

II—24 水処理における凝集剤の分割注入方式に関する実験的検討

北見工業大学 正 員 海老江 邦 雄
北見工業大学 学生員 藤 縄 憲 通

1. ま え が き

凝集処理は、浄水場などで多用される急速ろ過法の中で最も重要な単位操作の1つであり、丹保、Blackら等による多数の研究がある^{1)・2)}。従来より凝集剤の注入法としては、PACを中心とした一括注入方式が広く採用されてきた。また、凝集剤の注入率は、①最近における水源の複雑な汚染の進行、②降雨などに伴う原水濁度の急増、③薬品沈殿池内で除去できる粗大ブロックの形成、などに対応しなければならず、徐々に上昇する傾向にある。

こうした凝集剤注入率の上昇は、単に薬品費を押し上げるだけでなく、汚泥発生量の増加や汚泥の脱水効率の低下など様々な副次的問題を招いており、何らかの改善策が強く求められている。

今回、凝集剤の効果的な使用法を模索する研究の一環として、凝集剤を急速攪拌工程の前段と後段に一定の比率で分割して注入する分割注入方式を回分実験と連続流実験により検討したが、ここでは凝集特性や凝集のメカニズムなどに関する基礎的な知見について報告したい。

2. 実 験

2・1 実験装置と実験方法

今回の実験においては、図-1に示す連続攪拌槽とJar-Tester（イワキJT-6型）を用いた。連続攪拌槽は容積2.16ℓ（縦12cm×横12cm×深さ15cm）の槽4個からなっており、急速攪拌機の回転数は150rpmであった。実験は、始めにJar-Testerを用いた回分実験（急速攪拌120rpm、緩速攪拌 50rpm。その後、沈殿）を、その後連続流実験（急速攪拌は連続攪拌槽で、緩速攪拌はJar-Testerで行なった。その後沈殿）を実施した。

人工濁質にはカオリンを、また凝集剤として回分実験では硫酸アルミニウム(LAS)を、連続流実験ではポリ塩化アルミニウム(PAC)と高分子凝集剤（K社製カチオンK（推定分子量 $1,100 \times 10^4$ ）、アニオンA（ $1,400 \times 10^4$ ）、ノニオンN（ $1,200 \times 10^4$ ））を使用した。浄水処理における高分子凝集剤の使用は、現在のところ日本では許可されていない。しかし、表-1の国々同様、日本でも近い将来解禁される模様である。なお、今回用いた高分子凝集剤は、米国環境保護庁(EPA)によって浄水処理用として認可されている。

実験用原水としては本学水道水を用い、これをPH調整した後、所定量のカオリンを加えた。その後、2分

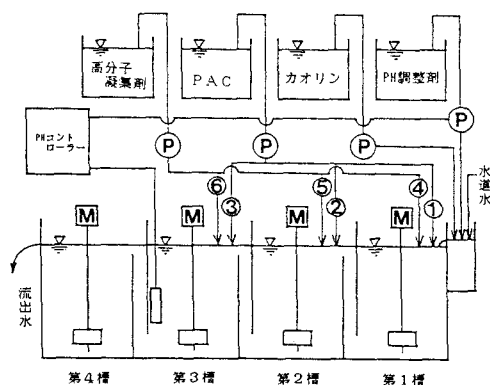


図-1 連続流の実験装置

表-1 高分子凝集剤の使用基準

	ポリアクリルアミド系 高分子凝集剤の品質	使用基準
ソビエト 東ドイツ	アクリルアミドモノマー 含有率 0.22%以下	浄水に残留するアクリルア ミドポリマー 最大 2ppm
アメリカ合衆国	同 上 0.05%以下	アクリルアミドポリマー 注入率 最大 1ppm
イギリス	同 上 0.05%以下	同 上 注入率 平均 0.5ppm以下 最大 1 ppm以下
日 本	同 上 0.05%以下	浄水工程での使用不可スラ ッジ処理に使用する場合故 流水にアクリルアミドモノ マー 最大 10ppb

割する凝集剤の前段分を注入して急速攪拌し、原則として予定した急速攪拌時間の $\frac{1}{2}$ が経過したところで、残りの後段分の凝集剤を注入した。したがって、連続流実験における凝集剤注入部は、前段分が第1槽入口（図-1の経路①）、後段分が第3槽入口（経路③）となる。また、第2、第4槽の流出水を採水、Jar-Testerによる緩速攪拌、沈殿の後、その上澄水について、残留濁度（日本精密光学SEP-H2-D型積分球式濁度計）、残留Al濃度（オキシソ法）、粒子のゼータ電位（三田村理研の電気泳動測定装置）などを測定した。

2・2 予備実験

図-2は、濁度を指標とした連続攪拌槽の定常化時間に関する実験結果である。横軸は t/T （採水時間／理論滞留時間）、縦軸は採水した試料の濁度 C を最大濁度 C_0 （上昇曲線では $t/T=4$ 、下降曲線では $t/T=0$ における試料濁度）で除した値である。その結果、凝集剤の安定化時間も濁度と同一と考えられるので、後の実験では、凝集剤の注入開始から滞留時間の3倍以上経過してから採水した。

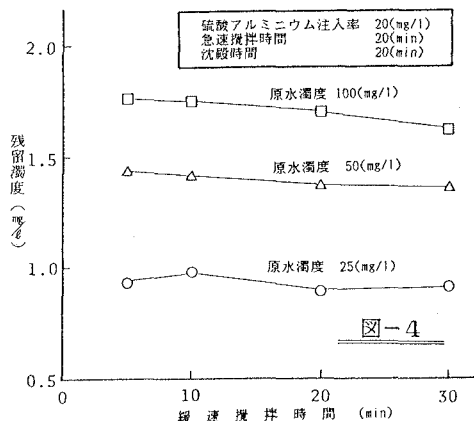
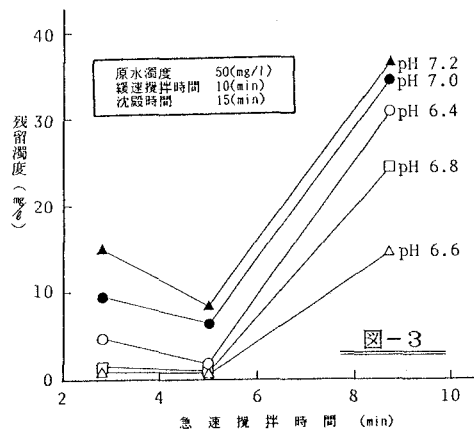
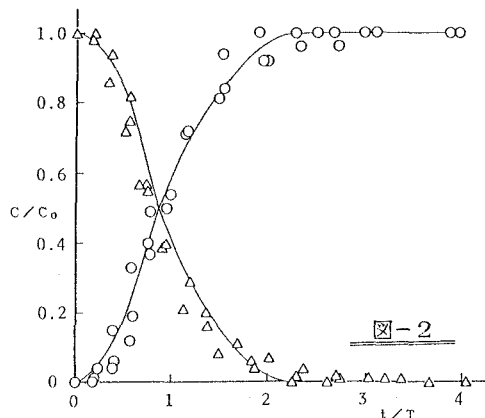
図-3は、連続流実験における最適急速攪拌時間および最適凝集PH値に関する実験結果の一部である。その結果より、最適急速攪拌時間は4～5分、最適PH値は6.6と判断した。

図-4は最適緩速攪拌時間に関する実験結果である。ただし、事前の急速攪拌(120rpm)は、Jar-Testerで行った。その結果、残留濁度はいずれの原水濁度においても緩速攪拌時間が長くなるにつれて僅かに改善されているが、緩速攪拌時間の効果は無視して差し支えないと考えた。したがって後の実験においては、緩速攪拌時間として10分間を採用した。

3. 結果および考察

3・1 凝集剤(LASまたはPAC)を用いた分割注入

凝集剤としてLASを用いた回分実験の結果を図-5と6に掲げる。これらの実験では、本学水道水にPH調整剤と50mg/lのカオリンを注入した後LASの総注入率を20または40mg/lとして凝集剤の分割比と急速攪拌時間を変化させた。その結果、残留濁度については全体的に凝集剤の総注入率が高いほど、また急速攪拌時間が長いほど低下している。さらに濁度除去に及ぼす分割比の効果に関しては、一括注入が最も良い結果を示し、後段の注入率が増すにつれて残留濁度が高くなる傾向となった。このことは、凝集剤の総注入率が同一であっても注入方法により濁度除去効果に差が出現すること、特に前段で添加される少量の凝集剤が凝集現

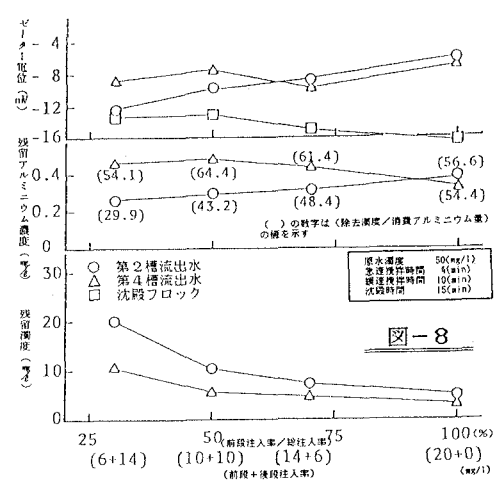
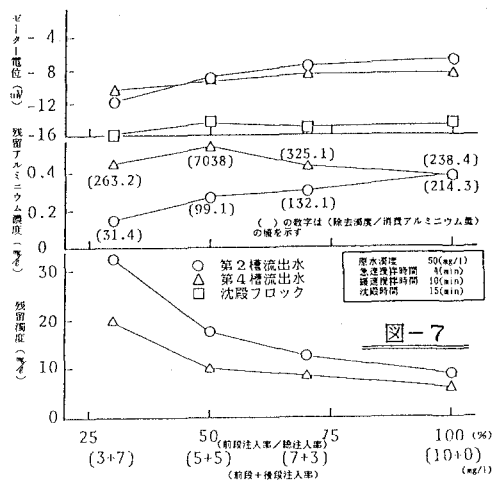
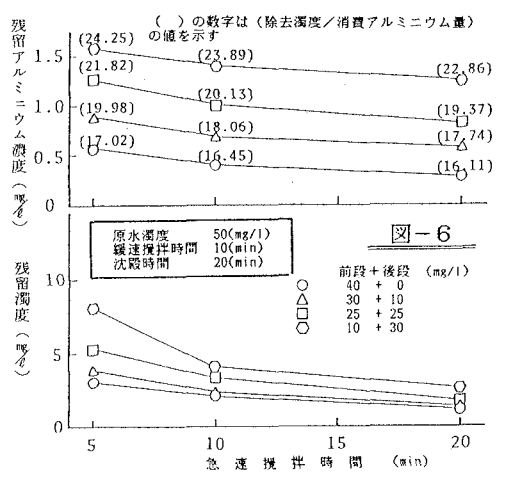
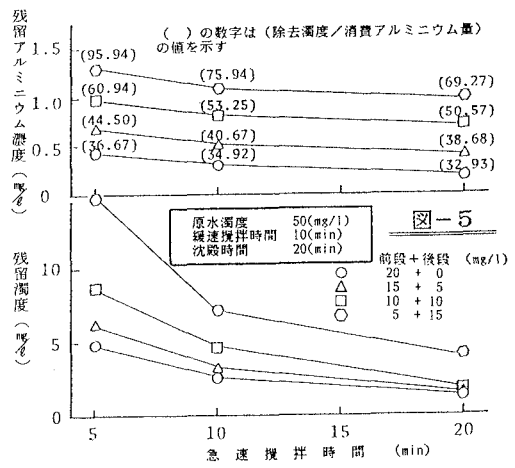


象全体に大きな影響を与える状況が認められる。また、残留Al濃度については、残留濁度と同様に一括注入が最も低い値をとり、分割注入での前段の注入率が増すに従い低い値となる。しかし、図の()内に示した(除去濁度/消費Al量)は、後段の注入率が増すにつれて高くなった。

ついで、連続流実験の結果を図-7~9に掲げた。ここでは凝集剤としてPACを用い、総注入率10, 20または30mg/lの下で実験をおこない、第2槽および第4槽流出水をJar-Testerで緩速攪拌した後の沈殿上澄水の残留濁度・残留Al濃度を測定した。なお、ゼータ電位については、第2槽、第4槽流出水の他、沈殿フロクについても測定した。

これらの図より、残留濁度については回分実験と同様に凝集剤の総注入率が高いほど分割比にかかわらず相対的に低い値をとっている。また、総注入率が等しい条件では、図-5, 6の結果と同様に一括注入が最も良く、ついで分割注入で前段のウェイトを高くしたものほど低い値をとっている。特に注目される点は、第2槽流出水と第4槽流出水の濁度差が意外に少ないことである。つまり一括注入時の濁度差は攪拌時間の効果のみと考えられるから、先の回分実験の結果と同様に後段で注入した凝集剤の効果が予想外に低い。

残留Al濃度については、凝集剤の総注入率が等しい場合、一括注入よりも分割注入の方が高くなる傾向が認められた。また、残留濁度の動きから予測されるよ



うに、分割注入の後段の注入率が高いほど前段と後段の残留Al濃度差が大きくなっており、後段で一括注入した凝集剤の有効率が低かったことを示している。

以上の結果をもとに単一凝集剤を使用した場合の凝集形態をモデル化したものが、図-10 (a),(b)である。一括注入の場合は、注入した凝集剤がカオリン粒子の表面に配置されて荷電の中和に作用すると同時に急速攪拌等の外力によりカオリン粒子相互が接触してファン・デア・ワールス力で結合し、マイクロフロックとなる。その後、緩速攪拌の過程で次第に沈降性のよいフロックへと成長していく。また、分割注入の場合は、前段の注入が済んだ時点では、一括注入の場合より注入率が低いため、カオリン粒子の表面には凝集剤の配置が希薄である。それゆえ、後段で注入される凝集剤は、カオリン粒子表面でいまだ荷電調整されていない部分に優先的に配置されるものと推測される。しかしながら、図-5～9で見られるように、後段の注入率が高くなるに伴って残留Al濃度が高くなっていること、また、前段と後段での粒子のゼータ電位が殆んど変化していないこと等から、後段で注入した凝集剤の多くはカオリンまたはマイクロフロックの表面に配置されず不活性Alとして残ると判断される。ただし、図-7～9で、前段の注入率が低い場合には後段で注入した凝集剤がかなりゼータ電位の低下に作用している。この様に分割注入の場合、前段で注入した凝集剤の効果が強く表面に表れる点が特徴といえよう。

これらのことから、分割注入方式が一括注入方式よりも良好な処理水質を与えるためには、①後段で注入する凝集剤の効率を高める方法を見出すこと、②後段で異符号の凝集剤を採用すること、あるいは③前段で注入する僅かな量の凝集剤でカオリンの荷電を効率よく上昇させてマイクロフロックを形成させ、後段で高分子凝集剤の持つ強力な架橋作用を利用する、などが考えられる。とくに③の方法は、高分子凝集剤を単独で使う場合よりも相当大きな効果が期待される。

3・2 高分子凝集剤を併用した分割注入

連続攪拌槽による PACと高分子凝集剤の併用実験に先立って、代表的な高分子凝集剤の注入率を変えた凝集実験を実施した。当初、カオリンの電荷は負であることからカチオンKの処理性が最も高くなると予想していたが、図-11に示したようにノニオンN、カチオンK、アニオンAの順であった。また、最適注入率はいずれの場合にも 0.5mg/l以下に存在している。

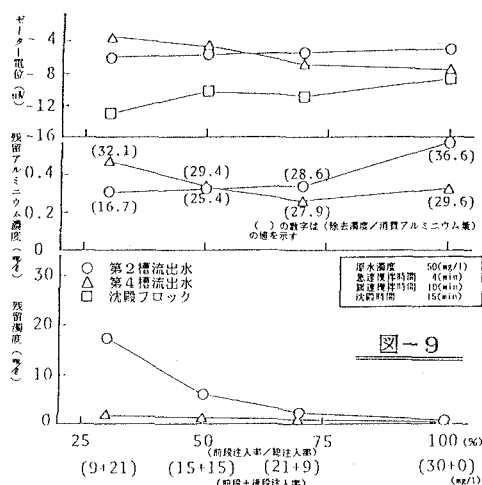
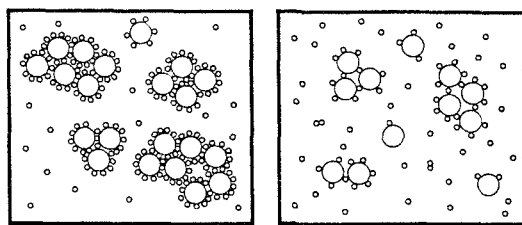


図-9



(a) 一括注入方式の凝集モデル

(b) 分割注入方式の凝集モデル

図-10 一括注入と分割注入の凝集モデル

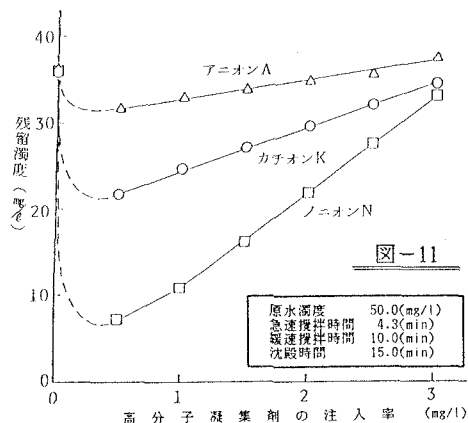


図-11

図-11の凝集性状については、カチオンKの場合、連続撹拌槽の第3と第4のいずれの槽底にも粗大（直径2～5mm）で密実なフロックが発生した点が特徴である。それらは、PAC 使用時のように、マイクロフロックを経て徐々に成長したというよりも、カオリンが高分子凝集剤の強い架橋作用によって捕捉されると同時に急速撹拌による kneading actionを受け、瞬時に成長したかのように観測された。ノニオンNの場合、急速撹拌によって次第に粗大なフロックに成長していったが、粘着性が強く、連続撹拌槽の内壁面に付着するものが相当あった。この高い粘着性はノニオンNの特徴であったが、フロックの成長過程は PAC使用の場合と比較的類似していた。また、アニオンAの場合には、カオリンと同一の負荷電をもつために殆んどフロック化は認められず残留濁度も高くなった。これらの状況を考え合わせ、連続撹拌槽による分割注入実験では、ノニオンNを使用することにした。

河村らによると、高分子凝集剤を単独で使用している浄水場もあるということである³⁾が、前述の結果からカオリン粒子の荷電上昇のために PACを少量注入してマイクロフロックを形成し、その後、高分子凝集剤を注入し、その架橋作用でフロック化を促進させて除濁する方法が望ましい。そこで最初に連続撹拌槽の第1槽（図-1の経路①）に PACを注入し、その後、第3槽（経路⑥）にノニオンNを注入する実験を実施した。その際、カオリン50、または100 mg/l、前段で PAC 5,10,20 mg/lおよび後段でノニオンN 0.2,0.4, 0.6 mg/lを採用したが、これらの実験結果を図-12に掲げる。濁度除去の傾向としては、前段の PAC注入率を増加させるに伴い、また、後段のノニオンNの注入率を減少させるに伴って、濁度除去率が上昇しており、図-5～9と同様であった。しかし、同一の凝集剤注入率では原水濁度が高くなると、濁質除去量は飛躍的に上昇するが、除去率では低下している。

図-12と図-7～9の比較から、PACとノニオンN 0.2mg/l併用時の残留濁度は、一括注入で2倍の PAC 注入率を採用した時よりも低い。すなわち、高分子凝集剤は、前段で注入する PACの50～75倍程度の効果を発揮している。ノニオン系高分子凝集剤の価格は、現在 PAC（北見市、昭和60年度価格：44円/Kg）の20～30倍程度（K社製高分子凝集剤：1350円/kg）、さらに、フロック発生量が大幅に減少することから高分子凝集剤の採用は相当経済的であると考えられる。

つづいて、連続撹拌槽の前の2槽で急速撹拌を、後の2槽で緩速撹拌を行なうよう調整して、凝集剤注

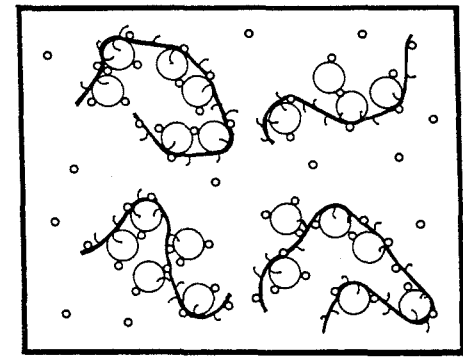
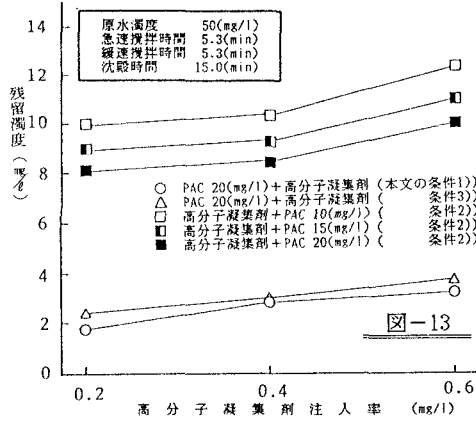
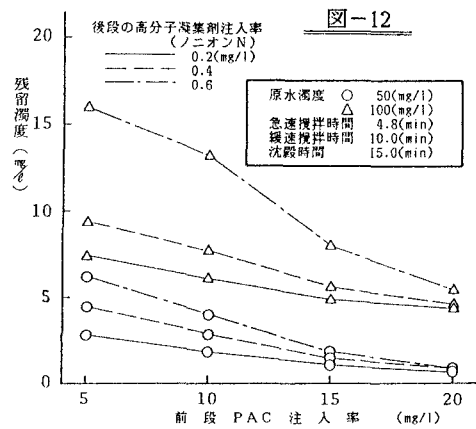


図-14 高分子凝集剤使用時の凝集モデル

入順序などを検討するために次の実験を実施した。凝集剤注入率は、原則としてPAC 20mg/lに対し高分子凝集剤をそれぞれ 0.2, 0.4, 0.6mg/lとした。

- 1). 第1槽入口(図-1の経路①)でPACを、第2槽の入口(急速攪拌の中間点⑤)でノニオンNを注入
- 2). 第1槽入口(経路④)でノニオンNを、第2槽の入口(急速攪拌の中間点②)でPACを注入
- 3). 第1槽入口(経路①)でPACを、第3槽の入口(緩速攪拌の開始点⑥)でノニオンNを注入

これらの実験結果を図-13に示す。残留濁度は、分割注入の前段として第1槽にPACを注入した後、後段としてノニオンNを急速攪拌の中間点である第2槽に注入する条件1)と緩速攪拌の開始点である第3槽に注入する3)を比較すると、1)が3)より良い結果となった。また、高分子凝集剤とPACの注入順序を入れ換えた1)と2)の結果を比較すると、2)の残留濁度が極端に上昇しており、複数の凝集剤を用いる場合には注入順序が非常に大きな因子となることが示唆される。

以上の結果から異種凝集剤併用時の凝集は、図-14のようにモデル化される。つまり、前段で注入した凝集剤はカオリン粒子表面に配置されて荷電の上昇と同時にマイクロブロックの形成を推進する。後段で注入した高分子凝集剤は荷電の上昇したカオリンやマイクロブロックを強力な架橋作用でとりこみながら、さらにブロック形成を促進させていくと考えられる。

4. あ と が き

単一の凝集剤を用いた場合および高分子凝集剤を併用した場合の分割注入方式に関する回分実験と連続流実験を行い、凝集特性やメカニズムなどについて種々検討してきた。単一凝集剤使用の場合、全体として分割注入方式の濁度除去率は一括注入方式に劣るものの、(除去濁度/除去Al量)が高くなることから、後段で注入する凝集剤の効率化の方法が見い出されれば、分割注入方式は実用化しうるものとする。また、後半では、連続攪拌槽を用いて後段にノニオン系高分子凝集剤を注入することにより、分割注入方式が効果的、かつ経済的になることを示した。今後は、急速ろ過を含めた総合的な固液分離現象の研究の中で凝集剤の分割注入方式を検討して行きたい。

最後に、本研究の実験遂行や関連データの採取にあたった北見工業大学土木工学科上下水道工学研究室の卒業生各位の努力に感謝の意を表すとともに、本研究は、昭和59年度および昭和60年度の文部省科学研究費(一般研究C)の助成を受けて実施した研究であることを記す。

参 考 文 献

- 1). 丹保 憲仁：水処理における凝集機構の基礎的研究(I)～(Ⅲ)，水道協会雑誌，No.361, 363, 365
- 2). Black, A.P. & Hannah, S.A. : Electrophoretic Studies of Turbidity Removal by Coagulation with Aluminum Sulfate, JAWWA, Apr. 1961
- その他、数篇
- 3). 河村 勸：米国における浄水技術と施設の現況，水道協会雑誌，No.457
- 4). 永澤 満・滝澤 章：水処理の高分子科学と技術(下) 高分子水処理剤，地人書館
- 5). 上水試験方法，日本水道協会