

潮汐影響のある河川の水深計測について

平田 法隆*・Krisana PUNAYANGKOOL**・小瀬 邦治***・長谷川 和彦****

Survey the River Depth with Tidal Effect

Noritaka HIRATA, Krisana PUNAYANGKOOL,

Kuniji KOSE and Kazuhiko HASEGAWA

Abstract

In South East Asia, there are many rivers that are suitable for transportation. However, at the end of rainy season, a large amount of sedimentation arises in the river. It causes frequent accidents such as groundings. Therefore, those rivers need to be dredged for the safety navigation. For this purpose, it is very important to measure the water depth timely and easily. However, it is still difficult to measure water depth in wide area. The authors have proposed a simple method. The measurement of water depth of the river using Kinematic GPS (K-GPS) and sounder is investigated. However, the tidal effect should be taking into an account for the precise measurement. The tide level of each measurement point was estimated by linear interpolation from tide tables. Substituting thus estimated tide level from the measured surface altitude of the river surface by K-GPS, river chart datum of each point was estimated. Thus estimated chart datum on downstream-bound and upstream-bound coincide well, and the proposed method of eliminating tide was verified. Therefore it is able to obtain the river water depth combining the tide information and measured sounder data.

Keywords : Kinematic GPS, River Depth Measurement, Tidal Effect, River Chart Datum

キーワード : K-GPS, 河川水深計測, 潮汐影響, 河川の基本水準面

1. はじめに

ミシシッピ川やエルベ, ドナウ川を有する欧米では河川輸送が発達している。東南アジアにおいても河川輸送に適した大きな河川が存在しており, ベトナムではメコン川とその周辺の運河を使用して盛んに河川輸送が利用されている。インドネシアにおいても, 西カリマンタン・Kapuas川, 東カリマンタン・Mahakam川やスマトラ・Musi川等で資源輸送に河川を利用している。

しかしながら, 東南アジアの河川は, 大雨の度に大量の土砂が堆積し, 川床の形状が大きく変化する。さらに, 乾季・雨季の季節変動のみならず, 毎日の潮汐の影響も内陸側数百 km に及び, 無視できないにも関わらず, インフラ整備が遅れているため, 事故が多発している。

信頼のおける輸送手段として河川輸送を推奨するには安全性, 信頼性の向上が不可欠であり, それには河川を輸送水路として活用するための環境整備にあたるパブリックセクターの機能と, 個々の輸送業者が輸送船舶の安全な運航管理を行うというプライベートセクターの機能を系統的に整える必要がある。

パブリックセクターの機能は河川を輸送に用いる上で共通に必要な条件の整備を行うことで, 多岐にわたる。大別すると, ①水路条件に応じた航行船舶のサイズの制限とか, 橋脚の高さや水深の確保という安全運航のための物理的条件を整えることと, ②狭隘部での遭遇等を安全に保つための運航の調整, あるいは漁業者との水域利用の競合を調整するためのゾーニングといった人的社会的条件の整備がある。このパブリックセクターの機能の明確化と整備がア

* 正会員 広島大学 (〒739-8527 東広島市鏡山 1-4-1)

** 学生会員 広島大学

*** 非会員 広島大学名誉教授

**** 正会員 大阪大学 (〒565-0871 吹田市山田丘 2-1)

ジアの河川輸送の振興には大変に重要である。その中で最も重要なものが河川の水深に関するもので、水深状態を計測し、必要なら浚渫等を施すと共に、運航者に必要な水深の情報を提供することである。

本研究の目的はこの河川の水深を現代技術を用いて、正確に効率的に把握する手法を開発することである。海底の場合は、測量船によるマルチビーム音響測深機、透明度のある浅瀬や河川では、航空機を使用したレーザー測深機により、機動的な測量体制を構築している⁽¹⁾⁽²⁾が、浅くて幅広の河川で、しかも濁っている場合、これらの機材は利用しづらい。本研究では最近では低コストで簡便に利用可能になった K-GPS が水平方向のみならず、垂直方向についても高精度で位置計測を可能にすることに着目して、超音波式測深器を組み合わせる水深測定システムを作り、アジアの河川で実用性を確認することである。この方法に河川毎に推定値が公表されている潮汐表を組み合わせると実用的な精度で基本水準面からの水深の推定が可能であることを確認したので報告する。

2. 水深計測の概要

乾季である2006年8月2日にインドネシアの東カリマンタンにある Mahakam 川の水深計測を行った。使用機材は、以下のとおりである。

- ・ 基準局 GPS ニコン・トリプル 4000SSE
 Compact L1/L2 Antenna
- 移動局 GPS ニコン・トリプル MS-750(2台)
 Micro Centered L1/L2 Antenna
- 音響測深器 タマヤ計測システム
 TDM-9000A

K-GPS 基準局は Samarinda 港湾局の屋上に設置し、インターネット上で公開されていたジャカルタとシンガポールの電子基準点から静止測量によって位置を求めた。また、K-GPS の後処理解析には Trimble Total Station を使用し、測地系は WGS84、直角平面座標には UTM を用いた。

水深計測に使用した船舶は、Samarinda 港湾局所有の警備艇で、全長 20.5m、全幅 5m の 2 軸 2 舵船で、船速は約 7knot であった。この船の中央部両舷に K-GPS アンテナを設置し、この 2 台のアンテナ位置から、横揺の影響を補正した 1 秒ごとの船体位置と針路を得た。また、右舷側の GPS アンテナ近傍に音響測深器の送受波器を設置して、水深を計測した。なお、K-GPS 基準局から個別に求めた船舶の 2 台の GPS アンテナ位置の相対距離の誤差は一部例外を除き ±5cm 以内で標準偏差は基準局からの距離に関係なく約 1.5cm であったので、水深計測の位置精度と

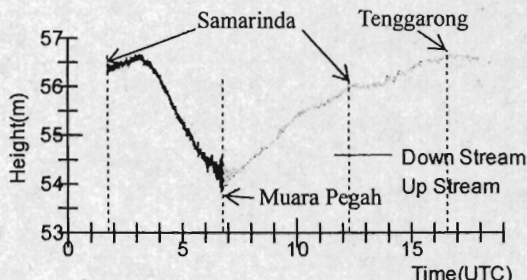


Fig. 1 Time history of water level measured by K-GPS

しては十分であったと考える。

3. GPS 計測した水面高度について

データを取得した範囲は下記の通りである。時刻は UTC で現地は +8 時間の時差がある。

1:37 - 6:43 (約 65km)

Samarinda ~ Muara Pegah 沖(河口)

6:49 - 12:15 (約 65km)

Muara Pegah ~ Samarinda

12:15 - 18:33 (約 35km)

Samarinda ~ Tenggarong

K-GPS で計測した水面の WGS84 楕円体高の時系列を Fig. 1 に示す。まず、Samarinda を出発して川を下っているにもかかわらず、3:10 までは水面高度が上昇している。その後、水面高度が下がり、河口付近では水面高度の振幅が大きくなっているが、これは波による影響であると思われる。それから、Samarinda に戻ると、水面高度が出発時より約 0.4m 下がっていた。それから約 1 時間は川を上っているにもかかわらず、高度がほぼ一定になっている。Tenggarong には 16:30 頃到着した。それ以降は、停泊しているにもかかわらず水面高度が変化しており、河口から 100km 上流でも潮汐の影響を受けていることがわかる。なお、Mahakam 川の流速は翌日 Tenggarong で行った旋回試験の結果、約 0.6m/s であった。

Fig. 2 は河口の南、約 15km の地点を原点として船の 1 秒毎の移動距離を積算した距離を横軸にしてい

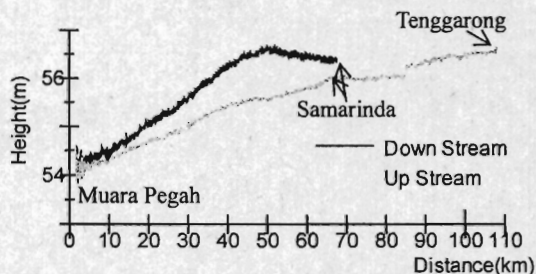


Fig. 2 Comparison of water level measured by GPS

る。この図から往路と復路で水面高度が異なっており、最大で約 1m 違うことがわかる。また、横軸が船の移動積算距離であるため、河川の長さとは異なる。一部、往路と復路で異なる経路を航走していることもあり、Samarinda に到着した時点で約 3km 位置がずれた。また、85km 付近で高度に段差が現れているが、これは、そこで 30 分程度停泊し、その間に潮位が変化したため、時系列で示した Fig. 1 に段差がないことからわかるように、計測上の問題ではない。

翌朝、Tenggarong から Samarinda まで戻る際も計測を行ったが、基準点を設置した港湾局で停電があり、GPS が動作停止し、基準点のデータが欠落したため、解析できなかった。したがって、以降の解析は Samarinda から河口までの往復のみを扱う。

4. 計測した水深について

4.1 距離補正

Fig.3 に GPS で求めた河口から Samarinda までの航走距離と水深の関係を示す。本来は面的に水深を計測し、等高線図で表すべきであるが、単純に 1 往復計測しただけであるので、河川を線として取扱った。下りと上りで航走距離が異なっているため、同一地点にもかかわらず距離が異なるとみなされ、水深の変化が一致していない。また、河口付近で水深が連続的に変化せず、2 倍程度の値になっている点が多数存在しているのは波浪によるロールの影響と、水深が浅いため、航路の部分のみ浅瀬を行っており、余分な反射波を拾ったためと思われる。なお、Mahakam 川の川幅は 1km 程度であるが、Samarinda の川下側で川幅が 300m 程度に狭くなっているところがあり、水深が急激に深くなっているところと一致する。

下りと上りで航走距離が異なるため、航走距離では位置の同定ができない。そこで、河口からの距離で表現することを試みた。すなわち、Fig.4 に示すように河川を折線近似し、計測点から折線に垂線を下ろして交点を求め、航走距離の代わりに、河口から

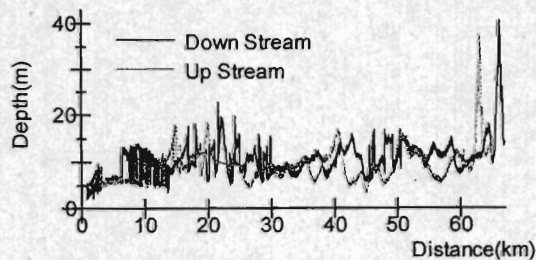


Fig. 3 River depth measured by sounder

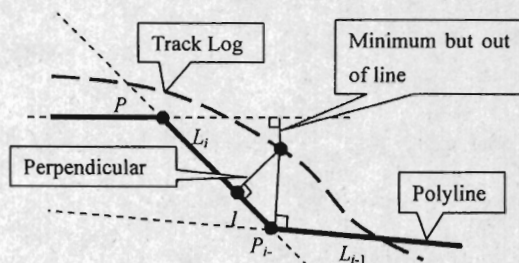


Fig.4 The way of polyline fitting

交点までの折線の線分長の合計を距離とし、その点における水深として扱うことにした。すなわち、計測点と折線との交点が i 番目の折線にあり、 j 番目の線分長が L_j で、 P_{i-1} からの距離が l であるとすると、距離 L は(1)式で表せる。

$$L = l + \sum_{j=1}^{i-1} L_j \quad (1)$$

なお、今回の目的は、河川の距離を正確に求めるのが目的ではなく、往路と復路の距離を一致させるのが目的であるので、目視によって主観的に河川を折線で近似した。近似は、DAN 杉本氏のカシミール 3D (<http://www.kashmir3d.com/>) のルート生成機能を使用し、University of Maryland の Earth Science Data Interface (<http://glcfapp.umiacs.umd.edu:8080/esdi/index.jsp>) よりダウンロードした Landsat 衛星画像を元に行った。45km 付近のトラックログを 5 分間隔でプロットした例を Fig.5 に示す。コースの異なる下りと上りが一本の折線上にプロットされている。

折線近似によって距離を修正し、水面高度から水深を引いた川床の高度の結果を Fig.6 に示す。Fig.3 に見受けられた位相のずれがなくなっており、位置のずれが補正されていることがわかる。また、30km

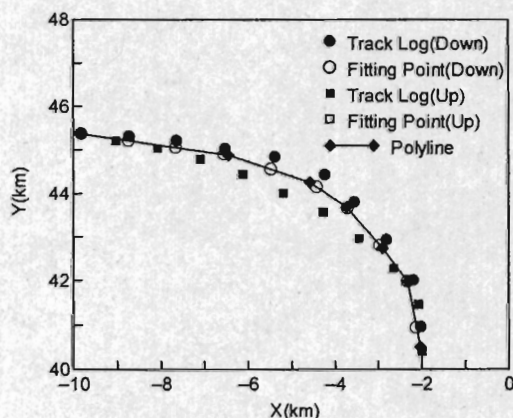


Fig.5 Polyline fitting of the Track Log

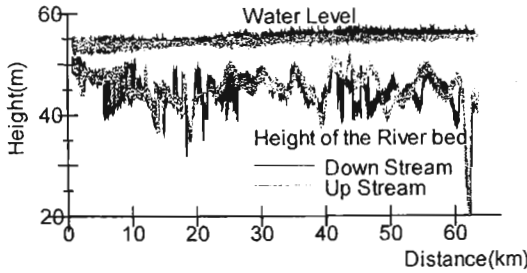


Fig.6 Measured water level and height of river bed with corrected distance

から 40km 付近は往復で近いところを通航しており、川床の形状が良く似ている。しかし、25km 付近では、中州の西側と東側を通航し、45km から 50km にかけては、Fig.5 に示すように、下りは水深の深い外回り、上りでは水深の浅い内回りであったため、川床の形状が大きく異なっている。

4.2 潮汐補正

Mahakam 川は河口から 100km 上流でも標高が数メートルしかなく、潮汐の影響を受けて水位が変動する。今回の調査では、検潮場の有無を確認しなかったため、水位の実測値を使用することはできなかった。また、インドネシア浸漬局で入手した潮汐表は Mahakam 川の東側の河口にある Muara Bayor のデータのみであり、情報として不十分であった。米国 Garmin 社 (<http://www.garmin.com/>) の海図ソフトである BlueChart® の Asia Pacific 版に収録されている潮汐データは Fig.7 に示すように Mahakam 川関係で 5 箇所あった。

潮汐表と BlueChart® の潮位の比較を行ったところ Fig.8 に示すように、BlueChart® の方が約 10cm 水位が高いが、位相と振幅は良く一致していた。また、今回計測した時間内では、BlueChart® の潮位データ

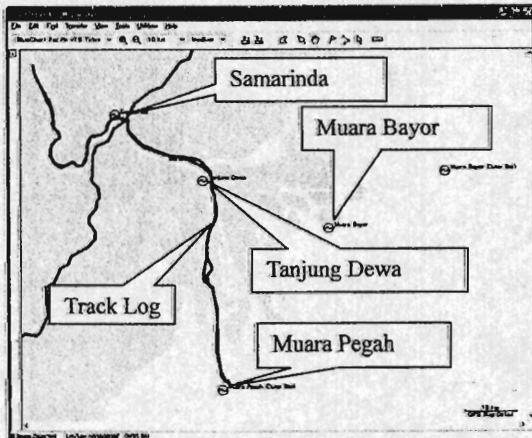


Fig.7 Known tidal point by BlueChart®

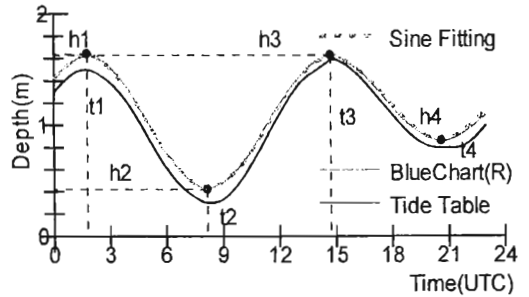


Fig.8 Compare with tide table and BlueChart® at Muara Bayor on 2nd Aug. 2006

の満潮と干潮間を半波長の正弦波で近似したところ、Tanjung Dewa で誤差が最大 4cm で、他ではほぼ一致した。通常、潮汐表の分解能は 10cm であるので、実用上問題ないと考え、正弦波で近似して潮汐影響を補正することを試みた。すなわち、満潮や干潮の時刻を t_i, t_{i+1} 、水位を h_i, h_{i+1} としたとき、水位 H は

$$H = h_i \sin\left(2\pi \frac{t - t_{oi}}{T_i}\right) + H_{oi} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} t_{oi} &= (t_i + t_{i+1})/2 \\ h_i &= (h_i + h_{i+1})/2 \\ \text{ここで、} \quad H_{oi} &= (h_{i+1} - h_i)/2 \\ T_i &= 2(t_{i+1} - t_i) \end{aligned}$$

と表す。

次に、川は一樣で、潮汐は河口から上流へ一定の速度で変化すると仮定すると、2 地点間の満潮および干潮の時刻とその時の水位は線形関係とみなせるので、線形補間によって通過地点の満潮および干潮の時刻とその時の水位を求め、(2)式より正弦関数で近似して、そこを通過する時刻の潮位を得た。すなわち、Fig.9 において、潮汐が既知の地点 A、B の距離が L であるとすると、満潮および干潮の時刻 $t_{A1}, t_{A2}, t_{B1}, t_{B2}$ における ● の 4 点から、距離 l の通過地点 P の満潮および干潮の時刻 t_{P1}, t_{P2} とその時の水位 h_{P1}, h_{P2} は l/L で線形補間して、● の 2 点となる。この 2

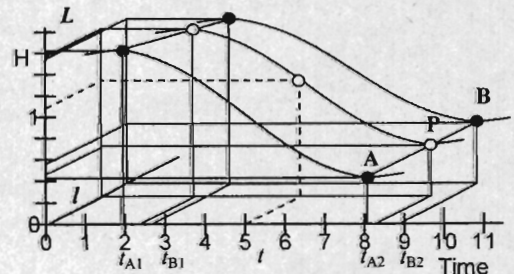


Fig.9 How to estimate tide level at pass point

点間を(2)式を用いて正弦波で近似し、通過時刻 t における \odot の潮位を求めた。

$$t_{p1} = \frac{L-l}{L} t_{A1} + \frac{l}{L} t_{B1}, t_{p2} = \frac{L-l}{L} t_{A2} + \frac{l}{L} t_{B2}$$

$$h_{p1} = \frac{L-l}{L} h_{A1} + \frac{l}{L} h_{B1}, h_{p2} = \frac{L-l}{L} h_{A2} + \frac{l}{L} h_{B2}$$

$$H = h \sin\left(2\pi \frac{t-t_0}{T}\right) + H_0 \quad (3)$$

$$t_0 = (t_{p1} + t_{p2}) / 2$$

$$h = (h_{p1} + h_{p2}) / 2$$

ここで、

$$H_0 = (h_{ip2} - h_{p1}) / 2$$

$$T_i = 2(t_{p2} - t_{p1})$$

このようにして推定した観測船通過時の潮位を Fig.10 に示す。Table 1 に示す Samarinda, Tanjung Dewa, Muara Pegar の3地点の潮汐データより求めている。6時過ぎの Muara Pegar の手前で段ができて、これは、船がいったん逆戻りをしたために生じている。

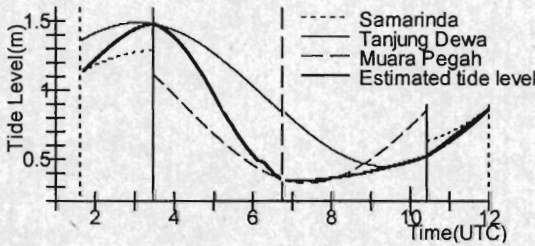


Fig.10 Estimated tide level

Table 1 Tide Level

Muara Pegar	Time(UTC)	Level (m)
High Water	1:01:52	1.49
Low Water	7:22:30	0.33
High Water	13:58:07	1.53
Tanjung Dewa	Time(UTC)	Level (m)
High Water	3:05:37	1.49
Low Water	9:22:30	0.44
High Water	15:24:22	1.47
Samarinda	Time(UTC)	Level (m)
High Water	3:31:52	1.28
Low Water	9:30:30	0.59
High Water	16:07:30	1.49

計測した水面高度から推定した潮位を差し引いて、基本水準面を求めたところ、Fig.11 に示すように、往路と復路でほぼ等しくなっており、潮汐の影響を取り除けていることが分かる。潮汐表の予報精度は

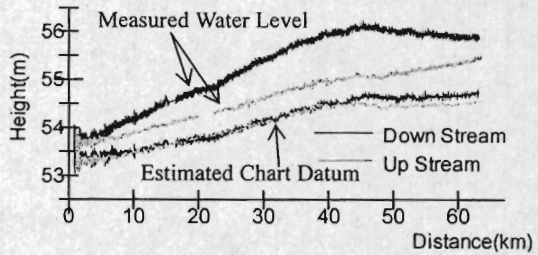


Fig.11 Estimated chart datum

一般に潮時で 20~30 分以内、潮高で 30cm 以内とされており⁽³⁾、日本の各港湾における調査でもそのような範囲に収まっている⁽⁴⁾。Tanjung Dewa と Samarinda の通過時刻における GPS による水面高度と潮汐データによる潮位から求めた基本水準面を Table 2 に示す。

Tanjung Dewa では往路と復路の通過時刻における基本水準面高さが良く一致しているが、Samarinda では誤差が 20cm 有ることが分かる。したがって、42km 以降の誤差は Samarinda の潮汐表の値が実際と異なっていたためと考えられ、精度を上げるためには、検潮場を設けて実測する必要がある。また、誤差が Samarinda に向かって線形に増加するのではなく、一様に異なっている。これは、①潮汐が上流へ伝播する速度と船速が近いこと、②Tanjung Dewa の上流で川が東と南に分岐しており、位相が少し異なる潮汐が混じること、③Samarinda の下流に川幅が狭くなっているところがあるため、(3)式の仮定から若干外れた挙動を示している等の原因が考えられる。

Table 2 Estimated chart datum from water level and tide

(a) Tanjung Dewa

Pass time (UTC)	Water level (m)	Tide (m)	Chart datum (m)
03:28	56.01	1.48	54.53
10:25	55.06	0.50	54.56
Difference	0.95	0.98	-0.03

(b) Samarinda

Pass time (UTC)	Water level (m)	Tide (m)	Chart datum (m)
01:45	55.88	1.14	54.74
12:05	55.42	0.88	54.54
Difference	0.46	0.36	0.20

Fig.12 に潮汐影響を取り除いた基本水準面からの水深データを示す。下りと上りで近いところを航走した 30km から 40km 過ぎまでは Fig.6 と比較し値が良く一致しており、潮汐影響を取り除けていることが分かる。

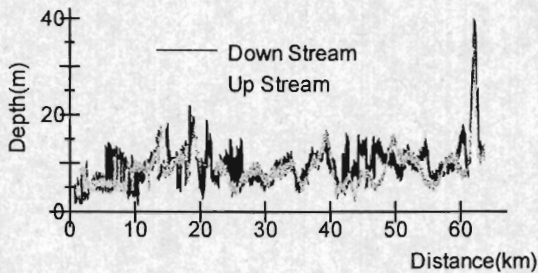


Fig.12 Estimated river depth from the chart datum

以上のことより、数ヶ所に検潮場を設置すれば、検潮データから基本水準面は推定できるので、水面高度を計測する必要はないことがわかった。しかも、水路確保のための浚渫作業にはセンチメートルの位置精度は不要であるので、D-GPSと測深器で対応できる。しかしながら、計測結果の妥当性を吟味するには水面高度が必要であるので、位置計測にはK-GPSを用いるべきである。

5. 結言

インドネシアの東カリマンタンにある Mahakam 川で K-GPS と測深器を使用した水深計測を行い、以下の知見を得た。

1. 潮汐の影響を受ける河川であっても、K-GPS と測深器を使用することにより、川床の高度を得ることができた。
2. 数ヶ所の潮汐データにより、河川の基本水準面を求めることができた。
3. 潮汐データを使用した補正が有効であるので、補正によって、水深を精度良く推定することができた。
4. 今回は潮汐の計測データが得られなかったため、潮汐表を元に補正を行ったが、Samarinda の潮位が GPS 計測とは異なったため、誤差となって現れたので、水深計測を実施する際は、潮汐を実測する必要がある。

なお、今回の計測は乾季の水量の少ない時期に行ったが、河川床の形状は雨季の間に変わるため、深淺測量と浚渫は乾季に入って水位が下がる前に行う必要がある。そこで、水量の多い時期においても潮汐データによる補正が有効であるかどうか確認する必要がある。

謝辞

本研究は日本学術振興会の拠点大学交流事業「海上輸送の総合的研究」および文部科学省科学研究費基盤研究(B)(海外学術調査)：アジアの河川輸送の現

状と開発戦略に関する調査研究(広島大学大学院工学研究科教授(当時)小瀬邦治代表)の一部として行ったものである。また、現地調査においてはインドネシア側から応用技術評価庁 BPPT と運輸省海運総局の全面的な協力を戴いたことを付記し、深甚の謝意を表する次第である。

参考文献

- (1) 海上保安庁：海洋調査に迫る，海上保安レポート 2007，2007
- (2) 日本水路協会：K-GPS を用いた水路測量効率化の研究 その3，日本水路協会，調査研究資料 112，2003
- (3) 市川義文・石田廣史：余裕水深決定のための潮汐表の精度-I，航海学会論文集，第 93 号，pp.27-33，1995
- (4) 市川義文・石田廣史：余裕水深決定のための潮汐表の精度-II，航海学会論文集，第 95 号，pp.27-33，1996

質疑応答

新井康夫（海技大学校）：

- (1) 航走距離について、積算した後、往・復の距離を合わすようにされているが、川の形状と測位結果から求められるのではないかと。
- (2) 測定した結果で水面と水深のばらつきの要因は何か教えていただきたい。

平田法隆：

- (1) 川のデジタルデータが入手できませんでしたが、往路と復路で中州の両側を通航したり、カーブで内回りや外回りをするなど、明らかに異なる経路を通航していましたので、位置の同定を行う簡易的な方法として、河川を折線近似し、航跡を折線に射影しました。
- (2) K-GPS の高度が±5cm 程度ばらつくのは仕様ですので、水面高度がこの程度ばらつくのは致し方ないと考えます。なお、K-GPS のアンテナを両舷に設置して、針路と横揺角を求めましたので、横揺の補正は行っています。浅いと反射信号の強度が強くなり、誤った計測を行うことが有ったり、浮遊物が送受波器に付着することが有ったりしましたので、取付け場所、適切な信号強度選択など、経験が必要であると感じました。また、川床が実際にどのような形状をしているかは、水が濁っているので直接知ることはできませんが、砂地であっても多少の凹凸はあると考えます。