

超音波を利用した新しいフロック強度測定法の開発

Development of Novel Method for Measurement of Floc Strength Using Supersonic

野田玲治¹, 岸敦男¹, 笠倉忠夫¹, 樫野泰司¹

¹ 豊橋技術科学大学工学部エコロジ-工学系/〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町字雲雀ヶ丘 1-1

Reiji NODA¹, Atsuo KISHI¹, Yasuji KASHINO¹, Tadao KASAKURA¹
Department of Ecological Engineering, Toyohashi University of Technology
/1-1 Hibarigaoka, Tempaku, Toyohashi, Aich, 441-8580, Japan

ABSTRACT

A novel method for measurement of floc strength using supersonic waves was studied in order to improve the operational efficiency of solid-liquid separation process. The novel method named as supersonic method was compared with the stirring method, which has conventionally been used to determine floc strength, and discussed. As a result, it was found difficult to increase the accuracy of measurement by the stirring method due to relatively low energy exerted to the flocs for fragmentation, whereas more accurate measurement was possible by the supersonic method which provides greater energy for floc fragmentation. As a possible application of supersonic method to actual solid-liquid separation process, estimation of specific resistance of coagulated sludge was considered. It was clearly shown that the floc fragmentation rate measured by the supersonic method strongly correlates with the specific resistance of coagulated sludge; implying that the specific resistance may be estimated from the floc fragmentation rate. It was also shown that the supersonic method is useful in determining dosage ratio of coagulant to sludge.

Key Words : Floc strength, CST(Capillary Suction Time) , Supersonic

1 緒言

平成10年の調査では、日本の下水道普及率は全国平均で56%にも達し、大都市ではほぼ100%を達成している。また平成8年度から始まった第8次下水道整備7箇年計画により、下水道事業は今後も益々強気に推進され、平成14年度末には普及率66%が見込まれている。下水処理においては、その溶解性汚濁物質除去のほとんどを微生物の活動に頼るため、多量の汚泥が発生する。平成6年度に日本の下水処理場で発生した汚泥は年間約3億m³(含水率99.2%)であり¹⁾、その61%が埋立処分されている。廃棄物の最終処分地の不足が問題視されている今日において、その減容化減量化は重大な課題である。

通常、汚泥は固液分離プロセス(調質、濃縮、脱水)を経て減容減量化される。調質では、汚泥が持っている負の荷電を中和する目的で正荷電を持つ凝集

剤を注入し、汚泥粒子同士を凝集させフロックを形成させる。このフロックによって、後続の濃縮・脱水プロセスを容易にし、脱水効率を向上させることが目的である。フロックの強度や大きさは、固液分離全体の効率に影響をおよぼすことから、固液分離プロセスでは最適な凝集剤の種類や注入率を決定しなければならない。

従来、フロック強度測定にはインペラによる攪拌法²⁾が用いられてきた。攪拌法では、調質後のフロックをインペラの回転によって破壊し、その際の濾過性の悪化をCST(Capillary Suction Time)の変化で評価する。この場合、攪拌時間に対するCSTの増加量が大いほど、フロック強度が劣っていることになる。しかし、この方法では加えられるエネルギーが低く、フロックが破壊されにくいと、精度の高い測定には不向きである。今後、より高い脱水効率を達成するためには、より精度の高いフロック

強度測定法が必要である。

そこで本研究では、新たなフロック強度測定法として超音波法を提案し、攪拌法との比較を行うことによって、超音波を用いたフロック強度測定法の可能性について検討する。さらに、加圧濾過実験を通してその脱水特性との関係も明らかにした後、実際の固液分離プロセスへの適用についても検討を加える。

2 実験方法

実験では、豊橋技術科学大学の下水処理場から採取した返送汚泥について、種々の凝集剤を添加し凝集試験法²⁾によってフロックを形成させたものを試料とした。試験に用いた凝集剤を Table1 に示す。特に断りがない限り、試料調製の際には最適、すなわちフロック形成直後の CST が最小となるよう、凝集剤を投入してフロックを形成させている。これらの試料を用いて、加圧濾過実験からフロックの基礎的な脱水特性を、攪拌および超音波を用いたフロック強度測定法からフロック強度を決定した。

2.1 加圧濾過実験

形成させたフロックは、加圧濾過実験によって濾過後のケーキ水分、平均濾過比抵抗、および圧縮性指数を決定する。加圧濾過実験に用いた装置を Fig.1 に示す。汚泥脱水の原理はケーキ濾過または圧搾である。本実験での加圧濾過では圧搾は行わないので、解析にはケーキ濾過の基礎式としてルースの工業濾過理論を用いる。

ケーキ濾過におけるルースの基礎式は次のように与えられる³⁾。

$$dv/dt = p/\{\mu(R_c + R_m)\} \quad (1)$$

ここで、 p は濾過圧力 (Pa)、 μ は濾液の粘度 (Pa·s)、 R_c および R_m はそれぞれケーキと濾材の抵抗 (1/m) を表す。 R_c がケーキ内に含まれる固形分質量に比例すると考えると、次のように表される。

$$R_c = \alpha w \quad (2)$$

ここで、 α は平均濾過比抵抗 (m/kg)、 w は単位濾過面積当りのケーキ固形分質量 (kg/m²) である。 w は

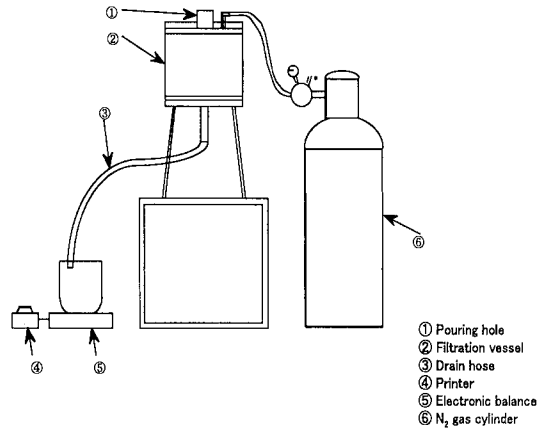


Fig.1 Equipment for pressurized filtration

ρ : 濾液の密度 (kg/m³)、 m : ケーキの湿乾質量比 (-)、 s : スラリー単位質量中の固体質量 (-) を用いて、以下の式で表すことができる。

$$w = \rho sv / (1 - ms) \quad (3)$$

R_m は濾過が進行すると 0 とおけることと (2)、(3) を考慮すると (1) は次のように書き換えることができる。

$$dv/dt = p(1 - ms)/(\mu \alpha sv) \quad (4)$$

上式を定圧濾過 (p が一定) の条件で積分すると、その解は以下のような濾液量 V (m³/m²) と濾過時間 t (s) の関係が放物線状の関数として求められる。

$$v^2 + 2vv_0 = K \cdot t \quad (5)$$

ここで、 K はルースの濾過定数 (m²/s)、 V_0 は濾材抵抗と等価ケーキを得るための仮想濾液量 (m³/m²) であり、 $K = 2p(1 - ms)/(\mu \rho s \alpha)$ である。(1) 式より K の値がわかれば、平均濾過比抵抗 α を求めることができる。ここで、

$$\alpha = 2p(1 - ms)/(\mu \rho s K) \quad (6)$$

であるので、平均濾過比抵抗は単位面積当たり単位固形質量を含むケーキを通して、単位粘度の流体を単位流速で流動させるのに要する圧力であると定義することができる。また、平均濾過比抵抗 α は圧縮

Tab.1 Physical properties of sludge

		Sludge A	Sludge B	Sludge C	
Total solid	mg/l	9600	7320	7470	
Volatile total solid	%-TS	81.9	80.2	82.7	
Fibrous matter	100mesh	%-TS	3.5	2.8	1.7
	200mesh	%-TS	3.2	2.5	1.8
pH	-	6.27	6.79	5.96	
CST	sec	57.2	19.6	24.7	

性ケーキの場合スペリー型で表せば、圧力 p の関数で以下のようになる³⁾。

$$\alpha = \alpha_0 p^n \quad (7)$$

任意の濾過圧力の実験によって得られた濾液質量と濾過時間のデータから、濾液量と濾過時間の関係を求め二次曲線(前述の(1)式)で近似することによって K, V_0 を算出する。濾液の粘度は粘度計を用いて測定し、 K の値よりその圧力におけるケーキの平均濾過比抵抗を求める。この操作を濾過圧力を変化させて行い、各圧力ごとの平均比抵抗と濾過圧力の関係を求め、それを指数関数(前述の(4)式)で近似することによって、圧縮性指数(n)ならびに平均濾過比抵抗(α_0)を決定した。

2.2 フロック強度測定法

フロック強度の測定法は、形成したフロックを何らかの方法で破壊しながら CST の変化を測定するものである。従来下水処理場等では、攪拌によってフロックを破壊する方法が広く行われてきた。本研究では、この攪拌法に加え超音波によってフロックを破壊する“超音波法”を提案し、これについても検討を行う。以下に、各手法の詳細について述べる。

1) 攪拌法²⁾

200ml ビーカーに 100ml の凝集汚泥を入れ、標準インペラにより 1000rpm で 10 秒間攪拌しつつ、20ml の水を加える。その後も攪拌を続け、30 秒後、1 分後、2 分後とその CST 値を 10 分後まで 1 分毎に測定する。

2) 超音波法

Tab.2 Coagulants used in this study

Cation polymer
PAC(poly aluminum chloride)
PFS(poly ferric sulfate)
Amphoteric polymer

500ml ビーカーに 300ml の凝集汚泥を入れ、連続運転で超音波破砕を行い、その CST 値の時間変化を測定する。超音波発振器の運転条件を Table 2 に示す。超音波発振器はホーン式である。超音波による分散効果を高くするためには、周波数を低く、出力を高くする必要があることがわかっている⁴⁾。そのため出力は、本装置で連続的に照射可能な最大出力である 80W とし、周波数は、超音波の中で最も低い部類に属する 20kHz とした。

フロックの破壊に伴って CST 値が増加するのは、凝集していた汚泥粒子が分散することによって、CST 測定時に濾紙への透過性が低下していくためである。フロック強度が高い場合、すなわち汚泥粒子間の結合が強い場合にはフロックが壊れにくいため、フロック強度が低い場合に比べて CST 値の増加割合は低くなる。本研究で実施した実験範囲内では CST とフロック破砕時間(超音波照射時間)との間に直線関係が成立した。本研究では、その傾きをフロック破砕速度 k と定義する。

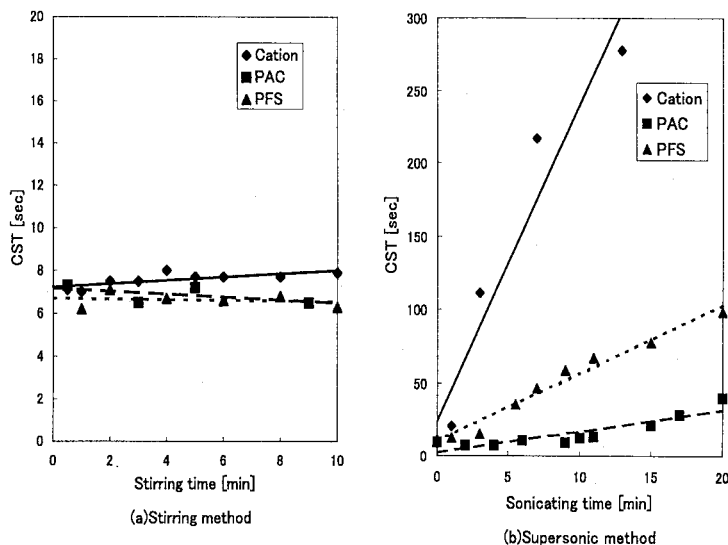


Fig.2 Comparison of changes in CST measured by the stirring and supersonic method

3 実験結果および考察

3.1 攪拌法と超音波法の比較

まず、フロック強度測定法として従来用いられてきた攪拌法と新しく提案する超音波法を比較するための実験を行った。同一汚泥に対して3種類の凝集剤(カチオンポリマー、PAC(Poly Aluminum Chloride) + 両性ポリマー、PFS(Poly Ferrous Sulfate) + 両性ポリマー)を用いて凝集させた試料について、攪拌法および超音波法によってフロック強度を測定した。各凝集剤の注入率は、凝集直後のCST値が最小となる注入率を用いている。これは実際の脱水プロセスにおける凝集剤注入率の決定法と同様である。下水汚泥の凝集法に対しては、一般にカチオンポリマーによる一液のみの注入法が多いが、金属塩と両性ポリマーの二液注入によってフロックを強固にしようという方法があり、これらを比較する意味で3種の凝集剤による実験を行った。実験結果を、Fig.2に示す。また、各凝集汚泥の0.6MPaにおける濾過比抵抗の値をTable 3に示す。

本実験で用いた3種類の試料について、攪拌法ではCSTがほとんど変化せず凝集剤による違いを判

Tab.3 Operating conditions for sonication

Output power 80W
Frequency 20kHz
Type of oscillator phone
Tip location of oscillator 5cm under the surface
Temperature 20~25°C

別しにくかった。Fig.2の結果からは、カチオンポリマーを用いたものがフロック強度が低いように見受けられる。この結果を濾過比抵抗と比較すると、カチオン凝集剤を用いた試料は最も濾過比抵抗が高く、ある程度フロック強度と濾過比抵抗の間に関連があることが伺える。しかし、二液注入法については、濾過比抵抗値で3倍以上も差があるにもかかわらず、両者はもはや区別することができなかつた。また、攪拌法では、凝集剤によるCST値の差が1~2秒と小さく、CST測定誤差の影響が大きくなる可能性がある。従って、攪拌法ではフロック強度にかなりの差異がなければ、正確な判断が下せないと判断できる。これに対して超音波法では、これらの3つ

Tab.4 Specific resistance at 0.6MPa

Coagulants	Specific resistance [m/kg]
Cation polymer	5.47×10^{12}
PAC+ Amphoteric polymer	0.34×10^{12}
PFS+ Amphoteric polymer	1.62×10^{12}

の間の違いが明確に現れていることが分かる。攪拌法で測定されたフロック強度 (CST) は、攪拌開始後速やかに一定値となる。これに対して超音波法では、時間とともに CST 値が上昇することがわかった。このことから、攪拌法は凝集フロック中の結合が弱い部分のみを切断しているのに対し、超音波法はかなり強固な結合あるいは細胞自体を時間経過とともに破壊しているものと考えられる。濾過比抵抗の結果と比較すると、比抵抗の結果に対してよい相関があった。これは、濾過の際の流路を閉塞するような変形や微粒子生成とフロック強度の間に関係があることを示している。しかし、最終水分率との関係は明確ではなかった。フロック強度と脱水特性の関係については、次節で検討する。少なくとも以上の結果から、超音波法は従来の攪拌法よりもフロック強度を評価するのに適していることは明らかである。

4 フロック強度と脱水特性との関係

3.1 に示した通り、超音波法で測定したフロック強度測定は、濾過比抵抗との間に相関があることが示唆されたことから、ここでは、加圧濾過実験から得られた脱水特性と超音波法から得られたフロック強度との関係について検討する。実験は、前節の3つの試料とは別の日に採取した返送汚泥を用いて調製した2種類の試料を加えた5種類の試料について行った。フロック強度は超音波法によって、平均濾過比抵抗と圧縮性指数は加圧濾過実験から求めた。実験から得られたフロック強度ならびに濾過比抵抗の結果を Fig.3 および Fig.4 に示す。

Fig.3 から、本実験で用いた試料すべてについて CST 値は超音波照射時間に対して直線的に増加しており、その傾きであるフロック破碎速度 k は個々の

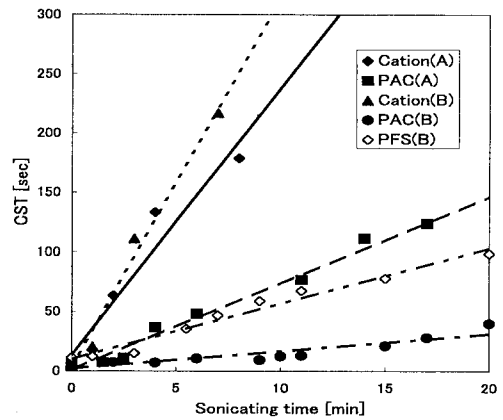


Fig.3 CST changes of sludges with various coagulants measured by the supersonic method

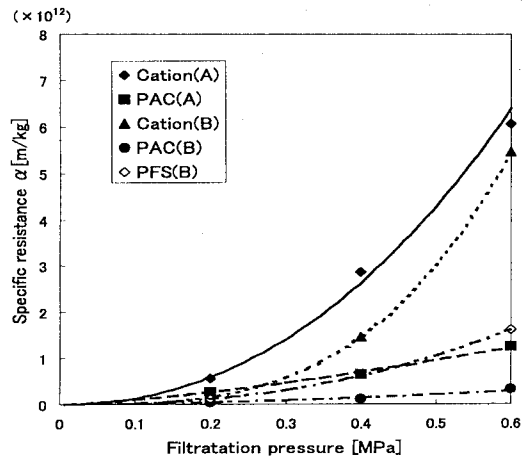


Fig.4 Specific resistance of sludges with various coagulants

凝集汚泥に固有でほぼ一定値をもつことが分かる。また、Fig.3 および 4 の比較から、フロック強度と濾過比抵抗との間に、定性的ながら強い相関があり、フロック破碎速度が大きいもほど濾過比抵抗が高くなる傾向が示された。濾過実験結果から、式 (4) によって平均濾過比抵抗 α_0 および圧縮性指数 n を求め、フロック破碎速度 k との関係プロットした結果を Fig.5 および 6 に示す。平均濾過比抵抗の結

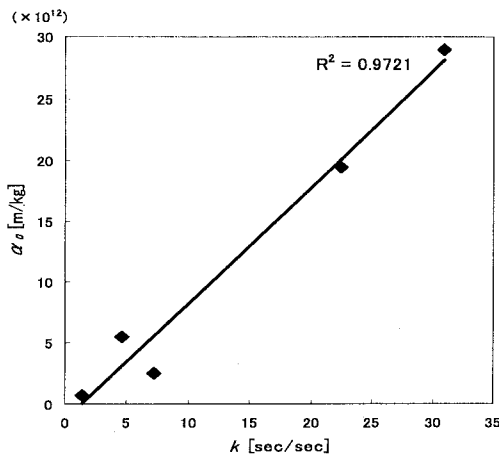


Fig.5 Relationship between k and α_0

果から、フロック破碎速度と平均濾過比抵抗の間には非常に強い一次の相関があることがわかった。濾過比抵抗を評価する指標として、フロック破碎速度は非常に有効であるといえる。ただし、別の下水処理場などの大きく物性が異なった下水汚泥について試験を実施していないため、すべての汚泥が Fig.5 上の直線に従うとは限らず、汚泥物性の違いにより直線の勾配が変化する可能性もある。今後、他の汚泥についても両者の関係を調査し、勾配に影響を与える因子について検討する必要がある。これに対して、圧縮性指数 n は本実験条件範囲でほぼ一定値となり、フロック破碎速度との間には明確な相関は見られなかった。このことから、フロック強度は圧縮性指数に影響を与えないことが考察できる。

以上の結果から、汚泥あるいは凝集剤の違いによって平均濾過比抵抗は大きく異なるが、超音波法で測定したフロック破碎速度は濾過比抵抗を推定する有効な指標に成り得るといえる。

5 凝集剤注入率決定への適用性の検討

3.2 では、フロック破碎速度が濾過比抵抗を見積もるための指標になりうることを示したが、これらはすべて凝集直後の CST 値から決定した凝集剤の最適注入率における結果を示している。しかし、凝集直後の CST 値から求めた最適注入率の凝集汚泥が、濾過に最も適しているかどうかは不明である。実際に白戸らは、CST 値と 49kPa における見掛けの比抵抗の関係が直線ではないことを示している²⁾。従って、実際の脱水プロセスでは、凝集剤の種類のみならずその投入量についても最適値を予測できる必要がある。ここでは、凝集剤注入率決定への本法の適用について検討する。実験は、同一の返送汚泥に対してカチオンポリマー添加量を変化させて行った。カチオンポリマーの注入率を変化させた際の、フロック破碎速度および比抵抗の変化を Fig.7 に示す。本図から、ポリマー添加率 1%未満の領域では、

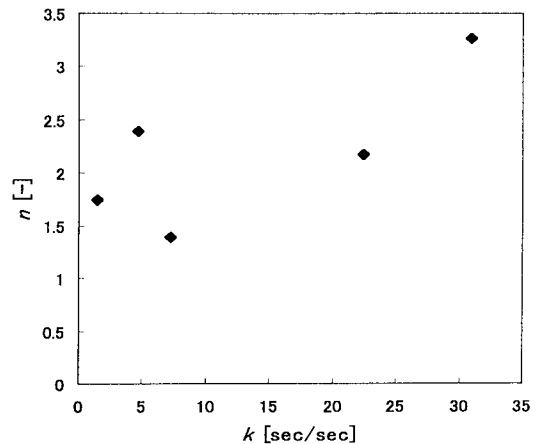


Fig.6 Relationship between k and n

フロック破碎速度と平均濾過比抵抗の間に非常に強い相関があることが分かる。フロック破碎速度から予測される最適注入率は 0.67% であり、この結果は平均濾過比抵抗の結果とも一致する。このときの凝集直後の CST 値から求めた凝集剤の最適注入率は 0.5% であり、この注入率で凝集させた場合、若干ではあるが平均濾過比抵抗が高くなってしまふ。従っ

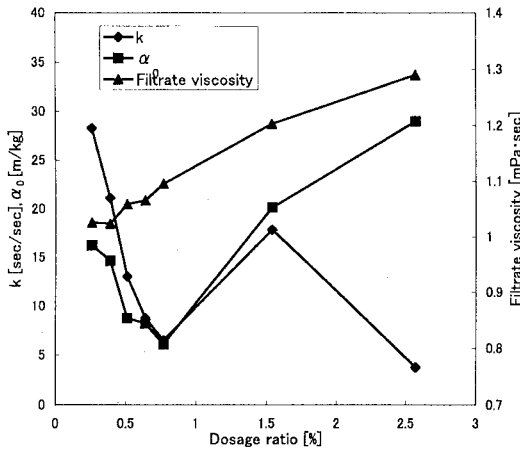


Fig.7 Influence of dosage ratio to k and α_0 and filtrate viscosity

て、フロック強度測定を行うことによって、フロック破碎速度から平均濾過比抵抗が最小になる注入率を予測でき、濾過過程に適した凝集汚泥を調質できる。このことは、超音波法が凝集剤の注入率を決定する際に利用できる可能性を示している。

しかし、ポリマーが最適値を超えて過剰に注入された領域(1%以上)では、濾過比抵抗は増加し続けるのに対し、フロック破碎速度は低下する。ポリマーが過剰に注入された領域では、凝集に関与しなかったポリマーが濾液中に残留し、結果として濾液の粘度が増加することによって、超音波のエネルギーを吸収したためと推測できる。この問題は、超音波の波長などを制御することによって解決できる可能性があるが、現状ではデータが得られておらず今後の課題である。以上の事から、ポリマーが過剰に注入された場合、その脱水における濾過比抵抗を正しく推測できないので、凝集剤が過剰に注入されないように注意することが必要である。ただし、凝集直後の CST 値から決定できる凝集剤注入量と、フロック破碎速度から予測される注入量は接近していることが予測できることから、上述の問題はそれほど大きな問題ではないと考えられる。以上のことから、超音波法を用いたフロック強度測定法は、注入率決定の指標として有効であると考えられる。

6 結論

より精度の高いフロック強度測定を目指して、従来までの攪拌法に変わる新しい方法として、超音波による分散効果を利用した“超音波法”を提案し、各種凝集汚泥を用いてその評価を行った結果、以下の知見を得た。

- 1) 超音波を用いたフロック強度測定法では、従来の攪拌法よりもフロック強度の差異を明確に評価できた。
- 2) 超音波法から求めたフロック破碎速度 k と平均濾過比抵抗 α_0 の間に一次の相関があることを示した。
- 3) フロック破碎速度 k と圧縮性指数 n との間には、明確な相関は見受けられなかった。
- 4) 超音波法は最適な凝集剤を決定する際の評価指標に成り得る。
- 5) 超音波法は凝集剤注入率を決定する際の評価指標に成り得るが、ポリマーが過剰に注入されると、正しい評価ができない可能性がある。ただし、この問題は今後の検討によって解決し得るものである。

[参考文献]

- 1) 平成6年度版下水道統計—行政編一、日本下水道協会(1994)
- 2) 白戸紋平、出井哲夫: 固液分離技術—実験からスケールアップまで—、技報堂出版(1979)
- 3) 化学工学会編: 化学工学便覧、p696(1988)
- 4) 実吉純一、菊池喜充、能本乙彦: 超音波技術便覧(新訂版)、日刊工業新聞社、p1652(1984)

(受付 1999. 6. 14)

(受理 1999. 8. 26)

