

# 平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震を対象にした 減災農地の津波減勢効果の検証

桐 博英\*・丹治 肇\*・福与徳文\*\*・毛利栄征\*\*\*・山本徳司\*\*\*\*

## 目 次

I 緒 言 .....	279	1 解析方法 .....	282
II 減災農地の概要 .....	279	2 モデルの再現性の検証 .....	282
III 水理模型実験による評価 .....	280	3 モデル地区における減災農地の効果の検証 .....	283
1 水理模型 .....	280	V 結 言 .....	285
2 実験条件 .....	281	参考文献 .....	285
3 実験結果 .....	281	Summary .....	286
IV 数値解析による評価 .....	282		

## I 緒 言

平成 23 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震では、巨大な津波により東北地方の宮城県および岩手県の沿岸部をはじめとして甚大な被害をもたらした。東北地方太平洋沖地震は、マグニチュード 9.0 という日本近海では発生しないと考えられてきた巨大なものであり、津波対策として建設された海岸堤防を越水して犠牲者を出すなど、従来の津波対策のあり方を覆すものであった。

沿岸部の防災対策は、これまで海岸堤防による海岸線での防御が行われてきた。その中で、岩手県の三陸沿岸では、明治三陸、昭和三陸およびチリ地震で発生した津波に対応できる海岸堤防を計画し、ソフト対策とともに津波被害に備えてきた。一方、今後の沿岸防災計画の策定にあたっては、海岸堤防のみで沿岸部の防御を行うのは困難であり、東北地方太平洋沖地震津波後の海岸保全施設の復旧においては、土木学会津波特定テーマ委員会が津波被害を数十年から百数十年に 1 度発生する津波を主に海岸保全施設で対応する「津波防護レベル」と、構造物の適用限界を超過し、ソフト対策と併せて対応する「津波減災レベル」に分類して対応する方針を示している。

一方、農研機構では、東北地方太平洋沖地震津波被災後の恒久復旧に向けて、沿岸部の農地を津波の減勢に用いる「減災農地」による災害に強い農村地域整備を提唱し、具体化しつつある。しかし、減災農地については、

どの程度の津波減勢効果が得られるのかが定量的に評価されておらず、実際の計画策定にあたって不明な点が残されている。そこで、本研究では、減災農地の津波減勢効果を水理模型実験と数値シミュレーションにより評価した。

## II 減災農地の概要

減災農地の具体的な内容と考え方については、毛利・丹治（2012）を参照することとし、本節では、その概要のみを示す。減災農地のイメージを Fig.1 に示す。減災農地は、海岸堤防と内陸側に設置する 2 線堤および 3 線堤による複合的な減災システムを構築し、広域的な農村地域の復興を進めるための集落デザインの基本コンセプトである。具体的には、

- ・津波が堤防をある程度越流することを許容する
- ・高台等の安全地帯に住居を移転する
- ・農地や林地などの面構造物に津波減勢効果を見込む
- ・堤防・樋門・道路等により津波遡上を防護する
- ・避難が迅速に行われるよう農道や集落道路を配置する

を組み合わせることで、巨大津波災害を地域全体で軽減し、人命および生活に最低限必要な財産を守ろうとするものである。減災農地の背景には、海岸堤防を現在よりも高くすると海岸と陸域が分断され、海岸利用や環境、景観面でマイナスとなる以外に、2 線堤および 3 線堤により内陸側の防御エリアを明確にするほか、通常時は基幹道路等として利用するなど地域の生活環境に対する効果がある。

本報で検討する減災農地は、三陸沿岸のリアス海岸のうち、農地海岸における海岸堤防の延長が概ね 500m 以上の海岸地区への適用を想定している。これは、仙台湾

\* 水工学研究領域沿岸域水理担当

\*\* 農村基盤研究領域地域計画担当

\*\*\* 施設工学研究領域長

\*\*\*\* 技術移転センター教授

平成 23 年 12 月 14 日受理

キーワード：東日本大震災、農地海岸、減災農地、津波

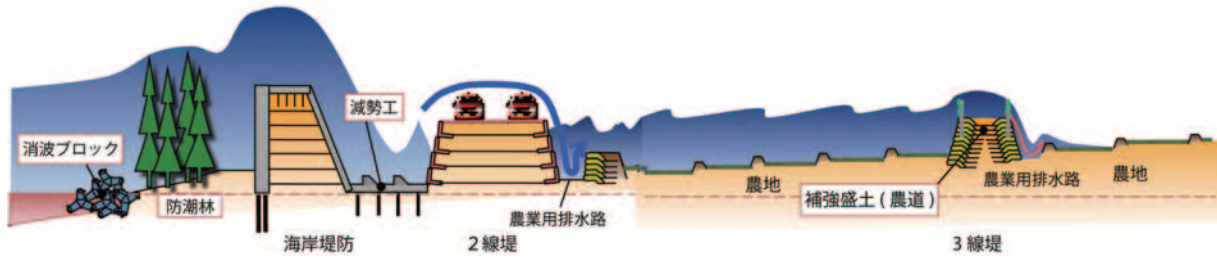


Fig. 1 減災農地のイメージ  
Image of the disaster prevention farmland

沿岸のように 1 海岸地区の海岸堤防延長が長い場合は背後地の地域計画が広大になるほか、海岸堤防の延長が短い場合には堤高の高い津波堤防による背後地の防御が期待できるためである。なお、減災農地は、あらゆる津波を防御できるものではなく、津波警報発令時には速やかに高台等へ避難する必要があることを申し添える。

### III 水理模型実験による評価

減災農地による津波遡上遅延効果の有無を明らかにするため、水理模型実験を行った。本実験では、岩手県三陸南沿岸に属する山田湾湾奥部の織笠地区をモデルに海岸堤防高（計画 6.6 m）と津波波高、背後地の勾配を抽出し、水理模型の諸元を決定した。当該地域をモデル地区に設定したのは、

- 隣接する宮古湾沖に国土交通省が GPS 波浪計を設置しており、沖波の実測値がある
- 船越海岸、織笠など、津波災害や復興計画を検討する上でポイントとなる地区がある
- 津波浸水シミュレーションを実施中であり、津波到達波高を設定しやすい

のためである。なお、ここで選定したモデル地区とは水理模型諸元を決定するために使用したものであり、実際に当該地区への減災農地の適用を想定してはいない。

#### 1 水理模型

本実験では、農村工学研究所ダム実験棟の鋼製水路（幅 0.8m × 深さ 1.0m × 長さ 40.0m）のガラス観測部に水理模型を設置し、隣接するコンクリート製水路（幅 1.0m × 深さ 2.0m × 長さ 40.0m）を津波発生の貯水槽兼水位設定に利用した。鋼製水路とコンクリート製水路の配置を Fig.2 に示す。両水路は、水路始端で給水槽を共有しており、通常は水路始端のスライドゲートによりいずれか一方のみを使用するが、両水路のスルースゲートを開放することで一連の系とすることができる。なお、発生させる津波の波高は津波発生ゲート上流の水位で決まるため、コンクリート製水路に給水したうえで下流端のゲートで水位を設定した。

水理模型の断面図を Fig.3 に示す。水理模型はフルード則に基づき、鉛直方向の縮尺は 1/40、水平縮尺は背後

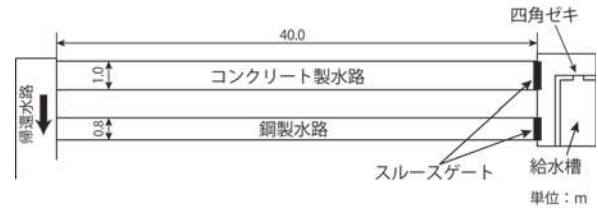


Fig. 2 水路の配置  
Location of channels

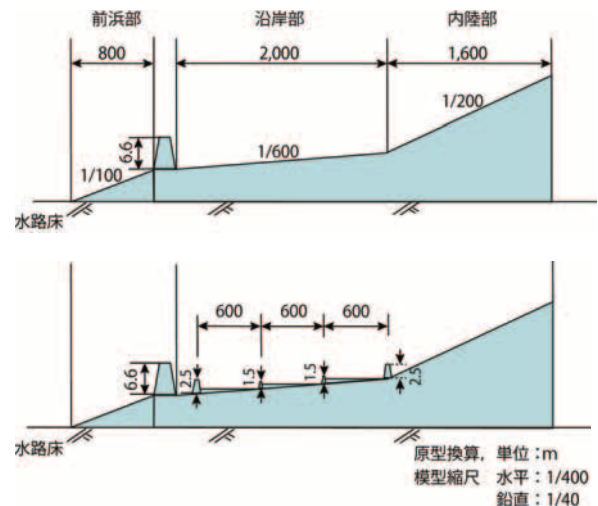


Fig. 3 水理模型断面図  
Cross section of hydraulic model

地の地形勾配を元に 1/400 とし、海岸堤防背後の地形は地形勾配を簡略化した一様勾配とした。減災農地と通常の地形勾配による津波浸水抑制効果を対比するため、水理模型設置区間を水路横断方向中央で仕切り、水路右岸側に減災農地模型、左岸側に現況地形模型を製作した。なお、模型は耐水ベニヤで製作し、表面を青色ペイント仕上げとした。減災農地の模型の全景を Fig.4 に示す。減災農地では、海岸堤防の背後および沿岸部と内陸部の境界に高盛土道路を想定した、高さ 2.5m の 2 線堤および 3 線堤を設置した。ここで、3 線堤の天端標高は、海岸堤防と同じとした。これは、3 線堤の天端標高が高いほど津波浸水を抑制する効果が期待できるが、農地が有する同効果を正確に判定できなくなるためである。また、2 線堤と 3 線堤の間にある農地の境界（2ヶ所）には農道を想定した小段を設け、小段の天端がほ場面から 0.5m 高くなるように設定した。

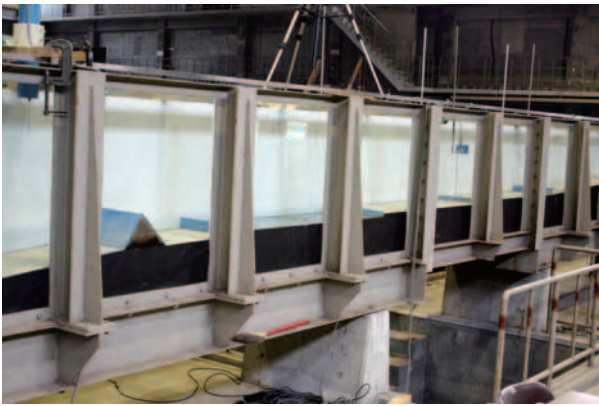


Fig. 4 減災農地水理模型の全景

Photo of hydraulic model of disaster prevention farmland

Table 1 津波浸水深一覧

List of inundation depth of the tsunami

地点	浸水深 (T.P.m)	遡上距離 (m)
山田町浦の浜	10.543	510
山田町浦の浜	10.514	200
山田町織笠	7.659	1,700
山田町織笠	8.215	1,380
山田町織笠	9.010	1,000
山田町織笠	7.944	480

## 2 実験条件

初期水位を海岸堤防下端に設定し、海岸堤防から沖側に 14m（模型実寸）の位置に設置した津波発生ゲートで津波を造波した。ここで、Table1 に示す東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ (<http://www.coastal.jp/tjt/>) による速報値（2011 年 5 月 11 日参照）から得た津波浸水深データから、織笠地区に隣接する浦の浜の浸水深標高をもとに海岸堤防直近の津波波高の目標を 10.5m とした。

### a 測定項目

計測点の位置を Fig.5 に示す。計測は、発生させた津波の波形を記録するための沖波高と堤防直近の岸波高をサーボ式波高計で計測するとともに、陸域では 2 番目の農道の直下および 3 線堤手前の浸水深を容量式波高計で計測した。なお、現況地形模型では、減災農地模型と同じ位置に計測点を設定した。計測では 20Hz でサンプリングを行い、AD 変換器を介して PC に収録した。

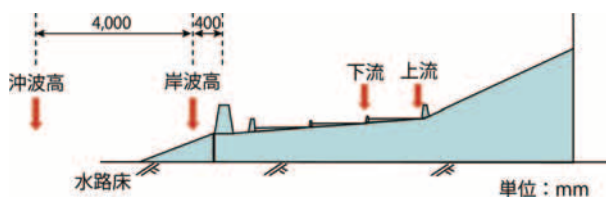


Fig. 5 計測点の位置

Location of observation points

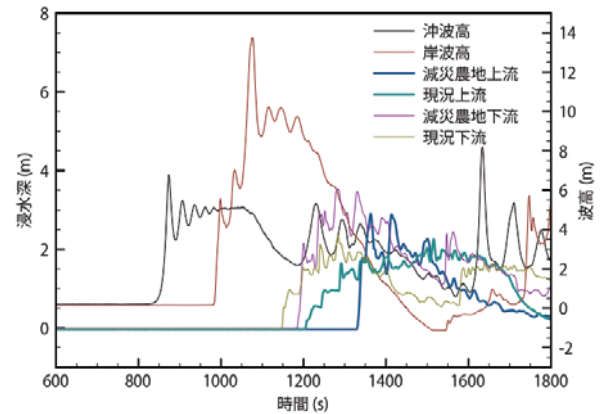


Fig. 6 浸水深と津波波高の時間変化(津波継続時間が短いケース)

Time series of inundation depth and tsunami wave height (Short wavelength)

## 3 実験結果

本実験では、津波発生ゲートの開閉操作を手動で行っているため、津波波高はある程度設定できるが、津波継続時間を固定できない。このため、本報では、津波継続時間が短い場合と長い場合で整理し、津波減勢効果を検証した。

### a 津波継続時間が短いケース

各点の浸水深と津波波高の時間変化を Fig.6 に示す。津波継続時間が短い場合、海岸堤防にぶつかった津波が堤防前法の傾斜に沿って少しジャンプするため、一時的に目標波高を上回る状況が確認できた。海岸堤防を越水した津波は海岸堤防背後の 2 線堤で減勢され、比較的穏やかにほ場を遡上し上流側の 3 線堤に達するものの、3 線堤を越水はせず、内陸部に浸水することはなかった。一方、現況模型では、海岸堤防を越水した津波は、減勢されることなく内陸部終端まで駆け上がる状況であった。津波減勢効果を 3 線堤前面に津波が到達する時間の差で評価すると、130s（実物換算値）であった。なお、津波遡上距離では 44% の低減になるが、これは内陸部の地形勾配により様々に変化するため、参考値である。

### b 津波継続時間が長いケース

津波継続時間が長いケースでは、海岸堤防地点でジャンプする状況は確認できず、深い越流水深で激しく堤防の裏法を洗う状況が見られた (Fig.7)。津波浸水深と波高の時間変化を Fig.8 に示す。Fig.8 において、1,200s 以降に沖波高が上昇するのは、海岸堤防に反射した津波が測定を通過するためである。津波が海岸堤防を越流した後は、津波継続時間が短いケースと同様に 2 線堤が減勢効果を発揮し、3 線堤前面における津波到達時間の遅延は 104s であった。津波の越水量が増え、3 線堤の天端に達した後は、内陸部が浸水するものの氾濫量は十分に減勢されており、内陸部における遡上高は 3 線堤の天端標高を若干超える程度であった。



Fig. 7 海岸堤防の越流状況  
Photo of tsunami overflows the coastal dike

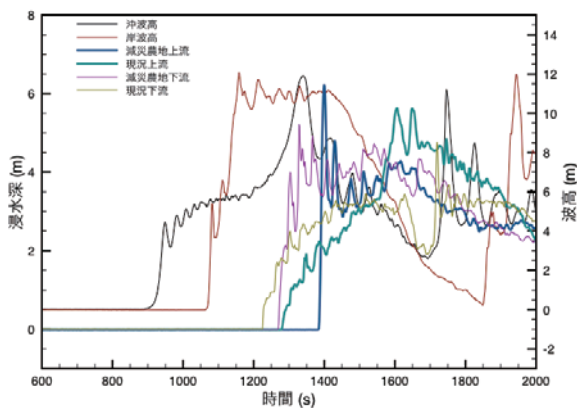


Fig. 8 浸水深と津波波高の時間変化(津波継続時間が長いケース)  
Time series of inundation depth and tsunami wave height (Long wavelength)

#### IV 数値解析による評価

##### 1 解析方法

解析には、農村工学研究所が開発した沿岸農地の氾濫シミュレーションモデル桐ら(2004)を用いた。使用したモデルの概要を Fig.9 に示す。本モデルは、海域および氾濫域の流れと水路や小河川の流れを分離し、前者を平面流解析、後者を1次元不定流解析で解析し、本間の越流公式で算定した越流量をもとに両者を統合する。

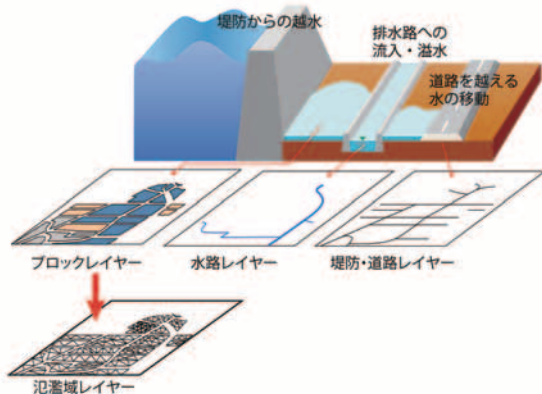


Fig. 9 津波浸水モデルの概念図  
Concept of the tsunami flood model

#### 2 モデルの再現性の検証

##### a 対象領域

使用するモデルの津波浸水シミュレーションの再現性を確認するため、岩手県三陸南沿岸の山田湾を対象に解析を行った。解析領域の位置を Fig.10 に示す。

##### b 計算条件

解析では、Fig.10 に示す岩手中部沖のGPS波浪計の観測データを解析領域の東端に境界条件として与えた。陸域の地盤標高データは、震災後にレーザープロファイラ(LP)により計測されたデータを用いており、震災による地盤沈下を含んでいる。一方、海底地盤標高データは、5秒間隔でデジタルデータを整備しているJTOPO05でも山田湾内にはデータがなかったため、海底地形図から読み取った。

解析領域を三角形要素で分割し、沿岸部では約10mの節点間隔で解析データを作成して主要な道路及び堤防を再現した。

その他の解析に使用したパラメータ等の一覧を Table2 に示す。



Fig. 10 山田湾の解析領域  
Analysis area of the Yamada bay

Table 2 計算条件  
List of parameters

計算条件	パラメータ等
解析モデル	沿岸農地氾濫シミュレーションモデル
津波波高境界条件	岩手中部沖 GPS 波浪計データ
海底地形	1/50,000 海底地形図 第6370号1「山田湾」
陸域地形	LP データ (岩手県提供)
節点間隔	湾外: 200-1,000m 湾内: 20-200m 陸域沿岸部: 8-10m 陸域内陸部: 20-200m
粗度係数	海域: 0.025 農地: 0.020

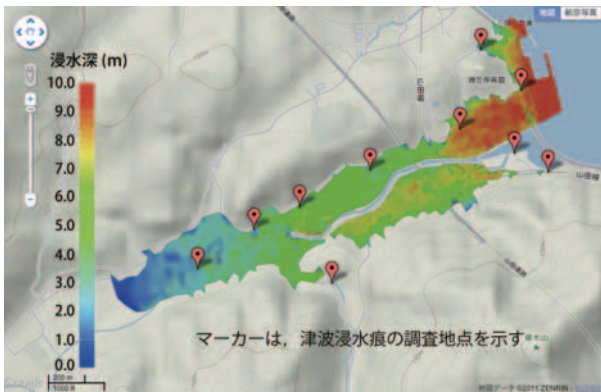


Fig. 11 織笠地区における津波浸水深の解析結果  
Simulated inundation depth in Orikasa district

### c 解析結果

山田湾の湾奥部に位置する織笠地区の津波浸水深分布の解析結果を Fig.11 に示す。Fig.11 において、赤色のマーカーは、「東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ (The 2011 Tohoku Earthquake Tsunami Joint Survey Group, 2011)」による浸水痕跡標高の調査地点である。津波浸水域の湛水は、浸水最末端で津波浸水痕の測点より上流側に達しているのが見られるものの、それ以外では津波浸水痕の調査結果とほぼ整合する結果が得られていることが確認された。ここで、津波浸水域の解析結果が調査結果よりも上流側に達しているのは、解析に用いた地盤標高 LP データが震災後に計測したものであり、津波襲来時とは異なること、地形勾配が小さく、モデルが氾濫域を過大評価していること、などが考えられる。

## 3 モデル地区における減災農地の効果の検証

### a モデル地区の概要

減災農地の効果の検証のため、岩手県大船渡市吉浜地区をモデルに解析を行った。吉浜湾の解析領域を Fig.12 に示す。当該地区は、前節で解析対象とした山田湾から約 35km 南の吉浜湾の湾奥部、吉浜川の河口に位置する



Fig. 12 吉浜湾の解析領域  
Analysis area of the Yoshihama bay

農地海岸であり、海岸は吉浜海水浴場として利用されている。吉浜地区の海岸保全施設は 570m の海岸堤防が整備されているが、T.P.+14.30m の計画堤防高に対して現況は T.P.+7.15m であった。吉浜地区は、過去に被災した津波により居住区の高台移転をすすめ、東北地方太平洋沖地震津波の際には人的被害を最小限にとどめたことが知られている。このように、吉浜地区は、地形や海岸利用面のほか、地区の防災意識の高さなどの点からも減災農地のモデルとして適当と考えた。

### b 計算条件

計算に使用した津波波高と海底地形データソースの一覧を Table3 に示す。吉浜湾においても海底地形のデジタルデータはなかったため、海底地形図からデータを読み取った。なお、本検証計算で用いたモデルや陸域地形データおよび他の計算条件は、Table2 に示したものと同一である。外潮位の境界条件にしようした岩手南部沖の GPS 波浪計のデータを Fig.13 に示す。岩手南部沖では、15時から10分間で7mの波高の津波が来襲している。GPS 波浪計の設置位置は、Fig.12 に示すように釜石の沖合い約 20km の位置にあり、この地点の水深は 200m である。

検討ケースの一覧を Table4 に示す。本検討では現況の地形および海岸堤防標高による東北地方太平洋沖地震津波の再現を行うとともに、平成 15 年度に策定された三陸南沿岸海岸保全計画における海岸堤防標高 (T.P.+14.3m) で河口部に津波防潮樋門を建設したものの、減災農地を適用した場合の 3 ケースを比較した。本計算に用いた減災農地を適用した計画案の概要を Fig.14 に示す。

Table 3 津波波高及び海底地形データソース一覧  
List of data source of tsunami wave height and sea bottom elevation

計算条件	使用データ
津波波高境界条件	岩手南部沖 GPS 波浪計データ
海底地形	1/50,000 海底地形図 第 6370 号 7「大船渡湾」 1/50,000 海底地形図 第 6370 号 7「釜石湾」

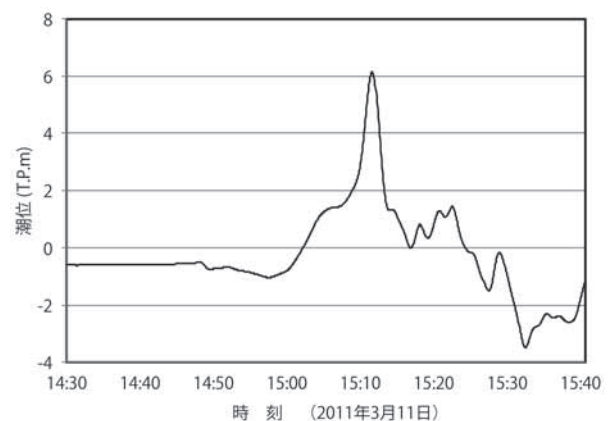


Fig. 13 境界における津波波高  
Tsunami height given to the boundary

**Table 4** 検討ケース一覧  
List of cases

ケース	地盤標高	海岸堤防標高	備考
現況	現況地盤標高	T.P.+7.15m	現況津波の再現
計画堤防	現況地盤標高	T.P.+14.3m	河口部に津波防潮水門を建設
減災農地	減災農地計画案	T.P.+7.15m	ほ場標高は暫定値を使用



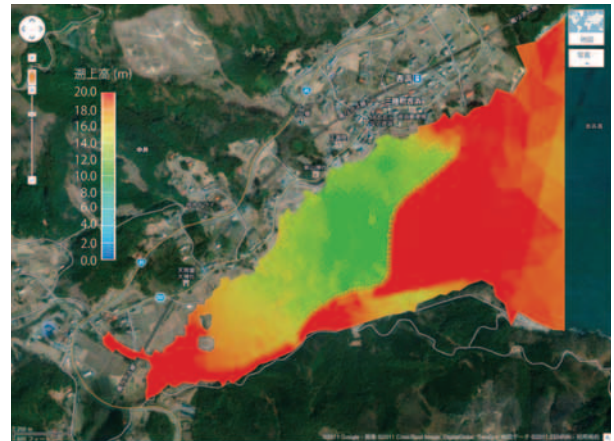
**Fig. 14** 吉浜地区の解析に用いた減災農地計画案  
Plan of the disaster prevention farmland used for the simulation

**C 解析結果**

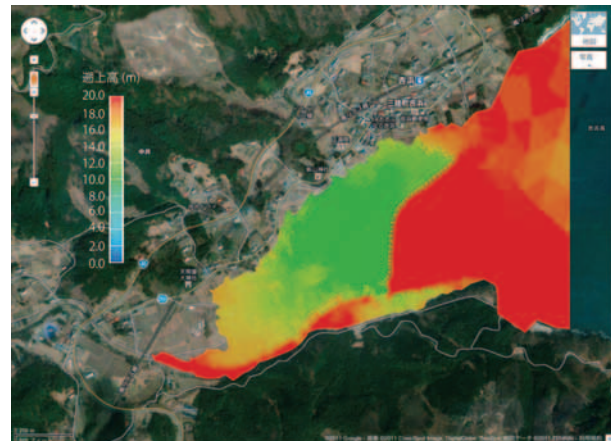
現況地形および堤防高による津波遡上の再現結果を **Fig.15** に示す。今回のシミュレーションでは、吉浜川の河床標高データを入手することができず、近傍の地盤標高より3m低いと仮定した。このため、津波が実際よりも多く河川を遡上し、上流部で氾濫が発生しているが、被災状況の航空写真との対比からこれは過大評価だと考えられる。

一方、堤防標高を計画天端高まで上げた場合の津波遡上高を **Fig.16** に示す。計画天端標高は、明治三陸、昭和三陸およびチリ地震津波の最高値をもとに決定されているが、東北地方太平洋沖地震津波では計画天端標高を超えて越水し、浸水範囲は現況（堤防高さ7.15m）よりも若干狭くなるものの、大きな浸水は免れられないと考えられる。なお、**Fig.16** の河口部右岸川で浸水標高が低くなっているのは津波防潮堤の効果であるが、この場合でも海岸堤防を越水した氾濫水が河川に流入し、浸水する状況が見られた。

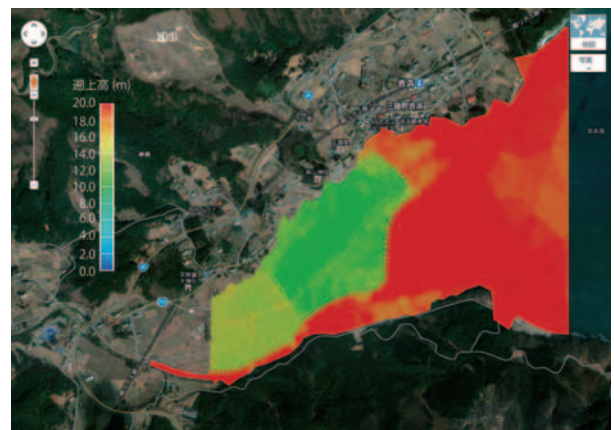
減災農地（堤防高さ7.15mと2線堤の併用）における津波浸水高さを **Fig.17** に示す。減災農地では、地区の北側の浸水高さが他のケースより高くなっているが、これは地盤標高が高い部分に水源と駐車場を設けており、外周が囲まれていることで湛水するためである。減災農地として整備する農地区画によって浸水深が小さくなっており、津波減勢が有効に働いて、集落への遡上を防止している。2線堤（標高20m）ではほぼ津波遡上は防止できているが、左岸集落前の一部でわずかな浸水の可能性がある。この部分的な浸水は、減災農地の配置や農地段差の取り方などで回避できる可能性がある。



**Fig. 15** 津波浸水高さ（標高）の分布（現況）  
Distribution of tsunami run-up height (Present)



**Fig. 16** 津波浸水高さ（標高）の分布（計画堤防）  
Distribution of tsunami run-up height (Planned dike height)



**Fig. 17** 津波浸水高さ（標高）の分布（減災農地）  
Distribution of tsunami run-up height (Disaster prevention farmland)

現況地形、計画堤防および減災農地の各ケースについて、**Fig.14** の地点1～3の評価地点における浸水深の時間変化を示したのが **Fig.18** ~ **Fig.20** である。浸水深の最大値は、現況地形では8mに達している一方で、計画堤防および減災農地では6m程度に抑えられている。また、現況地形および計画堤防では、地点1と地点2の津

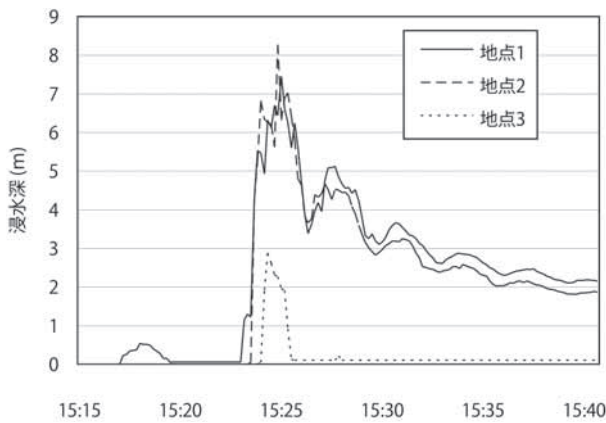


Fig. 18 評価地点の浸水深の時間変化（現況地形）  
Time series of inundation depth at the evaluation points (Present)

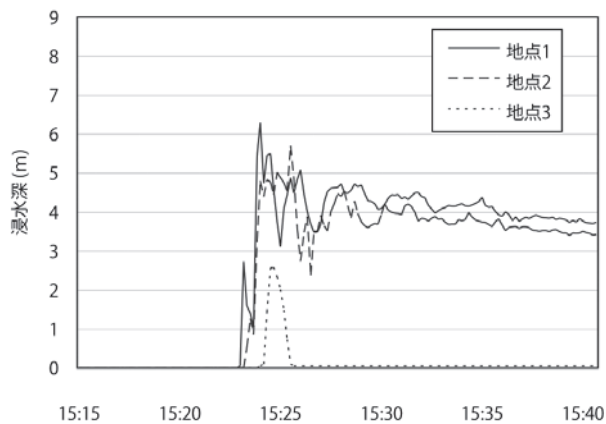


Fig. 19 評価地点の浸水深の時間変化（計画堤防）  
Time series of inundation depth at the evaluation points (Planned dike height)

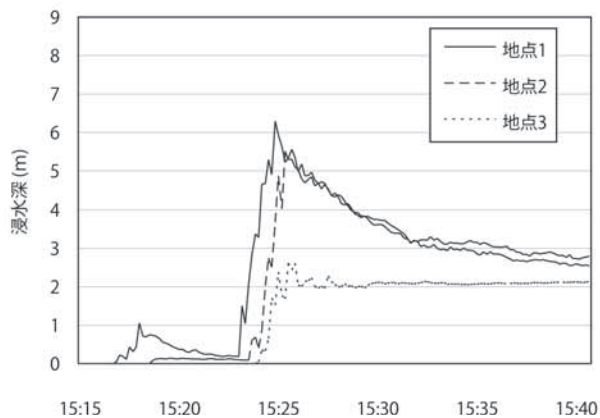


Fig. 20 評価地点の浸水深の時間変化（減災農地）  
Time series of inundation depth at the evaluation points (Disaster-prevention farmland)

波の到達時間にほとんど差がないのに対し、減災農地では 90s 程度の津波到達遅延効果が得られているのが確認できる。また、津波浸水深の低下スピードは、現況地形に比べて減災農地では緩やかであり、津波遡上後の戻り流れが減勢されていると考えられる。ここで、計画堤防

で浸水深がなかなか低下しないのは、津波来襲後でも防潮水門が解放されないと設定したことによる。なお、地点 3 の浸水深が減勢農地で低下しないのは、農地の周囲の段差により圃場がプール状になるためである。

## V 結 言

本報では、東北地方太平洋沖地震で発生した津波被害からの恒久復旧対策のメニューとして、農研機構が提案している減災農地の津波減勢効果を水理模型実験と数値シミュレーションで検討した。

水理模型実験では、海岸堤防のみでの防御を行う現況地形では、海岸堤防に衝突した津波が減勢されずに内陸部を駆け上がる一方で、減災農地では、ほ場の段差（高さ 1.5m）では津波の減勢効果は小さいものの、2 線堤（高さ 2.5m）で減勢効果を得られる可能性があることがわかった。また、津波の継続時間が長くなると減勢農地でも内陸部に津波が遡上するが、これは津波越波量が農地のバッファーを超えるためである。以上の結果から減勢農地の効果を整理すると以下のとおりである。

- 津波の浸水防止：2 線堤と 3 線堤の高さと海岸堤防との間の容量を大きく取ることが重要である。
- 津波減勢：2 線堤と減災農地によって流速を低減でき、結果として津波遡上高さを抑制できる。
- 盛土を適切な位置に複数列配置することによって、大きな津波浸水抑制効果がある。

数値シミュレーションによる解析では、農村工学研究所で開発した農地の氾濫シミュレーションモデルで津波遡上の評価が行えることを確認するとともに、沿岸部の農地をバッファーとして適正な容量を確保することで、巨大な津波に対しても海岸堤防を高くするのに遜色のない効果が得られると評価された。なお、農地区画、公園、河川の配置によって浸水範囲、浸水深は異なると考えられ、減災農地を具体化する際にはより詳細なシミュレーションを行う必要がある。

## 参考文献

- 1) 毛利栄征・丹治 肇 (2012) 海岸堤防の後背農地による津波減勢 - 減災農地の考え方と提案 -, 農工研技報 213, 105-116
- 2) The 2011 Tohoku Earthquake Tsunami Joint Survey Group (2011) "NATIONWID EFIELD SURVEY OF THE 2011 OFF THE PACIFIC COAST OF TOHOKU EARTHQUAKE TSUNAMI", 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 67 (1), 63-66
- 3) 桐 博英・久保田富次郎・登坂宣好・丹治肇・中矢哲郎 (2004) 有限要素法による小水路を考慮した農地氾濫モデル, 応用力学論文集, 7 (1), 423-430

## Evaluation of the effect of Tsunami Energy Dissipation of Disaster-Prevention Farmland

KIRI Hirohide, TANJI Hajime, FUKUYO Narufumi, MOHRI Yoshiyuki and YAMAMOTO Tokuji

### Summary

The effect of tsunami energy dissipation of disaster-prevention farmland was evaluated by a hydraulic model test and a numerical simulation. The Tohoku earthquake on 11 March, 2011 caused a huge tsunami disaster, especially along the coast of the Tohoku region of Japan. NARO has proposed using disaster-prevention farmland to mitigate damage caused by tsunami in coastal farmlands, but its effectiveness for dissipating tsunami energy has not been clarified. We conducted hydraulic model tests to evaluate the delay of tsunami run-up to a residential area, and found the tsunami was delayed by 130 s for short-wavelength tsunami. The short-wavelength tsunami did not reach the residential area in the case of disaster-prevention farmland, but reached the top of the residential area in the case of normal farmland. In the case of long-wavelength tsunami, the volume of tsunami that overflowed the coastal dike exceeded the capacity between the coastal dike and a third dike and reached the residential area. However, the energy of the long-wavelength tsunami that reached the residential area was dissipated by the second and third dikes. A numerical simulation evaluated the effects of disaster-prevention farmland in a model district. The simulated inundation area of existing farmland, the case with a higher coastal dike, and the disaster-prevention farmland were compared. The area inundated by the tsunami in the higher coastal dike was narrower than that of the existing farmland. However, the difference of the inundation area was small. The inundation area of the disaster-prevention farmland was similar to that of the existing farmland because the heights of the coastal dikes were the same. However, the velocity of tsunami run-up was slower in the disaster-prevention farmland. Thus, it is concluded that disaster-prevention farmland is an effective revival plan for the model district.

**Keywords** : The 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake, coastal farmland, disaster prevention farmland, tsunami