

(44) マルチフィード方式による新規高温 UASB プロセスのアルカリ度削減効果

Reduction of Alkalinity Supplement to a Novel High-rate UASB Reactor by a Multi-Feed Mode

遠山 明*, Wilasinee YOOCHATCHAVAL*, 井町寛之*, 大橋晶良*, 原田秀樹*
Akira TOYAMA*, Wilasinee YOOCHATCHAVAL*, Hiroyuki IMACHI*, Akiyoshi OHASHI*, Hideki HARADA*

ABSTRACT; Alkalinity supplement is in general a major burden to running cost of anaerobic wastewater treatment process of plug flow type reactor like UASB. In order to reduce the cost for alkalinity supplement, a multi-feed mode was proposed, and verified by conducting an experiment of a laboratory-scale multi-staged thermophilic (55°C) UASB by feeding an alcohol (*Shochu*) distillery wastewater. At a loading rate of $50 \text{ kgCOD} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ (corresponding to HRT of 4.8 h for influent strength of $10,000 \text{ mgCOD} \cdot \text{l}^{-1}$), the multi-feed mode allowed the $0.01\text{--}0.02 \text{ gCaCO}_3/\text{gCOD}$ of alkalinity supplementation with above 70% COD removal, while a process failure due to severe pH drop occurred at $0.09\text{--}0.12 \text{ gCaCO}_3/\text{gCOD}$ of alkalinity supplement in single feed mode UASB process. The multi-feed mode successfully made it possible to lessen alkalinity supplement to 1/6 ($0.02/0.12$) of the single feed mode.

KEYWORDS; thermophilic UASB process, multi-feed mode, *Shochu* distillery wastewater, alkalinity supplementation

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⁾²⁾。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°C) 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°C) UASB プロセスが開発され⁴⁾⁵⁾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⁾⁸⁾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のみ供給する単一フィード (Single Feed, 以下 SF とする) 方式であるため、供給口付近で廃水中の有機物分解により酢酸やプロピオン酸などの揮発性脂肪酸 (VFA : Volatile Fatty Acids) が集中的に生成されて pH が低下する。よって、リアクター内でメタン菌の至適 pH を維持するには苛性ソーダや重炭酸ナトリウムなどのアルカリ剤が必要である。特に、分解過程でアルカリ度を生成しない炭水化物系廃水や、酸生成とメタン生成のバランスが不均衡になりやすい高速・高負荷処理を行った場合に、使用される多量のアルカリ剤が嫌気性処理において主要な経費となるため¹⁰⁾¹¹⁾、アルカリ剤の削減が望まれている。

添加するアルカリ剤を削減するために、処理水中のアルカリ度を利用した処理水循環が導入される場合がある¹¹⁾¹²⁾。高濃度に窒素を含有する廃水に対しては処理水循環によってアンモニアなど嫌気性微生物叢に対して阻害性を示す物質が蓄積する傾向があるため、長期間の処理水循環を行った場合にリアクターの処理性能が破綻する可能性がある。

焼酎蒸留粕廃水は、pH が低く酸性化されていて有機物を高濃度に含有する易分解性の糖系廃水である。この廃水を SF 方式により高速メタン発酵処理した場合、酸生成速度がメタン生成速度に比べて速いため、

*長岡技術科学大学 環境システム工学系 (Dept. of Environ. Systems Engineering, Nagaoka University of Technology)

リアクター内で VFA が蓄積し、アルカリ剤を使用しなければリアクター内が酸敗化して良好な処理が望めなくなる。そこで、著者らは現行の単一フィード方式に替わる新規のマルチフィード方式 (Multi-Feed, 以下 MF とする) を開発した。マルチフィード方式は、リアクター高さ方向に廃水を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、使用するアルカリ剤の削減が期待される。

本稿では、高速処理が可能な多段型 UASB リアクターを用いて、高負荷 (容積負荷 $50 \text{ kgCOD}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d}^{-1}$)・低アルカリ度添加量条件において、SF 方式と MF 方式による処理特性の比較検討を行い、MF 方式によるアルカリ度削減効果を評価した。

2. 実験方法

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 87.5 cm, 最大幅 15 cm, 最小幅 3.9 cm, 奥行き 10 cm の矩型断面が折れ曲がった階段状の構造である。リアクターの有効容積は 8 L であり、高さ方向 7.5 cm 間隔に 8 個の GSS (Gas-Solid Separator: 気・固液分離装置) 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 (Inlet 1: 0 cm, Inlet 2: 8 cm, Inlet 3: 16 cm) 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°C に制御した。

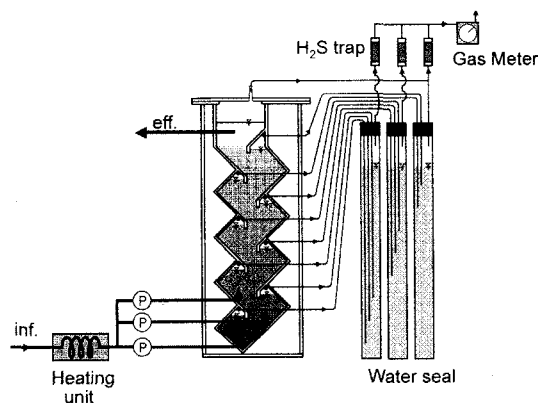


Fig. 1 Schematic diagrams of a multi-staged UASB reactor.

2.2 供給基質

実験で使用した焼酎蒸留粕廃水の組成を Table 1 に示す。焼酎蒸留粕廃水は、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添加量は既報¹³⁾に準拠した。

2.3 植種汚泥

植種汚泥は、高温焼酎蒸留粕廃水を処理したグラニューール汚泥 (最大 COD 容積負荷 $120 \text{ kgCOD}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d}^{-1}$, COD 除去率約 83%) を 35°C で約 3 ヶ月間保存したものを使用し、リアクター内には $161 \text{ gVSS}\cdot\text{reactor}^{-1}$ (汚泥濃度 $20,000 \text{ mgVSS}\cdot\text{l}^{-1}$, $\text{VSS}/\text{SS}=0.93$) の汚泥量を投入した。

2.4 供給方式

SF 方式では、リアクターの最下部 (0 cm) 一箇所のみに廃水を供給した。MF 方式では、リアクターの最下部から Inlet 1, Inlet 2, Inlet 3 の順に逐次廃水を供給した。リアクター形状、リアクター内の汚泥負荷、

Table 1 Characteristics of Shochu wastewater.

pH	4.1	
COD total	48,800	$\text{mgCOD}\cdot\text{l}^{-1}$
COD soluble	47,500	$\text{mgCOD}\cdot\text{l}^{-1}$
Carbohydrate total	5,500	$\text{mgCOD}\cdot\text{l}^{-1}$
Carbohydrate soluble	5,400	$\text{mgCOD}\cdot\text{l}^{-1}$
TKN total	1,410	$\text{mgN}\cdot\text{l}^{-1}$
TKN soluble	1,310	$\text{mgN}\cdot\text{l}^{-1}$
$\text{NH}_4\text{-N}$	400	$\text{mgN}\cdot\text{l}^{-1}$
Acetate	2,450	$\text{mgCOD}\cdot\text{l}^{-1}$
n-Butyrate	470	$\text{mgCOD}\cdot\text{l}^{-1}$

リアクター内の VFA 濃度などを考慮して、流入割合を時間比で Inlet 1 : Inlet 2 : Inlet 3 = 5 : 3 : 2 (1 サイクル) とし、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¹⁴⁾) に準拠した。供給廃水および処理水の溶解性試料は、0.4 μm ガラス繊維濾紙 (ADVANTEC GB140) で濾過したものをを用いた。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)、VFA は FID 型検出器ガスクロマトグラフ (Shimadzu GC-1700) によって測定した。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¹⁴⁾) 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¹⁵⁾の方法に準じた。式 (1) から TBA 5.75 は pH 5.75 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。

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

2.6 実験条件

Table 2 に本研究における実験条件を示す。実験期間は Phase 1 から Phase 8 まで区分した。

Phase1 はリアクターのスタートアップ、Phase 2 は SF 方式による最小アルカリ度添加量の把握、Phase 3 はリアクターの処理性能回復、Phase 4 は MF 方式による最小アルカリ度添加量の把握、Phase 5 はリアクターの処理性能回復を行うことを、それぞれ目的とした。Phase 6 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 はリアクターの再スタートアップ、Phase 8 は SF 方式から MF 方式への変更による処理特性の影響を評価することを、それぞれ目的とした。

Table 2 Operating conditions of the multi-staged UASB reactor in this study.

Phase	Period (day)	Condition	Feed mode
1	0-23	Start-up	SF*
2	23-53	Alkalinity reduction by single feed mode	SF*
3	53-77	Recovery	SF*
4	77-136	Alkalinity reduction by multi-feed mode	MF**
5	136-185	Recovery	MF** to SF*
6	185-211	Reactor stop	
7	211-249	Restart-up	SF*
8	249-305	switch single feed mode to multi-feed mode	SF* to MF**

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

3. 実験結果および考察

3.1 SF 方式による連続処理特性

Phase 2 (23~53 日) は、容積負荷 50 $\text{kgCOD} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ 、流入廃水濃度 10,000 $\text{mgCOD} \cdot \text{l}^{-1}$ 、HRT4.8 h の一定条件下で、SF 方式によりアルカリ度添加量を 0.18 から 0.12, 0.09 $\text{gCaCO}_3/\text{gCOD}$ と次第に削減した。**Fig. 2** に Phase 2 におけるアルカリ度添加量、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。

アルカリ度添加量 0.18 $\text{gCaCO}_3/\text{gCOD}$ では、処理水中の TBA5.75 濃度が平均 2892 $\text{mgCaCO}_3 \cdot \text{l}^{-1}$ と高かったことから、処理水 pH も平均 7.9 と高かった。

アルカリ度添加量 $0.12 \text{ gCaCO}_3/\text{gCOD}$ では、アルカリ度添加量の削減に伴い、処理水中の TBA5.75 濃度が平均 $2322 \text{ mgCaCO}_3\cdot\text{l}^{-1}$ と減少したが、処理水 pH は平均 8.0 であった。

しかし、アルカリ度添加量 $0.09 \text{ gCaCO}_3/\text{gCOD}$ では、アルカリ度添加量の削減に伴い、処理水中の TBA5.75 濃度が 2080 から $138 \text{ mgCaCO}_3\cdot\text{l}^{-1}$ まで減少し、処理水 pH も 7.9 から 5.9 と低下した。COD 除去率も 90% から 44% まで急激に低下して、処理水全 VFA 濃度が 251 から $1210 \text{ mgCOD}\cdot\text{l}^{-1}$ と増加したことで、処理性能が急激に悪化した。この結果、SF 方式ではアルカリ度添加量を 0.12 から $0.09 \text{ gCaCO}_3/\text{gCOD}$ に削減したところで処理性能が急激に悪化したことから、SF 方式による最小アルカリ度添加量は $0.09\sim 0.12 \text{ gCaCO}_3/\text{gCOD}$ の範囲であると考えられる。

3.2 MF 方式による連続処理特性

Phase 4 (77~136 日) は、容積負荷 $50 \text{ kgCOD}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d}^{-1}$ 、流入廃水濃度 $10,000 \text{ mgCOD}\cdot\text{l}^{-1}$ 、HRT 4.8 h の一定条件下で、MF 方式によりアルカリ度添加量を 0.18 から 0.09 , 0.04 , 0.02 , $0.01 \text{ gCaCO}_3/\text{gCOD}$ と次第に削減した。Fig. 3 に Phase 4 におけるアルカリ度添加量、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。アルカリ度添加量を 0.18 から 0.09 , $0.04 \text{ gCaCO}_3/\text{gCOD}$ と削減したところ、アルカリ度添加量の削減に伴い処理水中の TBA5.75 濃度が平均 3307 から $947 \text{ mgCaCO}_3\cdot\text{l}^{-1}$ まで減少し、処理水 pH も平均 8.2 から 7.5 まで低下した。しかし、アルカリ度添加量が $0.04 \text{ gCaCO}_3/\text{gCOD}$ では、平均 COD 除去率 71%、処理水 TBA5.75 濃度が平均 $947 \text{ mgCOD}\cdot\text{l}^{-1}$ となり安定した処理が行われた。

アルカリ度添加量を 0.04 から $0.02 \text{ gCaCO}_3/\text{gCOD}$ まで削減した直後に、処理

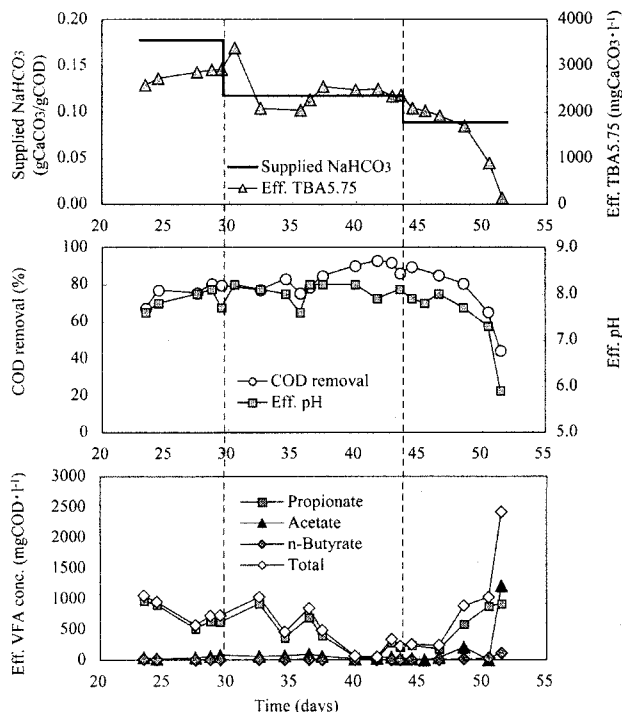


Fig. 2 Process performance of a multi-staged UASB reactor by single feed mode.

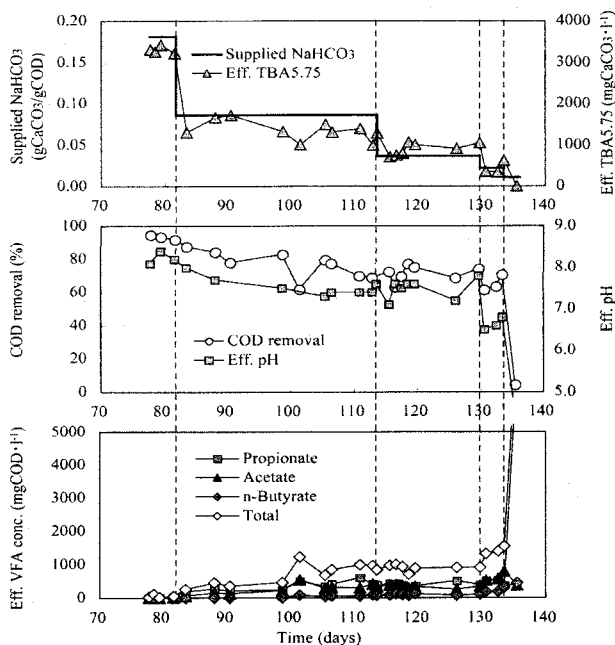


Fig. 3 Process performance of a multi-staged UASB reactor by multi-feed mode.

水 TBA5.75 濃度が 1050 から 355 $\text{mgCaCO}_3\cdot\text{l}^{-1}$ 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% まで低下した。しかしその後は、処理水 TBA 濃度が 622 $\text{mgCaCO}_3\cdot\text{l}^{-1}$ 、処理水 pH が 6.8、COD 除去率が 71% となり、処理性能が回復した。

そこで、更にアルカリ度添加量を 0.01 $\text{gCaCO}_3/\text{gCOD}$ まで削減したところ、処理水 TBA5.75 濃度が 0 $\text{mgCaCO}_3\cdot\text{l}^{-1}$ 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。COD 除去率も 44% まで急激に減少し、処理水全 VFA 濃度が 8030 $\text{mgCOD}\cdot\text{l}^{-1}$ まで蓄積したため、処理性能が完全に破綻した。

この結果、MF 方式ではアルカリ度添加量を 0.02 から 0.01 $\text{gCaCO}_3/\text{gCOD}$ に削減したところ、リアクター処理性能が急激に悪化して破綻したことから、MF 方式による最小アルカリ度添加量は 0.01 から 0.02 $\text{gCaCO}_3/\text{gCOD}$ の範囲であると考えられる。

3.3 SF 方式から MF 方式への変更による処理特性の影響

Phase 8 (249~305 日) は、容積負荷 50 $\text{kgCOD}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d}^{-1}$ 、流入廃水濃度 10,000 $\text{mgCOD}\cdot\text{l}^{-1}$ 、HRT 4.8 h の一定条件下で、始めは SF 方式によりアルカリ度添加量を 0.18 から 0.09, 0.06, 0.04 $\text{gCaCO}_3/\text{gCOD}$ と次第に削減して、処理性能が悪化後に MF 方式に変更した。Fig. 4 に Phase 8 におけるアルカリ度添加量、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。

SF 方式でアルカリ度添加量を 0.18 から 0.04 $\text{gCaCO}_3/\text{gCOD}$ に削減したところ、アルカリ度添加量の削減によって、平均処理水 TBA5.75 濃度が 2490 から 731 $\text{mgCaCO}_3\cdot\text{l}^{-1}$ まで減少し、平均 COD 除去率も 81% から 64% まで低下した。このため、288 日目から供給方式を SF 方式から MF 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 45°C)

により、若干処理性能が悪化したが、その後はリアクター内の温度上昇によって次第に処理性能が回復した。最終的に、MF 方式へ変更したことによって、COD 除去率が 75% まで上昇した。

Phase 2 では SF 方式の最小アルカリ度添加量は 0.09 から 0.12 $\text{CaCO}_3/\text{gCOD}$ の範囲であったが、Phase 8 ではアルカリ度添加量が 0.04 $\text{gCaCO}_3/\text{gCOD}$ でも著しい処理性能の悪化がみられなかった。これは、焼酎廃水の腐敗により廃水組成が変化したためである。Phase 2 では流入全 VFA 濃度が平均 1291 $\text{mgCOD}\cdot\text{l}^{-1}$ であったが、Phase 8 では流入全 VFA 濃度が 2 倍以上の平均 2626 $\text{mgCOD}\cdot\text{l}^{-1}$ であった。VFA の分解によってアルカリ度である重炭酸塩が生成されたため、Phase 8 ではアルカリ度添加量を 0.09 から 0.04 $\text{gCaCO}_3/\text{gCOD}$ に削減しても、著しい処理性能の悪化がみられなかったと考えられる。

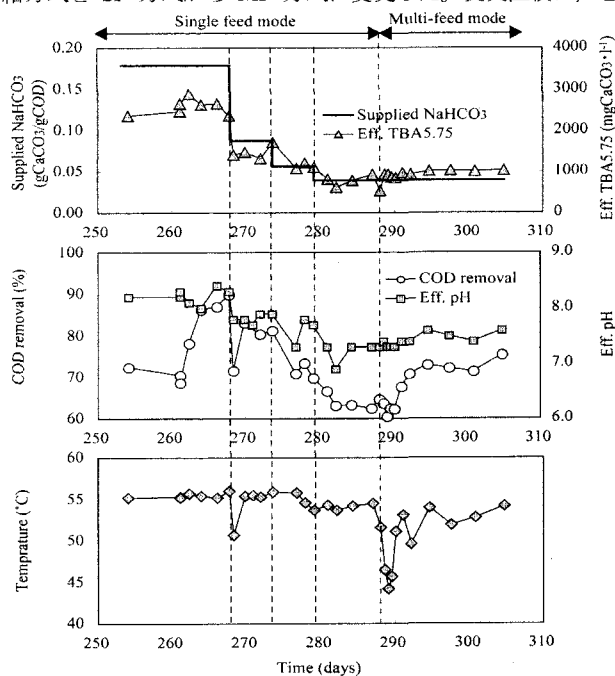


Fig. 4 Process performance of a multi-staged UASB reactor by switch single feed mode to multi-feed mode.

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, $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度のリアクター高さ方向 (7.5, 14, 21.5, 29, 36.5, 44, 51.5, 59 cm) における分解挙動を示す。容積負荷 $50 \text{ kgCOD}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d}^{-1}$ (流入廃水濃度 $10,000 \text{ mgCOD}\cdot\text{l}^{-1}$, HRT 4.8 h) の一定条件において, SF 方式でアルカリ度添加量 $0.09 \text{ gCaCO}_3/\text{gCOD}$ (52 日目), MF 方式で $0.04 \text{ gCaCO}_3/\text{gCOD}$ (114 日目), $0.02 \text{ gCaCO}_3/\text{gCOD}$ (134 日目) について実験した。

SF 方式でアルカリ度添加量 $0.09 \text{ gCaCO}_3/\text{gCOD}$ では, リアクター底部から高さ 36.5 cm までは全 VFA 濃度が 2720 から $3300 \text{ mgCOD}\cdot\text{l}^{-1}$ まで増加し, ほとんど有機物の除去が行われなかった。リアクター高さ 44 cm で VFA の分解により重炭酸塩が生成されたため, pH が 6.7, TBA5.75 濃度が $369 \text{ mgCaCO}_3\cdot\text{l}^{-1}$ 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 VFA 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 $138 \text{ mgCaCO}_3\cdot\text{l}^{-1}$, pH が 5.9, COD 除去率が 42% となった。

MF 方式でアルカリ度添加量 $0.04 \text{ gCaCO}_3/\text{gCOD}$ では, リアクター底部から高さ 21.5 cm までは VFA が蓄積して pH が 4.9 まで低下した。しかし, リアクター高さ 21.5 cm 以降で VFA の分解に伴い重炭酸塩が生成されたため, 処理水中の TBA5.75 濃度が $1280 \text{ mgCaCO}_3\cdot\text{l}^{-1}$, pH が 7.6, COD 除去率が 71% となった。

MF 方式でアルカリ度添加量 $0.02 \text{ gCaCO}_3/\text{gCOD}$ では, リアクター高さ 29 cm 以降で VFA が分解され重炭酸塩が生成されたため, 処理水中の TBA5.75 濃度が $662 \text{ mgCaCO}_3\cdot\text{l}^{-1}$, pH が 6.8, COD 除去率が 71% となった。

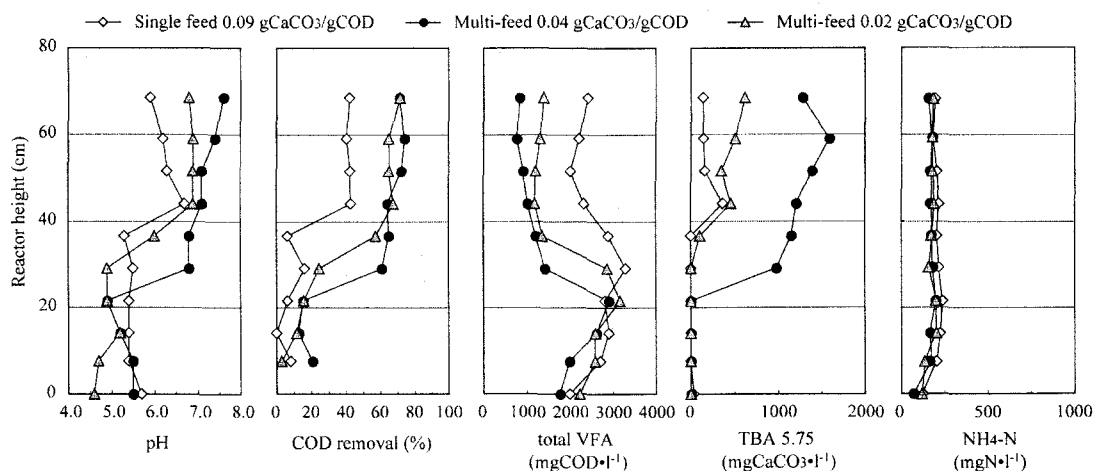


Fig. 5 Comparison of pH, COD removal, total VFA, TBA5.75 and $\text{NH}_4\text{-N}$ along the reactor height.

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 参照), 代謝由来アルカリ度が生成される。式 (2) にリアクター内におけるアルカリ度要求量を示す。この式は, van Haandel¹⁶⁾ が考案した式を改良して求めた。

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

ここで, Alk_{req} : アルカリ度要求量 ($gCaCO_3/gCOD$), VFA_{prod} : 生成されたVFA濃度 ($mgCaCO_3/l$), $CO_2(aq)_{neut}$: 溶存 CO_2 を中和するのに要するアルカリ度濃度 ($mgCaCO_3/l$), Alk_{add} : 添加したアルカリ度濃度 ($mgCaCO_3/l$), $Ammonium_{prod}$: 生成された NH_4-N 濃度 ($mgCaCO_3/l$), COD_{inf} : 流入COD濃度 ($mgCOD/l$) である。本研究では, 嫌気性処理において良好に処理が行われる場合のpH範囲が6.5~8であることから, $CO_2(aq)_{neut}$ 項にpH6.5を用いてアルカリ度要求量を算出した (Fig. 6参照)。

Fig. 6 に容積負荷 $50 kgCOD \cdot m^{-3} \cdot d^{-1}$ (流入廃水濃度 $10,000 mgCOD/l$, HRT4.8 h) の一定条件で pH6.5 における, SF 方式でアルカリ度添加量 $0.09 gCaCO_3/gCOD$ (52 日目), MF 方式で $0.04 gCaCO_3/gCOD$ (114 日目), $0.02 gCaCO_3/gCOD$ (134 日目) のアルカリ度要求量を示す。

リアクター高さ方向での最大アルカリ度要求量 (最もアルカリ度が要求されるポイントのアルカリ度要求量) は, SF 方式では高さ 29cm において $0.26 gCaCO_3/gCOD$ であったが, MF 方式ではどちらも高さ 21cm において $0.10 gCaCO_3/gCOD$ であった。

SF 方式では高さ 51.5cm において, アルカリ度要求量が $0.16 gCaCO_3/gCOD$ で最小となった。マルチフィード方式ではどちらも, リアクター高さ 44cm 以上でアルカリ度要求量がほとんどなかった。

よって, アルカリ度要求量の観点からも, MF 方式により大幅にアルカリ剤が削減できる可能性がある。

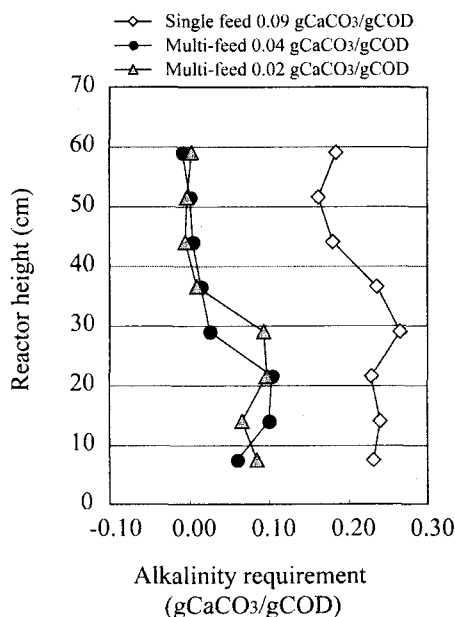


Fig. 6 Comparison of alkalinity requirement at pH 6.5 along the reactor height between single feed and multi-feed mode.

4. 結論

本研究では, 高負荷 (容積負荷 $50 kgCOD \cdot m^{-3} \cdot d^{-1}$)・低アルカリ度添加量条件において, SF 方式と MF 方式による処理特性の比較検討を行った結果, 以下の知見が得られた。

- 1) SF 方式では最小アルカリ度添加量が 0.09 から $0.12 gCaCO_3/gCOD$ の範囲であったのに対して MF 方式では 0.01 から $0.02 gCaCO_3/gCOD$ の範囲であったことから, MF 方式により最小アルカリ度添加量を $1/6$ ($0.02/0.12$) に削減可能であった。
- 2) SF 方式でリアクターの処理性能が悪化した後に MF 方式に変更することによって, COD 除去率が 65% から 75% まで上昇し, 処理性能が回復した。
- 3) リアクター内 pH を 6.5 に維持するのに必要なリアクター高さ方向での最大アルカリ度要求量は, SF 方式では $0.26 gCaCO_3/gCOD$ であったのに対して, MF 方式では $0.10 gCaCO_3/gCOD$ であり, 約 $2/5$ ($0.10/0.26$) となった。

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) Sam-soon, P., Loewenthal, R. E., Wentzel, M. C., Moosbrugger, R. E. & Marais, G. v. R. (1991) Effects of a recycle in the upflow anaerobic sludge bed (UASB) systems. *Water SA*, **17**, 37-46.
- 13) 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.
- 14) 下水試験方法上巻 1997 年版 (1997) 社団法人日本下水道協会.
- 15) 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.
- 16) van Haandel, A. C. (1994) Influence of the digested COD concentration on the alkalinity requirement in anaerobic digesters. *Water Sci. Tech.*, **30**, 23-34.