based research on carbon emission mitigation strategies for green container terminals. *Ocean Engineering*. 163, 288–298.
- 28) PIANC, 2019. Renewables and Energy Efficiency for Maritime Ports - MarCom WG Report n°159-2019. The World Association for Waterborne Transport Infrastructure PIANC Maritime Navigation Commission. Brussels, Belgium.
- 29) Rijsenbrij, J.C., Wieschemann, A., 2011. *Sustainable Container Terminals: A Design Approach*, Springer New York.
- 30) Shinoda, T., Budiyo, M.A., 2016. Energy saving effect of roof shade for reefer container in marine container terminal. *The Journal of Japan Institute of Navigation*. 134, 103–113.
- 31) Sifakis, N., Tsoutsos, T., 2021. Planning zero-emissions ports through the nearly zero energy port concept. *Journal of Cleaner Production*. 286.
- 32) Sornn-Friese, H., Poulsen, R.T., 2016. Ports as sustainability hubs in global maritime supply chains: a content analysis of the external business communication of the worlds largest ports. Paper Presented at the International Association of Maritime Economist.
- 33) Sornn-Friese, H., Poulsen, R.T., Nowinski, A.U., de Langen, P., 2021. What drives ports around the world to adopt air emissions abatement measures? *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 90.
- 34) Spalding, B., 2013. *Advances in Heat Transfer Trends, Tricks, and Try-Ons in CFD/CHT*. Advances in Heat Transfer 1st ed. Elsevier Inc.
- 35) Sugimura, Y., Wakashima, H., Liang, Z., Shibasaki, R., 2022. Logistics strategy simulation of second-ranked ports on the basis of Japan's port reforms: A case study of Hakata Port. *Maritime Policy & Management*. under review.
- 36) Van den Berg, R., De Langen, P.W., 2014. An exploratory analysis of the effects of modal split obligations in terminal concession contracts. *International Journal of Shipping and Transport Logistics*. 6, 571–592.
- 37) van Duin, J.H.R., Geerlings, H., Verbraeck, A., Nafde, T., 2018. Cooling down: a simulation approach to reduce energy peaks of reefers at terminals. *Journal of Cleaner Production*. 193, 72–86.
- 38) Werner, B., 2014. Reduction of the CO2 footprints of container terminals by photovoltaics, green efforts project. Technical report.
- 39) Woo, J.K., Moon, D.S.H., Lam, J.S.L., 2018. The impact of environmental policy on ports and the associated economic opportunities. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 110, 234–242.
- 40) Zis, T.P.V., 2019. Prospects of cold ironing as an emissions reduction option. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 119, 82–85.

国土技術政策総合研究所研究報告

RESEARCH REPORT of NILIM

No. 73

October 2023

編集・発行 ©国土技術政策総合研究所

本資料の転載・複写のお問い合わせは
〔〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1
管理調整部企画調整課 電話:046-844-5019〕
E-mail:ysk.nil-46pr@gxb.mlit.go.jp

