

下水の再利用化におけるオゾンの利用

Ozonation in Sewage Reuse System

最近、水資源の有効利用と将来の水不足対策の一環として、下水の再利用が注目されており、各種の用水化システムが検討され、既に一部実用化も行なわれている。

オゾンは強い酸化力をもっており、従来から殺菌、脱色、脱臭、COD除去などに利用されてきた。しかし、オゾンはこのような性能のほかにSS除去性能もあり、簡単な操作により下水のSS除去に使用できる。オゾンのSS除去性能は、SS成分に対するオゾンの浮上作用に基づくと考えられる。

このようなオゾンの多機能性を下水の用水化に利用すると、比較的簡単な用水化システムで、多方面に利用可能な水質の用水が得られる。

安達 哲朗* Tetsurô Adachi
久保田昌治** Shôji Kubota
池本 徳郎*** Norio Ikemoto

1 緒 言

近年、水資源の有効利用を図るため、各地の下水処理場、団地、ビルなどでは排水を再利用するシステムの導入が活発に検討されている。再利用水の水質の基準例¹⁾を表1に示すが、「水質汚濁防止法」の放流水の水質基準値に比べてかなり厳しい値になっている。再利用水は主にトイレ、散水、洗車、人工小川などに使用される。

下水処理水の用水化には種々の処理方法があるが、なかでもオゾンの利用が注目されている。オゾンは強い酸化力を持っていることで知られており、ヨーロッパでは古くから上水の殺菌剤として採用されている。オゾン殺菌法は塩素殺菌法に比べて、操作性、安全性に優れた特長を持っている。しかも殺菌のほかに脱色、脱臭²⁾、COD(化学的酸素要求量)除去性能があり、更にSS(浮遊固形物)除去性能も持っていることが明らかになった。

オゾンはこのように多くの機能をもっていることから、下水の用水化に当たって特に注目されている。

表1 再利用水の水質基準例 再利用水の主な用途はトイレ、散水、洗車、人工小川などである。

基 準 項 目	基 準 値 案
臭 気	不快臭を發しない。
色 度	10度以下
濁 度	5度以下
全 蒸 発 残 留 物	500mg/l以下
浮 遊 物	5mg/l以下
pH	5.8～8.6
C O D	20mg/l以下
B O D	10mg/l以下
リ ン 酸 イ オ ン	0.5mg/l以下
陰イオン界面活性剤	1.0mg/l以下
大 腸 菌 群	検出されないこと(個/ml)。
一 般 細 菌 群	100個/ml以下
残 留 塩 素	0.2mg/l以上

注：略語説明 BOD(生物化学的酸素要求量) COD(化学的酸素要求量)
SS(浮遊固形物)

本論文では、下水処理場の二次処理水をオゾン処理した場合の水質改善特性を明らかにするとともに、オゾンを利用した下水用水化システムについて述べる。

2 下水二次処理水のオゾン処理性能

2.1 殺 菌

我が国では、下水二次処理水の殺菌には主として塩素が用いられている。しかし、塩素は毒性が強く、運搬、取扱いな

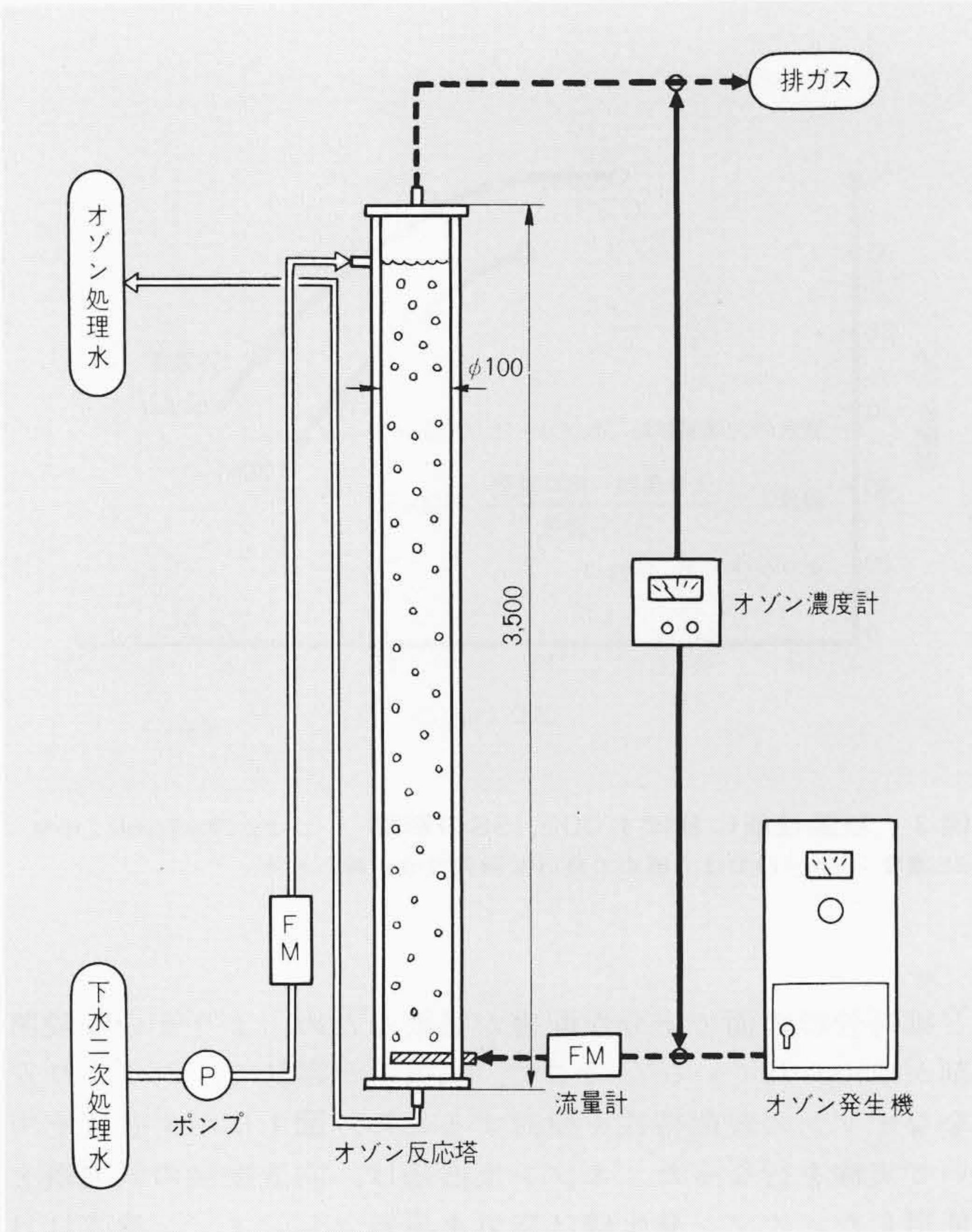


図1 オゾン処理実験装置 オゾン反応塔は向流接触の気泡塔を使用した。

* 日立製作所日立研究所 ** 日立製作所日立研究所 理学博士 *** 日立製作所国分工場

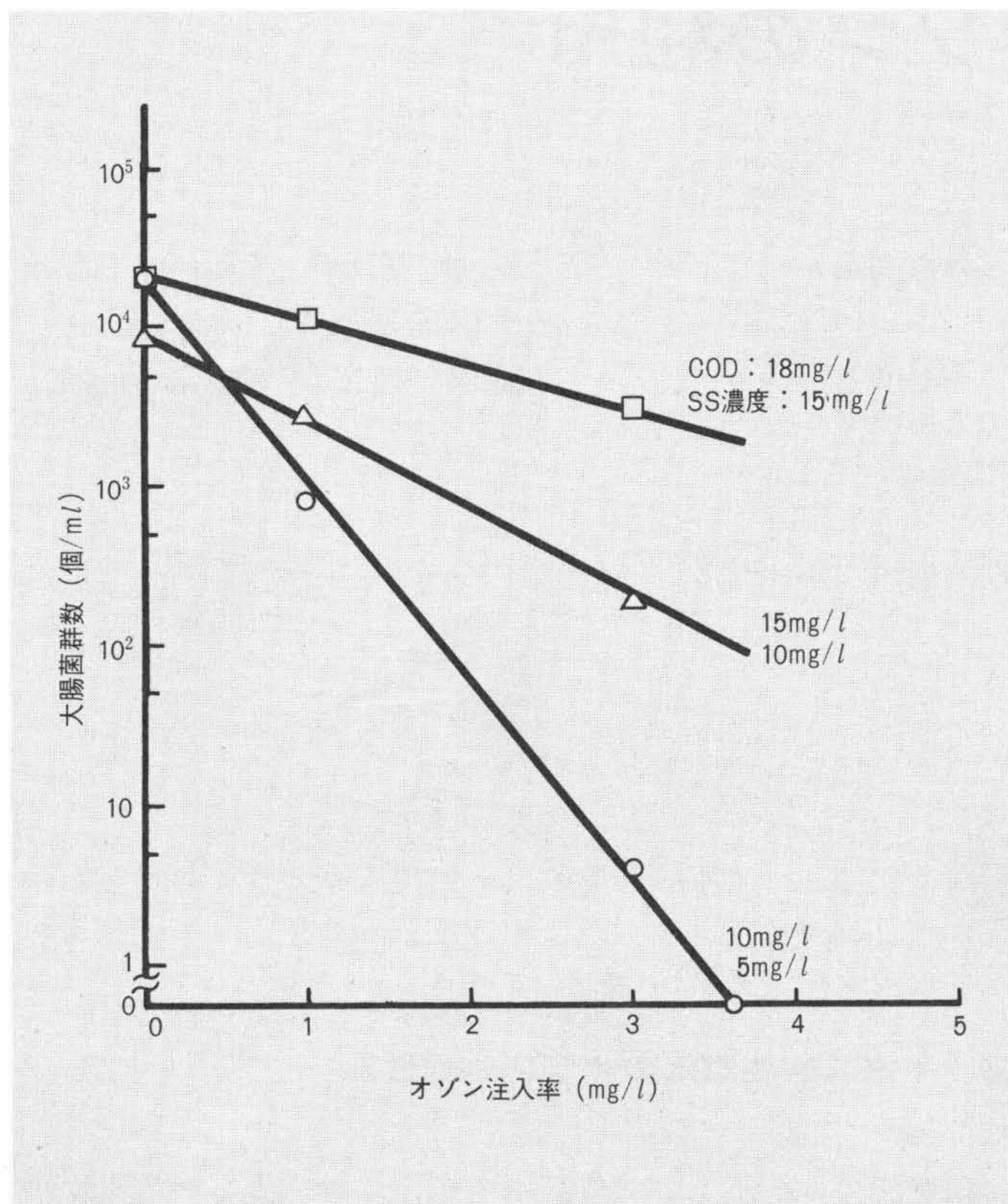


図2 オゾン殺菌性能 大腸菌群数は、オゾン注入率に対してほぼ指数関数的に減少する。殺菌性能は水質の影響を大きく受けることが分かる。

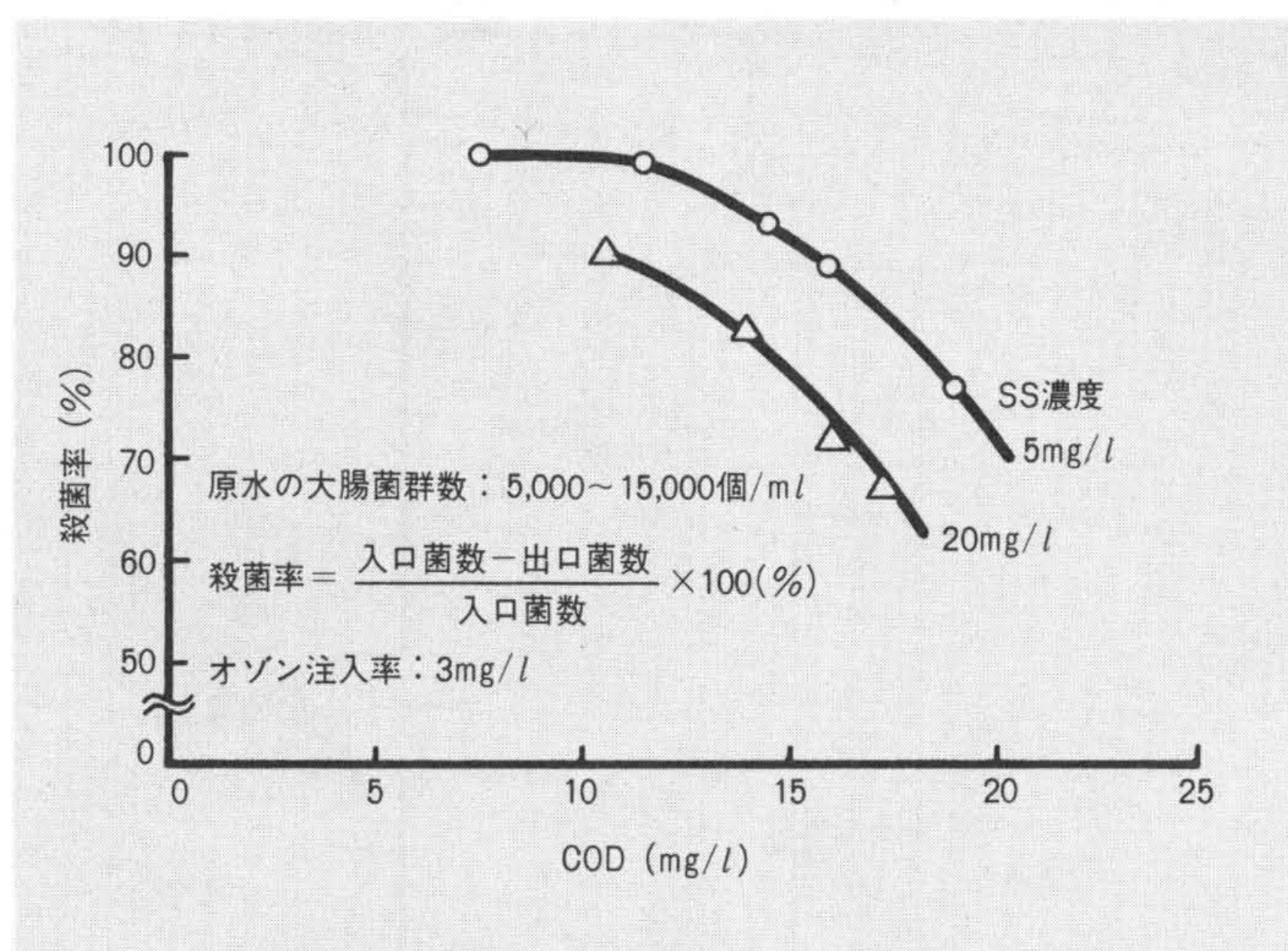


図3 殺菌性能に及ぼすCOD, SSの影響 二次処理水(COD: 10mg/l, SS濃度: 5mg/l)では、極めて良好な殺菌性能が得られる。

ど維持管理の面で十分な配慮が必要なため、より安全な殺菌剤が求められている³⁾。そこで、取扱いが容易で、かつより安全なオゾンの殺菌特性を検討するため、図1に示す装置を用いて実験を行なった。オゾン反応塔は、向流接触の気泡塔を使用した。オゾン発生機は空気を原料とし、オゾン濃度は日立製作所製の吸光光度計(紫外)で反応塔の入口側と出口側で測定した。

殺菌性能は大腸菌群数の残存数で評価し、大腸菌の培養にはデスオキシコーレート寒天培地を使用した。

殺菌実験で得られた結果のうち、代表的な三例を図2に示

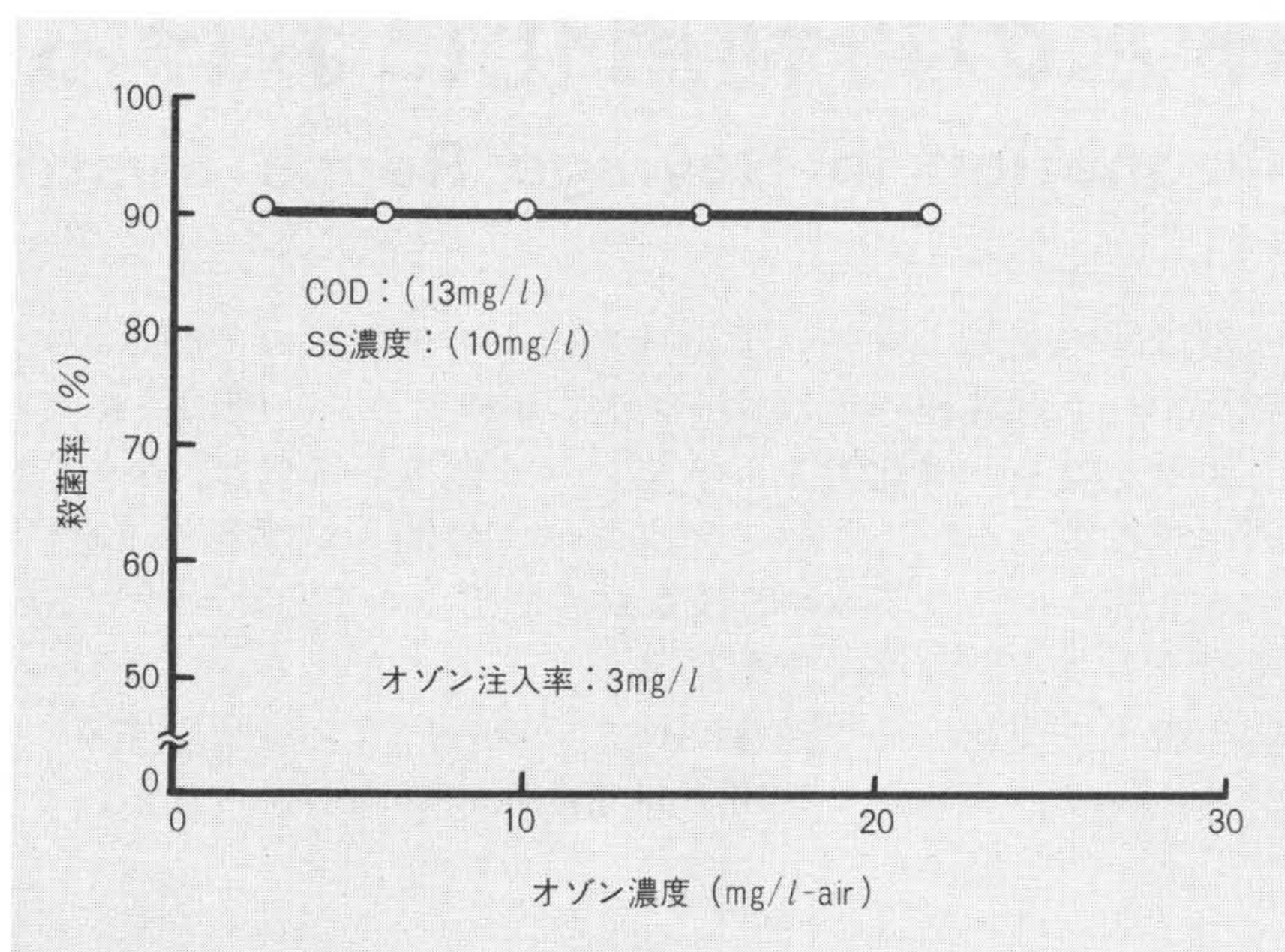


図4 殺菌性能に及ぼすオゾン濃度の影響 オゾン濃度の影響はほとんど認められない。

す。実験した下水処理場の二次処理水の大腸菌群数は、10,000個/ml前後であった。残存大腸菌群数は、オゾン注入率に対してほぼ指数関数的に減少する。また、二次処理水の水質の変動に伴い殺菌性能が変化することから、排水中の有機性物質の影響が大きいことが分かる。二次処理水(COD 10mg/l, SS濃度 5mg/l)では、オゾン注入率 4mg/lで大腸菌群数は0個/mlになる。

ここで、排水中の有機性物質を溶解性有機物(COD)と不溶性有機物(SS)とに分け殺菌性能への影響を求めた。その結果を図3に示す。オゾン注入率は3mg/l一定である。排水中のCOD, SS濃度の増加に伴い殺菌率が低下するのは、オゾンがそれらの有機性物質によって消費されるためである。また、 NO_2^- (亜硝酸性窒素)やABS(界面活性剤)などの被酸化性物質の影響についても検討したが、二次処理水中の濃度が NO_2^- 0.2mg/l, ABS 0.5mg/lと低いいため殺菌性能にほとんど影響しないことが分かった。オゾンは酸化力が強いので、細菌の殺菌だけでなく共存する被酸化性物質をも酸化する。したがって、完全な殺菌力を得るには共存被酸化性物質の少ないことが望ましい。

オゾン殺菌に対する水質の影響が明らかになったので、次に操作因子の影響について検討した。オゾン殺菌性能はオゾン注入率に依存するので、オゾンの有効利用の観点からオゾン吸収効率を高めることが必要条件となる。実験では気泡径3mm, 有効水深3mで吸収効率90%が得られた。

次に、オゾン濃度と殺菌性能の関係を図4に示す。オゾン注入率を3mg/l一定とし、オゾン濃度を2.5~21.5mg/l-airに変えて殺菌性能の比較を行なったが、この範囲ではオゾン濃度の影響はほとんどないことが判明した。更に、液滞留時間と殺菌性能の関係を図5に示す。オゾン注入率を3mg/l一定とし、液滞留時間を1.5~20分に変えて殺菌性能への影響を調べた。図5から液滞留時間は3分程度でよいことが分かる。このことはオゾン殺菌処理が極めて短時間でできることを示している。以上から、操作因子のうち影響が大きいのはオゾン注入率であり、オゾン濃度、液滞留時間の影響は少ないことが分かった。

オゾン殺菌は簡単な操作で行なうことができ、殺菌性能の制御が容易で、安全性が高いという特長をもっているため、再利用水だけでなく下水放流水の殺菌への適用⁴⁾も米国をはじ

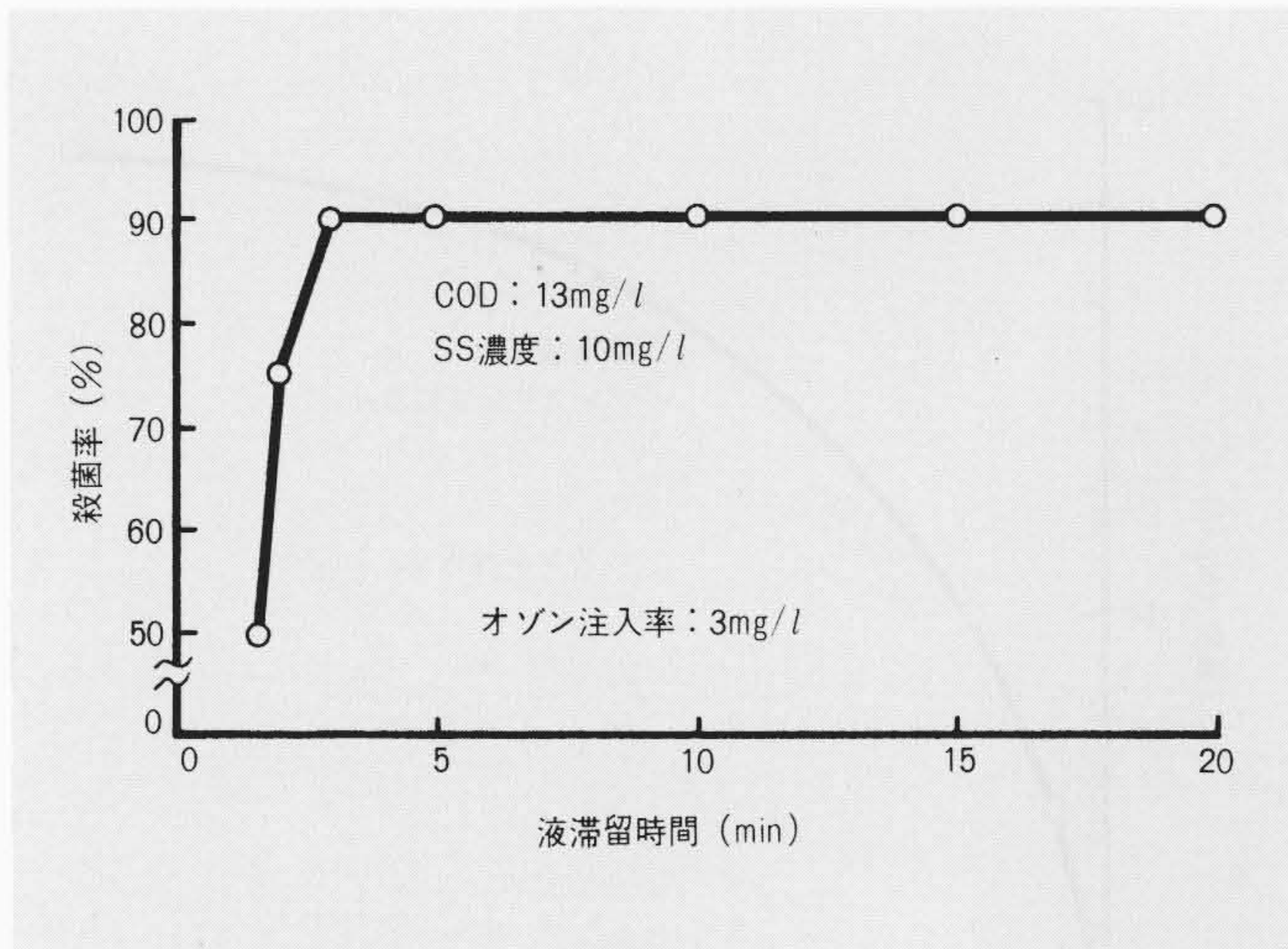


図5 殺菌性能に及ぼす液滞留時間の影響 オゾンは短時間の接触で殺菌が可能である。装置の小形化が図れる。

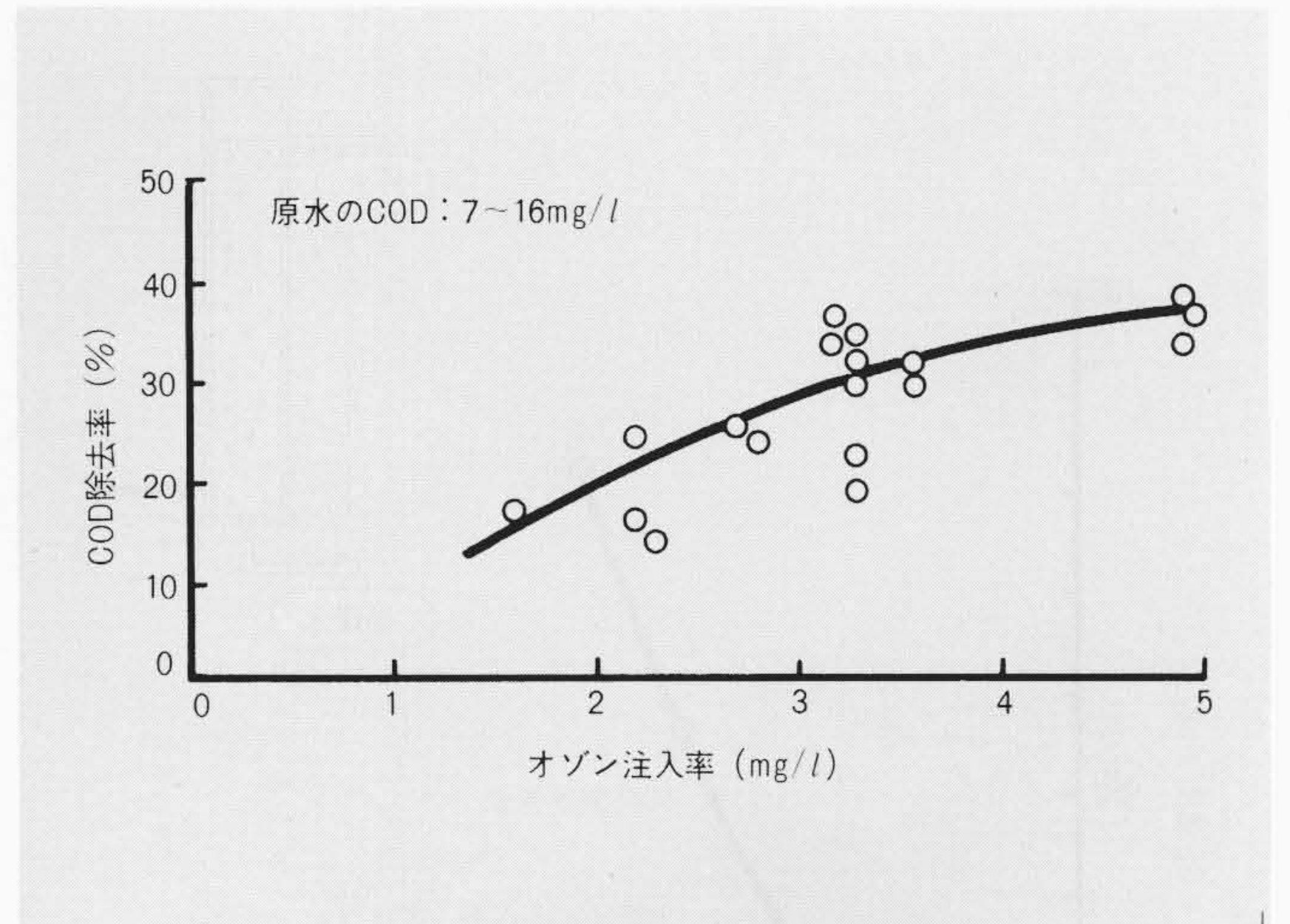


図7 オゾンによるCOD除去性能 CODの除去率は比較的低いが、30%程度得られる。

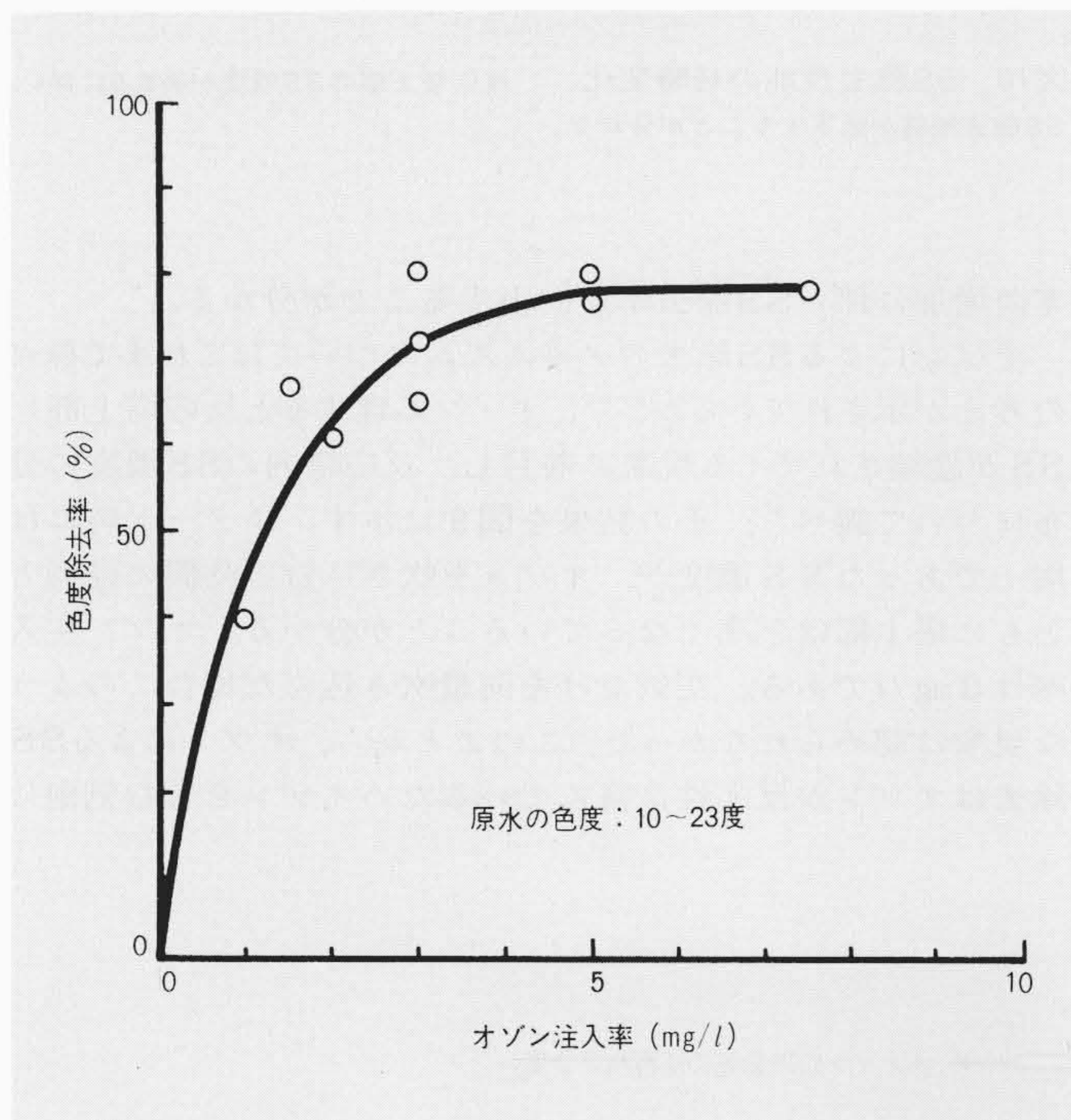


図6 オゾン脱色性能 脱色性能は顕著に認められ、処理水はほぼ無色透明になる。

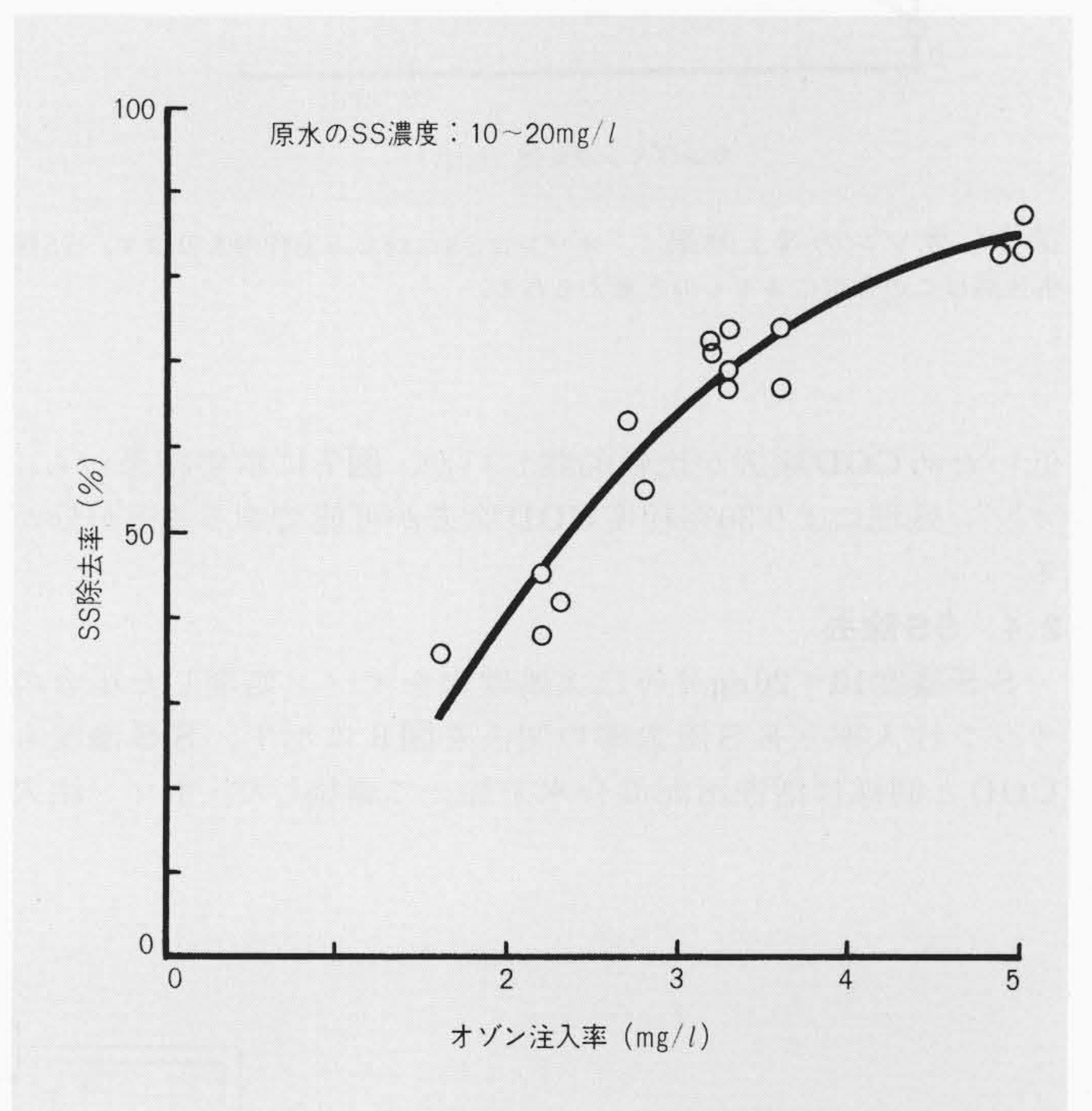


図8 オゾンによるSS除去性能 オゾン処理すると著しいSS除去性能が認められる。

めとして検討されている。

2.2 脱色

図1の装置を用いて、下水二次処理水のオゾン脱色性能を検討した。色度は、試料のSSを遠心分離した後、波長450nmで上澄み液の吸光度を測定し、あらかじめJISの標準液に基づいて作成した検量線より求めた。二次処理水の色度はし尿処理水に比べるとかなり低いですが、まだ淡黄色を呈しており、再利用する場合視覚的に不快感を与えるので脱色処理を行なう場合がある。

色度10~23度の二次処理水を使用した場合のオゾン脱色性能を図6に示す。オゾン脱色性能は非常に良好であり、オゾン処理水はほぼ無色透明になる。また、色度除去率はオゾン注入率5 mg/l以上ではほとんど変化しない傾向が見られ、オ

ゾンを経済的に利用するための指標になると思われる。

次に、脱色性能に対するオゾン濃度や液滞留時間の影響を検討したが、殺菌の場合と同様にほとんど影響を受けないことが分かった。また、下水処理場によっては、二次処理水をオゾン処理すると処理水が淡紅色に着色する現象が観察されたが、この着色は短時間で消失した。

2.3 COD除去

図1の装置を用いて、下水二次処理水のオゾンによるCOD除去性能を求めた結果を図7に示す。使用した二次処理水のCODは7~16mg/lである。CODの高いところは二次処理水に曝気槽の活性汚泥混合水を加えて調整した。

COD除去率はオゾン注入率に従って増加するが、しだいに飽和する傾向が認められる。一般に二次処理水では、CODが

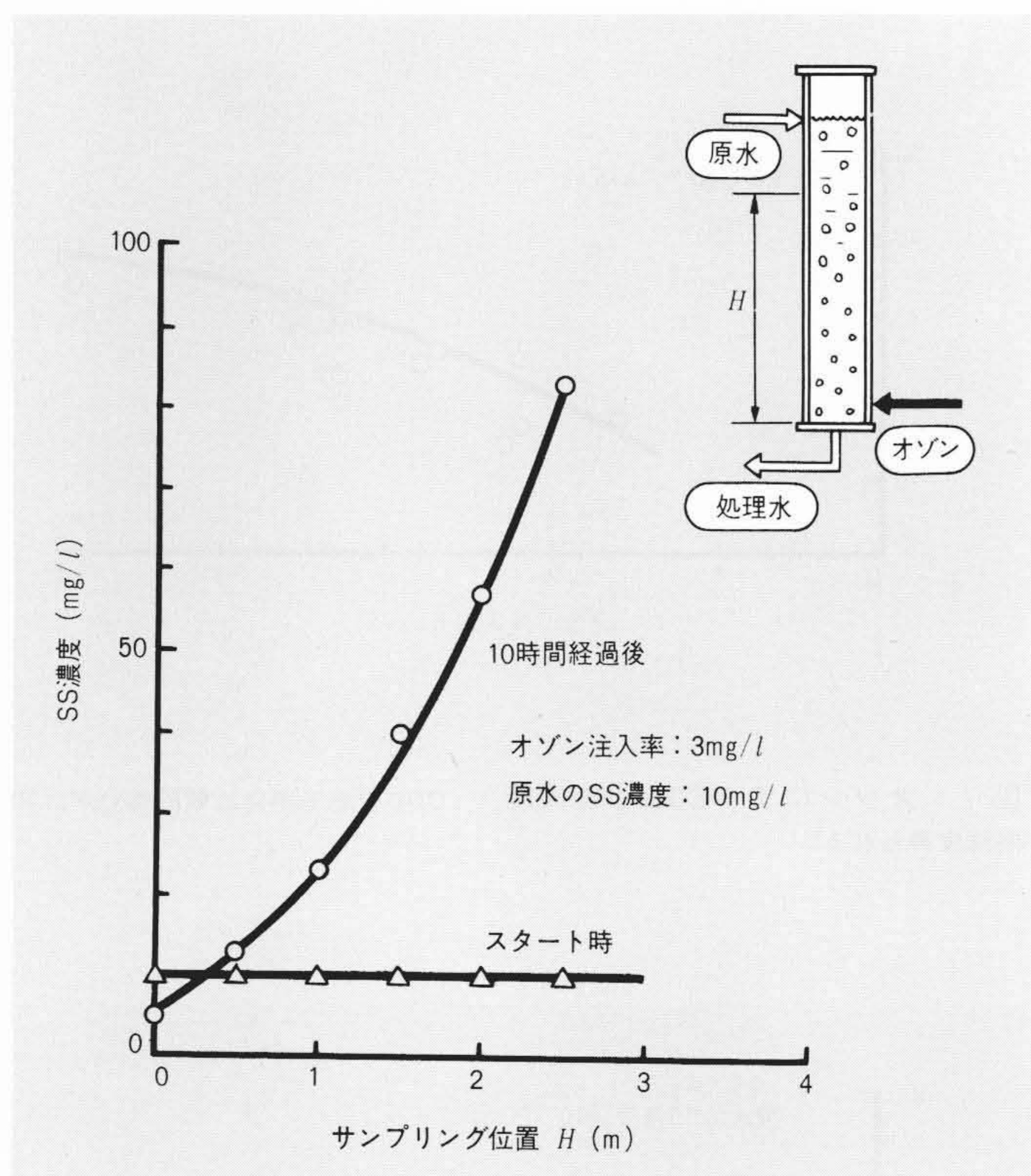


図9 オゾンの浮上効果 オゾンはSSに対し浮上作用を及ぼす。SS除去性能はこの作用によるものと考えられる。

低いためCOD除去が比較的難しいが、図7に示す結果から、オゾン処理により30%程度COD除去が可能であることが分かる。

2.4 SS除去

SS濃度10~20mg/lの二次処理水をオゾン処理した場合のオゾン注入率とSS除去率の関係を図8に示す。SS濃度もCODと同様に活性汚泥混合水を加えて調整した。オゾン注入

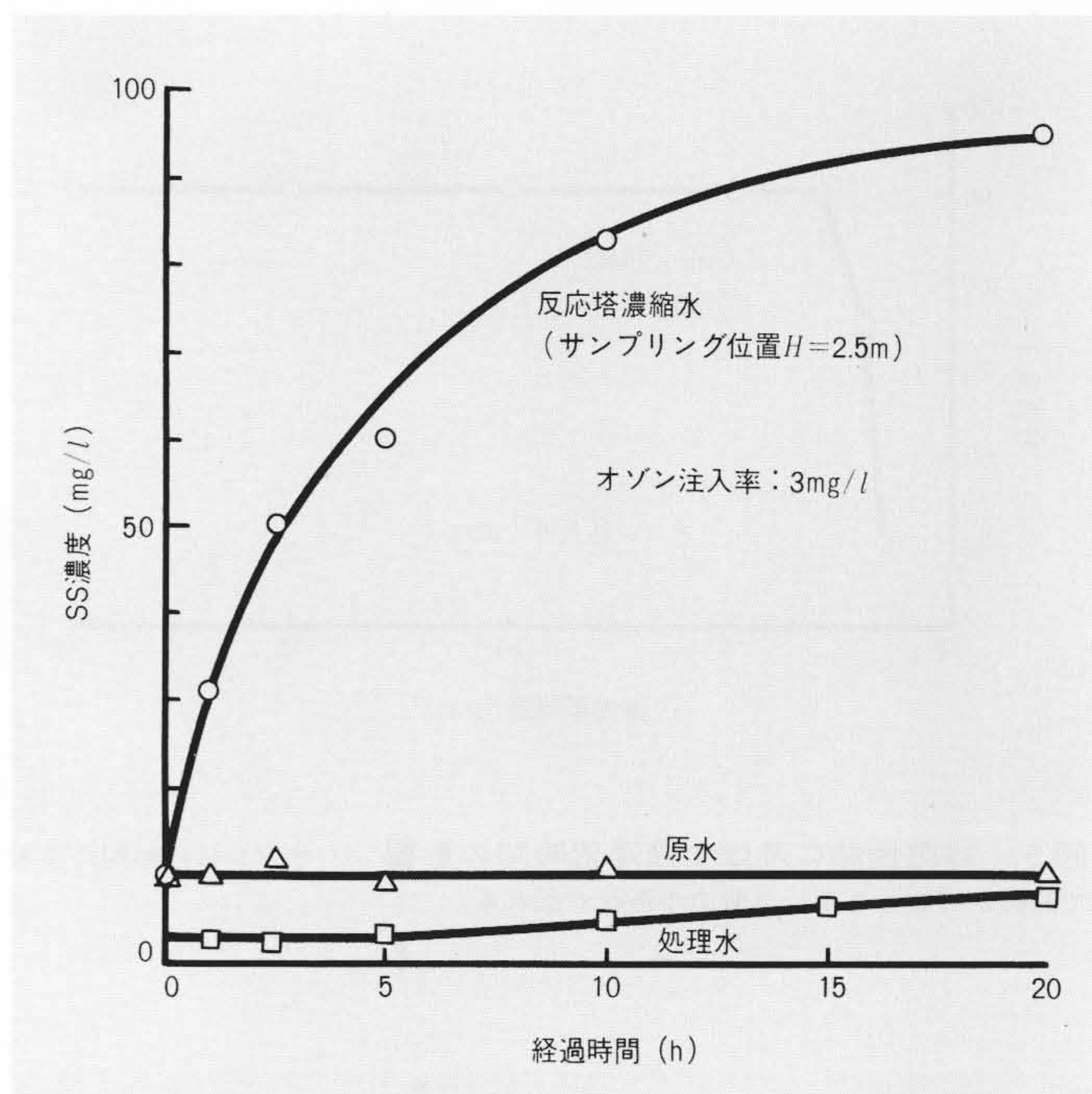


図10 SS除去性能の経時変化 反応塔上部のSS濃度が高まるに伴い、SS除去性能が低下することが分かる。

率の増加に伴いSS除去率が向上することが分かる。

オゾンによるSS除去のメカニズムについてはこれまで種々の考えが示されているが^{5)~7)}、オゾン処理すると反応塔上部にSSが濃縮されてくる現象に着目し、反応塔内のSS濃度の分布について調べた。その結果を図9に示す。スタート時には均一であったSS濃度が、オゾンを吹き込むと時間の経過とともに塔上部ほど高くなっていることが分かる。オゾン注入率は3mg/lである。空気だけを同量吹き込んだ場合このような現象は認められなかった。このことから、オゾンによるSS除去はオゾンが反応性に富んでいるためオゾンを含む気泡に

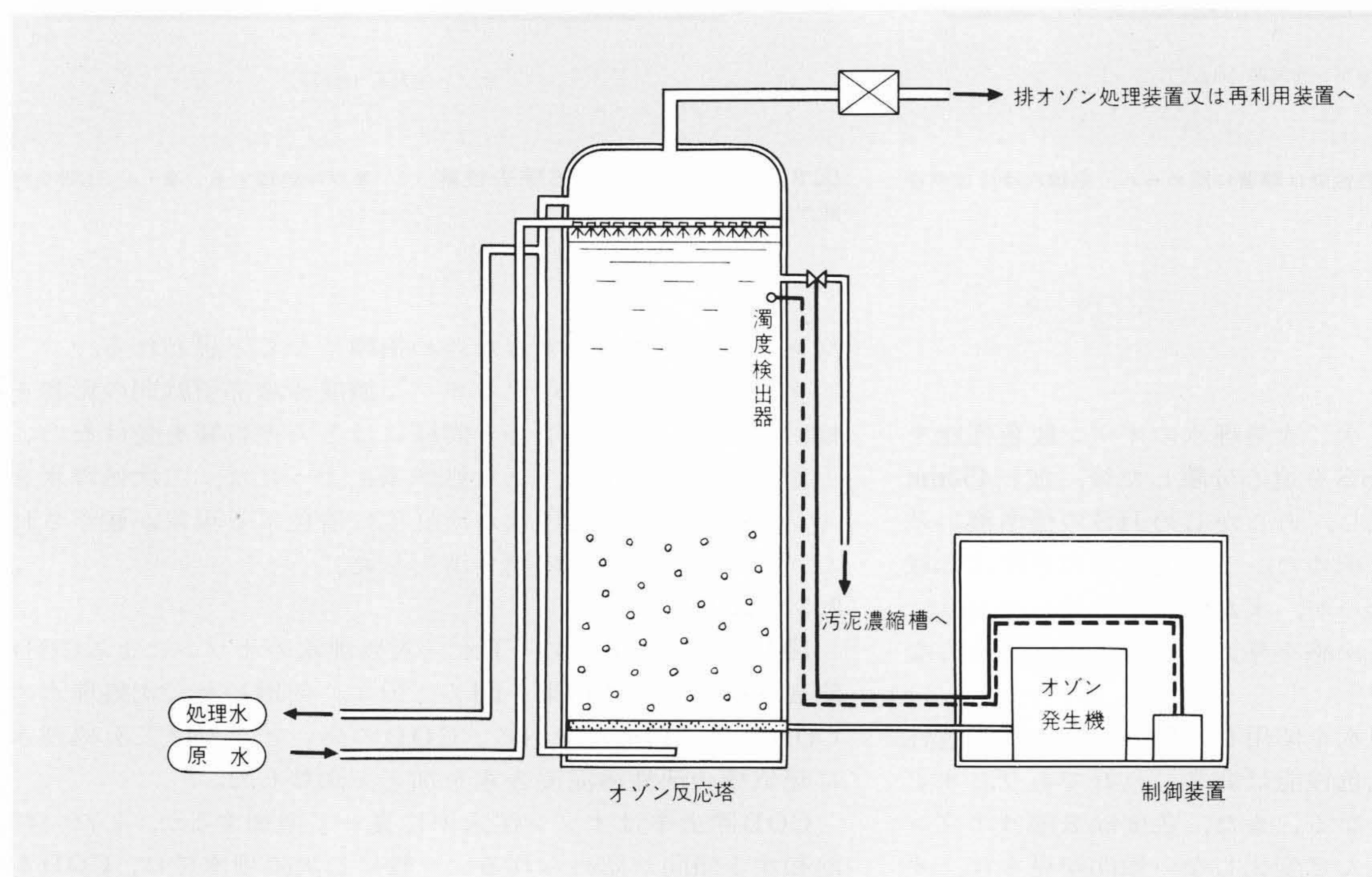


図11 オゾン処理装置 安定したSS除去性能を得るために、反応塔上部の濁度を検出して、濃縮水を排出する構造になっている。

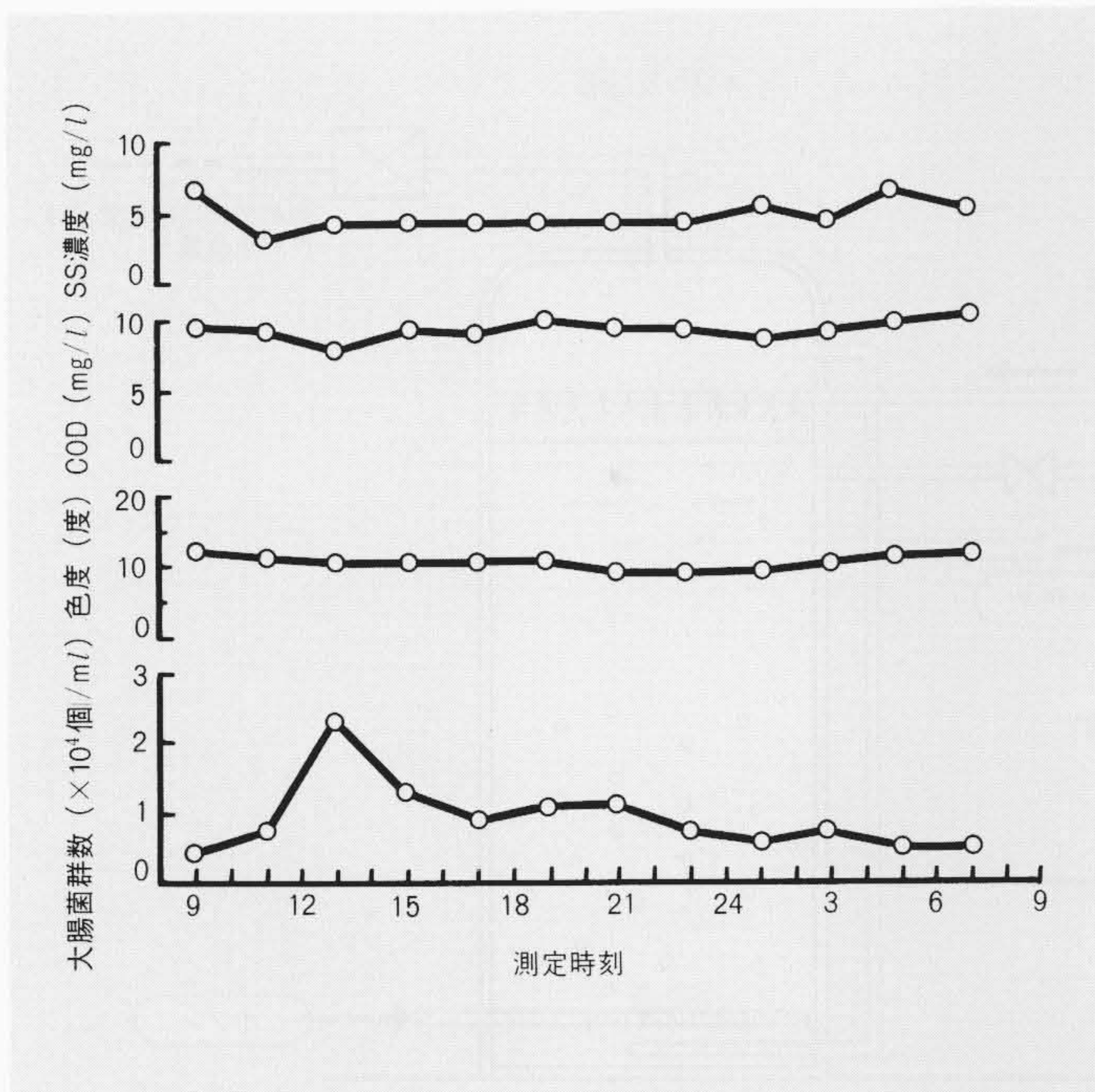


図12 下水二次処理水水質の日間変動の一例 二次処理水水質は、大腸菌群数を除いて比較的安定しており、日間変動は小さい。

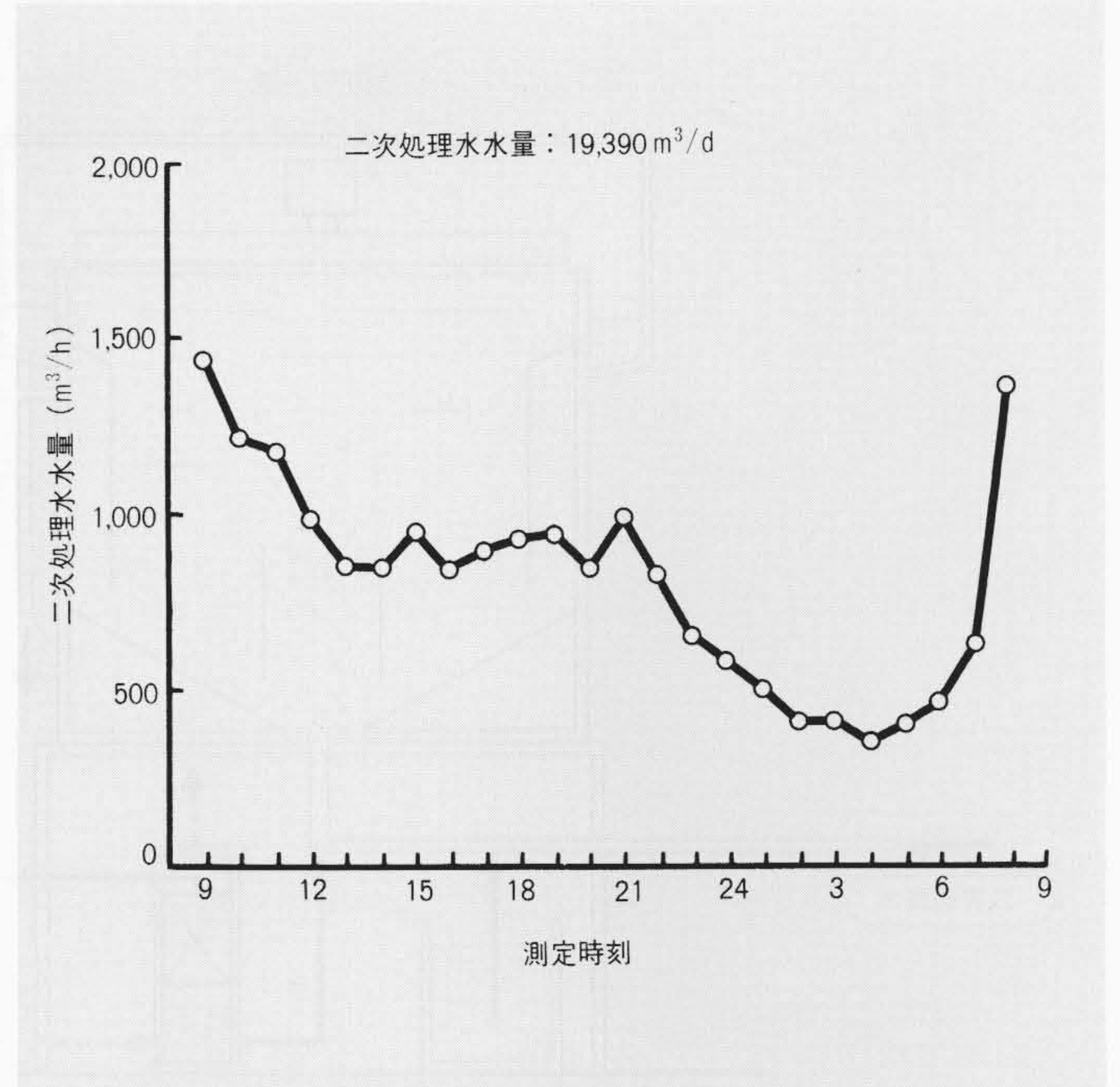


図13 下水二次処理水水量の日間変動の一例 水量の日間変動が大きい。最大値と最小値では約4倍の差がある。

SSが付着し、浮上するためと考えられる。

図10に浮上に伴うSS濃度の経時変化を示す。図1の反応塔で $H=2.5\text{m}$ の位置でのSS濃度の測定結果である。SS濃度は時間とともに高くなりしだいに飽和する。それに伴い、処理水のSS濃度が原水のSS濃度に近づくことが分かる。すなわち、通常の気泡塔を用いた場合、SSは最初は除去されるが、時間とともにオゾンのSS除去性能が低下する現象が認められた。したがって、安定したSS除去性能を得るには、塔上部の濃縮液を定期的に排出する簡単な操作で可能となる。

このようにオゾンによるSS除去を有効に利用すると、SSを80%程度除去することができるので、下水の用水化に当たってオゾンを効果的に利用することは大きなメリットがある。

従来、オゾンは主として殺菌、脱色、脱臭、COD除去などの目的に利用されてきたが、SS除去性能も積極的に利用することがオゾンの新しい利用法として極めて重要と思われる。

図11にSS除去性能を有効に利用したオゾン処理システムの一例を示す。オゾン反応塔上部の液の濁度を検出して濃縮液の排出を制御し、安定なSS除去性能が得られるようになっている。

3 オゾン利用の下水用水化システム

3.1 下水二次処理水水質の日間・年間変動

下水二次処理水水質は日間、年間を通じて変動が予想されるので、下水用水化システムの適用に当たってはその変動を十分に把握することが重要である。ある下水処理場での二次処理水水質の日間変動の一例を図12に示す。二次処理水水質のうち大腸菌群数は13時ごろにピークが認められるが、色度、COD、SS濃度は比較的安定しており、日間変動の小さいことが分かる。また、単位時間当たりの二次処理水水量の日間変動の一例を図13に示す。二次処理水水量は生活パターンをそのまま反映しており、4時が最小で9時が最大になっている。最大値と最小値では約4倍の差があり、水量の日間変動が大きいことが分かる。次に、二次処理水水質の年間変動の

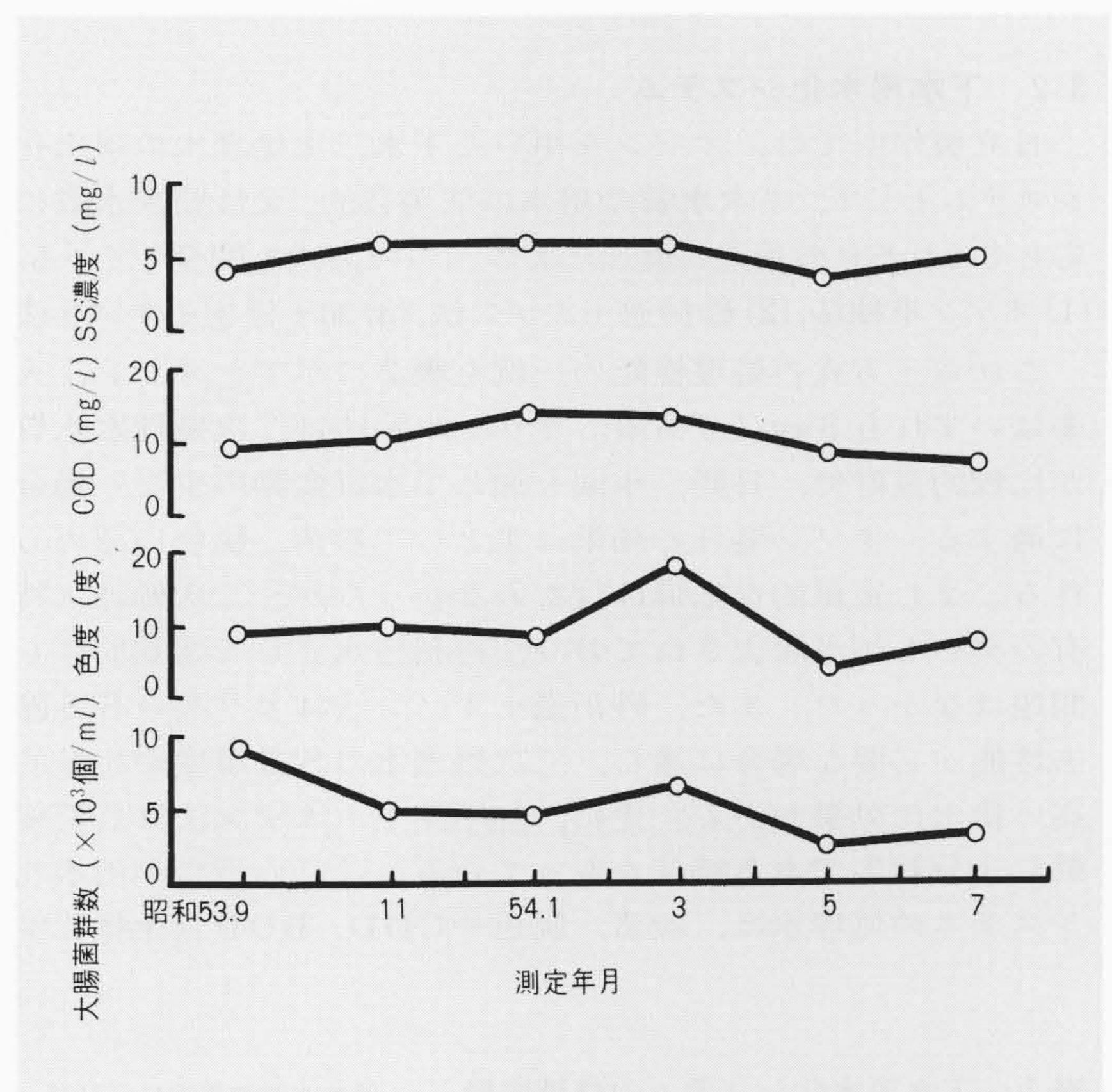


図14 下水二次処理水水質の年間変動の一例 二次処理性能が冬季に低下する傾向が認められる。これは、活性汚泥の処理性能の低下によるものと考えられる。

一例(昭和53年9月～翌54年7月測定)を図14に示す。COD、色度及びSS濃度は冬季に増大する傾向が認められる。これは、冬季は水温が下がり活性汚泥の処理性能が低下するためと考えられる。春季から秋季にかけては極めて安定した二次処理性能が得られている。したがって、活性汚泥法を採用する下水処理場は、一般にこのような処理性能の季節的な変動が予想されるので、下水の用水化に当たってはこの点を考慮したシステムを採用することが望ましい。

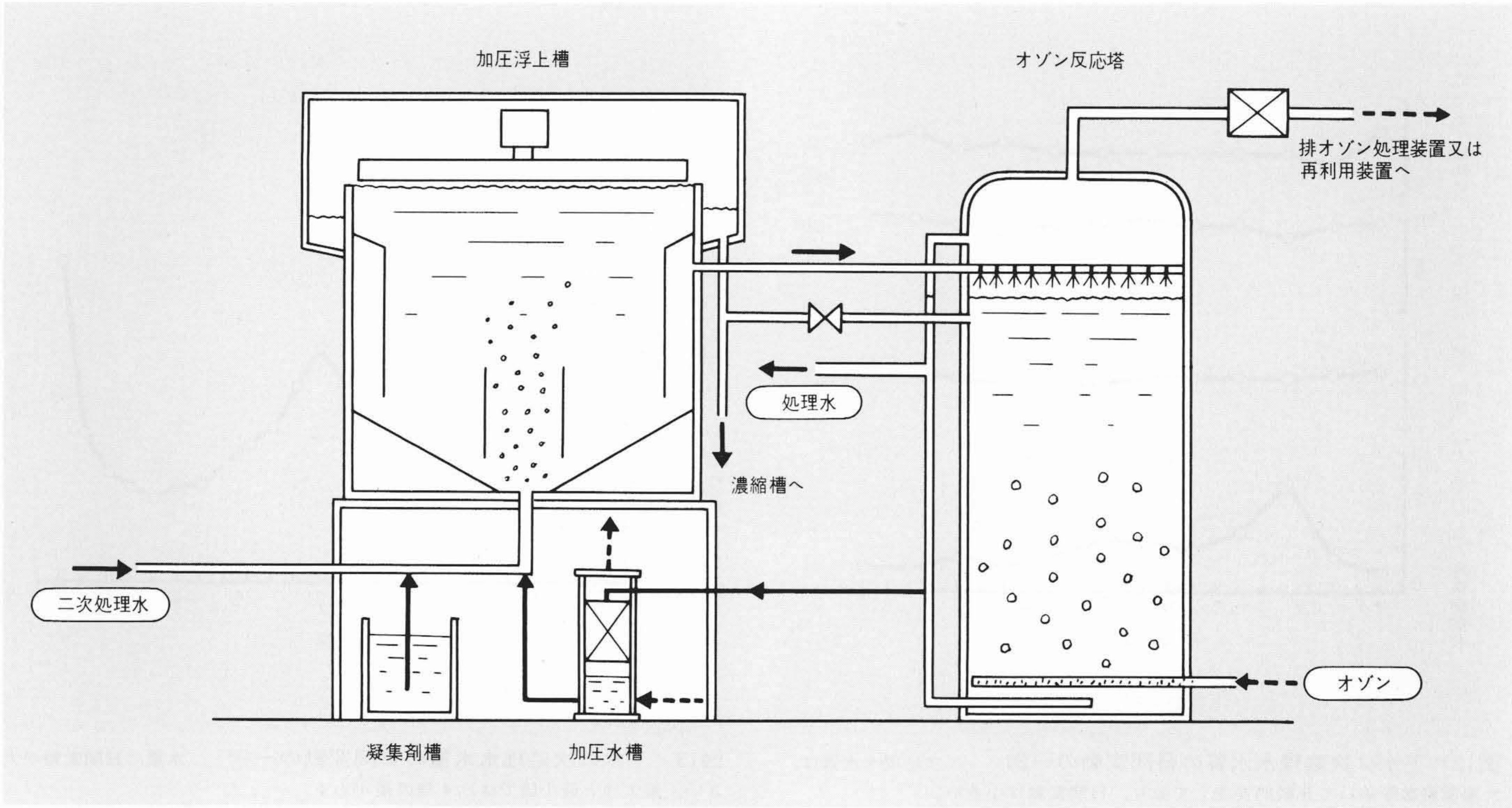


図15 下水用水化システム(加压浮上+オゾン法) 二次処理水の水質変動に対しても安定した処理性能が得られる。

3.2 下水用水化システム

日立製作所では、オゾンを用いた下水二次処理水の用水化システムとして、原水水質や用水の使用目的、又は要求水質に応じてそれぞれの用途に適した次の三つの方式を開発している。(1)オゾン単独法、(2)砂汙過+オゾン法、(3)加压浮上+オゾン法

これら三方式の処理性能の一例を表2に示す。オゾン注入率はいずれも3mg/lである。オゾン単独法は二次処理水水質が比較的良好で、日間、年間を通じて水質変動の少ない場合に適する。オゾン処理の効果は主として殺菌、脱色に認められる。また定量的な把握は行なわなかったが、二次処理水特有の臭いも相当除去されており、再利用水として感覚的にも問題はなかった。また、砂汙過+オゾン法はより高いSS除去性能が必要な場合に適し、二次処理水のSS濃度が比較的高い排水に効果がある。更に、加压浮上+オゾン法は負荷変動に十分対応できる特長をもっている。これら三つの用水化システムの処理水は、殺菌、脱色やCOD、BOD（生物化学

的酸素要求量）、SSの除去など広範囲にわたって水質が改善される。加压浮上+オゾン法による下水用水化システムの一例を図15に示す。

4 結 言

下水二次処理水をオゾン処理すると、殺菌、脱色やCOD、SS除去などに顕著な効果があることが明らかになった。しかも、オゾン注入率は数ミリグラム毎リットルでよいため運転コストの問題もほとんどなく、下水用水化の基盤的な要素技術として今後大きく伸びる可能性が予想される。また、前処理用又は後処理用として砂汙過、加压浮上などと組み合わせれば、より広い用途に使用できる安全で良好な水質の用水が得られる。

最後に、本研究の遂行に当たり終始有益な御助言、御協力をいただいた日立市建設部の小林 清部長、下水道部の菅又芳彦部長及び河野 通所長をはじめ関係各位並びに御協力をいただいた関係処理場の各位に対し、深く感謝の意を表わす次第である。

表2 下水用水化システムの処理性能 原水水質や用途に応じて、最適なシステムを選ぶことが可能である。

		COD (mg/l)	BOD (mg/l)	SS濃度 (mg/l)	色 度 (度)	大腸菌 群 数 (個/ml)
1	原 水	8.0	24.4	5	9	4,500
	オゾン単独法	6.5	14.2	3	1	0
2	原 水	14.2	27.3	26	19	10,000
	砂汙過+ オゾン法	9.6	17.1	3	3	0
3	原 水	16.8	32.8	34	24	13,000
	加压浮上+ オゾン法	4.5	12.2	4	3	0

参考文献

1) 西原：水資源問題と中水道、環境技術、6、6、450～455（昭52-6）
2) 久保田、外：下水処理へのオゾンの利用、日立評論、61、187～192（昭54-3）
3) 大場 訳：下水の殺菌(1)、下水道協会誌、15、171、81～90（昭53-8）
4) C. Nebel：Ozone Provides Alternative for Secondary Effluent Disinfection, Water and Sewage Works (1976)
5) 宗宮、外：連続向流接触筒による二次処理水のオゾン処理に関する研究(Ⅲ)、水処理技術、16、9、45～52（昭50-9）
6) 立川：し尿処理水の脱色について、環境技術、6、3、199～204（昭52-3）
7) 田草川、外：都市下水のオゾン処理に関する研究、第13回下水道研究発表会講演集、198～200（昭51）