

フィリピン国パンパンガ川流域における カンダバ湿地帯の洪水・土砂制御機能について

Functions of Flood and Sediment Control Effects of Candaba Swamp
in Pampanga River Basin in the Republic of the Philippines

山下直樹¹、大本照憲²、西野謙³

Naoki YAMASHITA, Terunori OHMOTO and Ken NISHINO

¹ 正会員 日本工営(株) コンサルタント国際事業本部 水資源開発部 (〒102-0083 千代田区麹町 2-5)

² 正会員 工博 熊本大学 工学部環境システム工学科 (〒860-0862 熊本市黒髪 2-39-1)

³ 正会員 日本工営(株) コンサルタント国際事業本部 パンパンガ洪水防御開発事務所長 (〒102-0083 千代田区麹町 2-5)

Flood control project on the Pampanga River Basin in the Republic of the Philippines, conducted from 1939 to 1975 following a suggestion from U.S. Army Corps of Engineers, has a unique characteristic. It is that embankment was constructed only right side of the river to protect lives and properties in right basin area, and the Candaba Swamp located in left basin area was regarded as flood retarding area. The wetland is 486 square kilometers, and its reserve storage is approximately 2 billion cubic meters. However, the function of flood control on the Candaba Swamp has not been examined thoroughly. In this paper, flood mitigation effect by the wetland was studied by hydrological analysis in 2 conditions, with and without the wetland, and annual sedimentation in the wetland was estimated by discharge data and empirical sediment transport equation. The results show significant flood and sediment control effects of Candaba Swamp in Pampanga river basin quantitatively.

Key Words : Candaba Swamp, Flood Control, Sediment Control, Developing Country

1. はじめに

発展途上国に存在する湿地帯は、今後開発される可能性があるものの、その機能を定量的に評価した研究事例は少ない。本研究の目的は、フィリピン国パンパンガ川流域におけるカンダバ湿地帯の果たす洪水軽減効果及び土砂収支への影響を明らかにすることであり、現地踏査、水文資料の収集および流出解析により検討した。

パンパンガ川は、フィリピン国ルソン島中央部のカラバロ山地に源を発し南流してマニラ湾へ注ぐ、流域面積 10,503 km²、流路延長 260 km のフィリピンで第4番目の規模の河川である。その中流部左岸側にあるカンダバ湿地帯は、面積 486 km²、貯水容量約 20 億 m³ の規模を有する。アメリカ合衆国政府の提言により 1930 年代から実施された本河川の治水事業には一つの特徴が挙げられる。それは洪水防御対象として人口・資産の集中する本川中下流部の右岸側流域を守るために本川右岸に築堤し、左岸側は無堤状態にすることによりカンダバ湿地帯を遊水地と位置付けた点である。しかしながら、カンダバ湿地帯での洪水貯留効果は十分には研究されていない。

本研究では、カンダバ湿地帯による洪水流量の軽減効

果を明らかにするための方法として、湿地帯が有る場合と無い場合で流出解析を行い、両者の流出特性を比較検討した。また、1987 年から 2000 年までの観測流量および流砂量式を基に、湿地帯における年堆砂量を推算した。

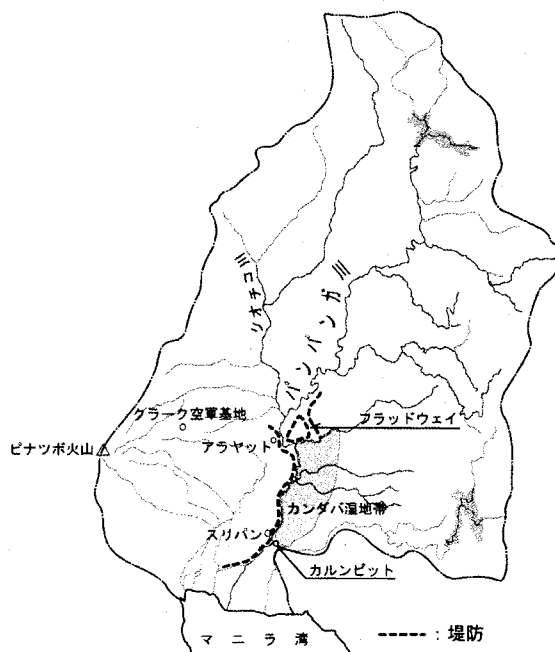


図-1 パンパンガ川流域図

2. カンダバ湿地帯の洪水制御機能

(1) 既往洪水

パンパンガ川における流量観測が開始された1960年以降の最大洪水は、1976年5月の台風ディダゲンによるものである。また、最近10ヵ年での主要な洪水としては1993年10月と1998年10月のものが挙げられ、アラヤット地点とスリパン地点にて洪水流量が観測されている。

表-1 パンパンガ川での既往洪水の諸元

洪 水		1976 年 5 月	1993 年 10 月	1998 年 10 月	
流域面積 (km ²)	アラヤット	5,642	5,642	5,642	
	スリパ ^ン	7,121	7,121	7,121	
ピーク流量 (m ³ /s)	アラヤット	2,780	3,300	2,747	
	スリパ ^ン	2,490	1,992	1,530	
生起確率 (年)	アラヤット	10	15	10	
	スリパ ^ン	15	10	5	
洪水到達 時間 (hr)	アラヤット	67	42	43	
	スリパ ^ン	105	88	81	
降雨総量 (百万 m ³)	アラヤット	3,865	2,007	1,564	
	スリパ ^ン	5,022	2,418	1,911	
洪水総量 (百万 m ³)	アラヤット	2,228	1,592	1,262	
	スリパ ^ン	2,284	815	517	
流出率		アラヤット	0.576	0.793	0.806

表-1 より、アラヤットにおいて1976年の洪水は、1993年と1998年の洪水より洪水到達時間が長く、また流出率が低い。現地踏査および水文資料から、その原因として以下のことが考えられる。

- 1) 山地の荒廃化、中流部における農業開発などにより流域の土地被覆状況が変化したため、上中流域における雨水涵養能力が低下した。
- 2) アラヤット上流に位置し河川とカンダバ湿地帯とを繋ぐフラッドウェイの疎通能力が堆砂により低下したために、カンダバ湿地帯への洪水分流量が減少した。
- 3) 1976年洪水はモンスーンの影響によるため、台風による1993年洪水、1998年洪水より降雨継続時間が長かった。
- 4) 1976年洪水は雨季前半の5月、1993年洪水、1998年洪水は雨季後半の10月に発生していることから、土壌の水飽和度が1976年洪水の時に比して1993年洪水、1998年洪水の時の方が高かった。

(2) 流出モデルの作成

流出モデルの作成にあたって、スリパン地点より上流域7,121 km²について図-2に示すとおり27の流域に分割した。降雨データについては、流域内及び近傍にある13ヶ所の雨量観測所で観測された時間雨量を用いた。

解析ツールには、US Army Corps of Engineers

Hydrologic Engineering Center が開発した Hydrologic Modeling System HEC-HMS を用いた。HEC-HMS では、各流出・流下過程を幾つかの理論から選択して解析することが出来る。本流出モデルにおいては、データの入手可能範囲などから表-2に示すものを採用した。

表-2 流出モデルに用いた理論

Subbasin Loss	Initial and Constant
Subbasin Transform	Snyder Unit Hydrograph
Subbasin Baseflow	Recession
Reach	Modified Puls, Muskingum

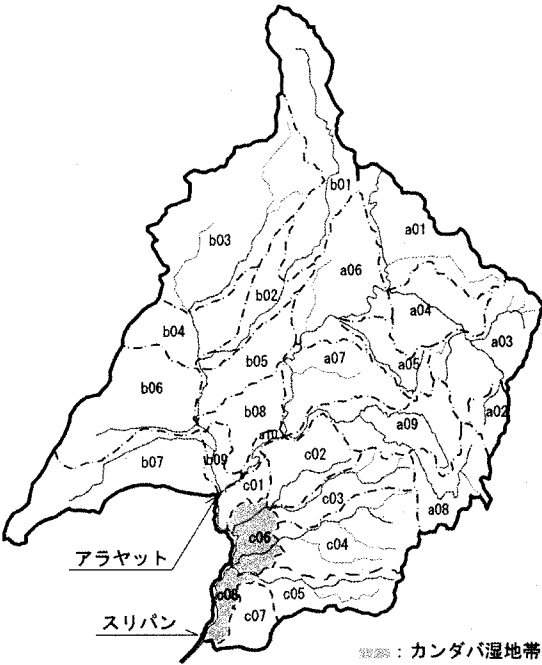


図-2 流域分割図

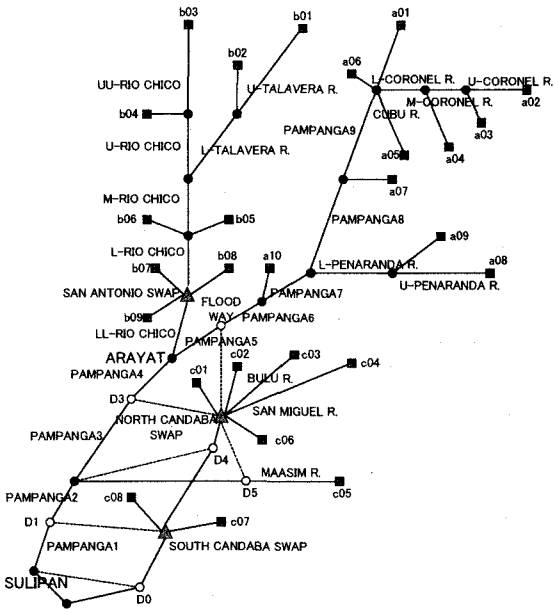


図-3 現況流出モデル図

表-3 流出モデルの検証

洪水 地点	1993 年 10 月				1998 年 10 月			
	アラヤット		スリバン		アラヤット		スリバン	
流域面積 (km ²)	5,642		7,121		5,642		7,121	
流量	実測	計算	実測	計算	実測	計算	実測	計算
ピーク流量 (m ³ /s)	3,300	3,095	1,992	1,994	2,747	2,771	1,530	1,524
ピーク時間	10 月 8 日 6:00	10 月 8 日 4:00	10 月 9 日 5:00	10 月 9 日 13:00	10 月 25 日 13:00	10 月 25 日 17:00	10 月 27 日 2:00	10 月 27 日 6:00
洪水到達時間 (hr)	42	40	88	96	43	47	81	85
降雨総量 (百万 m ³)	2,007	2,007	2,418	2,418	1,564	1,564	1,911	1,911
洪水総量 (百万 m ³)	1,592	1,604	815	763	1,262	1,252	517	604
流出率	0.793	0.799	-	-	0.806	0.800	-	-
相関係数	0.992		0.992		0.994		0.993	

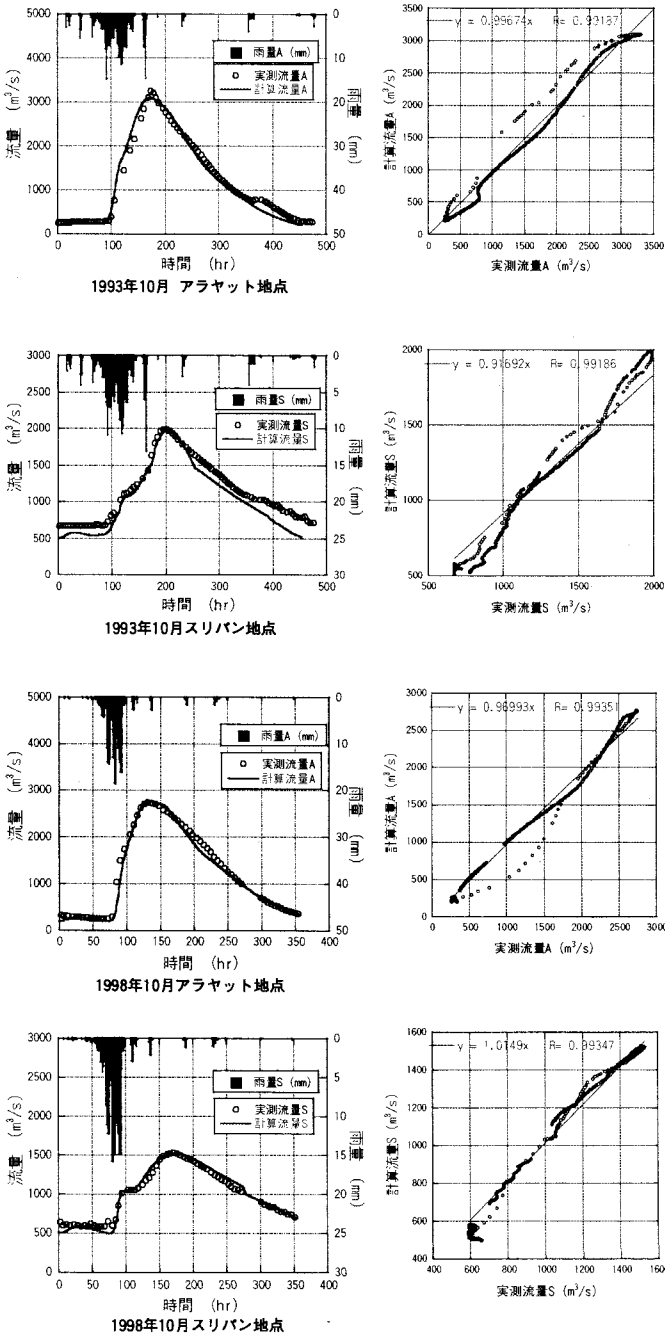


図-4 流出モデルの検証

1976 年洪水に対して 1993 年洪水および 1998 年洪水は流出特性が著しく異なることから、現況を把握するために 1993 年洪水と 1998 年洪水を検証対象として、流出モデルを作成した。検証地点は流量観測が行われたアラヤットおよびスリバンとし、分割流域間の洪水の流入・流出条件は地形図、1998 年洪水調査報告書および現地踏査結果を考慮して設定した。検証の結果、実測流量と計算流量の相関係数は 0.992～0.994 の範囲にあり、作成されたモデルは相関性が高いといえる。

(3) 洪水軽減効果の解析

作成した現況モデル (図-3) をベースとして、カンダバ湿地帯が無い場合の流出モデルを図-5 のとおり作成した。

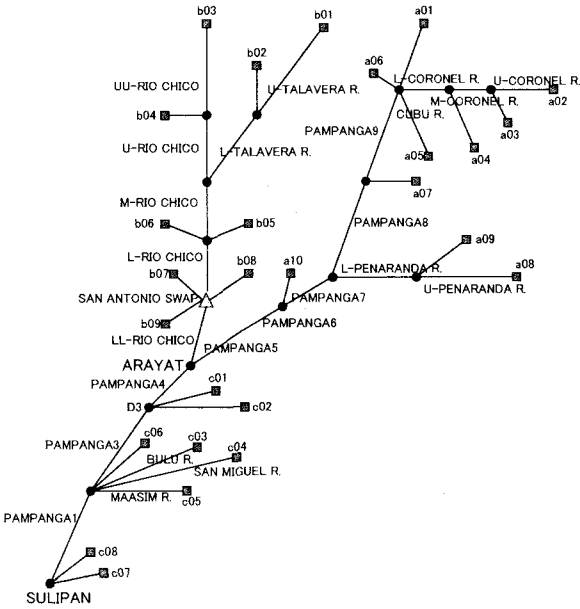


図-5 カンダバ湿地帯が無い場合の流出モデル

表-4 湿地帯が有る場合と無い場合との流出特性の比較

洪水 湿地帯の有無	1993 年 10 月			1998 年 10 月		
	有り		無し	有り		無し
地 点	スリパン	河口から 21 km	スリパン	スリパン	河口から 21 km	スリパン
ピーク流量 (m³/s)	1,994	3,422	4,380	1,524	2,885	4,132
ピーク流量低減率*	0.453	0.778	-	0.369	0.698	-
ピーク時間	10 月 9 日 13:00	10 月 9 日 14:00	10 月 7 日 20:00	10 月 27 日 6:00	10 月 27 日 14:00	10 月 25 日 8:00
洪水到達時間 (hr)	96	97	55	85	93	39
降雨総量 (百万 m³)	2,418	2,418	2,418	1,911	1,911	1,911
洪水総量 (百万 m³)	763	1,643	1,760	604	1,258	1,397
流出率	-	0.679	0.728	-	0.658	0.731
洪水容量低減率**	-	0.934	-	-	0.901	-

*, **: 低減率 = (湿地帯有り) / (湿地帯無し)

現況では湿地帯に流入した洪水は、湿地帯を南流してスリパン地点の東側のカルンピット地点から流出する。よって、湿地帯が有る場合と無い場合との洪水総量を比較検討するにあたって、スリパン地点およびカルンピット地点でのハイドログラフを合成したものを河口から 21 km の地点 (図-6 (b)参照) でのハイドログラフとして用いた。

アラヤット地点でのピーク流量の生起確率が 10 年規模に相当する 1998 年 10 月洪水の検討結果について述べると、カンダバ湿地帯での洪水貯留により、

- 1) 本川中流スリパン地点におけるピーク流量は、湿地帯が無い場合には 4,130 m³/s、湿地帯が有る場合には 1,520 m³/s であった。同地点におけるピーク流量は 37% に低減されている。
- 2) 湿地帯が有る場合、河口から 21 km 地点でのピーク流量は 2,890 m³/s であった。湿地帯が無い場合のスリパン地点でのピーク流量に対して、湿地帯が有る場合の河口から 21 km 地点におけるピーク流量は 70% に低減されている。
- 3) スリパン地点での洪水到達時間は、湿地帯が無い場合には 39 時間、湿地帯が有る場合には 85 時間であった。同地点における洪水到達時間は 2.2 倍になっている。

4) 本川中流スリパン地点における洪水総量は、湿地帯が無い場合には 1,397 百万 m³、湿地帯が有る場合で河口から 21 km 地点での通過洪水総量は 1,258 百万 m³ であった。河口から 21 km 地点における洪水総量は 90% に低減されている。ということが判明した。

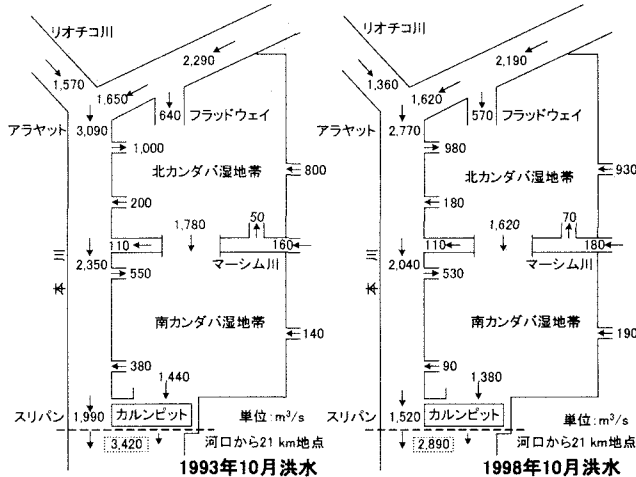


図-6 (b) 湿地帯が有る場合のピーク流量

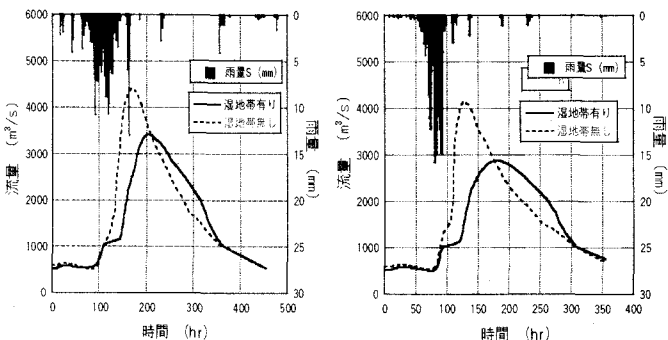


図-6 (a) 湿地帯が有る場合と無い場合のハイドログラフ

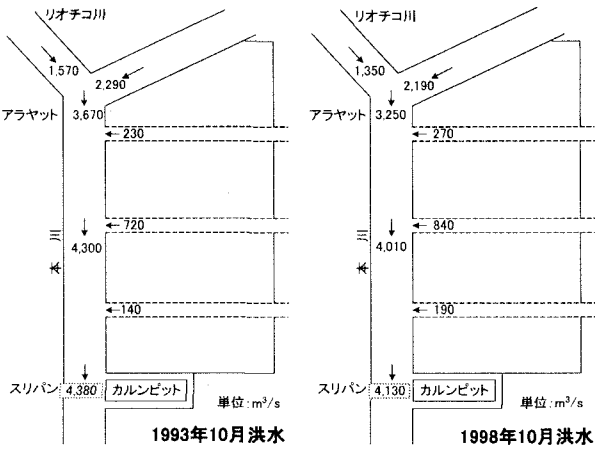


図-6 (c) 湿地帯が無い場合のピーク流量

解析の結果、1998 年 10 月洪水時のスリパンおよびカルンピットにおける洪水総量は湿地帯が無い場合に対して 139 百万 m³ 低減されており、これをスリパンの流域面積で除すると 19.5 mm となる。つまり 1998 年 10 月洪水時の流域平均総雨量 268 mm のうち 19.5 mm をカンダバ湿地帯は貯水していたこととなる。

バンパンガ川のカンダバ湿地帯と日本の利根川中流にある渡良瀬遊水地の規模を比較する。表-5 に示すとおり、カンダバ湿地帯は利根川流域の約 2/3 の流域面積であるバンパンガ川流域において、渡良瀬遊水地の面積の約 15 倍、総貯水容量の約 10 倍の規模を持つ。また、1998 年 10 月洪水時のスリパンおよびカルンピットにおいて低減された洪水総量 139 百万 m³ は、東北地方の雄物川水系玉川ダム（重力式コンクリートダム、堤高 100 m、堤頂長 441.5 m）の洪水調節容量 107 百万 m³ に相当する。

表-5 カンダバ湿地帯と渡良瀬遊水地の諸元

	バンパンガ川	利根川
流域面積 (km ²)	10,503	16,840
流路延長 (km)	260	322
	カンダバ湿地帯	渡良瀬遊水地 *
面積 (km ²)	486	33
総貯水容量 (百万 m ³)	2,002.8	2 × 10 ²

* 参考文献 4) より

3. カンダバ湿地帯の土砂制御機能

(1) 流砂量

バンパンガ川においては、1980 年に河床材料の粒度分布調査が行われ、掃流砂量・浮流砂量の経験式が作成されている。表-6 に示す河床材料の粒度分布調査結果のとおり、河口からアラヤット地点までの河床材料の粒度分布はほぼ一様であり、流下方向での大きな変化はない。河床材料の平均粒径および中央粒径は微細粒に相当する。

表-6 河床材料の平均粒径および中央粒径

	単位：mm	
地 点	d _m	d ₅₀
アラヤット	0.10	0.07
スリパン	0.10	0.07
河 口	0.11	0.07

流砂濃度のサンプリングは 1980 年調査時に数回行われているが、流量と流砂量の関係式を求めるにはサンプル数が不十分であるとして、掃流砂量を佐藤-吉川-芦田式、浮流砂量を Englund-Hansen 式により算定している。

全流砂量 $Q_s=Q_B + Q_{SL}$

掃流砂量 $Q_B=K_1Q^{P_1}$

浮流砂量 $Q_{SL}=K_2Q^{P_2}$

表-7 流砂量算定式

地 点	K ₁	P ₁	K ₂	P ₂
アラヤット	1.479×10 ⁻⁶	0.990	1.986×10 ⁻⁶	1.610
スリパン	2.239×10 ⁻⁸	1.652	2.296×10 ⁻¹⁰	2.903

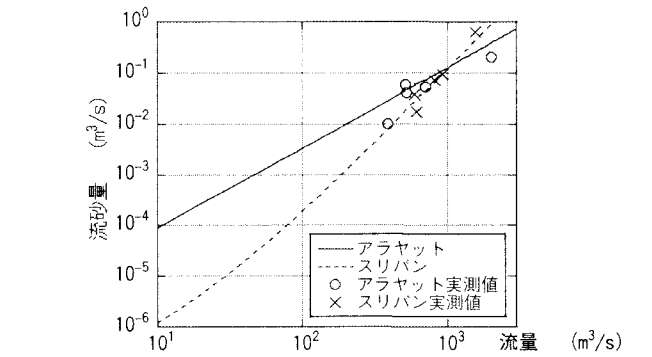


図-7 流砂量と流量との関係

(2) 堆砂機能の解析

アラヤット及びスリパンにおける河川流砂量を 1987 年から 2000 年までの観測日流量と先述の流砂量式により求め、アラヤットでの流砂量とスリパンでの流砂量との差分を 2 地点間でのカンダバ湿地帯への浮流砂流入量とした。流砂量算定の結果、アラヤットでの流砂量は 928,200 m³/年、河川からカンダバ湿地帯へ洪水が流入する 6 月から 12 月にかけてのアラヤットからスリパンまでのカンダバ湿地帯への浮流砂流入量は 259,800 m³/年との結果を得た。

アラヤット地点の上流にあるフラッドウェイから湿地帯への浮流砂流入量を算定した。フラッドウェイからの洪水流入期間は地形条件よりアラヤットからスリパンまでの流入期間とほぼ同一であり、洪水流入量は流出解析によるとアラヤットからスリパンまでの区間におけるカンダバ湿地帯への洪水流入量の約 50 %に相当する。従って、

フラッドウェイからカンダバ湿地帯への浮流砂流入量 ≒ 259,800 m³/年 (6 月から 12 月にかけての

アラヤット - スリパン 間浮流砂流入量) × 0.5^{1.61}

= 85,100 m³/年

ここで、流砂量と流量とは指数関数的な関係にあることから、洪水流入量比 0.5 に 1.61 乗 (1.61：アラヤット地点での浮流砂量式の P₂) して求めた。

よって、カンダバ湿地帯への全浮流砂流入量は 344,900 m³/年と推定され、これによるカンダバ湿地帯での堆砂厚を以下のとおり求めた。

カンダバ湿地帯での堆砂厚

≒ 344,900 m³/年 / 301.0 km² (1998 年 10 月洪水時の

カンダバ湿地帯での湛水面積) = 0.11 cm/年

となった。ここで、1998 年 10 月の洪水時のカンダバ湿地帯での湛水面積は、カンダバ湿地帯の水位-面積曲線式および当時の実測最大水位 EL. 6.62 m により算定した。

湿地帯における実際の堆砂厚は場所により異なり、とりわけフラッドウェイにおける堆砂は著しい。2001 年 8 月の現地踏査の際、フラッドウェイが堆砂の進行により天井河川の様相を呈していることを確認した。

表-8 流砂量算定結果

単位：10 ³ ×m ³			
地点 月	アラヤット ①	スリパン ②	①-②
1	5.5	1.4	4.1
2	3.8	0.4	3.4
3	3.9	1.0	2.9
4	4.8	3.8	1.0
5	3.6	1.8	1.8
6	52.2	31.4	20.8
7	159.8	99.8	60.0
8	175.0	126.3	48.7
9	221.4	145.6	75.8
10	195.8	161.2	34.6
11	59.5	53.6	5.9
12	42.9	28.9	14.0
計	928.2	655.3	272.9
6月～12月のアラヤット－スリパン間の 流砂減少量			③ 259.8
6月～12月のアラヤット－スリパン間の 流砂量減少率			0.28*

*③/Σ①

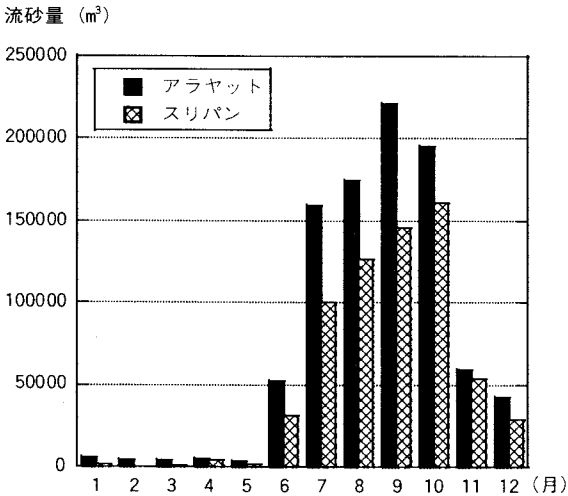


図-8 月別流砂量

4. おわりに

本研究では、カンダバ湿地帯による洪水流量の軽減効果を明らかにするための方法として、湿地帯が有る場合と無い場合で流出解析を行い、両者の流出特性を比較検討した。また、1987 年から 2000 年までの観測流量および流砂量式を基に、湿地帯における年堆砂量を推算した。

アラヤット地点でのピーク流量の生起確率が 10 年規模に相当する 1998 年 10 月洪水について検討した結果、カンダバ湿地帯に関して以下の知見が得られた。

- 1) 本川中流スリパン地点におけるピーク流量は、湿地帯が無い場合には 4,130 m³/s、湿地帯が有る場合には 1,520 m³/s であった。同地点におけるピーク流量は 37%に低減されている。
 - 2) 湿地帯が有る場合、河口から 21 km 地点でのピーク流量は 2,890 m³/s であった。湿地帯が無い場合のスリパン地点でのピーク流量に対して、湿地帯が有る場合の河口から 21 km 地点におけるピーク流量は 70%に低減されている。
 - 3) スリパン地点での洪水到達時間は、湿地帯が無い場合には 39 時間、湿地帯が有る場合には 85 時間であった。同地点における洪水到達時間は 2.2 倍になっている。
 - 4) 本川中流スリパン地点における洪水総量は、湿地帯が無い場合には 1,397 百万 m³、湿地帯が有る場合で河口から 21 km 地点での通過洪水総量は 1,258 百万 m³であった。河口から 21 km 地点における洪水総量は 90%に低減されている。
- カンダバ湿地帯における堆砂量については、
- 5) 湿地帯上流のアラヤット地点における年流砂量は 928,200 m³/年であり、パンパンガ川からカンダバ湿地帯への浮流砂流入量は 344,900 m³/年である。ということが判明した。

参考文献

- 1) JAPAN INTERNATIONAL COOPERATION AGENCY: FEASIBILITY REPORT ON THE PAMPANGA DELTA DEVELOPMENT PROJECT, MAIN TEXT, APPENDIXES VOLUME I, II, February 1982
- 2) NIPPON KOEI CO., LTD. IN ASSOCIATION WITH NIKKEN CONSULTANTS, INC. AND BASIC TECHNOLOGY AND MANAGEMENT CORPORATION: TECHNICAL NOTES PART I HYDROLOGICAL DATA BOOK PAMPANGA DELTA DEVELOPMENT PROJECT, March 1989
- 3) NIPPON KOEI CO., LTD. IN ASSOCIATION WITH NIKKEN CONSULTANTS, INC. AND BASIC TECHNOLOGY AND MANAGEMENT CORPORATION: INVESTIGATION REPORT ON FLOOD BY TYHOON LOLENG IN PAMPANGA RIVER BASIN, December 1998
- 4) 国土交通省 関東地方整備局 利根川上流工事事務所：利根川パンフレット, 2001
- 5) (財)日本ダム協会：ダム年鑑 1999
- 6) US Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center：Hydrologic Modeling System HEC-HMS User's Manual Version 2.1, January 2001
- 7) US Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center：Hydrologic Modeling System HEC-HMS Technical Reference Manual, March 2000

(2002. 4. 15 受付)