

石垣島轟川河口海域における底質中懸濁物質含量 簡易予測モデルとその応用¹⁾

仲宗根一哉・金城孝一・佐藤泰夫²⁾・佐川鉄平³⁾

Predictive Models and Application of Suspended Particles in Sea Sediment at the Todoroki River Estuary, Ishigaki Island

Kazuya NAKASONE, Koichi KINJYO, Yasuo SATO²⁾ and Teppei SAGAWA³⁾

要旨：河口海域の底質中懸濁物質含量定点観測データ，河川 SS 負荷量観測データ，土壤流出予測量を算出するための基礎データおよび波浪推算データが揃った石垣島轟川河口海域をモデルケースに重回帰分析および最小二乗法を用いてサンゴ礁海域の底質中懸濁物質含量の変動を説明するモデルを構築した。観測値に対するモデルの当てはまりは良く，USLE などの土壤流出予測モデルと組み合わせることによって，陸域の土壤流出防止対策の効果を海域の底質中懸濁物質含量の予測値から定量的に評価できることを示した。

Key words: サンゴ礁，底質中懸濁物質含量，白保海域，USLE，石垣島，予測モデル

I はじめに

沖縄県では，1970年代から1980年代にかけて急速な社会基盤整備に伴う大規模で集中的な土地改変により，大量に流出した土壌が隣接するサンゴ礁海域に流入し，海域環境に大きなダメージを与えた¹⁾。海域環境の悪化は，サンゴ礁生態系の衰退を招き，水産業や観光業などに重大な経済的損失をもたらした。このため，沖縄県は1995年10月に沖縄県赤土等流出防止条例を施行し，以降，開発事業における土壤流出防止対策が全県的に進められてきた。条例の施行により開発事業からの土壤流出量は減少したが，反面，条例の規制のかからない農地からの土壤流出がクローズアップされてきた²⁾。

今後，農地からの土壤流出防止対策を進展させるには，農家が対策を取り入れやすい制度の導入やシステムの構築が必要である³⁾。その前段として，「農地からの土壤流出量をどの程度削減すれば海域が保全できるか」という議論が不可避であり，陸と海をつなぐ包括的な研究が求められている¹⁾。

仲宗根ら⁴⁾は地理的環境や地形の異なるサンゴ礁海域で，海底の土壌堆積の指標である底質中懸濁物質含量⁵⁾ (SPSS : content of Suspended Particles in Sea Sediment) の変動に対し，降水や波浪がどの程度寄与しているのか，既存の SPSS 長期定点観測データと地域気象観測システム (Automated Meteorological Data

Acquisition System)，略称 AMeDAS の気象観測値および全国港湾海洋波浪情報網 (Nationwide Ocean Wave information network for Ports and HarbourS)，略称 NOWPHAS の波浪観測データを用いて統計的に解析し，SPSS 予測モデルを構築した。ところで，陸域から海域への土壤流出負荷を表現するには，降水量よりも海域に接続する河川や排水路の SS 負荷量が直接的である。しかし，海域の SPSS 長期観測値と，その海域に接続する河川 SS 負荷量の長期観測値が同時に得られた調査事例は極めて少ない。また，海域の地理的条件によっては，NOWPHAS の波浪観測値と対象とする海域の波浪特性が対応しない場合もある⁴⁾。そこで，SS 負荷量に代えて USLE⁶⁾ (Universal Soil Loss Equation) 等の土壤流出予測式から推算される土壤流出量や，推算波浪が利用できれば，より簡便に SPSS 予測モデルを構築することが可能であり，各種土壤流出防止対策の効果を海域の SPSS 予測値として評価することが期待できる。

本論文では河口近傍の河川 SS 負荷量の長期観測値と，土壤流出予測量の算出を前提とした河川流域農地の詳細データ，および河口海域における SPSS 長期観測値の揃った石垣島轟川流域と轟川河口海域 (白保海域) をモデルケースに SPSS 予測モデルを構築し，農地土壤流出防止対策のシナリオ設定に基づく SPSS 変動シミュレーションを行い，対策評価の定量化を試みた。

¹⁾ 本研究は，内閣府国庫補助事業「平成 21 年度赤土等に係る環境保全目標設定調査」の一部として実施した。

²⁾ いであ株式会社

³⁾ WWF ジャパン (財団法人世界自然保護基金ジャパン) サンゴ礁保護研究センター

II 方法

1. 解析データ

解析に用いたデータ取得地点を図1に示した。

(1) SPSS 観測値

轟川河口海域における SPSS 観測値 (表1) は, WWF ジャパン (財団法人世界自然保護基金ジャパン) サンゴ礁保護研究センターが実施する白保海域定点観測調査⁷⁾ から, 2005年12月から2008年11月までの14回の観測値を入手し, 河口近傍の2地点 (E2, F2) の観測値を用いた。

(2) SS 負荷量

轟川の期間 SS 負荷量 (表2) は, 「平成20年度赤土等流出対策支援システム確立検討業務報告」⁸⁾ から, 2005年12月から2008年11月までの轟川河口近傍の流量および濁度から算出された日 SS 負荷量を基に, 表1の SPSS 観測期間に対応する流域面積あたり期間 SS 負荷量を積算して用いた。

(3) 流域内農地情報

轟川流域内農地の一筆情報 (土壌種類, 作物, 面積, 斜面・傾斜長, 保全対策など) は, 「平成20年度赤土等流出対策支援システム確立検討業務」⁸⁾ で, GIS の属性データとして収集されており, 土壌流出量の推算に用いた。

(4) 波浪

波浪データ (表3) は財団法人日本気象協会が有償で提供している局地波浪推算データベースを用いた。このデータベースは, 気象庁から1日2回配信される日本沿岸波浪 GPV (格子間隔6分 (約10 km), 時間間隔6時間) を, 地形による遮蔽効果と局所的な風波を考慮に入れて2分格子間隔 (約3.7 km) の値に内挿・再計算を行い, 波浪予報の基礎資料としている。ここでは海岸線に対する波向きを考慮して波向 45° (北東) - 135° (南東)

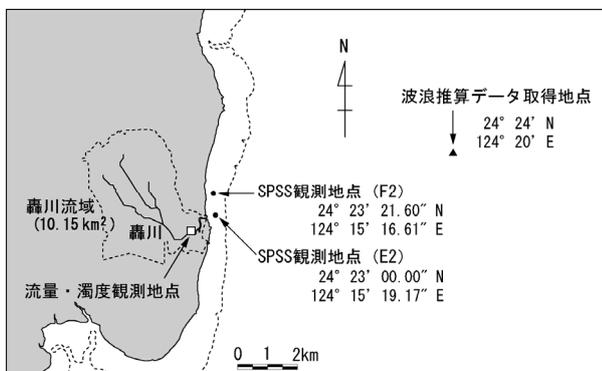


図1. 石垣島轟川における流量・濁度観測地点, 轟川河口における SPSS 観測地点および石垣島東沖合の波浪推算データ取得位置図。

表1. 石垣島轟川河口海域における SPSS 観測データ。

観測年月日	SPSS (kg/m ³)		
	E2	F2	幾何平均
2005/12/10	26.1	34.6	30.04
2006/3/11	23.1	42.9	31.45
2006/5/21	11.7	31.1	19.13
2006/8/19	12.8	25.6	18.09
2006/12/9	13.8	14.7	14.27
2007/2/26	38.9	63.8	49.80
2007/5/13	21.7	88.2	43.77
2007/8/4	8.3	18.2	12.31
2007/11/18	21.3	55.7	34.47
2008/3/2	435.1	51.9	150.21
2008/5/25	64.8	62.5	63.65
2008/6/24	1041.3	138.4	379.59
2008/8/3	16.7	37.5	25.02
2008/11/16	17.3	15.2	16.20

表2. 石垣島轟川の期間 SS 負荷量。

期間	日数	期間 SS 負荷量 (kg/10.15km ²)
2005/9/26 - 2005/12/10	74	-
2005/12/10 - 2006/3/11	91	1266.3
2006/3/11 - 2006/5/21	70	1314.5
2006/5/21 - 2006/8/19	88	856.9
2006/8/19 - 2006/12/9	110	2872.3
2006/12/9 - 2007/2/26	77	344.5
2007/2/26 - 2007/5/13	77	458.7
2007/5/13 - 2007/8/4	81	210.9
2007/8/4 - 2007/11/18	104	7488.7
2007/11/18 - 2008/3/2	104	2835.6
2008/3/2 - 2008/5/25	83	2250.2
2008/5/25 - 2008/6/24	29	2201.0
2008/6/24 - 2008/8/3	39	55.0
2008/8/3 - 2008/11/16	103	4167.6

表3. 石垣島東沖の波浪推算取得地点の期間平均有義波高および期間最大有義波高。

期間	日数	有義波高 (m) ¹⁾	
		期間平均	期間最大
2005/9/26 - 2005/12/10	74	2.32	11.02
2005/12/10 - 2006/3/11	91	2.35	4.12
2006/3/11 - 2006/5/21	70	1.71	3.99
2006/5/21 - 2006/8/19	88	1.90	9.65
2006/8/19 - 2006/12/9	110	1.78	8.15
2006/12/9 - 2007/2/26	77	2.24	4.73
2007/2/26 - 2007/5/13	77	1.73	3.91
2007/5/13 - 2007/8/4	81	1.16	5.57
2007/8/4 - 2007/11/18	104	2.56	11.48
2007/11/18 - 2008/3/2	104	2.59	5.43
2008/3/2 - 2008/5/25	83	1.66	3.49
2008/5/25 - 2008/6/24	29	1.28	2.22
2008/6/24 - 2008/8/3	39	1.78	8.75
2008/8/3 - 2008/11/16	103	1.89	10.43

¹⁾ 北東-南東の波向きの波浪データを用いた。

の有義波高を採用し、表1のSPSS観測期間に対応する期間平均有義波高および期間最高有義波高を算出した。

2. 解析方法

(1) SS 負荷量を説明変数にした SPSS 予測モデル

SPSS 観測期間前後の2地点 (E2, F2) 平均 SPSS の常用対数変換値の差分を従属変数として、期間 SS 負荷量および期間始めの地点平均 SPSS を期間平均有義波高および期間最高有義波高のそれぞれに乗算したものを説明変数として、重回帰分析を行った。統計解析には SPSS15.0J を使用した。得られた最適モデルを漸化式に変形して、SPSS 予測モデルを得た。

(2) USLE を組み合わせた SPSS 予測モデル

USLE を用いた轟川流域の月別土壌流出量の推定では、2005 年から 2008 年に轟川流域内で観測された降水量⁸⁾ から月別降雨係数を算出した。月別の作物係数は、比嘉ら⁹⁾の文献から引用し、土壌係数、傾斜・斜面長係数および保全係数は、「平成 20 年度赤土等流出対策支援システム確立検討業務」⁸⁾で収集された資料から引用した。2005 年から 2008 年までの月別 SS 負荷量に対応する月別土壌流出予測量から、SS 負荷量と土壌流出予測量との回帰式を求め、SPSS 予測モデル中の期間 SS 負荷量を期間土壌流出予測量に置き換えた。

(3) SPSS 予測モデルの応用

轟川流域農地における営農上の土壌流出防止対策のシナリオを設定し、(2)で得られた USLE を組み合わせた SPSS 予測モデルを用いて SPSS 観測期間における SPSS 変動シミュレーションを行い、海域環境への影響評価を試みた。

II 結果および考察

1. SS 負荷量を説明変数にした SPSS 予測モデル

重回帰分析の結果、最適モデルは以下のようになり、期間前後の SPSS の変動は、期間 SS 負荷量と期間始めの SPSS 対数値と期間最高有義波高の積で説明できた。

$$\Delta \log_{10}(Q_{i,i+1}) = \log_{10}(SPSS_{i+1}) - \log_{10}(SPSS_i) = 0.122 \times SS_{Ci,i+1} - 0.075 \times \log_{10}(SPSS_i) \times m_x H_{i,i+1} + 0.453 \dots \textcircled{1}$$

$$(R = 0.747, p < 0.01)$$

ここで、 $\Delta \log_{10}(Q_{i,i+1})$ は、観測期間 (i, i+1) の SPSS 対数値の階差 ($\log_{10}(SPSS_{i+1}) - \log_{10}(SPSS_i)$) を表し、 $SS_{Ci,i+1}$ は、轟川流域面積 10.15 km²あたりの期間 SS 負荷量($t \times 10^{-3}$)を表す。 $m_x H_{i,i+1}$ は、波向 45° (北東) - 135°

(南東) の期間最高有義波高(m)を表す。

①式を漸化式に変形すると、

$$\log_{10}(SPSS_{i+1}) = \log_{10}(SPSS_i) + 0.122 \times SS_{Ci,i+1} - 0.075 \times \log_{10}(SPSS_i) \times m_x H_{i,i+1} + 0.453 \dots \textcircled{2}$$

となる。予測モデルに初期値を入力して連続計算した結果を図2に示し、SPSS 観測値 (幾何平均値) と計算値の相関を図3に示した。予測モデルは、観測値の変動に対して概ね当てはまりが良く、観測値との相関も相関係数 0.923 と高かった。さらに、観測値と連続計算値の残差平方和を最小にするよう、最小二乗法により係数の最適解を求め、以下の修正モデル③を得た。

$$\log_{10}(SPSS_{i+1}) = \log_{10}(SPSS_i) + 0.128 \times SS_{Ci,i+1} - 0.064 \times \log_{10}(SPSS_i) \times m_x H_{i,i+1} + 0.363 \dots \textcircled{3}$$

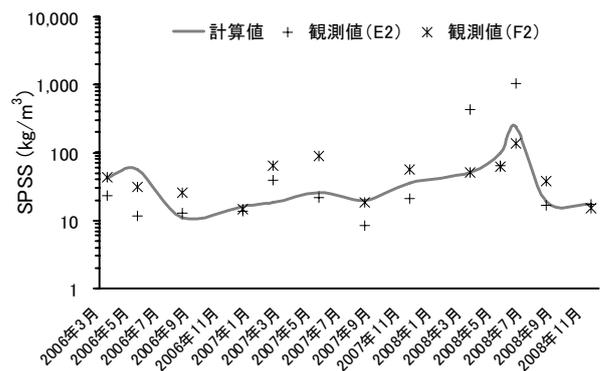


図2. SPSS 予測モデル②から算出した石垣轟川河口海域における SPSS 計算値と観測値の変動。

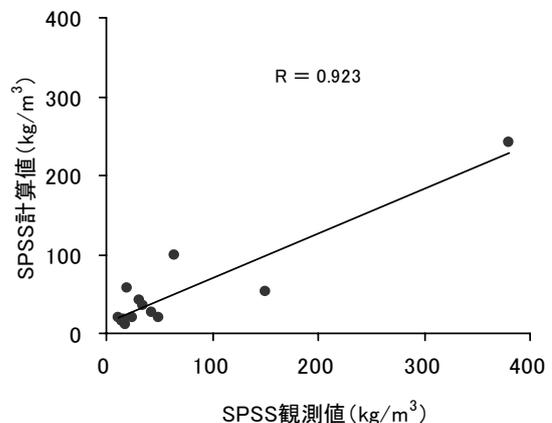


図3. SPSS 予測モデル②から算出した SPSS 計算値と観測値の相関. SPSS 観測値は2地点の幾何平均値。

修正モデル③に初期値を入力して、連続計算した結果を図4に、SPSS 観測値（幾何平均値）と修正モデルから算出した計算値の相関を図5に示した。最小二乗法を用いた係数の最適化により相関係数は0.926に向上した。

2. USLE を組み合わせた SPSS 予測モデル

次に轟川流域（10.15 km²）における SS 負荷量と USLE による土壌流出予測量を月別に算出し、図6に示した。得られた回帰式から USLE により算出した土壌流出予測量は SS 負荷量に 1.9842 を乗算した値に近い。これにより③式は、

$$\log_{10}(\text{SPSS}_{i+1}) = \log_{10}(\text{SPSS}_i) + 0.064 \times \text{USLE}_{i,i+1} - 0.064 \times \log_{10}(\text{SPSS}_i) \times m_{\text{H}}H_{i,i+1} + 0.363 \dots \textcircled{4}$$

となり、USLE による期間土壌流出予測量と期間始めの SPSS 対数値と期間最高有義波高の積から轟川河口海域の SPSS を予測することができ、陸域の土壌流出量の削減効果を海域 SPSS の変化として表現できた。

3. SPSS 予測モデルの応用

2006年1月から2009年3月までの轟川流域の月別総降雨量と月別 SS 負荷量の時系列変化を図7に示した。SS 負荷量は概ね降雨量の多い時期に高くなる傾向があり、USLE から算出した月別土壌流出予測量も SS 負荷量の時系列変化とほぼ同様なパターンを示す（図8）。これを年間土壌流出予測量に対する月別土壌流出予測量の割合として示すと、3月から9月にかけて流出割合が高く、サトウキビ夏植えの収穫後、次の苗植え付けまでの裸地期間と重なる（図9）。轟川流域の農地の大半がサトウキビ畑であることから、サトウキビ畑での土壌流出防止対策を図ることが重要となる。そこで、サトウキビの作型を現状の夏植えから株出しに変えた場合（株出し）、サトウキビを含む全畑でグリーンベルトを設置した場合（GB）、サトウキビ株出しと全畑グリーンベルト設置の場合（株出し+GB）の4つに分け、年間土壌流出予測量を現状と比較した（図10）。なお、グリーンベルトの対策効果は流出濁水抑制であり、その効果は一様ではないと考えられるが、ここではグリーンベルトの保全係数を0.5として計算した。

USLE による推算の結果、GB の場合、現状よりも5割程度、株出しでは現状より4割程度土壌流出量を削減する効果が予想され、株出し+GB では同様に約7割の削減が見込まれる。こうした農地対策シナリオに基づいて SPSS 予測モデルを利用すると、農地対策メニ

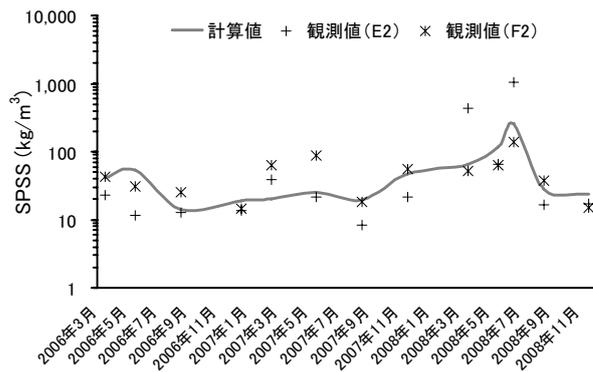


図4. 修正 SPSS 予測モデル③から算出した SPSS 値と観測値の変動。

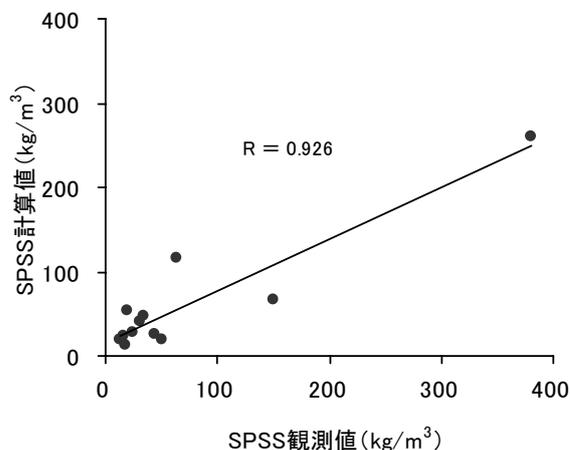


図5. 修正 SPSS 予測モデル③から算出した SPSS 計算値と観測値の相関。SPSS 観測値は2地点の幾何平均値。

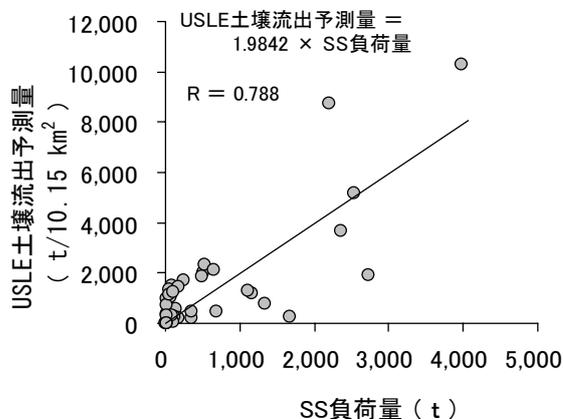


図6. USLE から算出した轟川流域面積あたりの月別土壌流出予測量と月別 SS 負荷量の相関。

ューの種類や組み合わせによって隣接する河口海域におけるSPSSを予測することができる。さらに、サンゴ礁海域の環境保全指標の一つとしてSPSSを用いることで、目標とするSPSS値と現状値から、陸域からの土壌流出削減必要量の算出が可能となることから、陸域対策の効果をも評価し、サンゴ礁の環境保全対策と陸域の土壌流出防止対策を計画的に進めることが期待できる。

図11は、SPSS予測モデルを用いて、観測期間内のSPSSの変動を農地対策シナリオごとに時系列で表している。3つのシナリオ全てで現状よりもSPSSが低く推移している。2008年6月7日には1時間あたり88mm

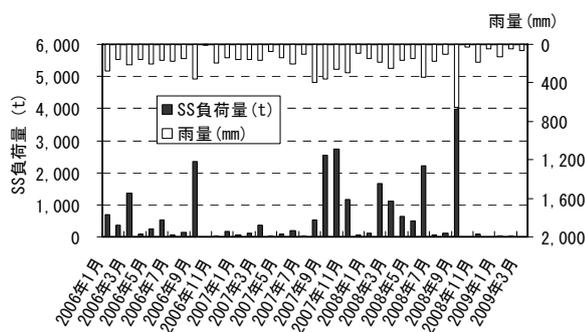


図7. 轟川流域の月別降水量と月別SS負荷量の時系列変化(2006年1月-2009年3月). 資料⁸⁾中のデータを加工.

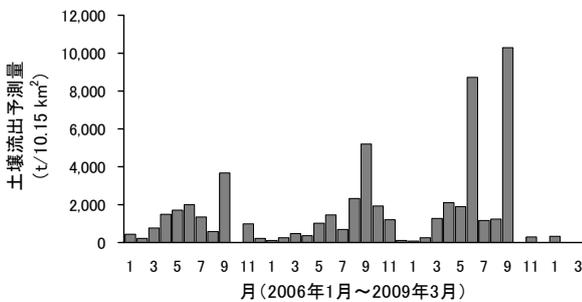


図8. USLEから算出した轟川流域の月別土壌流出予測量の時系列変化(2006年1月-2009年3月). 資料⁸⁾中のデータを加工.

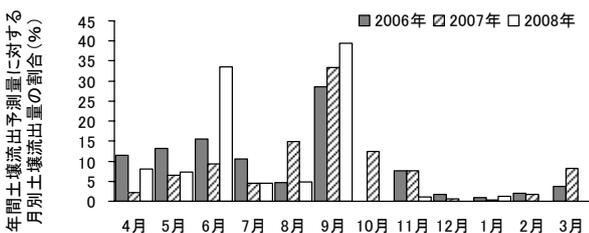


図9. 轟川流域の年間土壌流出予測量に対する月別土壌流出予測量の割合.

という強い雨が記録されているが、現状のSPSS観測値270 kg/m³に対して、グリーンベルトを流域全ての畑に設置していればSPSSは84 kg/m³に抑えられると予測できる。また、サトウキビ作型を夏植えから株出しへ移行した場合も同様にSPSSは53 kg/m³に、さらに全畑グリーンベルトとサトウキビ株出しの両方の対策の場合ではSPSSは36 kg/m³と、さらに低くなる事が分かる。

大見謝⁵⁾は年間最大SPSS値と底質状況およびサンゴなどとの関係に明瞭な対応があることを明らかにしており、9つのランクに分けて整理している(付表)。図11の農地対策シナリオごとのSPSS変動をSPSSランクの推移で表すと表4のようになる。轟川流域では、現状ではSPSSランクは5bから7で推移しているが、全畑グ

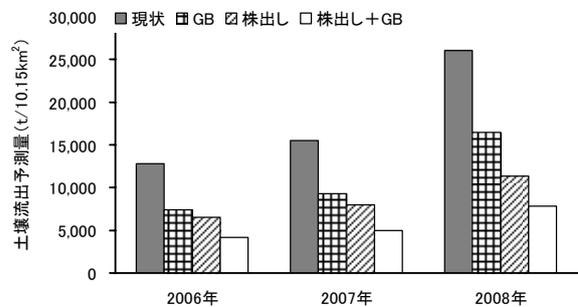


図10. 農地対策シナリオと年間土壌流出量の比較.

現状: 現状の対策・作型, GB: 流域内全畑にグリーンベルトを設置, 株出し: サトウキビ夏植えから株出しに移行, 株出し+GB: 株出し移行と全畑グリーンベルト設置.

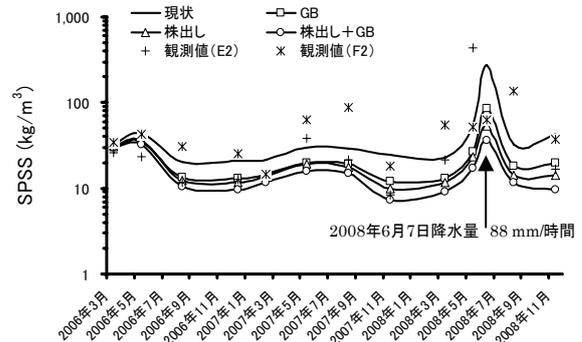


図11. SPSS予測モデルを用いた轟川流域における農地対策シナリオに基づく河口海域SPSSの変動シミュレーション. 現状: 現状の対策・作型, GB: 流域内全畑にグリーンベルトを設置, 株出し: サトウキビ夏植えから株出しに移行, 株出し+GB: 株出し移行と全畑グリーンベルト設置.

ーンベルト設置やサトウキビ夏植えから株出しへの移行などの対策を施した場合、SPSS ランクは4から6で推移すると予測される。また、全畑グリーンベルトとサトウキビ夏植えから株出しへの移行を組み合わせると、SPSS ランクは4から5bで安定的に推移しており、サンゴ礁海域環境の改善が期待できる。

表4. SPSS 予測モデルを用いた轟川流域における農地対策シナリオに基づく河口海域予測 SPSS ランクの推移。現状：現状の対策・作型，GB：流域内全畑にグリーンベルトを設置，株出し：サトウキビ夏植えから株出しに移行，株出し+GB：株出し移行と全畑グリーンベルト設置。

年月日	観測 SPSSランク	SPSS予測モデルによる予測SPSSランク			
		現状	GB	株出し	株出し+GB
2006年3月11日	5b	5b	5b	5b	5a
2006年5月21日	5a	5b	5b	5b	5b
2006年8月19日	5a	5a	5a	5a	5a
2006年12月9日	5a	5a	5a	5a	4
2007年2月26日	5b	5a	5a	5a	5a
2007年5月13日	5b	5a	5a	5a	5a
2007年8月4日	5a	5a	5a	5a	5a
2007年11月18日	5b	5a	5a	4	4
2008年3月2日	6	5a	5a	5a	4
2008年5月25日	6	6	5a	5a	5a
2008年6月24日	7	7	6	6	5b
2008年8月3日	5a	5b	5a	5a	5a
2008年11月16日	5a	5b	5a	5a	4

IV 参考文献

- 1) 大見謝辰男 (2003) 赤土等の流出によるサンゴ礁の汚染. 沿岸海洋研究, 40 : 141-148.
- 2) 仲宗根一哉・比嘉榮三郎・満本裕彰・大見謝辰男 (1998) 沖縄県における赤土等年間流出量 (第2報) 沖縄県衛生環境研究所報, 32 : 67-72.
- 3) 大見謝辰男・比嘉榮三郎・仲宗根一哉・満本裕彰 (2002) 赤土条例施行前後における沖縄沿岸の赤土等堆積状況比較. 沖縄県衛生環境研究所報, 36 : 77-84.
- 4) 仲宗根一哉・金城孝一・灘岡和夫・宮川勝司・吉本昌弘・佐藤泰夫・玉城不二美・渡口輝・大城洋平・井上豪・天願博紀 (2009) サンゴ礁海域における SPSS の長期観測と変動解析. 沖縄県衛生環境研究所報, 43 : 79-90.
- 5) 大見謝辰男 (2003) SPSS 簡易測定法とその解説. 沖縄県衛生環境研究所報, 37 : 99-104.
- 6) 農林水産省構造改善局計画部 (1992) 土地改良事業計画指針 農地開発 (改良山成畑工), 191pp.
- 7) 安村茂樹・前川聡・佐藤哲 (2004) 沖縄県石垣島白保サンゴ礁海域における赤土堆積量の時空間的分布について. 保全生態学研究, 9 : 117-126.
- 8) 沖縄県営農支援課・アジアプランニング株式会社 (2009) 平成20年度赤土流出対策支援システム確立検討業務報告書.
- 9) 比嘉榮三郎・大見謝辰男・仲宗根一哉・満本裕彰 (1997) 沖縄県における各種作物の作物係数. 沖縄県衛生環境研究所報, 31 : 147-151.

付表. SPSS ランクと底質, サンゴなどとの関係⁵⁾.

SPSS (kg/m ³)		底質状況, その他参考事項	
下限	ランク		上限
	1	<0.4	定量限界以下. きわめてきれい. 白砂がひろがり生物活動はあまり見られない.
0.4 ≤	2	<1	水中で砂をかき混ぜても懸濁物質の舞い上がりを確認しにくい. 白砂がひろがり生物活動はあまり見られない.
1 ≤	3	<5	水中で砂をかき混ぜると懸濁物質の舞い上がりが確認できる. 生き生きとしたサンゴ礁生態系が見られる.
5 ≤	4	<10	見た目ではわからないが, 水中で砂をかき混ぜると懸濁物質で海が濁る. 生き生きとしたサンゴ礁生態系が見られる. 透明度良好.
10 ≤	5a	<30	注意して見ると底質表層に懸濁物質の存在がわかる. 生き生きとしたサンゴ礁生態系のSPSS上限ランク.
30 ≤	5b	<50	底質表層にホコリ状の懸濁物質がかぶさる. 透明度が悪くなりサンゴ被度に悪影響が出始める.
50 ≤	6	<200	一見して赤土等の堆積がわかる. 底質攪拌で赤土等が色濃く懸濁. ランク6以上は, 明らかに人為的な赤土等の流出による汚染があると判断.
200 ≤	7	<400	干潟では靴底の様様がかくつきり. 赤土等の堆積が著しいがまだ砂を確認できる. 樹枝状ミドリイシ類の大きな群体は見られず, 塊状サンゴの出現割合増加.
400 ≤	8		立つと足がめり込む. 見た目は泥そのもので砂を確認できない. 赤土汚染耐性のある塊状サンゴが砂漠のサボテンのように点在.