

生物材料を吸着剤とした廃水処理

Treatment of Wastewater with Biological Materials as Adsorbent

It was demonstrated in the present study that biological materials such as yeast cells, bacteria, algae and sawdust strongly adsorbed various pollutants in water including heavy metals, dyes and synthetic detergents. Heat or chemical treatment of aggregates of these cells with organic high polymers under appropriate conditions yielded granules, which were stable and insoluble in water and proved to be effective adsorbents for columnar adsorption process. Mixtures of cells such as sewage sludge obtained by the activated sludge process were also applicable to the adsorption treatment of wastewater. Adsorption of metal ions, basic and acid dyes on biological cells was mainly due to the electrostatic interaction, and regulation of hydrogen ion concentration was required for effective removal of the pollutants from water. The adsorption of small ions on biological cell showed characteristic features, and the adsorption-isotherm was largely dependent on the concentration of the cells. The adsorption mechanisms were briefly discussed in terms of electrostatic inter-cellular interaction.

伊藤迪夫* *Michio Itô*小林映章* *Teruaki Kobayashi*湯浅光義** *Mitsuyoshi Yuasa*

1 緒 言

従来の廃水処理法は、大別して物理化学的方法と生物学的的方法とから成る。前者ではイオン交換樹脂や活性炭による吸着、廃水のpH調整や凝集剤利用による沈殿処理法などが用いられており、その主な対象廃水としては重金属含有廃水などがあげられる。これに反し、従来の生物学的的方法は、好気的あるいは嫌氣的微生物の代謝活性を利用するものであり、主に都市下水や食品工業廃水中の有機物の分解処理(活性汚泥法やメタン発酵法など)に適用されてきた。

生物学的手段で重金属などの有害物を含む廃水を処理しようとする場合、当該廃水中で多種の細菌を培養して特定の耐性菌を探し出し、その菌に有害物を取り込ませて廃水から除去しようとするのが普通である。このような考え方に沿って水銀含有廃水の処理法を開発した例が報告されている⁽¹⁾。

しかしながら、一般的に考えると、このような方法では有害物の種類に応じて有効菌の種類を変えねばならず、その検索、培養に人手と時間を要し、その結果成功する保証もなく、また、廃水の実際の処理プロセスの維持管理も容易ではないものと思われる。

我々は、重金属などが生物一般に極めて有害なものである以上、特定の細菌を用いなくても、現在大量に工業的に生産されている細胞(生物材料)を吸着剤として用いても、重金属などは細胞に強く吸収吸着されて、良い結果が得られるのではないかと考え実験的検討を加えたところ、所期の結果が得られたので報告する。本稿ではまず生物材料の各種水質汚染物に対する吸着能について述べ、続いて、実際の廃水処理に当たって必要な基礎データを記し、また、生物材料の示す特異な吸着機構について概説する。なお、本稿の内容の一部は日本化学会で発表した⁽²⁾。

表1 水処理用生物材料(吸着剤)と水質汚染物質(被吸着物質)
酵母菌は一般に細胞が多糖類で囲まれており、丈夫であるので適当な吸着剤の一つである。

Table 1 Biological Materials as Adsorbent for Wastewater Treatment and Pollutants Adsorbed by them.

生 物 材 料	水 質 汚 染 物
酵 母 菌 パン酵母 食飼料用酵母(亜硫酸パルプ廃液酵母, 石油タンパク酵母)	合 成 洗 剤 水 溶 性 染 料 金 属
藻 類 クロレラ, セネデスムス	
細 菌 類 人体に無害な菌 活性汚泥法により副生する余剰汚泥	
木材粉末 ラワン, スギ, ウォールナット, ヒノキ	

2 生物材料の吸着能

水処理に利用可能な材料として本研究で提案する生物材料及びこれらに対する被吸着能を検討した水質汚染物は表1に示すとおりである。生物材料の代表としてパン酵母を選びその吸着能を中心に以下に概説する。水処理用吸着剤として細胞を用いる場合、それが水中で破壊されない必要があるが、この点、酵母菌は一般に細胞が多糖類で囲まれており、丈夫であるので適当な吸着剤の一つである。

表2にパン酵母の各種金属イオンに対する吸着能をまとめた。実験はパン酵母28gを径6.5cmのガラス製カラムに充てんし、カラム上部から表記した各イオンを500ppm(Hg⁺のみ24ppm)含む水溶液を50ml流し、続いて純水を流しカラム通過液320ml中の金属濃度を原子吸光法により分析して行なった。本実験結果から、Alイオンを例外として原子番号24以上の重金

* 日立製作所中央研究所 理学博士 ** 日立製作所中央研究所

表2 パン酵母を充てんしたカラムによる水溶液中の金属イオンの除去 Alイオンを例外として原子番号24以上の重金属は効果的に酵母菌により吸着除去されることが分かる。

Table 2 Removal of Metal Ions by Baker's Yeast

金属イオン	原子番号	除去率 (%)
Na ⁺	11	— 9
Mg ⁺⁺	12	74
Al ⁺⁺⁺	13	> 99.0
K ⁺	19	— 130
Ca ⁺⁺	20	77
Cr ⁺⁺⁺	24	85
Mn ⁺⁺	25	91
Ca ⁺⁺	27	93
Ni ⁺⁺	28	85
Cu ⁺⁺	29	99.9
Zn ⁺⁺	30	97
Ag ⁺	47	> 99.9
Cd ⁺⁺	48	99
Hg ⁺	80	99.9
Hg ⁺⁺	"	> 99.9
酢酸フェニル水銀	"	"
Pb ⁺⁺	82	> 99.8

属は効果的に酵母菌により吸着除去されることが分かる。K⁺, Na⁺など細胞中に多量に存在するイオンは細胞によっては吸着除去されず、特にK⁺は添加した量の2.3倍カラム通過液中に溶出した。

酵母の重金属に対する吸着力は非常に強い。このことは上記のカラム吸着実験で、Ag⁺につき、通水完了後、カラムを減圧乾燥して(カラムの厚み約1cm)カラム中の銀濃度の分布をX線マイクロアナライザによりAgL_α線で水溶液の通水方向に走査して測定した結果(図1参照)より明らかである。銀はカラム表面近傍に幅200μ程度の薄層状に吸着している。

合成洗剤としてドデシルベンゼンスルホン酸塩(DBS)及びドデシルアルコールの硫酸エステル塩(SDS)を代表例として選び、これらの水溶液にパン酵母を76g/lの濃度で添加し(バッチ吸着方式)1時間放置後懸濁液を遠心分離して細胞を除き、上澄みの洗剤濃度を測定した結果、これらの洗剤はい

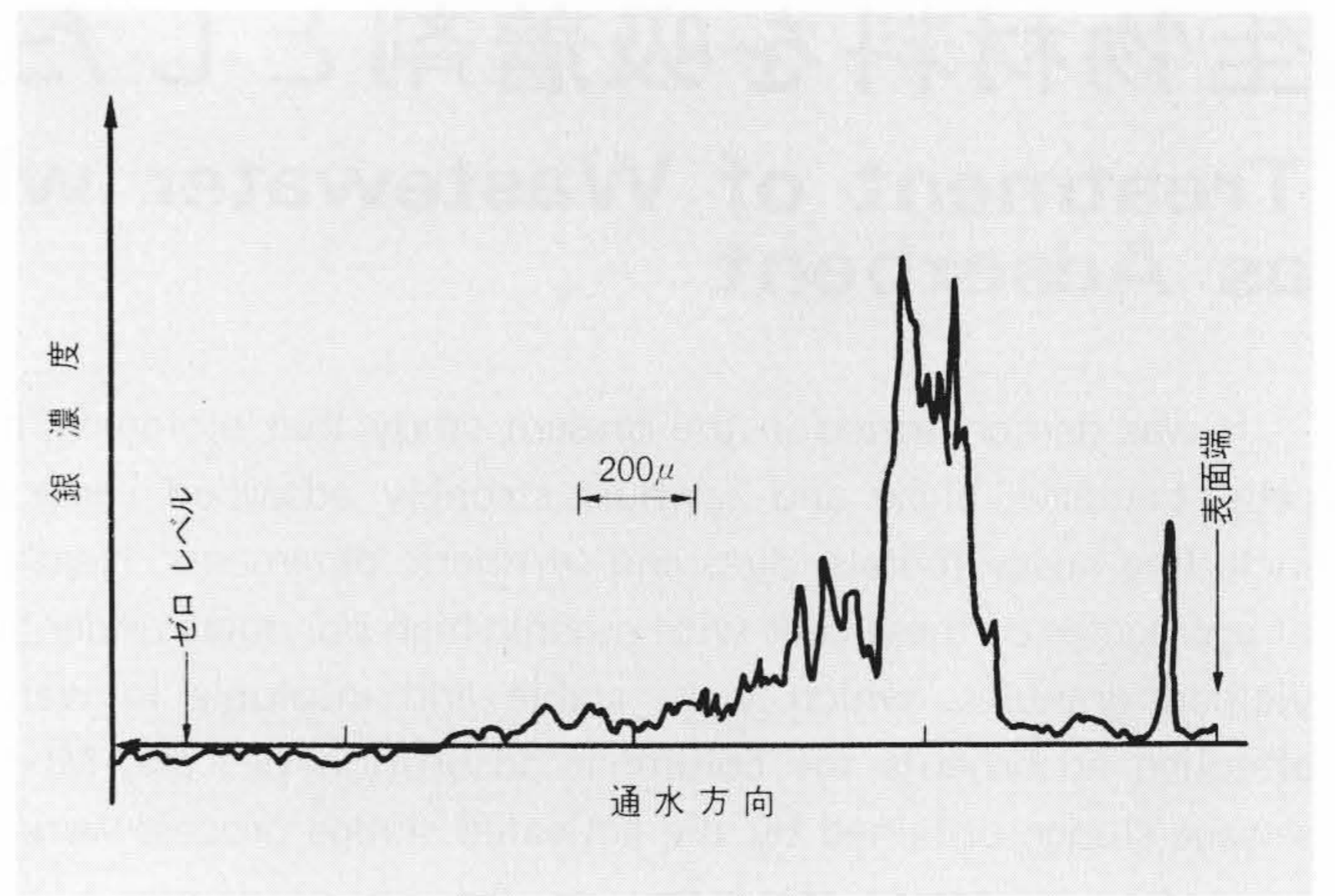


図1 パン酵母カラム中での吸着銀イオンの濃度分布 測定はX線マイクロアナライザによる。

Fig. 1 Distribution of Adsorbed Ag in Baker's Yeast Column

ずれも酵母により効率よく吸着除去されることが分かった(表3参照)。

同様に、各種直接染料、塩基性染料合計18種の濃厚水溶液(液層1cm当たり吸光度30程度を与える)をパン酵母濃度76g/lでバッチ吸着法により処理したところ、いずれの染料も70~99%の範囲の高い除去率で吸着除去された。

パン酵母の代わりに他の生物材料を用いても結果は定性的に同一である。表4は、亜硫酸パルプ廃液からの飼料用酵母を吸着剤として(濃度80g/l)バッチ吸着法で重金属、洗剤、及び染料を吸着除去した結果を示すものである。例えば、Hg⁺⁺については初濃度200ppmの溶液が本酵母による1回の吸着処理により5ppb以下の溶液になった。

生物材料を吸着剤とした廃水処理では廃水と細胞が接触する際のpHが重要である。以上、述べてきた実験結果はすべて中性pH付近で得られたものである。廃水のpHが変化すると吸着能も変化する。この様相を各pH値でのバッチ吸着法による除去率の実験結果をもとにして図2に示した。陽イオンであるCd⁺⁺は中性付近でパン酵母により強く吸着除去されるが、酸性(pH5付近)になると吸着されない。これに反し、陰イオンである酸性染料インジゴカーミン(IC)及びクロム酸は、酸性条件下では吸着されるが中性では吸着されない。一般に、細胞は両性電解質のように挙動し、中性付近では負に荷電し

表3 パン酵母による合成洗剤の除去(バッチ吸着法) 合成洗剤はいずれも酵母により効率よく吸着、除去される。

Table 3 Removal of Synthetic Detergents by Baker's Yeast

洗剤名	原液濃度 (ppm)	処理済み液濃度 (ppm)	除去率 (%)	
			50	100
DBS (ドデシルベンゼン スルホン酸塩)	66	2.4	96	
	660	28	"	
	40,000	10,000	73	
SDS (ドデシルアルコールの 硫酸エステル塩)	580	37	94	
	5,800	1,000	83	

注: 酵母濃度 76g/l

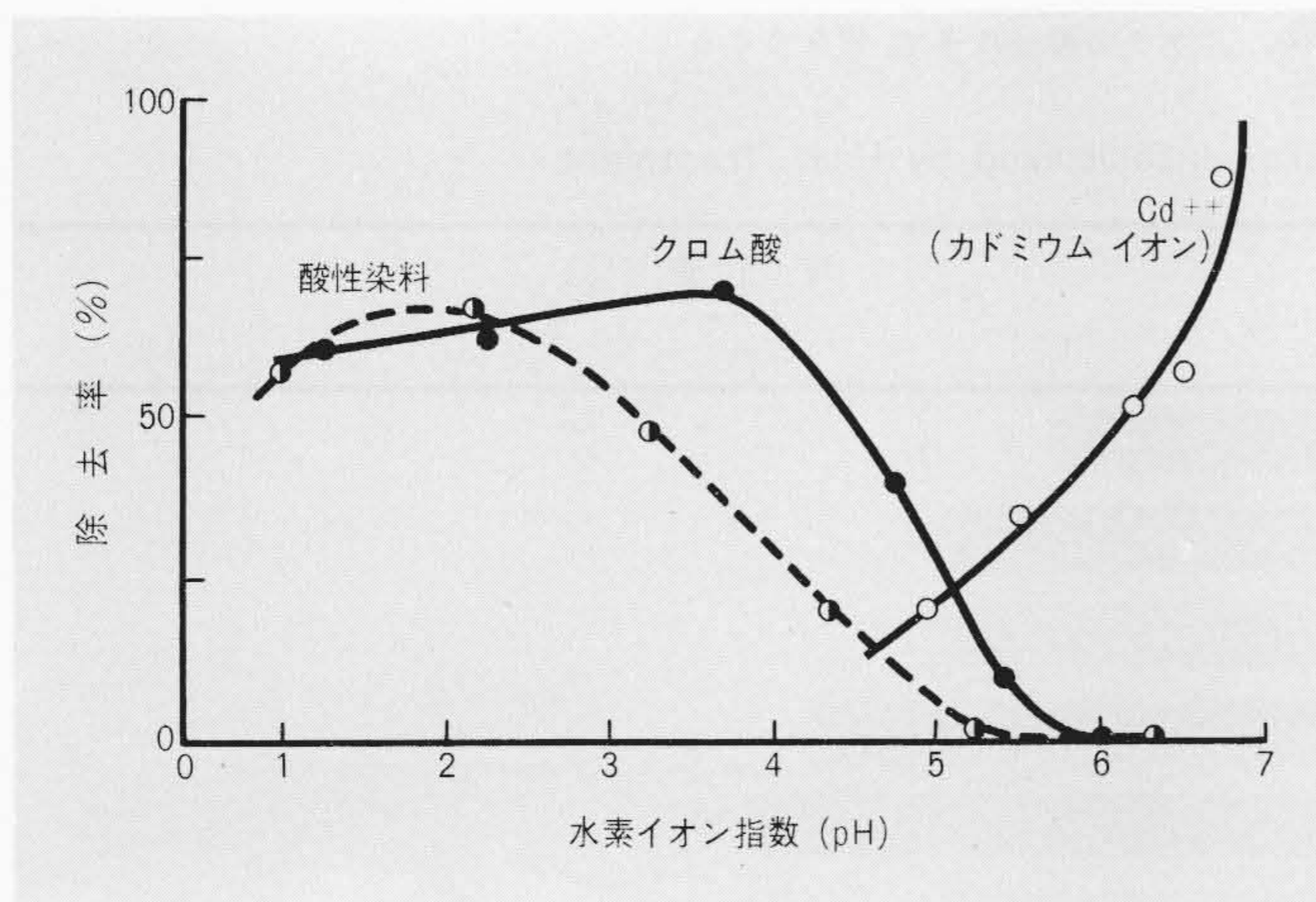


図2 カドミウムイオン、クロム酸及び酸性染料のパン酵母による吸着除去に対するpHの効果 廃水のpHが変化すると吸着能も変化する。
Fig. 2 pH Effect on Adsorption by Yeast of Cd⁺⁺, Chromate and an Acid Dye

ており、酸性になるにつれて負電荷量が減少してついに正に荷電するようになるが、図2の結果はこのことと矛盾しない。例えば、Cd⁺⁺は細胞の負電荷密度の高い中性付近では静電気力により吸着除去されるが、負電荷密度の減少とともに除去されなくなる。

吸着が静電気力に基づくことから予想されるように、細胞の重金属に対する吸着速度は大きい。例えば、Cd⁺⁺の初濃度10ppm、パン酵母濃度7g/lの混合懸濁液(pH6.3)でCd⁺⁺の吸着過程をCd電極を用いて時間的に追跡したところ、10秒以内で反応は平衡に達することが分かった。

3 生物材料によるカラム吸着法

廃水に生物細胞をpHを制御しつつ添加すれば重金属をはじめとする各種の水溶性汚染物質を吸着除去できる。しかしながら、大量の廃水を処理する場合、このいわゆるバッチ吸着法はプロセスが回分的になり、また、細胞と廃水を分離する手段を要するなどの点で不利であろう。酵母などの微生物細胞は、

一般に大きさが数ミクロン程度で非常に小さいので、細胞をそのままカラムに充てんすると通水速度が上げられない。細胞を巨視的大きさに造粒してこれに水不溶性(水非分散性)を付与し得れば、この巨視的粒子をカラムに充てんすることにより廃水の高速度連続処理が可能になる。各種微生物細胞を熱処理法および合成高分子を用いる方法の2方法につき造粒し、その吸着能を検討した結果を以下に述べる。木材粉末は特に造粒しなくてもそのままカラム用吸着剤となる。

酵母、クロレラ、細菌、余剰汚泥などの凝集体を215°C以上で熱処理すると、細胞間で熱凝固反応が生じ凝集体は水に不溶非分散性となり、この粒子は再生再使用可能なカラム用充てん剤として利用できることが分かった。一例として、パン酵母の凝集体を215°Cで熱処理して不溶化したものをカラムに充てんし、Cd⁺⁺あるいはPb⁺⁺を含む水溶液を通水し、金属を吸着させ、その後塩酸を通水して金属を脱着し、続いてカラムをアルカリの通水により再生する操作をCd⁺⁺につき連続6回、続いてPb⁺⁺につき1回繰り返した結果を表5に示した。同表で通水速度は金属水溶液の1時間当たりの通水量を充てん剤のカラム中で占める容積で除した値、SV値(Space Velocity)で示してある。水不溶酵母粒子は少なくとも7回金属の吸着を繰り返してもその吸着量が低下せず、むしろ増加する傾向を示すことが分かる。なお、Cdの吸着量2%はPbの吸着量4%とほぼ等モル量である。本粒子による吸着にはイオン交換作用が主として寄与しているものと考えられる。

細胞はタンパク質、糖類などの高分子物質で構造を維持している。これらの構造物と反応する適当な高分子と細胞を混合すれば細胞の凝集体は水に不溶となろう。種々の化合物と細胞との反応を検討したところ、例えば、パン酵母につきメラミン-ホルムアルデヒド樹脂を用いると良い結果が得られた。すなわち、メラミン-ホルムアルデヒド樹脂の水溶性製品と酵母の濃厚懸濁液とを混合し、触媒存在下で放置すると室温で硬化反応が進行する。硬化反応の途中で混合物を押出造粒法あるいは転動造粒法など既存技術で造粒しておけば水に不溶の吸着剤粒子を得ることができる。本樹脂の効果は主として樹脂中のメチロール基と酵母細胞表面の糖類の水酸基との脱水縮合反応に基づくものと考えられる。

このようにして、水に不溶化したパン酵母の吸着能を酸性

表4 飼料用酵母による重金属、洗剤及び染料の除去(バッチ吸着法) パン酵母と同様に重金属、洗剤、染料を吸着、除去している。

Table 4 Removal of Metals Detergents and Dyes by Fodder Yeast

被除去化合物	原液濃度 (ppm)	処理済み液濃度 (ppm)	除去率 (%)	
			50	100
Hg ⁺⁺	400	8.9		98
	200	<0.005		>99.99
Cd ⁺⁺	400	35		92
	200	10		95
DBS SDS	660	27		96
	580	24		"
ブリリアントグリーン (塩基性染料) ナイアガラ スカイブルー (直接染料)	300	2.4		99.2
	2,200	6.6		99.7

注: 酵母濃度 80g/l

表5 熱処理により水に不溶化した酵母粒子カラムによる重金属の除去 水不溶酵母粒子は、少なくとも7回金属の吸着を繰り返してもその吸着量が低下せず、むしろ増加する傾向を示す。

Table 5 Removal of Metals by Columnar Process with Yeast Granules Insolubilized by Heat Treatment

金 属	吸 着 回 数	添加金属濃度 (ppm)	通 水 速 度 (SV)	吸 着 量 (%)			
				1.0	2.0	3.0	4.0
Cd ⁺⁺	1	10	125	1.0			
	2	"	20		1.3		
	3	"	33			1.4	
	4	100	18				1.8
	5	"	"				2.0
	6	"	"				"
Pb ⁺⁺	7	185	16				4.0

染料インジゴカーミン (IC) に対する吸着実験をもとに示す。染料の100ppmの水溶液をpH 2でSV値50の高速で不溶性酵母粒子を充てんしたカラムに通水し、通過液に1ppmの染料が出現するまでの染料の吸着量を求めた。吸着量は造粒するときの酵母と樹脂との混合比及び粒子の大きさに依存するが、酵母対樹脂の比が100対20程度が良い結果を与え、吸着量は60~150メッシュの粒子につき10%程度であった。

図3は、木材(ラワン)粉末(16~150メッシュ)と市販の水処理用粒状活性炭(16~32メッシュ)の塩基性染料メチルバイオレットに対する吸着能をカラム吸着法で比較した結果を示すものである。活性炭は4.4g、木材は1.0gをカラムに充てんし、カラム容積一定(11ml)で100ppmの染料水溶液をpH 7でSV値50及び100で通水して比較した。木材粉の吸着速度は活性炭のそれよりはるかに大きく、例えば、SV値50では木材カラムの場合、染料添加量60mg程度まで染料は処理水中に出現しない(染料濃度1ppm以下)のにひきかえ、活性炭カラ

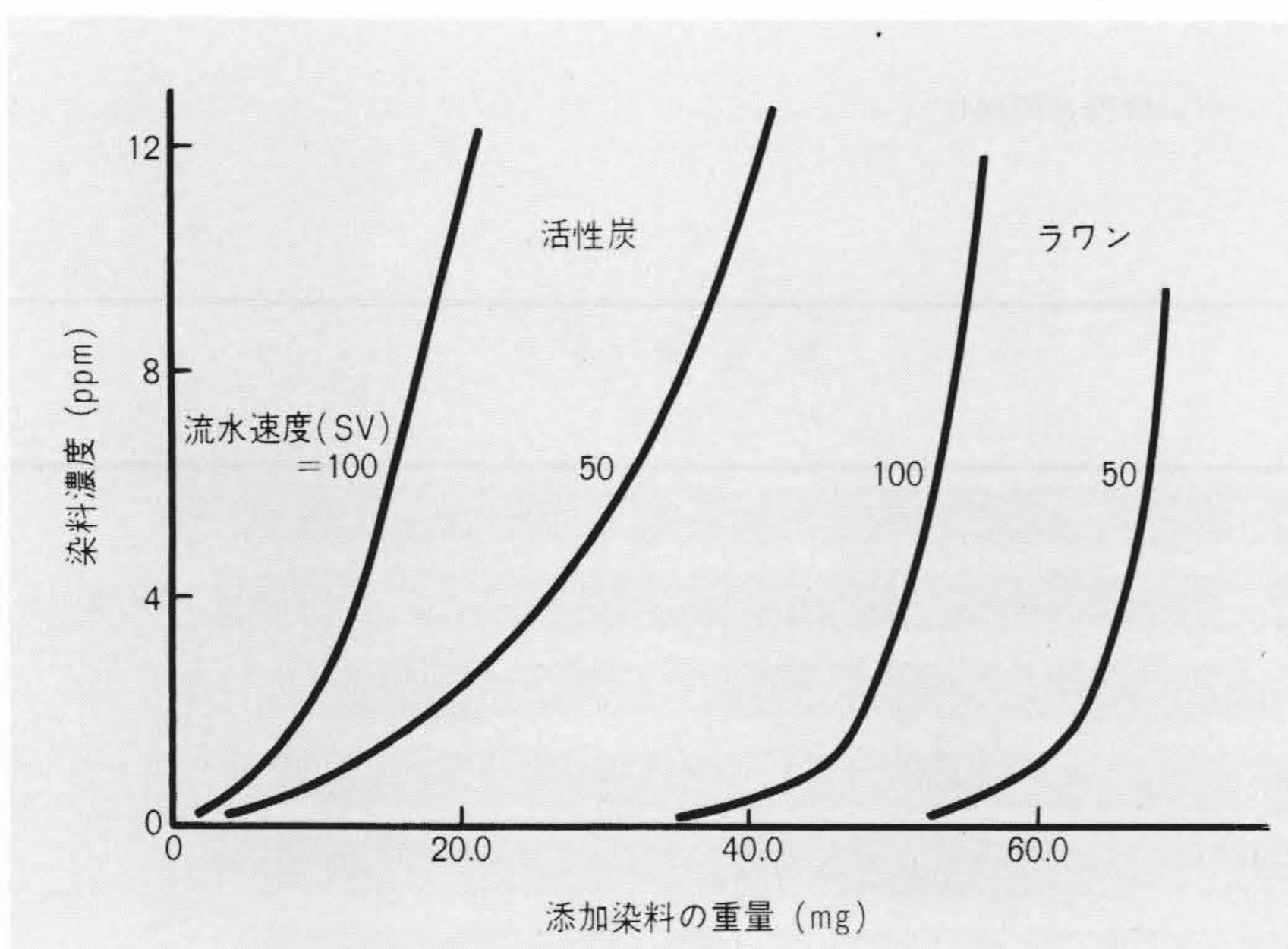


図3 木材粉及び活性炭の吸着速度のカラム吸着実験による比較 木材粉の吸着速度は、活性炭のそれよりはるかに大きくなる。

Fig. 3 Comparison of Adsorption Rates of Wood Powder and Activated Carbon

ムでは染料添加量10mgですでに処理水は着色した。

4 生物材料の吸着機構

生物材料のイオン性低分子量物質に対する吸着機構は、従来吸着現象一般に言われているものとは異なる面を有している。通常、吸着剤の性能評価などにおいて、いわゆる吸着等温線が決定されるが、これは吸着剤と被吸着剤を種々濃度でバッチ方式で混合し、反応が平衡に達したときの被吸着剤の平衡濃度の対数を横軸にとり、縦軸に吸着剤単位量当たりの吸着量の対数をプロットして得られる。このようにして得られる平衡濃度と吸着量の関係は一般に一定のこう配をもつ1本の直線(Freundlich型吸着)あるいは吸着飽和を示す1本の曲線(Langmuir型吸着)とされている。しかるに、生物細胞を吸着剤とした場合の吸着等温線は非常に特異なものとなり、得られる線関係は用いた吸着剤の混合液中での濃度に依存して大きく変化することが分かった。

図4、5は例としてパン酵母にCd⁺⁺およびHg⁺⁺を吸着させた場合の吸着等温線(23°Cで実験)を示すものである。これらから、酵母の濃度を70g/lから0.07g/lまで変化させると一定の金属イオンの平衡濃度に対して種々の吸着量が得られることが分かる。吸着量は酵母濃度が低いほど高くなる。

平衡濃度を酵母濃度で除した値の対数を横軸にとると、上記の複数の関係線図は屈折はしているが1本の直線に整理されるという興味ある事実が分かった(図6、7)。これらの図の直線関係で、屈折を含まない一つの直線部分については次の実験式が成立する。ここで、吸着量をM、酵母濃度をY、金属の平衡濃度をC、A、nを定数とする。例えば、Cd⁺⁺の

$$M/Y = A(C/Y)^n$$

最初の直線部分(図6)では、Mをm moles/g、Yをg/l、Cをm moles/l単位で表わすと、Aは0.10、nは0.44となる。同じく、2段めの直線部分については、Aは0.8、nは1.1となる。本式の右辺の()の中のYを除けば、Freundlichの吸着等温式になる。

細胞のイオンに対する吸着では細胞濃度が高くなると細胞単位重量当たりの吸着量は減少する。このことは基本的には荷電粒子(細胞)に対するイオンの結合反応に、荷電粒子間の相互作用の影響が表われたためと解釈できる。例えば、負荷

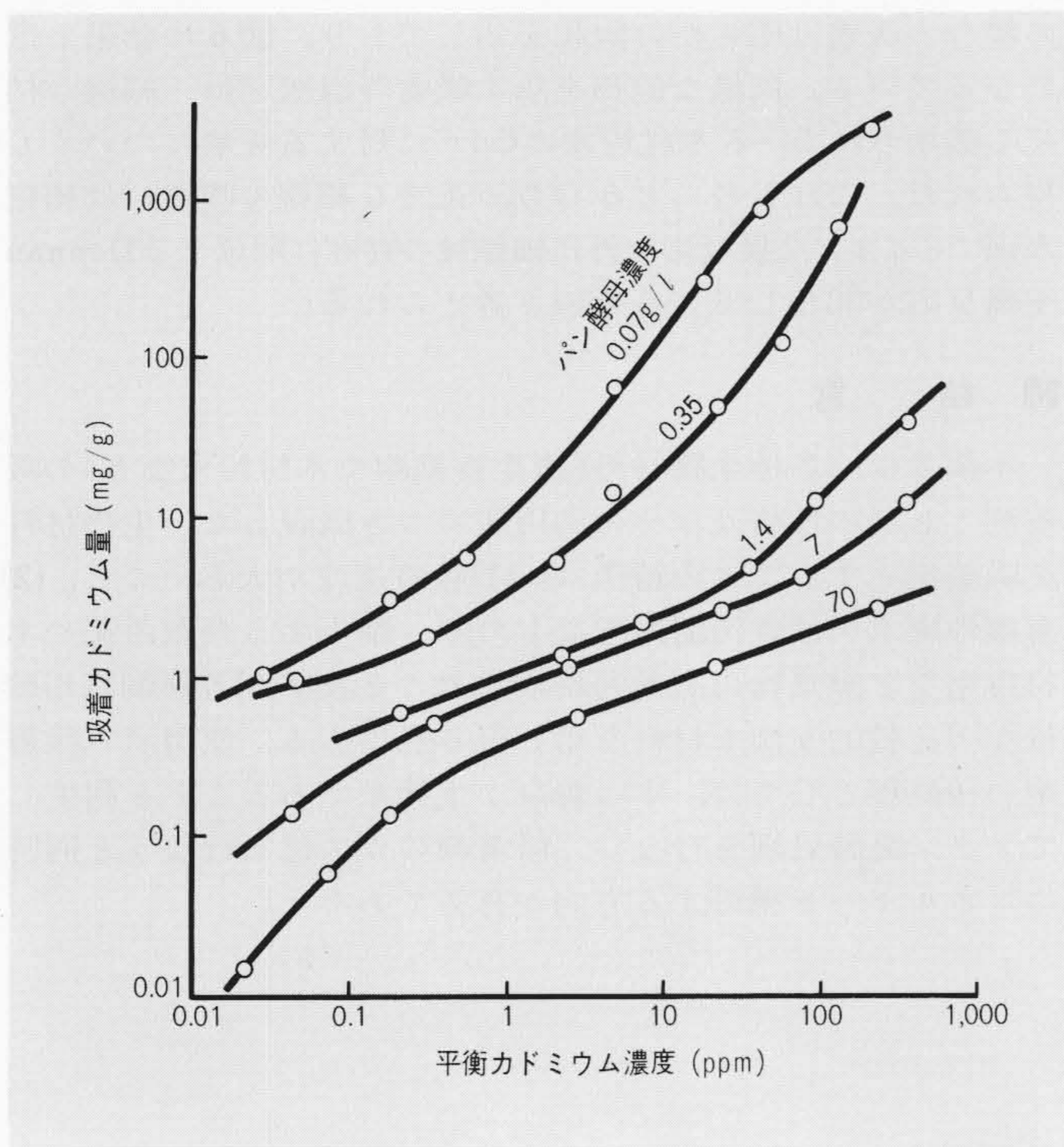


図4 種々の酵母濃度におけるカドミウム吸着に対する吸着等温線 吸着量は酵母濃度が低いほど高くなる。

Fig. 4 Adsorption Iso-therms for Cd^{++} at Various Yeast Concentrations

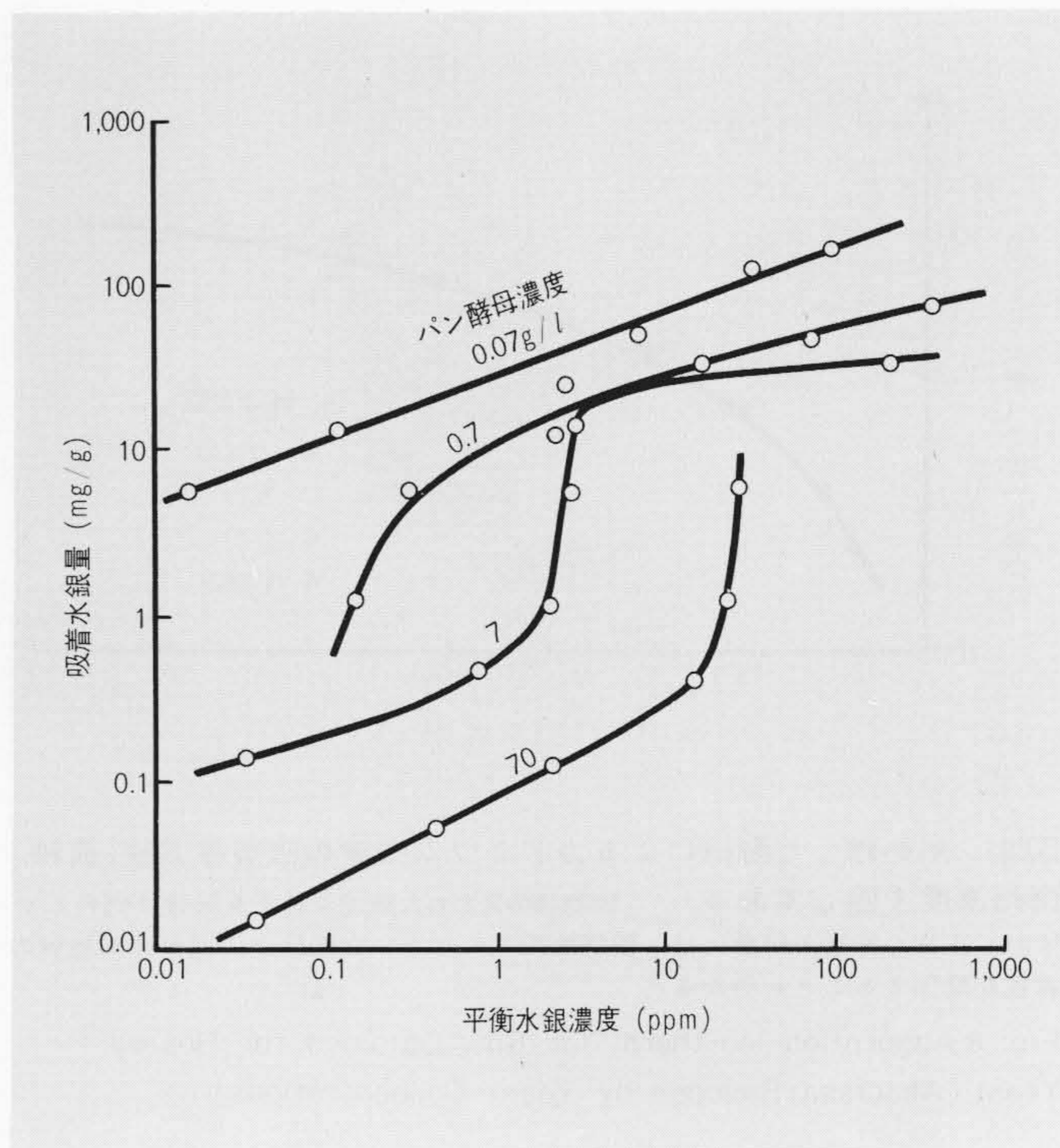


図5 種々の酵母濃度における水銀吸着に対する吸着等温線 一定の金属イオン濃度に対して、各種の吸着量が対応していることが分かる。

Fig. 5 Adsorption Iso-therms for Hg^{++} at Various Yeast Concentrations

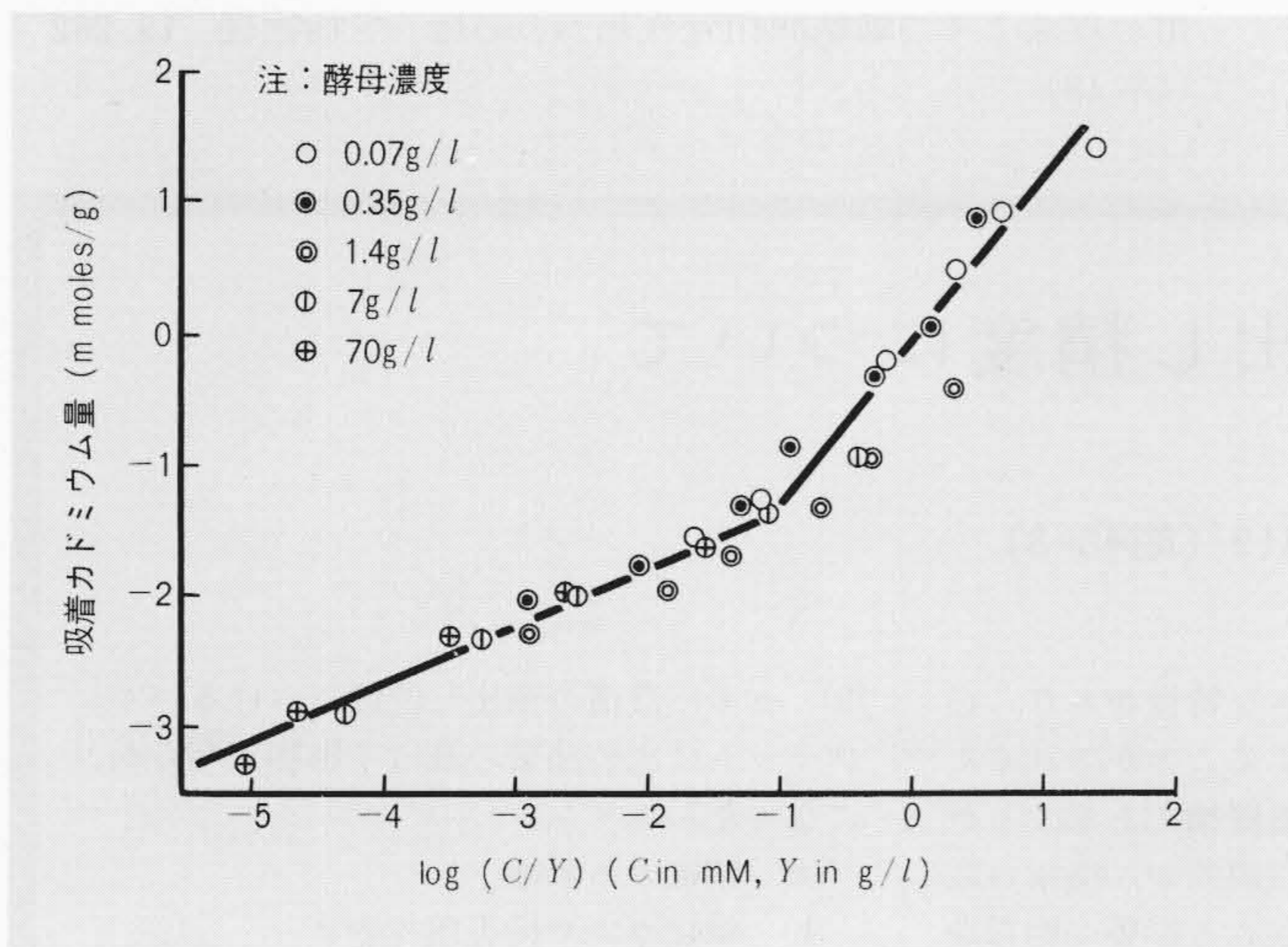


図6 横軸を酵母濃度と金属濃度の比で示したカドミウム吸着の等温線 この事実は生物細胞をバッチ吸着法に应用する場合の基本になる

Fig. 6 Adsorption Iso-therm for Cd^{++} with Abscissa Reduced by Yeast Concentrations

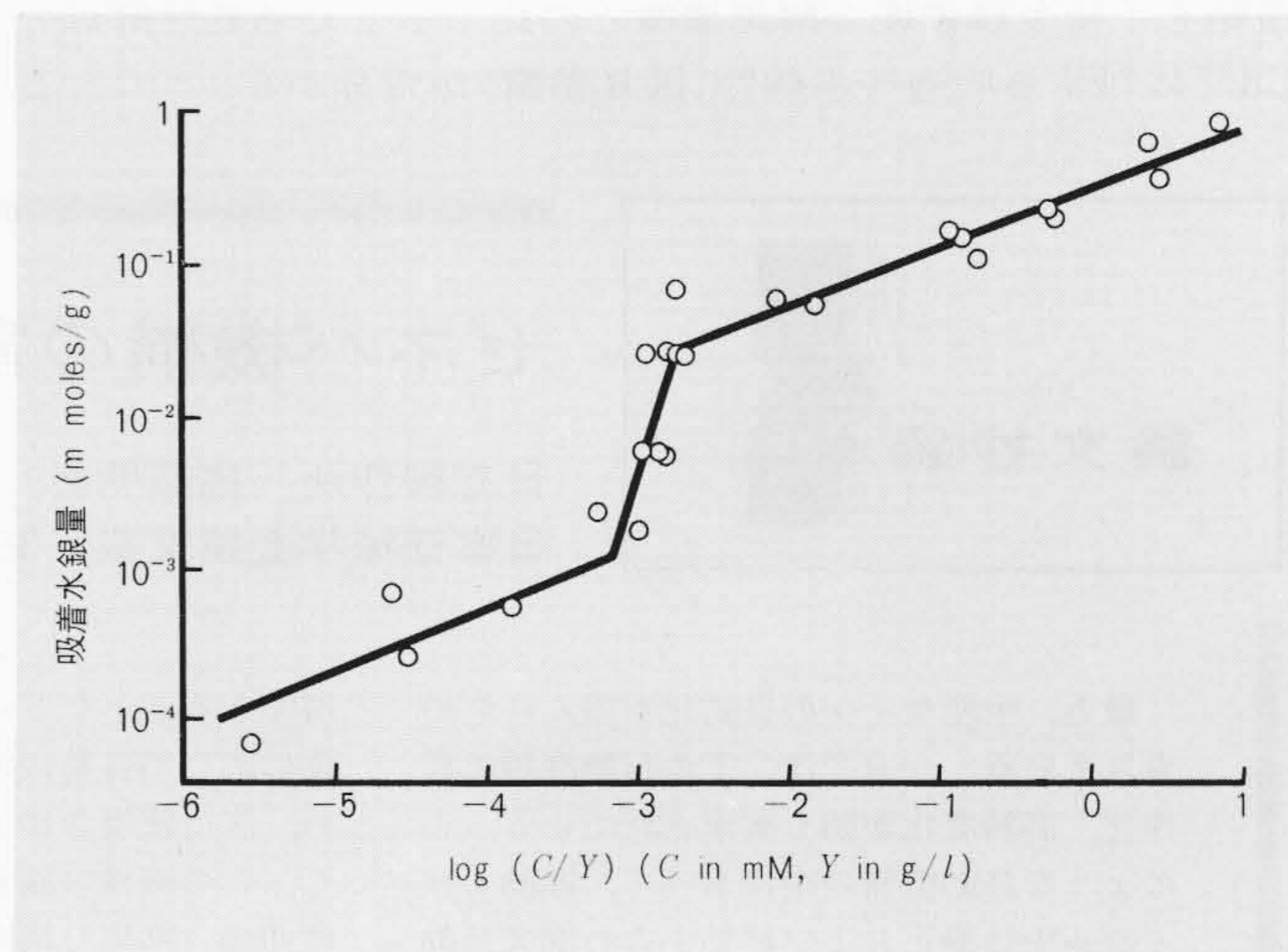


図7 横軸を酵母濃度と金属濃度の比で示した水銀吸着の吸着等温線 微生物細胞に対する重金属の吸着は非常に飽和しにくい。

Fig. 7 Adsorption Iso-therm for Hg^{++} with Abscissa Reduced by Yeast Concentrations

電粒子が高濃度に存在して互いに接近すれば、静電的相互作用により粒子の表面電位が低下し、陽イオンの結合は抑止される。このような荷電粒子間の相互作用のイオンの結合に与える効果の定量的取扱いは非常に複雑になり、理論的にも実験的にも従来ほとんどなされておらず、今後の研究課題として残されている。この種の問題の理論面の手掛りを得るには参考文献(3)が参考になるであろう。

図6, 7から分かるもう一つのこと、微生物細胞に対する重金属の吸着が非常に飽和しにくいことである。このことは、吸着が単に細胞表面でのイオン交換によるもの以外に、

細胞の内側と外側におけるイオンのDonnan平衡分布にも大きく依存していることを暗示している。このことは、 Hg^{++} を吸着させたパン酵母をグルタルアルデヒドで固定して超薄切片を作り透過形電子顕微鏡で観察したところ、細胞内に多数の電子密度の高い粒子が見られたことによっても支持される。高電子密度の粒子は水銀処理をしない酵母についてはもちろん観察されなかった。図6, 7の関係線図が途中で屈折することは金属イオンの濃度域により全吸着量に対する表面でのイオン交換とDonnan平衡分布の寄与の割合が変化することを示しているものと考えられる。

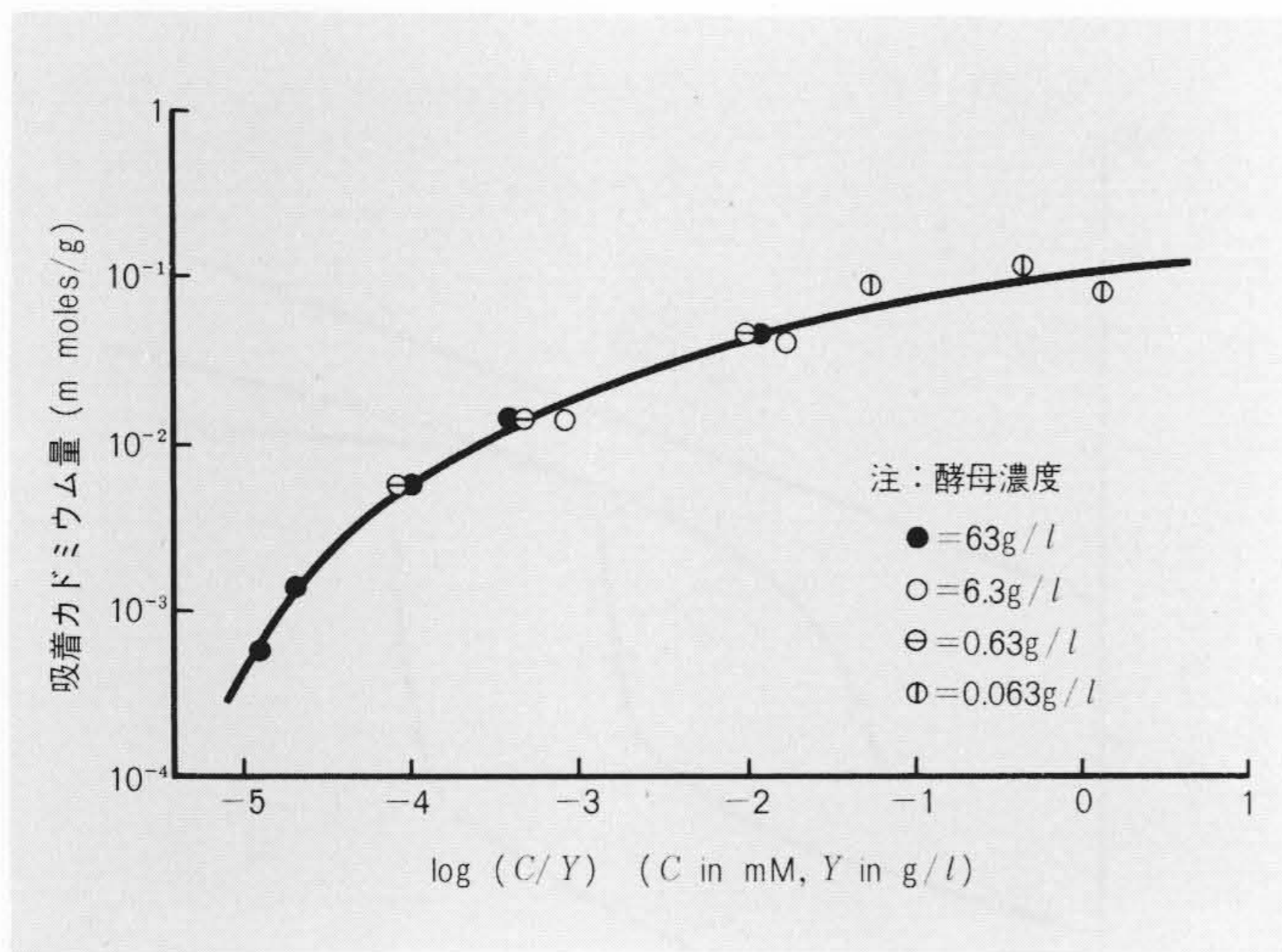


図8 熱処理した酵母によるカドミウム吸着の吸着等温線(横軸、酵母濃度で除してある) 細胞膜の失われた細胞に対する吸着は飽和しやすい。正常な細胞の吸着には、細胞表面でのイオン交換反応のほか細胞膜の存在が関係することが分かる。

Fig. 8 Adsorption Iso-therm for Cd²⁺ Obtained for Heated Yeast (Abscissa Reduced by Yeast Concentrations)

パン酵母を110°Cで1時間半熱処理をして細胞を破壊したもののに対する金属の吸着も等温線が酵母濃度に依存する点では正常なパン酵母の吸着と様式が類似している。しかしながら、横軸を平衡金属濃度と酵母濃度との比で示した熱処理酵母のCd²⁺に対する吸着等温線図(図8参照)から分かるように、こ

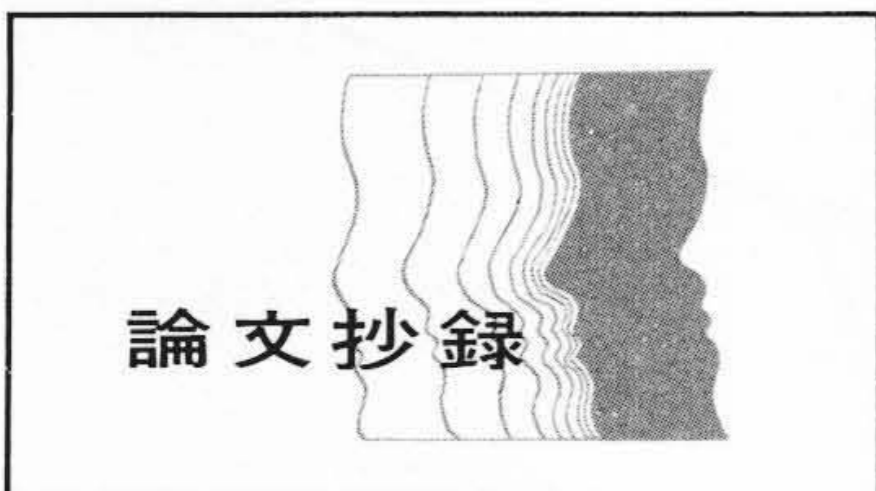
の場合の吸着は明らかに飽和を示しており、図6の結果とは異なっている。同様な飽和を示す吸着等温線図は、細胞が枯死し破壊されている木材粉末のCd²⁺に対する吸着についても得られた。これらのことから、正常な細胞の吸着には細胞表面でのイオン交換反応の外に細胞膜の存在に関するDonnan平衡反応が関与しているものと考えられる。

5 結 言

本稿では、各種生物材料(微生物細胞や木材粉末など)の吸着剤としての性格及びその利用法につき概説した。生物材料を吸着剤とすることの特徴は、(1)吸着速度が大きいこと、(2)有機性廃水の活性汚泥処理などの際、副生する余剰汚泥や木材粉末など廃棄物の有効利用になること及び(3)各種飼料用酵母など比較的安価な材料を用い得る点にある。使用済み吸着剤の後処理としては、本吸着剤が生物系であることを利用してメタン発酵処理を行ない、吸着剤のガス化を行なうと同時にエネルギーを獲得する方向が有望であろう。

参考文献

- (1) 七字三郎 「微生物工業技術と公害」工化誌 72, 395 (昭-44)
- (2) 小林, 伊藤, 湯浅, 大場 「生物材料による廃水処理」昭和48年度秋季日化大会予稿(I) P-123
- (3) 大島広行 「一定表面電荷密度を有するコロイド粒子の相互作用の理論とその細胞間相互作用への応用」生物物理 13, 262 (昭-48)



ゼネバ機構の割出し精度について

日立製作所 高梨明紘
日本機械学会論文集 39-319 (昭48-3)

最近、生産ラインの自動化が盛んに進められている。一方では、その自動機械の高速化、高精度化が強く要求されている。このような自動機械の中であって、運動1サイクル中に静止および移動を含む間欠運動機構は、現在製品の組立および検査作業に多く使用されており、不等速運動機構の中でその占める地位は重要である。

間欠運動機構の研究は、1940~1950年ごろを中心に盛んに行なわれ、イギリスのOtto Lichtwitzらの研究をはじめとして多くの文献が公表されている。しかし、これらの研究は、機構の基本的な幾何学的解析にとどまっており、機構を製作する場合、大きな問題となる機構の割出し精度誤差などに関する解析が遅れているのが現状である。現在多く使用されている間欠運動機構には、ラチェット機構、ゼネバ機構、バレルカム機構など種々ある。このような間欠運動機構の中であって、ゼネバ機構は、設計製作が容易であること、比較的高速で使

用できることなどに大きな特長があり、必要に応じて容易に使用することができるため、広く使用されている機構である。しかし、この機構の諸量寸法誤差が、機構の変位曲線、割出し精度に与える影響が明らかでなく、機構の設計時に機構に期待する精度を考慮した機構製作許容誤差を決定する基準がない。

そこで、本論文では、このようなゼネバ機構について諸量寸法誤差が、機構の変位曲線、割出し精度に与える影響を解析し、種々の割出数のゼネバ機構(固定節長さ100mm)を製作し、理論解析結果と比較検討した。その結果、次に示すような各点が得られた。

(1) ゼネバ機構の原動節長さ、固定節長さ、原動節ローラ、従動節スロット間のバックラッシュが機構の変位曲線、割出し精度に与える影響が明らかになった。この結果、機構諸量の重みを考慮した工作許容値を与えることが可能となった。

(2) ゼネバ機構の割出し位置におけるバックラッシュに次の諸量の及ぼす影響が明らかになった。

- (a) 鎖錠カム半径
- (b) 鎖錠カム半径方向すきま
- (c) 固定節長さ誤差

(3) 従動節割出し位置においては、割出期間初期および終期における原動節従動節間すきまが急激に増大する。したがって、従動節割出期間初期においては、機構の割出精度が劣化しやすい。

(4) 割出し位置における割出し精度を向上させるためにゼネバ機構を二葉構造にすることを提案した。このようにすれば、重負荷に耐える機構をも期待することができる。

以上の解析結果は、自動機械などに使用されるゼネバ機構の設計に有効であると思われる。筆者らは、機構がさらに高速で使用される場合を考え、機構の弾性変形を考慮した機構の解析および実験を現在行っている。