

転倒マス型セディメントトラップ に基づく土砂沈降量の連続計測

CONTINUOUS MONITORING OF DEPOSITION RATE OF SEDIMENTS WITH A TIPPING-BUCKET TYPE OF SEDIMENT TRAP

今清水雄一¹・二瓶泰雄²

Yuichi IMASHIMIZU and Yasuo NIHEI

¹学生員 学(工) 東京理科大学大学院 理工学研究科土木工学専攻修士課程
(〒278-8510 千葉県野田市山崎2641)

²正会員 博(工) 東京理科大学助教授 理工学部土木工学科(同上)

To realize long-term, continuous monitoring of deposition rate of sediments in rivers and coasts, we attempt to present a tipping-bucket type of sediment trap (TST), which was originally developed for measuring bed-load discharge in rivers at low cost. To check the fundamental performance of the TST, we conduct simple laboratory experiments for deposition of sediments. As field tests, we apply the TST to continuous monitoring for the deposition rate of sediments in three rivers. The observed results indicate that the TST can realize the continuous measurements of deposition in rivers. It should be also noted that the temporal variations of deposition rate of sediments during flood events may be observed clearly by using the TST.

Key Words : *tipping bucket, sediment trap, deposition flux, sediment transport, wash load*

1. はじめに

河川の源流から沿岸域にわたる水系一貫土砂管理¹⁾を実施する上では、水系全体の土砂動態を把握する必要がある。そのために必要な調査項目として、水平方向の土砂輸送量(掃流砂量、浮遊砂量、ウォッシュロード)や鉛直方向の土砂輸送量(底質巻上げ・土砂沈降フラックス)に加えて、それらの結果として生じる地形変化が挙げられる。これらのうち、浮遊砂やウォッシュロードに関しては、光学式や超音波式の機器による観測技術が実用化している^{2)・3)}。その他の項目に関しては様々な取り組みがあるものの^{4)~6)}、汎用性の高い計測手法は確立されておらず、今後の計測技術の発展が望まれる。

このうち土砂沈降量計測に関しては、一般に円筒状の容器を水中または底面に設置し、水中から沈降している懸濁粒子を捕集する、というセディメントトラップが海洋観測を中心に用いられる⁷⁾。この機器では土砂沈降量の総量は計測されるが、土砂沈降フラックスの時間変化は得られない。また複数の捕集用容器が取り付けられたターンテーブルを任意の時間毎に回転し、時系列的に土砂沈降フラックスを計測し得る時間分画式セディメントトラップも存在するが⁷⁾、この測器の時間分解能は容器数に制約され、その数が増えるほど機器が大掛かりとなる。これらのセディメントトラップは、沈降粒子の総量や化学成分を調べるのには適しているが、土砂沈降量の

時間変化を高分解能で長期間計測するには限界がある。

それに対して著者らは、安価で小型な掃流砂計開発を目的として、雨量計で用いられる転倒マスを利用した河床内トラップ型簡易掃流砂計を試作し、洪水中の掃流砂観測を実施した(二瓶・塗師⁸⁾)、以下前報と呼ぶ)。この転倒マス型測器(従来測器)は、沈降した土砂をマスに貯めて、所定量を超えるとマスが転倒し、転倒時刻を記録する、という単純な仕組みになっている。このことから、この転倒マス型測器は掃流砂計としてのみならず、土砂沈降フラックスの時系列変化を計測可能なセディメントトラップとしても極めて有望な機器である。しかしながら、従来測器は様々な問題点を抱えており、そのままセディメントトラップとして用いることは難しい。

そこで本研究では、転倒マス型セディメントトラップ(Tipping-bucket type of Sediment Trap, TST)を実用化することを目的として、従来測器が有する様々な問題点を改良した転倒マス型測器(以下、本測器と呼ぶ)を試作するとともに、静水及び流水中の土砂沈降実験を行い、本測器の基本性能を検証する。また、様々なタイプの河川において本測器を用いた現地調査を実施したので、それらの結果を以下に示す。

2. 転倒マス型セディメントトラップの開発

(1) 従来測器の概要と問題点

表 - 1 従来測器の問題点と本測器の特徴

	従来測器の問題点	本測器の特徴・改良点
(a)	長期観測を実現することが困難である。	土砂堆積容量を大幅に増加させるために、測器本体の高さ及び底面からの転倒マス設置高さを確保する。
(b)	マスの計測精度が低い。	一転倒あたりの土砂量を安定化させるために、転倒マスを支える軸を片側固定から両側固定にしてマスを安定に支える。また、少ない土砂沈降量でも精度良く計測するために、1転倒あたりの土砂質量を従来測器の約1/10(1~2g)まで減少させる。
(c)	測器の設置作業に労力を要する。	測器の形を直方体から円柱にして測器全体を小型化し、設置作業全般の効率化を図る。
(d)	上部の漏斗部での根詰りが発生する。	本測器上部に取り付けられている漏斗の根詰り対策として、漏斗下端の穴の径を1.0cmから2.0cmへと大きくする(漏斗型)。また、漏斗を使用せずに筒型を測器上部に設置する。

図 - 1 は、前報において掃流砂計測を主目的として製作された従来測器の概観を示す。この従来測器は、安価、製作工程や設置作業の容易さ、自動連続計測可能、小型ということに留意して製作されたものである。この測器では、上部の取込み用蓋の中央に漏斗が取り付けられて、その漏斗から集められた土砂が片方のマスの中に落ちる。そのマス内にある土砂が一定量貯まるとマスが転倒し、そのマスから土砂が下方へ排出されるとともに、もう片方のマスに土砂が堆積し始める。マスが転倒すると発生する電気パルスデータをデータロガーにおいて記録し、掃流砂量の自動・連続計測が可能となる。従来測器を用いて都市河川の掃流砂観測を行ったところ、小規模出水時において掃流砂の時系列変化を計測することに成功した。

従来測器は掃流砂計としての基本性能を有していることは前報にて検証されたが、現状では、表 - 1 に示されているような問題点や課題が存在する。例えば、前述した出水調査中、測器内に容量を超える土砂が堆積したため、出水イベントの途中で計測が終了してしまい、従来測器のままでは、長期観測を継続して実施することは困難であることが判明した。また、土砂沈降フラックスは、一般に掃流砂量よりも小さいことが想定されるため、掃流砂計として製作された従来測器をそのまま土砂沈降量計測用セディメントトラップとして準用することは無理がある。このように、従来測器が抱える問題点を克服した形で土砂沈降量計測に適したセディメントトラップを開発する必要がある。

(2) 本測器の特徴

従来測器の基本コンセプトを踏襲しつつ、そこで生じる多くの問題点を極力解決し、土砂沈降量の時系列計測に適したセディメントトラップとして製作された本測器の概観を図 - 2 に示す。ここでは、測器上部の形として、従来測器と同様に漏斗を用いるタイプ(漏斗型)と、そ

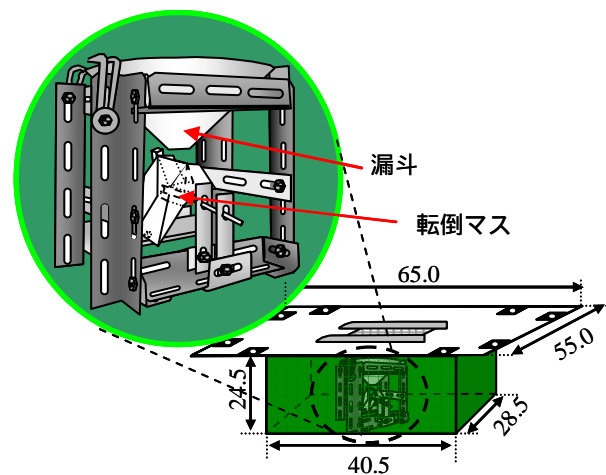


図 - 1 従来測器に関する模式図(単位: cm)

れとは大幅に異なり塩ビパイプを使用するタイプ(筒型)、という2種類のタイプを使用している。この漏斗型と筒型は上部構造のみ異なっており、他の部分には大きな差異はない。以下に、本測器の主な特徴を列挙する。

a) 長期観測の実現

従来測器では、測器底部から傾斜したときの転倒マスまでの高さは3.7cmであるため、土砂堆積容量が十分確保されず、長期間にわたる連続観測が困難であった。そのため、本測器では、底部から傾斜状態の転倒マスまでの高さを確保して(漏斗型: 11.5cm, 筒型: 9.5cm)、堆砂容量を増加させた。また、従来測器では、データロガーの防水ケースとしてビニール製の簡易防水ケースを用いていたが、本測器では長期観測に耐えられるように、防水性の高いステンレス製ケースを採用した。

b) マス計測精度の向上

従来測器では、図 - 1 のように、転倒マスの回転軸は片側からのみ固定されており、安定してマスを転倒させることが難しかった。本測器では、転倒マスの回転軸を両側から固定し、マスの転倒を安定化させている。

また、土砂沈降量が掃流砂量よりも少ないことを想定

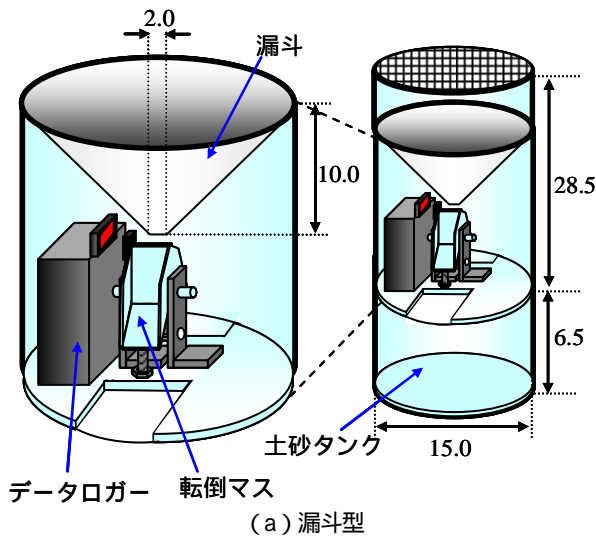


図 - 2 本測器の概観 (単位: cm)

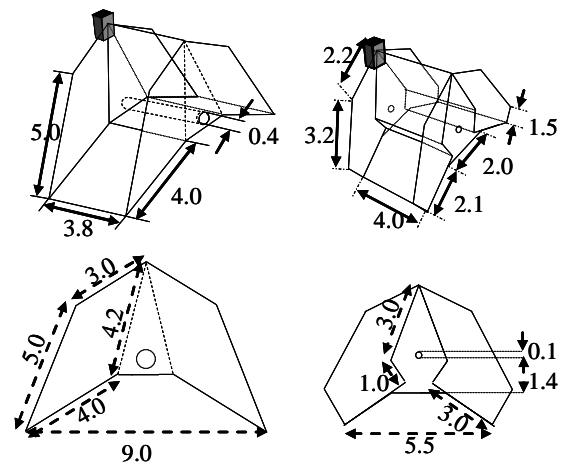
して、マスが一回転倒するのに必要な砂の質量（以下、転倒質量と呼ぶ）を、従来測器（=18～20g）の1/10以下となるように転倒マスを改良した。そのために、転倒マスの軽量化、小型化を行った。具体的には、転倒マスを構成する塩ビ板の厚さを1/2（1.0mmから0.5mmへ）にするとともに、図 - 3のように転倒マスの大きさを半分程度にした。本測器における転倒マスの形は、従来測器と比べて、排砂しやすく、かつ、マス内で満遍なく堆砂するように設計・製作されている。

c) 測器の小型化

測器を円柱型にし、小型化することで設置作業の効率化を図った。従来測器では、幅40.5cm、奥行き28.5cm、高さ24.5cmであった。それに対して、本測器では直径は15.0cm、高さは漏斗型35.0cm、筒型32.0cmと従来測器と比べてスリム化された。これにより、本測器の持ち運びや設置作業の労力が軽減された。

d) 漏斗の根詰り対策

従来測器や開発初期の本測器を用いて都市河川において現地観測を行ったところ、漏斗部分に根詰りが発生し、



(a)従来測器 (b)本測器

図 - 3 転倒マスの形状と寸法 (単位: cm)

調査が実施できていない事例が見られた。これは、微細土砂や有機物が漏斗からマスまで流れ落ちずその場に蓄積されたため、漏斗下端の穴がふさがれた。そこで、応急策として、漏斗下端の穴の直径を元々の1.0cmから倍の2.0cmに変更した（漏斗型）。その結果、漏斗内の根詰りの発生頻度を大幅に減らせることはできた。一方、大きな洪水時には、漏斗型の場合、機器の堆砂容量を越える土砂が沈降してしまい、計測を継続することができなかった。そこで、漏斗を用いる代わりに、直径2cmの塩ビパイプの筒を採用することとした（筒型）。これにより、本測器上部の開口部面積は、漏斗型では177cm²であるのに対して、筒型では3.14cm²となり、洪水時のような土砂沈降量が大きな場合でも、漏斗型と比べて筒型の方が転倒マスに落ちる土砂の総量を大幅に減らしている。そのため、筒型は洪水時を含む長期観測に適した機器であると共に、漏斗型のような傾斜面が存在しないので根詰りは全く問題にならない。ただし、筒型では平常時の少ない土砂沈降量を計測するには不適な場合も考えられる。現段階では、平常時の少ない土砂沈降量計測には漏斗型、洪水時のような多量の土砂沈降量を長期計測するには筒型が適していると考えられる。

3. 室内試験による本測器の基本性能の検証

(1) 実験概要

転倒マス型セディメントトラップとして開発された本測器の基本性能を検証するために、静水中における土砂沈降現象に関する室内実験を行う。この実験としては、図 - 4に示すように、静水中に本測器を沈めて水平面上に置き、測器直上から豊浦標準砂を一定量の割合で投下する。そのときの転倒マスの転倒時間間隔や砂の投下量を調べる。なお、単位時間あたりに落下する砂の質量が

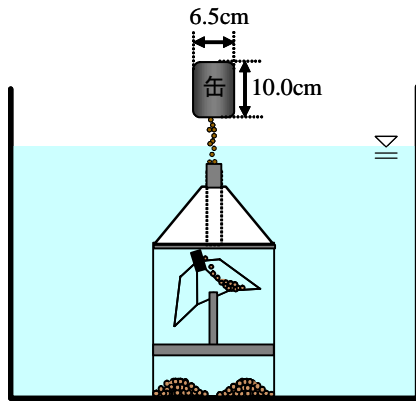


図 - 4 土砂沈降実験の概要

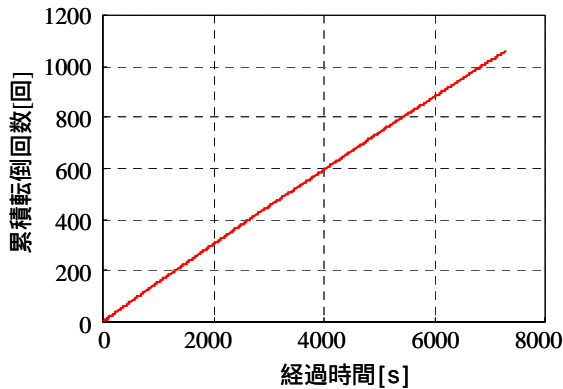


図 - 5 静水実験における累積転倒回数の時間変化

一定であることは事前に確認している。また、ここでは、筒型の本測器を用いて実験を行っている。

(2) 実験結果

静水中における土砂沈降量試験により得られた累積転倒回数の時間変化を図 - 5 に示す。これを見ると、実験開始より累積転倒回数は直線的に増加している。砂の投下量は時間的に一定であることから、本測器中のマスが一定時間間隔で転倒しているものと考えられる。本実験における総転倒回数、堆積土砂総量、転倒質量の結果をまとめたものを表 - 2 に示す。表中には従来測器の結果も合わせて示す。このように、本測器の転倒質量は、1.17gと従来測器の1/10以下となっており、本測器は、従来測器よりも少ない土砂沈降量の計測に適していることが分かる。また、堆積土砂の総量は、1242gと従来測器の約3倍になっており、従来測器の問題点を大幅に改良していることが分かる。

転倒マスの累積転倒回数と一回の転倒にかかった時間を転倒時間の平均値で除したものの関係を図 - 6 に示す。これより、従来測器では転倒時間が平均値の0.7~1.5倍と大きく変化するのに対して、本測器では0.92~1.03倍となっている。このように本測器の転倒マス観測精度が

表 - 2 本測器と従来測器の基本性能の比較

	本測器	従来測器
総転倒回数[回]	1060	30
堆積土砂総量[g]	1242	427
転倒質量[g/転倒]	1.17	14.2

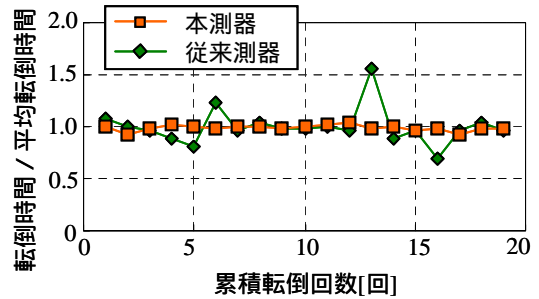


図 - 6 従来測器と本測器のマス転倒時間間隔

大幅に向上していることが示された。

なお、ここでは、静水中の土砂沈降量実験の結果のみを示しているが、小型開水路を用いた流水中の実験も別途行っている。その結果、表 - 2 と同程度の転倒回数、堆積土砂総量を流水実験でも確認できており、本測器を流水中で用いても大きな支障がないことが確認された。

4. 本測器による現地河川の土砂沈降量計測

(1) 観測概要

本測器を現地河川における土砂沈降量計測に適用する。ここでは、都市河川（千葉県大堀川）、大河川（江戸川）、マングローブ河川（沖縄県宮良川）、というタイプが大きく異なる3つの河川において本測器を設置し、土砂沈降量計測を実施する。TSTの設置法としては、河床に打ち込まれた単管パイプにTSTを取り付ける（大堀川・江戸川、河床からの設置高さ約30cm）、TSTを地面に埋める（宮良川、河床からの設置高さ約5cm）のどちらかとする。各観測の概要は、次の通りである。

a) 都市河川（大堀川）

水質汚濁化が著しく、汚濁物質の流下・堆積特性の解明が急務な都市河川の事例として、富栄養化湖沼として有名な千葉県手賀沼に流入する大堀川下流部（河口より1.5km地点）を観測地点として選定した。この河川の低水路幅は20~40mであり、その低水路中央部河床付近に本測器（筒型）を設置した。観測期間は2006年8月21日から9月28日までである。なお、上記の期間中、5回メンテナンスと測器の確認を行っている。

b) 大河川（江戸川）

近年、ウォッシュロードの動態が着目されている大河川の一例として、江戸川中流部の野田橋（河口より39km）において本測器による観測を行った。この地点

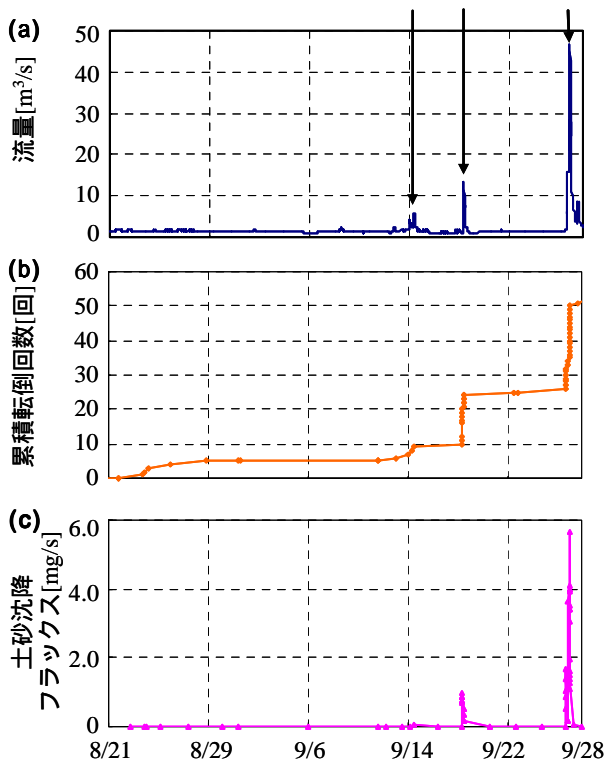


図 - 7 大堀川における流量 (a), 累積転倒回数 (b), 土砂沈降フラックス (c) の時間変化

では、低水路幅70m、堤間幅400mの複断面河道となっており、低水路側岸付近に本測器（筒型）を設置した。観測期間は2006年9月11日から25日であり、この期間中一度も測器のメンテナンスを行っていない。本測器の設置期間中、最大流量 $400\text{m}^3/\text{s}$ に達する出水が生じた。

c) マングローブ河川（宮良川）

赤土流出が問題化しているマングローブ河川である沖縄県石垣市宮良川において本測器（漏斗型）による現地調査を実施した。設置地点は河口部に位置する宮良橋付近の氾濫原である。観測期間は2006年7月27日から9月12日であり、一度もメンテナンスを行っていない。

(2) 観測結果

a) 都市河川（大堀川）

都市河川である大堀川の観測結果として、約1ヶ月間の流量、累積転倒回数、土砂沈降フラックスの時間変化を図-7に示す。ここでは、本測器に堆積した土砂の質量を計測し、それをマスの総転倒回数で除して転倒質量を算出し、その転倒質量を転倒時間間隔で除したものを土砂沈降フラックスとして与える。他の地点においても同様に整理している。また、流量は別途設置されている水位計による観測値と $H-Q$ 式から算出されている。これを見ると、マスの累積転倒回数は52回に達し、その大部分(=47回)は、同図中矢印で示されている3つの洪水時に生じている。また、洪水時においても、流量が大きいほ

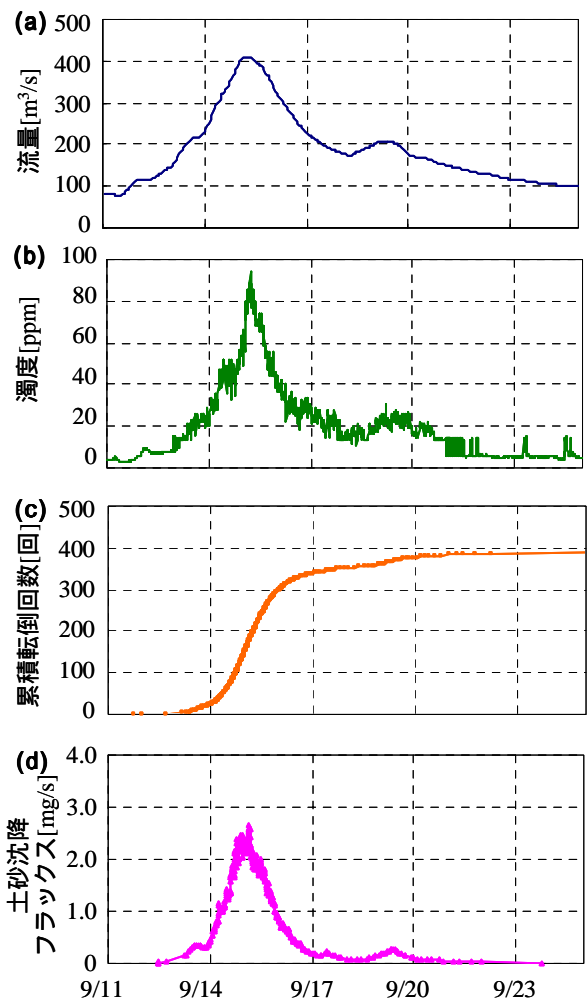


図 - 8 江戸川における流量 (a), 濁度 (b), 累積転倒回数 (c), 土砂沈降フラックス (d) の時間変化

どマスの累積転倒回数は大きく増加している。特に、観測期間後半の洪水イベント（2006/9/26～27）では、最大流量が $40\text{m}^3/\text{s}$ に達し、土砂沈降フラックスが $5\text{mg}/\text{s}$ を越える値も観測されている。別途検討結果より、この時のSSは $100\text{mg}/\text{l}$ 以上に達したことが確認されたため、後述する江戸川での土砂沈降量よりも大きくなったものと考えられる。また、平常時においても、少ないながらマスは転倒しており（合計5回）、筒型の本測器を用いても、平常時の土砂沈降量計測が実施できることが確認できた。

b) 大河川（江戸川）

江戸川における観測結果として、流量、濁度、累積転倒回数、土砂沈降フラックスを図-8に示す。ここで、流量は $H-Q$ 式により算出し、濁度はこの観測地点で別途計測している水平設置型超音波ドップラー流速分布計の反射強度データを用いて推定されている。この観測では最大 $400\text{m}^3/\text{s}$ に達する洪水が発生している。この洪水時においても、本測器は土砂沈降量計測を継続して実現しており、観測期間中の累積転倒回数は最終的に387回に達した。また、それより得られる土砂沈降フラックスは

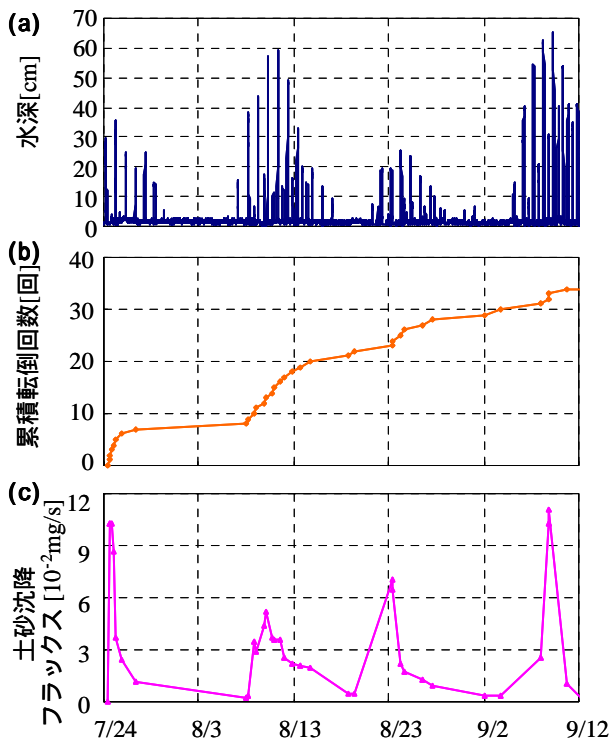


図 - 9 宮良川における水深 (a), 累積転倒回数 (b), 土砂沈降フラックス (c) の時間変化

洪水中に大きく時間変化しており、その大局的な挙動は濁度と類似していることが分かる。土砂沈降フラックスの最大値は2.6mg/sであり、大堀川での結果よりもやや小さい。以上の結果より、このような大きな規模の出水においても、本測器は欠測なく土砂沈降量を連続計測し得ること、さらに、洪水中における土砂沈降フラックスの大きな変化を測定できることが実証された。

c) マングローブ河川 (宮良川)

宮良川の観測結果として、水深、累積転倒回数、土砂沈降フラックスを図 - 9 に示す。水深は自記式水位計で計測された氾濫原上の水深である。観測期間中には洪水イベントは発生していないため、土砂沈降量は潮汐により輸送されたものである。朔望周期毎に比べると、各期間中の土砂沈降フラックスにはいくつかの差異が見られ、潮位変化が土砂沈降量に影響を及ぼしているものと推察される。さらに、約1ヵ月半の間、メンテナンスは一度も行わなかったにも関わらず、本測器は土砂沈降フラックスを継続して計測することに成功しており、本測器を長期間使用することが十分可能であることが示された。

5. まとめ

本研究で得られた結論は、以下の通りである。

(1) 土砂沈降量計測に適した転倒マス型セディメントトラップ (TST) を実用化するために、従来測器の問題

点を踏まえて、小型化、計測精度の向上、観測期間の長期化などを実現したTST (本測器) を開発した。

(2) 静水中の土砂沈降実験を行い、従来測器よりも大幅に性能が向上していることを確認した。

(3) 本測器を用いて、大堀川、江戸川、宮良川という様々な河川における土砂沈降量の連続観測を実施した。その結果、宮良川では、メンテナンスを行わずに1ヵ月半の長期観測を実現できた。また、江戸川や大堀川では、洪水時における土砂沈降フラックスを連続計測することに成功した。

(4) 以上の結果から、本測器が土砂沈降量を高い時間分解能で連続計測可能な測器であることが示された。

なお、現段階では粘土鉱物などの微細土砂の計測は難しい。今後、様々な粒径分布を有する土砂に対する本測器の適用性について、詳細に検討する予定である。また、土砂動態の全体像を把握する上では、鉛直下向きの土砂フラックスに関する本測器による計測のみならず、河床変動や底質巻上げ量に関する観測を同時に行うことは不可欠であり、現在、それらの課題に取り組んでいる最中である。

謝辞：本研究における現地調査を行う際には、東京理科大学理工学部土木工学科水理研究室学生諸氏に多大なる御助力を頂いた。本研究の一部は、日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究 (C) (2) (研究代表者：二瓶泰雄) によるものである。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 藤田光一：“広域総合土砂 (物質) 管理”の理念と実践との隔たりをどう埋めるか, 月刊海洋, Vol.32, No.3, pp.179-184, 2000.
- 2) 横山勝英, 諏訪義雄, 二村貴幸, 谷口丞, 末次忠司: 濁沼川下流域における土砂・栄養塩動態の特性, 水工学論文集, Vol.46, pp.659-664, 2002.
- 3) 川西澄, 山本洋久, 余越正一郎: 超音波流速計と散乱光式濁度計を用いた懸濁粒子の濃度, 粒径, フラックスの測定, 水工学論文集, Vol.42, pp.559-564, 1998.
- 4) Laronne, J. B. and Reid, I.: Very high rates of bedload sediment transport by ephemeral desert rivers, *Nature*, Vol.366, pp.148-150, 1993.
- 5) 澤井健二: 流砂計測技術の現状と展望, 砂防学会誌, Vol.54, No.2, pp.75-84, 2001.
- 6) 水山高久, 野中理伸, 野中伸久: 音響法 (ハイドロフォン) による流砂量の連続計測, 砂防学会誌, Vol.49, No.4, pp.34-37, 1996.
- 7) 日本海洋学会編: 沿岸環境調査マニュアル [水質・微生物編], 恒星社厚生閣, pp.165-173, 1990.
- 8) 二瓶泰雄, 塗師隆生: 河床内トラップ型簡易掃流砂計の試作, 河川技術論文集, Vol.11, pp.327-332, 2005.

(2006.9.30受付)