

海岸工学は、第二次大戦の最中にその骨格が形成され戦後に誕生した土木工学の比較的新しい分野で、この40年余の間に驚異的な進歩を遂げて現在充実した壮年期を迎えようとしている。海岸工学の発展の背景には、度重なる台風などによる災害の防止と国土保全、昭和30年代より社会問題となってきた海岸侵食や水質汚染の沿岸環境問題の解明、それとほぼ同時期から活発となった沿岸部の開発・利用など、さまざまな問題提起がなされてきたことがある。そして、これらの社会的要請に応えるため、海岸・港湾・水産関係での工学的技術の進歩とこれを支える数多くの研究がなされ、いまなお、膨大な智識が蓄積されている。

このような海岸工学の成果を整理して大学の学部課程の教科書、いいかえれば海岸工学の入門書を書くことは、著者にとって非常に難しいことであるといえる。何故なら、海岸工学で取り扱う事柄は非常に幅広く変化に富んだものであるからである。例えば、波は海岸工学にとって最も重要な現象であり、また数学的にも、物理的にもたいへん研究が進んでいる問題である。一方、海岸地形の変化に深く関係する、波・海岸構造物・漂砂間の相互作用といった問題の理論的な解明は未だ不十分であり、現地観測と室内実験より得られる知見や現場での施工技術経験がたいへん重要視されている。

実際問題を取り扱う場合の手法がどのようなものであれ、われわれ土木技術者がとるべき基本的な姿勢として、“百聞は一見にしかず”といわれるように、実際の海岸でどのようなことがどのようにして起こっているかを、自分自身の目で確かめ理解することが必要である。

以上のことを念頭に置いて自分の講義ノートを整理し、またこれまで出版された海岸工学の代表的な教科書・専門書を改めて読み直して、学生諸君が関心を示した問題、理解しづらかった問題などを勘案して本書の内容を決めることにした。このため、(1)取り扱う現象の記述は、実際の海岸や室内実験での観

察とデータによって平易にしかも物理的に行う。(2)数式と計算式は実際に使われるものを重点にあげ、これらの式が得られるまでの考え方を重視して説明することを方針として本書を書くことにした。

理工学分野の急速な進歩を反映して、第3の波といわれる、コンピュータによる数値計算やシミュレーション、あるいは環境評価とか土木計画といった、これからの海岸工学にとって非常に有力でかつ重要な手法や考え方は、われわれにとって不可欠であるが、本書の目的が入門書であることから割愛することにした。各章ごとの引用文献を参考にして、読者が勉強されることを期待する。表現の不適切や、記述にも誤りがある恐れがあり、これらについては、読者諸氏のご寛容とご叱正をお願いする次第である。

終りに、原稿の段階で貴重なご意見、ご指摘をいただいた、中央大学助教授水口 優 博士、運輸省港湾技術研究所 後藤智明 博士に心より感謝する。また、数多くの研究論文や出版物を参照し、これから貴重な図版を転載させていただいた。心よく転載を許可された方々に深く感謝申し上げる次第である。

1987年7月

服 部 昌太郎

目次

第1章 序論

1.1	日本の海岸	1
1.2	海岸工学の生立ち	3
1.3	海岸工学で取り扱う事柄	4
1.4	海岸と海底地形	5
1.4.1	海底地形	5
1.4.2	海岸の地形	6
1.5	海浜	8
1.6	海の波	9
1.6.1	海面運動の周期による分類	9
1.6.2	規則波と不規則波	11
1.7	沿岸域での波と流れによる諸現象	11

第2章 微小振幅波理論と規則波の一般的性質

2.1	はじめに	13
2.2	波の諸元と代表指標	13
2.3	波の分類	15
2.3.1	水深による分類	15
2.3.2	進行波と重複波	15
2.3.3	微小振幅波と有限振幅波（線形波と非線形波）	15
2.4	微小振幅波理論	16
2.4.1	理論の仮定	16
2.4.2	基礎方程式と境界条件	16
2.4.3	速度ポテンシャルの解	18
2.5	波長と波速	19
2.6	進行波の水面波形	22

2.7 水粒子の運動速度と軌跡	23
2.7.1 水粒子の運動速度	23
2.7.2 水粒子の運動加速度	24
2.7.3 水粒子の運動軌跡	24
2.8 水 中 圧 力	26
2.9 波のエネルギーとその伝達率	28
2.9.1 位置エネルギー	28
2.9.2 運動エネルギー	28
2.9.3 波の全エネルギー	29
2.9.4 エネルギーの伝達率	29
2.9.5 群 速 度	31
2.10 重複波の諸性質	31
2.10.1 完全重複波	31
2.10.2 部分重複波	33
2.11 波運動に及ぼす波高の影響(有限振幅効果)	34
2.11.1 水面波形	34
2.11.2 水粒子の速度	35
2.11.3 波による質量輸送	35
2.11.4 有限振幅波理論	35

第3章 浅海域での規則波の変形

3.1 は じ め に	37
3.2 浅 水 変 形	37
3.2.1 微小振幅波の浅水変形	37
3.2.2 浅水変形に及ぼす波高の影響(有限振幅効果)	39
3.3 波 の 屈 折	40
3.3.1 屈折現象	40
3.3.2 屈折を考慮した浅水変形	41
3.3.3 屈折図の作図法	43
3.4 波 の 回 折	45
3.4.1 規則波の回折	45
3.4.2 屈折と回折とが共存する場の波	48

3.5 波の反射と透過	48
3.5.1 規則波の反射率と透過率	48
3.5.2 砕波を伴う斜面からの反射	49
3.6 砕波	51
3.6.1 砕波の形式	51
3.6.2 砕波波高と砕波水深——砕波指標	52
3.6.3 浅水変形と砕波条件	55
3.7 波の減衰	57
3.7.1 海底摩擦による波高減衰	57
3.7.2 内部粘性による波高減少	60
3.7.3 海底面での浸透による波高減少	60
3.7.4 砕波による波高減少	61
3.7.5 逆風による波高減少	61
3.8 エネルギー分散による波の減衰	62

第4章 長周期の波と水位変動

4.1 はじめに	63
4.2 潮汐	63
4.2.1 潮汐現象	63
4.2.2 潮汐の調和分解	65
4.2.3 潮位の基準面	66
4.2.4 潮流	67
4.3 高潮	68
4.3.1 高潮現象	68
4.3.2 高潮の計算	70
4.4 津波	72
4.4.1 津波の発生因	72
4.4.2 津波の伝播と変形	74
4.5 副振動と湾水振動	78
4.5.1 副振動の発生因	78
4.5.2 閉鎖水域での水面振動	79
4.5.3 一部開放水域での水面振動	80

第5章 海の波の統計的性質と波浪推算

5.1 はじめに	83
5.1.1 水面の挙動	83
5.1.2 不規則波の解析方法	84
5.2 波別解析法による不規則波の表示	85
5.2.1 波の定義法	85
5.2.2 代表波とその定義	85
5.2.3 海の波の統計的性質	86
5.3 エネルギースペクトル法による不規則波の表示	91
5.3.1 周波数スペクトル	91
5.3.2 周波数スペクトルと代表波との関係	92
5.3.3 風波の周波数スペクトル	93
5.3.4 代表的な風波のスペクトル	94
5.4 方向スペクトル	97
5.5 風波の発生と発達	99
5.5.1 波の発生 (Phillips の共鳴理論)	100
5.5.2 風波の発達 (Jeffreys の遮へい理論)	101
5.5.3 風波の発達 (Miles のせん断流理論)	101
5.6 風波の発達過程	102
5.6.1 代表波の変化	102
5.6.2 スペクトルの変化	104
5.7 風波の推算法	105
5.7.1 風域の設定	105
5.7.2 SMB法(有義波法)	107
5.7.3 浅海域の波浪推算法 (Bretschneider 法)	111
5.8 うねりの推定	112
5.9 不規則波の変形	113
5.9.1 不規則波の屈折	113
5.9.2 不規則波の回折	115
5.9.3 不規則波の碎波変形	118
5.9.4 サーフビート	121

第6章 沿岸海浜過程——漂砂・海浜流——

6.1 はじめに	123
6.2 海浜形状	124
6.2.1 海浜縦断形状(岸沖方向)	124
6.2.2 海岸平面地形(沿岸方向)	128
6.3 海浜底質	130
6.3.1 粒度組成	131
6.3.2 岸沖方向の底質分布	132
6.3.3 沿岸方向の底質分布	133
6.4 波による底質移動	134
6.4.1 各海浜領域での漂砂	134
6.4.2 移動限界水深	136
6.5 漂砂量の算定	139
6.5.1 掃流漂砂量	139
6.5.2 浮遊漂砂量	140
6.5.3 sheet flow の漂砂量	142
6.5.4 岸沖漂砂量とその方向	143
6.5.5 沿岸漂砂量とその方向	145
6.6 海浜流と発生メカニズム	149
6.6.1 海浜流	149
6.6.2 radiation 応力	149
6.6.3 平均水位の変化	153
6.6.4 沿岸流の流速分布	155
6.6.5 沿岸流の平均流速式	157
6.6.6 海浜流の観測例	158

第7章 波と構造物

7.1 はじめに	159
7.2 波力(波圧)	160
7.2.1 直立堤に作用する波力	160
7.3 重複波の波力式	161

7.3.1	Sainflou の簡略式	161
7.3.2	部分碎波圧	162
7.3.3	浮力と揚圧力	162
7.4	碎波圧の算定式	163
7.4.1	広井の式	164
7.4.2	揚圧力	164
7.4.3	波向に対する波圧の補正	165
7.5	碎波後の波による波力	165
7.6	連続形の波圧式——合田の式	166
7.7	捨石式構造物の波力	169
7.7.1	傾斜面被覆材の所要重量算定式 ——Iribarren 式と Hudson 式	169
7.7.2	安定係数 K_D	171
7.8	小口径部材——直立円柱に作用する波力	172
7.8.1	Morison の式	172
7.8.2	直立円柱の全波力と最大波力	174
7.9	波の打上げ	175
7.9.1	斜面前方で波が碎波しない場合	176
7.9.2	斜面前方で波が碎ける場合	178
7.9.3	消波工を有する場合の打上げ高	179
7.10	越波	181
7.10.1	規則波の越波量	181
7.10.2	不規則波の越波量	183
7.10.3	許容越波量	186
7.11	構造物での波の反射と伝達	187
7.11.1	消波構造物	187
7.11.2	構造物による波の反射	188
7.11.3	消波構造物の反射と伝達	189

第8章 海岸侵食とその対策

8.1	はじめに	193
8.1.1	海岸変形と時間尺度	193
8.1.2	海岸変形と土砂収支	194

8.2 海浜変形の原因	194
8.2.1 漂砂量と地形変化——底質量の保存則	194
8.2.2 岸沖方向の地形変化	196
8.2.3 沿岸方向の地形変化	197
8.2.4 海岸侵食の要因	197
8.3 侵食対策の計画と工法	199
8.3.1 侵食対策調査の項目	200
8.3.2 侵食対策の計画	200
8.3.3 侵食対策工法の種類	200
8.4 海岸堤防と護岸	201
8.4.1 目的と機能	201
8.4.2 堤防・護岸の種類	202
8.4.3 堤防前面の海浜変化	202
8.4.4 海岸堤防と消波工(根固め工)	207
8.5 突 堤 (群)	207
8.5.1 突堤群の目的と機能	208
8.5.2 突堤の形状と構造	208
8.5.3 突堤の規模	209
8.6 離 岸 堤	210
8.6.1 離岸堤の目的と機能	210
8.6.2 離岸堤の構造と形式	210
8.6.3 離岸堤の堆砂効果	212
8.6.4 離岸堤の沈下ブロックの散乱	213
8.7 養 浜 工	214
8.7.1 養浜土砂の選定	214
8.7.2 養浜工法の種類	215
8.7.3 わが国での養浜工の実施例	217
8.8 その他の侵食対策工	218

参 考 文 献

索 引

— S I と重力単位系 —

土木技術の分野でも、在来の重力単位系から国際単位系 (Système International d'Unités：以下略称 SI で呼ぶ) への移行が全面的に行われることになった。しかし、本書では重力単位系によっているため、以下両単位系の関係について若干の説明をしておく。

単位系は、基本量およびそれに対する基本単位の選び方で決まる。SI と重力単位系の大きな違いは、前者は基本量として質量をとり、単位として [kg] を、後者は基本量として単位質量に働く重力の大きさ [kgf] を用いていることである¹⁾。これらの単位系の関係について考えてみる

$$\begin{aligned} \text{単位質量に働く重力の大きさ} & \quad 1[\text{kgf}] = 1[\text{kg}] \times 9.8[\text{m/s}^2] \\ \text{(工学単位系の基本量)} & \quad = 9.8[\text{kg} \cdot \text{m/s}^2] \\ & \quad = 9.8[\text{N}] \end{aligned}$$

ここで [N]：ニュートンという SI 固有の名称をもつ単位

すなわち、SI で 9.8 [N] で表される力を、重力単位系では基本単位 [kgf] を用いて 1 [kgf] と表している。したがって、この関係からそれぞれの単位系相互の換算ができる。また、SI にはニュートンのほかに圧力あるいは応力度などに用いるパスカル [Pa] など固有の名称をもつ単位がある。すなわち、力と圧力 (応力度) の関連単位の換算表はつぎのようである。

(1) 力		(2) 圧力, 応力度	
N	kgf	Pa	kgf/cm ²
1	1.01972×10^{-1}	1	1.0197×10^{-5}
9.80665	1	9.80665×10^4	1

$1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2 = 1.0197 \times 10^{-4} \text{ tf/m}^2$

また、 $\times 10^6$ には M (メガ)、 $\times 10^9$ には G (ギガ) を用い、例えば

$$1 \text{ MPa} = 1 \times 10^6 \text{ Pa} = 1 \text{ N/mm}^2 = 10.197 \text{ kgf/cm}^2$$

ということになる。設計規準では応力度の単位として N/mm^2 を用いているものが多いが、これは MPa と同じである。

1) 重力単位系で質量を表すと、(力=質量×加速度) の関係から $[\text{kgf} \cdot \text{s}^2/\text{m}]$ となるが、便宜上 [kg] を用いて $1[\text{kgf} \cdot \text{s}^2/\text{m}] = 1[\text{kg}]$ として扱っている。

序 論

1.1 日本の海岸

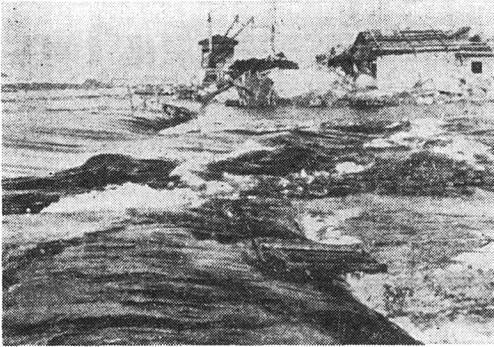
わが国は北海道、本州、四国、九州の四大島とそれを取りまく3000余りの島からなり、総面積は377400 km²と狭いにもかかわらず、海岸線の総延長は34265 kmにも及んでいる。国土の面積の約70%は山地で、産業、交通の重要な場である低平地は沿岸域にあり、総人口の60%以上の人々がそこで生活を営んでいる。

わが国の海岸線は長大であるが、海岸線1 km当りの面積は11.0 km²、また国民1人当りの海岸長は30 cmにしかない。したがって、臨海地域はわが国の社会・経済・産業活動に、また海岸は国民のレクリエーションの場として貴重な空間となっている。

台風の常襲地帯と地震の多発地帯に位置するわが国は、冬期には強い季節風

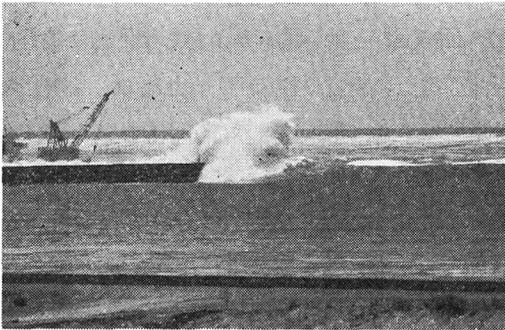


・高波（静岡県）



・高潮（伊勢湾）

が吹く。この厳しい自然条件とオホーツク海，太平洋，日本海，東シナ海の外海に海岸が直面しているため，沿岸域には高波，高潮，津波が来襲して種々の海岸災害が発生する危険性が高い（図 1.1）。加えて，人口・産業の集中が進む



・津波（日本海）

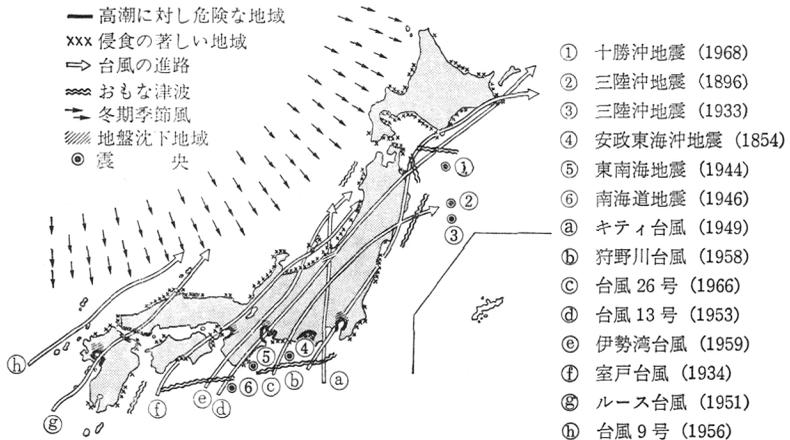


図 1.1 海岸災害の特性

臨海大都市域で問題となっている地盤沈下は、海面の相対的な上昇をもたらすため、都市防災の観点から新たな自然条件としてとらえる必要がある。

1.2 海岸工学の生立ち

土木工学の新たな分野として海岸工学 (coastal engineering) が公に認められたのは、1950年10月にアメリカ California 州 Long Beach 市で開催された第1回海岸工学会議が契機であるといえる。

それまで、海に関係する土木工学の分野は港湾工学であった。港湾工学では、港湾の建設にかかわる問題として、波の推定、防波堤に働く波力、港湾内への波の進入防止、港内埋没や河口閉塞をもたらす砂移動などと、これらを生ずる波、潮汐、漂砂^{せき}および河口密度流などの現象解明といった、現在の海岸工学でも主要な課題である事柄がとり上げられていた。第二次世界大戦以前はこれらの問題に対する理解は十分でなく、技術者の長年にわたる経験の積重ねに依存する、いわゆる経験工学的な色彩が強かった。

第二次世界大戦下のアメリカでは、波の予測技術、浅海域での波の変形と海底地形の変化などに関する研究が、科学者と技術者との協力によって活発に行われた。大戦後、これらの成果が海岸・港湾構造物の計画および設計に活用されるようになり、先に述べた第1回海岸工学会議で集約発表されると、海岸の諸現象に関心をもつ研究者と技術者に大きな影響を与えるとともに、工学とし



・新潟海岸

での積極的な取り組みが開始された。なお、海岸工学会議は隔年ごとに開催される国際会議(International Conference on Coastal Engineering, 略して ICCE)に発展し、今日に至っている。

わが国では、戦後の国土復興に伴う港湾施設などの整備、1947年から1950年にかけて来襲した台風による海岸災害の復旧と、鳥取海岸や新潟海岸などで顕著となってきた海岸侵食の対策のため、海岸保全事業の推進に加えて海岸構造物の設計基準の統一化を必要とする気運が高まってきた。1953年の13号台風はわが国の海岸史上特筆すべき台風で、その被害は日本全土に及んだ。高潮災害を受けた伊勢湾沿岸の海岸堤防の復旧は、わが国で初めて海岸工学的な手法によって計画された。このことは、アメリカでの海岸工学の研究に関心をもちはじめていたわが国の研究者と海岸技術者にとって、海岸工学の研究をより推進するための引き金となっただけではなく、1956年に成立した“海岸法”の制定の契機ともなった。

1954年には、神戸市で土木学会関西支部主催による海岸工学研究発表会が開催され、1956年には土木学会に海岸工学委員会が設立された。以来、毎年開催される海岸工学講演会で数多くの研究成果が発表され、その成果は海岸工学講演会論文集(講演集)(1954~1988)と海岸工学論文集(1989以降)に集録されている。

1.3 海岸工学で取り扱う事柄

海岸は海と陸地とが接する所で、波、流れ、風などの自然外力によって海岸の形状は絶えず変化している。このような海岸に災害防止や沿岸利用のために、海岸・港湾構造物を築造したり人為的に海岸地形を変化させたりすると、どのようなことが起こるのであろうか。これらを予測し、好ましくない現象の発生防止対策を検討するため、波や流れなどの外力の特性あるいは外的要因による諸現象の発生機構を研究・解明する必要がある。また、計画・施工する構造物の機能や安全性の検討に加えて、構造物の設置による周辺沿岸域の海岸地形や自然環境に対する悪影響の防止や除去対策をたてることもなされる。

海岸工学で取り扱う問題を要約すると次のようになる。

(1) 海岸での水理諸現象に関係する波や流れなど、外力要素の基本的な性質と実体を把握し、その挙動を解明する。

(2) 海浜地形の変化を予測するため、海岸での土砂移動（漂砂）の機構を研究・調査する。

(3) 海岸構造物の設計・施工に必要とする、構造物の水理的特性と機能を検討する。

(4) 海岸災害の発生機構を調べ、災害防止対策を検討する。

(5) 沿岸環境問題として、諸物質の海域拡散などの現象を解明し、環境に及ぼす物理的影響を調べる。

(6) 以上の問題に対する研究・調査を行うため、室内実験や現地観測に用いる計測機器・装置と観測システムの開発を行う。

わが国の海岸にとって重要課題である海岸防災と、近年非常に重視される自然環境保全に加えて、国民が要望する海岸環境の整備と利用に対応するため1999年に海岸法が改正され、海岸工学の新たな時代が始まった。

実際の海の波や流れの現象は非常に複雑である。現象を複雑化する原因として、波高が大きい波や海岸付近に発生する流れ（海浜流）が示す現象の非線形性と、一波一波ごとに性質が違う波の不規則性とがあげられる。この非線形性の強い現象と不規則な波の特性を解明して、現象の複雑さを構造物の設計などにとり入れることが、現在の海岸工学の重要な研究テーマとなっている。

1.4 海岸と海底地形

1.4.1 海底地形

海岸から深海までの海底を総称して大陸縁辺部という。太平洋型大陸縁辺部は、海岸から沖に向かって大陸棚（大陸棚）、大陸斜面、海溝、大洋底と図1.2のように続いている。大西洋型の地形には海溝はない。大陸棚は水深0～200m

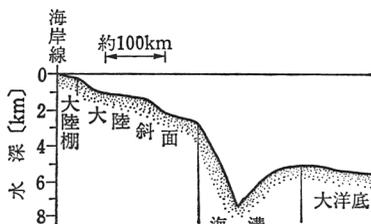


図 1.2 太平洋型海底地形模式断面図

の部分で、比較的平坦な緩勾配の浅海底である。大陸棚の成因として、地殻変動と堆積作用あるいは氷河期の海水準の低下による波の侵食などの説がある。大陸棚の沖側には水深2000 mまで達する急勾配の大陸斜面があり、その先に海溝がある。

海面の高さ（海水準）は約6000年前に現在とほぼ同じになったといわれているが、氷河期には海面低下による海退、間氷河期には海面上昇による海進が生じ、これまで数回にわたって海面の高さが $-130 \sim 60$ m変化して、沿岸域から大陸棚にかけてさまざまな地形が形成された。

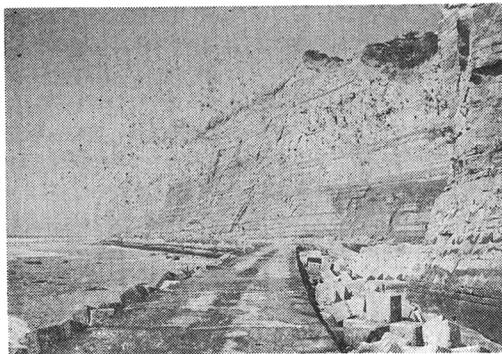
海洋開発技術の進歩によって、水深100～200 mの大陸棚前縁まで人間の力が及び、なんらかの工事がなされるようになった。しかし、海洋空間利用としての海岸や港湾などの工事が行われているのは、現在のところ水深50 mあるいは100 mまでの非常に限られた海の場合でしかない。

1.4.2 海岸の地形

海岸（coast）は海に接する陸地の部分であり、沿岸〔nearshore (zone)〕は陸沿いの浅い海の部分を指すが、その範囲は明確ではない。海岸線（coastline）は、一般には陸地と海との境界とみなされているが、海岸工学では波や潮汐の作用が及ぶ限界（海岸と浜との境界線）を指し、地形的には海崖などがある。

〔1〕 岩石海岸と砂浜海岸 海岸はその構成物質の性状から岩石海岸と砂浜海岸に大別される。

岩石海岸は波の作用によって侵食され、侵食土砂はその付近に堆積したり、



岩石海岸（福島）

—著者略歴—

- 1955 年 中央大学工学部土木工学科卒業
1960 年 中央大学大学院博士課程修了
中央大学講師（工学部）
1962 年 中央大学助教授（工学部）
1971 年 工学博士（東京大学）
1971 年 中央大学教授（理工学部土木工学科）
2000 年 中央大学名誉教授

海岸工学

Coastal Engineering

© Masataro Hattori 1987

1987 年 8 月 15 日 初版第 1 刷発行

2006 年 3 月 20 日 初版第 16 刷発行

検印省略

著者 服部 昌太郎
杉並区高井戸西 3-9-13
発行者 株式会社 コロナ社
代表者 牛来辰巳
印刷所 富士美術印刷株式会社

112-0011 東京都文京区千石 4-46-10

発行所 株式会社 コロナ社

CORONA PUBLISHING CO., LTD.

Tokyo Japan

振替 00140-8-14844・電話 (03) 3941-3131 (代)

ホームページ <http://www.coronasha.co.jp>

ISBN 4-339-05052-0

(壮光舎印刷, 愛千製本所)

Printed in Japan



無断複写・転載を禁ずる

落丁・乱丁本はお取替えいたします