付着型酵母リアクターによる厨房排水の処理特性

Characteristics of Kitchen Wastewater Treatment by the Yeast Reactor

千種 薫¹、矢口淳一¹、並木広光²

¹(株)西原環境衛生研究所／〒108-0023 東京都港区芝浦3-6-18

²西原ネオ工業(株)／〒108-0023 東京都港区芝浦3-6-18

KAORU CHIGUSA¹, JUNICHI YAGUCHI¹, and HIROMITU NAMIKI²

¹Nishihara Environmental Sanitation Research Co.,Ltd./3-6-18, Shibaura, Minato-ku, Tokyo 108-0023, Japan

²Nishihara Neo Co.,Ltd. /3-6-18, Shibaura, Minato-ku, Tokyo 108-0023, Japan

Abstract

A new reactor equipped with the string-type media twined with yeasts was developed in order to treat kitchen wastewater from restaurants and discharge it into sewerage system. The first treatment facility seeded with the mixture of the isolated mycelial yeasts, was installed at a restaurant in 1995. After three years, the treatment performance of this facility was investigated for a year. The yeast reactor was able to remove more than 90% of BOD and hexane extracts in spite of a large load variation. A part of the twined yeasts with media were separated by periodic excessive aeration and washed out. The separation of the twined yeasts resulted in 55~125mg/l of SS concentrations in the effluent. This yeast process could meet the discharge limits completely with no sludge disposal.

Key word : kitchen wastewater, string-type media, yeast, stability, oils

1. はじめに

近年、ホテルやレストラン等の小規模事業所排水に対して、下水道法に基づき条例で除害施設の設置が要求される場合が多い。放流規制値も通常でBOD 600mg/l、SS 600mg/l、ヘキサン抽出物質30mg/l以下と比較的楽に得られる水質である。小規模事業所は人手がかけられないこともあって、省力化できる処理システムを望む声が高い。さらに、これらの事業所排水は主に厨房排水であるため、油脂含有量が高く、水量変動、濃度変動ともに大きい。ホテルやレストランの厨房排水は、客数の増減に伴い時間的、季節的変動が大きく、単位時間当たりの流量予測ができない難点がある。従来、油脂含有率の高い厨房排水は、加圧浮上装置や油脂分離装置のような物理化学的前処理装置を設置して油脂を分離除去した後、活性汚泥法による処理を行っていた。しかし、この方法

では凝集剤、アルカリ剤等の薬剤を多量に消費し、除去した廃油を衛生的に処分する際に多くの労力と費用がかかる、負荷変動に対する対応が難しいなどの問題を抱えている。

これらの諸問題を解決するために、無人化運転できる付着固定型の酵母処理システムを開発した。厨房排水組成に対して資化率の高い酵母を選択し、ひも状担体に付着固定させて処理すると、加圧浮上装置を設置せずに、直接処理ができるばかりでなく、処理水質は水量変動や濃度変動に左右されずに安定し、その上、廃油の処分も汚泥処分も不要になり無人化できることが判明した。1995年3月にレストランで稼働した厨房排水処理システムは、5年を経過した現在でも安定した処理結果が得られており、付着固定型の酵母リアクターによる処理の特性や知見が得られたので報告する。尚、このレストランは高速道路のサービスエリアに設置されているため、時

間変動が大きい特徴がある。

2. 材料および方法

2. 1 排水の性状

レストランの厨房排水濃度は、年間平均で BOD 703mg/l、CODcr 1,163mg/l、SS 292mg/l、ヘキサン抽出物質159mg/lであり、pHはほぼ中性である。BOD や CODcr に比べて SS とヘキサン抽出物質の濃度変動が大きい。排水組成を CODcr 換算して Fig. 1 に示す。組成としては、脂質が約41%で最も多く、炭水化物15%、タンパク質8%の順である。また排水組成の60%が固形分であり、そのうちの2/3は脂質で占められる。残りの40%が溶解性物質で、揮発性脂肪酸、アミノ酸、炭水化物中の1/3ならびに不明分の大部分がこれに当たる。排水の栄養バランスは BOD : N : P = 100 : 3 : 1 であり、浮遊型の酵母処理プロセスの解析結果^{1, 2)}より、酵母による処理に NP の不足はないと考えられる。

Fig. 1 Characteristics of kitchen wastewater

Fig. 2 Process schematics of the treatment facility

2. 2 供試酵母

レストラン排水に対して高い資化性能を有する脂質資化性酵母、タンパク質資化性酵母及び炭水化物資化性酵母を選択し、排水組成割合に応じて、脂質：炭水化物：タンパク質＝2：1：1の量比とした。脂質資化性酵母として *Candida hellenica*、炭水化物資化性酵母として *Candida edax*、ならびにタンパク質資化性酵母として *Trichosporon capitatum* を大量培養して添加した。

種酵母の添加量は乾物量で80kgであり、立ち上げ時に一度添加しただけである。供試酵母は、全て菌糸、偽菌糸を形成して生育する菌株であるため、ひも状坦体に絡みやすい特性を持つ。また、供試した酵母はいずれも発酵性が無いか弱い菌株であり、TCA サイクルを経て有機物を酸化除去する回路を持つ菌株であるから、カビに近い菌種といえる。

2. 3 実用装置運転

1) フローシート

1995年にレストランに設置された付着固定型の酵母処理装置の概要とフローシートをそれぞれ Fig. 2 と Fig. 3 に示す。付着固定型の装置は流量変動に対応できるプロセスとして開発された。レストランの厨房排水は2.5mm 目のスクリーンで除渣後、流量調整槽を経て直接酵母反応槽へ移送される。加圧浮上装置は設置していない。酵母反応槽には酵母を付着固定するため、塩化ビニリデン製のひも状坦体が垂直方向にすだれ状に充填されている。充填率は70%である。ひも状坦体に付着した酵母は菌糸を伸ばしながら増殖し、自らひも状坦体に絡んでゆくが、一定量以上付着しないようにタイマーを設

Fig. 3 Schematic diagram of the yeast reactor and the autolysis reactor

定し、一時的に曝気量を高めることにより剥離させている。曝気方式は全面曝気方式で、槽内を曝気攪拌すると同時に担体の逆洗も兼ねている。自己酸化槽は、酵母槽から流出する処理水を単純曝気し、処理水中に浮遊する酵母菌体上のヘキサン抽出物質を完全酸化するために設置しており、担体充填率は50%である。酵母反応槽への硫酸の添加は、酵母の至適 pH が酸性側にあるため、pH を6.0付近に維持するためである。

2) 運転条件

処理装置の運転条件を Table 1 に、設計目標水質を Table 2 に示す。処理水の目標水質は条例により定められた下水道放流規制値である。付着固定型の酵母反応槽は BOD 容積負荷 $2.0 \text{ kgBOD/m}^3/\text{day}$ で設計され¹⁾、槽容積は 80 m^3 、滞留時間 HRT を 9 時間とした。自己酸化槽容積は、酵母槽の $1/2$ とした。

余剰酵母の生成量は、食品工場排水を浮遊型の酵母反応槽で処理した場合、除去 BOD 量の約 20% と算定されているので^{2, 3)}、流入水 BOD 濃度が約 $3,000 \text{ mg/l}$ 以下であれば酵母処理水中の SS 濃度は 600 mg/l 以下となり、生成される汚泥はそのまま下水道へ放流できる。付着酵母の剥離量をコントロールすれば無人化運転機能を有するシステムとなる。

Table 1 Operating conditions of the yeast reactor and the autolysis reactor

Parameter	Yeast reactor	Autolysis reactor
Flow rate (m^3/day)	200	200
Reactor volume (m^3)	80	40
BOD volumetric loading ($\text{kgBOD/m}^3/\text{day}$)	2.0	
Oxygen demand ($\text{kgO}_2/\text{kgBOD removed}$)	0.6	0.2
HRT (h)	9	4.5
pH	5.5~6.0	

Table 2 Design value of water quality

Analytical items	Influent	Effluent
BOD (mg/l)	800	600
SS (mg/l)	600	600
Hexane extracts (mg/l)	150	30
pH	6.5~7.2	5.8~8.6

3) 処理性能の追跡調査

1995年3月に運転開始以来処理施設は順調に機能し、処理性能上の問題は生じなかった。そこで、3年目に当たる1998年1月から一ヶ月に一度の割合で、処理性能の調査を行った。処理性能としては、目標水質の達成、処理水質の安定性ならびに排水成分に対する分解性の差異を調査した。さらに、汚泥生成量ならびに栄養バランスに見られる処理特性をしらべ、無人化運転の可能性を裏づけた。

4) 油脂ならびに固形分の分解実験

Fig. 1 から知られるように、排水中の60%が固形成分であるので、厨房排水中の固形成分分解能を確認するために酵母処理水を使用したフラスコ実験を行った。固形成分である脂質、タンパク質、および炭水化物に類似した基質を選定し、排水中と同濃度になるように添加してその分解性を調べ、加水分解酵素の有無を確認した。実験は 500 ml フラスコに基質とろ過滅菌した酵母処理水 100 ml を添加し、 37°C で 9 時間反応させた後の成分を分析した。 37°C は本施設の年間平均水温であり、9 時間は HRT である。脂質の分解性は牛脂の加水分解能で代表させ、酵母処理水に市販の牛脂を 20 mg 添加して 9 時間後のヘキサン抽出物質中の酸価、ケン化価からリパーゼの存在を判定した。タンパク質の分解では、酵母処理水に牛血清粉末を 15 mg 添加し、9 時間後の減少率を調査すると共に遊離アミノ酸を分析した。炭水化物は、厨房排水中に含有率の高い洗米排水を想定して、生でんぷんを排水中に 17 mg 添加し、不溶性炭水化物の減少率をしらべた。

2. 4 分析方法

一般分析ならびに脂質の分析は下水道試験法に準拠したが、ヘキサン抽出物質中の酸価ならびにケン化価は基準油脂分析試験法⁴⁾によった。タンパク質はケルダール法により有機態窒素を検出後、アミノ態窒素を差し引き 6.25 を乗じて算出した。アミノ態窒素は硫酸酸性下リンタングステン酸でタンパク、ペプチドを沈殿除去後、バンスライク法⁵⁾で測定した。炭水化物はアンスロン硫酸法⁶⁾により分析した。担体に付着した酵母の走査型電子顕微鏡観察は、試料を 2.5% グルタルアルデヒドで固定した後、エタノールで脱水し、酢酸イソアミル溶液で置換したものを臨界点乾燥に供した。その後金蒸着を施し、走査型電子顕微鏡 (Hitachi 530 型) により観察した。

3. 結果と考察

3. 1 酵母フローラ

種酵母として添加した *C. hellenica*、*C. edax* ならびに *T. capitatum* の酵母槽内でのひも状担体への付着状況を調査した結果、いずれの菌体も順調に増殖しており、1998年8月の調査時には *C. hellenica* が50%で優占し、*C. edax* と *T. capitatum* が残りの半数づつを占めていた。Fig. 1 に示したように、厨房排水は油分の含有率が高く、脂質分解酵母として添加した *C. hellenica* が優占していたことから、反応槽内の酵母フローラは排水組成により決定される傾向が強いと推定された。3株の酵母は、Fig. 4 に示す走査型電顕写真のように、菌糸を伸ばしながら増殖を続け、自らひも状担体に絡んで固着していた。

Fig. 4 Scanning electron microphotograph of the mycelial yeasts twined with the string-type media

Fig. 5 Microphotograph of the twined yeasts of the yeast reactor in Dec.1998

また2月と12月の調査時の酵母菌体内には、Fig. 5の位相差顕微鏡写真に見られるような多数の光る粒子が観察された。脂質分解性酵母は、排水中の油分が菌体表面に吸着すると菌体外酵素リパーゼを菌体外に産出し、油分をグリセリンと脂肪酸に加水分解する。加水分解されたグリセリンや脂肪酸は、酵母菌体内に取り入れられるが、脂肪酸はFig. 5に見られる光る粒子のように、取り入れられた直後は油滴の形で菌体内に存在するのではないかと考えられる。2月と12月は排水中のヘキサン抽出物質濃度が上昇しており、菌体内の光る粒子はヘキサン抽出物質負荷が増大すると観察された。自己酸化槽の担体に付着した酵母には、このような現象は見られなかった。

3. 2 処理性能

運転期間中における流入水、酵母処理水ならびに放流水の濃度変動幅と平均値をTable 3に示す。またFig. 6には1年間の水温とBOD容積負荷の変動、流入水BODならびにヘキサン抽出物質濃度の変化に伴う酵母処理水質を示す。Table 3とFig. 6に見られるように、酵母反応槽の水温は、年間を通じて35℃前後となっており、生物処理しやすい温度条件にあった。またBOD容積負荷の変動にもかかわらず酵母処理水質は安定しており、BOD除去率、ヘキサン抽出物質除去率共に常に90%以上が得られ、規制値を十分にクリアしていた。処理水質の安定性が高いことから、酵母反応槽のひも状担体には処理に必要な菌体量が付着保持され、無人化運転の可能性が示唆される。酵母処理水のSS濃度は55～125mg/lが得られており、余剰酵母生成量は後述するように平均0.12kg酵母/kg除去BODとなっているから、一定量以上に増殖した酵母は逆洗により常時剥離されていることが裏づけられる。

Table 3の分析値から、酵母処理水と放流水は水質がほとんど変わらず、自己酸化槽は不要と推察される。計画水量が流入し、油脂が菌体に吸着した直後に逆洗がかかるとヘキサン抽出物質値が高く検出されることを懸念して、後段の自己酸化槽で吸着状態の油滴を資化させる目的で設置したが、排水中のヘキサン抽出物質濃度が400mg/lを越えていた2月と12月でも、酵母処理水はそれぞれ2.3mg/lと5.3mg/lと充分に除去され、自己酸化槽は不要であると結論づけられた。前述した顕微鏡観察の結果もこれを裏付けている。

また、酵母による処理では、窒素とリンは酵母細胞を形成する量しか除去されないが³⁾、処理水中の窒素とリ

Table 3 Results of the plant operation(1998 Jan.~Dec.)

Analytical items		Influent (average)		Yeast treated water (average)		Effluent (average)	
BOD(mg/l)		510~1250 (703)		20~60 (39)		18~55 (37)	
COD _{Cr} (mg/l)		841~2071 (1163)		76~215 (122)		67~223 (124)	
COD _{Mn} (mg/l)		130~320 (193)		50~90 (73)		46~91 (70)	
SS(mg/l)		120~930 (292)		55~125 (83)		55~130 (84)	
Hexane extracts(mg/l)		70~450 (159)		1~10 (3)		ND~8 (2)	
Total N (mg/l)	Protein-N	18~26 (22)	9~16 (12)	6~18 (15)	4~7 (5)	5~20 (15)	4~11 (5)
	Amino acid-N		4~7 (6)		—		—
	NH ₃ -N		2~8 (4)		2~11 (10)		2~11 (10)
Cabohydrate (mg/l)	Insoluble	139~182 (163)	100~153 (121)	ND~13 (2)	ND~5 (1)	ND~13 (2)	ND~6 (1)
	Dissolved		33~56 (42)		ND~8 (1)		ND~6 (1)
VFA(mg/l)		96~179 (158)		1~9 (3)		ND~6 (2)	
Total P(mg/l)		5~8 (6)		1~7 (3)		1~8 (3)	
pH		5.3~5.9 (5.6)		6.1~6.7 (6.4)		6.0~6.7 (6.4)	

ンの分析値には浮遊する SS 中の窒素とリンも検出されているので流入水とあまり変わらない値になっていると考えられる。

3. 3 処理水質の安定性

Fig. 6-1 および 6-2 に示した酵母反応槽の 1 年間の BOD 容積負荷、排水 BOD 濃度、ならびに酵母処理水 BOD 値を見ると、この間 BOD 容積負荷、排水 BOD 濃

度とも 2 倍以上変動しているが、酵母処理水の BOD 濃度は 40mg/l 前後で安定していた。これらの結果から、付着型の酵母処理は負荷変動にも濃度変動にも強いといえる。ヘキサン抽出物質に対しての処理の安定性も Fig. 6-3 で追跡している。流入水中のヘキサン抽出物質濃度が 70~450mg/l の範囲で変動しているにもかかわらず、処理水質は 1~10mg/l で、平均 3 mg/l が得られている。

Fig. 6-1

Fig. 6-3

Fig. 6-2

Fig. 6 Monthly BOD loading and water temperature in the yeast reactor (Fig.6-1), Influent and effluent BOD concentrations of the yeast reactor (Fig.6-2), Influent and effluent hexane extracts concentrations of the yeast reactor (Fig.6-3). Symbols ; $\square$ BOD loading, $\blacklozenge$ water temperature, $\bigcirc$ Influent BOD concentration, $\blacksquare$ BOD concentration of the yeast treated water, $\triangle$ Influent hexane extracts concentration, $\blacktriangle$ hexane extracts concentration of the yeast treated water

3. 4 排水中の固形分の分解

酵母は、真菌類に属する微生物であるため、菌体外酵素によって固形分の分解が可能であることは乾燥食品工場排水の処理で実証された。³⁾ 厨房排水中の固形分について分解が可能かどうか調べるため、酵母処理水を使用してフラスコ実験を行い、Table 4 にその結果を示す。牛血清粉末を添加したタンパク質分解実験では、反応時間 9 時間で約 70% の不溶性タンパク質が分解され、その大部分が遊離アミノ酸として検出された。厨房排水中の一部をなす洗米排水を使用した炭水化物の分解実験では、不溶成分の 74% が 9 時間で分解され、酵母処理水中のアミラーゼの存在が示唆された。

脂質の分解性は、分解しにくい牛脂を添加してヘキサン抽出物質中の酸価とケン化価を測定することによって調査した。Table 4 で遊離脂肪酸の濃度は、ヘキサン抽出物質濃度に (酸価 / ケン化価 × 100) で表せられる加水分解率を乗じて算出した。⁷⁾ 9 時間後の加水分解率は 85% で、脂質はリパーゼの働きによって、ほとんど遊離脂肪酸に加水分解されていた。3 成分のフラスコ実験により、厨房排水中の固形分は、酵母の菌体外酵素により分解され、低分子化することが確認された。また後述するように本処理装置の余剰酵母生成量は、0.06~0.22kg 酵母 / kg 除去 BOD と浮遊型の酵母リアクターの運転実績以下となり、酵母菌体に排水中の固形分が吸着して除去されているとは考えられない。

Table 4 Degradation of insoluble substances by yeast treated water

Analytical items	Concentration (mg/l)	
	before reaction	after reaction (9h)
Rice-washing water		
Insoluble Saccharides	170	45
Soluble Saccharides	0	71
Bovine serum		
Insoluble Proteins	110	32
Amino Acids	10	68
Soybean oils		
Lipids	200	25
Unionized Fatty Acids	0	170

3. 5 余剰酵母生成量

付着型の酵母リアクターでは、増殖した酵母がひも状担体に付着し、そこから菌糸を伸ばしながら増殖を続け、ひも状担体に絡んでくる。一定量以上付着しないように、曝気強度を調節して一部をはく離させ、処理水中に SS として放流すれば、余剰汚泥引き抜きのいらない無人化運転機能を有するシステムとなる。ひも状担体から剥離してくる汚泥量は、かなり変動しているが、前述のように 55~125mg/l (平均 83mg/l) の範囲で十分放流規制値を満足していた。当該処理施設では、設置以降 4 年間一度も余剰酵母の引き抜きは行っており、無人化運転が実現している。

酵母の持つ菌体外酵素は、厨房排水中の固形分も分解することが確かめられたので、付着型のリアクターでは、酵母処理水中の SS 量を余剰酵母発生量と見なすことができる。BOD 除去速度と酵母処理水中の SS 量の関係を Fig. 7 に示した。ここから余剰汚泥発生量は、除去 BOD 当たり 0.06~0.22kgSS/kgBOD で、平均 0.12kgSS/kg BOD となり、浮遊型の酵母処理施設が 0.22kgSS/kg BOD である³⁾のでそれよりかなり低くなった。これは、付着型のリアクターの BOD 負荷が浮遊型より低いためであると考えられる。除去 BOD 当たりの汚泥発生量から、最大流入水 BOD 濃度が 2,700mg/l 以下であれば酵母処理水中の SS 濃度は 600mg/l 以下となり、生成される汚泥はそのまま下水道へ放流できる。

酵母生成量から、酵母処理に必要な排水の栄養バランスを求めると、窒素リンの必要量は次式で示される。

N(P)必要量 =

$$\text{酵母生成量} \times \text{酵母細胞中の N(P) 含量} \quad (1)$$

Fig. 7 Relationship between BOD degradation rate and excess yeast washed out

酵母中の窒素リン含有量は、それぞれ8.8%と1.5%であるので⁸⁾、(1)式から処理に必要な栄養バランスは、 $BOD:N:P=100:0.5\sim1.8:0.1\sim0.3$ となり、厨房排水中の窒素とリンは十分足りていることが分かる。

3. 6 必要酸素量

酵母反応槽での必要酸素量は、浮遊型の酵母処理システムの解析から、除去BOD当たり $0.6\text{kgO}_2/\text{kg}$ 除去BODと報告されており³⁾、本処理施設の設計においてもTable 2に示したようにこの値を用いた。Fig. 6から知られるように、調査期間中設計容積負荷以下で運転できたため、供給酸素量が不足することはなく、酵母槽内DO濃度は常に $1.0\text{mg}/\text{l}$ 以上であった。これには、付着した酵母を剥離するために一定時間毎に行っている逆洗による酸素供給も寄与している。

自己酸化槽の必要酸素量は、酵母菌体上の油分が吸着する場合を考慮して、酵母槽の $1/3$ としたが、前述のように自己酸化槽では分解は進まなかった。

4. 結論

油脂含有量が高くまた流量濃度変動の大きい厨房排水に対して、ひも状担体に酵母を付着固定したリアクターを開発し、増殖酵母を担体洗浄によって一定量剥離させることで無人化運転可能な処理プロセスを確立した。実施設の追跡調査から、酵母反応槽はBOD容積負荷が $0.63\sim1.48\text{kgBOD}/\text{m}^3/\text{day}$ の範囲で変動しても、処理水BOD濃度は $40\text{mg}/\text{l}$ 前後で安定していた。またヘキサ

ン抽出物質も流入水濃度が $70\sim450\text{mg}/\text{l}$ の範囲で変動しているにもかかわらず、処理水質は $10\text{mg}/\text{l}$ 以下が得られた。処理水中のSS濃度は、 $55\sim125\text{mg}/\text{l}$ で、一定量以上に増殖した酵母は逆洗により常時剥離されていることが裏づけられた。

一方、酵母菌体中に吸着した油分を分解させる目的で自己酸化槽を設置したが、酵母処理水中のヘキサン抽出物質濃度は $10\text{mg}/\text{l}$ 以下で、自己酸化槽は不要であると結論づけられた。

参考文献

- 1) 千種 薫・中井泰弘・長谷川真一：除害施設向け無人化システム、産業と環境、8、91-93 (1996)
- 2) 千種 薫：北海道大学学位論文(1997)
- 3) 千種 薫・矢口淳一・大下信子・石川久男・渡辺義公：酵母による高濃度有機性排水の処理特性、環境工学論文集、32、89-97 (1995)
- 4) ㈱日本油化学協会：基準油脂分析試験法 (1971)
- 5) 小原哲二郎・鈴木隆雄・岩尾裕之：改訂食品分析ハンドブック、建邦社、48 (1982)
- 6) 日本生物工学会：生物学実験書、培風館、20、東京 (1992)
- 7) 食品産業クリーンエコシステム技術研究組合：食品産業のための最新バイオ水処理技術、恒星社厚生閣、193-214、東京 (1993)
- 8) 千種 薫・西 信俊・松丸美智代・嶺岸令久：酵母による排水処理特性と適用例、公害と対策、25 (15)、1557-1563 (1989)

(受付 2000. 8. 22)

(受理 2000. 11. 28)