

山国川と中津干潟の広域土砂動態と 侵食堆積機構の解明と河川の土砂量 算定技術の高精度化

群馬大学大学院 理工学府 環境創生部門
准教授 鵜崎 賢一



研究経歴

(九州大学大学院総合理工学研究院大気海洋環境システム学専攻)

[風, 海岸]

■海水飛沫の定量的評価～半理論式の提案

水理実験



[風, 海洋・海岸]

■吹送流中の二次循環流の形成機構

水理実験・数値計算



- ・トラス構造を有する鋼製浮防波堤の消波性能評価と設計指針の構築
- ・係留船舶の長周期動揺の原因と対策
- ・感潮水路網の水位予測計算
- ・諫早干拓事業の影響評価に関する現地調査, 和白干潟の大気
・水質調査



[風・漂砂, 海洋・海岸]

■漂砂過程における吹送流の影響評価 : 日本学術振興会特別

研究員

～極浅海域での土砂動態



(国土交通省港湾空港技術研究所任期付研究員)

現地観測・数値計算

[風・海岸 (干潟)]

■潮汐と風波を考慮した泥と砂による広域土砂動態・地形変化モデルの構築と現地適用

～干潟の土砂動態 ...海岸・干潟の土砂供給源としての河川



(群馬大学大学院理工学府環境創生部門) 現地観測・数値計算

[風・漂砂・流砂, 河川・海岸 (干潟) ・湖沼]

■河川の流量・土砂量計測技術の高精度化

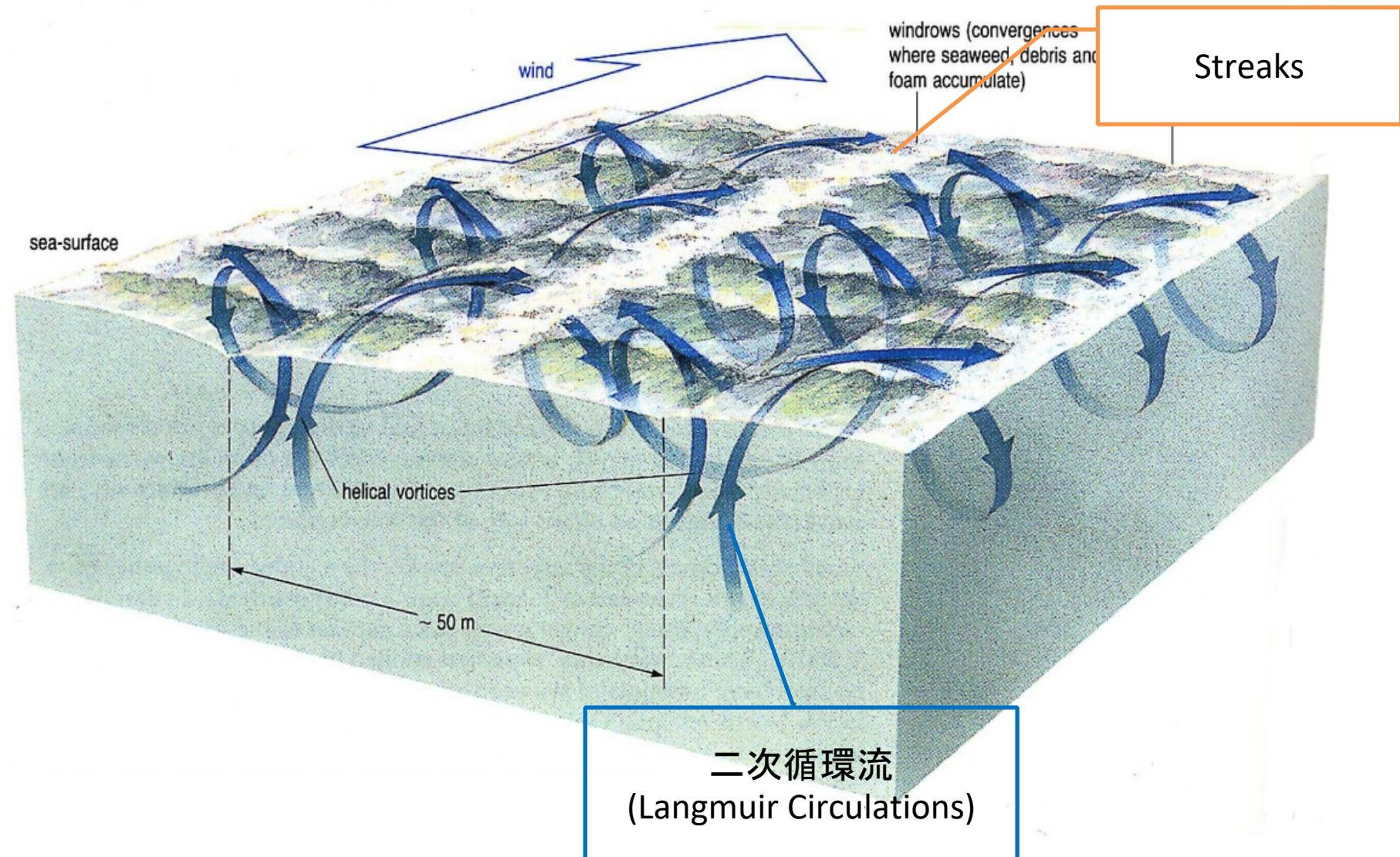
- ・利根川八斗島水位観測所の埋没問題の原因と対策
- ・河川流量の算定時の表面流速における吹送流の影響評価

■河川・沿岸域を含めた広域土砂動態の解明

- ・那珂川からの土砂供給量の算定と鹿島灘の広域土砂動態の解明
- ・山国川と周防灘を含めた中津干潟の広域土砂動態の解明と新たな保全対策の提案

■吹送流中の二次循環流の形成機構と湖沼の水質環境に及ぼす影響評価

Langmuir Circulations



"Ocean Currents in Ocean Circulation", ed. G. Bearman, Pergamon Press



渡良瀬遊水地・谷田部川

研究背景

1. 干潟の価値

- ◇沿岸域の水質浄化
- ◇生態系の維持
- ◇潮干狩り等のレジャーの場

2. 中津干潟の抱える問題

- ◇漁獲量の減少
- ◇航路埋没

←干潟の**侵食**？**泥質化**？



図-1 中津干潟の位置



図-2-1 中津干潟(干潮時)



図-2-2 中津干潟(満潮時)

中津干潟のアサリ

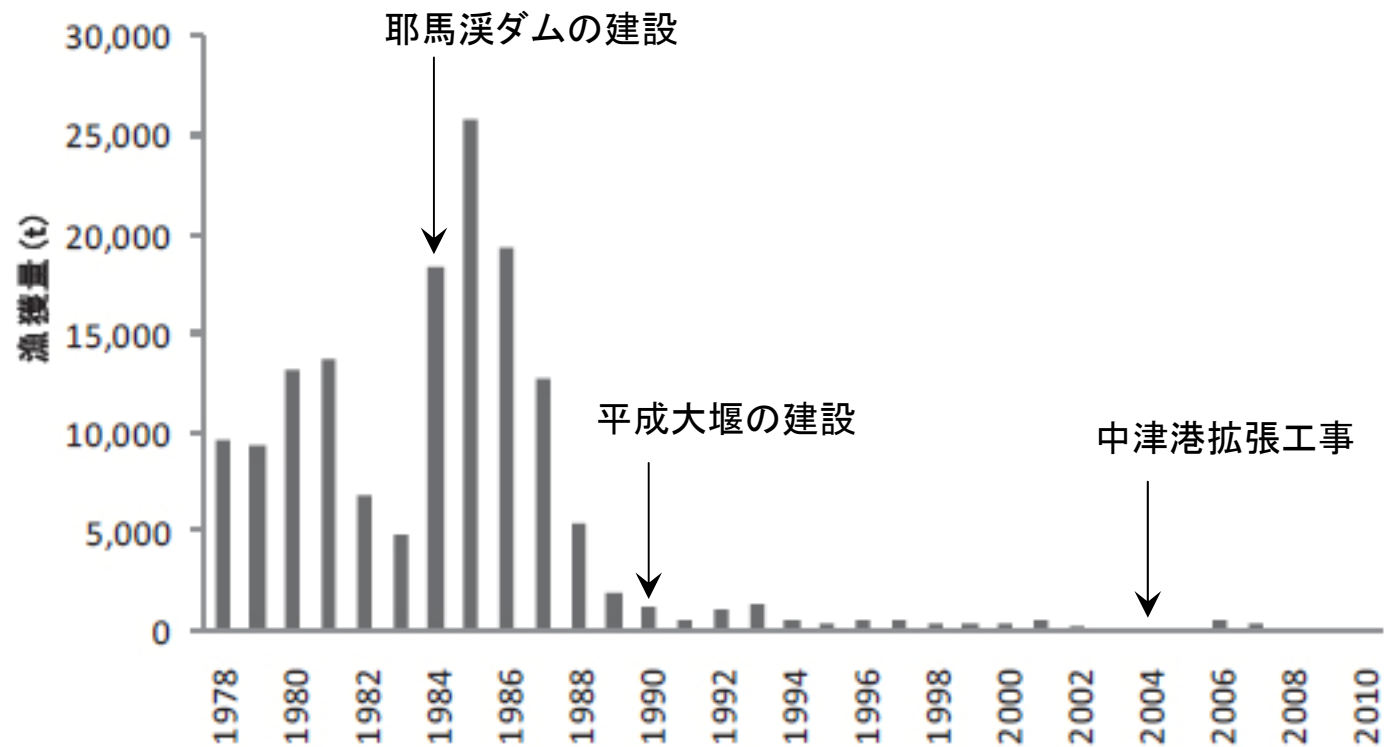


図1-1 中津市のアサリ漁獲量の推移

(1978～2009；大分県農林水産統計年報、2010；浅海チームによる推定)





研究目的

1. **地元民の懸念**
 - ◇中津港の拡張工事
 - ◇平成大堰の建設
 - ◇耶馬溪ダム
2. **既往の調査での不明点**
 - ◇長期的な地形変化
 - ◇土砂動態
 - ◇侵食堆積機構・泥質化

地形変化が目に見えないため
拡張や**侵食堆積**が分かりにくい

中津干潟と山国川の
土砂動態を明らかにする



図-3 平成大堰(山国川河川事務所HPより)



図-4 耶馬溪ダム

研究内容

1. 干潟の現地観測

- ◇ ADCPとRTK-GPSを用いた観測
- ◇ 干潟の年間の土砂侵食・堆積量を算定

2. 干潟の土砂動態についての検討

- ◇ 2016年出水期における土砂供給量算定
- ◇ 2015-16年における年間の土砂収支算定

3. 広域土砂動態モデルを用いた数値計算

- ◇ WDMPOMを周防灘に適用し流れ場を再現
- ◇ 干潟からの土砂の流出方向を予測

4. 長期観測データによる分析

- ◇ 山国川が中津干潟に与える影響の調査

5. 干潟の土砂侵食堆積機構の解明

- ◇ 干潟の土砂侵食・堆積量の重回帰分析
降水量・有義波高に着目



図-5 観測の様子



図-6 干潟の土砂収支検討図

1. 干潟の現地観測

観測概要

- ◇冠水時にADCPとRTK-GPSをボートで曳き、水深と座標を同時に観測
- ◇水位計で基準点の水位を観測
- ◇事前にRTK-GPSで基準点の標高を観測



図-7 観測機材 (ADCPとRTK-GPS)

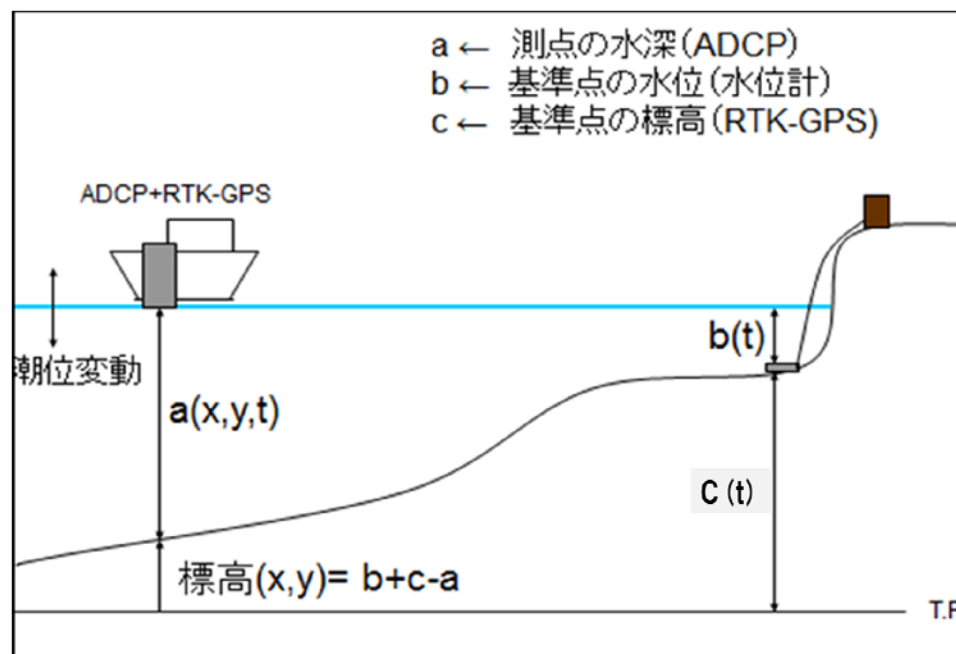


図-8 海底面標高

基準点の標高 + 基準点の水位 - 測点の水深 = 海底面標高

1. 干潟の現地観測

観測概要

小型ボート観測・・・汀線から1km範囲の浅海部を，岸沖方向に500m間隔で14測線

漁船での観測・・・沖合1km～3kmを，沿岸方向に500m間隔で4測線



図-9 観測線(2014年5月30, 31日)

観測日
2014年5月30,31日
2014年9月10,11日
2015年5月16,17,18日
2015年9月27,28日
2016年6月4,5日
2016年9月18,19日

1. 干潟の現地観測

観測結果

観測線上の標高を元に補間を行い、
観測範囲の干潟全体の標高を求めた。



図-9 観測線(2014年5月30,31日)

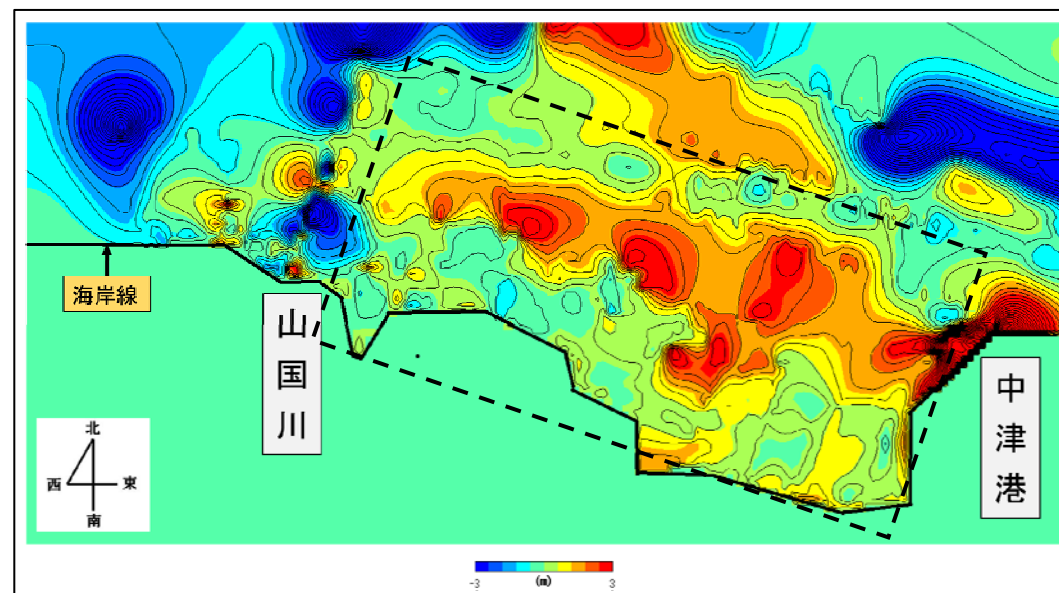


図-10 2015年5月-2016年9月標高差コンター図
(寒色:侵食、暖色:堆積)

1. 干潟の現地観測

期間	土砂堆積量	侵食or堆積
2014/5～9月 (出水期4ヶ月)	-1,870,000m ³	侵食
2014/5月～2015/5月 (1年間)	-4,822,603m ³	侵食
2015年5月～9月 (出水期4ヶ月)	196,105m ³	堆積
2014/5月～2015/9月 (観測期間合計)	-4,626,498m ³	侵食

1. 干潟の現地観測

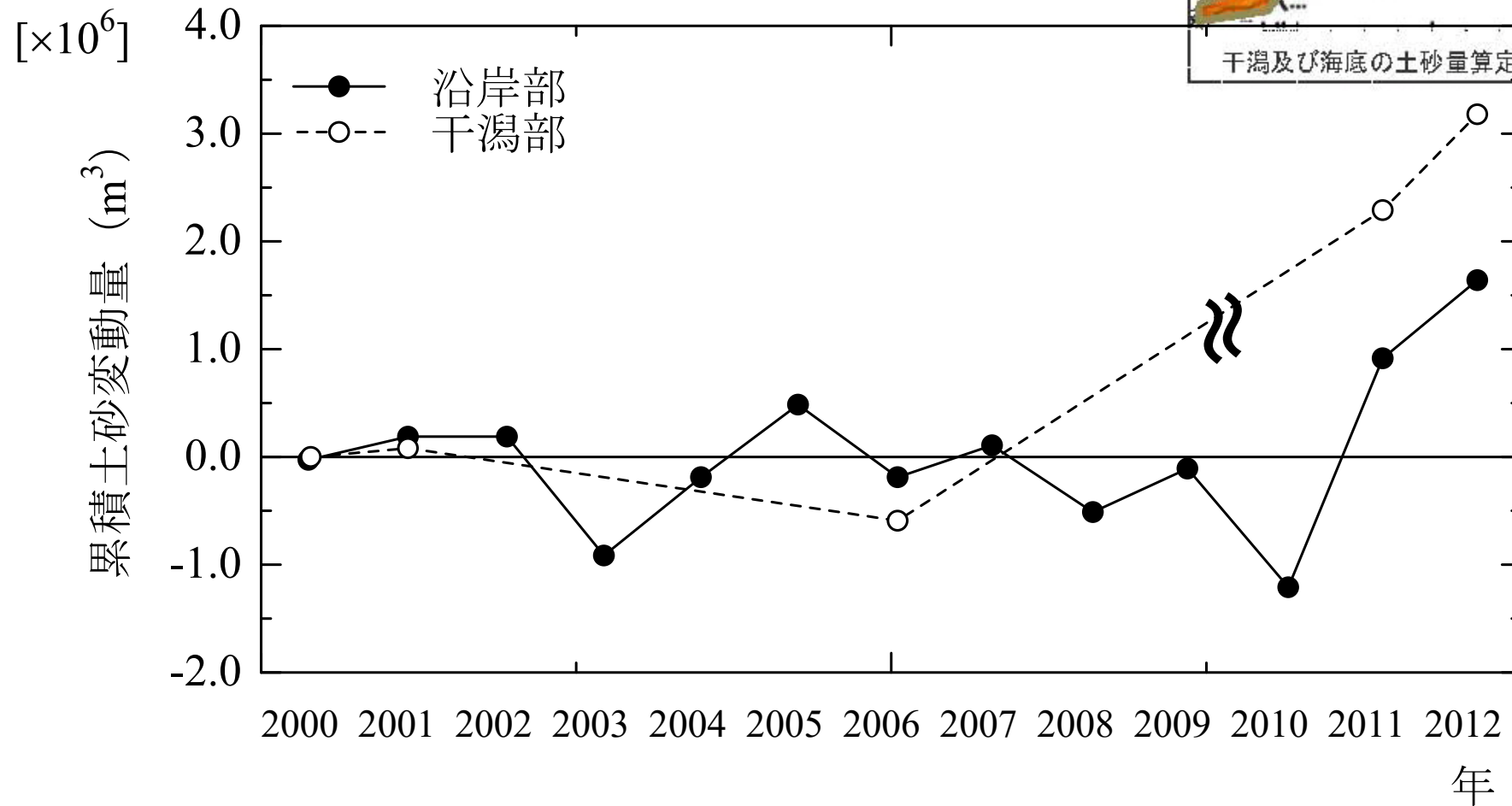
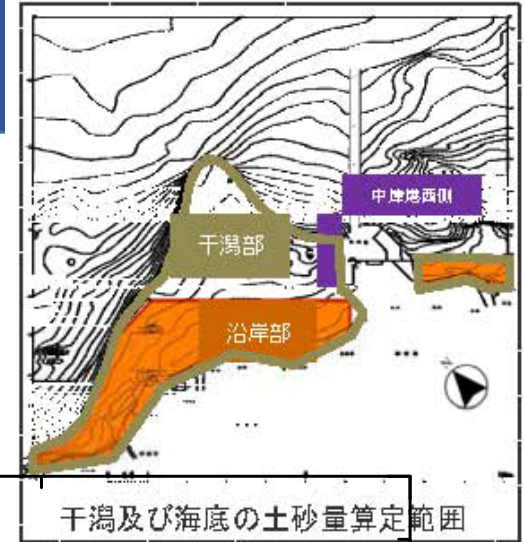
観測結果

$$\text{土砂侵食堆積量} = \text{標高差} \times \text{観測範囲の面積} \times (1 - \text{空隙率})$$

表-1 土砂侵食堆積量

期間	土砂侵食堆積量	侵食・堆積
2015年5月-9月 (出水期4ヶ月)	202,156m ³	堆積
2015年9月-2016年9月 (年間)	-99,036m ³	侵食
2015年5月-2016年9月 (合計)	103,118m ³	堆積

国交省の深浅測量データ



長期データによる土砂侵食堆積量の算定

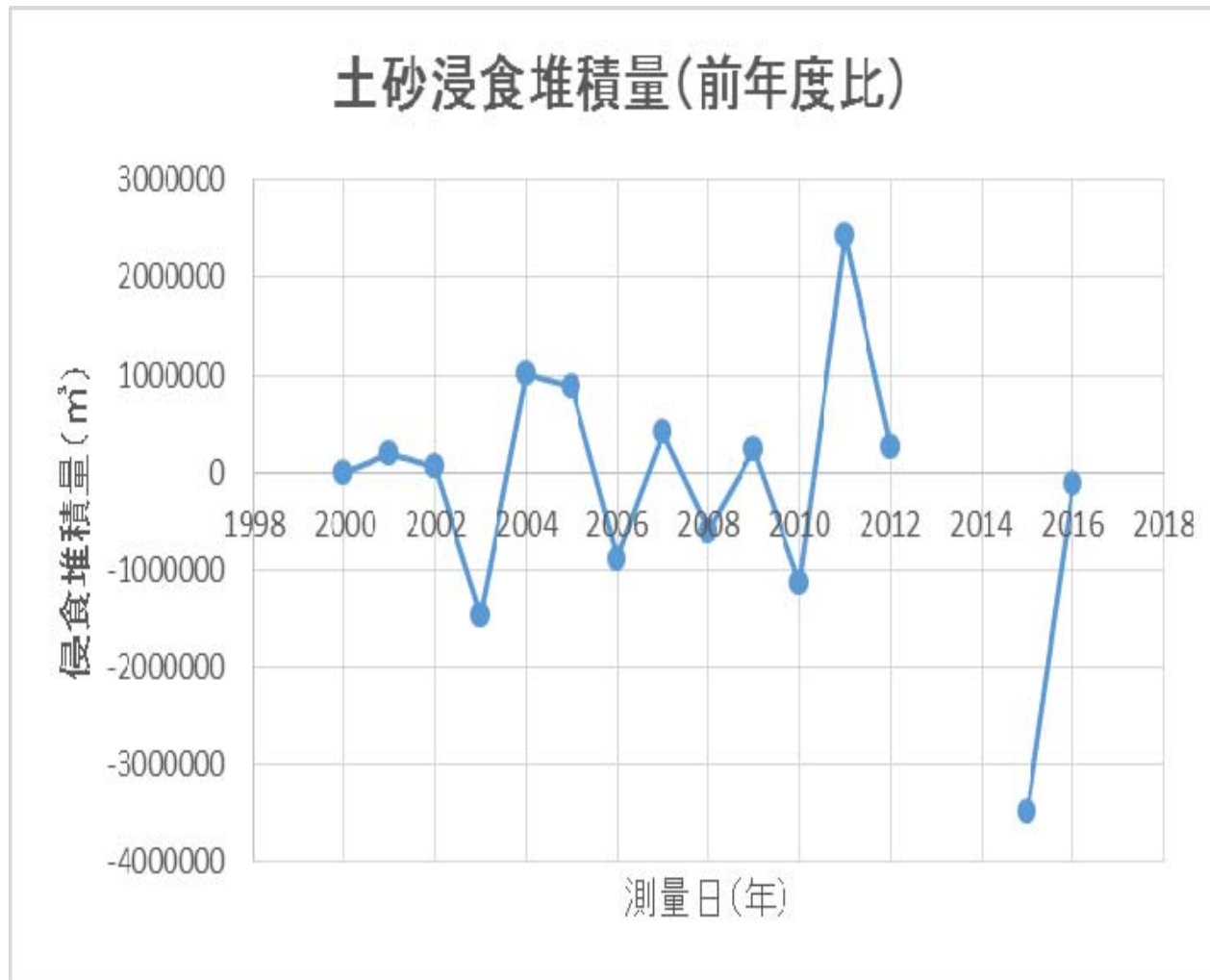


図4. 2000年からの前年度比グラフ

2. 河川からの土砂供給についての検討

山国川からの土砂供給量算定

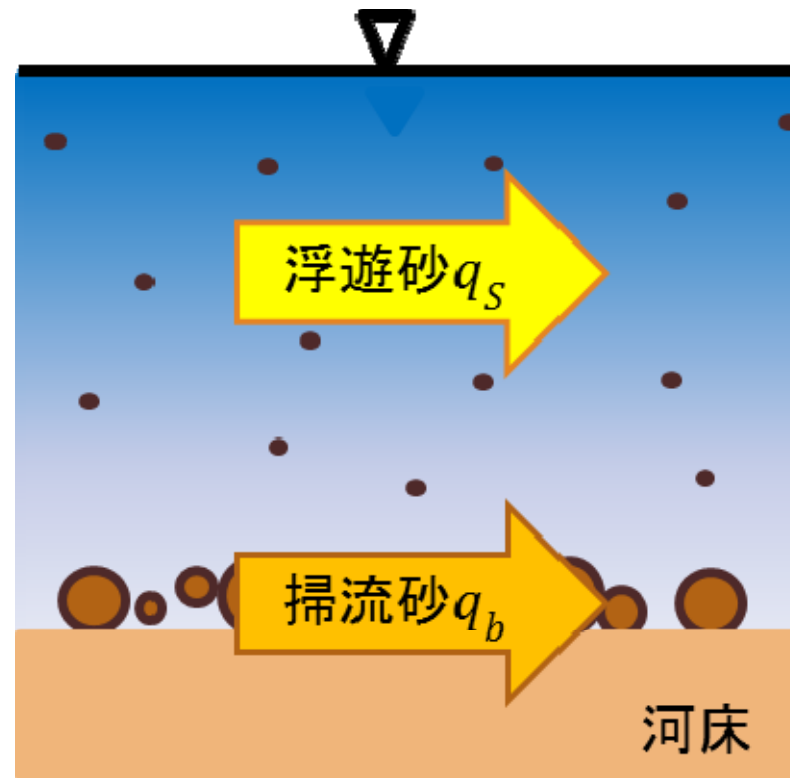


図-11 河川を流れる土砂イメージ

$$\text{土砂供給量 } q_t = \text{浮遊砂量 } q_s + \text{掃流砂量 } q_b$$

2. 河川からの土砂供給についての検討

土砂供給量算定①浮遊砂量 q_s

$$\text{浮遊砂量 } q_s = \bar{C} \times Q (\text{m}^3/\text{s}) \quad (1)$$

C-Qグラフから求めた
 $C = aQ^2 (\text{g}/\text{m}^3)$ (2)

(1)式の \bar{C} は無次元なので(2)式の C を
泥の土粒子密度 $\sigma (\text{g}/\text{m}^3)$ で割り、
無次元に置き換えて式(1)に代入

$$q_s = \frac{aQ^2}{\sigma} \times Q (\text{m}^3/\text{s}) \quad (3)$$

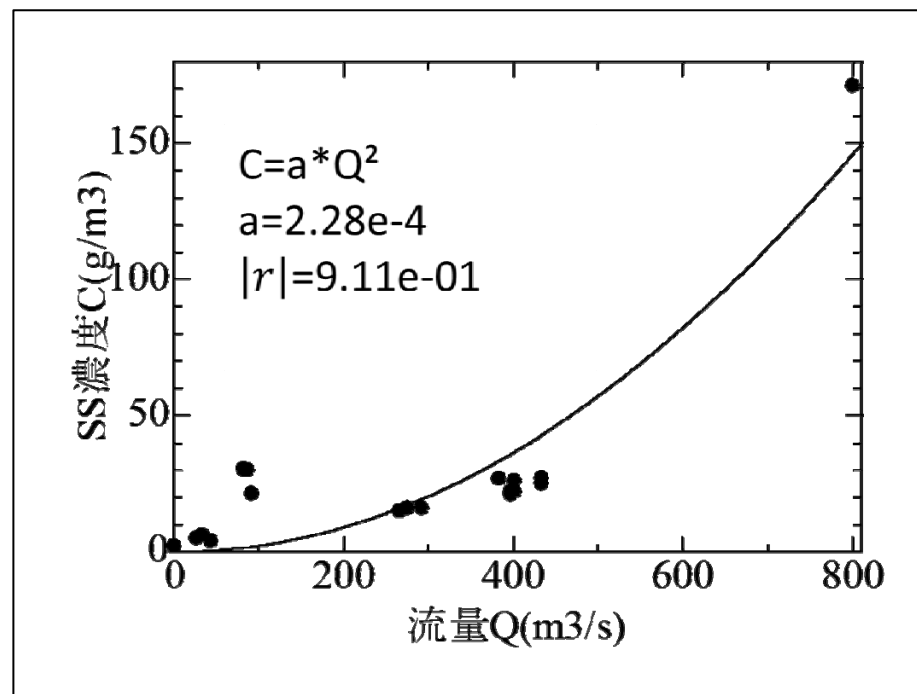


図-12 C-Qグラフ(2016ver)

式(3)に時々刻々の流量を積分することで浮遊砂量算出

2. 河川からの土砂供給についての検討

土砂供給量算定②掃流砂量 q_b

芦田・道上式

$$\text{掃流砂量 } q_{b*} = 17\tau_*^{3/2} \left(1 - \frac{\tau_{*c}}{\tau_*}\right) \left(1 - \sqrt{\frac{\tau_{*c}}{\tau_*}}\right) \quad (1)$$

掃流力 τ_*

$$\tau_* = \frac{u_*^2}{(\sigma/\rho - 1)gd} \dots \textcircled{1} \quad \rho u_*^2 = \frac{1}{2} \rho f u_b^2$$
$$u_* = \sqrt{gRI} \dots \textcircled{2}$$

(1)式の q_{b*} は無次元量なので次の式(2)を用いて次元をもつ q_b (m^3/s)に変換した。

$$q_b = q_{b*} \times \sqrt{\left(\frac{\sigma}{\rho} - 1\right)gd^3} (m^3/s) \quad (2)$$

式(2)に時々刻々の流量を積分することで掃流砂量算出

τ_{*c} : 限界掃流力=0.047
 u_* : 摩擦速度
 ρ : 水の密度
 R : 径深
 n : 粗度係数=0.033
 σ : 砂の土粒子密度=2.65(g/cm^3)
 d : 砂の径深=0.3(mm)
 l : 河床勾配=1/2500
 g : 重力加速度=9.81 (m/s^2)

2. 河川からの土砂供給についての検討

土砂供給量算定

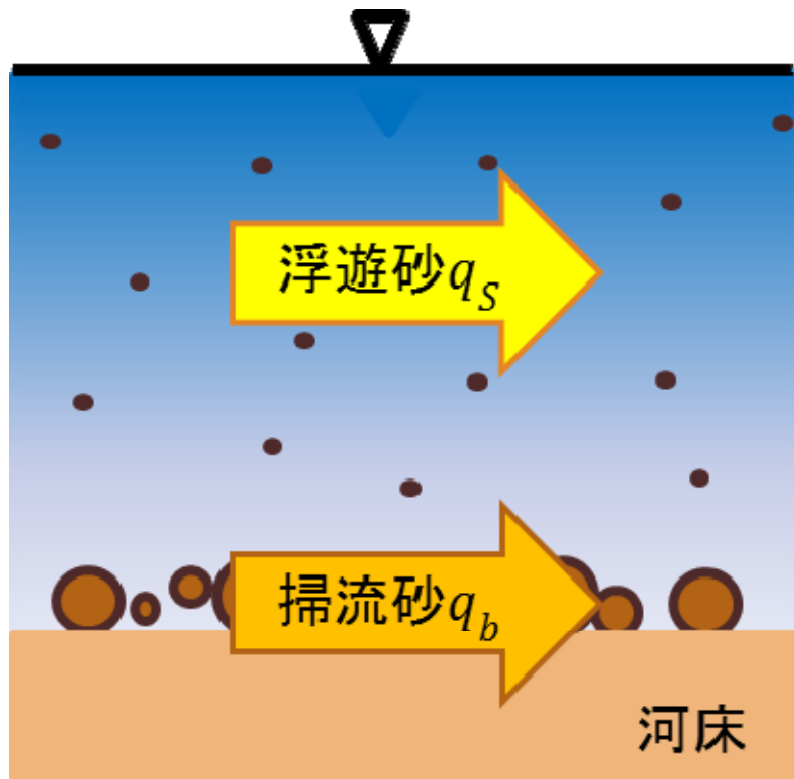


図-11 河川を流れる土砂イメージ

$$\text{浮遊砂量 } q_s = 1.32 \times 10^4 (m^3)$$

$$\text{掃流砂量 } q_b = 8.39 \times 10^4 (m^3)$$

$$\underline{\text{2016年出水期の土砂供給量 } q_t = 9.71 \times 10^4 (m^3)}$$

2. 河川からの土砂供給についての検討

過去20年分の土砂供給量算定①

表-4 土砂供給量算定(H27小野卒論)

西暦	降水量 (mm)	下唐原(m³)			金谷(m³)		
		浮遊砂量	掃流砂量	合計	浮遊砂量	掃流砂量	合計
1996	731	86057	12079	98136	欠測	欠測	欠測
1997	1292	158133	50067	208200	欠測	欠測	欠測
1998	449	38611	1399	40010	欠測	欠測	欠測
1999	878	107779	20722	128501	欠測	欠測	欠測
2000	443	31803	1472	33275	欠測	欠測	欠測
2001	769	66096	13190	79286	欠測	欠測	欠測
2002	497	41908	10196	52104	欠測	欠測	欠測
2003	616	80058	12951	93009	欠測	欠測	欠測
2004	1011	113888	16262	130149	欠測	欠測	欠測
2005	876	85478	49267	134745	欠測	欠測	欠測
2006	1298	139090	27400	166491	欠測	欠測	欠測
2007	799	59146	46857	106004	欠測	欠測	欠測
2008	507	3915	46857	50773	3854	52904	56757
2009	580	14721	71259	85980	16363	85316	101678
2010	573	5098	60097	65195	7376	80828	88204
2011	852	9123	108967	118090	欠測	欠測	欠測
2012	1087	129269	117035	246303	欠測	欠測	欠測
2013	737	6250	72574	78823	16874	138432	155306
2014	387	2466	36624	39090	5046	45397	50443
2015	691	2623	65032	67655	8005	108679	116684
2016	825	13181	83884	97065	欠測	欠測	欠測

水害 →

2. 河川からの土砂供給についての検討

土砂供給量と降水量

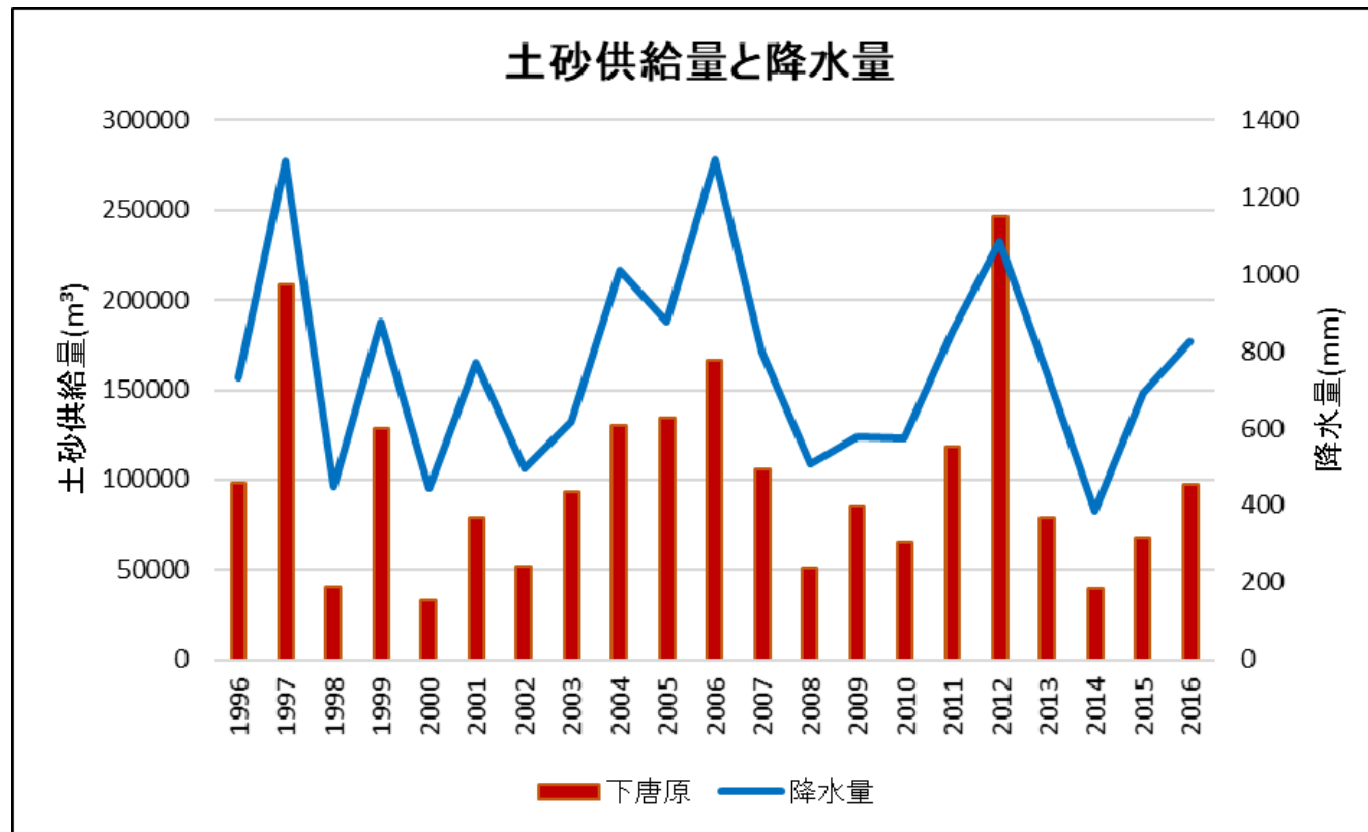


図-16 土砂供給量と降水量の関係

近年、八斗島観測所周辺では土砂堆積が加速



利根川上流河川事務所データ



正常な流量計測が困難な状況

土砂堆積問題を考える上で
土砂供給量を把握することは重要

観測地

利根川

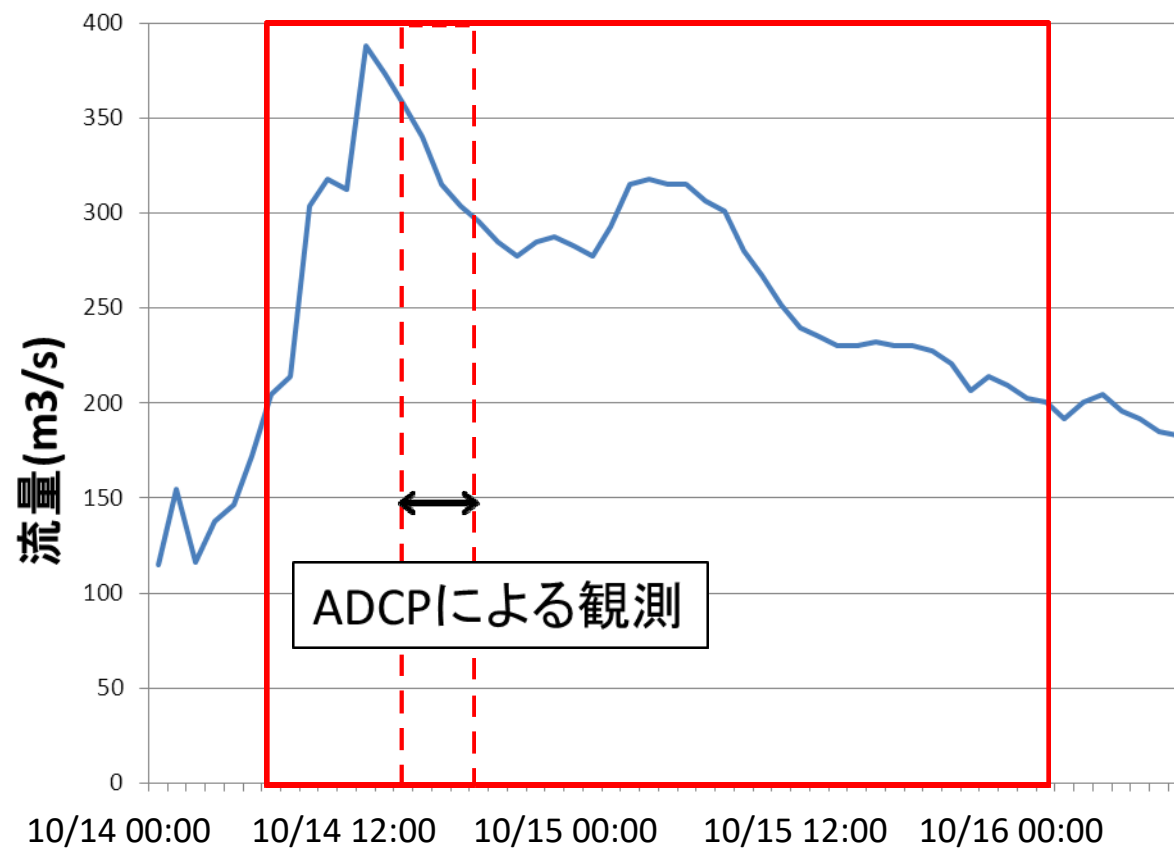
鳥川





利根川五料橋

2014/10/14~16 上福島水位観測所



ADCPによる
土砂供給量の算出

計算値の補正

観測手法

ADCPをフロートにのせてロープで
固定係留し観測

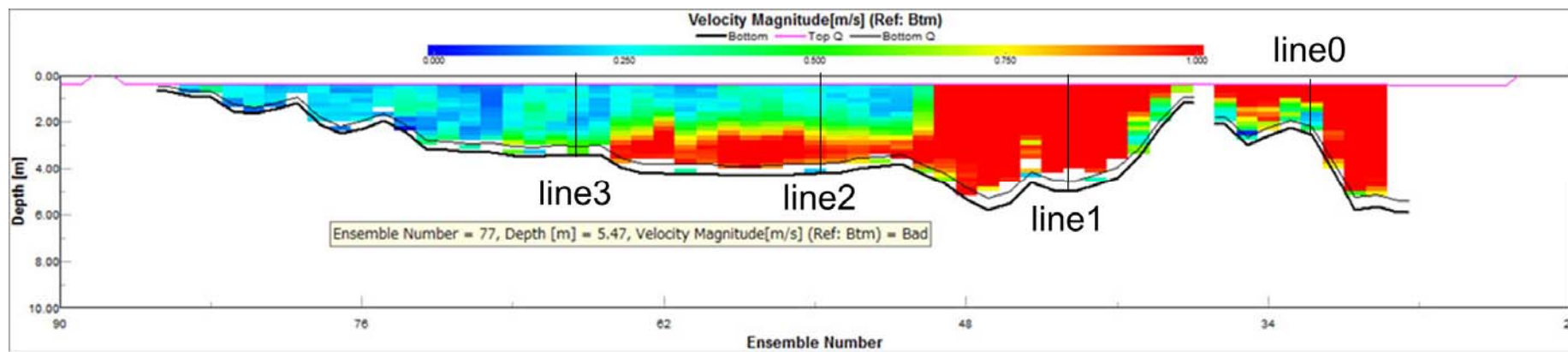
採水による観測



観測概要



観測測点



H26年6月の出水時における横断流速分布(五料橋)

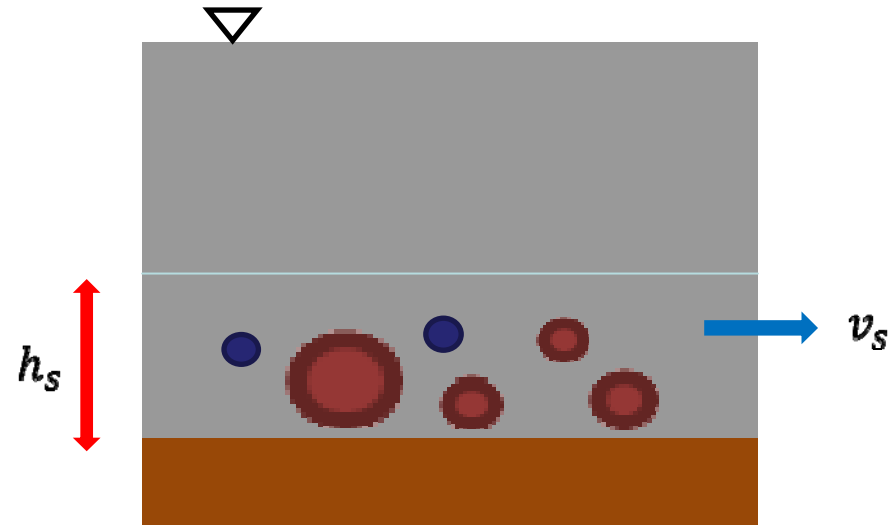
ADCPによる掃流砂量の算出

$$q_B' = v_s \cdot h_s \cdot c_s$$

v_s :土砂移動速度 ADCP

h_s :移動層厚

c_s :土砂濃度



h_s 、 c_s を江頭の式から算出

$$c_s \cdot h_s = \frac{1}{\cos\theta} \cdot \frac{1}{\tan\varphi_s - \tan\theta} \cdot \tau_* \cdot d$$

$$\tau_* = \frac{u_*^2}{(\sigma/\rho - 1)gd}$$

u_* : 摩擦速度
 σ : 砂の密度
= 2.78(g/cm³)
 ρ : 水の密度
 d : 砂の粒径

φ_s : 砂の内部摩擦角
 $\varphi_s = 27^\circ$
 θ : 河床勾配
 $\theta = 0.143^\circ$

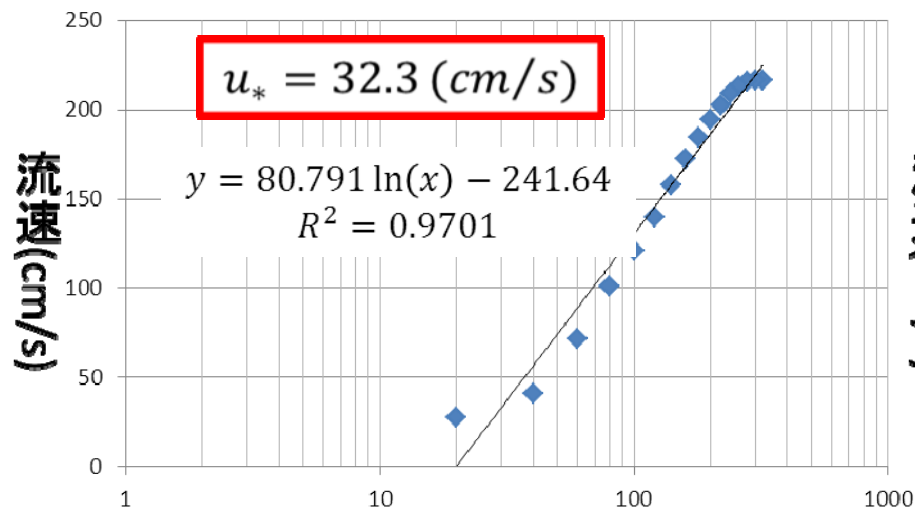
$$u = \frac{u_*}{k} \ln Z + c$$

K=0.4

u_*/k はX軸に水路床からの距離(cm)
Y軸に流速u(cm/s)をとった片対数の
グラフの傾きとなる

測点0

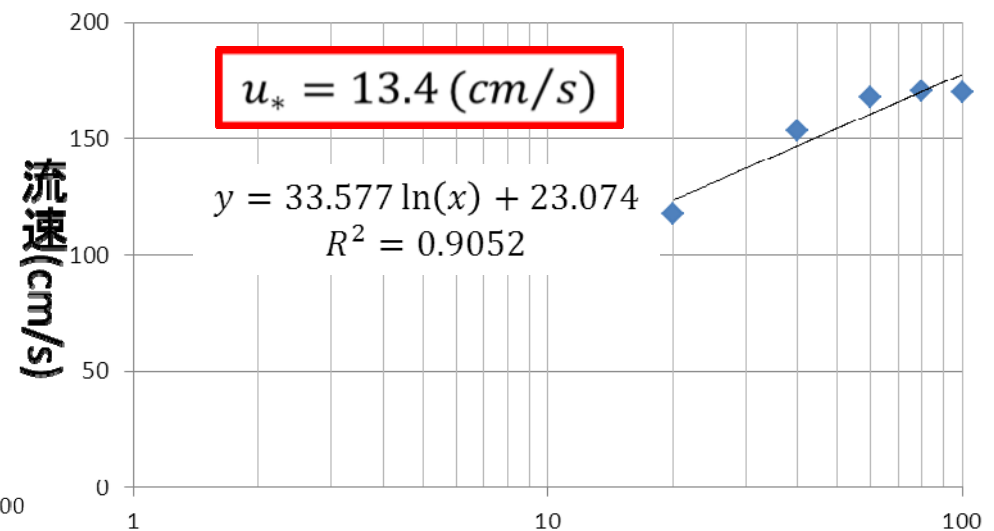
15:20~15:35



Z:水路床からの距離(cm)

測点1

12:50~13:05

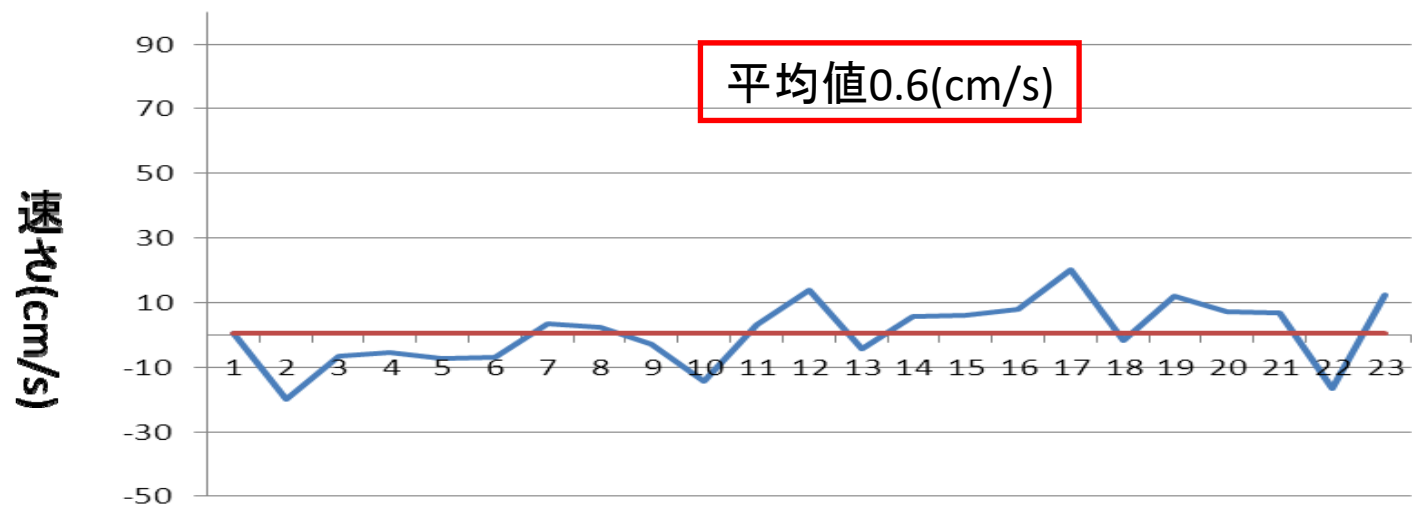


Z:水路床からの距離(cm)

河床移動速度

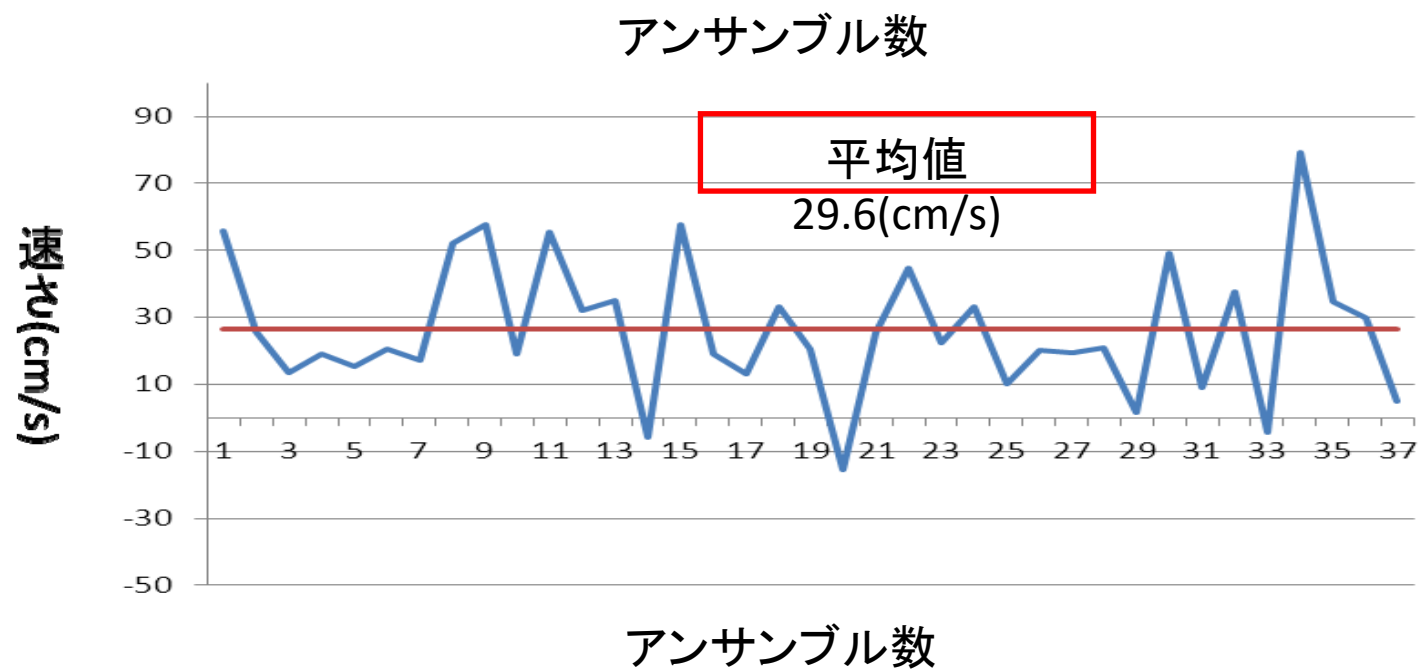
測点0

15:50~16:00



測点1

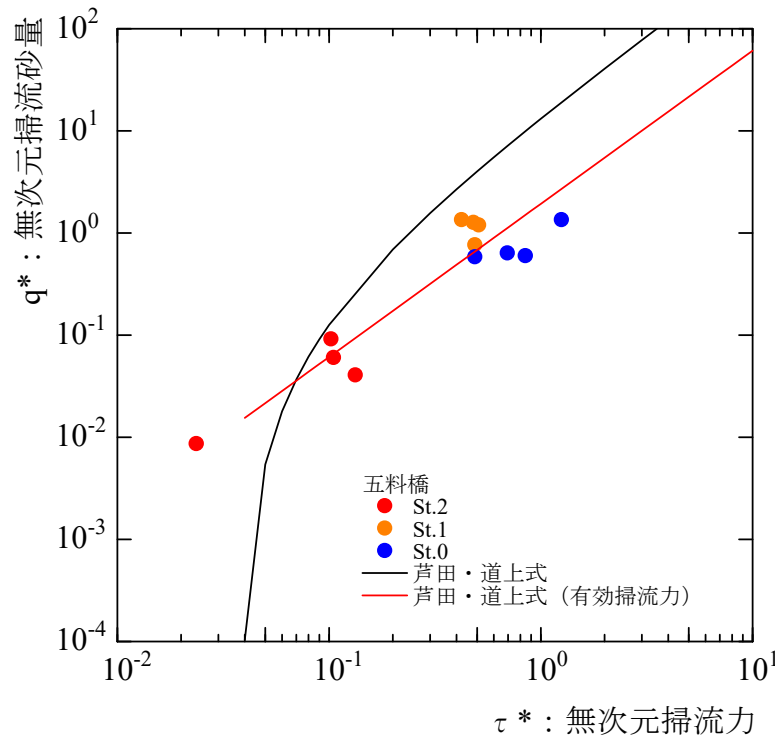
12:50~13:05



一回の出水での掃流砂量の算出

芦田・道上式から掃流砂量を算出

$$q_b = 17 \tau_{*c}^{3/2} \left(1 - \frac{\tau_{*c}}{\tau_*}\right) \left(1 - \sqrt{\frac{\tau_{*c}}{\tau_*}}\right) \tau_{*c} = 0.047 \quad u_*^2 = \frac{1}{2} f v_m^2$$



$$\frac{Q}{Bh} = \frac{1}{n} \left(\frac{Bh}{B+2h} \right)^{2/3} I^{1/2}$$

反復解法よりhを算出

3. 干潟の土砂動態についての検討

土砂収支の検討

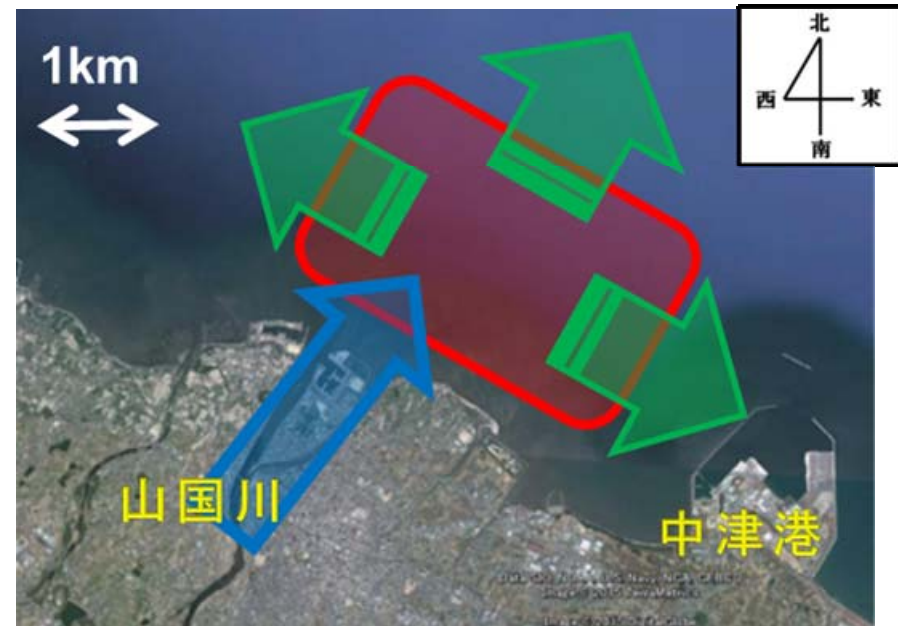


図-6 干潟の土砂収支検討図

2015年5月-2016年9月土砂収支

出水期(2015,16)
土砂供給量

1.64×10^5

—

土砂侵食堆積量

1.03×10^5

=

土砂流出量

$6.1 \times 10^4(m^3)$

3. 干潟の土砂動態についての検討

土砂収支の検討

①年間の土砂侵食堆積量についての検討

②一般的に年間を通して干潟は、
・出水期である夏期に**土砂供給**
・強風かつ高波となる冬季に**土砂流出**

③冬季の土砂流出は多いと
約400万侵食となる場合もある

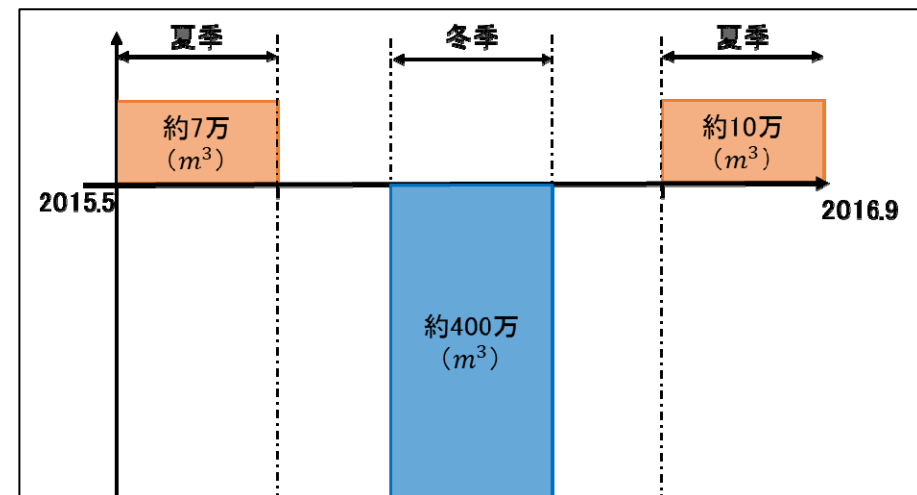


図-13 土砂収支イメージ図

年間の土砂侵食堆積量に対して出水期の土砂供給量が少ない

2012: 約450万m³堆積 ⇔ 約25万m³河川供給
(cf.年22万m³～国交省)

二瓶ら(2013): 日本全国の河川での結果

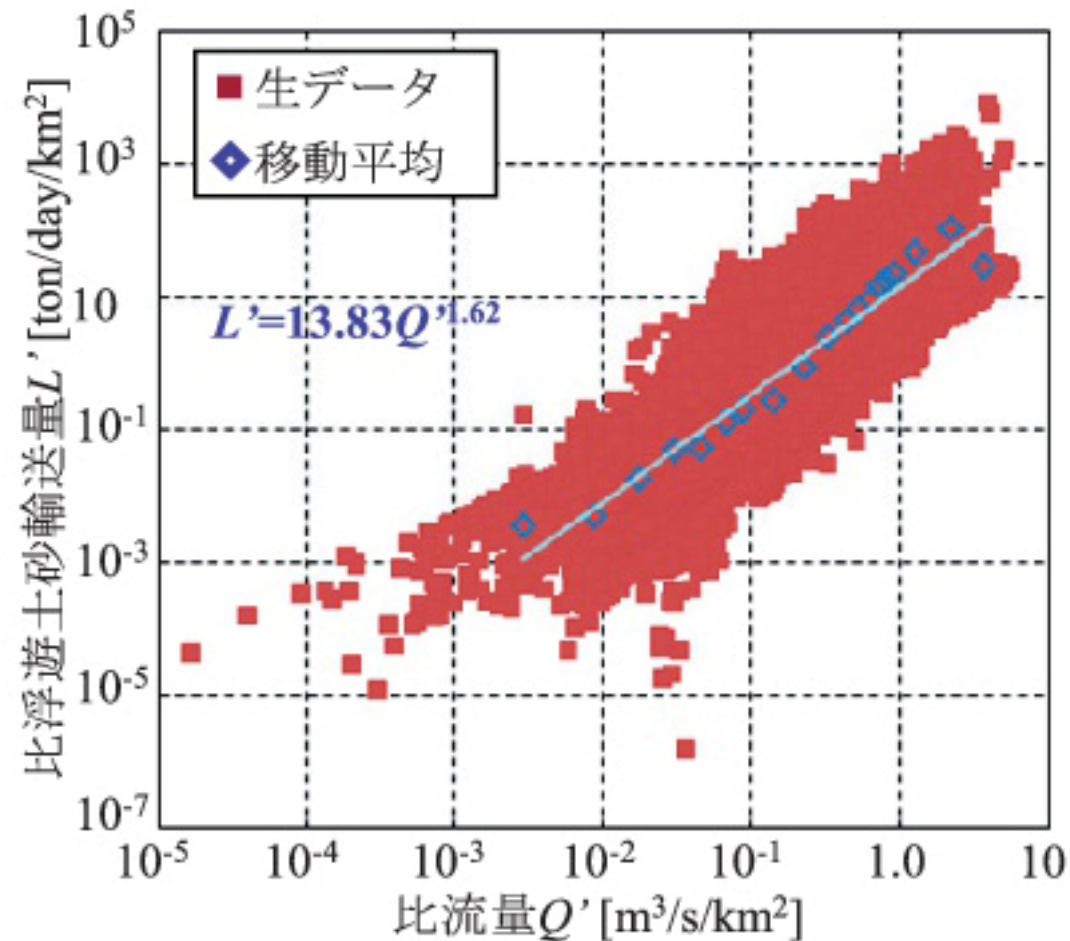
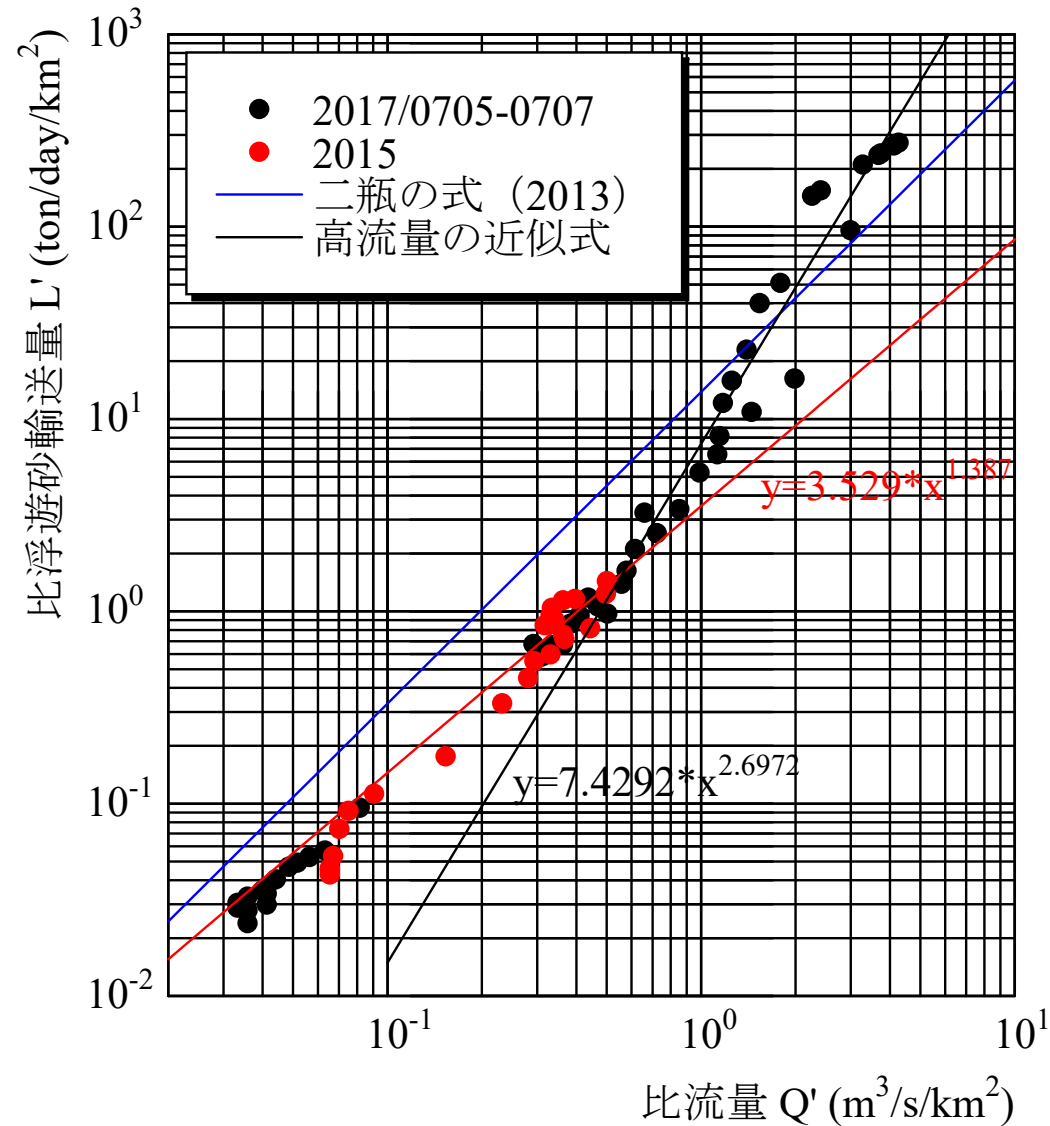
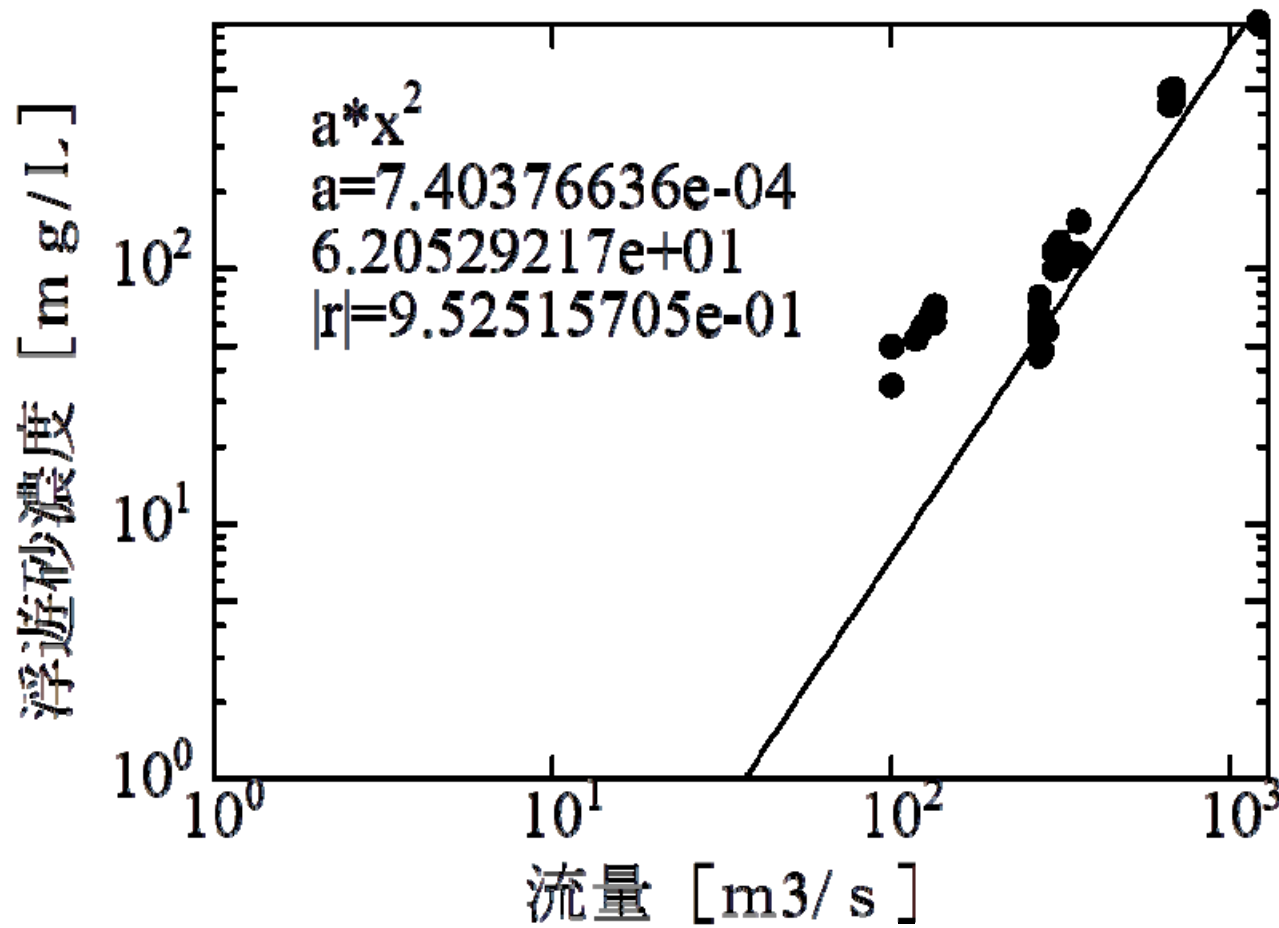


図-3 全データに対する L' と Q' の相関関係

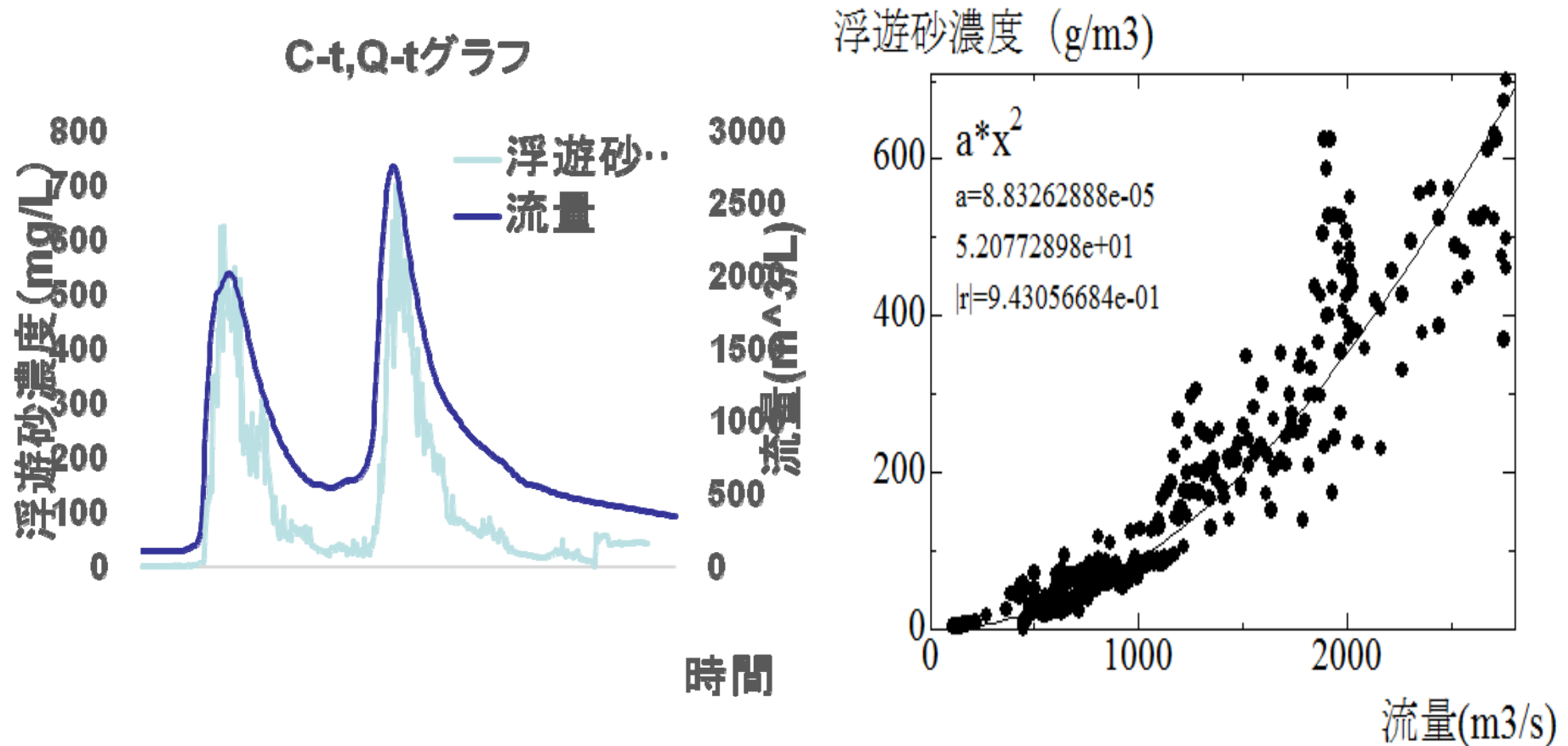
大出水時の濁度－流量グラフ(山国川)



利根川五料橋のCQグラフ



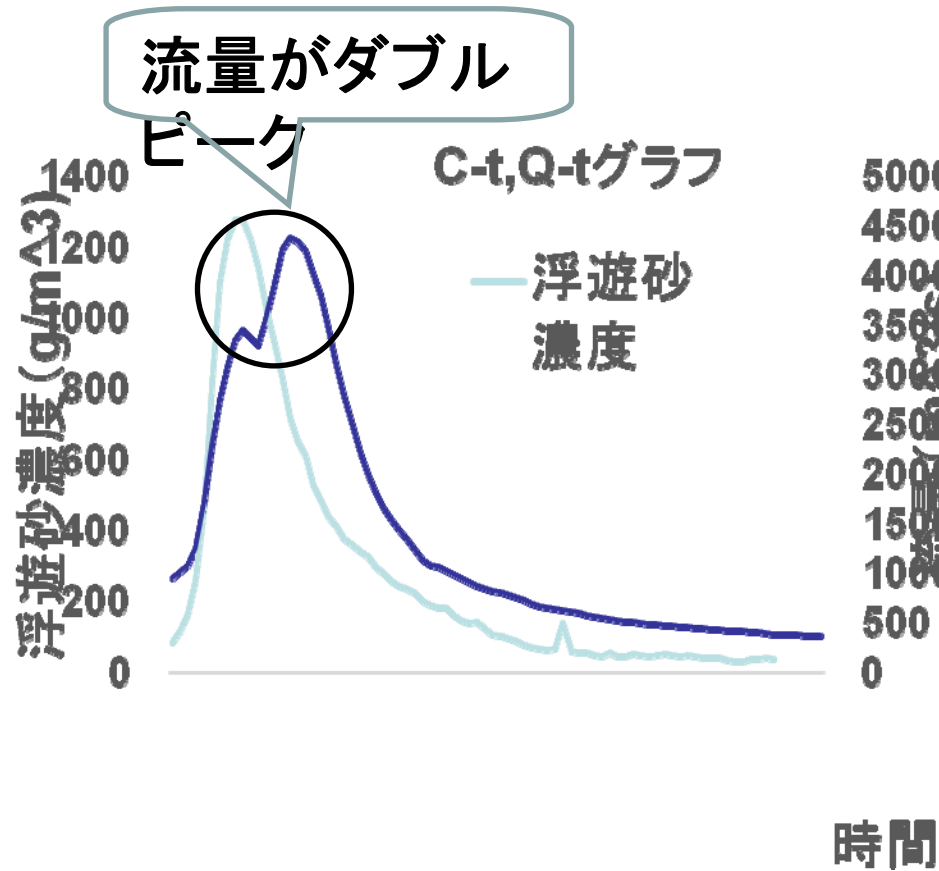
3-2. 那珂川の q_s - Q 式を導く(2013年度のデータ)



$$q_s = 8.83 * 10^{-5} * Q^2 * Q$$

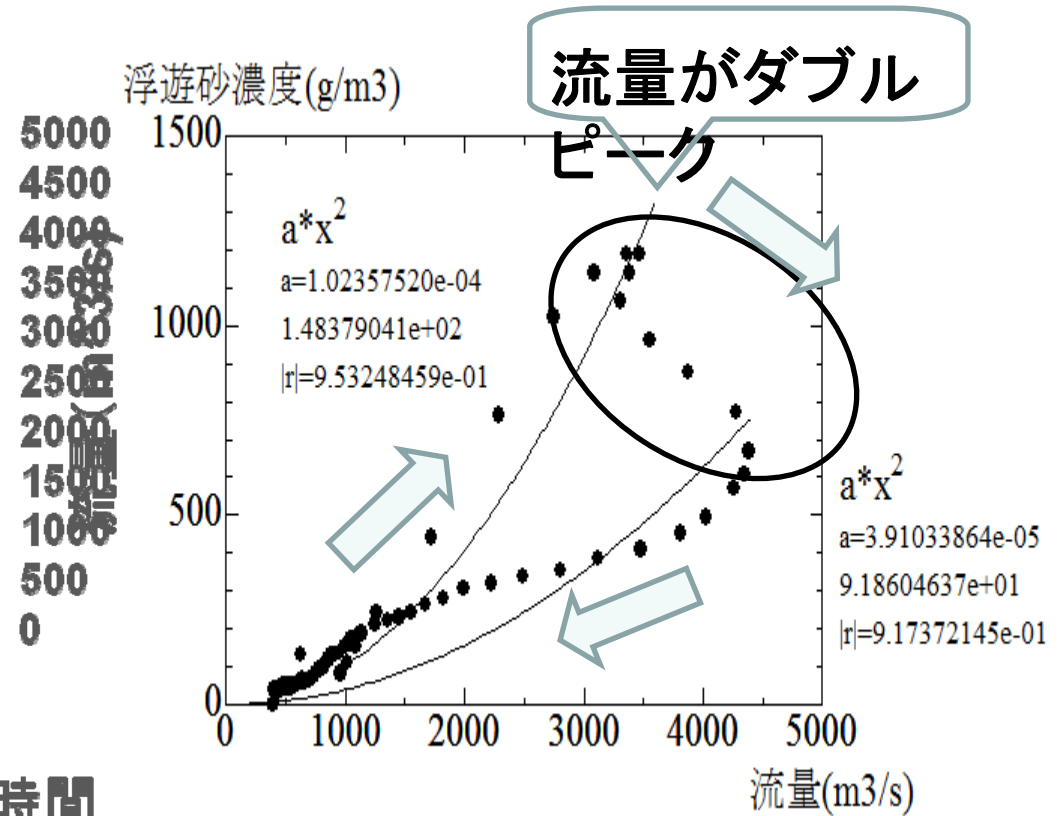
C(浮遊砂濃度)

3-3. 那珂川の q_s Q式を導く(2015年度のデータ)



$$q_s = 1.02 * 10^{-4} * Q^2 * Q$$

C(浮遊砂濃度)



$$q_s = 3.91 * 10^{-5} * Q^2 * Q$$

C(浮遊砂濃度)

4. 広域土砂動態モデルを用いた数値計算

数値計算概要①

三次元マルチレベルモデルPOM(Princeton Ocean Model)を周防灘に適用し、流れ場を再現することで、干潟からの土砂の流出方向を予測。



表-3 計算条件

メッシュ数	
nx	146
ny	131
メッシュサイズ	
dx	450 (m)
	550 (m)

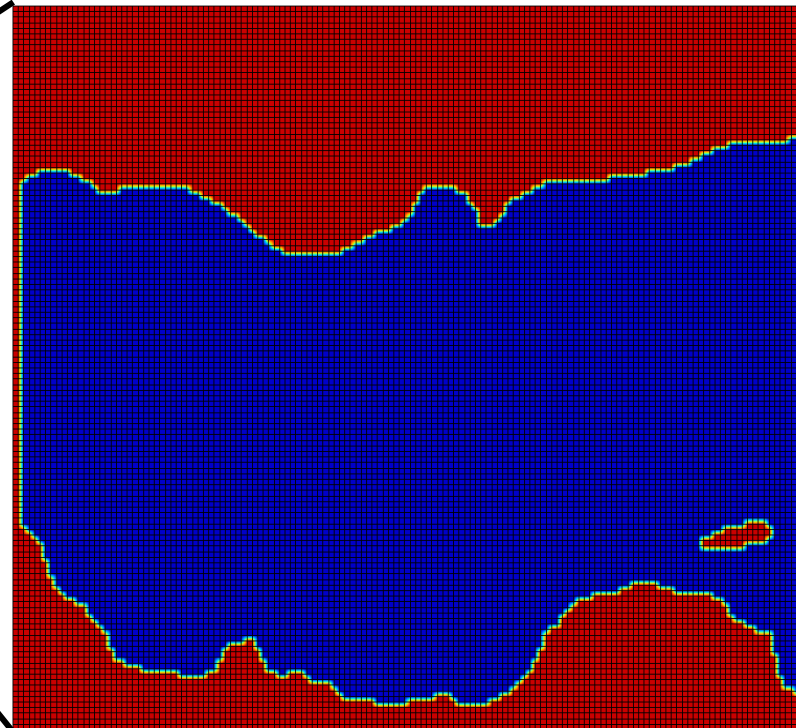


図-13 計算領域

4. 広域土砂動態モデルを用いた数値計算

数値計算概要②

input

- ◇周防灘の水深
- ◇大分と徳山の実測潮位を線形補間し、
計算領域の右端から与えた

output

- ◇周防灘における潮汐残差流

潮汐残差流・・・
潮の満ち引きの非対称性によって
生じる流れ。

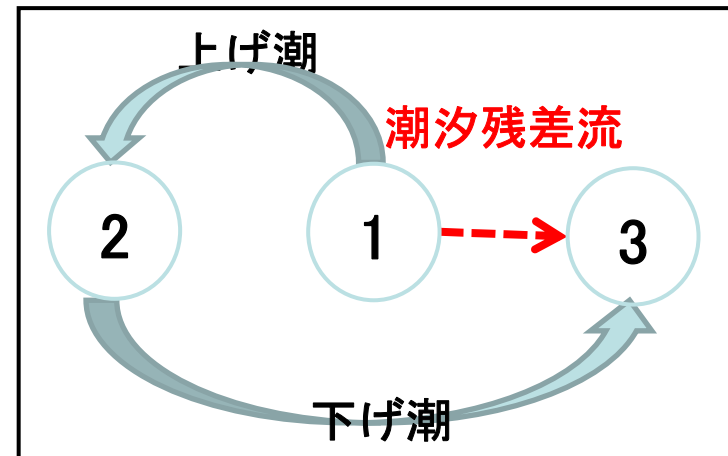


図-14 潮汐残差流イメージ図

4. 広域土砂動態モデルを用いた数値計算

WDMPOM(鵜崎ら, 2009)をもちいた数値計算結果

◇周防灘では, 海岸線に沿うように反時計回りの流れ.
→上手の苅田方面からの潮流による沿岸漂砂が存在する
可能性有

◇中津干潟において北東方向の流れ
→干潟の土砂は北東方向に流出

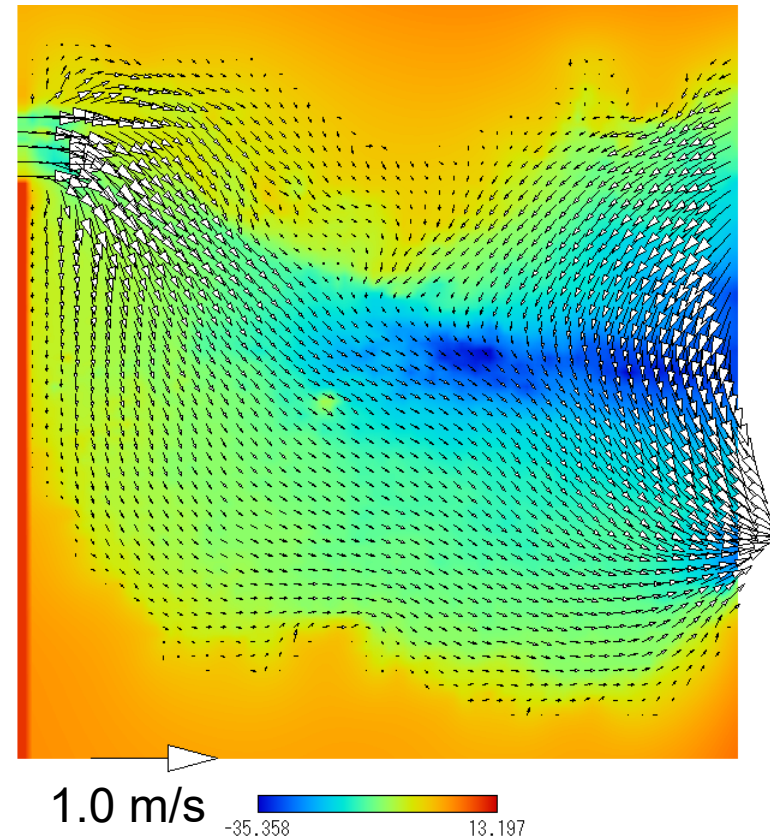


図-15 周防灘における潮汐残差流流速方向

5. 干潟の土砂侵食堆積機構の解明

干潟の土砂侵食堆積量の影響因子

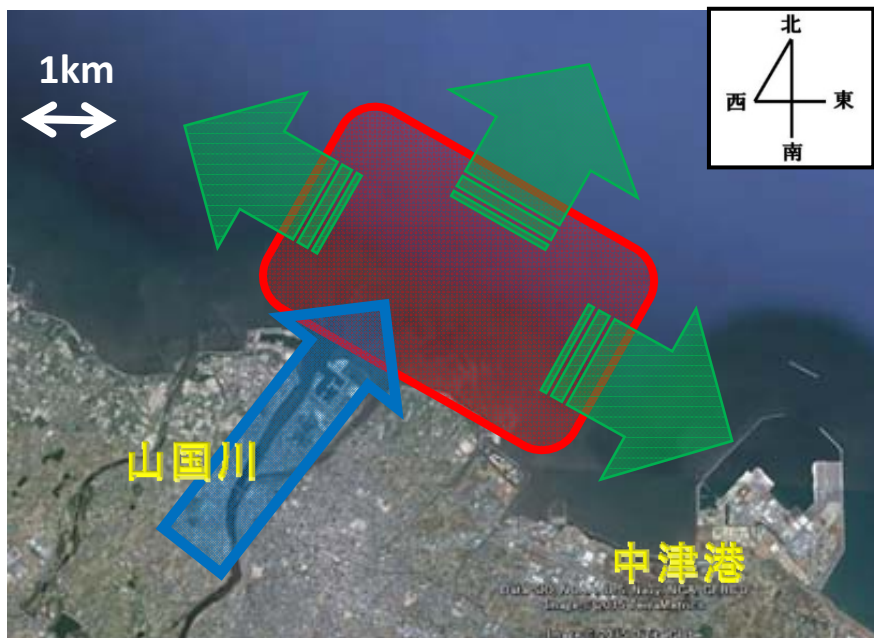


図-6 干潟の土砂収支検討図

表-5 年間の各データ

	土砂侵食・堆積量(m ³)	降水量(mm)	有義波(m)
2001	1.77E+05	485	0.506
2002	1.94E+05	359	0.533
2003	-9.35E+05	457	0.542
2004	-1.77E+05	400	0.515
2005	5.00E+05	478	0.443
2006	-1.77E+05	561	0.501
2007	8.06E+04	681	0.503
2008	-5.16E+05	432.5	0.471
2009	-9.68E+04	414.5	0.47
20010	-1.19E+06	333	0.54
2011	9.03E+05	563.5	0.419
2012	1.63E+06	947	0.552
2014	-4.82E+06	344	0.5214

土砂収支

河川(山国川)の
土砂供給量

降水量

干潟の
土砂流出量

波

干潟の
土砂侵食・堆積量

国土交通省観測・2001~2012年土砂侵食・堆積量データ
 気象庁耶馬溪観測所・降水量データ
 NOWPHAS苅田観測所・有義波データ

5. 干潟の土砂侵食堆積機構の解明

土砂侵食堆積量と2成分の各相関

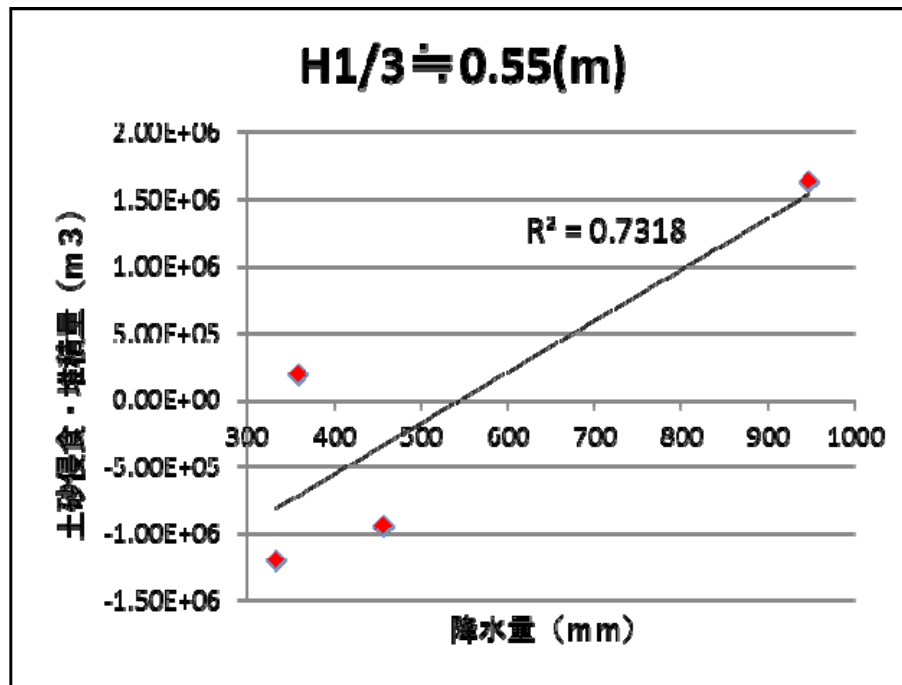


図-18 土砂侵食堆積量と降水量(input)

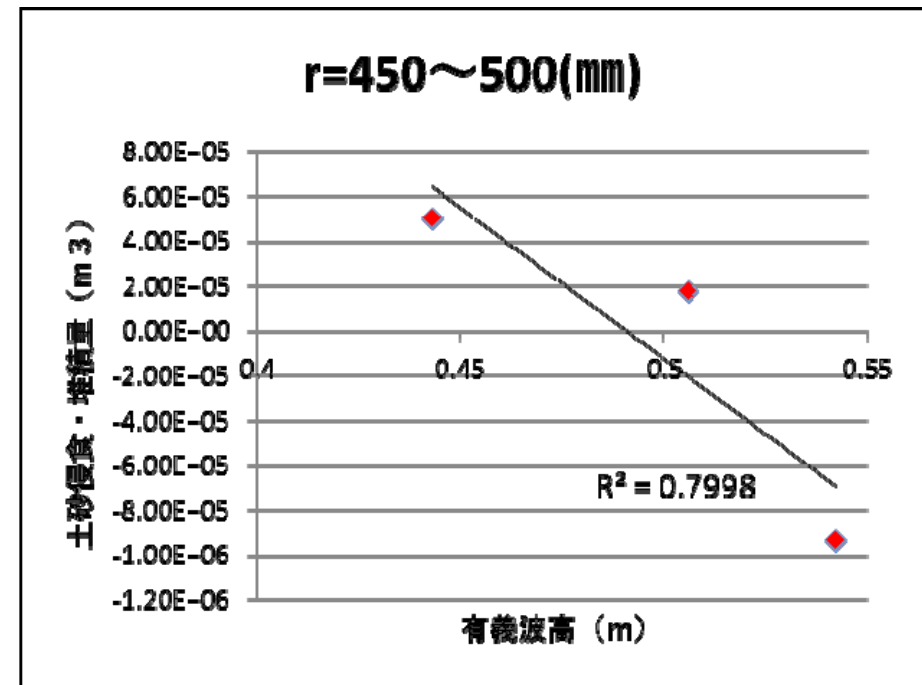


図-19 土砂侵食堆積量と有義波高(output)

5. 干潟の土砂侵食堆積機構の解明

土砂侵食堆積量と降水量・有義波高の相関

重回帰分析

1つの目的変数を、複数の説明変数から予測したいときに用いる統計手法。

重回帰式

$$\Delta h = a_1 r + a_2 H_{\frac{1}{3}} + a_0$$

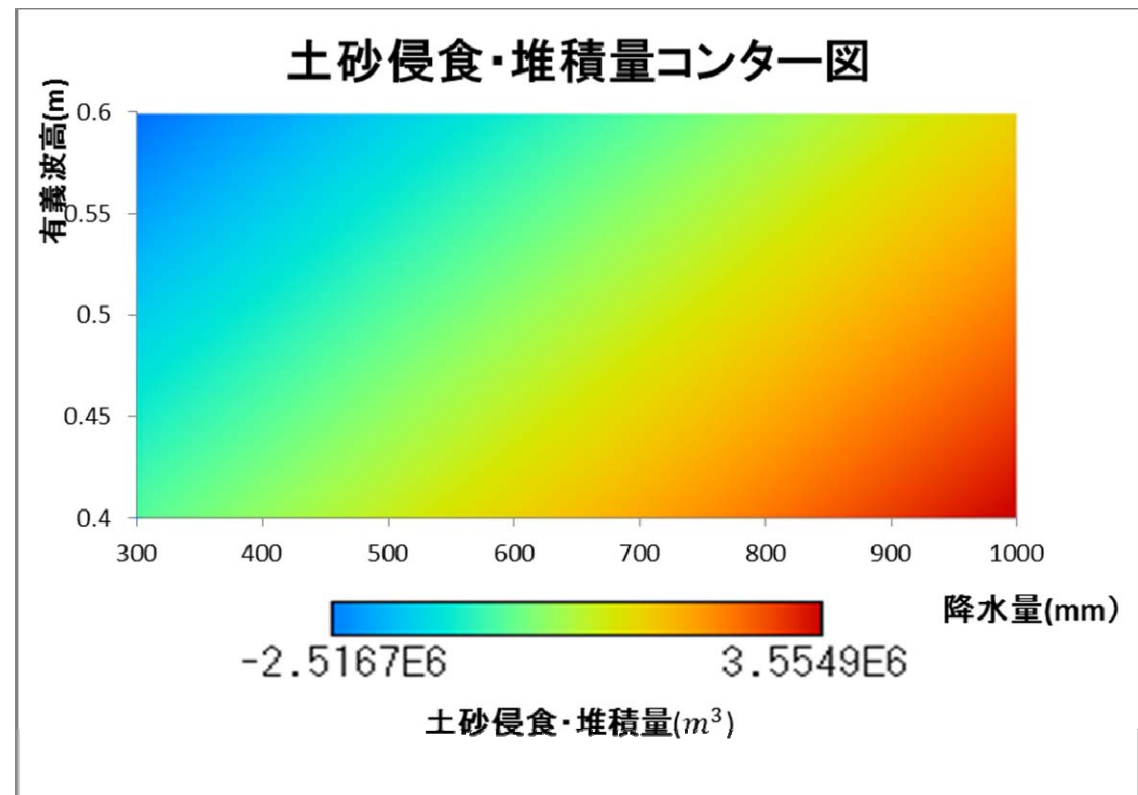


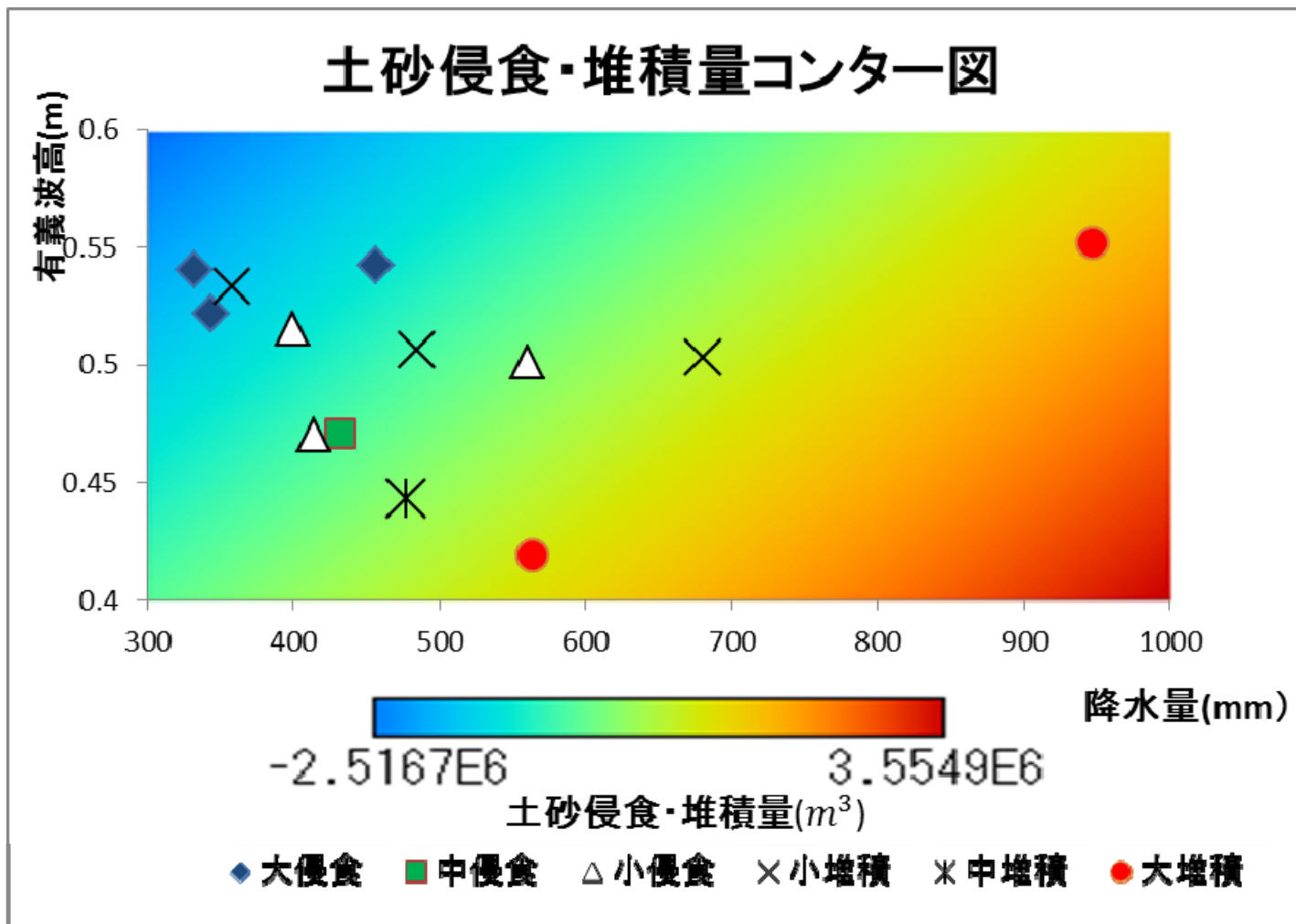
図-20 土砂侵食堆積量コンター図

目的変数: 土砂侵食・堆積量 Δh
説明変数: 降水量 r ・有義波高 $H_{1/3}$

$$\Delta h = 5.51 \times 10^3 r - 1.11 \times 10^7 H_{\frac{1}{3}} + 2.46 \times 10^6$$

5. 干潟の土砂侵食堆積機構の解明

土砂侵食堆積量コンター図



2001	小堆積
2002	小堆積
2003	大侵食
2004	小侵食
2005	中堆積
2006	小侵食
2007	小堆積
2008	中侵食
2009	小侵食
2010	大侵食
2011	大堆積
2012	大堆積
2014	大侵食

図-21 土砂侵食堆積量コンター図(データ反映)

6. 本研究のまとめ

1. 河川と干潟の土砂動態を明らかにする手法を確立.
2. 中津干潟は長期的に見て明瞭な侵食/堆積傾向はない.
3. 山国川と中津干潟の土砂収支の不一致 → 沿岸土砂輸送の影響・大？
4. 若干の泥質化傾向
5. 2017年の水害による泥の堆積 ～粒度分布解析
→ 山国川の土砂供給量算定の見直し.
6. 2乗則の修正
7. 侵食・堆積量予測式の提案
8. 広域土砂動態・地形変化モデルの構築
→ 将来地形変化予測, 対策工の立案・評価