

平成 28 年 5 月 6 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25750148

研究課題名(和文) 南海トラフ巨大地震に起因する海岸侵食リスク評価

研究課題名(英文) Risk evaluation of coastal erosion caused by Nankai megathrust earthquakes

研究代表者

小花和 宏之(Obanawa, Hiroyuki)

東京大学・工学(系)研究科(研究院)・特任研究員

研究者番号：10422205

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：南海トラフ巨大地震による過去の地盤変動量を調査したところ、顕著な場所および最大沈下量は、高知県高知海岸の2 mおよび和歌山県七里御浜の40 cmと判明し、両海岸を本研究の調査対象地とした。地盤沈下による汀線後退量予測式をもとに後退量を計算したところ、高知海岸では81～135 m、七里御浜では2～21 mであった。両調査地における想定海岸侵食範囲内の土地利用を調べたところ、高知海岸については建物用地(21%)や農用地(11%)といった居住・経済活動範囲が多く含まれ、直接的な被害規模が大きく、一方、七里御浜については海浜(37%)の比率が大きく、直接的な被害の程度は相対的に小さいと評価された。

研究成果の概要(英文)：Risk evaluation of coastal erosion caused by Nankai megathrust earthquake was carried out. Based on the historical records remarkable and cyclic land subsidence caused by mega earthquake occurred at Kochi coast up to 2 m and Shichiriohama up to 40 cm therefore those two areas were chosen for the study areas of this study. Calculation result with an existing equation for coastal erosion showed that 81 to 135 m erosion will occur at Kochi coast and 2 to 21 m erosion will occur at Shichiriohama after the mega earthquake. At Kochi coast 21% of the eroded area is building region and 11% of that is farm land where are residential and economic areas so direct damage by the coastal erosion will be relatively large. On the other hand at Shichiriohama large part (37%) of the eroded area is in the beach so the disaster damage will be relatively small.

研究分野：地形学

キーワード：海岸侵食 地盤沈下 南海トラフ 地震

### 1. 研究開始当初の背景

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震により、東日本の広範囲にわたり地盤変動が発生した。これは、日本海溝におけるプレート境界のひずみが解放されることにより、海溝付近の陸側プレートが隆起し、その反動でより内陸側の東北沿岸部において沈下が発生したものである。仙台平野では最大120cmの地盤沈下が発生し、各地で陸域の水没および海岸侵食が発生し、海岸や港湾施設、沿岸の住宅地や農地、交通インフラ等が消失する被害が発生した。

一方、東北地方太平洋沖地震の発生を受け、次に発生する大規模地震として強く懸念されているものが、東海・東南海・南海連動型地震(以下、南海トラフ巨大地震と呼称)である。この地震の規模は内閣府によるとM9.0と想定され、これまでの地震発生周期(図1)から推定すると、今後30年以内に発生する確率は50~87%と非常に高く、緊急な防災対策の強化が必要である。

東北地方太平洋沖地震発生時と同じく、南海トラフ巨大地震発生時にも、広域で地盤変動が発生することが予想される。たとえば高知県においては、1707年の宝永地震では2m、1946年の昭和南海地震では70cmもの沈下が確認されている。これら地震に起因する沿岸域の沈水、海岸侵食の被害を低減するためには、地盤沈下が海岸地形に及ぼす影響を事前に評価し、その評価結果をもとに防災計画



図1 東海・東南海・南海地震の発生履歴 (四国新聞社 <http://www.shikoku-np.co.jp/feature/tuiseki/549/>)

や土地利用計画を策定する必要がある。

### 2. 研究の目的

静岡県から四国に至る太平洋沿岸域を対象として、海岸地形の特性(海岸構成物質、海浜勾配など) 波浪条件、南海トラフ巨大地震に起因する地盤変動量の推定値を収集し、地盤沈下による海岸侵食量の予測式を用いて、陸域の沈水を含む海岸侵食リスクの評価を行う。

### 3. 研究の方法

#### (1) 地盤沈下による海岸侵食量予測式の改善

地盤沈下と海面上昇は、海面に対する陸域の標高が低下するという点で、等価の現象とみなすことができる。それらの現象による絶対的あるいは相対的な陸域の低下により、沿岸部では様々な問題が発生する。たとえば、地下水への海水侵入(井戸水の塩水化、沿岸植生の枯死)、水害危険性の増大(津波・高波に対する脆弱性、高潮による浸水危険性、低所における排水不良)、侵食基準面の変化に伴う河川流況の変化(土砂堆積による河床上昇、水深減少による航行障害)などが挙げられる。さらに大きな問題として、海岸侵食が発生する。相対的な海面上昇により、海面上昇量と海浜勾配に応じた(いわば幾何学的な)陸域の水没すなわち汀線後退に加え、海底地形が波の侵食力に応じた平衡地形に移るために、さらに海岸が侵食される。

地盤沈下による海岸侵食量を求める手法として、三村ほか(1993)により以下のような汀線後退量を求める式が提案されている。

$$\frac{3}{5}AW_*^{5/3} - \frac{3}{5}A(W_* - \Delta y_k)^{5/3} - SW_* + B\Delta y_k + \frac{0.5S^2 - SB}{\tan\beta} = 0 \quad \text{式(1)}$$

ここで、 $A$ は海浜断面係数(各海岸に固有の定数)、 $W_*$ は汀線から $h_*$ (断面変化が生じる限界水深、すなわち波による地形変化の限界水深)までの岸沖方向距離、 $\Delta y_k$ は汀線の後退距離、 $S$ は海面上昇量、 $B$ はバームの高さ、 $\tan\beta$ は海浜の平均勾配である(図2)。この式は、海浜の平衡地形がBruun(1962, 1988)によって示された以下の式(2)で表わされると仮定し、2次元断面で考えた時に侵食土砂量と堆積土砂量が等しくなる、という条件下で求められる式である。ここで、 $h$ は水深、 $y$ は汀線からの沖方向距離を示す。本研究では、海面上昇量を地盤沈下量とみなして式(1)をもとに岸沖方向の2次元的な汀線後退量を算出する。

$$h = Ay^{2/3} \quad \text{式(2)}$$

海岸侵食に影響する要因は地盤沈下だけではなく、他にも海岸構造物の影響や、人工的な土砂移動(浚渫・養浜)、海食崖の保護やダム建設による供給土砂の減少などが挙げられ、それらの影響を要因ごとに分離することは極めて難しく、地盤沈下による海岸侵食量の評価はまだまだ不明な点が多い。そこで本研究では、東北地方太平洋沖地震により広範囲に発生した地盤変

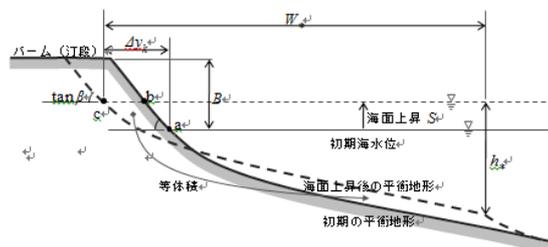


図2 海面上昇による海岸侵食 (三村ほか, 1993 および磯部, 2008 をもとに作成)

動と海岸侵食に着目し、既存の地盤沈下量と海岸侵食量の関係式の有効性を検証した。すなわち、海岸侵食に影響する要因のうち同地震時に変化したものは地盤沈下量のみであり、その後の海岸侵食量との関係に着目することで、地盤沈下と海岸侵食のみの関係性を評価するものである。その結果、海岸の立地(外洋に面している、湾内に位置する)、砂浜の状況(もともとの岸沖方向の砂浜幅)、海底の状況(岩礁や海底谷の有無など)といった条件が適切な砂浜海岸に限れば、ばらつきは見られるものの既存の汀線後退量の予測式は実測値と整合関係にあることが判明した(本検討の詳細は、国土地理協会学術研究助成報告集第2集に掲載)。そこで本研究においても、海岸侵食量の予測には式(1)を用いることとした。

## (2) 南海トラフ巨大地震による地盤変動量の推定

当初、南海トラフ巨大地震による地盤変動推定値は、「地震・津波の予測精度の高度化に関する研究(代表者:東京大学、東北大学)」の成果を用いる予定であった。同研究は、スーパーコンピュータ「京」を中核とするHPCI戦略プログラムの一つであり、「防災・減災に資する地球変動予測」の一課題として、平成24年度から開始されたものである。同プログラムによって期待される成果として、10m単位の詳細な地盤沈下の予測が挙げられている。しかし、残念ながら同研究により推定された地盤沈下量は未だ公表されておらず、本研究で使用することは断念した。

そこで、南海トラフ巨大地震が一定期間で繰り返し発生している特性を活かし、過去の地震に伴う地盤沈下量の記録から、今後の沈下量を推定することとした。海溝におけるプレート境界ひずみの解放というメカニズム、およびおおそ一定の再現期間という点で、南海トラフ巨大地震により発生する地盤沈下量もある程度の再現性は担保出来ると考えられる。当然、震源の位置や大きさにより地盤変動量は変わることが考えられるが、過去の記録の中で最大の値を用いることで、起こりうる最大の被害を評価することができると期待される。

東海・東南海・南海地震に関する記録は様々な文献、新聞記事等で散見されるが、それらの中で多数の専門家の手で整理された比較的新しい資料である「南海トラフの地震活動の長期評価(第二版)(文部科学省特別機関 地震調査研究推進本部 地震調査委員会、平成25年5月24日公表)」のデータを用いた。本資料によると、同地震による地盤変動は地盤沈下だけではなく、多くの場所で隆起も発生していることが分かる。たとえば1944年昭和東南海地震および1946年昭和南海地震では、高知県室戸岬で1.3m、足摺岬で0.6m、和歌山県潮岬で0.7m隆起したとされている。また、1854年安政東海および安政南海地震では、静岡県清水から御前崎付

近まで1~2m、高知県室戸岬で1.2m隆起したとされている。さらに、1707年宝永地震でも、静岡県御前崎、和歌山県串本、高知県室戸岬で隆起が記録されている。以上のように、海溝に近い岬の先端部では多くの場所で地震に伴う隆起が発生している。一方、海溝から(北北西方向に)離れた場所では地盤沈下が発生しており、たとえば1944-1946地震時には紀伊半島東部の海岸で30~40cm、高知県高知・須崎では1.2mの沈降が記録されている。また、1854年地震時には高知県高知市付近で約1m、上ノ加江付近で1.5m、甲ノ浦で1.2m沈降している。さらに、1707年地震では高知県高知で最大2mの沈下が発生している。

以上の記録による地震起源の地盤沈下が発生しやすい場所、および顕著な海岸侵食が短期間に発生しやすい砂浜海岸という2つの条件をもとに、本研究の対象地は高知県高知海岸および和歌山県七里御浜の2か所とした。高知海岸では過去に1~2mの地盤沈下が記録されているが、被害を過小評価することを避けるために想定沈下量を2mと仮定し、また七里御浜では30~40cmと記録されているが同様の理由により40cmと仮定した。

## (3) 沿岸環境データの収集

海岸侵食量予測式で使用するパラメータを以下のように求めた。

### A: 海浜断面係数

A(海浜断面係数)は、まず対象とする海岸において岸沖方向に測線を設定し、汀線から沖方向の海底縦断形を求め、その縦断形を式(2)で近似して推定する。したがって、まず海底の地形情報が必要となる。可能であれば実際に岸沖方向の水準測量あるいは音響測探機を用いた測量を各調査地で実施して詳細なデータを得ることが望ましいが、本研究の全ての対象地において実測するのは難しいため、既存のデータである「海底地形デジタルデータ(日本水路協会)」を用いた。これは日本沿岸全域にわたって整備された海底地形の等深線データであり、海域により等深線間隔は異なるが、取得水深データで求められる最大限の高密度等深線が収録されている。ファイル形式は、アスキーファイルとシェープファイルの2種類があり、本研究ではArcGISを用いて他データと統合するためにシェープファイル形式のデータを用いた。対象範囲をカバーする「M7002 Ver.2.3 遠州灘」および「M7003 Ver.2.2 四国南岸沖 豊後水道」の2範囲のデータを使用した。

次に、対象とする砂浜海岸に測線を設定した。測線は、高知海岸および七里御浜両海岸で、人工構造物や岩礁を避けて、海岸の中央および左右(東西あるいは南北)の3か所に海岸線に直交する方向に引いた。次に、ArcGISを用いて測線と海底地形等深線の交点にポイントを生じさせ、各ポイントに等深線データ(水深)およびx、y座標値を付加させた。さらにx、y座標値を用いて汀線から各ポイント(水深)までの測線

上の水平距離を求め、縦断形を作成した。次に、海底断面図に対して式(2)をフィッティングすることで、 $A$ の値を求めた。近似は、断面図上の各ポイントについて、鉛直方向の実測値(各ポイントの水深)と計算値(式(2)で求められる水深)の残差の絶対値の和を最小にする方法を用いた。以上の計算により求めた各対象地の $A$ の値を表1に示す。高知海岸では0.13~0.18、七里御浜では0.16~0.62であった。

$h_*$ : (断面変化が生じる限界水深、すなわち波による地形変化の限界水深)

岸沖方向の波による土砂移動を考える場合、考慮すべき範囲は波による地形変化の限界水深すなわち $h_*$ までとなる。 $h_*$ の値には各調査地における波の強さや海底の構成物質の特性が影響するが、全ての測線について個別に調査することは難しいので、宇多(1997)の調査結果を参考に、高知海岸では11m、七里御浜では10mと設定した。

$W_*$ : 汀線から $h_*$ までの岸沖方向距離

$W_*$ (汀線から $h_*$ までの岸沖方向距離)は、上記海底地形図および設定した $h_*$ の値により求めた。その結果、高知海岸では378~635m、七里御浜では57~673mであった。

$S$ : 海面上昇量

先述したように、高知海岸では2m、七里御浜では40cmと設定した。

$B$ : バームの高さ

バームとは、砂浜海岸において高潮時または暴浪時の波の働きによって打ち上げられた砂がたまり、その表面が陸側へわずかに傾いた微地形のことを指す。バームは汀線位置の変化に伴って侵食あるいは堆積作用を受けるため、海浜侵食量を求めるためにその高さを決める必要がある。

研究代表者がかつて、千葉県九十九里浜南部を対象として航空レーザ測量により得られた詳細な地形データを用いて調べたところ、バームの上部に局所的な砂丘が堆積していることが多く、沿岸方向に数m規模の細かい起伏が認められた。すなわち、砂丘堆積物も含めた一見するとバームに見える堆積物の高さは、ある砂浜において一定の値を取るとは限らない。

バーム上部の砂丘堆積物も汀線変化に伴いバームと共に侵食されることが想定されるため、 $B$ の値には砂丘堆積物の厚さも含めた方が適切と考えられる。しかし、本研究の対象地域において測線上の砂丘堆積物も含めたバームの高さを正確に求めることは困難であり、また比較的近い距離(数m)で変化するその高さを測線上の一点の値のみで決めてしまうことは、むしろ結果に対して悪影響を与えかねない。そこで本研究では、九十九里浜南部における経験をもとに、 $B$ の値を1mおよび3mと幅を持って設定し、それぞれの値に対して計算を行うこととした。

$\tan \beta$ : 海浜の平均勾配

海浜の平均勾配を表す $\tan \beta$ に関しては、測線と海底地形等深線の交点のうち、汀線側から数えて1番目(汀線上)と2番目(等深線上)のポイント間の勾配を用いた。その結果、高知海岸

では0.02~0.03、七里御浜では0.05~0.22と求められた。

#### 4. 研究成果

各種海岸地形パラメータを式(1)に代入し、調査対象海岸それぞれにおける汀線後退量の計算値を求めた(表1)。高知海岸における最小値は81m、最大値は135mであり、七里御浜における最小値は2m、最大値は21mであった。 $B$ (バーム)の値により汀線後退量が多少異なるが、その差は最大でも8%程度であった。七里御浜に比べて高知海岸の推定海岸侵食量はかなり大きい、その主な原因は、高知海岸の方が設定した地盤沈下量が大きく(高知海岸では2m、七里御浜では40cm)、また海浜の平均勾配が緩い(高知海岸では0.02~0.03、七里御浜では0.05~0.22)ためだと考えられる。

表1 海浜地形パラメータおよび汀線変化量

	七里御浜			高知海岸		
	北部	中部	南部	東部	中部	西部
海浜断面係数 $A$	0.62	0.41	0.16	0.13	0.18	0.15
移動限界水深 $h_*$	10	10	10	11	11	11
汀線から $h_*$ までの水平距離 $W_*$	57	77	673	635	378	533
汀線の後退距離 $\Delta y_k$ (計算値 $\beta=1$ )	-2	-4	-21	-135	-82	-106
汀線の後退距離 $\Delta y_k$ (計算値 $\beta=3$ )	-2	-4	-19	-134	-81	-102
地盤沈下量 $S$	0.4	0.4	0.4	2	2	2
バームの高さ $\beta_1$	1	1	1	1	1	1
バームの高さ $\beta_2$	3	3	3	3	3	3
海浜の平均勾配 $\tan \beta$	0.22	0.09	0.05	0.02	0.03	0.03

南海トラフ巨大地震により発生する海岸侵食量が我々の社会生活に及ぼす影響を評価するために、侵食域内の土地利用を調べた。想定される汀線後退量は、被害規模を過小評価することを避けるために、高知海岸では最大値の135m、七里御浜では最大値の21mと設定した。土地利用情報は、国土数値情報土地利用細分メッシュデータ(平成21年度)を使用した。同データは、国土交通省国土整備局国土整備課がwebで無料公開しており、国の土地利用の状況について3次メッシュ1/10細分区画(100mメッシュ)毎に、各利用区分(田、その他の農用地、森林、荒地、建物用地、幹線交通用地、湖沼、河川等)を整備したものである。適切な変換ツール等で処理することで、ArcGISでの利用も可能である。

データ処理手順としては、まず上記海底地形デジタルデータおよび土地利用細分メッシュデータをArcGISに読み込む。次に、海底地形デジタルデータに付与されている属性値をもとに海岸線のデータのみ抽出する(等深線データを削除する)。次に、海岸線データから想定される汀線後退量の幅でバッファを発生させ、ポリゴンを作成する。GISにおけるバッファとは、面(ポリゴン)や線(ライン)から特定の距離の範囲エリアを作成する機能あるいはその作成結果のことである。すなわち、ここで作成したバッファポリゴンは、両海岸において地震後に侵食される範囲と想定される。次に、各バッファポリゴン内の土地利用データを集計(クリップ集計)し、侵食域内の土地利用集計値とした。集計結果を図3に示す。土地利用データのうち、海水

域、河川地および湖沼の範囲は直接的な社会影響が無いので除いた。高知海岸については、建物用地（全体の21%）、海浜（14%）、農用地（11%）の比率が多い。これは、海岸侵食範囲が海浜（砂浜）のみならず、さらに内陸側の建物用地や農用地にまで到達していることを示す。高知平野は低平な地形であり、また海岸の近くまで土地利用が進んでいるため、地震による2mの地盤沈下および海岸侵食による被災範囲および社会的影響がかなり大きくなると考えられる。一方、七里御浜については、海浜（全体の37%）の比率が大きく、建物用地（9%）や森林（6%）など他の土地利用への影響は比較的小さい。これは、同海岸でも海岸近くまで土地利用は進んでいるが、想定される汀線後退量が21mと相対的に小さいため、侵食域が砂浜海浜内に納まることが主な理由だと考えられる。

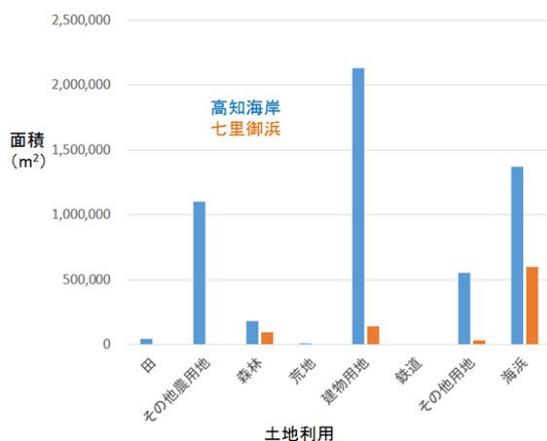


図3 浸水域の土地利用

今後の対策としては、ハード的には土砂の移動限界水深を超える深さまで到達する防護壁等で地盤沈下による海岸侵食を停止させる、極めて大量の人工的な土砂供給（養浜）により広範囲の砂浜の幅を拡大させる方法などもありうるが、自然景観および環境の保護や長期的な自然との共生を考えると、決して最善の対策とは考えにくい。対象とする現象の規模により周期は異なるが、日本に住む限り災害は今後も必ず発生する。そのような場所で継続的に生活していくには、海岸線から一定の距離の土地利用を住居や商業など恒久的な目的とはせず、公園やレジャーなど一時的な目的に限定する、あるいは早期警戒や避難の体制をより強固に構築して人命の保護を最優先し、海岸域の構造物等はいずれ周期的な災害により放棄・再建する必要があることを事前に認識・許容する必要があると考えられる。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 8 件)

1. 小花和宏之, 早川裕式, 加藤 顕, ゴメス クリストファー: 小型無人航空機および単独測位 GNSS 搭載カメラを用いた簡易的な地形測量手法. 地形, 36, 87-106 (2015). 査読有り
2. 小花和宏之, 早川裕式, ゴメス クリストフ

ー: UAV 空撮と SfM を用いたアクセス困難地の 3D モデリング. 地形, 35, 283-294 (2014). 査読有り

3. 小花和宏之, 早川裕式, 齋藤 仁, ゴメス クリストファー: UAV-SfM 手法と地上レーザ測量により得られた DSM の比較. 写真測量とリモートセンシング, 53, 67-74 (2014). 査読有り
4. 小花和宏之, 徳永朋祥: 南九十九里海岸の汀線変化に対する地盤沈下の影響評価: 海浜土砂収支に基づく検討. 沿岸域学会誌, 26, 153-165 (2013). 査読有り

〔学会発表〕(計 12 件)

1. Obanawa, H. and Hayakawa, Y.S.: High resolution and frequency measurement of erosion volume of inaccessible sea cliff using Unmanned Aerial Vehicle. International Geographical Union Regional Conference 2015 (IGU2015), Moscow Russia (2015).
2. Obanawa, H.: Quantitative measurement of the topographic change at overhanging sea cliff with small UAV survey system. International Geoscience and Remote Sensing Symposium 2015 (IGARSS 2015), Milan Italy (2015).
3. Obanawa, H. and Hayakawa, Y.S.: High-resolution topographic survey using small UAV and SfM-MVS technologies in hardly accessible area. The International Symposium on Cartography in Internet and Ubiquitous Environments 2015, Tokyo University (2015).
4. Obanawa, H., Hayakawa, Y.S. and Gomez, C.: 3D modelling of inaccessible areas using UAV-based aerial photography and Structure from Motion. European Geosciences Union General Assembly 2014, Vienna Austria (2014).

〔その他〕

1. 小花和宏之: 三宝寺池上空からのドローン測量. 里池ノート(「サイエンスカフェ 里ま」会報誌), 5 (2016).
2. 小花和宏之: 自力で航空測量. GIS NEXT, 46, 88-89 (2014).

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

小花和 宏之 (OBANAWA HIROYUKI)  
 東京大学・工学系研究科・特任研究員  
 研究者番号: 10422205

(2) 研究協力者

早川 裕式 (HAYAKAWA YUICHI)  
 東京大学・空間情報科学研究センター・准教授  
 研究者番号: 70549443