

戦後の臨海部における埋立工法と土地利用に関する研究

江崎 翼¹・阿部 貴弘²

¹ 非会員 目黒区役所 都市整備部(〒153-8573 東京都目黒区上目黒 2-19-15)

E-mail:cstb15013@g.nihon-u.ac.jp

² 正会員 日本大学 理工学部 まちづくり工学科(〒101-8308 東京都千代田区神田駿河台 1-8-14)

E-mail:abe.takahiro@nihon-u.ac.jp

我が国において、江戸時代より臨海部での埋立は有用な土地造成手法として用いられてきた。以来、時代の影響を受けて、土地利用も地域ごとに特色を持つようになった。そこで本研究では、埋立に関する工法について、戦後からの発展の流れを把握し、埋立用途とその目的を併せ見る事で、技術発展と用途ごとに用いられる工法の傾向とその歴史を明らかにすることを目的とする。社会背景と埋立工法の関係性を図表にまとめ分析し、そこから、各工法の技術発展には社会背景も深く関わっていることが明らかになった。

Key Words: *The world war II, Landfill, Seawall, Soil improvement, Work boats, Sea airport,*

1. 研究背景・目的

我が国では、江戸時代、徳川幕府が増大する江戸の人口を収容するための居住地確保を目的に、台地を切り崩して海面を埋め立てる大規模な工事を行った。

このように、国内で臨海部での埋立は有用な土地造成として江戸時代から行われていることが確認されている。その中で埋立技術は進歩を遂げ、現在では短工期、広範囲の埋立が実施されるようになった。同時に土地利用も高度成長期における技術開発や、産業の発展など、時代の影響を受けて地域ごとに特色を持つようになった。したがって、埋立技術は、社会要請を実現するための発展が不可欠である。そこから、埋立地の土地利用と埋立技術との関係を明らかにすることは、今後の臨海部における土地の活用方法を議論する上で有意義であると考えられる。

埋立地に関する既存研究は主に技術、土地利用双方の観点からなされており、安井ら¹⁾の研究により、戦後の埋立地の用途変遷を国土計画、公有水面埋立法から分析していた。そこから、産業構造の変化等により埋立地の土地利用も変化していく中で、全国で約5000haの民間の低未利用地が出現していることが明らかになっていた。

北村ら²⁾の研究では、埋立式人工島の施工技術について、厳しい自然条件下での人工島建設工法の現状・将来動向をまとめていた。現在用いられている地盤改良、基礎の技術が明らかになっており、その中で、難工事化・

工費削減・環境対策・安全面についての課題が存在することも指摘されていた。

こうした研究が存在する一方、用途と技術の関係性や傾向、変遷についての研究は行われていない。

そこで本研究では、各埋立工法について、戦後からの発展の流れを把握し、埋立用途と目的を併せ見る事で、技術の発展と用途ごとに用いられる工法の傾向とその歴史を明らかにすることを目的とする。

2. 研究方法

(1) 調査対象

技術については、戦後から現在に至るまでの発展箇所を総合的に見る。

埋立の事例に関しては、埋立地特有の土地利用として空港、再開発地域に着目し、その地区で用いられた埋立工法について調査する。空港に関しては、戦後から段階的に埋立を施工しており、大規模な事業である羽田空港を研究対象とする。再開発に関しては、50haを超える大規模埋立であり、それぞれ異なる用途から都市機能を有する用途として再開発された豊洲地域、北九州港八幡東田地区、横浜みなとみらい21地区を研究対象とする。

(2) 埋立技術の進歩過程の調査

日本土木史、土木工法事典などの文献を用いて埋立に用いられる技術の概要、進歩過程を読み取る。

上記の部分について文献調査では明らかにならなかったことについては、土木施工会社、埋め立て工事に関する協会にヒアリング調査を行い情報の補完を行う。文献調査の結果と合わせて、技術発展の流れと年代ごとに用いられた技術の傾向をそれぞれ表、グラフにまとめ、横断的に分析を行う。

(3) 用途、技術変遷の背景についての調査

文献調査により、埋立に関する法規や技術変遷の背景を把握する。その他、戦後から段階的に埋立を施工しており、大規模な事業である羽田空港や、埋立地の再開発事例などを調査し、(1)において作成した表と横断的に分析する。

3. 結果と考察

(1) 関連法規についての調査

埋立で適用される法律は主に公有水面埋立法があるが、通常の埋め立てに比べて環境問題などで課題が存在する海面処分場に関する法規は、これに加えて清掃法、廃掃法などがある。埋立に関する法規の歴史を表-1に示す。

表-1 海面処分場に関する法規の歴史

西暦(和暦)	法令の出来事	分類	詳細
1950(昭和25)年	港清法制定	埋立全般	港清整備などの基本となる開発立法
1953(昭和28)年	港清整備促進法の制定	埋立全般	重要港清の埋立等に係る資金調達の円滑化を図る法律
1954(昭和29)年	清掃法の制定	廃棄物処理場	法第6条において「埋立場」と定義、同令第2条において、一層の埋立高さ(5m以内)、速やかに覆土をするなどを規定
1961(昭和36)年	港清整備緊急措置法の制定	埋立全般	港清整備五箇年計画の基礎となる法律
1962(昭和37)年	新産業都市建設促進法の制定	埋立全般	全国総合開発計画の主要課題である拠点開発方式による地域開発を実施するために制定された法律
1970(昭和45)年	海洋汚染防止法の制定	埋立全般	汚濁の発生防止と余水の処理が厳しく問われたため、水質汚濁防止対策技術が発達した
1971(昭和46)年	廃掃法の施行	廃棄物処理場	海洋処分や廃棄物の埋立処分を「最終処分」と位置づける「埋立処分基準」が制定され、陸上埋立処分と水面埋立処分のほか旧坑道等の地下空間利用も付け加えられた
1973(昭和48)年	港清法改正	廃棄物処理場	「廃棄物埋立権限」が創設
1973(昭和48)年	公有水面埋立法改正	埋立全般	「無免許埋立を許す追認制度」を廃止し、不法投棄事業が減少に関する基準(以下「基準法令」という)を定める
1977(昭和52)年	共同命令の施行	廃棄物処理場	水面埋立地の指定で、廃棄物による水面埋立地を廃掃法に規定する処理施設として指定
1979(昭和54)年	公有水面埋立地の指定	廃棄物処理場	「再生資源の利用に関する法律」が制定
1991(平成3)年	リサイクル法の施行	埋立全般	前年の法律改正により廃止の届出が制度廃止された
1992(平成4)年	廃止の届出制度(厚令46)	埋立全般	環境保全に関する施設を総合かつ計画的に推進し、もって現在及び将来の国民の健康で文化的な生活の確保に寄与するとともに人の福祉に貢献することを目的とする
1993(平成5)年	環境基本法の施行	埋立全般	法律の適用範囲を一定規模以上としていた規模要件を撤廃し、構造・維持管理・処分場の廃止についての基準が強化され、明確化された
1997(平成9)年	技術的な基準を強化	廃棄物処理場	廃掃法に基づく最終処分場の構造・維持管理基準の強化・明確化、前年の廃棄物処理法改正により必要となった最終処分場の廃止の確保を行うための基準の設定を行う
1998(平成10)年	廃止の追認制度	廃棄物処理場	環境基本法に移行するための多くの法的整備を導いた。また、脱環境化、低炭素社会への取り組みと相まって循環型社会の指標として最終処分場が定められ、埋立処分場の最小化や埋立処分場不要論によって埋立処分場の在り方が厳しく問われている
2000(平成12)年	循環基本法	廃棄物処理場	一般廃棄物最終処分場の設計指針に「性能指針」が導入され、「廃棄物最終処分場の計画・設計要綱」として集大成された
2000(平成12)年	性能指針	廃棄物処理場	埋立処分場を建設する場合、廃棄物処理法における基準命令、いわゆる構造基準(埋立処分場の強力な設計指針となっていた)から構造基準と同程度の性能を有する
2002(平成14)年	性能指針への変更	廃棄物処理場	「廃棄物最終処分場の計画・設計要綱」として集大成された
2005(平成17)年	指定区域制度	廃棄物処理場	環境保全上の支障が生じおそれがある区域は、その区域内での土地の形質変更は施工方法の基準に従い実施することと知事への事前の届出が義務づけられた
2007(平成19)年	港清法改正	廃棄物処理場	廃棄物埋立権限が適性確認制度の対象になるとともに、施設の劣化や劣化による性能の低下を事前に防止する「予防保全型」の考えを導入した計画的な維持管理の考え方に転換した

1973年に廃棄物護岸の定義や無免許埋立を許す追認制度の廃止など、環境問題への対策が講じられていた。1970年代は高度経済成長の終焉であり、これ以前は多くの用地を急速に造成していたことや、1965年には夢の島ハエ騒動が起こったことから、1970年代以降は土地を多

く造成することから、環境への配慮を優先するようになった転換点と言える。

海面処分場の定義は、公共の利益に寄与する土地利用を目的とした「公有水面埋立法」³⁾の埋立免許願書において、『埋立に用いる土砂などの採取場所及び採取量を記載した図書』という欄に、廃棄物の種類と量を記載した埋立地である。『埋立地の用途』に廃棄物処分用地とは書けないことが明らかになった。

この中で、埋立に関する法律の中で最も重要とされる公有水面埋立法の改訂前後の比較内容を表-2に示す⁴⁾。

表-2 公有水面埋立法の改定内容

	制定時(大正10年)	改訂時(昭和48年)
埋立の目的	耕地拡大、地租の増加	産業復興、地域開発
法制定(改正)の主眼	事業の円滑な推進	埋立の利権化の排除 環境保全への配慮
埋立法の性格	手続法	手続法(計画法、事業法への転換の必要性)
衝突する利害	漁業関係のみ	環境、市民生活への影響
意見聴取	地元市町村会	地元市町村長(議会の議決)
縦覧制度	なし	関係都道府県知事への通知、公衆の縦覧、意見書の提出
許可基準	地方長官の自由裁量	免許基準の法定
分譲目的の埋立	制限なし	公共団体などに限る
権利の移転などの規制	免許条件、登記が必要	許可基準を設け法律上の規制とする
転用規制	なし	許可に係らせる、罰則による担保
追認制度	無願埋立の追認を広く認める	追認制度を廃止
環境庁長官との調整	なし	主務大臣の認可に当たって意見を聞く

ここから、公有水面埋立法の制定時には事業の円滑な推進を主眼に置いていることや、埋立の追認を認めていることから、いかに埋立の手続きをスムーズに行うかが目的になっていると考える。改訂時には環境や市民生活への配慮についてに加え追認制度の廃止などが追加で記載されており、環境問題への対応や工業だけではなく市民や一般企業など、埋立地が今までより広い範囲で活用できるような改訂がなされたと考える。

(2) 埋立に使用された技術

埋立手順としては図-1の通り初めにセル式、ケーソン式などがある護岸工事を行い、次にサンドレーン工法などがある地盤改良を行い、最後に埋立工事を行う⁵⁾。

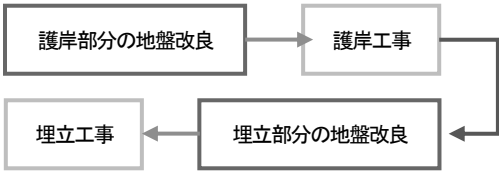
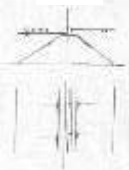
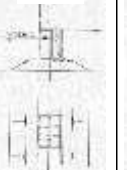
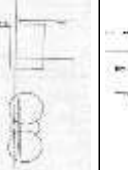
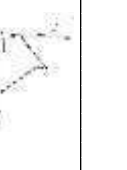


図-1 埋立工事の手順

a) 護岸の技術の流れ

埋立工事で用いられる各護岸構造の工事手順と断面図を4つに分類し、表-3に示し概要を調査する^{5a)}。

表-3 護岸の工事手順・断面図⁹⁾

	捨石式	ケーソン式	鋼板セル式	矢板式
工事手順	基礎捨石投入 基礎捨石均し 被覆ブロック据付 上部コンクリート打設	底面工 床版鉄筋組立 床版型枠組立 床版コンクリート打設 鉄筋組立 型枠組立・組外 コンクリート打設 型枠組外	鋼板セル製作 鋼板セル運搬 中詰材投入(鋼板セル部) アーク打設 中詰材投入(アーク部) 上部コンクリート打設	閉鎖形状に組合せ 矢板打込み 継手処理
断面図				

捨石式は、石材を堤体状に積み上げた護岸構造であり、工事手順が少なくもっとも単純、経済的な断面である。大水深においても利用可能であり、一番ポピュラーな断面であることが明らかになった。特徴は、施工が簡単で急速に行える点である。廃棄物埋立の施工に関して不利な点は、水深が大きくなると堤体の沈下量も無視できない事、内法面の分だけ廃棄物埋立部分の内容積が削減される点である。

矢板式は、矢板を打ちこみ、土をとめて上部を舗装し護岸を造成する工法である。

矢板式の特徴は、軟弱地盤において急速施工が可能であり、施工設備が比較的簡単なことである。欠点としては、基本的に鋼板を用いるため腐食対策が必要であることである。

ケーソン式は、一般に数層に分割して施工され、赤字部分の鉄筋組立～コンクリート打設の作業が繰り返されるということが明らかになった。工法の特徴としては、工場製品であるため品質の信頼性が高く、反復作業のため省力化、迅速化、施工管理が容易であることが挙げられた。その他、古くから存在する一番手慣れた構造で急速施工が可能であることが明らかになった。廃棄物埋立の施工に関して不利な点は、堤体間の隙間から内側に封じ込めたつもりの廃棄物が浸出、漏出する恐れがあることである。

セル式は、赤字で示したようにあらかじめ工場で加工、製作された鋼板を、作業基地で溶接により組み立ててセル構造を形成し、その後運搬し中詰を施す特徴があることが明らかになった。その他の特徴は、根入れ部を必要としないため硬い地盤にも利用できる点と、急速施工で一般的に低廉な点である。欠点は、中詰め未施工期間中のセルが構造的に極めて脆弱であるため、事故が発生し

やすいという部分である。

4つの工法の技術発展した点について、捨石式の建造は、以前は潜水士の手で行われてきたが、近年では機械化が進んでおり、その中でもGPSの導入や均し作業の最適化が取り込まれ、建設機械の開発がみられる。

矢板式の技術発展の経緯は、高度成長期で大規模・大水深な埋立が増えた際に、矢板を控え式にする、二重構造にするなど形状の変化があり、その後は鋼矢板式などより強固な材料を用いるようになった。

ケーソン式、セル式護岸の技術発展の経緯は、工場製品である円筒状のプレキャストコンクリートブロックを施工時点で継ぎ足しを行うPCウェル工法や、鋼矢板を円形に組み立てた後大型クレーン船で現地に運搬するプレハブ鋼矢板セル工法など、共に手順の応用、変化が起こったといえる。プレハブ鋼矢板セル工法の特徴は、軟弱地盤上であっても比較的深い場所に鋼矢板下端を支持できる硬い層があると鋼矢板セル構造物を施工することができ、単純な作業の組み合わせで施工できるため特殊な施工施設が必要ないことである。しかし、鋼矢板セルの従来の施工法では、施工時間が長く中詰め未施工期間中のセルが構造的に極めて脆弱であるため、事故が発生しやすい、という欠点があった。

それに加え、鋼矢板式護岸は大水深用の鋼矢板として、Z型鋼矢板やH型鋼矢板が生産されるなど、素材の変化も見られた。

その他、ケーソン工法では耐波安定性に優れ、経済的でしかも周辺の海域に優しい新しい防波堤構造を開発するため、昭和50年頃から種々の研究開発が行われるようになった。鋼矢板では、1990年代から基礎大型化が進み2000年代になると基礎の大水深化が進んだ。

主な護岸の種類と埋立工事において採用された年を表-4に示す⁹⁽¹⁾⁾。

表-4 主要な護岸構造の歴史

採用開始年	護岸の工法
1954(昭和29)年	鋼矢板セル式
1957(昭和32)年	鋼板セル式
1969(昭和44)年	鋼管矢板基礎
1971(昭和46)年	オープンケーソン(PCウェル工法)
1984(昭和59)年	曲面スリットケーソン
昭和60年代	ハイブリットケーソン
1990(平成2)年	二重円筒ケーソン
2007(平成19)年	根入れ式鋼板セル工法

護岸の新技術が採用された箇所は、ふ頭や港湾など物流、工業用地が多いことが明らかになった。

他にも、廃棄物処分場では、遮水性を高めるための鋼矢板の技術進歩や緑地や交流施設で用いられる親水性護岸の開発が行われていた。

日本土木史には高度経済成長時代の臨海部の埋立地に見られる、超軟弱地盤などにおける深い基礎として鋼管杭が急速に普及してきた。1970年代になると、これまで荷重条件と土質条件を主体として選定されてきた基礎工法が、次第に厳しくなる施工現場の制約に応じていることが明らかになった。また、環境問題などの施工条件に対応して新しい施工法が取り入れられるようになったと推測できる。

ヒアリング調査では護岸構造全体の歴史の流れとして、水深が浅く、強度がある場所では、波が来ない場所では緩傾斜護岸、ブロック積み、L型ブロックで護岸を形成することが多く、これらは戦前から存在する護岸構造であることが明らかになった。その後、軟弱地盤で、大水深の埋立が増え、矢板式の護岸構造が注目され始めた。大規模な埋立が増えた際に、矢板を控え式にする、二重構造にするなどの改良があった。その他、重力式や鋼矢板式の護岸構造も新たに開発された。これらは直立式であったが、平成に入ってから環境の損失を克服する活動が起こり、山砂などのいわゆる通常の埋立では自然と共存できる緩傾斜護岸が再注目された。

このことから、矢板式、セル式、重力式の3つに関してはそれぞれで施工条件を比較しながら建造しており、傾向の変化はなく、捨石式については、戦前まで主流であった工法が、社会背景により再注目された例といえる。技術に関しては、手順の改善、材料の変化、省力化と廃棄物埋立においては遮水性向上による環境問題への対応が図られたといえる。

b) 地盤改良の技術の流れ

地盤改良については、実際に埋立で用いられることが多い圧密促進工法、締固め工法、固化処理工法の3つに分類して分析する⁹⁷⁾。

圧密促進工法(ドレーン工法)の特徴は、近年に関しては積載荷重工法と併用している点と低騒音、低振動での施工が可能な点である。欠点は、圧密促進工法のみでの施工の場合では地盤の締固め、固結の効果は期待できず、地盤は緩いままとなる点である。その他、この工法はサンドドレーンとペーパードレーンに大別される。このため液状化の発生は防いでも地震後にある程度の沈下が発生する可能性がある。

締固め工法(サンドコンパクション工法)は、建設機械を用いて大きなエネルギーを地盤に作用させ、土構造を変化させて土の密度を増加させることにより、強度増加を図る。特徴としては、締固め、補強、圧密排水を基本原理としており、複数の原理を併せ持つので砂質土、粘性土、有機質などほとんどすべての土質に適用できる点である。欠点は、騒音、振動を伴うことである。

固化処理工法は、セメントなどの安定剤を地盤中に供給し、攪拌翼を用いて原地盤と混合する。最近では、石

炭火力の副産物である石炭灰をセメントの相当部分を置き換えて低強度の安定処理土を形成するFGC深層混合処理工法も開発された。

それぞれの技術発展が起こった箇所としては、圧密促進工法は、サンドドレーンから始まり、現在はプラスチックドレーンが用いられる場合が多いなどドレーン部分の進歩が見られた。プラスチックボードドレーン工法は、地盤の変形に追従しやすく、所定の断面積と連続性を容易に維持でき、かつ軽量の施工機械を利用できるものとして需要を伸ばしている。

締固め工法は、サンドコンパクション船などの建設機械の改良が見られた。その他、最近では砂の密度を高めて液状化強度を大きくするための工法と位置づけられることが多い。

表層混合処理、深層混合処理工法は、軽量材料の発展や石炭灰をセメント部分との置き換えなど、素材の変化、改良が見られた。

地盤改良全体では、ドレーンや混合処理で用いられる素材の開発により、施工期間の短縮や環境問題への対応などの進歩が見られた。他にも、サンドドレーン船やサンドコンパクション船などの建設機械の改良も要因として挙げられる。

主な地盤改良の種類と埋立工事で採用された年を表-5に示す⁹⁴⁾。

表-5 主要な地盤改良の歴史

採用開始年	地盤改良の工法
1952(昭和27)年	サンドドレーン工法
1956(昭和31)年	締固め砂杭工法(SCP工法)
1957(昭和32)年	振動棒締固め工法
1963(昭和38)年	生石灰パイル工法
1964(昭和39)年	ペーパードレーン工法
1966(昭和41)年	強制置換工法
1973(昭和48)年	重錘落下工法
1973(昭和48)年	表層処理工法
1978(昭和53)年	深層混合処理工法
1981(昭和56)年	粉体噴射攪拌工法
1992(平成4)年	事前混合処理工法
1997(平成9)年	SGM軽量土工法
1999(平成11)年	管中混合固化処理工法

空港や人口島などの、大水深、大規模な工事が必要とされる場合において事前混合処理などの地盤改良の新技術が用いられることが明らかになった。

その他、日本土木史には、地盤改良工法が床掘置換工法、サンドドレーン工法、サンドコンパクションパイル工法、深層混合処理工法の順で発達してきている点が着目されるという記述があった。ここから、近年にかけては大規模、大水深での埋立工事や、地震時の安定の確保に対応していったことが考えられる。

その他、軟弱地盤を地盤改良する際に重要となるもの

として調査技術が挙げられる。発展の歴史について述べると、高度成長期以降は、年ごとに適地減少に伴い海域においては沿岸部から沖合への展開を余儀なくされている。このような流れの中で、調査技術もあらゆる地盤を対象として、広域的な地質構造からサイトの基礎地盤の物理・力学的性状を精度よく、効率的に把握することが要求されてきた。したがって、調査技術はこれらの要求を満たすための非常に多くの手法が改良・開発されてきた。しかし、それらのプロトタイプのお多くは、1970年初期以前に開発されたものが多く、その後のエレクトロニクス、計測技術およびコンピューターの発展と関連して急速に調査技術における機器の小型化、高精度化、データ処理の迅速化、自動化が行われている。

ヒアリング調査では地盤改良全体の歴史の流れについて、戦前はプレロード工法、1950年代は自然に起こる沈下の課題の登場により、早く圧密できるドレーン工法、1960年代は工場、空港、ビルなど重いものを建設するため現状では支持力が足りないため、支持力の強化を行うサンドコンパクション工法、1970年代は埋立地の地盤をあらかじめ強固にする考えの登場により、深層混合処理工法、1980年代からは環境への配慮、住宅内でも施工できるよう静的に改良することが明らかになった。ここから、地盤改良に関しては、時代ごとの社会要請により工法が段階的に開発、改良していったと言える。

地盤改良全体に関しては、建設機械の改良と材料の変化による工期短縮、埋立工事の水深深化と環境問題への対応が図られたといえる。

土地利用に関する地盤改良工法の開発の経緯は、新しく事業を行うたびにそれに見合った工法の改良を施しており、用地造成を目的として技術の発展を行っているといえる。

c) 埋立工事の技術の流れ

埋立工事で用いられる用材は主に、浚渫土砂、山砂、廃棄物の3つが存在する。

埋め立て工事の技術変遷は、海底土砂を用材として用いる場合では、浚渫船の性能が大きく関わっている。浚渫船ごとの埋立方法を表-6に、その後用いられる作業船、バージの説明を表-7に示す¹²⁾。

表-7 作業船ごとの埋立方法

浚渫船	海上運搬方法	埋立方法
ポンプ浚渫船	排砂管(水力輸送)	直接排送(排砂管)
	排砂管と中継ぎポンプ船	
非航式グラブ浚渫船	土運船(底開・側開式)	バージ直投
ディンパー浚渫船		バーザンローダ埋立
バケット浚渫船		揚土機+ダンプ運搬
		揚土機+シフダブルコンベヤー
		揚土機+フローディングコンベヤー
		揚土機+空気圧送
ドラグサクソン浚渫船	自走航行	直接排送(排砂管)
自航式グラブ浚渫船	自走航行	捨土(グラブで投棄)

表-7 作業船の概要

作業船・バージ名	概要
土運船	船体中央部に土砂を積込むようご形の泥倉をもち、下端の泥倉扉が開閉できる底開きの土運船。土砂を泥倉内に積込み、土捨場で運搬し、泥倉扉を開いて土砂を水中へ排出する。
揚土船	全開バージ、底開バージによる土砂の直接投下による埋め立てが進むと護岸内では水深も浅くなり、喫水制限のあるバージによる直接投下はできなくなる。これ以後は箱型バージにより運搬された土砂を揚土船により所定の高さまで埋め立てる。土運船により運搬されてきた土砂を揚土装置(バックホウ式)により揚荷し、コンベヤ等を介して埋立地等へ排出する作業船。
全開バージ	船体中央にホールドは1つ持ち、ホールド部の船体そのものが左右に分かれ開放することで、土砂を直接投下させる構造になっている。センターヒンジ式とサイドヒンジ式があるが、現在ではセンターヒンジ式が主流になっている。
底開バージ	全開バージ同様、土砂の直接投下を行えるものであるが、全開バージと要領は異なり、倉内をいくつか分割しその底に開閉扉を設け、その扉を土圧で開放することで土砂を投下させるものである。全開バージに比べ構造が複雑であるが、土砂の投下は均一であるので水深が浅い場合は底開バージが好まれる。
箱形バージ	工事の初期と最終段階で使用される。初期段階では地盤改良部の敷き砂の運搬に、最終段階では揚土船の土砂運搬に使用される。
ポンプ船	浚渫船の一種で、吸入管を海底に下し、カッターを回転させて切り崩した土砂を海水とともにポンプで吸い込み、排砂管を通して直接埋立地に排送する船。
グラブ船	浚渫船の一種で、旋回式クレーンで吊り下げたグラブを海底地盤上に落下させて海底を掘削する船。
ディンパー船	強力なディンパー掘削力により、固結地盤や破砕岩の浚渫に威力を発揮する。船の固定と移動にはスバッドを利用する。船首尾にある昇降自在のスバッドを海底に立てて船体を固定し、船首のディンパーアームの先端のバケットで掘削する。
バケット船	水底土砂をチェーンバケットで連続的に掘削する。高効率で浚渫単価も安い。
ドラグサクソン船	浚渫船の一種で、自航しながら海底に接地させたドラグヘッドを引きずり、浚渫ポンプで土砂を吸い上げて船内の泥倉に積み込み運搬する船。

山砂や廃棄物を用材として用いる場合では、運搬方法や廃棄物に関してはその素材が大きく関わっている。調査の結果、近年ではベルトコンベアーやモータスクレーパを用いた、山砂による埋立なども行われていることが明らかになった。

次に、作業船の技術発展を表-8に示す¹³⁾。

表-8 作業船の技術発展

作業船	進歩箇所	備考
ポンプ浚渫船	大型化	近年の港湾工事においては、大量土砂の処理、大深度浚渫、硬土盤、および岩盤の浚渫、長距離輸送などの厳しい作業条件になってきたため、過酷な海象条件、浚渫深度及び排送距離の増大などによる対策も考慮されており、衝撃装置付のスバッド支持、クリスマスツリー方式による船体保持がある。
	耐波性の向上	昭和30年代に入ってからポンプ浚渫船の大型化が進められたところから、自動化の基礎となる各種要素技術の開発が進められるとともに、それらを装置としてとりまとめ、これらが実用化されてきた。その後も引き続き周辺装置を含めた自動化につながる各種装置の開発が進められた。
	自動化	自動化による省力化、省人化と浚渫能力の向上が図られている。
ドラグサクソン浚渫船	ドラグヘッドなどによる適用土質の拡大	従来グラブ浚渫船の欠点と言われた掘削跡の海底の凹凸の1/10まで水平掘削が可能となった。
	浚渫能力の向上	浚渫時に揺れ、傾斜がない。他の航行船舶の波浪による揺れ、位置の移動がなく、また、浚渫位置の設定など、ワイヤーによる方式よりも早く確実にできる。大深度以外のグラブ浚渫船に凌駕されるものが多い。
	土捨て方式の改良	浚渫機の駆動方式は、電動式、ディーゼル直結、油圧式などにより多少異なるが、自動化により、最も効率の良い自動運転ができるのは、電動式駆動である。
グラブ浚渫船	制御装置	最近のものは沿革総載や自動化が容易な後者の2方式が採用されている。
	スバッド方式	揚土船で分類される機械式、ポンプ式の短所を補うためドロのような土質の土砂の揚土には、揚土機に機械式、搬送機部に用いる。
	自動化	
バケット浚渫船	自動化	
揚土船	圧送ポンプ	

高度経済成長の始まった昭和30年代前半より昭和40年代中ごろまでは、浚渫・埋立のためのポンプ浚渫船の全盛の時代であった。これ以降においては、工事要請が多様化し、公害問題に対応した油回収など環境整備船の建造やヘドロ浚渫船の開発、作業船の大型化が進められた。ポンプ浚渫船は環境問題の対応により、余水を多く含むという点で昭和50年代頃からは次第に減少した。代わりに、浚渫による余水が少ないので環境によいとされる、グラブ浚渫船が主流になった。この頃からコンピュータの導入が始まり、最近では浚渫船の自動化、ロボット化

を図った浚渫船の改造，建造も行われるようになっていくことが明らかになった。

近年は，自然条件が厳しくなりつつあり，対象とする施設は大型化している．特徴的工事としては耐震バースの整備，ふ頭の再開発や，関西国際空港や東京国際空港などの沖合展開である．そのため，地盤改良船，バージアンローダ船，起重機船，グラブ浚渫船の兼用船の建造が従前に比べ目立つ。

以上の結果から，作業船に関しては，それぞれの浚渫船が時代によって活躍している傾向が多く，大型化と自動化による工期短縮，人手不足の改善が図られるようになったといえる。

現在では，埋立に用いられる廃棄物は，都市ごみと産業廃棄物に分かれており，さらに産業廃棄物は有害物質を含むかそうでないかで分けられる。

(3) 土地利用についての調査

a) 再開発地域

今回調査した戦後の大規模埋立において，埋立が着手された年で考えると，1960年代は工業用地，ふ頭が多い．1980年代にかけて工業用地を目的とする埋立は減っていき，業務用地や商業用地を目的とする埋立が増え，近年においては人工島建設による空港，交流施設を目的とする埋立が多く見られるようになっていった．再開発を行った大規模埋立地には，横浜みなとみらい 21 地区，北九州港八幡東田地区，豊洲ふ頭などが挙げられた。¹⁴⁾

横浜みなとみらい 21 地区はふ頭，造船所を業務，商業，交流施設に，北九州港八幡東田地区は製鉄所をテーマパーク，博物館に再開発しており，いずれも都市機能として変化を遂げていることが明らかになった。

豊洲ふ頭の埋立地盤は，戦後早い時期に埋め立てられ主に砂質土からなる港湾施設整備に伴う浚渫土により造成された．この埋立地では東京ガス（株）豊洲工場があって，1956～1976 年の間，石炭乾留法による都市ガスの製造を行っていた．当時の安全意識と法規制は緩く，操業に伴ってベンゼンをはじめとする各種の副生成物が発生して周辺環境を汚染，一部は上壤中に残留，浸透した。

豊洲 6 丁目地区については，土地利用変換を図るにあたって地区の全体に盛土を行い，親水空間を提供するために緩傾斜護岸を整備した。

再開発地域での地盤改良工法に関しては，追加で液状化対策を施している．工業地域の再開発の場合は，これに加えて工場から排出された汚染物質を封じ込めるための地盤改良を施している。

b) 東京国際空港の埋立工事

羽田空港の護岸構造と現在の埋立護岸の構造の傾向については，D 滑走路は大半が傾斜堤護岸で一部がケーソン式護岸を用いており，空港埋立においても環境に配慮

した護岸構造になっていることが明らかになった．地盤改良については，沖合展開事業においては，サンドドレーン工法，プラスチックボードドレーン工法，プレロード（載荷盛土）工法を併用した．沖合展開事業は，飽和状態の航空輸送容量への対応のため 1 日も早い事業の完了が要請された為だと考えられる．とくに地盤強度を必要とする部分には深層混合処理工法，高圧噴射工法，生石灰杭工法などを使用していた．その内，図-2 で示した第 1 期計画では，プラスチックボードドレーン工法を採用した．第 2 期計画ではエプロンであり，舗装構造及び勾配規制は滑走路よりも厳しい条件であるため，圧密時間の短縮などを目的としてプレロードを用いた．第 3 計画は滑走路であり水深が大きい．空港周辺では安全運行のために施工機械の高さに制約を受け，改良深度が制限されるためサンドドレーンを採用した．

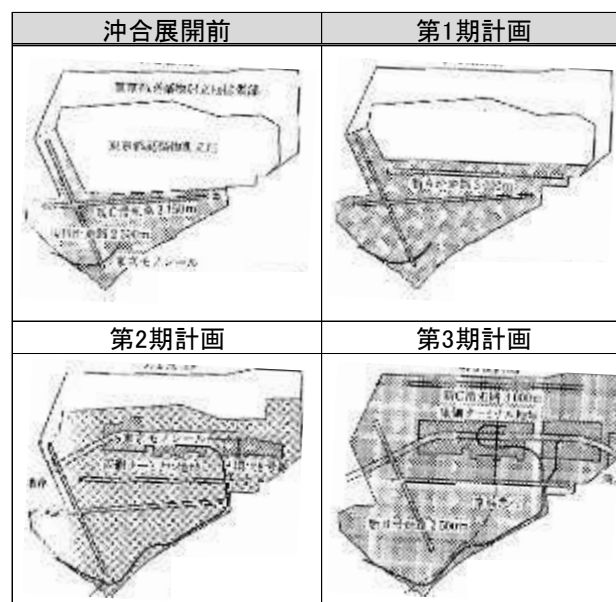


図-2 沖合展開事業¹⁰⁾

空港埋め立て全体については，浚渫残土・廃棄物埋め立てなど，目的が決められていない埋立の場合，より多くの地盤改良が必要となり，施工に時間がかかる場合が多いことが明らかになった．近年に関しては，より多くの設備が建てられるようにするのを目的として，地盤改良を施していることが明らかになった。

他にも，計画空港用地 1100ha のうち，地盤改良必要面積は約 800ha と広域であり，高い技術を有した地盤改良工法が必要になることが明らかになった。

(4) 工法と背景の分析

a) 技術発展の要因についての分析

3 つの工法について技術発展した項目を，用地造成の需要により発展した部分と課題解決・規制のために発展した部分に分類し表-9 に示す。

表-9 技術発展の要因

	用地造成の需要により発展した部分	課題解決・規制のために発展した部分	経緯
護岸	護岸形状の変化(戦後～)		・戦後に大規模・大水深の埋立が増えた際に、それに対応するため形状が最適化された。 ・都市機能を有する用途の埋立が増えた際に、環境と共生できるような親水性護岸の需要が増加した。
	施工手順の最適化(1970年代～)		・高度成長期に、より短工期で大規模な埋立ができるように発展した。
	基礎の大型化(1970年代～)	遮水性の向上(1970年代～)	・ごみ問題や法規による廃棄物埋立護岸の定着により、廃棄物を海に浸出させないように発展した。
地盤改良	新工法の開発(戦後～)	工法の機械化(1970年代～)	・高度成長期における技術革新や1980年代からの労働力確保の課題により建設機械の自動化が図られた。 ・より短工期で埋立地を造成する需要に加え、埋立地により大型の施設を建造する必要が出たため、新工法が段階的に開発された。
		材料の開発(1960年代～)	・工事施工する際に、より環境に配慮した工法が開発された。
	建設機械の進歩(1990年代～)		・建設機械の大型化・自動化など、大規模に箇所より短工期に埋立ができるよう発展した。 ・より環境に配慮した建設機械が開発された。
	静的に改良(2000年代～)		・既存の住宅地で地盤改良を施工する必要が出たため、周辺地域に配慮して静的に工事を行うことができるようになった。 ・高度成長期に、より短工期で大規模な埋立ができるように発展した。
埋立工事(作業船)	作業船の大型化(戦後～)		・より多様な条件下で埋立工事が行えるよう制御装置の開発などが行われた。
	各種装置の開発(戦後～)	作業船の自動化(1980年代～)	・高度成長期における技術革新や1980年代からの労働力確保の課題により作業船の自動化が図られた。

技術発展の要因に関して、用地造成の需要により発展した部分については、戦後から 2000 年代まで年代によって需要が変化していることから、段階的に技術革新が起こっているといえる。課題解決・規制のために発展した部分に関しては、ごみ問題やそれに関する法規の改正による要因が多いことから、技術発展に関しても 1970 年代～1980 年代の間に方向性の変化が起こっている傾向があった。その他にも、災害などによる用途の需要の変化や、新たなる課題の解決による要因が挙げられた。

b) 工法と土地利用の分析

3 つの工法に関しての主要な項目と、技術発展の変遷図を図-3 に示し、年代ごとの埋立工事の特徴と大きな法規の改正と工法の関係図を表-10 に示す。

	護岸	戦後～	1960年～	1970年～	1980年～	1990年～	2000年～	2010年～
捨石式	進歩部分	工法の機械化						
	主要な護岸の傾向	緩傾斜護岸						
矢板式	進歩部分	形状の変化						
	主要な護岸の傾向	自立矢板式護岸						
重力式	進歩部分	施工手順の最適化						
	主要な護岸の傾向	ケーソン						
セル式	進歩部分	形状の変化						
	主要な護岸の傾向	1954年～ 鋼矢板セル式護岸						
地盤改良		戦後～	1960年～	1970年～	1980年～	1990年～	2000年～	2010年～
圧密促進	進歩部分	材料の変化・建設機械の進歩						
	主要な工法の傾向	サンドドレーン工法						
締固め	進歩部分	形状の変化						
	主要な工法の傾向	1960年代～ サンドコンパクションバイブル工法						
固化	進歩部分	環境への配慮・大径化・低コスト化						
	主要な工法の傾向	1970年代～ 深層混合処理工法						
埋立工事(作業船)		戦後～	1960年～	1970年～	1980年～	1990年～	2000年～	2010年～
ポンプ浚渫船	進歩部分	大型化・耐波性向上						
	主要な船の傾向	ポンプ浚渫船						
ドラグサクソン浚渫船	進歩部分	ドラグヘッドなどによる適用土質の拡大・浚渫能力の向上・土捨て方式の改良・油回収能力の付加・自動化						
	主要な船の傾向	ドラグサクソン浚渫船						
グラブ浚渫船	進歩部分	大型化・制御装置の開発						
	主要な船の傾向	グラブ浚渫船						
バケット浚渫船	進歩部分	大型化						
	主要な船の傾向	バケット浚渫船						
ディップバー浚渫船	進歩部分	大型化						
	主要な船の傾向	ディップバー浚渫船						
揚土船	進歩部分	大型化・自動化						
	主要な船の傾向	バージアンローダー船						

傾向 増
↑
↓
傾向 減

図-3 埋立技術の変遷

表-10 社会背景・土地利用と埋立工法の関係

		高度成長期		環境問題対応期		環境保全・再生期		
		戦後～	1960年代～	1970年代～	1980年代～	1990年代～	2000年代～	2010年代～
全体的特記事項	近代的な土質工学の導入期に当たる。	・高度成長期に対応して大規模急速施工を目指した技術の確立時期。 ・1965年夢の島ハエ騒動の事件を機に最終処分場の環境対策が叫ばれ、衛星埋立工法が採用。	・工学技術を導入した封込型技術が確立。 ・1973年にオイルショックが起こり、高度成長期が終了。	・経済の安定成長や環境の保全に対応。 ・労働力確保による施工対策の変更。 ・この時期の特徴的工事としては、耐震バースの整備、ふ頭の再開発や関西国際空港や東京国際空港などの沖合展開である。 ・労働力確保の危機感から必然的に施工対策の変更が求められ、研究開発は飛躍的に整備。	・技術発展の方向性がより省力化、自動化、ロボット化の方向に進む。 ・構造物が大型化する一方、環境問題その他から立地条件が悪化し、研究の重要性が増加。	・昭和30～50年に建設された人工島は離岸距離が比較的小さく、水深10m程度より深い埋立であったが、1981年に埋立が竣工した関西国際空港は、沖合5km、水深18mの海域を埋立てたものであり、近年の人工島は、大半が廃棄物処分のための埋立であること、埋立が水深10mを超える海域へと移行。 ・社会が求めるものは厚重大から軽薄短小にむかうとともに、限らない経済の追求よりは地球規模や地球規模の環境観照と整理に向かう。	現在の課題は阪神淡路大震災、東日本大震災を経て、大地震が起こった際の対応である。多少壊れてもいいが、壊れた際にどう対処するか、迅速に修復できるような構造へ改良する。	
法規に関する特記事項	・港湾法の制定 ・港湾整備促進法の制定 ・清掘法の制定	・新産業都市建設促進法の制定 ・港湾整備緊急措置法の制定	・公有水面埋立法改正で「無免許埋立」を許す追認制度を廃止 ・海洋汚染防止法の制定 ・港湾法改正により廃棄物埋立護岸が定着		・埋め立て処分場の技術的な基準を強化(構造・維持管理・処分場の廃止についての基準が強化され明確化された) ・リサイクル法の施行 ・環境基本法の施行	・環境基本法の施行 ・廃棄物最終処分場の計画・設計要領として性能指針が導入 ・港湾法改正により海面処分場に関して計画的な維持管理の考え方に転換		
技術発展		形状の変化		遮水性向上・施工手順の最適化		環境への配慮・材料の変化・プレハブ化・基礎大型化		
護岸	特記事項	鋼管杭が登場し、以後活弁に採用されるようになる。	・それまで遮水性土留め壁として鋼矢板を用いるのが一般的であったが、次第に軟弱な地盤に深い掘削を行わなければならない場合も現れ、鋼管矢板も用いられ始めた。 ・環境対策として湧出水処理のためローディングアンダーション方式が北港処分場で実施。 ・港湾法改正により廃棄物埋め立て護岸が定着される。	・工場製品である円筒状のプレキャストコンクリートブロックを施工時までに摩りだし、そのつどポストテンション方式でPC鋼棒を緊張して一体化させるPCウェル工法が開発。	・縦横斜護岸が再び注目される。	・鋼矢板護岸について、1990年代から基礎大型化が進み、2000年代になると基礎の大水化が進む。		
技術発展		材料の変化・建設機械の進歩		環境への配慮・静的に改良		環境への配慮・大径化・低コスト化・建設機械の改良		
地盤改良	特記事項	・軟弱地盤対策工法として理論的・工学的なサンドドレーン工法が導入。 ・サンドコンパクション工法が開発。 ・圧密排水、締固め、注入固結、置換工法など、基本原理に基づくものから、いくつかの機能を同時に果たす工法が開発。	・大都市周辺の過密化と構造物の大型化、大規模化に伴い、軟弱地盤対策は急務の急となり、成果の一つとして深層混合処理工法が開発。 ・固化工法が開発。 ・これまで荷重条件と土質条件を主体として選定されてきた基礎工法が、次第に厳しくなる施工現場の制約に対応し、また、それぞれの施工工法に対応して新しい施工工法が確立。 ・高分子材料が急速に開発、普及。	・住宅街で地盤改良を行うに際して、騒音と振動が問題になりそれらの対策がなされる。 ・廃棄物有効活用のために、発電所の残土を利用する施工法が確立。	・環境負荷の低減が強く求められるようになり、廃棄物や建設残土まき道敷土などこれまで建設工事には不適とされていた土材料のリサイクルを図ろうとする技術が開発。 ・埋立地盤の改良において、軟弱な深部に固化工材を添加して適度な強度に改良し、埋立材として利用する管中混合処理工法が開発。 ・阪神淡路大震災で、液状化現象による被害が各地で観測。その一方、サンドコンパクション工法やサンドドレーン工法の施工された地盤の健全性が確認。	・石炭灰を用いた地盤改良が確立。		
技術発展		大型化・新装置の開発		大型化・自動化		大型化・自動化		
作業船	特記事項	・戦後、輸入されたアラメダ号、国産のスズエ号などのサンドポンプ船は、大規模埋立海工業地帯造成の立役者となり活躍。 ・戦後、経済の衰退により、大型船の建造はほとんどなくなり、代わって小型船が多く建造。 ・日本の経済は驚異的な回復を遂げ、再び船舶の大型化に伴って、渡海工事の需要も増加。 ・国の予算に作業船設備費が設けられ、新鋭船の建造あるいは地方公共団体による作業船整備に対する補助(1953年に廃止)が行われる。 ・ポンプ渡渡船ブームが起こる。	・ポンプ渡渡船の場合の移砂管によるスライル輸送、グラブ渡渡の場合の土運船輸送などは施工機械の大型化によって能力が向上。 ・高度成長期には、旺盛な埋立需要を乗って民間企業にポンプ渡渡船の多数建造し、いわゆるポンプ渡渡船ブームを呈する。	・大規模渡渡船について、ポンプ渡渡船「出島」で水深80mまでの渡渡を可能にする。1974年に関西国際空港埋立深層砂採取工事にて就役。 ・その後、国においては、昭和40年代に入り渡渡船などの在来型作業船の建造が下火になり、代わって、民間企業によるポンプ渡渡船が旺盛になる。 ・環境対策のために汚泥渡渡の技術開発が活発化。	・この時期の埋立要領により、地盤改良船、バーフアローグ船、起重機船、グラブ渡渡船の兼用船の建造が従前に比べ目立つ。	・中部国際空港などの大規模な埋立の終了、民主党政権などの背景により、作業船の運用は減少。 ・自民党政権や埋立地造成に再び注目が集まるなどの背景により、再び増加。		

ここから、戦後直後の高度成長期には、新たな工法の出現や既存の作業船の大型化などがなされ、全体でより早く施工できるような技術発展があったと言える。その後、1970年代には、廃棄物護岸の定義や無免許埋立を許す追認制度の廃止など、環境問題への対策が講じられてた。その前後の年代では、自動化や遮水性の向上など技術発展の方向転換が起こったほか、それ以前に主流だった工法にとってかわって、より環境に良いとされる既存の工法に注目が集まり、環境問題に対応した新工法の開発などが行われた。1990年代前後には、環境問題の対応から、いかにして現存する自然を守り、育んでいくかという課題を解決するため保全の方向に進んだ。加えて、阪神淡路大震災をはじめとした大災害に対応するための技術開発が見られたほか、既存の埋立地の再開発や、海上空港などの大規模な埋立が再び行われるようになり、それに従って各工法も技術発展や新工法の開発が起こった。

以上のことから、夢の島をはじめとした埋立地のごみ問題が重要視されるようになり、公有水面埋立法や港湾法に環境や市民生活に関する改訂がなされた1970年代前後で、埋立に関する技術発展にも大きな転換が訪れたといえる。その後の臨海部は、港湾や工業地域だけではなく、大規模な海上空港や、環境に配慮した親水性護岸を活用した交流施設などの建設が活発化し、より多くの人々に親しまれるようになった。これらの変化により表面化してきた多様な課題やニーズに対応するために、技術開発の方向性もより多岐にわたったといえる。

4. まとめ

本研究では、技術発展と工期、土地利用を図化することにより、戦後に用いられている埋立工法の概要と、土地利用用途ごとの工法の傾向を明らかにした。ここから、各工法の技術発展には社会背景も深く関わっていることが明らかになった。加えて、埋立工事の施工速度には地盤改良と作業船、環境問題には3つの工法すべてが関係しており、各工法でそういった課題に迅速に対応していることが明らかになった。それにより戦前では水深が浅く、波が低い条件に加えて、軟弱地盤の箇所では埋立工事を施工することができなかったが、戦後、高度成長期以降では、大規模な埋立がより大水深な箇所に短工期に、環境により良く施工できるようになった。

用途についても、港湾や工業地域だけではなく、大規模な海上空港や、環境に配慮した親水性護岸を活用した交流施設などを建設できるようになった。その他、作業船などで埋立工事の自動化が進み、工期の短縮化だけではなく、高度成長期以降発生していた人手不足の改善も図ることができた。これにより、従来の埋立地の環境に良いとは言えないイメージが払拭され、臨海部の活用がより活発になると考える。

今後の埋立工事の課題としては、阪神淡路大震災、東日本大震災を経て、地震にどのように対応していくかである。被害が出た際にどう対処するか、迅速に修復できるような工法を開発することが重要になると考える。

参考文献

- 1) 安井誠人・藪中克一：日本における海上埋立の変遷，海洋開発論文集第 18 巻，土木学会，pp.119-124，2002
- 2) 北村浩行・真田輝見・下村嘉平衛・加藤敏夫：人工島施工法の研究，海洋開発論文集第 3 巻，土木学会，pp.137-142，1987
- 3) 山口真弘・住田正二：公有水面埋立法，日本港湾協会，1954
- 4) 岸田弘之：海岸管理の変遷から捉えた新しい海岸制度の実践と方向性，国土交通省 国土技術政策総合研究所，2011
- 5) 日本埋立浚渫協会：海とともに：次代を拓く確かな技術，日本埋立浚渫協会 50 周年記念誌ワーキンググループ 編，2011
- 6) 土木学会：土木用語大辞典，土木学会編，1999
- 7) 産業調査会事典出版センター：土木工法事典 第 6 版，土木工法事典編集委員会編，2010
- 8) 2 期空港島護岸工事誌，関西国際空港建設事務所，200-
- 9) 土木学会：日本土木史 昭和 16 年-昭和 40 年，土木学会日本土木史編集委員会編，1973
- 10) 土木学会：日本土木史 昭和 41 年～平成 2 年，土木学会編，1995
- 11) 土木学会：日本土木史 平成 3 年-平成 22 年，土木学会日本土木史編集委員会編，2017
- 12) 悦勝三次：埋立工事と作業船 (特集 特殊船(その 2))，らん：bulletin of the Kansai Society of Naval Architects, Japan (通号 42)，pp.1-6，1999
- 13) 日本作業船協会：日本作業船要覧 1991，1991
- 14) 日本港湾協会：日本港湾史 新版，日本港湾協会編，2007

(2019.4.8 受付)