



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	硫酸イオンの微生物処理による再資源化に関する基礎的研究（第1報）：石膏の単槽連続処理における最適条件の実験的検討
Author(s)	岡村，明彦；森田，博志；鶴井，雅夫 他
Citation	北海道大學工學部研究報告，115，23-34
Issue Date	1983-07-30
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/41804
Type	departmental bulletin paper
File Information	115_23-34.pdf



硫酸イオンの微生物処理による
再資源化に関する基礎的研究
(第1報)

——石膏の単槽連続処理における最適条件の実験的検討——

岡村明彦* 森田博志**
鶴井雅夫*** 高森隆勝***

(昭和58年3月31日受理)

**Fundamental Studies for Treatment of
Sulfate by Microorganism
(1st Report)
—Optimum Condition for Bacterial Reduction of
Sulfate Ion in Single Stage Continuous Treatment—**

Akihiko OKAMURA, Hiroshi MORITA, Masao TSURUI
and Takakatsu TAKAMORI
(Received March 31, 1983)

Abstract

Treatment of gypsum by sulfate-reducing bacteria with continuous culture was studied, and the following results were obtained.

- 1) The amount of reduced sulfate at a pH in the range of pH 5.7 to pH 6.8 could be expressed in terms of HCl demand for pH-stat.
- 2) Arrhenius' plot could be adapted to the relationship between the maximum specific titration rate of 1 N HCl and temperature.
- 3) The maximum growth rate obtained was $0.211 \text{ (hr}^{-1}\text{)}$ under the conditions of 30°C and pH 6.8 with batch culture. The optimum condition for reduction of sulfate ion with single stage continuous culture was as follows; temperature: 30°C , pH: 6.8 and mean residence time: 8.1 (hr). And the reduction rate of sulfate ion was $1.0 \text{ (mmol/l}\cdot\text{hr)}$ under the optimum condition.
- 4) Model parameters were determined from experimental data with batch and continuous culture, and the simulation results were in good agreement with the experimental data.

1. 緒 言

1970年代の公害規制の強化と、オイルショック以来の硫黄分の多い重油のやむを得ない消費等のため、現在産業廃棄物として石膏（通常 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ）が余剰になってきている。ところが、

*高砂熱学(株)

**栗田工業(株)

***資源開発工学科 鉱物処理工学講座

この石膏は現在のところ、セメント原料、建築用ボードあるいは埋立地等で使用される他には主な利用方法が開発されていない。そこで当研究室では、この排煙脱流石膏を再資源化する方法についての基礎的研究を6年前から行なっている。その方法は、次の2つのプロセスに分けられる。第一のプロセスは、硫酸塩還元細菌を用いて石膏を水溶液中で還元し、 H_2S を得る過程であり、第二のプロセスは、第一のプロセスで得た H_2S を熱化学分解反応によって最終的に H_2 と S^0 とに分離、回収しようとするものである。これら一連の再資源化プロセスは、第一のプロセスを当研究室が、第二のプロセスを北海道大学工学部金属工学科田中研究室が担当している¹⁾。

硫酸塩還元細菌の利用は、我が国において主に溶液中から重金属イオンを回収する目的で、検討がなされている²⁻⁵⁾。しかし硫酸塩還元細菌を用いて H_2S を得ようとする研究は少なく、著者らの他には、Cork⁶⁾ が行なっているにすぎない。そこで、基礎的研究の第一段階として、硫酸塩還元細菌を用いて石膏を連続処理する場合の最適条件について、実験的検討を行なったので、その結果について報告する。

2. 実験方法および実験装置

2.1 使用菌種の一般的性質

実験に用いた細菌は、札幌市茨戸付近の下水溝から採取した汚泥を硫酸塩還元細菌純粋分離用培地⁷⁾で十数回植えつぎをくり返し、ほぼ純粋分離できたと考えられる菌株を使用した。硫酸塩還元細菌は、温度25~35℃、pH 中性付近でよく生育するグラム陰性、偏性嫌気性で従属栄養型の極鞭毛を持つ桿状菌である²⁾。培地中では、 FeS の黒色沈澱により、その存在が容易に観察できる。硫酸塩還元細菌のエネルギー源は、乳酸、ピルビン酸などが主なものであり、乳酸を用いた場合の硫酸根還元反応は、次式で示されるものと考えられる⁸⁻⁹⁾。



この細菌は、電子受容体として酸素を用いることができず、エネルギー源から得た電子を硫酸根に与え、その結果、硫酸根が還元され H_2S が生成するものと考えられる。

2.2 培地および実験装置

実験に使用した培地の組成を Table 1 に示す。エネルギー源は、乳酸ナトリウムを用い、硫酸根は実験の目的から石膏 ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) のみとした。また、試薬は全て特級のものを使用した。培地成分中最も高いコストを要求するものは主としてエネルギー源である。当研究室において、故紙等から乳酸を得る方法を現在検討中であり、この意味から実験には、エネルギー源として乳酸ナトリウムを使用した。処理対象となる石膏の濃度は、できるだけ高いことが望ましく、溶解度に近い2.3 [g/l] とした。なお、石膏の水に対する溶解度は、温度25℃で、2.63 [g/l]であるが、実際には、3時間の攪拌で溶解量は、2.3 [g/l] が、ほぼ限界であったため、これを処理原液として

Table 1 Medium Components

Components	[g/l]
K_2HPO_4	0.5
NH_4Cl	1.0
NaCl	0.824
$\text{FeCl}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	0.006
$\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	0.0825
thioglycolic acid	0.01
L-ascorbic acid	0.01
yeast extract	0.5
sodium lactate	3.0
$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	2.3
added distilled water	1.0 [ℓ]

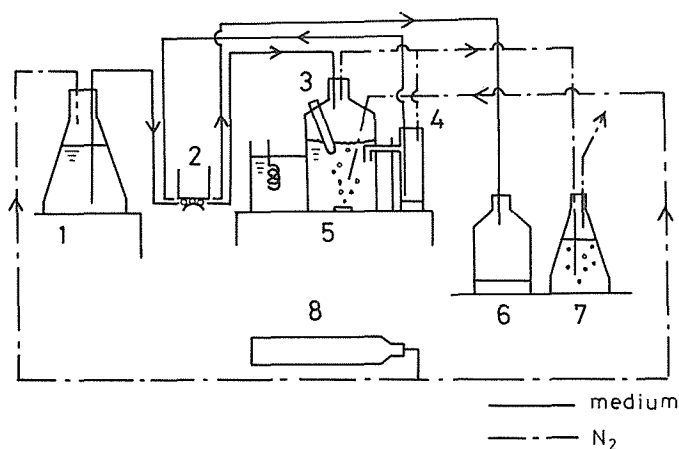


Fig.1 Schematic of apparatus

- | | |
|---------------------|-----------------------|
| 1. Medium reservoir | 2. Pump |
| 3. Reaction vessel | 4. Sampling vessel |
| 5. Stirrer | 6. Waste vessel |
| 7. Bubbler | 8. N ₂ gas |

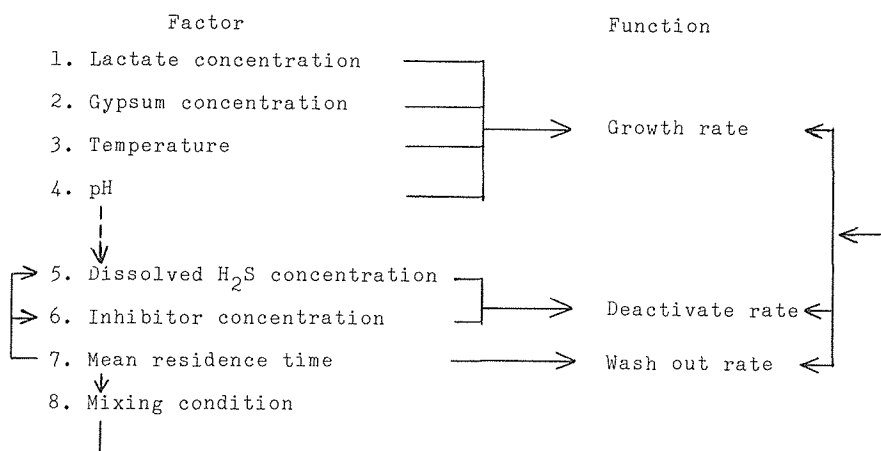


Fig.2 Factors influencing on activity of sulfate-reducing bacteria

用いた。また、乳酸ナトリウムは(1)式により硫酸根との当量比が、2 : 1となるように過不足なく加えた。

実験装置を Fig. 1 に示す。槽内を嫌気条件下に保ち、生成した H₂S を槽外へ速やかに排出する目的で、槽内に N₂ ガスを通気した。また、処理槽内 pH を一定にするために、1N HCl を pH スタットを用いて添加した。連続処理実験の場合、サンプリングによる槽内処理水の一時的減少を防ぐ目的でサンプリング槽を別に設けて実験を行なった。

2.3 実験方法

石膏の連続処理において、硫酸塩還元細菌の石膏処理速度に影響を及ぼすと考えられる要因の相関図を Fig. 2 に示す。乳酸濃度と硫酸根濃度には(1)式より明らかなように、当量比 2 : 1 の関係がある。操作要因であり、かつ主要因と考えられるものに槽内温度、槽内 pH、平均滞留時間があり、これら 3 者について、次のように実験を行なった。温度効果の実験は、設定実験条件下

で3回以上前培養をくり返し、十分訓養されたとされる対数増殖期の菌株を最終前培養液から60〔ml〕分取し、容積1,000〔ml〕の処理槽（有効容積840〔ml〕）に植えつぎ、回分式で行なった。pH効果の実験は、自然pH（初発pH 5.0付近、最終pH 7.0付近）で前培養した菌株を用い、他は温度効果の実験と同じ手法を用いて回分式で行なった。連続処理実験は、当初回分式で行ない、槽内硫酸根濃度が、ほぼ0となり菌体濃度が十分高くなった時点で連続操作に切り換えた。定常状態の判定は、槽内硫酸根濃度がほぼ一定値を示した時点を定常状態と判断した。

測定項目は、温度効果の実験では処理水濁度、1N HCl添加量である。pH効果の実験と連続処理実験の場合は、処理水濁度、菌体数、槽内硫酸根濃度、1N HCl添加量を測定した。処理水濁度は、菌体濃度の代替特性値の一つと考えられる。処理水濁度は、サンプリングした原液を、0.1N HClで4倍希釈後、5分間放置し未溶解石膏、 CaCO_3 、FeS等の影響を除いた後、650〔nm〕付近の吸光度を分光光度計で測定した⁹⁾。槽内硫酸根濃度は、比濁法¹⁰⁾により定量し、菌体数は、顕微鏡により計数盤上の菌を600倍の倍率で直接計数した。1N HClは、(1)式より明らかなように、1〔M〕の硫酸根の還元の際して2〔M〕の水酸基が、槽内に放出され、これによる槽内pHの上昇を防ぐ目的で添加した。菌体に対数増殖期にあり、槽内処理水の緩衝作用および処理水の自然pH低下が無視できる時、1N HCl添加量と発生 H_2S 量には、一定の対応関係が存在する¹²⁻¹³⁾。

3. 実験結果

3.1 槽内温度の影響（回分実験）

槽内温度、槽内pHの間には、交互作用がないと考えられるために、pHを6.8に保持して、槽内温度を20、25、30℃に設定して実験を行なった。その結果をFig.3 a, b, cに示す。各図より濁度は、若干の誘導期の後、急激に増加し一定値に到ることがわかる。また、その間の濁度の

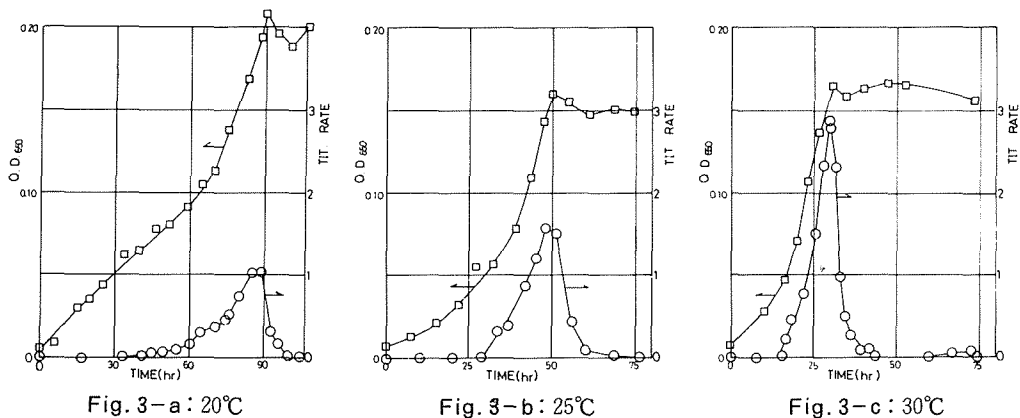


Fig. 3 Batch experiments of temperature effect

□ : O.D. 650 (abs.)

○ : titration rate of 1N HCl (ml/hr)

勾配と1N HCl添加速度に良好な対応関係が認められる。1N HCl添加速度の最大値は、30、25、20℃の順に大きく、濁度が最大値をとるまでに要する時間も、この順序で短くなっている。20℃における濁度は、他に比べて相対的に高いが、その最大値における菌体数を測定したところ、1.44

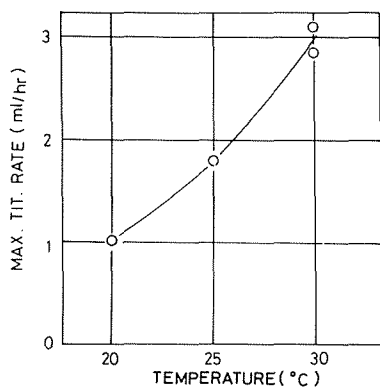


Fig. 4-a Effect of temperature on maximum titration rate

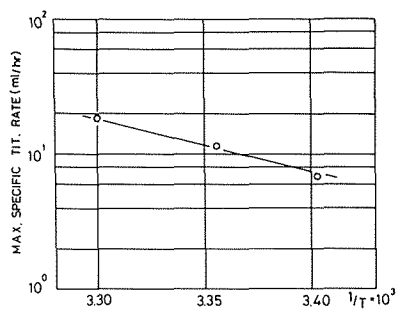


Fig. 4-b Arrhenius' plot of maximum specific titration rate

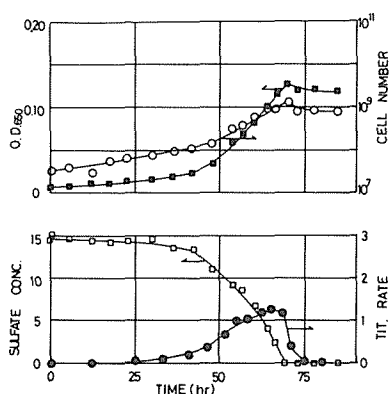


Fig. 5-a : pH5.7

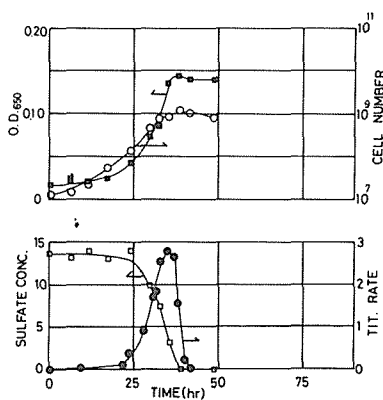


Fig. 5-b : pH6.4

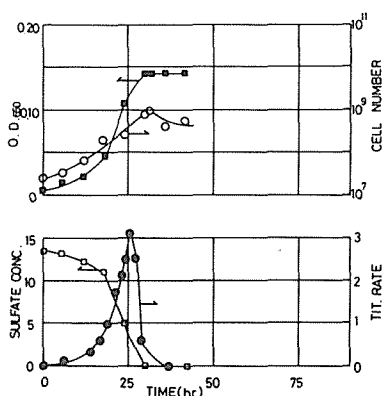


Fig. 5-c : pH6.8

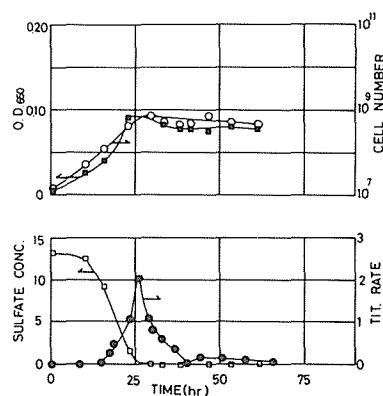


Fig. 5-d : pH7.8

Fig. 5 Batch experiments of pH effect

- : cell number (cells/ml)
- : O.D.₆₅₀ (abs.)
- : titration rate of 1N HCl (ml/hr)
- : sulfate concentration (mM/l)

$\times 10^9$ [cells/ml] であった。また、 30°C における菌体数の最大値は、 1.35×10^9 [cells/ml]であり、 20°C の場合とほとんど差が見られなかった。菌体数を直接計数する際の顕微鏡下の観察においても菌体の形状が変化する等の特別な変化は認められなかった。これらのことから、 20°C において濁度の測定値が相対的に高いのは、誘導期が極めて長かったために、代謝副産物が槽内に多く蓄積されたためと推察される。

次に、各温度における最大 HCl 添加速度を Fig. 4a に示す。また、最大 HCl 添加速度を、その時刻での濁度で割り、最大比 HCl 添加速度として Arrhenius プロットしたものを、Fig. 4b に示す。ただし、先に述べた原因により、 20°C の濁度は、 30°C での菌体数—濁度の検量線を用いて 20°C の菌体数に対応した濁度とし、その補正した濁度より、最大比 HCl 添加速度を求めた。Fig. 4b より両者には、ほぼ直線関係があることが認められる。Fig. 4a, 4b から、 30°C が最大 HCl 添加速度、最大比 HCl 添加速度とともに最も大きいことがわかる。

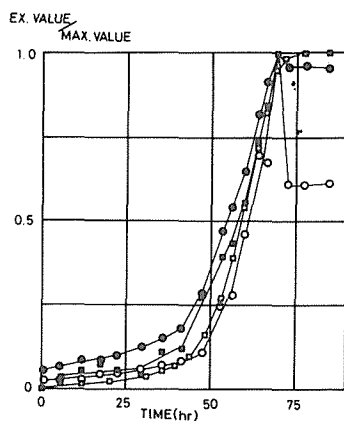


Fig. 6-a : pH 5.7

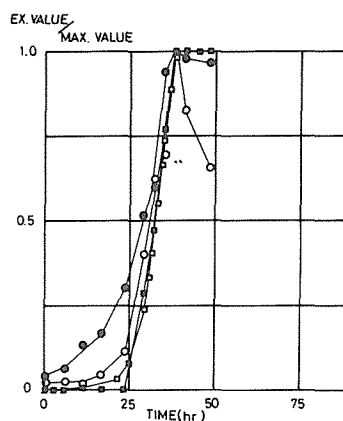


Fig. 6-b : pH 6.4

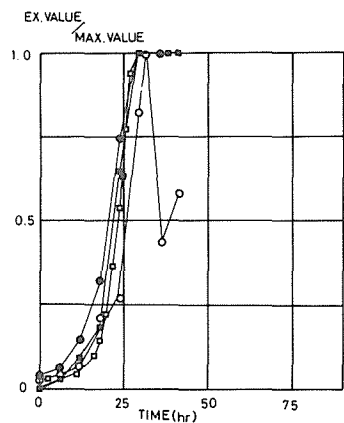


Fig. 6-c : pH 6.8

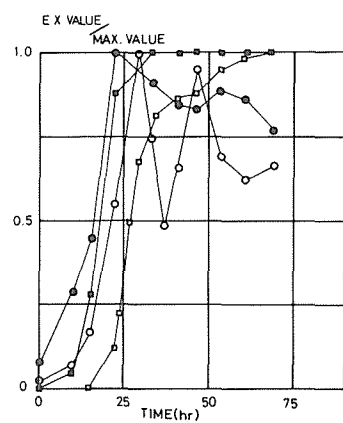


Fig. 6-d : pH 7.8

Fig. 6 Normalized plots of experimental data (batch experiments of pH effect)

- : cell number (—)
- : O.D. 650 (—)
- : titration volume of 1N HCl (—)
- : reduced sulfate concentration (—)

3.2 槽内 pH の影響（回分実験）

3.1の実験結果より、槽内温度を30℃に固定し、pH を5.7, 6.4, 6.8, 7.8, に保持して菌体の石膏処理能力を調べた結果を、Fig.5a, b, c, d に示す。各図から菌体数、濁度の増加に伴って槽内硫酸根濃度が減少してゆき、HCl 添加速度もそれに対応していることがわかる。特に、槽内硫酸根濃度が0に近づいた時点で、ほぼ同時に菌体数、濁度がともに最大値となっている。このことは、石膏が完全に消費されたために硫酸塩還元細菌の増殖が停止したことを意味していると考えられる。槽内硫酸根濃度が、0になるまでの所要時間はpH が6.4, 6.8, 7.8の場合、30時間前後であり、pH が5.7のものは約70時間要した。また、最大 HCl 添加速度は、pH が6.8, 6.4, 7.8, 5.7の順序で大きかった。濁度は、pH が7.8の場合かなり低い値を示した。この場合、菌体は硫酸根の消費とともに徐々に小さくなってゆき、定常期には、顕微鏡下でほとんど球状の菌しか認められなかった。H₂S の水溶液への溶解は、pH が6.0で総量の9%, 7.0で50%, 7.8では86%に達するため、菌体の形状変化は、溶存 H₂S による影響のためと推察される⁸⁾。また、pH が5.7の場合にも球状の菌が認められた。

次に、実験値を規格化してプロットしたものを、Fig.6a, b, c, d に示す。すなわち菌体数、濁度については、各最大値と各時刻での値の比をとり、HCl 添加量は、各時刻までの積算添加量と最終積算添加量との比をとった。また、硫酸根濃度は、初発硫酸根濃度を1とした場合の各時刻までに還元された硫酸根濃度の割合（これを以後硫酸根還元割合と呼ぶ）をプロットした。各図から、菌体数、濁度、HCl 積算添加量の増加は、硫酸根還元割合の増加とほぼ一致していることが認められる。しかし、pH が7.8の場合、HCl 積算添加量が、硫酸根還元割合に対して約10時間遅れる結果を示した。これは、pH 7.8の実験において実験開始から徐々に槽内 pH が低下し、硫酸根の還元反応が進み槽内 pH が、再び7.8に復帰するのに約10時間要したためである。他の pH 領域の実験でも同様に、pH の自然低下が見られたが、そのためによる HCl 添加の遅れは、ほとんど無視できた。また、pH が6.8, 7.8の場合、菌体数の増加が、硫酸根還元割合の増加に比して若干遅れる傾向を示す。以上のことから、硫酸根還元割合に対しては、菌体数より濁度の方がよりよい対応を示しているものと考えられる。また、pH が5.7から6.8の領域においては、硫酸根還元割合の指標として HCl 積算添加量を用いてもよいことがわかる。つまり HCl 添加速度は、これらの pH 領域では、石膏処理速度に対応するものと考えられる。Fig.7a に各 pH 条件における最大 HCl 添加速度を、Fig.7b に最大比 HCl 添加速度を示した。Fig.7a,b より槽内 pH は、6.8 付近が石膏処理に適しているものと考えられる。

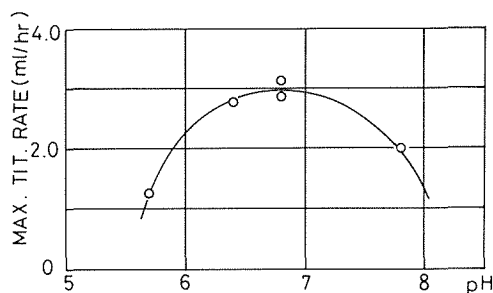


Fig.7-a Relationship between pH and maximum titration rate

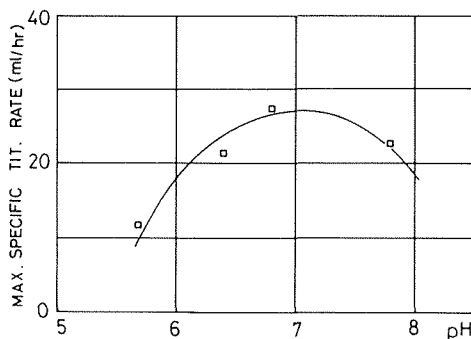


Fig.7-b Relationship between pH and maximum specific titration rate

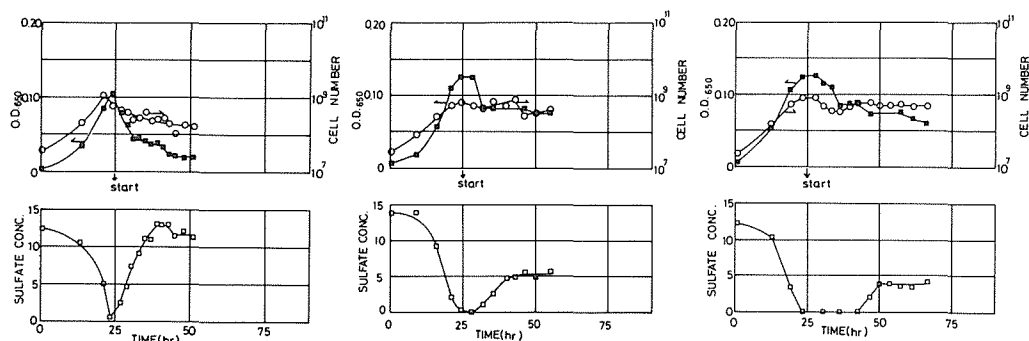
Fig. 8-a: $\bar{t} = 5.0$ (hr)Fig. 8-b: $\bar{t} = 8.1$ (hr)Fig. 8-c: $\bar{t} = 11.7$ (hr)

Fig. 8 Continuous experiments of mean residence time effect

- : cell number (cells/ml)
 ■ : O.D. ₆₅₀ (abs.)
 □ : sulfate concentration (mM/l)

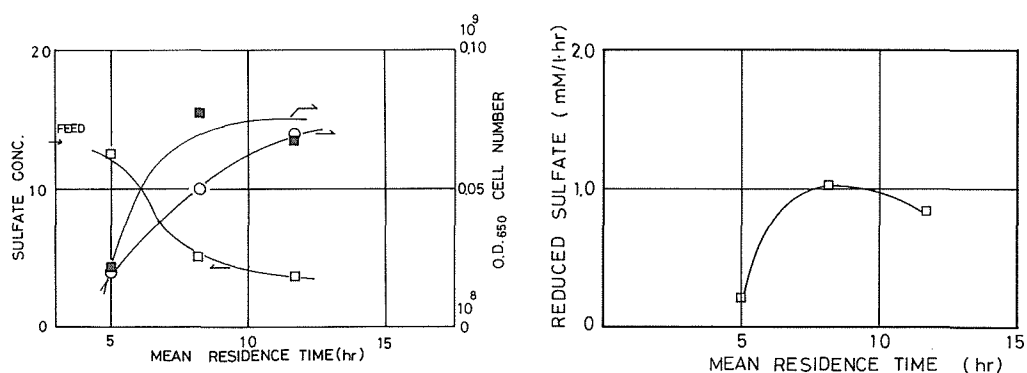


Fig. 9-a Effect of mean residence time on steady state values

Fig. 9-b Effect of mean residence time on sulfate reduce rate

- : cell number (cells/ml)
 ■ : O.D. ₆₅₀ (abs.)
 □ : sulfate concentration (mM/l)

3.3 平均滞留時間の影響（連続実験）

平均滞留時間を5.0, 8.1, 11.7時間に設定して石膏の単槽連続処理実験を行なった結果を, Fig. 8 a, b, cに示す。3.1, 3.2の実験結果より, 槽内温度, 槽内 pH は, それぞれ30℃, 6.8に固定している。各図から連続操作に切り換えた後(図中に Start と表現している) 菌体数, 濁度は減少して, ほぼ定常値に到達し, それに対応して槽内硫酸根濃度は, 上昇し定常値に向うことがわかる。HCl 添加速度をプロットしていないのは, 槽内に処理水を供給するリザーバー内原水の pH が自然低下し, 適宜リザーバー内原水 pH を6.8付近に調整し直したためである。この場合にも, 還元石膏量との対応関係が一応認められたが, 厳密性に欠けるものであった。次に, 各定常値と平均滞留時間の関係を Fig. 9a に示す。これより平均滞留時間の増加に伴ない菌体数, 濁度の定常値が増大し, 槽内硫酸根濃度が減少することがわかる。槽内硫酸根濃度をさらに低くするには, 平均滞留時間をより長くすればよいが, そうすれば, 単位時間当りの処理量が減少することになる。評価の第一段階としては, 多段処理方法等を考えた上で, 単槽処理における石膏

処理速度を決定することが妥当であると考えられる。今、各平均滞留時間に対する石膏処理速度を、Fig. 9b に示す。連続処理における石膏の処理速度は、完全混合状態では、平均滞留時間を $\bar{t}$ 、供給硫酸根濃度を C_{SF} 、槽内硫酸根濃度の定常値を $\tilde{C}_S$ とすれば、 $(C_{SF} - \tilde{C}_S)/\bar{t}$ で与えられる。Fig. 9b より平均滞留時間、8.1時間付近が最も大きい石膏処理速度1.0 [mM/l·hr] を示していることがわかる。

4. 実験結果に対する考察

槽内硫酸根濃度と菌体数、濁度の間には、良好な対応関係が存在することを前節で示した。その点に着目し、槽内硫酸根濃度と菌体濃度の経時変化を定量的に把握することは、工学的にきわめて重要な問題と考えられる。そこで、実験から得られた数値をもとに、定量化に必要なパラメーターを推定し、その値を用いて、シミュレーションを行なったので、その結果を次に示す。

今、石膏の単槽連続処理における槽内硫酸根濃度 (C_S)、菌体濃度 (βC_V) の収支式は、(2)、(3)式で示される。

$$\frac{d\beta C_V}{dt} = \mu \beta C_V - D \beta C_V \quad (2)$$

$$\frac{dC_S}{dt} = D(C_{SF} - C_S) - \frac{1}{\alpha Y} \mu \beta C_V \quad (3)$$

μ : 比増殖速度 [hr⁻¹]

αY : 増殖収率 (濁度換算) [g/mM], [l/mM]

D : 希釈率 [hr⁻¹]

βC_V : 菌体濃度 [g/l]

C_S : 硫酸根濃度 [mM/l]

C_{SF} : 供給硫酸根濃度 [mM/l]

(2), (3) 式は、処理槽が、完全混合槽である場合にのみ成立する。本実験では、トレーサー応答法により連続処理時の混合状態は、ほぼ完全混合であることを確認している。ここで、 μ を Monod の式、 $\mu = \mu_{\max} C_S / (K_S + C_S)$ で近似し、定常状態を考えると、(2), (3) 式は、(4), (5) 式となる。

$$\mu = \frac{\mu_{\max} \tilde{C}_S}{K_S + \tilde{C}_S} = D \quad (4)$$

$$\alpha Y = \frac{\mu_{\max} \tilde{C}_S}{K_S + \tilde{C}_S} \times \frac{\beta \tilde{C}_V}{D(C_{SF} - \tilde{C}_S)} \quad (5)$$

(チルド記号〜は、定常値を表わす)

Table 2 に各平均滞留時間に対する濁度換算菌体濃度、基質濃度の定常値を示す。(4) 式を変形す

Table 2 Relationship between mean residence time and steady state value, growth yield based on optical density.

$\bar{t}$ (hr)	5.0	8.1	11.6
$\beta \tilde{C}_V$ (-)	0.021	0.078	0.068
$\tilde{C}_S$ (mM/l)	12.0	5.1	3.7
αY (l/mM)	0.016	0.0086	0.0081

ると, (6) 式となる。

$$\frac{1}{\mu} = \frac{1}{\mu_m} + \frac{1}{\mu_m} \frac{K_s}{\tilde{C}_s} \quad (6)$$

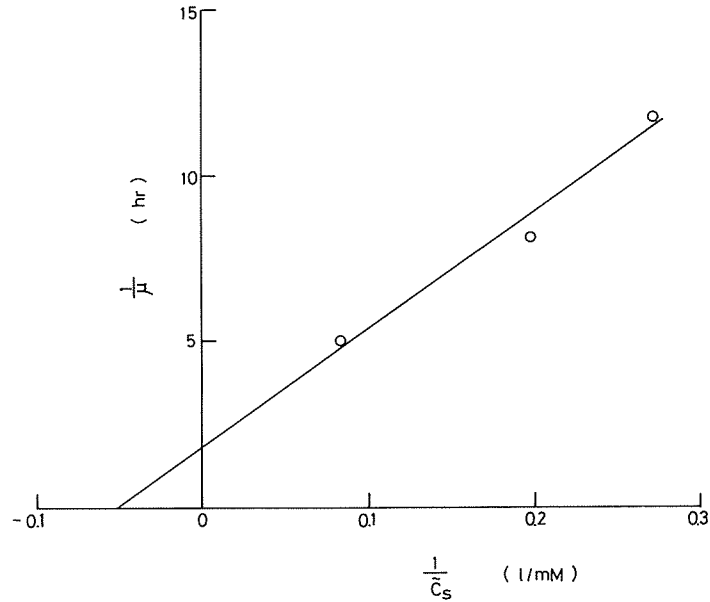


Fig. 10 Lineweaver-Burk Plot

Fig. 10 は, (6) 式の $1/\mu$ の値と $1/\tilde{C}_s$ の値をプロットしたものである。同図直線の勾配より, 最大比増殖速度 $\mu_{\max}$ は 0.54 となる。また, X 切片の値より飽和定数 K_s は, 19.1 となった。各平均滞留時間に対応した αY は, $\beta \tilde{C}_v$, $\tilde{C}_s$ の実測値を (5) 式に代入して求めた。それぞれの値を Table 2 に示す。連続処理における濁度換算収率は, 一般に変化し, 平均滞留時間の増加にともない減少

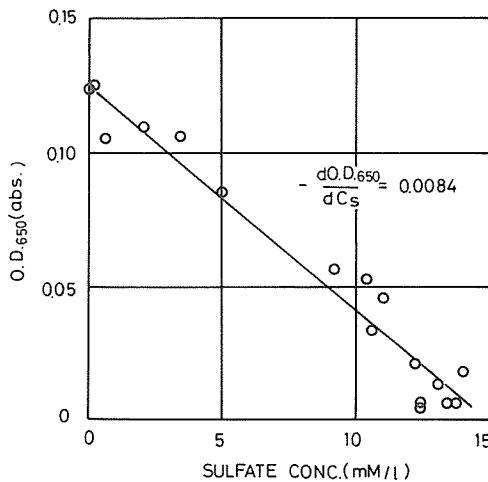


Fig. 11 Growth yield based on optical density (batch experiment (30°C, pH6.8))

Table 3 Simulation conditions

Parameter or initial condition	Batch	Continuous
$\beta C_v(0)$ (abs.)	0.006	0.118
$C_s(0)$ (mM/l)	13.4	0.102
$\mu_{\max}$ (hr ⁻¹)	0.54	0.54
D (hr ⁻¹)	0.0	0.123
K_s (mM/l)	19.1	19.1
αY (l/mM)	0.0084	0.0086
C_{sf} (mM/l)	0.0	13.4

する傾向を示す¹³⁾。次に、回分処理における濁度換算収率 αY は、(7) 式より求めた。

$$-\frac{d\beta C_v}{dC_s} = \alpha Y \quad (7)$$

(7) 式は、濁度換算菌体濃度を縦軸に、その時の槽内硫酸根濃度を横軸にプロットしたグラフの直線の勾配が、 αY を与えていることを示す。Fig. 11 に、その一例を示す。図の直線の勾配より αY の値は、0.0084 [1/mM] となった。以上、得られたパラメーターの値を、Table 3 に示す。これらの値を用いて、計算した結果の一例を Fig. 12 に示す。同図より、シミュレーション結果と実験結果は、比較的良好な対応関係を示しているものと考えられる。

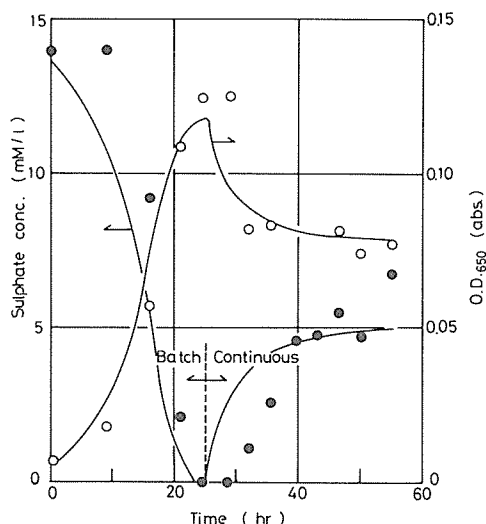


Fig. 12 Simulation result of batch and continuous experiment

($\bar{t} = 8.1$ (hr))

— : Simulation curves

○ : O.D. ₆₅₀ (abs.)

● : sulfate concentration (mM/l)

5. 結 論

石膏の硫酸塩還元細菌による処理実験を行なったところ以下のことが、明らかとなった。

- 1) 温度が20℃から30℃、pHが5.7から6.8の領域においては、pH スタットによる1N HCl 添加量を石膏還元反応の代替特性値として用いることができる。
- 2) 温度が20℃から30℃、pHが6.8においては、最大比 HCl 添加速度は、Arrheniusの式に従う。
- 3) 石膏の単槽連続処理における最適条件は、温度30℃、pH 6.8、平均滞留時間8.1時間であり、その場合の石膏の処理速度は、1.0 [mM/l·hr] であった。
- 4) 石膏の連続処理の定量的把握に必要なパラメーターの推定を行ない、その値を用いて、シミュレーションを行なった結果、実験結果と比較的良好な対応関係を示した。

謝 辞

本研究を開始するにあたり，硫酸還元菌の取り扱い手法等に関し，御教授下さいました北海道大学薬学部石本真教授，小林邦彦助手に厚く御礼申し上げます。また，本研究の初期に実験を担当された，本研究室大学院学生，角田英男君，関琢彦君に感謝の意を表わします。

使 用 記 号

- C_s : 槽内硫酸根濃度 [mM/l]
 $\bar{C}_s$: 槽内硫酸根濃度の定常値 [mM/l]
 C_{SF} : 供給硫酸根濃度 [mM/l]
 C_v : 活性菌体濃度 [g/l]
 $\bar{C}_v$: 活性菌体濃度の定常値 [g/l]
 D : 希釈率 [hr⁻¹]
 K_s : 飽和定数 [mM/l]
 $\bar{t}$: 平均滞留時間 [hr]
 αY : 濁度換算増殖収率 [g/mM], [l/mM]
 βC_v : 濁度換算活性菌体濃度 [g/l]
 α : 菌体重量濁度換算係数 [l/g]
 β : 活性菌体濃度濁度換算係数 [—]
 μ : 比増殖速度 [hr⁻¹]
 μ_{max} : 最大比増殖速度 [hr⁻¹]

引 用 文 献

- 1) 芝山良二，中島和夫，土田直行，田中時昭：日本鉱業会誌，**97** (1981), p. 41.
- 2) 今井和民：昭和53年度全国地下資源関係学協会合同秋季大会講演会資料，(1978), p. 5.
- 3) 鈴木喬：インプレースリーチング特別委員会・バクテリアリーチング研究会（第11回）要旨集，(1976), p. 5.
- 4) 鈴木喬：ibid, (第12回)，(1977), p. 15.
- 5) 八木沢三男，村上幸枝，加藤勝弘，他三名：日本鉱業会誌，**93** (1977), p. 447.
- 6) D. J. Cork : Ph. Dissertation, Uni. Arizona (1978).
- 7) 土壤微生物実験法，土壤微生物研究会編 (1975), 養賢堂.
- 8) 中原東郎，佐々木英次，神田幸雄，梅野秀夫：農化，**52** (1978), p. 365.
- 9) J. H. Vosjan : Plant and soil, **43** (1975), p. 141.
- 10) F. Berglund, B. Sörbo : Scandinav. J. Clin. & Investigation, **12** (1960), p. 147.
- 11) 高森隆勝，角田英男，岡村明彦：化学工学北陸大会セミナー講演要旨集，(1980), p. 67.
- 12) 岡村明彦，高森隆勝：日本鉱業会春季大会講演要旨集，(1981), p. 199.
- 13) S. Koga, A. E. Humphrey : Biotech. Bioeng., **9** (1967), p. 375.