

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

三上 貴仁¹・柴山 知也²・Miguel ESTEBAN³

¹学生会員 早稲田大学大学院創造理工学研究科 (〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1)
E-mail:t.mikami@asagi.waseda.jp

²フェロー 早稲田大学教授 理工学術院 (〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1)
E-mail:shibayama@waseda.jp

³東京大学特任准教授 大学院新領域創成科学研究科 (〒277-8561 千葉県柏市柏の葉5-1-5)
E-mail:esteban.fagan@gmail.com

2012年10月29日にアメリカ東海岸に上陸したハリケーンサンディにより、ニューヨーク州やニュージャージー州の沿岸部で高潮災害が発生した。ニューヨーク市では、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、都市機能に大きな被害が生じた。本稿では、現地調査結果とウェブ上で収集した情報をもとに、ニューヨーク市における高潮災害の実態をまとめた。さらにこれらの情報をもとに、日本の臨海都市域での浸水災害を考える際に検討すべき項目として、地下空間における浸水災害の評価、人的被害軽減のための措置、異なる浸水形態（高潮と津波）の想定の上で3つを取り上げて論じた。

Key Words : storm surge, waterfront area, field survey, 2012 Hurricane Sandy, New York City

1. はじめに

2012年10月に発生したハリケーンサンディ (Sandy) は、10月29日夜（現地時間）にニュージャージー州に上陸した。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。

マンハッタン地区のような臨海都市域が、高潮や津波などの沿岸からの浸水によってその都市機能を失った事例は少ない。日本の多くの臨海都市域が面している三大湾（東京湾、伊勢湾、大阪湾）においても、表-1に示す

ような高潮災害が発生しているが¹⁾、近年ではほとんど発生していない。そのため、数値計算²⁾⁴⁾や水理実験⁵⁾を用いて被害を想定し、減災策を論じるという研究がなされてきた。これらの研究成果に、今回発生したマンハッタン地区での具体的な被害情報を加えて、より現実にした減災策を考えることは有効であると考えられる。

これらの背景から、筆者らは災害発生からおよそ10日後にマンハッタン地区を中心に現地調査を実施し、高潮による被害情報の収集にあたった。本稿では、現地調査等で得られた結果をもとに、サンディによるニューヨーク市での高潮災害の実態をまとめる。さらに、これらの情報をもとに、日本の臨海都市域における浸水災害の減災策を考える際に重要となる視点について論じる。

表-1 日本の三大湾で発生した主な高潮（文献¹⁾に加筆）

年 (台風名)	発生した湾	最大偏差(m)
1917年	東京湾	2.1
1934年 (室戸台風)	大阪湾	2.9
1950年 (28号, ジェーン台風)	大阪湾	2.4
1959年 (15号, 伊勢湾台風)	伊勢湾	3.4
1961年 (18号, 第二室戸台風)	大阪湾	2.5

2. ハリケーンサンディとそれに伴う高潮の特徴

(1) ハリケーンサンディの経路

サンディは10月22日にカリブ海で発生し、ジャマイカやキューバを縦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946 hPa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。

図-1に、サンディの経路とともに、過去にニューヨーク周辺に大きな影響を与えた2011年ハリケーンアイリーンと1938年ニューイングランドハリケーンの経路を示す。経路のデータは、Unisys Weather (<http://weather.unisys.com/hurricane/>) のトラックデータを用いており、サンディとアイリーンについては3時間おき、ニューイングランドハリケーンについては6時間おきの位置を丸でプロットし、丸の中の色はその時点での中心気圧を示している。

三者の経路を比較すると、サンディは接近時にニューヨークの南側を西に向かって進んでいたのに対し、他の二つはニューヨークの近傍を北に向かって進んでいたことが分かる。ニュージャージー州の南北に延びる海岸線とニューヨーク州ロングアイランドの東西に延びる海岸

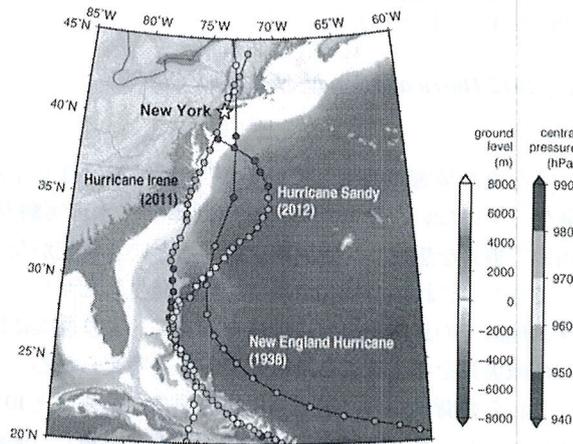


図-1 ニューヨークに被害を与えたハリケーンの経路

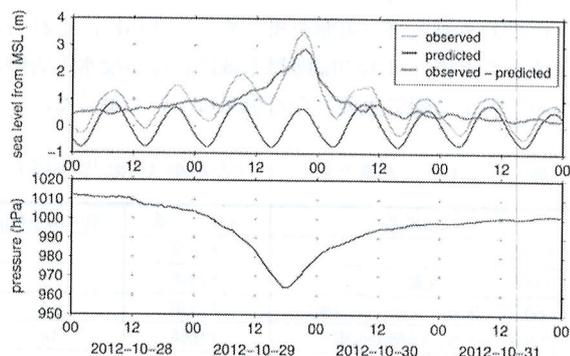


図-2 Batteryでの潮位と気圧の観測値

線の交点に位置し、湾が東に向かって開いているニューヨークにとって、サンディの経路は、他の二つに比べて高潮が発生しやすい経路であったことが分かる。

(2) 潮位の観測記録

図-2に、NOAA (<http://tidesandcurrents.noaa.gov/>) によるマンハッタン地区の南端に位置するBatteryでの潮位と気圧の観測値を示す。観測値は6分ごとのデータである。最大高潮偏差は10月29日21:24（アメリカ東部夏時間、UTC-4）の2.87 mであった。図より、最大高潮偏差の発生時刻と満潮の時刻がほぼ同時であり、水位は最大でMSL+3.50 mにまで達し、顕著な高潮被害につながったことがわかる。

3. 高潮による浸水被害に関する現地調査

(1) 現地調査の概要

現地調査は、2012年11月9日から12日にかけて行った。調査範囲は、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）、および、スタテン島である（図-3）。

各調査地点では、浸水高と浸水深の計測と被害状況の記録を行った。浸水高と浸水深は図-4のように定義し、GPS、レーザー距離計（Laser Technology社製Impulse）、スタッフを用いて場所と高さを記録した。



図-3 調査地域（Google Earthに加筆）

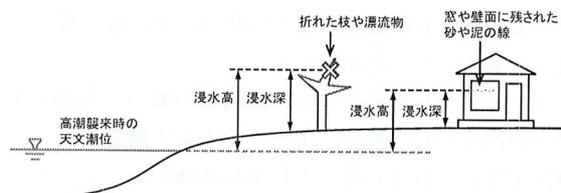


図-4 痕跡高の定義

(2) 現地調査の結果

現地調査による痕跡高計測結果の一覧を表-2に示す。マンハッタン地区で2.5 mから3 mの浸水高、スタテン島の南部で4 m前後の浸水高であった。外洋側のLower New York BayからUpper New York Bayに進むにしたがって(図-3), 浸水高は小さくなっていくと考えられるが, より多くの地点での浸水高分布を把握することで, 今回の高潮の特徴を理解する必要がある。以下に, 各調査地点における被害状況について詳述する。

a) マンハッタン地区南部

今回の調査では, 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(図-5)。

Fulton Stは, ウォーターフロントにあるSouth Street Seaportと呼ばれる観光施設から内陸に向かっている道路で

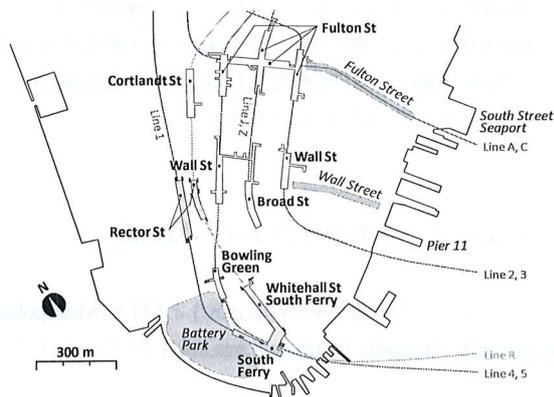


図-5 マンハッタン地区南部

ある。道路に沿って海岸線から300 m程度まで浸水し, 浸水高は2.5 mから3 mであった。屋内にも浸水した痕跡が見られ, 道路沿いにある店舗は営業できる状態になったが, 窓ガラスや壁面への大きな損傷が見られなかった。流入した海水は漂流物が少なく, 大きな運動量をもった流れではなかったと考えられる。

Wall Stは, Pier 11と呼ばれる棧橋から内陸に向かっている道路である。海岸線から200 m程度まで浸水し, 浸水高は2.5 mから2.7 mであった。店舗等が多いFulton Stとは異なり, Wall Stはオフィス街である。道路沿いの建物のひとつには, 地下が浸水したという張り紙が見られた。建物の周囲には, 排水作業を行うポンプ車や浸水時に使用されたと考えられる土嚢が散見された(写真-1)。

Battery Park周辺では明瞭な浸水痕跡を見つけることができず, 地下鉄駅等の状況を調査した。South Ferry (Line 1), Whitehall St (Line R), Rector St (Line 1)の三駅は復旧作業のため, 調査を行った11月10日時点では中に入ることができなかった。浸水時に海水が浸入したと考えられる駅の入口や通気口には, 浸水を防ぐような構造物による対策は見られなかった(写真-2, 写真-3)。South FerryとRector Stの駅の間に入があるBrooklyn Battery Tunnelも通行禁止の状態であった。

Battery ParkからSouth Street Seaportまでの1kmほどを海岸線に沿って調査したが, 特に目立った浸水対策のための構造物は見られなかった。これは, 後述する他の地域でも同様であり, 日本の都市とは異なり, マンハッタン地区には構造物により浸水から街を防御するシステムがほとんどなかったと考えられる。

表-2 痕跡高計測結果

No.	場所	緯度	経度	浸水高(m)	浸水深(m)	海岸線からの距離(m)	痕跡の種類
1	South Street Seaport	N40°42.343'	W74°00.186'	2.65	1.14	45	Mudline(inside)
2	Fulton Street	N40°42.373'	W74°00.200'	2.59	1.99	100	Mudline(outside)
3	Fulton Street	N40°42.396'	W74°00.216'	2.82	1.89	150	Mudline(outside)
4	Fulton Street	N40°42.403'	W74°00.204'	2.69	1.72	150	Mudline(outside)
5	Fulton Street	N40°42.415'	W74°00.232'	2.96	1.57	185	Mudline(inside)
6	Fulton Street	N40°42.432'	W74°00.225'	2.87	1.21	210	Mudline(inside)
7	Fulton Street	N40°42.456'	W74°00.262'	2.61	0.59	275	Mudline(inside)
8	Pier 11	N40°42.197'	W74°00.381'	2.62	1.26	<20	Mudline(inside)
9	Wall Street	N40°42.287'	W74°00.392'	2.51	1.35	105	Mudline(inside)
10	Wall Street	N40°42.323'	W74°00.453'	2.68	0.44	210	Mudline(inside)
11	New Dorp Beach (Staten Island)	N40°33.987'	W74°06.112'	-	0.76	650	Mudline(inside)
12	New Dorp Beach (Staten Island)	N40°33.727'	W74°05.842'	4.03	2.22	55	Drift on a tree
13	New Dorp Beach (Staten Island)	N40°33.862'	W74°05.682'	3.44	1.88	115	Mudline(inside)
14	Wolfes Pond Park (Staten Island)	N40°30.764'	W74°11.572'	4.22	2.55	35	Drift on a tree
15	East River side (E 23rd St)	N40°44.120'	W73°58.469'	2.57	1.26	<20	Mudline(inside)
16	East River side (E 25th St)	N40°44.206'	W73°58.453'	-	1.24	45	Mudline(outside)
17	East River side (E 30th St)	N40°44.416'	W73°58.346'	-	1.16	<20	Mudline(outside)
18	Substation	N40°43.742'	W73°58.515'	-	1.32	320	Mudline(outside)
19	Substation	N40°43.604'	W73°58.419'	-	0.96	190	Mudline(outside)
20	Hudson River side (St Clair Pl)	N40°49.071'	W73°57.676'	-	-	70	Eyewitness ("reached here")

b) マンハッタン地区南東部

イーストリバー沿いをE 20th StからE 37th Stまで調査した。E 23rd St, E 25th St, E 30th Stの海岸線への突き当たり付近で浸水痕跡が確認できた。いずれも浸水深は1.2 m前後で、E 23rd Stでの浸水高は2.57 mであった。川に直接面した建物内部で浸水痕跡を確認したが、建物への被害は小さかった。

イーストリバー沿いのE 13th St付近には、高潮発生時に浸水し停電の一因となった変電所がある。海岸線が湾曲している部分の隅に位置しており、道路沿いに二つの方向から(Avenue Cに沿って北東から、E 13rd/14th/15th Stに沿って南東から)海水が進入してきたと考えられる。変電所敷地の周囲で浸水深を計測したところ、Avenue C沿いでは1.32 m、13th St沿いでは0.96 mであった。これらの浸水深から少なくとも施設内建物の1階と地下部分は浸水したと考えられる。

c) マンハッタン地区北西部

ハドソン川に沿ってW 116th StからW 125th Stまで調査したが、このあたりには公園(Riverside Park)が広がっており、この公園の標高が十分に高いために、沿岸の道路を除いて被害が出なかったと考えられる。公園の北端部の道路(St Clair Pl)で、海岸線から約70 mの位置まで浸水したという証言が得られた。

d) スタテン島

マンハッタンとスタテン島はフェリーで結ばれており、島北端のフェリー乗り場から島南端までは列車(Staten

Island Railway)が走っている。スタテン島では、この列車の停車駅のうち、New DorpとPrince's Bayの二つの駅で下車し、駅から海岸線までの被害状況を調査した。

New Dorpでは、駅から海岸に延びる道路が突堤につながっている。海に向かって突堤の右側にある砂浜と突堤の左側にある建物で浸水高を計測したところ、それぞれ4.03 mと3.44 mであった。道路の両側で浸水高に差ができた理由としては、右側は背後に家屋等の建物が密集しており水位が高まりやすかった一方で、左側は背後が運動場となっており建物がなく、海水が建物前面にある砂丘を超えて速い流速で流れ込んできたからであると考えられる。

New Dorpでは、マンハッタン地区と比べて浸水高が大きだけでなく流れによる被害も大きかった。内陸部では建物被害、海岸線付近では局所的な洗掘が見られた(写真-4)。海岸線から約650 m内陸の建物でも道路面から76 cmの高さまで浸水していたことが確認できた。

Prince's Bayでは、海岸線近くで4.22 mの浸水高を計測した。New Dorpよりも被害範囲は狭いが、海岸線から一番近くに位置している家屋は倒壊していた。

4. ニューヨーク市のサンディへの対応

ニューヨーク市(<http://www.nyc.gov/>)とMTA (Metropolitan Transportation Authority, <http://www.mta.info/>)のプレスリリー

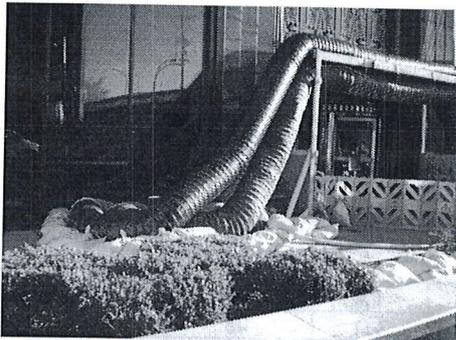


写真-1 Wall St.での排水作業の様子



写真-3 地下鉄の通気口



写真-2 Whitehall St, South Ferryの駅入り口



写真-4 スタテン島 New Dorpでの被害

スに掲載された情報をもとに、サンディ上陸前後のニューヨーク市内の主な動きを整理したものを表-3に示す。

ニューヨーク市では、サンディ上陸前日に、Zone A (浸水の可能性が高い標高の低い地域、図-6) の約37万5千人の住民への強制避難措置と地下鉄やバスの運行休止を実施した。その結果、停電や地下鉄の浸水などの被害が生じたものの、人的被害は軽減されたと考えられる。地下鉄は、イーストリバーの下を走るトンネルのすべてが浸水し、ロウワーマンハッタンでは全面的に地下鉄の運行が停止していたが、図-7から分かるように11月5日には大部分が復旧した。調査を行った11月10日時点では、ロウワーマンハッタンで入場できない駅は3つにまで減少していた。これは、プレスリリースにあったように、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いたからであると考えられる。

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強制避難措置や地下鉄の運行休止を行っており、このことがプレスリリースの中で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、大規模な措置にあたっては混乱は比較的少なかったと考えられる。

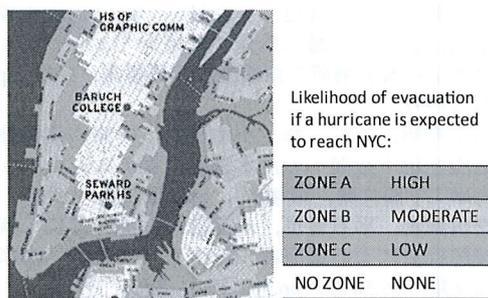


図-6 ニューヨークの避難地区区分 (http://www.nyc.gov/html/oem/html/hazards/storms_evaczones.shtml)

5. 日本の臨海都市域における浸水災害の減災策

(1) 地下空間における浸水災害の評価

ニューヨーク市では、地下鉄駅やトンネル、Wall Stにおいて地下空間への浸水被害が生じていた。近年では、韓国馬山市においても台風0314号 (Maemi) による高潮で地下駐車場や店舗に浸水被害が生じている⁹⁾。また、津波を想定したとき、地下空間への流入量は総氾濫水量の約25%³⁾、あるいは約10%³⁾に達するという分析結果もあり、臨海都市域では地下空間における浸水災害の評価が重要な課題であるといえる。

日本の臨海都市域においても、ニューヨーク市と同様に地下鉄や店舗をはじめとした地下空間の高度利用がなされている。これらの地下空間について、まずは地下への出入り口や通気口といった浸水開始点となり得る地点の標高を正確に把握し、浸水可能性の評価をする必要がある。さらには、迅速な排水ができるかどうかは災害後の復旧の成否に大きく影響するので、浸水量の評価とそれに応じた排水機能を準備できるかどうかの評価も必要になる。

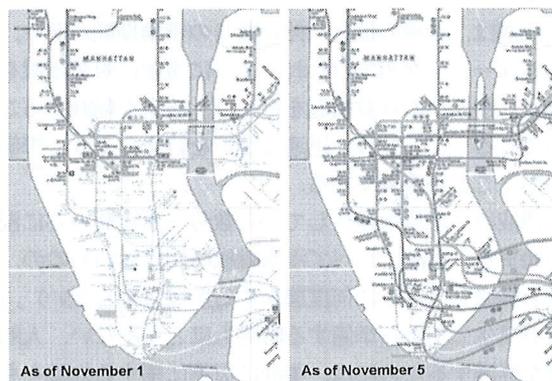


図-7 地下鉄の復旧状況 (MTAのウェブサイトからダウンロード、現在は参照不可)

表-3 サンディ上陸前後のニューヨーク市内の主な動き

日付	ニューヨーク市内の動き	停電地域内の人数
10月26日 (金) 10月27日 (土)	・ 市長、MTA とともにサンディへの準備体制を整えていることを発表し、市民へ注意を促す (土曜日時点では強制避難や地下鉄・バスの運休について可能性はあるとしているが決定はしていない。停電の可能性についても言及している。)	
10月28日 (日)	・ MTA が地下鉄とバスの運休を発表 ・ 市長が Zone A 内の住民への強制避難と月曜日の学校閉鎖を発表 ・ 午後7時より地下鉄、午後9時よりバスの運行を休止	
10月29日 (月)	・ 午後8時頃サンディが上陸し、午後9時24分に Battery にて最高潮位を記録	
10月30日 (火)	・ 道路や橋の清掃、復旧作業を開始	750,000
10月31日 (水)	・ 朝にはバスの大半が運行	643,000
11月01日 (木)	・ 水や食料の配布を開始	534,000
11月02日 (金)	・ マンハッタン地区での停電の復旧作業を開始	460,000
11月03日 (土)	・ 寒さ対策のため、避難所への送迎バスの運行や毛布の配布を開始 ・ 地下鉄の約8割が復旧	194,000
11月04日 (日)		145,000
11月05日 (月)	・ 学校の大半が再開 (避難所として使用している8校と被害を受けた57校を除く)	115,000

(2) 人的被害軽減のための措置

住民の安全確保の視点に立てば、ニューヨーク市のように、強制避難や公共交通機関の運行を停止するという措置の実施を想定しておく必要がある。

ニューヨーク市では、州知事、市長、MTA、電力会社等が議論をして、これらの措置を決定したようである。日本のそれぞれの都市においても、台風の接近時に誰がこの議論に参加し、どのような基準をもって措置の実行について判断をするか決めておかなければならない。その際、避難措置を実施する場合には避難しなければならない人数と避難場所の収容人数のバランスについて、公共交通機関を止める場合には情報の周知方法や停止時と復旧時に代替交通手段を確保できるかどうかといった点について、確認しておく必要がある。

(3) 異なる浸水形態（高潮と津波）の想定

ニューヨーク市において浸水災害を考える際の主な対象はハリケーンによる高潮であるが、日本の都市では高潮に加えて、津波による浸水災害についても考慮しなければならない。高潮と津波では、同じ海水の流入による浸水が発生するが、その性質は異なるという点に注意が必要である。

高潮は、台風の接近に伴い数日の準備期間があり、今回ニューヨーク市で行われたように事前に対策措置を実施し、住民への注意喚起を行えば、被害を軽減することができる。ここでは、迅速な復旧を行えるように準備しておくことが重要である。

津波は、地震が発生してから数分～数時間のうちに浸水が始まる。高潮に比べて浸水継続時間は短いものの、何度も襲来し（さらに何度襲来するかは分からない）、地震が発生してから準備する時間もほとんどない。人的被害を軽減するためには、事前に災害に関する知識をもっておくこと、短い準備時間の間にできる即応的な減災方法を構築しておくことが重要である。

同じ浸水災害であっても、高潮と津波ではその浸水形態が異なり、それに応じて事前になすべき減災策も異なるので、それぞれの特徴を踏まえた議論が必要になる。

6. おわりに

ハリケーンサンディによる高潮被害を受けたニューヨーク州マンハッタン地区とスタテン島で現地調査を実施し、被害情報を収集した。これらの調査結果やウェブ上で収集した情報をもとに、ニューヨーク市で発生したことを整理し、日本の臨海都市域での浸水災害を考える際に検討すべき項目として、地下空間における浸水災害の評価、人的被害軽減のための措置、異なる浸水形態（高潮と津波）の想定の3つを取り上げて論じた。

日本では東京をはじめとした臨海都市域での大規模な浸水災害を近年はあまり経験していない。ニューヨーク市での経緯を今後も注意深く観察し、情報を分析して具体的な減災策へと活かしていく必要がある。

謝辞：本研究は、日本学術振興会科学研究費補助金・基盤(B) No.22404011（代表者：早稲田大学柴山知也）、および、早稲田大学重点領域研究「東北地方太平洋沖地震津波の被災分析と復興方略研究」（代表者：柴山知也）により行われたことを付記する。

参考文献

- 1) 和達清夫編：津波・高潮・海洋災害（防災科学技術シリーズ2）、p.212、共立出版、1970。
- 2) 岡安章夫、柴山知也、後藤遼一：臨海部大規模地下空間における氾濫水伝播の数値シミュレーション、日本沿岸域会議研究討論会講演概要集、No.5、pp.20-21、1992。
- 3) 河田恵昭、石井和、小池信昭：津波の市街地への氾濫と地下空間への浸水過程のシミュレーション、海岸工学論文集、第46巻、pp.346-350、1999。
- 4) 安田誠宏、平石哲也、永瀬恭一、島田昌也：流体直接解析法による臨海部の浸水リスク解析、海岸工学論文集、第50巻、pp.301-305、2003。
- 5) 安田誠宏、平石哲也、稲垣茂樹：臨海部の津波氾濫に関する模型実験、海岸工学論文集、第50巻、pp.271-275、2003。
- 6) 安田誠宏、平石哲也、河合弘泰、永瀬恭一：韓国南部馬山市における高潮浸水被害現地調査と地下浸水解析、海岸工学論文集、第51巻、pp.1366-1370、2004。

ANALYSIS OF INUNDATION DISASTER AND MITIGATION IN WATERFRONT AREA BASED ON FIELD SURVEY OF STORM SURGE IN NEW YORK CITY CAUSED BY 2012 HURRICANE SANDY

Takahito MIKAMI, Tomoya SHIBAYAMA and Miguel ESTEBAN

On October 29th, 2012, Hurricane Sandy made landfall along the east coast of the United States and generated storm surge in the states of New York and New Jersey. The flooding in New York City caused heavy damage on infrastructures such as an electricity and a subway system. In this paper, the actual situation of this disaster in New York City are summarized based on the results of a field survey and information on public websites and lessons for increasing preparedness in Japanese waterfront area are discussed.