

<研究発表>

合流式下水道の雨天時の生物処理に関する検討

内田 翔¹, 宮崎 太一郎², 山下 尚之¹, 田中 宏明¹, 古屋 勇治³, 田中 良春³,

¹京都大学流域圏総合環境質研究センター(〒520-0811 大津市由美浜 1-2 E-mail: uchida@biwa.eqc.kyoto-u.ac.jp)

²いで株式会社環境コンサルタント事業部(〒550-0002 大阪市西区江戸堀 3 丁目 2-23 E-mail: myz20612@ideacon.co.jp)

³富士電機システムズ(株)(〒290-8511 千葉県市原市八幡海岸通 7 番地 E-mail: furuya-yuji@fesys.co.jp)

概要

現在、合流改善対策の中心は SS と SS 由来の BOD の除去であり、窒素・リンの除去を目的とした対策はほとんど行われていない。そこで、SS・BOD の他、窒素・リンを含む溶解性成分にも着目し、処理区の一部に合流式を含む下水処理場において雨天時調査を行ったところ、雨天時に特徴的な水質変動特性が見られた。また、生物反応槽へ流入する有機物濃度をリアルタイムに把握する方法として BOD バイオセンサの利用を検討した。その結果、活性汚泥を用いた微生物膜については、バイオセンサの BOD 推定値(BODs)と溶解性 BOD(D-BOD)との間に比較的良好な相関があり、BOD バイオセンサの簡易処理水への適用可能性が示唆された。

キーワード: 合流式下水道, 雨天時調査, 窒素, リン, バイオセンサ

1. はじめに

近年、合流式下水道からの雨天時未処理放流水による公共用水域の悪化が問題となっている。現在の合流改善対策の中心は、雨水吐における夾雑物対策と越流回数減少による BOD 負荷量の削減が目標である。また、下水処理場においては、高速ろ過や高速凝集沈殿などの雨天時処理技術が開発されている¹⁾。これらの主な除去対象は SS と SS 由来の BOD であり、窒素・リンの除去を目的とした対策はほとんど行われていないのが現状である。しかしながら、放流先が閉鎖性水域や重要な水資源となっている箇所では、富栄養化や消毒副生成物等の観点から、窒素・リンを含む溶解性成分の除去を目的としたより高度な処理対策が必要と考える。

下水処理場においてこれらの要求を満たす雨天時処理を考えた場合、既存の生物反応槽を利用し、雨天時下水全量を処理する方法が有用であると考えられる²⁾。しかし、現状では一日時間最大汚水量(1Q)を超える量の下水は、反応槽の MLSS 濃度の低下や、沈殿池での汚泥沈降性悪化による汚泥流出を防止するため、多くの場合簡易処理のみで放流されている。

雨天時にも生物処理を行うためには、降雨時に大きく変動する流入水の水質変動を把握する必要がある。また、降雨状況に対応した運転管理を行うため、流入水質変動をリアルタイムに把握する必要がある。そこで本研究では、処理区の一部に合流式を含む下水処理場で、雨天時に水質調査を行い降雨時の水質変動の特徴の把握を試みるとともに、BOD の代替計測手段として BOD バイオセンサの利用を検討した。

2. 雨天時水質調査

2.1 調査概要

下水処理場における雨天時の流入特性、簡易処理放流時の窒素・リンの挙動を把握するため、またバイオセンサの測定結果(BODs)との比較のため、雨天時の水質調査を行った。雨天時調査は、下水処理場への流入水と最初沈殿池流出水(以下、簡易処理水)を対象に行い、測定項目は BOD、溶解性 BOD(D-BOD)、SS、濁度、全窒素(T-N)、溶解性窒素(D-N)、アンモニア性窒素(NH₄⁺-N)、全リン(T-P)、溶解性リン(D-P)とした。また、全成分と溶解性成分の差を取ることで懸濁態 BOD(P-BOD)、懸濁態窒素(P-N)、懸濁態リン(P-P)を求めた。流入水と簡易処理水の採水地点、バイオセンサの設置地点を Fig.1 に示す。

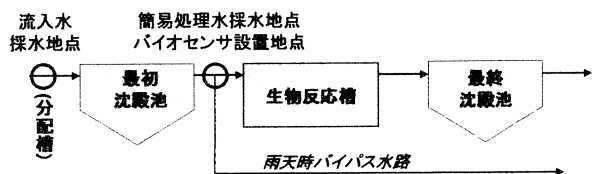


Fig.1 採水地点とバイオセンサ設置地点

2.2 調査結果

(1) 流入特性

1月13日から14日にかけて行った雨天時調査の調査日の降雨状況と流入量変化について Fig.2 に示す。1月13日は16:30頃から雨が降り始め、深夜にかけて1mm/hr前後の弱い雨が断続的に観測された。1月14日はやや強い降雨が観測され、12:00頃に晴天時平均流入量(約2,000 m³/hr)の4倍近い約8,000m³/hrに達するなど流入量が大幅に増加した。また、10:30~12:00に簡易処理放流が発生した。

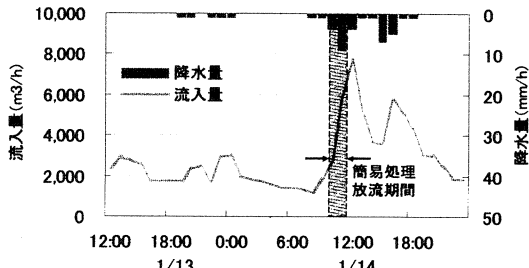


Fig.2 降雨状況と流入量変化

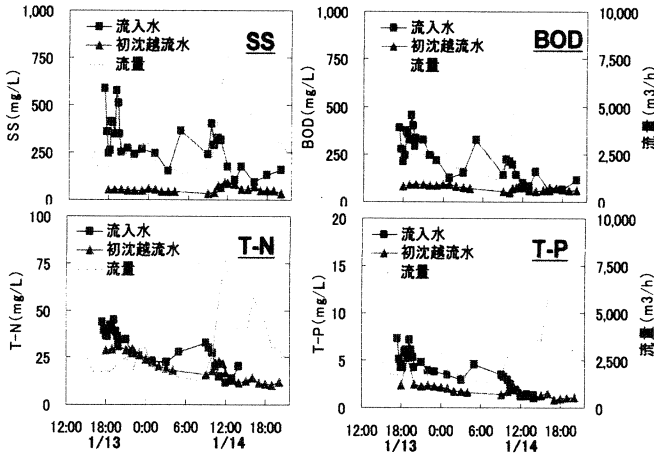


Fig.3 雨天時調査結果

このときのSS、BOD、T-N、T-Pの濃度変動をFig.3に示す。降雨初期の最大値は、SSで585mg/L、BODで453mg/L、T-Pで7.3mg/Lとそれぞれ晴天時の同時刻の約5倍、約4倍、約2.5倍となっていた。一方T-Nでは、降雨初期の最大値が42.3mg/Lと晴天時の同時刻の約1.8倍にとどまった。14日の降雨では、流入量の増加に伴って希釈され各水質項目の濃度が大きく減少した。

(2) 簡易処理放流水中の窒素・リン濃度

簡易処理放流時(簡易処理放流期間前後; 9:00~14:00)の簡易処理水の窒素・リンの形態別の濃度をFig.4に示す。簡易処理放流期間中に最大値T-N 23.2mg/L、T-P 2.2mg/Lとなり、それぞれ放流水の年平均値の約2.5倍、約8倍と高い値を示した。ただし1月14日の放流水に占める簡易処理水の割合は約6%であり、下水処理場からの放流水の濃度としては晴天時と同程度と思われる。

また、窒素については、T-Nの67%、D-Nの75%をアンモニア性窒素が占めていた。雨天時には、1Q超過分の下水中のNH₄⁺-Nはそのまま流出していると考えられ、硝化促進が雨天時処理の課題の1つとして挙げられる。

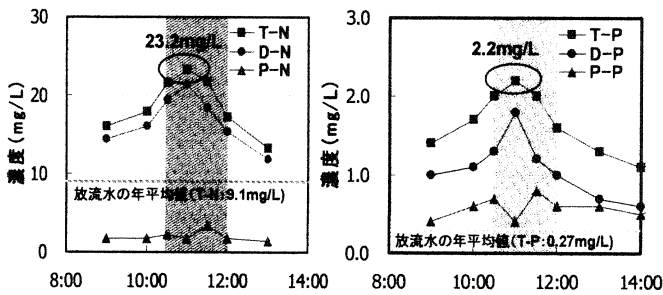


Fig.4 簡易処理放流時の窒素・リン濃度

3. バイオセンサを用いた簡易処理水のBOD連続測定方法の検討

3.1 装置の概要

本研究では、BOD連続測定装置として工場排水の監視等での実績のある王子計測機器社製「BF-2000」を用いた。本装置は、分子識別部位に微生物、信号変換部位にDO電極を用いたフローセル方式のBODバイオセンサである。DO電極表面に好気性微生物を膜状に成形したものを微生物電極として用いている。装置の概略図をFig.5に示す。

本装置では、試薬としてBOD標準液の他に、膜微生物へのpHの影響を除くための緩衝液、管路およびフローセル内の汚染除去のための洗浄液をそれぞれ使用する。検水および標準液は、緩衝液と一定の割合で混合した後、エアポンプにより曝気を行い、恒温槽に設けたフローセル内の微生物電極により測定を行う。本装置は、下水処理場内に設置して連続測定する仕様とはなっていないため、処理場内での連続運転に耐えるように、試薬やサンプリングユニット等を改良したものを使用した³⁾。

3.2 運転条件

この測定装置を最初沈殿池流出水路に設置し(Fig.1)、下水処理場の簡易処理水のBOD連続測定実験を行った。測定間隔は1時間とし、水路に浸漬した銅製メッシュストレーナ(1mm)を通して、採水ポンプにより採水した。

標準液は、グルコース・グルタミン酸混合液⁴⁾(以下、GGA)をBOD換算で100mg/Lに調製したものに、管路の汚染ならびに標準液の変質防止のため1mM相当のアジ化ナトリウムを加えたものを使用した。緩衝液は、pH7.0のリン酸緩衝液を使用した。洗浄液は、10μMのEDTAに水酸化ナトリウムを加えpH9.5に調製したものをを使用した。

検水ならびに試薬類の供給について、Fig.6のタイムチャートに示す。検水・標準液の供給時間は5分間とし、検水・標準液の測定前後には15分間の洗浄を行った。また10時間に1回、検水の管路を通して標準液を測定することにより、管路の汚染の程度を確認した。

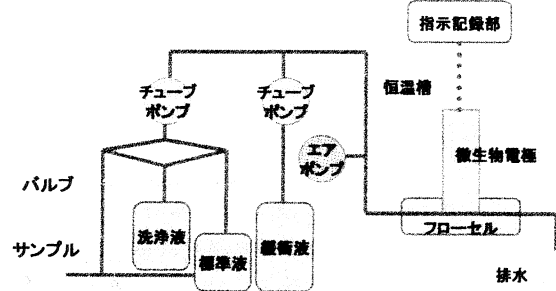


Fig.5 BODバイオセンサの概略図

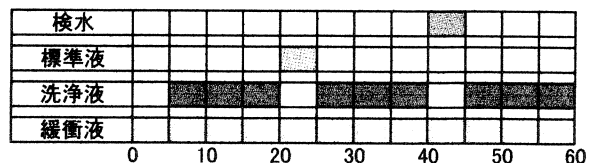


Fig.6 BODバイオセンサのタイムチャート

3.3 膜微生物の選定

本研究では、JIS K3602 で規定された酵母 *Trichosporon cutaneum* と、対象下水と同一処理場の活性汚泥を膜微生物として選定し、両者の対象下水連続測定への適用性を比較した。*Trichosporon cutaneum* は、ポリフッ化ビニリデン製の膜に固定化した微生物膜を使用し、活性汚泥は、簡易処理水に最も馴致していると思われる生物反応槽入り口付近の活性汚泥を採取し、*Trichosporon* 膜と同様の膜に固定した。

3.4 簡易処理水の連続測定結果

(1) *Trichosporon* 膜を用いた測定

簡易処理水の BODs 連続測定を行った結果とバイオセンサの応答値(出力値)を Fig.7, Fig.8 に示す。Fig.7 に示すように、標準液の BODs は、測定開始後 2 日目以降著しく低下しており、管路の汚染が進行していることが示唆された。また、簡易処理水の BODs は測定開始直後から急激に低下し、ほぼ 0 となった。Fig.8 に示すように、標準液の応答値は膜交換後 2 日程度で 1200digits に達し、その後緩やかに低下した。応答値の低下の原因としては、管路の汚染による GGA の管内での資化の可能性が考えられる。また、*Trichosporon* 膜は GGA は比較的良好に資化するものの簡易処理水はほとんど資化しないことが明らかとなった。

(2) 活性汚泥膜を用いた測定

膜微生物に活性汚泥を用いて、*Trichosporon* 膜による測定と同一条件で BODs 連続測定を行った。微生物の膜への固定は、生物反応槽から採取し 30 分自然沈降させた活性汚泥を 50 μ L 採取し、*Trichosporon* 膜と同じ膜に固定化した。固定化量は 0.3~0.6mg 程度(乾燥重量)であった。BODs 測定結果とバイオセンサの応答値を Fig.9, Fig.10 に示す。Fig.10 に示すように、活性汚泥膜では 5 日程度で標準液の応答値が最大値を示し、その後漸減する傾向が見られた。*Trichosporon* 膜と比較して標準液に対する応答が緩やかで、応答値のピークは *Trichosporon* 膜の半分程度であった。ま

た、膜交換後 1 日程度においては標準液よりも簡易処理水に対して大きな応答を示した。

これらのことから、活性汚泥膜は標準液に対する資化性は *Trichosporon* 膜と比較して小さいものの、簡易処理水に対する資化性は高いと思われる。ただし Fig.9 に示すように、標準液に対する応答性が增大している期間(膜交換直後)においても、簡易処理水の応答値が漸減傾向にあることから、膜内の生物相が標準液を資化しやすい生物相に変化していることが考えられる。そのため、より簡易処理水に近い成分の標準液の使用を検討する必要がある。

3.5 バイオセンサの応答特性

晴天時、雨天時におけるバイオセンサの応答特性を明らかにするため、それぞれの場合において BOD、D-BOD と BODs との関係を考察した。

(1) 手分析との比較

BOD、D-BOD と BODs 値の比較を Fig.11, Fig.12 に示す。全体として BOD > D-BOD > BODs の傾向が見られたが、BODs 値は BOD、D-BOD とほぼ同様の濃度変動を示し、簡易処理水の濃度変動をとらえていることが確認された。

(2) 晴天時・雨天時の応答特性

調査期間中の晴天時の BOD、D-BOD と BODs との関係を求めると、BOD と BODs との相関は $r^2=0.40$ ($n=94$)、D-BOD と BODs との相関は $r^2=0.72$ ($n=45$) となり、BODs 値は BOD よりも D-BOD と比較的高い相関が得られた。このことから、晴天時において D-BOD の推定にバイオセンサの利用可能性が高いことが示唆された。

一方雨天時についても同様に求めると、BOD と BODs との相関は $r^2=0.64$ ($n=28$)、D-BOD と BODs との相関は $r^2=0.33$ ($n=20$) であった。晴天時と比較して D-BOD と BODs との相関は低く、降雨状況に伴いバイオセンサの応答特性が変化することが示唆された。ただし、取得できた降雨時のデータが少ないため、更なるデータ取得と検討が必要である。

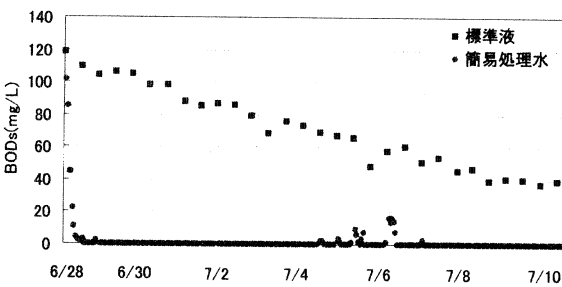


Fig.7 BODs (Trichosporon 膜)

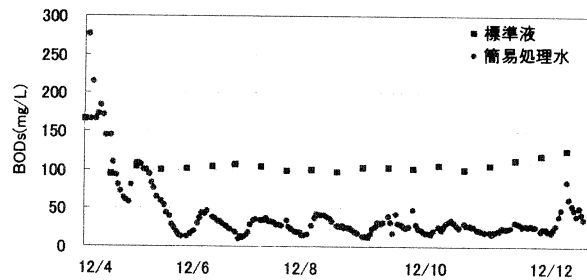


Fig.9 BODs (活性汚泥膜)

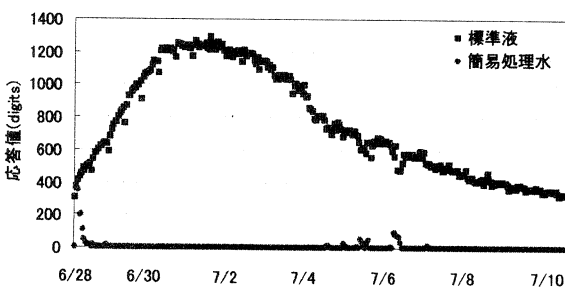


Fig.8 応答値 (Trichosporon 膜)

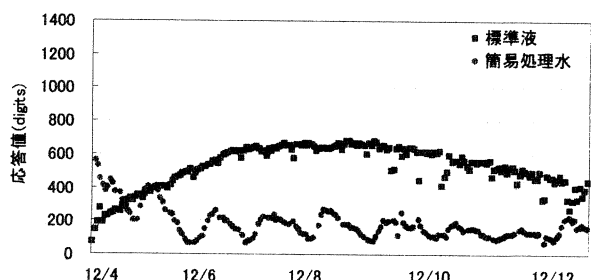


Fig.10 応答値 (活性汚泥膜)

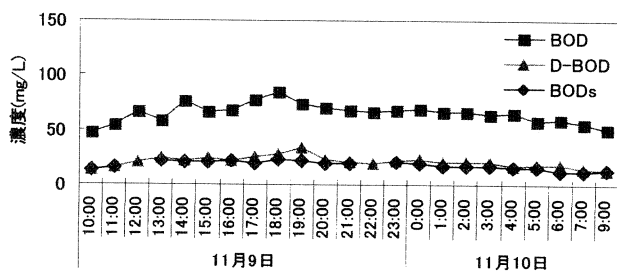


Fig.11 BOD、D-BOD と BODs (11/9~11/10)

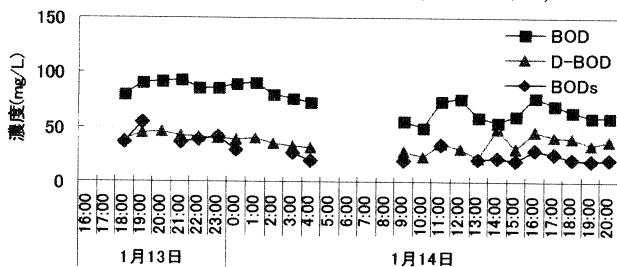


Fig.12 BOD、D-BOD と BODs (1/13~1/14)

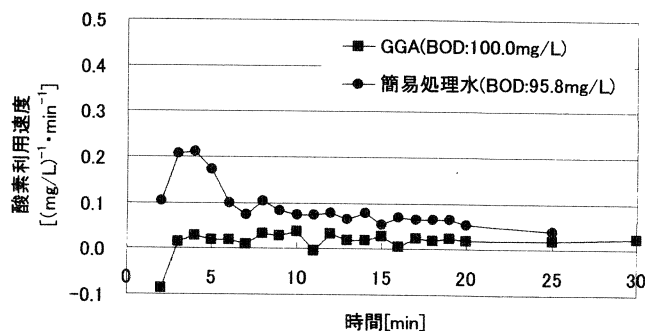


Fig.14 酸素利用速度 (RUN-1)

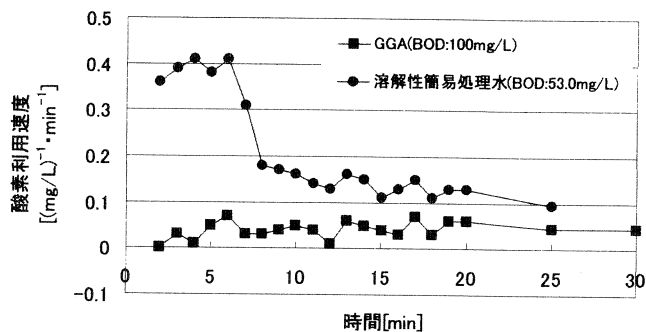


Fig.15 酸素利用速度 (RUN-2)

3.6 膜微生物の簡易処理水への応答特性の検討

(1) 酸素利用速度試験概要

バイオセンサで利用する活性汚泥の標準液・簡易処理水への応答特性の差異を検討するため、酸素利用速度試験を実施した。本実験は Fig.13 に示す実験系を 3 連作成し、Table.1 に示す実験条件で行った。以下に手順を示す。

各フランビンに緩衝液と検水を 100mL ずつ加えた後、水道水で 3 度洗浄し遠心沈降させた活性汚泥を湿重量で等量ずつ加え、残りを水で満たし、DO 計を装着してフランビンを密栓した。フランビン密栓後、スターラーを 3 系列同時に回転させ、回転を始めた時間を 0 として最大 30 分間 DO 濃度を測定した。測定結果から(式 1)により BOD 1mg/L、MLSS 1mg/L あたりの活性汚泥の酸素利用速度を算出した。

$$v_t = \frac{v_{ISPL} - v_{IW}}{BOD * MLSS} \quad (式 1)$$

ただし、 v_t [L/mg/min]：標準化した酸素利用速度、 v_{ISPL} [mg/L/min]：時間 t [min]における検水の DO 消費速度、 v_{IW} [mg/L/min]：時間 t における内生呼吸速度、 BOD [mg/L]：検水の BOD、 $MLSS$ [mg/L]：活性汚泥の MLSS である。

(2) 酸素利用速度試験結果

RUN1、2 の結果を Fig.14、Fig.15 に示す。Fig.14 より、実験開始後 30 分間において、GGA と比較して簡易処理水の方が酸素利用速度が大きいという結果となった。これは Fig.10 に示すように、バイオセンサの膜交換直後に GGA よりも簡易処理水への応答が大きい傾向と一致しており、膜中の微生物相が標準液

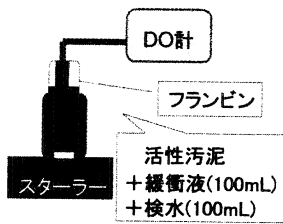


Fig.13 酸素利用速度試験実験系

Table.1 実験条件

RUN	検水(mg/L値はBOD換算)		
	1	2	3
1	水(blank)	GGA(100mg/L)	初沈流出水(48.0mg/L)
2	水(blank)	GGA(100mg/L)	溶解性初沈流出水(95.8mg/L)

を資化しやすいものに変化していることが示唆された。

また、GGA では酸素利用速度がほぼ一定であるのに対して、簡易処理水では実験開始後 5~10 分間に酸素利用速度が小さくなる傾向が見られた。このことから、バイオセンサにおける検水と膜の接触時間(5 分)において、溶解性の極めて易分解性の有機物が資化されていると考えられる。また、管路が汚染されている場合には、この易分解性の有機物が管路で消費され、BODs 値に大きな影響を与えている可能性があると考えられる。

4. まとめ

分流式と合流式の下水を処理する下水処理場での雨天時水質調査を行った結果、簡易処理放流水質は窒素、リンとも晴天時の放流水質に比べ高濃度となっており、特にアンモニア性窒素は極めて高濃度となっていた。また、バイオセンサを用いた BOD 連続測定方法を検討した結果、晴天時において D-BOD とバイオセンサ測定値(BODs)との相関が比較的高く、下水処理場の簡易処理水への適用可能性が示唆された。しかし、雨天時においては相関が低く、晴天時においても膜内の微生物相の変化が起こることから、降雨特性を考慮した補正が必要であり、標準液の変更等の検討を行う必要がある。また、濁度計と組み合わせるなど、全 BOD を推定する方法を検討する必要がある。これらの検討とともにデータの蓄積により更なる知見を得ることが今後の課題として挙げられる。

参考文献

- 1)阿部千雅他：下水道協会誌，Vol.42，No.518，pp64-77(2005)
- 2)古川清：下水道協会誌，Vol.39，No.475，pp40-44(2002)
- 3)古屋勇治他：EICA，第 9 巻，第 2 号，pp27-30(2004)
- 4)JIS K3602