

国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of
National Institute for Land and Infrastructure Management

No.1251

July 2023

港湾における気候変動対策の新たな可能性の提案 ～浚渫土砂の有効活用による炭素貯留と ブルーカーボン生態系の創出の有効性～

杉村佳寿・岡田知也・内藤了二・桑江朝比呂・中川康之

Proposals for New Possibilities for Climate Change Countermeasures in Ports:
Effectiveness of Carbon Storage and Creation of Blue Carbon Ecosystems through
the Beneficial Utilization of Dredged Soil

SUGIMURA Yoshihisa, OKADA Tomonari, NAITO Ryoji, KUWAE Tomohiro, NAKAGAWA Yasuyuki

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

港湾における気候変動対策の新たな可能性の提案 ～浚渫土砂の有効活用による炭素貯留と ブルーカーボン生態系の創出の有効性～

杉村佳寿*
岡田知也**
内藤了二***
桑江朝比呂****
中川康之*****

要 旨

気候変動への世界的な関心が高まる中、日本ではカーボンニュートラルポット（CNP）政策が掲げられている。本稿では、CNP政策のより確実な推進を目的として、浚渫土砂の有効活用を通じた安定的な封じ込めにより、含まれる有機炭素の貯留効果を港湾における新たな気候変動対策として提案した。封じ込めによる炭素貯留に加え、ブルーカーボン生態系（BCE）の基盤材を浚渫土砂の有効活用先とすることでBCEによる炭素貯留効果が増加し、これらの対策がCNPの実現と残余排出の吸収に大きな意義を持つことがシナリオ分析により明らかになった。CNPの実現に向けた次世代エネルギーの輸入拠点の整備が求められているが、本稿の結果は、浚渫土砂の有効活用による封じ込めを前提に浚渫事業自体にも気候変動対策としての意義があることを示唆している。日本のように環境政策や港湾ガバナンスにより、政府や港湾管理者のイニシアチブが重要となる国では、これらの新しい対策の実現可能性は政府のイニシアチブが重要となるが、港湾運営に加えて港湾整備に焦点を当て、浚渫土砂とBCEを炭素吸収源として利用することは、世界を先導する取組みとなる。

キーワード：気候変動，カーボンニュートラル，ブルーカーボン，浚渫土砂

* 港湾・沿岸海洋研究部 港湾新技術研究官
** 港湾・沿岸海洋研究部 海洋環境・危機管理研究室長
*** 港湾・沿岸海洋研究部 主任研究官
**** 港湾空港技術研究所 沿岸環境研究領域長
***** 港湾空港技術研究所 特別研究主幹
〒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

Proposals for New Possibilities for Climate Change Countermeasures in Ports: Effectiveness of Carbon Storage and Creation of Blue Carbon Ecosystems through the Beneficial Utilization of Dredged Soil

SUGIMURA Yoshihisa*
OKADA Tomonari**
NAITO Ryoji***
KUWAE Tomohiro****
NAKAGAWA Yasuyuki*****

Synopsis

As climate change has attracted increasing global attention, carbon neutral ports (CNPs) have been set as government policies in Japan. In this research, we proposed carbon storage through the stable containment of organic carbon present in dredged soil as a new climate change countermeasure in ports with the aim of providing a more reliable basis for policy making concerning ports. Furthermore, it was revealed through scenario analysis that the containment effect through the beneficial utilization of dredged soil as foundation materials for blue carbon ecosystems (BCEs) and carbon storage by BCEs have significant meanings for the realization of CNPs and sinks for the residual emissions, considering the necessity to promote dredging projects for the development of the next generation of import bases toward the realization of CNPs, which may result in the generation of a large amount of dredged soil. In a country like Japan, whose port policies and port governance make it difficult to actively promote climate change countermeasures by individual port, the feasibility of these new countermeasures would depend on the government's initiative. It would be a world-leading effort to focus on port development in addition to port operation and utilizing the dredged soil and BCEs as carbon sinks.

Key Words: Climate change, Carbon neutrality, Blue carbon, Dredged soil

* Research Coordinator for Advanced Port Technology, Port, Coastal and Marine Department
** Head of Marine Environment and Emergency Management Division, Port, Coastal and Marine Department
*** Senior Researcher, Port, Coastal and Marine Department
**** Director, Coastal and Estuarine Environment Department, Port and Airport Research Institute
***** Senior Director for Research Affairs, Port and Airport Research Institute
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	3
3. 日本の港湾環境政策とその特徴	3
4. 浚渫土砂の有効利用による炭素貯留	6
4.1 港湾事業における浚渫土砂の有効利用	6
4.2 浚渫土砂の炭素貯留効果に関する2つの考え方	7
4.3 想定される議論	8
5. 浚渫土砂の有効活用とBCE創出による炭素貯留のポテンシャル	9
5.1 浚渫土砂の封じ込めによる炭素貯留の定量的効果	9
5.2 CNP実現に向けた新たな対策の意義	9
5.3 新たな対策の政策への反映	12
6. おわりに	13
参考文献	13

1. はじめに

港湾は国の経済を支える重要な社会インフラであり、特に日本のように四面を海に囲まれた島国では猶更である。一方で、港湾運営はCO₂排出など社会的コストとされる負の外部性を発生させる可能性がある (Tichavska et al., 2019; Schrobback and Meath, 2020)。そのため、港湾に対して、運営に伴う負の外部性を説明し、対処するよう求める圧力が高まってきている (Eriksen, 2018)。近年では、特に気候変動が世界的に注目されており、港湾における対策にも注目が高まっている (Alamoush et al., 2020)。港湾のCO₂排出に起因する課題に対処するために、最近ではCO₂排出量を削減し、気候変動を緩和することを目的としたgreen portの概念が世界中で用いられている (Davarzani et al., 2016)。あるいは、港湾は、経済、社会、環境という3つのボトムラインをマネジメントし、バランスを取る必要があるが (Lim et al., 2019)、これに着目したsustainable portの概念も登場している (Bjerkkan and Seter, 2019)。

国際的な枠組みとしても、国際港湾協会 (IAPH) の港湾環境委員会の要請により、2008年に世界の主要港55港がWorld Port Climate Declaration (WPCD) を自主採択し、World Ports Climate Initiative (WPCI) が誕生した。世界の港湾はこれに基づき様々な環境対策を実施し、2018年にはWPCDはWorld Ports Sustainability Programmeへと拡張されている。国際海事機関 (IMO) は、2018年に温室効果ガス排出量を2050年までに2008年比で50%削減するという目標が掲げ (IMO, 2018)、港湾への協力促進依頼を2019年に採択している (IMO, 2019)。また、国や地域によっては、例えばEU指令2014/94によりEUの全ての港湾が陸電供給システムとLNGバンカリングの利用を優先することが求められているなど (European Commission, 2014)、規制的な気候変動対策が採られる場合もある。

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となっており、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)。そして、CO₂排出量削減は、グローバルサプライチェーンとロジスティクスの取り組みによって達成される可能性があるため (Cariou et al., 2019; Xing et al., 2020)、海上輸送と内陸輸送をつなぐ結節点である港湾には、サプライチェーン全体を最適化する役割を持ちうる (Bjerkkan and Seter, 2019)。このため港湾は、自身のCO₂排出量を削減するための戦略を適用するだけでなく、海運や内陸輸送の排出量を削減するための対策を実施している (Alamoush et al., 2020)。

こうした背景の下、港湾における気候変動対策に関し

ては、すでに多くの先行研究が行われており、実務的な取組みを先導する港湾も登場している。港湾による取組みのレベルは、国や港ごとに異なるが (Sornn-Friese and Poulsen, 2016)、最新の先行研究を踏まえると対応策は一定程度整理されつつあり、代表的なものとしては陸電供給システムや電動式荷役機械の導入が挙げられる。しかし、現在の気候変動対策の採用状況と、IMOやIAPHが表明している野心的な排出削減目標との間にギャップがあり、長期的な努力が必要と言われている (Sornn-Friese et al., 2021)。すなわち、対策の社会実装や新たな対策の提案は、実務的にも学術的にも求められている。

本稿では、港湾における新たな気候変動対策として、浚渫土砂中の炭素貯留と浚渫土砂の有効活用によるブルーカーボン生態系 (BCE) (Nellemann et al., 2009; Froehlich et al., 2019)の創出に着目する。現在、日本ではカーボンニュートラルポート (CNP) 政策が推進されており、水素輸入拠点の整備のために航路の浚渫が必要となる可能性がある。港湾事業によって大量に発生する浚渫土砂を BCE 造成材として有効活用することで安定的に封じ込め、浚渫土砂中の有機炭素が貯留され、さらに BCE が創出されれば、大きな CO₂ 吸収効果を発揮する可能性がある。日本政府や港湾管理者は、港湾事業として藻場干潟の造成や生物共生型港湾構造物の整備等に取り組んできた。これらの事業は当初は気候変動対策として意図されたものではないが、炭素吸収源となる BCE の創出に他ならない。港湾における気候変動対策は、地理的、経済的、規制、政治的な背景が重要な文脈となる中 (Lam and Notteboom, 2014)、ヨーロッパでは多く研究されている一方で、アジアでは数が少なく (Tseng and Pilcher, 2019)、特に日本の港湾における気候変動対策を扱った先行研究は存在しない。このことは、日本の特性を踏まえた気候変動対策の中に、新たな視点で世界を先導できるものが含まれる可能性を意味する。先行研究で議論されてきた港湾における気候変動対策の多くは「港湾運営」における「排出源対策」である中、浚渫土砂中の炭素貯留と浚渫土砂の有効活用による BCE の創出は、「港湾整備」における「吸収源対策」という点で極めて斬新である。しかし、浚渫土砂の有効活用については気候変動対策として認識すらされていない。こうした新たな対策を検討し、効果的に社会実装させていくことの意義は極めて大きい。すなわち、本稿の目的は、日本の経験を基に、先行研究において注目されていないこうした気候変動対策の可能性を検証し、日本における港湾環境政策に示唆を与え、併せて世界を先導することである。また本稿の学術的新規性・貢献は、①港湾整備の過程で創造される吸収源に着目し、港湾にお

る気候変動対策としての可能性を検証していること、②港湾整備における浚渫土砂の有効活用が気候変動対策になり得ることを提案していること、③吸収源対策を含め港湾におけるカーボンニュートラルのロードマップを提示していることである。

2. 先行研究の整理

港湾における GHG 排出やその対策を焦点に当てた先行研究も存在するが、気候変動対策は港湾のグリーン化や持続可能性の文脈の中の一要素として取り上げられることも多い。Bergqvist and Monios (2019) は、港湾の持続可能性については大気汚染に焦点が当てられる傾向があることを指摘し、Hua et al. (2020) も green port における同様の傾向を指摘しているように、より広範に港湾における環境問題全般を扱う先行研究においても気候変動は重要な要素となっており、こうした文献のレビューも重要となる。

港湾における気候変動対策においては、主体が誰であれ物理的に港湾のエリアで実施されるものと、Port Authority (PA) が関与する対策という二つの意味がある。港湾は、港湾自身の CO₂ 排出量削減だけでなく、海運や内陸輸送の排出量を削減するための対策を実施しているからである (Alamouh et al., 2020)。Chen et al. (2013) や Sornn-Friese et al. (2021) は、港湾に関連する CO₂ 排出は、船舶からの排出、港湾内での排出、港湾の背後圏輸送からの排出のいずれかであるとしているが、それぞれの CO₂ 排出量が先行研究で推計されている。例えば、Styhre et al. (2017) や Tichavska et al. (2019) は港湾における船舶からの排出、Peng et al. (2018) や Martínez-Moya et al. (2019) は港湾ターミナルからの排出、Gonzalez Aregall et al. (2018) や Wang et al. (2020) は、港湾背後圏の物流ネットワークからの排出について検証している。また、WPCI は、港湾におけるカーボンフットプリントのガイダンスを示しており (WPCI, 2010)、Mamatok and Jin (2016) は実際に港湾におけるカーボンフットプリントを測定している。

港湾における排出源対策については様々な先行研究が存在するが、Bjerkan and Seter (2019) や Alamouh et al. (2020) など網羅的なレビューを行っている文献が既に存在する。また Xing et al. (2020) は、船舶側からの視点で、Iris and Lam (2019) はエネルギー効率性について焦点を当て港湾における対策を整理している。レビュー文献ではないが、Lam and Notteboom (2014) や Acciaro et al. (2014) は PA の観点で気候変動対策を含む港湾における対策に

ついて整理している。IAPH は港湾関連の気候変動関連の問題に対処するためのツールキットを発表しており (IAPH, 2020a; IAPH, 2020b)、PIANC は港湾のための再生可能エネルギーとエネルギー効率 (PIANC, 2019a)、港湾や航路インフラのための炭素マネジメントに関する報告書を公表している (PIANC, 2019b)。

対策の実施については、Li et al. (2020) は、政府が採る手段として、排出規制区域や排出制限値の設定など規制型の政策と、報奨・懲罰制度の確立などインセンティブ型の政策を挙げている。Lam and Notteboom (2014) は、環境戦略に関して先進的な港湾では規制的なアプローチを採用する傾向があることを指摘している。規制型の政策に関連しては、Geerlings and Van Duin (2011) は PA の財政的支援、Lam and Notteboom (2014) は経済的インセンティブの重要性を指摘している。港湾における気候変動対策を実施には多額のコストがかかるが (Woo et al., 2018)、代表的な対策である陸電供給 (Bjerkan and Seter, 2019) については、Tseng and Pilcher (2015)、Dai et al. (2019)、Zis (2019) は導入の最大の障壁が、港湾及び船舶側での高額な初期投資であることを指摘しており、環境便益を含める政府の立場からのみ導入への投資が可能であっても、ビジネススペースでは困難であるとしている。港湾には多くのステークホルダーが存在するが、Poulsen et al. (2018) は、気候変動対策は複雑であり、港湾関係者の広範な協力の必要性を指摘している。Acciaro et al. (2014) や Lam and Li (2019) は環境に関する課題に対しては、PA の積極的な役割が必要とされることを主張している。こうした点は、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に繋がる (Munim et al., 2020)。1980 年代以降世界中で港湾改革が進展する中 (Brooks et al., 2017)、PA の役割の変化やランドロードモデルを通じた港湾運営の民営化が起こっており (Monios, 2019)、地主、規制、運営という PA の伝統的な役割に加えてコミュニティ・マネージャー機能 (Verhoeven, 2010) が重視されてきていることが環境対策への PA の積極的な役割に繋がっている。一方で、コンセッション契約は環境ガバナンスとしても機能する (Van den Berg and De Langen, 2014; Lam and Notteboom, 2014; Notteboom and Lam, 2018)。コンセッション契約全体の 85% に環境条項が含まれ (Notteboom and Verhoeven, 2010)、当然、PA の管理・監督が必要となる (Lam and Notteboom, 2014)。実際、Munim et al. (2020) や Sornn-Friese et al. (2021) もランドロードモデルの採用は、CO₂ 排出量削減の重要なドライバーであるとし、Martínez-Moya et al. (2019) も環境目的を達成するための政策ツールとしてコンセッション契約が非常に重要であ

ることを指摘している。

以上のように、先行研究では港湾に関連する CO₂ 排出量の推計、港湾で実施しうる気候変動対策について多くの先行研究が存在し、レビュー文献を踏まえれば、対策は一定程度収束しつつある。港湾における気候変動対策を検討する場合、各国の政策立案者、各港湾の PA 等は、政策や施策の導入可能性や課題・留意点について先導事例や先行研究を参考にすることができる。一方、これまでの港湾における気候変動対策として挙げられているものの大部分は排出源対策であり、吸収源対策に言及する研究はほとんど存在しない (IS2S, 2013; Lam and Notteboom, 2014; Bosman et al., 2018)。しかし、港湾は carbon capture storage (CCS), carbon capture and utilization (CCU) の重要な担い手になり得る (Alamouh et al., 2020)。Acciaro et al. (2014) は、港湾が CCS の重要な担い手であることを指摘し、Alamouh et al. (2020) は、ロングビーチ港における炭素貯留を最大化する植樹法を紹介している。Bosman et al. (2018) は CCS を念頭に、循環型港湾やバイオベース港湾に向けて大規模な投資が必要であると主張した。また、BCE の炭素貯留能力は、Froehlich et al. (2019)、Lovelock and Duarte (2019) が気候変動緩和策として強調しているが、BCE を港湾における気候変動対策とすることは、PIANC (2019b) が言及しているのみである。

また、港湾整備に対しては、環境への影響に言及されることはあっても (Lam and Li, 2019)、気候変動対策として評価されることはない。Taljaard et al. (2021) が自然環境を港湾インフラシステムの不可欠な構成要素として組込むことを主張している通り、港湾整備の一環で創造される吸収源の活用は検討されるべきである。PIANC (2019b) では、有機炭素を多く含む浚渫土砂から CO₂ が放出されることに言及しているが、対策は示されておらず、浚渫土砂を藻場や干潟を作る材料として利用することを推奨しているに過ぎない。Fox and Trefry (2018) は、浚渫土砂中の炭素含有量に関するデータを提示しているが、放出される炭素量を定量的に評価した先行研究はない。この点、本稿は吸収源対策の新たな可能性として港湾整備に伴う浚渫土砂の有効活用に注目している。浚渫土砂そのものが含む炭素は気候変動対策としてはまだ着目されていないが、藻場干潟の造成、窪地の埋戻し、用地造成として浚渫土砂を封じ込め、含まれる炭素が CO₂ に戻ることなく貯留されれば、CO₂ 排出量削減に大きく貢献する可能性がある。更に、BCE 造成材として活用すれば、吸収効果が継続的に発揮されることも期待される。以上のように、吸収源であり港湾整備にも関連する BCE の創出を浚渫土砂の有効活用により行うことは、港湾に

おける気候変動対策としても大きなポテンシャルを有している可能性がある。BCE に関しては、科学的に検証されていない面も多いため (Lovelock and Duarte, 2019; Macreadie et al., 2019)、その解明次第では今後の拡張も期待できる。

3. 日本の港湾環境政策とその特徴

表-1 に日本における気候変動対策の出来事と関係する港湾政策を示す。2000 年代前半までは港湾緑地や海浜の整備、水質浄化対策、循環資源の輸出拠点形成が港湾環境政策として掲げられ、対応する事業が進められてきた。1999 年の港湾法改正では、港湾整備において環境の保全に配慮することが規定されている。明示的に気候変動対策を目的とした港湾環境政策は京都議定書発効後であり、当初は陸電供給や省エネ荷役機械の導入など排出源対策が中心であったものが、2009 年の UNEP レポートを契機に近年では吸収源対策としての BCE の活用にも着目するようになってきている。BCE は NDC のインベントリには含まれておらず、現時点ではパリ協定の枠組みの外にあるが (杉村ら, 2021)、社会実装としてブルーカーボンオフセット制度が地方自治体で創設され、直近では国が認可するジャパンプルーエコノミー技術研究組合においてもオフセット制度が創設されるなど推進の動きは始まっている (Kuwae et al., 2022)。

近年では、気候変動対策を意図したカーボンフリーポート (CFP) 及び CNP 政策が掲げられている。政府の港湾長期政策である PORT2030 の中で、洋上風力発電の導入、船舶・荷役機械・トレーラ等の輸送機械の低炭素化や陸上給電設備の導入等の「CO₂ 排出源対策」を行うとともに、鉄鋼スラグ等の産業副産物を有効利用した BCE の活用等による「CO₂ 吸収源対策」を促進し、世界に先駆けた CFP を実現することが謳われている。CNP は菅総理による 2050 年カーボンニュートラル宣言を受けた政策である。国際物流の結節点・産業拠点となる港湾において、次世代エネルギーの大量輸入や貯蔵、利活用等を図るとともに、脱炭素化に配慮した港湾機能の高度化や臨海部産業の集積を通じて CNP を形成し、水素等を活用した日本全体の脱炭素社会の実現に貢献することが目指されている。なお、港湾における水素等の次世代エネルギーの大規模な輸入拠点の整備は、浚渫事業の必要性に繋がる。

前章で整理した先行研究、特に Bjerkan and Seter (2019)、Alamouh et al. (2020) などのレビュー文献で整理された施策メニューと、日本におけるこれまでの港湾環境政策やそれに伴う港湾事業、最新の気候変動に係る港湾政策

表-1 日本における気候変動に関連する出来事と港湾環境政策

年	気候変動に関連する出来事	港湾環境政策
1973		港湾法改正, 港湾環境整備事業開始
1985		長期港湾政策「21世紀への港湾」
1985		生物共生型港湾構造物整備開始
1988		海域環境創造事業開始
1994		港湾環境政策「新たな港湾環境対策—環境に共生する港湾 (エコポート) をめざして
1997	京都議定書採択	
1997	環境自主行動計画	
1998	地球温暖化対策法制定	
1999		港湾法改正 (港湾整備等にあたって環境の保全に配慮)
2002		リサイクルポート政策
2005	京都議定書発効, 京都議定書目標達成計画, 自主参加型国内排出量取引制度, 温対法改正 (報告制度)	港湾行政のグリーン化～今後の港湾環境政策の基本的な方向～ (地球温暖化対策含む)
2006	温対法改正 (京都メカニズム)	船舶版アイドリングストップの実験開始
2008	京都議定書目標達成計画, 低炭素社会づくり行動計画, 排出量取引の国内統合市場の試行的実施, 国内クレジット制度, オフセット・クレジット制度	
2008		生物共生型護岸実証実験開始
2009	UNEP レポート, 低炭素社会実現計画	地球温暖化に起因する気候変動に対する港湾政策のあり方
2010	地球温暖化対策基本法案閣議決定	
2011	カーボンニュートラル認証制度	
2012	再生可能エネルギーの固定価格買取制度, 地球温暖化対策基本法案廃案, 第四次環境基本計画 (2050年 GHG 排出量▲80%), 環境税導入	
2013	J-クレジット制度, 低炭素社会実行計画	
2014		生物共生型港湾構造物の整備・維持管理に関するガイドライン策定
2015	日本の約束草案(2030年度に2013年度比▲26.0%), パリ協定採択	
2016	地球温暖化対策計画, パリ協定発効	横浜市ブルーカーボンオフセット制度
2018	再エネ海域利用法	PORT2030 策定, カーボンフリーポート構想
2018	気候変動適応法	
2019	UNEP 排出ギャップ報告書 2019, パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略	
2020	NDC 提出, 2050年カーボンニュートラル宣言, カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略	福岡市ブルーカーボンオフセット制度
2021	革新的環境イノベーション戦略 (ブルーカーボンに言及)	ジャパンプルーエコノミー技術研究組合認可, カーボンニュートラルポート政策, Jブルークレジット制度

である CFP 及び CNP 政策を踏まえ, 日本の港湾において採り得る気候変動対策のメニューは表-2 のように整理できる. 表-2 には, 各施策メニューについて既存政策等での推進状況と実施時に参考となる先行研究の例も示している. 排出源対策としては, 荷役機械の電動化, 陸電供給施設の整備などが代表的であり, これらを含め, 表-2 に記載されている項目の多くは, 補助金や実証事業等を通じて政府主導で進められてきたが, 依然本格的な適用や導入に至っていないものが大部分である. このことは日本の港湾ガバナンスにも関係している.

日本の港湾ガバナンスの特徴は, 港湾管理者が商業化・

企業化せずに地方自治体が港湾管理権を有していること, 多くの港湾では民営化が進んでいないこと, global terminal operator (GTO)の進出がないこと, 大港湾では港湾運営会社制度と呼ばれる民営化政策を導入していることにある(Sugimura, 2020). 港湾運営会社制度とは, 民間の視点を有する株式会社である港湾運営会社が港湾の複数の埠頭群を港湾管理者等から借受け一体運営するものであるが, 更にターミナルオペレーターに専用的に貸付を行う. 港湾運営会社の選定には競争はなく, ターミナルオペレーターへの貸付も歴史的な船社専用ターミナルの経緯の中で, 競争のない専用的な貸付である. すなわ

表-2 日本の港湾において採り得る気候変動対策のメニュー

	施策メニュー	既存施策と状況	参考文献例
港湾	グリーンポート計画等の策定	港湾環境計画（法的根拠はないが政府に推奨されている）、CNP 形成計画（政府主導で推進）	Acciaro et al. (2014), Schipper et al. (2017)
	CO ₂ 排出量のモニタリング、情報対策	法制度的な枠組みはなし	Puig et al. (2017), Cammin et al. (2020)
	ターミナル貸付時の環境配慮行動の盛り込み	ターミナルオペレーターへの貸付に環境インセンティブを盛り込む事例あり	Van den Berg and De Langen (2014), Notteboom and Lam (2018)
	インセンティブ導入（対船舶、車両）	一部港湾で自主的に導入	Chen et al. (2013), Bergqvist and Egels-Zandén (2012), Gonzalez Aregall et al. (2018)
	船舶、陸運、立地企業と港湾管理者の協働、サプライチェーン全体の最適化	国による補助金制度あり（物流分野における CO ₂ 削減対策促進事業）、J-クレジット制度（海上コンテナの陸上輸送の効率化）の活用可能	Pan et al. (2013), Cheon (2017), Gonzalez Aregall et al. (2018)
	荷役機械の移動効率化（自動化含む）、レイアウト設計	AI ターミナルについて政府主導で検討中（RTG 遠隔化への補助金制度あり）	He et al. (2015), He (2016)
	荷役機械の電化、水素燃料電池（FC）化	国による補助金制度あり（物流分野における CO ₂ 削減対策促進事業）、J-クレジット制度（ハイブリッド式建設機械・産業車両への更新）の活用可能	Martinez-Moya et al. (2019), Di Ilio et al. (2021)
	陸電供給施設の整備	陸電供給施設については一部港湾で国による導入実験が行われたが本格導入はなし	Zis et al. (2014), Winkel et al. (2016)
	再生可能エネルギー（太陽光発電、風力発電、バイオマス発電、廃棄物発電）の活用	J-クレジット制度の活用可能、洋上風力発電の導入を促進中	Lam and Notteboom (2014), Kang and Kim (2017)
	大規模蓄電施設の整備	災害等非常時対応と低炭素化を目的とした国による実証事業を実施	Kotrikla et al. (2017), Papaioannou et al. (2017)
	スマートグリッドの導入	港湾に特化した動きはなし	Ihle et al. (2016), Yiğit et al. (2016)
	水素ステーションの整備	一部港湾で検討中（国主導）	Kang and Kim (2017), Bicer and Dincer (2018)
	リーファーコンテナ等へのカーボンフリー電源の導入	一部港湾で自主的にルーフシェードの導入事例あり	Wilmsmeier et al. (2012), van Duin et al. (2018)
	ブルーカーボン生態系の創出（藻場、干潟等）、洋上風力発電海域内含む	海域環境創造事業等での整備箇所多数あるが、気候変動対策としての活用は限定的（一部港湾にのみカーボンオフセット制度が導入）	PIANC (2019b)
浚渫土砂の有効活用による排出源対策	海域環境創造事業や通常の港湾改修事業での整備箇所が多数あるが、気候変動対策を目的としていない	PIANC (2019b)	
港湾緑地の整備	港湾環境整備事業での整備箇所が多数あるが、気候変動対策を目的としていない	I2S2 (2013)	
次世代エネルギーの輸出入・配送拠点の整備	LNG バンカリング拠点の形成を促進中 次世代エネルギーについては、一部港湾で検討中	Acciaro et al. (2014)	
循環資源の輸出入・配送拠点の整備	リサイクルポート政策で輸出が推進されているが、気候変動対策を目的としての検討は始まったところであり、輸入促進の観点はない	Poulsen et al. (2018)	
船舶	陸電供給施設の利用	陸電供給施設は一部港湾で国による導入実験が行われたが本格導入はなし、次世代エネルギー供給施設の利用は一部港湾で検討中（国主導）	Zis et al. (2014), Boile et al. (2016)
	港内の効率航行の実施	自主的取り組みを行う事例あり	Styhre et al. (2017), Linder (2018)

表-2 日本の港湾において採り得る気候変動対策のメニュー（続き）

	施策メニュー	既存施策と状況	参考文献例
船舶	代替燃料等環境配慮型船舶の導入（ゼロセミッション船）	開発に対し国による補助金制度あり、J-クレジット制度（LNG燃料船・電動式船舶）の活用可能	Winnes et al. (2015), Styhre et al. (2017)
車両	ゲート前渋滞の緩和、港内ドレージ輸送の効率化	各港湾で対応しているが、気候変動対策を目的としての検討は始まったところ	Chen et al. (2013), He et al. (2013)
	モーダルシフト	国による補助金制度あり	Gonzalez-Aregall et al. (2018)
	環境配慮型車両の導入（FC車両）	一部港湾で検討中（国主導）	Poulsen et al. (2018), Iris and Lam (2019), Di Ilio et al. (2021)

ち、日本の港湾の多くが公共所有、公共運営、一部の大港湾では公共所有、民間運営となっているが、民間運営の場合でも運営者が競争的に選定されている訳ではない。諸外国とは異なり、企業化していない港湾管理者には、環境配慮活動に対して ESG や CSR の観点からの動機がない。更に、地方自治体が港湾管理者であることは、中央政府が国家戦略的な政策を策定しても、地域の利益が優先され政策に実効性が伴わないことや、港湾運営におけるビジネス的視点の欠如といった帰結をもたらす可能性を有する(Sugimura, 2020)。このため、いくら国際的に主流となっても、港湾料金の上昇に繋がる気候変動対策が港湾単位で導入されることは、港湾間競争の観点から考えにくい。GTO が進出していないことから、諸外国で行われている気候変動対策がターミナルオペレーター主導で進められる可能性も否定される。ターミナルの貸付においては、日本においては標準的なランドロードモデルではなく、ターミナルオペレーターへの貸し付けもコンセッション契約ではなく、伝統的に専用貸付けの形態を採っている。したがって、港湾管理者側の交渉力が決して強くないターミナルリース契約において、環境への取組みが盛り込まれることは考えにくい。このように、日本の港湾ガバナンスモデルは、気候変動対策が各港湾で自主的に、積極的に推進される特徴を有しているわけではなく、諸外国以上に政府や港湾管理者のイニシアチブが重要となってくる。また、日本の環境政策は排出量取引制度のような規制的なアプローチ採用している米国や EU に比べ、自主的なアプローチに依存していることが特徴である (Arimura et al., 2019)。実際、日本ではキャップ・アンド・トレード制度の導入を盛り込んだ法案が産業界の反対により 2012 年に廃案となった (Gokhale, 2021)。Lam and Notteboom (2014) は、先進的な港湾では規制的なアプローチを採用する傾向があると述べているが、日本ではそのようなアプローチは採られておらず、このことは港湾における気候変動対策の低い実効性の理由となり得る。

表-1 に示す対策のうち、先行研究や国際的な事例と比較して日本の潜在的な対策として最も特徴的なのは、BCE の創出と浚渫土の有効活用である。大型の水素輸入船を収容できる港湾施設は少なく、次世代エネルギー輸入拠点整備には大水深の岸壁や航路が必要なため大量の浚渫土砂が発生する点で、これらの 2 つの対策は密接に関連している。このように、各港湾で採用されている戦略や先行研究では、気候変動対策として港湾運営における排出源対策が主なテーマとなっている。すなわち、港湾運営に加えて港湾整備に焦点を当て、BCE や浚渫土砂を炭素吸収源として着目することは、世界をリードする取り組みとなり得る。特に、港湾事業に伴う浚渫土砂を安定的に封じ込めることは、含まれる有機炭素の貯留としての役割を果たす可能性がある。港湾整備における取組みが気候変動対策として認識され、より大規模に実施されるようになれば、自然資本の概念を取り入れたインフラ設計を後押しすることにもなる (Taljaard et al., 2021)。しかし、炭素貯留として浚渫土砂の有効活用を評価するためには、その可能性を科学的に検証する必要がある。これについては、次章以降で述べる。

4. 浚渫土砂の有効利用による炭素貯留

4.1 港湾事業における浚渫土砂の有効利用

浚渫土砂の有効活用は世界各地で行われ、用地造成や湿地の再生に用いられている (Taljaard et al., 2021)。日本でも自然再生、循環型社会形成、土地造成の抑制の観点から、港湾事業において藻場干潟の造成、深掘跡の埋戻し、用地造成といった浚渫土砂の有効活用を積極的に行ってきた。造成干潟・藻場において、有機物量が多く含水比が高い浚渫土砂は生物生息基盤面の基礎材料として使われ、基盤材とした浚渫土砂の上に砂を 30cm 程度被覆して、生物の生息環境が良好な藻場干潟としている。含水比が非常に高い浚渫土砂の場合には、浚渫土砂と砂の間に生分解性シート敷いて、砂の沈下を防ぐ工法も用い

られている。高度成長期の急速な港湾域の開発において、港湾施設の造成用地の埋込材として、海域の土砂を採取・利用するため、日本の港湾の周辺海域には深掘跡が多く存在する。近年では、その窪地で貧酸素水塊が頻発することから、環境改善の目的で埋戻しが行われている（内藤ら，2008a, 楠山ら，2017）。埋戻しが完了した後は、表面に砂を被覆することによって良好な生物生息環境を形成することが可能であるため、窪地の埋戻し材として富栄養化した浚渫土砂でも支障なく活用されている。

近年、気候変動対策としての BCE の活用が港湾環境政策に盛り込まれ、CFP では BCE 造成材としての浚渫土砂の有効利用に言及されている。しかし、その主眼は CO₂ 吸収源としての BCE にあり、浚渫土砂に含まれる炭素自体の貯留にあるわけではない。また、BCE は吸収源対策として注目されているが、現時点では日本の NDC に含まれていないため目標貯留量が設定されておらず、財政面も含めて BCE 創出を強化する仕組みが整っていない。

港湾事業で発生する現在の年間浚渫土量に含まれる有機炭素量及び浚渫土砂の有効活用先、また港湾区域での BCE による CO₂ 吸収量を表-3 に示す。年間浚渫土量中の有機炭素量は 71 万 t-CO₂、BCE による CO₂ 貯留効果は 16 万 t-CO₂ であるが、これらに関連する CO₂ 吸収効果が日本の CNP 実現にどの程度貢献するかはまだ明らかにされていない。

4.2 浚渫土砂の炭素貯留効果に関する2つの考え方

表-3 に示すように、日本の現状の年間浚渫土砂量は 1,595 万 m³/年であり、用地造成に 53%、藻場干潟に 13%、深掘跡の埋戻しに 6%が有効活用されている。年間浚渫土砂量に含まれる有機炭素量 71 万 t-CO₂ を効果的に地中に貯留させれば、CO₂ 排出量削減に大きく貢献すると考えられる。気候変動に関する政府間パネル（IPCC）は 2013 年に湿地ガイドラインの補足を策定し、マングローブ林、

塩性湿地、海草藻場を BCE として取り上げたが、浚渫土砂に含まれる炭素は、BC としては新しい概念となる（Kuwaie et al., 2016）。

浚渫土砂に含まれる炭素の貯留効果については、図-1 に示すような 2 つの異なる考え方がある。一つは、炭素が港湾内の底泥に堆積した状態を炭素の貯留と見做す考え方であり（考え方 1）、この場合、浚渫は貯留された炭素の除去（排出）となる。浚渫土砂を陸揚げすると、浚渫土砂中の有機物が好気性条件下で分解され、CO₂ が放出される。逆に浚渫土砂を封じ込めると、有機物の分解を抑制することになり、CO₂ 排出量が削減することになる。

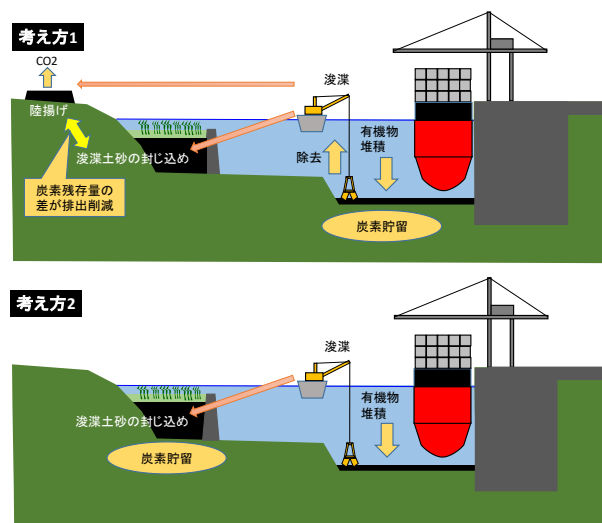


図-1 浚渫土砂の封じ込めによる炭素貯留の2つの考え方

もう一つは、炭素が港湾内の底泥に堆積した状態を炭素ストックと見做さない考え方である（考え方 2）。航路の維持浚渫に代表されるように港内に堆積した有機物は定期的に除去されるため炭素貯留とは見做さず、浚渫後に封じ込めた分を貯留とする。この場合、貯留された炭素は炭素収支の上では吸収側に扱うことができる。浚渫

表-3 浚渫土砂に含まれる炭素量と浚渫土砂の有効活用の状況

項目	値	出典
年間浚渫土量	159,500,000 m ³	桑江ら (2019)
浚渫土砂中の炭素含有量	44.7 t-CO ₂ /1000 m ³	密度 = 1.5 g/cm, 土粒子密度 = 2.6 g/cm, 全有機炭素 (TOC) = 1.5% (内藤ら, 2008b)
年間浚渫土量に含まれる炭素量	712,965 t-CO ₂	上 2 つの値の乗算
深掘跡埋戻しへの利用割合	5.9%	財務省 (2018)
藻場干潟への利用割合	12.9%	
用地造成への利用割合	53.2%	
BCE による CO ₂ 吸収量	1,320,000 t-CO ₂	桑江ら (2019)
港湾区域における BCE による CO ₂ 吸収量	162,000 t-CO ₂	上の数字に海岸線延長のうち港湾区域の割合 (12%) を乗じたもの

土砂の有効活用は、どちらの考え方でも気候変動対策として一定の可能性がある。特に、浚渫土砂で造成される藻場干潟は BCE に適合し、資源の有効活用と気候変動に対する Nature Based Solutions (Raymond et al., 2017) として斬新である。この点から、今後は浚渫土砂の有効活用方法の選定基準に、炭素収支を指標の一つとして含めるべきである。

4.3 想定される議論

港湾における気候変動対策で吸収源に言及した研究は少ないが、世界的には、港湾における CCS の先進事例が出始めている。例えば、ロッテルダム港はアントワープ港と共同で CO₂ 輸送ハブと洋上貯蔵プロジェクトを進めており、これは EU 加盟国初の大規模 CCS プロジェクトになると予想されている (Wright, 2022)。同様に、コペンハーゲンマルメ港は、回収した CO₂ を貯蔵し、古い油田に貯蔵するために配送するプロジェクトへの参加を発表している (Tank News International, 2020)。さらに、コーパスクリスティ港も、塩水帯水層への CO₂ 隔離プロジェクトへの参加を発表している (Port of Corpus Christi, 2022)。これらのプロジェクトは、港湾が CCS フィールドや輸送基地として関与しているものの、主体は港湾地域に立地する産業であり、港湾活動として炭素貯留に積極的に取り組むという点で本稿のアプローチとは異なる。しかし、本稿の内容は新たな挑戦であるため以下のような議論が予想される。

(1) 炭素貯留のタイミング

海洋堆積物は、主に海洋で生産された有機物や陸域由来の有機物を長期間貯留する炭素吸収源としての役割を担っている。長期的な炭素フラックスは、無機炭素（炭酸塩）で $0.13\text{-}0.38 \times 10^{15}\text{g/年}$ 、有機炭素で $0.05\text{-}0.13 \times 10^{15}\text{g/年}$ の範囲で海洋堆積物に蓄積される。このような観点から、浚渫は長期的な貯留を阻害し、CO₂ 排出の原因となる。港湾区域は一般に都市に近い陸上からの栄養塩流入が多く、一次生産量が多い。外洋に比べ、炭素貯留量は比較的大きい。逆に、港湾機能を維持するために定期的に維持浚渫が行われる港湾で沈降する有機物は、長期安定性に関して不確実性が高く、港湾内の海底に沈降した時点で炭素が蓄積されたという解釈は支持されないと考えられる。

この議論は、性質の異なる水域を混同していることに起因している。そこで、沖合沿岸域を港湾（開発区域）とそれ以外の区域に分けることを提案する。港湾では、有機物の沈降は貯留と見做さず、封じ込められる浚渫土砂

に含まれる有機物の量を貯留と見做す。その他の水域では、有機物の沈降量を貯留と見做し、開発や漁業活動（底引き網漁など）による攪乱を排出量と見做す。この区別は、開発された土地とそうでない土地（森林、農地、草地）の区別と同様である、このように沖合沿岸域を分割することで、少なくとも底質の攪乱を想定している港湾では、考え方 2 が支持されやすくなる。

定量的な観点からは、浚渫による排出量の放出と同時に有機物堆積物の貯留量を計算しなければ、考え方 1 は偏ったものとなる。しかし、面的不均質性を持つ沖合沿岸域において、年間有機物沈降量を定量的に算出することは困難かつ不確実である。考え方 2 では、浚渫土砂の含有量と含まれる炭素量から炭素貯留量を算出することができる。有効活用される浚渫土砂量は、プロジェクトごとに明確に数値化される。浚渫土砂中の炭素量の測定は、合理的な浚渫区域区分で分析することになるが、浚渫時に実施する有害化学物質の調査方法が適用できるので十分実現可能である。したがって、定量的な検証可能性という点では考え方 2 が優位となる。

(2) 炭素貯留効果の持続性

次に、炭素貯留効果の持続性の問題がある。CCS の漏洩についてはモニタリング戦略の重要性が指摘されているが (Lichtschlag et al., 2021)、浚渫土砂を有効活用した場合の炭素貯留効果を適切に評価するのと同様に、工事後の炭素残留量についても考慮する必要がある。浚渫土砂に含まれる有機炭素は、工事中や工事後の環境によっては分解され、大気中に放出される可能性がある。浚渫土砂を干潟に利用する場合、日本では覆砂構造が多く採用されているが、干潮時の水面が浚渫土と砂の界面より下にある場合、浚渫土砂の上層が好気性になり、有機物の分解が促進され、炭素貯留率が最適でなくなることがある (Kuwae et al., 2016)。海底堆積物中の有機物は、その分解性によって、主に易分解性、準易分解性、難分解性の 3 つに分類され、日本の海底堆積物における有機物の含有率はそれぞれ、0.5～12.9%、1.8～17.1%、72～97%と測定されている (Asaoka et al., 2020)。この 3 つの分類の全球規模での平均分解速度定数は、それぞれ 70, 0.5, 0.001/年と推定され (Stolpovsky et al., 2018)、酸素欠乏は分解速度を 3～10 倍低下させることが知られている (Canfield, 1994; Kristensen, et al., 1995)。したがって、炭素残存率を最大化するためには、嫌気状態を維持する構造の検討が必要となる。また、有機物分解には生物攪乱も大きな要因であるが、生物攪乱を受ける深度（最大でも 0.5m 程度）は通常覆砂層であることを踏まえれば、浚渫土砂を覆砂

する 2 層構造はかなりの炭素の残存が期待できる。さらに、深掘跡の埋戻しの場合、上述のように、深掘跡では低酸素状態が発生しやすいため、有機物の好気性分解が制限され、より高い炭素残存率が得られることが期待される。

また、炭素貯留効果があったとしても、浚渫事業の実施や浚渫土砂の有効活用の際に排出される CO₂ が大きければ、ネットの効果はなくなる。排出と吸収（あるいは排出削減）を定量的に評価し、それぞれについて効果的に削減（あるいは増加）させられるか否かを含めて検討がなされるべきである。用地造成は、工事完了までに数十年を要する。そのため、浚渫土砂が大気中に露出しないような工法を考案し、工事期間中の有機物の分解を最小限に抑えることが必要となる可能性もある。いずれにせよ、残留炭素に関する十分なデータはなく、本稿で提案する浚渫土砂の有効利用を気候変動対策として位置づけるのであれば、十分なデータとモニタリングが必要となる。

5. 浚渫土砂の有効活用とBCE創出による炭素貯留のポテンシャル

5.1 浚渫土砂の封じ込めによる炭素貯留の定量的効果

ここでは、浚渫土砂の封じ込めによる炭素貯留の気候変動対策としての定量的な効果を試算する。前章の 2 つの考え方に基づき、考え方 1 に必要な港湾内底泥への炭素貯留量、浚渫による CO₂ 排出量、浚渫土砂の有効活用による CO₂ 排出削減量、考え方 2 に必要な浚渫土砂の有効活用による炭素貯留量を推計する。この際、浚渫土砂の有効活用による炭素貯留量について残存率を考慮する必要がある。さらに、浚渫と有効活用のための工事（BCE 造成材の整備工事等）に伴う CO₂ 排出量の考慮も必要となる。

浚渫土砂の有効活用による炭素貯留効果を定量的に評価するために、現時点での港湾における CO₂ 排出量と BCE による炭素貯留量を含めて全体の排出量と吸収量を比較する。日本の港湾からの CO₂ 排出量については、国土交通省港湾局（2009）で 125 港合計（日本の港湾取扱貨物量の 88%）の試算結果が示されており、これを基に表のように日本の港湾における CO₂ 排出量を推計できる。ただし、CNP で対象としている臨海部立地企業からの CO₂ 排出量は含まれていないことには留意が必要である。また、BCE による CO₂ 吸収量は桑江ら（2019）により日本全体で 132 万 t-CO₂/年であると示されており、日本の海岸線に占める港湾の割合を用いて港湾関連部分を比例

按分により推計する。試算の前提条件となる炭素残存率を表-4 に、試算結果を図-2、表-5 に示す。

吸収側としては、考え方 1 では、港湾内の底泥への炭素貯留 78.1 万 t-CO₂/年、BCE による貯留 16.2 万 t-CO₂/年と浚渫土砂の有効活用による炭素貯留 22.5 万 t-CO₂/年で合計 116.9 万 t-CO₂/年となるが、この量は排出側に比べると非常に小さい（考え方 2 でも同様）。特に、浚渫事業に伴う CO₂ 排出量（39.9 万 t-CO₂/年）は炭素の貯留効果（255,000 t-CO₂）を上回っている。このように、有効活用方法と浚渫工事方法の両面での工夫がなされない限り、実務的には吸収源対策とはならないことになる。

表-4 浚渫土砂の有効活用時の炭素残存率

項目	値	出典
深掘跡埋戻しの残存率	90%	中川（1998）、岡田ら（2016）に基づき筆者らが設定
藻場干潟造成の残存率	80%	
用地造成の残存率	30%	

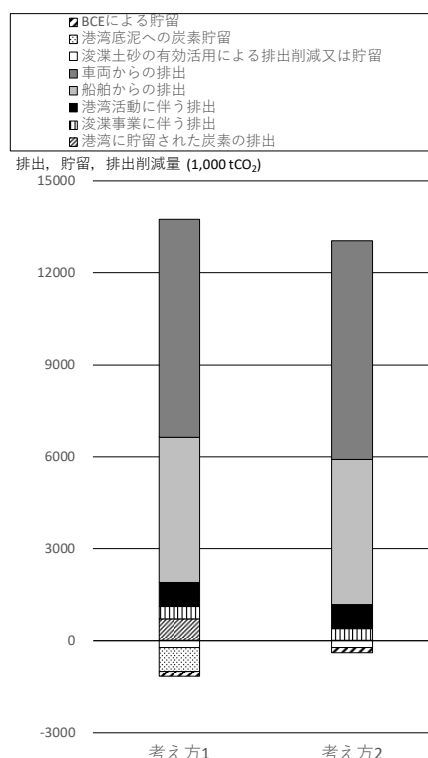


図-2 日本全体の港湾関係の CO₂ 排出量と吸収量

5.2 CNP実現に向けた新たな対策の意義

前節の結果から、BCE による貯留や浚渫土砂の有効活用による炭素貯留効果に比べ CO₂ 排出量が多いため、CNP の実現には抜本的な変化が必要であることが分かった。本節では、CNP の実現に向けた新たな気候変動対策としての浚渫土砂中の炭素貯留と、浚渫土砂の有効活用

表-5 日本全体の港湾関係のCO₂排出量と吸収量

	排出量・吸収量	千 t-CO ₂	根拠
1	コンテナクレーン	39	国土交通省港湾局 (2009) の「荷役機械」分を酒井・渡邊 (2006) におけるコンテナクレーン割合で配分 (5 港平均)
2	ヤード荷役機械	347	国土交通省港湾局 (2009) の「荷役機械」分を酒井・渡邊 (2006) におけるヤード荷役機械割合で配分 (5 港平均)
3	リーファーコンテナ	137	国土交通省港湾局 (2009)
4	管理棟	262	国土交通省港湾局 (2009)
5	港湾活動に伴う排出合計	785	1～4 の合計
6	浚渫事業に伴う排出 (建設機械等)	399	年間浚渫土量 × CO ₂ 排出原単位 (0.025 t-CO ₂ /m ³) (林, 2011)
7	浚渫事業に伴う排出 (貯留された炭素の排出)	713	年間浚渫土量 × 浚渫土砂中の炭素含有量
8	船舶 (入出港時)	1,320	国土交通省港湾局 (2009) の「停泊中船舶」分から酒井・渡邊 (2006) における入出港時/停泊時の排出量で推計 (5 港平均)
9	船舶 (停泊時)	3,413	国土交通省港湾局 (2009)
10	船舶からの排出合計	4,733	8, 9 の合計
11	車両 (ゲート前渋滞)	91	国土交通省港湾局 (2009)
12	車両 (港内ドレージ)	46	国土交通省港湾局 (2009)
13	車両 (背後圏輸送)	6,986	国土交通省港湾局 (2009)
14	車両からの排出合計	7,123	11～13 の合計
15	排出合計 (考え方 1)	13,753	5, 6, 7, 10, 14 の合計
16	排出合計 (考え方 2)	13,040	5, 6, 7, 10, 14 の合計
17	港湾内の底泥への炭素貯留	-781	港湾区域 (634,000 ha) × TOC 堆積原単位 (1.23 t-CO ₂ /ha) (久保 2015)
18	浚渫土砂の有効活用による排出量の削減又は炭素貯留量の増加	-225	年間浚渫土量 × 浚渫土砂中の炭素含有量 × 有効活用割合 × 残存率
19	BCE による貯留	-162	上の値に海岸線延長のうち港湾区域の割合(12%)を乗じたもの
20	吸収合計 (考え方 1)	-1,169	17, 18, 19 の合計
21	吸収合計 (考え方 2)	-387	18, 19 の合計
22	合計 (考え方 1)	12,254	15, 20 の合計
23	合計 (考え方 2)	12,653	16, 21 の合計

による BCE の創出の意義について、二つのシナリオを想定して 2030 年及び 2050 年の港湾における CO₂ 発生量・吸収量を試算する。シナリオ 1 は、既往研究や先行事例によりある程度実現可能性が確認できている施策を中心としたもの、シナリオ 2 は次世代エネルギーへの転換を前提としたものである。いずれのシナリオでも浚渫土砂の有効活用による炭素貯留効果、そして浚渫土砂の有効活用による BCE の創出拡大を目指すものであるが、シナリオ 2 では浚渫事業を集中的に実施し、BCE 基盤材としての活用をできる限り目指すことを想定したものである。各シナリオの詳細を表-6 に、排出量算定のための前提条件を表-7 に、浚渫土砂の有効活用に関する前提条件を表-8 に示す。なお、両シナリオとも、浚渫土砂の有効活用について施工技術の改善に伴い、炭素残留率が改善されることを想定する。分析を通じて考察する。

計算結果は、図-3 および表-9 に示すとおりである。結果は以下のように解釈できる。

- ・ CNP が実現するのは、排出源対策が大幅に進んだシナリオ 2 の 2050 年であり、次世代エネルギーへの転換

が不可欠であることが示唆される。シナリオ 2 では浚渫土砂が多く発生するため、浚渫土砂の有効利用は吸収源対策として大きな効果が期待できる。

- ・ 施工技術の改善により CO₂ 排出量を抑制できれば、一定の正味吸収効果が得られる (両シナリオとも 2030 年、2050 年には浚渫事業に伴う CO₂ 排出量が浚渫土砂の有効活用の効果を下回っている)。
- ・ BCE 造成材としての浚渫土砂の有効活用は、浚渫土砂中の炭素貯留と、BCE 創出による貯留量の増加という二つの効果により、CNP 達成に貢献が可能である。シナリオ 1 でも、2050 年にはカーボンニュートラルがほぼ達成されるような量的効果が期待できる。
- ・ 浚渫土砂中の炭素貯留効果自体は有効活用した時点で発現するが (実際、集中的な浚渫事業が終了した 2050 年の貯留効果はシナリオ 2 の 2030 年における効果よりも小さい)、BCE による炭素貯留はその後も続くため (実際、BCE による炭素貯留量はいずれのシナリオでも 2030 年より 2050 年の方が大きい)、早く創出するほど以降の純排出量をより効率的に削減できる。

表-6 シナリオの詳細

	シナリオ 1	シナリオ 2
概要	電化等の既存施策を中心とした対策、現状の浚渫量を前提とした BCE 創造強化	左に加え、水素輸入拠点整備等に伴い浚渫事業が促進、BCE 創造の更なる強化
荷役機械 リーファーエリア	電動化、再エネ由来電力の使用 開閉式屋根の設置等による省電力、再エネ由来電力の使用	左に加え、FC 化 左に加え、自立型水素電源等を設置
管理棟 船舶入港	再エネ由来電力の使用 IMO の目標 (2030 年燃料効率-40%、2050 年 CO ₂ 排出量-50%)、低速航行	左に加え、自立型水素電源等を設置 左に加え、ゼロエミッション船の導入
船舶停泊 車両渋滞	LNG 船の導入、陸電供給の導入 デジタル物流の活用により解消	左に加え、ゼロエミッション船の導入 デジタル物流の活用により解消
港内ドレージ 背後圏輸送	船舶へのモーダルシフト、低速航行、EV 化 鉄道へのモーダルシフト、EV 化	左に加え、FC 車両の導入 左に加え、FC 車両の導入
浚渫事業 BCE の創造	現状の浚渫量を維持 浚渫土砂を BCE 造成材へ一定量活用	今後 10 年間航路浚渫事業の集中実施 浚渫土砂の BCE 造成材への活用強化

表-7 排出量算出のための前提条件

	2030 年	2050 年	設定根拠
脱炭素電源割合	59%	88%	エネルギー基本計画(素案)(2021)、IEA(2021)
荷役機械電動化率(シナリオ 1)	50%	100%	筆者らの設定
荷役機械電化による CO ₂ 削減率	70%	70%	環境省(2015)
荷役機械 FC 化率(シナリオ 2)	30%	99%	IEA(2021)の PHEV, BEV, FCEV の販売台数シェア(heavy trucks)と同じに設定
開閉式屋根の設置による省電力率	10%	10%	博多港の事例
自立型水素等電源の導入率(シナリオ 2)	30%	99%	荷役機械 FC 化率(シナリオ 2)と同様
陸電供給導入率	50%	100%	筆者らの設定
陸電供給導入による CO ₂ 削減率	40%	40%	国土交通省港湾局(2009)、ただし化石燃料による発電を想定した際の率
港湾関連車両のモーダルシフトの割合	50%	電化 FC 化以外分	筆者らの設定
船舶からの CO ₂ 削減率(シナリオ 1)	40%	50%	IMO(2018)
ゼロエミッション船導入率(シナリオ 2)	17.1%	92.5%	国際海運ゼロエミッションプロジェクト(2022)、IEA(2021)
LNG による CO ₂ 削減率(シナリオ 1)	25%	25%	Sifakis and Tsoutsos(2021)
港湾関連車両の電化割合	8%	59%	IEA(2021)の Share of electric vehicles in stock(heavy truck)
FC 車両導入率	30%	99%	荷役機械 FC 化率(シナリオ 2)と同様

表-8 浚渫土砂の有効活用に関する前提条件

項目	値	根拠
年間浚渫土量(現状)	1,595 万 m ³ /年	桑江ら(2019)
年間浚渫土量(シナリオ 2 の今後 10 年間)	2,595 万 m ³ /年	水素輸入拠点整備等のため年間 1,000 万 m ³ を追加的に実施
炭素貯留量(残存率考慮前)	63 t-CO ₂ /万 m ³	前節の結果
深掘跡埋戻への活用割合	5.9%	財務省(2018)
藻場干潟への活用割合(シナリオ 1)	25%	桑江ら(2019)
藻場干潟への活用割合(シナリオ 2)	50%	BCE 造成のため上記の 2 倍設定
用地造成への活用割合(シナリオ 1)	41.1%	財務省(2018)の有効活用割合から深掘跡埋戻、藻場・干潟への活用分を引いたもの
用地造成への活用割合(シナリオ 2)	16.1%	財務省(2018)の有効活用割合から深掘跡埋戻、藻場・干潟への活用分を引いたもの
深掘跡埋戻の際の残存率	95%	施工上の工夫が行われることを想定
藻場・干潟の際の残存率	90%	施工上の工夫が行われることを想定
用地造成の際の残存率	50%	施工上の工夫が行われることを想定

表-9 シナリオ分析結果（単位：千 t-CO₂）

	現状	2030 シナリオ 1	2030 シナリオ 2	2050 シナリオ 1	2050 シナリオ 2
港湾活動に伴う排出	785	369	136	63	1
浚渫事業に伴う排出	399	244	170	14	0
港湾に貯留された炭素の排出	713	713	1,160	713	713
船舶からの排出	4,733	1,965	1,446	580	61
車両からの排出	7,123	3,689	1,579	910	1
排出合計（考え方 1）	13,753	6,960	4,491	2,281	775
排出合計（考え方 2）	13,040	6,247	3,331	1,568	62
港湾底泥への炭素貯留	-781	-781	-781	-781	-781
浚渫土砂の有効活用による排出削減	-225	-347	-680	-347	-418
BCE による貯留	-162	-355	-788	-740	-1,558
貯留及び排出削減合計（考え方 1）	-1,169	-1,483	-2,250	-1,868	-2,758
吸収合計（考え方 2）	-387	-702	-1,469	-1,086	-1,976
合計（考え方 1）	12,254	5,321	1,693	467	-1,914
合計（考え方 2）	12,653	5,545	1,862	482	-1,558

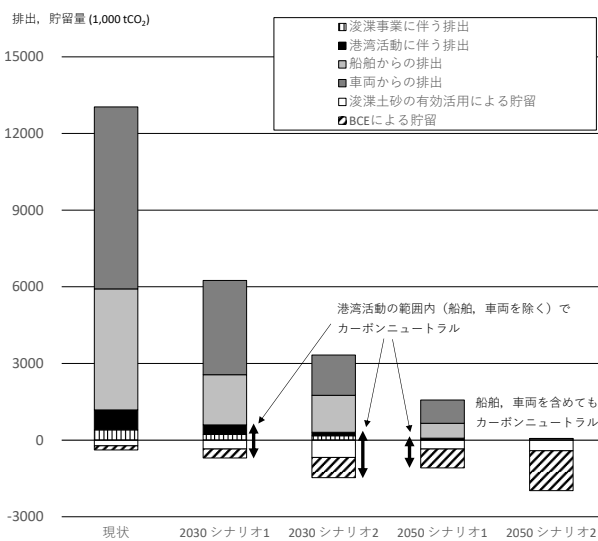
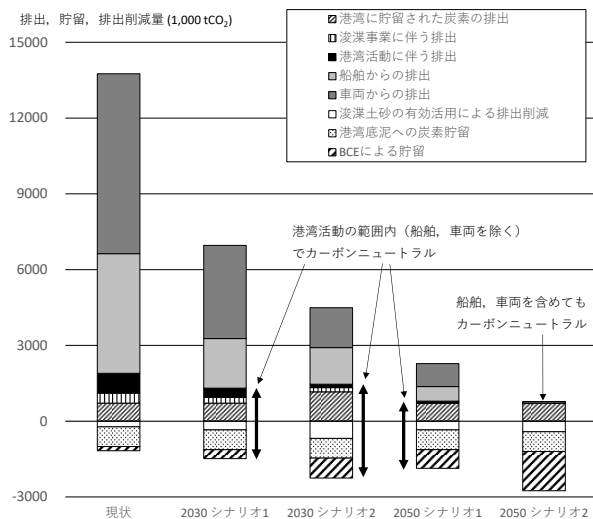


表-6 シナリオ分析結果
（上：考え方 1，下：考え方 2）

シナリオ 2 では、2050 年にカーボンニュートラルが達成されるが、浚渫土砂の有効活用や BCE による貯留量と比較しても、CO₂ 排出量は小さくなっている。この点、最終的には排出源対策の方が重要であるとも言えるが、残余排出の吸収源としての意義も軽視すべきではない。例えば、本稿では CO₂ 排出量には臨海部の産業からの排出は含めていないが、臨海部には重厚長大産業が立地しており、将来的にも残留排出は必ず存在する。日本全体のカーボンニュートラルの実現に貢献するためには、本稿で提案した新たな対策には、残余排出の吸収源としての意義もある。

以上の議論から、次世代エネルギー輸入拠点整備のために浚渫事業を集中的に実施し、発生した浚渫土砂を BCE 造成材として有効活用するという政策シナリオは、CNP 達成に向けても CNP 達成後も、気候変動対策として十分に受け入れられるものと考えられる。

5.3 新たな対策の政策への反映

港湾におけるカーボンニュートラルの実現には、次世代エネルギーが不可欠であり、そのための輸入拠点の整備が重要となる。輸入拠点形成のための港湾事業で発生する浚渫土砂は、BCE 造成材として有効活用でき、CO₂ 吸収量をさらに増やすことができる。

港湾事業における浚渫量は、予算制約や環境負荷の観点から激減しており、従来の価値観では浚渫事業の推進が困難になっている。浚渫事業を有効な気候変動対策として推進するためには、脱炭素社会実現への貢献や、浚渫土砂の有効活用と BCE 創出による炭素貯留効果のポテンシャルが認知されることが必要となる。すなわち、港湾整備事業を次世代エネルギーの普及や気候変動対策の

ための吸収源として有効に活用するためには、これまでの視点を変える必要がある。

日本のように歴史的に自主的なアプローチに依存した環境政策を展開し、港湾ガバナンスの関係でビジネスベースでの気候変動対策が相対的に展開されにくい国にとっては、本稿で提案する新しい対策は政府のイニシアチブが必要となる。日本では、大規模な港湾整備は国が直接実施するため、国の判断次第で新たな対策の実現可能性は高くなる。BCEによる貯留を最適化しつつ、建設時のCO₂排出量を削減する技術も重要であることから、技術開発の観点でも政府が主導する必要がある。

6. おわりに

本稿では、浚渫土砂に含まれる有機炭素の貯留、浚渫土砂をBCE造成材として有効活用したBCE創出による炭素貯留に着目し、これらの新しい気候変動対策の効果について検討した。港湾事業により発生する浚渫土砂をBCE基盤材としての有効活用することでCO₂吸収に貢献することに加え、浚渫土砂の安定的な封じ込めによる含まれる有機炭素の貯留効果を本稿で初めて明らかにした。先行研究では、主に港湾運営時の排出源対策に着目しているが、本稿で提案する気候変動対策は、港湾整備段階で発生する浚渫土砂や造成したBCEが長期的なCO₂吸収源として機能する点で斬新である。しかし、これらの吸収源対策の効果は、港湾で排出されるCO₂の多くを占める船舶や車両からの排出を含めると、広義のカーボンニュートラル実現には十分ではなく、CNPを包括的に実現するためには、次世代エネルギーへの転換等の抜本的な対策が必要となることを示唆している。また、カーボンニュートラルを目指す社会・国にとって、BCEの創出や浚渫土砂の有効活用といった吸収源対策は残余排出をオフセットするための重要な要素であることは言うまでもない。さらに、日本の環境政策や港湾ガバナンスの特徴を踏まえると、新たな気候変動対策が実現には政府のイニシアチブが重要となる。

浚渫土砂中の炭素の貯留効果を精緻に定量化するためには、今後さらなる科学的な裏付けが必要となる。また、CNPを実現するためには、各種対策の組合せ、対策の実施方法、資金調達の方法等についても検討する必要がある。こうしたことを通じて、国や港湾の特性に基づいた個々の港湾におけるCNP実現に向けたより具体的なロードマップの提供が可能になるものと考えられる。

(2023年5月31日受付)

参考文献

- 岡田知也, 井芹絵里奈, 秋山吉寛: 東京湾沿岸域の底泥の堆積速度, 国土技術政策総合研究所資料, Vol.888, 2016.
- 環境省: 物流分野におけるCO₂削減対策促進事業(国土交通省連携事業), 2015.
- 楠山哲弘, 首藤啓, 中嶋さやか, 河井崇: 博多湾窪地埋め戻しによる海域環境の改善, 土木学会論文集B2(海岸工学), Vol. 73, pp. I_1357-I_1362, 2017.
- 久保篤史: 東京湾における炭素循環, 東京海洋大学博士論文, 2015.
- 桑江朝比呂, 吉田吾郎, 堀正和, 渡辺謙太, 棚谷灯子, 岡田知也, 梅澤有, 佐々木淳: 浅海生態系における年間二酸化炭素吸収量の全国推計, 土木学会論文集B2, Vol.75, pp.10-20, 2019.
- 国際海運ゼロエミッションプロジェクト: 国際海運の2050年カーボンニュートラル達成に向けて, 2022
- 国土交通省港湾局: 「港湾における温室効果ガス排出削減計画」作成ガイドライン(案), 2009.
- 財務省: 予算執行調査(平成30年度), 2018.
- 酒井浩, 渡邊豊: コンテナターミナルにおけるCO₂排出量の評価と削減に関する基礎的研究, 運輸政策研究, Vol.9, pp.15-21, 2006.
- 資源エネルギー庁: エネルギー基本計画(素案), 2021.
- 杉村佳寿, 小林登茂子, 三戸勇吾, 吉原哲, 岡田知也, 桑江朝比呂: 博多港におけるブルーカーボンオフセット制度の創設と今後の展望, 土木学会論文集G(環境), Vol.77, pp.31-48, 2021.
- 内藤了二, 中村由行, 浦瀬太郎: 港湾域の底泥中化学物質濃度と底生生物叢の関係, 港技術研究所資料, Vol.1174, 2008a.
- 内藤了二, 井上徹教, 中村由行, 浦瀬太郎, 久野賢二: 三河湾窪地の埋め戻し土砂投入時における濁りの拡散特性と密度成層の効果, 海岸工学論文集, Vol.55, 2008b.
- 中川康之: 内湾域における泥質物の堆積過程に関する研究, 港湾技術研究所報告, vol. 37, 1998.
- 林友弥: 港湾整備事業における二酸化炭素排出量の推計について, 平成23年度国土交通省国土技術研究会, 2011.
- Acciaro, M., Ghiara, H., Cusano, M.I., 2014. Energy management in seaports: A new role for port authorities. *Energy Policy*. 71, 4-12.
- Alamouh, 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.
- 18) Arimura, T.H., Kaneko, S., Managi, S., Shinkuma, T., Yamamoto, M., Yoshida, Y., 2019. Political economy of voluntary approaches: a lesson from environmental policies in Japan. *Economic Analysis and Policy*. 64, 41-53.
- 19) Asaoka, S., Jadoon, W.A., Umehara, A., Takeda, K., Otani, S., Ohno, M., Fujitake, N., Sakugawa, H., Okamura, H., 2020. Organic matter degradation characteristics of coastal marine sediments collected from the Seto Inland Sea, Japan. *Marine Chemistry*. 225.
- 20) Bergqvist, R., Monios, J., 2019. *Green Ports in Theory and Practice*. Green Ports. Elsevier.
- 21) Bicer, Y., Dincer, I., 2018. Clean fuel options with hydrogen for sea transportation: a life cycle approach. *International Journal of Hydrogen Energy*. 43, 1179-1193.
- 22) 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.
- 23) Boile, M., Theofanis, S., Sdoukopoulos, E., Plytas, N., 2016. Developing a port energy management plan issues, challenges, and prospects. *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*. 2549, 19-28.
- 24) Bosman, R., Loorbach, D., Rotmans, J., Raak, R.V., 2018. Carbon lock-out: leading the fossil port of Rotterdam into transition. *Sustainability*. 10.
- 25) 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.
- 26) Cammin, P., Yu, J., Heilig, L., Voß, S., 2020. Monitoring of air emissions in maritime ports. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 87.
- 27) Canfield, D.E., 1994. Factors influencing organic carbon preservation in marine sediments. *Chemical Geology*. 114, 315-329.
- 28) Cariou, P., Parola, F., Notteboom, T., 2019. Towards low carbon global supply chains: a multi-trade analysis of CO₂ emissions reductions in container shipping. *International Journal of Production Economics*. 208, 17-28.
- 29) 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.
- 30) Cheon, S., 2017. The economic-social performance relationships of ports: roles of stakeholders and organizational tension. *Sustainable Development*. 25, 50-62.
- 31) 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.
- 32) Davarzani, H., Fahimnia, B., Bell, M., Sarkis, J., 2016. Greening ports and maritime logistics: A review. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 48, 473-487.
- 33) Di Ilio, G., Di Giorgio, P., Tribioli, L., Bella, G., Jannelli, E., 2021. Preliminary design of a fuel cell/battery hybrid powertrain for a heavy-duty yard truck for port logistics. *Energy Conversion and Management*. 243.
- 34) Eriksen, T.H., 2018. Scales of Environmental Engagement in an Industrial Town: Glocal Perspectives from Gladstone, Queensland. *Ethnos*. 83, 423-439.
- 35) European Commission, 2014. Directive 2014/94/EU of the European Parliament and of the Council of 22 October 2014 on the Deployment of Alternative Fuels Infrastructure.
- 36) Fox, A., Trefry, J.H., 2018. Environmental dredging to remove fine-grained, organic-rich sediments and reduce inputs of nitrogen and phosphorus to a subtropical estuary. *Marine Technology Society Journal*. 52, 42-57.
- 37) Froehlich, H.E., Afflerbach, J.C., Frazier, M. and Halpern, B.S., 2019. Blue growth potential to mitigate climate change through seaweed offsetting. *Current Biology*. 29, 3087-3093.
- 38) Geerlings, H., Van Duin, R., 2011. A new method for assessing CO₂-emissions from container terminals: A promising approach applied in Rotterdam. *Journal of Cleaner Production*. 19, 657-666.
- 39) Gokhale, H., 2021. Japan's carbon tax policy: Limitations and policy suggestions. *Current Research in Environmental Sustainability*. 3.
- 40) Gonzalez-Aregall, M., 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.
- 41) Hales, D., Lam, J.S.L., Chang, Y.T., 2016. The Balanced Theory of Port Competitiveness. *Transportation Journal*. 55, 168-189.
- 42) He, J., 2016. Berth allocation and quay crane assignment in a container terminal for the trade-off between time-saving and energy-saving. *Advanced Engineering Informatics*. 30, 390-405.
- 43) He, J., Huang, Y., Yan, W., Wang, S., 2015. Integrated internal truck, yard crane and quay crane scheduling in a container terminal considering energy consumption. *Expert Systems with Applications*. 42, 2464-2487.
- 44) He, J., Zhang, W., Huang, Y., Yan, W., 2013. A simulation optimization method for internal trucks sharing assignment among multiple container terminals. *Advanced Engineering Informatics*. 27, 598-614.
- 45) Hua, C., Chen, J., Wan, Z., Xu, L., Bai, Y., Zheng, T., Fei, Y., 2020. Evaluation and governance of green development practice of port: A sea port case of China. *Journal of Cleaner Production*. 249.
- 46) 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>.
- 47) 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>.
 - 48) IEA, 2021. Net Zero by 2050 - A Roadmap for the Global Energy Sector. <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>.
 - 49) Ihle, N., Runge, S., Meyer-Barlag, C., Grundmeyer, N., Appelrath, H.J., 2016. Software components for demand side integration at a container terminal. *Computer Science - Research and Development*. 31, 25–31.
 - 50) IMO, 2018. Initial IMO strategy on reduction of GHG emissions from ships. Resolution MEPC.304(72).
 - 51) IMO, 2019. EPC/74/18/ADD.1. Resolution MEPC.323(74): Invitation to Member States to Encourage Voluntary Cooperation between the Port and Shipping Sectors to Contribute to Reducing GHG Emissions from Ships. International Maritime Organization. London, UK.
 - 52) 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.
 - 53) I2S2, 2013. Environmental Initiatives at Seaports Worldwide: A Snapshot of Best Practices. International Institute for Sustainable Seaports (I2S2). VA, USA.
 - 54) Kang, D., Kim, S., 2017. Conceptual model development of sustainability practices: the case of port operations for collaboration and governance, *Sustainability*. 9.
 - 55) Kotrikla, A.M., Lilas, T., Nikitakos, N., 2017. Abatement of air pollution at an aegean island port utilizing shore side electricity and renewable energy. *Marine Policy*. 75, 238-248.
 - 56) Kristensen, E., Ahmed, S.I., Devol, A.H., 1995. Aerobic and anaerobic decomposition of organic matter in marine sediment: Which is fastest?. *Limnology and Oceanography*. 40, 1430–1437.
 - 57) Kuwae T., Kanda, J., Kubo, A., Nakajima, F., Ogawa, H., Sohma, A., Suzumura, M., 2016. Blue carbon in human-dominated estuarine and shallow coastal systems. *Ambio*. 45, 290-301.
 - 58) Kuwae, T., Watanabe, A., Yoshihara, S., Suehiro, F., Sugimura, Y., 2022. Implementation of blue carbon offset crediting for seagrass meadows, macroalgal beds, and macroalgae farming in Japan. *Marine Policy*. 138.
 - 59) Lam, J.S.L., Li, K.X., 2019. Green port marketing for sustainable growth and development. *Transport Policy*. 84, 73-81.
 - 60) 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 (2), 169-189.
 - 61) Li, Y., Li, J., Wei, F., Huang, Q., 2020. CO₂ emission performance evaluation of Chinese port enterprises: A modified meta-frontier non-radial directional distance function approach. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 89.
 - 62) Lichtschlag, A., Pearce, C.R., Suominen, M., Blackford, J., Borisov, S.M., Bull, J.M., de Beer, D., Dean, M., Esposito, M., Flohr, A., Gros, J., Haeckel, M., Huvenne, V.A.I., James, R.H., Koopmans, D., Linke, P., Mowlem, M., Omar, A.M., Schaap, A., Schmidt, M., Sommer, S., Strong, J., Connelly, D.P., 2021. Suitability analysis and revised strategies for marine environmental carbon capture and storage (CCS) monitoring, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 112.
 - 63) Lim, S., Pettit, S., Abouarghoub, W., Beresford, A., 2019. Port sustainability and performance: A systematic literature review. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 72, 47-64.
 - 64) Linder, A., 2018. Explaining shipping company participation in voluntary vessel emission reduction programs. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 61, 234-245.
 - 65) Lovelock, C.E. and Duarte, C.M., 2019. Dimensions of blue carbon and emerging perspectives. *Biology Letters*. 15.
 - 66) Macreadie, P.I., Anton, A., Raven, J.A., Beaumont, N., Connolly, R.M., Friess, D.A., Kelleway, J.J., Kennedy, H., Kuwae, T., Lavery, P.S., Lovelock, C.E., Smale, D.A., Apostolaki, E.T., Atwood, T.B., Baldock, J., Bian-chi, T.S., Chmura, G.L., Eyre, B.D., Fourqurean, J.W., Hall-Spencer, J.M., Huxham, M., Hendriks, I.E., Krause-Jensen, D., Laffoley, D., Luisetti, T., Marbà, N., Masque, P., McGlathery, K.J., Magonigal, J.P., Murdi-yarso, D., Russell, B.D., Santos, R., Serrano, O., Silli-man, B.R., Watanabe, K. and Duarte, C.M., 2019. The future of Blue Carbon science. *Nature Communications*. 10.
 - 67) Mamatok, Y., Jin, C., 2017. An Integrated Framework for Carbon Footprinting at Container Seaports: the Case Study of a Chinese Port. *Maritime Policy and Management*. 44, 1-19.
 - 68) 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.
 - 69) Monios, J., 2019. Polycentric port governance. *Transport Policy*. 83, 26-236.
 - 70) 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.
 - 71) Nellemann, C., Corcoran, E., Durate, C. M., Valdes, L., De Young, C., Fonseca, L. and Grimsditch, G., 2009. Blue Carbon - A Rapid Response Assessment, United Nations Environmental Programme. GRID-Arendal. Birkeland Trykkeri AS, Birkeland.
 - 72) Notteboom, T., Lam, J.S.L., 2018. The Greening of Terminal Concessions in Seaports. *Sustainability*. 10.,

- 3318.
- 73) Notteboom, T., Verhoeven, P., 2010. The awarding of seaport terminals to private operators: European practices and policy implications. *European Transport* .45, 83-101.
- 74) Papaioannou, V., Pietrosanti, S., Holderbaum, W., Becerra, V.M., Mayer, R., 2017. Analysis of energy usage for RTG cranes. *Energy*. 125, 337-344.
- 75) 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.
- 76) PIANC, 2019a. 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.
- 77) PIANC, 2019b. Carbon Management for Port and Navigation Infrastructure - EnviCom WG Report n° 188 - 2019. The World Association for Waterborne Transport Infrastructure PIANC Maritime Navigation Commission. Brussels, Belgium.
- 78) Port of Corpus Christi, 2022. Port of Corpus Christi enters into agreement with Talos Energy and Howard Energy Partners for carbon capture and sequestration opportunities. <https://natgeo.nikkeibp.co.jp/atcl/news/21/031900137/>.
- 79) Poulsen, R.T., Ponte, S., Sornn-Friese, H., 2018. Environmental upgrading in global value chains: the potential and limitations of ports in the greening of maritime transport. *Geoforum*. 89, 83-95.
- 80) Puig, M., Michail, A., Wooldridge, C., Darbra, R.M., 2017. Benchmark dynamics in the environmental performance of ports. *Marine Pollution Bulletin*. 121, 111-119.
- 81) Raymond, C.M., Berry, P., Breil, M., Nita, M.R., Kabisch, N., de Bel, M., Enzi, V., Frantzeskaki, N., Geneletti, D., Cardinaletti, M., Lovinger, L., Basnou, C., Monteiro, A., Robrecht, H., Sgrigna, G., Munari, L. and Calfapietra, C., 2017. An Impact Evaluation Framework to Support Planning and Evaluation of Nature-based Solutions Projects. Report prepared by the EKLIPSE Expert Working Group on Nature-based Solutions to Promote Climate Resilience in Urban Areas. Centre for Ecology & Hydrology, Wallingford, United Kingdom. http://www.eklipse-mechanism.eu/apps/Eklipse_data/website/EKLIPSE_Report1-NBS_FINAL_Complete-08022017_LowRes_4Web.pdf.
- 82) Schrobback, P., Meath, C., 2020. Corporate sustainability governance: Insight from the Australian and New Zealand port industry. *Journal of Cleaner Production*. 255.
- 83) Schipper, C.A., Vreugdenhil, H., de Jong, M.P.C., 2017. A sustainability assessment of ports and port-city plans: comparing ambitions with achievements. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 57, 84-111.
- 84) Sifakis, N., Tsoutsos, T., 2021. Planning zero-emissions ports through the nearly zero energy port concept. *Journal of Cleaner Production*. 286.
- 85) 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.
- 86) Sornn-Friese, H., Poulsen, R.T., Nowinsk, 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.
- 87) Stolpovsky, K., Dale, A.W., Wallmann, K., 2018. A new look at the multi-G model for organic carbon degradation in surface marine sediments for coupled benthic–pelagic simulations of the global ocean. *Biogeosciences*. 15, 3391–3407.
- 88) Styhre, L., Winnes, H., Black, J., Lee, J., Le-Griffin, H., 2017. Greenhouse gas emissions from ships in ports - Case studies in four continents. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 54, 212-224.
- 89) Sugimura, Y., 2020. Public-private partnerships in Japan's cruise terminal operations. *Research in Transportation Business & Management*.
- 90) Taljaard, S., Slinger, J.H., Arabi, S., Weerts, S.P., Vreugdenhil, H., 2021. The natural environment in port development: A ‘green handbrake’ or an equal partner?. *Ocean & Coastal Management*. 199.
- 91) Tank News International, 2020. Copenhagen Port participates in carbon capture and storage project. <https://portofcc.com/port-of-corpus-christi-enters-into-agreement-with-talos-energy-and-howard-energy-partners-for-carbon-capture-and-sequestration-opportunities/>.
- 92) Tichavska, M, Tovar, B., Gritsenko, K.D., Johansson, L., Jakanen, J.P., 2019. Air emissions from ships in ports: Does regulation make a difference? *Transport Policy*. 75, 128-140.
- 93) Tseng, P.H., Pilcher, N., 2019. Evaluating the key factors of green port policies in Taiwan through quantitative and qualitative approaches. *Transport Policy*. 82, 127-137.
- 94) 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.
- 95) 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.
- 96) Verhoeven, P., 2010. A Review of Port Authority Functions: Toward a Renaissance?. *Maritime Policy and Management*. 37, 247-270.
- 97) Wang, L., Peng, C., Shi, W., Zhu, M., 2020. Carbon dioxide emissions from port container distribution: Spatial characteristics and driving factors. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 82.
- 98) Wilmsmeier, G., Froese, J., Zotz, A.K., 2012. Energy consumption and efficiency: emerging challenges from

- reefer trade in South American container terminals. *FAL Bull.* 329, 1-9.
- 99) Winkel, R., Weddige, U., Johnsen, D., Hoen, V., Papaefthimiou, S., 2016. Shore side electricity in Europe: potential and environmental benefits. *Energy Policy.* 88, 584-593.
- 100) Winnes, H., Styhre, L., Fridell, E., 2015. Reducing GHG emissions from ships in port areas. *Research in Transportation Business & Management.* 17, 73-82.
- 101) Wright, C., 2022. An overview of Europe's carbon capture and storage developments. <https://www.azocleantech.com/article.aspx?ArticleID=1452>.
- 102) 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.
- 103) WPCI, 2010. Carbon Footprinting for Ports: Guidance Document. World Port Climate Initiative.
- 104) Xing, H., Spence, S., Chen, H., 2020. A comprehensive review on countermeasures for CO₂ emissions from ships. *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* 134.
- 105) Yiğit, K., Kökkülünk, G., Parlak, A., Karakaş, A., 2016. Energy cost assessment of shoreside power supply considering the smart grid concept: a case study for a bulk carrier ship. *Marine Policy.* 43, 469-482.
- 106) Zis, T.P.V., 2019. Prospects of cold ironing as an emissions reduction option. *Transportation Research Part A: Policy and Practice.* 119, 82-85.
- 107) Zis, T., North, R.J., Angeloudis, P., Ochieng, W.Y., Bell, M.G.H., 2014. Evaluation of cold ironing and speed reduction policies to reduce ship emissions near and at ports. *Maritime Economics & Logistics.* 16, 371-398.

国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of NILIM

No. 1251

July 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

港湾における気候変動対策の新たな可能性の提案
↳ 浚渫土砂の有効活用による炭素貯留とブルーカーボン生態系の創出の有効性