比国パシッグ川支流・水路に堆積する 汚泥と水質の現状

東 さやか¹・Nasroden PAGAYAO²・Maria Antonia N. TANCHULING³・
日比野忠史⁴

¹株式会社ディーエヌシー 部長 (〒810-0041 福岡県福岡市中央区大名 2-12-15)

²広島大学大学院修士 国際協力研究科 (〒739-8529 広島県東広島市鏡山 1-5-1)

³Ph.D., University of the Philippines Professor (Diliman, Quezon City 1101, Metro Manila, Philippines)

⁴正会員 広島大学大学院准教授 工学研究科 (〒739-8527 広島県東広島市鏡山 1-4-1)

E-mail: hibinot@hiroshima-u.ac.jp

パシッグ川はマニラ首都圏の中心をラグナ湖からマニラ湾に向かって東西に流れている。下水処理施設の未整備によりパシッグ川の支流・水路には生活排水が直接流入し、47の支流・水路では過剰な有機物により著しい水質汚濁の問題がある。本論文ではパシッグ川支流の水質特性と直面する問題についてまとめた。その結果、雨と潮位変動に伴った流れが支流・水路でのBOD、CODの持空間の分布を変化させていること、CODが平均的に100を越え、BOD/CODが1/2程度に分布する水塊には、常時のBOD(生活排水)の流入に加え、底泥からのCODの拡散が年を通して継続的に起こるため、CODには底泥起源の還元物質の含有率が高いことを明らかにした。

Key Words: sewage, water quality, sediment, rehabilitation, tributaries, PRRC

1. はじめに

パシッグ(Pasig)川はマニラ首都圏(メトロマニラ)の中心をラグナ湖からマニラ湾に向かって東から西に流れる全長約27kmの河川である。サン・ホアン(San Juan)川とマリキナ(Marikina)川が主な支流であるが、これらを含んで全長約1794kmの47支流・水路(estero)が複雑に入り組んでいる。マニラ湾での潮差は大潮期に1.0~1.5m程度、小潮期には約0.5mある。海水はラグナ湖まで遡上しており、乾季になる11月頃に海水の遡上量が増大していく。マニラ首都圏の人口は約1,200万人であるが、下水処理施設はその20%にも満たない状況である。パシッグ川の支流・水路には生活排水が直接流入し、支流・水路の全長にわたって過剰な有機物により汚濁している。パシッグ川の水質汚濁の65%が生活排水、30%が工場排水である¹⁾。水路床には有機泥が厚く堆積し、ガスの発生、スカムの浮遊が頻繁に起こるために、水路周辺での悪臭は人々の健全な生活を阻害している。

パシッグ川管理については、主にマニラ首都圏開発庁(MMDA)が担い、洪水対策についてはMMDAに加え公共道路事業省(DPWH)、水質管理については環境天

然資源省(DENR)および保健省(DOH)がそれぞれ担っている。ただし、パシッグ川の再生、水域の環境改善、観光利用については、大統領府下に組織された複数の省庁によるコンソーシアムであるパシッグ川再生委員会(Pasig River Rehabilitation Commission: PRRC)が担っている。PRRCはパシッグ川環境整備(不法住居の撤去、ゴミ回収等)、水質改善を主な事業としている。

著者らはパシッグ川支流のestero de Paco(パコ水路)において石灰灰造粒物を用いた河川環境の修復事業(パイロット事業)を計画している。パコ水路はマニラ湾からパシッグ川の約4.5km上流地点でマニラ市内を南に流れる全長約3kmの水路である。本論文はパイロット事業を成功に導くために把握したパシッグ川流域の特性についてまとめたものである。

2. 支流・水路の整備事業

パシッグ川支流・水路の整備については、PRRCが定めた計画に基づき、支流・水路の環境整備を順次進めている。2014年~2015年度は、年約4.8億ペソ(約12億

(8月20日はTY1312, 10月10日はモンスーンによる水位上昇, 両洪水によりマニラの都市機能は麻痺した)

図-1 マニラ湾での潮位変動 (雨量と大潮潮差により4期間に分けられる)

円)をPRRCによる支流・水路の整備費として支出している。2009年9月の台風オンドイ(TY0916)により、マニラ首都圏が大規模な洪水被害を受けた。特に水路上に不法に簡易住居を築いて生活する人々が深刻な被害を受けるとともに、水路の機能不全が被害の拡大につながったと指摘されたことから、2010年以降、水路上で生活する住民の移転、支流沿いの遊歩道整備、廃棄物や堆積物を取り除く浚渫等が中心となっている。2015年までに、整備予定のパシッグ川支流・水路のうち52.73%の整備を完了したと報告しており2016年度末までのターゲットを60.85%と定めている(National Expenditure Program 2016, PRRC部分)。

3. パシッグ川水系の特性

(1) マニラ湾での潮位変動と水系内の流れ場

図-1にマニラ湾での潮位変動(2013年)を示した。マニラ湾では、大潮時の干満差が一定ではなく、5~8月と11~1月の2期間に干満差が大きくなる特性がある。年較差は日本と同程度の40~50cm程度あり、7~9月に最大となる。潮汐による海水遡上はパシッグ川水系内に汚泥の堆積を促進する一因となると考えられる²⁾。淡水(降雨)流入の減少と海水の遡上(塩分濃度の上昇)は懸濁有機物を沈降させ、汚泥の堆積を加速させる³⁾。ラグナ湖水位は降雨によって水位上昇が起こるため、海水面上昇に伴う海水遡上は乾季に強くなり、海水遡上はラグナ湖まで至る。大潮干満差の大きい期間は乾季の12~2月と雨季の5~8月、小さい期間は乾季の3~4月と雨季の9~10月の4つの期間に分けられる。本論文ではこれらの期間を乾①季、乾②季、雨①季、雨②季と呼ぶ。

図-1に示した潮位変動には洪水に伴う水位上昇が

明確に現れている。2013年にはマニラの都市機能を麻痺させる台風、モンスーンによる洪水が2度あった(8月20日、10月10日)。最大潮位は4mを超えるが、洪水下の最大潮位は大潮満潮水位と同程度である。大潮満潮程度で都市機能が麻痺する規模の洪水となるのは支流・水路の本川への接続が悪いこと、支流・水路の流下能力が低いことがあげられる。マニラでは規模の大きい降雨によっても道路の冠水がいたる所で起こり、冠水状態が数日間続く等、排水能力も低い状態にある。水路の氾濫は水底汚泥を水路周辺に高濃度に拡散させ、深刻な健康被害を招いている。

(2) 支流・水路での水質

PRRCの年次報告書(2014)ではパシッグ川の基本情報として河川長27km、支流・流域水路長1794km、平均河川幅91.2m、水深は0.5~5.5m、流量は12~275m³/sとなっている。水深、流量の年較差は乾季と雨季で流れ場が大きく変化するためである。水質(比国環境天然資源省基準)は"Class C"と報告されているが将来的な目標値としてとらえるべきである。5年間(2009~2014)の水質平均値はBOD 30.79mg/L、糞便性大腸菌 2.72×10⁸MPN/100mL、DO 2.85mg/Lである¹⁾。

図-2にパシッグ川支流のサン・ホアン川(図-3、マニラ湾河口から約9km上流で北から合流)流域13地点(表層)での(a)糞便性大腸菌の2012年1月~8月(乾季~雨季)での月変動、(b)COD~ORP関係(2012年の12回の平均値)を示した⁴⁾。大腸菌、CODとも極めて高く、河川水にも関わらずORPが負の状態にある。各地点での大腸菌数はパシッグ川本川での5年間の平均値よりも低い値を示しており、サン・ホアン川が大腸菌の主たる汚染源ではないと予想される。各地点において季節変動に関して一定の傾向は現れていないが、パシッグ川の接続地点に近い3~7地点と上流部の10~13地点で10⁸MPN/100mLを超える月が現れている。下流(3~7地

図2 サン・ホアン川流域 13 地点での 2012 年の水質変化 (数字の大きい側が上流)

図3 パシッグ川河口部周辺の水路網

(図3、図4はグーグルマップを利用して作成)

図4 パコ水路の観測点 (St.1～20, 数値 : m は水路床高)

点)では大潮時の干満差(大潮較差)の小さい3～4月に高くなる傾向がある。海水遡上のある乾季であっても2月中旬～5月初旬(乾②季)では大潮較差が小さいために乾①季に比較して低い水交換能となり、接続域においてパシッグ川への流下が制限(死水域の形成)されることが考えられる。糞便性大腸菌の増加は生活排水の放流,または増殖が原因である。海水の遡上する乾季には支川上流はマニラ湾から離れて位置しており,河川水が支流上流に輸送され糞便性大腸菌の集積が起こる(生活排水が流下し難い)と考えられる。

CODは有機物の他に有機物の嫌気分解(消化)によって生成された還元物質(ReS)が含まれる。ORPが水中において負の電位(還元状態)にあることは,ReSの生成が継続していることを示している。また,COD～ORP関係では酸化状態($ORP > 0$)におけるCOD量から50mg/L程度のCODに対応する有機物が含有されていると考えられる。さらにCOD/BODは約1/2(図-5(a-2)参照)であり,CODには生物分解され難い有機物(UOM)がBODと同程度含まれていると推定される。

(3) 貧困と汚濁の集積と拡散

水路近傍は貧困層の生活の場であり,水路は下水道でもある。不法住居の撤去は洪水の流下能力の向上や下水

の直接放流の制限に繋がる。しかしながら,永年にわたり堆積した有機汚泥や流入負荷は不法住居の撤去後にも継続的な問題として残っている。臭気汚染はこれらの汚泥を起源としており,水路周辺の臭気問題は不法住居の撤去と同時に有機汚泥処理を行うことで解決に向かうことができる。日常的に起こる道路の冠水は広い範囲に臭気を拡散している。貧困地域においては狭い空間においても多くの人々の生活を担う場所となる。生活排水は水路に流すことが最も清潔な手段であるため,水路周辺は貧困層の密集地となり易い。

都市貧困地域では,そこに暮らす人口の正確な把握が困難であるため,汚水の流入量の把握も困難な状況である。環境保護区(EPAs)の設定により,行政が不法住居の撤去および住民の移転を行った後も,首都圏郊外である移転先の雇用の機会が少なく,生計手段の欠如を理由に再び元の住居周辺に戻り,知人や親戚の住居に身を寄せて暮らすケースも多い。また,クリスマスが近づくと,マニラ首都圏の高級住宅街で物乞いをするために,一時的にマニラ首都圏に滞在する地方の貧困世帯も多数見られる。さらに選挙時期には,いわゆる「票買い」により,マニラ首都圏に一時的に転居・滞在するため,路上で生活する人々が増えるという独特の問題もある。

(a) EPAs 設定以前のパコ市場前水路 (左側がパコ市場)

(b) EPAs 設定後(2016.5)のパコ市場前水路 (右側がパコ市場)

(c) 底泥から発生するガス (2016.5)
写真-1 Estero de Paco (パコ) 水路の状況

表-1 パコ市場前水路での水質特性 (2013 年 1 月測定)

Parameters	Paco	Class C
BOD (mg/L)	46	7(10)
COD (mg/L)	102	
TSS (mg/L)	41	
Surfactant (mg/L)	3.43	0.5
OIL & Grease (mg/L)	1.00	2
Nitrate as N (mg/L)	9.60	10
Ammonia (mg/L)	4.18	
Phosphate as P (mg/L)	17.23	0.4
Phenolic Substances (mg/L)	0.043	0.02
Chloride (mg/L)	52	350
Arsenic (mg/L)	<0.03	0.05
Cadmium (mg/L)	0.1324	0.01
Chromium (mg/L)	<0.0144	0.05
Cyanide (mg/L)	0.76	0.05
Lead (mg/L)	<0.006	0.05
Mercury (mg/L)	0.00031	0.002
Total Coliform (MPN/100 mL)	35,000,000,000	5,000
Fecal Coliform (MPN/100 mL)	35,000,000,000	
Copper (mg/L)	<0.004	0.05
pH	6.87	6.5-8.5
DO (mg/L)	0	5.0

うに見える。水面に浮かぶ植物群は現在では機能していないが、水質浄化のリアクターとして設置され、親水性の高い水路の景観を感じることができる。ただし、リアクターとしての機能が発現されていないため、水は黒く濁り水面にはスカムやバイオフィルム（藻類）が浮遊している。さらに、底泥からはガスの発生（写真(c)）があり、極めて強い臭気が放たれている。不法住居の撤去は洪水リスクを低減し景観の回復に十分な効果をもたらす。しかし、環境保護の観点からは不十分であり、蓄積された汚泥と現在も流入する生活排水対策が必要とされている。

4. パコ市場前面での水底質

(1) 不法住居撤去と環境保護

TY0916 洪水をきっかけにして、2015 年までに 32.6km 区間に EPAs が設けられている。パコ水路では EPAs の最初の整備水路として 2010 年から水路脇の 3m 区間が地役権として設定されている。図-4 にパコ水路の外観と河床高、写真-1 に(a) EPAs 設定以前と(b) EPAs 設定後 (2016 年 5 月) のパコ市場前面水路 (図-4 の St. 10) の状況、(c) 底泥から発生するガスを示した。図-4 中に示した数値は UN (St. 20), Paco (St. 10), MR (St. 2) 周辺の水路床高である。パコ水路の河床勾配は 4m/3km 程度であるがパッシング川に近い 300m を除くと 2m 程度の標高差でしかない。写真(b)にあるように EPAs 設定後水路から不法住居やゴミが撤去され、流路は確保されたよ

(2) 水底質特性

a) 測定項目の特性

本調査では 2013 年の乾②季 (4/24, 5/7) と雨①季 (5/23, 6/11, 7/11, 8/8), 雨②季 (10/7) に計 7 回の DO, BOD, COD, TDS (全溶存物質) が、図-4 に示される 20 地点 (表層) において測定された⁵⁾。TDS は ReS とその他の溶存物質、COD は ReS と有機物 (BOD, UOM) の和を測定している。酸素を直接消費する ReS が存在する場 (還元状態) では酸素の酸化還元電位が高いため積極的な酸素消費がある。

表-1 に 2013 年 1 月に測定されたパコ市場前水路 (St. 10) での水質特性を示した。水質は Class C 基準と大きな差がある。COD は 102mg/L, BOD が 46mg/L, DO が 0mg/L である。糞便性大腸菌にいたっては 3.5×10^{10} MPN/100mL が側定され、図-2 に示したサン・ホアン川流域と比較すると最も高い測定値に属している。酸素の混入が容易に起こる河川において BOD/COD が 1/2 以

図-5 パコ水路（上、中、下流）での(a)COD, (b)DOの月変化

図-6 パコ水路での水質特性（地点別表示で大きめのシンボルは図-5に示した地点を表わす）

下であるのは底泥の酸素消費（ReS 生成）能力が高い、または UOM の含有率が高いことを表わしている。N, P の 9.6mg/L, 17.3mg/L と極めて高い濃度は、有機物の活発な分解（ReS 生成）があることを裏付けている。

b) 水質の季節的、場所的変動

図-5 には 2013 年に測定されたパコ水路での COD, DO の月変化（0 は欠測）が示されている。図から上流にある UN (St. 20) と中下流にある Paco (St. 10), MRF (St. 2) で COD の変化傾向が異なること、乾②季と雨②季の順に DO が低くなっていることがわかる。

図-6 には(a)COD~BOD, (b)TDS~DO, (c)COD~DO 関係が、(-1)季節別、(-2) 地点別に示されている。図では St. 1~8 を下流, St. 9~16 を中流, St.17~20 を上流として示している。図(a-2)中のドットはサン・ホアン川流域での測定値（図-2）である。COD, BOD, TDS, DO 間の関

係は空間的、時間的に特徴のある変化をしている。TDS の成分は雨①季、雨②季と乾②季で異なり、乾②季に DO/COD 勾配（図(c-1)中の実線）が小さいことから、乾②季には ReS による酸素消費の場が形成されると推定される。さらに、上流（St. 17-20）側では海水遡上によると考えられる高い TDS の水塊が現れており、乾②季にはパコ水路上流まで海水遡上があるが、中～上流までには至っていないことがわかる。

溶存酸素の低下は雨季にも継続して生じており、雨②季になる 10 月においても、数 mg/L まで DO の低下がある。雨季には表層からの DO 混入が活発にあるにも関わらず高い DO 消費があるのは、水層において嫌気分解が継続していることを示唆している。COD~BOD 関係（図-6(a-2)）において BOD/COD 比の高い水塊では COD~DO 関係（図-6(c-2)）が右側にずれており（図間で曲線で囲

んだ範囲が対応), 雨①季に BOD の供給が多いこと, 水路に流入した有機物 (BOD, UDM) は乾季に St. 1 側で集積 (堆積) し, 雨季になるとパシグ川方向に輸送される流れの構造があると推定される. また, これらの点 (曲線範囲) を除けば, COD~DO 間に一意的な関係が見られる. 水路全域において DO/COD 勾配が乾季 (実線) よりも雨季 (点線) に大きくなっており, COD の起源が堆積有機物 (UOM, ReS) にあること, 雨季には DO 供給が伴うことから高い DO/COD 勾配 (図 4(c)中の点線) を形成すると考えられる.

c) 底質の状態

パコ市場前面水路での通常時の表面流速は 10cm/s 程度である. 底泥には IL が 32.5%, 油分が 576mg/L が測点されており, 高含水比の真黒い還元泥が約 1m 堆積している. COD が平均的に 100 を越え, BOD/COD が 1/2 程度に分布する水塊では常時の BOD (生活排水) の流入に加え, 底泥起源の COD (ReS) の溶出に強く依存している. BOD/COD 比の変化が小さいのは, 年を通して BOD の供給と底泥からの COD の拡散が継続的に起こっていることを示している. この傾向はサン・ホアン川での水底質と同様であり, 生活排水とともに堆積した有機泥の影響が強く現れている. 支流・水路のいたる場所が大腸菌を増殖させる栄養源となっており, 流入下水と堆積汚泥の削減は緊急な課題である.

5. おわりに

本論文ではパシグ川の支流であるパコ水路における水底質浄化プロジェクトを成功させるために必要なパコ水路周辺状況と水底質について調査を行なった. 以下に本研究で明らかにした項目をまとめる.

- (1) 大潮高潮位 (HWL) は乾季と雨季の後半で低く, 乾季と雨季の前半で高くなっており, 4 半期毎に変化し

ている. これにより, 水路での海水の遡上形態は各期によって異なっている

- (2) 酸素の低下 (雨②季の10月でも, 5mg/L以下のDO) は雨季にも生じている. 乾②季に上流 (St.1~8) で BODの供給が多く, 雨①季になると中上流 (パシグ川方向) に輸送される. 乾②季は貧酸素状態にあり, CODはReSが主体の成分となっている.
- (3) 水路に放流された BOD 負荷は潮位差の小さい乾季にパシグ川からの海水遡上により水路内に蓄積される. COD が平均的に 100 を越え, BOD/COD が 1/2 程度に分布する水塊には, BOD (生活排水) が堆積した底泥を起源とする Res, UOM が COD の含有率を高くしている.

謝辞: 本研究は JSPS 科研費 JP15H05221 の助成を受けている. ここに記して謝意を表する.

参考文献

- 1) Pasig River Rehabilitation Commission (PRRC): Annual report, retrieve from <http://www.prrc.gov.ph/>.
- 2) 中下慎也, 加納一成, TOUCH NARONG, 日比野忠史: 沿岸域に拡散・堆積する油脂類の変動特性の解明, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 70, No. 2, pp. 1_1086-1_1090, 2014.
- 3) 阿部真己, 今川昌孝, 駒井克昭, 日比野忠史: 河川干潮域での有機泥輸送における塩分の働き, 第54巻, 水工学論文集, pp.1645-1650, 2010.3.
- 4) Ariel Blanco, Amado Alarilla1, Ricajay Dimalibot, Maria Antonia N. Tanchuling, Merliza Bonga, Enrico C. Paringit: SPATIO-TEMPORAL ANALYSIS OF WATER QUALITY VARIATIONS IN SAN JUAN RIVER AND ITS TRIBUTARIES USING GIS, 6th Asean Environmental Engineering Conference, 2013.
- 5) Clemente, E., Tanchuling, M. A.: Dissolved Oxygen Modeling of Estero de Paco (Final technical report for Department of Science and Technology), 2014.

(2017.2.2 受付)

SEDIMENT AND WATER QUALITY IN THE PASIG RIVER TRIBUTARIES AND CREEKS IN THE PHILIPPINES

Sayaka AZUMA, Nasroden PAGAYAO, Maria Antonia N. TANCHULING and Tadashi HIBINO

The Pasig River is the main river in Metro Manila, Philippines that connects Laguna de Bay with Manila bay. Due to lack of a proper sewage system, its 47 tributaries and creeks are contaminated by untreated sewage water. This paper summarizes the characteristics and issues of the Pasig river tributaries. This study shows that BOD and COD of the Estero de Paco are affected both by rainfall and tidal change. Thus BOD load of the Estero is accumulated in the Estero due to adverse current. Moreover, the water mass where the average COD is over 100mg/L and BOD/COD is 1/2 indicates the high level of COD from sludge as COD is released from the sludge at the bottom throughout the year in addition to the continuous effluent of BOD (domestic waste).