

マルチフィード方式による高温 UASB 法のアルカリ度削減効果

水圏土壌環境制御研究室 氏名 遠山 明
指導教官 原田秀樹, 大橋晶良, 井町寛之

1. はじめに

Upflow anaerobic sludge blanket (UASB) 法は易分解性の中・高濃度有機性廃水などに対して既に完成された技術であり, 普及・発展しているメタン発酵プロセスである¹⁻³⁾。近年, 高温で排出される産業廃水などの処理において, 中温 (30~40℃) プロセスよりも更に高速・高負荷処理が可能である高温 (50~60℃) UASB プロセスが開発され⁴⁻⁶⁾, パイロットスケール規模での適用例も幾つか報告されている⁷⁻⁹⁾。

現在稼働している UASB プロセスは廃水をリアクター底部に供給する単一フィード方式のため, 供給口付近で有機物の分解に伴う集中的な酸生成反応が発生してリアクター内の pH が低下することで良好な処理が望めなくなる。この pH 低下を防ぐためには多量のアルカリ剤を使用する必要があるが, 使用される多量のアルカリ剤コストは嫌気性処理において主要な経費となるため^{10,11)}, 添加するアルカリ剤の削減が望まれている。

この問題を解決するため, 現行の単一フィード方式に替わる新規の供給方式「マルチフィード方式」を開発した。マルチフィード方式は廃水をリアクター高さ方向に分散供給することによって集中的な酸生成反応を分散化できると考えられるため, 添加するアルカリ剤の削減が期待される。

本研究では, 低アルカリ度条件における単一フィードとマルチフィード方式による比較検討を行い, アルカリ度要求量の削減においてマルチフィード方式によるアルカリ度削減効果を評価した。

2. 方法

2.1 実験装置

Fig. 1 に本実験で使用した多段型 UASB リアクターの概要図を示す。リアクターの全長は 87.5cm, 最大幅 15cm, 最小幅 3.9cm, 奥行き 10cm の矩型断面が折れ曲がった階段状の構造である。リアクター有効容積は 8L であり, 高さ方向 15cm おきに 8 個の GSS (Gas-Solid Separator : 気・固液分離装置)

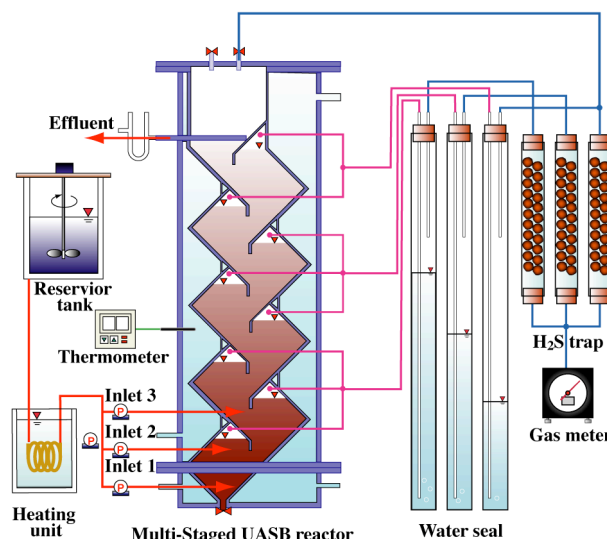


Fig. 1 Schematic diagrams of a multi-staged UASB reactor.

が設置されている。廃水は高さ方向に 3 箇所の廃水供給口 (Inlet1 : 0cm, Inlet2 : 8cm, Inlet3 : 16cm) から供給した。リアクター内温度はウォータージャケットによって 55℃ に制御した。

2.2 供給廃水

実験で使用した焼酎蒸留粕廃液の組成を Table 1 に示す。焼酎蒸留粕廃液はデカンター式遠心分離機によって固・液分離された分離液を用いた。廃水供給時には焼酎蒸留粕廃水を水道水で希釈し, アルカリ剤である重炭酸ナトリウム (NaHCO₃) と微量金属およびミネラルをそれぞれ添加した。微量金属およびミネラルの濃度は既報¹²⁾に準じた。

Table 1 Characteristics of Shochu wastewater.

pH	4.1	
COD total	48,800	mgCOD/L
COD soluble	47,500	mgCOD/L
Proteins total	5,900	mgCOD/L
Proteins soluble	5,100	mgCOD/L
Carbohydrate total	5,500	mgCOD/L
Carbohydrate soluble	5,400	mgCOD/L
total VFA	2,920	mgCOD/L
Acetate	2,450	mgCOD/L
n-Butyrate	470	mgCOD/L

2.3 植種汚泥

植種汚泥は高温焼酎蒸留粕廃液を処理したグラニキュール汚泥（最大 COD 容積負荷 120kgCOD/m³・d, COD 除去率約 83%）を 35℃で約 3 ヶ月間保存したものを使用し、リアクター内には 161gVSS/reactor（汚泥濃度 20,000mg/L, SS/VSS 比 0.93）の汚泥量を投入した。

2.4 供給方式

単一フィード方式（SF：Single feed mode）ではリアクターの最下部（0cm）一箇所のみで廃水を供給した。マルチフィード方式（MF：Multi-feed mode）ではリアクターの最下部から Inlet1, Inlet2, Inlet3 の順に逐次廃水を供給し、Inlet1：Inlet2：Inlet3 = 5：3：2 の流入割合で 1HRT あたり 3 サイクルするように設定した。

2.5 分析方法

COD 測定は HACH 法, pH 測定はハンディ pH メータ (HORIBA B-112), SS および VSS 測定は下水試験方法（下水試験方法 1997 年度版¹³⁾）に準じた。供給廃水および処理水の溶解性試料は、0.4 μ ガラス繊維濾紙 (ADVANTEC GB140) で濾過した後分析した。汚泥の溶解性試料は、採取した汚泥を遠心分離後、0.4 μ ガラス繊維濾紙 (ADVANTEC GB140) で濾過した後分析した。バイオガス組成は TCD 型検出器ガスクロマトグラフ (Shimadzu GC-8A), 揮発性脂肪酸 (VFA：Volatile Fatty Acids) 測定は FID 型検出器ガスクロマトグラフ (Shimadzu GC-1700) によって検出した。アンモニア性窒素はインドフェノール青吸光光度法（下水試験方法 1997 年度版¹³⁾）によって測定した。アルカリ度は True Bicarbonate Alkalinity (TBA) を用いて、測定は Jenkins ら¹⁴⁾の方法に準じた。式 (1) から TBA 5.75 は pH5.75 で測定した全アルカリ度 (Alk5.75) を 1.25 倍することによって算出した。

$$TBA5.75 = Alk5.75 \times 1.25 \quad (1)$$

2.6 実験条件

Table 2 に本実験における実験条件および目的を示す。実験は Phase1 から Phase8 まで区分して行った。

Phase1 期間はリアクターのスタートアップを目的として実験し、Phase 2 期間は単一フィード方式による最小アルカリ度添加量を求める目的で実験し

た。Phase 3 期間はリアクターを回復させる目的で、Phase 4 期間はマルチフィード方式による最小アルカリ度添加量を求める目的で実験した。Phase 5 期間はリアクターを回復させる目的で実験し、Phase 6 期間は新潟県中越地震の影響によってリアクターの運転を一時中止した。Phase 7 期間はリアクターの再スタートアップをする目的で実験し、Phase 8 期間は単一フィード方式で処理特性が悪化後にマルチフィード方式に切り替えることでマルチフィード方式による有効性を評価する目的で実験した。

3. 実験結果および考察

3.1 単一フィード方式による連続処理

Phase2 期間（23 日から 53 日）は、容積負荷 50kgCOD/m³・d, 流入廃水濃度 10,000mgCOD/L, HRT4.8h の一定条件下で、単一フィード方式により添加重炭酸ナトリウム濃度を 0.18gCaCO₃/gCOD から 0.12gCaCO₃/gCOD, 0.09gCaCO₃/gCOD と次第に削減した。Fig. 2 に Phase2 期間における添加重炭酸ナトリウム濃度, 処理水 TBA5.75 濃度, COD 除去率, 処理水 pH, および処理水 VFA（酢酸, プロピオン酸, n-酪酸, 全 VFA）の経時変化を示す。

添加重炭酸ナトリウム濃度 0.18gCaCO₃/gCOD 期間では、処理水中の TBA5.75 濃度が平均 2892mgCaCO₃/L と高かったことから処理水 pH も平均 7.9 と高かった。

添加重炭酸ナトリウム濃度 0.12gCaCO₃/gCOD 期間では、添加重炭酸ナトリウム濃度の削減に伴い処理水中の TBA5.75 濃度が平均 2322mgCaCO₃/L と減少したが処理水 pH は平均 8.0 であった。

しかし、添加重炭酸ナトリウム濃度 0.09gCaCO₃/gCOD 期間では、添加重炭酸ナトリウム濃度の削減に伴い処理水中の TBA5.75 濃度が 2080mgCaCO₃/L から 138mgCaCO₃/L まで減少し処理水 pH も 7.9 から 5.9 と低下した。また、COD 除去率も 90%から 44%まで減少し処理水全 VFA 濃度が 251mgCOD/L から 1210mgCOD/L と増加したことで処理特性が急激に悪化した。

この結果、容積負荷 50kgCOD/m³・d（流入廃水濃度 10,000mgCOD/L, HRT4.8h）の条件において、単一フィード方式では添加重炭酸ナトリウム濃度を 0.012gCaCO₃/gCOD から 0.09gCaCO₃/gCOD に削減

Table 2 Experimental condition in this study.

Phase	1	2	3	4	5	6	7	8
Period (day)	0-23	23-53	53-77	77-136	136-185	185-211	211-249	249-305
Purpose	Start-up	Reduction of alkalinity supplementation by a single feed mode	Recovery	Reduction of alkalinity supplementation by a multi-feed mode	Recovery	Reactor stop because of the big earthquake	Restart-up	Evaluation of a multi-feed mode
Feed mode	SF*	SF*	SF*	MF**	MF** to SF*		SF*	SF* to MF**

SF* : Single feed mode, MF** : Multi-feed mode

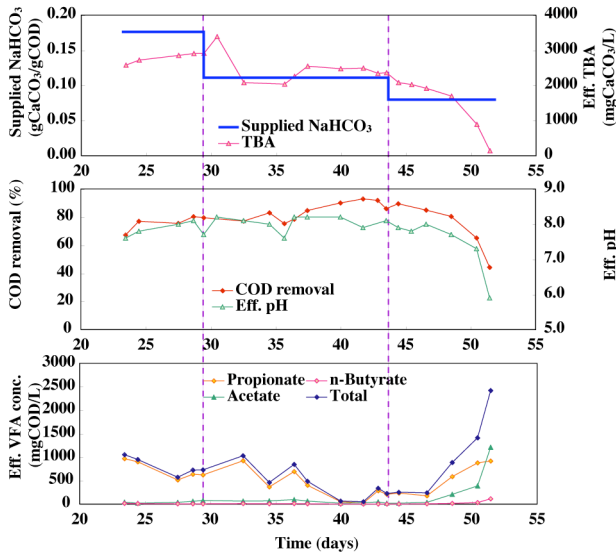


Fig. 2 Process performance of a multi-staged UASB reactor by a single feed mode at 0.09 to 0.18 gCaCO₃/gCOD under COD loading 50 kgCOD/m³·d with influent COD concentration 10,000 mgCOD/L, HRT 4.8 h during phase 2.

したところリアクター処理特性が急激に悪化したことから、単一フィード方式による最小アルカリ度添加量は 0.09gCaCO₃/gCOD から 0.12gCaCO₃/gCOD の範囲であると考えられる。

3.2 マルチフィード方式による連続処理

Phase4 期間 (77 日から 136 日) は、容積負荷 50kgCOD/m³·d, 流入廃水濃度 10,000mgCOD/L, HRT4.8h の一定条件下で、マルチフィード方式により添加重炭酸ナトリウム濃度を 0.18gCaCO₃/gCOD から 0.09gCaCO₃/gCOD, 0.04gCaCO₃/gCOD, 0.02gCaCO₃/gCOD, 0.01gCaCO₃/gCOD と次第に削減した。**Fig. 3** に Phase4 期間における添加重炭酸ナトリウム濃度, 処理水 TBA5.75 濃度, COD 除去率, 処理水 pH, 処理水 VFA (酢酸, プロピオン酸, n-酪酸, 全 VFA) の経時変化を示す。添加重炭酸ナトリウム濃度 0.18gCaCO₃/gCOD から 0.04gCaCO₃/gCOD 期間では、添加重炭酸ナトリウム濃度の削減に伴い処理水中の TBA5.75 濃度が平均 3307mgCaCO₃/L から 947mgCaCO₃/L まで減少し処理水 pH も平均 8.2 から 7.5 まで減少した。しかし、添加重炭酸ナトリウム濃度が 0.04gCaCO₃/gCOD 期間では平均 COD 除去率 71%, 処理水 TBA5.75 濃度が平均 947mgCOD/L となり安定した処理が行われた。

その後、添加重炭酸ナトリウム濃度を 0.02gCaCO₃/gCOD まで削減したところ、処理水 TBA5.75 濃度が 1050mgCaCO₃/L から 355mgCaCO₃/L まで減少したのに伴い処理水 pH が 7.8 から 6.5 まで低下し、COD 除去率も 74%から 61%まで急激に

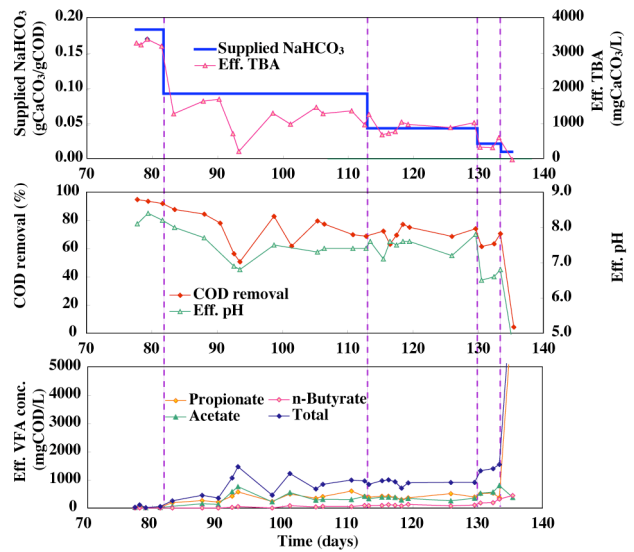


Fig. 3 Process performance of a multi-staged UASB reactor by a multi-feed mode at 0.01 to 0.18 gCaCO₃/gCOD under COD loading 50 kgCOD/m³·d with influent COD concentration 10,000 mgCOD/L, HRT 4.8 h during phase 4.

減少して処理水全 VFA 濃度が 907mgCOD/L から 1320mgCOD/L まで増加したため、一時処理特性が悪化した。しかしその後、添加重炭酸ナトリウム濃度 0.02gCaCO₃/gCOD 期間において、処理水 TBA 濃度が 622mgCaCO₃/L, 処理水 pH が 6.8, COD 除去率が 71%まで回復した。

そこで、さらに添加重炭酸ナトリウム濃度を 0.01gCaCO₃/gCOD まで削減したところ、処理水 TBA5.75 濃度が 0mgCaCO₃/L となり処理水 pH が 4.5 まで急激に低下してリアクター内が完全に酸敗化した。このため、COD 除去率が 44%まで急激に減少し処理水全 VFA 濃度が 8030mgCOD/L まで蓄積したため処理特性が完全に破綻した。

この結果、容積負荷 50kgCOD/m³·d (流入廃水濃度 10,000mgCOD/L, HRT4.8h) の条件において、マルチフィード方式では添加重炭酸ナトリウム濃度を 0.02gCaCO₃/gCOD から 0.01gCaCO₃/gCOD に削減したところリアクター処理特性が急激に悪化したことから、マルチフィード方式による最小アルカリ度添加量は 0.01gCaCO₃/gCOD から 0.02gCaCO₃/gCOD の範囲であると考えられる。

3.3 供給方式の違いによる処理特性の影響

Phase8 期間 (249 日から 305 日) は、容積負荷 50kgCOD/m³·d, 流入廃水濃度 10,000mgCOD/L, HRT4.8h の一定条件下で、最初は単一フィード方式により添加重炭酸ナトリウム濃度を 0.18gCaCO₃/gCOD から 0.09gCaCO₃/gCOD, 0.06gCaCO₃/gCOD, 0.04gCaCO₃/gCOD と次第に削減して、処理特性が悪化後にマルチフィード方式に

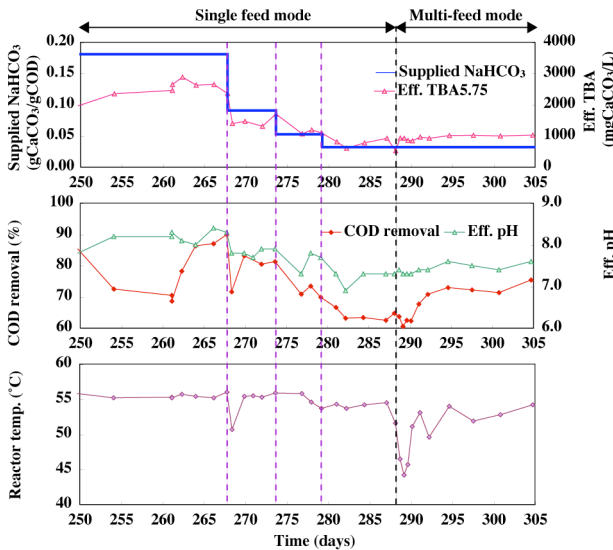


Fig. 4 Process performance of a multi-staged UASB reactor by a single feed mode at 0.04 to 0.18 gCaCO₃/gCOD and multi-feed mode at 0.04 gCaCO₃ under COD loading 50 kgCOD/m³·d with influent COD concentration 10,000 mgCOD/L, HRT 4.8 h during phase 8.

変更することで、マルチフィード方式の効果を評価した。**Fig. 4**にPhase8期間における添加重炭酸ナトリウム濃度、処理水 TBA5.75 濃度、COD 除去率、処理水 pH、リアクター内温度の経時変化を示す。

添加重炭酸ナトリウム濃度を 0.18gCaCO₃/gCOD から 0.04gCaCO₃/gCOD に削減した単一フィード方式期間において、添加重炭酸ナトリウム濃度の削減により平均処理水 TBA5.75 濃度が 2497mgCaCO₃/L から 731mgCaCO₃/L まで減少し平均 COD 除去率も 81%から 64%まで減少した。そのため、288 日目から供給方式を単一フィード方式からマルチフィード方式に変更した。変更直後に急激なリアクター内の

温度低下（最大 44.9°C）により、一時若干処理特性が悪化したが、その後リアクター内の温度上昇に伴い次第に処理特性が回復した。最終的にマルチフィード方式変更後に COD 除去率が 75%まで増加して処理特性が向上した。

Phase2 期間では単一フィード方式の最小アルカリ度添加量は 0.12gCaCO₃/gCOD から 0.09gCaCO₃/gCOD の範囲であったが、Phase8 期間では添加重炭酸ナトリウム濃度が 0.04gCaCO₃/gCOD 期間において著しい処理特性の悪化がみられなかった。その原因としては、焼酎廃水の腐敗により廃水組成が変化したことにより Phase2 期間では流入全 VFA 濃度が平均 1291mgCOD/L であったのに対して Phase8 期間では流入全 VFA 濃度が 2 倍以上の平均 2626mgCOD/L であった。このため、リアクター内で VFA の分解によってアルカリ度である重炭酸塩が多く生成されたため、Phase8 期間では添加重炭酸ナトリウム濃度を 0.09gCaCO₃/gCOD から 0.04gCaCO₃/gCOD に削減しても著しい処理特性の悪化がみられなかったと考えられる。

3.4 リアクター高さ方向の基質分解挙動

Fig. 5に pH, COD 除去率, 全 VFA 濃度, TBA5.75 濃度, アンモニウムイオン濃度のリアクター高さ方向における分解挙動を示す。容積負荷 50kgCOD/m³·d（流入廃水濃度 10,000mgCOD/L, HRT4.8h）の一定条件において、単一フィード方式で添加重炭酸ナトリウム濃度 0.09gCaCO₃/gCOD（52 日目）、マルチフィード方式で添加重炭酸ナトリウム濃度 0.04gCaCO₃/gCOD（114 日目）、マルチフィード方式で添加重炭酸ナトリウム濃度 0.02gCaCO₃/gCOD（134 日目）期間について実験した。

pH はリアクター高さ 7.5cm, 14cm, 21.5cm, 29cm,

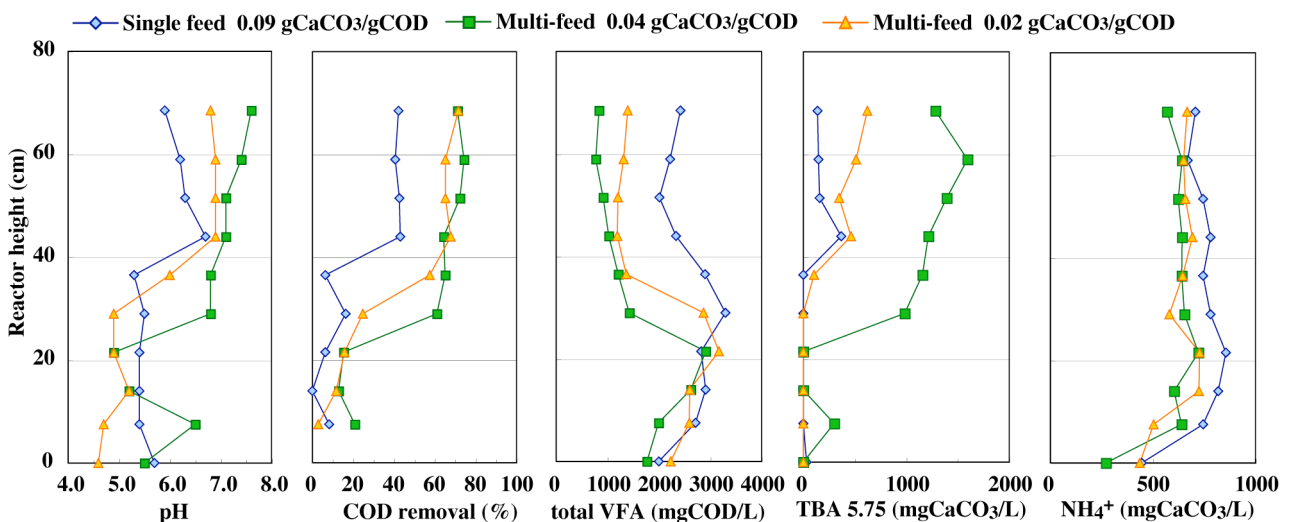


Fig. 5 Comparison of pH, COD removal, total VFA, TBA5.75 and NH₄⁺ along the reactor height between a single feed mode at 0.09 gCaCO₃/gCOD and multi-feed mode at 0.02 and 0.04 gCaCO₃/gCOD under loading 50 kgCOD/m³·d with influent COD concentration 10,000 mgCOD/L, HRT 4.8 h.

36.5cm, 44cm, 51.5cm, 59cm から採取した汚泥を測定し、COD 濃度, TBA5.75 濃度, VFA 濃度, NH_4^+ 濃度は汚泥を遠心分離 (10,000rpm, 10 分, 4°C) した後の上澄み液を用いた。

単一フィード方式で添加重炭酸ナトリウム濃度 $0.09\text{gCaCO}_3/\text{gCOD}$ 期間では, リアクター底部から高さ 36.5cm までは全 VFA 濃度が $2720\text{mgCOD}/\text{L}$ から $3300\text{mgCOD}/\text{L}$ まで増加して pH が 5.4 から 5.3 と低く COD 除去率が 16%と低かったためにほとんど有機物が除去されなかった。リアクター高さ 44cm で VFA の分解により重炭酸塩 (HCO_3^-) が生成されたため, pH が 6.7, TBA5.75 濃度が $369\text{mgCaCO}_3/\text{L}$ までそれぞれ増加し COD 除去率が 43%まで増加した。しかし, リアクターの高さが上昇するにつれてプロピオン酸や全 VFA 濃度が増加したことによって TBA5.75 濃度が減少して pH が低下したため, 最終的に処理水中の TBA5.75 濃度が $138\text{mgCaCO}_3/\text{L}$, pH が 5.9, COD 除去率が 42%となった。

マルチフィード方式で添加重炭酸ナトリウム濃度 $0.04\text{gCaCO}_3/\text{gCOD}$ 期間では, リアクター底部から高さ 21.5cm までは, 酢酸, プロピオン酸, n-酪酸, 全 VFA 濃度の蓄積がして pH が 4.9 まで低下した。この区間ではアンモニウムイオン濃度が $271\text{mgCaCO}_3/\text{L}$ から $721\text{mgCaCO}_3/\text{L}$ まで増加したが, VFA 生成が量的に上回ったために生成した重炭酸塩が全て消費されたことでアルカリ度が生成されなかった。しかし, リアクター高さ 21.5cm 以降で VFA である酢酸, プロピオン酸, n-酪酸の分解に伴い重炭酸塩が生成されたため, 最終的に TBA5.75 濃度が $1280\text{mgCaCO}_3/\text{L}$ に増加し pH が 7.6 に上昇して COD 除去率が 71%まで増加した。

マルチフィード方式で添加重炭酸ナトリウム濃度 $0.02\text{gCaCO}_3/\text{gCOD}$ 期間では, リアクター底部から高さ 29cm までは, 酢酸, プロピオン酸, n-酪酸, 全 VFA 濃度が蓄積して pH が 4.9 と低かった。しかし, リアクター高さ 29cm 以降で VFA が分解され重炭酸塩が生成されたため, 最終的に TBA5.75 濃度が $662\text{mgCaCO}_3/\text{L}$, pH が 6.8, COD 除去率が 71%となった。

3.5 リアクター高さ方向のアルカリ度要求量

焼酎蒸留粕廃液はタンパク質および VFA 濃度が多く含有していることから (Table 1) 代謝由来アルカリ度が生成される。

式 (2) にリアクター内の pH を 6.5 に維持するのに必要なアルカリ度要求量を示す。この式は van Haandel¹⁵⁾が考案した式を改良して求めた。

$$\text{Alk}_{\text{req.}} = (\text{VFA}_{\text{prod.}} + \text{CO}_2 (\text{aq}) \text{ neut.} + \text{Alk}_{\text{add.}} - \text{Ammonium}_{\text{prod.}}) / \text{inf. COD} \quad (2)$$

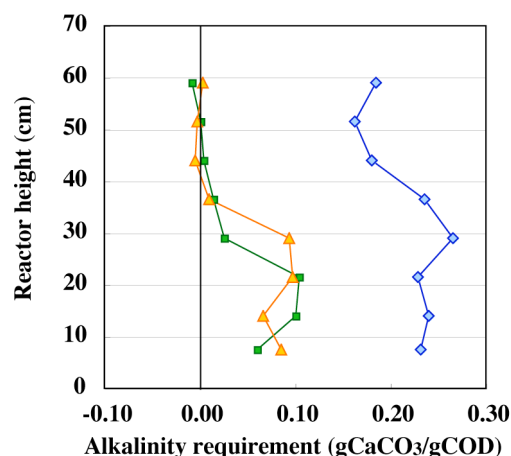


Fig. 6 Comparison of alkalinity requirement along the reactor height between a single feed mode at $0.09\text{gCaCO}_3/\text{gCOD}$ and multi-feed mode at 0.02 and $0.04\text{gCaCO}_3/\text{gCOD}$ under COD loading $50\text{kgCOD}/\text{m}^3\cdot\text{d}$ with influent COD concentration $10,000\text{mgCOD}/\text{L}$, HRT 4.8 h

ここで, $\text{Alk}_{\text{req.}}$: アルカリ度要求量 ($\text{gCaCO}_3/\text{gCOD}$), $\text{VFA}_{\text{prod.}}$: 生成された VFA 濃度 (mgCaCO_3/L), $\text{CO}_2 (\text{aq}) \text{ neut.}$: 溶存 CO_2 を中和するのに要するアルカリ度濃度 (mgCaCO_3/L), $\text{Alk}_{\text{add.}}$: 添加したアルカリ度濃度 ($\text{gCaCO}_3/\text{gCOD}$), $\text{Ammonium}_{\text{prod.}}$: 生成されたアンモニウムイオン濃度 (mgCaCO_3/L), inf. COD : 流入 COD 濃度 (mgCOD/L) である。

Fig. 6 に容積負荷 $50\text{kgCOD}/\text{m}^3\cdot\text{d}$ (流入廃水濃度 $10,000\text{mgCOD}/\text{L}$, HRT4.8h) の一定条件における, 単一フィード方式で添加重炭酸ナトリウム濃度 $0.09\text{gCaCO}_3/\text{gCOD}$ (52 日目), マルチフィード方式で添加重炭酸ナトリウム濃度 $0.04\text{gCaCO}_3/\text{gCOD}$ (114 日目), マルチフィード方式で添加重炭酸ナトリウム濃度 $0.02\text{gCaCO}_3/\text{gCOD}$ (134 日目) 期間におけるアルカリ度要求量を示す。

単一フィード方式では最大アルカリ度要求量がリアクター高さ 29cm で $0.26\text{gCaCO}_3/\text{gCOD}$ であったのに対して, マルチフィード方式では 0.02 および $0.04\text{gCaCO}_3/\text{gCOD}$ の両期間において最大アルカリ度要求量が $0.10\text{gCaCO}_3/\text{gCOD}$ であった。また, 単一フィード方式では最小アルカリ度要求量が $0.16\text{gCaCO}_3/\text{gCOD}$ であったのに対して, マルチフィード方式では両期間ともにリアクター高さ 44cm 以上でアルカリ度要求量はほとんどなかった。

4. まとめ

本研究の結果, 容積負荷 $50\text{kgCOD}/\text{m}^3\cdot\text{d}$ (廃水濃度 $10,000\text{mgCOD}/\text{L}$, HRT4.8h) の一定条件において以下の知見が得られた。

1. 連続処理実験結果から, 単一フィード方式では最

小アルカリ度添加量が 0.09 から 0.12gCaCO₃/gCOD の範囲であったのに対して、マルチフィード方式では最小アルカリ度添加量が 0.01 から 0.02gCaCO₃/gCOD の範囲であった。

2. 供給方式を単一フィード方式からマルチフィード方式に変更することでCOD除去率が64%から75%まで増加し処理特性が向上した。
3. リアクター内 pH を 6.5 に維持するのに必要な最大アルカリ度要求量が単一フィード方式では 0.26gCaCO₃/gCOD であったのに対して、マルチフィード方式では 0.10gCaCO₃/gCOD であった。

以上の結果、マルチフィード方式は単一フィード方式と比較して最小アルカリ度添加量と最大アルカリ度要求量を大幅に削減することが達成され、アルカリ度削減におけるマルチフィード方式の有効性が実証された。

参 考 文 献

- 1) Lettinga, G. (1995) Anaerobic digestion and wastewater treatment systems. *Antonie van Leeuwenhoek*, **67**, 3-28.
- 2) Lettinga, G., Field, J., van Lier, J., Zeeman, G. and Pol, L. W. H. (1997) Advanced anaerobic wastewater treatment in the near future. *Wat. Sci. Tech.*, **35**, 5-12.
- 3) Sekiguchi, Y., Kamagata, Y. and Harada, H. (2001) Recent advances in methane fermentation technology. *Current Opinion in Biotechnology*, **12**, 277-282.
- 4) Syutsubo, K., Harada, H. and Ohashi, A. (1998) Granulation and sludge retainment during start-up of a thermophilic UASB reactor. *Wat. Sci. Tech.*, **38**, 349-357.
- 5) Tagawa, T., Takahashi, H., Sekiguchi, Y., Ohashi, A. and Harada, H. (2002) Pilot-plant study on anaerobic treatment of lipid- and protein-rich food industrial wastewater by a thermophilic multi-staged UASB reactor. *Wat. Sci. Tech.*, **45**, 225-230.
- 6) Wiegant, W. M., Claassen, J. A. and Lettinga, G. (1985) Thermophilic anaerobic digestion of high strength wastewaters. *Biotech. Bioeng.*, **27**, 1374-1381.
- 7) Rintala, J. A. and Lepisto, S. S. (1997) Pilot-scale thermophilic anaerobic treatment of wastewaters from seasonal vegetable processing industry. *Wat. Sci. Tech.*, **36**, 279-285.
- 8) Souza, M. E., Fuzaro, G. and Polegato, A. R. (1992) Thermophilic anaerobic digestion of vinasse in pilot plant UASB reactor. *Wat. Sci. Tech.*, **25**, 213-222.
- 9) 山田真義, 山内正仁, 大橋晶良, 原田秀樹 (2004) 多段型高温 UASB リアクターによる焼酎蒸留粕液画分の高速メタン発酵処理, 環境工学研究論文集, **41**, 31-40.
- 10) Ferguson, J. F., Eis, B. J. and Benjamin, M. M. (1984) Neutralization in anaerobic treatment of an acid waste. *Wat. Res.*, **18**, 573-580.
- 11) Romli, M., Greenfield, P. F. and Lee, P. L. (1994) Effect of recycle on a two-phase high-rate anaerobic wastewater treatment system. *Wat. Res.*, **28**, 475-482.
- 12) 珠坪一晃, 原田秀樹, 鈴木宏誌, 桃井清至, 大橋晶良 (1995) 高温 UASB リアクターによるアルコール蒸留廃水処理特性と保持汚泥微生物群の生態学的挙動, 環境工学研究論文集, **32**, 201-212.
- 13) 下水試験方法上巻 1997年版 (1997) 社団法人日本下水道協会.
- 14) Jenkins, S. R., Morgan, J. M. and Zhang, X. (1991) Measuring the usable carbonate alkalinity of operating anaerobic digesters. *Res. J. Water Poll, Cont, Fed.*, **63**, 28-34.
- 15) van Haandel, A. C. (1994) Influence of the digested COD concentration on the alkalinity requirement in anaerobic digesters. *Water Sci Tech.*, **30**, 23-34.