

## 電気分解法を利用した凝集処理システムの開発

### Development of electrocoagulation for wastewater

鎌田 樹志\*・明本 靖広\*・若杉 郷臣\*

富田 恵一\*

KAMADA Tatsuyuki\*, AKEMOTO Yasuhiro\*,

WAKASUGI Motoomi\*, TOMITA Keiichi\*

受付：2021年11月22日

受理：2022年6月29日

\* 循環資源部

Corresponding Author KAMADA Tatsuyuki

kamada-tatsuyuki@hro.or.jp

#### ABSTRACT

The electrocoagulation has properties that are compact and easy to handle, it is promising for wastewater treatment on the small scale. However, since electrocoagulation is commonly used in the electrochemical industry, some optimal conditions should be investigated and evaluated for application to the treatment of high concentration wastewater. For the purpose of continuous small-scale treatment, the treatment conditions were verified using digested livestock manure as model wastewater and iron electrode. The model wastewater was supplied to an experimental tank (effective volume was 2 L × 4 tanks) at 4 L/h and operating electrocoagulation with a constant current of 2 A. The leached iron ion from the anode electrode aggregated the suspended solid in model wastewater. The continuous treatment is feasible without the accumulation of sediments in the treated water by withdrawing the aggregated sediments at 1.6 L/h from the bottom of the tank. In addition, the coagulation effect of this method was comparable to that of a commercially available coagulant. These results indicate electrocoagulation can be an alternative to the coagulant-based sedimentation process.

*Keywords: Electrocoagulation, Wastewater treatment, Coagulation treatment*

#### 1. はじめに

排水処理において一般的に用いられる処理方法は、活性汚泥法などの生物処理である。しかし、この方法は反応速度が遅いため大きな処理槽が必要で、さらに負荷変動や温度変化などの影響で処理が不安定になりやすいなどの問題点を抱えている。また、各種産業・生活排水には高濃度の有機物や難分解性物質などが含まれているが、排水基準は年々厳しくなる傾向にあり、生物処理だけで基準を満たすのは難しい状況となっている。そのため、排水処理プロセスにおいて、物理化学的な処理方法を組み合わせる必要性が高まっている<sup>1)</sup>。

物理化学的な方法のひとつとして凝集処理法が挙げられる。これは塩化第二鉄やポリ塩化アルミニウムなどの凝集剤を添加することで排水の懸濁成分等を凝集・沈殿させる方法である。一方、電気分解により鉄やアルミニウムを排水に供給し凝集処理を行う電気分解法がある。この方法は、例えば鉄を供給する場合、鉄を電極として直流電流を通電することにより陽極から鉄が溶出し、凝集剤と同様に作用する(図1)。

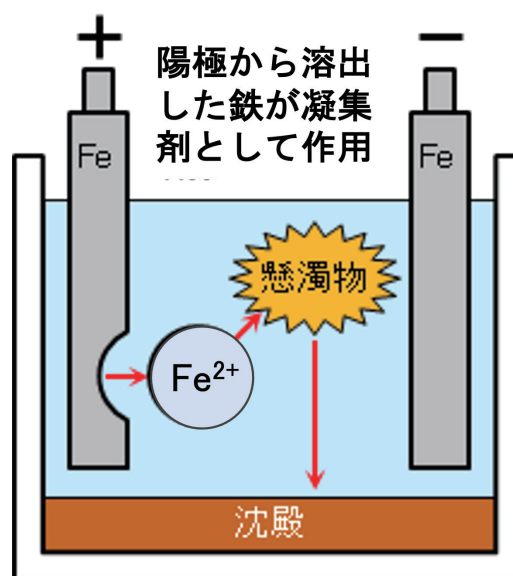


図1 鉄電極による凝集処理の原理

Fig. 1 Principle of electrocoagulation with iron electrodes

金属鉄、アルミニウムを電極に用いるため、酸性で腐食性の高い塩化第二鉄やポリ塩化アルミニウムなどの凝集剤よりも安全性が高い利点がある。また、リンの除去において、これらの凝集剤と比較して、ランニングコストが低く、設置スペースの観点からも有効とされている<sup>2)</sup>。

しかしながら、これまでに研究されている電気分解法による凝集処理は、電気化学工業で用いられているものを模倣したものが多く、排水処理に適用する場合には電解槽の構造、操作条件などを最適化する必要がある<sup>3)</sup>。当研究所では電気分解法を利用した凝集処理について、バッチ処理試験における基本的な処理特性を報告している<sup>4)</sup>。

本研究では、従来の薬剤（凝集剤）による凝集処理を電気分解法による凝集処理に改良することを想定し（図2）、鉄電極を用いた凝集処理について連続試験装置を製作した。この装置を用いて、電気分解の適正条件や凝集物の引抜条件など凝集プロセスを検討した。さらに、市販凝集剤と凝集状況を比較した。

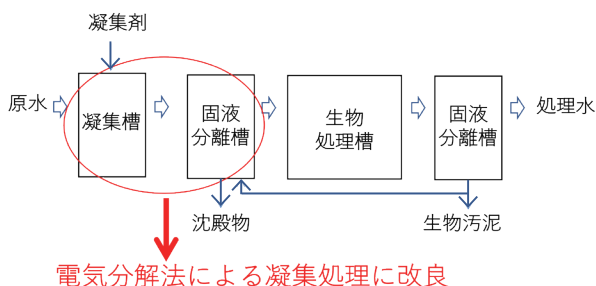


図2 一般的な排水処理プロセスと本研究の位置づけ  
Fig. 2 General wastewater treatment process and position of this study

## 2. 試験方法

### 2.1 連続試験装置

電気分解法による凝集試験を行うため、試験水槽、直流電源、極性反転スイッチ、攪拌機を組み合わせた連続試験装置を製作した。図3、4に概略図と試験水槽の写真を示す。試験水槽は1槽あたり100mm×100mm×200mm（有効容積2L）で4槽が連なっており、1槽目は電解槽および凝集槽とし、攪拌機と電極を設置した。2～4槽目は沈澱槽とし各槽は上部からのオーバーフローにより液を移送した。原水は1槽目にチューブポンプで送液し、4槽目上部から上澄み処理水を排出した。また2槽目、3槽目の下部からチューブポンプにより沈澱を引き抜いた。

電源は直流電源（アズワン PPS303）を用い、定電流モード（1A または 2A）で給電した。電極との間に極性反転スイッチを設け、30分毎に陽極、陰極の極性を反転した。

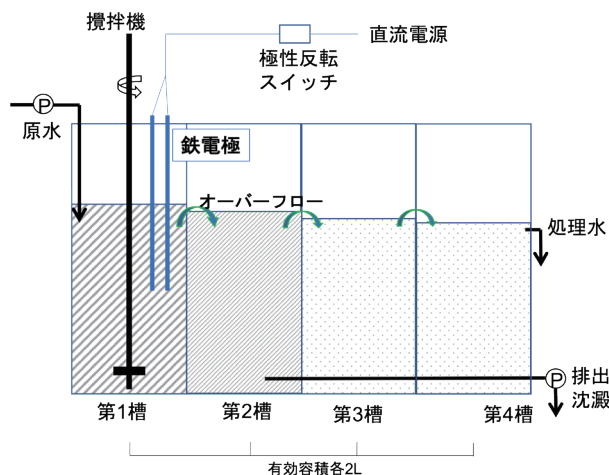


図3 連続電解処理試験装置の概略図  
Fig. 3 Schematic diagram of experimental equipment for the continuous electrocoagulation

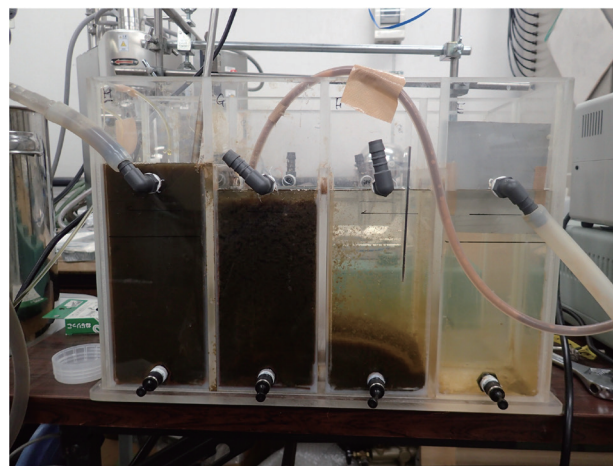


図4 試験水槽  
Fig. 4 Experimental equipment for the continuous electrocoagulation

### 2.2 供試排水と分析方法

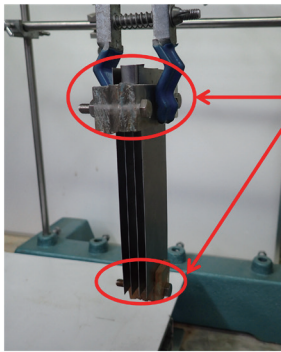
供試排水は、比較的保存性がよく、懸濁物質（SS）を多く含むことから家畜ふん尿のメタン発酵消化液を選定した。凝集試験にはメタン発酵消化液を目開き約1.5mmの網でろ過し、大きな未分解物や敷料を除いた後、SSが1,000mg/Lとなるように希釈し模擬排水（原水）とした。この排水の水質を表1に示す。なお、SSについてはJIS K0102により分析した。また、全有機体炭素（TOC）および全窒素（T-N）はTOC-TN計（株）島津製作所 TOC-VCPH, TNM-1）、全リン（T-PO<sub>4</sub>）はポータブル吸光度計（ハック社 DR 2800）で分析した。

表1 供試排水の水質  
Table 1 Characteristic of model wastewater

	SS	TOC	T-N	T-PO <sub>4</sub>
原水(mg/L)	1,000	700	207	127

### 2.3 電極設置方法と評価

電極には鉄電極 45mm × 150mm × 0.4mm ((株)三商)を使用した。また既報<sup>4)</sup>では電極2枚でバッチ試験を行ったが、連続試験では電解槽容積あたりの有効極板面積を増加させるため、鉄電極4枚を用い、5mmの塩化ビニル板を挟み極板間を固定し(図5)、1, 3枚目と2, 4枚目を接続してそれぞれ陰極、陽極とした。また、電解槽には上部から吊り下げ100mm浸漬した。電極の評価は、試験後に水分を拭き取り、電極表面の観察と各電極の重量を測定した。各試験における重量減少量を鉄の溶出量とした。



塩化ビニル板をはさみ極板間の距離を5mmに保持

図5 電極設置法(4枚の鉄電極)  
Fig. 5 Electrode configuration (4 iron electrodes)

### 2.4 電解凝集の適正条件

電極へ通電すると、陽極板上に凝集物が付着するため電圧値が上昇し、消費電力が増加する。これを低減するため、通電の極性を反転すると陰極板上で発生する水素ガスにより付着物がはく離し電圧が低下することがわかっている<sup>4)</sup>。また凝集物の付着を抑制するには極板間の水流も有効と考えられる。そこで攪拌速度による電圧上昇への影響を確認した。電気分解は、電源装置により2Aの定電流で運転し、電源装置のロガー機能により電圧値を記録した。電解槽上部から攪拌羽根を入れ、攪拌機を所定回転数(150, 300, 400rpm)で運転した。この時の電圧変化と凝集状況の目視により、凝集処理への通電方法と攪拌の影響を検討した。

### 2.5 凝集プロセスの検討

凝集処理を連続して行うため、凝集により生成した汚泥の引抜条件(排出条件)を検討した。連続凝集試験で濃度調整した原水を4L/hで供給すると、各槽は有効容積2Lのため1槽あたりの滞留時間は0.5hとなる。この時1槽目は電気分解槽、2槽および3槽目は沈降槽、4槽目は放流槽と想定し試験を行った。

沈澱の引抜量は、沈澱槽の汚泥の増減を目視により判断した。また、連続処理が可能と思われる引抜量における処理水と排出沈澱の分析を行い、凝集プロセスの評価とした。

### 2.6 市販凝集剤との比較

市販凝集剤を用いた比較試験を実施した。原水供給量、沈澱引抜量や1槽目の攪拌は300rpmとするなど電気分解法と同条件とし、1槽目に鉄供給量が電気分解法と同じとなるように塩化第二鉄水溶液(10gFe/L)をチューブポンプで連続投入した。この時の処理水と排出沈澱について電気分解法と比較した。

## 3. 結果と考察

### 3.1 電極設置方法と評価

電極を4枚使用した連続凝集試験を実施後、電極は浸漬部分がほぼ均等に薄くなった(図6)。電気分解を続けると4枚の電極のうち中側の2枚目3枚目は図7のように崩壊した。また1Aおよび2Aで所定時間電気分解した場合の各電極の重量減少は、外側の1枚目4枚目は中側の電極の半分に近い値であった(表2)。これは1枚目と4枚目の外面は電極反応に寄与せず、2枚目と3枚目は両面が反応している違いによるものと考えられる。また既報<sup>4)</sup>から鉄の溶出量は通電した電気量に比例することがわかっており理論値は約1gFe/A・hである。1Aで4時間処理、2Aで2.2時間処理、2Aで4時間処理の各結果とも4枚の電極の合計減少量は、理論値の鉄溶出量とそれぞれ一致することが確認できた。これらのことから、電流値を調整することで鉄の溶出量を容易に制御でき、原水に合わせた鉄を供給することで無駄なく電極が利用できるとともに、通電量の積算値から電極寿命を予測することが可能とわかった。

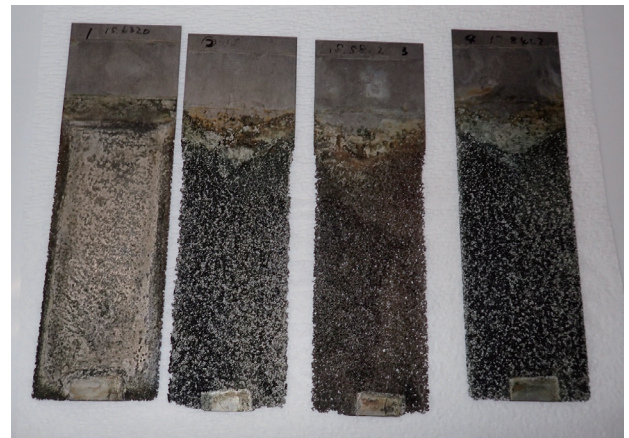


図6 8時間使用後の鉄電極  
Fig. 6 Picture of the iron electrode after 8 hours of electrocoagulation

表2 電極の重量変化  
Table 2 Weight loss of electrode after electrocoagulation

電解条件	電極板No.	1	2	3	4	1-4合計
1A-4h	減少量(g)	0.824	1.326	1.325	0.680	4.155
2A-2.2h	減少量(g)	0.707	1.542	1.332	0.855	4.436
2A-4h	減少量(g)	1.487	2.587	2.565	1.461	8.099



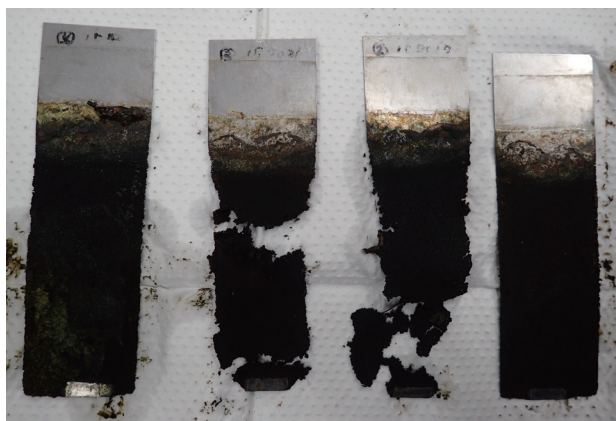


図7 14時間使用後の鉄電極  
Fig. 7 Picture of the iron electrode after 14 hours of electrocoagulation

### 3.2 電解凝集の適正条件

図8に攪拌速度と電圧上昇の関係を示す。150rpmでは30分毎の極性反転を行っても電圧の上昇が見られたが、300rpm以上では電圧は上昇しなかった。さらに電気分解では陰極からの水素ガス生成により泡が発生するが、150rpmでは泡が減らず、2槽以降に流出した(図9)。

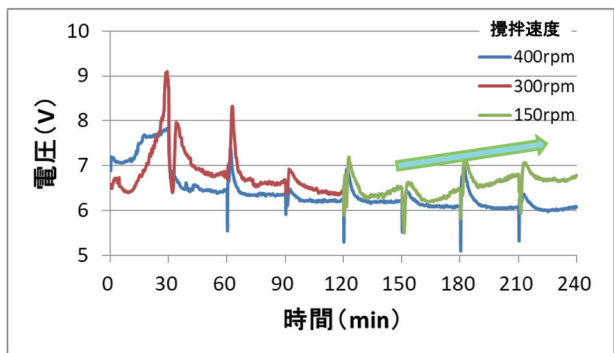


図8 連続処理における電圧の経時変化  
Fig. 8 Variation in the voltage as a function of time during continuous electrocoagulation

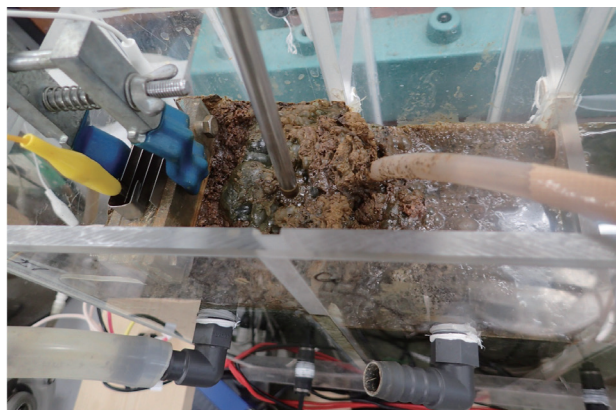


図9 電気分解による泡の発生状況  
Fig. 9 Generated foam during continuous electrocoagulation around the electrodes

300rpm以上では泡が攪拌に巻き込まれ消泡し2槽目への流出が抑制された。このことから、適正条件として極性反転と一定速度以上の攪拌が必要であることがわかった。

### 3.3 凝集プロセスの検討

電気分解によって生成する沈澱の引抜量を決めるため、電気分解中の電解槽から試料を採取し、SV30(30分後の沈澱容積)を測定したところ30%程度であった。これを目安に沈澱槽からの連続的な引抜量を調整したところ1.6L/hの引抜(原水供給量の40%)で、沈澱が溜まることなく連続的に上澄みが得られた。(図10)

またこの時の原水、処理水および排出沈澱のSS、TOC、T-N、T-PO<sub>4</sub>を分析したところ、SS、TOC、T-PO<sub>4</sub>は凝集分離により94%以上除去できたがT-Nの除去率は40%程度であった。また排出沈澱のSSは3,300mg/Lであり、他の項目も原水に比べ2~3倍に濃縮されていた(表3)。

これらのことから実プロセスでは凝集処理を行った後の生物処理への負荷低減に有効であることが示唆された。

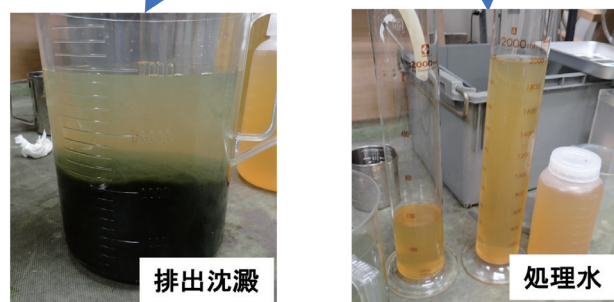
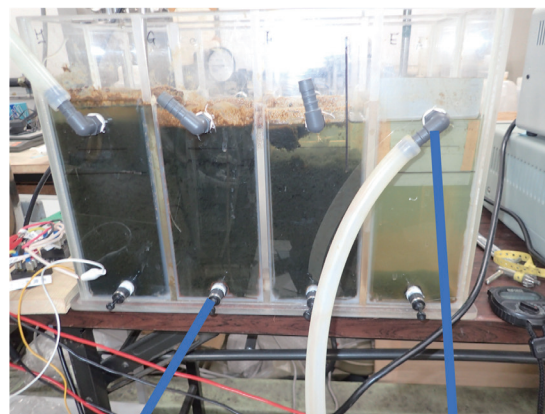


図10 連続処理における排出沈澱と処理水  
Fig. 10 Discharged sediment and treated water during continuous electrocoagulation

表3 連続処理における水質分析結果

Table 3 Characteristics of model wastewater before and after continuous electrocoagulation

	SS	TOC	T-N	T-PO <sub>4</sub>
原水(mg/L)	1,000	700	207	127
処理水(mg/L)	17	16	148	2
処理水除去率(%)	98	98	29	98
排出沈澱(mg/L)	2,370	1,580	280	202

### 3.4 市販凝集剤との比較

市販凝集剤による比較試験では、原水供給量を 4L/h、沈澱引抜量 1.6L/h、電気分解槽の攪拌は 300rpm とし、1 槽目に 2A 定電流の電気分解法と同じ鉄供給量 2gFe/h となるように塩化第二鉄水溶液を添加し凝集処理を行った (図 11)。その結果の処理水の SS、TOC、T-PO<sub>4</sub> は 95% 以上除去され、T-N は 30% 除去された。また引抜沈澱の SS は 2,370mg/L であった (表 4)。T-N 除去率と引抜沈澱の SS が若干電気分解法より低いが、鉄の凝集作用は、市販凝集剤である塩化第二鉄と電気分解法では同等の効果が得られることを確認した。電気分解法はこれまでの薬剤凝集に比べ薬剤注入ポンプが不要であり、通電条件により鉄溶出量の調整が可能ことから、維持管理が容易になると考えられる。

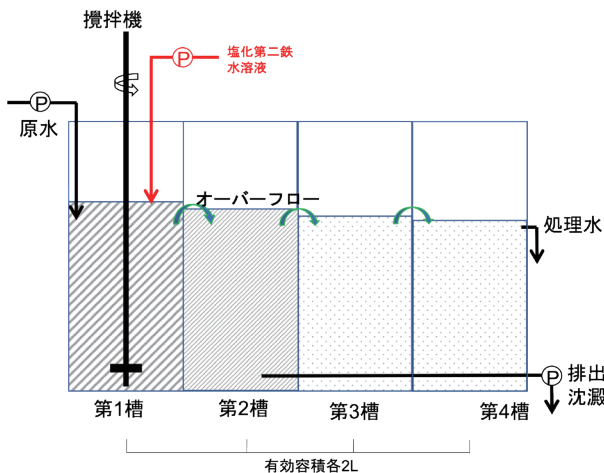


図 11 市販凝集剤との比較試験

Fig. 11 Schematic diagram of comparative experiment with commercial

表 4 市販凝集剤による水質分析結果

Table 4 Characteristics of model wastewater before and after the treatment with commercial flocculants

	SS	TOC	T-N	T-PO <sub>4</sub>
原水(mg/L)	1,000	700	207	127
処理水(mg/L)	32	42	127	4
処理水除去率(%)	97	94	39	97
排出沈澱(mg/L)	3,300	2,680	402	299

## 4. まとめ

鉄電極による電気分解法の連続凝集処理について、家畜ふん尿消化液を模擬排水とし処理特性を検討した。

- ・鉄電極は浸漬部分の極板全体から鉄が溶出するため浸漬部分の極板を無駄なく利用が可能で、電気分解による鉄の溶出量は理論値とほぼ一致する。
- ・電源の極性反転と電気分解槽の攪拌で電圧上昇を抑制でき消費電力低減できる。
- ・排水から SS、TOC、T-PO<sub>4</sub> を 94% 以上除去できる。ただし T-N は 40% 程度除去であった。
- ・鉄電極による電気分解法は市販凝集剤と同等の凝集効果であることを確認した。

今後、実排水に電気分解法による凝集分離プロセスを適用するため、引き続き検討を進めている。

## 謝辞

本研究で使用したイオンクロマトグラフおよび純水製造システムは、競輪の補助を受けて整備されました。また連続凝集試験装置の極性反転スイッチは産業技術環境研究本部工業試験場産業システム部藤澤怜央研究職員に製作協力いただきました。ここに記して感謝申し上げます。

## 引用文献

- 1) 和田洋六：水処理技術，(2011)
- 2) 森泉雅貴，福本明広，小田謙治 他：高度水処理技術における鉄電解法の応用，水環境学会誌，Vol.24，No.9，(2001)
- 3) 榎原 豊：電気分解法による排水・汚水処理のメカニズム（ケーススタディ），排水・汚水処理技術集成，(2007)
- 4) 佐々木雄真，若杉郷臣，鎌田樹志 他：電気分解法による排水処理技術，北海道立総合研究機構工業試験場報告，No.318，(2019)

## 要 旨

電気分解法はコンパクトで扱いやすいという特徴をもつため、小規模な排水処理において有望な技術である。しかしながら、従来の報告は、電気化学工業において使用されている処理条件の模倣が多く、高濃度排水などに適用するには、電気分解法の諸条件を最適化する必要がある。そこで、家畜ふん尿消化液を模擬排水とした凝集試験を行い、その処理特性や処理条件を検証した。模擬排水を水槽（有効容積 2 L × 4 槽）に 4 L/h で供給しながら 2 A の定電流で通電すると、陽極から鉄イオンが溶出し、懸濁物質が凝集した。凝集物の引き抜きを 1.6 L/h で行うことで、沈殿が処理水に混じることなく連続的に処理が可能であることが確認された。また、本法での凝集分離効果は市販の凝集剤と同程度であった。これらのことから、電気分解法は、既存の凝集剤による凝集処理プロセスの代替となり得る可能性が示された。