

近代日本の港湾整備における2種類のケーソン技術の導入と展開*

Introduction and Development of Two Types of Caisson Technology in Modernized Era in Japan

加地 美佐保**・樋口 輝久***・馬場 俊介****

By Misaho KAJI, Teruhisa HIGUCHI and Shunsuke BABA

本論文は、明治後期から昭和戦前期における港湾技術史の構築を目指すプロジェクトの一環として、防波堤や岸壁などの主要施設の工事において急速に普及した2種類のケーソン技術（ケーソン式施設とニューマチック・ケーソン工法）に焦点を当ててまとめたものである。研究手法としては、当時の図書や雑誌を再整理することで技術者の思考を読み解き、2種類のケーソン技術の採択の経緯について明らかにしようとするというスタンスに立っているが、あくまで新事実の発見にウェイトを置いたものではなく、ケーソンの技術史を再整理することに意義を見出そうとするものである。そして、その過程の中で、今まであまり重視されてこなかったケーソン関連の施設に、近代土木遺産としての側面から光を当てることをもう一つの目標として掲げている。

1. 序論

わが国の近世期の港湾施設は、沿岸航路や漁業に用いられた平底の中小船舶を対象として整備されていたため、大深度の防波堤や垂直岸壁をもつ埠頭など19世紀の欧米で常態化していた近代施設など必要とはしなかった。1698年に構築された大多府港の元禄防波堤（現・岡山県）は当時としては世界的レベルの構造物であり、その時点では日本の港湾技術も世界と比べて遜色のないものであった。しかし、その後の100年で英仏を中心とする港湾技術の発展は目覚しく、科学的知見に基づいた防波堤の築造技術がどんどん洗練されていって、日本が明治維新を迎えるころには彼我のレベルに大きな隔たりが生じていた点では他の土木技術とよく似ている。こうした中で、橋梁の分野では伝統的技術が圧倒的な新技術の前に瓦解してしまったのに対し、トンネルの分野では既往の鉱山技術を活かした形で急速な進歩を遂げていった。分野によって様々な展開を見せる中で、港湾の分野では、新旧の技術が対象により使い分けられ、漁港等では在来の石防波堤の技術が第2次大戦前までそのまま温存された。そして、土木遺産という目で見えた場合、どうしても石防波堤に目が向けられてしまい、コンクリートで現役の岸壁や防波堤にはどうしても目が向きにくかった。大きな反省点ということができよう。

さて、明治初期から中期にかけての港湾工事は、漁港を除けば、国家的な優先度をもつ重要な港湾に限られていた。そして、その多くはオランダ人のお雇い技師団によって仕切られたことはよく知られているし、その時代の港湾施設は文化財として高く評価されている。一方、主要な港湾の増改築、および、地方港湾の近代化は、明治後期から日本人自身の手によって始まる。この時代の港湾工事は、世界の最新技術が積極的に導入され、飛躍的な進歩を遂げる。昭和7(1932)年の『土木工学』では、内務技師・鮫島茂が、ケーソン技術について「此點に於て日本は異状の發達を示し、今日ケーソン技術に於て全世界に冠たるものであり、我がnational typeと謂はるべき程の流行を來してゐる。」¹⁾と述べるまでに至ったのだが、土木遺産という目で見えた場合、一部を除き、それらが正当に評価されてきたとはいえない。本研究では明治後期から昭和戦前までを対象に、防波堤や岸壁の築造に2種類のケーソン技術（ケーソン式施設とニューマチック・ケーソン工法）がどのように取り入れられ、後世にどう影響を与えてきたかに焦点を当てて分析する。そして、その過程の中で遺産級の施設についても言及する。

要約にも書いたが、本研究の目的は“新事実の発見”ではなく、“技術史の再構築”にある。そこで、まず『日本土木史』²⁾や『日本港湾史』³⁾のような一般的な図書から全体的な流れをつかみ、次いで、二次資料的な存在、すなわち、戦前に出版されたテキスト的図書⁴⁾や港湾史^{5,6)}、欧米諸国の施設報告書⁷⁾、港湾技術に関する雑誌（『工学会誌』、『土木学会誌』、『港湾』など）に目を通して、

*Keywords：近代 港湾 技術史

** (株)西日本電信電話株式会社

(〒540-8511 大阪市中央区馬場町3-15)

*** 正会員 博士(学術) 岡山大学助手(大学院環境学研究科)

(〒700-8530 岡山市津島中3-1-1)

**** 正会員 工学博士 岡山大学教授(同上)

当時の技術者達の施工法に対する考え方を整理するという手法を採った。また『港湾構造物集覧』^{8,9,10)}などの構造物のリストを確認することで、著名なケーソン式施設について漏れがないように努めた。

なお、旧字体や旧称などの表示については、論文の構成上必要な箇所以外では、旧字体や旧仮名遣いは新字体及び現代仮名遣いに改め、尺・間といった旧単位表記は1/6間=1尺=0.303mとして換算した。

2. ケーソン式施設

(1) 世界のケーソン式施設

ケーソンとニューマチック・ケーソンは、単に名称だけ見ると、前者が後者を包含しているように（さらに、ケーソンからニューマチック・ケーソンが発達したように）受け取られがちである。しかし、両者は全くの別物であり（前者は施設、後者は工法）、歴史的にも同じくらい古い起源を誇っている。原初的なケーソン式施設は、古代ローマ期の石アーチ橋の基礎構造（石塊を詰めた木枠）として実用化されていたし、ニューマチック・ケーソン工法の前身となったダイビング・ベルの起源はより古く、古代マケドニアで使われていたとの説もある¹¹⁾。

近代におけるケーソン式施設の“再”発見の例としてよく知られているものは、スイス生まれのイギリス人チャールズ・ラベリー（Charles Labelye）がウェストミンスター橋（Westminster, 1738～50年）の架設の際に用いられた巨大な木枠基礎と、シェルブール（Cherbourg）港の中央防波堤（Digue Centrale）の失敗に終わった初代工事の際に技師ド・セサル（de Cessart）が考案したコーン（cône）と呼ばれる円錐台形の巨大な型枠（底径50m、頂径20m、深さ20m）であった（1780～88年に中止）。

港湾におけるケーソン式施設の採用は、防波堤の構築法を模索する中で生まれてきた。それは、傾斜堤（プリマス港、1847年）→混成堤（ブレイ港、1856年）→ブロック式直立堤（旧英領カラチ港、1873年）と続く防波堤の技術発展史の次に位置するもので、第1号がビゼルト港（旧仏領チュニジア、Bizerte, 1889年）で造られたとされている。この防波堤は、表面を石張り加工した鋼製ケーソン（caisson はフランス語で大きな箱、函を意味する言葉）製で、それ以後、ビルバオ港（スペイン、Bilbao, 1891年）、ゼーブルッヘ港（ベルギー、Zeebrugge, 1900年）でも使われたとされる。著者らは、こうしたケーソン式施設に関するデータを外国文献から直接検証できなかったため、上記の記述は、神戸港のケーソン工法導入に深く関わった内務技師・高西敬義が大正12(1923)年の『土木学会誌』に記した内容¹²⁾に依存したものとなっている。

なお、ケーソン式防波堤の始まりについては、ドーヴァー港（イギリス、Dover, 1840年ころ）の防波堤施工計画の一案としてあがっていたとか、マドラス港（旧英領インド、Madras, 19世紀末）やサンダーランド港（イギリス、Sunderland 港、同）の防波堤堤頭部で用いられたとかいう記述¹³⁾もあり判然としないが、本論文の目的は日本のケーソン技術史の構築にあり、これ以上の探索は行わない。

ケーソン式施設が鋼製から無筋コンクリート製へと変化するのには、工費節約のためバルセロナ港（スペイン、Barcelona, 1904年）で採用されたのが最初とされている¹⁴⁾。そして、鉄筋コンクリート（RC）製のケーソン式施設の第1号はロッテルダム港（オランダ、Rotterdam, 1908年）の岸壁であったと考えられる（直接証拠はない）。先に登場した高西敬義は、大正8(1919)年から翌年にわたって欧米を視察した際の報告書の中で、「スプーアウエヒ、ハーフェン（註：ロッテルダム港域のスポーレヴェフ港を指す）の東側岸壁の一部崩壊し…これが修繕に際し長四十米の箱型の方塊を船渠内にて製造し…その成績頗る良好なるを得たりと云ふ。…函を以て岸壁實體全部を構成せるものにして…成績頗る良く、新設及修繕の岸壁に之を利用せるもの頗る多し。」¹⁵⁾と述べている。以上の記述は、竣工後10年以上経過後の“事後談”でしかないが、いずれにせよ、1905年に一部が倒壊した岸壁の補修工事にRCケーソンが試験的に用いられ、成績が良かったので、以後の工事でもすべてRCケーソンが採用され、1908年に完成に至ったことは事実である（無筋コンクリートのバルセロナ港からわずか1年後に試行されているので、ロッテルダム港が世界初のRCケーソン岸壁の施工例と断定してもほぼ間違いないであろう）。

このニュースは直ちに日本にも伝わり、神戸港で建設予定だった岸壁に使用してはどうかということになった。そして、当時神戸港の築港主任であった森垣亀一郎が明治40(1907)年7月、単身で現地視察に赴いた。その結果、3年後の明治43(1910)年8月、神戸港の第一期工事で日本初のケーソンが沈設されるに至ったのである（詳しくは後述）。本格的なRCケーソン岸壁としては、これが世界で2例目という素早さであった。

(2) 日本のケーソン式施設

近代の日本においてはケーソン施設に用いたケーソンのことを「函」「函塊」「潜函」「沈函」と呼んでいた。

a) 日本初のケーソン式岸壁—神戸港

神戸港は明治以前から日本における最古の港（大輪田泊→兵庫津）の一つとして栄えてきたが、本格的な近代化が行われるのは、明治3(1870)年に鉄道敷設工事が開始

されて以降のことである。明治 6(1873)年に策定された築港計画は、当時主流だったオランダ人でなく、イギリス人技師マーシャル (John Marshal) によるものであった。ただ、その内容は 2 本の防波堤にすぎず、本格的な港湾計画は沖野忠雄と吉本亀三郎によるもので、明治 39(1906)年には第一期修築工事 (神戸税関海陸運輸連絡設備工事) として岸壁や防波堤が計画されるに至る。日本で最初のケーソンが用いられたのは、このうち第一～第四突堤である (突堤という用語は一般に護岸のための外郭施設を指すのに用いられるが、神戸港の場合には船舶の積み降ろしのような岸壁的な役割を担わされていた)。当初、突堤は RC 角柱と木杭を用いた“杭式”で施工する予定であったが、前述の提案を踏まえて検討した結果、ケーソン式岸壁が採用されることになった。工事は明治 42(1909)年 7 月に潜水夫による基礎工事からスタートし、すべてのケーソンが据え付けられ、充填が完了したのは大正 4(1915)年 5 月のことであった。ここで用いられたケーソンは図-1 のような形であり、手本としたロッテルダム港のケーソン式岸壁とよく似た形をしている。寸法的に見ても、神戸港の 1 号函 (底部幅 10.9m、頂部幅 6.9m、長さ 35.5m、高さ 11.7m) と、ロッテルダム港域のスヒ港 (Schie haven) のケーソン (底部幅 9.8m、長さ 41.05m、高さ 9.5m) と遜色はない [スヒ港は、世界初のスポールヴェフ港 (Spoorweg haven) のケーソン岸壁と同年の着工で竣工は 2 年遅れ。スポールヴェフ港のケーソンの詳細が不明なためスヒ港のものをを用いた]。神戸港の合計 80 個 (他に護岸工事に 1 個) の RC ケーソンは仮栈橋上で製作された (明治 43(1910)年 3 月～大正 3(1914)年 3 月)。この栈橋は、無筋コンクリート・ケーソンを製作したバルセロナ港にならったものである。設計はクラーク・アンド・スタンフィールド (英、Clark & Stanfield) 社に依頼したが、製作は川崎造船所で輸入品

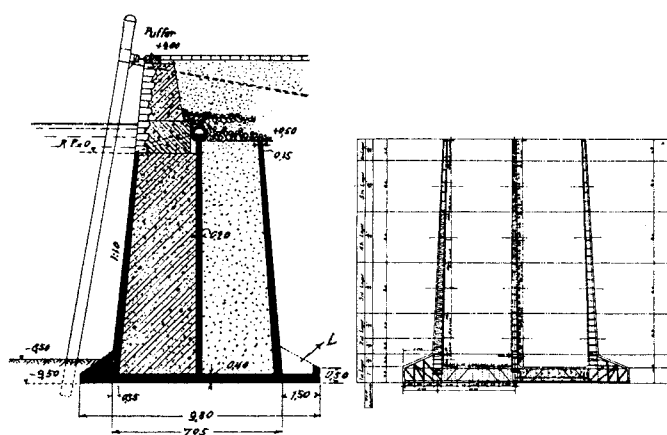


図-1 ロッテルダム港 (左) と神戸港 (右) のケーソン
(出典: 左『歐米港湾視察報告書』, p138
右『神戸開港百年史』, p275)

のミキサ等を用いて行った。ケーソンを曳航し、据え付けた後は、ロッテルダム港のケーソン同様にポンプで排水し、前室 (断面から見て外海側) にはコンクリートを、後室には砂を充填した。またこのケーソンには、底部に 0.8～0.9m 幅のフーチングが突出しており、隣接するケーソンの間には 2m 程度の隙間が生じてしまうため、その空隙に水中コンクリートを充填してケーソン同士を結合した。なお、ケーソンの表面は、花崗岩の切石布積で加工されているため、一見すると RC ケーソンとはわからない。

岸壁以外にもケーソン式混成堤として東防波堤や南防波堤が計画され、東防波堤は明治 45(1912)年から、南防波堤は大正 6(1917)年から着工し、昭和 10(1935)年頃までにはほぼ現在の延長部が築造された。神戸港における日本初のケーソン式施設の導入が大成功に終わったことを受けて、全国でケーソン式の港湾施設が築造されていった。また、神戸港のその後の修築工事でも、ケーソン式施設が中心的役割を担った^{2,3,6,7,16,17}。

神戸港の初代ケーソン岸壁は、平成 7(1995)年の阪神大震災で滑り出しや沈下などの被害を受けたものの、神戸港の歴史的遺産ということで、ケーソンを据え直した後には表面石材を補填し、できる限りオリジナルのイメージに近い形で復元された (日本を代表する近代土木遺産とみなすことができる)。なお、現在では旧第二～第四突堤は第三～第一というように名称は変わり、旧第一突堤はポートアイランドに続く道路として改造された。

b) 日本初のケーソン式防波堤—小樽港

大正 2(1913)年 4 月の『工学会誌』で、小樽港について関屋忠正が記した中で、「第二港以北には最近方塊に代わるに毎個の重量貳餘噸の混凝土潜函を用ゆるの見込を立て本年度に於て二個を製造し内一個を沈置し頗る好成績を得たり」¹⁸⁾と紹介しており、ブロック積みで施工予定であった防波堤 (廣井勇の有名なコンクリートブロック堤) をケーソン式 (長さ 14.8m、幅 7.9m、高さ 7.9m) に変更したことが分かる。これが全国で 2 例目のケーソン式施設であり、岸壁でなく防波堤に採用したものとしては日本初である。

小樽港の築港は、古市公威らによる明治 26(1883)年の調査から始まる。明治 30(1887)～41(1908)年にかけての第一期工事では、水深 13.6m の港口に延長 1288m の北防波堤を築造した (図-2 中の北堤と示されたうち、赤枠で示した部分)。その構造は、捨石基礎の上にブロックを積み、頂部に場所打ちコンクリートを施工したものであった。このブロック積み工法はスロッピング (slopping) と呼ばれ、カラチ港 (旧英領パキスタン、Karachi、1860

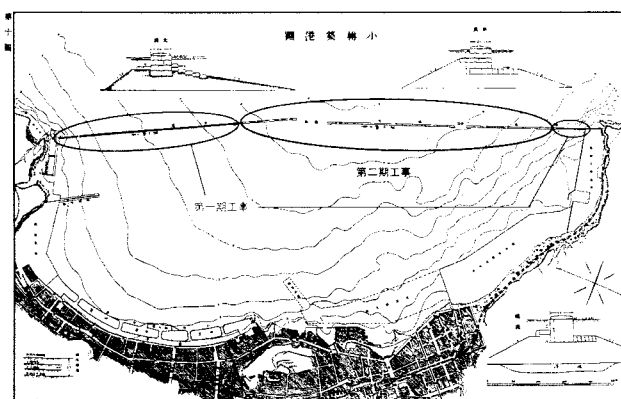


図-2 小樽港全図と防波堤断面図
(参考文献¹⁹⁾に加筆)

年着工)で初めて採択されたもので、傾斜させた扁平ブロックを順次滑り落としていくユニークな工法であった。この手法によれば、ブロックの隙間を縮小でき、かつ、迅速に作業ができたため 1870 年代に流行したが、その後、先端のブロックが抜けやすいなどの理由で次第に使われなくなっていった。日本には 17 年のタイムラグを経て小樽港に導入されたことになるが、ケーソン式への転換(明治 44(1911)年)は素早く、神戸港のケーソン岸壁(明治 43(1910)年 3 月製作開始)のわずか 1 年後のことであった。

小樽港の南防波堤も当初はブロック積み工法でスタートしたが、200m を施工したところで全体計画が変更された。すなわち、当初は北防波堤と南防波堤の 2 堤構成(総延長 2364m)としていたが、潮流が予想以上に早かったことと、北防波堤のケーソン式防波堤の作業が順調に推移していたことから、南北防波堤の中間に島堤を設ける 3 堤構成に変更された。そして南北防波堤の延長部計 1068m と島堤 915m がすべてケーソン式で施工されることになった。ここで特筆すべきことは、世界初の斜路式ケーソンドックによってケーソンの製作と進水が行われたことである。以降、小樽港では岸壁などもケーソン式で施工された^{2,3,5,6,17)}(大正 10(1921)年 7 月)。

なお、2 堤構成から 3 堤構成への計画変更については、コロンボ港(旧英領スリランカ、Colombo、1884 年)のレイアウトを模した可能性も考えられる(著者らの仮定)。ただし、コロンボ港では小樽港と違って、ブロック積みスロッピング工法が最後まで使われていた)。

ところで、小樽港では初代のブロック積みスロッピング工法の部分のみが注目されている。しかし、ケーソン式の部分も同程度に重要であり、世界初の斜路式ケーソンドック(現存)ともども近代港湾遺産としての高く評価されるべきであろう。

明治期のケーソン式施設は神戸、小樽の 2 港のみであり、全国的な普及は大正以後になる。

c) 大正～昭和期のケーソン式施設

大正期はケーソン式施設が急速に広まった時代であった。北海道や日本海側の港では、海上作業が可能な日数が著しく少ないため、ケーソン式防波堤としての利用が多かったが、全国的にはケーソン式岸壁が主流であった。大正 12(1923)年の『土木学会誌』で、高西敬義が「一般ニ小規模ノ港湾施設ニ於テハ設備工事ノ關係上空洞方塊積上岸壁ヲ以テ最モ得策ナルモノトナシ規模大ナルモノニ於テハ鉄筋混凝土函ヲ使用スルモノヲ以テ最モ完全ナル工法ヲ説ケリ」²⁰⁾と述べているように、関東大震災以後、岸壁は小規模なものにはセルラブロック、大規模なものにはケーソンを用いるべきと考えられていた。

日本において、ブロック積みからケーソン式への変換点となったのは、大正 12(1923)年の関東大震災による横浜港の大々的な被災であった。横浜港の復旧工事は、港湾技術史上において重要な体験となったので、被害状況と復旧工事について言及しておこう。

横浜港は開国当初から日本にとって欠かせない港湾の一つであり、その計画や築港がいち早く始められたことから、様々な最新の技術が用いられてきた。横浜築港で最終的に採用されたのは、周知のごとくイギリス人技術者パーマー(H.S.Palmer)が明治 21(1888)年に提案したものであり、第一期工事として同 29(1896)年までに北水堤や東水堤、スクリュépایلを用いた鉄棧橋などが完成した。以後、明治 32(1899)～38(1905)年にかけて、“第一期海面埋立工事”として埋立てと、物揚場や護岸の築造が行われ、“第二期海面埋立工事”に引き継がれた後、岸壁や上屋などの陸上設備が築造された。この海面埋め立て工事では、後述するようにニューマチック・ケーソンによる硬土盤の掘削や基礎工事が行われ、明治 39(1906)年に古市公威の設計による、日本初の近代的なブロック積み式岸壁が建造されたのである。築港工事は岸壁の築造を以ていったん完了し、大正 10(1921)年から“第三期拡張工事”として修築工事が開始され、対海外貿易用の瑞穂埠頭、対国内用の山の内埠頭や道路、鉄道などの工事が行われていたが、その途中で、大正 12(1923)年 9 月、前代未聞の大地震に襲われたのである^{2,3,5,6,21)}。

この地震で、開港以来築き上げてきた港湾施設はことごとく破壊され、急発展の途上にあった横浜港の機能は完全に停止してしまった。かろうじて原形を留めた岸壁はわずかに約 420m であり、それ以外の 1580m は倒壊した。誤解を招かないように付け加えておくが、岸壁は、ニューマチック・ケーソンを用いて施工した基礎や最下部のブロックはほぼすべてが無事だった。岸壁本体のブロック同士の接合が不完全だったため完全に倒壊したのである。復旧工事は翌月 10 月から始められ、予算の半分

が岸壁の普及に費やされた。

この予想もしなかった大災害によって、ブロック積み方式の欠点が露呈した形になった。そのため、復旧工事にあたっては、防波堤やブロック積みの残存部を除いて、ほとんどがケーソン式やセルラブロック式に変更された。本邦においてセルラブロックが使用されたのはこの復旧工事からであり、その理由は、ケーソンの製作が追いつかなかったためであった。使用されたケーソンは、幅 5.2m、長さ 15.5m、高さ 7.4m、重さ 430t のもので、製作を担当した浅野造船所においては一度に 10 個が製作可能であったが、約 60 日を要したため、岸壁の延長にすると 1 日あたり 2.7m となり、築造予定の 954.6m を施工するのに 1 年近くかかる計算になる。これでは半年以内の復旧という目標にはほど遠かったため、セルラブロックを直接現場で製作し、使用することになった。セルラブロックは 2 段積みになされ、下段用は幅 4.8m、長さ 4.9m、高さ 2.5m、上段用は長さ 4.9m、幅 3.9m、高さ 2.8m で、どちらも 1 個約 27t という大きさであった。こうしてケーソンとセルラブロックを合わせて 1 日に 6.4m が施工できるようになり、工事予定期間は 5 ヶ月に短縮された。

こうして横浜港の修築工事は、途中でほぼすべての施設を造り直すという思いもよらない災厄を経て、第三期工事で計画していた設備も昭和 20(1945)年頃には完成した。これもほぼすべてがケーソンやセルラブロックを用いて施工されている。本来の修築工事にはアーチ型などの新しい形が試みられている^{21,22)}。

横浜港の被災と修築工事をきっかけに、ケーソンによる施工例はますます増え、昭和 17(1942)年の『土木学会誌』で、内務技師嶋野貞三が「鉄筋コンクリート構造が普及されたのは大正以後であり、大正 8 年頃から岸壁と云へば鉄筋コンクリート函塊を主體とするのが普通と見られるに至った」²³⁾と振り返っているように、導入からわずか 10 年ほどの間に、岸壁施工における定石とされるまでに普及した。なお、このころには、ケーソン式が何より最良であると信じられていたが、費用がかかるため地方の港湾ではまだ施工例は少なかった。

昭和 7(1932)年の『土木工学』で、内務技師・鯨島茂は「往時は方塊積疊の如く、集合體が多く使はれたが、近時大岸壁、特に本邦に於けるものは、専ら混凝土のケーソン大塊を使用し、monolithic の壁體である」²⁴⁾と述べている。昭和 12(1937)年にはタイ（当時シャム）の首都バンコク港の修築の設計コンペで日本が欧米各国をさしおいて優勝した²⁴⁾事実を見ると、日本の港湾技術はこのころには世界の頂点に達しつつあったようである。

このように昭和期の日本ではケーソンが全盛期を迎え

ていたが、それを遡ること大正 13(1924)年には、第 13 回国際航路会議で、海中工事におけるコンクリートの耐久性が焦点となり²⁵⁾、昭和元(1926)年の第 14 回万国港湾会議では、ケーソンは無筋・鉄筋を問わず充填材料と周壁との接合が不十分であり、岸壁は幅を広くとって仕切り壁を配置すべき²⁶⁾とされるなど、コンクリート自体の耐久性や、ケーソン式の安全性に疑問が持たれ始めるようになっていた。

ケーソンの中詰め材についての考え方には、大きく 2 つの流れがあった。初期においては、経済的な理由から中詰めに浚渫土砂を用いることは適切な工夫とされていたが、ケーソン自体が海中でどれだけの耐久性があるか未知な点もあったため、ケーソン壁が損傷しても壁体の形を保てるといった観点で、中詰めにコンクリートを充填すべきという意見も多かった。しかし、大正後期から昭和初期にかけて、ケーソン式構造は地震などの水平力に弱いということが認識され始めた。つまり、壁体そのものは無事でも、滑り出したり沈下したりといった事故が数多く報告されるようになった。こうした場合には、中詰め材を取り除いて重量を軽減し、基礎を修正した後ケーソンを据え直す処置が採られた。こうしたケースでは、外殻と中身を密接に接着するコンクリート充填法は不適切な方法になる。その後もコンクリートブロックを幾らか投入してから砂石充填を行うなど様々な工夫がなされたようだが、現在でも、浚渫した土砂をケーソンの中詰め材料として用いるのはごく一般的なことである。

ケーソン式構造自体の安全性についても、地震時の体験から、岸壁などに用いるのは危険であるとの論争が巻き起こった。ケーソンに対する過信は、それまで扱っていた石やコンクリートブロック積みと比較した時の巨大さに起因していたのかもしれない。それに気付いた技術者達は、形や施工法を様々に工夫し始める。当時は満足のいく画期的な工夫は発見されず、ケーソン式構造は、終戦前における鉄などの材料不足も手伝って昭和 15(1940)年ころから下火になる。しかし、その後基礎工における安定計算や波力の分析などが著しく発達し、消波ブロックなども発明されて、ケーソン式構造は現在でも港湾工事において最も一般的な工法となっている。

(3) 日本のケーソン式施設の分布

図-3 と図-4 は、防波堤と岸壁の地域（横軸）と時代（縦軸）による分布状態を示したものである。ともに、ケーソン式を濃い実線または点線で、ブロック積みを薄い実線または点線で表している（点線は修築工事）。横軸は、図中の地名からも分かるように、右にいくほど北、左にいくほど南にあることを漠然と示している。両方の

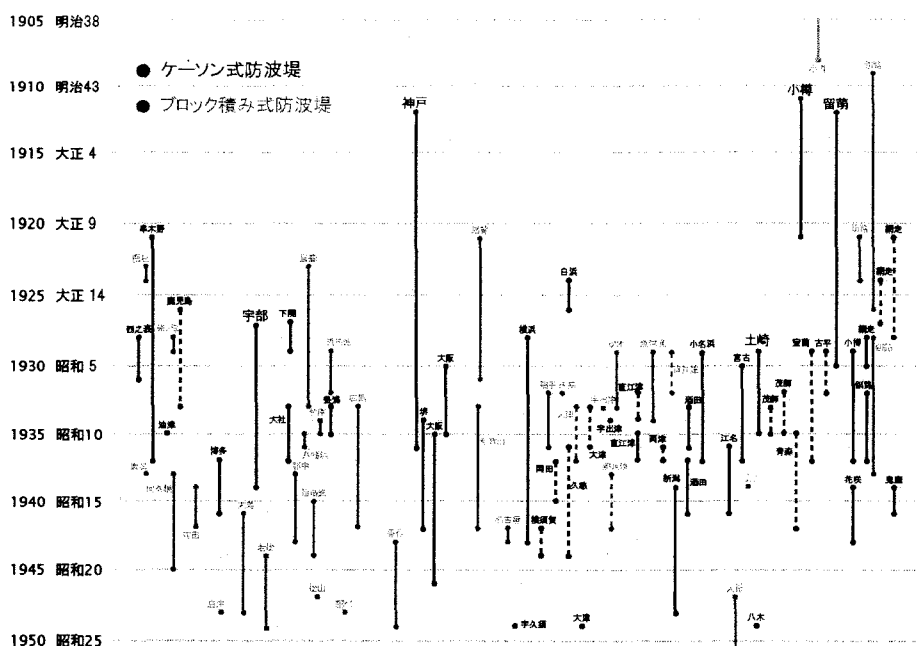


図-3 防波堤（ケーソン式・ブロック積み式）
（参考文献 8,9）より著者ら作成

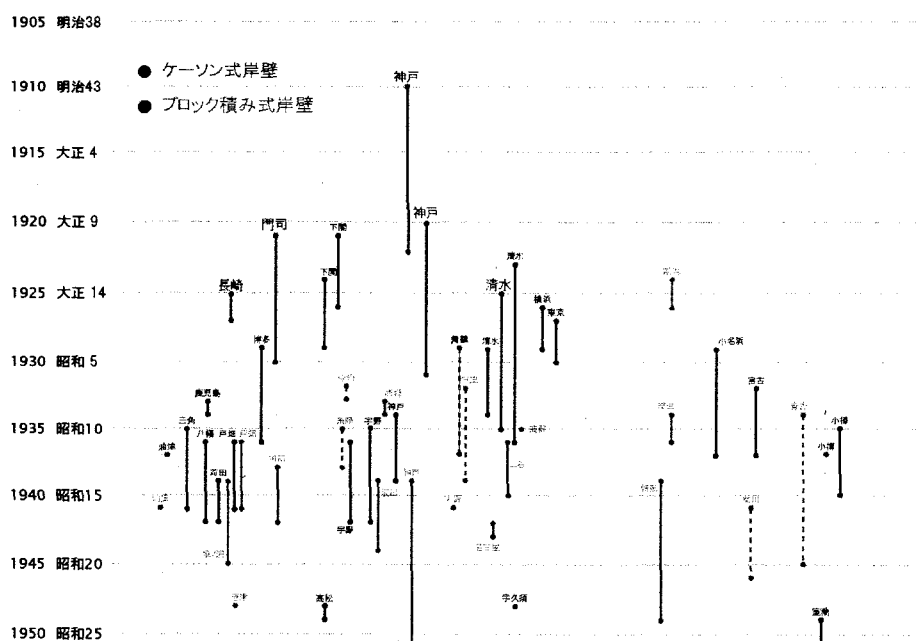


図-4 岸壁（ケーソン式・ブロック積み式）
（参考文献 8,9）より著者ら作成

図は、著者らが『港湾構造物集覧』^{8,9)}をもとに作成したもので、必ずしも全国の施工例すべてを網羅したものではないが、代表的な工事はほぼ押さえられているものと判断している。

この図から概略的な傾向として見てとれることは、北～東日本ではケーソン式防波堤が、西～南日本ではケーソン岸壁が相対的に多いという“雰囲気”である。前者の理由については、北にいくほど冬季の海上施工に日数制限があり、かつ、波力が強く傾斜堤やブロック積みで

は対応しきれなかったという仮説が成り立つ。また、後者については、その逆で、防波堤はブロック積みで十分だと考えられていたためと思われる。ケーソン岸壁が東京以西で多いのは、主要港湾の多くがその地域にあり、北日本では岸壁を必要とするような大型港湾が少なかったことがその理由であろう。

次に、時代という観点から両図を眺めると、ケーソン式は、神戸と小樽を別とすれば、大正中期以降になって一斉に普及を始めるのに対し、ブロック積みそれほど時代によって左右されなかったように思われる。ただ、ケーソン式岸壁で昭和15年ころ施工が途切れているが、それは戦争のせいなのか、あるいは、前述したケーソン式に対する不信感の表れなのかは、図上からは読みとれない。

さらに、各港について個別に見ていくと、防波堤と岸壁の双方をケーソン式で築造している例は案外と少ない。小樽、横浜、神戸、下関、鹿児島など当初から第一種または第二種重要港湾に指定されていた港湾を別格と考えれば、工事の規模や予算が大きく影響していたように思われる。

(4)特筆すべき日本のケーソン式施設(大正～昭和期)

以下、全国のケーソン式施設の中で、技術面、構造面など何らかの点で特徴のあるものを抽出して紹介しよう。これらは、現存していれば、近代港湾遺産の候補となるものである。

a)技術的特徴を持つケーソン式施設—留萌港

留萌港は北海道西岸の日本海に面した港であるが、冬

期の強い波浪と漂砂が防波堤の工事を思わぬ方向へもっていった。まず、明治 44(1911)年に捨石コンクリートブロック堤として着工したものの、強い波浪のため同年度中にケーソン式防波堤に変更となった。さらに、小樽港と同じ斜路式ケーソンドックによってケーソンの製作と進水を行ったが(当時の小樽築港事務所長・伊藤長右衛門が留萌港築港の所長を兼務していた)、強い風と高い波浪によってケーソンが損壊・移動し、かつ、ケーソンドックに漂砂が蓄積し、ただでさえ短い冬季の施工期間を圧迫した。その対策として考えられたのが、小樽港で製作したケーソンを留萌まで約 100km を海上輸送するという案であった(そのころには小樽港の築港も一段落していた)²⁷⁾。これが、日本における最初の“ケーソンの海上運搬”となった。海上輸送は大正 11 (1922) 年から始まり(10.0×10.6×7.9m のケーソン 8 個、翌 12 年には 9 個)、昭和 3(1928)年には最大 14.6×12.1×7.9m のケーソン 9 個を輸送するなど、計 43 個のケーソンを平均時速 3.2km という速度で曳航した。こうして、南防波堤 940m、北防波堤 273m、東突堤 182m、西突堤 121m が建造された(昭和 5 年度完成)。

留萌港のケーソン式防波堤は全国でも小樽に次いで 2 例目にあたり、明治年代に着工したものとしては神戸港、小樽港とこの留萌港の 3 例のみである。経費がかさむにもかかわらず、ケーソン式防波堤が荒波に悩む築堤工事の打開策として大いに期待されたことがうかがえる。ただ、留萌港のケーソンはその後破壊や補修をくり返し受け、現在では南防波堤 940m が残っている。なお、これ以後に作られた施設はすべて鋼矢板式であった^{2,3,5,6,17,28)}。

b) 技術的特徴を持つケーソン式施設—土崎港

土崎港(現・秋田港の一部)は古くから港勢の盛んな港であり、早くも明治 18(1885)年、古市公威の指導の元で延長 667.3m もの波止場が築造され、明治 35(1902)年には広井勇により延長 1036.4m の護岸などが整備されている。明治 43(1910)年に第二種重要港湾に指定されたが、第一種は横浜、神戸、敦賀、関門海峡の 4 港のみ、第二種は 10 港程度しか指定されていなかった時代であった。

しかし、土崎港は雄物川の河口にあったため、その後も土砂の堆積に悩まされ続けた。大正 6(1917)年からこの雄物川の改修工事が行われ、昭和 4(1929)年から修築工事も始まる。内容としては、岸壁と突堤の築造、浚渫、埋立てなどの工事であったが、なかでも防波堤はケーソンを曳航したユニークな工事を行ったことで知られている。ケーソン自体は特に巨大でも珍しい形でもなかったが、フロート(フローターとも言う)と呼ばれる“浮き輪”のようなものでケーソンを海上移動させた初めての例で

あった(昭和 10 年完成)。

ケーソンはブロックと違い、海面に浮かせた状態で曳航できることが利点の一つであったが、土崎港の場合、それが不可能であった。ケーソンの大きさは長さ 10m、幅 7.5m、高さ 5.5m で、壁を薄くし鉄筋の配置を工夫しても吃水は 3.5m になる。しかし、土崎港は河口港のため水深が浅く、日本海の荒波にさらされるため、施工海域の水深は工事期間で 2.1m~2.9m しかなく(<3.5m)、ケーソンをそのまま浮揚・曳航することは無理だと判断された。そこで、木製の箱 2 つをケーソンの両側に取り付け、浮力を増すことを考えた。これにより吃水は 2.0m まで減り、場所によっては浚渫を必要としたが、据え付け場所まで無事に運ぶことに成功した。図-5 は、実際に一对のフロート(長さ 12m、幅 4.6m、高さ 4.1m)でケーソンを挟んで曳航している様子である^{2,3,5,29)}。

なお、この南防波堤は、現在でも 260m にわたって残っている。

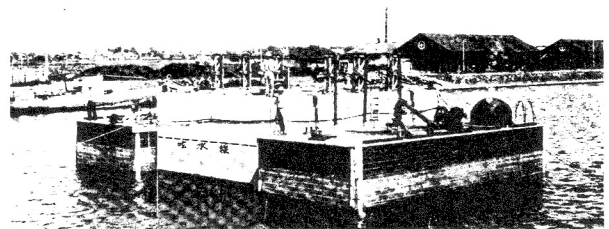


図-5 土崎港のフロート
(出典:「土崎港修築ケーソン浮揚方法に就て」,
『土木建築工事画報』, 9-12, 1933)

c) 構造的特徴を持つケーソン工法—神戸港(第二期)

初期の(ロッテルダムや神戸で用いられた)ケーソンは、図-1 のような対称形であったが、大正 9(1920)年から始まる神戸港の第二期修築工事では、「非対称函」「アンシンメトリカルケーソン」と呼ばれる図-6 のような形式のもの(断面に対して左右が非対称)が採択された。

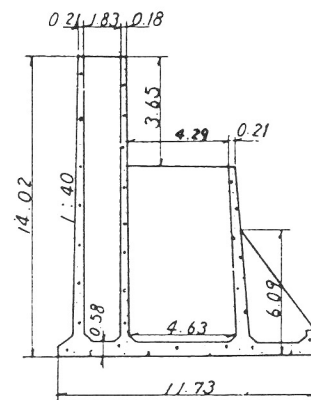


図-6 神戸港の非対称ケーソン(大正 11 年)
(出典:『神戸開港百年史』, p358)

このような形が選択された理由は、海側の水圧や波力と陸側の土圧の差に対応するためであった。この形式の特徴として、ケーソンの重量が軽減され喫水が浅くなるため、費用を20～30%引き下げることが可能となった。神戸港の非対称ケーソンはヨーロッパのものより洗練され、均整のとれた形をしていたため、欧米の港湾に関する書物でも紹介されている³⁰⁾。しかし、それでも沈下や滑り出しを完全に防ぐには至らず（神戸港は地盤が軟弱であった）、しかも、工事中に横浜港の震災被害もあったため、杭などを用いた補強が行われた¹⁶⁾。

なお、この非対称ケーソンは阪神淡路大震災で被災した後の修復によって、外観が見えなくなってしまった（前面を矢板で補強してコンクリートを注入）。

d) 構造的特徴を持つケーソン式施設—清水港

大正14(1925)年、清水港の岸壁で、図-7のような周壁（外海に面する部分）をアーチ型にしたケーソンが使用される。これはマルチプル・アーチダムの耐圧特性をそのまま活かしたものとされ³¹⁾、その後、横浜港でも用いられた。しかし、施工がきわめて難しいことや、費用がかさむこと、清水港岸壁そのものの被災（昭和5年と10年の地震）などから、全国的に普及するまでには至らなかった。

なお、この周壁アーチ型ケーソンは上面を拡幅して栈橋化したため、外観が見えなくなってしまった。

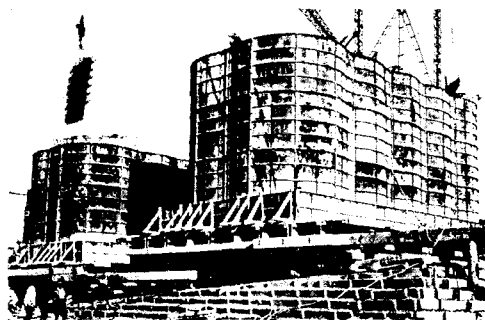


図-7 清水港の周壁アーチ型ケーソン
(出典：「静岡地方の激震と清水港岸壁の被害」、『土木建築工事画報』、3-11、1927)

e) 構造的特徴を持つケーソン式施設—門司港

昭和2(1927)年ごろ、門司港などで「L型塊」と呼ばれる形式のケーソン岸壁が現れる（昭和5年完成）。これは、ケーソンの片側の壁を取り払ったもので、清水港の修築などに携わった須山英次郎の発案といわれ、コストは通常のケーソンの3分の1で済んだといわれている³²⁾。構造的に見れば、ケーソンとはもはや別物であるが、ケーソン式施設の発展型とみなして図面で紹介する（図-8）。当時、この発案は、画期的なケーソンの変形案であ

ると絶賛され、現在でも施工法の一つとして活躍している。

このL型ブロック（長255.3m）は門司港レトロ地区の第一船溜でそのまま活用されている。

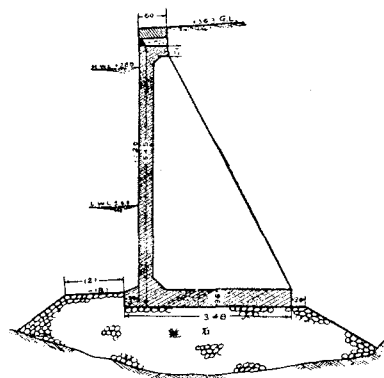


図-8 門司港のL型ブロック

(出典：「門司港の修築工事に就て(2)」、『土木建築工事画報』、8-9、1932)

f) 構造的特徴を持つケーソン式施設—長崎港

昭和6(1931)年ごろ、長崎港や鹿児島港でケーソンを2段に積み上げるといった方法が採られた。この2段積みケーソンは、もともと、明治43(1910)年ごろ、神戸港の高浜岸壁において使用されたという記録があるものの、設計図などの詳細は不明で、かつ、それ以後の2段積みとの関連も不明だったので、ここでは2段積みケーソンの代表例として長崎港の出島三十尺岸壁をあげておく。この岸壁は、内務技師・三好貞七の発案で、大正14(1925)年～昭和2(1927)年にかけて施工されたものである。横浜港で用いられたセルラブロックをケーソンに置き換えたような形態で、台形型をした2室構造のケーソンに長方形のやや幅の狭いケーソンを積み重ねた構造となっていた（図-9）。恐らく、1つの巨大なケーソンを製作するより、2つに分かれたケーソンを製作する方が安価だと考えたことが発案の理由と思われるが、施工がきわめて困難で、成績も振るわなかったため、実験的な段階か

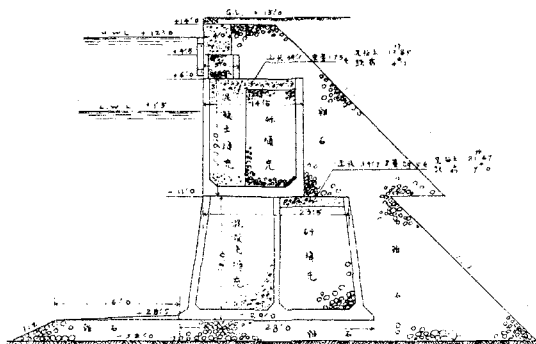


図-9 長崎港の出島三十尺岸壁

(出典：「長崎港修築工事概要」、『港湾』、6-6、1928)

ら抜けきらなかった。他の施工例としては、同じ三好が手がけた鹿児島港があるだけで、長崎港の他の岸壁も通常のケーソン式ブロック積みで施工されている^{33,34,35)}。

なお、この 2 段積みケーソンは長崎出島ワープを造る際に埋め立てた上にウッドデッキで舗装され、外観は完全に失われてしまった。

g) 民間施工のケーソン式施設—宇部港

宇部港は民間業者と山口県によって築かれた港で、ケーソン式の西防波堤も民間企業の専用施設である。宇部港周辺では明治 27～28(1895)年の日清戦争をきっかけとして炭鉱の開発が進められた。宇部港の始まりは、こうした炭鉱会社による埋立てや防波堤の築造であり、石炭の採掘で生じた土砂を利用して広大な土地が造成されていった。しかし、もともと宇部港の水深は浅く、河川による土砂の堆積が発展の妨げになることが危惧されたため、沖ノ山炭鉱の頭取らを中心に外海側に近代的な防波堤を築造する計画が立てられた。この計画は宇部村の築港委員会とともに進められ、大正 15(1926)年には南、西、東と 3 本の防波堤を築くという構想が定められる。工事は昭和 2(1927)年に着工し、600 個ものケーソン（長さ 8.0m、幅 2.75m）を用い、南防波堤 817.2m、西防波堤 328.2m が昭和 8(1933)年に竣工した。築港工事は以後、国庫補助をもとに山口県に引き継がれ、昭和 8～14(1939)年までにケーソン式の東防波堤 180m などを完成させた。

その後の変遷でかろうじて残存していた西防波堤だが、現在は外側が工場用地として埋め立てられ、護岸化している。しかし、護岸部分のコンクリートは今も当時のケーソン式防波堤の形態を留めている。この護岸は、山口県の近代化遺産として紹介されているものの、私有地内にあることから地元の認識も低い^{2,3,5,36,37,38)}。

3. ニューマチック・ケーソン工法

(1) 世界のニューマチック・ケーソン工法

ニューマチック(pneumatic)はフランス語で圧搾された空気を表す言葉である。従って、ニューマチック・ケーソンは、“圧搾空気の入った函”を意味している。その前身は、潜水服の起源でもあるダイビング・ベル(diving bell)であるが、意図して圧搾空気が使われているわけではないので、ニューマチック・ケーソンには入らない。

ニューマチック・ケーソンの第一号は、シャロンヌ=シュール=ロワール(Chalonnnes-sur-Loire、フランス)の炭鉱の 1 号堅坑の掘削(1839 年)にあたり、厚さ 20m の帯水砂層を突破するために鉱山技師ジャック・トリガー(Jacques Triger)によって考案されたもので、当時トリガーの装置(Appareil Triger、図-10)と呼ばれた^{39,40)}。ト

リガーはまた、圧搾空気が健康に及ぼす影響(DCS)について初めて学術的報告を行った(1841 年)人物としても知られている。トリガーの装置は同じ鉱山の 4 号堅坑の掘削(1858 年)の際にアシーユ・ファジェー(Achille Fagès)によって改良された。

一方、ダイビング・ベルに出入りできるようエア・ロックを付けたものが最初に使われたのはメドウエイ川

(イギリス、Medway、1851 年)の橋の基礎工

事で、ウィリアム・キュービット(William Cubitt)とジョン・ライト(John Wright)の考案によるものとされている。また、港湾工事における初使用は、ロッテルダム港(オランダ、Rotterdam、1860 年)の岸壁工事とされ、アントワープ港(ベルギー、Antwerpen、1877～84 年)では河川の直線化に使われた。前 2 者についてはエア・ロック付きダイビング・ベルという表記がされ、アントワープの場合はニューマチック・ケーソンと呼ばれているが、それぞれの構造的類似性については不明である。呼称は別として、今日ニューマチック・ケーソンと呼ばれる工法が当初最も多く使用されたのは大規模橋梁の基礎工事で、ブルックリン吊橋(アメリカ、Brooklyn、1869 年～)イーザ橋(アメリカ、Eads、1870 年～)などが代表例だが、いずれも多くは作業員が潜水病にかかっている)。

戦前の日本でニューマチック・ケーソンの歴史について書かれた最初期の文献の一つは、内務省神戸土木出張所の内務技師・高西敬義が、大正年代に行った欧米視察の報告書で、そこにはアントワープ港について、「此の岸壁は圧搾空気式潜水函を使用して工事を施工せるもの、嚆矢とし、規模頗る大にして、當時技術者間の注目する所となれり。」⁴¹⁾と紹介している。このケーソンは鉄製のもので、作業室は基礎の一部としてそのままコンクリートで充填され、壁体は煉瓦造りであった。アントワープ港のものが本当に第 1 号であったかどうかは別として、この時の「にゆうまちつく、けいそん」という言葉がその後のわが国で定着していくきっかけを作ったことでは

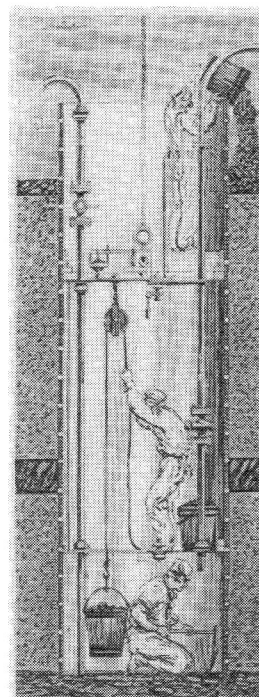


図-10 トリガーの装置³⁹⁾

意義がある。

1886年にはジェノヴァ港（イタリア、Genova）のドック工事のコンペが行われ、採用されたチョッケ（Zschokke）とテリエール（Terrier）という技師がコンクリート製で可動式のケーソンを発明した。これは1ヶ所の基礎工事を終えた後、ケーソンを引き上げて並行移動し、次の位置へ据えて作業を行うというもので、翌1887年にはリボルノ港（イタリア、Liborno）でも同じ技術者によって使用された⁴²⁾。

（2）日本のニューマチック・ケーソン工法

近代の日本においてはこの工法を「潜函工法」あるいは「圧気工法」と称し、工法に使用するケーソンのことを「潜函」「潜水函」「空気潜函」などと呼んでいた。

日本では、天保5(1834)年ころ、イギリス製のダイビング・ベルがオランダを通して輸入され、長崎製鉄所の岸壁工事に利用された。この装置は、現在でも三菱重工業史料館に展示されている（図-11）。

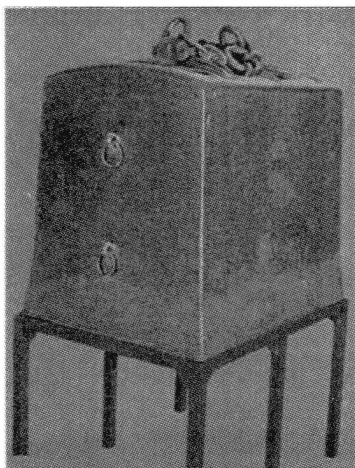


図-11 長崎で用いられたダイビング・ベル
（出典：http://www.mhi.co.jp/nsmw/html/siryoud.htm）

ニューマチック・ケーソン工法は、明治35(1902)年、横浜港の第一期工事の税関海面埋立工事で用いられたものが第1号である。この埋立工事は、当時の最新の知識と技術を結集した前衛的なものであった。工事の最高顧問であった古市公威の当初の計画では、袋詰めコンクリート基礎の上にブロックを積むという計画であったが、マルセイユ港でニューマチック・ケーソンが用いられているということを知った中山秀三郎がこの工法の採用を提案した。それに、古市公威や内務技師の沖野忠雄、工事部長であった丹羽鋤彦らが賛同した。丹羽は、明治33(1900)年にケーソン工法の見学に渡欧した。ケーソンの設計は中山が行い、丹羽の下で坂井鳴海が実際のニューマチック・ケーソン工事に当たった。明治38(1905)年の『工学会誌』には、この坂井が報告を載せている。

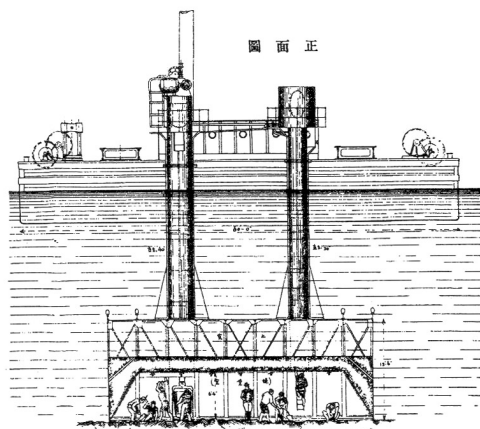


図-12 横浜港のニューマチック・ケーソン
（出典：『横浜税関海面埋立工事報告』、付圖）

この日本初のニューマチック・ケーソンは軟鋼製で、東京の石川島造船所において製作されることとなった。初めて港湾工事に携わる若い技術者も多かったが、ケーソン自体も操業用の機械類もすべて日本製であった。このニューマチック・ケーソンは図-12のようなもので、可動式構造であった。さらに、潮の干満に対応するためと移動を容易にするため上下2層構造になっており、海中に沈める際は上室に海水を満たして沈め、下室に圧縮空気を送って作業室とし、移動する際は上室には空気を送り、浮かせた状態で両端の台船を用いて移動した。それまでの欧州で用いられてきたものは、ケーソンを沈めるために上層に石や鉄材などを置いたが、横浜では海水と空気を上手く利用したという点に画期的な工夫があった。作業室の寸法は長さ約10.9m、幅約7.3m、高さ約2.1mであり、手本としたマルセイユのケーソン（最大で長さ20.2m、幅6.67m、高さ2m）より小さ目である。ケーソンは明治35(1902)年の春に完成し、工事は5月から始まった。途中、暴風による故障のため一時中断されたが、明治38(1905)年にニューマチック・ケーソン工事は完了し、岸壁の壁体はコンクリート製ブロック積みで建造された。ここに、日本における近代的岸壁の歴史が始まった^{21,43,44)}。

この工事で使用されたニューマチック・ケーソンは、記念のために保存すべしとの意見も出た⁴⁵⁾そうだが、起重機の基礎としてそのまま沈設されることになった。また、残念ながら、ケーソン工事によって築造された岸壁は、先に述べたように、関東大震災によって大きな被害を受け、現在ではその一部が残存しているのみ⁴⁶⁾である。

横浜港の岸壁築造工事は絶賛されたが、高い技術力と工費を必要としたためか、明治42(1909)年に朝鮮において鉄道用橋梁の橋脚基礎に用いられた他は、しばらく用いられることはなかった。

日本の技術史上にニューマチック・ケーソン工法が再び現れるのは関東大震災の復興事業であり、それも港湾ではなく、永代橋をはじめとする橋梁の基礎工としてであった。その際、工事はアメリカの技術者らの協力で進められ、以後、橋梁基礎や建築基礎の分野で急速に広がっていった。

ところで、わが国には自前のニューマチック・ケーソン技術があったにもかかわらず、なぜアメリカから直輸入せざるをえなかったのであろう。先に見てきたように、横浜港の埋立工事は大御所的存在であった古市公威や沖野忠雄の陣頭指揮による国家的事業であり、古市・沖野が得意とした“日本人を海外に行かせて技術を学びとらせる”方式で技術導入がなされている。それが、明治初期のお雇い技師時代さながらに、外国（アメリカ）から丸ごと技術を買取る方式に変わってしまった。技術導入を承諾した最終的な責任者は復興局土木部長であった太田円三であるが、外国人の介在に対する反対意見に対し、太田は「技術は日進月歩である、それ自体インターナショナルなものである。現に外国に留学し、外国の著書を読み、文献をあさっているのではないか、それとこれと何程の相違があるのか、智識を学ぶのではない、技術を習うのだ、早く覚え咀嚼して、これを日本の技術として普及するのだ」⁴⁷⁾と言ったされる。こうした路線の変化は、古市・沖野らとの世代の相違によるものなのか、関東大震災という未曾有の災害に見舞われて自信喪失し、あるいは、何か確固たるものに頼りたくなった若手技術者の共感を得たようにも思われる。結果として、永代橋・清洲橋・言問橋の基礎工のニューマチック・ケーソンはアメリカの施工専門会社から3人の技術者を招いて実施された。

こうして他分野で再導入され、日本化していったニューマチック・ケーソン工法は、30年の空白を経て再び港湾工事でも採用される。昭和10～12(1937)年に三池港で内陸北岸壁382mを建設するのに使用されたのをきっかけに、昭和10～11(1936)年には横須賀港のドルフィン工事でも用いられた。昭和12(1937)年には呉港の係船束柱の基礎が施工され、昭和23(1948)年には東京港で豊州石炭埠頭のデタッチドピア、昭和26(1951)年には神戸港の第7・第8突堤にも利用された。

4. 結論

本論文では、2種類のケーソン技術（ケーソン式施設とニューマチック・ケーソン工法）がわが国にどのように導入され、その後どのような展開を辿ったのかを見てきた。一方は港湾施設であり、一方はそれを築くための

工法であり、それらを一括して取り上げるのに矛盾を感じる向きもあるが、一つはともに「ケーソン」という用語を用いた類似の技術であること、もう一つはニューマチック・ケーソンを沈めてその上に構造物を造るケースや、ニューマチック・ケーソン工法を使ってケーソン式施設を造るケースなど、両者はしばしば類似、混合して使われるため、技術史を説明する上での混乱を回避する目的もあった。

以下、本論文で得られた知見を簡単にまとめる。港湾構造物としてのケーソン式施設は、鉄やRCで構築された近代ケーソンに絞れば歴史は浅く、1908年にロッテルダム港で技術的完成を見る。しかし、その割に日本での初施工は大正4(1915)年であり、タイムラグはわずかに7年しかない。そして、その後も、斜路式ケーソンドック（小樽港）、「非対称函」（神戸港）など世界的にも優れた技術が自前で開発され、日本を世界有数のケーソン式港湾施設の多用国へと押し上げた。

一方、水中施工法としての近代ニューマチック・ケーソン工法の方が若干歴史は古く、1880年ころまでには技術が確立し、大規模な橋梁基礎工事にどんどん活用されていた。しかし、日本ではニューマチック・ケーソン工法を必要とするほど高度な港湾工事の必要性が明治後期（1900年ころ）まで存在しなかった。これで少なくとも20年のタイムラグが生ずる。そして、実際に普及し始めるのは昭和10(1935)年以降のことであり、先の20年と合わせれば、欧米に比べて半世紀以上のタイムラグが生じるに至った。

土木遺産という目で見えた場合、『日本の近代土木遺産—現存する重要な土木構造物2000選』⁴⁸⁾で取り扱っているほとんどの港湾遺産は石の防波堤や石や煉瓦の護岸である。なぜなら、その方が何となく文化的・伝統的な雰囲気があるし、一目で価値がありそうなのがわかるからである。それに比べて、コンクリートでできた港湾遺産は地味で、無装飾、後世の補修の有無も判定しにくく、これまでほとんど遺産として認定されてこなかった。本論文の目的の一つは、こうした目立たないが技術的に重要な港湾遺産に目を向け、少なくとも重要なものについては現状確認をして、残っていれば『2000選』のリストに加えようという意図もあった。結果として4件が新たに加えられることになったが、今後も地道な発掘を続けていきたい。

謝辞

ケーソン式施設に関しては、京都大学附属図書館、日本港湾協会には資料収集に関して便宜をはかっていただいた。また、ニューマチック・ケーソン工法に関しては、

株式会社白石の小山良浩氏が収集された大量の資料をいただいた。心からの謝意を表したい。

参考文献

- 1) 鮫島茂：「岸壁の崩壊と其對應策(其一)」，土木工學，1-1，p.21，1932
- 2) 日本土木史編集委員会(編)『日本土木史 大正元年～昭和15年』，土木学会，1973
- 3) 『日本港湾史』，日本港湾協会，1978
- 4) 鈴木雅次：『港湾工学』，アルス，1938
- 5) 運輸省港湾局：『日本港湾修築史』，運輸省港湾局，1951
- 6) 廣井勇：『日本築港史』，丸善，1907
- 7) 高西敬義：『歐米港灣視察報告書』，内務省神戸土木出張所，1923
- 8) 運輸省鐵道技術研究所(編)：「港灣構造物集覧」，運輸省鐵道技術研究所，1948
- 9) 運輸省港湾局(編)：「港灣構造物集覧 第2集」，運輸省港湾局，1951
- 10) 運輸省港湾局(編)：「港灣構造物集覧 第3集」，運輸省港湾局，1954
- 11) http://www.shiraishi.com/eng/caisson/c1_1.html
- 12) 高西敬義：「繫船岸壁ノ構造及ビ之ガ築設ニ關スル構造上ノ私見」，土木學會誌，9-4，pp.13-14，1923
- 13) 長野正孝：「世界港湾発展史(11)」，港湾，p.92，1988
- 14) 前掲12)，pp13-16
- 15) 前掲7)，p.136
- 16) 神戸開港百年史編集委員会(編)：『神戸開港百年史』，神戸市，1970
- 17) 關屋忠正：「北海道の築港」，工學會誌，361，1913
- 18) 前掲17)，p.135
- 19) 前掲6)，図10
- 20) 高西敬義：「繫船岸壁ノ構造及ビ之ガ築設ニ關スル構造上ノ私見」，土木學會誌，9-4，p.635，1923
- 21) 片山琢朗(編)：『横浜港修築史』，運輸省第二港灣建設局京浜港工事事務所，1983
- 22) 安藝杏一：「横濱港震害復舊工事に就て」，土木建築工事画報，1-7，1925
- 23) 嶋野貞三：「繫船岸構造概論」，土木學會誌，28-2，p136，1942
- 24) 「斷然世界を壓倒せる我港灣技術」，土木建築工事画報，13-12，1937
- 25) 鈴木雅次：「第13回国際航路會議に面して」，港湾，1-1
- 26) 「海中工事とコンクリート」，工学研究，51，p.30，1928
- 27) 「留萌港史」，北海道開發局留萌開發建設部監修，北海道開發協會，1976
- 28) 林千秋：「留萌築港函塊(ケーソン)曳運作業報告」，土木學會誌，15-7，1929
- 29) 阿部一郎：「土崎港修築ケーソン浮揚方法に就て」，土木建築工事画報，9-12，1933
- 30) 前掲16)，p358
- 31) 岡部三郎：「混凝土の長所を最も有効に利用せりと認めたる工事の實例」，土木建築工事画報，2-10，p.40，1926
- 32) 「時事 理想的潜函の發明」，港湾，7-3，p.54，1929
- 33) 内務省下関土木出張所：「長崎港修築工事概要」，1928
- 34) 三好貞七：「長崎港修築工事概要」，港湾，6-6，1928
- 35) 三好貞七：「長崎港修築工事概要」，土木學會誌，21-8，1935
- 36) 山口県教育庁文化文化財保護課『山口県の近代化遺産』，山口県教育委員会，1998
- 37) 内務省下関土木出張所：「宇部港修築計画概要」，1937
- 38) 関谷新造：「宇部港修築工事概要」，土木學會誌，20-5，1934
- 39) <http://www.stebarbe.com/mcGallery/index.php?album=7>
- 40) <http://www.stebarbe.com/industriecharbon.htm>
- 41) 前掲7)，p.155
- 42) 「ゼノア港船渠構築工事」，Genie Civil Tome XVI，5，p11，1889
- 43) 臨時税關工事部：『横濱税關海面埋立工事報告』1905
- 44) 坂出鳴海：「横濱港岸壁工事ニ使用セシにゆうまちつく、けいそん」，工學會誌，271，1905
- 45) 中山秀三郎：「日本最初のケーソン工事」，土木建築工事画報，4-1，p.14，1928
- 46) 平川脩士：「(第1回)わが国におけるニューマチックケーソン工法の歴史」，建設と圧気，p.23，1992
- 47) 平山復二郎：「地底に基礎を掘る一日本に於ける空気ケーソン工事の歴史」，パシフィックコンサルタンツ，1955
- 48) 土木史研究委員会編：「日本の近代土木遺産—現存する重要な土木構造物2000選」，土木学会，2001