

Hurricane Katrina による Biloxi 周辺の 高潮被害分布とその外力特性の検証

田島芳満¹・佐藤慎司²・藤原弘和³

2005 年 8 月 29 日に米国メキシコ湾岸に上陸した Hurricane Katrina は、米国南部の沿岸域に甚大な被害を及ぼした。現地における被害調査では、Hurricane に伴う高潮被害状況は局地的に著しく変容することが確認された。本論文では、このような被災程度の局地性が顕著であった Mississippi 州の Biloxi に着目し、現地観測結果を整理するとともに高潮に伴う外力場と被災程度との因果関係の解明を試みた。その結果、Biloxi における一般家屋の流失率の平面分布は、高潮に伴う浸水深の平面分布だけではなく、来襲波浪に伴う流速振幅の平面分布とより強い相関を示すことが明らかとなった。

1. はじめに

メキシコ湾上で発達した Hurricane Katrina は、2005 年 8 月 29 日に米国メキシコ湾岸に再上陸し、沿岸域に米国史上最大規模の深刻な被害を及ぼした。米国連邦緊急事態管理庁 (FEMA) によれば、メキシコ湾岸での Katrina に伴う高潮浸水深は、洪水保険料率地図 (FIRMS) における保険料率の設定基準である基準洪水標高 (BFE) を 1~2.5 m 程度上回るものであった (FEMA, 2005a)。これに対し FEMA は、Katrina を含む最近のデータも考慮した 100 年確率の洪水標高 (ABFE) を新たに算定した。この ABFE では、高潮に伴う潮位上昇に加え、来襲波に伴う変動水位の影響が新たに考慮されている。ただしこの来襲波に伴う水位増加分は、浸水深の 50 % として簡易的に算定するものであり、波の伝播特性を必ずしも適切には反映していない。

著者の一人は、土木学会による派遣調査団の一員として、米国現地における被害調査を行った。調査では、高潮に伴う被災程度が地形や構造物などの局地的要因に大きく左右されることが確認された (柴山ら, 2006)。特にメキシコ湾沿岸域では、同じ浸水深であってもその被災程度が大きく異なる事例が数多く見られ、浸水深だけでは被害程度を説明できないことが示唆された。

そこで本稿では、まず来襲波浪に伴う被災程度の局地性が特に顕著であった Mississippi 州の Biloxi に着目し、現地調査で見られた被害の局地性について整理する。次に被災直後の航空写真を用いて被災程度の平面分布を作成し、被災程度の局地性の客観的評価を試みる。さらに、非線形分散波モデルを用いた波の遡上・碎波変形計算を

行い、対象地域での外力場の相対的な平面分布の推定を行う。最後に本研究で新たに作成した被災程度と外力場の平面分布から、両者の因果関係について検証する。

2. Biloxi における現地調査

(1) Biloxi の概要

図-1 に Biloxi 周辺のメキシコ湾岸域と Katrina の移動経路を、図-2 には Biloxi 周辺の水深分布を示す。2000 年の国勢調査によれば、図-1 に濃灰色で示した Biloxi 市の人口は約 50,000 人、世帯数が約 12,000 世帯、人種別の人口構成は白人 71.4%、黒人 19.0%、ベトナム人 3.4 % である。黒人の人口比率は米国全土の比率 (12.2 %) よりやや高いものの、黒人比率が特に高い New Orleans (67.1 %) に比べれば米国南部では比較的白人比率が高い地域である。また Biloxi の属する Harrison 郡での貧困率は 16.1 % であり、Orleans 郡の 26.7 % に比べれば大幅に低いものの、全米平均の 12.4%、南部諸州平均の 13.9 % に比べればこの地区が決して裕福な居住区ではないことが分かる。

図-1 に示したように Biloxi は Katrina の移動経路の東側に位置しており、Katrina 上陸前には岸向きの風が卓越していたことが推察できる。また Biloxi 周辺は砂嘴状に伸びた Ship Island や Horn Island に囲まれた遠浅海域となっており、平常時には碎波による自然消波効果が大きいことが推察される。実際に Biloxi 周辺の海岸線には防波堤などの海岸防護施設はなく、ほぼ自然海浜に近い状態となっている。逆に Katrina の来襲時には、この遠浅海域上で潮位上昇量が増幅されたことが予想される。

図-3 には、図-1 の St. 42007 (水深 14 m) に設置されたブイ式波高計 (National Data Buoy Center, <http://www.ndbc.noaa.gov/>) で計測された海上風速と気圧、有義波高とピーク波周期の時系列を示す。図中網掛けした 8 月 29 日 06 : 00 以降のデータは、係留索が破断しブイが漂流した後のデータを表す。特に波浪場は水深の影

1 正 会 員 Ph. D. 東京大学講師 大学院工学系研究科
社会基盤学専攻

2 フェロー 工博 東京大学教授 大学院工学系研究科
社会基盤学専攻

3 学生会員 東京大学 大学院工学系研究科
社会基盤学専攻

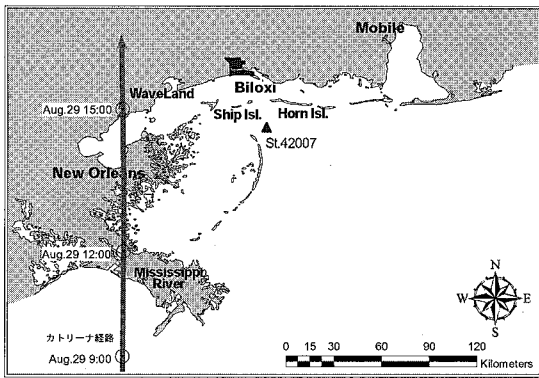


図-1 メキシコ湾岸域および Katrina 経路図

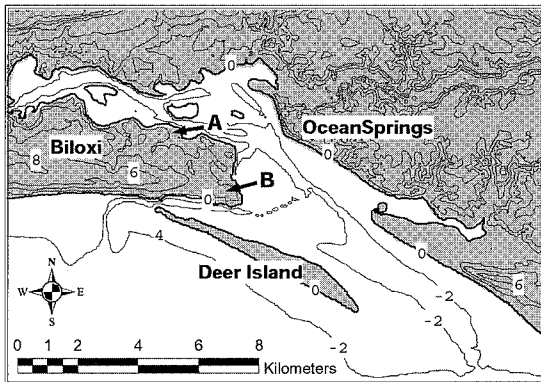


図-2 Biloxi 周辺の地形図

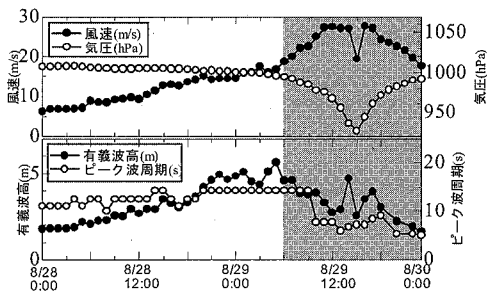


図-3 St.42007における風況および波浪場の観測結果

響を受けるため、ブイ漂流後の計測値の信頼度は低いが、風速のピークは29日の15:00頃であったことが推察できる。

(2) 被害の局地性

図-2の地点AおよびBにおける被災3ヵ月後の様子を写真-1に示す。図-2に見られるように両地点の地盤標高や海岸線からの距離はほぼ同じ条件である。しかしながら、地点Aでは家屋の1階部分が被災した程度に留まっているのに対し、地点Bでは家屋が完全に流失してしまっている。両地点間で風を遮蔽するような地形や大規模構造物が存在しなかったことを勘案すると、Biloxiでは家屋破壊に対する暴風による影響は小さかつ

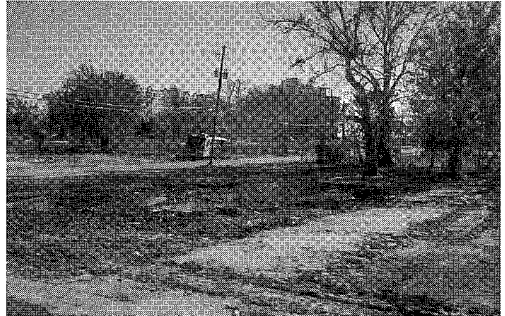


写真-1 同じ浸水深で被害程度が異なるA地点(上)およびB地点(下)(2005年11月30日撮影)

たことが推察できる。以上より、両者の被災程度の差には、外海に直接面した南側海岸線からの距離の差に伴う波浪条件の差が大きく寄与していたことが予想される。Biloxiではこのように、波浪条件が被害の大きさを支配的に決定づけていると推察される事例が多く見られた。その一方で、A地点付近のように波浪による被災がそれほど顕著ではないと考えられる場所では、家屋の破損状況が地盤標高、すなわち浸水深の違いによる影響を反映している事例も見られた(柴山ら, 2006)。

3. 家屋流失率分布の推定

現地調査で見られた被害程度の局地性を客観的かつ俯瞰的に捉える目的で、NOAAによる被災直後の航空写真(<http://ngs.woc.noaa.gov/katrina/>)を用いて以下の手順でBiloxi周辺における家屋の「流失率」の平面分布図を作成した。

まずBiloxi地区約9km²の地域を対象に標高や土地利用形態を勘案して道路などを境界とする41区域に分割した。次にそれぞれの区域において木造戸建家屋を対象に各区域における家屋戸数(対象全区域で約3,900戸)を数えた。ただし流失により戸数を数えることが困難な場合については、隣接する居住区画における単位面積当たりの戸数に、対象居住区画の面積を乗じて戸数を推定した。次に各区域における完全倒壊あるいは基礎から完全に流失した家屋戸数についても同様に数えた。ここで求めた流失家屋戸数を同じ対象区域における全戸数で除

して家屋の「流失率」を区域毎に算定した。2000年の国勢調査によれば対象領域全域の世帯数は約5,000世帯であり、本研究で推定した家屋数はやや過小評価されているが、集合住宅の存在を勘案すれば、妥当な推定であると考えられる。またここで着目している流失率は同じ数え方で推定した流失家屋数と全家屋数の比で与えられるため、その誤差は比較的小さいものであると考えられる。

図-4に、上述の操作で算定した木造戸建家屋の流失率の平面分布を示す。ここで得られた流失率分布は、Census Bureau・FEMA (2005) が推定したKatrinaに伴う地域経済への影響率の平面分布と良く一致している。図に見られるように、家屋の流失率は、Biloxiの南側海岸線および東側先端部に集中的に高くなっているのがわかる。

また後述する浸水深の比較に見られるように、Biloxi地区の北側および南側の沿岸域における浸水深はほぼ同程度であった。それにも関わらず、両者の被害程度には大きな差異があることが流失率の平面分布からも明らかとなった。以上より、Biloxiのような沿岸域において高潮による被害予測およびその対策を考える際には、標高だけでは被害の程度は規定できないことが示唆される。

4. 外力場の推定

以上の検討から、Biloxiにおける被害事例では高潮に伴う潮位変動に加えて、波による影響が無視できないことが推察される。そこで本節は、非線形分散波モデルを用いたBiloxi周辺の波浪伝播、砕波、遡上解析を行い、高潮と高波浪の両者を考慮した外力場の推定を試みる。

(1) モデルの概要

ここで行う数値解析の主要な目的は、高潮に伴う長時間スケールの浸水に加えて波による短時間スケールの変動成分を適切に評価し、被災の外力場として勘案することである。このため、数値モデルには波浪場の陸上域への遡上・砕波変形を妥当に再現する技術が要求される。

そこで本研究ではBoussinesq方程式に透水層を考慮したMadsen (1997) らのモデルを援用した波の遡上・砕波変形計算を行う。ただし砕波モデルには、佐藤・鈴木 (1990) と同様の拡散型砕波減衰項を用い、その拡散係数の算定には任意平面波浪場への適用が比較的容易な田島ら (2006) の方法を用いた。また運動方程式には風による影響を考慮し、水面で作用する剪断応力項を付加した。風況の算定には藤田のモデルを用い、剪断応力の算定には本多・光易 (1980) の C_D 値を用いた。ここで適用した剪断応力項は時々刻々の水面勾配に関係なく常に水平方向の剪断応力として与え、風による波エネルギーの増幅効果については、本モデルでは考慮していない。

数値計算には田島ら (2006) と同様の予測子・修正子法

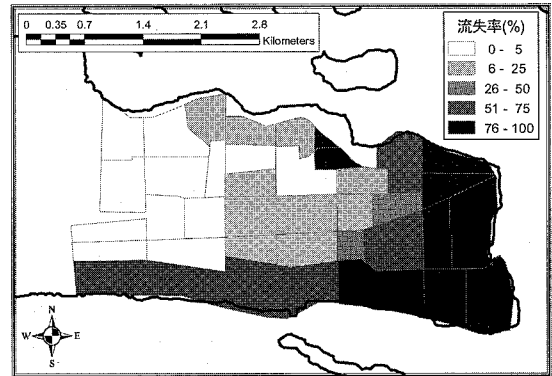


図-3 家屋流失率 (%) の平面分布

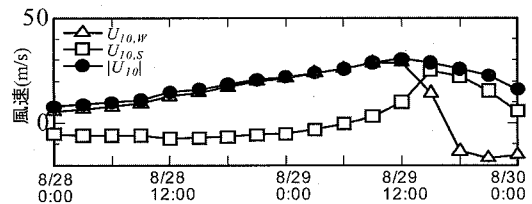


図-5 Biloxiにおける風速成分の推定値

に基づくスキームを用いた。ただし計算軸方向の移流項については、比較的大きな格子間隔を用いた広領域計算での数値粘性に伴う波高減衰を防ぐ目的で、ADI法と同様の時空間方向に中央差分を用いた陰解法を採用した。

(2) 計算条件

計算領域は図-2に示した東西19.5 km × 南北11.7 kmの領域とし、計算格子間隔は1/3 s (8.9 m × 10.3 m)とした。地形データは、陸上域の標高にU.S. Geophysical SurveyのNational Elevation Dataset (<http://seamless.usgs.gov/>)による1 s間隔のデータを、海域の水深データにはNational Geophysical Data Center (<http://www.ngdc.noaa.gov/ngdc.html>)のUS Coastal Relief Modelによる3 s間隔のデータをそれぞれ用い、両データを接続し、さらに格子間隔が1/3 sとなるようにデータを内挿して作成した。

次に風の計算に必要なHurricaneのデータには、Unisys Weather (<http://weather.unisys.com>)によるKatrinaの中心移動経路と中心気圧変化の時系列データを用いた。前述の藤田のモデルを用いて算定したBiloxiでの風速成分の時系列変化を図-5に示す。図に見られるように、Hurricaneの中心が北上してMississippi川河口砂嘴周辺(図-1)に近づく29日9:00頃までは西向きの風速成分 U_{10W} が卓越し、逆にKatrinaがその後さらに北上すると北向きの風速成分 U_{10S} が卓越していることが分かる。ここで本研究における波浪解析に用いる風の条件としては、計算時間の制約から風況の時系列変化は考慮せず、8月29日15:00頃の風況を想定した

計算を行った。すなわち、運動方程式に入力する水面剪断応力は、この時間の風速成分に対応する水面剪断応力を用いて一定値で与えた。

入射波条件についても同様に 8 月 29 日 15:00 頃を想定し、この時間の風向に対応する波向として、 $N20^{\circ}W$ を中心に 5° ずつ波向を変えた 3 方向の波を入射させた。入射波周期については、St.42007 でブイが漂流する直前のピーク波周期である $T=14.5\text{ s}$ を用いた。次に入射波高条件について考える。前述したように Biloxi 周辺の水深はとても浅く、実際の高波浪来襲時には計算領域のほぼ全域で碎波しており、図-2 下端の入射波境界における波高は碎波波高で規定されていたことが予想される。そこで本研究では、安定な数値計算が行える範囲で十分に大きな波高として、入射波境界での波高を 5 m とした。最後に潮位については、FEMA (2005b) による最高潮位分布を参考に、沖側入射境界付近における潮位として NAVD88 + 6.5 m を計算初期に計算領域全域で一様に与えた。計算領域内の吹き寄せや wave setup による潮位変動は数値モデルで直接算定される。

(3) 計算結果

以上の条件における数値モデルによる波高の計算結果

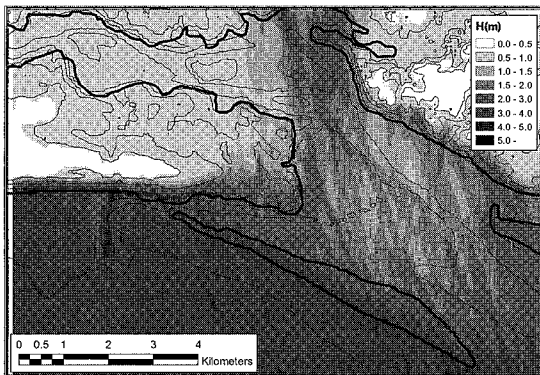


図-6 波高分布の計算結果

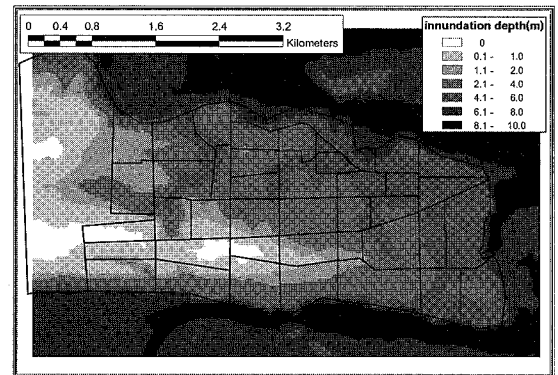


図-7 浸水深分布の計算結果

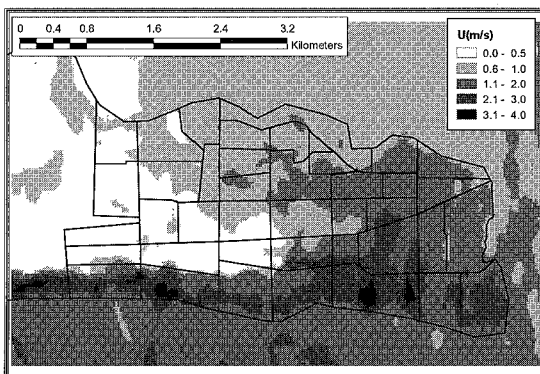


図-8 流速振幅分布の計算結果

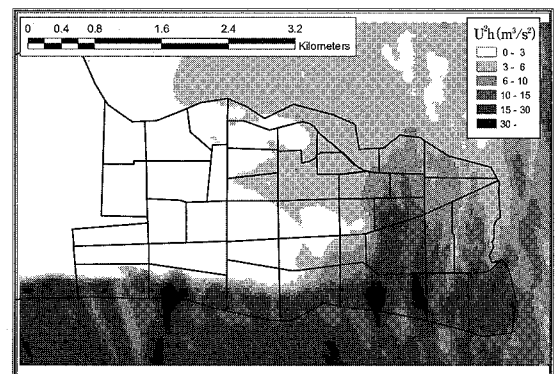


図-9 U^2h の平面分布 (計算結果)

を図-6 に示す。図に見られるように、本研究による計算結果では Deer Island 上での波高減衰が顕著であり、Biloxi の遡上域での波高分布は入射波の波向に大きく依存することが予想される。次に図-7、および図-8 には、図-4 に示した戸建家屋の流失率の平面分布と同じ図示範囲とした浸水深および軌道流速振幅の平面分布を示す。浸水深の平面分布では、標高の違いによって Biloxi の北側沿岸域の浸水深の方が南側のそれよりも大きいことが分かる。この傾向は明らかに図-4 の流失率分布とは矛盾し、Biloxi における被災は浸水深だけでは説明できないことが推察できる。次に流速分布に着目すると、Biloxi の南側および東側沿岸域で大きな流速が計算されており、流失率分布と比較的近い結果が得られた。しかしながら、Biloxi の東端部では、流速が大きいのは南端の 1 区画に限られており、流失率分布で顕著な Biloxi 北東端部における甚大な被害を説明できていない。この理由のひとつとしては、来襲波の波向や碎波減衰条件の違いにより、モデルが Deer Island による波高減衰量を過大評価している可能性が考えられる。一方、流失率が家屋に直接作用する流体力と深い関わりがあると想定し、流体力の指標として流速の 2 乗と浸水深に比例する

U^2h の平面分布を図示したところ(図-9), 特に Biloxi 東端における U^2h の分布は U の分布に比べて南北方向に延伸し, 流失率分布に近づく傾向が見られた。

5. 流失率と外力場との相関関係

以上の計算結果による比較結果を踏まえ, 家屋の倒壊・流失と強い相関を示すと考えられる被災因子パラメタとして, 浸水深 h , 軌道流速振幅 U に加えて, 構造物に作用する流体抗力を想定した U^2h を考え, これらのパラメタの算定結果と家屋流出率との比較を行った。図-10には流失率を算定した41区画について, 各区画の家屋流失率と, 各区画内における被災因子パラメタの平均値とを比較する。まず浸水深と流失率との比較を見ると, 例えば浸水深の計算結果が4~5mのときには, 流失率は数%から90%近くまで広く分布している。これに対して軌道流速振幅 U と流失率の関係をを見ると, 流速振幅がある値未満になると家屋の流失率も一様に小さくなっており, 流失限界条件を流速振幅によってある程度説明づけることが可能であると考えられる。最後に被災因子パラメタとして U^2h を用いた場合と流失率を比較すると, データの分布がより線形に近づいていることが図-10から見てとれる。データ数が限られており定量的な評価は難しいものの, 図に示した浸水深 h , 流速振幅 U , そして U^2h を指標とした場合の家屋流失率との相関係数は0.61, 0.68, 0.75となり, これら3つの指標の中では U^2h と流失率との相関が最も高かった。

以上より, Biloxiを対象とした被災程度と外力場の検証では, 浸水深だけでなく, 波浪に伴う流速成分を考慮することによって, 被災の局地性をより適切に予測することができることを示した。ただし, 家屋構造や入射波条件の不確定性を考慮すれば, 流失限界条件を定量的に議論するには, さらなるデータの収集・検証が必要になると考えられる。また, 特に陸上地形が大きく変化する場所では, 氾濫流による定常的な流速成分による構造物の破壊や流失に対する影響も適切に考慮する必要があると考えられる。また, 本研究では考慮しなかったものの, Biloxiの南側海岸線では係留していたバージ式カジノが陸上に漂流し, 陸上の建造物に衝突して被害を拡大するなど, 漂流物の衝突も重要な被災要因となりうる。

6. おわりに

Biloxi 周辺の被災調査で顕著であった, 被害程度の局地性について整理し, 航空写真に基づく家屋流失率と数値モデルに基づく外力場の推定値との相関関係を検証した。Biloxiにおける家屋の流失率は浸水深だけでは説明できず, 波浪に伴う流速振幅によって構造物に作用する流体力を適切に考慮する必要があることを実証的に示した。

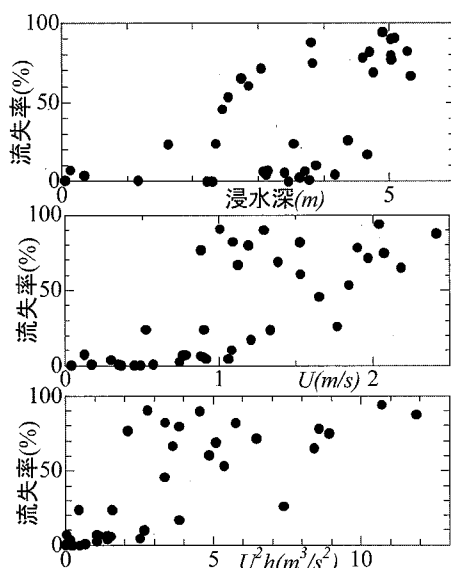


図-10 被災外力因子パラメタと家屋流失率の関係

謝辞: 本研究で示した現地情報は, 土木学会受託研究(河川環境管理財団委託), 横浜国立大学, 岐阜大学, 九州共立大学の資金補助のもと実施した現地調査にて得られたものである。ここに記して深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 佐藤慎司・鈴木秀典(1990): 砕波帯における底面流速変動波形の評価法, 海工論文集, 第37巻, pp. 51-55.
- 柴山知也・安田孝志・小島治幸・田島芳満・加藤史訓・信岡尚道・安田誠宏・玉川勝巳(2006): Hurricane Katrinaによる高潮被害の調査, 海工論文集, 第53巻(印刷中).
- 田島芳満・佐藤慎司・鈴木淳也・下園武範・磯部雅彦(2006): 潜堤周辺の砕波・乱流特性を考慮した海浜流場予測モデルに関する一考察, 海工論文集, 第53巻(印刷中).
- 本多忠夫・光易恒(1980): 水面に及ぼす風の作用に関する実験的研究, 第27回海工論文集, pp. 90-93.
- Census Bureau・FEMA(2005): Katrina damage in Mississippi coastline: Percent of affected business in FEMA areas by census block, <http://www.census.gov/econ/www/hurricane/maps/>.
- FEMA(2005a): Reconstruction guidance using Hurricane Katrina surge inundation and advisory base flood elevation maps, http://www.fema.gov/pdf/hazard/flood/recoverydata/katrina/katrina_reconstruction.pdf.
- FEMA(2005b): Mississippi hurricane Katrina surge inundation and advisory base flood elevation map panel overview, http://www.fema.gov/pdf/hazard/flood/recoverydata/katrina/ms_overview.pdf.
- Madsen, P. A., O. R. Sorensen and H. A. Schaffer(1997): Surf zone dynamics simulated by Boussinesq type model. Part I. Model description and cross-shore motion of regular waves, Coast. Eng., vol.32, pp. 255-287.