

(2) 焼酎蒸留粕廃液を対象とした 高温多段型UASBリアクターによる アルカリ剤削減オンサイト実証実験

山田 真義^{1*}・片平 智仁¹・山内 正仁²・大橋 晶良¹・原田 秀樹³

¹長岡技術科学大学大学院 環境・建設系 (〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町1603-1)

²鹿児島工業高等専門学校 土木工学科 (〒899-5102 鹿児島県霧島市隼人町真孝1460-1)

³東北大学大学院 土木工学専攻 (〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉6-6)

* E-mail:myamada@stn.nagaokaut.ac.jp

UASB法による酸性廃液を対象とした嫌気性廃液処理では、あらかじめアルカリ剤を添加し供給pHを中性付近に調整するため、アルカリ剤にかかるランニングコストが高くなるデメリットがある。本研究では、パイロットスケール高温 (55℃) 多段型UASBリアクターにより、糖系の酸性廃液である焼酎蒸留粕廃液を対象として、シーケンシャルマルチフィード方式と処理水循環方式でアルカリ剤削減運転を行った。その結果、シーケンシャルマルチフィード方式では、アルカリ剤使用量が0.075kgCaCO₃/kgCODtreated、処理水循環方式 (廃水: 井水: 処理水=1:4:10) では、処理水に含まれる代謝由来アルカリ度により、供給pHは6.3に増加し、リアクター内pHは6.9~7.2でアルカリ剤無添加運転が可能であった。

Key Words : thermophilic MS-UASB, alcohol distillery wastewater, alkalinity, on-site experiment

1. はじめに

現在、UASB法はアグロインダストリー系廃液に対し卓越した処理技術を有するが、特定の廃液種 (炭水化物系廃液) では十分なアルカリ度がないため、あらかじめ供給廃液にアルカリ剤添加を必要とする場合があり、ランニングコストが高くなるというデメリットがある^{1), 2)}。また、酸性廃液においてもアルカリ剤の添加を必要とする場合があるが、代謝由来アルカリ度を生成する場合、処理水を循環することにより、供給pHをコントロールし、アルカリ剤を大幅に削減可能であることが知られている^{2), 4), 5)}。これらの報告は中温UASBプロセスであり、実規模プラントの実施例が少ない高温UASBプロセスのアルカリ剤削減運転方法の知見が得られていない現状である。

特に、高速・高負荷型の高温UASBリアクターでは、酸生成速度とメタン生成速度のバランスが不均衡になるため、供給口付近で酸生成が優先し、pHの低下を招く可能性がある。その結果、リアクター内がメタン生成細菌の至適pH範囲外になり、メタン生成活性が低下して酢酸、プロピオン酸といった揮発性有機酸が蓄積するため、メタン発酵プロセスが破綻する可能性がある。そこ

でリアクター内のpH低下を回避する方法としてリアクターの高さ方向に廃液を分散供給 (シーケンシャルマルチフィード) し、アルカリ剤を削減出来る方法も報告されている⁶⁾。

そこで、本研究ではアルコール蒸留廃液 (麦焼酎蒸留粕廃液; 以下、麦廃液とする。) を対象とした高温 (55℃) プロセスにおけるシーケンシャルマルチフィード (Sequential Multi Feed: SMF, 以下、SMF方式とする。) 方式と処理水循環方式 (Effluent Recycle: ER, 以下、ER方式とする。) によるアルカリ剤削減運転をパイロットスケール多段型UASBリアクター (Multi-Staged UASB: MS-UASB, 以下、MS-UASBとする。) を用いてオンサイト実証実験により検討した結果を報告する。

2. 実験方法

(1) MS-UASBリアクター

図-1に本実験で用いたパイロットスケールMS-UASBリアクターのフローシートを示す。MS-UASBリアクターは、高さ6.3 m、内径0.8 m、容量2.5 m³ (液浸総容積) であ

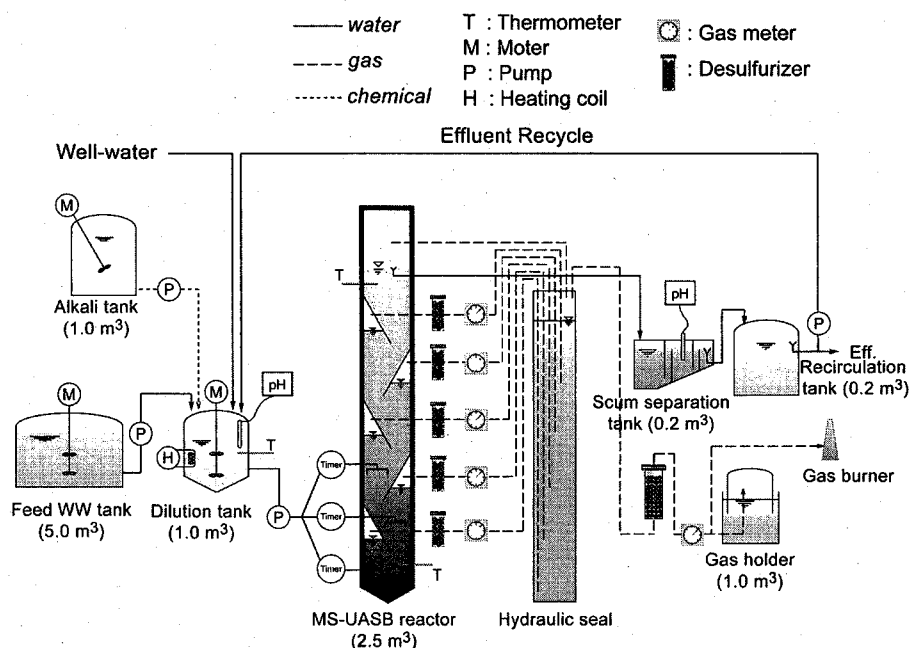


図-1 パイロットスケールMS-UASB リアクターのフローシート

る。MS-UASBリアクターは高さ方向に5段のGSS (Gas-Solids-liquid Separator) 装置と最上部に1段、計6基のGSS装置を設置した。供給口はMS-UASBリアクターの高さ方向に設置した(Inlet 1: 0.4 m, Inlet 2: 1.5 m, Inlet 3: 2.4 m)。全ガス量は乾式ガスメーターにより測定した。リアクター内温度は原水希釈調整槽に設置したヒーターにより加温し、55℃付近に制御した。COD容積負荷と液滞留時間(HRT)の算定は液浸総容積を基準として行った。植種汚泥については既報⁷⁾に記した。

(2) 供給廃水

本実験に使用した麦廃水の組成を表-1に示した。麦廃水は既設焼酎蒸留粕ピットで20時間以上重力沈殿した上澄み液を水中ポンプでポンプアップした廃水を使用した。

(3) 分析方法

COD_{Cr}測定はHACH法、pH測定はハンディpHメーター(TOA DKK HM-21P)、SS及びVSS、アンモニア性窒素の測定は下水試験方法に準拠した⁸⁾。VFAはFID型検出器ガスクロマトグラフ(Shimadzu GC-8A PF)、バイオガス組成(CH₄, CO₂, H₂)はTCD型検出器ガスクロマトグラフ(Shimadzu GC-8A IT)により測定した。供給廃水及び処理水の溶解性試料は、ガラス繊維濾紙(ADVANTEC GB140)で濾過したものを分析に使用した。

本実験におけるアルカリ度はJenkinsら⁹⁾、Ripleyら¹⁰⁾が提案したpH5.75で滴定するTBA5.75(TBA: True Bicarbonate Alkalinity)を採用した。pH4.3で滴定する

表-1 本実験に使用した麦廃水の組成

Parameters		Unit	
pH		[-]	3.9
SS		[mg·L ⁻¹]	3,900
COD _{Cr}	Total	[mgCOD·L ⁻¹]	86,900
	Soluble	[mgCOD·L ⁻¹]	79,600
Carbohydrate	Total	[mgCOD·L ⁻¹]	11,680
	Soluble	[mgCOD·L ⁻¹]	9,730
VFA	Acetate	[mgCOD·L ⁻¹]	5,170
	Propionate	[mgCOD·L ⁻¹]	580
	i-Butyrate	[mgCOD·L ⁻¹]	170
	n-Butyrate	[mgCOD·L ⁻¹]	59
	i-Valerate	[mgCOD·L ⁻¹]	83
	n-Valerate	[mgCOD·L ⁻¹]	22
	i-Caproic acid	[mgCOD·L ⁻¹]	630
	n-Caproic acid	[mgCOD·L ⁻¹]	19
TKN		[mgN·L ⁻¹]	4,100
NH ₄ ⁺ -N		[mgN·L ⁻¹]	600

場合は重炭酸塩アルカリ度とVFA塩アルカリ度が測定されるが、処理が悪化した際に蓄積するVFAにより誤差が生じることがあるため(最大約30%)、正確な重炭酸塩アルカリ度を測定するのが困難な場合がある。エンドポイントpH5.75で滴定するTBA5.75は、理論的に重炭酸塩アルカリ度の約80%が滴定されるが、VFAは20%以下しか寄与しない。そのためTBA5.75は、pH5.75で滴定されたアルカリ度(Aik5.75)に1.25を乗じて算出した(1a)。

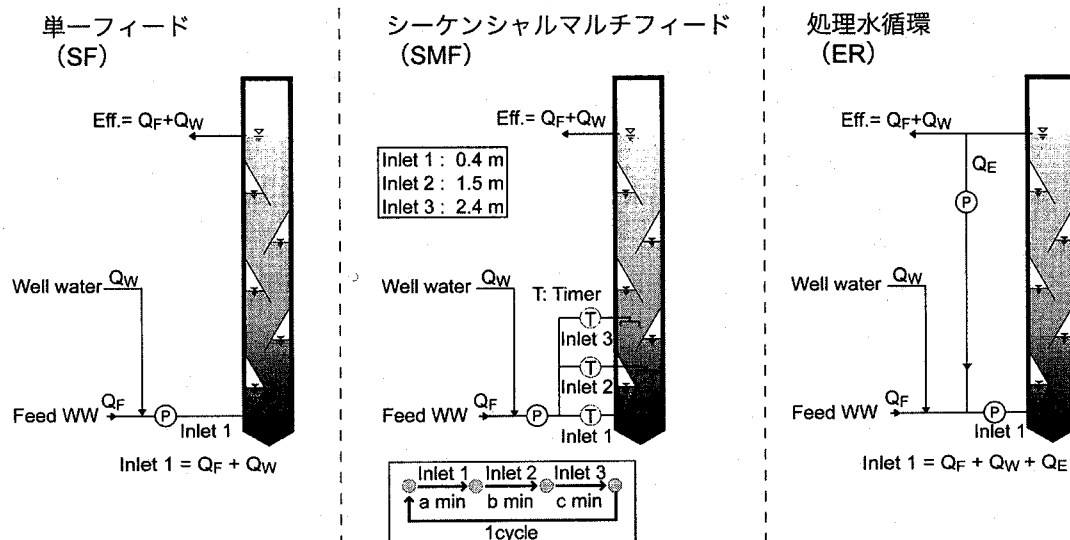


図-2 本実験の廃水供給方法 (SF, SMF, ER 方式)

表-2 廃水供給方法の違いによる実験条件

Run	Experimental period [d]	Inf.-pH [-]	F:W:E [-]	Dilution [times]	Recycle ratio [times]	OLR [kgCOD·m ⁻³ ·d ⁻¹]	Inf.-CODt [mg·L ⁻¹]	HRT [h]
SF	9	6.9	1:5.3:0	6.3	0	41.7	13900	8
SMF 1	4	6.3	1:5.3:0	6.3	0	41.7	13900	8
SMF 2	5	5.9	1:5.3:0	6.3	0	41.7	13900	8
SMF 3	5	5.5	1:5.3:0	6.3	0	41.7	13900	8
SMF 4	5	5.3	1:2.9:0	3.9	0	45.2	20900	12
SMF 5	5	5.0	1:2.9:0	3.9	0	45.2	20900	12
ER 1	22	6.2	1:1:5.5	2	5	34.8	43450	24
ER 2	21	6.2	1:2:4.5	3	4.5	34.8	29000	20
ER 3	14	6.1	1:4:5	5	5	34.8	17380	12
ER 4	21	6.3	1:4:10	5	10	34.8	17380	12

SF: single feed mode, SMF: sequential multi-feed mode, ER: effluent recycle mode
F: feed, W: well-water, E: effluent

TBA5.75 = Alk5.75 × 1.25 (1a)
ここで、
TBA5.75: True bicarbonate alkalinity at pH 5.75
Alk5.75: Titrated alkalinity at pH5.75
1.25: 1 / (80 % of HCO₃⁻ titrated at pH 5.75)

(4) 廃水供給方法

図-2に本実験の廃水供給方法を示す。供給方法は単一フィード (Single Feed: SF, 以下, SF方式とする。), SMF方式, ER方式とした。SMF方式は原水を井水により希釈し, MS-UASBリアクターの高さ方向に設置された3つの供給口 (リアクター下部からInlet 1, Inlet 2, Inlet 3とした。) から下から順に廃水供給を行った。供給サイクルは各供給口から流出口までのリアクター内液容積比

から算出した。また, Inlet 3から流出口までのHRTが 4 h 以上になるように設定し, Inlet 1: Inlet 2: Inlet 3 = 約18分: 15分: 12分とした。ER方式は処理水を循環水槽から循環ポンプにより所定量を原水希釈調整槽に送り循環した。

(5) 実験条件

表-2に実験条件を示す。SF方式はSMF方式とER方式の比較データとした。SMF方式ではHRTが8~12 hであるため各実験期間を5日間とし, 原水希釈調整槽に設置したpH制御装置で供給pHを6.3から5.0に段階的に低下させ, アルカリ剤使用量, 処理性能を調査した。ER方式では井水による希釈率及び処理水循環比を変更し, アルカリ剤使用量, 処理性能を調査した。

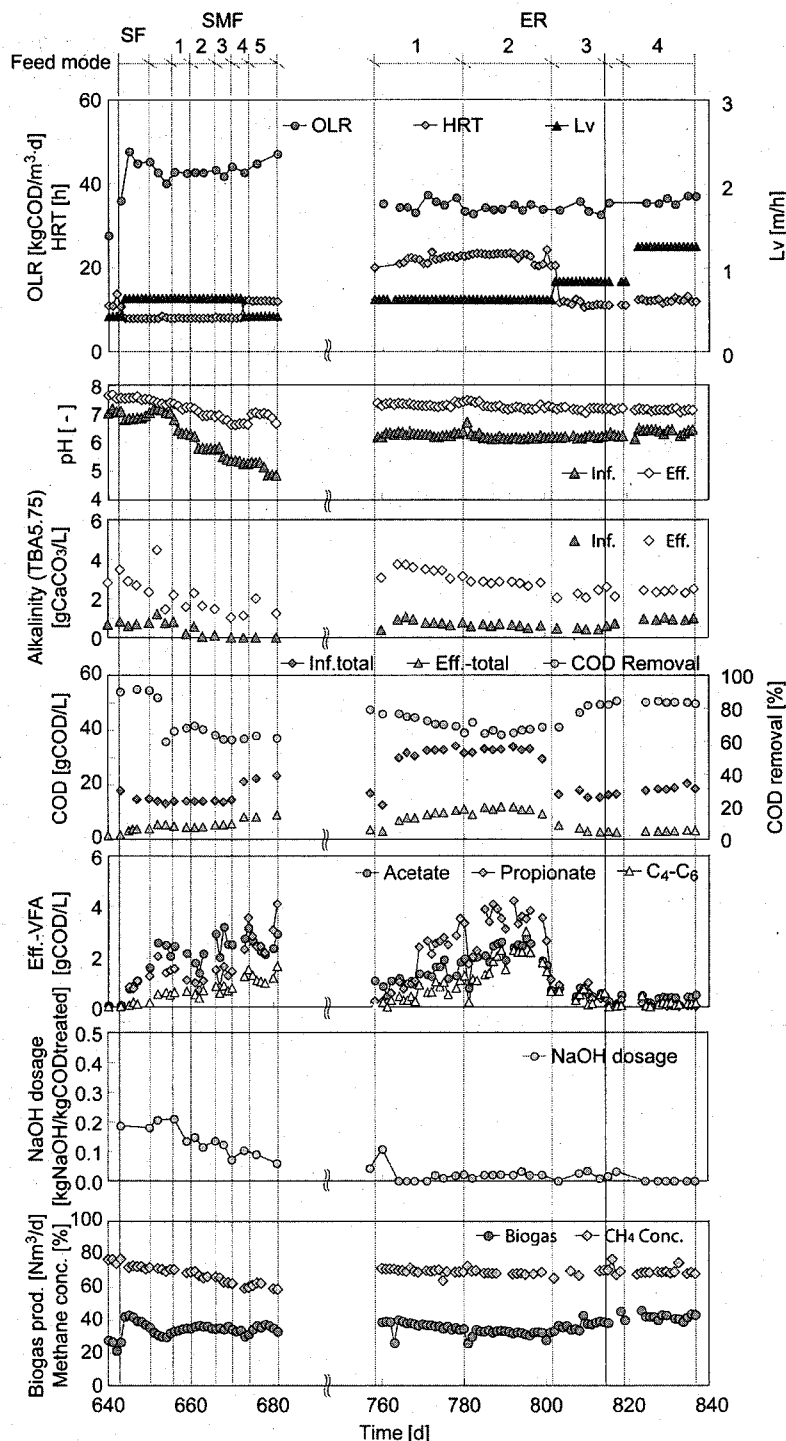


図3 アルカリ剤削減運転を対象とした高温 MS-UASB リアクターの連続処理実験結果

3. 実験結果及び考察

(1) アルカリ剤削減期間の連続処理特性

図-3 に 640 日から 840 日のアルカリ剤削減運転を対象とした高温 MS-UASB リアクターの連続処理実験結果を示

す。アルカリ剤削減運転期間は COD 容積負荷 $35 \sim 45 \text{ kgCODm}^{-3}\text{d}^{-1}$ で運転を行った。SMF 方式によるアルカリ剤削減実験は 5 条件について行い、実験期間の汚泥負荷は $3.5 \text{ kgCODkgVSS}^{-1}\text{d}^{-1}$ であった。SF 方式から SMF 方式に切り換え後、COD 除去率が 60%程度に低下したが、処理水

VFA の上昇が観察されなかったため、実験を継続した。SMF 5 (Inf. pH 5.0) において処理水 VFA が蓄積する傾向を観察したため、SMF 5 を SMF 方式によるアルカリ剤削減運転の限界と判断した。

ER方式によるアルカリ剤削減実験は4条件について行い、井水による希釈倍率と処理水循環比を変化させ、アルカリ剤削減効果を調査した。ER方式の実験期間の汚泥負荷は2.0~3.2 kgCOD/kgVSS⁻¹・d⁻¹であった。ER 1 (井水2倍希釈) 及びER 2 (井水3倍希釈) では、リアクター内のアンモニア性窒素濃度が約1,300 mgNL⁻¹になり、理論上の遊離アンモニア濃度が114 mgNL⁻¹程度存在していたことが分かった。メタン生成が失活する150 mgNL⁻¹¹⁰⁾に達してはいなかったが、処理水VFAの蓄積が見られた。そこで、バイアル実験 (実験温度: 55℃, バイアル内pH 7.0) によりアンモニア性窒素によるメタン生成菌への阻害の有無を確認した結果を表-3に示す。この結果からバイアル内アンモニア性窒素が1,000 mgNL⁻¹でプロピオン酸基質を対象としたメタン生成活性値が約半分になり、リアクター内のアンモニア性窒素濃度がメタン発酵に影響していることが確認された。そのため、ER 3では廃水に対し井水で5倍希釈を行いリアクター内のアンモニア性窒素濃度が1,000 mgNL⁻¹以下になるように、F:W:E=1:4:5に設定し運転を行った。その結果、処理水VFAが低下し、COD除去率は80%程度に回復し、良好な処理を行うことが出来た。ER 4では廃水に対する井水希釈倍率をER 3と同じ5倍希釈に設定し、処理水循環量を廃水量1Qに対し10Qに増加させ、F:W:E=1:4:10で運転を行った。この結果、COD除去率が80%以上で安定した処理が可能であった。

(2) SF方式と比較したSMF方式のアルカリ剤削減効果

COD容積負荷は40 kgCOD/m³・d⁻¹で約30日間、流入pHを変化させ、アルカリ剤 (12%水酸化ナトリウム) 削減運転の最適条件を求めた。図-4にSF方式とSMF方式の除去COD当たりに対するアルカリ剤削減率をSF方式のNaOH使用量 (0.228 kgCaCO₃/kgCODtreated) を100%としたときの比較結果を示す。SF方式からSMF方式に切り換え、SMF 1ではアルカリ剤削減率26.2% (0.168 kgCaCO₃/kgCODtreated)、SMF 5では、67.2% (0.075 kgCaCO₃/kgCODtreated) までアルカリ剤使用量を削減することが可能であった。このことから、SF方式からSMF方式に切り換えることにより、約7割のアルカリ剤が削減出来ることが分かった。

表廃水を対象としたSMF方式における本実験条件では、アルカリ剤使用量をゼロにすることが出来ないことが分かったが、メタン生成菌を阻害するアンモニア性窒素、微量金属 (Mg²⁺, Ca²⁺, K⁺, Na⁺) 等が高濃度に含まれる廃水種に対しては、井水などにより適正な希釈をする必要

表-3 バイアル内アンモニア性窒素濃度による各基質のメタン生成活性値 (バイアル内pH 7.0)

アンモニア性窒素 [mgNL ⁻¹]	メタン生成活性値		
	水素基質 [gCOD/gVSS ⁻¹ ・d ⁻¹]	酢酸基質 [gCOD/gVSS ⁻¹ ・d ⁻¹]	プロピオン酸基質 [gCOD/gVSS ⁻¹ ・d ⁻¹]
130	6.33	0.83	0.15
1,000	5.65	0.79	0.06
3,000	5.27	0.55	0.03

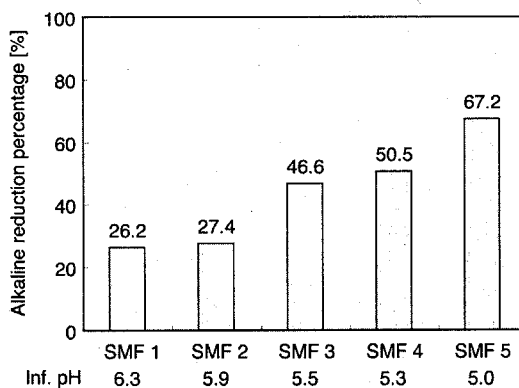


図-4 SF方式に対するSMF方式のアルカリ剤削減率

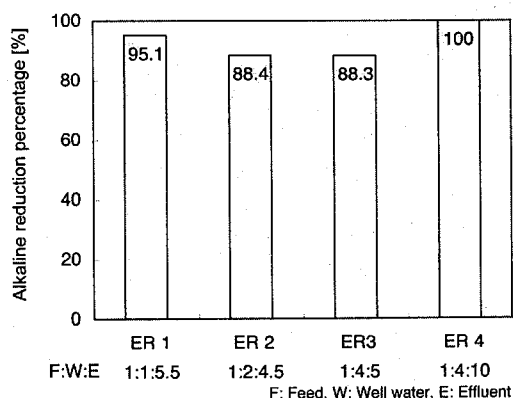


図-5 SF方式に対するER方式のアルカリ剤削減率

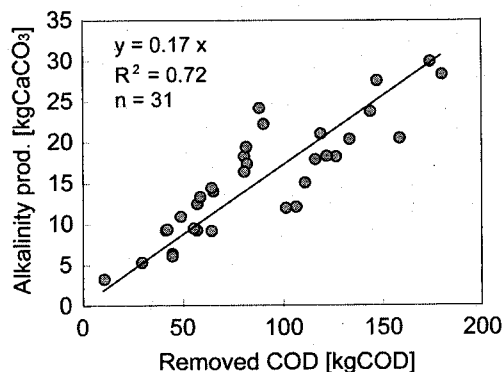


図-6 除去COD量に対する廃水からのアルカリ度生成量

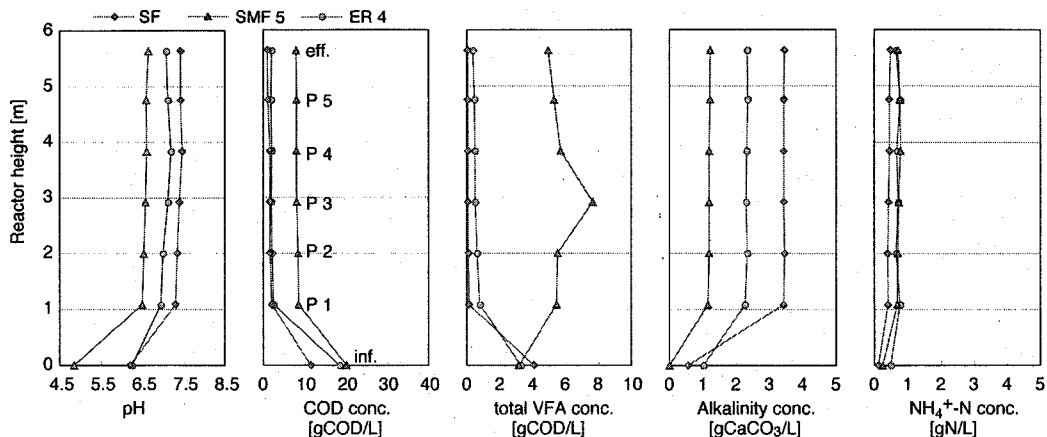


図-7 SF, SMF, ER 運転時のリアクター高さ方向のプロファイル結果

があるため、SMF方式によるアルカリ剤削減方法は有効であると考えられる。

(3) SF方式と比較したER方式のアルカリ剤削減効果

ER方式ではCOD容積負荷 $35 \text{ kgCOD} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ で約80日間、処理水循環運転を行った。まず、ER 1〜3で井水による希釈量を増加させ、アルカリ剤使用量を調査した。次に、ER 4では処理水循環量を原水量1Qに対して10Qに増加させアルカリ剤使用量を調査した。図-5にSF方式に対するER方式のアルカリ剤削減率を示す。ER 1〜4の全ての実験条件においてアルカリ剤使用量が大幅に削減可能であった（アルカリ剤削減率 ER 1: 95.1%, ER 2: 88.4%, ER 3: 88.3%, ER 4: 100%）。特にER 4ではアルカリ剤を無添加で運転が可能であった。ER 1及びER 2で処理水VFAが蓄積した原因としてアンモニア阻害が考えられたため、ER 3で井水による希釈倍率を増加させた。アルカリ剤使用量の比較すると、ER 2で除去COD量が減少したためER 3と同等のアルカリ剤が必要になったが、希釈倍率が低いほどアルカリ剤使用量を抑えられる結果であった。

ER 3 (F:W:E=1:4:5) からER 4 (F:W:E=1:4:10) に処理水循環比を増加させた結果、アルカリ剤無添加運転が可能であり、COD除去率も80%以上と非常に良好な処理が可能であった。Nishimura ら⁵⁾の蒸留廃水を対象とした中温UASBリアクターの循環運転の結果では $0.02 \text{ kgCaCO}_3/\text{kgCODtreated}$ (処理水循環比: 9) であり、本実験のER方式の有効性が確認された。ER 4においてアルカリ剤無添加運転が可能であった理由は、麦廃水のアルカリ度生成能に起因していると考えられる。図-6に麦廃水を対象とした除去COD量に対する廃水からのアルカリ度生成量を示す。この結果から麦廃水のCOD除去量 (1 kgCOD) に対し 0.17 kgCaCO_3 が生成され、ER方式で運転することにより処理水に含まれる代謝由来アルカリ度を利用し、アルカリ剤を削減可能であることが分かった。

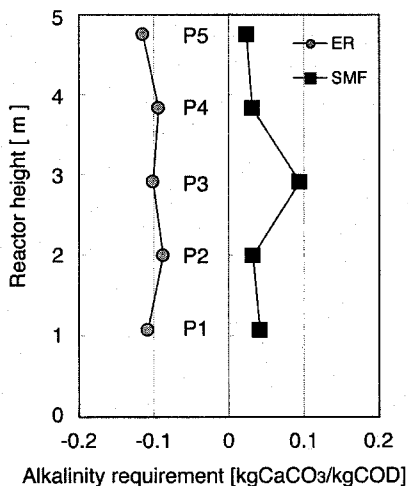


図-8 SMF 5, ER 4 運転時のリアクター高さ方向のアルカリ度要求量

(4) 各運転条件におけるリアクター高さ方向の基質分解挙動

図-7にSF方式とSMF方式 (SMF 5)、ER方式 (ER 4) のリアクター高さ方向の基質分解挙動を示す。SMF 5ではpHが6.4程度でメタン生成菌の至適pH (pH 6.5〜8.2) から少し外れていたことや実験開始時の汚泥負荷が高く ($3.5 \text{ kgCOD} \cdot \text{kgVSS}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)、良好な処理が出来なかったため、アルカリ度はP1から処理水まで $1,000 \text{ mgCaCO}_3/\text{L}$ 程度とSF運転の1/3程度、ER運転の1/2程度であった。ER 4では処理水に含まれる代謝由来アルカリ度を利用し、アルカリ剤添加なしで供給pH 6.3を維持することが可能で、リアクター内pHも6.9〜7.2でメタン生成菌の至適pH範囲内で運転を行うことが出来た。アルカリ度もP1から処理水まで $2,000 \text{ mgCaCO}_3/\text{L}$ 以上と十分なアルカリ度を維持

することが可能であった。図-8に式(2a)から算出した各運転条件 (SMF 5, ER 4) におけるアルカリ度要求量を示す。

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

ここで、

Alk_{req} : アルカリ度要求量 ($\text{kgCaCO}_3/\text{kgCOD}$)

VFA_{prod} : 生成された VFA 濃度 (mgCaCO_3/L)

$\text{CO}_2(\text{aq})_{\text{neut.}}$: pH6.5 における溶存 CO_2 の中和に必要なアルカリ度要求量 (mgCaCO_3/L)

Alk_{add} : 供給アルカリ度 濃度 (mgCaCO_3/L)

$\text{Ammonium}_{\text{prod}}$: 生成された $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 濃度 (mgCaCO_3/L)

$\text{COD}_{\text{inf.}}$: 流入 COD 濃度 (mgCOD/L)

この結果から、SMF 4では3 m付近でVFA濃度が高くなりアルカリ度が0.1 $\text{kgCaCO}_3/\text{kgCOD}$ 必要であった。また、ER 4では、リアクター内のアルカリ度要求量が総ての測定ポイントでアルカリ度が十分に足りており、処理水循環をすることにより、麦廃水から生成されたアルカリ度で十分に供給麦廃水を中和することが出来ることが分かった。

4. おわりに

SMF 方式で供給 pH 5.0 の実験条件 (SMF 5) で COD 除去率が 60%であったが、SF 方式と比較しアルカリ剤使用量を 70%削減でき、アルカリ剤使用量は 0.075 $\text{kgCaCO}_3/\text{kgCODtreated}$ であった。

ER 方式では、F : W : E = 1 : 4 : 10 の実験条件 (ER 4) で、COD 除去率 83.8%、アルカリ剤無添加運転が可能であった。

なお、メタン生成菌を阻害するアンモニア性窒素、微量金属 (Mg^{2+} , Ca^{2+} , K^+ , Na^+) 等が高濃度に含まれる廃水種に対しては、井水などにより適正な希釈をする必要があるため、SMF方式によるアルカリ剤の削減効果が期待できると考えられる。また、麦廃水に対しアルカリ剤削減をするためにER方式は有効な運転方法であることが分かった。

謝辞：本研究は経済産業省、地域新生コンソーシアム研究開発事業 (平成14, 15年度) の補完研究 (平成16, 17年度) として実施した。本実験設備の設置は国分酒造協業組合殿、改造工事は株式会社荏原製作所殿のご協力を得た。また、本研究を行うにあたり九州産業技術センターの吉田善樹氏、国分酒造協業組合の皆様にご多大のお世話になった。ここに記して感謝申し上げます。

参考文献

- 1) Ferguson, J. F., Eis, B. J. and Benjamin, M. M.: Neutralization in anaerobic treatment of an acid waste, *Wat. Res.*, Vol.18, pp.573-580, 1984.
- 2) Romli, M., Greenfield, P. F. and Lee, P. L.: Effect of recycle on a two-phase high-rate anaerobic wastewater treatment system, *Wat. Res.*, Vol. 28, pp. 475-482, 1994.
- 3) Lettinga, G.: Anaerobic digestion and wastewater treatment systems, *Antonie van Leeuwenhoek*, Vol. 67, pp. 3-28, 1995.
- 4) Shin, H.-S., Bae, B.-U., Lee, J.-J. and Paik, B.-C.: Anaerobic digestion of distillery wastewater in a two-phase UASB system, *Wat. Sci. Tech.*, Vol. 25, pp. 361-371, 1992.
- 5) Nishimura, S. and Yoda, M.: Effect of decarbonation on alkaline reduction in two-phase UASB process, *Wat. Sci. Tech.*, Vol. 34, pp. 437-444, 1996.
- 6) 遠山明, Yoochatchaval Wilasinee, 井町寛之, 大橋晶良, 原田秀樹: 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, 環境工学研究論文集, Vol. 42, pp. 407-414, 2005.
- 7) 山田真義, 山内正仁, 大橋晶良, 原田秀樹: 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, Vol. 41, pp. 31-40, 2004.
- 8) 日本下水道協会: 下水試験方法 上巻, 1997.
- 9) Jenkins, S. R., Morgan, J. M. and Sawyer C. L.: Measuring anaerobic sludge digestion and growth by a simple alkalimetric titration, *J. WPCF*, Vol. 55, pp. 448-453, 1983.
- 10) Ripley, L. E., Boyle, W. C. and Converse, J. C.: Improved alkalimetric monitoring for anaerobic digestion of high-strength wastes, *J. WPCF*, Vol. 58, pp. 406-411, 1986.
- 11) McCarty, P. L. and McKinney, R. E.: Salt toxicity in anaerobic digestion, *J. WPCF*, Vol. 33, pp. 399-415, 1961.

(2006.5.26 受付)

Reduction of alkali addition for treatment of *shochu* distillery wastewater by pilot-scale thermophilic (55 °C) multi-staged UASB reactor

Masayoshi YAMADA¹, Tomohito KATAHIRA¹, Masahito YAMAUCHI²,
Akiyoshi OHASHI¹ and Hideki HARADA³

¹Dept. of Environmental Systems Engineering, Nagaoka University of Technology

²Dept. of Civil Engineering, Kagoshima National College of Technology

³Dept. of Civil Engineering, Tohoku University

One of the main disadvantages of anaerobic treatment of wastewater having low pH is that the operational cost is too high as there is a need to supply a considerable amount of alkali from outside. To curtail the cost by reducing alkali supply, a sequential multi-feed mode (distributed feeding) and effluent recycle mode were proposed, and verified by conducting experiment on a pilot-scale (2.5 m³) thermophilic (55 °C) multi-staged UASB reactor. Wastewater used for the study was alcohol distillery wastewater (*shochu*), one of the largely produced industrial wastewater in Japan. The sequential multi-feed mode of operation (SMF 5; influent pH: 5.0, COD loading rate: 45 kgCOD·m⁻³·d⁻¹ (HRT: 12 h, influent COD concentration: 20,900 mgCOD·L⁻¹)), successfully made it possible to lessen alkalinity supplement (24 % NaOH solution) by 67.2 % compared to the single feed mode. As for the effluent recycle mode operation (ER 4; F:W:E = 1:4:10, COD loading rate: 35 kgCOD·m⁻³·d⁻¹ (HRT: 12 h, influent COD concentration: 17,400 mgCOD·L⁻¹)), operation was possible without any supplement of alkalinity as the system reuses the alkalinity generated during the microbial metabolism.