

海岸工学の誕生と発展



高橋 重雄

一般財団法人 沿岸技術研究センター
 上席客員研究員

1. まえがき

図1は、「史上最大の作戦」といわれる第二次大戦のノルマンディ上陸作戦をテーマとした絵画で、フランスのノルマンディの海岸に造られた仮設港が描かれています。筆者はこれをロンドンの英国立海事博物館で見つけたとき、研究所や大学の諸先輩から「海岸工学はノルマンディ上陸作戦から始まった」と聞いていたことを思い出しました。



図1 ノルマンディ上陸作戦とフェニックスケーソン
 (Stephen Bone作 英国立海洋博物館蔵)

本報告は、海岸工学の発展について概要を述べるものであり、これまで筆者が諸先輩から聞いていたことなどをとりまとめたものです。ただし、多くの諸先輩が言われるように、海岸工学は第二次大戦から急速に発展していると思いますが、海の工学は港を造る技術として古くから進歩しています。特に、産業革命における海の工学を含む科学技術の発展は顕著であり、明治維新を経て、わが国にも伝わっています。

海岸工学は、そうした技術を基礎として、第二次大戦を契機に誕生し、戦後にわが国にも紹介されています。米国や欧州のみならず、わが国における第二次大戦後の海岸工学の発展は著

しく、成熟した段階に達していると思います。さらに21世紀にはいって、新たな進展を迎えているのではないのでしょうか。

2. 産業革命と防波堤の建設

紀元前の昔から防波堤はあり、試行錯誤ではありましたが、技術の進展が認められます。特に、18世紀以後の産業革命とともに世界中に港が造られ、大規模な防波堤が多数建設されると、その技術は、代表的な海の工学の一つとして急速に進歩しています。

例えば、フランスのCherbourg港の防波堤の建設は1781年から始まっており、最初の設計では、底面径50mのコーン形(円錐台)の石柵堤でしたが、捨石堤に変更され、被災と修復を繰り返して、捨石マウンドの上に直立壁をもつ混成堤(捨石マウンドと直立壁の混成という意味)が造られています(図2)。

このように産業革命以降、防波堤を中心に海の技術は蓄積され、第二次大戦を経て、戦後の海岸工学へと続いています。ちなみに、後述するハドソンの捨石の安定重量式は、1938年のスペインのイリバレンの公式を基礎とするものです。イリバレンは、若い頃から防波堤など港の建設に従事しています。

なお、波の基礎理論(微小振幅波理論)はイギリスの天文学者、G.B.Airyによって1845年に提案されており、この時代の数学や物理学など基礎科学の発展も海岸工学の誕生に大きく寄与していることは当然です。

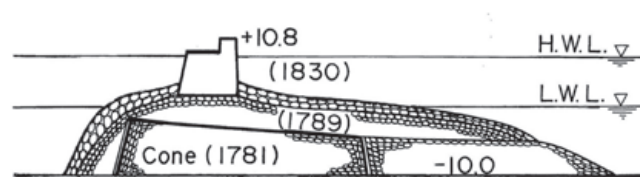


図2 Cherbourg防波堤の建設

3. 明治維新と防波堤の建設

日本では明治維新の後、近代的な港の建設がいわゆるお雇い外国人によって始まっています。例えばイギリス陸軍の工兵少将H.S.Palmerは、横浜水道を建設したことで有名ですが、1888年からの横浜港の防波堤の建設にも貢献しています(図3)。

こうした当時の西欧の混成堤の技術を発展させる形で、廣井勇らが小樽港の防波堤などを建設しています(図4)。スリランカのコロンボ港にも、小樽港の混成堤に似た混成堤が造られていることは興味深いことです。廣井は、1919年に砕波の波圧公式(廣井式)を提案しており、合田式が提案されるまでは実務に使われていました。また、廣井は千葉の太東崎の海岸で、波エネルギー変換装置の研究もしており、強大な波力の利用まで考えています。廣井は、橋梁の本を書くなど土木技術者として幅広い活躍をしており、日本の土木技術者の先達、海岸工学の先達といってよいと思います。



図3 今も活躍している横浜港の北水堤

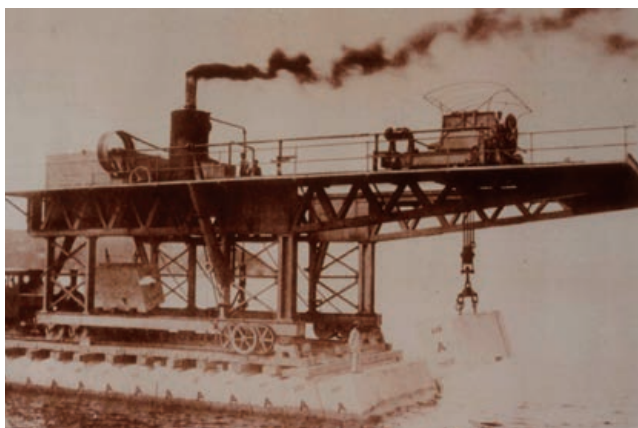


図4 小樽港防波堤の建設

4. ノルマンディ上陸作戦と海岸工学の誕生

前掲図1のノルマンディの海岸には、船のようなものが並んでいますが、これはフェニックスケーションと呼ばれる長大ケーソンで、上陸作戦用物資のための仮設港を造る仮設防波堤です。仮設港の建設はもちろん、この海岸への上陸作戦のために、多くの研究者や技術者が動員され、様々な技術開発が行われています。

例えば、捨石の安定重量の設計公式で有名なハドソン(図5)は、若いときにフェニックスケーションの水理模型実験にも従事しています。彼の所属したWES(Waterways Experiment Station)は、アメリカの陸軍工兵隊(US Army Corps of Engineers)の研究所であり、陸軍が港湾や海岸の整備を担当するアメリカにあって、日本の港湾空港技術研究所のような役割を担うところです。陸軍工兵隊には、1933年に設立された海岸侵食局BEB(Beach Erosion Board)もあり、そうした調査・研究機関の人材や研究施設、そして実験技術などが第二次大戦を契機に発展しています。ちなみに、BEBは、1963年にCERC(Coastal Engineering Research Center)となり、1996年には、WESと統合し、CHL(Coastal and Hydraulics Laboratory)となっています。

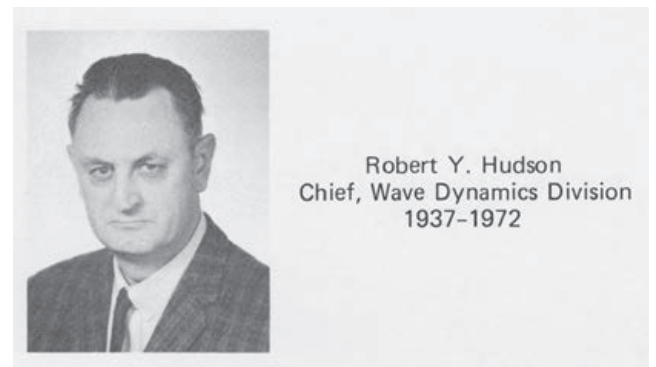


図5 Robert Y. Hudson
(A History of the Waterways Experiment Station, 1979)

また、SMB法と呼ばれる波浪予測技術の基礎が、米国カリフォルニア大学海洋研究所のスベドラップとムンクによって、まさにこうした上陸作戦のために開発されています。また、屈折・回折・砕波などの波の変形の基礎技術も開発されました。

このように、海岸工学は、第二次大戦で軍事技術として格段に進歩しました。この軍事技術は、第二次大戦後、Civil Engineeringとして一般に開放されています。そうした知見の発表の場として、カリフォルニア大学のオブライアンとジョン

ソンは1950年にロングビーチで、海岸工学講演会を開催しました。これが現在にも続く、国際海岸工学会議の第一回目となっています。以下は、第一回目の論文集の構成と各編の重要なKeywordsを示すもので、「海岸工学の計画及び設計に関する科学技術の現状」を報告するものです。

第1編 波運動の基本原則

波の発生、波の理論、波の変形、屈折・回折、海浜流

第2編 設計の基礎資料

波の記録、波の予報、風波・うねり、気象図、沿岸地形

第3編 海岸土砂

地質学、河川土砂、砂浜、水理模型実験、浚渫

第4編 海岸構造物の設計と施工

港湾の位置、防潮壁、突堤、防砂堤、防波堤、模型実験

第5編 海岸計画の沿革

ロサンゼルス港、サンタモニカ湾、
ニュージャージー海岸

5. 伊勢湾台風と日本の海岸工学

日本の海岸工学は、米国の国際海岸工学会議の論文集を翻訳することから始まったと思われます。海岸工学Ⅰ及びⅡ(J.W.Jhonson編/土木学会海岸工学委員会訳、丸善、1955年)はその第一巻から第三巻までを翻訳したものです(図6)。

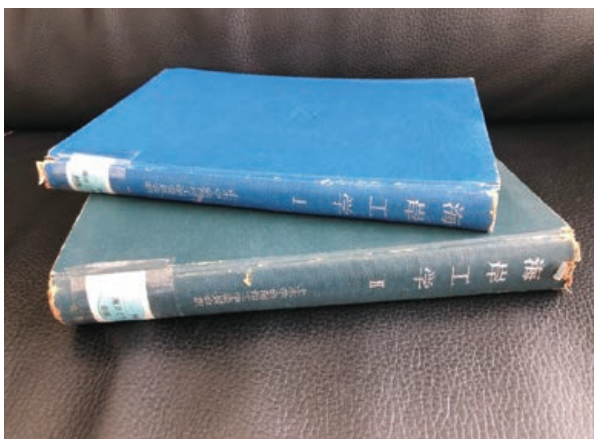


図6 海岸工学Ⅰ及びⅡ

ただし、日本の海岸工学発展の契機となったのは1953年の台風13号や1959年の伊勢湾台風による高潮・高波災害でした。日本の海岸工学は、1950年代の高潮・高波災害から始まったともいえます。

伊勢湾台風は、9月26日に潮岬に929hPaで上陸し、伊勢湾奥を中心に大災害をもたらしました。特に高潮偏差は3.45m、最高潮位は平均海面上3.89mに達し、5,098人への犠牲者の原因となりました。わが国の高潮防災は、この伊勢湾台風が基準となり、このクラスの台風が各湾を襲ったときの高潮を対象にしてきました。こうした高潮推算は、当時の計算機で行われていますが、的確な高潮偏差を計算していることに驚かされます。

6. 海岸工学の72年間の発展

1950年から72年たちます。日本はもちろん米国や欧州の多くの技術者・研究者のご努力下、海岸工学の発展は目を見張るものがあります。ここで開発された多くの技術について述べることは、その概要であっても困難です。しかしながら、ノルマンディ上陸作戦のために使われた技術を現在の技術と比べてみれば、格段の違いがわかるでしょう。例えば、現在では波浪の予測は、沿岸センターのCOMINSのように波浪スペクトルを数値計算(WAMやWWIII)で求めることができます。また、浅海域への波の伝播や仮設防波堤に作用する波力、係留船の動揺などは、設計公式等で算定でき、多方向不規則波を用いた水理模型実験でより的確に把握でき、種々のレベルの数値計算でも求めることができます。

7. 日本における主要な技術開発

海岸工学の発展に対する日本の貢献は顕著です。ここでは、例として日本の技術開発について3つを紹介したいと思います。

(1) 現地観測

海岸工学の発展には、現地のデータが大きく寄与してきました。日本でも多くの現地観測や現場実験が行われていますが、とりわけNOWPHASによる長年の波浪観測は、現地の波の理解と予測技術の発展にとって重要でした。また、栈橋による観測により、現地の海浜変形が非常にダイナミックであることを再認識しています。

(2) 不規則波に基づく耐波設計体系

合田良實は、1985年に著書Random Seas and Design of Maritime Structuresを発表し、耐波設計体系を規則波から不規則波に変えています。結果として、波の伝播や変形だけでなく、耐波構造物の設計をも大きく変えるとともに、多方向不規則波による実験など実験をも変えるものとなり、世界の海岸工学を変えるものでした。

(3) 数値計算

波の伝播や構造物への波の作用を計算する数値計算の発展は、わが国でも目覚ましいものがあります。とりわけ、緩勾配方程式による波の伝播、さらには非線形なブジネスク法の進展が顕著です。また、流体力学の基本方程式であるナビエ・ストークス方程式による数値流体力学 (CFD) に基づく数値波動水路・水槽も実用のレベルとなっています。沿岸センターでは、研究会を設けて集中的な開発を行っています。

8. 最近の課題

海岸工学にかかわる残された問題は少なくなく、新しい課題も多いのですが、ここでは、主要なものについて述べます。

(1) 耐波構造物の設計上の諸問題

杭に作用する衝撃砕波力や、栈橋上部工への衝撃揚圧力など、水面と構造物の衝突は空気を巻き込む複雑な現象であり、その衝撃力の算定には問題が残っています。数値波動水路でも、砕波や衝撃力の計算では、十分に安定した結果を得るには至っていません。なお、大きな衝撃力の発生の危険性を把握して、それを避ける設計とすることは重要であり、ほぼ可能となっています。

また、防波堤などの消波工や被覆石の沈下も問題です。これは、消波工や被覆石の下にあるマウンド石や海底地盤の洗堀や散乱に起因することが多いのですが、適切な対策が取られていないことも多いと思われます。

さらに近年、防波堤を設けず外洋に直接護岸を建設する、防波護岸が増加しています。防波護岸では、捨石マウンドやケーソン目地から波力が直接的に作用するため、吸出しなどによる陥没事故が少なくなく、圧抜き工など、適切な対策が必要です。

なお、長周期波とそれに対する係留問題も重要であり、その原因の特定と定量的な把握、的確な対策が課題です。

(2) 地球温暖化

人類の喫緊の課題として、地球温暖化があり、その解決には、海岸工学の責任も少なくないと思われます。緩和策としては、洋上風力発電の推進等があり、日本でも、ようやく進展し始めています。

適応策としては、海面上昇に対する対応や、台風の強大化への対応があげられます。海面上昇については、海岸侵食の進行も大きな問題です。海岸侵食は、これまでも難しい海岸工学の課題の一つでしたが、その対策は一応、可能となっています。しかしながら、海面上昇による世界的な海岸侵食の進行には、

さらに的確な対策が必要となっています。

また高潮・高波の増大による浸水災害への対応が不可欠であり、とりわけ災害の予測、見える化によって、市民の理解を得ることが重要です。特に、適切な避難や早期復旧への備えなど、強大な台風に対する防災能力の向上を図る必要があります。

(3) DX/AI

近年の情報技術の発展により、DX (デジタルトランスフォーメーション)、すなわち、デジタル技術の進展が社会を変えていくと考えられています。特に、AI (人工知能) は、設計を変えていくと思われます。海岸工学の分野でも、変革は不可避と思われ、すでに、一部でAIの適用は始まっています。例えば、護岸の越波流量を求めるために、これまでの実験結果を教師データにして、AIで算定することも可能です。こうしたDX/AIによって、海岸工学にも大きな変革が期待されます。

9. あとがき

本報告では海岸工学の発展、特に、波に関する概要を示しましたが、海岸工学は、沿岸域の工学として幅広いテーマを持つようになっています。例えば、市民による海岸の利用については、親水性というKeywordで景観や安全性の向上について研究が進められています。また、沿岸域の水環境や生態系、生物多様性に関する研究も、海岸工学の重要なテーマとなっています。最近では、沿岸域におけるCO₂の削減 (ブルーカーボン) の研究も進んでおり、海岸工学の一部というよりは新たな学問領域と言えるかもしれません。本報告で述べてきたように、海岸工学は時代の要請を受けて誕生・拡大し、その時代の最先端の技術を利用して成長してきており、今後も発展すると期待されています。

なお、防波堤の歴史については、伊藤喜行 (1969) : 防波堤構造論史、港湾技術研究所資料No.69、海岸工学の歴史については、合田良實 (2012) : 海岸工学、技報堂出版を参照してください。