

ウォーターフロントから海洋空間まで、
人間が住み・働き・憩う環境をデザインする。

緊急特集

東日本大震災の被災から復興に向けて

教授 畔柳昭雄

平成23年3月11日の午後2時46分に発生した“東北地方太平洋沖地震”は、未曾有の大災害を国土に及ぼし、それまでの日本の状況を瞬時に一変させてしまったことは、まだ記憶に新しい。

津波は、各地に壊滅的被害を与え、リアス式海岸の岩手県宮古市重茂半島姉吉地区では、38.9mの遡上高の痕跡を残している。また、砂浜海岸の続く宮城県仙台市宮城野区から亘理市に至る範囲では、内陸6.0kmまで津波が到達している。こうした被害は、青森県から東京都にまで及んでおり、日経新聞（4月11日朝刊）記事が被害の甚大さを伝えている。

今回の被災の特徴は、阪神淡路大震災と比較した場合、家屋倒壊や火災による重傷者を含めた負傷者の数が少ないことにある（阪神43,000人、今回4,684人）。その反面、死者行方不明者は極めて多く、津波のもたらす被害の深刻さが伝わってくる。

一方、被災地に対する支援の輪は、国内外に大きな広がりを見せ、新しい人々の連携が生み出されてきている。また、新しい“海からの支援”も多様に展開されてきており、とくにメガフロート（浮体式海洋構造物）の活躍には期待が寄せられている（物資供給施設兼代替的係留施設としての利用や原発の廃水貯水施設として利用）。

他方、想定外といわれるような状況も承知のように発生しており、地震や津波に対する新たな視点に基づく研究や技術開発に期待が高まってきている。

海洋建築工学科では、地震発生直後から各教員が、それぞれ専門の立場で、千葉県や茨城県の沿岸部をはじめ、宮城県仙台市周辺各地および岩手県三陸海岸各地で実態調査を行ってきた。現在は被災状況の現地調査とともに、新しい支援策の研究と具体的な技術支援に取り組みは始めている。

本誌では、これまで実施した調査結果に基づき、緊急特集号として、津波被害状況の特徴やメガフロートの活動および津波の“射流”解説、GISによる被災状況の可視化などを踏まえ、被災地における被災と復興に向けた状況についてまとめている。



東日本大震災の実態と被害の特徴

教授 中西三和

東北地方太平洋沖地震はマグニチュード9.0という、わが国における観測史上最大の地震動を記録し、東北地方から関東地方の広い地域に激甚災害をもたらした。すでに多くの機関で地震動の特徴や分析がはじめられているが、ここではまず地震動特性と被害の状況について概要を紹介する。

〈地震概要〉

地震名称：平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震

発生時刻：平成23年 3月11日（金）午後2時46分

震 源：北緯38.0°、東経142.9°（三陸沖）

震源深さ：約24km

規 模：マグニチュード9.0

震 度：気象庁発表資料より

各地の震度分布を図1に示す。宮城県北部の栗原市で震度7を観測したほか、東日本の広域で大きな揺れを観測した。また、余震分布を図2に示した。本震のあと、マグニチュード7を上回る余震が5回も発生していることから今回の地震がいかに巨大であったか理解できる。南北500kmに及ぶ余震分布などの分析から震源域の長さは約400km、幅は約200kmで、最大の滑り量は約20m以上であったと推定され

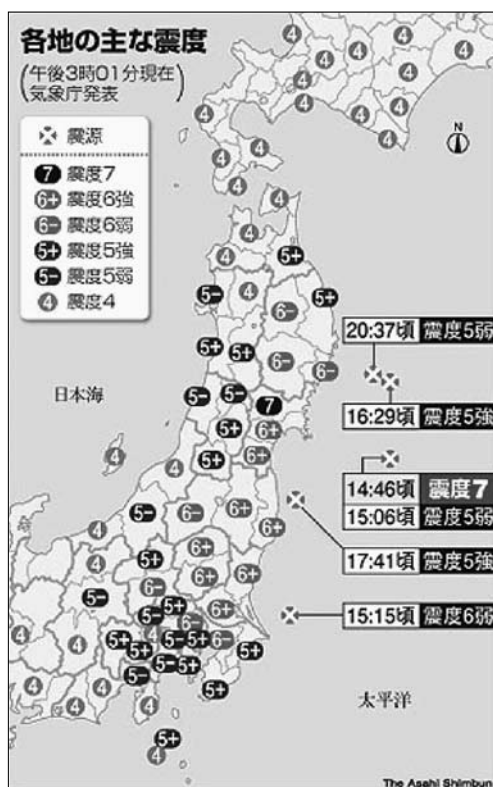


図1 各地の震度分布

<http://www.asahi.com/photonews/gallery/infographics2/schema010.html> より引用

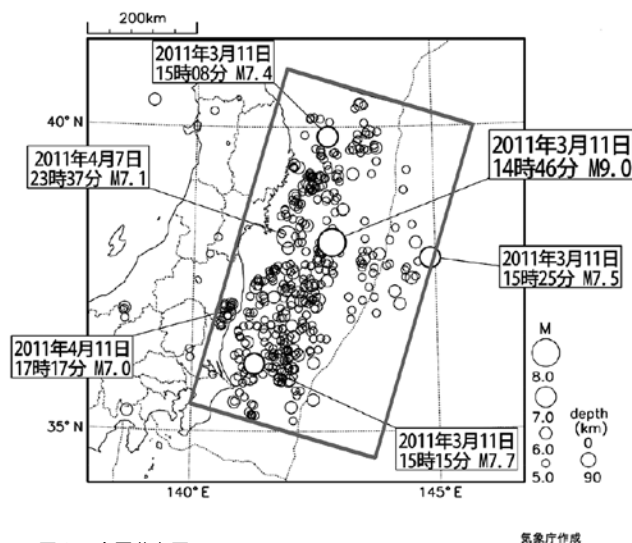


図2 余震分布図

http://www.jma.go.jp/jma/menu/yoshin_area.pdf より引用

ている。とくに、三陸沖の震源で最初のイベントが起きてから福島沖、茨城沖へと続く破壊の連鎖が非常に継続時間の長い地震動を引き起こした。

観測地震動：防災科学技術研究所では全国の主要な箇所に強震観測網（K-NET、KiK-net）を設置し、その地震動記録をインターネット上で公開している。筑波大学の境は、東日本各地のこれら地震記録に基づいて応答スペクトルを求め観測地点200m周辺の被害調査を行った結果を自身のホームページに公開している。その中から観測点仙台（MYG013）を、図3および図4に示した。東北地方の観測点での地震動の特徴として、地震継続時間約90秒後に異なる二つめの加速度のピーク値が存在し別の地震発生を伺わせる。また、加速度応答スペクトルから1秒を下回る短周期成分が卓越した地震動であったことがわかる。

一方、本学船橋キャンパスでは高密度の地震観測網を整備している。14号館前の広場に地下約100m、80m、45m、地表面、そして建物の各階に地震計が設置され、地盤を伝わる地震動と建物の揺れの間係を詳細に検討することができるシステムとなっている。2号館と3号館の間の敷地と、両建物の高さ方向にも加速度センサーが設置され、地震入力と建物の応答の関係が観測されている。2号館は枠組み鉄骨による耐震補強建物、3号館は免震構造、そして14号館は制震構造という違いがあり、その比較は非常に興味深い。図5、6は14号館北棟のR階で観測された加速度時刻歴波形と速度応答スペクトルである。仙台で観測された最大加速度に比べその最大加速度は小さいものの、速度応答スペクトルからもわかるように、1秒以上の長周期側においても比較的大きな応答であることが特徴である。

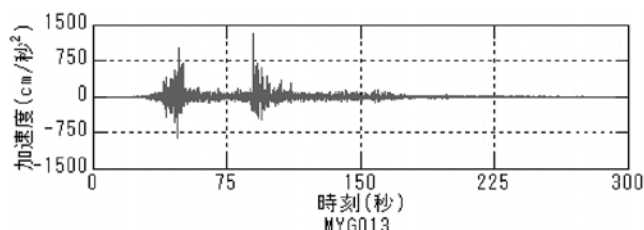


図3 強震観測点 MYG013 (仙台) 加速度時刻歴

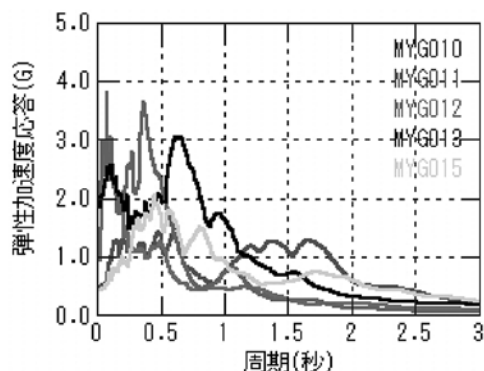


図4 加速度応答スペクトル

<http://www.kz.tsukuba.ac.jp/~sakai/113g.htm> より引用

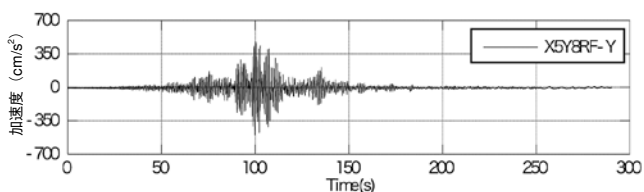


図5 14号館北棟R階加速度時刻歴

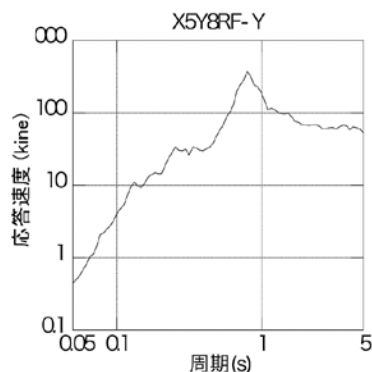


図6 速度応答スペクトル (資料提供: 土木工学科 仲村成貴専任講師)

津波: 先に紹介したように、震源は太平洋プレートと北米プレート (オホーツクプレート) の境界領域で発生した。国土地理院の観測では、東日本全体が震源に吸い寄せられるような大きな断層のずれによって海底に数 m の地殻変動を生じさせ、巨大津波が発生したと分析されている。気象庁が地震発生当日の午後 6 時 39 分に発表した各地津波の高さは図 7 に示すとおりである。

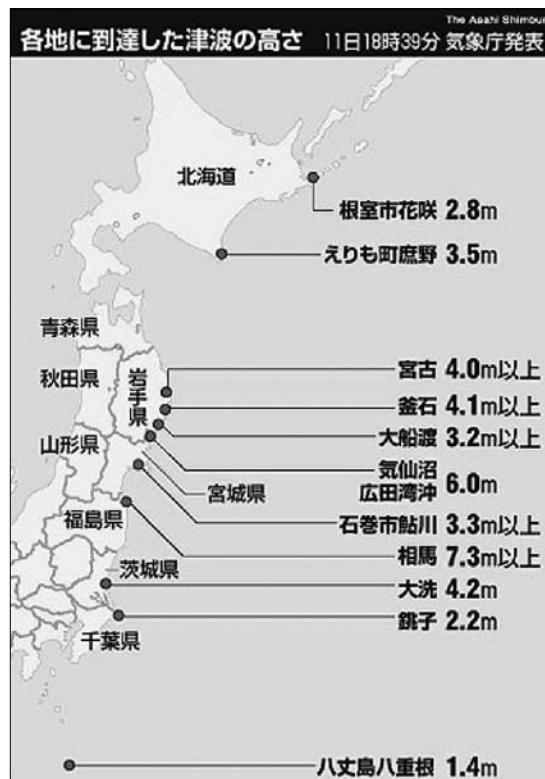


図7 各地で観測された津波高さ

<http://www.asahi.com/photonews/gallery/infographics2/schema009.html>

地震被害の特徴: 今回の地震災害は、宮城県の北部で震度 7 を観測した地震動の大きさに比較して、揺れによる建物被害が比較的少なく、人的な被害や建物の倒壊の多くが大津波によるものであったことが特徴である。津波被害は東北地方のみならず関東地方の太平洋沿岸の広い範囲に及んでいる。また、震源から比較的離れた首都圏においても継続時間の長い長周期地震動による天井の落下や家具などの転倒被害、湾岸の広い地域での地盤の液状化による電気・ガス・上下水道などライフラインの被害や戸建て住宅の傾斜、交通手段の停滞による多数の帰宅困難者、正確な情報が伝わらないことによる避難の遅延、風評被害など市民生活を脅かすさまざまな問題点が浮き彫りになった。また、東京湾の湾岸地域だけでも、約 42km² の広い範囲で地盤の液状化により、ライフラインや戸建ての住宅を中心に多くの被害が生じた。

5 月 9 日現在の警察庁が公表した東北 3 県の被害の概要は以下の通りである。

〈人的被害〉

	死者	行方不明者	避難者
全体	14,919 人	9,893 人	118,786 人
岩手	4,388 人	3,275 人	37,482 人
宮城	8,924 人	8,973 人	34,792 人
福島	1,543 人	641 人	25,274 人

〈建物被害〉

全壊	83,591 棟	半壊	31,435 棟	一部損壊	243,474 棟
----	----------	----	----------	------	-----------

千葉県・茨城県沿岸の被災状況

教授 小林昭男

はじめに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震による千葉県と茨城県の沿岸域の震災を初動調査した。震災は地震動による建物や施設の損傷、地盤の液状化による被害、巨大津波による被害に大別されるが、本調査は主に地盤の液状化と津波による被災を対象とした。本稿では調査結果から7地域を選び被災状況と特徴を示す。調査地点の位置を図1および図2に示す。なお、来襲した地震津波の特徴や遡上高さは土木学会および港湾空港研究所の報告を参照されたい。

地盤の液状化による被災

液状化による被災については、千葉県千葉市美浜区打瀬・ひび野（2011年3月19日に調査）と茨城県潮来市日の出（2011年3月23日に調査）の状況を示す。

図1のP1は打瀬地区であり、花見川河口付近の公園の被災状況を図3に示す。この公園は埋立て砂の上に植栽用の覆土を施しており、埋立て砂の液状化による覆土の沈下によって地盤に幅40cmの亀裂と高さ50cmの段差が生じていた。段差面から観察された覆土の厚さは約30cmであった。

高層建築物は外見上すべて健全であったが、液状化による歩道の沈下で建築物との間に段差が生じていた。また、歩道のマンホールの浮き上がりも各所で見られた。図4はP2のひび野地区のマンホールの浮き上がり（高さは約1m）である。

P3は潮来市日の出地区であり、図5はこの地区の液状化による道路の変状と電信柱の傾斜を示している。歩道上には噴砂跡残り、沿線のほとんどの電信柱が大きく道路側に傾斜していた。また、この周辺の多くの建築物は躯体には損傷は見受けられないものの、液状化が原因と考えられる不等沈下による傾斜変形の被災を受けていた。

以上のことは、沿岸域や湿地に建設される住宅などの小規模建築物に対しては、その規模にかかわらず躯体のみならず地盤に関しても耐震設計が必要であることを示唆している。

具体的には、敷地の液状化判定の実施や地盤改良あるいは杭基礎の採用の検討が必要であると考えられる。

津波による被災

津波による被災については、千葉県旭市の飯岡地区（2011年3月23日に調査）と茨城県平潟漁港および大津漁港（2011年3月29日に調査）の状況を示す。

図1のP4は飯岡地区の九十九里ビーチライン沿いの家屋の被災箇所である。この付近の海岸は岸沖方向に幅の広い砂浜を有しており、砂浜の陸側端部には高さ2mほどの緩傾斜型堤防が築造されていた。津波は北東方向から屈折して九十九里浜方向へ向きを変えて飯岡に来襲した。津波は遠浅の地形と砂浜で減勢はしたものの堤防を乗り越えて、沿岸の家屋を倒壊させた。住民の説明によれば津波はこの傾斜型堤防によって大きくジャンプして家屋を襲ったとのことである。このことは護岸の配置や形状に対する課題を提示している。図6は飯岡地区の家屋被災状況の一部であり、この地区の津波痕跡は地盤面から高さ2mであった。

図1のP5は飯岡漁港である。飯岡漁港では屏風ヶ浦に沿って南下してきた津波が初めに南側の突堤を乗り越えて港内に来襲した。津波の侵入方向の港奥には多くの停泊中の漁船があり、これらが互いに衝突しながらエプロンに乗り上げ、漂っていた漁船は引き波で突堤の小段に乗り上げた。漁港全域が浸水し、ほとんどの漁船が被災した。図7に被災漁船を示す。

図2のP6は北茨城市の平潟漁港に隣接する住宅地である。平潟漁港は入り江の良港として古くから栄えた港であるが、波高7mの津波の遡上により高台の住宅や旅館が被災した。漁港南側の護岸前面は消波ブロックが施されていたが、外洋から直接来襲した津波はこの護岸を乗り越えて背後の家屋を襲った。そのため、家屋の壁面は津波水塊の叩きつけにより破壊された。図8に家屋の被災状況を示す。

図2のP7は北茨城市の大津漁港である。沖防波堤の一部

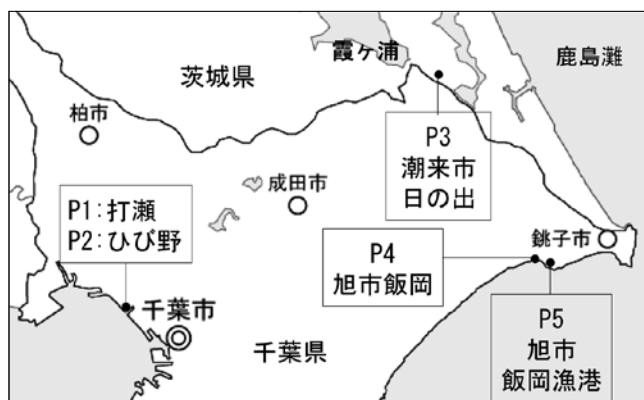


図1 調査位置図 (P1～P5)



図2 調査位置図 (P6～P7)



図3 液状化で生じた段差



図4 浮き上がったマンホール



図5 噴砂跡と傾斜した電柱



図6 津波で被災した家屋



図7 空地に乗り上げた漁船



図8 護岸背後の被災家屋

が津波により倒壊しており、津波荷重の甚大さを示していた。漁港内の漁業協同組合付近のほとんどの家屋が全壊していた。図9は家屋の被災状況であり、倒壊した家屋の中に漁船が乗り上げていた。係船岸のエプロンは液状化により崩壊して海中に陥没している箇所があり、健全なエプロンの上には多くの船が打ち上げられていた。図10はエプロン上への船舶の乗り上げ状況である。

大津漁港では港内水域から漁網を引き上げる作業が行われていた。他の調査地点では津波により陸上に打ち上げられ

た大量の漁網の処理作業がクレーンを使用して行われていた。漁港施設、船舶、漁具のすべてが大きく被災しており、今後の漁業復興が懸念される。

以上の他、茨城県では大規模港湾が津波による被災を受けていた。その一方で、常陸那珂港の南に位置する阿字ヶ浦では、地盤の液状化や地震動による躯体の崩壊はあるものの津波被害はなかった。調査前には、この海浜は砂浜と背後の陸上施設の間にはバリアになる構造物はないので、甚大な津波被害を受けたものと思われた。この津波災害を免れた理由は、



図9 津波で被災した家屋

常陸那珂港の沖防波堤の効果もその一つであると考えられるが、詳細は今後の課題である。

おわりに

調査結果によれば、液状化による被災は今後の沿岸域の土地利用における地盤改良などの対策実施を再認識させている。住宅などの小規模建築物に対しては、液状化対策は施されなかった。しかし被災地では液状化は想定範囲のことであったと考えられ、設計者が対策を講じなかった理由を明らかにし、今後の設計の警鐘とすべきである。

津波による被災は完全な防護の困難さを示している。津波防災は復興計画の中で議論されるが、避難路と避難場所の確保とともに、津波の勢いを低減する対策と津波の遡上を誘導する対策が必要である。

調査結果によれば九十九里浜では津波は河川や海に通じている道路に沿って遡上した。このような河川や道路沿いの家屋は大きく損傷しているが、20mほど離れると浸水被害にとどまっていた。津波の内陸への遡上の特徴を利用して津波を誘導するような道路計画が可能であろう。また、九十九里有料道路は砂丘上に建設されており、ヒアリングによれば、この道路は津波来襲に対してバリアの役割を果たした。もし



図10 エプロンに乗り上げた漁船

この道路が2本あり、海に通じる道路が直線であれば、この道路間は一時的な貯水池になる。このようなことを考え合わせると図11のような津波対策案も考えられる。

私たち海洋建築工学科は、本稿で述べたような被災状況の調査とその結果の考察を継続し、復興計画や津波対策の立案に役立つ調査研究を積極的に実施している。

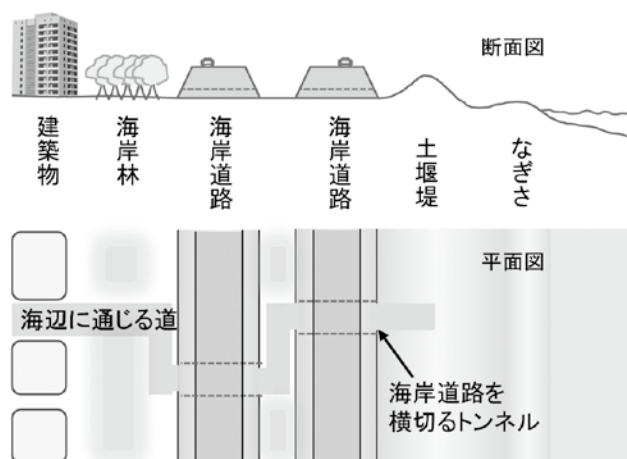


図11 津波を減勢するアイデア

理工学部

東日本大震災復興支援研究プロジェクト

本プロジェクトは、多くの災害事象を詳細に調査することで、災害復興や災害に強いまちづくり、地震防災体制の提言や減災技術の開発など、理工学部の研究基盤を基礎として技術支援に取り組む多年度継続型の復興支援である。

本研究プロジェクトを実施するにあたり、研究の推進と成果発信を支援するために、理工学部の附属施設である防災センター内に「東日本大震災復興支援室」を設け、プロジェクトの研究拠点として情報の一元化を図られている。復興支援室には、理工学研究所長、次長および研究プロジェクトの代表他数名の幹事で構成する企画調整委員会を設け、プロジェクト全体の活動が統括されており、研究プロジェクトはテーマ別に下記の6つのグループで組織されている。

【復興支援室の体制】

- | | |
|---------|---|
| 支 援 室 長 | 中西三和 (海洋建築工学科) |
| 同 幹 事 | 小林昭男 (海洋建築工学科) |
| 同 幹 事 | 秦 一平
(建築学科、防災センター業務責任者) |
| プロジェクト① | 復興まちづくり／岸井隆幸 (土木工学科) |
| プロジェクト② | 構造物被害と地盤災害／古橋 剛 (建築学科、
防災センター管理責任者) |
| プロジェクト③ | 津波対策／増田光一 (海洋建築工学科) |
| プロジェクト④ | 交通システム／藤井敬宏 (社会交通工学科) |
| プロジェクト⑤ | 情報通信システム／泉 隆 (電子情報工学科) |
| プロジェクト⑥ | 原子力被害・エネルギー供給システム／
仲 滋文 (物理学科)、補佐 鈴木勝行 (電気工学科) |

港湾における被害状況

准教授 居駒知樹

津波による被害とはいかなるものか？ 津波は一般に沖合を伝播中には気づき難いとされている。沖合では津波の高さは決して高くなく波の長さが極めて長いため、水面の変化を目視し難い。そのため、一般的には沖合まで船舶が退避できれば津波被害から逃れられる場合がほとんどである。しかしながら、沖合で1 m程度の波高の津波が港湾に押し寄せた場合、港湾内では数 mの高い津波になって確認されることは珍しくない。水深が浅くなることによる浅水変形が直接の要因で、地形によっては特定の場所に波が集中することが起きてさらに波高が高くなることもある。いわゆるリアス式海岸で津波高が高くなる要因である。

津波が台風時の大波よりも恐ろしい理由は、わずか1 mの高さであっても水深が1,000 mであれば、1,001 m分の高さの海水が丸ごと陸に押し寄せてくるためである。押し寄せた海水（津波）は水深が0 mになれば、一気に陸側に溢れることになる。陸に溢れた津波は波から流れに変化し、あらゆるものを押し流そうとする。

津波は“波”として陸に迫り、陸への遡上とともに流れに変わる。遡上津波の動的な荷重は遡上水位と流速で決定される。もちろん、流速が速い方が荷重は大きい。後者の流速は水波としての水粒子速度よりも流れに変化した後の方が速くなる。遡上津波の先端が崩れることで「射流」となると、さらに流速は高くなり、陸上の構造物に働く荷重はさらに増大する。

東北地方太平洋沖地震に伴う大津波では人的被災と合わせて、大小の船舶被災、港湾施設の被災、港湾の後背地におけ

る工業地帯や住宅地の被災、市街地の被災、水産施設や港湾施設の被災などがある。

港の被害

港は物理的に海と陸とが繋がるインフラであり、機能としては商業・工業機能有する場合や水産機能を有する場合がある。それぞれの機能に応じて船舶関連施設と背後地には物流関連施設や工場が隣接する。場合によっては住宅地も隣接するような大きな後背地を有することも珍しくない。港は船舶に係留されかつ荷役が行われるため静穏である必要がある。そのために、防波堤が種々の方法で設置される。津波が想定される沿岸域の港では、釜石港に代表されるような津波防潮堤が海上にも設置される。

津波の来襲を聞きつけて港外へ避難する船舶もテレビで映し出されていた。実際に避難した船舶もあるようである。しかしながら、それらはほんの一部に過ぎない、5 t程度の小型船舶は陸域数 kmあるいはそれ以上流されているものも多く、20 t未満程度でも港の背後地まで遡上して流されている（写真1）。大型船舶であっても岸壁からさらに陸内に打ち上げられているものも珍しくない（写真2）。実はこれらの陸で発見される船舶は、東北地方の港湾や漁港に係留されていた船舶の一部に過ぎない。多くが港内に沈没している。もっというと、港内で沈没しているという確認ができれば良い方である。小型の船舶は引き波で沖にさらわれ、実際のところほとんどの船舶が発見されずにいるという。今後多くの船舶が太平洋上で漂流しているのが確認されるだろう。



写真2 仙台新港で岸壁に打ち上げられた船舶

写真1 陸前小野駅周辺まで漂流した小型船舶

建物の被害

東北地方沿岸地域を襲った津波は、数 m の浸水高といえども秒速数 m の流速であったと思われる。そのため、自動車は流され、強度の弱い壁は飛ばされ、それがさらに後方の物を破壊していくということが連鎖的に起きている(写真3)。その度合いが大規模となったり、流速が大きくなったり津波高が高くなったりした地域では、強度の大きな RC 造のビル以外はことごとく倒壊して流された。30年以上前に建てられた古い建物は RC 造であっても基礎をすくわれて転倒しているものも見られた(写真4)。



写真3
北茨城・大津漁港裏で民家の塀に突っ込む自動車

木造住宅はコンクリートの基礎を除けば、丸ごと浮き上がってしまうほど軽い。RC 造であっても単位面積当たり 1 ～ 2 t 程度で考えれば、十数 m の浸水で、もしも建物内部に海水が浸入しなければ、極めて大きな上向きの荷重(浮力)を受ける。ほとんどの場合、1 階の窓や壁が破壊されて建物内に大量の海水が流入する。それは建物後方の窓から流出するか、建物そのものを押し流す。後者の場合にはさらに後方の建物をそれ自身が破壊する。このような連鎖が大なり小なり発生して、最悪の場合には集落や街全体が全て没われてしまう。今回の大津波では実際に多くの地域でこのようなことが起きてしまった。

今回の津波による被害では、津波そのものによる破壊はもちろん、流された漂流物による倒壊や破壊が起きていたことも理解する必要がある。瓦礫が遡上津波と一緒に流れることの重大さを今後の復興計画や津波被害研究に考慮していくことが求められる。



写真4 転倒した RC 造の建物(女川)

各地から出動したメガフロート

造船各社によるメガフロート技術研究組合によって実証実験がスタートしたのは、1995年である。全長300m、全幅60mの浮体を海上に浮かべて“メガフロート”の波浪中性能や海洋環境影響、そして計器の安全性などの試験が始まった。この浮体による試験は3年間継続された。そして、1998年からはフェーズⅡに移行し、これまでにない巨大な浮体式構造物である浮体式空港実証試験が開始されることになった。全長は1,000m、最大幅120mという“メガフロート”（図1）は同様に3年間の試験を行い、その間に小型機の離発着やYS-11型機によるタッチアンドゴー試験が実施された（写真1）。世界的にも大きな話題を呼び、その後の羽田空港D滑走路浮体式案を策定するための基本技術となったのである。“メガフロート”という単語はこの実証実験の際に生まれ、当初は実証試験機の大浮体そのものを意味する固有名詞として用いられていた。その後、超大型浮体あるいはそれなりの規模のポンツーン型浮体はメガフロートと表現されている感がある。

東北太平洋沖地震と大津波によって多くの沿岸地域が被災した。そして、福島第1原子力発電所ではレベル7という事故が発生し、本原稿執筆中の今なおその対応に余談は許されない状況が続いている。この大震災の後、室蘭港に設置されていた室蘭港浮体式防災施設が福島県の相馬港に派遣された。この派遣は物資輸送とともに、その後の臨時浮棧橋としての利用やヘリポートとしての利用が可能であるとの理由から決められた。浮体規模は長さ80m、幅24m、構造深さ4mである。この浮体は国土交通省が阪神淡路大震災での教訓を受けて、“メガフロート”の実証試験以降、広域防災計画立案の中で、浮体式の地震に対する優位性をさまざまな観点から検討して建造されたうちのひとつである。建造技術は前述した“メガフロート”の技術研究の成果が適用された。これの他に大阪湾、名古屋港、横浜港にも防災拠点用の浮体が設置されている。室蘭の広域防災用浮体は被災地に内で物資輸送やその後の救援・復旧作業の拠点とするために活用された。本来の役割を果たしたといえる。

これとは別に福島第1原発での放射能汚染水の貯水を目的とし

て、静岡県の清水港から海釣り公園として利用されていたメガフロート（長さ136m、幅46m、構造深さ3m）が現地に曳航^{えいこう}されることが決まった。本原稿執筆時点では三菱重工業の横浜ドックにて改造作業が進められているはずである。このメガフロートは本稿初めに紹介した“メガフロート”の一部である。実証試験後にいくつか分割され、海釣り公園として全国3カ所で利用されている。今回はそのうちのひとつである。2000年のサッカーワールドカップの決勝前夜祭が開催された会場も“メガフロート”の片割れであった。1,000mの規模のメガフロートは造船所のドックで建造することは不可能である。そのため、全国のドックでユニット浮体を建造し、メガフロート設置海域まで船舶で曳航^{えいこう}してきて繋ぎ合せた。この場合には溶接による接合であった。図2のような構成である。鋼材のみでできたメガフロートは溶接方法（洋上では揺れる）が確立されたのちは問題なく作業できる。さらに、鋼材のみで構造部材が出来上がっているため、水密性さえ確保できれば使用後は切断して分割することも可能であった。その結果、大部分が国内で2次利用されていた。

今回の福島第1原発の汚染水を貯水するタンクとして利用されることになったのは、タンクとしての相当量の容積を確保できると、改造が容易であったからであると推察される。改造の内容は、汚染水を浮体内全体に均等に注入できるよう、浮体内の隔壁に穴をあけることが主であった。鋼製構造物ではドックにさえ入れば比較的容易な作業である。

汚染水の注水が完了した後の処理については定かではないが、今回の大震災で復旧に関係する作業に「メガフロート」が登場したことの意味は大きい。当時の研究に直接携わった筆者としては、必ずしも満足できる用途とはいえないが、国の大事に活躍したことは事実であるし、浮体式構造物の幾つかの利点の実証された結果として、浮体式構造物利用の実績が出来上がったのである。今後も国内の防災計画の中における浮体式構造物（メガフロートのようなもの）の位置付けは高くなると予想できる。さまざまな実用的用途への活用も積極的になるだけの実績を作ったこともまた事実である。

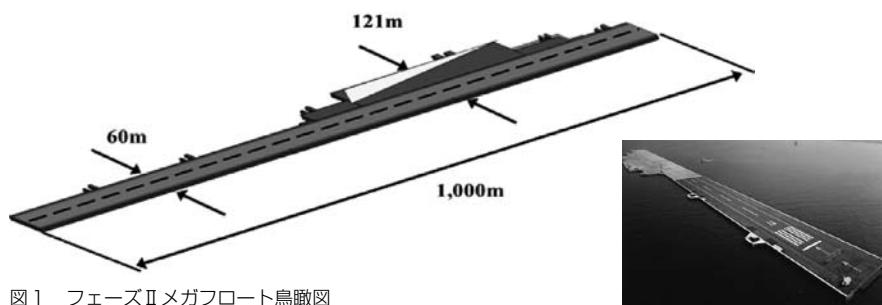


図1 フェーズⅡメガフロート鳥瞰図

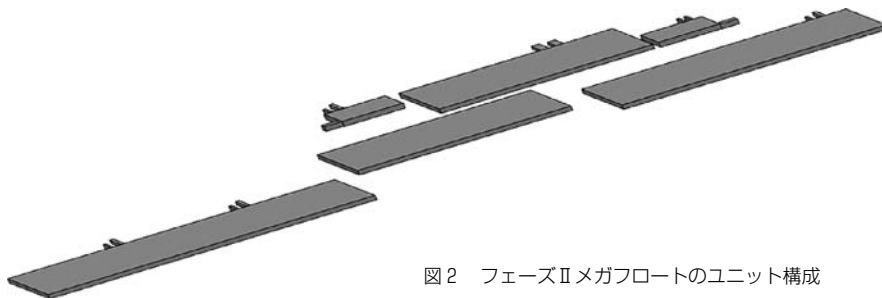


図2 フェーズⅡメガフロートのユニット構成



福島に向かうメガフロート

共同通信5月7日より引用

津波避難ビルによる減災対応

教授 増田光一

津波避難ビル指定制度の背景

沿岸都市で津波に対する避難計画を策定する場合、高台のない平地では、津波避難ビルの設置が必要になり、その適切な立地選定と配置が重要になる。津波避難ビルは、津波に耐えられる高さや強度を持つことを要件とし、津波の来襲時に住民が待避し、波が引いた後に公共施設の避難所へ移るための一時避難所の機能を担う。この制度は、2004年のインドネシア・スマトラ沖大地震の津波被害を教訓に翌2005年に国の防災基本計画に盛り込まれたことからビルの指定がはじまっている。津波避難ビルは以下の基準を満たすものが選定される。

- ① 鉄筋コンクリート造または鉄骨鉄筋コンクリート造の3階建て以上の耐震性のある建築物（予想浸水高が低ければ2階建てでも可）であること。
- ② 日頃から鍵がかかっていない、または常に警備員などが常駐し、屋上に通じる外階段が設置されているなど、緊急時の利用に対応できる。
- ③ ビルからおおむね半径200mの範囲を避難対象エリアとし、1人あたりおおむね1m²程度として避難可能人数を算定する。

津波避難ビルは、既存の施設を津波避難ビルとして指定する場合と、津波避難専用に計画・整備されたものがある。既存の施設を津波避難ビルに指定した事例としては、宮古市、

静岡市、釜石市にそれぞれ存在する。こうした市街地に建つ津波避難ビルは、高台または避難場所まで避難することが困難な場合、緊急的かつ一時的な避難場所として利用するものである（図1）。

津波避難ビルの事例

写真1は岩手県釜石市の津波避難ビルに指定された市営釜石ビルである。3月11日の津波で3階は床上浸水したが4階以上には被害はなかったことが明らかになっている。このビルには、地震直後に住民が逃げ込み、一定程度津波避難ビルの役目が果たされた。このことから釜石市民においては、このビルが、津波が発生した際の避難場所として広く認識されていたことが推察される。

また、宮城県気仙沼市では民間食品会社（ヤヨイ食品）ビルの3階以上と屋上が、静岡県静岡市では、清水港に面した総合ショッピング・アミューズメント施設「エスパルスドリームプラザ」（写真2）のオープンデッキがそれぞれ津波発生時の避難場所として指定されている。

津波避難ビル等専用の施設の事例として、北海道奥尻町の望海橋、三重県志摩市の畔名地区津波避難タワー、三重県大紀町の錦タワーの3例を紹介する。

写真3・4が望海橋（人工地盤）である。本施設は漁港内に立地し、平常時は、網干し場や網の保管場所として利用され、津波による災害時にはすみやかに高台への避難を可能にしている。また、この施設は、鉄筋コンクリート造で、その



図1 避難困難地域の抽出の考え方（参考文献1）



写真1
岩手県釜石市・市営釜石ビル



写真2 静岡県静岡市・エスパルスドリームプラザ



写真3
北海道奥尻町・望海橋
(撮影：阿波秀真・設計：
㈱AWA建築計画研究所)

延べ床面積は、4,650 m^2 である。

写真5が三重県志摩市・畔名地区津波避難タワーである。避難タワーは、津波からの避難で高台まで逃げきれない場合を想定し設置された施設であり、鉄骨造で7.9m、延べ床面積13 m^2 である。

写真6が三重県大紀町・錦タワーである。本タワーは、津波発生時の緊急避難場所および防災活動の拠点として活用されている。構造は、鉄筋コンクリート造の5階、延べ床面積は319.47 m^2 である。

津波避難ビルの役割

津波からの避難は、津波が発生する前に浸水エリア外または高台等に逃げるのが原則である。こうした安全な場所の整備が困難な場合は、津波避難ビルの指定を行い、一時的な避難場所を確保する。津波避難ビルは、あくまでも一時的な避難等を中心に考えた施設である。今回の東日本大震災では津波避難ビルは、一定の効果をあげたが、大震災の教訓を活かして避難ビルの普及促進と指定基準の見直しおよびハザードマップとの関連性を高める必要があると考える。

参考文献

1) 内閣府：「津波避難ビル等に係るガイドライン」2005年



写真4 望海橋模型
(出典：北海道開発局「青苗地盤—災害に強い漁港漁村づくり」)



写真5 三重県志摩市・畔名地区津波避難タワー



写真6 三重県大紀町・錦タワー

射流について

3月11日に発生した東日本大震災において木造およびRCの建築物に壊滅的被害をもたらした津波は、「射流」と呼ばれる特殊な津波であることが東京大学地震研究所の都司准教授の分析によって明らかになった。通常の津波は、常流と呼ばれ、流れは比較的遅くゆっくりと水位が上昇していく。これに対して射流は、津波の伝搬速度よりも流れが速く、都司准教授によると滝のように海水の塊が一気に押し寄せるため、危険性が非常に高い。

ここで、港湾空港研究所のGPS波浪計の観測結果を基に都司先生の分析について考察する。図1は岩手県南部沖における津波の第1波の拡大図であり、これを詳しく観察すると地震発生後から15分後の15時頃から約6分間で2m程度に緩やかに上昇し、その後4分程度でさらに4m以上も急激に上昇していた様子が明かになった。このような状態で沿岸陸域に砕波しながら海水の壁が遡上した状態を射流状態と呼んでいる。このような急激な水位上昇がどのようにして発生したかは、さらなる分析の成果を待つことにして、ここでは射流について水理学的にできるだけ平易に解説する。

われわれが毎日経験している水理現象の中に「常流」と「射流」は存在する。それは、風呂に水を入れる様子を良く見ると図2のよ

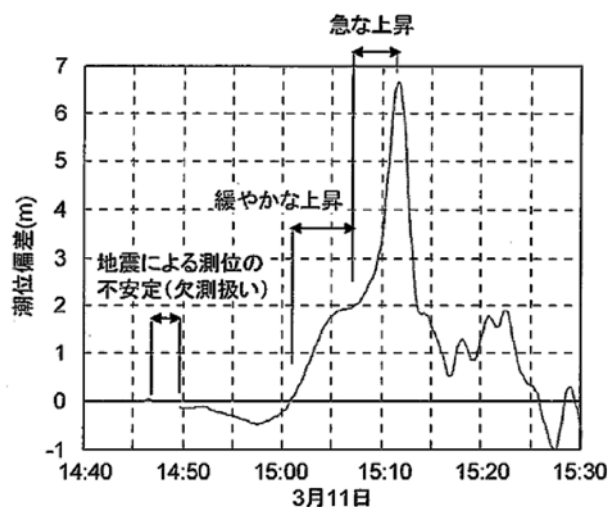


図1 岩手南部沖における津波の第1波の拡大図¹⁾

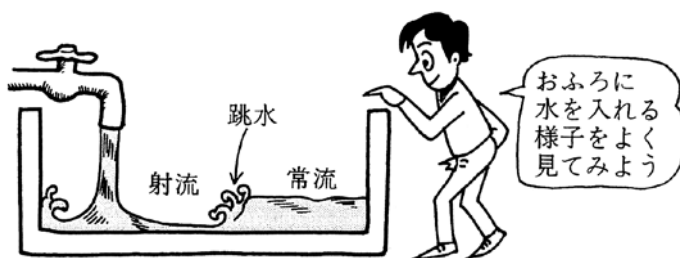


図2 射流と常流の模式図²⁾

うな模式図になり、蛇口から水が風呂の底に落ちると激しく周辺に跳ねるこの時の流れを「射流」といい、その周辺の遅い流れを「常流」という。

一方、開水路では図3のように「常流」と「射流」が発生する。これら二つの図から「常流」は比較的遅い流れでそれに対して「射流」は早い流れとなることが理解できる。二つの流れの速さの違いの定量的に区別する指標として、津波を浅海長波と仮定するとその伝搬速度Cは

$$C = \sqrt{gh} \quad (g: \text{重力加速度}, h: \text{水深})$$

のよう与えられ、「常流」の流速uは伝搬速度Cより小さく、「射流」の流速は、Cよりも大きくなる。この長波の伝搬速度と流速の比をフルード数Frといい、フルード数は「常流」と「射流」の区別を求める無次元量である。

フルード数によって「常流」と「射流」を判別すると次のようになる。

$$\text{常流} \quad Fr = \frac{u}{\sqrt{gh}} < 1$$

$$\text{射流} \quad Fr = \frac{u}{\sqrt{gh}} > 1$$

ところで、遡上後の津波による荷重、すなわち津波力は、ハザードマップを基にした浸水深の3倍の静水圧の三角形分布を仮定して評価されていたが、海岸に近い場所の津波避難ビル等の建築物の設計には、射流状態で防波堤を乗り越えた津波遡上流の衝撃圧を考慮する必要があると考えられる。また、水槽実験やシミュレーションを駆使してその衝撃圧の実用評価式を作成することが望まれる。

参考文献

- 1) 高橋重雄、他33名 (2011) : 2011年東日本大震災による港湾・海岸・空港の地震・津波被害に関する調査速報、港湾空港技術研究所資料、No.1231、2011年4月
- 2) 栗津清蔵監修 (2009) : 絵とき水理学 (改訂2版)、(株)オーム社、2009年12月

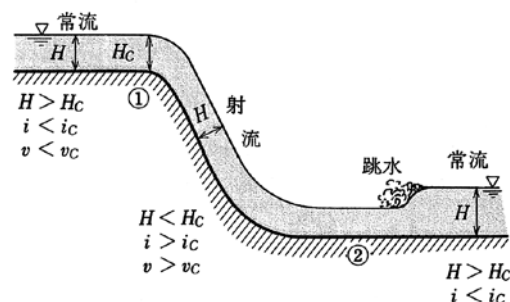


図3 開水路における常流と射流²⁾

津波に強いまちづくりの提案に向けて

客員教授
リサイクルソリューション理事長 新井洋一

ウォーターフロント開発と津波来襲

東日本大震災は、ウォーターフロントには、津波の危険性がある空間であることをあらためて示した。西暦684年に四国沖で起きた津波災害以来、今日までの約1,400年間に、約60回の津波災害が起きている。20年～30年に1回、津波災害が起きていることとなる。記録が比較的正確な明治以来では15回来襲しており、10年に1回の割合となる。わが国のウォーターフロントにとって、津波来襲は、日常的なことであるといえる。

海洋建築工学科は、これまで、海と建築構造物とのかかわりについての研究を数多く行ってきた。海辺の持つ、優れた特性を活かすまちづくりや、海辺に市民のアクセスを向上させるための各種の提案を行うなど、わが国のウォーターフロント開発に大きな影響を与えてきている。

今、東日本復興を目指して、津波に強い都市づくり・まちづくりを目指し、現在各方面で叡智を集める作業が進められている。海と、建築物との双方の結びつきを追求している海洋建築工学科には、新しい海辺の防災空間づくりを進めることに、高い期待が寄せられている。

高台願望

「高台へ避難してください」の放送を続けながら殉職した役場の女子職員の声は、命を救われた地域の人々には「天使の声」であったと報道されている。これは、津波の来襲時に助かるためには、いかに素早く高台へ辿りつくかにかかっていることをあらためて教えている。標高60m近くに「ここより下には住むな」という碑がある岩手県宮古市姉吉地区では、住民は教えを守り今回被災はなかったといわれている。わが国の近海地震による津波は、例外もあるが、ほぼ20分程度で来襲するとされている。20分で高台に逃げることであれば命が守れる。津波に強いまちづくりのキーワードは「高台」だ。「いかに高台に素早く辿りつくか」あるいは、「高台に住む」である。

津波で被災した地域の状況を見ると、津波の浸水を免れた高台は、のどかな田園風景が広がる。しかし、浸水した地域は、天国と地獄を分けたように悲惨な風景だ。津波遡上高から上にあるか下にあるかが命を分けた（写真1）。

津波は強い流れでまちを飲み込んだ

今回、津波の来襲状況が数多く記録された。そこには、陸上では津波は「水の強い流れ」「高速の氾濫流」となり、あたかもまち全体に大洪水が押し寄せて来ている状況が映っている。家屋に残った津波の痕跡と地面との深さは「浸水深」、津波が遡上した高さや津波到達時の天文潮位の間は「遡上高」と呼ばれている（図1）。

今回、津波が来襲する海上の状況が航空機により捉えられた。そこには、あたかも海全体が岸に向かって流れ、変形し



写真1 津波の浸水のなかった高台と低地とは命を分ける（菖蒲田浜）

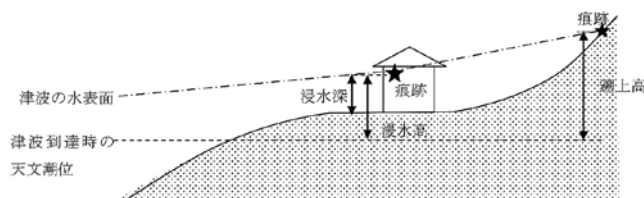


図1 津波の痕跡高の種類¹⁾

ながら押し寄せてくるいくつもの波の重なりが映し出されている。さらに、津波が松林や護岸などの陸上に達すると、津波は構造物にぶつかり飛沫とともに大きく盛り上がっている。これは津波の運動エネルギーが位置エネルギーに変わることによる。海岸付近では津波の高さは約1.5倍程度高まるとされている。さらに上陸した水の塊は、高速の流れとなり、あたかも巨大な生き物のように田園や家屋を飲み込みながら進行する。これに巻き込まれると、生命は危ういことが容易に想像できる。今回釜石港で観測された流速は、護岸を越流した時点で浸水深7.51mで約2.4m/sの流速があったことが報告されている。

今回、現地視察を仙台港、塩釜港、石巻港、女川港とその周辺地域について行った。津波来襲からほぼ1カ月の後である。私は、かつて10年間ほど、東北・関東の港湾海岸の計画や建設に携わったことがある。塩釜には住まいもあった。見覚えのある風景は激変していた（写真2、3）。



写真2、3

老後は釣りを楽しむと言っていた知人の家は、どこかもわからない。集落はすべて流出していた。知人は今もってどこに行ったのかわからない（仙台港蒲生地区 浸水深約9m）

建物の被災状況

建物の被災程度は、建物に作用する力の大きさに依存する。津波の流速や浸水の深さが大きな要因である。また、建物の構造や造り、とくに木造、鉄筋コンクリート造、鉄骨造、使用材料なども被災に関係してくる。一般的には浸水深が2～3m程度では、木造は大破、鉄筋コンクリート造は小破の状況が多いとされている（写真4）。それ以上になると木造は大破・流出の状況が大層を占め2階に逃げている生命は危うい。

浸水深が5m以下であれば、鉄筋コンクリート造の建物は小破、5～8mであれば中破といわれてきている。例外も見られるが、おおむねそのような状況が見られる。ここには、津波避難ビルは鉄筋コンクリート造が好ましいことが示されている（写真5）。

津波による漂流物も被害の大きな要因となる。とくに自動車の流出や港湾内の倉庫の貨物の流出、大型貨物車の流出などが建物に大きな衝撃を与え、建物の破壊にも及んでいる。また、自動車の中で命を落とした人も多いといわれている。船舶や油タンク、コンテナなど臨港地区では港湾特有の漂流物の影響も大きいものがある。建物の流出は、建物自身の浮力によるものの影響も大きい。高床式の構造物は、浮力が軽減されることや、波力の軽減も加わり、破壊形状が軽微な状況が見られる（写真6、7）。

海辺にある仙台新港緑地、その基部の各種構造物は、植栽も含め、破壊された状況が見られるが、本体である大規模な盛り土による丘陵状態の構造物はまったく影響を受けていない（写真8、9）。これと同等に、盛り土状の道路も内陸においては津波の進行を大幅に防止し、防災構造物としての機能がみられたことが報告されている。また、自動車を飛び出し歩道橋上に逃げた人が数多く助かった話もある。これらは津波避難構造物を考える参考となろう（写真10）。

多重津波防護システム開発の必要性

津波対策の基本であった土木構造物、海岸保全施設による完全な防護は困難であることをあらためて体験した。原点に立ち返る発想が必要だ。これからは、可能な限り高い場所に逃げる、なるべく高台に居住するなど、高台を目指す計画が以前にも増して真剣に検討されるだろう。この半面、津波に飲み込まれた低地は緑地や公共施設を中心にし、住居は丘陵地帯や高盛土のネットワークなどに計画するというような内容のコンセプトを多くの人がまず思い浮かべることになるだろう。

高台づくりには、主要な材料としての土が各所で使われるだろう。土による高盛土構造物を複数設置することにより、津波防護の効果を上げることなどだ。また一方で、コンクリートや鋼構造物による人工地盤構造物も数多く検討されるだろう。今回、津波の浸水深も予想を大幅に外れた箇所が多い。まち全体の水も漏らさぬ防護壁の構築などは不可能なことを体験した。伝承や体験を取り入れた自然に逆らわない思考や構造物が見直されるだろう。ハードとソフト、多くの要素を組み合わせることによる「多重防護」の考え方が現実的なものとなるだろう。

これを実施するためには、多くの専門家を横断し、曖昧なものも取り入れる態度を持つ、新しいタイプの技術者が必要となる。このため、われわれはこれまでも増して幅広い知見に基づいた豊かな発想と確固とした信念を持つ必要がある。技術の幅を大きく広げる必要がある。ハードな技術分野に加え、ヒューマン（人間的・社会的）な技術分野についても強い関心を持つ必要がある。

耐津波構造物開発の必要性

津波が来襲する海辺の低地には、まったく構造物を設置しない、住まない、ということは、現実として成り立たない。



写真4
浸水深2m程度の住宅地。なんとか形状を保っているが1階部分は壊滅（多賀城市）



写真5
海に面した鉄筋コンクリート造の建物は、屋上まで津波が来たが形状は保っている。背後の建物は、なんとか残存状況にある（女川港 浸水深約13m）



写真6
仙台港フェリーターミナル駐車場のタンクローリーの漂流（仙台区 浸水深約3～4m）



写真7
船舶の転覆乗り上げ。船舶は、港内では危険な漂流物となる（塩釜港区西ふ頭観光棧橋 浸水深約2.5m）



写真8
下部の集会所などは破損があったが、200万㎡の土砂を積み上げている丘陵全体はまったく影響を受けていない。大規模な盛り土構造物は、津波抵抗力の大きさを示している（仙台新港中央緑地）



写真9
仙台新港中央緑地上部。点線の部分まで津波が遡上した（痕跡高9.9m）



写真10

県道女川石巻線、避難所となった歩道橋。階段は被災している



写真11

臨港鉄道。コンテナも流出（仙台港 浸水深約4m）



写真12

外壁の防護能力のない倉庫。資材の流出は周辺に大きな被災要因となる（石巻港 浸水深約4m）



写真13

鎮守の森で守られている神社も被災した。多賀城市八幡神社（宮内1丁目）

海辺には、必然的に設置しなければならない構造物も多い。臨海産業基盤、臨港鉄道、港湾施設、倉庫や公共施設、污水处理場、エネルギー基地などさまざま。地形や場所によっては、低地へ立地する住宅も発生するだろう。われわれはこれからの構造物ごとに津波への抵抗力を高め、津波の被災を軽減する構造物づくりと向き合わざるを得ない（写真11、12）。

外力としては、津波自身の波力・衝撃力に加え、各種漂流物による破壊をどのように捉えるか、あるいは津波が引くときの外力をどう捉えるかなどの課題解決が迫られよう。

耐津波構造物の備えるべき要件としては、来襲時の構造物本体の安定や高さの維持に加えて、例えば、倉庫に収容している荷物の漂流の阻止や、外壁の漂流物に対する衝撃に耐える構造など、周辺に及ぼす影響の少ない、さまざまな工夫が必要となろう。来訪者や働く人たちの避難場所の設置計画や構造の検討も必要となる。また、駐車場の車の漂流防止などもある。

東日本大震災体験の教訓は、日本の他の地域へただちに活かさなければならない

わが国では、東日本大震災に続き、同等か、もしくはそれ以上の確率で発生が予想されている地震として、東海・東南海・南海地震がある。これに伴い、津波が発生し、大きな被害が予測されている。いつ、どこで地震が発生するか予測することは困難であるが、発生までに時間的な猶予があるわけではない。とくに関東や東海の大都市地域では、再開発などにより、居住地域や各種都市機能の展開地域が臨海部へ拡大

している。また、大都市における0m地帯などの低平地においては、津波の被害が生じた場合には、浸水区域が広範囲に及び、深刻な被害の発生が予想される（図2）。

東海、東南海、南海地震が予想される地域は、太平洋ベルト地帯といわれているように、わが国の産業、経済の中核地帯だ。この地域の被災は、東北関東大震災以上の大きな影響があることは明らかである。早急に今回得た教訓を活かすことが求められている。

新しい日本づくりのはじまり

マスコミで紹介される被災住民の対応や会話は、悲惨で破壊されたまちの風景とは異なり、住民の持つ倫理観や価値観が大変さわやかなものとして、多くの人々の心を打った。そこにはわれわれが忘れようとしていたかつての日本人の根源のようなものが、伝わってきている。

復興計画づくり、新たなまちづくりは形の復元ではない、地域の活力と文化を引き継ぐことが大切だ。海辺では、みなとまつり、花火大会などは地域の生活の一部となっている。地域コミュニティは、重要な地域資源である（写真13）。

今回、地域住民のコミュニティ意識の強さや、地域への帰属意識の強さが、東北にはまだ充分継続されていたことが示された。復興計画を実行するとき、この地域コミュニティの力が再生維持を図る力となる。

われわれにはこれまでの体験を活かし、東日本の復興を、新しい日本づくり、新しい物語づくりの中でひとつひとつ、積み上げていくことが求められている。

【海溝沿いの主な地震の今後30年以内の発生確率】※20%以上のみ掲載

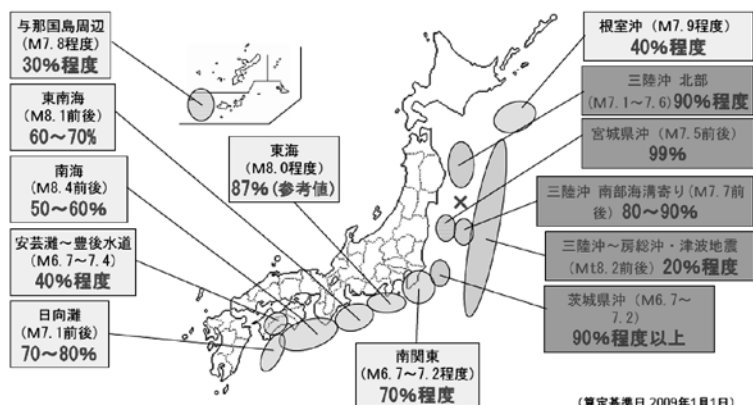


図2 大規模地震発生切迫²⁾

引用・参考文献

- 1) 独立行政法人港湾空港技術研究所「港湾空港技術研究所資料No.1231」、2011年4月、独立行政法人港湾空港技術研究所、p47
- 2) 地震調査研究推進本部「海溝型地震の長期評価の概要」（算定基準日2009年1月1日）
- 3) 財団法人沿岸技術研究センター TUNAMI 出版編集委員会編「TUNAMI 津波から生き延びるために」、2008年11月、丸善プラネット(株)
- 4) 港湾学術交流会編「港湾工学—プロフェッショナルをめざして」、2009年11月、朝倉書店
- 5) 河田恵昭「津波災害—減災社会を築く」、2010年12月、岩波新書

GIS による被災状況の可視化

助教 坪井 聖太郎

災害と GIS —地理情報システム

地図を用いて特定のテーマを視覚的に表現・分析するための GIS (Geographic Information System: 地理情報システム) は、わが国では1995年1月17日に発生した阪神淡路大震災を契機に政府主導によりデータ基盤整備の本格的な取り組みが開始され、その後の復興都市計画に大きく寄与したことが知られている。災害における GIS の役割には、広域・狭域にわたって地図として示すことで「発災前」には避難経路の策定や、避難訓練、危機意識の共有と可視化に、「発災後」には支援物資、医療支援、ボランティア等の的確な配置計画等の復興支援に資する機能を有する。

被災状況の可視化

ここでは、岩手県、宮城県、福島県の被災状況を事例に GIS を用いて作成した地図を示す。本震災における住宅被災状況では津波により全壊、倒壊した家屋が岩手県沿岸に多くみられ、宮城県から福島県にかけて一部破損の家屋が多く見られることが特徴となっている(図1)。また、避難者数を示した図2からは原子力発電所事故により、福島県の沿岸居住者の多くが他地域へ避難していることがわかる。

三陸沿岸部では1896年の明治三陸地震、1960年のチリ地震などにおいて、たびたび津波による被害を受けており、大規模な津波防波堤の建設や積極的な防災教育の推進が行われてきた。しかし、現在までに判明している死者・行方不明者の数は、関東大震災に次ぐ深刻なものとなっている。こうしたリアス地形を持つ沿岸地域は、狭隘な湾口から低平な地形が入江状に奥地まで広がり、居住者の多くはここに集住していることが特徴となっている。今回、岩手県宮古市では、地震発生後、約30分で防波堤を越えて津波が来襲しており、人口が密集している市街地に壊滅的な被害が発生している(図3)。こうした地域の多くでは、高台への避難道路が整備されており、被害を逃れた人がいる一方で、高齢者の逃げ遅れや、自動車による避難行動から道路渋滞により被災したことなどが指摘されている。今後においては同地域の復興再建計画はもちろん、類似の地形を有する他の沿岸地域においても、立地を考慮した住宅整備計画や避難路、避難行動指針の再考等を検討していくことが課題である。

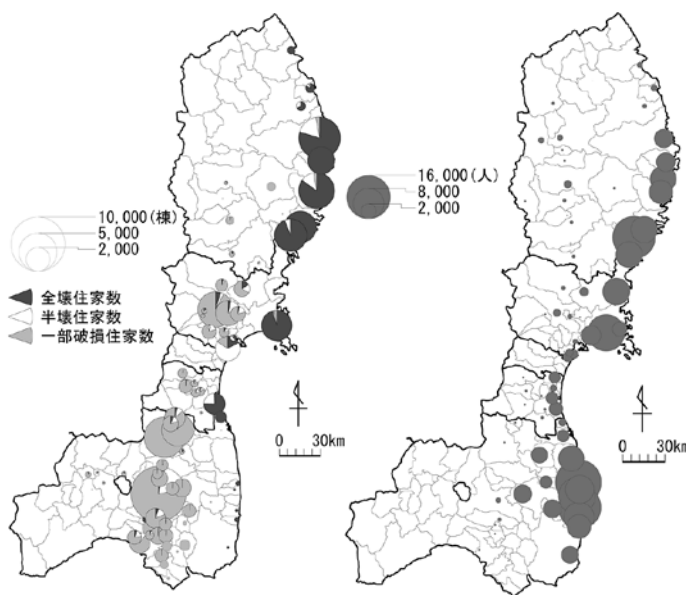


図1 住宅被災状況

図2 避難者数

※本データソースは、総務省により公開された4月26日現在の最新データであり、この中には被災状況の調査中・確認中のもの(未集計地域)も含まれている。

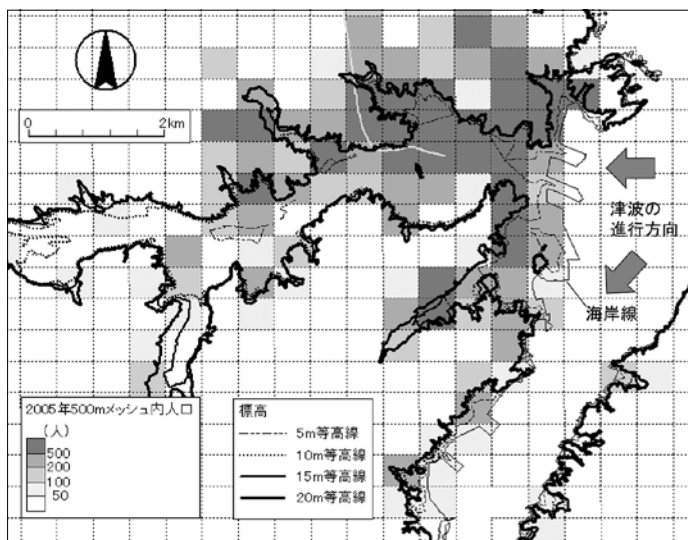


図3 岩手県宮古市の標高地形と人口分布(メッシュ)

※国土数値情報、平成17年国勢調査データをもとに筆者作成

海建 東日本大震災特集号 発行者/畔柳昭雄 発行日/平成23年6月5日

〒274-8501 千葉県船橋市習志野台7-24-1

日本大学理工学部海洋建築工学科教室

Tel: 047-469-5420(事務室) Fax: 047-467-9446

編集委員一浜原正行、坪井聖太郎

制作——(株)ムーンドッグ

<http://www.ocean.cst.nihon-u.ac.jp>