

酵母による産業排水処理と余剰酵母の有効利用

学位論文内容の要旨

近年、産業排水は主に加圧浮上装置で固形分を除去した後、活性汚泥法で処理されてきたが、産業排水は濃度変動や負荷変動が大きい為に活性汚泥法が不安定になり易く、多くの施設で苦慮している現状がある。特に、農畜産物を原料とする食品工場の排水は高濃度で腐敗し易い特性がある為、揮発性脂肪酸(VFA)が生成され易く糸状性細菌が出現し易い。

第1章では産業排水処理の実態と新しい処理法の必要性を論じ、本研究を開始した背景と目的を記述している。まず、糸状性バルキングの主因微生物であるType021Nの対策を検討したが実用化に至らなかった経緯を取り上げ、新しい対策を考える必要性が生じた背景を論じている。そして、加圧浮上装置へ流入する前の原水基質に対して資化率の高い微生物を探索すれば負荷変動に対応できると考え、集積培養を重ねた結果酵母が分離され酵母を用いたプロセスを開発した経緯を述べる。

第2章は、酵母の持つ二形成に着目し、固液分離性と有機物除去能を重視して酵母菌株を選択した試験報告である。乾燥食品工場排水と製油工場排水を対象にして回分式で集積培養を行い、分離されたコロニーの1/3以上が酵母の場合には酵母による処理は可能とし、酵母コロニーの中から優占種を選択して同定試験と除去性能評価を行い処理の可能性を判断した。

乾燥食品工場排水はVFAを約50%含有し、残りの基質は多岐に渡るが、本排水からは *Candida edax*, *Trichosporiella flavificans*, *Trichosporon capitatum* が分離された。分離酵母は有機物濃度が高い時には酵母型で存在するが、有機物濃度が低くなると分岐して長く伸長する菌糸、偽菌糸を形成し糸状態になることが判明した。又、糖の発酵性は負か非常に弱く、糖はピルビン酸からアセチルCoAを経てTCA回路へ導入される酸化型の代謝経路をもつ菌株である。*C.edax*はBOD4100mg l^{-1} の分離源排水を250mg l^{-1} まで低減するが、3株を混合して処理するとBOD150mg l^{-1} まで低減され、フラスコ内が低濃度である為に菌糸、偽菌糸を伸長して絡み合いペレットを形成して良好に固液分離する現象がみられた。

製油工場排水はBOD10000mg l^{-1} あり、85%が大豆油を主成分とする油脂で構成される。油脂資化性酵母として集積された9株は *Hansenula anomala*, *Candida intermedia*, *Candida schatavii*, *Trichosporon capitatum*, *Candida fluviatilis*, *Candida tropicalis*, *Candida viswanathii*, *Candida pseudolambica* および *Candida hellenica* であった。

2%の大豆油を用いた性能調査では *H.anomala* と *C.hellenica* が約75%の大豆油を除去し、残りの25%のヘキサン抽出物質のうち3/4が遊離脂肪酸であった結果から、リパーゼ活性は

高いが β 酸化が遅れ気味の菌株と判定された。9株を混合して処理すると95%以上の大豆油が除去され、遊離脂肪酸も残留しない結果となって、酵母による処理は混合株で行う方が良いと判明した。処理過程で形成されたペレットは*C.hellenica*が優占し、*C.schatavii*、*C.fluviatilis*等も検出されたが油脂資化性能の高い*H.anomala*は検出されず、菌糸が短い為にペレット形成に加われずに流出して、優占した菌株はやはり菌糸、偽菌糸が長く分岐し、発酵性が弱いという結果が再現された。酵母による処理は沈降性に問題があり、酵母型では固液分離しない為、酵母を糸状態にしてペレット化する必要性があると判明した。さらに発酵回路を有する菌株では有機物の低減ができず、TCA回路をもつ菌株でなければならない。これより、本処理プロセスの酵母は排水基質を資化して増殖し菌糸、偽菌糸を形成して伸長しTCA回路をもつことを選定基準とした。

第3章では糸状態酵母をペレット化する装置を考案して、酵母処理の設計概要を確立した。酵母をペレット化すると固液分離性が良好になるばかりでなく、菌体濃度を8000~13000mg l^{-1} と高く保持できるので高負荷運転が可能となる。酵母による処理は流入水の濃度や組成が異なっても0.5~1.5kg BOD/kg酵母・日の負荷範囲で、酵母処理水は常にBOD 200mg l^{-1} 前後が得られる。菌糸の伸長が最大になる1.0kg BOD/kg酵母・日を至適負荷として酵母濃度を10000mg l^{-1} 保持すると容積負荷は10kg BOD/m 3 ・日となるから、この値を酵母処理の基準とした。その際の必要酸素量0.6kgO $_2$ /kg除去BOD、酵母生成量0.2kg酵母/kg除去BODと至適pH範囲5.0~6.5を加えて酵母処理の設計概要とした。ペレット形成の為の装置として酵母反応槽内にパンチングプレート(板)を設置した。板の位置はSVI値が最も低くなる結果に基づき、送風量から得られる流速(m/sec)で混合液が2回転する位置に決定した。沈殿槽には汚泥濃縮槽と同じ考えを導入してピケットフェンスを設け、掻寄機はサイクロイド型にして20000mg l^{-1} 以上の返送酵母濃度に対応できる仕様とした。酵母処理のフローシートは二段処理であり、酵母反応槽と酵母沈殿池を前処理として採用し、後処理として活性汚泥法を設置した。

第4章は酵母による産業排水処理の例である。酵母による処理は実用化された乾燥食品工場をはじめ、製油工場での排水量1t/日のパイロットプラント、ホイップ工場の例や食品工場以外として再生紙工場排水処理の例を記載している。いずれの処理例においても酵母処理は負荷変動に強く加圧浮上装置に替わり得ることが証明され、実用装置では稼働4年後にも追跡調査を行い、水質の安定性と固形分の分解能を確認している。又、酵母は有機物を酸化したエネルギーを熱に変える性質がある為、酵母反応槽の水温は冬でも高く、酵母処理が安定する因子ともなる。反面、酵母処理水質には限界があり、BOD 200mg l^{-1} 前後が常に残留し、酵母の酵素は基質に対する親和性が低いことを示した。再生紙工場排水は分子量7000以上の高分子物質が57%を占め、排水から集積された5株のうち3株がPVA含有培地で増殖してPVAの分解除去が示唆された。

第5章は余剰酵母の有効利用である。余剰酵母から酵母エキスを作成して乳酸菌を培養した試験とキノコ栽培培地基材として使用した試験報告である。余剰酵母はアミノ酸、核酸、脂質、ビタミン等の有用物質を多量に含有するので栄養要求性の高い乳酸菌の生育に充分活用でき、市販の酵母エキスに遜色がない増殖量を示した。

キノコ栽培への余剰酵母エキスの添加は菌糸生長が早く、子実体収量が増加し品質が改良されて有効性が確認された。

第6章は総括として酵母処理プロセスの位置付けを明確にする為に、加圧浮上装置や他の生物処理法と特徴やコストの比較を行う。

第7章は本研究のまとめであり、残された課題についても言及している。

最後に酵母による産業排水処理は、糸状態酵母をペレット化すると従来問題であった固液分離性が解決し、高負荷運転も可能となり処理も安定することが明らかとなった。さらに、余剰酵母をキノコ栽培に活用すると増収が可能になる。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 渡 辺 義 公
副 査 教 授 清 水 達 雄
副 査 教 授 田 中 信 壽
副 査 教 授 渡 辺 寛 人

学 位 論 文 題 名

酵母による産業排水処理と余剰酵母の有効利用

近年、産業排水は主に加圧浮上装置で固形分を除去した後、活性汚泥法で処理されてきたが、産業排水は濃度変動や負荷変動が大きいため活性汚泥法が不安定になりやすく、多くの施設で苦慮している現状がある。特に、農畜産物を原料とする食品工場の排水は高濃度で腐敗しやすい特性があるため、揮発性脂肪酸 (VFA) が生成されやすく糸状性細菌が出現しやすい。

前処理として設置される加圧浮上装置では、洗剤等で乳化された油分は分離せずに活性汚泥法へ通過するし、固形分も含有率が高いとその一部は凝集剤と接触できずに活性汚泥法へ移流し、負荷変動を助長させる。

乳化された油分は活性汚泥法のフロックに吸着してフロック内部を酸欠にし、フロック内部から Type 021 N, *spaerotilus* sp. Type 1701, *Beggiatoa* sp. 等の糸状性細菌を生長させる。固形分の流入も酸素不足を助長する。この結果、活性汚泥法の沈殿池では膨化とキャリオーバーを繰り返すことになる。

第1章では産業排水処理の実体と新しい処理法の必要性和題して、糸状性バルキングの主因微生物である Type 021N の対策を検討したが実用化に至らなかった経緯を取り上げる。対策は Type 021N の細胞壁を溶菌する *Xanthomonas maltophilia* を分離し活性汚泥に添加して Type 021N の消滅を試みたが、有機物が存在すると溶菌せず特異的な現象ではないことが判明した。ついで、Type 021N をペレット化し重力沈殿しやすくする対策を試みた。糸状性細菌のみならず酵母、カビ等の糸状性微生物は全て振とうフラスコ内で菌糸がぶつかり合う攪拌状態をつくると菌糸は物理的に絡みペレットを形成する。Type 021N もペレットを形成したが分岐しない菌糸であるため、ペレットは強固さに欠け、ばっ気強度や返送ポンプの圧縮により絡みが解けて元の一本の糸状態に戻る欠点があった。これより、糸状性細菌の対策には限界があり新しい対策を考える必要性が生じた。そこで、加圧浮上装置へ流入する前の原水基質に対して資化率の高い微生物を探索すれば負荷変動に対応できると考え、集積培養を重ねた結果酵母が分離され酵母を用いたプロセスを開発した経緯を述べる。

第2章は、処理に最適な酵母菌株を選択した試験報告である。乾燥食品工場排水と製油工場排水を対象にして回分式で集積培養を行い、分離されたコロニーの1/3以上が酵母の場合には酵母による処理は可能とし、酵母コロニーの中から優占種を選択して同定試験と除去性能評価を行い処理の可能性を判断した。

乾燥食品工場排水はVFAを約50%含有し、残りの基質は多岐にわたるが、本排水からは *Candida edax*, *Trichosporiella flavificans*, *Trichosporon capitatum* が分離された。分離酵母は分岐して長く伸長する菌糸、偽菌糸を形成し、糖の発酵性は負か非常に弱く、

糖はピルビン酸からアセチルCoAを経てTCAサイクルへ導入される酸化型の代謝経路を持つカビに近い菌株である。*C. edaxi*はBOD4, 100mg/1の分離源排水を250mg/1まで低減するが、3株を混合して処理するとBOD150mg/1まで低減される。フラスコ内では3株の菌糸、偽菌糸は絡み合いペレットを形成して良好に固液分離する。

製油工場排水はBOD10, 000mg/1あり、85%が大豆油を主成分とする油脂であるため、集積された9株のうち7株が*Candida*属である。9株は*Hansenula anomala*, *Candida intermedia*, *Candida schatavii*, *Trichosporon capitatum*, *Candida fluviatilis*, *Candida tropicalis*, *Candida viswanathii*, *Candida pseudolambica*および*Candida hellenica*であった。

2%の大豆油を用いた性能調査では*H. anomala*と*C. hellenica*が約75%の大豆油を除去し、残りの25%のヘキサノ抽出物質のうち3/4が遊離脂肪酸であった結果から、リパーゼ活性は高いがβ酸化が遅れ気味の菌株と判定された。9株を混合して処理すると95%以上の大豆油が除去され、遊離脂肪酸も残留しない結果となって、酵母による処理は混合株で行う方が良いと判明した。処理過程で形成されたペレットは*C. hellenica*が優占し、*C. schatavii*, *C. fluviatilis*等も検出されたが油脂資化性能の高い*H. anomala*は検出されず、菌糸が短いためにペレット形成に加われず流出した。検出された菌株はやはり菌糸、偽菌糸が長く分岐化し、発酵性が弱いという結果であったことより、本処理プロセスの酵母は排水基質を資化して増殖し、菌糸、偽菌糸を形成伸長し、TCAサイクルをもつことを選定基準とした。

第3章では酵母処理の設計概要を確立した。酵母による処理は流入水の濃度や組成が異なっても0.5~1.5kgBOD/kg酵母・日の負荷範囲で、酵母処理水はBOD200mg/1前後となる。1.0kgBOD/kg酵母・日を至適負荷とし酵母濃度を10,000mg/1保持すると容積負荷は10kgBOD/m³・日となるからその際の必要酸素量0.6kgO₂/kg除去BODと至適pH範囲5.0~6.0を加えて酵母処理の設計概要とした。処理装置の設計では酵母槽内にペレット化を促進するための板を設置し、沈殿槽には汚泥濃縮槽と同じ考えを導入してピケットフェンスを設け、掻寄機はサイクロイド型にして20,000mg/1以上の返送酵母濃度に対応できる仕様とした。

第4章は酵母による処理の実際である。酵母による処理は実用化された乾燥食品工場を始め、製油工場での排水量1t/日のパイロットプラント、ホイップ工場の例や食品工場以外として、再生紙工場排水処理の例を記載している。いずれの処理例においても酵母処理は負荷変動に強く加圧浮上装置に替わり得ることが証明され、実用装置では稼働4年後にも追跡調査を行い、水質の安定性と固形分の分解能を確認している。また、酵母は有機物を酸化したエネルギーを熱に変える性質があるため、酵母槽の水温は冬でも高く、酵母処理が安定する因子ともなるし、エネルギーATPを熱に変える分だけ酵母生成量は少なくなり、0.2kg酵母/除去BODと低減される。反面、酵母処理水質には限界があり、BOD200mg/1前後が常に残留し、酵母の酵素は基質に対する親和性が低いことを示した。再生紙工場排水は分子量7,000以上の高分子物質が57%を含め、排水から集積された5株のうち3株がPVA含有培地で増殖してPVAの分解除去が示唆された。

第5章は余剰酵母の有効利用である。余剰酵母から酵母エキスを作成して乳酸菌を培養した試験とキノコ栽培培地基材として使用した試験報告である。余剰酵母はアミノ酸、核酸、脂質、ビタミン等の有用物質を多量に含有するので栄養要求性の高い乳酸菌の生育に充分活用でき、市販の酵母エキスに遜色がない増殖量を示した。

キノコ栽培への余剰酵母エキスの添加は菌糸生長が早く、子実体収量が増加し品質が改良されて有効性が確認された。

第6章は総括として酵母処理プロセスの位置づけを明確にするために、加圧浮上装置や他の生物処理法と特徴やコストの比較を行う。また、残された課題についても言及している。

これを要するに、著者は、廃水処理プロセスの処理効率向上と余剰汚泥の有効利用についての新知見を得ており、環境工学の進歩に貢献するところ大なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。