

沿岸災害の現地調査と津波流体運動
による海岸堤防の被災機構

Field Surveys of Coastal Disasters and Failure Mechanism
of Coastal Dykes Induced by Tsunami Fluid Motion

2014年2月

三上 貴仁

Takahito MIKAMI

沿岸災害の現地調査と津波流体運動
による海岸堤防の被災機構

Field Surveys of Coastal Disasters and Failure Mechanism
of Coastal Dykes Induced by Tsunami Fluid Motion

2014年2月

早稲田大学大学院創造理工学研究科
建設工学専攻 海岸工学研究

三上 貴仁

Takahito MIKAMI

目次

第1章	序論	1
1.1	研究の背景	1
1.2	研究の目的	3
1.3	本論文の構成	4
第2章	沿岸災害の諸相	6
2.1	沿岸災害の現地調査	6
2.1.1	2009年サモア諸島沖地震津波	9
2.1.2	2010年チリ沖地震津波	12
2.1.3	2010年メンタワイ諸島沖地震津波	15
2.1.4	2011年東北地方太平洋沖地震津波	18
2.1.5	2012年ハリケーンサンディ高潮	23
2.2	地域の特性を踏まえた沿岸災害の理解	25
2.3	本章のまとめ	28
第3章	津波と海岸堤防に関する既往研究	29
3.1	沿岸災害対策における海岸堤防の位置付けの変遷	29
3.2	過去の津波による海岸堤防の被災要因に関する認識の変遷	33
3.2.1	過去の津波による海岸堤防の被災調査	34
3.2.2	津波による海岸堤防の被災要因に関する認識	45
3.3	津波による海岸堤防の被災に関する既往研究	46
3.4	本章のまとめ	47
第4章	2011年東北地方太平洋沖地震津波による海岸堤防の被害	48
4.1	海岸堤防の被害調査	48
4.2	津波痕跡高と映像資料による海岸堤防を越流する津波の分析	55
4.3	本章のまとめ	59
第5章	水理実験による検討	61
5.1	津波の造波方法	61

5.2	海岸堤防を越流する津波の分類	62
5.3	水理実験の概要	64
5.4	水理実験の結果と考察	65
5.5	本章のまとめ	68
第 6 章	数値計算による検討	70
6.1	数値計算モデルの支配方程式	70
6.2	数値計算手法	73
6.2.1	計算領域と計算格子	73
6.2.2	自由水面位置の決定	74
6.2.3	圧力と流速の算出	79
6.2.4	圧力と流速の境界条件	92
6.2.5	ベンチマークテストによる検証	99
6.3	数値計算の概要	100
6.4	数値計算の結果と考察	101
6.5	本章のまとめ	104
第 7 章	結 論	105
	参考文献	108
	研究業績一覧	117
	謝 辞	120

表 目 次

1.1	海岸保全施設の種類と役割	2
2.1	沿岸災害の現地調査概要一覧	6
2.2	沿岸災害に影響を与える地域の特性の例	26
3.1	1933 年昭和三陸地震津波以降の主な沿岸災害と対策の動き	30
3.2	十勝沖地震津波における堤防の天端高と津波高（中村ら，1969）	42
3.3	日本海中部地震津波における構造物の種別と被災形態（宇多，1985）	43
4.1	映像資料中の海岸堤防の概要	55
6.1	密度関数 f の値と計算格子の種類	75

目 次

1.1	海岸堤防の概念図（海岸保全施設技術研究会，2004）	4
2.1	津波や高潮による浸水痕跡の例	7
2.2	津波や高潮による浸水痕跡高の定義	8
2.3	2009年サモア諸島沖地震津波における津波痕跡高分布	10
2.4	サモア独立国ウポル島沿岸のリーフ地形	11
2.5	2009年サモア諸島沖地震津波における潮位観測記録	12
2.6	2010年チリ沖地震津波における津波痕跡高分布	14
2.7	2010年チリ沖地震津波における潮位観測記録	15
2.8	2010年メンタワイ諸島沖地震津波における津波痕跡高分布	17
2.9	スマトラ島沖離島部における津波痕跡高分布	18
2.10	2011年東北津波における津波痕跡高分布	20
2.11	2011年東北津波におけるリアス式海岸部の津波痕跡高分布	21
2.12	2011年東北津波における平野部の津波痕跡高分布	22
2.13	ハリケーンサンディ（2012年）とアイリーン（2011年）の経路	23
2.14	マンハッタン地区南部の浸水高分布（Google Earthに加筆）	24
2.15	地域の特性と沿岸災害	27
3.1	日本における堤防と護岸の総延長の変遷（海岸統計）	29
3.2	伊勢湾周辺における海岸堤防断面の変遷（豊島，1969）	32
3.3	昭和三陸地震津波における吉浜での海岸堤防被害（松尾，1933）	35
3.4	昭和三陸地震津波前の吉浜での海岸堤防断面（松尾，1933）	36
3.5	昭和三陸地震津波後の吉浜での海岸堤防断面（岩手県土木課，1936）	36
3.6	1960年チリ地震津波時の大槌町での防浪堤被害（Horikawa，1961）	40
3.7	岩崎（1960）による海岸堤防を越流する津波の概略図	40
3.8	1960年チリ地震津波時の大船渡市での岸壁の引き波（土木学会誌，1960）	41
4.1	海岸堤防の被害調査地点	48
4.2	石巻市雲雀野町における海岸堤防被害の状況	49
4.3	石巻市雲雀野町における海岸堤防被害の断面図	49

4.4	七ヶ浜町菖蒲田浜における海岸堤防被害の状況	50
4.5	七ヶ浜町菖蒲田浜における海岸堤防被害の断面図	50
4.6	岩沼市寺島における海岸堤防被害の状況	51
4.7	岩沼市寺島における海岸堤防被害の断面図	51
4.8	亘理町荒浜における海岸堤防被害の状況	52
4.9	山元町高瀬における海岸堤防被害の状況	53
4.10	山元町高瀬における海岸堤防被害の断面図	53
4.11	相馬市磯部における海岸堤防被害の状況	54
4.12	相馬市磯部における海岸堤防被害の断面図	54
4.13	おいらせ町松原で撮影された映像（越流前後）	56
4.14	おいらせ町松原の海岸堤防位置と津波痕跡高の分布	56
4.15	久慈市宇部町で撮影された映像（越流前後）	58
4.16	久慈市宇部町の海岸堤防位置と津波痕跡高の分布	58
4.17	宮古市赤前で撮影された映像（越流前後）	59
4.18	宮古市赤前の海岸堤防位置と津波痕跡高の分布	59
5.1	水理実験における津波の造波方法	61
5.2	本間（1940）による堰堤の越流状態の分類	63
5.3	実験水路断面と堤防模型の模式図	64
5.4	水深と単位幅あたりの流量による流れの分類	65
5.5	越流する流れの分類と可視化結果	66
5.6	越流時の堤防に作用する圧力と水面形状	68
6.1	計算領域	73
6.2	スタガード格子	74
6.3	irregular stars（Chan & Street, 1970）の考え方をを用いた圧力の計算	94
6.4	底面境界条件の設定	96
6.5	側面境界条件の設定	97
6.6	水柱崩壊問題の実験条件	99
6.7	水柱崩壊問題の実験結果（Martin & Moyce, 1952）と計算結果との比較	100
6.8	計算領域の設定	101
6.9	海岸堤防周辺の流速場と圧力場の時間変化	102
6.10	計算結果出力点の位置	103
6.11	堤防裏法尻周辺における x 方向流速 u の時間変化	103
6.12	堤防裏法肩周辺における圧力 p の時間変化	103

主要記号一覧

C_s	スマゴリンスキー定数
f	密度関数
g	重力加速度
g_i	重力加速度の各方向成分
h	水理実験における水平床上の初期水深
M_w	地震のモーメントマグニチュード
p	圧力
q	水理実験における単位幅あたりの流量
t	時間
u	x 方向の流速成分
u_i	流速の各方向成分
\bar{u}_i	流速の Grid Scale (GS) 成分
u'_i	流速の Sub-Grid Scale (SGS) 成分
v	y 方向の流速成分
w	z 方向の流速成分
Δx	x 方向の格子間隔
Δy	y 方向の格子間隔
Δz	z 方向の格子間隔
Δt	計算時間間隔
θ	岸沖方向軸 (x 軸) が水平方向となす角度
ν	流体の動粘性係数
ν_e	Sub-Grid Scale (SGS) 応力の渦粘性係数
ρ	流体の密度
ω	SOR 法の緩和係数

第1章 序論

1.1 研究の背景

日本は四方を海に囲まれた島国であり、津波、高潮、波浪、海岸侵食などの沿岸災害による被害をしばしば受けてきた。これらの災害から沿岸の暮らしを守るために、各種の海岸保全施設（表-1.1）が海岸工学の発展とともに整備されてきた。海岸保全施設の中でも主要なものである堤防と護岸の総延長はそれぞれ、2,835kmと6,204kmにもおよぶ（国土交通省水管理・国土保全局海岸室，2012）。

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震津波（以下，2011年東北津波と呼ぶ）は，東日本の太平洋沿岸に甚大な被害をもたらした。特に，岩手県，宮城県，福島県の東北三県では，来襲した津波が沿岸に設置された海岸保全施設を乗り越え，広範囲が津波により浸水した。陸上に氾濫した津波は，人的被害や建物への被害を引き起こしただけでなく，海岸保全施設へも甚大な被害を与えた。災害発生直後に実施された空撮映像等による概略調査では，東北三県の堤防と護岸の総延長約300kmのうち約190kmが全壊または半壊の状態であったことが確認された（国土交通省，2011）。

2011年東北津波後に実施された海岸堤防の被害調査では，被覆工の崩落，堤体内の土砂の流出，堤体背後の土地の洗掘など，海岸堤防を越流した津波による被害の状況が多くの地域で明らかとなった。越流する津波による海岸堤防の被害は，一部の研究者の指摘（例えば，首藤，1999）や津波防災に関する指針（国土庁ほか，1997）の中で，2011年東北津波以前から触れられていることではあったが，現在見られるような海岸堤防が整備されて以降，実際に生じた事例が少なく，詳細な検討がなされることはほとんどなかった。これから，2011年東北津波の被災地における海岸堤防の再建，あるいは，既設の海岸堤防をもつ地域における津波防災を考えるにあたって，2011年東北津波のような巨大津波に対して海岸堤防がどのように応答するのかを理解することは，重要な研究課題であると考えられる。

一方で海外へも目を向けると，2011年東北津波だけでなく各地で津波や高潮をはじめとした沿岸災害が発生していることがわかる。ひとつの国あるいは地域に注目すると，大規模な沿岸災害が発生するのは数十年から数百年に一度である。沿岸防災に関する知見の蓄積のスピードは決して速くはなく，さらには過去の経験や知恵の風化の危険性を常にはらんでいる。したがって，他の地域で発生した沿岸災害から積極的に学び，自らの地域の沿

表- 1.1 海岸保全施設の種類と役割

種類	概要	機能
堤防	盛土やコンクリートなどで現地盤を嵩上げした施設	高潮や津波による海水の侵入を防止する/ 波浪による越波を減少させる/海水による侵食を防止する
護岸	現地盤を被覆した施設（嵩上げを伴わない）	高潮や津波による海水の侵入を防止する/ 波浪による越波を減少させる/海水による侵食を防止する
胸壁・防潮堤	盛土やコンクリートなどで現地盤を嵩上げた施設/海岸線に漁港や港湾等の施設が存在し、施設利用の面から海岸線付近に堤防、護岸等を設置することが困難な場合に、それらの施設の背後に設置される	高潮や津波による海水の侵入を防止する
突堤	陸上から沖方向に細長く突出した施設/通常は、複数の突堤を適当な間隔で設置した突堤群として機能させる	漂砂を制御することにより汀線を維持し、もしくは回復させる
離岸堤	汀線の沖側に設置される天端高が海面よりも高い施設	消波することにより越波を減少させる/漂砂を制御することにより汀線を維持し、もしくは回復させる
潜堤・人工リーフ	汀線の沖側に設置される天端高が海面よりも低い施設	消波することにより越波を減少させる/漂砂を制御することにより汀線を維持し、もしくは回復させる
消波堤	汀線近傍に汀線と平行に設置される施設	消波することにより汀線を維持する
高潮防波堤	湾口に設置された高潮対策を主とした防波堤	高潮のピーク偏差の低減や波浪の遮蔽/堤防等の代わりに設置することで湾内のより高度な利用を可能にする
津波防波堤	湾口に設置された津波対策を主とした防波堤	津波による堤内の水位上昇や流速を低減させる/堤防等の代わりに設置することで湾内のより高度な利用を可能にする

* 土木学会海岸工学委員会海岸施設設計便覧小委員会（2000），海岸保全施設技術研究会（2004）をもとに，筆者が作成した。

岸防災を見直し改善していくという姿勢が重要である。

筆者は、2009年以降に発生した5つの沿岸災害（2009年サモア諸島沖地震津波、2010年チリ沖地震津波、2010年インドネシア・メンタワイ諸島沖地震津波、2011年東北地方太平洋沖地震津波、2012年ハリケーンサンディ高潮）について、災害発生直後（災害発生より数週間から1ヶ月程度後）に現地調査を実施し、被災状況の把握と沿岸防災に関する

知見の収集に努めてきた。特に、防災に関する知見については、それぞれの地域がもつさまざまな特性が沿岸災害に際しどのように機能したか、という点に着目してきた。例えば、地形条件が襲来する津波にどのような影響を与えたかという点や、地域の備えが被害の軽減にどのように貢献したかという点などである。

沿岸災害には多様な側面があり、その中の個々の事象を解明することも重要であるが、災害の全体像を見渡してその特徴を把握し、将来の災害への備えに役立つかたちで提示することもまた重要である。筆者が行ってきた5つの沿岸災害の現地調査で得られた知見を地域の特性とその影響という観点から整理したうえで、個々の沿岸災害の全体像を理解し、他の地域の沿岸災害から学ぶ際に有効な視点を示すことは、沿岸災害を研究するうえでの基礎になると考えられる。

1.2 研究の目的

前述した背景を踏まえて、本研究は以下に挙げる二点を目的とする。

一点目は、沿岸災害の現地調査で得られた知見をもとに沿岸災害の多様な側面を描くとともに、得られた知見を整理して他の災害から学ぶ視点を与えることである。筆者は、前述したように2009年以降に国内外で発生した5つの沿岸災害（2009年サモア諸島沖地震津波、2010年チリ沖地震津波、2010年メンタワイ諸島沖地震津波、2011年東北地方太平洋沖地震津波、2012年ハリケーンサンディ高潮）について、災害発生直後に現地調査を実施し、浸水痕跡高や被災状況に関する具体的な情報、沿岸防災に関する知見の収集に努めてきた。沿岸防災に関する知見の収集にあたっては特に、さまざまな地域の特性が沿岸災害による被害と被害からの回復にどのような影響を与えるのか、という点に注目してきた。そこで、地域の特性を踏まえて沿岸災害を理解する方法について考察する。

二点目は、津波流体運動による海岸堤防の被災機構の解明である。特に、図-1.1に示すような一般的な三面張りの海岸堤防が、越流する津波に対してどのように応答するのかを明らかにすることを目的とする。まずは、津波と海岸堤防に関する既往研究について、沿岸災害対策における海岸堤防の位置付けの変遷、津波による海岸堤防の被災要因に関する認識の変遷とともに整理する。次に、2011年東北津波による海岸堤防の被害について、筆者が実施した海岸堤防被害調査の結果、東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループによる高密度な津波痕跡高データ、2011年東北津波時に撮影された映像を用いて論じる。以上で得られた成果をもとに、津波襲来時の海岸堤防周辺における流体運動について水理実験と数値計算を用いて検討し、生じる流れの水理学的特性と海岸堤防の被災機構の関係について考察する。

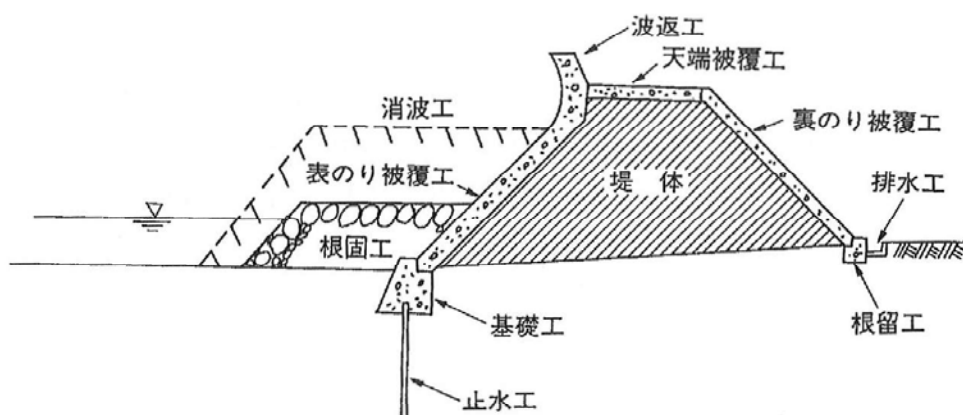


図- 1.1 海岸堤防の概念図（海岸保全施設技術研究会，2004）

1.3 本論文の構成

本論文は7つの章から構成され、各章の概要は以下のとおりである。

第1章は、序論であり、研究の背景と目的について述べた。

第2章では、沿岸災害の諸相について述べる。まず、2009年以降に国内外で発生した5つの沿岸災害（2009年サモア諸島沖地震津波、2010年チリ沖地震津波、2010年メンタワイ諸島沖地震津波、2011年東北地方太平洋沖地震津波、2012年ハリケーンサンディ高潮）を対象に、筆者が災害発生直後に実施してきた調査結果に基づき、浸水痕跡高と地域の特性が沿岸災害に与えた影響の2点について整理する。地域の特性とその災害への影響に関する具体的な事例を参照しながら、地域の特性を踏まえて沿岸災害を理解する方法について考察する。

第3章では、津波と海岸堤防に関する既往研究について述べる。まず、日本における主要な沿岸災害とその対策について整理した年表に基づき、沿岸災害対策における海岸堤防の位置付けの変遷について述べる。さらに、過去の津波による海岸堤防の被災状況について調査した文献に基づき、津波による海岸堤防の被災要因に関する認識の変遷について述べる。最後に、これらの変遷の中で進められてきた津波と海岸堤防に関する既往研究を整理する。

第4章では、2011年東北津波による海岸堤防の被災実態について述べる。まず、2011年東北津波後に筆者が数度にわたって実施してきた海岸堤防の被害調査結果に基づき、海岸堤防の具体的な被害事例について述べる。さらに、東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループによる津波痕跡高データと津波襲来時に海岸堤防周辺で撮影された映像に基づき、津波襲来時に海岸堤防周辺で生じた流体運動と海岸堤防被害の関係について論じる。

第5章では、水理実験による検討内容について述べる。本研究では、2011年東北津波

で見られたような海岸堤防を越流する津波について考察するので、まず、それに対応した実験水路における津波の造波方法について検討する。次に、海岸堤防を越流する津波の形態とその定性的な分類について検討する。そのうえで、実験水路において海岸堤防を越流する津波を再現し、分類したそれぞれの形態の流れがもつ基礎的な水理学的特性を把握する。さらに、得られた水理学的特性に基づいて、越流による海岸堤防の被災機構について論じる。

第 6 章では、数値計算による検討内容について述べる。まず、本研究で用いる Large Eddy Simulation (LES) モデルの支配方程式と数値計算手法について述べ、ベンチマークテストによる検証を行い数値モデルの妥当性を確認する。そのうえで、水理実験と同様のスケールで数値計算を実施し、時間経過とともに変化する海岸堤防を越流する津波の再現を試みる。

第 7 章は、結論であり、本研究で得られた成果を総括する。

第2章 沿岸災害の諸相

2.1 沿岸災害の現地調査

2009年以降、国内外のさまざまな地域で5つの大規模な沿岸災害（2009年サモア諸島沖地震津波，2010年チリ沖地震津波，2010年メンタワイ諸島沖地震津波，2011年東北地方太平洋沖地震津波，2012年ハリケーンサンディ高潮）が発生した。筆者はこれらの沿岸災害について，災害発生直後（災害発生より数週間から1ヶ月程度後）に現地調査を実施し（表-2.1），それぞれの沿岸災害の実態把握に努めてきた。災害発生直後に実施した現地調査では，主に以下に挙げる二点の把握を目的とした。

一点目は，浸水痕跡高の把握である。浸水痕跡高は，津波や高潮による外力を評価する際に最も重要となる指標であるとともに，数値計算により津波や高潮を再現する際の検証に用いる指標でもある。現地調査では，図-2.1に示すような津波や高潮による浸水の痕跡を探索し，痕跡位置の海面からの高さを計測した。それぞれの計測に際しては，まずハン

表- 2.1 沿岸災害の現地調査概要一覧

災害名称	主な被災地域	地震・ハリケーンの概要 ^{a, b}	調査日程
2009年サモア諸島沖地震津波	サモア独立国，米領サモア，トンガ	2009年9月29日に南太平洋サモア諸島で M_w 7.9の地震が発生	10月28日～10月31日
2010年チリ沖地震津波	チリ	2010年2月27日にチリ中部沿岸で M_w 8.8の地震が発生	4月3日～4月8日
2010年メンタワイ諸島沖地震津波	インドネシア	2010年10月25日にインドネシアのスマトラ島南部で M_w 7.7の地震が発生	11月19日～11月20日
2011年東北地方太平洋沖地震津波	日本	2011年3月11日に三陸沖で M_w 9.0の地震が発生	3月25日～3月28日
2012年ハリケーンサンディ高潮	アメリカ	2012年10月29日に中心気圧946hPaのハリケーンがアメリカ東海岸に上陸	11月9日～11月12日

^a 地震の概要は，各地震の発生月の気象庁「地震・火山月報（防災編）」による。

^b ハリケーンの概要は，National Hurricane CenterのWebサイト（<http://www.nhc.noaa.gov/archive/2012/al18/al182012.update.10300002.shtml>）による。

ディGPSにより各計測地点の緯度経度を記録し、その後レーザー距離計（Impulse 200LR, Laser Technology 社製）、反射プリズム、スタッフを用いて、計測時点における海面から痕跡の位置までの高さを計測した。計測後、計測時の天文潮位と津波や高潮の推定襲来時刻の天文潮位（津波が発生しなかった場合の潮位）との差を調べ、襲来時における痕跡までの高さを算出して浸水痕跡高としている。

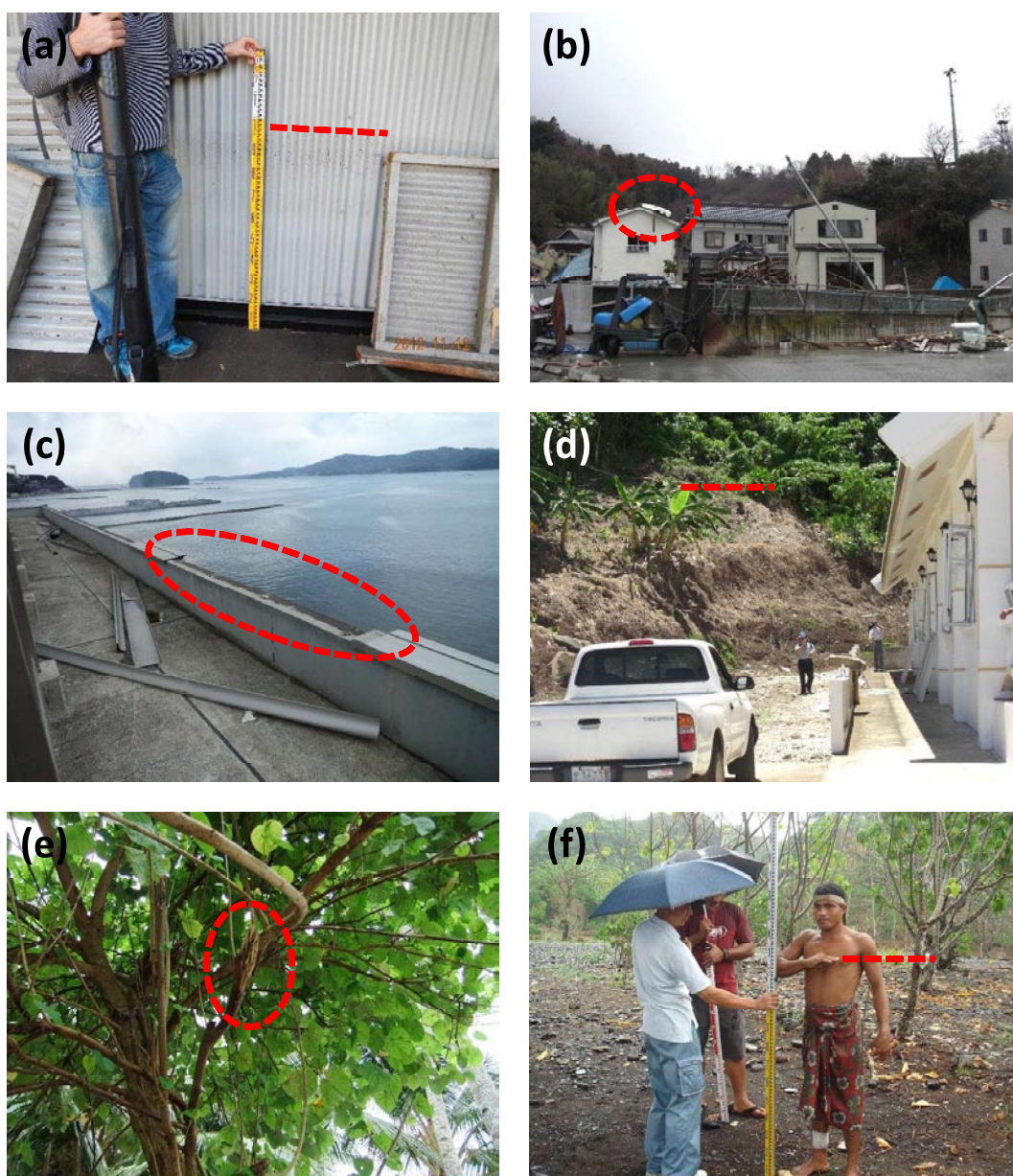


図- 2.1 津波や高潮による浸水痕跡の例（a：建物の壁面に残された泥の線，b：海水により屋根の上に運ばれた漂流物，c：損壊した建物の一部，d：斜面上の植生の潮枯れ，e：折れた樹木の枝，f：津波や高潮を襲来時に目撃した住民による証言）

浸水痕跡高は一般的に、遡上高（run-up height）と浸水高（inundation height）の二つに分類して使用されており、本論文でもこの定義に従って記述する（図-2.2）。遡上高は、陸域を遡上した津波が最も内陸まで侵入し、その動きを停止した位置の高さである。主に、津波により運ばれた複数の漂流物や斜面上の植生の色の変化、目撃証言などによりその位置を判断する。浸水高は、陸域を遡上する途中に残された痕跡の高さである。主に、海岸近くの樹木の枝折れや樹木に付着した海由来の漂流物、建物の壁面に残された砂や泥の線などによりその位置を判断する。遡上高と浸水高に加えて、浸水痕跡の近傍地盤からの高さを表す浸水深（inundation depth）という用語を用いることもある（図-2.2）。また、遡上高は沿岸に襲来した津波や高潮のもつエネルギーのすべてが位置エネルギーに変換された状態、浸水高は位置エネルギーと運動エネルギーの双方が混在した状態、というように両者をエネルギーの観点から説明することもできる（高橋，2011）。

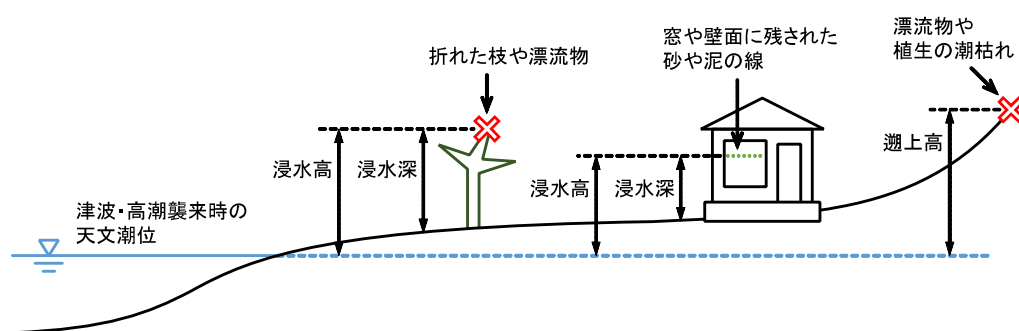


図-2.2 津波や高潮による浸水痕跡高の定義

二点目は、地域の物理的特性あるいは社会的特性が沿岸災害に与える影響の把握である。物理的特性が与える影響の例としては、河川や海岸林などの沿岸に存在する自然環境、海岸堤防や防波堤をはじめとした海岸保全施設などの人口構造物の存在が、津波や高潮の伝播や遡上に影響を与えることが挙げられる。社会的特性が与える影響の例としては、継続的な防災教育や過去の被災経験の伝承が被害の軽減につながることを、あるいは、警報システムの不備や災害に対する理解の欠如が被害の増大につながることを挙げられる。これらの事象をそれぞれの地域において具体的に把握するために、写真による状況の記録や住民への聞き取り調査を実施した。

災害直後に現地調査を実施することで、風雨や復旧作業による浸水痕跡の消失、災害を経験した住民の記憶の風化を防ぐことができ、多くの重要な知見を得ることができた。本節では、筆者が実施してきた5つの沿岸災害の現地調査で得られた知見を上述した二つの観点（浸水痕跡高、地域の特性が沿岸災害に与えた影響）から整理していく。

2.1.1 2009年サモア諸島沖地震津波

2009年9月29日6時48分（現地時間，UTC-11），南太平洋上に位置するサモア諸島の南約200kmの位置を震源とする M_w 7.9の地震が発生した。この地震に伴って発生した津波は周囲に点在する島嶼国を襲い，サモア独立国で死者143人，行方不明者4人¹，米領サモアで死者32人，行方不明者2人²，トンガで死者9人³の犠牲者を出した。津波は太平洋上を伝播し，震源から西に650kmほど離れたウォリス・フツナにも到達したことが確認されている（Lamarche et al., 2010）。

現地調査は，災害発生から約1ヶ月後の2009年10月28日から10月31日にかけて実施した（柴山ら，2010；Mikami et al., 2011）。調査地域は，被害の大きかったサモア独立国のウポル島南部と米領サモアのトゥトゥイラ島西部である。以下に，現地調査で得られた津波痕跡高と地域の特性が本津波災害に与えた影響について述べる。

津波痕跡高 サモア諸島における津波痕跡高の分布を図-2.3に示す。図には，筆者らの調査隊による計測結果とそのほかの調査隊による計測結果（行谷ら，2010；有川ら，2010；Okal et al., 2010）をあわせて示している。ウポル島とトゥトゥイラ島の沿岸部の広い地域で5m以上の津波痕跡高を記録しており，震源に面した島の南部沿岸だけでなく，島の北部沿岸にも津波が襲来していることがわかる。ウポル島における津波痕跡高は，東端部で10m以上と高く，西に向かうにしたがって低くなっている。トゥトゥイラ島における津波痕跡高は，西端部で15m以上と高く，東に向かうにしたがって低くなっているが，数箇所10m前後の局地的に高い遡上高を記録している場所がみられる。局地的に高い部分は岬の先端部や湾奥部であり，地形の影響を受けて隣接する地域でも津波痕跡高が大きく異なることがわかる。

地域の特性が与えた影響 サモア諸島における現地調査で得られた特筆すべき知見として，島を取り囲むサンゴ礁リーフが津波に与えた影響，津波に関する教育の効果，被災後の集落の高地移転と社会構造の関係の3点について以下に述べる。

1点目は，サンゴ礁リーフが津波に与えた影響についてである。サモア諸島はサンゴ礁のリーフに取り囲まれており，これらのリーフ上で津波が砕けたことが住民の避難行動や被害程度に影響を与えていたことが明らかになった。島を取り囲むリーフの幅が広い地域（Satitua, 図-2.4 a）では，これらのリーフ上で波が砕けながら進んでくる様子が見えやすかった。沿岸部の住民はいつもの波とは違うと感じ，いち早く危険に気づき安全な場所へと避難することができた。本津波災害においては，地震発生から第一波襲来まで

¹<http://www.unocha.org/roap/top-stories/samoa-remembering-tsunami-2009>

²<http://reliefweb.int/report/american-samoa/fema-remembers-american-samoa-first-anniversary-tsunami>

³<http://reliefweb.int/report/tonga/tongan-prime-minister-gives-39-new-houses-people-niutatoputapu>

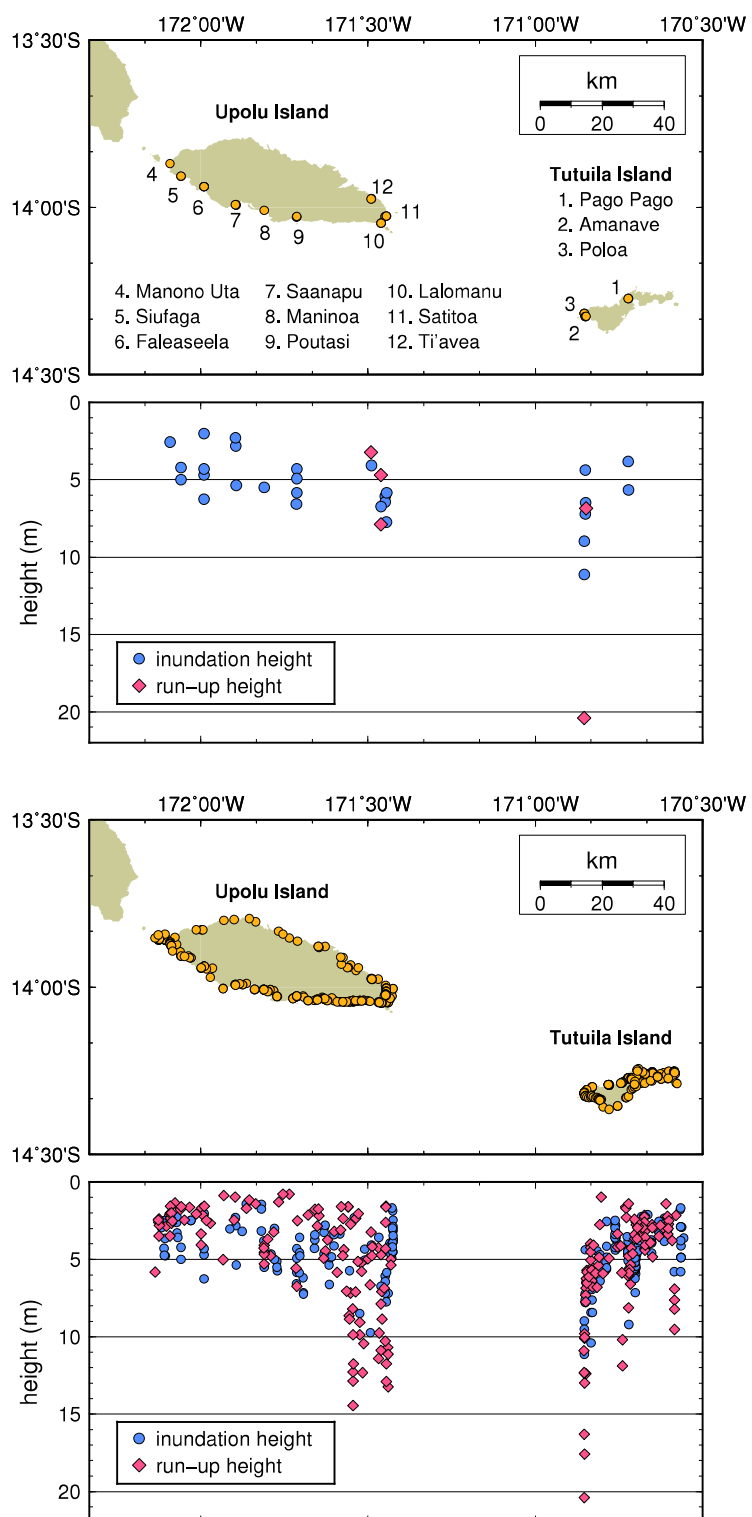


図- 2.3 2009年サモア諸島沖地震津波における津波痕跡高分布（上：筆者らの計測結果，下：全体の計測結果）

が比較的短く、住民自らが津波の危険性を察知して適切な避難を行う必要があり、リーフ上で津波が砕波することが助けとなっていた。また、リーフの広がる入り江の奥に位置している地域（Faleaseela, 図-2.4 b）では、津波は遠くで砕けて、徐々に水位が上がってくるようなかたちで1回襲来したのみであったという証言が得られており、リーフ上で波が砕けることによって津波のエネルギーが減衰する効果も確認された。リーフ上での波の変形やエネルギーの変化は数値解析によっても確認されており（三上・柴山, 2012）、地域ごとの津波の特性を理解するうえで、それぞれの地域の有する自然環境の特徴を考慮することが重要であることをこの事例は示している。

2点目は、津波に関する教育の効果についてである。図-2.5 に示しているウポル島北部 Apia とトゥトゥイラ島 Pago Pago での検潮記録（National Tsunami Warning Center）からもわかるように、津波第一波の襲来までの時間は30分以下と短かった。そのため、第一波襲来までに津波警報が全島に行き渡るには至らなかった。しかし、津波警報がかろうじて間に合った所（Ulutogia）でも、間に合わなかった所（Satittoa, Poloa）でも、多くの人が迫ってくる津波を見て、危険を察知して逃げたと語っていた。いくつかの村では学校で

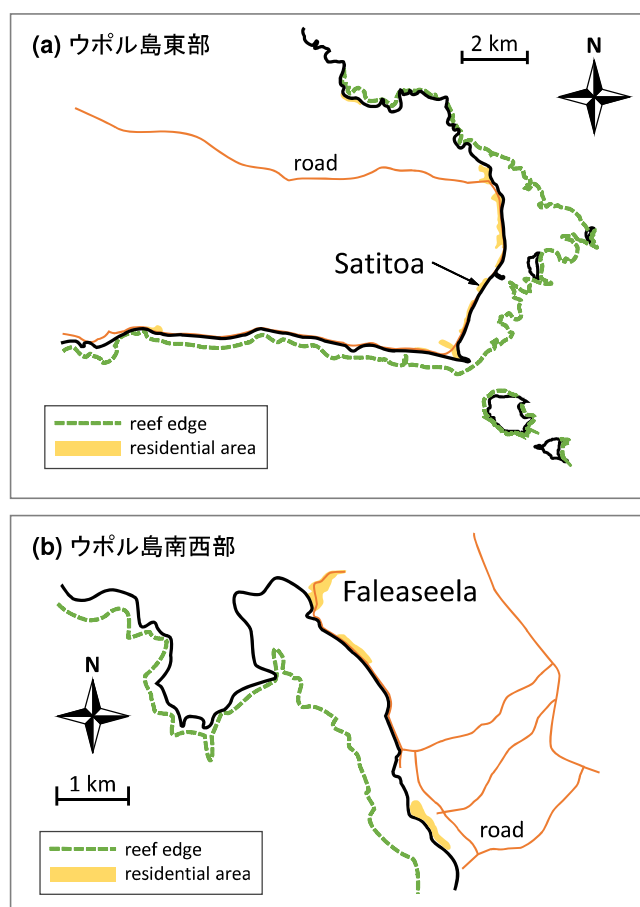


図-2.4 サモア独立国ウポル島沿岸のリーフ地形

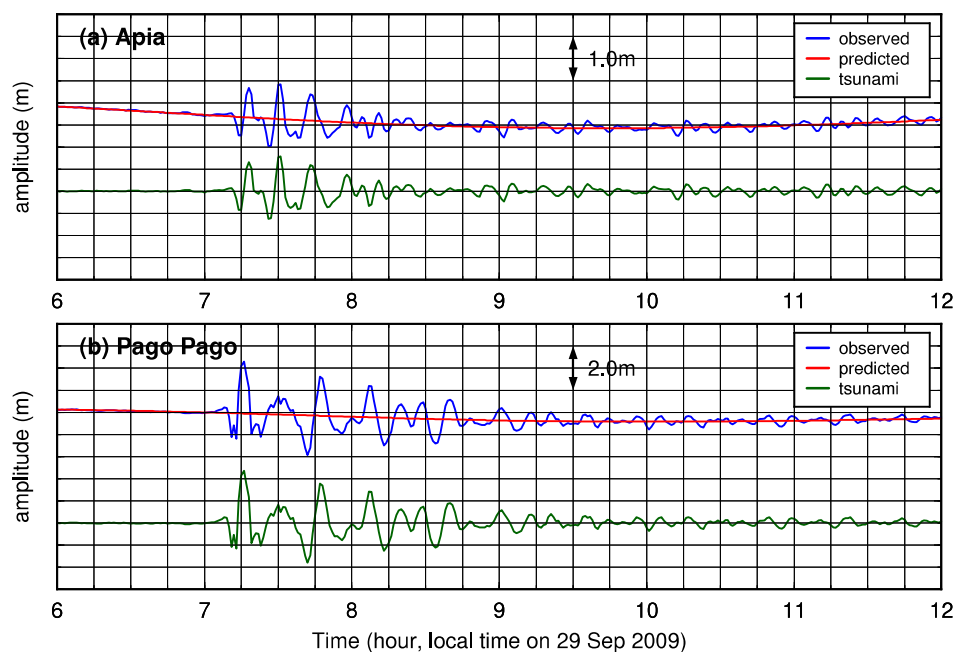


図- 2.5 2009年サモア諸島沖地震津波における潮位観測記録

津波の挙動を教える教育を実施しており、津波の危険を感じたら安全な場所へ避難するという意識が教育を受けた子供を通じて住民の中に伝わっていたと考えられる。

3点目は、被災後の集落の高地移転と社会構造の関係についてである。ウポル島東部に位置する Ulutogia では、本津波災害の被害を受けて、筆者らが現地調査を行った時点で既に、集落全体で高地への移転を決定していた。集落では被災後の1ヶ月間に何度か話し合いを開き、最後はマタイと呼ばれる集落のリーダーが高地移転を決断した。サモア諸島の多くの村では、土地を集落の共同体とその代表者であるマタイが管理しており、マタイは土地移転などに際し大きな権限を持っている。住み慣れた沿岸の地域を離れることは一般的にストレスや抵抗を伴うものであるが、このマタイのリーダーシップというサモア社会の伝統的な社会構造の特徴が、高地移転の決断の際にうまく機能したものと考えられる。

2.1.2 2010年チリ沖地震津波

2010年2月27日3時34分（現地夏時間，UTC-3），南米チリ中部沖を震源とする M_w 8.8の地震が発生した。この地震に伴って発生した津波はチリ沿岸の広範囲に被害をもたらし、地震と津波による死者523人のうち、少なくとも156人は津波によるものとされている⁴。津波は地震発生から20時間以上後に日本の太平洋沿岸にも到達し、岩手県の宮古湾奥では浸水高が2mを超えた（都司ら，2010）。日本では人的被害は発生しなかったものの、地域

⁴<http://www.unisdr.org/archive/25366>

によっては浸水被害や水産被害が発生した（今井ら，2010）。

現地調査は，災害発生から約1ヶ月後の2010年4月3日から4月8日にかけて実施した（三上ら，2011）。調査地域は，チリ中部沿岸の広範囲にわたり，北のCartagenaから南のTiruaまでの距離は500km以上にのぼる。以下に，現地調査で得られた津波痕跡高と地域の特性が本津波災害に与えた影響について述べる。

津波痕跡高 チリ沿岸における津波痕跡高の分布を図-2.6に示す。図には，筆者らの調査隊による計測結果とそのほかの調査隊による計測結果（東北大学大学院工学研究科災害制御研究センター，2010；Fritz et al.，2011）をあわせて示している。広範囲にわたって10m以上の津波痕跡高を記録しており，一部地域では20m以上の局所的に高い遡上高を記録している。筆者らの計測結果の中で15mを超える遡上高さは，いずれも海岸線付近の急斜面で記録したものであり，運動量をもった津波が局所的に高さを増したものと考えられる。

地域の特性が与えた影響 チリにおける現地調査で得られた特筆すべき知見として，大陸棚による津波の捕捉効果と沿岸住民への知識の普及の2点について以下に述べる。

1点目は，大陸棚による津波の捕捉効果についてである。チリ沿岸は沖合約50kmまでは水深500m以下の大陸棚が広がっているが，その外側では沖に向かって急激に深くなり，沖合100kmを過ぎると水深は5000m近くになっている。このように急激に水深が深くなっているため，大陸棚上で発生した津波は，入射角が大きい場合には太平洋へと伝播せずに大陸棚縁部で反射し，チリ沿岸を何度も襲ったと考えられる。実際，Llicoでは，午前4時頃，午前5時から6時にかけて，午前8時頃の計3回津波が押し寄せ，このうち午前8時頃の津波が最も街を破壊したという証言が得られている。これは，図-2.7に示しているValparaisoとCorralでの検潮記録（National Tsunami Warning Center）からもわかる。前述のサモア諸島における津波（図-2.5）と比べると，津波の襲来間隔や継続時間が著しく異なる。

2点目は，沿岸住民への知識の普及についてである。現地調査によって判明した津波の規模は，例えば，2004年インド洋大津波でのスリランカでの津波の規模（柴山ら，2005）に匹敵するものであったが，スリランカでは死者が3万人以上にのぼるのに対し，チリでは数百人程度に抑えられた。この理由としては，揺れの大きさと知識の普及の2点が考えられる。地震の規模が大きく，揺れも大きかったため，住民にとって具体的に津波の来襲を感じることができた。また，1960年チリ地震津波，2004年インド洋大津波といった大規模な津波災害を契機として，沿岸で生活する住民の間に津波に関する知識が広く行き渡っており，多くの住民が地震発生後，高台に避難していた。ただし，Constitucionのように沿岸にキャンプをしに来た人たちが被災する例もあり，沿岸域の住民だけでなく，沿岸を利用する人にも広く避難を促すような取り組みも必要である。

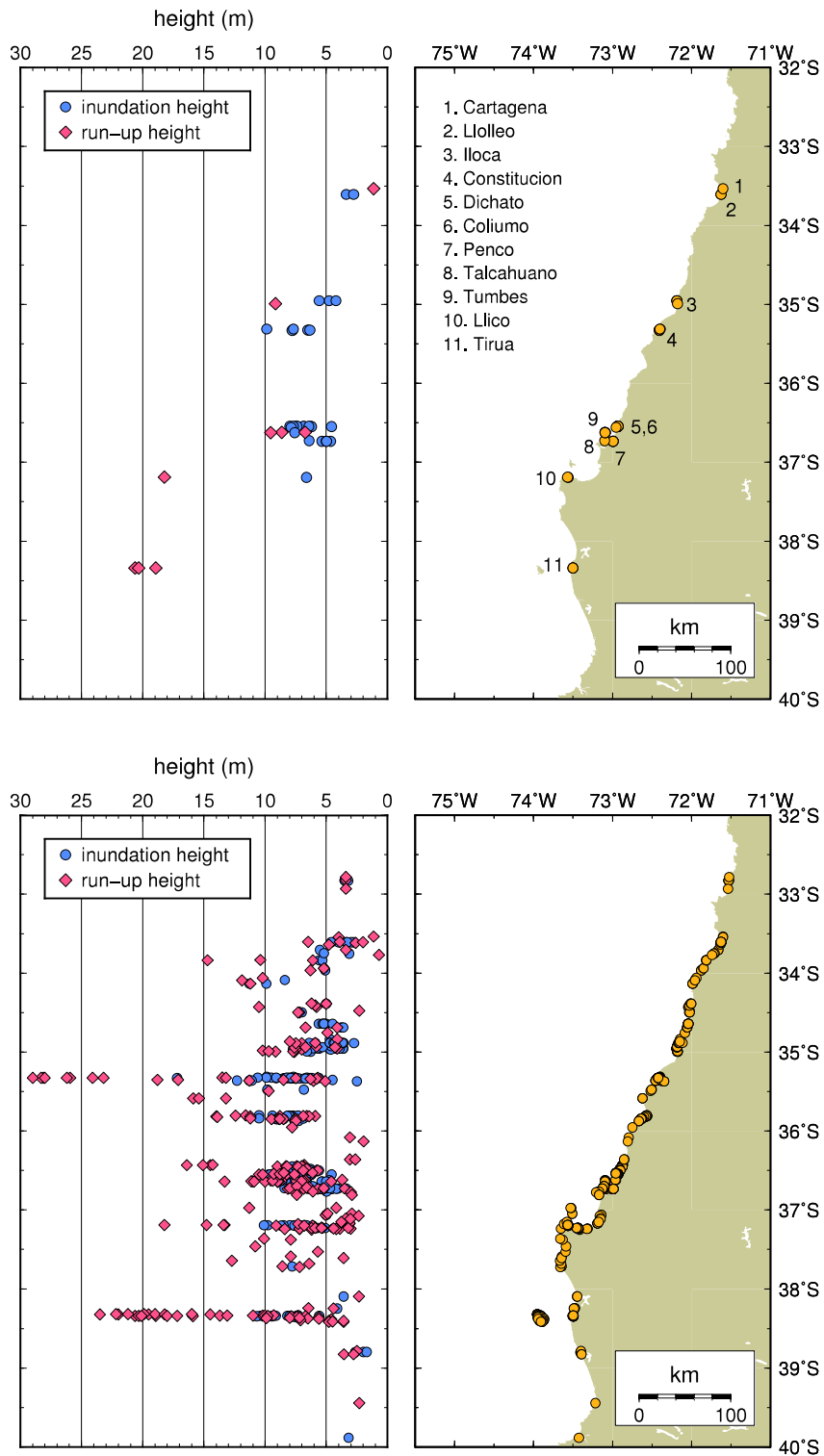


図- 2.6 2010 年チリ沖地震津波における津波痕跡高分布（上：筆者らの計測結果，下：全体の計測結果）

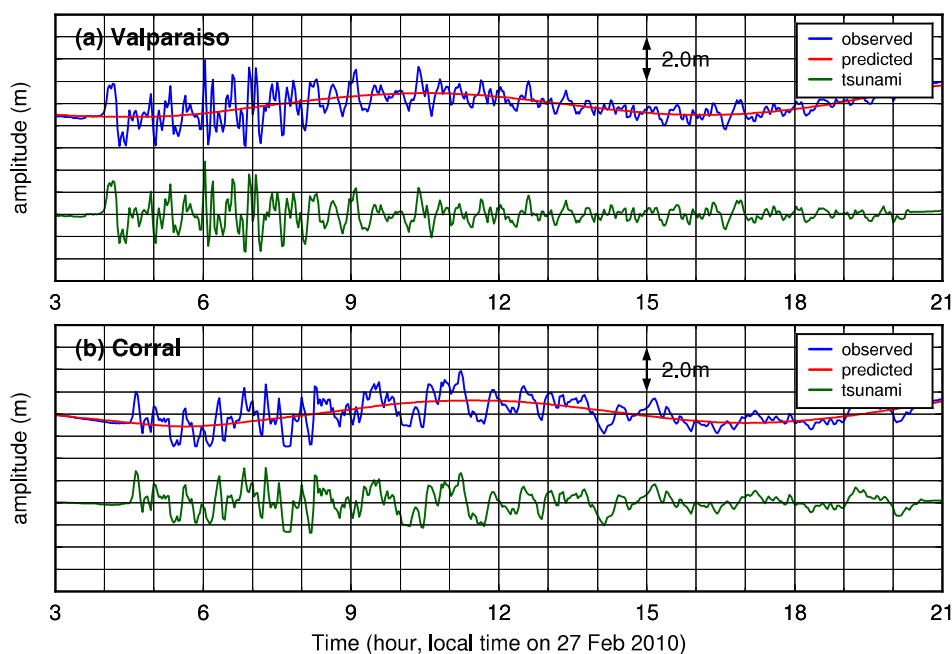


図-2.7 2010年チリ沖地震津波における潮位観測記録

2.1.3 2010年メンタワイ諸島沖地震津波

2010年10月25日21時42分（現地時間，UTC+7），インドネシアはスマトラ島の西海岸沖に位置するメンタワイ諸島沖を震源とする M_w 7.7の地震が発生した。この地震に伴って発生した津波はメンタワイ諸島沿岸を襲い，犠牲者は死者509人，行方不明者21人におよぶ⁵。メンタワイ諸島を構成する主な島は，北からシベル島，シポラ島，北パガイ島，南パガイ島の4島であり，これらのうち震源に近い南北パガイ島とシポラ島において被害が大きかった。

現地調査は，災害発生から約1ヶ月後の11月19日と20日にかけて実施した（Mikami et al., 2013）。11月初旬に，既に他の調査隊により，南北パガイ島での調査が実施されていたため（富田ら，2011），本調査ではシポラ島を対象とし，2日間で島南東部の4地点を調査した。以下に，現地調査で得られた津波痕跡高と地域の特性が本津波災害に与えた影響について述べる。

津波痕跡高 南北パガイ島とシポラ島の沿岸における津波痕跡高の分布を図-2.8に示す。図には，筆者らの調査隊による計測結果とそのほかの調査隊による計測結果（富田ら，2011；Hill et al., 2012；Satake et al., 2013）をあわせて示している。シポラ島の南部から南パガイ島の南部までの範囲で5m以上の津波浸水高が記録されている。シポラ島北端に位置するTuapejatと南Pagai島南端から20kmほどの場所に位置するSanding島においても遡

⁵<http://reliefweb.int/report/indonesia/indonesia-tsunami-survivors-still-lack-adequate-shelter>

上高が計測されているが、その値は2m程度であり大きな被害もなかったことが報告されている(Hill et al., 2012)。これらのことから、本津波災害において大きな被害を受けたのは、南北パガイ島とシボラ島南部のインド洋側に限られていたと考えられる。

地域の特性が与えた影響 メンタワイ諸島における現地調査では2日間で4つの集落の調査しか行えなかったが、その中で得たメンタワイ諸島のような離島での津波対策における避難路の確保の重要性と住民の津波に対する意識の向上の重要性の2点について以下に述べる。

1点目は、避難路の確保の重要性についてである。調査した4つの集落のうちBosuaでは死者が出なかった。その理由のひとつとして高台へのアクセスが容易であったことが挙げられる。Bosuaでは海から集落に向かってのびる道に沿って津波が侵入してきたと考えられるが、その道はそのまま内陸へと進んでおり、遡上高を記録した海岸線から300m程の位置より奥では被害がなく、住民はこれらの場所へと逃げる事ができたと考えられる。一方で、Old-GobikやMasokutでは内陸の高台へと続く道がなく、住民は逃げ場がなかった。Bere-Berilouでは内陸に向かって道が続いているものの、標高の高い場所はなく建物は1階建てもしくは2階建てであるので、避難に適した場所が見当たらなかった。これらの集落で津波避難シェルターや防災構造物を建造することは、技術的あるいは経済的な観点からも困難であるため、それぞれの集落において居住地と高地をつなぐ安全な避難路の確保が重要であると考えられる。

2点目は、住民の津波に対する意識の向上の重要性についてである。メンタワイ諸島の位置するスマトラ島沖では、ここ十年だけでも2004年インド洋大津波、2005年ニアス島沖地震津波、2010年メンタワイ諸島沖地震津波と3度も津波災害が発生している。しかし、それぞれの津波のスマトラ島沖離島部の津波痕跡高分布(図-2.9)をみると、2004年と2005年では北部のシムル島からニアス島にかけての地域、2010年では南部のメンタワイ諸島といったように、隣接した地域で発生した地震であっても被害を受ける島は波源近傍の島に限られることがわかる。スマトラ島沖における特定の地域のサンゴ礁や地層から読み取ることができる地震の発生頻度は、100~300年に一度程度であるという報告もある(Sieh et al., 2008; Monecke et al., 2008)。これらのことから、ひとつひとつの島や集落にとっての津波の発生間隔というのは長いので、年月とともに薄れてしまいやすい災害経験の伝承だけではなく、津波に対する意識を向上させ維持するような仕組みが必要であると考えられる。現地での住民への聞き取り調査では、BosuaとMasokutでは防災教育や避難訓練が行われていたが、Bere-Berilouでは行われていなかったことがわかった。これからはこれらの取り組みを多くの集落で定着させるとともに、シムル島やニアス島で行われている地域の文化や歴史に根ざした防災意識を向上させる取り組み(高藤, 2013)についても検討していく必要がある。

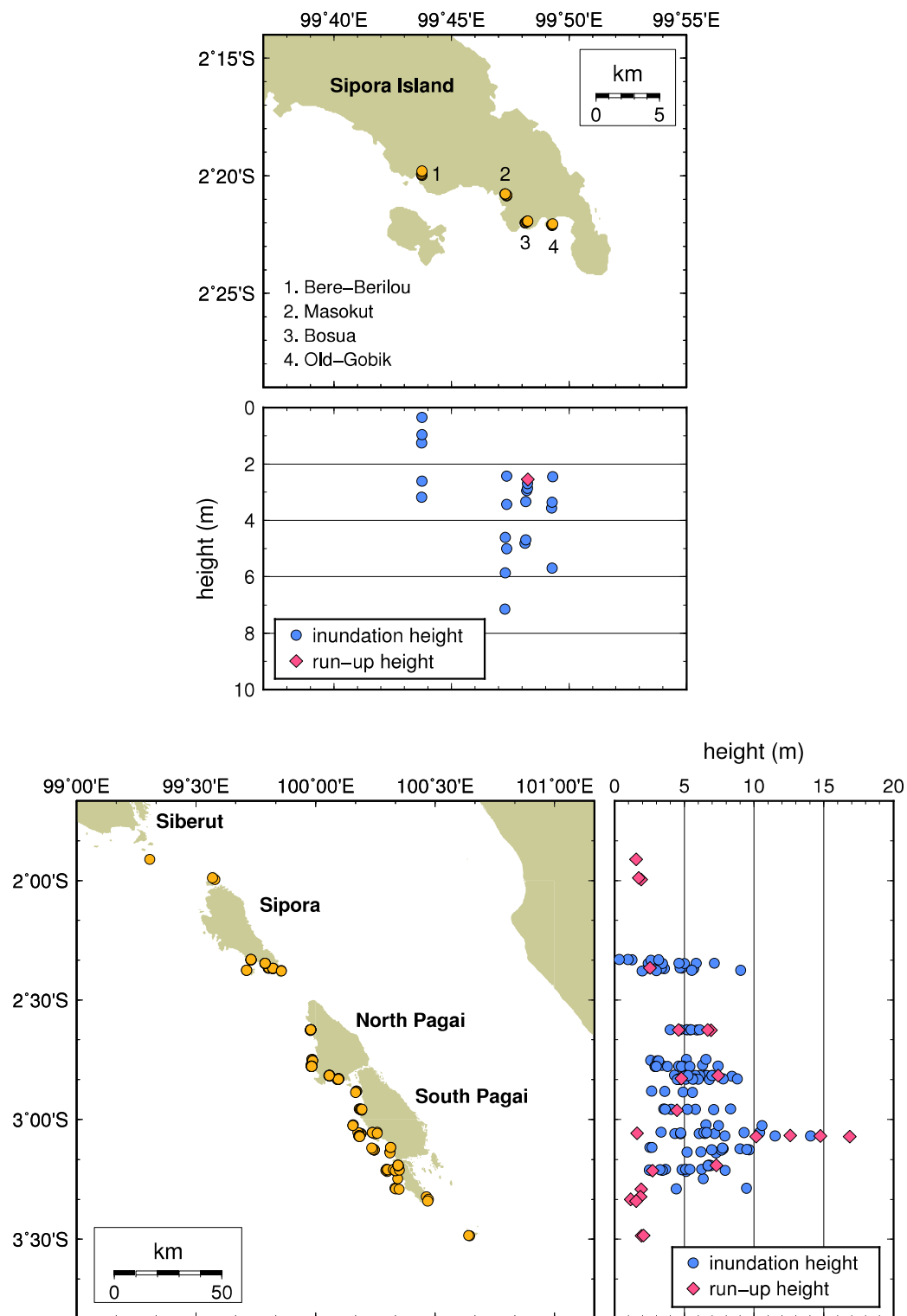


図- 2.8 2010年メンタワイ諸島沖地震津波における津波痕跡高分布（上：筆者らの計測結果，下：全体の計測結果）

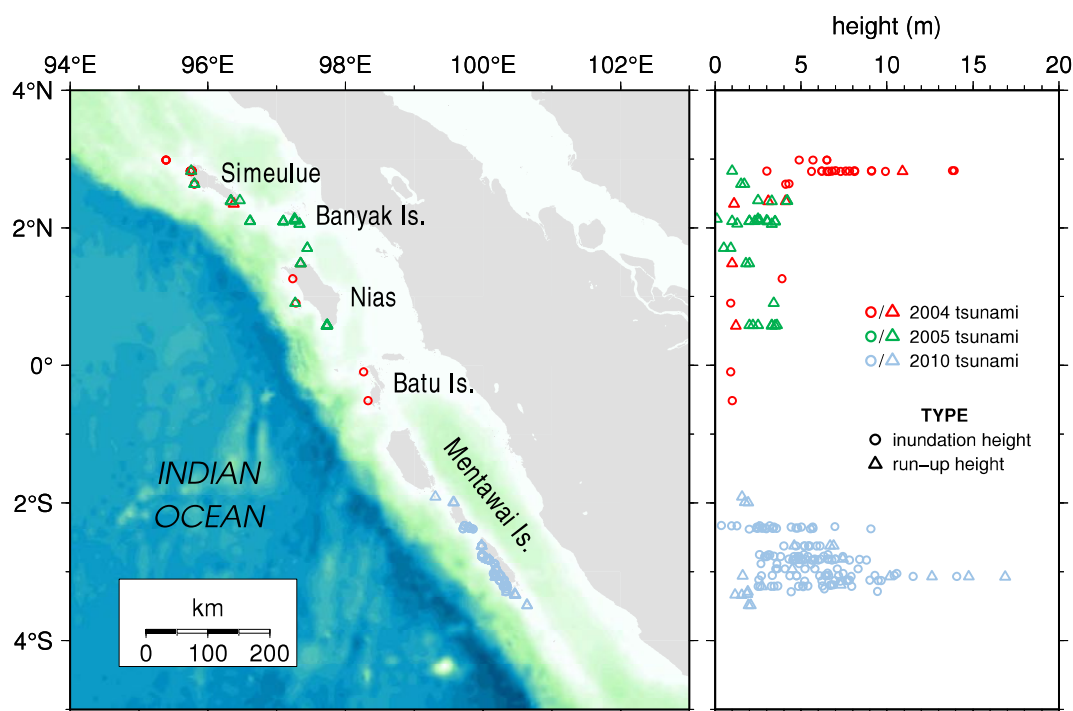


図- 2.9 2004年インド洋大津波 (Jaffe et al., 2006), 2005年ニアス島沖地震津波 (Borrero et al., 2011), 2010年メンタワイ諸島沖地震津波のスマトラ島沖離島部における津波痕跡高分布

2.1.4 2011年東北地方太平洋沖地震津波

2011年3月11日14時46分 (日本時間, UTC+9), 東北地方太平洋沖を震源とする M_w 9.0の地震が発生した。この地震に伴って発生した津波は, 東日本沿岸の広範囲に甚大な被害をもたらし, 2014年1月10日時点の死者数は15,884人, 行方不明者数は2,640人となっている⁶。2012年3月11日までに被災3県 (岩手県, 宮城県, 福島県) において検視等を行った遺体のうち9割以上の死因が溺死であり⁷, 犠牲者の多くが津波に巻き込まれたことにより命を落としていることがわかる。

現地調査は, 災害発生から約2週間後の3月25日から28日にかけて実施した (柴山ら, 2011; Mikami et al., 2012)。調査地域は, 被害の甚大であった宮城県北部から福島県北部までの地域である。以下に, 現地調査で得られた津波痕跡高と地域の特性が本津波災害に与えた影響について述べる。

津波痕跡高 2011年東北津波においては, 広域にわたる津波痕跡高の調査を実施するために, 土木学会や日本地球惑星連合等の研究者により, 東北地方太平洋沖地震津波合同調

⁶警察庁: 被害状況と警察措置, <http://www.npa.go.jp/archive/keibi/biki/index.htm>

⁷警察庁: 平成24年版警察白書, <http://www.npa.go.jp/hakusyo/h24/honbun/index.html>

査グループが立ち上げられ、その計測結果はすべてウェブ上で公開されている（The 2011 Tohoku Earthquake Tsunami Joint Survey Group, 2011 ; Mori et al., 2012）. 筆者らの計測結果と東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ（2012）による全体の計測結果を図-2.10に示す. 津波痕跡高の全体の特徴としては、岩手県と宮城県のリアス式海岸部で20mを超える大きな値を記録しており、そこから南北へ進むにしたがって低くなっていくことが挙げられる.

地域の特性が与えた影響 2011年東北津波において大きな被害を受けた地域は、岩手県や宮城県北部のリアス式海岸部と宮城県南部や福島県の仙台湾沿岸の平野部に大別することができる. リアス式海岸部と平野部では、その沿岸域の地形の違いにより浸水形態や被災形態が異なることがわかった. 以下に、それぞれの地域における特徴について述べる.

1点目は、浸水形態についてである. 筆者が調査した地域の中でリアス式海岸部に位置する気仙沼市、南三陸町、女川町の津波痕跡高分布（図-2.11）をみると、湾奥の低地部で広く浸水し、その浸水高は海岸線から最大遡上地点までほぼ一様になっていることがわかる. リアス式海岸部では、高台には含まれた低地部分に津波が集中し、津波痕跡高は大きくなったが、海岸線近傍であっても隣接する十分な高さのある高台にアクセスできれば、津波から逃れることができると考えられる. 一方で、筆者が調査した地域の中で平野部に位置する仙台市、名取市、亶理町、相馬市の津波痕跡高分布（図-2.12）をみると、津波は内陸数kmまで到達しており、遡上限界は海岸線とほぼ平行であり、痕跡高は海岸線から内陸に向かって徐々に小さくっていることがわかる. 平野部では、リアス式海岸部と異なり、内陸に進むに従って津波痕跡高は小さくなるものの、地形的な凹凸が少なく、海岸線近傍では高さのある建造物以外に避難できる高さのある場所が少なかった. 海岸線近傍であっても避難できるようにするためには、沿岸部の人口に合わせて津波避難ビル等の整備を推進していく必要があると考えられる.

2点目は、被災形態についてである. リアス式海岸部には小さな漁村が点在しており、それぞれが防波堤により守られている. その中には、津波防災を主目的として建設されたものもあるが、多くは高波や高潮を防ぐことを主目的として建設されたものであり、これらの防波堤の被害が多くみられた. 南三陸町では津波避難ビルが効果を示した例もみられたが、高さが必ずしも十分でなかったことや被災時に長期間にわたって孤立してしまう可能性があることなどの問題点も明らかになった. 一方、平野部では、沿岸に建設された長距離にわたる海岸堤防が甚大な被害を受け、さらに、海岸堤防を越流した津波が海岸堤防の背後に広がる海岸林にも甚大な被害を与えた. これまで沿岸における減災機能を担っていた海岸堤防と海岸林の両方を失った平野部においては、今回の津波に対して海岸堤防や海岸林が果たした役割や被災したメカニズムを解明するとともに、これらの機能回復に向けた道筋を示す必要があると考えられる.

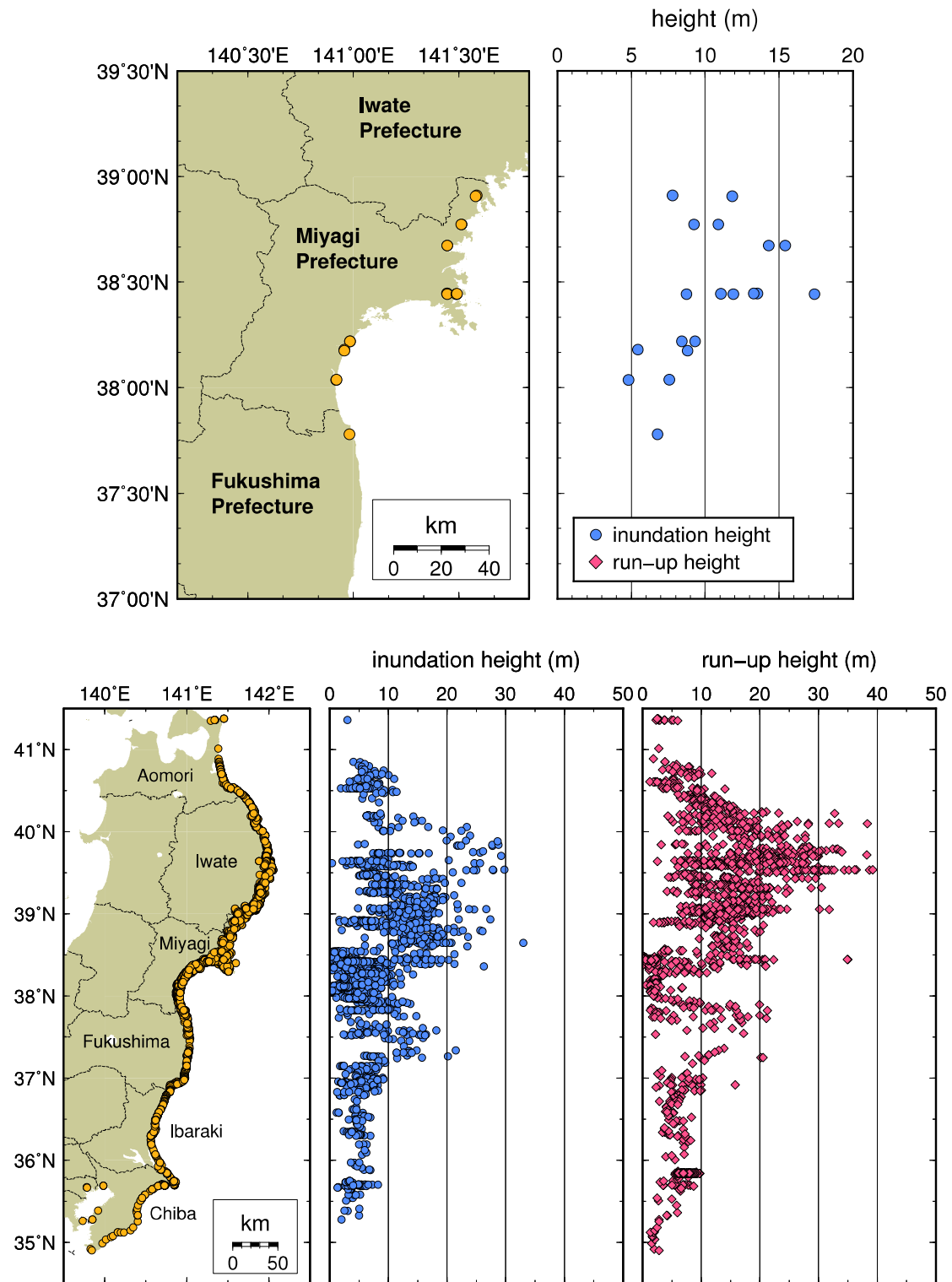


図- 2.10 2011年東北地方太平洋沖地震津波における津波痕跡高分布（上：筆者らの計測結果，下：全体の計測結果）

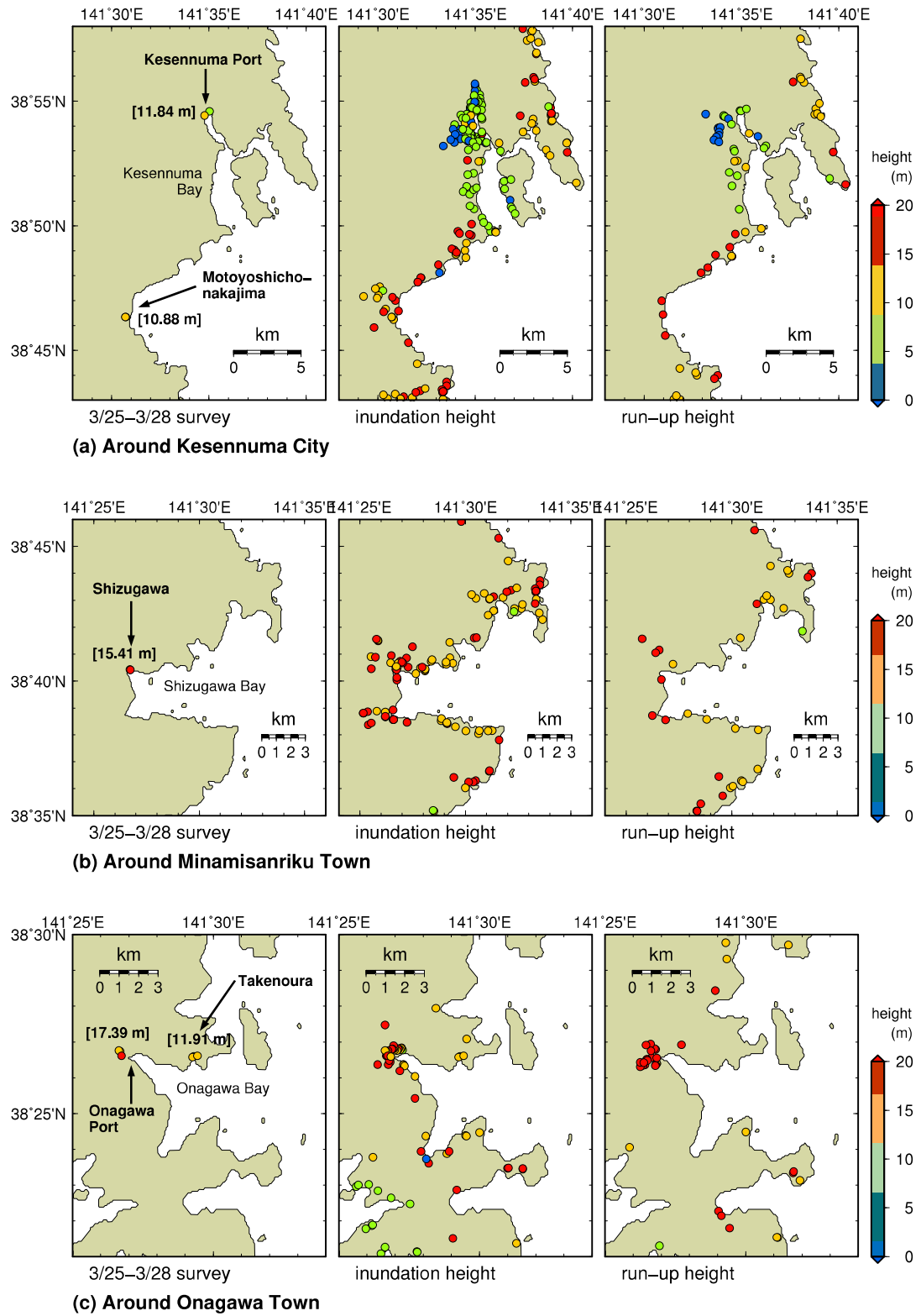
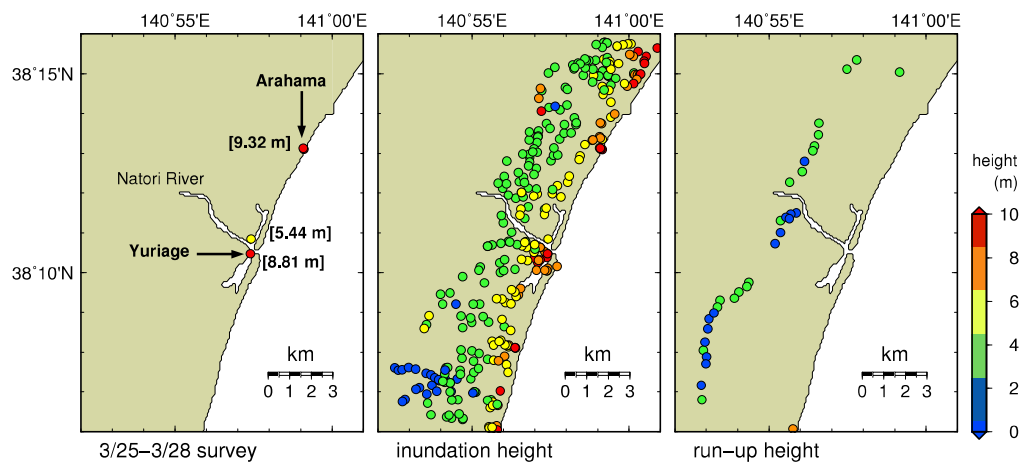
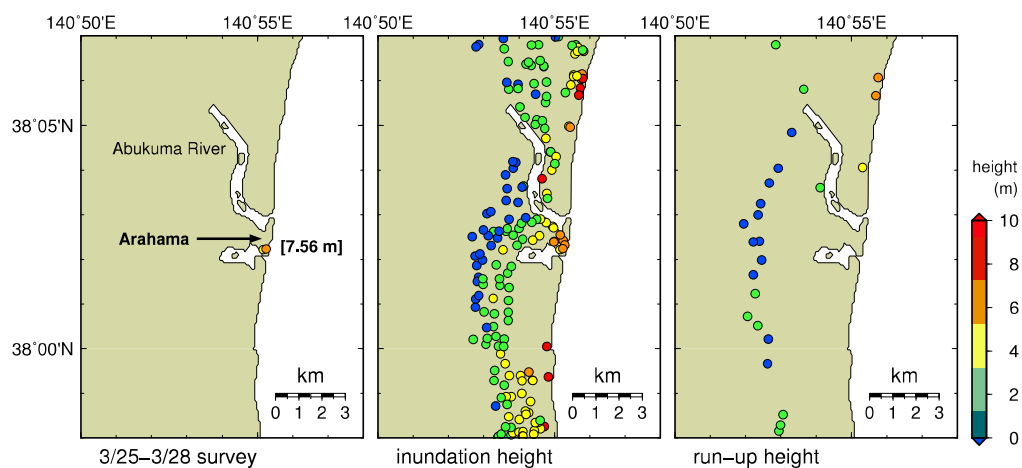


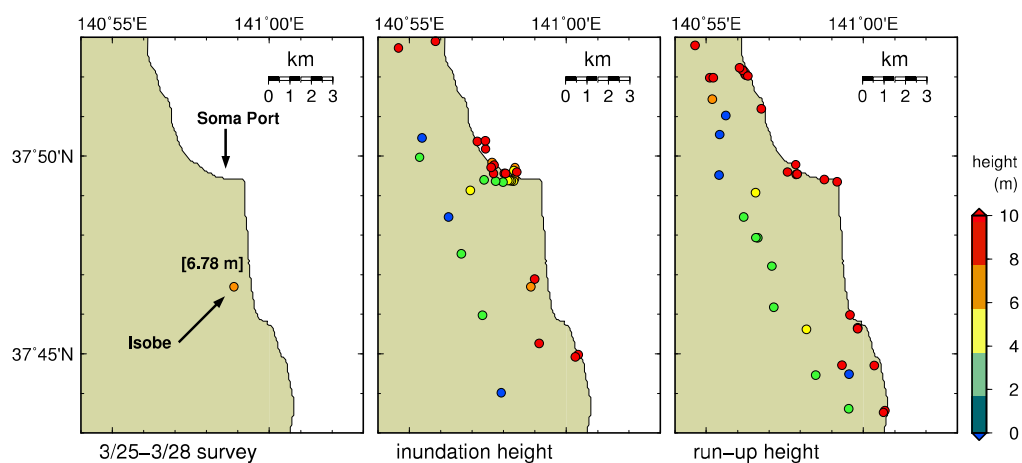
図- 2.11 2011 年東北津波におけるリアス式海岸部の津波痕跡高分布



(a) Around Wakabayashi, Sendai City and Natori City



(b) Around Watari Town



(c) Around Soma City (Note that some points found in the sea area are located on wharfs of Soma Port)

図- 2.12 2011 年東北津波における平野部の津波痕跡高分布

2.1.5 2012年ハリケーンサンディ高潮

2012年10月22日にカリブ海で発生したハリケーンサンディ (Sandy) は、ジャマイカやキューバを横断し、大西洋を北上した。大西洋上ではしばらく北東方向へ進んでいたが、10月28日頃から北西方向へと進路を変え、10月29日20時頃 (アメリカ東部夏時間, UTC-4), 中心気圧 946hPa と強い勢力を保ったままニュージャージー州に上陸した。ニューヨークには2011年にハリケーンアイリーン (Irene) も襲来しているが、経路 (Unisys Weather) を比較するとサンディの方がニューヨーク湾内で高潮が発生しやすくなっていることがわかる (図-2.13)。

サンディの接近に伴い、10月29日から30日にかけて、ニューヨーク州やニュージャージー州の沿岸部において高潮災害が発生した。ニューヨーク州マンハッタン地区では、変電所の浸水による停電や地下鉄を含む地下空間の浸水などの被害が生じた。11月2日時点でニューヨーク市内の約46万人が停電の影響を受けており、その約半数がマンハッタン地区の住民であった。地下鉄は11月3日までに大部分が運行を再開したものの、一部路線ではその後も運休を続けている。ニューヨーク市長による浸水する可能性の高い地域の住民への強制避難の措置により、大規模な人的被害の発生は免れたが、都市機能には大きな被害が生じた結果となった。

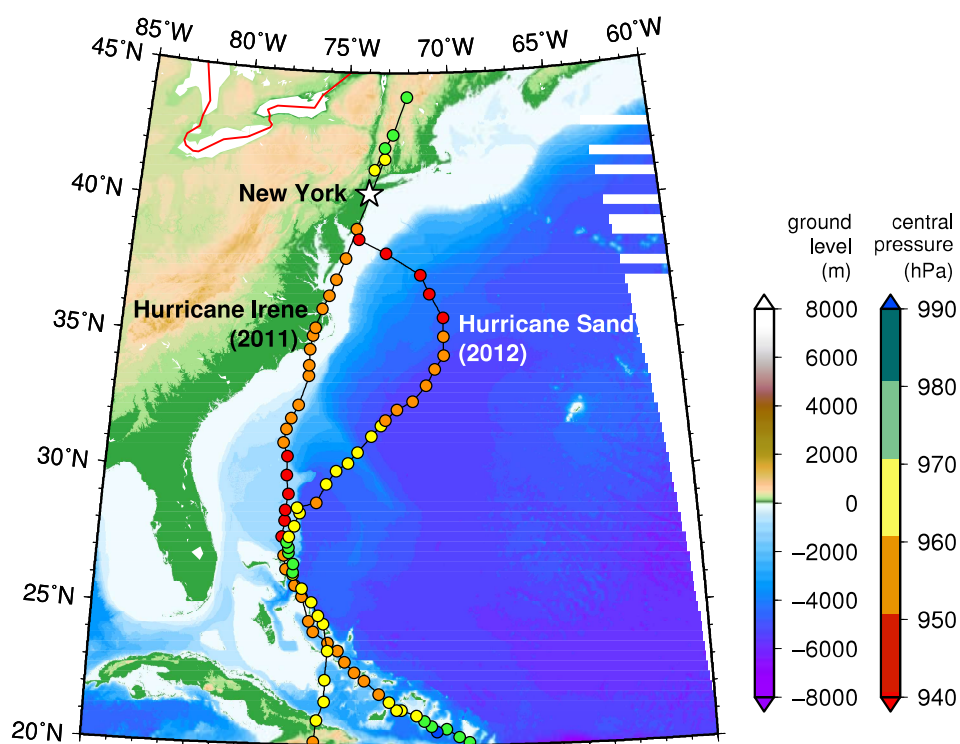


図- 2.13 ハリケーンサンディ (2012年) とアイリーン (2011年) の経路

現地調査は、災害発生から約10日後の11月9日と12日にかけて実施した（三上ら，2013）。調査地域は、マンハッタン地区南部（ロウワーマンハッタン）、マンハッタン地区南東部（イーストリバー沿岸）、マンハッタン地区北西部（ハドソン川沿岸）、スタテン島である。特に、臨海都市域での浸水高と浸水被害の特徴を把握するために、マンハッタン地区南部の三つの地域（Fulton St. 沿い、Wall St. 沿い、Battery Park 周辺の地下鉄駅）を重点的に調査した。以下に、現地調査で得られた高潮痕跡高と地域の特性が本高潮災害に与えた影響について述べる。

高潮痕跡高 マンハッタン地区で2.5～3mの浸水高、スタテン東南部で4m前後の浸水高を計測した。外洋側のLower New York BayからUpper New York Bayに進むにしたがって、浸水高は小さくなっていったと考えられる。Fulton St. やWall St. では、通りに沿って海岸線から200～300m内陸まで痕跡高の計測を行った（図-2.14）。全10地点（Fulton St. : 7地点、Wall St. : 3地点）の浸水高の値に大きな違いはなく、道路沿いの建物の壁面や窓ガラスに大きな損傷が見られなかったことから、大きな運動量をもった高潮が襲来したのではなく、徐々に水位が上がり、一定の標高以下の地域が浸水したと考えられる。

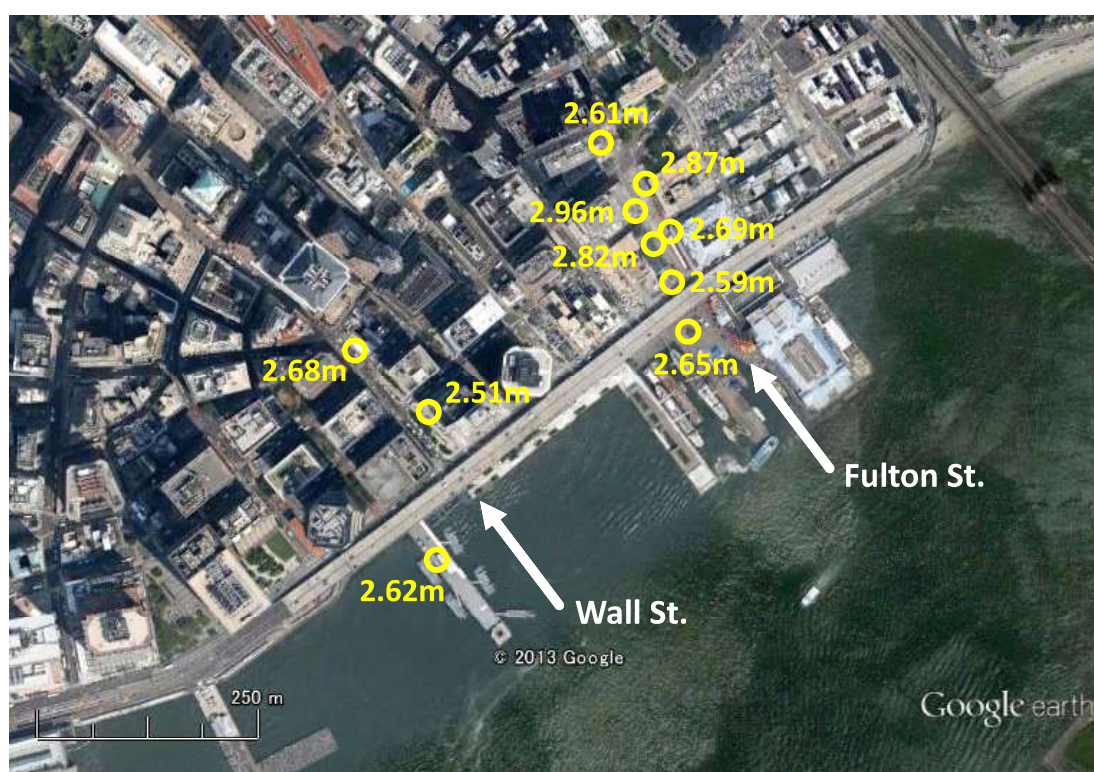


図- 2.14 マンハッタン地区南部の浸水高分布（Google Earth に加筆）

地域の特性が与えた影響 ニューヨークにおける現地調査で得られた特筆すべき知見として、地下空間における浸水被害と過去の経験に基づく備えの2点について以下に述べる。

1点目は、地下空間における浸水被害についてである。マンハッタン地区南部では、南端部に位置する Battery Park から Fulton St. と海岸線の交点に位置する South Street Seaport までの1kmほどを海岸線に沿って調査したが、特に目立った防災構造物は見られず、周辺の地下鉄駅においても浸水を防ぐような対策は見られなかった。そのため、地下鉄をはじめとした地下空間が浸水し、地下からの排水作業を行っている様子がみられた。ニューヨークあるいは日本の三大湾（東京湾、伊勢湾、大阪湾）に面している臨海都市域では、地下空間が高度に発達しており、地下空間の浸水をどう防ぐか、浸水した際にどのように早期復旧を図るかといった点が重要であると考えられる。

2点目は、過去の経験に基づく備えについてである。ニューヨーク市では、Zone A と呼ばれる浸水可能性の高い標高の低い地域の約37万5千人の住民に対して、サンディ上陸前日に強制避難措置と地下鉄やバスなどの公共交通機関の運行休止措置を実施した。ニューヨーク市では、2011年にアイリーンが襲来した際にもこれらの措置を行っており、このことが市長などからの住民への呼びかけの際にも再三述べられていた。アイリーンの際の経験により、行政や住民の間でハリケーン襲来に際しての具体的なイメージが共有されていたため、大規模な措置に当たっても混乱は比較的少なかったと考えられる。また、地下鉄の復旧に際してもアイリーンでの経験を活かして、ハリケーン襲来前に排水作業への準備や浸水可能性のある区域からの車両の移動等を行っており、浸水被害を受けた地下鉄の早期復旧を可能にした。

2.2 地域の特性を踏まえた沿岸災害の理解

前節での5つの事例からわかるように、ひとくちに沿岸災害といってもその災害の特徴は、それぞれの地域の特性を受けて地域ごとに異なり、それに伴って有効な対策も異なる。では、異なる特性をもつ他の地域で発生した沿岸災害から学び、将来の災害に備えるには、どのような考え方があり得るだろうか。本節では、前節で述べた具体的な事例を参照しながら、地域の特性を踏まえて沿岸災害を理解する方法について考察する。

他の地域から沿岸災害について学ぼうとする際には、まず、その地域の特性を理解する必要がある。表-2.2に、沿岸災害に影響を与える地域の特性の例を物理的、社会的、時間的な条件の3つに分類したものを示す。物理的な条件の具体例としては、水深の分布や河川の存在などの地理的条件、海岸保全施設や避難路などのハード対策、船舶や流木などの漂流物の有無などを挙げることができる。社会的な条件の具体例としては、過去の被災経験の有無、防災に関する住民の教育水準、警報システムの有無やその発信内容などを挙げ

表-2.2 沿岸災害に影響を与える地域の特性の例

物理的な条件	<ul style="list-style-type: none"> ・ 地理的条件（水深，島，河川，水路，砂丘，海岸林，湾形，サンゴ礁） ・ 居住地の状態（居住地域と高台との距離，住宅の強度，人口密度） ・ 想定される地震（規模，波源からの距離，地震発生サイクル） ・ 既存のハード対策（海岸堤防や防波堤などの海岸保全施設，シェルター，避難路） ・ 漂流物の有無（船，コンテナ，樹木）
社会的な条件	<ul style="list-style-type: none"> ・ 過去の経験（被災経験の有無とその伝承） ・ 教育水準（一般的な教育水準，防災に関する教育水準） ・ 警報システム（システムの有無，発信内容） ・ 集落内部での結び付き（住民の日常での付き合い，集落での意思決定プロセス） ・ 居住者以外の存在（土地と関係の薄い観光客や労働者の有無） ・ 沿岸域での産業への依存度（漁業，工場） ・ インフラの整備度合い
時間的な条件	<ul style="list-style-type: none"> ・ 時間帯（朝方，昼間，夜間） ・ 天候（雨，雪） ・ 季節（春夏秋冬，乾季雨季の存在）

ることができる。時間的な条件は、上記の地域のもつ固有の特性とは少し意味合いが異なるが、それぞれの災害が発生した際の時間帯や天候、季節などはときに災害に影響を与えることがあるのでここに加えた。異なる地域間で沿岸災害について比較する際、まったく同じ条件をもつ地域を見つけることはできないが、地域のある特性に着目すれば、同じ特性をもつ地域を見つけることができる可能性は大いにある。その同じ特性が沿岸災害に与えた影響を知ることが、他の地域から学ぶ際のひとつの糸口になる。

次に、表-2.2に挙げたような地域の特性が、沿岸災害のどの側面に影響を与え得るかという観点から整理したものを図-2.15に示す。沿岸災害における被害は、ある地域に対して、地震や台風（ハリケーン，サイクロン）により引き起こされた津波や高潮が外力として作用したときに発生する。沿岸災害を理解するうえでは、まず、これらの外力としての津波や高潮について理解することが必要である。一方、被害を受ける地域の方に目を向けてみると、この被害に対して、どの程度の軽減する能力を有しているか、あるいは、どの程度の回復する能力を有しているかを理解する必要があると考えられる。地域の特性はこれらの沿岸災害の側面のいずれかに影響を与えており、これらのうちどの側面に影響を与えるかを知ることが次のステップとなる。それぞれの例としては、チリにおいて大陸棚の存在が津波の伝播に影響を与えたこと（災害が引き起こす外力への影響，前節2.1.2参照），メンタワイ諸島において高地へのアクセスしやすさが被害程度に影響を与えたこと（被害を軽減する能力への影響，前節2.1.3参照），サモア諸島において伝統的な社会構造が迅速な高地移転の意思決定につながったこと（被害から回復する能力への影響，前節2.1.1参

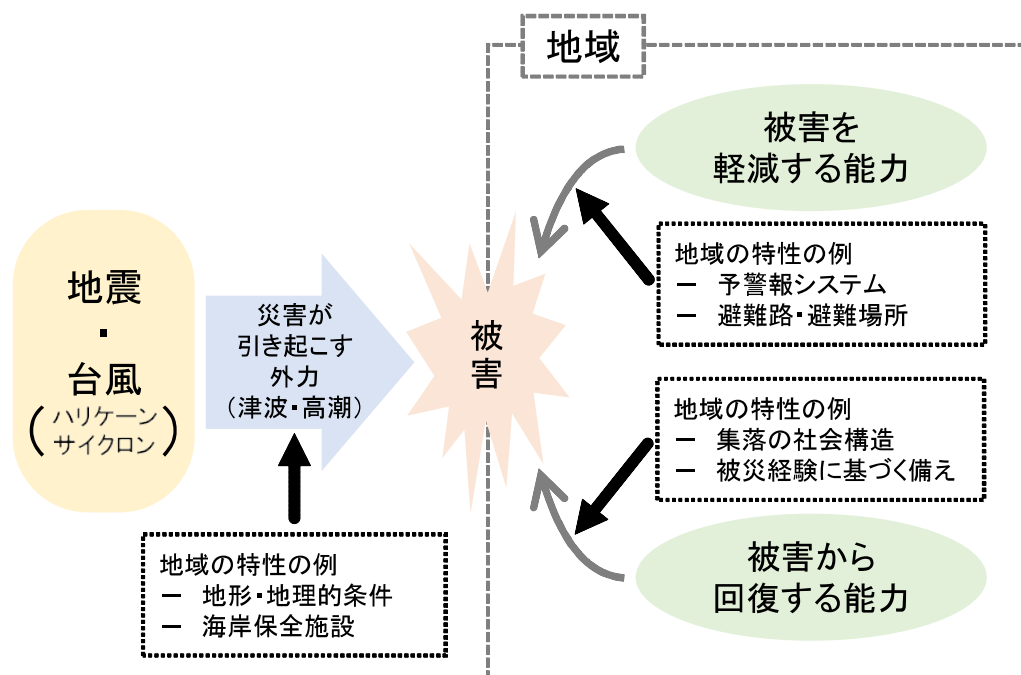


図- 2.15 地域の特性と沿岸災害

照)などが挙げられる。

さらに、減災策の観点からそれぞれの地域をみると、その特徴も異なることがわかる。沿岸災害による影響を小さくするためには、災害が引き起こす外力を変化させる、あるいは、地域の有する被害を軽減する能力や回復する能力を高めるという方策が考えられる。これらの方策のうちどれに重きを置くかは、地域によって異なる。例えば、高潮対策について東京湾とニューヨークのマンハッタン地区を比較すると、東京湾沿岸では防潮堤や水門を設置し、高潮という外力の低減を図っているのに対し、マンハッタン地区では、ハード対策は施さず、危険地域から住民を避難させるという方策を採っており（前節 2.1.5 参照）、外力に変化を加えるのではなく、被害を軽減する能力を高めることに力を入れていることがわかる。

以上に説明してきた沿岸災害を理解する際の視点を整理すると、次のようになる。

- (a) 沿岸災害に影響を与える地域の特性（物理的，社会的，時間的）を知る
- (b) 地域の特性が沿岸災害のどの側面（災害が引き起こす外力，被害を軽減する能力，被害から回復する能力）にどのような影響を与えるのかを理解する
- (c) 地域で沿岸災害の減災策としてどの方策（外力を変化させる，被害を軽減する能力を向上させる，被害から回復する能力を向上させる）に重きを置いているかを知る

これらの視点をを用いると、それぞれの地域の沿岸災害の特徴を他の地域と比較しやすいかたちで把握することができる。

本節で示した視点に基づいてそれぞれの沿岸災害で得られた知見を整理し、情報として広く共有することが、他の地域で発生した沿岸災害から学び、将来の災害に備えるひとつのあり方になると考えられる。今後も世界各地で発生するであろう沿岸災害について、現地調査を続けて知見を蓄積し、さまざまな地域が互いに学び合うことで、沿岸災害に対してよりよい備えをしていくことが望まれる。

2.3 本章のまとめ

本章では、2009年以降に国内外で発生した5つの沿岸災害（2009年サモア諸島沖地震津波、2010年チリ沖地震津波、2010年メントワイ諸島沖地震津波、2011年東北地方太平洋沖地震津波、2012年ハリケーンサンディ高潮）での事例に基づいて、沿岸災害のもつさまざまな側面を抽出し、それらを地域の特性を踏まえて理解する方法について考察した。

まず、それぞれの沿岸災害に対して筆者が実施した現地調査の結果を示した。具体的には、津波痕跡高の分布と地域の特性が沿岸災害に与えた影響について述べた。大陸棚や島の配置、島を取り囲むサンゴ礁リーフや河川などの地形および地理的な地域の特性や、防災教育の有無や過去の被災経験などの社会的な地域の特性が沿岸防災に影響したことを実例をもって示した。

次に、現地調査で得られた具体的な事例を参照しながら、地域の特性を踏まえて沿岸災害を理解する方法について論じた。沿岸災害に影響を与える地域の特性としては、物理的な条件、社会的な条件、時間的な条件があり、それらの特性が沿岸災害のどの側面（災害が引き起こす外力、被害を軽減する能力、被害から回復する能力）に影響を与えるのかを理解することが重要であることを示した。

第3章 津波と海岸堤防に関する既往研究

3.1 沿岸災害対策における海岸堤防の位置付けの変遷

2012年現在、日本の沿岸に設置されている堤防の総延長は2,835kmである（国土交通省水管理・国土保全局海岸室，2012）。図-3.1に示した日本の沿岸に設置されている堤防と護岸の総延長の変遷をみると、堤防の総延長は1960年代から1970年代までは増加傾向にあったが、その後は現在に至るまで3,000km弱でほぼ横ばいに推移していることがわかる。このような変遷の背景には、その間に発生した沿岸災害による被害と沿岸災害対策における海岸堤防の位置付けの変化があったと考えられる。そこで本節では、日本における主要な沿岸災害とその対策について年表を作成し、沿岸災害対策における海岸堤防の位置付けの変遷について具体的に検証していく。

日本の歴史災害をまとめた渡辺（1998）と北原ら（2012）に加えて、沿岸災害対策の変遷を論じた小池（2002）、津波対策の変遷を論じた首藤（2000；2006）、気象庁の歴史をまとめたWebページ（<http://www.jma.go.jp/jma/kishou/intro/gyomu/index2.html>）を参考に、日本における主要な沿岸災害とその対策について整理した年表を表-3.1に示す。

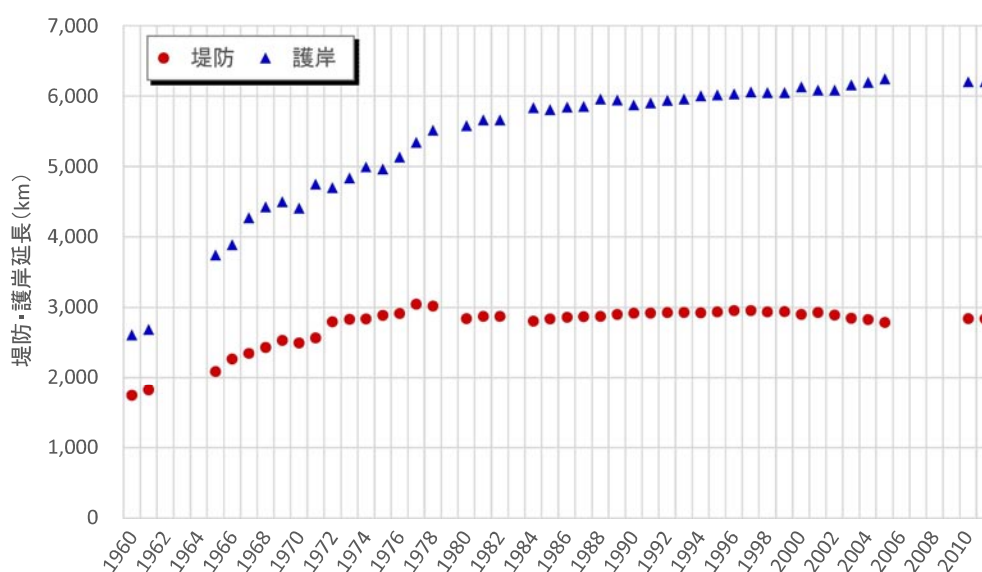


図- 3.1 日本における堤防と護岸の総延長の変遷（各年度の海岸統計を基に作成）

表-3.1 1933年昭和三陸地震津波以降の主な沿岸災害と対策の動き（次頁に続く）

年（年号）	主な沿岸災害	主な対策の動き	津波対策の特徴	
1933 (S08)	昭和三陸地震津波	「津波災害予防に関する注意書」	第1期： 過去の経験や実績に基づいた地域ごとの対策 （高地移転や海岸堤防の建設等）を実施	
1934 (S09)	室戸台風			
1935 (S10)				
1936 (S11)				
1937 (S12)				
1938 (S13)				
1939 (S14)				
1940 (S15)	神威岬津波	三陸沿岸に津波警報組織発足		
1941 (S16)				
1942 (S17)	周防灘台風			
1943 (S18)				
1944 (S19)	東南海地震津波			
1945 (S20)				
1946 (S21)	南海地震津波			
1947 (S22)				
1948 (S23)				
1949 (S24)	キティ台風			
1950 (S25)	ジェーン台風			
1951 (S26)	ルース台風			
1952 (S27)	1952年十勝沖地震津波	気象庁で津波警報業務開始		
1953 (S28)	昭和28年台風13号			
1954 (S29)		海岸工学研究発表会（第1回海岸工学講演会）を開催		
1955 (S30)				
1956 (S31)		海岸法制定		
1957 (S32)		「海岸保全施設設計便覧」		
1958 (S33)		海岸保全施設築造基準を制定		
1959 (S34)	伊勢湾台風			
1960 (S35)	チリ地震津波	「海岸保全施設築造基準解説」		第2期： 1960年チリ地震津波を契機とした防災構造物と津波予報の充実
1961 (S36)	第2室戸台風			
1962 (S37)				
1963 (S38)	エトロフ島沖地震津波			
1964 (S39)	新潟地震			
1965 (S40)				
1966 (S41)				
1967 (S42)				
1968 (S43)	1968年十勝沖地震津波			
1969 (S44)		「海岸保全施設設計便覧 [改訂版]」 / 海岸保全施設築造基準を改訂		
1970 (S45)				
1971 (S46)				
1972 (S47)				
1973 (S48)		「海岸保全施設築造基準解説」		

年(年号)	主な沿岸災害	主な対策の動き	津波対策の特徴
1974 (S49)	日本海中部地震	東海地震の危険性に関する議論	
1975 (S50)			
1976 (S51)			
1977 (S52)			
1978 (S53)			
1979 (S54)			
1980 (S55)			
1981 (S56)			
1982 (S57)			
1983 (S58)			
1984 (S59)			
1985 (S60)			
1986 (S61)			
1987 (S62)			
1988 (S63)	北海道南西沖地震 北海道東方沖地震	海岸保全施設築造基準を改訂/「海岸保全施設築造基準解説」	
1989 (H01)			
1990 (H02)			
1991 (H03)			
1992 (H04)			
1993 (H05)			
1994 (H06)			
1995 (H07)			
1996 (H08)			
1997 (H09)	十勝沖地震 平成16年台風23号 東北地方太平洋沖地震津波	「地域防災計画における津波防災対策強化の手引き」	第3期： 防災構造物，まちづくり，防災体制を組み合わせた対策の実施
1998 (H10)		海岸法の大幅改正/津波予報区の細分化と新しい津波予報の開始 「海岸施設設計便覧 [2000年版]」	
1999 (H11)			
2000 (H12)			
2001 (H13)			
2002 (H14)			
2003 (H15)			
2004 (H16)			
2005 (H17)			
2006 (H18)			
2007 (H19)			
2008 (H20)			
2009 (H21)			
2010 (H22)			
2011 (H23)			
		「海岸保全施設の技術上の基準・同解説」	

まず、海岸堤防の整備の契機となった沿岸災害についてみていく。表-3.1をみると、昭和20年代に台風災害が頻発していることがわかる。日本では、これらの台風災害を契機に海岸工学という研究分野が徐々に発展していった。特に、昭和28年の台風13号が与えた影響は大きく、これを契機に海岸堤防については三面張りが必要という原則がたてられた(小池, 2002)。その後、1959年の伊勢湾台風と1960年のチリ地震津波において、越波や越流による海岸堤防の被害が生じ、海岸堤防の三面張りの必要性が実例をもって確認されることとなった。図-3.2に、伊勢湾周辺における海岸堤防断面の変遷(豊島, 1969)を示すが、昭和28年の台風13号を機にそれまでの簡易な構造から三面張りの強固な構造になっていることがわかる。これ以降、1970年代までかけて海岸堤防の整備が進んでいくが、この間に大きな沿岸災害が発生することはなく、津波や高潮に対する海岸堤防の効果あるいは限界を議論する材料は得られなかった。

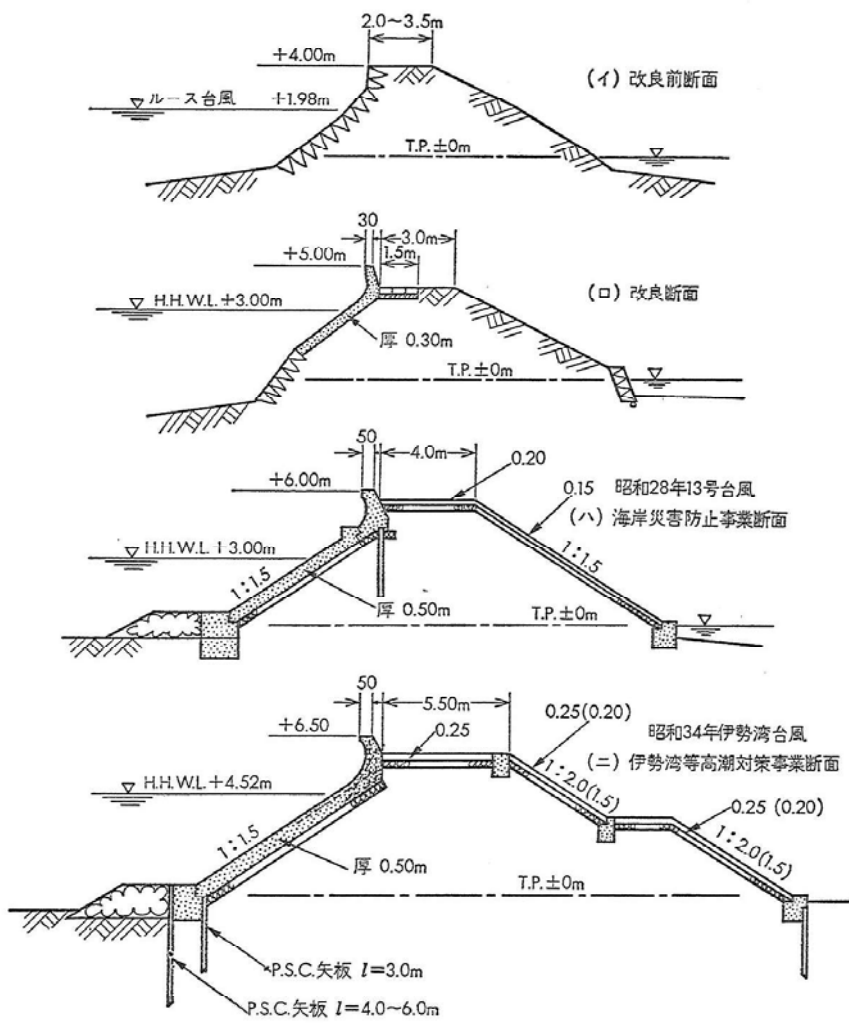


図-3.2 伊勢湾周辺における海岸堤防断面の変遷(豊島, 1969)

次に、津波対策の中での海岸堤防を含めた防災構造物の位置付けの変遷についてみていく。首藤（2006）は、日本における津波対策はその特徴にしたがって三期に分類できるとしている。第一期は、1960年チリ地震津波の発生以前であり、この時期においては過去の経験や実績に基づいて地域ごとに津波対策が行われていた。第二期は、1960年チリ地震津波からの約40年間であり、この時期に発展した津波の数値計算技術や警報システムが津波対策に用いられるようになり、防災構造物で浸水を防ぐという考え方が採用されていた。第三期は、1997年以降であり、「地域防災計画における津波防災対策強化の手引き」に代表される総合的な津波対策が目指されるようになり、防災構造物に加えて、津波に強いまちづくりと防災体制といったソフト面の充実が叫ばれるようになった。

海岸堤防の位置付けの変遷も上述の津波対策の三期の区分とともに考えることができる。第一期では、過去に大きな津波被害を受けたいくつかの地域で海岸堤防を設置した事例がみられる。有名なものとしては広村（現和歌山県有田郡広川町）の事例が挙げられる。広村では、1854年（安政元年）の安政南海地震津波の被害を受けて、村の有力者である濱口梧陵が高さ4.5mの堤防の築造を計画し、私財を投じてこれを完成させた（杉村、2005）。ただし、広村の事例のように海岸堤防を設置することができるのは、指導者の存在、経済的な背景、沿岸の土地利用などの条件が整った地域に限られていたと考えられる。第二期では、海岸工学の研究面および行政面での充実を背景に、海岸堤防が津波対策の主たるものとして位置づけられることとなった。昭和20年代に頻発した台風や1960年チリ地震津波で蓄積された経験に基づき、海岸堤防が各地で整備されるようになり、三陸地方に限れば、1968年十勝沖地震津波で海岸堤防が津波による浸水を防いだことから海岸堤防の有効性が実例をもって認識されるようになった。しかし、その後、東海地震の危険性の指摘や1993年北海道南西沖地震津波での被害を受けて、「津波常襲地域総合防災対策指針（案）」（建設省河川局・水産庁、1983）や「地域防災計画における津波防災対策強化の手引き」（国土庁ほか、1997）を作成する議論の中で、海岸堤防の高さを越える津波を考慮する必要性が認識されるようになった。その結果、第三期では、海岸堤防を越えるような津波を想定し、防災構造物、まちづくり、防災体制の三つの組み合わせで津波対策をするという考え方が浸透していった。

3.2 過去の津波による海岸堤防の被災要因に関する認識の変遷

本節では、過去の津波による海岸堤防の被災事例を具体的にみていく。前節と同様に、1933年昭和三陸地震津波以降の津波災害を対象とし、海岸堤防の被災要因について考察している主な文献を以下に引用しながら、その論点を抽出していく。これらの文献のうち、1933年昭和三陸地震津波から1960年チリ地震津波までの文献に関しては、首藤（1999）

が既にまとめているのでこれを参考とし、それ以外の文献も参照したうえで主要なものを取り上げた。本節の最後では、取り上げた文献に基づき、津波による海岸堤防の被災要因に関する認識の変遷について整理する。

3.2.1 過去の津波による海岸堤防の被災調査

表-3.1に記載した津波災害のうち、1933年昭和三陸地震津波、1944年東南海地震津波、1946年南海地震津波、1960年チリ地震津波、1968年十勝沖地震津波、1983年日本海中部沖地震津波、1993年北海道南西沖地震津波の6つについて年代順に取り上げる。

(1) 1933年昭和三陸地震津波

1933年昭和三陸地震津波では、三陸沿岸の各地で海岸堤防の被害が生じた。石川(1933)は三陸沿岸での被害調査結果を11点にまとめており、その中のひとつで海岸堤防の被災要因について以下のように述べている。

(4) 灣奥海岸際に施設してある防波堤、堤防の抵抗力は今回の津浪襲來に際し現在の程度では眞に鎧袖一觸の感がある、(例へば或るものは、堤防の基礎を二米迄深く掘浚されしもある)

而して是等築造物の石材等は陸地の方向へ押流されて居る、是れを見れば皆押し寄せる津浪によつて破壊されしを知るものである。

然れども海際を距て、陸上に築れたる弱き石垣の類が潮の流れを防ぐに案外多大の効果をなしてゐる。其適例各地に多い。

上記からは、海岸堤防が押し波によって被災したと考察していることがわかる。さらに、松尾(1933)、Matsuo(1934)は被災要因についてより詳細に言及している。両文献ともほぼ同様の内容であるので、ここでは松尾(1933)が岩手県気仙郡吉浜村(現岩手県大船渡市三陸町吉浜)の海岸堤防の被災要因について検討した部分を引用する。

岩手縣氣仙郡吉濱村は明治29年の津浪の被害が甚大であつた爲に海岸に延長約420mの防浪堤を築き將來の津浪に備へた。その断面は第十二圖に示す如く海に面した部分のみ空積間知を施した土堤であつて、高さは地盤に高低ある爲一端に於て5.45m他端に於て1.8mである。底部には此の附近の海岸に多くある徑約15cmの玉石を多く使用し、目潰しに粘土を含んだ砂を用ひた。この防浪堤は今回の津浪により流出したが(寫眞第四十五参照)その跡に就て見るに、防浪堤底面に於ける土砂の性質は $\tan\varphi = 40^\circ$ $s = 2.0t/m^2$ 程度と推定される。茲に φ は底面に於ける土砂の内部摩擦角、 s は粘着力と

する。今堤の最高部分に就て計算すれば底面に於ける剪断抵抗力は $w \tan 40^\circ + s \times 9.8 = 54.7 \times 0.84 + 2 \times 9.8 = 65.5t$ 茲に w は堤の単位長の重量とする。

之に對してその高さは 5.45m であるから単位鉛直面に對し $65.5/5.45 = 12.0t/m^2$

堤の破壊の原因がこの水平壓力であるとすればその壓力は之以上であつたと推定される。但し今回の津浪當時は寒さ甚だしく地表面が一部凍結してゐたと考へられるがその程度竝に凍結部分の強度が明らでない。試みに地表面より 30cm の間凍結しこの凍結部分が $150t/m^2$ の剪断抵抗力を有するとすれば津浪の壓力は次の値より大である筈である。

$$(150 \times 0.6 + 65.5)/54.5 = 28.5t/m^2$$

引用中の「寫眞第四十五」を圖-3.3 に示す。写真より堤防がすべて流失してしまつてゐることがわかる。ここで引用した兩者ともに、津波により作用する水平力によって海岸堤防が流失したと考察している。當時は、吉浜にあったような海側に石を空積みしたものや土堤などの現在に比べれば簡素な構造の海岸堤防が主であり（引用した松尾（1933）の「第十二圖」を圖-3.4 に示す）、高さも不十分であつたことから、越流した津波（押し波）が海岸堤防を容易に破壊したと考えられる。これらの被害を受けて、1933 年昭和三陸地震津波以降、三陸沿岸の各地で海岸堤防が津波を防ぐことを目的に設置されるようになった。昭和三陸地震津波後に建設された海岸堤防の断面の一例として、吉浜の断面図（岩手県土木課、1936）を圖-3.5 に示す。



寫眞第四十五 氣仙郡吉浜村。明治 29 年の津浪の被害甚大なりしに依り築造した防浪堤(断面底巾 9.8 m, 天端巾 2.7 m 高さ最大 5.5 m 海に面する側は 3 分勾配にて間知積の土堤)は今回の津浪で全部流失。寫眞は長さの方向に撮つたもので右方に一部基礎部分の残を見る。

圖- 3.3 昭和三陸地震津波における吉浜での海岸堤防被害（松尾，1933）

第十二圖

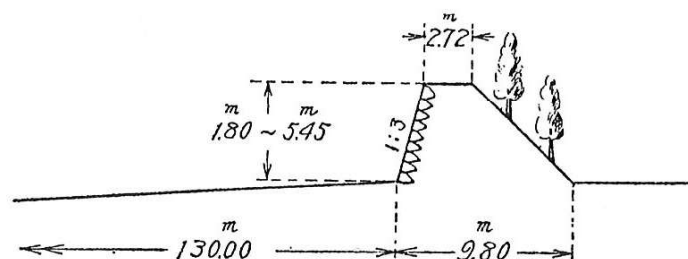


図-3.4 昭和三陸地震津波前の吉浜での海岸堤防断面（松尾，1933）

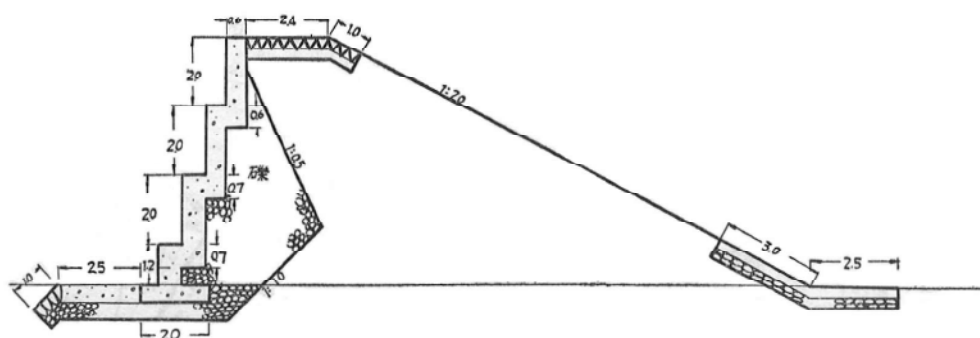


図-3.5 昭和三陸地震津波後の吉浜での海岸堤防断面（岩手県土木課，1936）

(2) 1944年東南海地震津波

1944年東南海地震津波は、戦時中に発生したものであり他の災害に比べて文献が少ない。ここでは、中央气象台がまとめた本津波の調査概要より、兵庫県から三重県までの沿岸を調査した神戸海洋气象台の酒井（1945）の論文を引用する。

河川の出口に當る海岸は此の點が水理工學乃至土木學的には最弱點らしく海岸石造り築堤の破壊は一般に其の點で初まつて居るらしい。尚、石造り或は混凝土舗装築堤でも浮流物の衝突が行はるれば案外脆く破損を蒙るものらしく、一度被損個所を生ずれば數回の潮の昇降で殆ど破壊し盡されるらしい模様を聞き又信ぜられた。

河口付近で海岸堤防の破壊が始まり、また、漂流物の衝突が海岸堤防の破壊に寄与したと考察している。東京大学地震研究所の表も和歌山県を中心に現地調査を行い、那智で津波が海岸堤防を越流し、破壊したことについて述べているが、海岸堤防の破壊要因に関する考察はみられない（表，1946）。

(3) 1946年南海地震津波

1946年南海地震津波も、1944年東南海地震津波と同様に文献が少ない。ここでは、農林省農業試験場の現地調査報告（四手井・渡邊，1948）の中から引用する。この報告の主たる関心は津波に対する防潮林の効果にあるが、図面が豊富で海岸堤防をはじめとした構造物の効果と被害に関する検討もなされている。この報告の中から構造物の被害をまとめた部分を引用する。

第13節 防潮工事の被害

防潮工事を海中の防波堤と陸上の護岸、土堤、石堤の二つに区分して考察すれば、前者は空積の石堤が多く、廣村及び由良村のものは、海中に突き出た先端の一部が破壊されて居た。白濱の靈泉橋も之に屬するものであろう。是等は純然たる津浪の破壊力によるもので、土地の人の言によると、引潮の時に破壊されたものと云ふ。事實靈泉橋は引潮の方向に倒れた残骸が見られた。後者には練積、空積の石垣及びコンクリートのものがあり、之には構造上津浪の力に抵抗し得ず破壊されたもの及び基礎地盤軟弱な爲轉倒したものが数えられる。

津浪には地震が先行するから、地震により工作物や基礎地盤が弛み、之に津浪が加はつて更に破壊されると見るのが實際であると思はれるが、此の二つを分けることは出来ないので、結果的に何れに起因したかは判明しない。何れにせよ、空積の石垣式で法面の急なもの、或は練積と見えても、表面のみモルタルを施したものは大部破壊して居り、特に引潮によると見られる場合が多い様であつた。空積でも法面のゆるやかなものには、被害が少ない様であつた。コンクリート製のもので破壊されたものには、

(1) 海水が裏面にまわり、裏面の工事が不完全なために崩れ落ちたもの。
(南廣村，切目村)

(2) 基礎の砂が浸水により洗ひ流され轉倒したもの（文里海岸）

(3) コンクリートの継目不完全で、引潮により上部のものが轉倒したもの
(由良村)

(4) 道路端の護岸壁で天端が路面より幾分高くなつて居る爲、引潮の壓力が此所にかかり、引き倒された様に轉倒、又は傾斜して、路面に迄破壊を及ぼして居るもの。（由良村の道路，串本海岸の道路）等が擧げられる。

富田村朝來歸の、高さ4米の大防潮壁は良く大浪を防いで後方の家屋を守つたが、練積とは云へ、上塗のモルタルが剥げ、積石が移動し、龜裂の入つた箇所が見られた。

津波による海岸堤防の被災要因について非常に網羅的に考察している。これまでに得られている海岸堤防の破壊要因について、大部分の知見を網羅しているといつてもよい。この

とき初めて、越流による洗掘や引き波による作用が海岸堤防の被災につながることに言及している。

(4) 1960年チリ地震津波

1933年昭和三陸津波を契機に東北地方沿岸のいくつかの地域では海岸堤防が設置されており、1960年チリ地震津波では、その効果が確認された地域もあれば、そうでない地域もあった。いずれにせよ、本節で挙げた津波災害の中では最も海岸堤防被害に関する事例が豊富であり、数多くの知見が得られている。文献の数も多数に上るので、ここでは多くの研究者あるいは実務家の目に触れ、後に影響を与えたであろう文献を中心にみていく。

まずは、土木学会誌に寄せられた岩崎・堀川（1960）の災害調査報告から、海岸堤防と防浪堤の被害に関する考察を引用する。

(3) 海岸堤防

三陸沿岸にある海岸堤防は、津波対策のための防潮堤を除くと、その前面が簡単な石積またはコンクリート壁で裏法はほとんど例外なく土羽でおおっている。写真-4は気仙沼湾内大川出口の海岸堤防の決壊を示す。図-8に示すようにここでの越流高は痕跡がなくてはっきりわからないが、その近くの痕跡より T.P. 2.72m と思われ、この天端高 T.P. 1.75m であるから、越流高は 2.35m となる。その背後の土地までの堤防高は 2.35m であるから、越流した水は堤内に一度貯められ、図示の水門をとおって排出されようとしたと思われる。しかしこの水門と土堤との間隙が一つの突破口になって破堤し、間知石が海側に約 50m 飛んでいた（それ以上は海に没してわからなかった）。堤防高が低いと、引水は全面越流して海側の堤脚を洗い、脆弱な土堤では寄せ水の際に越流の際に陸側の法肩を最初に崩し、冠水時間が長いとそのまま裏法の全面崩壊に導いている。これらは、冠水高、冠水時間、堤防高、堤背後地の排水方法、引き水の方向や流況等により、種々の様相をていするようであるので、今後の対策の立案に当たられる方は、現地の状況をよく判断して適切な計画を立てられることをお願いしたい。

(4) 防浪堤

津波を考慮した防浪堤にも今回は高さが低くて、越流されたものがあった。写真-5および図-9は大槌町にあるもので、天端高 T.P. 3.20m に対し、すぐ前面の家屋にある痕跡によれば、T.P. 3.70m、よって冠水高 0.50m であった。冠水高が低かったから、冠水時間も当然短かく、裏法の崩壊に至る過程はごくわずかであったであろう。すなわち、裏法の法崩れが起こった頃には越流の水位が低くなり、水は天端のコンクリートからすぐ直下に落下して写真に示すよ

うな洗掘を生じたものと思われる。このことはすぐ背後の家が破壊を免れており、また防浪堤の前面の小屋の蔭の部分の裏法は破壊されていないことから裏付けられると思われる。

次に、第7回海岸工学講演会公演集に掲載された佐々木（1960）の防浪堤の被害に関する考察を引用する。

昭和8年の津波後築造された堤防中大規模のものは田老、吉浜の防浪堤であり小規模のものが大槌、越喜来（護岸）であつた（図-10）。田老の堤防は津波後着手し戦時中工事を中止し、昭和29～32年に完成したものであるが、今回は堤防の位置まで津波が到達しなかつた。吉浜、越喜来の堤防においては今回の津波は堤脚より約1.3～1.5mの深さに達し一応背後への津波の浸入を止めたが、吉浜の堤防については昭和8年の津波高15mに対して天端高+7.6mであつて、昭和8年程度の津波を受けた場合、背後の遡上高が2波、3波目に対してどのようになるか疑問が残されている。これらの構造物は総て前面はコンクリートあるいは練積石垣で法面を防護されているが、背面は一様に空積であつた。大槌の堤防はこの点について極めて有意義な教訓を与えた。すなわち構造物の天端はT.P.+3.2m、津波高+3.7mで50cmだけ越流したのであるが背面は全延長にわたって洗掘されていたのであつて、背面の保護が極めて重要なことを示している。また昭和34年度より普代、津軽石において防浪堤を築造しているが、これらは総て、背面をコンクリート枠張工で保護している。普代では今回津波を受けていないが、津軽石では全計画730m中130mを築造していたに過ぎず、天端高+5.0m、津波高5.4m、瞬間的には約1.0mで越流したと推定されるが、水が裏に廻りウォータークッションになった点も考慮されるが、先端部の洗掘を除いて堤体は全く無傷であつた。

上記のいずれにおいても越流による裏法の被害を指摘しており、例として大槌町での被害を挙げている。Horikawa（1961）に掲載された大槌町の防浪堤の被害状況を図-3.6に示す（上に引用した岩崎・堀川（1960）の中の「写真-5」と同じ写真）。大槌町の防浪堤も前述の吉浜と同様に、1933年昭和三陸地震津波後に建設されたものであり、三面張りの構造であるが、図-3.6からわかるように全壊に至っている。この大槌町での被害は、越流により海岸堤防に被害が生じるということを大きく印象付けるものであったと考えられる。岩崎（1960）はさらに、越流の状況を図-3.7のように示し、限界流速が生じる図中の点Aが最も早く破壊されると指摘している。また、越流による裏法被害に加えて、引き波による堤防前面の洗掘も注目されている。図-3.8に、土木学会誌第45巻第6号（1960）の口絵に掲載された引き波の様子を示す。

最後に、あるべき海岸堤防の構造について指摘している田原（1960）の論文を引用する。

津波の場合は、津波が週期が非常に長いため、流れの性格をもっている
ので、ある程度の侵入を許すとすれば、完全に三面コンクリート巻きとしなけれ
ばならない。週期の短い台風波と違うので、溢流現象に近くなるから裏のり尻
には水叩等も考慮する必要がある。

津波が海岸堤防を越流する場合には、台風襲来時に生じる越波とは異なり、流れのように
捉える必要があることを指摘し、採るべき対策として三面張りから一步踏み込んで裏法尻
の水叩きの必要性についても言及しており、津波による海岸堤防の越流現象を正確に捉え
ていた提言の一つであるといえる。



Plate 4. Failure of the sea wall at Ozuchi shown
with a scoured ditch on the landward slope.
Houses remained unscathed. A counter-tsu-
nami grove is seen at upper right.

図- 3.6 1960年チリ地震津波時の大槌町での防浪堤被害 (Horikawa, 1961)

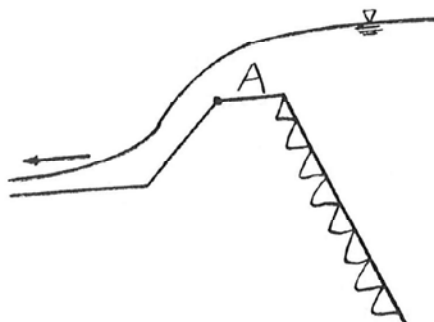


図- 3.7 岩崎 (1960) による海岸堤防を越流する津波の概略図

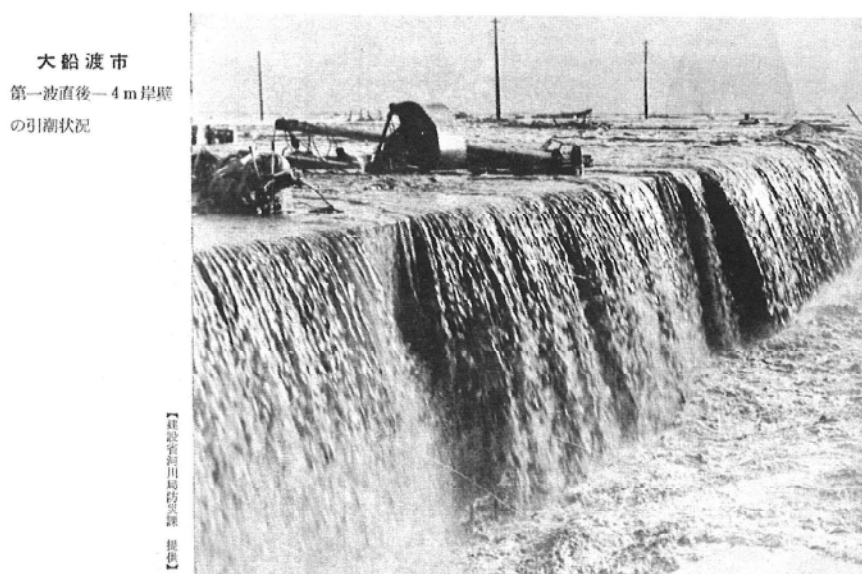


図- 3.8 1960年チリ地震津波時の大船渡市での岸壁の引き波（土木学会誌，1960）

(5) 1968年十勝沖地震津波

1968年十勝沖地震津波は、干潮時に発生したため津波による顕著な被害は発生しなかった。1960年チリ地震津波後に整備された海岸堤防を本津波が乗り越えなかったことで、結果として、海岸堤防が減災効果をもつという認識が広まることとなった。中村ら（1969）は、岩手県沿岸の海岸堤防を調査し、次のように述べている。

また沿岸に設けられている津波堤防は全般的にみて効果的であったとみる事ができるが、これらの津波堤防はチリ地震津波の潮位をもって天端高としているため、必ずしも各堤防ともその堤高が妥当とは考えられないであろう。なぜなら津波は地震そのものの特性は勿論であるが、震源地と湾の特性によって、著しくその現象が異なるためで、今回の津波がチリ地震津波と比較して一般に潮位の上昇高は小さかったにもかかわらず、宮古湾などではチリ地震津波潮位で決定した天端まで潮位が高まっており、しかもこれが干潮時であったため越波はみなかったが、もし津波が6～8時間前後して襲来していたならば、各地とも潮位はこれより約2mは高まり、場所によっては2m以上高くなったであろうことは容易に類推でき、宮古湾等では完全に越波したことになる。Table 5は各地の堤防の天端高と今回の津波潮位を比較して示してあるが、これを見てその状況がよくわかる。

したがって津波堤防の高さは、単に過去の津波潮位を画一的に全域に適用して天端高を決定することは妥当でなく、地震規模と震源地を想定して地域ごとの天端高を決定することが望ましいことになる。

表-3.2 十勝沖地震津波における堤防の天端高と津波高（中村ら，1969）

地区名	計画天端高 (T.P)	津波の最高潮位 (T.P)	摘要
野田	7.8	4.8	
金浜	5.3	4.5	
赤前	4.8	4.8	余裕なし
吉里吉里	3.8	3.0	
室浜	4.8	4.3	
箱崎	5.5	4.2	
片岸	3.2	4.0	越波
吉浜	7.15	2.3	
綾里	3.3	0.5	
長部	1.7	1.4	
小友ヶ裏	6.15	1.97	
三日市	6.25	2.1	

引用文中の「Table 5」を表-3.2に示す。表からわかるように、ほとんどの地域で津波は海岸堤防を乗り越えなかったものの、海岸堤防を乗り越える可能性はあり、堤高については検討の余地があると指摘している点に注目すべきであろう。

(6) 1983年日本海中部地震津波

1983年日本海中部地震津波では、河川堤防や干拓堤防の被害实例は見られるが、海岸堤防の被災实例は見当たらない。本災害による海岸保全施設の被害については、消波堤、離岸堤、護岸の被害が顕著であった。ここでは、護岸の被害について論じている2つの文献を引用する。徳田（1984）は、護岸の被災要因について次のように述べている。

海岸の被害個所と被災概略を表5.5.5に示す。これらの被害の特徴は津波を原因とするものが顕著に認められることであって、離岸堤の被害、消波ブロックの散乱、海岸護岸の倒壊などである。写真5.5.11は津波によって散乱した異形ブロックの状況で、4t以上のブロックが100m以上も移動した。写真5.5.12は津波の強い戻り流れによる海岸護岸の倒壊状況である。

（中略）

図5.5.4は、岩館町小入川地区における津波被災地点の概略である。この地区には図5.5.5のような断面の護岸が造られているが、津波の波力によって打継ぎ目部分から破断し、長さ5～10m、質量10～20tの塊状になって、20～25m

も後方へ移動した。打継目部分には所々に栗石がはめられていたが、それらが真中からせん断的に切られているのがいくつもみられた。

宇多（1985）は、14地点の護岸の被害を分析し、護岸の種類と被害要因について表（表-3.3）とともに次のようにまとめている。

重力式護岸の被災形態としては倒壊又は傾倒が多く、津波の戻り流れによる背後からの力が被災外力となったと推定される。階段式護岸の被災原因には地震動と津波力両者が関係している。すなわち堤体の亀裂や継目部で陥没が起きたあと、津波によって堤体土砂の吸い出しや洗掘が生じた例がある。ブロック積式護岸の被災では重力式護岸と同様に戻り流れによる護岸背後からの力が主因と考えられる。

表- 3.3 日本海中部地震津波における構造物の種別と被災形態（宇多，1985）

構造物の種類	被災形態	被災外力の推定	参照地点
重力式護岸	護岸倒壊 又は傾倒	引き波の戻り流れによる背後から後からの力	麩木漁港海岸 八森漁港海岸 浜間口海岸
階段式護岸	堤体亀裂 継目部分で陥没 基礎洗掘	地震動による堤体亀裂，継目部分での陥没力 津波による法面覆工の破壊 堤体土砂の吸い出し，洗掘	能代港海岸 琴浜海岸
ブロック積護岸	護岸倒壊	引き波の戻り流れによる背後から後からの力	小泊漁港

両者とも津波の戻り流れと構造物の継目部の脆弱性を被災要因として具体例とともに挙げている。宇多はさらに、津波の流れにより被覆工の破壊や堤体土砂の吸い出しが生じることに着目している。

(7) 1993年北海道南西沖地震津波

1993年北海道南西沖地震津波では、津波による海岸堤防の被害が奥尻島南部（青苗）や北海道南西部（太櫓）で報告されている（田中ら，1994）。首藤・松富（1994）は、本津波における防災構造物の被災の特筆点として5点を挙げ、そのうち以下に示す2点で海岸堤防について触れている。

①青苗5区の西側防潮堤（天端高4.5m）は、推定で4mを超える越流水深の津波に襲われたが、裏側の落差が1m程度で、裏側に被覆工が施されていたため、裏側が全く掘れず倒れなかった。

(中略)

③コンクリート構造物の被災原因に施工不良が目立った。コンクリートの打ち継ぎ目の処置が不良であったり、コンクリートの配合や打設が不良であったりした。

前述の日本海中部地震津波でも挙げられていた構造物の継目部の脆弱性を指摘するとともに、奥尻島南端部に位置する青苗での被災を免れた海岸堤防について触れている。

上記の引用で触れている青苗5区は、奥尻島南端部に突き出た砂州上の市街地であり、東南西の3方が海に囲まれている。この地区では、津波が西から襲来し、西側の海岸堤防を越えて市街地を進み、さらに東側の海岸堤防を越えて海へと流れ込んだことが報告されている。嶋本ら(1994)は、青苗5区での海岸堤防被害について次のように記述している。

青苗地区の防波堤・防潮堤は全体としてみると大きな破損は免れたが、南東端では防潮堤が約80mの幅にわたって倒壊した(図3のAB)。この部分の防潮堤は第三紀中新世(八雲期, 8~13Ma)の泥岩の上に設置されており、この泥岩は手でも壊れるほどの強度しかもっていない上に、泥岩と防潮堤の底部の間の固着も十分ではなかった。しかも、防潮堤を支えていたのは約5千年前の未固結な礫層であり、裏側から津波の直撃を受けて転倒してしまった。防潮堤が倒れて部分では深さ2m近くも礫層がえぐられており、津波の水流が集中したことが推察できる。多くの家屋もここから外洋に流出したに違いない。

東側の海岸堤防の一部が倒壊し、その理由として設置された地盤の強度不足を挙げている。首藤(1994)は、津波痕跡高をふまえながら青苗5区での詳細について次のように記述している。

青苗5区の西岸には日本海中部地震津波の後に高さ4.5mの海岸堤防が建設されていたが、津波はこれを乗り越えた。図-1から判る通り、西側の海崖上では津波は11m~10mの痕跡を残した。痕跡の得られた最南端では6.7mとなっているが、そのすぐ近くで10mであることから考え、青苗5区を襲った津波は7mから10mあったとするのが妥当であろう。結局、津波は防潮堤上を2.5m以上5m内外の厚さの水脈として越えたものと推定される。防潮水門は開いたままであったが、閉めたとしても、大差は無かったであろう。防潮堤そのものはほとんど無傷で残された。

青苗5区の東岸にあった旧堤は、10年前の津波の後嵩上げされて4.5mになっていたが、これは背後から乗り越えられた。越流した水が堤防前面の浜を叩き、洗掘が生じ、背後から押された堤防は前へ押し出された。この部分は図-2に囲んで示してある。この場所では地盤の洗掘が進み、堤内地は侵食された。防潮堤の生き残ったところは堤内地の地盤は侵食を受けなかった。

青苗5区東側の海岸堤防では、陸側から津波に乗り越えられたという点が特殊ではあるが、2011年東北津波で見られたような越流による海岸堤防背面での洗掘と同じことが指摘されている。

3.2.2 津波による海岸堤防の被災要因に関する認識

本節で取り上げた文献より、1933年昭和三陸地震津波から1993年北海道南西沖地震津波までの津波による海岸堤防の被災要因に関する認識の変遷は、1960年チリ地震津波を以て、以下のようにまとめることができる。

1933年昭和三陸地震津波、1944年東南海地震津波、1946年南海地震津波 過去の津波で大きな被害を受けた地域の一部で、石積や練積の簡易な構造の海岸堤防が作られていた。しかし、これらの海岸堤防は強度や高さの面で十分ではなく、津波はこれらを乗り越えて海岸堤防を破壊した。津波による海岸堤防の被災要因に関する知見は、それぞれの災害後の調査によりいくつか得られていたが、それらが後に伝わった形跡はなく、さらにそれを実際の海岸堤防に活かす技術的、経済的な裏付けはまだなかった。三陸地方の沿岸では、1933年昭和三陸地震津波の被害を受けて、いくつかの地域で津波を防ぐことを主たる目的とした海岸堤防が作られた。

1960年チリ地震津波 越流による裏法の洗掘、戻り流れによる前面の洗掘、不完全な打継目部による転倒被害など、津波による海岸堤防の被災要因はかなり洗い出され、被災状況の写真など多くの具体的な資料（図-3.6、図-3.8など）も得ることができた。越流時に海岸堤防周辺で生じる流れと海岸堤防被害に関する関係についても考察が行われた。昭和20年代に頻発した台風災害を契機に海岸工学という研究分野が発展してきたという技術的な背景に加えて、1960年チリ地震津波とその前年に生じた伊勢湾台風からの復旧に向けた経済的な裏付けもあったことから、全国的に津波や高潮への対策として三面張りの海岸堤防が作られるようになった。

1968年十勝沖地震津波、1983年日本海中部沖地震津波、1993年北海道南西沖地震津波 1960年チリ地震津波を契機として、三面張りの海岸堤防が作られるようになったが、これらが津波に対してどのように応答するのかを検証するような大きな津波が発生することはなかった。1968年十勝沖地震津波では、津波襲来時が干潮時であったこともあり、津波は海岸堤防を乗り越えず大きな被害が生じることはなかった。1983年日本海中部地震津波では、1960年チリ地震津波で指摘されたことを再度確認したにとどまった。1993年北海道南西沖地震津波では、奥尻島青苗で津波による海岸堤防被災に関して貴重な知見が得られたが、事例の数が限られており、その知見が日本全体に注意を喚起するには至らなかった。

3.3 津波による海岸堤防の被災に関する既往研究

津波による海岸堤防の被災に関する既往研究を概観すると、主に海岸堤防に作用する波力と戻り流れによる海岸堤防前面の洗掘のいずれかに注目していたことがわかる。以下にそれぞれの代表的な既往研究を挙げ、その論点を総括する。

海岸堤防に作用する波力については、次のような研究がなされてきた。Hamzah ら (2000) は、Navier-Stokes 方程式を直接解くダイレクトシミュレーションにより、段波状の津波が陸上に設置された直立の構造物に作用する波圧の特性を調べている。水谷・今村 (2002) は、段波状の津波が台形の構造物に作用するときの衝撃波圧の算定式を水理実験を基に提案している。加藤ら (2005) は、傾斜を有する海岸堤防の表面に作用する波圧の特性を調べるために、縮尺 1/10 程度の大規模なスケールで水理実験を行っている。富永ら (2007) は、Hamzah ら (2000) と同様に段波状の津波が陸上に設置された直立の構造物に作用する波圧の特性を水理実験により調べている。これらの一連の研究の背景には、砕波域にある防波堤においてしばしば問題となる衝撃波力を、海岸堤防においても評価しようとする考えがあると思われる。いずれの研究においても、孤立波が斜面上で段波状に変化し陸上の海岸堤防に作用するとしており、長時間の越流が起きるような津波については想定していない。

戻り流れによる洗掘については、次のような研究がなされてきた。西村・堀川 (1979) は、陸上に遡上した孤立波の戻り流れによって、直立堤の前面の海底に生じる洗掘を水理実験により再現した。洗掘の進行過程を明らかにし、洗掘量を流下流量と水層厚の関数と考えてモデル化を試みている。野口ら (1997) も西村・堀川 (1979) と同様に、戻り流れにより生じる洗掘を大規模な水理実験により再現している。後藤ら (2002) は、同様の問題に対して MPS 法と呼ばれる粒子法の数値計算でアプローチしている。これらの一連の研究の背景には、1960 年チリ地震津波以降、報告されてきた戻り流れによる護岸法先の被害があると思われる (図-3.8 参照)。主な焦点は、戻り流れにより生じる洗掘量を正確に評価しようとしている点にある。

津波による海岸堤防の被災に関する既往研究としては、以上に挙げたものに加えて、首藤 (1999) や Shuto (2009) による研究がある。首藤は、過去の被災事例を整理して越流時の裏法尻の洗掘に関する研究の重要性を指摘しているが、実際にこれに関する研究が行われることは少なかった。例えば、後藤ら (2001) は、MPS 法を用いて海岸堤防を越流する津波の堤防背後での流体運動の特性を論じているが、この研究における主な関心は堤防前後での流況の変化であり、海岸堤防にどのような被害をもたらし得るかについての考察はみられない。

3.4 本章のまとめ

本章では、沿岸災害対策における海岸堤防の位置付けの変遷と津波による海岸堤防の被災要因に関する認識の変遷を参照したうえで、津波による海岸堤防の被災に関する既往研究を整理することを試みた。

まず、沿岸災害対策における海岸堤防の位置付けの変遷を日本における主要な沿岸災害と対策について整理した年表をもとに論じた。三面張りの海岸堤防は、昭和20年代に頻発した台風災害や1960年チリ津波を契機に設置されるようになったことがわかった。最初は海岸堤防をはじめとした防災構造物で沿岸災害対策の中心であったが、1990年頃から防災構造物が津波を乗り越える可能性が国の作成した指針にも含まれるようになり、まちづくりや防災体制などとともに防災構造物を整備していく必要があるという考えへと変化していったことがわかった。

次に、津波による海岸堤防の被災要因に関する認識の変遷を過去の津波による海岸堤防被災調査に関する文献をもとに論じた。1933年昭和三陸津波から1960年チリ津波までの津波災害で海岸堤防の津波による被害に関して越流による被害も含めてさまざまな知見は得られていたことがわかった。しかし、三面張りの海岸堤防が作られるようになってからは、それまでに得られた知見を検証するような大きな津波が発生することはなかったことがわかった。

最後に、前述の変遷の中で進められてきた津波による海岸堤防の被災に関する既往研究について整理した。既往研究は、主に海岸堤防に作用する波力と戻り流れによる前面の洗掘のいずれかに注目しており、越流時の裏法尻の洗掘に関する研究の重要性の指摘はあったが、実際にこれに関する研究が行われることは少なかったことがわかった。

第4章 2011年東北地方太平洋沖地震津波による海岸堤防の被害

4.1 海岸堤防の被害調査

2011年東北津波による海岸堤防被害の詳細を知るために、筆者は数度にわたって調査を実施してきた。調査は仙台湾に面した宮城県と福島県の沿岸で実施した。調査地点は、北から石巻市、七ヶ浜町、岩沼市、亶理町、山元町、相馬市の6地点である(図-4.1)。各調査地点では、海岸堤防被害の状況を写真で記録するとともに、可能な範囲で被災断面の計測を行った。本節では、6地点における調査結果について北から順に述べる。

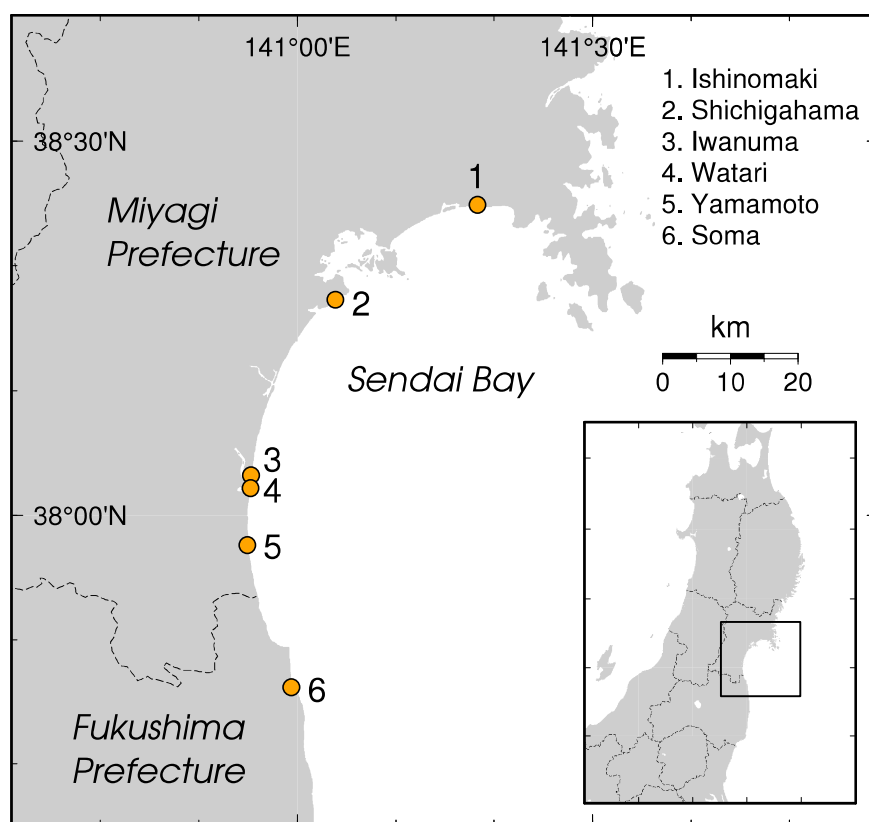


図- 4.1 海岸堤防の被害調査地点

(1) 宮城県石巻市雲雀野町 (N 38°24.895', E 141°18.312')

2012年8月6日に調査を実施した。調査対象の海岸堤防は、旧北上川河口の右岸部の海岸線に平行に設置された直立堤である(図-4.2, 図-4.3)。直立堤から約150m沖には離岸堤が設置されている。直立堤の本体への大きな被害はみられないが、背後部での洗掘が顕著であった。直立堤の背後には幅2m程度の路面があったが、その背後で越流した津波による洗掘が始まり、徐々に路面の下の土砂も吸い出され、最終的に路面の崩壊まで生じたと考えられる。海岸堤防に沿って0.5m間隔13箇所洗掘深を計測したところ、平均洗掘深は1.0mであった。

復興庁(2013)によれば、被災前の海岸堤防の高さはT.P.+4.53mであり、復旧後の高さはT.P.+7.20mになるという。堤防後背地で計測された津波痕跡高(東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ, 2012)は、T.P.で5mから7m程度であった。



図-4.2 石巻市雲雀野町における海岸堤防被害の状況(背後の吸い出しと洗掘)

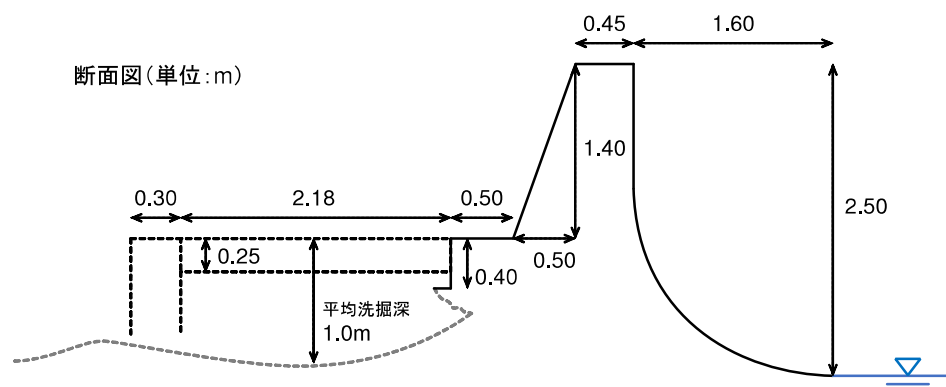


図-4.3 石巻市雲雀野町における海岸堤防被害の断面図

(2) 宮城県宮城郡七ヶ浜町菖蒲田浜 (N 38°17.289', E 141°03.872')

2013年8月20日に調査を実施した。調査対象の海岸堤防は、七ヶ浜町の東南部の海岸線に沿って設置された傾斜堤である(図-4.4, 図-4.5)。海岸堤防から約150m沖には離岸堤が設置されている。表法は階段式斜面になっており、斜面上のいくつかのブロックには浮き上がりや沈下の被害がみられたものの、おおむね健全であった。裏法も階段式斜面になっているが、傾斜は表法より急であった。裏法の直後の後背地では洗掘が生じていた。洗掘により堤体内の土砂も吸い出され裏法斜面が少し沈下している被害がみられた。調査時点では既に後背地の土地の造成を進めており、実際にはより広い範囲が洗掘による被害を受けていたと考えられる。

復興庁(2013)によれば、海岸堤防の高さはT.P.+5.00mであり、復旧後の高さはT.P.+6.80mになるという。堤防後背地で計測された津波痕跡高(東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ, 2012)は、T.P.で8mから10m程度であった。



図-4.4 七ヶ浜町菖蒲田浜における海岸堤防被害の状況(表法面と裏法面)

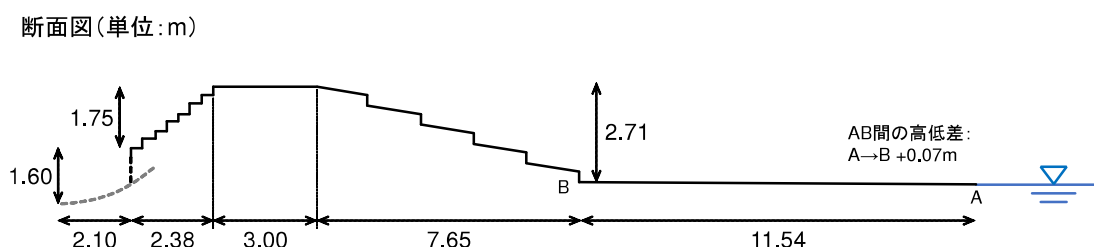


図-4.5 七ヶ浜町菖蒲田浜における海岸堤防被害の断面図

(3) 宮城県岩沼市寺島 (N 38°03.224', E 140°55.311')

2012年8月8日に調査を実施した。調査対象の海岸堤防は、阿武隈川河口左岸部の海岸線に平行に設置された傾斜堤である(図-4.6, 図-4.7)。海岸堤防の後背地には防潮林と貞山堀と呼ばれる運河が存在する。防潮林も大きな被害を受けていた。海岸堤防は両法面とも植生で覆われており、表法面側には顕著な被害はみられなかったが、裏法面側では被害が大きかった。背後では洗掘が生じ落堀(本論文においては常田・谷本(2012)と同様に、海岸堤防背後に生じた水溜まりを落堀と呼ぶ)が形成されており、堤体内の土砂が吸い出され、裏法の型枠工が崩落している箇所がみられた。調査時点では既に、復旧工事のために落堀の埋め戻しが行われており、実際にはより広い範囲が洗掘による被害を受けていたと考えられる。

復興庁(2013)によれば、海岸堤防の高さはT.P.+6.20mであり、復旧後の高さはT.P.+7.20mになるという。堤防後背地で計測された津波痕跡高(東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ, 2012)は、T.P.で5mから7m程度であり、貞山堀を越えると痕跡高は小さくなっている。



図-4.6 岩沼市寺島における海岸堤防被害の状況(落堀と裏法崩落部)

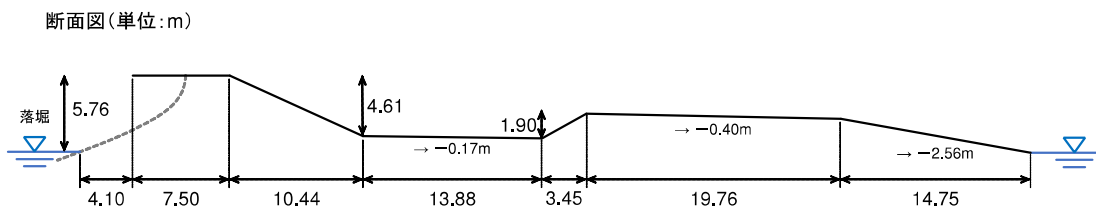


図-4.7 岩沼市寺島における海岸堤防被害の断面図

(4) 宮城県亘理郡亘理町荒浜 (N 38°02.183', E 140°55.250')

2012年8月7日に調査を実施した。調査対象の海岸堤防は、阿武隈川河口右岸部の海岸線に平行に設置された傾斜堤である(図-4.8)。背後には、鳥の海と呼ばれる汽水湖がある。海岸堤防から約250m沖には離岸堤が設置されており、背後には幅約60mの防潮林があった。調査時点では既に、復旧工事が始まっており、海岸堤防の前面には工事用道路の舗装がなされていたため、海岸線から海岸堤防までの断面の計測を行うことができなかった。堤防全体が流失していた箇所もみられたが、堤体内の土砂、天端面、裏法面は流失したものの、表法の被覆工と波返工を残している箇所もみられた。前述の岩沼市寺島と同様、大規模な落堀が形成されていた。

復興庁(2013)によれば、海岸堤防の高さはT.P.+6.20mであり、復旧後の高さはT.P.+7.20mになるという。堤防後背地で計測された津波痕跡高(東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ, 2012)は、T.P.で5mから8m程度であった。



図-4.8 亘理町荒浜における海岸堤防被害の状況(落堀と残存した表法面)

(5) 宮城県亘理郡山元町高瀬 (N 37°57.613', E 140°54.930')

2012年8月7日に調査を実施した。調査対象の海岸堤防は、山元町の海岸線に平行に設置された傾斜堤である(図-4.9, 図-4.10)。前述の岩沼市寺島の海岸堤防と似た構造、被害状況であった。特徴的であったのは、堤体すべてが流失した箇所が見られたということである。山元町の沿岸では海岸堤防の背後に幅約100mから300mの防潮林が広がっていたが、それらの大部分も流失していた。被災直後の航空写真をみると、かろうじて堤体の一部が残った箇所が堤防背後の落掘と全体が流失した箇所に囲まれて、海上に孤立しているようにみえることがわかる。航空写真の変遷をたどると、海上に孤立した堤防残存箇所の背後にトンボロのように陸地が形成されていく過程がわかる。

復興庁(2013)によれば、海岸堤防の高さはT.P.+6.20mであり、復旧後の高さはT.P.+7.20mになるという。背後地で計測された津波痕跡高(東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ, 2012)は、T.P.で4mから8m程度であり、内陸に進むに従って小さくなっている。



図-4.9 山元町高瀬における海岸堤防被害の状況(堤防の残存部と天端部の被害)

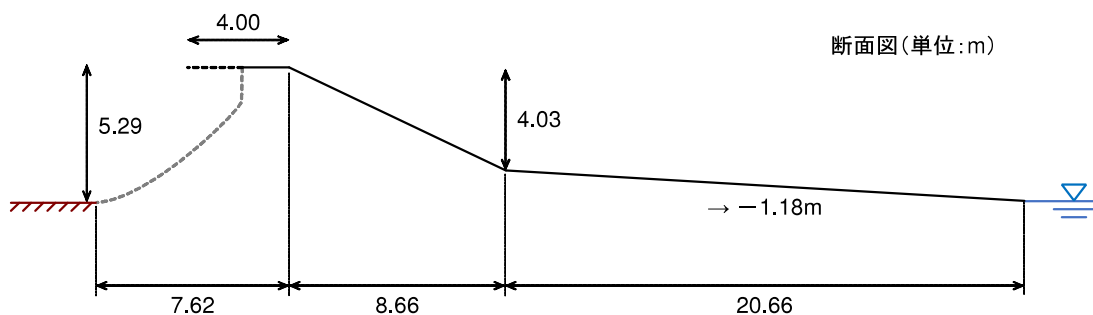


図-4.10 山元町高瀬における海岸堤防被害の断面図

(6) 福島県相馬市磯部 (N 37°46.160', E 140°59.403')

2012年8月7日と2013年8月19日に調査を実施した。調査対象の海岸堤防は、松川浦南端より約1km南の海岸線に平行に設置された傾斜堤である(図-4.11, 図-4.12)。表法面は残存していたが、裏法面はほぼすべて流失しており、大きな落堀が形成されていた。被害が大きい箇所では、天端工と表法面の上部の被覆ブロック数列分まで流失していた。松川浦の東側は南北に5km程にわたって伸びる砂州となっており、砂州の沿岸には海岸堤防が設置されている。2011年東北津波の災害直後に行った現地調査の際には、この砂州の根元に近い部分に訪れており、表法面の構造が違うものの(前項の山元町高瀬の海岸堤防と似た構造)、同様に大きな被害を受けていることが確認されている(柴山ら, 2011)。

復興庁(2013)によれば、海岸堤防の高さはT.P.+6.20mであり、復旧後の高さはT.P.+7.20mになるという。背後地ではほぼすべての家屋が流失しその背後も田畑であるため、津波痕跡高の計測箇所が他地域に比べて少ないが、松川浦の南端部で7mの浸水高が計測されており、海岸線から約3km内陸の地点で2.4mの遡上高が計測されている(東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ, 2012)。



図-4.11 相馬市磯部における海岸堤防被害の状況(落堀と被覆ブロック流失部)

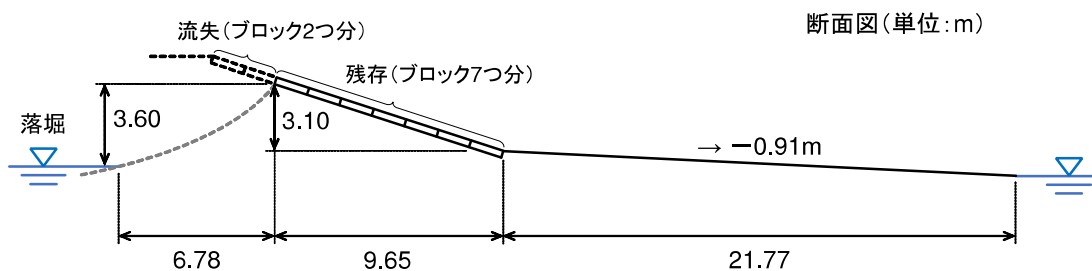


図-4.12 相馬市磯部における海岸堤防被害の断面図

4.2 津波痕跡高と映像資料による海岸堤防を越流する津波の分析

津波による海岸堤防の被害を考える際、津波襲来時に海岸堤防の周囲でどのような流れが生じていたかを考察する必要がある。そこで重要な資料となるのが津波痕跡高の分布と映像資料である。

2011年東北津波では、広域にわたる津波痕跡高の計測を効率的に実施するために、土木学会海岸工学委員会や日本地球惑星科学連合などの研究者により、東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ（以下、合同調査グループと呼ぶ）が立ち上げられた。合同調査グループにより計測された津波痕跡高のデータは6000点近くにもおよぶ（東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ，2012）。非常に密度の高いデータセットとなっているので、これらを用いることで浸水の面的分布を推定することができる。

また、2011年東北津波では、津波襲来時の様子を撮影した映像資料も多く残された。津波襲来時の様子が撮影され映像資料として残されるようになったのは、1983年日本海中部地震津波の頃からである。津波の痕跡高の分布だけでは、実際に生じた流れの状態を把握することは難しいので、映像資料が重要となる。

本節では、三つの地点における津波襲来時に海岸堤防周辺で生じた流れの状態について、津波痕跡高と映像資料を用いて分析を行う。この三地点は、Webサイト（<http://www.nicovid eo.jp/mylist/24570254>）に掲載された映像資料の中から海岸堤防を越流する津波の様子が撮影されている場所を選んだ。

表- 4.1 映像資料中の海岸堤防の概要

場所	海岸名	堤防背後での津波痕跡高 ^a	被災前現況堤防高 ^b	被災後復旧堤防高 ^b	堤防の被害状況
青森県上北郡 おいらせ町松原	横道海岸	3~4m	6.0m	-	堤防裏法流出。（東北地方整備局河川部地域河川課，2011）
岩手県久慈市 宇部町第20地割	久喜漁港海岸	12~15m	12.0m	14.0m	「津波が防潮堤を越流しているが、裏のり面の及び裏のり基礎の吸出しは確認されていない。防潮堤の背後は道路となっており、コンクリートやアスファルトで被覆されていたことが、吸い出しを受けなかった理由の一つと考えられる。」（岩手県津波防災技術専門委員会，2011）
岩手県宮古市 赤前第11地割	赤前地先海岸	6~10m	8.5m	10.4m	「波返工や被覆工は健全。裏被覆工が一部損壊。背面，前面ともに洗掘なし。背面のアスファルト道路が洗掘を防止。」（笠間，2011）

^a 津波痕跡高（T.P.）は、東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ（2012）による。

^b 堤防高（T.P.）は、青森県のみ青森県（2003），それ以外は復興庁（2013）による。

(1) 青森県上北郡おいらせ町松原

おいらせ町松原では、明神川河口左岸に設置してある横道海岸の海岸堤防を津波が越流する様子が撮影されている。映像からは、撮影者が河口の水門近くにおり、水位が上昇してくるのにしたがって、水門の上へと登っていったことがわかる。図-4.13に、海岸堤防を津波が越流する前後の映像のキャプチャ画像を示す。河口部では徐々に水位が上昇し、水位が海岸堤防の高さを超えると速い速度で後背地に向かって流下していったことがわかる。津波は海岸堤防を越えることで限界水深を経て射流となり、水位は低くなるが流速は速い状態で内陸へと氾濫していったと考えられる。



図- 4.13 おいらせ町松原で撮影された映像（越流前後）

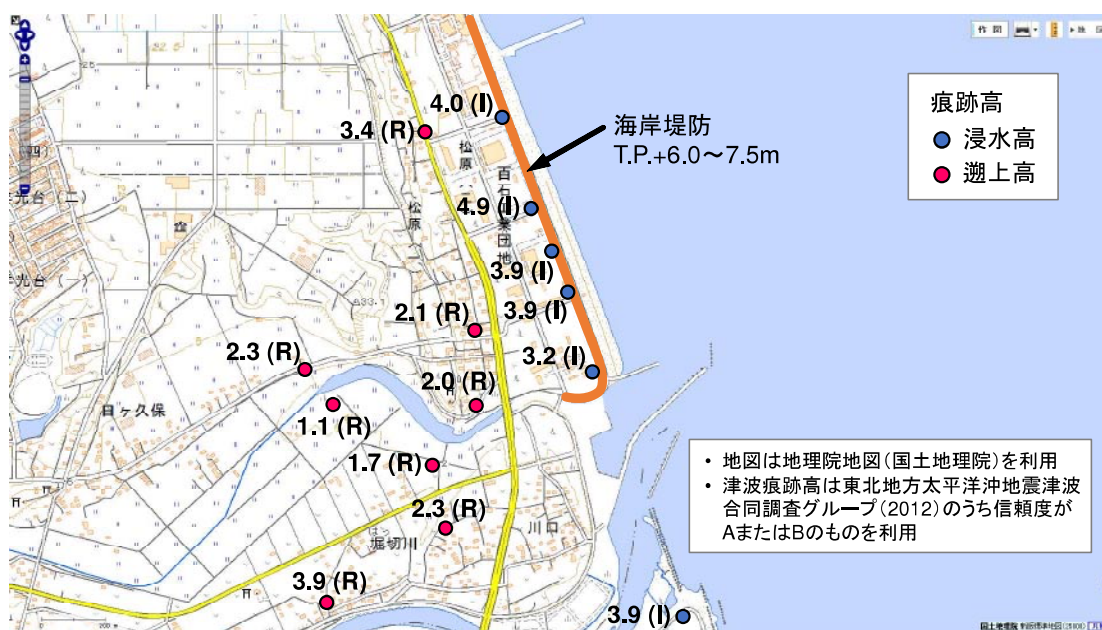


図- 4.14 おいらせ町松原の海岸堤防位置と津波痕跡高の分布

さらに、津波痕跡高の分布もみていく。図-4.14に、海岸堤防周囲の津波痕跡高をプロットした地図を示す。海岸堤防の高さがT.P.+6.0m（青森県，2003）あるいはT.P.+7.0～7.5m（デーリー東北新聞社，2011）であるのに対し、後背地での津波痕跡高はT.P.+2～5mとなっている。津波痕跡高は海岸堤防の高さよりも低い値であり、津波痕跡高の分布が映像からの分析（堤防背後で射流が生じたこと）と符合していることがわかる。

東北地方整備局河川部地域河川課（2011）は、横道海岸の海岸堤防において裏法流出の被害が生じたと報告している。海岸堤防を越流し射流となった流れが裏法の被害を引き起こす原因のひとつとなったと考えられる。

(2) 岩手県久慈市宇部町第20地割

久慈市宇部町では、久喜漁港海岸の海岸堤防を津波が越流する様子が撮影されている。映像からは、集落の西側に広がる高台の上から津波が襲来する様子を撮影していることがわかる。図-4.15に、海岸堤防を津波が越流する前後の映像のキャプチャ画像を示す。津波が越流を始めると比較的早い段階で海岸堤防背後に海水が溜まり水位が高くなった。津波が引いていってからも海岸堤防背後の海水はなかなか排出されなかった様子もわかる。前述のおいらせ町松原での状況とは異なり、射流となって海岸堤防の背後を流下していく時間は短かったと考えられる。

さらに、津波痕跡高の分布もみていく。図-4.16に、海岸堤防周囲の津波痕跡高をプロットした地図を示す。海岸堤防の高さがT.P.+12.2m（復興庁，2013）であるのに対し、後背地での津波痕跡高はT.P.+12～16mとなっている。津波痕跡高は海岸堤防の高さをほぼ同一もしくは少し高い値であり、津波痕跡高の分布が映像からの分析（堤防背後で水位が高まった）と符合していることがわかる。

岩手県津波防災技術専門委員会（2011）によれば、久喜漁港海岸の海岸堤防では裏法面での被害や基礎の吸出し等はみられなかったという。同資料では、コンクリートやアスファルトで被覆されていたことが吸出しを受けなかった要因の一つと考えられるとしているが、海岸堤防背後で比較的早く水位が高まり、射流の状態が長時間継続せずにすんだことも裏法への被害を軽減した要因の一つと考えられる。

(3) 岩手県宮古市赤前第11地割

宮古市赤前では、宮古湾奥に位置する赤前地先海岸の海岸堤防を津波が越流する様子が撮影されている。映像からは、集落の東側に広がる高台の上から津波が襲来する様子を撮影していることがわかる。図-4.17に、海岸堤防を津波が越流する前後の映像のキャプチャ画像を示す。津波は海岸堤防を越流すると勢いよく背後へと流れ込むが、海岸堤防の背後



図-4.15 久慈市宇部町で撮影された映像（越流前後）



図-4.16 久慈市宇部町の海岸堤防位置と津波痕跡高の分布

では家屋等にトラップされ水位が高まっている様子がみてとれる。映像の後半では、後背地が冠水している様子を確認することができる。

さらに、津波痕跡高の分布もみていく。図-4.18に、海岸堤防周囲の津波痕跡高をプロットした地図を示す。海岸堤防の高さがT.P.+8.5m（復興庁，2013）であるのに対し、後背地での津波痕跡高はT.P.6~13mとなっている。海岸堤防の背後には10m以下の低地が広がっているものの、堤防の高さ前後の津波痕跡高が低地を囲む高台の斜面上の広い範囲で計測されており、海岸堤防と高台に囲まれた低地一面が浸水し、映像でみられたように水が溜まっていたと考えられる。

笠間（2011）によれば、表法被覆工と天端工は健全であり、裏法被覆工に一部損壊が見



図-4.17 宮古市赤前で撮影された映像（越流前後）

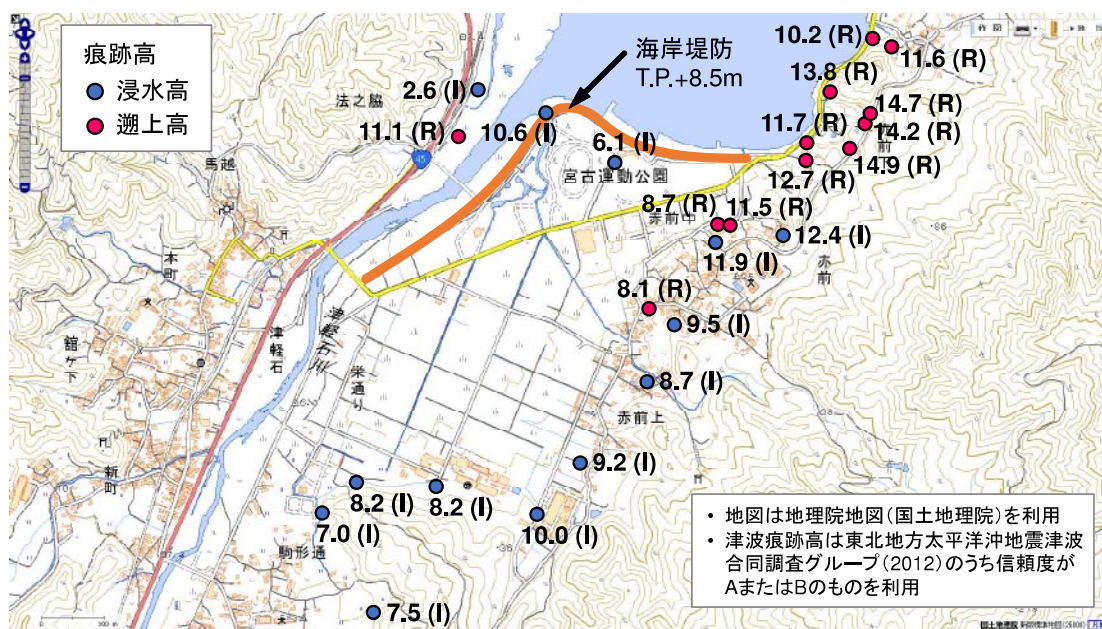


図-4.18 宮古市赤前の海岸堤防位置と津波痕跡高の分布

られたということであった。背面のアスファルト道路が洗掘を防止したとも考察している。アスファルト舗装に加えて、前述の久慈市宇部町での事例と同じように、海岸堤防背後に水が溜まったことが裏法への被害を軽減させた理由の一つと考えられる。

4.3 本章のまとめ

本章では、2011年東北津波による海岸堤防の被害について、被害調査結果や津波痕跡高と映像資料による分析を通して整理することを試みた。

まず、筆者が災害発生後に数度にわたって仙台平野沿岸の6地点で実施した海岸堤防被害調査の結果をもとに、2011年東北津波において生じた海岸堤防被害の特徴を把握した。三面張りの海岸堤防を主として調査し、津波が海岸堤防を越流したことによる裏法被覆工や天端工の流失、堤体内土砂の流失、堤防背後で生じた洗掘などの被害を複数個所で確認した。

次に、津波襲来時に撮影された映像と、東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループの計測した津波痕跡高データを用いることで、津波越流時の流れの状態を分析した。その結果、堤防を越流し射流となって後背地へ流下していく流れと、海岸堤防背後に隣接した高台の影響を受けて堤防背後に流入した海水が貯留され流れの状態が変化していく様子を確認することができた。このように、海岸堤防を越流する津波の状況はひとつとおりではなく、周囲の地形や環境の影響を受けてその状態が変化することがわかった。さらに、映像中の海岸堤防の被害調査から、越流する津波の状態が海岸堤防の被害程度に影響を及ぼした可能性があることがわかった。以上の知見から、津波の流体運動による海岸堤防の被災機構を考察する際には、越流する津波の状態を考慮する必要があると考えられる。

第5章 水理実験による検討

5.1 津波の造波方法

水理実験を実施するにあたって、まず本節では、水路内で津波を造波する方法について検討を行う。津波の造波方法は、図-5.1に示すようにさまざまあるが、それぞれの方法に再現できる物理現象に違いがあるため、以下にそれを整理して本研究の目的に沿った造波方法について検討する。

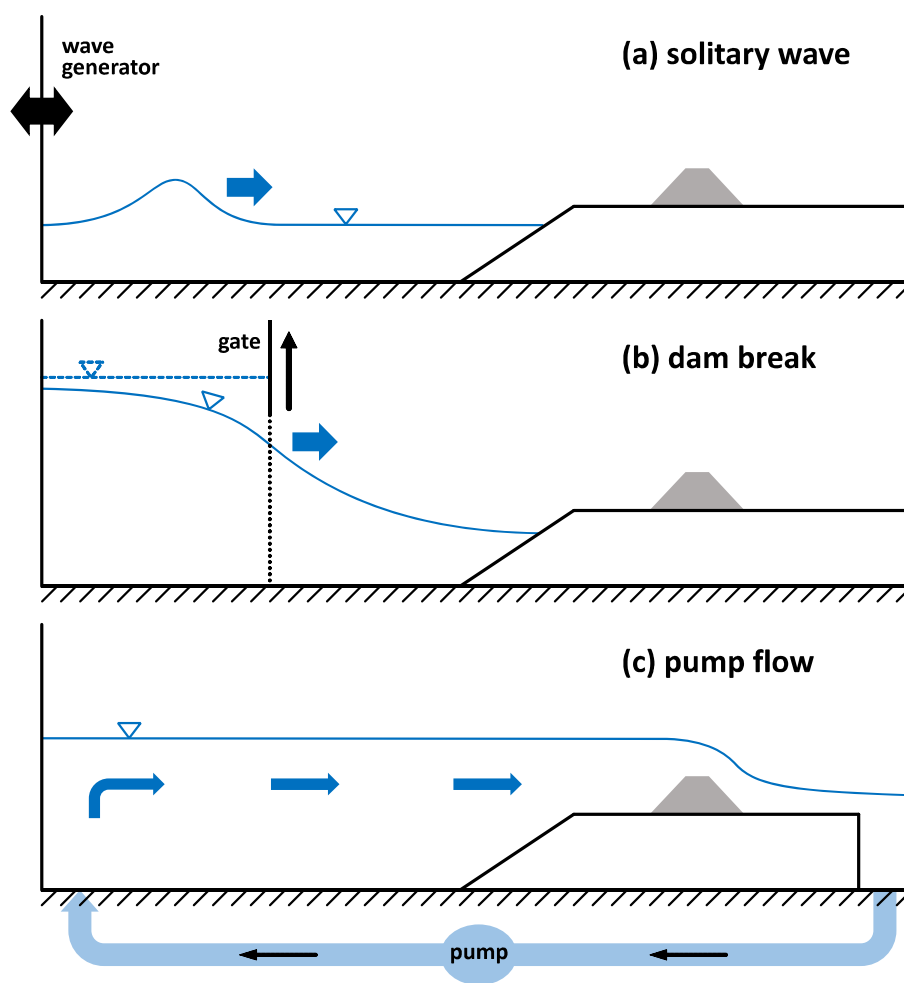


図- 5.1 水理実験における津波の造波方法

津波を水理実験で再現する際には一般的に、孤立波とダムブレイク流れが使用されることが多かった。孤立波を用いた津波の実験（例えば、Hamzahら、2000；加藤ら、2005）では、水路の上流端に設けられた造波板のストロークの距離や時間を調節することで、さまざまな波高や周期の波を発生させている（図-5.1 a）。ダムブレイク流れを用いた津波の実験（例えば、松富・大向、1999；富永ら、2007）では、水路の上流側をゲートで仕切り、ゲートの内側に水を溜めた後にゲートを急開することで波を発生させている（図-5.1 b）。これらの実験では、斜面等で段波状に変形した津波が陸上の構造物へ作用する際の波力の測定に主眼を置いている。

一方で、2011年東北津波においてみられたような海岸堤防を長時間越流するような津波を水理実験において再現するには、長距離の水路を用いて波長の長い孤立波もしくはダムブレイク流れを発生させなければならない。これらの方法には限界があるので、例えば、村上ら（1988）は、堤防の前面に水を溜めて、そこに滑車を取り付けたプランジャーを押し込むことで越流する流れを再現している。近年では、海岸堤防を長時間越流するような津波を再現する際には、より越流の条件を制御しやすいポンプを用いた循環流（一様流）が用いられるようになってきている（例えば、大井ら、2012）。循環流を用いた津波の実験では、水路の上流端と下流端を管路で接続し、管路に取り付けたポンプにより流れを発生させ、上流から下流に向かって流れを発生させている（図-5.1 c）。ポンプによって流量を、水路内の水位によって越流水深を制御することができ、遡上してきた津波の衝撃波力を検討することは難しいが、越流時の流体運動の分析には適した方法と言える。

本研究で主眼を置いているのは、海岸堤防を越流する津波の流体運動の特性、特に越流時に海岸堤防背後で生じる流体運動であり、孤立波やダムブレイク流れではなく、循環流を用いることが適当と考えられる。

5.2 海岸堤防を越流する津波の分類

前章で述べたように、2011年東北津波において撮影された映像は、津波が海岸堤防を越流する際に海岸堤防周辺で生じる流れはひとつおりのことを示唆している。そこで本節では、海岸堤防を越流する津波にどのような形態がありうるのか、また、あるとしたらどのように分類できるのかについて考えていきたい。

前章の映像資料の中では、いずれも越流開始直後は海岸堤防天端上で限界水深となり、射流となって後背地へ流下していく様子が確認できた。しかし、久慈市宇部町のように海岸堤防の背後に十分な高さの高台が存在すると、海岸堤防の背後での水位が比較的短時間で上昇し、射流が生じている時間間隔が短縮される様子が確認できた。海岸堤防の背後での流れが射流かそうでないかは、海岸堤防の被災機構を考えるにあたって重要な視点である

と考えられ、この視点から越流する津波の分類の可能性について探っていきたい。

越流する津波を論じるにあたって、このように流れを分類しようとする試みはほとんどみられないが、本間（1940）は堰堤の流量係数を求める際に周囲で生じる流れを以下の三つに分類して論じている。一つ目は、越流した水が射流となって流下する流れであり、「完全越流」と呼んでいる。二つ目は、下流側水位が高くなって流下する射流部が表面渦で覆われてしまう流れであり、「不完全越流」と呼んでいる。三つ目は、射流部を生じない流れであり、「潜越流」と呼んでいる。本間（1940）の論文中にあるこれらの流れの概略図を図-5.2 に示す。これは、射流が生じる流れのうち、跳水が堤防周辺で生じない流れを完全越流、跳水が裏法面近傍で生じる流れを不完全越流としていることがわかる。このように、流れが構造物の周囲で変化する場合、跳水の始まる位置でもって分類しようとする試みはいくつかあり、例えば、Rand（1955）も落差工にて生じる流れを同じように分類している。

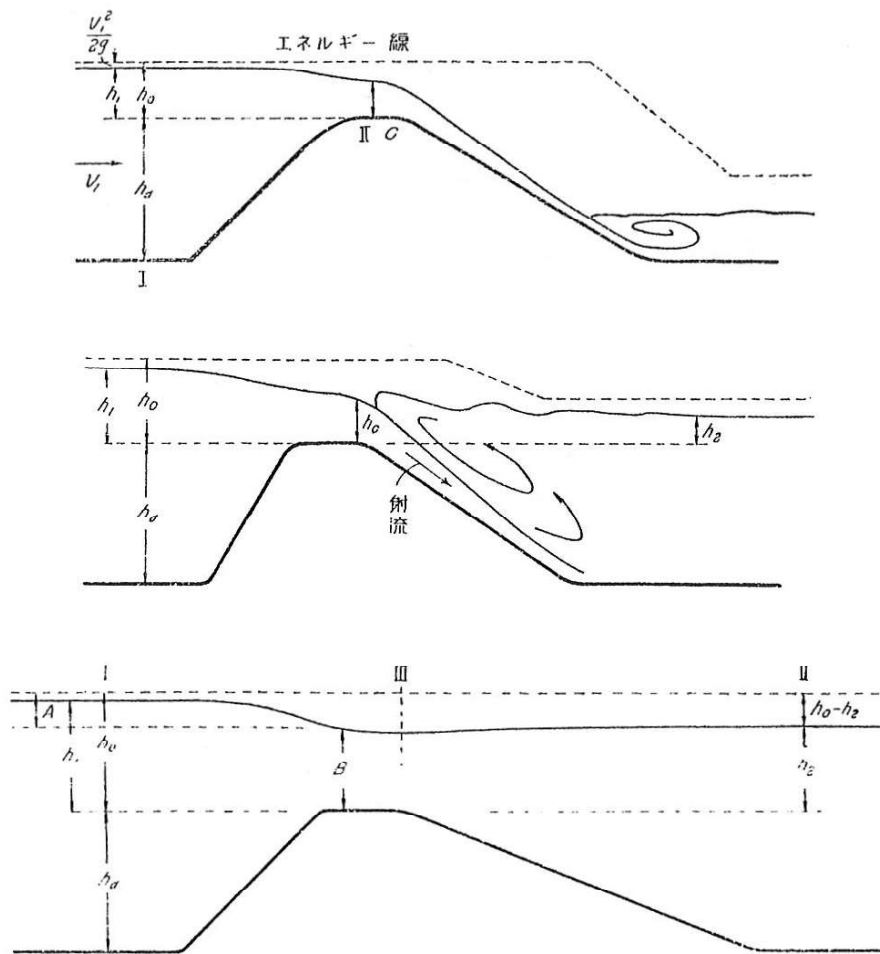
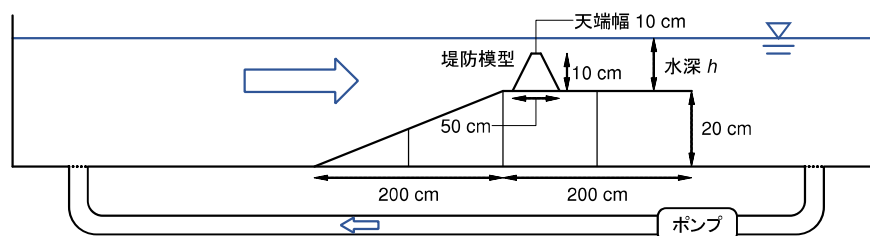


図- 5.2 本間（1940）による堰堤の越流状態の分類（上から順に、完全越流，不完全越流，潜越流の概略図）

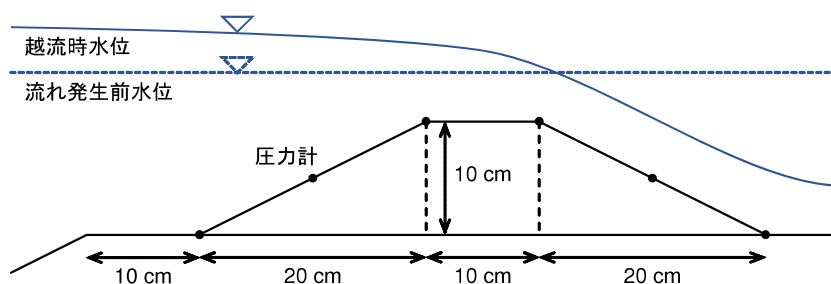
海岸堤防を越流する津波も、上記の本間（1940）と同じように分類することができ、それぞれの流れの特性を把握することは、越流する津波による海岸堤防の被災機構を考える際に重要な視点を与え得ると考えられる。図-5.2からもわかるように、海岸堤防背後の流れの状態が異なるので、まず、循環流を用いて実験水路内でそれぞれの流れを再現できるかどうかを確認し、さらに、流速や圧力の観点からそれぞれの流れの特性を把握していく。

5.3 水理実験の概要

水理実験は、早稲田大学に設置されている実験水路（長さ約12m、幅40cm、高さ60cm）を用いて実施した。図-5.3（aのみ鉛直方向の縮尺比を水平方向より小さくした）に、実験水路断面と堤防模型の模式図を示す。大井ら（2012）と同様に、水路に取り付けた環流装置により一方向流れを水路内に発生させることで、越流する津波を再現した。環流装置の上流側の出入口から約4m離れた位置より、長さ2m、勾配1/10の斜面を設置し、それに続けて長さ2mの水平床を設置した。斜面の終端部から10cmの位置に、高さ10cm、天端幅10cm、両法面勾配1:2の堤防模型を設置した。斜面、水平床および堤防模型は、すべてステンレス製である。これらと水路側壁面との間は、水が浸入しないようにすべて充填材を用いて密閉した。実験スケールは約1/50とした。



(a) 実験水路断面



(b) 堤防模型

図-5.3 実験水路断面と堤防模型の模式図

十分な越流水深を確保するために、水路内を水で満たしてから流れを発生させた。水を満たした際の堤防模型を設置してある水平床から静水面までの距離を水深 h とし、 h を 10cm から 20cm まで 2.5cm ずつ変化させた。流量は環流装置に取り付けられているバルブで調節し、それぞれの水深について 4 段階に変化させた。

以上の条件のもと、堤防模型を水平床上に固定して流れを発生させ、堤防周辺の流れの可視化と堤防に作用する圧力の計測を行った。また、環流装置に取り付けられた流量計を用いて、流量の計測を行った。

5.4 水理実験の結果と考察

水深 h と単位幅あたりの流量 q を変化させたところ、堤防模型を越流する流れは、本間 (1940) による分類のとおり 3 種類に分類できることがわかった。水深 h と単位幅あたりの流量 q 、および、3 種類の流れの関係を図示すると、図-5.4 のようになる。水深が浅く流量が多い場合には完全越流となり、水深が深く流量が少ない場合には潜越流となり、これらの遷移領域で不完全越流となることがわかる。

海岸堤防を越流する津波を水理実験をもとに論じた既往の研究 (例えば、大井ら, 2012; 鳩貝ら, 2012) では、上述の 3 種類の流れが存在し得ることに着目したものはみられない。しかし、実際には海岸堤防背後の条件 (構造物や植生の有無, 地形の勾配など) によって、海岸堤防背後の水位が越流中に上昇し、流れの状態が時間経過とともに変化し、それに伴っ

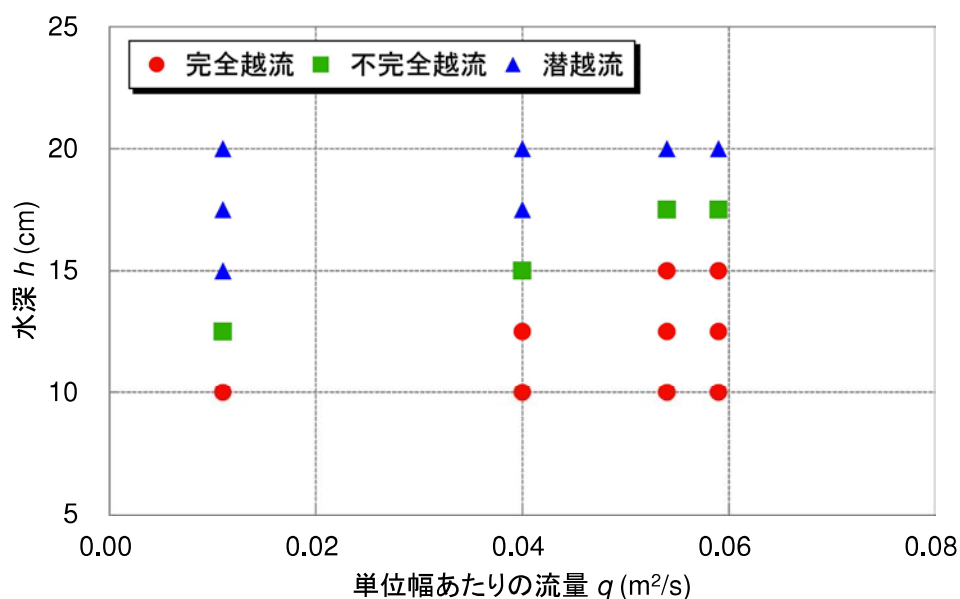


図-5.4 水深と単位幅あたりの流量による流れの分類

て海岸堤防被害の有無や程度も変化していくと考えられる。したがって、それぞれの種類について検討していく必要がある。水深 $h = 15\text{cm}$ の場合、流量を調節することで 3 種類の流れを発生させることができるので（図-5.4 参照）、以下では水深 $h = 15\text{cm}$ の場合に生じるそれぞれの種類の流れ（完全越流： $q = 0.054\text{m}^2/\text{s}$ ，不完全越流： $q = 0.040\text{m}^2/\text{s}$ ，潜越流： $q = 0.011\text{m}^2/\text{s}$ ）の特徴と海岸堤防被害との関係について述べる。

(1) 堤防周辺の流速場

水路内にトレーサー（ダイヤイオン HP20SS，三菱化学製）を混入し、レーザー光（PIV Laser G100，カトウ光研製）を照射して、3 種類の流れについて流れ内部の流速場を可視化し、その定性的な特徴を抽出した。

図-5.5 に、それぞれの流れの状態を可視化したものを示す。完全越流では、堤防背後を射流の状態で流下していく。不完全越流では、堤防背後を流下する射流の上に渦が生成される領域が発生する。潜越流では、射流が発生することなく、堤防背後では水面近傍に流

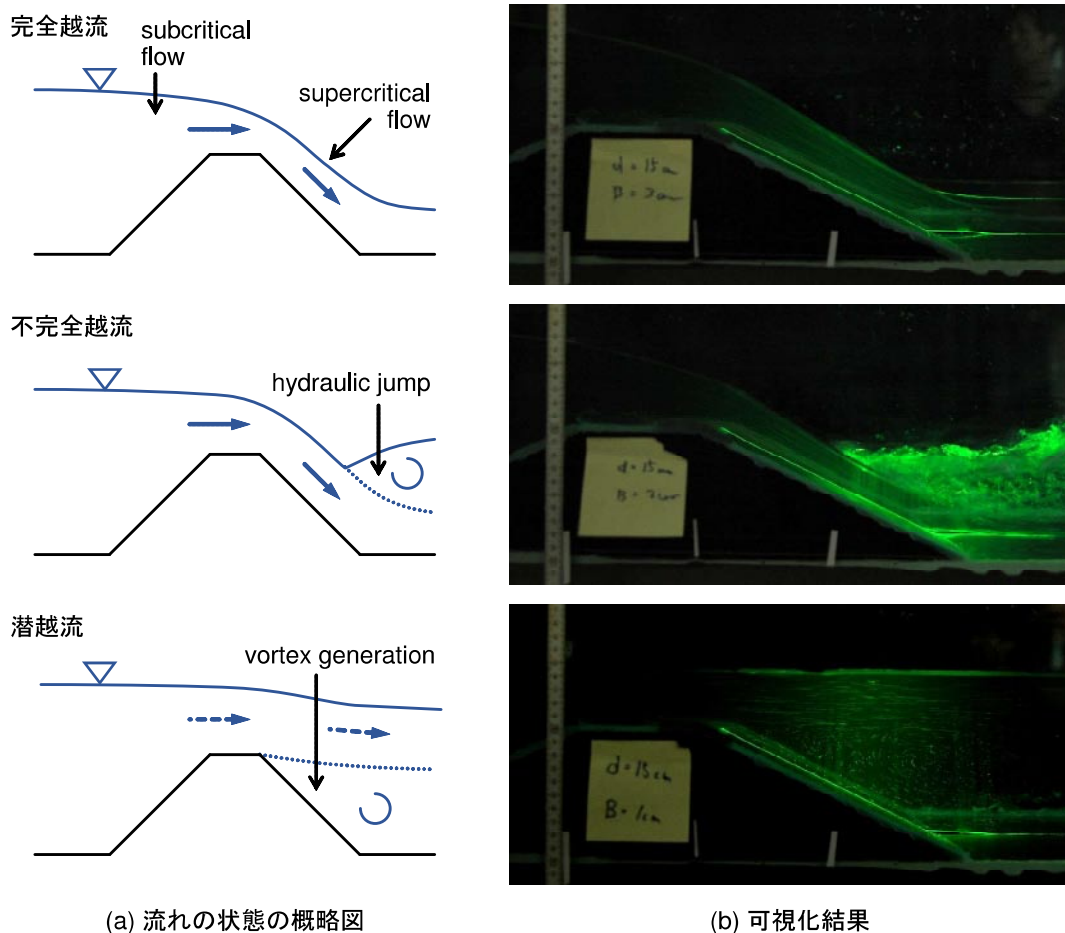


図- 5.5 越流する流れの分類と可視化結果

速の速い部分が生じ、その下方では流速の遅い渦が形成されている。完全越流や不完全越流の状態では、流速の速い部分が裏法面に沿って存在し、洗掘や堤体内の土砂の吸い出しを引き起こす可能性があるのに対し、潜越流では、流速の速い部分が水面近傍に存在するので、堤防への影響は少ないと考えられる。

ここで、流速場の観点から、津波越流が堤防に与える影響を抑える方策について、既往の研究成果を踏まえながら考察したい。首藤（1999）は、堤防のすぐ後方に高さが十分にある土堤があり、堤防後方に海水が比較的早く溜まったことが堤防の被害を防いだという事例を挙げている。谷本ら（2012）は、越流により堤防背後に形成された洗掘（落堀）あるいは水路の存在により、堤防背後の水深が増加することを指摘している。これらのことより、越流開始時に流れが完全越流の状態であっても、堤防背後の水深が高まりやすい条件であれば、流れが不完全越流や潜越流の状態に移行し、流速の速い部分が裏法面を離れ、堤防への洗掘被害等を抑制する効果があると考えられる。

(2) 堤防に作用する圧力

堤防模型表面に圧力計（PS-05KC、共和電業製）を設置し、3種類の流れについて越流時に堤防に作用する圧力を計測した。サンプリング周波数は200Hzとした。圧力計のキャリブレーションは、流れを発生させる前の静水中で実施した。流れを発生させてから20秒ほど経過すると、圧力計はほぼ一定の値を示すようになったので、流れ発生後20秒から30秒までの値の平均値を越流時の堤防に作用する圧力とした。図-5.6に、越流時の堤防に作用する圧力と水面形状を示す。

完全越流と不完全越流では、裏法両端部の流れが湾曲するところで遠心力の影響を受けて圧力が大きく変化していることがわかる。上に凸の流れになる裏法肩では圧力が下がっており、下に凸の流れになる裏法尻では圧力が上がっている。潜越流では、水面形に大きな変動はなく、堤防に作用する圧力も静水圧とほぼ等しくなっている。完全越流や不完全越流の状態における裏法肩の圧力低下は、被覆工間隙からの堤体内土砂の吸い出しや被覆工自体の不安定化、といった被害の要因になると考えられる。

ここで、堤防に作用する圧力の観点から、津波越流が堤防に与える影響を抑える方策について、既往の研究成果を踏まえながら考察したい。中尾ら（2012）は、二線堤構造によって一線目と二線目の間に水を溜めることで、裏法肩での圧力低下を防げる可能性があることを指摘している。小竹・磯部（2012）は、裏法面の緩勾配化によって裏法肩での流れの湾曲を抑え、被覆工に作用する上向きの力を抑えられることを実験により確かめている。これらのことより、裏法肩での圧力低下を防ぐためには、堤防背後の水深が高まりやすいようにすること、流れの湾曲を抑えることの2つの方策が挙げられると考えられる。ただし、両者とも堤防背後の土地利用に制約を与え得ることに留意する必要がある。

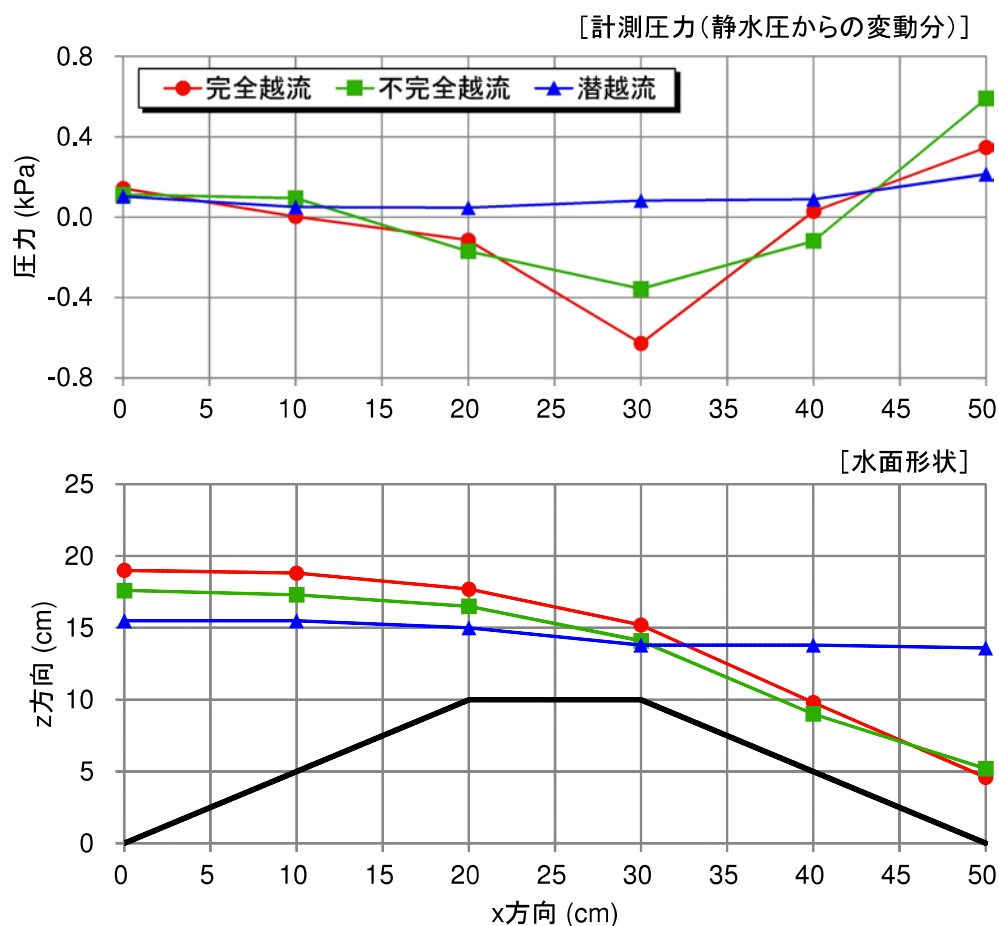


図- 5.6 越流時の堤防に作用する圧力と水面形状

5.5 本章のまとめ

本章では、水理実験を実施することで海岸堤防を越流する津波の状態とその流体運動の基礎的な水理学的特性を把握することを試みた。

まず、水理実験で用いる津波の造波方法について検討した。2011年東北津波以前には、海岸堤防を越流する津波を対象とした研究は少なく、津波の造波方法としては孤立波とダムブレイク流れが用いられることが多かった。しかし、2011年東北津波でみられた海岸堤防を長時間越流する津波をこれらの方法で再現するには、長距離の水路を用いなければならない等の問題がある。そこで、本研究で対象としている海岸堤防を越流する津波の再現には、実験水路内でポンプを用いて循環流を発生させる方法を採用することとした。

次に、海岸堤防を越流する津波の状態の分類について検討した。本研究では、本間(1940)が堰堤の流量係数を求める際に用いた三つの分類(完全越流、不完全越流、潜越流)を参考に論じた。完全越流は越流した流れが射流となって背後へ流下していく流れであり、不

完全越流は流下していく射流の上を表面渦が覆う流れであり，潜越流は射流が発生しない流れである．これらは海岸堤防を越流する津波の分類にも適用できると考えられる．

以上で検討した結果を用いて，循環流を用いて水路内に設置した海岸堤防模型を越流する流れを再現した．水深 h と単位幅あたりの流量 q を変化させたところ，堤防模型を越流する流れは，本間（1940）による分類のとおり3種類に分類できることが分かった．完全越流や不完全越流の状態では，流速の速い部分が裏法面に沿って存在し，洗掘等を引き起こす可能性があるのに対し，潜り越流では，流速の速い部分が水面近傍に存在するので，堤防への影響は少ないと考えられる．完全越流と不完全越流では，裏法両端部の流れが湾曲するところで遠心力の影響を受けて圧力が大きく変化する．上に凸の流れになる裏法肩では圧力が下がり，下に凸の流れになる裏法尻では圧力が上がる．潜越流では，水面形に大きな変動はなく，堤防に作用する圧力も静水圧とほぼ等しい．完全越流や不完全越流の状態における裏法肩の圧力低下は，被覆工の不安定化の要因になると考えられる．

第6章 数値計算による検討

6.1 数値計算モデルの支配方程式

数値流体力学 (Computational Fluid Dynamics, CFD) の発展に伴い, 理論的研究と実験的研究に加えて, 現在では数値計算による流体運動の解析が活発に行われている. これらの数値計算は, 非圧縮性粘性流れの支配方程式である Navier-Stokes 方程式を直接解く方法 (Direct Numerical Simulation, DNS) と, 平均操作を施した方程式に乱流モデルを導入して解く方法に大別される. さらに, 後者の方法は, 時間平均を施した Navier-Stokes 方程式に現れる未知量をモデル化したもの (Reynolds-averaged Numerical Simulation もしくは Reynolds-averaged Navier-Stokes, RANS) と, 空間平均を施した Navier-Stokes 方程式に現れる未知量をモデル化したもの (Large Eddy Simulation, LES) に大別される. 現在では, これらの乱流モデルを用いた数値計算による流体運動の諸特性の解明に関する研究が数多く行われている (大宮司ら, 1998).

本研究では, 乱流モデルのひとつである Large Eddy Simulation (LES) モデルを用いた数値計算を行う. 海岸工学の分野における LES モデルを用いた既往研究としては, 砕波体内の流体運動 (Watanabe & Saeki, 1999; Christensen & Deigaard, 2001; Christensen, 2006), 緩傾斜護岸の越波量 (Okayasu et al., 2005), 防波堤周辺の乱流特性 (Thao & Shibayama, 2006), 砕波体内の底質浮遊 (Suzuki et al., 2007) などが挙げられ, 沿岸域で生じる多くの現象に関する適用事例をもっていることがわかる. 以下に, 本研究で用いる数値計算モデルの支配方程式について述べる.

非圧縮性粘性流れの支配方程式は, 以下の Navier-Stokes 方程式と連続式である.

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} + g_i \quad (6.1)$$

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (6.2)$$

ここで, u_i は流速の各方向成分, p は圧力, ρ は密度, ν は動粘性係数, g_i は重力加速度の各方向成分を示す. まず, この方程式を LES モデルの考え方に従って空間平均化する.

乱流中の運動エネルギーは, 低波数の大きなスケールの渦から高波数の小さなスケールの渦に伝わっていき, 最終的には分子間の熱運動エネルギーに変換される. この伝達過程

をエネルギーカスケード (energy cascade) と呼ぶ。また、低波数の大きな渦は流れ場の影響を受けるが、高波数の小さな渦は流れ場によらず普遍的な性質をもっている。このような小さなスケールの渦における性質を局所等方性と呼ぶ。本来、Navier-Stokes 方程式を解いて乱流の数値計算を行う場合には、広い波数範囲にわたって存在するすべてのスケールの渦を解像する必要があるが、エネルギーカスケードや局所等方性の考え方をを用いると、流れ場によらない小さなスケールの渦だけをモデル化することで、よりよい計算結果が得られると考えることができる。

そこで、支配方程式を空間平均化し、乱流の速度 u_i を計算格子幅以上の直接計算可能な成分 \bar{u}_i (Grid Scale 成分, GS 成分) とそれ以下の成分 u'_i (Sub-Grid Scale 成分, SGS 成分) とに分離する。本研究では、空間平均操作に用いるフィルタ関数としてガウシアンフィルタ (Gaussian filter) を用いている。式 (6.1) および式 (6.2) を空間平均化すると以下のようになる。

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} (\tau_{ij}) + g_i \quad (6.3)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_j} = 0 \quad (6.4)$$

ここで、 τ_{ij} はフィルターによって粗視化された流れにおける残余の応力と呼ばれ、次式のように表される。

$$\tau_{ij} = \overline{u_i u_j} - \bar{u}_i \bar{u}_j \quad (6.5)$$

τ_{ij} は計算格子幅以下の SGS 成分の変動効果を表している。厳密には、 $\rho \tau_{ij}$ が応力の次元をもつが、ここでは ρ を一定としていることからこれを省略し、 τ_{ij} を応力として記述する。

次に、SGS 応力 τ_{ij} のモデル化に取り組む。SGS 応力のモデルとしては、LES で最も広く用いられているスマゴリンスキーモデル (Smagorinsky, 1963) を用いる。式 (6.3) における SGS 応力 τ_{ij} の効果は、分子粘性との類似から次式のようにひずみ速度 \bar{D}_{ij} と比例すると表すことができる。

$$\tau_{ij} = -2\nu_e \bar{D}_{ij} \quad (6.6)$$

ここで、 ν_e は SGS 応力の渦粘性係数である。 \bar{D}_{ij} はひずみ速度の GS 成分であり、次式のように表される。

$$\bar{D}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (6.7)$$

スマゴリンスキーモデルでは、 ν_e は次式で評価される。

$$\nu_e = (C_s \Delta)^2 \sqrt{2 \bar{D}_{ij} \bar{D}_{ij}} \quad (6.8)$$

ここで、 C_s はスマゴリンスキー一定数と呼ばれ、このモデルにおいて与えるべき唯一の無次元定数である。 $C_s = 0.10$ が多く用いられているので (例えば、Christensen & Deigaard,

2001), 本研究でも $C_s = 0.10$ を用いる. Δ はフィルタ幅の長さスケールであり, 次式のように定義する.

$$\Delta = (\Delta x \Delta y \Delta z)^{1/3} \quad (6.9)$$

これらにより, 式 (6.3) に現れる SGS 応力 τ_{ij} は次式のように表される.

$$-\frac{\partial}{\partial x_j}(\tau_{ij}) = -\frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ -2(C_s \Delta)^2 \sqrt{\frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right)^2} \right\} \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (6.10)$$

上式は, 特に 3 次元計算においては境界での計算が複雑になってしまう. そこで, 近似を用いることで次のように展開する.

$$-\frac{\partial}{\partial x_j}(\tau_{ij}) = - \left\{ -2(C_s \Delta)^2 \sqrt{\frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right)^2} \right\} \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (6.11)$$

さらに, 上式は連続式 (6.4) を用いることで以下のように簡略化できる.

$$-\frac{\partial}{\partial x_j}(\tau_{ij}) = (C_s \Delta)^2 \sqrt{\frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right)^2} \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j^2} \quad (6.12)$$

以上より, 本研究で用いる LES モデルの支配方程式となる空間平均化された Navier-Stokes 方程式と連続式は, 以下のように表わされる.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial z^2} \right) \\ &+ (C_s \Delta)^2 \sqrt{\frac{1}{2}} \left| \left(2 \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} \right) \right| \left(\frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial z^2} \right) \\ &- g \sin \theta \end{aligned} \quad (6.13)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial z^2} \right) \\ &+ (C_s \Delta)^2 \sqrt{\frac{1}{2}} \left| \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + 2 \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial y} \right) \right| \left(\frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial z^2} \right) \end{aligned} \quad (6.14)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{w}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{w}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial z^2} \right) \\ &+ (C_s \Delta)^2 \sqrt{\frac{1}{2}} \left| \left(\frac{\partial \bar{w}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} + 2 \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} \right) \right| \left(\frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial z^2} \right) \\ &- g \cos \theta \end{aligned} \quad (6.15)$$

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} = 0 \quad (6.16)$$

ここで, θ は岸沖方向軸 (x 軸) が水平方向となす角度であり, 沿岸方向軸 (y 軸), 鉛直方向軸 (z 軸) はそれぞれ岸沖方向軸に対して垂直に設定しており, u, v, w は各軸方向への流速を示している. 本論文ではこれ以降省略のため, $\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}, \bar{p}$ を u, v, w, p と表記する.

6.2 数値計算手法

数値流体力学における計算手法は、Euler 表記に基づく格子法と Lagrange 表記に基づく粒子法に大別され、双方についてさまざまな手法が提案されている（数値波動水槽研究小委員会，2012）。本研究では，前節で示した支配方程式を格子法のひとつである差分法により計算する。使用した計算プログラムは，Wijayaratna（2000）および鈴木（2004）により構築されたプログラムに改良を加えたものである。数値計算のフローは，まず密度関数法を用いて自由水面を決定した後，水セルと判断された計算格子の圧力と流速を算出するようになっている。

6.2.1 計算領域と計算格子

計算領域は，図-6.1 のように設定している。岸沖方向を x 方向，沿岸方向を y 方向，鉛直方向を z 方向としている。また，一様斜面上の流体運動を扱う際に底面の計算格子を階段状に表現するのを避けるため， x 方向軸を角度 θ 傾斜させることができるように設定している。これにより底面の計算格子をフラットに表現できるようになっている。

計算格子は，図-6.2 に示すスタガード格子（staggered grid）を採用している。スタガード格子では，圧力を計算格子の中心で設定し $(p_{i,j,k})$ ，流速の各方向成分を計算格子の中心と各方向に隣接する計算格子の中心の midpoint で設定する $(u_{i+1/2,j,k}, v_{i,j+1/2,k}, w_{i,j,k+1/2})$ 。自由水面を決定するために用いる密度関数は，圧力と同様に計算格子の中心で設定する $(f_{i,j,k})$ 。

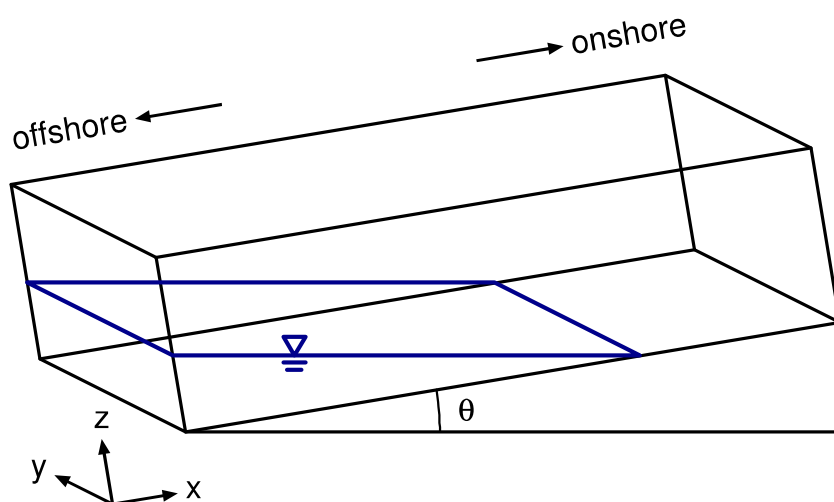


図- 6.1 計算領域

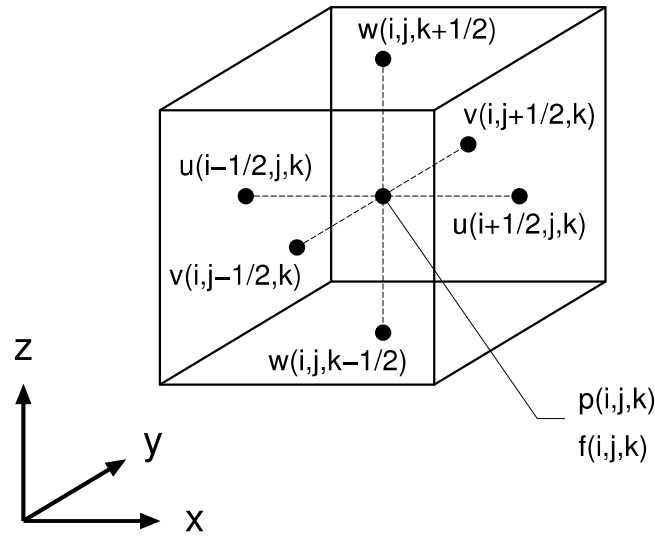


図- 6.2 スタガード格子

6.2.2 自由水面位置の決定

自由水面は、次式で与えられる密度関数 f を CIP (Cubic Interpolated Pseudo-particle) 法 (Yabe et al., 1990) を用いた分離解法により解くことで決定する。

$$\frac{\partial f}{\partial t} + u \frac{\partial f}{\partial x} + v \frac{\partial f}{\partial y} + w \frac{\partial f}{\partial z} = 0 \quad (6.17)$$

CIP 法では、 f の空間微分値 ($\partial_x f$, $\partial_y f$, $\partial_z f$) も必要となるため、上式からこれらの値についての式を求めておく。上式を x , y , z について微分すると次式ようになる。

$$\frac{\partial(\partial_x f)}{\partial t} + u \frac{\partial(\partial_x f)}{\partial x} + v \frac{\partial(\partial_x f)}{\partial y} + w \frac{\partial(\partial_x f)}{\partial z} = -(\partial_x f) \frac{\partial u}{\partial x} - (\partial_y f) \frac{\partial v}{\partial x} - (\partial_z f) \frac{\partial w}{\partial x} \quad (6.18)$$

$$\frac{\partial(\partial_y f)}{\partial t} + u \frac{\partial(\partial_y f)}{\partial x} + v \frac{\partial(\partial_y f)}{\partial y} + w \frac{\partial(\partial_y f)}{\partial z} = -(\partial_x f) \frac{\partial u}{\partial y} - (\partial_y f) \frac{\partial v}{\partial y} - (\partial_z f) \frac{\partial w}{\partial y} \quad (6.19)$$

$$\frac{\partial(\partial_z f)}{\partial t} + u \frac{\partial(\partial_z f)}{\partial x} + v \frac{\partial(\partial_z f)}{\partial y} + w \frac{\partial(\partial_z f)}{\partial z} = -(\partial_x f) \frac{\partial u}{\partial z} - (\partial_y f) \frac{\partial v}{\partial z} - (\partial_z f) \frac{\partial w}{\partial z} \quad (6.20)$$

密度関数 f は、計算領域内すべての計算格子に与えられ、表-6.1 に示すように f の値を用いて種類を判別する。水で満たされていれば一定値 (本計算プログラムでは 1) をとり、水がない場合は 0 とする。自由水面は、 f が 0.5 のところに存在していると仮定し、 f が 0.5 以上の計算格子を水セル、 f が 0.5 より小さい計算格子を空気セルと判断する。計算領域内で壁や床を表わす計算格子では、 f を 5 とする。後述する圧力と流速の算出は、水と判断された計算格子でのみ行う。

支配方程式を非移流相と移流相に分離して解く。非移流相は支配方程式から移流項を除いたもの、移流相は支配方程式から右辺の項を取り除いたものである。非移流相において

表- 6.1 密度関数 f の値と計算格子の種類

密度関数 f の値	計算格子の種類
$0.5 \leq f \leq 1.0$	水セル (water cell)
$0.0 \leq f < 0.5$	空気セル (empty cell)
$f = 5.0$	壁床セル (obstacle cell)

は, 前時間ステップ (f^n) での値から, 中間時間ステップ (f^*) の値を求める. 移流相においては, 中間時間ステップ (f^*) での値から, 現時間ステップ (f^{n+1}) の値を求める.

非移流相 非移流相の式は以下の通りである.

$$\frac{\partial f}{\partial t} = 0 \quad (6.21)$$

$$\frac{\partial(\partial_x f)}{\partial t} = -(\partial_x f) \frac{\partial u}{\partial x} - (\partial_y f) \frac{\partial v}{\partial x} - (\partial_z f) \frac{\partial w}{\partial x} \quad (6.22)$$

$$\frac{\partial(\partial_y f)}{\partial t} = -(\partial_x f) \frac{\partial u}{\partial y} - (\partial_y f) \frac{\partial v}{\partial y} - (\partial_z f) \frac{\partial w}{\partial y} \quad (6.23)$$

$$\frac{\partial(\partial_z f)}{\partial t} = -(\partial_x f) \frac{\partial u}{\partial z} - (\partial_y f) \frac{\partial v}{\partial z} - (\partial_z f) \frac{\partial w}{\partial z} \quad (6.24)$$

これらの式を, 時間についてはオイラー陽解法, 空間については中央差分を用いて離散化すると, 以下のようになる.

$$\frac{f_{i,j,k}^* - f_{i,j,k}^n}{\Delta t} = 0 \quad (6.25)$$

$$\begin{aligned} & \frac{(\partial_x f)_{i,j,k}^* - (\partial_x f)_{i,j,k}^n}{\Delta t} = \\ & -(\partial_x f)_{i,j,k}^n \frac{u_{i+1/2,j,k}^n - u_{i-1/2,j,k}^n}{\Delta x} \\ & -(\partial_y f)_{i,j,k}^n \frac{(v_{i+1,j+1/2,k}^n + v_{i+1,j-1/2,k}^n)/2 - (v_{i-1,j+1/2,k}^n + v_{i-1,j-1/2,k}^n)/2}{2\Delta x} \\ & -(\partial_z f)_{i,j,k}^n \frac{(w_{i+1,j,k+1/2}^n + v_{i+1,j,k-1/2}^w)/2 - (w_{i-1,j,k+1/2}^n + w_{i-1,j,k-1/2}^n)/2}{2\Delta x} \end{aligned} \quad (6.26)$$

$$\begin{aligned} & \frac{(\partial_y f)_{i,j,k}^* - (\partial_y f)_{i,j,k}^n}{\Delta t} = \\ & -(\partial_x f)_{i,j,k}^n \frac{(u_{i+1/2,j+1,k}^n + u_{i-1/2,j+1,k}^n)/2 - (u_{i+1/2,j-1,k}^n + u_{i-1/2,j-1,k}^n)/2}{2\Delta y} \\ & -(\partial_y f)_{i,j,k}^n \frac{v_{i,j+1/2,k}^n - v_{i,j-1/2,k}^n}{\Delta y} \\ & -(\partial_z f)_{i,j,k}^n \frac{(w_{i,j+1,k+1/2}^n + w_{i,j+1,k-1/2}^n)/2 - (w_{i,j-1,k+1/2}^n + w_{i,j-1,k-1/2}^n)/2}{2\Delta y} \end{aligned} \quad (6.27)$$

$$\begin{aligned}
& \frac{(\partial_z f)_{i,j,k}^* - (\partial_z f)_{i,j,k}^n}{\Delta t} = \\
& -(\partial_x f)_{i,j,k}^n \frac{(u_{i+1/2,j,k+1}^n + u_{i-1/2,j,k+1}^n)/2 - (u_{i+1/2,j,k-1}^n + u_{i-1/2,j,k-1}^n)/2}{2\Delta z} \\
& -(\partial_y f)_{i,j,k}^n \frac{(v_{i,j+1/2,k+1}^n + v_{i,j-1/2,k+1}^n)/2 - (v_{i,j+1/2,k-1}^n + v_{i,j-1/2,k-1}^n)/2}{2\Delta z} \\
& -(\partial_z f)_{i,j,k}^n \frac{w_{i,j,k+1/2}^n - w_{i,j,k-1/2}^n}{\Delta z} \tag{6.28}
\end{aligned}$$

以上の式を整理すると、以下のようになる。

$$f_{i,j,k}^* = f_{i,j,k}^n \tag{6.29}$$

$$\begin{aligned}
(\partial_x f)_{i,j,k}^* &= (\partial_x f)_{i,j,k}^n \\
& - \frac{\Delta t}{\Delta x} (\partial_x f)_{i,j,k}^n (u_{i+1/2,j,k}^n - u_{i-1/2,j,k}^n) \\
& - \frac{\Delta t}{4\Delta x} (\partial_y f)_{i,j,k}^n (v_{i+1,j+1/2,k}^n + v_{i+1,j-1/2,k}^n - v_{i-1,j+1/2,k}^n - v_{i-1,j-1/2,k}^n) \\
& - \frac{\Delta t}{4\Delta x} (\partial_z f)_{i,j,k}^n (w_{i+1,j,k+1/2}^n + w_{i+1,j,k-1/2}^n - w_{i-1,j,k+1/2}^n - w_{i-1,j,k-1/2}^n) \tag{6.30}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
(\partial_y f)_{i,j,k}^* &= (\partial_y f)_{i,j,k}^n \\
& - \frac{\Delta t}{4\Delta y} (\partial_x f)_{i,j,k}^n (u_{i+1/2,j+1,k}^n + u_{i-1/2,j+1,k}^n - u_{i+1/2,j-1,k}^n - u_{i-1/2,j-1,k}^n) \\
& - \frac{\Delta t}{\Delta y} (\partial_y f)_{i,j,k}^n (v_{i,j+1/2,k}^n - v_{i,j-1/2,k}^n) \\
& - \frac{\Delta t}{4\Delta y} (\partial_z f)_{i,j,k}^n (w_{i,j+1,k+1/2}^n + w_{i,j+1,k-1/2}^n - w_{i,j-1,k+1/2}^n - w_{i,j-1,k-1/2}^n) \tag{6.31}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
(\partial_z f)_{i,j,k}^* &= (\partial_z f)_{i,j,k}^n \\
& - \frac{\Delta t}{4\Delta z} (\partial_x f)_{i,j,k}^n (u_{i+1/2,j,k+1}^n + u_{i-1/2,j,k+1}^n - u_{i+1/2,j,k-1}^n - u_{i-1/2,j,k-1}^n) \\
& - \frac{\Delta t}{4\Delta z} (\partial_y f)_{i,j,k}^n (v_{i,j+1/2,k+1}^n + v_{i,j-1/2,k+1}^n - v_{i,j+1/2,k-1}^n - v_{i,j-1/2,k-1}^n) \\
& - \frac{\Delta t}{\Delta z} (\partial_z f)_{i,j,k}^n (w_{i,j,k+1/2}^n - w_{i,j,k-1/2}^n) \tag{6.32}
\end{aligned}$$

移流相 移流相の式は以下の通りである。

$$\frac{\partial f}{\partial t} + u \frac{\partial f}{\partial x} + v \frac{\partial f}{\partial y} + w \frac{\partial f}{\partial z} = 0 \tag{6.33}$$

$$\frac{\partial(\partial_x f)}{\partial t} + u \frac{\partial(\partial_x f)}{\partial x} + v \frac{\partial(\partial_x f)}{\partial y} + w \frac{\partial(\partial_x f)}{\partial z} = 0 \tag{6.34}$$

$$\frac{\partial(\partial_y f)}{\partial t} + u \frac{\partial(\partial_y f)}{\partial x} + v \frac{\partial(\partial_y f)}{\partial y} + w \frac{\partial(\partial_y f)}{\partial z} = 0 \tag{6.35}$$

$$\frac{\partial(\partial_z f)}{\partial t} + u \frac{\partial(\partial_z f)}{\partial x} + v \frac{\partial(\partial_z f)}{\partial y} + w \frac{\partial(\partial_z f)}{\partial z} = 0 \quad (6.36)$$

これらの式を, CIP 法を用いて離散化すると, 以下のようになる.

$$\begin{aligned} f_{i,j,k}^{n+1} &= f_{i,j,k}^* \\ &+ [(B1_{i,j,k}\xi + B2_{i,j,k}\eta + B3_{i,j,k}\zeta + B4_{i,j,k})\xi + B5_{i,j,k}\eta + (\partial_x f)_{i,j,k}^*]\xi \\ &+ [(B6_{i,j,k}\eta + B7_{i,j,k}\zeta + B8_{i,j,k}\xi + B9_{i,j,k})\eta + B10_{i,j,k}\zeta + (\partial_y f)_{i,j,k}^*]\eta \\ &+ [(B11_{i,j,k}\zeta + B12_{i,j,k}\xi + B13_{i,j,k}\eta + B14_{i,j,k})\zeta + B15_{i,j,k}\xi + (\partial_z f)_{i,j,k}^*]\zeta \\ &+ B16_{i,j,k}\xi\eta\zeta \end{aligned} \quad (6.37)$$

$$\begin{aligned} (\partial_x f)_{i,j,k}^{n+1} &= (\partial_x f)_{i,j,k}^* \\ &+ (3B1_{i,j,k}\xi + 2B2_{i,j,k}\eta + 2B3_{i,j,k}\zeta + 2B4_{i,j,k})\xi \\ &+ (B5_{i,j,k} + B8_{i,j,k}\eta)\eta \\ &+ (B12_{i,j,k}\zeta + B15_{i,j,k} + B16_{i,j,k}\eta)\zeta \end{aligned} \quad (6.38)$$

$$\begin{aligned} (\partial_y f)_{i,j,k}^{n+1} &= (\partial_y f)_{i,j,k}^* \\ &+ (B2_{i,j,k}\xi + B5_{i,j,k} + B16_{i,j,k}\zeta)\xi \\ &+ (3B6_{i,j,k}\eta + 2B7_{i,j,k}\zeta + 2B8_{i,j,k}\xi + 2B9_{i,j,k})\eta \\ &+ (B10_{i,j,k} + B13_{i,j,k}\zeta)\zeta \end{aligned} \quad (6.39)$$

$$\begin{aligned} (\partial_z f)_{i,j,k}^{n+1} &= (\partial_z f)_{i,j,k}^* \\ &+ (B15_{i,j,k} + B3_{i,j,k}\xi)\xi \\ &+ (B7_{i,j,k}\eta + B10_{i,j,k} + B16_{i,j,k}\xi)\eta \\ &+ (3B11_{i,j,k}\zeta + 2B12_{i,j,k}\xi + 2B13_{i,j,k}\eta + 2B14_{i,j,k})\zeta \end{aligned} \quad (6.40)$$

上式中の $B1 \sim B16$ の値は, 次式より求める.

$$B1_{i,j,k} = [-2(f_{i+1,j,k}^* - f_{i,j,k}^*) + \{(\partial_x f)_{i+1,j,k}^* + (\partial_x f)_{i,j,k}^*\} \Delta x] / \Delta x^3 \quad (6.41)$$

$$B2_{i,j,k} = -[B17_{i,j,k} + \{(\partial_x f)_{i,j+1,k}^* - (\partial_x f)_{i,j,k}^*\} \Delta x] / \Delta x^2 \Delta y \quad (6.42)$$

$$B3_{i,j,k} = -[B18_{i,j,k} + \{(\partial_x f)_{i,j,k+1}^* - (\partial_x f)_{i,j,k}^*\} \Delta x] / \Delta x^2 \Delta z \quad (6.43)$$

$$B4_{i,j,k} = [3(f_{i+1,j,k}^* - f_{i,j,k}^*) + \{(\partial_x f)_{i+1,j,k}^* + 2(\partial_x f)_{i,j,k}^*\} \Delta x] / \Delta x^2 \quad (6.44)$$

$$B5_{i,j,k} = [B17_{i,j,k} + \{(\partial_x f)_{i,j+1,k}^* - (\partial_x f)_{i,j,k}^*\} \Delta x + \{(\partial_y f)_{i+1,j,k}^* - (\partial_y f)_{i,j,k}^*\} \Delta y] / \Delta x \Delta z \quad (6.45)$$

$$B6_{i,j,k} = [-2(f_{i,j+1,k}^* - f_{i,j,k}^*) + \{(\partial_y f)_{i,j+1,k}^* + (\partial_y f)_{i,j,k}^*\} \Delta y] / \Delta y^3 \quad (6.46)$$

$$B7_{i,j,k} = -[B19_{i,j,k} + \{(\partial_y f)_{i,j,k+1}^* - (\partial_y f)_{i,j,k}^*\} \Delta y] / \Delta y^2 \Delta z \quad (6.47)$$

$$B8_{i,j,k} = -[B17_{i,j,k} + \{(\partial_y f)_{i+1,j,k}^* - (\partial_y f)_{i,j,k}^*\} \Delta y] / \Delta x \Delta y^2 \quad (6.48)$$

$$B9_{i,j,k} = [3(f_{i,j+1,k}^* - f_{i,j,k}^*) + \{(\partial_y f)_{i,j+1,k}^* + 2(\partial_y f)_{i,j,k}^*\} \Delta y] / \Delta y^2 \quad (6.49)$$

$$B10_{i,j,k} = [B19_{i,j,k} + \{(\partial_y f)_{i,j,k+1}^* - (\partial_y f)_{i,j,k}^*\} \Delta y + \{(\partial_z f)_{i,j+1,k}^* - (\partial_z f)_{i,j,k}^*\} \Delta z] / \Delta y \Delta z \quad (6.50)$$

$$B11_{i,j,k} = [-2(f_{i,j,k+1}^* - f_{i,j,k}^*) + \{(\partial_z f)_{i,j,k+1}^* + (\partial_z f)_{i,j,k}^*\} \Delta z] / \Delta z^3 \quad (6.51)$$

$$B12_{i,j,k} = -[B18_{i,j,k} + \{(\partial_z f)_{i+1,j,k}^* - (\partial_z f)_{i,j,k}^*\} \Delta z] / \Delta x \Delta z^2 \quad (6.52)$$

$$B13_{i,j,k} = -[B19_{i,j,k} + \{(\partial_z f)_{i,j+1,k}^* - (\partial_z f)_{i,j,k}^*\} \Delta z] / \Delta y \Delta z^2 \quad (6.53)$$

$$B14_{i,j,k} = [3(f_{i,j,k+1}^* - f_{i,j,k}^*) + \{(\partial_z f)_{i,j,k+1}^* + 2(\partial_z f)_{i,j,k}^*\} \Delta z] / \Delta z^2 \quad (6.54)$$

$$B15_{i,j,k} = [B18_{i,j,k} + \{(\partial_z f)_{i+1,j,k}^* - (\partial_z f)_{i,j,k}^*\} \Delta z + \{(\partial_x f)_{i,j,k+1}^* - (\partial_x f)_{i,j,k}^*\} \Delta x] / \Delta x \Delta z \quad (6.55)$$

$$B16_{i,j,k} = [B17_{i,j,k} + f_{i,j,k+1}^* - (f_{i,j+1,k+1}^* + f_{i+1,j,k+1}^*) + f_{i+1,j+1,k+1}^*] / \Delta x \Delta y \Delta z \quad (6.56)$$

ここで,

$$B17_{i,j,k} = -f_{i,j,k}^* + f_{i+1,j,k}^* + f_{i,j+1,k}^* - f_{i+1,j+1,k}^* \quad (6.57)$$

$$B18_{i,j,k} = -f_{i,j,k}^* + f_{i+1,j,k}^* + f_{i,j,k+1}^* - f_{i+1,j,k+1}^* \quad (6.58)$$

$$B19_{i,j,k} = -f_{i,j,k}^* + f_{i,j+1,k}^* + f_{i,j,k+1}^* - f_{i,j+1,k+1}^* \quad (6.59)$$

$$\xi = -u_{i,j,k}^* \Delta t \quad (6.60)$$

$$\eta = -v_{i,j,k}^* \Delta t \quad (6.61)$$

$$\zeta = -w_{i,j,k}^* \Delta t \quad (6.62)$$

である。ξ, η, ζ の式中の流速は、 f^* と同じ空間位置において評価しなければならないため、それぞれ以下のように設定する。

$$u_{i,j,k}^* = \frac{1}{2} (u_{i-1/2,j,k}^* + u_{i+1/2,j,k}^*) \quad (6.63)$$

$$v_{i,j,k}^* = \frac{1}{2} (v_{i,j-1/2,k}^* + v_{i,j+1/2,k}^*) \quad (6.64)$$

$$w_{i,j,k}^* = \frac{1}{2} (w_{i,j,k-1/2}^* + w_{i,j,k+1/2}^*) \quad (6.65)$$

上記の $B1 \sim B19$ の式は, $u_{i,j,k}^* < 0$, $v_{i,j,k}^* < 0$, $w_{i,j,k}^* < 0$ において導かれたものである. $u_{i,j,k}^* \geq 0$ であれば, $i+1$ を $i-1$, Δx を $-\Delta x$ とし, $v_{i,j,k}^* \geq 0$ であれば, $j+1$ を $j-1$, Δy を $-\Delta y$ とし, $w_{i,j,k}^* \geq 0$ であれば, $k+1$ を $k-1$, Δz を $-\Delta z$ とすればよい. ξ , η , ζ の正負で場合分けして整理すると, 以下のようになる.

- ・ $\xi > 0$: $i+1$, Δx を用いる
- ・ $\xi \leq 0$: $i-1$, $-\Delta x$ を用いる
- ・ $\eta > 0$: $j+1$, Δy を用いる
- ・ $\eta \leq 0$: $j-1$, $-\Delta y$ を用いる
- ・ $\zeta > 0$: $k+1$, Δz を用いる
- ・ $\zeta \leq 0$: $k-1$, $-\Delta z$ を用いる

6.2.3 圧力と流速の算出

支配方程式 (6.13), (6.14), (6.15) をオイラー陽解法を用いて離散化すると, 以下のようになる.

$$u_{i+1/2,j,k}^{n+1} = u_{i+1/2,j,k}^n + \Delta t (Ax_{i+1/2,j,k} + Vx_{i+1/2,j,k} + Px_{i+1/2,j,k} - g \sin \theta) \quad (6.66)$$

$$v_{i,j+1/2,k}^{n+1} = v_{i,j+1/2,k}^n + \Delta t (Ay_{i,j+1/2,k} + Vy_{i,j+1/2,k} + Py_{i,j+1/2,k}) \quad (6.67)$$

$$w_{i,j,k+1/2}^{n+1} = w_{i,j,k+1/2}^n + \Delta t (Az_{i,j,k+1/2} + Vz_{i,j,k+1/2} + Pz_{i,j,k+1/2} - g \cos \theta) \quad (6.68)$$

ここで, A , V , P はそれぞれ移流項, 拡散項 + SGS 応力項, 圧力項の離散式である. 上式を以下の3段階に分離して計算する.

第1段階:

$$u_{i+1/2,j,k}^\dagger = u_{i+1/2,j,k}^n + \Delta t (Px_{i+1/2,j,k}^n) \quad (6.69)$$

$$v_{i,j+1/2,k}^\dagger = v_{i,j+1/2,k}^n + \Delta t (Py_{i,j+1/2,k}^n) \quad (6.70)$$

$$w_{i,j,k+1/2}^\dagger = w_{i,j,k+1/2}^n + \Delta t (Pz_{i,j,k+1/2}^n) \quad (6.71)$$

第2段階:

$$u_{i+1/2,j,k}^\ddagger = u_{i+1/2,j,k}^\dagger + \Delta t (Vx_{i+1/2,j,k}^\dagger - g \sin \theta) \quad (6.72)$$

$$v_{i,j+1/2,k}^\ddagger = v_{i,j+1/2,k}^\dagger + \Delta t (Vy_{i,j+1/2,k}^\dagger) \quad (6.73)$$

$$w_{i,j,k+1/2}^\ddagger = w_{i,j,k+1/2}^\dagger + \Delta t (Vz_{i,j,k+1/2}^\dagger - g \cos \theta) \quad (6.74)$$

第3段階:

$$u_{i+1/2,j,k}^{n+1} = u_{i+1/2,j,k}^\ddagger + \Delta t (Ax_{i+1/2,j,k}^\ddagger) \quad (6.75)$$

$$v_{i,j+1/2,k}^{n+1} = v_{i,j+1/2,k}^{\ddagger} + \Delta t \left(Ay_{i,j+1/2,k}^{\ddagger} \right) \quad (6.76)$$

$$w_{i,j,k+1/2}^{n+1} = w_{i,j,k+1/2}^{\ddagger} + \Delta t \left(Az_{i,j,k+1/2}^{\ddagger} \right) \quad (6.77)$$

ここで、添字 †, ‡ は、それぞれ第 1 段階、第 2 段階終了時の流速の値であることを示す。

圧力は連続方程式から導かれるポアソン方程式に従うこととする。時刻 t^{n+1} での流速を満足するように、連続方程式を中央差分を用いて離散化すると、以下ようになる。

$$\frac{u_{i+1/2,j,k}^{n+1} - u_{i-1/2,j,k}^{n+1}}{\Delta x} + \frac{v_{i,j+1/2,k}^{n+1} - v_{i,j-1/2,k}^{n+1}}{\Delta y} + \frac{w_{i,j,k+1/2}^{n+1} - w_{i,j,k-1/2}^{n+1}}{\Delta z} = 0 \quad (6.78)$$

上式から圧力に関するポアソン方程式を得るために、以下の式を用いる。

$$u_{i+1/2,j,k}^{n+1} = \alpha_{i+1/2,j,k} - \frac{\Delta t}{\rho} \left(\frac{p_{i+1,j,k}^{n+1} - p_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta x} \right) \quad (6.79)$$

$$v_{i,j+1/2,k}^{n+1} = \beta_{i,j+1/2,k} - \frac{\Delta t}{\rho} \left(\frac{p_{i,j+1,k}^{n+1} - p_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta y} \right) \quad (6.80)$$

$$w_{i,j,k+1/2}^{n+1} = \gamma_{i,j,k+1/2} - \frac{\Delta t}{\rho} \left(\frac{p_{i,j,k+1}^{n+1} - p_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta z} \right) \quad (6.81)$$

ここで、 α , β , γ は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \alpha_{i+1/2,j,k} = & u_{i+1/2,j,k}^n \\ & - \Delta t \left(\frac{u_{i+1,j,k}^n u_{i+1,j,k}^n - u_{i,j,k}^n u_{i,j,k}^n}{\Delta x} \right. \\ & + \frac{u_{i+1/2,j+1/2,k}^n v_{i+1/2,j+1/2,k}^n - u_{i+1/2,j-1/2,k}^n v_{i+1/2,j-1/2,k}^n}{\Delta y} \\ & \left. + \frac{u_{i+1/2,j,k+1/2}^n w_{i+1/2,j,k+1/2}^n - u_{i+1/2,j,k-1/2}^n w_{i+1/2,j,k-1/2}^n}{\Delta z} \right) \\ & + \Delta t (\nu + SGS_x) \left(\frac{u_{i+3/2,j,k}^n - 2u_{i+1/2,j,k}^n + u_{i-1/2,j,k}^n}{\Delta x^2} \right. \\ & + \frac{u_{i+1/2,j+1,k}^n - 2u_{i+1/2,j,k}^n + u_{i+1/2,j-1,k}^n}{\Delta y^2} \\ & \left. + \frac{u_{i+1/2,j,k+1}^n - 2u_{i+1/2,j,k}^n + u_{i+1/2,j,k-1}^n}{\Delta z^2} \right) - \Delta t \cdot g \sin \theta \end{aligned} \quad (6.82)$$

$$\begin{aligned}
\beta_{i,j+1/2,k} &= v_{i,j+1/2,k}^n \\
&- \Delta t \left(\frac{u_{i+1/2,j+1/2,k}^n v_{i+1/2,j+1/2,k}^n - u_{i-1/2,j+1/2,k}^n v_{i-1/2,j+1/2,k}^n}{\Delta x} \right. \\
&+ \frac{v_{i+1,j,k}^n v_{i+1,j,k}^n - v_{i,j,k}^n v_{i,j,k}^n}{\Delta y} \\
&+ \left. \frac{v_{i,j+1/2,k+1/2}^n w_{i,j+1/2,k+1/2}^n - v_{i,j+1/2,k-1/2}^n w_{i,j+1/2,k-1/2}^n}{\Delta z} \right) \\
&+ \Delta t (\nu + SGS_y) \left(\frac{v_{i+1,j+1/2,k}^n - 2v_{i,j+1/2,k}^n + v_{i-1,j+1/2,k}^n}{\Delta x^2} \right. \\
&+ \frac{v_{i,j+3/2,k}^n - 2v_{i,j+1/2,k}^n + v_{i,j-1/2,k}^n}{\Delta y^2} \\
&+ \left. \frac{v_{i,j+1/2,k+1}^n - 2v_{i,j+1/2,k}^n + v_{i,j+1/2,k-1}^n}{\Delta z^2} \right) \tag{6.83}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\gamma_{i,j,k+1/2} &= w_{i,j,k+1/2}^n \\
&- \Delta t \left(\frac{u_{i+1/2,j,k+1/2}^n w_{i+1/2,j,k+1/2}^n - u_{i-1/2,j,k+1/2}^n w_{i-1/2,j,k+1/2}^n}{\Delta x} \right. \\
&+ \frac{v_{i,j+1/2,k+1/2}^n w_{i,j+1/2,k+1/2}^n - v_{i,j-1/2,k+1/2}^n w_{i,j-1/2,k+1/2}^n}{\Delta y} \\
&+ \left. \frac{w_{i,j,k+1}^n w_{i,j,k+1}^n - w_{i,j,k}^n w_{i,j,k}^n}{\Delta z} \right) \\
&+ \Delta t (\nu + SGS_z) \left(\frac{w_{i+1,j,k+1/2}^n - 2w_{i,j,k+1/2}^n + w_{i-1,j,k+1/2}^n}{\Delta x^2} \right. \\
&+ \frac{w_{i,j+1,k+1/2}^n - 2w_{i,j,k+1/2}^n + w_{i,j-1,k+1/2}^n}{\Delta y^2} \\
&+ \left. \frac{w_{i,j,k+3/2}^n - 2w_{i,j,k+1/2}^n + w_{i,j,k-1/2}^n}{\Delta z^2} \right) - \Delta t \cdot g \cos \theta \tag{6.84}
\end{aligned}$$

ここで, SGS_x , SGS_y , SGS_z は次式で与えられる.

$$\begin{aligned}
SGS_x &= (C_s \Delta)^2 \sqrt{\frac{1}{2}} \\
&\left\{ \frac{2}{\Delta x} \left(u_{i+1/2,j,k}^n - u_{i-1/2,j,k}^n \right) \right. \\
&+ \frac{1}{4\Delta y} \left(u_{i-1/2,j+1,k}^n + u_{i+1/2,j+1,k}^n - u_{i-1/2,j-1,k}^n - u_{i+1/2,j-1,k}^n \right) \\
&+ \frac{1}{4\Delta x} \left(v_{i+1,j+1/2,k}^n + v_{i+1,j-1/2,k}^n - v_{i-1,j+1/2,k}^n - v_{i-1,j-1/2,k}^n \right) \\
&+ \frac{1}{4\Delta z} \left(u_{i+1/2,j,k+1}^n + u_{i-1/2,j,k+1}^n - u_{i+1/2,j,k-1}^n - u_{i-1/2,j,k-1}^n \right) \\
&+ \left. \frac{1}{4\Delta x} \left(w_{i+1,j,k+1/2}^n + w_{i+1,j,k-1/2}^n - w_{i-1,j,k+1/2}^n - w_{i-1,j,k-1/2}^n \right) \right\} \tag{6.85}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
SGS_y &= (C_s \Delta)^2 \sqrt{\frac{1}{2}} \\
&\left| \left\{ \frac{1}{4\Delta x} \left(v_{i+1,j+1/2,k}^n + v_{i+1,j-1/2,k}^n - v_{i-1,j+1/2,k}^n - v_{i-1,j-1/2,k}^n \right) \right. \right. \\
&+ \frac{1}{4\Delta y} \left(u_{i-1/2,j+1,k}^n + u_{i+1/2,j+1,k}^n - u_{i-1/2,j-1,k}^n - u_{i+1/2,j-1,k}^n \right) \\
&+ \frac{2}{\Delta y} \left(v_{i,j+1/2,k}^n - v_{i,j-1/2,k}^n \right) \\
&+ \frac{1}{4\Delta z} \left(v_{i,j+1/2,k+1}^n + v_{i,j-1/2,k+1}^n - v_{i,j+1/2,k-1}^n - v_{i,j-1/2,k-1}^n \right) \\
&\left. \left. + \frac{1}{4\Delta y} \left(w_{i,j+1,k+1/2}^n + w_{i,j+1,k-1/2}^n - w_{i,j-1,k+1/2}^n - w_{i,j-1,k-1/2}^n \right) \right\} \right| \quad (6.86)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
SGS_z &= (C_s \Delta)^2 \sqrt{\frac{1}{2}} \\
&\left| \left\{ \frac{1}{4\Delta x} \left(w_{i+1,j,k+1/2}^n + w_{i+1,j,k-1/2}^n - w_{i-1,j,k+1/2}^n - w_{i-1,j,k-1/2}^n \right) \right. \right. \\
&+ \frac{1}{4\Delta z} \left(u_{i+1/2,j,k+1}^n + u_{i-1/2,j,k+1}^n - u_{i+1/2,j,k-1}^n - u_{i-1/2,j,k-1}^n \right) \\
&+ \frac{1}{4\Delta y} \left(w_{i,j+1,k+1/2}^n + w_{i,j+1,k-1/2}^n - w_{i,j-1,k+1/2}^n - w_{i,j-1,k-1/2}^n \right) \\
&+ \frac{1}{4\Delta z} \left(v_{i,j+1/2,k+1}^n + v_{i,j-1/2,k+1}^n - v_{i,j+1/2,k-1}^n - v_{i,j-1/2,k-1}^n \right) \\
&\left. \left. + \frac{2}{\Delta z} \left(w_{i,j,k+1/2}^n - w_{i,j,k-1/2}^n \right) \right\} \right| \quad (6.87)
\end{aligned}$$

式 (6.79), (6.80), (6.81) を離散化された連続方程式 (6.78) に代入すると, 次式を得る.

$$\frac{p_{i+1,j,k}^{n+1} - 2p_{i,j,k}^{n+1} + p_{i-1,j,k}^{n+1}}{\Delta x} + \frac{p_{i,j+1,k}^{n+1} - 2p_{i,j,k}^{n+1} + p_{i,j-1,k}^{n+1}}{\Delta y} + \frac{p_{i,j,k+1}^{n+1} - 2p_{i,j,k}^{n+1} + p_{i,j,k-1}^{n+1}}{\Delta z} = R_{i,j,k}^n \quad (6.88)$$

これは, 圧力に関するポアソン方程式

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = R_{i,j,k}^n \quad (6.89)$$

を離散化したものである. ここで,

$$R_{i,j,k}^n = \frac{\rho}{\Delta t} \left(\frac{\alpha_{i+1/2,j,k}^\dagger - \alpha_{i-1/2,j,k}^\dagger}{\Delta x} + \frac{\beta_{i,j+1/2,k}^\dagger - \beta_{i,j-1/2,k}^\dagger}{\Delta y} + \frac{\gamma_{i,j,k+1/2}^\dagger - \gamma_{i,j,k-1/2}^\dagger}{\Delta z} \right) \quad (6.90)$$

である. さらに式を整理すると, 次式を得る.

$$\begin{aligned}
p_{i,j,k}^{n+1} &= \frac{1}{2(1/\Delta x^2 + 1/\Delta y^2 + 1/\Delta z^2)} \\
&\left\{ \left(\frac{p_{i+1,j,k}^{n+1} + p_{i-1,j,k}^{n+1}}{\Delta x^2} + \frac{p_{i,j+1,k}^{n+1} + p_{i,j-1,k}^{n+1}}{\Delta y^2} + \frac{p_{i,j,k+1}^{n+1} + p_{i,j,k-1}^{n+1}}{\Delta z^2} \right) - R_{i,j,k}^n \right\} \quad (6.91)
\end{aligned}$$

以上で離散化された支配方程式が出揃った。計算手順は以下のようになる。

1. 圧力の式を計算する ($u^n, v^n, w^n \rightarrow p^{n+1}$)
2. 第1段階の式を計算する ($u^n, v^n, w^n, p^{n+1} \rightarrow u^\dagger, v^\dagger, w^\dagger$)
3. 第2段階の式を計算する ($u^\dagger, v^\dagger, w^\dagger \rightarrow u^\ddagger, v^\ddagger, w^\ddagger$)
4. 第3段階の式を計算する ($u^\ddagger, v^\ddagger, w^\ddagger \rightarrow u^{n+1}, v^{n+1}, w^{n+1}$)

(1) 圧力の算出

圧力の式は、連立1次方程式である。本計算プログラムでは、連続1次方程式の反復解法のひとつとして流体計算でよく用いられているSOR (Successive Over-Relaxation) 法を用いて計算する (例えば, Hino et al., 1983; 1985)。反復回数を m で表わすと、反復計算する式は以下のようになる。

$${}^{(m)}p_{i,j,k}^{n+1} = \omega {}^{(m)}\tilde{p}_{i,j,k}^{n+1} + (1 - \omega) {}^{(m-1)}p_{i,j,k}^{n+1} \quad (6.92)$$

ここで、 ω は緩和係数であり、 ${}^{(m+1)}\tilde{p}_{i,j,k}^{n+1}$ は次式で表わされる。

$${}^{(m)}\tilde{p}_{i,j,k}^{n+1} = \frac{1}{2(1/\Delta x^2 + 1/\Delta y^2 + 1/\Delta z^2)} \left\{ \left(\frac{{}^{(m-1)}p_{i+1,j,k}^{n+1} + {}^{(m)}p_{i-1,j,k}^{n+1}}{\Delta x^2} + \frac{{}^{(m-1)}p_{i,j+1,k}^{n+1} + {}^{(m)}p_{i,j-1,k}^{n+1}}{\Delta y^2} + \frac{{}^{(m-1)}p_{i,j,k+1}^{n+1} + {}^{(m)}p_{i,j,k-1}^{n+1}}{\Delta z^2} \right) - R_{i,j,k}^n \right\} \quad (6.93)$$

初期値を

$${}^{(0)}p^{n+1} = 0 \quad (6.94)$$

として、上式を繰り返し計算し、すべての領域において下式を満たせば計算を終了する。

$$\left| {}^{(m)}p_{i,j,k}^{n+1} - {}^{(m-1)}p_{i,j,k}^{n+1} \right| < \varepsilon \quad (6.95)$$

本計算プログラムでは、 ε を 0.1N/m^2 としている。

(2) 流速の算出 (第1段階)

第1段階の式には、圧力項が含まれている。直前に圧力の値が更新されているので (p^{n+1})、その値を用いて次式により計算する。

$$u_{i+1/2,j,k}^\dagger = u_{i+1/2,j,k}^n - \frac{1}{\rho} \frac{\Delta t}{\Delta x} \left(p_{i+1,j,k}^{n+1} - p_{i,j,k}^{n+1} \right) \quad (6.96)$$

$$v_{i,j+1/2,k}^\dagger = v_{i,j+1/2,k}^n - \frac{1}{\rho} \frac{\Delta t}{\Delta y} \left(p_{i,j+1,k}^{n+1} - p_{i,j,k}^{n+1} \right) \quad (6.97)$$

$$w_{i,j,k+1/2}^\dagger = w_{i,j,k+1/2}^n - \frac{1}{\rho} \frac{\Delta t}{\Delta z} \left(p_{i,j,k+1}^{n+1} - p_{i,j,k}^{n+1} \right) \quad (6.98)$$

(3) 流速の算出 (第 2 段階)

第 2 段階の式には、拡散項と SGS 応力項が含まれている。直前に流速の値が更新されているので $(u^\dagger, v^\dagger, w^\dagger)$ ，その値を用いて次式により計算する。

$$\begin{aligned} u_{i+1/2,j,k}^\dagger &= u_{i+1/2,j,k}^\dagger \\ \Delta t \cdot VIS_x &\left(\frac{u_{i+3/2,j,k}^\dagger - 2u_{i+1/2,j,k}^\dagger + u_{i-1/2,j,k}^\dagger}{\Delta x^2} \right. \\ &+ \frac{u_{i+1/2,j+1,k}^\dagger - 2u_{i+1/2,j,k}^\dagger + u_{i+1/2,j-1,k}^\dagger}{\Delta y^2} \\ &\left. + \frac{u_{i+1/2,j,k+1}^\dagger - 2u_{i+1/2,j,k}^\dagger + u_{i+1/2,j,k-1}^\dagger}{\Delta z^2} \right) - \Delta t \cdot \sin \theta \end{aligned} \quad (6.99)$$

$$\begin{aligned} v_{i,j+1/2,k}^\dagger &= v_{i,j+1/2,k}^\dagger \\ + \Delta t \cdot VIS_y &\left(\frac{v_{i+1,j+1/2,k}^\dagger - 2v_{i,j+1/2,k}^\dagger + v_{i-1,j+1/2,k}^\dagger}{\Delta x^2} \right. \\ &+ \frac{v_{i,j+3/2,k}^\dagger - 2v_{i,j+1/2,k}^\dagger + v_{i,j-1/2,k}^\dagger}{\Delta y^2} \\ &\left. + \frac{v_{i,j+1/2,k+1}^\dagger - 2v_{i,j+1/2,k}^\dagger + v_{i,j+1/2,k-1}^\dagger}{\Delta z^2} \right) \end{aligned} \quad (6.100)$$

$$\begin{aligned} w_{i,j,k+1/2}^\dagger &= w_{i,j,k+1/2}^\dagger \\ + \Delta t \cdot VIS_z &\left(\frac{w_{i+1,j,k+1/2}^\dagger - 2w_{i,j,k+1/2}^\dagger + w_{i-1,j,k+1/2}^\dagger}{\Delta x^2} \right. \\ &+ \frac{w_{i,j+1,k+1/2}^\dagger - 2w_{i,j,k+1/2}^\dagger + w_{i,j-1,k+1/2}^\dagger}{\Delta y^2} \\ &\left. + \frac{w_{i,j,k+3/2}^\dagger - 2w_{i,j,k+1/2}^\dagger + w_{i,j,k-1/2}^\dagger}{\Delta z^2} \right) - \Delta t \cdot g \cos \theta \end{aligned} \quad (6.101)$$

ここで, VIS_x , VIS_y , VIS_z は次式で与えられる.

$$\begin{aligned}
VIS_x = \nu + (C_s \Delta)^2 \sqrt{\frac{1}{2}} & \left| \left(\frac{u_{i+3/2,j,k}^\dagger - u_{i-1/2,j,k}^\dagger}{\Delta x} + \frac{u_{i+1/2,j+1,k}^\dagger - u_{i+1/2,j-1,k}^\dagger}{2\Delta y} \right. \right. \\
& + \frac{v_{i+1,j+1/2,k}^\dagger + v_{i+1,j-1/2,k}^\dagger - v_{i,j+1/2,k}^\dagger - v_{i,j-1/2,k}^\dagger}{2\Delta x} + \frac{u_{i+1/2,j,k+1}^\dagger - u_{i+1/2,j,k-1}^\dagger}{2\Delta z} \\
& \left. \left. + \frac{w_{i+1,j,k+1/2}^\dagger + w_{i+1,j,k-1/2}^\dagger - w_{i,j,k+1/2}^\dagger - w_{i,j,k-1/2}^\dagger}{2\Delta x} \right) \right| \quad (6.102)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
VIS_y = \nu + (C_s \Delta)^2 \sqrt{\frac{1}{2}} & \left| \left(\frac{v_{i+1,j+1/2,k}^\dagger - v_{i-1,j+1/2,k}^\dagger}{2\Delta x} \right. \right. \\
& + \frac{u_{i+1/2,j+1,k}^\dagger + u_{i-1/2,j+1,k}^\dagger - u_{i+1/2,j,k}^\dagger - u_{i-1/2,j,k}^\dagger}{2\Delta y} + \frac{v_{i,j+3/2,k}^\dagger - v_{i,j-1/2,k}^\dagger}{\Delta y} \\
& + \frac{v_{i,j+1/2,k+1}^\dagger - v_{i,j+1/2,k-1}^\dagger}{2\Delta z} \\
& \left. \left. + \frac{w_{i,j+1,k+1/2}^\dagger + w_{i,j+1,k-1/2}^\dagger - w_{i,j,k+1/2}^\dagger - w_{i,j,k-1/2}^\dagger}{2\Delta y} \right) \right| \quad (6.103)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
VIS_z = \nu + (C_s \Delta)^2 \sqrt{\frac{1}{2}} & \left| \left(\frac{w_{i+1,j,k+1/2}^\dagger - w_{i-1,j,k+1/2}^\dagger}{2\Delta x} \right. \right. \\
& + \frac{u_{i+1/2,j,k+1}^\dagger + u_{i-1/2,j,k+1}^\dagger - u_{i+1/2,j,k}^\dagger - u_{i-1/2,j,k}^\dagger}{2\Delta z} + \frac{w_{i,j+1,k+1/2}^\dagger - w_{i,j,k+1/2}^\dagger}{2\Delta y} \\
& + \frac{v_{i,j+1/2,k+1}^\dagger + v_{i,j-1/2,k+1}^\dagger - v_{i,j+1/2,k}^\dagger - v_{i,j-1/2,k}^\dagger}{2\Delta z} \\
& \left. \left. + \frac{w_{i,j,k+3/2}^\dagger - w_{i,j,k-1/2}^\dagger}{\Delta z} \right) \right| \quad (6.104)
\end{aligned}$$

(4) 流速の算出 (第3段階)

第3段階の式は, 以下に示す3次元移流方程式を離散化したものである.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = 0 \quad (6.105)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = 0 \quad (6.106)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (6.107)$$

これは, 自由水面の決定の際に用いた密度関数において f を u , v , w に変えたものである. 密度関数の計算と同様に, CIP法を用いた分離解法により計算する.

非移流相 密度関数 f での計算と同様に考えると、非移流相の式は以下ようになる。

x 方向成分：

$$\frac{\partial u}{\partial t} = 0 \quad (6.108)$$

$$\frac{\partial(\partial_x u)}{\partial t} = -(\partial_x u) \frac{\partial u}{\partial x} - (\partial_y u) \frac{\partial v}{\partial x} - (\partial_z u) \frac{\partial w}{\partial x} \quad (6.109)$$

$$\frac{\partial(\partial_y u)}{\partial t} = -(\partial_x u) \frac{\partial u}{\partial y} - (\partial_y u) \frac{\partial v}{\partial y} - (\partial_z u) \frac{\partial w}{\partial y} \quad (6.110)$$

$$\frac{\partial(\partial_z u)}{\partial t} = -(\partial_x u) \frac{\partial u}{\partial z} - (\partial_y u) \frac{\partial v}{\partial z} - (\partial_z u) \frac{\partial w}{\partial z} \quad (6.111)$$

y 方向成分：

$$\frac{\partial v}{\partial t} = 0 \quad (6.112)$$

$$\frac{\partial(\partial_x v)}{\partial t} = -(\partial_x v) \frac{\partial u}{\partial x} - (\partial_y v) \frac{\partial v}{\partial x} - (\partial_z v) \frac{\partial w}{\partial x} \quad (6.113)$$

$$\frac{\partial(\partial_y v)}{\partial t} = -(\partial_x v) \frac{\partial u}{\partial y} - (\partial_y v) \frac{\partial v}{\partial y} - (\partial_z v) \frac{\partial w}{\partial y} \quad (6.114)$$

$$\frac{\partial(\partial_z v)}{\partial t} = -(\partial_x v) \frac{\partial u}{\partial z} - (\partial_y v) \frac{\partial v}{\partial z} - (\partial_z v) \frac{\partial w}{\partial z} \quad (6.115)$$

z 方向成分：

$$\frac{\partial w}{\partial t} = 0 \quad (6.116)$$

$$\frac{\partial(\partial_x w)}{\partial t} = -(\partial_x w) \frac{\partial u}{\partial x} - (\partial_y w) \frac{\partial v}{\partial x} - (\partial_z w) \frac{\partial w}{\partial x} \quad (6.117)$$

$$\frac{\partial(\partial_y w)}{\partial t} = -(\partial_x w) \frac{\partial u}{\partial y} - (\partial_y w) \frac{\partial v}{\partial y} - (\partial_z w) \frac{\partial w}{\partial y} \quad (6.118)$$

$$\frac{\partial(\partial_z w)}{\partial t} = -(\partial_x w) \frac{\partial u}{\partial z} - (\partial_y w) \frac{\partial v}{\partial z} - (\partial_z w) \frac{\partial w}{\partial z} \quad (6.119)$$

これらの式を、時間についてはオイラー陽解法、空間については中央差分を用いて離散化すると、以下ようになる。

x 方向成分：

$$u_{i+1/2,j,k}^* = u_{i+1/2,j,k}^\dagger \quad (6.120)$$

$$\begin{aligned} (\partial_x u)_{i+1/2,j,k}^* &= (\partial_x u)_{i+1/2,j,k}^n \\ &- \frac{\Delta t}{2\Delta x} (\partial_x u)_{i+1/2,j,k}^n \left(u_{i+3/2,j,k}^\dagger - u_{i-1/2,j,k}^\dagger \right) \\ &- \frac{\Delta t}{2\Delta x} (\partial_y u)_{i+1/2,j,k}^n \left(v_{i+1,j+1/2,k}^\dagger + v_{i+1,j-1/2,k}^\dagger - v_{i,j+1/2,k}^\dagger - v_{i,j-1/2,k}^\dagger \right) \\ &- \frac{\Delta t}{2\Delta x} (\partial_z u)_{i+1/2,j,k}^n \left(w_{i+1,j,k+1/2}^\dagger + w_{i+1,j,k-1/2}^\dagger - w_{i,j,k+1/2}^\dagger - w_{i,j,k-1/2}^\dagger \right) \end{aligned} \quad (6.121)$$

$$\begin{aligned}
(\partial_y u)_{i+1/2,j,k}^* &= (\partial_y u)_{i+1/2,j,k}^n \\
&- \frac{\Delta t}{2\Delta y} (\partial_x u)_{i+1/2,j,k}^n \left(u_{i,j+1/2,k}^\dagger - u_{i,j-1/2,k}^\dagger \right) \\
&- \frac{\Delta t}{2\Delta y} (\partial_y u)_{i+1/2,j,k}^n \left(v_{i+1,j+1/2,k}^\dagger + v_{i,j+1/2,k}^\dagger - v_{i+1,j-1/2,k}^\dagger - v_{i,j-1/2,k}^\dagger \right) \\
&- \frac{\Delta t}{8\Delta y} (\partial_z u)_{i+1/2,j,k}^n \left(w_{i+1,j+1,k+1/2}^\dagger + w_{i,j+1,k+1/2}^\dagger + w_{i+1,j+1,k-1/2}^\dagger + w_{i,j+1,k-1/2}^\dagger \right. \\
&\quad \left. - w_{i+1,j-1,k+1/2}^\dagger - w_{i,j-1,k+1/2}^\dagger - w_{i+1,j-1,k-1/2}^\dagger - w_{i,j-1,k-1/2}^\dagger \right) \quad (6.122)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
(\partial_z u)_{i+1/2,j,k}^* &= (\partial_z u)_{i+1/2,j,k}^n \\
&- \frac{\Delta t}{2\Delta z} (\partial_x u)_{i+1/2,j,k}^n \left(u_{i+1/2,j,k+1}^\dagger - u_{i+1/2,j,k-1}^\dagger \right) \\
&- \frac{\Delta t}{8\Delta z} (\partial_z u)_{i+1/2,j,k}^n \left(v_{i+1,j+1/2,k+1}^\dagger + v_{i,j+1/2,k+1}^\dagger + v_{i+1,j-1/2,k+1}^\dagger + v_{i,j-1/2,k+1}^\dagger \right. \\
&\quad \left. - v_{i+1,j+1/2,k-1}^\dagger - v_{i,j+1/2,k-1}^\dagger - v_{i+1,j-1/2,k-1}^\dagger - v_{i,j-1/2,k-1}^\dagger \right) \\
&- \frac{\Delta t}{2\Delta z} (\partial_y u)_{i+1/2,j,k}^n \left(w_{i+1,j,k+1/2}^\dagger + w_{i,j,k+1/2}^\dagger - w_{i+1,j,k-1/2}^\dagger - w_{i,j,k-1/2}^\dagger \right) \quad (6.123)
\end{aligned}$$

y 方向成分 :

$$v_{i,j+1/2,k}^* = v_{i,j+1/2,k}^\dagger \quad (6.124)$$

$$\begin{aligned}
(\partial_x v)_{i,j+1/2,k}^* &= (\partial_x v)_{i,j+1/2,k}^n \\
&- \frac{\Delta t}{2\Delta x} (\partial_x v)_{i,j+1/2,k}^n \left(u_{i+1/2,j+1,k}^\dagger + u_{i+1/2,j,k}^\dagger - u_{i-1/2,j+1,k}^\dagger - u_{i-1/2,j,k}^\dagger \right) \\
&- \frac{\Delta t}{2\Delta x} (\partial_y v)_{i,j+1/2,k}^n \left(v_{i+1,j+1/2,k}^\dagger - v_{i-1,j+1/2,k}^\dagger \right) \\
&- \frac{\Delta t}{8\Delta x} (\partial_z v)_{i,j+1/2,k}^n \left(w_{i+1,j,k+1/2}^\dagger + w_{i+1,j+1,k+1/2}^\dagger + w_{i+1,j,k-1/2}^\dagger + w_{i+1,j+1,k-1/2}^\dagger \right. \\
&\quad \left. - w_{i-1,j,k+1/2}^\dagger - w_{i-1,j+1,k+1/2}^\dagger - w_{i-1,j,k-1/2}^\dagger - w_{i-1,j+1,k-1/2}^\dagger \right) \quad (6.125)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
(\partial_y v)_{i,j+1/2,k}^* &= (\partial_y v)_{i,j+1/2,k}^n \\
&- \frac{\Delta t}{2\Delta y} (\partial_x v)_{i,j+1/2,k}^n \left(u_{i+1/2,j+1,k}^\dagger + u_{i-1/2,j+1,k}^\dagger - u_{i+1/2,j,k}^\dagger - u_{i-1/2,j,k}^\dagger \right) \\
&- \frac{\Delta t}{2\Delta y} (\partial_y v)_{i,j+1/2,k}^n \left(v_{i,j+3/2,k}^\dagger - v_{i,j-1/2,k}^\dagger \right) \\
&- \frac{\Delta t}{2\Delta y} (\partial_z v)_{i,j+1/2,k}^n \left(w_{i,j+1,k+1/2}^\dagger + w_{i,j+1,k-1/2}^\dagger - w_{i,j,k+1/2}^\dagger - w_{i,j,k-1/2}^\dagger \right) \quad (6.126)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
(\partial_z v)_{i,j+1/2,k}^* &= (\partial_z v)_{i,j+1/2,k}^n \\
&- \frac{\Delta t}{8\Delta z} (\partial_z v)_{i,j+1/2,k}^n \left(u_{i+1/2,j+1,k+1}^\dagger + u_{i+1/2,j,k+1}^\dagger + u_{i-1/2,j+1,k+1}^\dagger + u_{i-1/2,j,k+1}^\dagger \right. \\
&\quad \left. - u_{i+1/2,j+1,k-1}^\dagger - u_{i+1/2,j,k-1}^\dagger - u_{i-1/2,j+1,k-1}^\dagger - u_{i-1/2,j,k-1}^\dagger \right) \\
&- \frac{\Delta t}{2\Delta z} (\partial_y v)_{i,j+1/2,k}^n \left(v_{i,j+1/2,k+1}^\dagger - v_{i,j+1/2,k-1}^\dagger \right) \\
&- \frac{\Delta t}{2\Delta z} (\partial_y v)_{i,j+1/2,k}^n \left(w_{i,j,k+1/2}^\dagger + w_{i,j+1,k+1/2}^\dagger - w_{i,j,k-1/2}^\dagger - w_{i,j+1,k-1/2}^\dagger \right) \quad (6.127)
\end{aligned}$$

z 方向成分 :

$$w_{i,j,k+1/2}^* = w_{i,j,k+1/2}^\dagger \quad (6.128)$$

$$\begin{aligned}
(\partial_x w)_{i,j,k+1/2}^* &= (\partial_x w)_{i,j,k+1/2}^n \\
&- \frac{\Delta t}{2\Delta x} (\partial_x w)_{i,j,k+1/2}^n \left(u_{i+1/2,j,k}^\dagger + u_{i+1/2,j,k+1}^\dagger - u_{i-1/2,j,k}^\dagger - u_{i-1/2,j,k+1}^\dagger \right) \\
&- \frac{\Delta t}{8\Delta x} (\partial_y w)_{i,j+1/2,k}^n \left(v_{i+1,j+1/2,k}^\dagger + v_{i+1,j-1/2,k}^\dagger + v_{i+1,j+1/2,k+1}^\dagger + v_{i+1,j-1/2,k+1}^\dagger \right. \\
&\quad \left. - v_{i-1,j+1/2,k}^\dagger - v_{i-1,j-1/2,k}^\dagger - v_{i-1,j+1/2,k+1}^\dagger - v_{i-1,j-1/2,k+1}^\dagger \right) \\
&- \frac{\Delta t}{2\Delta x} (\partial_z w)_{i,j+1/2,k}^n \left(w_{i+1,j,k+1/2}^\dagger - w_{i-1,j,k+1/2}^\dagger \right) \quad (6.129)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
(\partial_y w)_{i,j,k+1/2}^* &= (\partial_y w)_{i,j,k+1/2}^n \\
&- \frac{\Delta t}{8\Delta y} (\partial_y w)_{i,j,k+1/2}^n \left(u_{i+1/2,j+1,k}^\dagger + u_{i+1/2,j+1,k+1}^\dagger + u_{i-1/2,j+1,k}^\dagger + u_{i-1/2,j+1,k+1}^\dagger \right. \\
&\quad \left. - u_{i+1/2,j-1,k}^\dagger - u_{i+1/2,j-1,k+1}^\dagger - u_{i-1/2,j-1,k}^\dagger - u_{i-1/2,j-1,k+1}^\dagger \right) \\
&- \frac{\Delta t}{2\Delta y} (\partial_y w)_{i,j,k+1/2}^n \left(v_{i,j+1/2,k}^\dagger + v_{i,j+1/2,k+1}^\dagger - v_{i,j-1/2,k}^\dagger - v_{i,j-1/2,k+1}^\dagger \right) \\
&- \frac{\Delta t}{2\Delta y} (\partial_y w)_{i,j,k+1/2}^n \left(w_{i,j+1,k+1/2}^\dagger - w_{i,j-1,k+1/2}^\dagger \right) \quad (6.130)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
(\partial_z w)_{i,j,k+1/2}^* &= (\partial_z w)_{i,j,k+1/2}^n \\
&- \frac{\Delta t}{2\Delta z} (\partial_z w)_{i,j,k+1/2}^n \left(u_{i+1/2,j,k+1}^\dagger + u_{i-1/2,j,k+1}^\dagger - u_{i+1/2,j,k}^\dagger - u_{i-1/2,j,k}^\dagger \right) \\
&- \frac{\Delta t}{2\Delta z} (\partial_z w)_{i,j,k+1/2}^n \left(v_{i,j+1/2,k+1}^\dagger + v_{i,j-1/2,k+1}^\dagger - v_{i,j+1/2,k}^\dagger - v_{i,j-1/2,k}^\dagger \right) \\
&- \frac{\Delta t}{2\Delta z} (\partial_z w)_{i,j,k+1/2}^n \left(w_{i,j+1,k+3/2}^\dagger - w_{i,j,k-1/2}^\dagger \right) \quad (6.131)
\end{aligned}$$

移流相 移流相の式は以下のようになる。

x 方向成分 :

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = 0 \quad (6.132)$$

$$\frac{\partial(\partial_x u)}{\partial t} + u \frac{\partial(\partial_x u)}{\partial x} + v \frac{\partial(\partial_x u)}{\partial y} + w \frac{\partial(\partial_x u)}{\partial z} = 0 \quad (6.133)$$

$$\frac{\partial(\partial_y u)}{\partial t} + u \frac{\partial(\partial_y u)}{\partial x} + v \frac{\partial(\partial_y u)}{\partial y} + w \frac{\partial(\partial_y u)}{\partial z} = 0 \quad (6.134)$$

$$\frac{\partial(\partial_z u)}{\partial t} + u \frac{\partial(\partial_z u)}{\partial x} + v \frac{\partial(\partial_z u)}{\partial y} + w \frac{\partial(\partial_z u)}{\partial z} = 0 \quad (6.135)$$

y 方向成分 :

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = 0 \quad (6.136)$$

$$\frac{\partial(\partial_x v)}{\partial t} + u \frac{\partial(\partial_x v)}{\partial x} + v \frac{\partial(\partial_x v)}{\partial y} + w \frac{\partial(\partial_x v)}{\partial z} = 0 \quad (6.137)$$

$$\frac{\partial(\partial_y v)}{\partial t} + u \frac{\partial(\partial_y v)}{\partial x} + v \frac{\partial(\partial_y v)}{\partial y} + w \frac{\partial(\partial_y v)}{\partial z} = 0 \quad (6.138)$$

$$\frac{\partial(\partial_z v)}{\partial t} + u \frac{\partial(\partial_z v)}{\partial x} + v \frac{\partial(\partial_z v)}{\partial y} + w \frac{\partial(\partial_z v)}{\partial z} = 0 \quad (6.139)$$

z 方向成分 :

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (6.140)$$

$$\frac{\partial(\partial_x w)}{\partial t} + u \frac{\partial(\partial_x w)}{\partial x} + v \frac{\partial(\partial_x w)}{\partial y} + w \frac{\partial(\partial_x w)}{\partial z} = 0 \quad (6.141)$$

$$\frac{\partial(\partial_y w)}{\partial t} + u \frac{\partial(\partial_y w)}{\partial x} + v \frac{\partial(\partial_y w)}{\partial y} + w \frac{\partial(\partial_y w)}{\partial z} = 0 \quad (6.142)$$

$$\frac{\partial(\partial_z w)}{\partial t} + u \frac{\partial(\partial_z w)}{\partial x} + v \frac{\partial(\partial_z w)}{\partial y} + w \frac{\partial(\partial_z w)}{\partial z} = 0 \quad (6.143)$$

これらの式を, CIP 法を用いて離散化すると, 以下のようになる.

x 方向成分 :

$$\begin{aligned} u_{i+1/2,j,k}^{n+1} &= u_{i+1/2,j,k}^* \\ &+ [(C1\xi_x + C2\eta_x + C3\zeta_x + C4)\xi_x + C5\eta_x + (\partial_x u)_{i+1/2,j,k}^*] \xi_x \\ &+ [(C6\eta_x + C7\zeta_x + C8\xi_x + C9)\eta_x + C10\zeta_x + (\partial_y u)_{i+1/2,j,k}^*] \eta_x \\ &+ [(C11\zeta_x + C12\xi_x + C13\eta_x + C14)\zeta_x + C15\xi_x + (\partial_z u)_{i+1/2,j,k}^*] \zeta_x \\ &+ C16\xi_x \eta_x \zeta_x \end{aligned} \quad (6.144)$$

$$\begin{aligned} (\partial_x u)_{i+1/2,j,k}^{n+1} &= (\partial_x u)_{i+1/2,j,k}^* \\ &+ (3C1\xi_x + 2C2\eta_x + 2C3\zeta_x + 2C4)\xi_x \\ &+ (C5 + C8\eta_x)\eta_x \\ &+ (C12\zeta_x + C15 + C16\eta_x)\zeta_x \end{aligned} \quad (6.145)$$

$$\begin{aligned}
(\partial_y u)_{i+1/2,j,k}^{n+1} &= (\partial_y u)_{i+1/2,j,k}^* \\
&+ (C2\xi_x + C5 + C16\zeta_x)\xi_x \\
&+ (3C6\eta_x + 2C7\zeta_x + 2C8\xi_x + 2C9)\eta_x \\
&+ (C10 + C13\zeta_x)\zeta_x
\end{aligned} \tag{6.146}$$

$$\begin{aligned}
(\partial_z u)_{i+1/2,j,k}^{n+1} &= (\partial_z u)_{i+1/2,j,k}^* \\
&+ (C15 + C3\xi_x)\xi_x \\
&+ (C7\eta_x + C10 + C16\xi_x)\eta_x \\
&+ (3C11\zeta_x + 2C12\xi_x + 2C13\eta_x + 2C14)\zeta_x
\end{aligned} \tag{6.147}$$

ここで,

$$\xi_x = -u_{i+1/2,j,k}^* \Delta t \tag{6.148}$$

$$\eta_x = -\frac{1}{4} \left(v_{i,j+1/2,k}^* + v_{i,j-1/2,k}^* + v_{i+1,j+1/2,k}^* + v_{i+1,j-1/2,k}^* \right) \Delta t \tag{6.149}$$

$$\zeta_x = -\frac{1}{4} \left(w_{i,j,k+1/2}^* + v_{i,j,k-1/2}^* + v_{i+1,j,k+1/2}^* + v_{i+1,j,k-1/2}^* \right) \Delta t \tag{6.150}$$

である.

y 方向成分 :

$$\begin{aligned}
v_{i,j+1/2,k}^{n+1} &= v_{i,j+1/2,k}^* \\
&+ [(D1\xi_y + D2\eta_y + D3\zeta_y + D4)\xi_y + D5\eta_y + (\partial_x v)_{i,j+1/2,k}^*] \xi_y \\
&+ [(D6\eta_y + D7\zeta_y + D8\xi_y + D9)\eta_y + D10\zeta_y + (\partial_y v)_{i,j+1/2,k}^*] \eta_y \\
&+ [(D11\zeta_y + D12\xi_y + D13\eta_y + D14)\zeta_y + D15\xi_y + (\partial_z v)_{i,j+1/2,k}^*] \zeta_y \\
&+ D16\xi_y \eta_y \zeta_y
\end{aligned} \tag{6.151}$$

$$\begin{aligned}
(\partial_x v)_{i,j+1/2,k}^{n+1} &= (\partial_x v)_{i,j+1/2,k}^* \\
&+ (3D1\xi_y + 2D2\eta_y + 2D3\zeta_y + 2D4)\xi_y \\
&+ (D5 + D8\eta_y)\eta_y \\
&+ (D12\zeta_y + D15 + D16\eta_y)\zeta_y
\end{aligned} \tag{6.152}$$

$$\begin{aligned}
(\partial_y v)_{i,j+1/2,k}^{n+1} &= (\partial_y v)_{i,j+1/2,k}^* \\
&+ (D2\xi_y + D5 + D16\zeta_y)\xi_y \\
&+ (3D6\eta_y + 2D7\zeta_y + 2D8\xi_y + 2D9)\eta_y \\
&+ (D10 + D13\zeta_y)\zeta_y
\end{aligned} \tag{6.153}$$

$$\begin{aligned}
(\partial_z v)_{i,j+1/2,k}^{n+1} &= (\partial_z v)_{i,j+1/2,k}^* \\
&+ (D15 + D3\xi_y)\xi_y \\
&+ (D7\eta_y + D10 + D16\xi_y)\eta_y \\
&+ (3D11\zeta_y + 2D12\xi_y + 2D13\eta_y + 2D14)\zeta_y
\end{aligned} \tag{6.154}$$

ここで,

$$\xi_y = -\frac{1}{4} \left(u_{i+1/2,j,k}^* + u_{i-1/2,j,k}^* + u_{i+1/2,j+1,k}^* + u_{i-1/2,j+1,k}^* \right) \Delta t \tag{6.155}$$

$$\eta_y = -v_{i,j+1/2,k}^* \Delta t \tag{6.156}$$

$$\zeta_y = -\frac{1}{4} \left(w_{i,j,k+1/2}^* + v_{i,j,k-1/2}^* + v_{i,j+1,k+1/2}^* + v_{i,j+1,k-1/2}^* \right) \Delta t \tag{6.157}$$

である.

z 方向成分 :

$$\begin{aligned}
w_{i,j,k+1/2}^{n+1} &= w_{i,j,k+1/2}^* \\
&+ [(E1\xi_z + E2\eta_z + E3\zeta_z + E4)\xi_z + E5\eta_z + (\partial_x w)_{i,j,k+1/2}^*]\xi_z \\
&+ [(E6\eta_z + E7\zeta_z + E8\xi_z + E9)\eta_z + E10\zeta_z + (\partial_y w)_{i,j,k+1/2}^*]\eta_z \\
&+ [(E11\zeta_z + E12\xi_z + E13\eta_z + E14)\zeta_z + E15\xi_z + (\partial_z w)_{i,j,k+1/2}^*]\zeta_z \\
&+ E16\xi_z\eta_z\zeta_z
\end{aligned} \tag{6.158}$$

$$\begin{aligned}
(\partial_x w)_{i,j,k+1/2}^{n+1} &= (\partial_x w)_{i,j,k+1/2}^* \\
&+ (3E1\xi_z + 2E2\eta_z + 2D3\zeta_z + 2E4)\xi_z \\
&+ (E5 + D8\eta_z)\eta_z \\
&+ (E12\zeta_z + E15 + E16\eta_z)\zeta_z
\end{aligned} \tag{6.159}$$

$$\begin{aligned}
(\partial_y w)_{i,j,k+1/2}^{n+1} &= (\partial_y w)_{i,j,k+1/2}^* \\
&+ (E2\xi_z + E5 + E16\zeta_z)\xi_z \\
&+ (3E6\eta_z + 2E7\zeta_z + 2E8\xi_z + 2E9)\eta_z \\
&+ (E10 + E13\zeta_z)\zeta_z
\end{aligned} \tag{6.160}$$

$$\begin{aligned}
(\partial_z w)_{i,j,k+1/2}^{n+1} &= (\partial_z w)_{i,j,k+1/2}^* \\
&+ (E15 + E3\xi_z)\xi_z \\
&+ (E7\eta_z + E10 + E16\xi_z)\eta_z \\
&+ (3E11\zeta_z + 2E12\xi_z + 2E13\eta_z + 2E14)\zeta_z
\end{aligned} \tag{6.161}$$

ここで,

$$\xi_z = -\frac{1}{4} \left(u_{i+1/2,j,k}^* + u_{i-1/2,j,k}^* + u_{i+1/2,j,k+1}^* + u_{i-1/2,j,k+1}^* \right) \Delta t \quad (6.162)$$

$$\eta_z = -\frac{1}{4} \left(v_{i,j+1/2,k}^* + v_{i,j-1/2,k}^* + v_{i,j+1/2,k+1}^* + v_{i,j-1/2,k+1}^* \right) \Delta t \quad (6.163)$$

$$\zeta_z = -w_{i,j,k+1/2}^* \Delta t \quad (6.164)$$

である.

6.2.4 圧力と流速の境界条件

圧力と流速については, 沖側境界, 自由水面, 底面境界, 側面境界, 岸側境界において, 境界条件を設定する必要がある. 以下に, それぞれの境界における境界条件について述べる.

(1) 沖側境界

本計算プログラムの沖側境界では, 対象とする流体運動に応じて, 造波境界, 流入境界, 不透水境界の3種類の条件を適用できるようになっている. このうち本研究では, 流入境界と不透水境界を用いたので, 以下にその2つについて述べる.

流入境界 流入境界では, 沖側の指定した範囲に流速を入力する. この場合, $i = 1$ 列において, 流速を入力する計算格子は水セル, それ以外の計算格子はすべて壁床セルとする (壁床セルの扱いについては, 次項に示す不透水境界と同様の方法を用いる).

入力する流速は, 計算開始後一定時間が経過してから目標とする流速になるようにする. 入力する流速を0から目標流速 u_{in} まで, 時間 t_{rise} かけて三角関数を用いて増加させるとすると, 次式で表わすことができる.

$$u_{incident}(t) = \begin{cases} \frac{u_{in}}{2} \left\{ 1 - \cos \left(\frac{\pi t}{t_{rise}} \right) \right\} & (t \leq t_{rise}) \\ u_{in} & (t > t_{rise}) \end{cases} \quad (6.165)$$

時間 t の代わりに, タイムステップ n を使うと, 次式のようになる.

$$u_{incident}^n = \begin{cases} \frac{u_{in}}{2} \left\{ 1 - \cos \left(\frac{\pi n \Delta t}{t_{rise}} \right) \right\} & (n \leq t_{rise}/\Delta t) \\ u_{in} & (n > t_{rise}/\Delta t) \end{cases} \quad (6.166)$$

岸沖流速以外は0とするので, 流速の条件は以下のようになる.

$$u_{1+1/2,j,k} = u_{incident}^n \quad (6.167)$$

$$v_{1,j+1/2,k} = 0 \quad (6.168)$$

$$w_{1,j,k+1/2} = 0 \quad (6.169)$$

圧力については、岸沖方向に隣接するセルと同じ値を代入する。

不透水境界 造波境界や流入境界を用いない場合（例えば、水柱崩壊などを扱う場合）は、沖側境界をすべて不透水境界にする必要がある。この場合、 $i = 1$ 列はすべて壁床セルとし、no-slip 条件を適用する。

岸沖流速 u 以外は境界面で直接定義することができないので、境界面を挟む値を用いて以下のように間接的に定める。

$$u_{1+1/2,j,k} = 0 \quad (6.170)$$

$$v_{1,j+1/2,k} = -v_{2,j+1/2,k} \quad (6.171)$$

$$w_{1,j,k+1/2} = -w_{2,j,k+1/2} \quad (6.172)$$

また、付加的な境界条件として、境界面において $\partial u / \partial x = 0$ となるように、以下の条件を用いる。

$$u_{1-1/2,j,k} = u_{2+1/2,j,k} \quad (6.173)$$

圧力については、境界面での流速が 0 であることを利用して、運動方程式の x 方向成分である式 (6.13) を変化した次式を解くことで求める。

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right) + (C_s \Delta)^2 \sqrt{\frac{1}{2}} \left| \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right| \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right) - g \sin \theta \quad (6.174)$$

上式を離散化すると、

$$p_{1,j,k} = p_{2,j,k} - \rho \Delta x \left[\left\{ \nu + (C_s \Delta)^2 \sqrt{\frac{1}{2}} \left| \frac{v_{2,j+1/2,k} - v_{1,j+1/2,k}}{\Delta x} + \frac{w_{2,j,k+1/2} - w_{1,j,k+1/2}}{\Delta x} \right| \right\} \left(\frac{u_{2+1/2,j,k} - 2u_{1+1/2,j,k} + u_{1-1/2,j,k}}{\Delta x^2} \right) - g \sin \theta \right] \quad (6.175)$$

となるので、流速の条件を代入すると次式を得る。

$$p_{1,j,k} = p_{2,j,k} - \rho \Delta x \left[\left\{ \nu + (C_s \Delta)^2 \sqrt{\frac{1}{2}} \left| \frac{2v_{2,j+1/2,k}}{\Delta x} + \frac{2w_{2,j+1/2,k}}{\Delta x} \right| \right\} \frac{2u_{2+1/2,j,k}}{\Delta x^2} - g \sin \theta \right] \quad (6.176)$$

(2) 自由水面

計算の中で自由水面を有する計算格子の流速が必要な場合、本計算プログラムでは単純に、境界外側の流速は境界内側の流速と等しくなるように設定する。

隣接する計算格子に自由水面を有する計算格子の圧力は、式 (6.91) を用いずに、irregular stars (Chan & Street, 1970) の考え方をを用いて算出する。図-6.3 のように、計算格子 (i, j, k) の周囲に自由水面が存在するとき、隣接する計算格子の圧力 $(p_1 \sim p_6)$ は、Taylor 級数展開を用いて次式のように表わされる。

$$p_1 = p_{i,j,k} + \eta_1 \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)_{i,j,k} + \frac{\eta_1^2}{2!} \left(\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} \right)_{i,j,k} + O(\eta_1^3) \quad (6.177)$$

$$p_2 = p_{i,j,k} - \eta_2 \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)_{i,j,k} + \frac{\eta_2^2}{2!} \left(\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} \right)_{i,j,k} - O(\eta_2^3) \quad (6.178)$$

$$p_3 = p_{i,j,k} + \eta_3 \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right)_{i,j,k} + \frac{\eta_3^2}{2!} \left(\frac{\partial^2 p}{\partial z^2} \right)_{i,j,k} + O(\eta_3^3) \quad (6.179)$$

$$p_4 = p_{i,j,k} - \eta_4 \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right)_{i,j,k} + \frac{\eta_4^2}{2!} \left(\frac{\partial^2 p}{\partial z^2} \right)_{i,j,k} - O(\eta_4^3) \quad (6.180)$$

$$p_5 = p_{i,j,k} + \eta_5 \left(\frac{\partial p}{\partial y} \right)_{i,j,k} + \frac{\eta_5^2}{2!} \left(\frac{\partial^2 p}{\partial y^2} \right)_{i,j,k} + O(\eta_5^3) \quad (6.181)$$

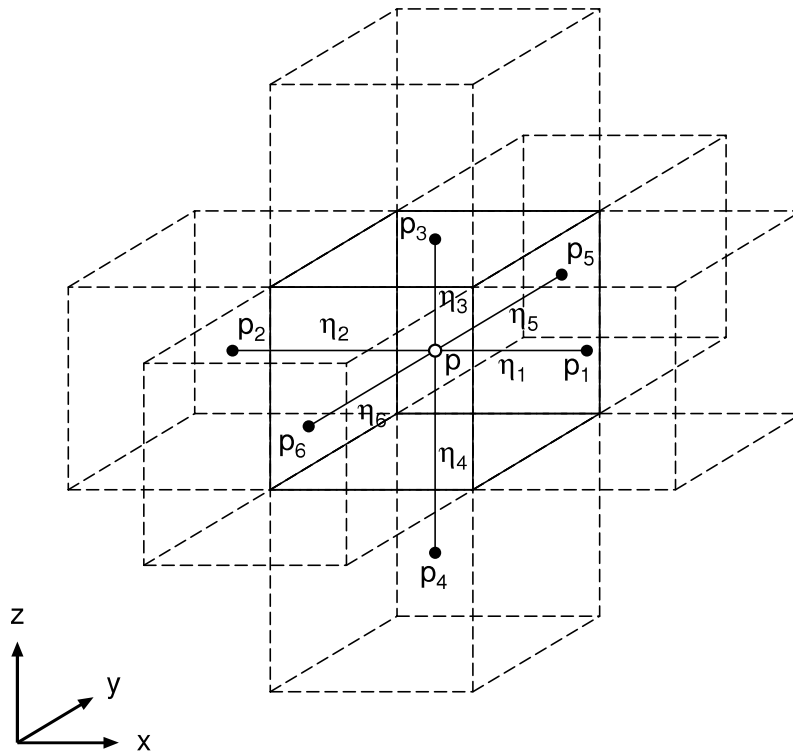


図- 6.3 irregular stars (Chan & Street, 1970) の考え方をを用いた圧力の計算

$$p_6 = p_{i,j,k} - \eta_6 \left(\frac{\partial p}{\partial y} \right)_{i,j,k} + \frac{\eta_6^2}{2!} \left(\frac{\partial^2 p}{\partial y^2} \right)_{i,j,k} - O(\eta_6^3) \quad (6.182)$$

ここで、 $p_{i,j,k}$ は計算格子 (i, j, k) における圧力、 $\eta_1 \sim \eta_6$ は計算格子 (i, j, k) の中心から隣接する格子の自由水面までの距離である。3次以上の項を無視して、上式から p の1次の空間微分項を消去すると、

$$\left(\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} \right)_{i,j,k} = \frac{2}{\eta_1 \eta_2 (\eta_1 + \eta_2)} \{ \eta_2 p_1 + \eta_1 p_2 - (\eta_1 + \eta_2) p_{i,j,k} \} \quad (6.183)$$

$$\left(\frac{\partial^2 p}{\partial y^2} \right)_{i,j,k} = \frac{2}{\eta_5 \eta_6 (\eta_5 + \eta_6)} \{ \eta_6 p_5 + \eta_5 p_6 - (\eta_5 + \eta_6) p_{i,j,k} \} \quad (6.184)$$

$$\left(\frac{\partial^2 p}{\partial z^2} \right)_{i,j,k} = \frac{2}{\eta_3 \eta_4 (\eta_3 + \eta_4)} \{ \eta_4 p_3 + \eta_3 p_4 - (\eta_3 + \eta_4) p_{i,j,k} \} \quad (6.185)$$

が得られる。これらの式を圧力に関するポアソン方程式 (6.89) に代入して整理すると、

$$p_{i,j,k} = \frac{\eta_1 \eta_2 \eta_3 \eta_4 \eta_5 \eta_6}{\eta_1 \eta_2 \eta_3 \eta_4 + \eta_3 \eta_4 \eta_5 \eta_6 + \eta_1 \eta_2 \eta_5 \eta_6} \left\{ \frac{\eta_2 p_1 + \eta_1 p_2}{\eta_1 \eta_2 (\eta_1 + \eta_2)} + \frac{\eta_4 p_3 + \eta_3 p_4}{\eta_3 \eta_4 (\eta_3 + \eta_4)} + \frac{\eta_6 p_5 + \eta_5 p_6}{\eta_5 \eta_6 (\eta_5 + \eta_6)} - \frac{R_{i,j,k}^n}{2} \right\} \quad (6.186)$$

が得られるので、この式を用いて圧力を算出する。自由水面上の圧力は、大気圧とする。 $\eta_1 \sim \eta_6$ は、密度関数の値を用いて、密度関数の値が0.5となる位置を線形内挿で求める。具体的には、計算格子 (i, j, k) の圧力を求めるとき、計算格子 $(i+1, j, k)$ に自由水面が存在するとすると、自由水面までの距離 η_1 は次式により算出する。

$$\eta_1 = \Delta x \cdot \frac{f_{i,j,k} - 0.5}{f_{i,j,k} - f_{i+1,j,k}} \quad (6.187)$$

隣接する計算格子が水の場合は、 $\eta_1 \sim \eta_6$ の代わりに Δx , Δy , Δz を用いる。

(3) 底面境界

底面境界には no-slip 条件を適用した。底面境界の位置は、図-6.4 に示すように、 $k = 2 + 1/2$ 平面とし、 $k = 1$ と $k = 2$ は境界面外側にある仮想格子とした。図-6.4 からわかるように、鉛直流速 w 以外は境界面で直接定義することができないので、境界を挟む値を用いて間接的に定める。

$$u_{i+1/2,j,2} = -u_{i+1/2,j,3} \quad (6.188)$$

$$v_{i,j+1/2,2} = -v_{i,j+1/2,3} \quad (6.189)$$

$$w_{i,j,2+1/2} = 0 \quad (6.190)$$

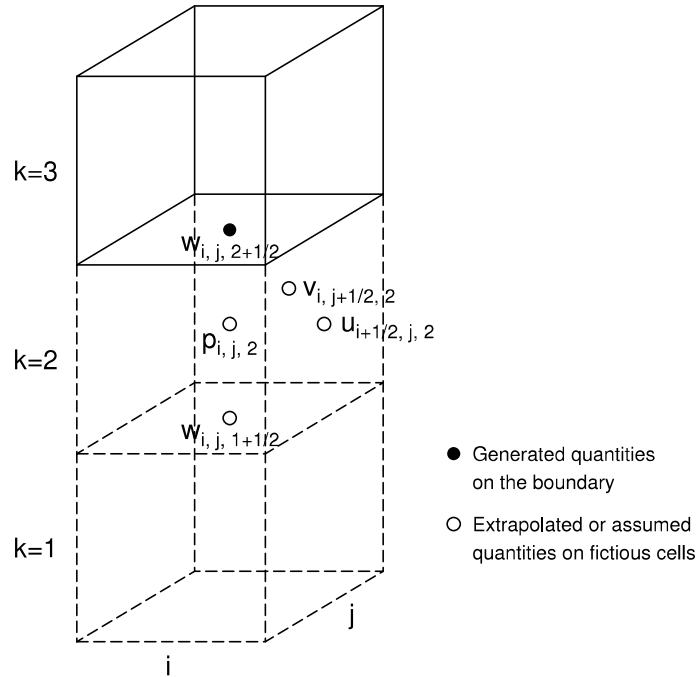


図- 6.4 底面境界条件の設定

付加的な境界条件として、境界面での $\partial w / \partial z$ をゼロとなるように格子 $k = 1$ での w を設定する。

$$w_{i,j,1+1/2} = w_{i,j,3+1/2} \quad (6.191)$$

圧力については、境界面での流速がゼロであることを利用して、運動方程式の z 方向成分である式 (6.15) を変化したものを解くことで求める。

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} = \nu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + (C_s \Delta)^2 \sqrt{\frac{1}{2}} \left| \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right| \left(\frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) - g \cos \theta \quad (6.192)$$

上式を離散化すると、

$$p_{i,j,2} = p_{i,j,3} - \rho \Delta z \left\{ \left(\nu + (C_s \Delta)^2 \sqrt{\frac{1}{2}} \left| \frac{u_{i+1/2,j,3} - u_{i+1/2,j,2}}{\Delta z} + \frac{v_{i,j+1/2,3} - v_{i,j+1/2,2}}{\Delta z} \right| \right) \left(\frac{w_{i,j,3+1/2} - 2w_{i,j,2+1/2} + w_{i,j,1+1/2}}{\Delta z^2} \right) - g \cos \theta \right\} \quad (6.193)$$

となるので、流速の条件を代入すると次式を得る。

$$p_{i,j,2} = p_{i,j,3} - \rho \Delta z \left[\left\{ \nu + (C_s \Delta)^2 \sqrt{\frac{1}{2}} \left| \frac{2u_{i+1/2,j,3}}{\Delta z} + \frac{2v_{i,j+1/2,3}}{\Delta z} \right| \right\} \frac{2w_{i,j,3+1/2}}{\Delta z^2} - g \cos \theta \right] \quad (6.194)$$

(4) 側面境界

側面境界には no-slip 条件を適用する。側面境界の位置は、図-6.5 に示すように、 $j = 2 + 1/2$ 平面、および、 $j = j_{max} - 2 + 1/2$ 平面とし、 $j = 1$ 列、 $j = 2$ 列、 $j = j_{max} - 1$ 列、 $j = j_{max}$ 列の格子は、境界面外側にある仮想格子とする。図-6.5 からわかるように、沿岸方向流速 v 以外は境界面で直接定義することができないので、境界面を挟む値を用いて間接的に定める。

岸から沖方向 (x 軸負方向) に向かって左側の側面境界では、以下のように流速を設定する。

$$u_{i+1/2,2,k} = -u_{i+1/2,3,k} \tag{6.195}$$

$$v_{i,2+1/2,k} = 0 \tag{6.196}$$

$$w_{i,2,k+1/2} = -w_{i,3,k+1/2} \tag{6.197}$$

付加的な境界条件として、境界面において $\partial v / \partial y = 0$ となるように、 $j = 1$ 列での v を設定する。

$$v_{i,1+1/2,k} = v_{i,3+1/2,k} \tag{6.198}$$

圧力については、境界面での流速が 0 であることを利用して、運動方程式の y 方向成分である式 (6.14) を変化した次式を解くことで求める。

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} = \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + (C_s \Delta)^2 \sqrt{\frac{1}{2}} \left| \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right| \left(\frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \tag{6.199}$$

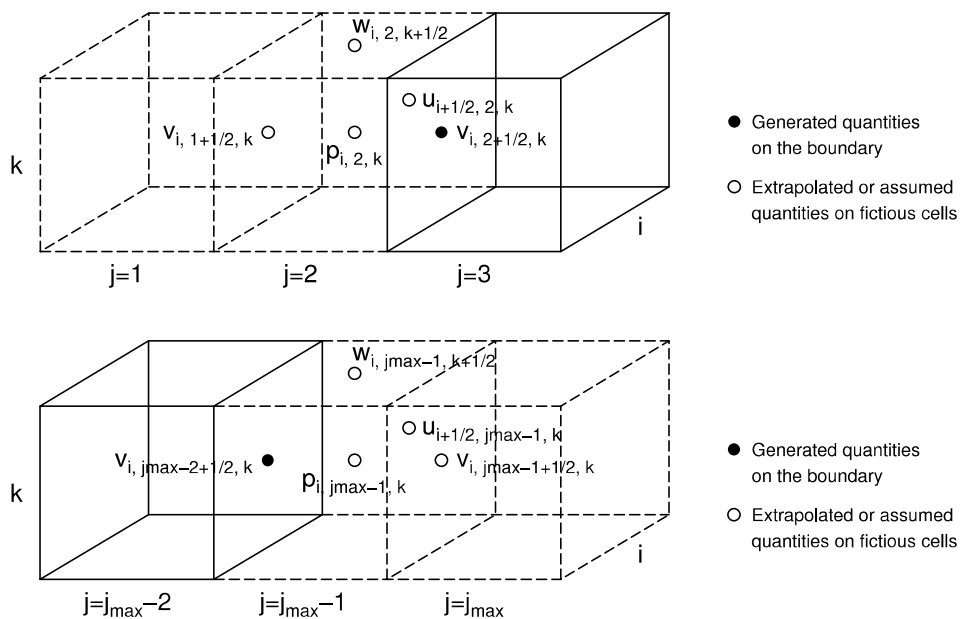


図- 6.5 側面境界条件の設定

上式を離散化すると、

$$p_{i,2,k} = p_{i,3,k} - \rho \Delta y \left[\left\{ \nu + (C_s \Delta)^2 \sqrt{\frac{1}{2}} \left| \frac{u_{i+1/2,3,k} - u_{i+1/2,2,k}}{\Delta y} + \frac{w_{i,3,k+1/2} - w_{i,2,k+1/2}}{\Delta y} \right| \right\} \left(\frac{v_{i,3+1/2,k} - 2v_{i,2+1/2,k} + v_{i,1+1/2,k}}{\Delta y^2} \right) \right] \quad (6.200)$$

となるので、流速の条件を代入すると次式を得る。

$$p_{i,j,2} = p_{i,j,3} - \rho \Delta y \left[\left\{ \nu + (C_s \Delta)^2 \sqrt{\frac{1}{2}} \left| \frac{2u_{i+1/2,3,k}}{\Delta y} + \frac{2w_{i,3,k+1/2}}{\Delta y} \right| \right\} \frac{2v_{i,3+1/2,k}}{\Delta y^2} \right] \quad (6.201)$$

岸から沖方向 (x 軸負方向) に向かって右側の側面境界では、以下のように流速を設定する。

$$u_{i+1/2,j_{max}-1,k} = -u_{i+1/2,j_{max}-2,k} \quad (6.202)$$

$$v_{i,j_{max}-2+1/2,k} = 0 \quad (6.203)$$

$$w_{i,j_{max}-1,k+1/2} = -w_{i,j_{max}-2,k+1/2} \quad (6.204)$$

付加的な境界条件として、境界面において $\partial v / \partial y = 0$ となるように、 $j = j_{max}$ 列での v を設定する。

$$v_{i,j_{max}-1+1/2,k} = v_{i,j_{max}-3+1/2,k} \quad (6.205)$$

圧力については、境界面での流速が 0 であることを利用して、運動方程式の y 方向成分である式 (6.14) を変化した次式を解くことで求める。

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} = \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + (C_s \Delta)^2 \sqrt{\frac{1}{2}} \left| \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right| \left(\frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (6.206)$$

上式を離散化すると、

$$p_{i,j_{max}-1,k} = p_{i,j_{max}-2,k} + \rho \Delta y \left[\left\{ \nu + (C_s \Delta)^2 \sqrt{\frac{1}{2}} \left| \frac{u_{i+1/2,j_{max}-1,k} - u_{i+1/2,j_{max}-2,k}}{\Delta y} + \frac{w_{i,j_{max}-1,k+1/2} - w_{i,j_{max}-2,k+1/2}}{\Delta y} \right| \right\} \left(\frac{v_{i,j_{max}-1+1/2,k} - 2v_{i,j_{max}-2+1/2,k} + v_{i,j_{max}-3+1/2,k}}{\Delta y^2} \right) \right] \quad (6.207)$$

となるので、流速の条件を代入すると次式を得る。

$$p_{i,j_{max}-1,2} = p_{i,j_{max}-2,3} + \rho \Delta y \left[\left\{ \nu + (C_s \Delta)^2 \sqrt{\frac{1}{2}} \left| \frac{-2u_{i+1/2,j_{max}-2,k}}{\Delta y} + \frac{-2w_{i,j_{max}-2,k+1/2}}{\Delta y} \right| \right\} \frac{2v_{i,j_{max}-3+1/2,k}}{\Delta y^2} \right] \quad (6.208)$$

(5) 岸側境界

本研究で行う計算では，岸側境界には不透水斜面あるいは不透水鉛直壁を設置し，境界から流出する流れはない．したがって，岸側境界で特別な処理は行っていない．

6.2.5 ベンチマークテストによる検証

自由水面をもつ流体運動の数値計算では，水柱崩壊問題が精度検証によく用いられている（例えば，川崎・中辻，2002；小笠原ら，2008）．本計算プログラムも，Martin & Moyce (1952) による水柱崩壊問題の実験結果を用いて，精度の検証を行う．

図-6.6のように，幅 a ，高さ $2a$ の水柱を水槽中の一端で崩壊させ，流体底面の先端位置 z と残存水柱の高さ η を計測する．Koshizuka et al. (1995) が実施した実験と同様に，水柱の大きさは $a = 14.6\text{cm}$ とし，計算格子間隔は $\Delta x = \Delta y = \Delta z = a/50$ とした．奥行き方向 (z 方向) の格子数は 15 とし，計算時間間隔は $\Delta t = 0.0001\text{s}$ とした．Martin & Moyce (1952) の実験結果と本計算プログラムによる計算結果を比較したものを図-6.7 に示す．実験結果と計算結果は概ね一致していることがわかる．また，本計算プログラムによる計算結果と Koshizuka et al. (1995) に掲載されている水柱崩壊の実験結果のスナップショットとを比較し，両者が概ね一致していることも確認した．これらのことから，本数値計算プログラムにより自由水面をもつ流体運動の数値計算について妥当な結果を得ることができると考えられる．

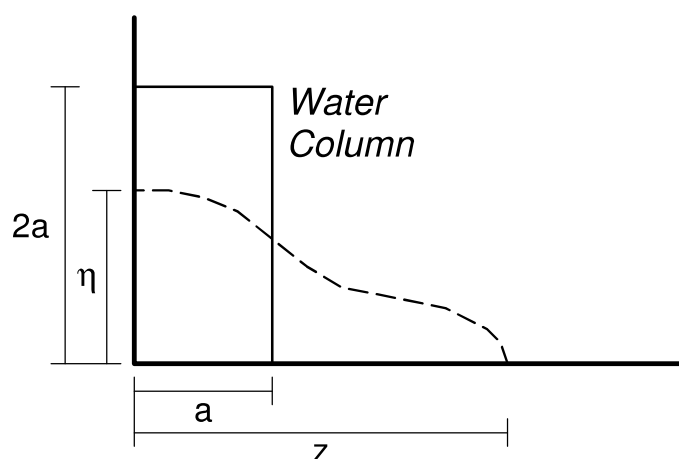


図- 6.6 水柱崩壊問題の実験条件

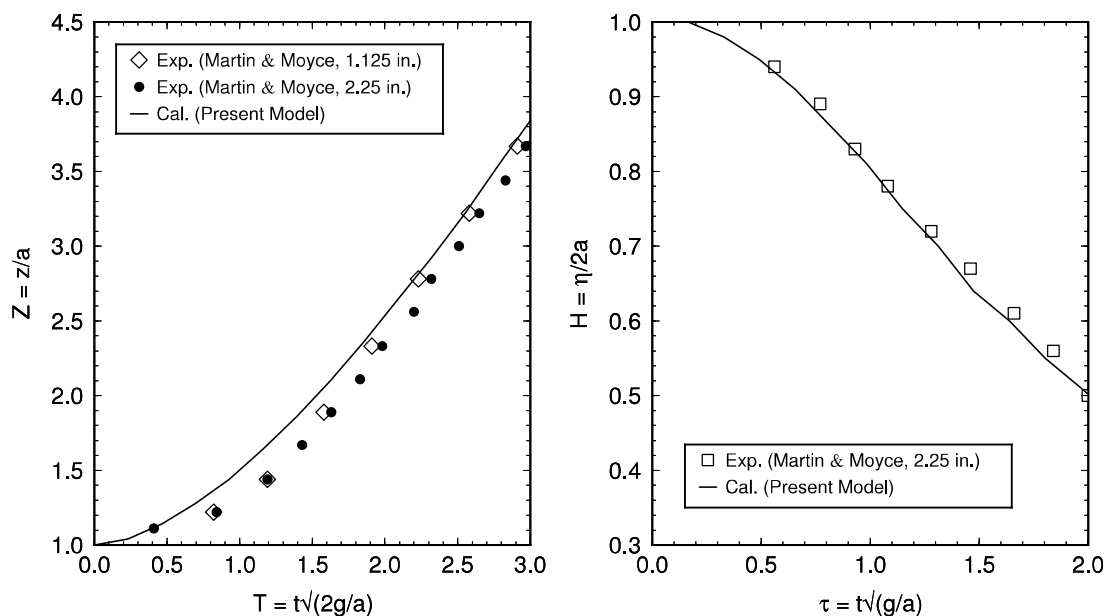


図-6.7 水柱崩壊問題の実験結果 (Martin & Moyce, 1952) と計算結果との比較

6.3 数値計算の概要

水理実験で計測できない分を補い、海岸堤防周辺で生じる流体運動を詳細に理解するために、数値計算を行った。具体的には、第4章で述べた久慈市での事例に見られたような沿岸に設置された海岸堤防を越流する流れを再現し、流速場や圧力場の特徴や海岸堤防背後の地形による流れの変化について考察した。

本研究で行う数値計算の計算領域の大きさは、第5章で扱った実験水槽レベルとした。計算領域を図-6.8に示す。計算領域は、長さ515cm、高さ70cm、幅10cmとし、計算格子間隔は1cmとした。沖側境界から100cmの領域の水深を20cm、海岸斜面の勾配を1/10、海岸堤防背後の陸上斜面の勾配を1/5とした。海岸堤防のモデルは、水理実験と同じく高さ10cm、天端幅10cm、両法面勾配1:2とした。

越流する津波を再現するために、沖側境界の下部から一定の流量を入力し続けた。流入境界の詳細については、6.2.4 (1)に示している。総計算時間は15秒間で、計算時間間隔は0.001秒とした。計算時間の短縮のために、初期水位を天端高と同じ高さに設定してから計算を開始した。

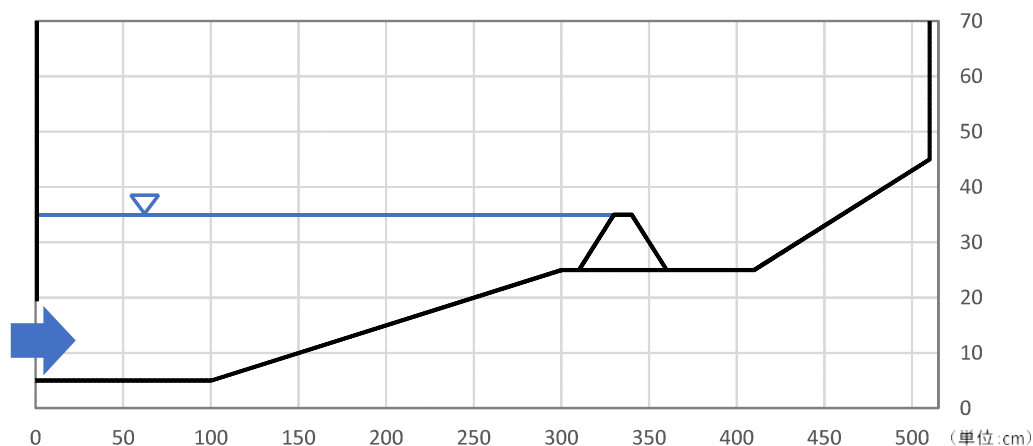


図-6.8 計算領域の設定

6.4 数値計算の結果と考察

海岸堤防周辺の流速場と圧力場の時間変化を図-6.9に示す。計算開始から6.5秒後においては、射流となって堤防背後を流下していく様子がわかる。計算開始から12.5秒後においては、堤防背後の水位が上昇しており、堤防背後の流れの中で流速の速い部分が底面を離れている様子がわかる。計算開始から13.5秒後においては、堤防背後の水位が堤防の天端高以上になり、流れの中で流速の速い部分は堤防背後の表面を流れている様子がわかる。これらの時間変化から、海岸堤防背後に流入した水が溜まりやすい環境（この場合は海岸堤防の背後に高台が隣接している）の下では、背後の水位が上昇するにつれて、流れの状態が前章で述べた「完全越流」から「潜越流」へと変化していることがわかる。

ただし、流れが遷移していく中で、水理実験で確認した不完全越流の状態にはならないことがわかる。射流が堤防裏法面に沿って流下しその上で剥離が発生することがない。これは水理実験においては、循環流を用いているので流れが下流へ進んでいくのに対し、この数値計算では流入した水が背後に滞留している状態なので、滞留している水がクッションとなり、不完全越流の状態にならないと考えられる。背後に平地が広がり、防潮林や構造物によって堤防背後の水位が上昇するような状況では流れの遷移状況が異なるとも考えられる。

次に、海岸堤防表面の各点での x 方向流速 u と圧力 p の時間変化を図-6.10、図-6.11、図-6.12に示す。まず、堤防裏法尻周辺における x 方向流速 u の時間変化についてみていく。裏法尻周辺では、流速の速い状態が越流開始直後から2秒~3秒程度継続するが、それ以降は細かく変動するようになり変動幅は小さいことがわかる。出現する流速の最大値は裏法尻よりもその背後の方が大きいこともわかる。次に、堤防法肩周辺における圧力 p の時間変化についてみていく。裏法肩では圧力が負の値をとることがわかる。これは、流れが

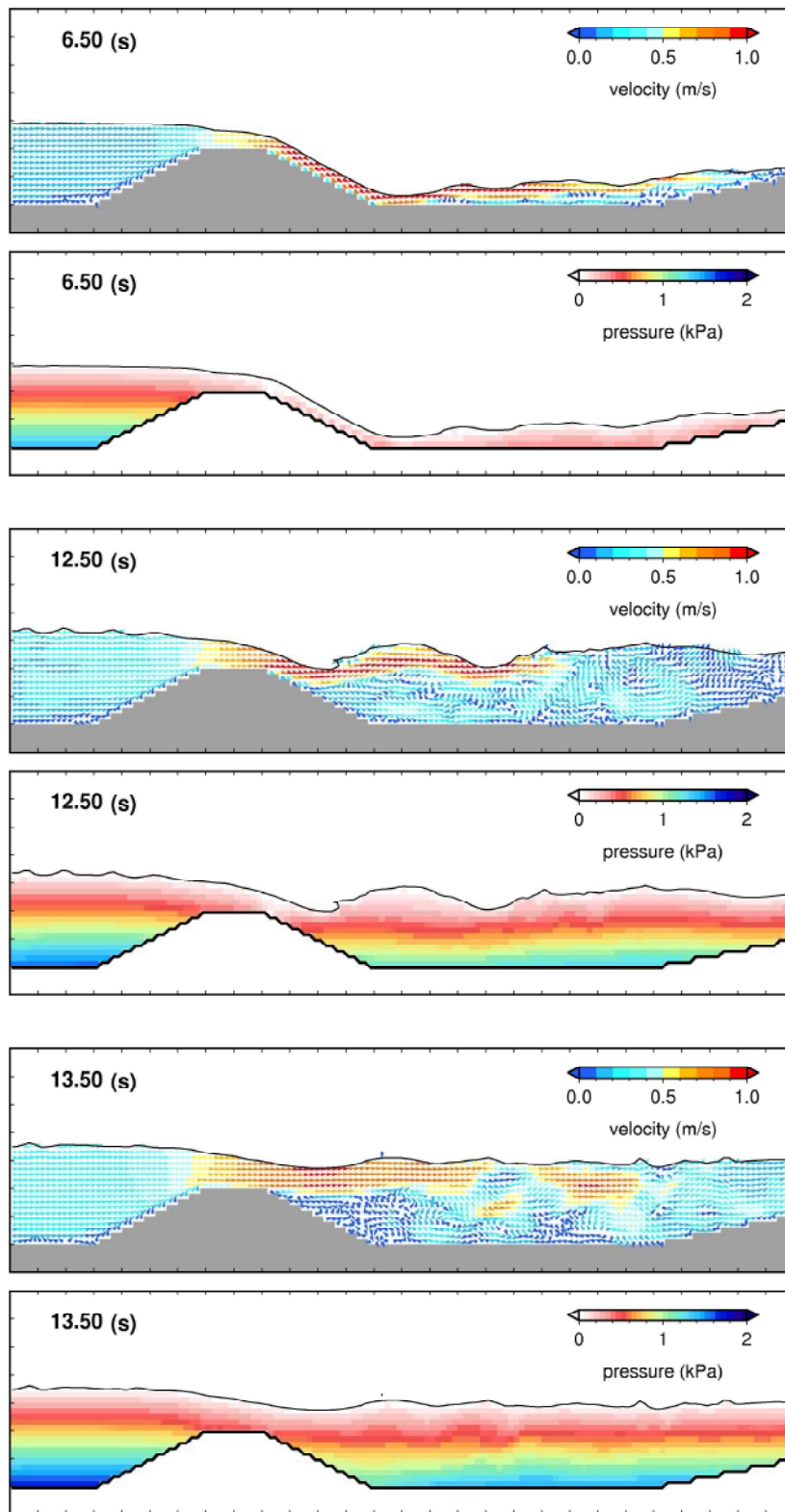


図- 6.9 海岸堤防周辺の流速場と圧力場の時間変化

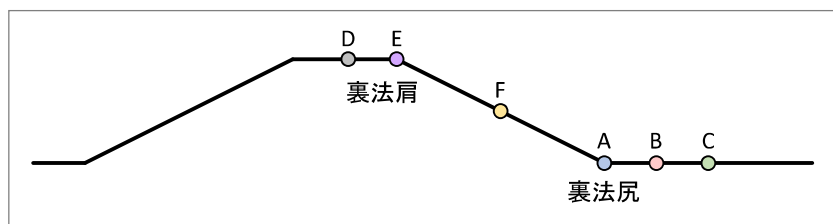


図- 6.10 計算結果出力点の位置

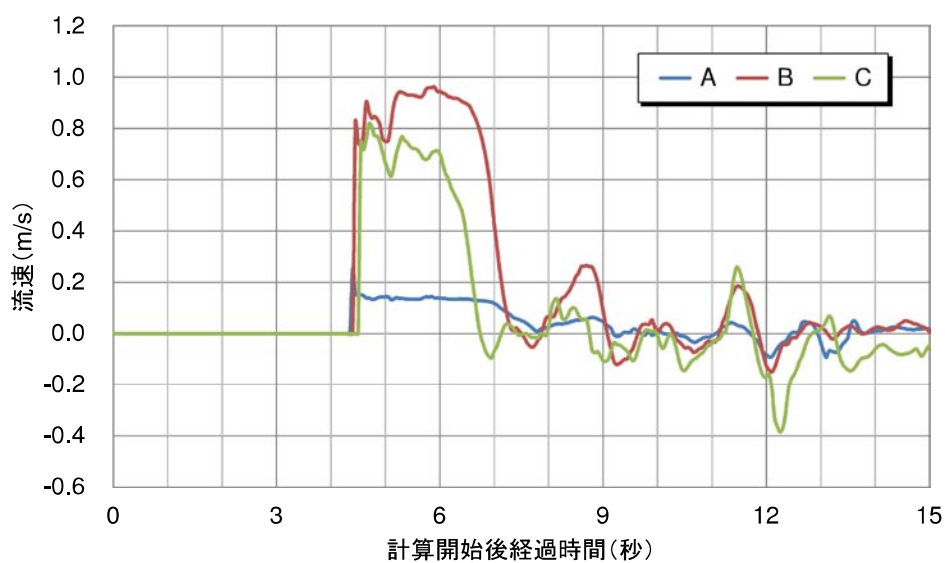


図- 6.11 堤防裏法尻周辺における x 方向流速 u の時間変化

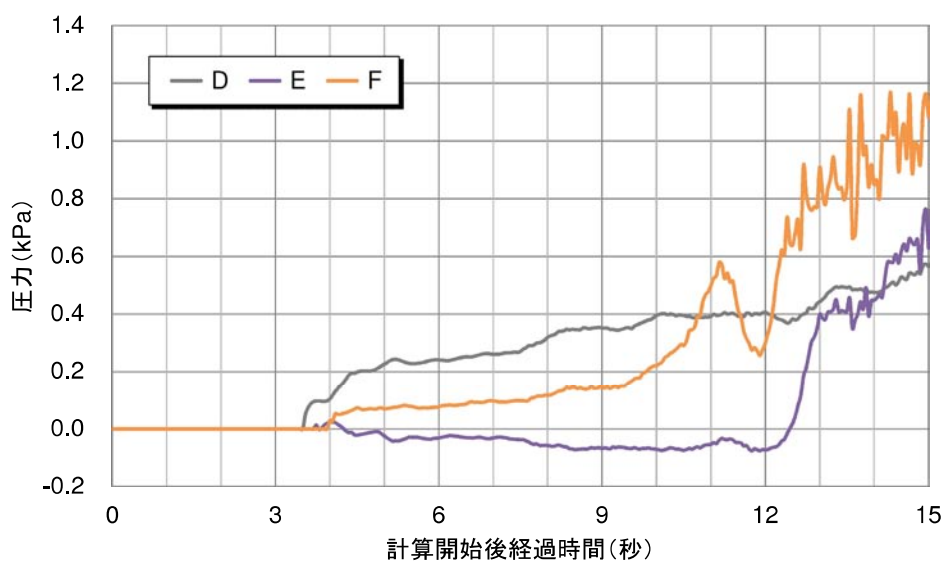


図- 6.12 堤防裏法肩周辺における圧力 p の時間変化

上に凸のかたちとなっていることで遠心力の影響で外向きの力を受けることによる。裏法肩では、負圧の状態は7秒以上継続しているが、堤防背後の水位の上昇に伴い流れの状態が完全越流から潜越流に遷移することで、急激に圧力が上昇し静水圧に近い値となる。圧力が周囲より低い状態が長時間継続することで、海岸堤防の場合は被覆工へ上向きの力が作用し不安定の要因になると考えられる。

以上より、LESモデルにより構築した数値計算モデルを用いることで、海岸堤防を越流する津波の流体運動の特性を再現できることがわかった。また、海岸堤防背後の地形条件により流れの状態が遷移していく様子を確認することができた。

6.5 本章のまとめ

本章では、数値計算を実施することで海岸堤防を越流する津波の流体運動の特性の詳細を把握することを試みた。

まず、本研究で使用した数値計算モデルについて説明した。本研究では乱流モデルのひとつである Large Eddy Simulation (LES) モデルを用いた。本モデルでは、ガウシアンフィルタを用いて空間平均化した Navier-Stokes 方程式に、スマゴリンスキーモデルを適用したものを数値計算の支配方程式としている。まず、その支配方程式の導出方法と境界条件について記述し、その後、圧力および速度の差分法による算出方法について記述した。水表面計算には密度関数法を、圧力場の解法にはSOR法 (Successive over-relaxation method) を、速度場の解法にはCIP法 (Cubic interpolated pseudo-particle method) を用いた。

次に、数値計算結果について論じた。水理実験で計測できない分を補い、海岸堤防周辺で生じる流体運動を詳細に理解するために、沿岸に設置された海岸堤防を越流する流れを再現し、流速場や圧力場の特徴や海岸堤防背後の地形による流れの変化について考察した。海岸堤防背後に流入した水が溜まりやすい環境（この場合は海岸堤防の背後に高台が隣接している）の下では、背後の水位が上昇するにつれて、流れの状態が前章で述べた「完全越流」から「潜越流」へと変化していることがわかった。津波の流体運動による海岸堤防の被災機構について検討する際には、周囲の条件を考慮に入れて流れの状態の時間変化を再現できるようにする必要があることがわかった。

第7章 結論

本研究では、2009年以降に生じた5つの沿岸災害（津波と高潮）に関する現地調査結果をもとに、地域の特性を踏まえた沿岸災害理解の視点について論じるとともに、津波流体運動による海岸堤防の被災機構について、2011年東北津波において得られた各種データ、水理実験、数値計算を用いて検討した。以下に、各章で得られた結論を示す。

第1章では、本研究の背景と目的を示した。

第2章では、沿岸災害の諸相について述べた。2009年以降に国内外で発生した5つの沿岸災害（2009年サモア諸島沖地震津波、2010年チリ沖地震津波、2010年メンタワイ諸島沖地震津波、2011年東北地方太平洋沖地震津波、2012年ハリケーンサンディ高潮）での事例に基づいて、沿岸災害のもつさまざまな側面を抽出することを試みた。まず、それぞれの沿岸災害に対して筆者が実施した現地調査の結果を示した。次に、現地調査で得られた事例を参照しながら、地域の特性を踏まえて沿岸災害を理解する方法について考察した。沿岸災害に影響を与える地域の特性としては、物理的な条件、社会的な条件、時間的な条件があり、これらの特性が沿岸災害の3つの側面、すなわち、災害が引き起こす外力、被害を軽減する能力、被害から回復する能力のどの側面にどのような影響を与えるのかを理解することが重要であることを示した。

第3章では、津波と海岸堤防に関する既往研究について述べた。まず、1933年昭和三陸地震津波以降の日本における主要な沿岸災害と対策について整理した年表に基づき、沿岸災害対策における海岸堤防の位置付けの変遷について述べた。三面張りの海岸堤防は、昭和20年代に頻発した台風災害や1960年チリ津波を契機に設置され、海岸堤防をはじめとした防災構造物は沿岸災害対策の中心であったが、1990年頃からまちづくりや防災体制などとともに防災構造物を整備していく必要があるという考えへと変化していったことがわかった。さらに、過去の津波による海岸堤防の被災状況について調査した文献に基づき、津波による海岸堤防の被災要因に関する認識の変遷について述べた。1933年昭和三陸地震津波から1960年チリ津波までの津波災害で海岸堤防の津波による被害に関して越流による被害も含めてさまざまな知見は得られていたが、三面張りの海岸堤防が作られるようになってからは、それまでに得られた知見を検証するような大きな津波が発生することはなかったことがわかった。最後に、これらの変遷の中で進められてきた津波と海岸堤防に関する既往研究を整理した。既往研究は、主に海岸堤防に作用する波力と戻り流れによる前

面の洗掘のいずれかに注目しており、越流時の裏法尻の洗掘に関する研究の重要性の指摘はあったが、実際にこれに関する研究が行われることは少なかったことがわかった。

第4章では、2011年東北津波による海岸堤防の被災実態について述べた。まず、2011年東北津波後に筆者が数度にわたって実施してきた海岸堤防の被害調査結果に基づき、海岸堤防の具体的な被害事例について述べた。三面張りの海岸堤防を主として調査し、津波が海岸堤防を越流したことによる裏法被覆工や天端工の流失、堤体内土砂の流失、堤防背後で生じた洗掘などの被害を複数個所で確認した。さらに、東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループにより計測された津波痕跡高と津波襲来時に海岸堤防周辺で撮影された映像に基づき、津波来襲時に海岸堤防周辺で生じた流体運動に関して分析した。堤防を越流し射流となって背後地へ流下していく流れと、海岸堤防背後に隣接した高台の影響を受けて堤防背後に流入した海水が貯留され流れの状態が変化していく様子を津波痕跡高と映像の双方から確認することができた。これにより、海岸堤防を越流する津波の状態はひととおりではなく、周囲の地形や環境の影響を受けてその状態が変化することがわかった。以上の知見から、津波の流体運動による海岸堤防の被災機構を考察する際には、越流する津波の状態を考慮する必要があることを示した。

第5章では、水理実験による検討内容について述べた。本研究では、2011年東北津波のような巨大津波に対する海岸堤防の応答を検討するので、まずはそれに対応した津波の造波方法を検討した。海岸堤防を長時間越流する津波を再現するために、これまで主に用いられてきた孤立波とダムブレイク流れではなく、循環流を津波造波方法として採用することで越流する津波を再現することとした。次に、海岸堤防を越流する津波の定性的な分類を試みた。本研究では、本間（1940）が堰堤の流量係数を求める際に用いた三つの分類（完全越流、不完全越流、潜越流）を参考に論じた。完全越流は越流した流れが射流となって背後へ流下していく流れであり、不完全越流は流下していく射流の上を表面渦が覆う流れであり、潜越流は射流が発生しない流れである。これらは海岸堤防を越流する津波の分類にも適用できると考えられる。最後に、海岸堤防を越流する津波の分類に基づいて、水理実験を実施して海岸堤防を越流する津波の基礎的な水理特性を把握した。水深と単位幅あたりの流量を変化させたところ、堤防模型を越流する流れは、本間（1940）による分類のとおり3種類に分類できることがわかった。完全越流や不完全越流の状態では、流速の速い部分が裏法面に沿って存在し、洗掘等を引き起こす可能性があるのに対し、潜り越流では、流速の速い部分が水面近傍に存在するので、堤防への影響は少ないと考えられる。完全越流と不完全越流では、裏法両端部の流れが湾曲するところで遠心力の影響を受けて圧力が大きく変化し、完全越流や不完全越流の状態における裏法肩の圧力低下は、被覆工の不安定化の要因になると考えられる。

第6章では、数値計算による検討内容について述べた。まず、本研究で用いる Large Eddy Simulation (LES) モデルの支配方程式と数値計算手法について述べ、ベンチマークテスト

による検証を行い数値モデルの妥当性を確認した。本モデルでは、空間平均化した Navier-Stokes 方程式に、スマゴリンスキーモデルを適用したものを数値計算の支配方程式とし、水表面計算には密度関数法を、圧力場の解法には SOR 法を、速度場の解法には CIP 法を用いた。次に、水理実験と同様のスケールで数値計算を実施し、津波越流時に海岸堤防周辺で生じる流体運動の内部特性について検討した。沿岸に設置された海岸堤防を越流する流れを再現し、流速場や圧力場の特徴や海岸堤防背後の地形による流れの変化について考察した。特に、背後に高台が隣接しており、海岸堤防背後に流入した水が溜まりやすい環境の下での越流する津波の状態の変化について考察した。数値計算の結果から、海岸堤防背後の水位が上昇するにつれて、流れの状態が前章で述べた完全越流から潜越流へと変化していることがわかった。数値計算による検討を通して、津波の流体運動による海岸堤防の被災機構について検討する際には、周囲の条件を考慮に入れて流れの状態の時間変化を再現できるようにする必要があることを示した。

最後に今後の課題について述べる。沿岸災害の現地調査については、今後も継続的に調査を実施し、更なる知見の蓄積に努める必要がある。加えて、長期間にわたって被害を受けた地域の調査を行うことで、災害からの回復の過程を分析することも重要な観点になっていくと考えられる。越流する津波の流体運動による海岸堤防の被災機構については、以下のような課題があると考えられる。ひとつは、複数の要素を踏まえた流体運動の分析である。海岸堤防を越流した津波が内陸数百 m から数 km にわたって氾濫するような場合、陸上での津波の流体運動は構造物や自然環境などの複数の要素の影響を受けて、場所によって大きく異なると考えられる。例えば、東北地方の太平洋沿岸を例に挙げると、リアス式海岸の湾奥部に位置する地域では、海から防波堤、防潮堤、居住地、高台といったものの影響を受け、平野部に位置する地域では、海から砂浜、海岸堤防、防潮林、農地、道路（二線堤）といったものの影響を受ける。これからの研究において、それらの個々の要素の与える影響について詳細に分析したうえで、複数の要素が組み合わさったときにどのような挙動が生じるかという点についても説明できるようになることで、将来発生し得る大規模な沿岸災害に対してよりよい備えができるのではないかと考えられる。さらには、大規模な水理実験や数値計算を実施することで、本研究では触れられなかった流体運動の三次元的な挙動を分析し、それぞれの地域のより詳細な状況を把握することも重要になると考えられる。

参考文献

- 青森県（2003）：下北八戸沿岸海岸保全基本計画，p. 55，<http://www.pref.aomori.lg.jp/kotsu/build/aomorikaiganhozen.html>.
- 有川太郎・辰巳大介・松 義孝・富田孝史（2010）：2009年サモア諸島津波の現地調査，港湾空港技術研究所資料，No. 1211，26p.
- 石川高見（1933）：昭和八年三月三日三陸沖強震及津浪踏査報告，昭和八年三月三日三陸沖強震及津浪報告，中央気象台，pp. 146–159。（国立国会図書館近代デジタルライブラリーにて参照可能）
- 今井健太郎・行谷佑一・都司嘉宣・藤井雄士郎・安藤亮輔・小松原純子・小松原琢・堀川晴央・宮地良典・松山昌史・吉井匠・石辺岳男・佐竹健治・西山昭仁・原田智也・嶋原良典・嶋原康子・藤間功司（2010）：2010年チリ中部地震による関東・東海地方沿岸の津波痕跡調査，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol. 66，No. 1，pp. 1351–1355.
- 岩崎敏夫（1960）：チリ地震津波による土木災害の概況と津波対策について，東北研究，第10巻，第5号，pp. 23–29.
- 岩崎敏夫・堀川清司（1960）：チリ地震津波とこれによる三陸地方災害の概況，土木学会誌，第45巻，第8号，pp. 9–16.
- 岩手県津波防災技術専門委員会（2011）：漁港海岸の被害状況及び考察等，第2回専門委員会資料，http://www.pref.iwate.jp/~hp0212/fukkou_net/tsunamibousai_02_01.html.
- 岩手県土木課（1936）：津波予防対策，震浪災害土木誌，pp. 132–149。（国立国会図書館近代デジタルライブラリーにて参照可能）
- 宇多高明（1985）：河川構造物と海岸保全施設の津波被害，1983年日本海中部地震被害報告，土木研究所報告，第165号，pp. 209–230.
- 大井邦昭・林建二郎・河野茂樹（2012）：津波越流に対する海岸堤防及び防波堤の強化に関する実験的研究，土木学会論文集 B3（海洋開発），Vol. 68，No. 2，pp. I.96–I.101.

- 小笠原敏記・菊地重友・佐々木信也・塚茂樹 (2008) : MPS 法による流体-構造の動的解析に関する検討, 海岸工学論文集, 第 55 巻, pp. 21-25.
- 表俊一郎 (1946) : 昭和 19 年 12 月 7 日東南海大地震に伴った津浪, 東京大学地震研究所彙報, 第 24 号, pp. 31-62.
- 海岸保全施設技術研究会編 (2004) : 海岸保全施設の技術上の基準・同解説.
- 笠間清伸 (2011) : 東北地方太平洋沖地震における複合地盤災害について, 第 3 回福岡市技術研究発表会発表資料, http://www.city.fukuoka.lg.jp/zaisei/gijutsukanri/business/gijutukanribuHP/jinzaiikusei/happyoukai_2_2.html.
- 加藤史訓・稲垣茂樹・福濱方哉 (2005) : 津波により海岸堤防に作用する波力に関する大型模型実験, 海岸工学論文集, 第 52 巻, pp. 756-760.
- 川崎浩司・中辻啓二 (2002) : 3 次元固気液多相流数値モデルの構築とその検証, 海岸工学論文集, 第 49 巻, pp. 56-60.
- 北原糸子・松浦律子・木村玲欧編 (2012) : 日本歴史災害事典, 吉川弘文館, 838p.
- 建設省河川局・水産庁 (1983) : 津波常襲地域総合防災対策指針 (案), 83p. (津波デジタルライブラリにて参照可能)
- 小池剛 (2002) : 海岸防災対策-過去・現在・未来, 第 38 回水工学に関する夏期研修会講義集, B-2, 20p.
- 国土交通省編 (2011) : 国土交通白書 2011, 378p.
- 国土交通省水管理・国土保全局海岸室編 (2012) : 海岸統計 [平成 24 年度版].
- 国土庁・農林水産省構造改善局・農林水産省水産庁・運輸省・気象庁・建設省・消防庁 (1997) : 地域防災計画における津波対策強化の手引き, 99p. (津波デジタルライブラリにて参照可能)
- 小竹康夫・磯部雅彦 (2012) : 津波の越流時に海岸堤防の法面に作用する圧力特性に関する実験的研究, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 68, No. 2, pp. I.891-I.895.
- 後藤仁志・酒井哲郎・林稔・織田晃治 (2001) : MPS 法による津波の堤越流・氾濫過程の数値シミュレーション, 海岸工学論文集, 第 48 巻, pp. 141-145.
- 後藤仁志・酒井哲郎・林稔・織田晃治・五十里洋行 (2002) : 遡上津波の戻り流れによる護岸法先洗掘のグリッドレス解析, 海岸工学論文集, 第 49 巻, pp. 46-50.

- 酒井乙彦 (1945) : 昭和 19 年 12 月 7 日 13 時 36 分頃の遠州灘地震被害踏査報告, 昭和十九年十二月七日東南海大地震調査概報, 中央気象台, pp. 68–88.
- 佐々木忍 (1960) : チリ地震津波について, 第 7 回海岸工学講演会講演集, pp. 275–287.
- 柴山知也・岡安章夫・Nimal Wijayaratna・佐々木淳・鈴木崇之・Ravindra Jayaratne (2005) : 2004 年スマトラ島沖地震津波のスリランカ南部被害調査, 海岸工学論文集, 第 52 卷, pp. 1401–1405.
- 柴山知也・三上貴仁・松丸亮・高木泰士・Faainuseiamalie Latu (2010) : サモア諸島沖地震津波の調査と分析, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 66, No. 1, pp. 1376–1380.
- 柴山知也・松丸亮・高木泰士・Miguel Esteban・三上貴仁 (2011) : 2011 年東北地方太平洋沖地震による津波災害の宮城県以南における現地調査, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 67, No. 2, pp. I.1301–I.1305.
- 嶋本利彦・堤昭人・川本英子・宮脇昌弘・佐藤比呂志 (1994) : 北海道南西沖地震に伴う津波災害と防災上の教訓, 月刊海洋, 号外, No. 7, pp. 219–231.
- 首藤伸夫 (1994) : 北海道南西沖地震津波による家屋の被害, 津波工学研究報告, 第 11 号, pp. 11–28.
- 首藤伸夫 (1999) : 津波による海岸堤防・護岸の被災—昭和 8 年三陸大津波から昭和 35 年チリ津波まで—, 津波工学研究報告, 第 16 号, pp. 1–37.
- 首藤伸夫 (2000) : 津波対策小史, 津波工学研究報告, 第 17 号, pp. 1–19.
- 首藤伸夫 (2006) : 津波対策の歴史, 第 42 回水工学に関する夏期研修会講義集, B-8, 19p.
- 首藤伸夫・松富英夫 (1994) : 北海道南西沖地震津波の特徴と今後の問題, 津波工学研究報告, 第 11 号, pp. 1–9.
- 数値波動水槽研究小委員会編 (2012) : 数値波動水槽—砕波計算の深化と耐波設計の革新を目指して—, 土木学会, 228p.
- 杉村広太郎 (2005) : 濱口梧陵小傳 (現代語訳版), 広川町文化財保護審議委員会・広川町教育委員会, 95p.
- 鈴木崇之 (2004) : 砕波による流体運動・底質浮遊の解明と 3 次元数値計算手法の開発, 博士学位論文, 横浜国立大学, 152p.
- 大宮司久明・三宅裕・吉澤徹編 (1998) : 乱流の数値流体力学, 東京大学出版会, 652p.

- 高橋智幸 (2011) : 津波の大きさと被害, 科学, 第 81 巻, 第 10 号, pp. 1027–1034.
- 高藤洋子 (2013) : 先人の知恵に学ぶ防災—インドネシア・シムル島およびニアス島の事例—, 立教大学アジア地域研究所 2013 年度第 1 回公開シンポジウム「防災における文化の役割—国際防災協力と災害文化の醸成—」資料, pp. 4–7.
- 田中茂信・山本幸次・岩崎福久・野口賢二 (1994) : 津波による被害, 平成 5 年 (1993 年) 北海道南西沖地震災害調査報告, 土木研究所報告, 第 194 号, pp. 53–80.
- 谷本隆介・常田賢一・北川秀彦・荒木進歩 (2012) : 津波に対する盛土の耐侵食性および落堀構造の減勢特性の検証, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 68, No. 2, pp. I.316–I.320.
- 田原隆 (1960) : チリ地震津波による災害と今後の問題点, 土木技術, Vol. 15, No. 11, pp. 8–16.
- 都司嘉宣・大年邦雄・中野晋・西村裕一・藤間功司・今村文彦・柿沼太郎・中村有吾・今井健太郎・後藤和久・行谷佑一・鈴木進吾・城下英行・松 義孝 (2010) : 2010 年チリ中部地震による日本での津波被害に関する広域現地調査, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 66, No. 1, pp. 1346–1350.
- デーリー東北新聞社 (2011) : 検証・東日本大震災「大津波 襲来」(3) 八戸市市川町, おいらせ町川口, http://cgi.daily-tohoku.co.jp/cgi-bin/web.kikaku/m9_shinsai/ootunami/ootunami_03.htm.
- 東北大学大学院工学研究科災害制御研究センター (2010) : Table of tsunami trace height measured in Chile by the Japanese team, 津波工学研究報告, 第 27 号, pp. 157–179.
- 東北地方整備局河川部地域河川課 (2011) : 青森県の河川・海岸堤防の復旧状況について, 個性の大地, 第 36 号, p. 10, <http://www.thr.mlit.go.jp/bumon/b00037/k00290/river-hp/kasen/kosei/log.html>.
- 東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ (2012) : 統一データセット (release 20121229), <http://www.coastal.jp/ttjt/>.
- 常田賢一・谷本隆介 (2012) : 2011 年東北地方太平洋沖地震の現地調査による防潮堤などの津波被害特性, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 68, No. 2, pp. I.1406–I.1410.
- 徳田弘 (1984) : 河川, 海岸等の被害と考察, 昭和 58 年 (1983 年) 日本海中部地震の記録—被災要因と事例—, pp. 334–341.
- 豊島修 (1969) : 現場のための海岸工学 (高潮編), 森北出版, 355p.

- 土木学会海岸工学委員会海岸施設設計便覧小委員会編（2000）：海岸施設設計便覧〔2000年版〕，土木学会，582p.
- 富田孝史・有川太郎・熊谷兼太郎・辰巳大介・廉慶善（2011）：2010年ムンタワイ地震津波に関する現地被害調査，港湾空港技術研究所資料，No. 1235，23p.
- 富永数男・中野晋・天羽誠二（2007）：海岸堤防に作用する段波津波の実験，海岸工学論文集，第54巻，pp. 826–830.
- 中尾秀之・佐藤慎司・Harry YEH（2012）：津波の越流による海岸堤防の破壊メカニズムに関する研究，土木学会論文集B2（海岸工学），Vol. 68，No. 2，pp. I-281–I-285.
- 中村充・白石英彦・佐々木泰雄（1969）：十勝沖地震津波と津波対策，農業土木試験場技報F，第3号，pp. 11–35.
- 行谷佑一・越村俊一・西村裕一・中村有吾・Gerard Fryer・Akapo Akapo・Laura S. L. Kong（2010）：2009年サモア諸島沖地震津波の米領サモアにおける津波高さおよび被害の調査，土木学会論文集B2（海岸工学），Vol. 66，No. 1，pp. 1366–1370.
- 西村仁嗣・堀川清司（1979）：遡上津波の戻り流れによる護岸法先の洗掘，海岸工学講演会論文集，第26巻，pp. 210–214.
- 野口賢二・佐藤慎司・田中茂信（1997）：津波遡上による護岸越波および前面洗掘の大規模モデル実験，海岸工学論文集，第44巻，pp. 296–300.
- 鳩貝聡・諏訪義雄・加藤史訓（2012）：津波の越流による海岸堤防の裏法尻の洗掘に関する水理モデル実験，土木学会論文集B2（海岸工学），Vol. 68，No. 2，pp. I-406–I-410.
- M.A. Hamzah・間瀬肇・高山知司・藤木繁男（2000）：海岸堤防に作用する津波力の実験と数値シミュレーション，海岸工学論文集，第47巻，pp. 371–375.
- 復興庁（2013）：公共インフラに係る復興施策〔平成25年5月28日〕，<http://www.reconstruction.go.jp/topics/main-cat1/sub-cat1-3/20130528181400.html>.
- 本間仁（1940）：低溢流堰堤の流量係数（第一編），土木学会誌，第26巻，第6号，pp. 635–645.
- 松尾春雄（1933）：三陸津浪調査報告，土木試験所報告，第24号，pp. 83–111.（国立国会図書館近代デジタルライブラリーにて参照可能）
- 松富英夫・大向達也（1999）：津波氾濫流の流体力に関する実験，海岸工学論文集，第46巻，pp. 336–340.

- 三上貴仁・柴山知也・武若聡・Miguel Esteban・大平幸一郎・Rafael Aranguiz・Mauricio Villagran・Alvaro Ayala (2011): 2010年チリ沖地震津波災害の現地調査, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol. 67, No. 2, pp. I.529–I.534.
- 三上貴仁・柴山知也 (2012): 乱流モデルを用いた幅の広いリーフ上での津波挙動の数値解析, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 68, No. 2, pp. I.76–I.80.
- 三上貴仁・柴山知也・Miguel Esteban (2013): 2012年ハリケーンサンディによる高潮災害のニューヨークにおける現地調査に基づく臨海都市域の浸水災害と減災策に関する考察, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol. 69, No. 2, pp. I.982–I.987.
- 水谷将・今村文彦 (2002): 津波段波の衝撃性および越流を考慮した設計外力算定フローの提案, 海岸工学論文集, 第49巻, pp. 731–735.
- 村上仁士・細井由彦・島田富美男・三野英樹 (1988): 堤越流時および越波後の津波の水位, 流速の特性に関する基礎実験, 第35回海岸工学講演会論文集, pp. 592–596.
- 四手井綱英・渡邊隆司 (1948): 昭和21年南海地震に於ける和歌山縣防潮林効果調査, 林業試験集報, 第57号, 林業の部, pp. 97–133.
- 渡辺偉夫 (1998): 日本被害津波総覧 [第2版], 東京大学出版会, 238p.
- Borrero, J.C., McAdoo, B., Jaffe, B., Dengler, L., Gelfenbaum, G., Hignman, B., Hidayat, R., Moore, A., Kongko, W., Lukijanto, Peters, R., Prasetya, G., Titov, V. & Yulianto, E. (2011): Field survey of the March 28, 2005 Nias-Simeulue earthquake and tsunami, *Pure and Applied Geophysics*, **168**, pp. 1075–1088.
- Chan, R.K.-C. & Street, R.L. (1970): A computer study of finite-amplitude water waves, *Journal of Computational Physics*, **6**, pp. 68–94.
- Christensen, E.D. (2006): Large eddy simulation of spilling and plunging breakers, *Coastal Engineering*, **53**(5-6), pp. 463–485.
- Christensen, E.D. & Deigaard, R. (2001): Large eddy simulation of breaking waves, *Coastal Engineering*, **42**(1), pp. 53–86.
- Fritz, H.M., Petroff, C.M., Catalan, P.A., Cienfuegos, R., Winckler, P., Kalligeris, N., Weiss, R., Barrientos, S.E., Meneses, G., Valderas-Bermejo, C., Ebeling, C., Papadopoulos, A., Contreras, M., Almar, R., Dominguez, J.C. & Synolakis, C.E. (2011): Field survey of the 27 February 2010 Chile tsunami, *Pure and Applied Geophysics*, **168**, pp. 1989–2010.

-
- Hill E.M., Borrero J.C., Huang Z., Qiu Q., Banerjee P., Natawidjaja D.H., Elosegui P., Fritz H.M., Suwargadi B.W., Pranantyo I.R., Li L., Macpherson K.A., Skanavis V., Synolakis C.E. & Sieh K. (2012): The 2010 Mw 7.8 Mentawai earthquake: Very shallow source of a rare tsunami earthquake determined from tsunami field survey and near-field GPS data, *Journal of Geophysical Research*, **117**(B6), B06402.
- Hino, T., Miyata, H. & Kajitani H. (1983): A numerical solution method for nonlinear shallow water waves (first report), *Journal of the Society of Naval Architects of Japan*, **153**, pp. 1–12.
- Hino, T., Miyata, H. & Kajitani H. (1985): Numerical simulation of nonlinear behavior of three-dimensional ocean waves interacting with obstacles, *Journal of the Society of Naval Architects of Japan*, **157**, pp. 141–154.
- Horikawa, K. (1961): Tsunami Phenomena in the Light of Engineering View-point, Report on the Chilean Tsunami of May 24, 1960, as Observed along the Coast of Japan, The Committee for Field Investigation of the Chilean Tsunami of 1960, pp. 136–150.
- Jaffe, B.E., Borrero, J.C., Prasetya, G.S., Peters, R., McAdoo, B., Gelfenbaum, G., Morton, R., Ruggiero, P., Higman, B., Dengler, L., Hidayat, R., Kingsley, E., Kongko, W., Lukijanto, Moore, A., Titov, V. & Yulianto, E. (2006): Northwest Sumatra and offshore islands field survey after the December 2004 Indian Ocean Tsunami, *Earthquake Spectra*, **22**(S3), pp. S105–S135.
- Koshizuka, S., Tamako, H. & Oka, Y. (1995): A Particle Method for Incompressible Viscous Flow with Fluid Fragmentation, *Computational Fluid Dynamics Journal*, **4**(1), pp. 29–46.
- Lamarche, G., Pelletier B. & Goff, J. (2010): Impact of the 29 September 2009 South Pacific tsunami on Wallis and Futuna, *Marine Geology*, **271**(3-4), pp. 297–302.
- Martin, J.C. & Moyce, W.J. (1952): An Experimental Study of the Collapse of Liquid Columns on a Rigid Horizontal Plane, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A*, **244**, pp. 312–324.
- Matsuo, H. (1934): Estimation of Energy of Tunami and Protection of Coasts, *Bulletin of the Earthquake Research Institute, Tokyo University, Supplementary*, **1**, pp. 55–64.
- Mikami, T., Shibayama, T., Matsumaru, R., Takagi, H., Latu, F. & Chanmow, I. (2011): Field survey and analysis of tsunami disaster in the Samoan Islands 2009, Proceedings

-
- of the 6th International Conference on Coastal Structures, Yokohama, Japan, pp. 1325–1336.
- Mikami, T., Shibayama, T., Esteban, M. & Matsumaru, R. (2012): Field survey of the 2011 Tohoku Earthquake and Tsunami in Miyagi and Fukushima Prefectures, *Coastal Engineering Journal*, **54**(1), 1250011.
- Mikami, T., Shibayama, T., Esteban, M., Ohira, K., Sasaki, J., Suzuki, T., Achiari, H. & Widodo, T. (2013): Tsunami vulnerability evaluation in the Mentawai islands based on the field survey of the 2010 tsunami, *Natural Hazards*, in press.
- Monecke, K., Finger, W., Klarer, D., Kongko, W., McAdoo, B.G. & Moore, A.L. (2008): A 1,000-year sediment record of tsunami recurrence in northern Sumatra, *Nature*, **455**, pp. 1232–1234.
- Mori, N., Takahashi, T. & The 2011 Tohoku Earthquake Tsunami Joint Survey Group (2012): Nationwide survey of the 2011 Tohoku earthquake tsunami, *Coastal Engineering Journal*, **54**(1), 1250001.
- Okal, E.A., Fritz, H.M., Synolakis, C.E., Borrero, J.C., Weiss, R., Lynett, P.J., Titov, V.V., Foteinis, S., Jaffe, B.E., Liu, P.L.-F. & Chan, I. (2010): Field survey of the Samoa Tsunami of 29 September 2009, *Seismological Research Letters*, **81**(4), pp. 577–591.
- Okayasu, A., Suzuki, T., & Matsubayashi Y. (2005): Laboratory experiment and three-dimensional Large Eddy Simulation of wave overtopping on gentle slope seawalls, *Coastal Engineering Journal*, **47**(2-3), pp. 71–89.
- Rand, W. (1955): Flow geometry at straight drop spillways, *Proceedings, ASCE*, **81**, Paper No. 791, pp. 1–13.
- Satake, K., Nishimura, Y., Putra, P.S., Gusman, A.R., Sunendar, H., Fujii, Y., Tanioka, Y., Latief, H. & Yulianto E. (2013): Tsunami source of the 2010 Mentawai, Indonesia earthquake inferred from tsunami field survey and waveform modeling, *Pure and Applied Geophysics*, **170**(9-10), pp. 1567–1582.
- Shuto, N. (2009): Damage to Coastal Structures by Tsunami-Induced Currents in the Past, *Journal of Disaster Research*, **4**(6), pp. 462–468.
- Sieh, K., Natawidjaja, D.H., Meltzner, A.J., Shen, C.-C., Cheng, H., Li, K.-S., Suwargadi, B.W., Galetzka, J., Philibosian, B. & Edwards, R.L. (2008): Earthquake Supercycles

- Inferred from Sea-Level Changes Recorded in the Corals of West Sumatra, *Science*, **322**, pp. 1674–1678.
- Smagorinsky, J. (1963): General circulation experiments with the primitive equations, *Monthly Weather Review*, **91**(3), pp. 99–164.
- Suzuki, T., Okayasu, A. & Shibayama, T. (2007): A numerical study of intermittent sediment concentration under breaking waves in the surf zone, *Coastal Engineering*, **54**(5), pp. 433–444.
- Thao, N. D. & Shibayama, T. (2006): Numerical simulation of 3-D wave breaking on breakwater, Proceedings of the 30th International Conference on Coastal Engineering, pp. 261–273.
- The 2011 Tohoku Earthquake Tsunami Joint Survey Group (2011): Nationwide field survey of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake tsunami, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B2 (Coastal Engineering)*, **67**(1), pp. 63–66.
- Watanabe, Y. & Saeki, H. (1999): Three-dimensional large eddy simulation of breaking waves, *Coastal Engineering Journal*, **41**(3-4), pp. 281–301.
- Wijayaratna, T.M.N. (2000): Numerical simulation of wave breaking on slopes and its applications, Doctoral Dissertation, Yokohama National University, 124p.
- Yabe, T., Ishikawa, T., Kadota, Y. & Ikeda, F. (1990): A multidimensional cubic-interpolated pseudoparticle (CIP) method without time splitting technique for hyperbolic equations, *Journal of the Physical Society of Japan*, **59**(7), pp. 2301–2304.

研究業績一覧

(a) 論文

1. Mikami, T., Shibayama, T., Esteban, M., Ohira, K., Sasaki, J., Suzuki, T., Achiari, H. & Widodo, T. (2013): Tsunami vulnerability evaluation in the Mentawai islands based on the field survey of the 2010 tsunami, *Natural Hazards*, in press, doi:10.1007/s11069-013-0936-z.
2. Esteban, M., Jayaratne, R., Mikami, T., Morikubo, I., Shibayama, T., Thao, N., Ohira, K., Ohtani, A., Mizuno, Y., Kinoshita, M. & Matsuba, S. (2013): Stability of Breakwater Armour Units Against Tsunami Attack, *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, in press, doi:10.1061/(ASCE)WW.1943-5460.0000227.
3. Esteban, M., Tsimopoulou, V., Mikami, T., Yun, N. Y., Suppasri, A. & Shibayama, T. (2013): Recent tsunamis events and preparedness: Development of tsunami awareness in Indonesia, Chile and Japan, *International Journal of Disaster Risk Reduction*, **5**, 84–97, doi:10.1016/j.ijdr.2013.07.002.
4. Shibayama, T., Esteban, M., Nistor, I., Takagi, H., Nguyen, D. T., Matsumaru, R., Mikami, T., Aranguiz, R., Jayaratne, R. & Ohira, K. (2013): Classification of Tsunami and Evacuation Areas, *Natural Hazards*, **67**(2), pp. 365–386, doi:10.1007/s11069-013-0567-4.
5. 三上貴仁・松葉俊哉・柴山知也 (2013) : 津波越流時の堤防周辺における流体運動の分析, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 69, No. 2, pp. I.991–I.995.
6. 星野さや香・柴山知也・Miguel Esteban・高木泰士・三上貴仁・高島知行 (2013) : 東京湾における高潮被災予測と沿岸域防護手法の提案, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol. 69, No. 2, pp. I.994–I.999.
7. 三上貴仁・柴山知也・Miguel Esteban (2013) : 2012年ハリケーンサンディによる高潮災害のニューヨークにおける現地調査に基づく臨海都市域の浸水災害と減災策に関する考察, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol. 69, No. 2, pp. I.982–I.987.
8. Mikami, T., Shibayama, T., Esteban, M. & Matsumaru, R. (2012): Field survey of the 2011 Tohoku Earthquake and Tsunami in Miyagi and Fukushima Prefectures,

Coastal Engineering Journal, **54**(1), 1250011, doi:10.1142/S0578563412500118.

9. 三上貴仁・柴山知也 (2012): 乱流モデルを用いた幅の広いリーフ上での津波挙動の数値解析, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 68, No. 2, pp. I.76–I.80.
10. 高木泰士・Nguyen Danh Thao・Miguel Esteban・Tran Thu Tam・Hanne Louise Knaepen・三上貴仁 (2012): ベトナム南部の沿岸域における災害脆弱性の検証, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol. 68, No. 2, pp. I.888–I.893.
11. 柴山知也・松丸亮・高木泰士・Miguel Esteban・三上貴仁 (2011): 2011 年東北地方太平洋沖地震による津波災害の宮城県以南における現地調査, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 67, No. 2, pp. I.1301–I.1305.
12. 三上貴仁・柴山知也・武若聡・Miguel Esteban・大平幸一郎・Rafael Aranguiz・Mauricio Villagran・Alvaro Ayala (2011): 2010 年チリ沖地震津波災害の現地調査, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol. 67, No. 2, pp. I.529–I.534.
13. 柴山知也・三上貴仁・松丸亮・高木泰士・Faainuseiamalie Latu (2010): サモア諸島沖地震津波の調査と分析, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 66, No. 1, pp. 1376–1380.

(b) 講演

1. Mikami, T. & Shibayama, T. (2013): Coastal dyke failure mechanism in the 2011 Tohoku Tsunami, Proceedings of the 9th APRU Research Symposium on Multi-Hazards around the Pacific Rim, Taipei, Taiwan, pp. 139–140.
2. Mikami, T. & Shibayama, T. (2013): Numerical analysis of tsunami flow around coastal dyke, Proceedings of the 7th International Conference on Asian and Pacific Coasts (APAC), Bali, Indonesia, pp. 654–659.
3. Mikami, T. & Shibayama, T. (2012): Numerical analysis of tsunami propagation on wide reef platform, 33rd International Conference on Coastal Engineering (ICCE), Santander, Spain. (poster presentation)
4. Mikami, T. (2012): Tsunami Disasters in Recent Years, Seminar on Coastal Disasters and Climate Change, Phan Thiet, Vietnam.
5. 三上貴仁 (2011): 東日本大震災が私に教えてくれたこと—被災地での現地調査を通じて—, 早稲田大学教育総合研究所教育最前線講演会シリーズ XIII (震災と教育—学び, 将来へ伝える—), 早稲田大学小野記念講堂.
6. Mikami, T., Shibayama, T., Matsumaru, R., Takagi, H., Latu, F. & Chanmow, I. (2011): Field survey and analysis of tsunami disaster in the Samoan Islands 2009, Proceedings of the 6th International Conference on Coastal Structures, Yokohama,

Japan, pp. 1325–1336.

(c) 著書

1. 柴山知也・三上貴仁（2013）：コラム1 東北地方太平洋沖地震津波（2011年3月11日），柴山知也・茅根創編『図説日本の海岸』，朝倉書店，pp. 34–35.
2. 三上貴仁（2012）：学生報告 東日本大震災が私に教えてくれたこと，早稲田大学教育総合研究所監修『震災と教育—学び，将来へ伝える—』，早稲田教育ブックレット No. 7，学文社，pp. 60–67.

謝 辞

本論文は、筆者が2009年に研究室に所属して以来行ってきた、津波災害や高潮災害に関する研究の成果をまとめたものであります。研究の遂行にあたっては、多くの方々の御指導御鞭撻を賜りました。

早稲田大学教授柴山知也先生には、学部から博士課程まで一貫して熱心かつ懇切丁寧な御指導を賜りました。先生には、本論文審査の主査として筆者を正しい方向に導いていただいただけでなく、多くの貴重な機会を与えていただきました。当時学部4年生で右も左もわからなかった筆者に、サモア諸島での津波災害現地調査に参加する機会を与えて下さったことに始まり、その後も災害現地調査、研究発表、論文作成など多くの機会を与えて下さったことが、筆者の研究活動の基礎となり、災害研究という難しくもやりがいのあるテーマに向き合うことができました。また、先生の指導の下で博士号を取得し世界各地で活躍されている多くの先輩方と国内外でともに活動する機会を得たことで、筆者が秘かに心に抱いていた、国際社会に貢献するという夢に一歩近づくことができました。ここに記して深甚なる謝意を表します。

早稲田大学教授榊原豊先生、早稲田大学教授関根正人先生には、ご多忙の中、本論文審査の副査を務めていただき、審査の過程で貴重な御助言と御指導をいただきました。学部や大学院での両先生の授業を通して、学問上の知識に限らず、研究者としての姿勢など多くのことを御教示いただきました。心から御礼申し上げます。

東京大学特任准教授 Miguel Esteban 先生には、英語での学術論文の執筆を前に気後れしていた筆者の背中を何度も押していただいたことで、短い期間で多くの学術論文を発表する機会に恵まれました。また、世界中をまぐるしく飛び回りながらも、新しい研究分野に積極的に飛び込んでいく先生の姿から、国際的に活躍する研究者像を垣間見ることができました。ここに記して感謝致します。

東洋大学教授松丸亮先生には、年の離れた後輩である筆者に目を掛けていただき、東洋大学での津波に関する講義や伊豆大島での土石流調査など、折にふれて研究室外での活動に連れ出していただきました。海外における防災協力の最前線で長年活躍されてきた先生の親身なアドバイスが、筆者に災害研究を行っていくうえでの心構えを説いてくれました。ここに記して感謝致します。

東京工業大学准教授高木泰士先生には、ベトナムで行った災害基礎調査のメンバーに加えていただき、筆者が関心をもっていた途上国の沿岸災害の問題を肌で感じることができました。その他にも多くの調査や研究会等でご一緒し、国内外のさまざまな機関で御仕事をされてきた先生のすぐ傍で勉強させていただいたことが、本論文作成の際にも大変役に立ちました。ここに記して感謝致します。

横浜国立大学准教授鈴木崇之先生には、本研究で用いた数値計算モデルについて丁寧に御教示いただきました。また、学会参加の際には筆者に毎回声をかけて下さり、それがきっかけで毎年開かれる海岸工学若手の会にも参加するようになり、研究者としての視野と交友の幅を広げることができました。ここに記して感謝致します。

大学においては、研究室秘書の松丸さん、社工連絡事務室の大友さん、水理実験室の江川さんをはじめとした方々の御協力により、充実した研究生生活を送ることができました。ここに記して感謝致します。

年々賑やかになっていく研究室の同期と後輩にも感謝致します。特に、ともに研究室の1期生として現在の半分のスペースの部屋からスタートし、今はそれぞれの分野に進み活躍している同期の皆には、数多くの刺激と激励をいただきました。

以上の方々をはじめ、ここに御名前をあげることができなかった多くの方々にも、調査、学会、学校生活を通して御協力や御助言をいただきました。皆様に心より感謝申し上げます。

最後に、筆者を応援し支えてくれた家族に深い感謝の念を捧げたいと思います。特に、日本全国津々浦々の海岸をその目で見て回り、その体験を直接語りかけてくれた祖父の存在は、筆者が海岸工学という研究分野に取り組むうえで大きな励みとなりました。本当にありがとうございました。

2014年2月

三上 貴仁