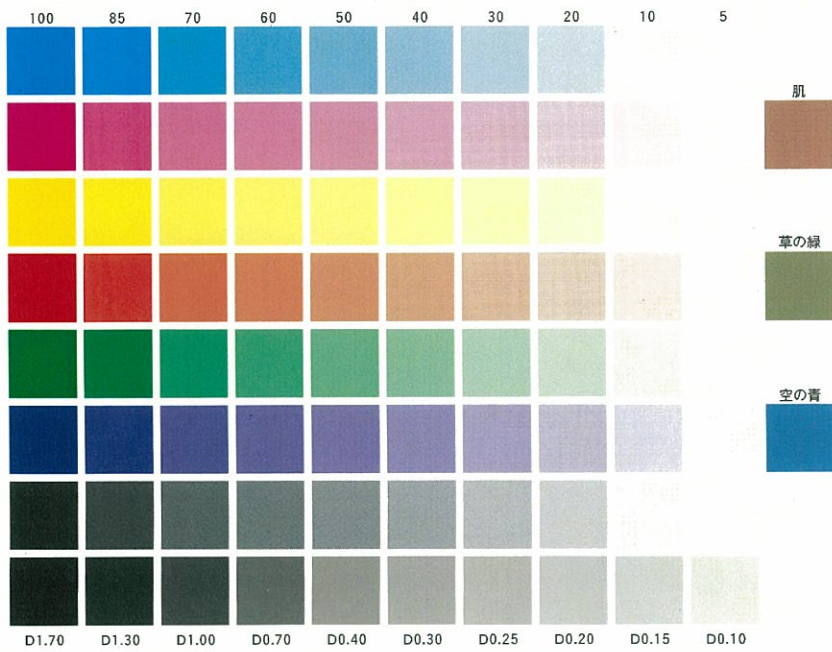


We conduct many of these
We conduct many of these
We conduct many of these



We conduct many of these
We conduct many of these
We conduct many of these



環境に配慮した合流式下水道越流システムの制御と 下水管きよ更生工法の社会経済評価

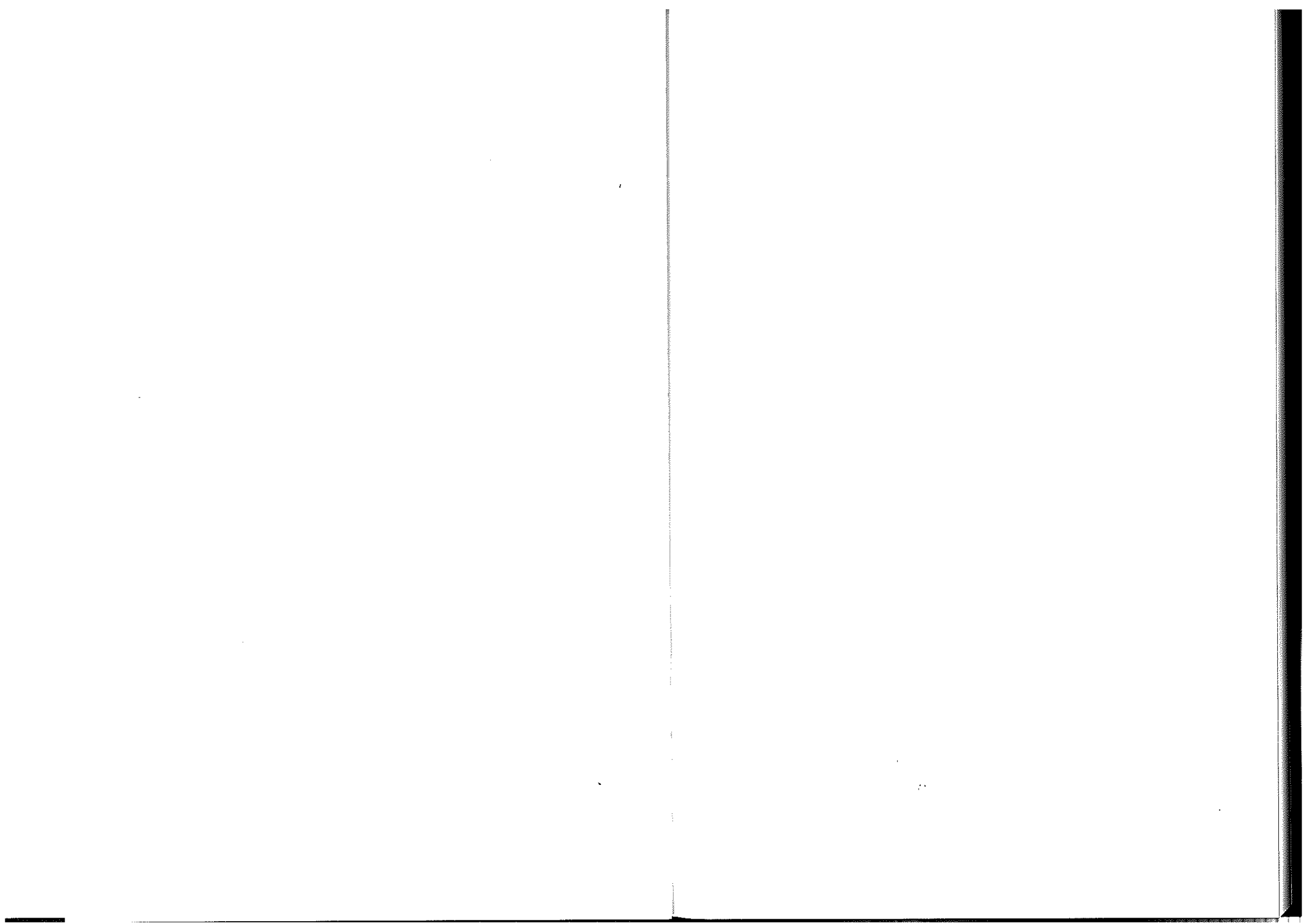
村岡 基

「環境に配慮した合流式下水道越流システムの制御と
下水管きよ更生工法の社会経済評価」

目 次

第1章 序 論	1
1.1 研究の背景	1
1.2 研究の目的	8
1.3 本論文の構成	11
【参考文献】	13
第2章 合流式下水道越流対策施設の評価に関する研究	14
2.1 緒 論	14
2.2 本研究の位置づけ	15
2.3 評価方法	16
2.4 合流式下水道システムの概要および雨天時調査結果	18
2.5 雨水滞水池による汚濁負荷削減効果の算定	21
2.6 合流改善対策によるCO ₂ 排出量の算出	28
2.7 CO ₂ 排出量を考慮した雨水滞水池導入による合流改善効果の評価	31
2.8 結 論	33
【参考文献】	35
第3章 下水道施設のリアルタイムコントロールによる合流式下水道の改善に 関する研究	37
3.1 緒 論	37
3.2 本研究の位置づけ	38
3.3 対象排水区およびRTCの制御方法	40
3.4 分布型モデルによる雨天時汚濁負荷解析	43
3.5 RTC実施による放流負荷量削減効果の定量	49
3.6 年間解析によるRTCの合流式下水道越流水対策効果の評価	52
3.7 結 論	57
【参考文献】	58

第4章 管きよ更生工法のライフサイクルアセスメントに関する研究	60
4.1 緒論	60
4.2 本研究の位置づけ	60
4.3 管きよ更生工法のLCA評価の方法	61
4.4 管きよ更生工法および開削工法のLCAの算出評価	65
4.5 管きよ更生工法のLCA評価結果および考察	76
4.6 結論	78
【参考文献】	80
第5章 管きよ更生工法の社会的な評価に関する研究	81
5.1 緒論	81
5.2 本研究の位置づけ	81
5.3 管きよ更生工法の建設コストと環境コストの算出条件	82
5.4 管きよ更生工法の建設コストと環境コストの算出結果	90
5.5 トータルコストの算出結果	92
5.6 交通渋滞の算出条件による比較	93
5.7 結論	96
【参考文献】	98
第6章 結論	99
研究業績一覧	104
謝辞	106



第1章 序論

1.1 研究の背景

「下水」とは、市街地で発生するすべての不要な水の総称であり、家庭污水、工場排水、雨水に区分される。このうち、家庭污水と工場排水を合わせて汚水と呼ぶ。また、「下水道」とは、下水を流すための排水管や排水きよ、処理施設、ポンプ施設等の総体を言う¹⁾。

下水道は、居住環境の改善や公衆衛生の向上を図り、国民の都市における快適な生活を確保するための基盤的な施設であるとともに、河川、湖沼、海域等の公共用水域の水質保全を図るために欠かすことのできない施設である²⁾。また、国民の生活水準向上と生活様式の高度化は、国民の生活の質的充足に対する欲求を著しく高め、下水道によるサービスは、快適な文化的生活を享受するために欠かすことのできないものとして認識されるに至っている。

しかし、我が国では近年、気候変動の影響か、または、ヒートアイランド現象の顕在化によるものなのか、市街化が高度に進んだ都市等の地域における集中豪雨による被害の多発化、いわゆる都市型水害の増大が見られるようになってきている。この現象と相まって、早くから下水道整備に着手してきた大都市を中心に、合流式下水道からの雨天時越流水とともに未処理汚水が公共用水域へ流出する頻度および汚濁負荷量が増大し、また、経年劣化等の原因による下水管きよの老朽化と該当する管きよ延長の増加が課題になってきている³⁾。さらに、下水道事業に取り組む自治体の中には、下水管きよや終末処理場の建設ラッシュ時に行った起債の償還に苦慮し、自治体の財政収支に悪影響を及ぼしているところさえある。

そのため、合流式下水道における雨天時越流水対策や下水管きよの老朽化対策に関しては、ライフサイクルアセスメント (Life Cycle Assessment : 以下、本章において「LCA」という) の概念の導入をもって、建設、維持管理、改築の各段階で要するコストの低減を図り、長期的視点からの自治体における支出抑制だけでなく、環境コスト評価指標の導入を行うことで、環境に対する排出負荷が低減可能な手法の導入を促進するべきであると考えられる。

上記を踏まえた本論文の背景について、以下に詳述する。

1.1.1 合流式下水道について^{4), 5)}

我が国における下水道整備の契機としては、明治10~12年にかけて大流行したコレラの流行対策として衛生施設の必要性が認識され、先見性を有した都市がこれを事業

として取り組み始めたことによる。とりわけ、明治14年に着工した横浜市の煉瓦製の
大下水、明治17年に着工した東京市（当時）の神田下水は、雨水だけでなく汚水の排
除も目的とした本格的な下水道として敷設された。

ただし、当時の下水道には終末処理場を有するものではなく、汲み取り便所を併用す
る中、雨天時において雨水とし尿を除く生活雑排水とを管きよを用いて速やかに排除
することで、浸水の発生を防除し、また、滞留した下水に起因した不衛生な状態を改
善することが第一義にされていた。そのため、東京市をはじめとした大都市は、雨水
と汚水を同じ管きよで収集する合流式下水道を採用した。また、昭和45年のいわゆる
「公害国会」までに下水道整備に着手した都市も、そのほとんどが合流式下水道を採
用した。

その結果、人口密集地域を抱える大都市を中心に、雨水と汚水を合わせて管きよが
一本で済む合流式下水道の整備により、迅速かつ効率的に下水道の普及を図ったこと
が日本経済の急速な発展に大きく寄与したと言える。

一方で、急速な経済の発展は、我が国の一部において「公害」という形でその歪み
を露呈することとなった。特に、昭和30年代に入ると、河川や湖沼、海域といった公
共用水域における水質汚濁が顕著となり、水俣病やイタイイタイ病の発生もあって、
昭和45年の公害国会では、環境庁（現在の環境省の前身）の創設、水質汚濁防止法の
制定、廃棄物の処理及び清掃に関する法律の改正とともに下水道法も大きく改正され、
同法の目的に「公共用水域の水質保全に資する」ことが明記されたことと併せて、流
域別下水道整備総合計画の策定義務化と流域下水道事業の創設が図られた。

この下水道法の改正以降、新たに下水道整備に着手した都市は、雨水と汚水を別々
の管きよで収集する分流式下水道を採用することとなった。また、下水道が公共用水
域の水質保全に果たす役割を高めるため、水処理における高度処理の導入が進められ
るようになった。

しかしながら、その後においても湖沼や総量規制制度の指定水域である東京湾、伊
勢湾および瀬戸内海における水質環境基準の達成率が河川と比較して低く推移し、富
栄養化による水質障害も依然として発生していたことに加えて、雨天時における合流
式下水道から未処理汚水を含む下水の流出が社会的に問題視されるに至った。そこで、
平成15年度に下水道法施行令が一部改正され、合流式下水道採用自治体においては、
平成25年度末までの10年間に所要の合流改善を実施することを義務づけられ、この
目標を達成するための措置として、国土交通省下水道部も平成14年度に創設した「合
流式下水道緊急改善事業」の見直し拡充が図られながら、国庫補助の対象範囲も拡大
する等の措置により当該自治体を支援することになった。

なお、平成14年度より国土交通省と（財）下水道新技術推進機構が中心となって、
合流式下水道の改善に関する研究開発を求める自治体に対し、学識経験者が技術的助

言を行い、民間企業が関連技術を開発目標に適合させるための研究を行う仕組みで進められてきた産官学連携事業の下水道技術開発プロジェクト（SPIRIT21：Sewage Project, Integrated and Revolutionary Technology for 21st Century）は、当初予定した24技術すべての実用化に向けた研究開発を平成17年3月までに完了している⁶⁾。

1.1.2 合流式下水道の現状

近年、下水道が公共用水域の水質保全に果たす役割を明確にするよう求められるようになってきている。このことを受けて、平成15年9月25日に公布された「下水道法施行令の一部を改正する政令」（平成15年政令第435号）では、平成14年10月の地方分権改革推進会議からの指摘である「事務・事業の在り方に関する意見」を踏まえて、公共下水道の構造に関する技術上の基準の制定が行われた⁷⁾。また、この制定に併せて、今後において下水道行政として推進すべき重要な施策であって、政令改正により対応可能な事項に関しても同じく規定された。

これと時を同じくして、下水道法施行令改正の主目的となった構造基準の制定以外にも、計画放流水質と水処理施設構造の体系的な整理、合流式下水道に係る雨水吐きの構造基準の制定、下水道管理者による計画放流水質に適合した水質基準の規定が行われた。

この中で、とりわけ合流式下水道に関しては、具体的な内容として、雨天時越流水の問題が顕在化する中、雨水吐きの構造基準を定め、雨天時の合流式下水道からの越流水の放流水質基準を規定し、放流先の水域状況を判断の上、下水道管理者自らが改善目標を設定し、その改善を平成16年度から原則として10年以内に行うことが求められた。このことにより、法的な根拠をもって公衆衛生の向上および公共用水域の水質保全が推進されることになった。この取り組みのことを合流式下水道改善対策、いわゆる「合流改善」と呼んでいる。

なお、国土交通省は、自治体を実施する公共事業への国庫補助金の一つである下水道事業費補助によって、平成14年度新規事項として「合流式下水道緊急改善事業」を創設し、自治体による合流式下水道緊急改善計画の策定とともに、同計画に位置づけられた事業内容を補助対象とすることで、合流式下水道の改善を集中的に実施できるよう措置した⁸⁾。加えて、平成19年度からは上記の合流式下水道緊急改善事業に拡充が図られ、同改善事業に実施期間を平成25年度末まで延伸するとともに、分流化のための管きよを国庫補助対象とする等の追加措置が図られた。

このような背景を有しながら、環境に配慮し、かつ、経済性も考慮した合流式下水道改善事業に位置づけられる越流対策施設の導入が望まれている。なお、次頁に現在の合流式下水道に関する国土交通省の取り組み等について、総括的に示しておく⁹⁾。

【合流式下水道の改善について】

<現状と課題>

○合流式下水道を採用している都市(191都市)においては、雨天時にし尿を含む未処理下水が放流されることによる水域汚染が社会問題化。

<施策の方向性>

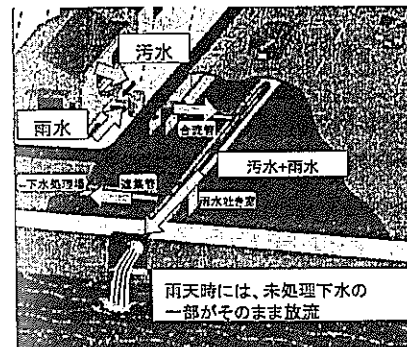
○中小都市(170都市)においては平成25年度末、大都市(21都市)においては平成35年度末までに緊急改善対策を完了

<重点的に取り組む施策>

○改善期限内に確実に対策を完了させるため、合流式下水道緊急改善計画に評価制度を導入し、SPIRIT21技術(省コスト、省スペース型の技術等)の適用や、より効率的な改善方式の見直しにより、事業の効率化を図る。

○未処理放流等で特に影響を受けやすい水域では、緊急改善対策と合わせて、未処理下水の消毒、放流先の水質モニタリング等を行うことにより未処理放流による汚染リスクを解消する対策を推進。

合流式下水道とは



合流式下水道の採用状況

- ・191都市:全下水道実施都市(1,489都市)の1割
- ・23万ha:全下水道処理区域面積(約137万ha)の2割
- ・約20%:全下水道処理人口普及率(約71%)の3割

緊急改善対策の概要(下水道法施行令に基づく対策等)

- 雨天時に水域に排出される汚濁負荷量(BOD)を分流式下水道並みに削減
 - 未処理放流回数が約1/2となり、大腸菌、ウイルス等による汚染の軽減にも効果
- ごみ、汚物等の流出防止
- 中小都市(170都市)においては平成25年度末、大都市(21都市)においては平成35年度末までに緊急改善対策を完了

合流式下水道の改善対策事例

貯留施設(雨水溜水池等)の整備
雨天時下水を一時的に貯留し、未処理下水の流出を抑制。晴天時に処理場へ送水して処理

浸透施設(ます、トレンチ、側溝、舗装等)の整備
雨水を地下に浸透し、合流管に流入する雨水量を軽減

分流化
合流管を汚水管として活用。もう1系統雨水管を布設し、合流式下水道を分流化するという方法で抜本的な対策が可能

1.1.3 管きよ更生工法について¹⁰⁾

地下に埋設された下水管きよを含むパイプラインを対象とした更生工法が世界で初めて開発されたのは、1970年(昭和45年)の英国においてである。その最初の工事実績は、翌1971年にロンドン・ハックニー地区の幅600mm×高さ900mmの下水卵形管きよを対象に反転工法で施工されたものであった。一方、我が国初となる下水管きよを対象とした更生工法による施工は、1983年(昭和58年)に広島県呉市においてφ350mmの鉄筋コンクリート管(ヒューム管)を対象にして、延長90m、反転工法により施工されたものであった。

現在、我が国における下水管きよの敷設延長は39.5万kmに達し¹¹⁾、また、下水管きよの耐用年数である50年を経過した老朽管延長は6千km、30年経過のものは6万kmを超えたと言われており、今後はその対象管きよの延長が急増することが見込まれている¹²⁾。さらに、下水管きよの老朽化や腐食等が原因となった道路陥没件数は、平成17年度には全国で6,600件に達し、特に経過年数が30年を境に道路陥没事故の発生率が増加するという実態が明らかにされていることから¹³⁾⁻¹⁵⁾、管きよの正しい施工と適正な維持管理の下、修繕に留まらない管きよの敷設替えもしくは管きよ更生工法を用いた再建設としての更新や改良の需要も増加すると考えられる。

しかしながら、現在または近い未来において、管きよの敷設替えもしくは管きよ更生工法を用いた再建設が必要とされる下水管きよの路線は、下水道事業への取り組みが比較的早かった大都市であり、また、その路線も商店街や繁華街、または交通量が多い国道や市道に含まれていることが多く、他のライフライン関係の管きよと地下で輻輳している等の理由で、開削工法による敷設替えが困難な状況にある。このことから、管きよ更生工法を用いた下水管きよの再建設の需要は増大し、その役割は大きくなると考えられる。

管きよ更生工法により施工された管きよには、構造物としての強度、耐久性、流下能力に加えて、管きよとしての水密性が備わっているよう求められる。また、更生管きよへの外力に対する耐荷能力の残存程度から、自立管や二層構造管といった区分も存在するが、たとえ開削工法と比較して短期間で施工が可能な管きよ更生工法による施工であっても、施工期間中における周辺環境への悪影響の低減もしくは回避を図る施工管理および品質管理が、今、新たに求められている。

1.1.4 管きよ更生工法の現状

先述のとおり、排水管や排水きよをまとめて「下水管きよ」または単に「管きよ」と呼ぶが、この管きよの耐用年数は50年程度であり、早くから下水道整備に着手してきた大都市では既に老朽化した管きよが増加し、クラック、継手のずれ、腐食等の問題が顕在化しており、改修が必要となっている。そのため、今後、我が国において下

水道施設の維持管理費および改築・修繕費等が増大していくことは明らかであるが、一方では、昨今の自治体における財政状況が厳しいことから、効果的かつ効率的な維持管理を行っていくことが求められている。

さらに、地球規模での環境問題への対応から、我が国の公共事業においても環境に対する負荷を軽減し、持続可能な社会システムを構築していくことが重要である。とりわけ、温暖化ガスについては、京都議定書の発効により、我が国における温室効果ガスの総排出量を2008年から2012年の間に基準年である1990年のレベルから6%削減が課せられており、公共事業において率先して温室効果ガス等の環境負荷排出量を抑える必要がある^{16)・17)}。そのためにも、下水管きよの改築・修繕においては、経済性も考慮しつつも環境負荷が少ない工法の選定を行うことが求められるようになっている。

平成19年6月19日に閣議決定された『経済財政改革の基本方針2007～「美しい国」へのシナリオ～』の「治安・防災、エネルギー政策等の強化」として示されている「改革のポイント」に挙げられている4つの事項の1つには、「国民の身近なところでの事故やトラブル等に対処するため、公共交通や道路交通の安全対策を強化する。また、住まいや身近な施設、製品、食品等の安全性を確保するとともに、(中略)、安全・安心な暮らしを実現する。」と記されている¹⁸⁾。

道路等に埋設されている管きよの安全度を診断することは、市民生活の身近なところで発生するかもしれない道路陥没やこれに伴う交通事故を未然に防ぐことにつながる。そして、結果的にはこれらの取り組みを通じて、下水管きよの安全性の確保を促し、安全・安心な暮らしの実現に貢献することになる。

国土交通省においては、老朽化した下水管きよの増加への対策として、下水道事業を実施する自治体に対し、緊急点検と今後の継続的な点検を通じた健全度の把握を行うよう平成18年度から働きかけている。また、予防保全やライフサイクルコスト(Life Cycle Cost: LCC)の低減といった観点からも、今後はさらに計画的な改築・更新に加え、耐震性の向上等による機能高度化を推進することとされている。

下水道事業を実施する自治体においては、未だLCAの概念または環境コスト指標を導入して管きよ更生工法の選定を行った事例は見られないことから、総合的な観点から環境面と経済性の双方を考慮した社会経済評価手法の導入が望まれている。なお、次頁に管きよを中心とした計画的な改築に関する現在の国土交通省の取り組み等について、総括的に示しておく¹⁹⁾。

【 管きょを中心とした計画的な改築について 】

<現状と課題>

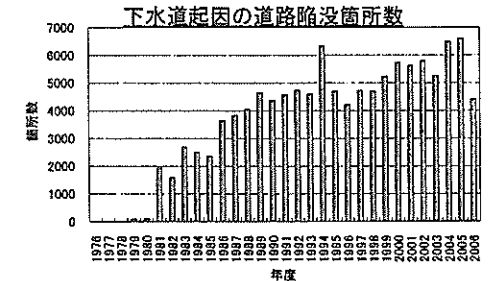
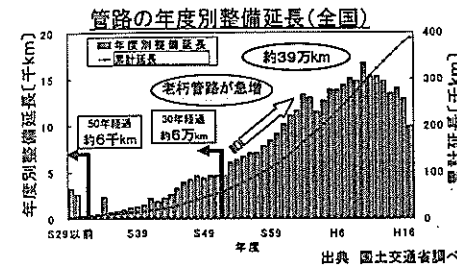
- 下水道整備の進展に伴い、施設ストックが増大。これに伴い、管路施設の老朽化等に起因した道路陥没も増加傾向。
- 道路陥没後の老朽管路の改築といった事後的な対応では、市民生活への影響を回避できず、コスト的にも不経済。

<施策の方向性>

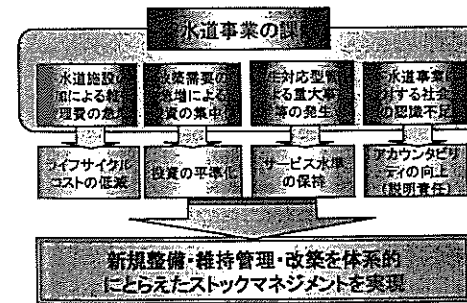
- 下水道の有する機能を将来にわたって維持・向上させるため、新規整備、維持管理、改築を体系的に捉え、ライフサイクルコストの最小化を図るための一体的かつ計画的な施設管理(ストックマネジメント)を導入。

<重点的に取り組む施策>

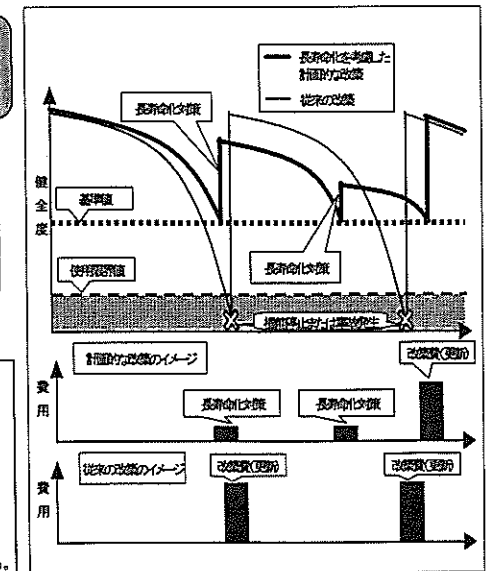
- 施設の改築にあたっては、「事故の未然防止」及び「ライフサイクルコストの最小化」の観点から、耐震化等の機能向上も考慮した、長寿命化対策を含めた計画的な改築を推進。



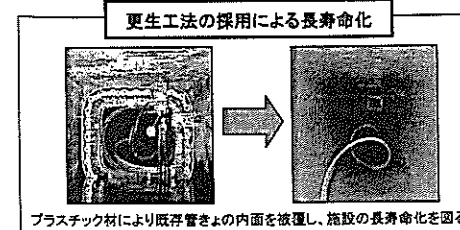
ストックマネジメントの実現



ライフサイクルコスト低減のイメージ



長寿命化対策の実施



1.2 研究の目的

本論文は、研究の背景を踏まえ、地球温暖化ガスの排出低減と生活の安全確保を図る立場から、下水道施設のシステム構築における建設コストと環境コストの抑制およびこれに基づく工法選定の必要性を勘案しながら、従来からの建設コストだけでなく環境コストにも配慮した総合的に経済性が高い下水道施設のシステム構築手法について明らかにするものである。

まず、下水道施設から排出される水質汚濁負荷量と地球温暖化ガスの低減化を目指す動きの高まりについては、合流式下水道越流システムの制御を通じた合流式下水道越流対策施設の評価として、雨水滞水池が設置されている合流式下水道排水区を対象にして、分布型モデルを用いた解析により、リアルタイムコントロール (Real Time Control: 以下、本章において「RTC」という) を実施した場合の合流式下水道改善効果を定量し、合流式下水道越流水対策としてRTCの有効性を明らかにする。

次に、下水道施設のRTCによる合流式下水道の改善に向けて、雨水滞水池がない場合 (ケース①) と、雨水滞水池容量の異なる5ケース (ケース②～⑥: 滞水池容量10,000m³～50,000m³, ケース毎に10,000m³ずつ容量増加) を設定し、汚濁負荷削減効果とライフサイクルでの環境負荷CO₂排出量を定量化する。

また、早くから下水道事業を開始した都市においては、法定耐用年数を経過した管きよや硫化水素の曝露から内面腐食の進行によって劣化した管きよが増加するという問題にも直面している。この問題の解決に向けて、近年、老朽管の改築を目的とした技術開発が盛んであるが、その中でも管きよ更生工法は、素材や形状、施工方法に工法ごとの工夫が盛り込まれ、施工時間の短縮、コストの低減とともにその長所を伸ばそうと技術開発が進展している。しかし、その施工に際しては、路上工事に伴う交通渋滞や騒音、振動の発生といった周辺環境への影響もあり、これらも考慮すべき重要な項目である。したがって、今後の下水管きよを対象とした更生工法の選定にあたっては、建設費といった建設コストだけでなく、工事に伴う周辺環境への影響といった環境コストも勘案し、総合的な評価を行う必要がある。

そこで、管きよ更生工法のうち、反転工法、形成工法および製管工法の中から施工実績等から代表的な工法を選定し、生活の安全確保を目的とした管きよ更生工法の普及と工法選定における環境配慮を総合的に評価するため、LCAによる環境負荷の比較評価を行うとともに、従来からの管きよ敷設工法である開削工法との比較も行い、下水管きよの更生工法のエネルギー消費量、CO₂排出量、NO_x排出量、SO_x総排出量を基にした総合的な評価から、環境面において優れた手法を明らかにする。

次に、管きよ更生工法のうち、反転工法、形成工法および製管工法の中から施工実

績等から先と同じ代表的な工法を選定し、製品製造時、運搬時、施工時を含む建設コストと、交通渋滞、騒音、大気汚染、建設副産物を含む環境コストを算出し、それぞれ比較評価を行う。また、従来からの管きよ敷設工法である開削工法との比較も行い、下水管きよの更生工法の建設コストと環境コストを合計したトータルコストとしての評価から、経済面において優れた手法を明らかにする。

以上に示した研究目的に対する各章の位置づけは、次頁の図-1.1に示すとおりである。

本論文においては、下水道事業の新たな展開として注目されている合流式下水道越流システムの制御と管きよ更生工法の社会経済評価に分けて検討を進めることにしている。しかし、最終的には、LCAの概念導入と環境コスト評価指標の導入を共通軸とし、それぞれに対して行った研究の成果として、環境に配慮した経済面で評価が高い下水道施設のシステム構築手法を明らかにすることとしている。

合流式下水道越流システムの制御については、下水道施設から排出される水質汚濁負荷量と地球温暖化ガスの低減化を目指す動きの高まりを背景として、合流改善対策の一つである雨水滞水池を事例に、汚濁負荷削減効果とCO₂排出量の双方から施設そのものを対象とした評価を行い、続いて、既存施設の能力を最大限活用することを前提とした費用面と即効性の両面において効率的な合流改善対策としてRTCの導入を対象とした評価も実施する。さらに、合流式下水道越流システムの制御を導入することにより、下水道事業を実施する自治体の財政面への寄与と公共水域に対する汚濁負荷量排出と雨天時越流回数それぞれの低減につながることをもって、都市環境システムの新たな評価手法として提示する。

管きよ更生工法の社会経済評価については、生活の安全確保を目的とした管きよ更生工法の普及と工法選定における環境配慮の高まりを背景にして、LCAからの評価と環境影響のコスト化から建設コストと合わせて算出したトータルコストによる社会的な評価をそれぞれ行う。加えて、管きよ更生工法による老朽管の改築が社会基盤を維持し、市民の都市生活における安全性の確保と満足度の充足を図ることが可能となり、結果的に都市環境の健全化に資するものになり得るのか提示する。

最後にこれらをまとめて、環境を配慮した経済面で評価が高い下水道施設のシステム構築手法を提案する。

【ライフサイクルアセスメントの概念導入と環境コスト評価指標の導入】

下水道施設から排出される水質汚濁負荷量と地球温暖化ガスの低減化を目指す動きの高まり

生活の安全確保を目的とした管きよ更生工法の普及と工法選定における環境配慮の高まり

合流式下水道越流システムの制御

下水管きよ更生工法の社会経済評価

第2章 合流式下水道越流対策施設の評価に関する研究

第4章 管きよ更生工法のライフサイクルアセスメントに関する研究

汚水と雨水を合わせて排除する合流式下水道において、集中豪雨に伴い頻発している都市型の内水被害を避けるため、雨天時の下水を終末処理場へ送水せず未処理のまま放流堰から越流させていること(以下、「越流水」という)が原因の公共用水域の水質汚濁問題が顕在化している。

下水道は、都市の社会基盤として基幹的な役割を果たしている。しかし、早くから下水道整備に着手した都市では、既に耐用年数を超過した老朽管が相当延長にわたり存在している。そのため、市民の足下の安全を確保するためにも、これらが原因となった道路陥没等の不慮の事故が発生させない取り組みが急がれている。

越流システムの制御を行うに当たり、越流水の水質汚濁負荷の削減量だけを指標とするのではなく、放流時に使用されるポンプ等の施設稼働に伴うCO₂の排出量も勘案し、これらの比を新たに定めた「環境調和性指標」として算出することで、環境に配慮できる方法を検討した。

老朽管を改築する非開削工法の一つである管きよ更生工法を対象に、ライフサイクルアセスメントによる環境負荷の比較評価を従来から多用されている開削工法との間で行った。

その結果、環境調和性指標を採用したモデルケースによる比較検討を通じて、水質汚濁の流出抑制と地球温暖化ガスの排出抑制が同時に可能な事業選定を行えることを明らかにした。

その結果、環境負荷の定量化を通じて、改築以前と同等もしくはそれ以上の流下能力を保持することを目的とした場合、開削工法に比べて管きよ更生工法が環境負荷の排出量が少ないという点において優れていることを明らかにした。

第3章 下水道施設のリアルタイムコントロールによる合流式下水道の改善に関する研究

第5章 管きよ更生工法の社会的な評価に関する研究

雨天時に合流式下水道から生じる越流水の発生抑制を目的に、既存の管きよやポンプ等の下水道施設能力を最大限活用することで、新たな施設増設等を行わない経済的な手法として、分布型モデルを用いたリアルタイムコントロールの導入について検討した。

老朽化した下水管きよの改築を目的とした工事では、路上の交通制限を設けることによる交通渋滞に加え、騒音や振動といった周辺環境に対する影響が生じている。

その結果、越流水が発生する回数および越流水に含まれる汚濁負荷量をも抑制できることが判明した。

下水管きよの更生工法の選定において、建設コストだけでなく、工事に伴う周辺環境への影響が少ない工法選定を行うための評価手法を考案し、モデルケースを対象に環境影響のコスト化を図ることで評価を行った。

さらに、越流水に含まれる汚濁負荷量の削減を同程度に行うことを目的に建設する雨水貯水池と比較して、建設コスト・環境コストの双方において、リアルタイムコントロールが優れていることを明らかにした。

その結果、従来工法である開削工法と比べて管きよ更生工法は、騒音や振動だけでなく、交通渋滞を引き起こす時間が短く、建設コストと環境コストのトータルコストで安価であることが判明し、これらから経済面で優れていることを明らかにした。

下水道事業を実施する自治体における行財政の正常化への寄与と都市環境システムの新たな評価手法の確立

社会基盤を維持し、市民の都市生活の安全性確保と満足度充足を図ることができる都市環境の健全化に資する評価手法の確立

第6章 結論 <環境を配慮した経済面で評価が高い下水道施設のシステム構築手法の提案>

図-1.1 本論文の目的に対する各章の位置付け

1.3 本論文の構成

本論文は、下水道施設のシステム構築における建設コストと環境コストの抑制とこれに基づく必要性の認識を主旨としながら、下水道事業の評価または検証において未だ導入が図られていないLCAの概念と環境コスト評価指標を用いることで、環境を配慮した経済面で評価が高い下水道施設のシステム構築手法の提案を行うものである。

内容としては、合流式下水道越流システムの制御と管きよ更生工法の社会経済評価に大別できる。

まず、合流式下水道越流システムの制御については、下水道施設から排出される水質汚濁負荷量とCO₂に代表される地球温暖化ガスの排出低減化を目指す動きの高まりを背景にして、合流式下水道越流対策施設の評価に関する研究と下水道施設のRTCによる合流式下水道の改善に関する研究のそれぞれについて述べ、これらを総括しながら、下水道事業を実施する自治体における財政の正常化への寄与と都市環境システムの新たな評価手法の確立に係る検討を行う。

次に、管きよ更生工法の社会経済評価については、生活の安全確保を目的とした管きよ更生工法の普及と工法選定における環境配慮への要求を受けて、管きよ更生工法のLCAに関する研究と管きよ更生工法の社会的な評価に関する研究のそれぞれについて言及し、これらの成果をまとめて、社会基盤を維持し、市民の都市生活の安全性確保と満足度充足を図ることができる都市環境の健全化に資する評価手法の確立に関する検討を行う。

なお、論文自体は6章からなる。各章の概要は、以下に示すとおりである。

第1章では、研究の背景として下水道事業の現状を概説しつつ、特に合流式下水道と管きよ更生工法の各々について経緯を説きながら、特に現在の状況について詳述する。また、研究の目的と本論文の構成についても概説する。

第2章では、汚水と雨水を合わせて排除する合流式下水道では、集中豪雨に伴い頻発している都市型の内水被害を避けるため、雨天時の下水を終末処理場へ送水せず未処理のまま放流堰から越流させていることが原因となった公共用水域の水質汚濁問題が顕在化している。このことを受けて、越流システムの制御を行うに当たり、越流水の水質汚濁負荷の削減量だけを指標とするのではなく、放流時に使用されるポンプ等の施設稼働に伴うCO₂の排出量も勘案し、これらの比を新たに定めた「環境調和性指標」と呼ぶべき評価指標を用いて算定することにより、環境に配慮可能な方法の検討を行う。

第3章では、合流式下水道から雨天時に生じる越流水の発生回数とこれに含まれる汚濁負荷排出量の抑制を目的に、既存の管きょやポンプ等の下水道施設能力を最大限活用することによって、新たな施設増設等が不要となる経済的な手法である分布型モデルを用いたR T Cの導入可能性について検討を行う。

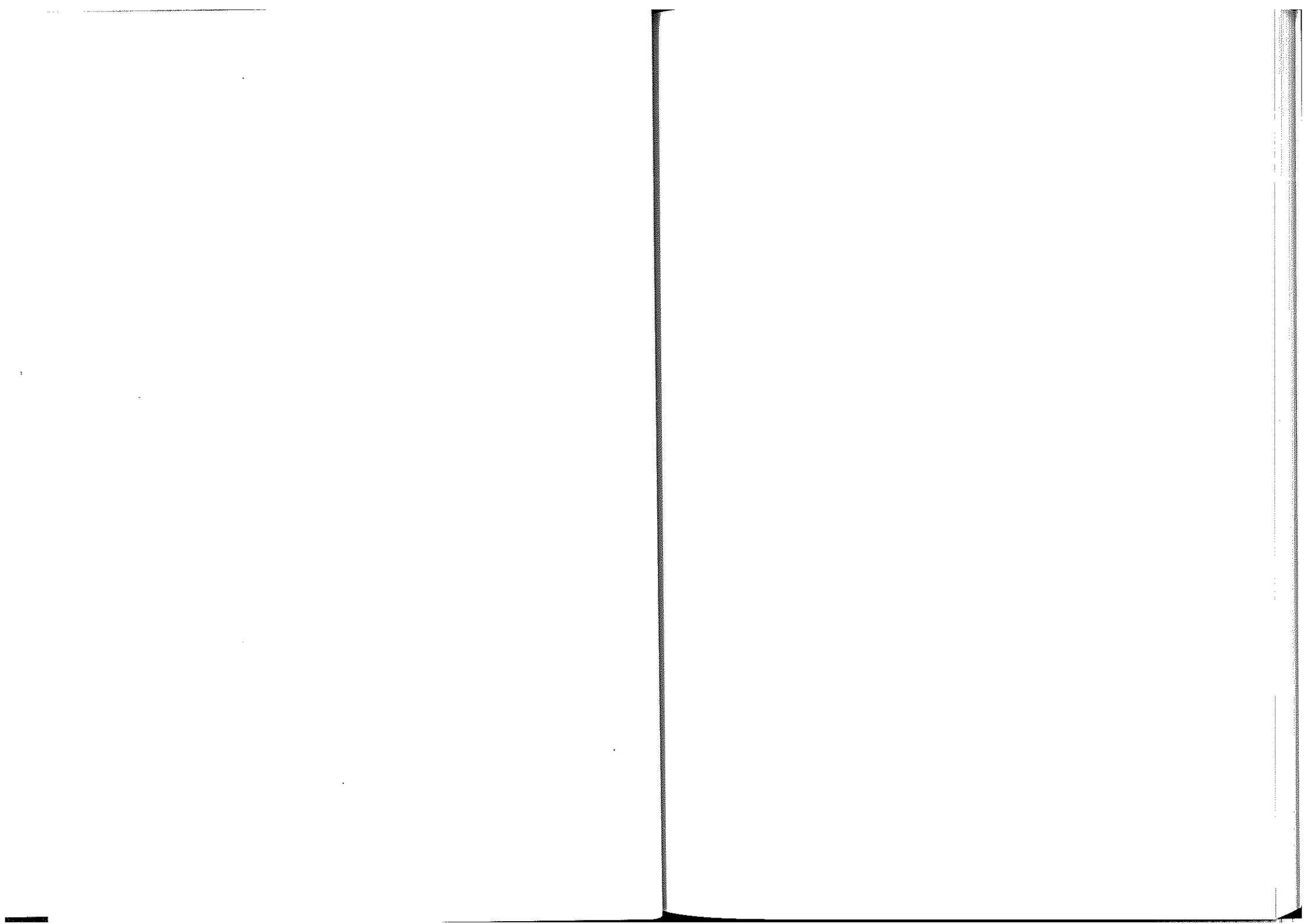
第4章では、早くから下水道整備に着手した都市を中心に、今後は、下水管きょの耐用年数である50年を経過した老朽管の延長が急増することが見込まれている。そのため、市民の足下の安全を確保するためにも、これらが原因となった道路陥没等の不慮の事故が発生しないよう取り組みが急がれていることを受けて、老朽管を改築する非開削工法の一つである管きょ更生工法を対象に、L C Aによる環境負荷の比較評価を従来から多用されている開削工法との間で行う。

第5章では、老朽化した下水管きょの更新を目的とした工事では、路上の交通制限を設けることによる交通渋滞に加え、騒音や振動といった周辺環境に対する影響が生じていることから、管きょ更生工法の選定においては、建設コストだけでなく、工事に伴う周辺環境への影響が少ない工法選定を行うための評価手法を考案し、モデルケースを対象にした環境影響のコスト化をもって評価を行う。

第6章では、結論として、本論文で得られた知見について、合流式下水道越流システムの制御に関しては、雨天時に処理場で処理されないまま公共用水域へ放流されている未処理汚水について、処理場の既存水処理能力を活かして適正処理を行うよう制御することで、新たな雨水滞水池の建設を不要にするといった財政支出の抑制にも寄与するものであるかの評価を行う。また、下水管きょ更生工法の社会経済評価については、今後、増加することが見込まれている下水管きょの老朽管を対象に、まとまった期間にわたり交通支障を伴う開削工法に代わって、非開削工法である管きょ更生工法の導入を図ることで、比較的短い工期をもって、周辺環境に対する騒音、振動の影響低減だけでなく、交通渋滞による社会経済損失も抑制可能であることを通じて、金銭価値化した環境コストと従来から求められている建設コストを合算したトータルコストの比較から、工法選定の判断材料にまで及ぶ評価を行う。さらには、今後の研究展望についても言及する。

【参考文献】

- 1) 建設省下水道法令研究会：逐条解説 下水道法，ぎょうせい，pp.13-18，1992.
- 2) 建設省下水道法令研究会：逐条解説 下水道法，ぎょうせい，pp.3，1992.
- 3) 下水道ビジョン研究会：未来を拓く「下水道ビジョン 2100」，(株)水道産業新聞社，pp.16-19，2006.
- 4) 国土交通省都市・地域整備局下水道部：平成 18 年度 下水道事業予算概算要求概要，平成 17 年 8 月，pp.43，2007.
- 5) 国土交通省都市・地域整備局下水道部：平成 17 年度 全国下水道主管課長会議（第 1 回）資料，平成 17 年 4 月 22 日，pp.127-128，2005.
- 6) S P I R I T 2 1 ホームページ：<http://www.jiwet-spirit21.jp/>
- 7) 松原 誠：解説 改正下水道法施行令 - 今回の改正で下水道事業は何かどう変わる - ，月刊下水道，Vol.27，No.8，pp.14-18，2004.
- 8) 国土交通省都市・地域整備局下水道部：平成 14 年度 下水道事業予算概算要求概要，平成 14 年 1 月，pp.10，2002.
- 9) 国土交通省都市・地域整備局下水道部：平成 20 年度 下水道事業予算概算要求概要，平成 19 年 8 月，pp.29，2007.
- 10) (財)下水道新技術推進機構：管きよ更生工法の品質管理 技術資料，2005 年 3 月，pp.12-15，2005.
- 11) 国土交通省都市・地域整備局下水道部：平成 20 年度 下水道事業予算概算要求概要，平成 19 年 8 月，pp.71，2007.
- 12) 国土交通省都市・地域整備局下水道部：平成 20 年度 下水道事業予算概算要求概要，平成 19 年 8 月，pp.27，2007.
- 13) 植松龍二：管路施設の老朽化の現状と課題，下水道協会誌，Vol.44，No.538，pp.4-6，2007.
- 14) 松宮洋介，深谷渉，福田康雄，榊原隆：下水道管きよのアセットマネジメント研究，下水道協会誌，Vol.44，No.538，pp.13-19，2007.
- 15) 松宮洋介，濱田知幸，岩元誠：多変量解析による下水道管渠の劣化箇所予測の検討，第 44 回下水道研究発表会講演集，pp.526-528，2007.
- 16) 国土交通省：国土交通省環境行動計画，平成 16 年 6 月，pp.2，2004.
- 17) 環境省ホームページ：<http://www.env.go.jp/earth/ondanka/10year/index.html>
- 18) 平成 19 年 6 月 19 日閣議決定：経済財政改革の基本方針 2007 ～「美しい国」へのシナリオ～，平成 19 年 6 月，pp.46，2007.



2.1 緒論

平成14年度に国土交通省が創設した「合流式下水道緊急改善事業」の対象都市は、全国で191都市(全下水道実施都市数:1,489都市,平成18年度末)であり、全下水道処理区域面積では全国の約2割(23万ha/137万ha)、全下水道処理人口普及率では全体の約3割(20%/71%)を占めている³⁾。

合流式下水道は、雨天時にある一定以上の雨水が下水道に流入すると未処理で公共用水域へ放流されることから(Combined Sewer Overflows:CSOs)、水質汚濁が発生しており、その対策立案が急務となっている。

平成13年6月に合流式下水道越流水対策(以下、「合流改善対策」という)の促進を図るため、国土交通省は「合流式下水道改善対策検討委員会」を設置し、今後の合流式下水道越流対策についての基本的な考え方を示している⁴⁾。その中で、当面の改善目標である10年後を目指して、

- ① 汚濁負荷量の削減
- ② 公共衛生上の安全確保
- ③ 夾雑物の流出防止

を骨子として掲げ、ハード対策(施設整備)とソフト対策(住民、関係機関への情報提供等)の重要性を説いている。

これらのうち、ハード対策の一つとして雨水滞水池が挙げられる。この雨水滞水池は合流式下水道からの雨天時越流水を貯留することから、骨子で掲げられている3点すべてに対して有効であり、経済的、用地的制約は受けるものの、今後整備されるケースが増加するものと考えられる。

ところで、近年、公共事業の立案においても、社会の持続可能な発展(Sustainable Development)の視点が必要とされてきており、下水道事業においても、地球温暖化ガスであるCO₂排出量等が少なく、事業効果の高い事業が求められようになっている。この観点から見ると、合流式下水道は分流式下水道と比較して、処理場やポンプ場の規模が大きく、また、その建設や運用において、エネルギー消費量やCO₂排出量も多い²⁾。そのため、合流改善対策として雨水滞水池を建設した場合であっても、汚濁負荷削減効果が高いだけでなく、エネルギー消費量やCO₂排出量が少ないことが循環型社会の構築に向けて重要となってくる。

上記を踏まえ、本研究では、雨水滞水池による合流改善対策を対象として、水環境面からの評価に加え、ライフサイクルCO₂排出量も考慮した評価を行った。

2.2 本研究の位置づけ

国土交通省は、合流式下水道改善事業として、合流式下水道が整備されている自治体に対して、合流式下水道緊急改善計画の策定を求める一方で、同計画に基づく事業を補助対象とするとしている。その補助対象の中には、越流量の抑制手段として、雨水滞水池、雨水貯留管の設置、遮集量の増大といった取り組みが示されている。合流改善対策として、雨水滞水池や雨水貯留管を整備することは、越流量や負荷量の削減が期待できることから、今後、さらに整備が進むものとする。この雨水滞水池や雨水貯留管等を用いた合流改善対策に関する研究では、汚濁負荷を最小にするための分水制御方法等の検討が行われている^{5)・6)}。また、最近では分布型モデルによる解析も行われている^{7)・8)}。

本研究は、これまで明らかにされてきた雨水滞水池等を用いた合流改善対策に関する研究の知見を参考に、分布型モデルを用いて合流式下水道システムからの汚濁負荷量を定量した。さらに、これまでの合流式下水道に関する検討で頻繁に行われてきた越流水による汚濁負荷の定量だけに留まらず、この対策に伴うCO₂排出量もライフサイクルアセスメント（以下、本章において「LCA」という）手法を用いて評価した。

地球環境問題への対応から土木事業においてもCO₂排出量等の地球温暖化ガスの削減が必要になっている。(社)土木学会においても、環境負荷低減型土木構造物設計ガイドラインが取りまとめられる等⁹⁾、構造物の設計分野においても、地球環境や地域環境の保全の観点から、総合的な社会基盤施設の整備方法と評価方法への取り組みがなされている。

ところで、包括的な環境負荷を評価する手法としてのLCAは、今後、環境負荷の低い事業を行っていく上で必須の手法である。下水道分野においても、LCAを用いた評価が行われている。先駆的な事例として、井村ら¹⁰⁾は、管きよ、ポンプ場、下水処理場といったライフサイクルでのエネルギー消費量とCO₂排出量を定量している。齋巻ら¹¹⁾は、終末処理場のライフサイクルでのCO₂排出量を求め、供用時の負荷が建設時負荷に比べて大きいことを示している。しかしながら、合流式下水道改善策に対するLCA評価を行った事例はほとんど見受けられない。

また、環境改善効果と地球環境に与える影響を比べた研究として、稲葉らは、諏訪湖の水環境改善を対象とした研究を多く行っており^{12)・14)}、水環境改善効果とともに副次的に発生するCO₂による地球環境への影響を経済的に評価している。そこでは、経済的評価として水環境改善効果の定量に対しCVM手法を適用し、事業実施によるCO₂排出量に対する損害費用をIPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change: 気候変動に関する政府間パネル)の報告書にまとめられた社会的限界費用の

中から、最も小さい推定結果(769 円/t-CO₂)と最も大きい推定結果(18,000 円/t-CO₂)の平均値を用いた評価等を行っている。阿部¹⁵⁾らは、土木工事の施工に伴って発生する複数の環境負荷の統合化方法として帰属価格の概念やCVMを用いて貨幣換算して評価している。

環境効率に関する研究として、和田らはこれまで数多くの研究成果を発表している¹⁶⁾⁻¹⁹⁾。松永・柏谷²⁰⁾は、污水収集システムについて、その選定と人口密度とがLCC、LC-CO₂にどういった影響を与えるのか評価を行っている。松井ら²¹⁾は、し尿・浄化槽汚泥等の液状廃棄物処理施設について、単位処理量当たりのエネルギー消費量、二酸化炭素発生量を定量している。岡寺²²⁾らは、東南アジアにおける急激な工業化に伴う資源・エネルギー消費による社会経済的影響を産業連関分析により評価し、環境効率改善型施策導入による効果を線形計画モデルにより定量している。

土木分野以外においては、製品設計・製造等について、既にエコデザイン(環境効率)の概念が導入されている²³⁾。山本²³⁾は、エコデザインについて、コスト(C:製造コスト、リサイクルコスト等のライフサイクル全体でのコスト)、インパクト(I:地球温暖化、資源枯渇等の地球環境に与える影響)、パフォーマンス(P:利便性、顧客満足度等)の3要素を用いて、ライフサイクル全体の環境負荷、コストの両面をより最適化し、新たな付加価値の創造を目指すとして、 $P/(C \cdot I)$ という式形を用いて評価している。

環境改善効果と環境負荷の統合評価手法として、経済的手法を用いることは一つの手段と考えられるが、CO₂排出量を経済的に評価する際の推定方法の違いによる不確実性の問題や、環境改善効果をCVMにより評価することのバイアスの問題等が考えられる。そのため、本研究ではエコデザインの考えを参考とした評価指標により、これから本格的に対策が実施される合流改善対策の一つである雨水滞水池を事例として、汚濁負荷削減効果とCO₂排出量の両面から評価を行うこととした。

2.3 評価方法

2.3.1 CO₂排出量を考慮した事業の評価方法

合流改善対策として雨水滞水池等の整備は、公共用水域の水質保全に寄与できるが、整備に伴いエネルギー消費量やCO₂排出量等の増大を招いている。また、公共用水域の水質保全という地域の環境整備事業であっても、地球規模で考えれば、逆に環境に負荷を与えている場合もあり得る。したがって、事業により得られる効果(便益)と事業による地球環境に与える影響(環境負荷)のバランスを如何に取るかが重要となる。すなわち、地域の環境整備事業実施においても、地球環境のことを考慮した評

価が必要である。

これらのことを受けて、環境整備事業の一つとして、合流改善対策事業を取り上げ、CO₂排出量を考慮した評価を行った。事業実施において、その得られる便益は大きく、それに伴う地球環境に与える影響は小さい方が望ましい。そのため、本研究では、エコデザインの考えを参考に式(1)に示す「環境調和性指標」と呼ぶべき評価指標を用いて合流改善事業の評価を行った。

$$\text{評価指標} = \frac{\alpha P_i}{\beta I_i} \quad (1)$$

ここで、P：便益（P：Performance）、I：地球環境に与える影響（I：Impact）、 α 、 β ：便益と地球環境に与える影響の重み、i：対策事業案番号を表す。本評価指標は、複数の事業案の中から地域環境の改善に加え、地球環境に与える影響（本研究ではCO₂排出量）も考慮した効率的な事業を選定する際の指標であり、その値が大きい程、地球環境に与える影響が小さく効率の高い事業ということになる。

便益と地球環境に与える影響の重み（ α 、 β ）の値は、単位当たり汚濁負荷削減量と単位当たりCO₂排出量の関係により定まるが、今回は、 α 、 β をともに1.0として評価を行った。ただし、これは単位当たりの汚濁負荷削減量とCO₂排出量が等価と位置づけているのではない。本研究では、この評価指標を複数の事業案からCO₂排出量も考慮した効率的な事業案の選定指標と位置づけている。そのため、事業案同士の相対関係は、 α 、 β の値に関わらず常に一定であり、 α 、 β を1.0とした本指標においても複数事業案の順位づけが可能であり、最も効率的な事業案の選定はでき得る。

環境影響には、地球温暖化やオゾン層破壊、酸性雨といった様々なものが考えられる。これら複数の項目を評価し、環境影響の総和をインパクト（Impact）として評価することが望ましいが、本研究では、その中で最も懸念されている地球温暖化の進行に着目し、その要因項目の一つであるCO₂排出量をインパクトとした。

本研究では、合流改善対策として雨水滞水池を整備した場合の公共用水域へ与える影響の軽減量（越流水による汚濁負荷削減量）を便益とし、その雨水滞水池の建設・運用に伴うCO₂排出量をLCA手法のインベントリ分析を用いて算出した。

2.3.2 汚濁負荷の評価方法

本研究では、雨水滞水池による汚濁負荷削減効果を定量するため、雨天時のみを対象にして、滞水池の設置の有無による越流水汚濁負荷削減量を求めた。なお、汚濁負荷解析には分布型モデルであるInfoWorks CS（Wallingford Software Limited, U.K.）を用いた。

2.3.3 CO₂排出量の評価方法

本研究ではLCA手法を用いた。LCAは、消費財としての製品を対象として、製品の材料の資源採取、製造、消費、廃棄の全ライフサイクルにわたる環境負荷を総合的かつ定量的に把握することにより製品の環境影響を評価する手法である。LCAには、積み上げによる方法と産業連関表を基にした方法があるが、本研究では、滞水池等の土木構造物は積み上げによる方法を採用し、電気設備や機械設備等は産業連関表を基にした方法を採用した。

2.4 合流式下水道システムの概要および雨天時調査結果

2.4.1 合流式下水道システムの概要

(1) 対象地域の概要

対象排水区は、表-2.1 に示すとおり、合流式下水道が整備されている2つの排水区と、分流式下水道が整備されている処理分区の一部から構成されている。排水区総面積は約829ha、処理人口は73,000人である。住宅地の占める割合が86%と高く、不透水面積が約61%と都市化が進んだ地域である。

表-2.1 対象排水区概要

工種別	屋根	道路・駐車場	庭・公園等
面積	24%	37%	39%
土地利用	住居	商業	工業
	86%	3%	11%

(2) 対象排水区における雨天時下水の流れ

対象排水区であるB処理場集水区のモデル図を図-2.1に、Aポンプ場および雨水滞水池の概略平面図を図-2.2に示す。対象排水区から流出した下水は、それぞれの分水堰へ流入し、分水堰により遮集された下水は、B処理場へ流入する。

雨天時に分水堰を越えた下水は、雨水幹線を経てAポンプ場へ向かい、ポンプ場雨水沈砂池前に設置しているゲート操作により、ポンプ場内への流入がコントロールされている。ゲート操作は、ゲート前流入井に設置している水位計により行われ、一定の水位を越えるとゲートは開けられる。ポンプ場沈砂池に流入した下水は、Aポンプ場に隣接して建設されている雨水滞水池へ2台のポンプによって送水される。雨水滞水池が満水になると、公共用水域への排水に切り替える仕組みとなっている。雨水滞水池に流入した下水は一時貯留された後、晴天時にB処理場へ送水される。現在の雨水滞水池の容量は10,000m³（流域換算：1.2mm）である。

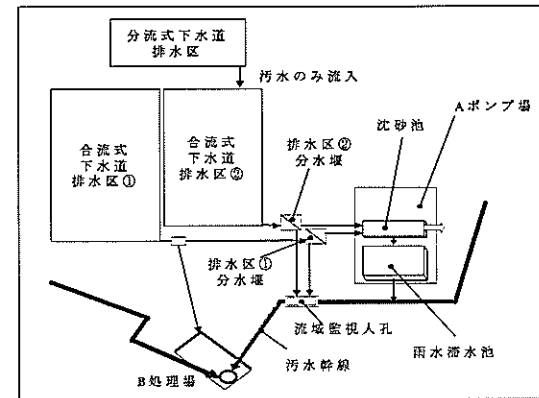


図-2.1 B処理場集水区モデル図

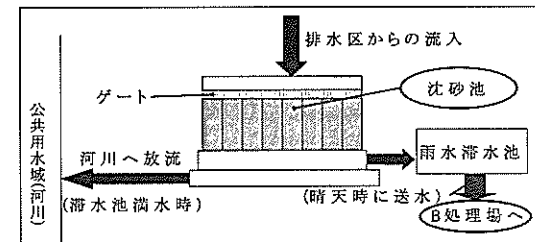


図-2.2 Aポンプ場等概略平面図

2.4.2 雨天時下水水質調査

雨水滯水池を用いて、計画的に効率よく雨天時汚濁流出を制御するためには、雨水滯水池稼働時の滯水池流入下水、排水区での雨天時下水の水質特性を十分に把握する必要がある。そこで、対象排水区の雨天時汚濁流出特性を把握するため、自動採水器を設置し、調査を行った。

(1) 対象降雨概要

雨水滯水池運用後の水質調査は、1999年10月27日～2000年11月17日までの期間に合計27回の調査を実施した。調査対象降雨の概要を表-2.2に示す。

表-2.2 調査対象降雨の概要

総降雨量	3.5～170.0 mm
降雨継続時間	0.2～50.0 hr
平均降雨強度	0.7～35.0 mm/hr
10分間最大降雨強度	3～99 mm/hr

(2) 採水方法

雨天時の流入下水の採水は自動採水器を用いて行った。採水地点はAポンプ場内の雨水滞水池、雨水沈砂池およびB処理場水質監視人孔である。雨水滞水池とポンプ場沈砂池は短時間で水質が変動することから採水間隔を短くした。具体的には、雨水滞水池は流入から約20分で満水となることから、7分間隔の採水とし、沈砂池はポンプによる水域への放流があることから、30分間隔の採水とした。滞水池が満水となる時間(20分)は雨の降り方により多少ずれる場合もあるが、沈砂池前ゲートにより水量調整がされていることから、大きな差はない。また、処理場は、分水堰以降の分流式下水道排水区からの流入があるため短時間による水質変動が少ないことから、採水間隔は1時間とした。

自動採水器の起動について、処理場では場内に設置した雨量計において1mm/hrの降雨が観測された場合に採水を開始し、雨水滞水池では滞水池内にセンサーを設置し、滞水池への流入を観測した時点で採水を開始した。沈砂池については、越流水質を把握するため、過去の調査結果を基にポンプ場前のゲートが開き、滞水池が満水となった後に起動するタイミングを統計解析結果から設定した。具体的には、ポンプ場に設置した雨量計において、降雨量が2時間で4mmを観測し、40分後に採水を開始することとした。

(3) 各採水地点での下水水質調査結果

各採水地点での雨天時下水の単純平均水質を表-2.3に示す。また、一例として、Aポンプ場沈砂池への雨天時流入下水水質の経時変化(2000年5月31日)を図-2.3に示す。

表-2.3 各採水地点の流入下水の平均水質

水質項目	処理場	滞水池	沈砂池
BOD (mg/L)	97	94	44
COD (mg/L)	53	58	32
SS (mg/L)	160	200	110

いずれの水質項目においても、処理場および雨水滞水池への平均流入水質は、沈砂池流入水質よりも高い。これは、流出初期の著しく汚濁した下水が処理場や滞水池に流入しているためである。また、滞水池については、流入開始直後に沈砂池底部の堆積物が巻き上げられ、それが滞水池に流入していることによる。したがって、雨水滞水池がない時は、平均水質で見ても高濃度の下水が公共用水域へ放流されていたことになる。雨水滞水池が設置されている現段階では、沈砂池への流入下水濃度が公共用水域へ放流されていることから、BODとCODはそれぞれ平均水質で44mg/L、32mg/L程度である。しかし、SS濃度については、100mg/Lと現在でも高い。

沈砂池の流入下水濃度が現在でも高い要因は、滞水池容量が小さいためである。図

ー2.3 に示すとおり、ポンプ場への流入下水が濃度のピークを迎える際、一部は雨水滞水池に流入しているものの、滞水池容量が小さいことから滞水池が満水となり、濃度のピークを完全に滞水池で捉えられずに水域へ放流される結果となっている。

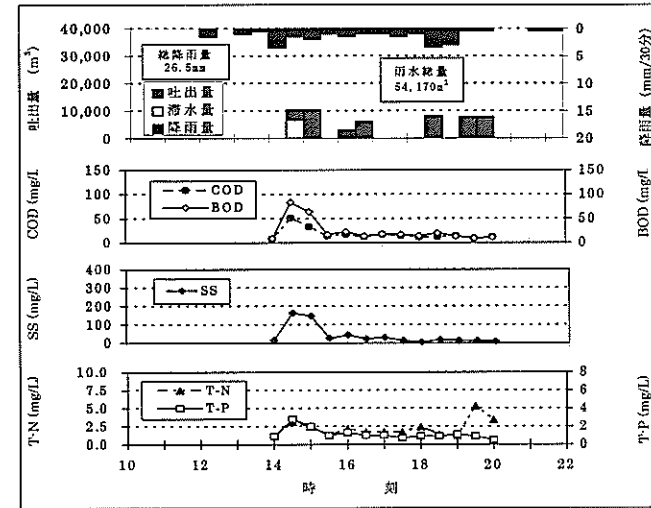


図-2.3 Aポンプ場雨天時流入下水水質経時変化

2.5 雨水滞水池による汚濁負荷削減効果の算定

本章では対象排水区をモデル化し、先の2.4に示した調査結果を用いて Infoworks CS によるシミュレーションから雨水滞水池による合流改善対策効果を算定した。

2.5.1 雨天時流出・負荷解析の方法

(1) 雨水流出解析

雨水流出解析は、有効降雨モデルおよび地表面流出モデルを用いた。地表面流出モデルでは、汚濁負荷解析も併せて行うことから、単一線形貯留池モデルを適用した。有効降雨モデルでは、凹地貯留と浸透をそれぞれ式(2)、(3)にて算出した。

$$D = \frac{k_d}{\sqrt{s}} \quad (2)$$

$$f = f_c + (f_0 - f_c)e^{-ks} \quad (3)$$

ここで、 D ：凹地貯留量(m)、 k_d ：凹地貯留係数(m)、 s ：地表勾配(m/m)、 f ：浸透能

(mm/hr), f_0 : 初期浸透能(mm/hr), f_c : 最終浸透能(mm/hr), k : 比例定数(1/hr), t : 時間 (hr) である。

地表面流出モデルは, 単一線形貯留池モデルの基本式と連続式をそれぞれ式(4)にて算出した。

$$S = KQ \quad (4-1)$$

$$\frac{dS}{dt} = i_n - Q \quad (4-2)$$

ここで, S : 流域に貯留された雨水量(m^3), K : 線形貯留係数(sec.), Q : 流域からの流出量, i_n : 有効降雨量(m^3/s)である。

(2) 汚濁負荷流出解析

汚濁負荷解析は, 晴天時の地表面堆積モデルと雨天時の掃流による流出モデルを用いた。評価項目は, 合流改善の目標値として利用されているBODと今回行った調査において高濃度の流出をしているSSとした。

晴天時堆積負荷量は, 式(5)にて算出した。

$$\frac{dM}{dt} = P_s - K_1 \cdot M \quad (5-1)$$

$$M_0 = M_s \cdot e^{-K_1 ND} + \left(\frac{P_s}{K_1}\right)(1 - e^{-K_1 ND}) \quad (5-2)$$

ここで, M : 単位面積当たりの堆積量(kg/ha), P_s : 堆積係数(kg/ha·day), K_1 : 減衰係数(1/day), M_0 : 晴天時終了後の堆積物量(kg/ha), M_s : 単位面積当たりの初期堆積物量(kg/ha), ND : 先行晴天日数(day)である。

地表面からの掃流によるSS流出負荷量は, 式(6)にて算出した。

$$M_e = K \cdot F \quad (6-1)$$

$$\frac{dM_e}{dt} = K_a \cdot M - F \quad (6-2)$$

$$K_a = C_1 \cdot i^{C_2} - C_3 \cdot i \quad (6-3)$$

ここで, M_e : 浮遊汚濁物量(kg/ha), K : 線形貯留係数(sec.), F : 浮遊汚濁物流出量(kg/ha·s), K_a : 浮遊汚濁物掃流係数(1/s), M : 堆積汚濁物量(kg/ha), C_{1-3} : 係数, i : 有効降雨(m/s)である。

また, BOD等の汚濁物については, SS分と関係があるとして, 式(7)により算出した。

$$F_a = K_{pa} \cdot F \quad (7-1)$$

$$K_{pa} = C_4 (i_{max} - C_5)^{C_6} + C_7 \quad (7-2)$$

ここで F_N :汚濁物流出量(kg/ha・s), K_{pn} :汚濁物掃流係数, i_{max} :5分間最大降雨強度(mm/hr), $C_{4\sim7}$:係数である。

2.5.2 雨天時流出・負荷解析結果および検証

(1) 晴天時流量および濃度

晴天時汚水量は、処理場での実測値を流域内下水道処理人口で割り戻した1人1日当たり排水量にて設定を行った。流域内には一部工場も存在するが、その排出量が不明であるため、前述の方法を用いた。晴天時汚水量の実測値と解析値の比較した結果(図-2.4)解析値は、ほぼ実測値を再現できている。

晴天時汚水濃度として、SSについては平均値を入力値とし、BODについては付着性と溶解性が存在するため、実測値と一致するようトライアルにより溶解性BOD濃度を設定した。晴天時汚水濃度の実測値と解析値の比較を図-2.5に示す。解析値は、実測値を概ね再現しており、設定値は妥当と判断できる。

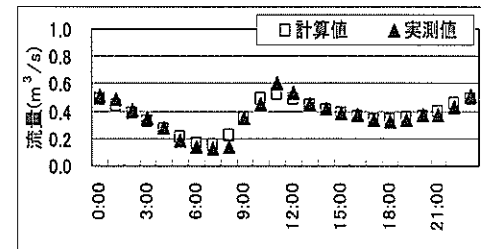


図-2.4 晴天時流量の同定結果

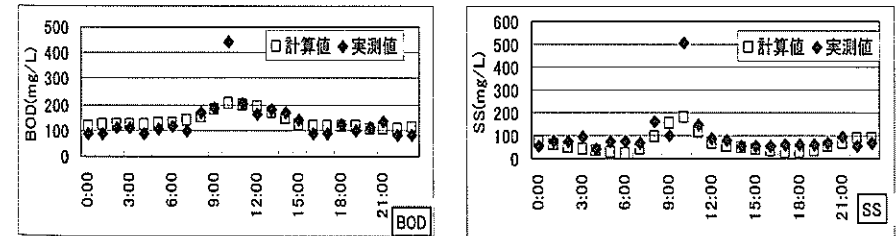


図-2.5 晴天時水質の同定結果

(2) 雨天時流入水量および流入水質

2000年に調査を行った降雨のうち、総降雨量の異なる3降雨を選定し、モデルパラメータの検証を行った。降雨データの一覧を表-2.4に示す。パラメータの設定は、管きよ内水理、汚濁負荷のパラメータは、解析ソフトのデフォルト値(初期設定値)を用

いた。地表面堆積負荷については、これまで和田らが調査^{2.4) - 2.7)}を行ってきた結果を基に、堆積係数(P_s)と減衰係数(K_d)は、対象地域に適した値に変更した。設定したパラメータの一覧を表-2.5および表-2.6に示す。

表-2.4 対象降雨の概要

降雨日	先行晴天 期間(hr)	総降雨量 (mm)	降雨継続 時間(hr)	平均降雨強度 (mm/hr)
2000.6.9	198	19.0	13	1.5
2000.9.23	154	52.0	8	6.5
2000.10.9	144	35.0	12	2.9

表-2.5 流出パラメータ

	浸透域	不透透域
貯留係数 K_d (m)	2.8×10^{-4}	7.1×10^{-5}
初期浸透能 f_0 (mm/hr)	160	—
最終浸透能 f_e (mm/hr)	8.5	—
比例定数 k (1/hr)	2.0	—
流出係数	—	0.55

表-2.6 汚濁負荷解析の設定値

	項目	設定値
地表面 堆積の 設定値	M_d (kg/ha)	0.0
	P_s (kg/ha·day)	2.4
	K_d (1/day)	0.100
係数	C_1	1.0×10^8
	C_2	2.022
	C_3	29.0
係数	C_4	0.280
	C_5	0.000
	C_6	-0.572
	C_7	0.000

また、解析結果の一例として、2000年9月23日の降雨にて実測値と解析値を比較した結果を図-2.6および図-2.7に示す。

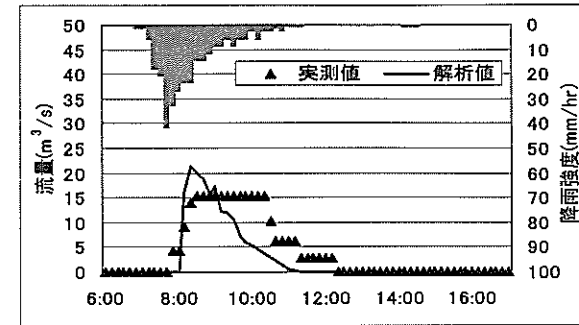


図-2.6 雨天時流入水量の実測値と解析値の比較

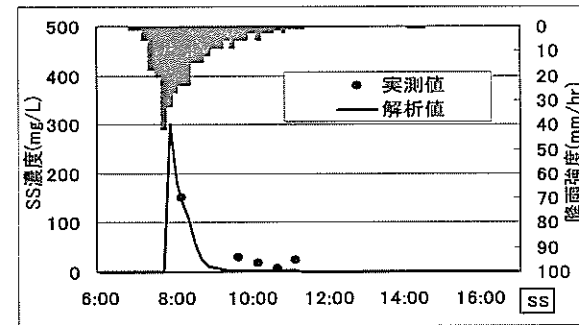
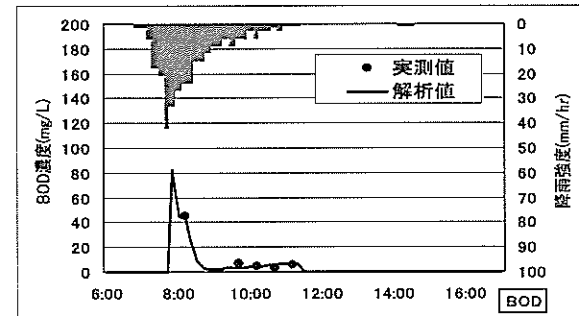


図-2.7 雨天時流入水質の実測値と解析値の比較

解析値の妥当性は、合致率²⁷⁾ (E)を用いて評価した。合致率の算定式を式(8)、(9)に示す。

$$E_Q = \left\{ 1 - \sqrt{\sum (Q_m - Q_s)^2 + TQ} \right\} \times 100 \quad (8)$$

$$E_L = \left\{ 1 - \sqrt{\sum (L_m - L_s)^2 + TL} \right\} \times 100 \quad (9)$$

ここで E_Q ：流量の合致率(%), Q_{sm} ：実測流量, Q_s ：解析流量, TQ ：総流出量, E_L ：負荷量の合致率(%), L_{sm} ：実測負荷量, L_s ：解析負荷量, TL ：総負荷量である。

また、検討を行った各降雨に対する流量とBODとSS負荷量の合致率の一覧を表-2.7に示す。いずれの降雨に対しても合致率は70~90%程度であり、今回設定したパラメータは妥当と判断できる。

表-2.7 流量およびBOD, SSの合致率 (%)

降雨日	流量	BOD	SS
2000.6.9	79.0	70.4	73.5
2000.9.23	89.3	89.7	89.1
2000.10.09	83.8	75.6	73.1

2.5.3 年間解析のシナリオ

(1) 対象降雨

降雨の降り方により越流負荷量は異なるが、本研究では、平均的な降雨年である2000年度の降雨を用いた越流負荷削減量を検討した。降雨観測地点はAポンプ場、独立降雨の定義は4時間無降雨で0.5mm以上の降雨とした。2000年度の降雨特性を表-2.8に示す。表中の全体とは、1年間の全降雨を対象にしたものであり、滞水池稼働日とは、現状の滞水池が稼働した時の降雨を対象にしたものである。

表-2.8 年間解析の対象降雨の概要

	総降雨量 (mm)	降雨回数 (回)	時間最大 雨量(mm/hr)	降雨日数 (day)
全 体	1,241.0	89	37.0	101
滞水池 稼働日	1,182.5	50	37.0	57

(2) 設定シナリオ

合流改善対策の効果を定量するシナリオは、表-2.9に示すとおり、滞水池の容量を変化させた5ケースと比較系として滞水池がない場合の合計6ケースとした。なお、滞水池に貯留された水は晴天時に処理場に送水し、処理後放流されるとした。二次処理除去率は、実測よりBOD97%、SS94%とした。

表-2.9 合流改善対策のシナリオ

ケース	滞水池容量	備考
①	0m ³	滞水池なし
②	10,000m ³ (流域換算：1.2mm)	現状
③	20,000m ³ (流域換算：2.4mm)	現状では高濃度の負荷が越流しているため容量増加
④	30,000m ³ (流域換算：3.6mm)	
⑤	40,000m ³ (流域換算：4.8mm)	
⑥	50,000m ³ (流域換算：6.0mm)	

2.5.4 雨天時流出・負荷の年間解析結果

年間解析を行った結果を図-2.8に示す。図中の処理後放流負荷量とは、雨水滞水池に貯留した水を晴天時に処理場に送水し、処理後河川に放流した負荷量を意味する。

雨水滞水池を設置することにより、河川放流量を約17～47%、BOD負荷量を35～80%、SS負荷量を40～90%削減できる。現状の2倍（ケース③）の滞水池容量を確保することにより、BOD、SS負荷量ともに雨水滞水池がない場合と比較して50%以上の削減効果が見られることから、合流改善効果は大きい。

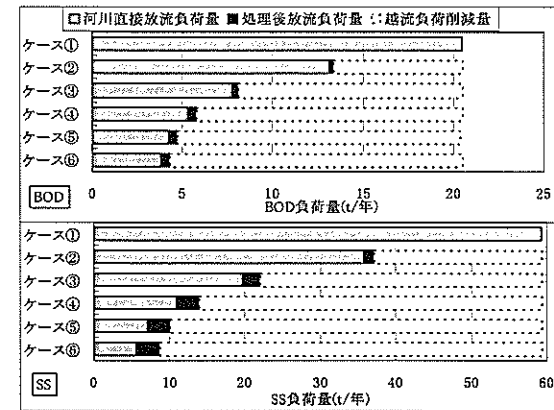


図-2.8 雨天時流出負荷量の年間解析結果

また、単位滞水池容量当たりのBOD、SS越流負荷削減量の一覧を表-2.10に示す。BOD、SSともに単位容積当たりの越流負荷削減効果は、ケース②が最も高い。これは、ケース②の場合滞水池容量が10,000m³のため、ほとんどの降雨において滞水池が満水となるが、滞水池容量が大きくなるケース③～⑥では、降雨規模が小さい場

合、滞水池が満水となる前に流入水量がなくなることがあるためである。

表-2.10 単位滞水池容量当たりのBOD、SS越流負荷削減量

(単位: kg/m³)

ケース	②	③	④	⑤	⑥
BOD	0.72	0.62	0.49	0.39	0.32
SS	2.21	1.87	1.51	1.23	1.01

2.6 合流改善対策によるCO₂排出量の算出

表-2.9で示した合流改善対策のシナリオに応じたCO₂排出量を本章では定量した。なお、今回は、雨水滞水池設置に伴う増加分のみを対象とするため、ケース①(滞水池がない場合)についてのCO₂排出量は算出しない。

2.6.1 評価範囲および耐用年数

(1) 評価範囲

評価範囲は、雨水滞水池の建設・運用、雨水滞水池増設に伴うAポンプ場改良(建設)と雨水滞水池増設に伴うポンプ場運用および滞水池貯留水の二次処理に係るB処理場運用とした。本研究において雨水滞水池設置に伴う増加分のみを対象としたのは、合流式下水道が整備された地域での雨水滞水池を導入する際の適正規模をCO₂排出量も含めて評価するためである。既設分を含めた評価では、下水道事業全体の便益を評価する必要があるが、本研究では雨水滞水池の整備事業の評価を対象とするため、既設分は考慮していない。

雨水滞水池建設時、ポンプ場改良工事の対象項目は資材使用、建設機械の燃料消費、建設機械の損耗に伴うものとする。Aポンプ場およびB処理場の運用は消費するエネルギー、薬品等である。なお、評価項目はCO₂排出量とする。

(2) 耐用年数

耐用年数は、土木・建築関連の構造物については45年、機械・電気設備については15年として計算を行った。

2.6.2 CO₂排出量の算出方法

(1) 計算方法および消費原単位

土木・建築については、資材、工事のデータを積み上げ、原単位は産業連関法により求めたものを使用する併用法とした。機械・電気設備については用いられている機器が

多種であり、かつ多数であったため産業連関表による方法とした。

消費するCO₂排出原単位には、LCA実務入門²⁸⁾のAppendix3に示されている代表値を主として用い、その他には、下水道施設、資材のCO₂排出量に関する既往研究^{29), 30)}に示されている値を用いた。なお、使用した主なCO₂排出原単位を表-2.11および表-2.12に示す。

表-2.11 滞水池建設に伴うCO₂排出原単位

対応産業項目	CO ₂ 排出原単位	参照
軽油	0.721 kg-C/L	30)
遠心力鉄筋コンクリート杭	136 kg-C/t	28)
プレストレストコンクリート製品	250 kg-C/t	28)
生コンクリート	89 kg-C/m ³	28)
普通ポルトランドセメント	217 kg-C/t	28)
道路用砕石	2,061 kg-C/千t	28)
小型鉄筋用異形棒	484 kg-C/t	28)
遠心力鉄筋コンクリート管	136 kg-C/t	28)
プレストレストコンクリート製品	250 kg-C/t	28)
鋳鋼普通鋼	1,628 kg-C/t	28)
直管普通鋳鉄	629 kg-C/t	28)
産業用重電機器一般	13.9 kg-C/万円	28)
電気通信施設建設	15.0 kg-C/万円	28)
ポンプおよび圧力機一般	15.5 kg-C/万円	28)

表-2.12 ポンプ場、処理場運用に伴うCO₂排出原単位

投入物	原単位項目	CO ₂ 排出原単位	参照
重油	A重油	0.74 kg-C/L	30)
次亜鉛	次亜塩素酸ナトリウム	87.55 kg-C/t	29)
亜塩素酸ソーダ	亜塩素酸ナトリウム	2,721 kg-C/t	28)
液体塩素	液体塩素	245.5 kg-C/t	28)
苛性ソーダ	水酸化ナトリウム	255.8 kg-C/t	28)
電力	電力	0.104 kg-C/kWh	30)
都市ガス	都市ガス	0.543 kg-C/m ³	30)
LPガス	プロパンガス	1.701 kg-C/m ³	30)

(2) 建設に伴うCO₂排出量の算出方法

雨水滞水池建設およびポンプ場改良工事のCO₂排出量は、現在建設され運用されている10,000m³の雨水滞水池に係る実際の工事の数量計算書から、資材使用量および使用機械の期間を読み取りCO₂排出原単位を乗じて、耐用年数で除した1年間当たりで評価した。なお、数量計算書のデータは、滞水池建設工事を表-2.13のように分類し、土木・建築については工程毎（土工、仮設工、地盤改良工、躯体工、流出管きょ敷設工、雑工）に分類し、読み取った。また、資材・機械の輸送は20tトラックを使用するとし、輸送距離はヒアリング結果より片道10kmとした。

表-2.13 雨水滞水池建設工事の分類

(土木・建築)	雨水滞水池土木工事
	〃 築造工事
(機械・電気)	雨水滞水池機械設備工事
	〃 電気設備工事
	〃 機械設備工事
	A ポンプ場雨水ポンプ設備工事
	〃 雨水沈砂池機械設備工事
〃 電気設備工事	

ケース③～⑥の雨水滞水池容量 20,000～50,000m³ の建設時CO₂排出は、10,000m³ の雨水滞水池を容量分併設すると想定し、10,000m³ の滞水池工事のみにかかるCO₂排出量をそれぞれ2～5倍した。また、ケース③～⑥のポンプ場のポンプ台数は、ケース②と同じ（増設せず）とし、滞水池への送水時間を長くすることとした。送水時間を長くした場合の問題として、滞水池に送水中に降雨が強くなった場合、ポンプ場や周辺で浸水が生じることが考えられる。

しかし、本解析では、ポンプ場流入きょにおいて浸水危険水位を越えた場合は、バルブ操作により、滞水池への送水から河川への放流に切り替えると設定した解析を行っている。そのため、本研究では、ポンプは増設していない。

(3) 運用に伴うCO₂排出量の算出方法

運用に伴うCO₂排出量は、Aポンプ場およびB処理場の運転管理記録データを基にして、年間の施設運用（ポンプ設備、沈砂池設備、ゲート設備、滞水池設備等）にかかる電力・重油消費量および薬品消費量等（次亜鉛、亜塩素酸ソーダ、苛性ソーダ等）にCO₂排出原単位を乗じ、ポンプ場および処理場への年間流入水量で除した単位水量当たりのCO₂排出量を用いた。計算の結果、滞水池設置に伴う運用のCO₂排出量は、ポンプ場運用（滞水池含む）が、0.011kg-C/m³、二次処理運用が0.042kg-C/m³

である。

2.6.3 CO₂排出量算出結果

上述の方法により算出した雨水滞水池建設・運用に伴う増加CO₂排出量の結果を図-2.9に示す。

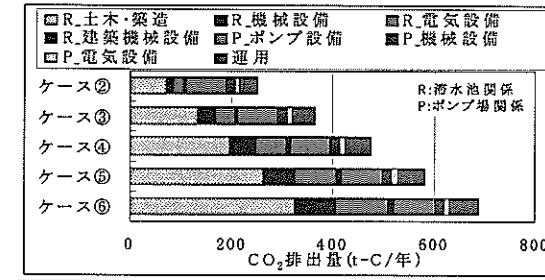


図-2.9 雨水滞水池建設・運用に伴うCO₂排出量

ケース②～⑥は、いずれのケースも土木・築造工事とポンプ設備工事によるCO₂排出量の合計が総CO₂排出量の50%以上を占めている。各工程の中で、CO₂排出量が最も多いのは、ケース②ではポンプ設備工事(32%)、ケース③～⑥では土木・築造工事(37～47%)である。

運用に伴うCO₂排出量はケース②～⑥でそれぞれ14%、12%、11%、9%、8%であり、建設時に比べるとその割合は低い。また、滞水池容量が大きくなるほど、運用時のCO₂排出割合は小さくなる。運用時のCO₂排出量の占める割合が低い理由は、評価範囲を雨水滞水池設置による増加分としているため、評価対象をポンプ場運用(滞水池含む)と滞水池に貯留された水の二次処理のみとしているためである。

単位滞水池容量当たりのCO₂排出量は、ケース②～⑥で各25.1、18.2、15.8、14.6、13.8kg-C・年/m³であり、滞水池容量が大きいくほど単位滞水池容積当たりのCO₂排出量は少ない。これはケース③～⑥の場合、ポンプ場のポンプ台数は、ケース②と同じ(増設せず)とし、滞水池への送水時間を長くしたためである。

2.7 CO₂排出量を考慮した雨水滞水池導入による合流改善効果の評価

2.3で示した評価指標を用いて合流改善効果を評価する。

2.7.1 評価指標値の算出

本評価指標は、式(1)で示したとおり、単位CO₂排出量当たりのBODもしくはSSの越流負荷削減量であり、値が大きいほど効率的であることを意味する。評価指標の算出は、2.5で求めたBOD、SS越流負荷削減量(図-2.8)を2.6で算出した各ケースに伴うCO₂排出量(図-2.9)で除して求めた。

2.7.2 評価指標値の算出結果

評価指標の算出結果を図-2.10に示す。

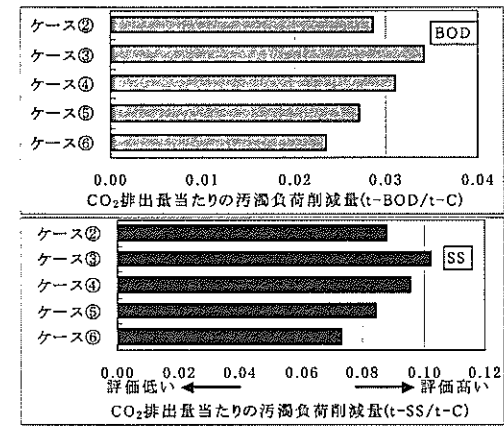


図-2.10 ケース毎のCO₂排出量当たり汚濁負荷削減量の比較

今回のシナリオにおいて、2.5で求めた単位滞水池容量当たりの越流負荷削減量は、ケース②が最も効率的であり、2.6で求めた単位滞水池容量当たりのCO₂排出量はケース⑥が最も効率的であった。しかし、今回提案した越流負荷削減効果とCO₂排出量を考慮した評価指標による評価ではケース③(滞水池容量:20,000m³)が最も効率的である。

これは、ケース④～⑥の越流負荷削減量はケース③より多いが、同時にCO₂排出量もケース③と比べ非常に大きいため、両者を考慮した場合、ケース③よりも評価は低い。ケース②は、その逆で、越流負荷削減効果が小さいためにケース③よりもやや評価が低い。今回検討したケースの評価順位は、ケース③>④>②>⑤>⑥となる。

2.7.3 雨水滞水池導入による越流水対策の評価

評価指標として適用したCO₂排出量に対する汚濁負荷削減量は、越流負荷削減と

いう地域環境に対する影響とCO₂排出量という地球環境に対する影響を考慮した指標である。この指標は、CO₂排出量等の地球環境に与える負荷の低減が必要とされる現在において重要なものである。今回の検討ケースのように越流負荷削減量、あるいはCO₂排出量のどちらかに問題があるケースでは評価が低くなる。そのため、本指標を事業選定の評価指標とすることにより、複数の事業案からCO₂排出量も考慮した効率的な事業選定が可能である。

本評価指標は、今後の持続可能な発展を進めていく上で、地球環境に対する影響も要因としており、今回の適用事例からもCO₂排出量等の地球環境に対する影響項目を考慮した効率的な事業選定の評価指標として有用な指標である。

今回の検討では、評価指標の α 、 β を1.0としているが、今回のような事業案同士の相対的評価ではなく、絶対的評価指標として使用する際は、1t当たりの汚濁負荷削減量の価値と1t当たりのCO₂排出量に係る価値の関係から α 、 β を適切に設定する必要がある。また、インパクトとして、CO₂排出量のみを対象としているが、それ以外の影響項目についてもできるだけ多く取り入れていく必要がある。

2.8 結論

本研究では合流改善対策として、今後ますます整備がされると考えられる雨水滞水池整備事業を対象に、事業により得られる効果に加え、事業に伴うCO₂排出量も考慮した評価を行った。

雨水滞水池のCO₂排出量を考慮した評価は、雨水滞水池容量の異なる5ケース（ケース②～⑥：滞水池容量10,000m³～50,000m³（10,000m³ずつ増加））を設定し検討した。ここで得られた知見を以下に示す。

- 1) 対象流域の越流水の実態調査を行った結果、現状として、10,000m³（流域換算：1.2mm）の滞水池があるにもかかわらず、平均越流水濃度はBODで44mg/L、SSで100mg/Lと高い状況にある。
- 2) 雨水滞水池による越流負荷削減効果をシミュレーションにより定量したが、実測値と解析値を比較した結果、今回設定したパラメータで流量、水質ともに高い合致率（70～90%）を得られており、本シミュレーションは妥当である。
- 3) 上記のシミュレーションにより、平均的な降雨年（年間降雨量1,241mm）により年間解析を行った結果、総越流負荷削減量は最も滞水池容量の大きいケース⑥が多い（BOD：80%、SS：90%）。しかし、単位滞水池容量当たりの越流負荷削減効率は、ケース③～⑥の場合、降雨規模の小さい降雨において、滞水池が満

水とならないことがあるのに対し、ケース②の場合、ほとんどの降雨で滞水池が満水となることから、滞水池容量の最も少ないケース②（BOD：0.74kg/m³，SS：2.35kg/m³）が高い。

- 4) ケース②～⑥のライフサイクルでのCO₂排出量を定量した結果、雨水滞水池事業では、土木・築造工事とポンプ設備工事に伴うCO₂排出量の占める割合が50%以上と高い。運用に伴うCO₂排出量は、ケースにより異なるが、8～14%と建設に比べ、CO₂排出割合は低い。単位滞水池容量当たりのCO₂排出量はケース⑥が最も少ない。
- 5) ケース②～⑥の事業に対してCO₂排出量を考慮した評価の結果、最も評価の高いケースは、越流負荷削減面とCO₂排出量の両面でバランスが取れていたケース③である。
- 6) 今回適用した評価指標は、複数事業案の中からCO₂排出量等地球環境に与える影響も考慮した効率的な事業選択の際に有用な指標である。

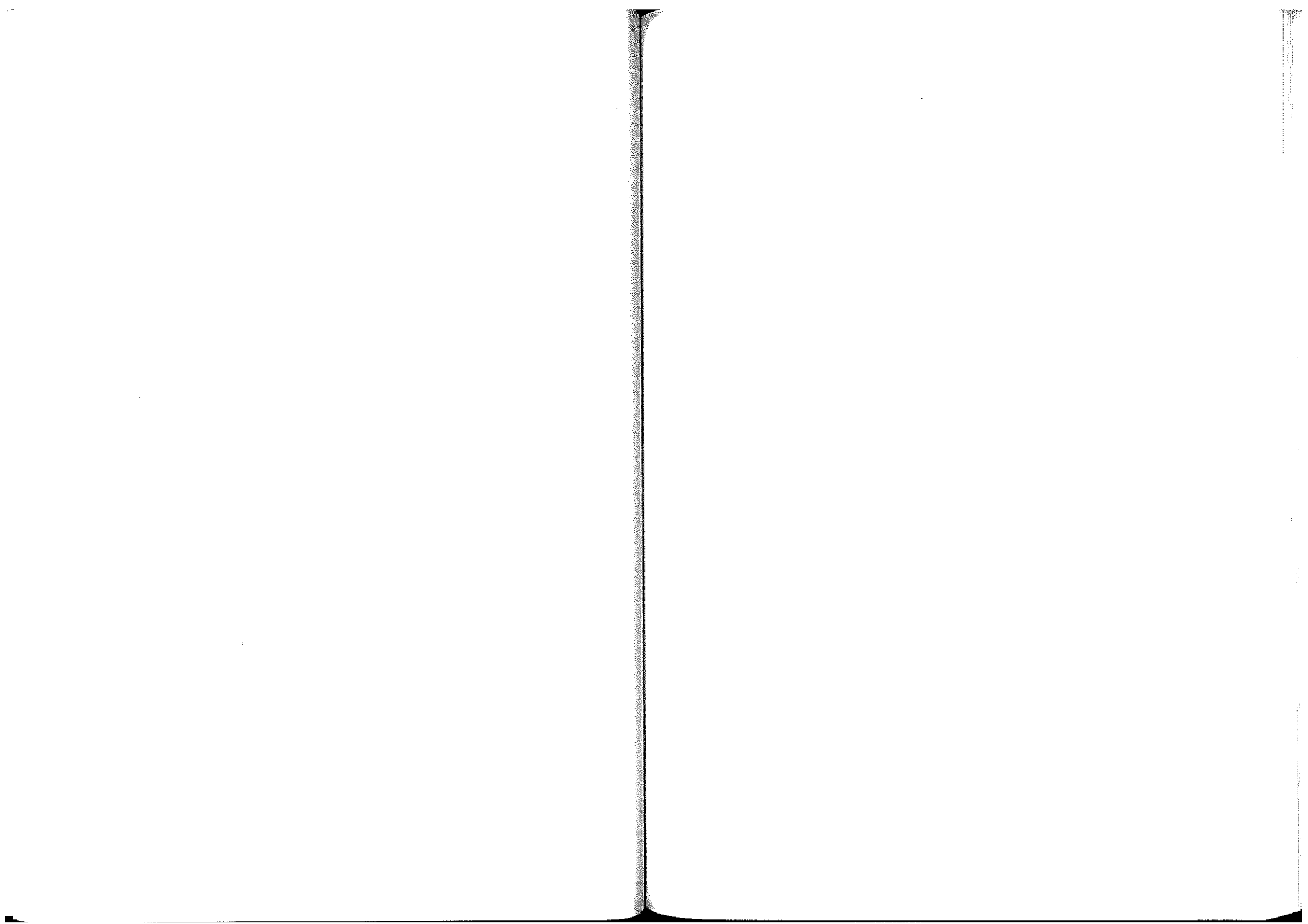
現在の公共事業は、得られる効果を事業の目標とし、費用効果分析（B/C）による評価は行われている。しかし、今回検討したような地球環境に対する影響を事業選定の指標として政策に反映された事例はほとんどない。本研究の対象とした合流改善対策としての雨水滞水池整備事業のような地域環境を改善する事業であっても、それに伴うエネルギー消費やCO₂排出といった面で、地球環境に対しては負の影響を与えている。

そのため、今後、持続可能な社会システムを構築する上で、地球環境に対する影響を考慮することは必須である。また、CO₂排出量等の多い公共事業に対しては、今回検討したように事業により得られる効果と地球環境に与える影響のバランスを考慮した評価指標により、効率の高い事業を選定することが重要である。

【参考文献】

- 1) 尾崎 平, 和田安彦, 村岡 基: ライフサイクルCO₂を考慮した合流式下水道越流水対策施設の評価ー雨水滞水池を事例としてー, 土木学会論文集, No. 776/VII-33, pp. 71-82, 2004. 11
- 2) 和田安彦, 三浦浩之: 大規模雨天時下水幹線の適正制御による合流式下水道の改善に関する研究, 土木学会論文集, No. 573/VII-4, pp. 39-47, 1997.
- 3) 国土交通省都市・地域整備局下水道部: 平成 20 年度 下水道事業予算概算要求概要, 平成 19 年 8 月, pp. 29, 2007.
- 4) 国土交通省: 合流式下水道の改善対策に関する調査報告書, 2002.
- 5) 高柳枝直, 玉野富雄, 福井聡, 寺川孝: 雨天時専用大幹線を利用した越流負荷の削減手法, 下水道協会誌増刊号論文集, No. 7, pp. 43-55, 1993.
- 6) 山本正, 米沢康雄: 流域下水道増補幹線による合流改善方策について, 第 31 回下水道研究発表会講演集, pp. 811-813, 1994.
- 7) 古米弘明, 市川新, 脇岡靖明: 分布型モデルを用いた浸水対策用雨水幹線を有する合流式下水道における雨天時流出汚濁負荷解析, 下水道協会誌, Vol. 38, No. 467, pp. 99-111, 2001.
- 8) 増田貴則, 市川新, 森高志: 分布型雨水流出モデルを用いた合流・分流式併合下水道区域における雨水流出負荷量の推定とその削減のためのシナリオ解析, 第 37 回下水道研究発表会講演集, pp. 197-199, 2000.
- 9) (社)土木学会: 環境負荷低減型土木構造物設計ガイドライン, 2001.
- 10) 井村秀文, 銭谷賢治, 中嶋芳紀, 森下兼年, 池田秀昭: 下水道システムのライフサイクルアセスメントーLCE及びLC-CO₂による評価ー, 土木学会論文集, No. 552/VII-1, pp. 75-84, 1996.
- 11) 龜巻峰夫, 藤岡荘介, 内藤弘: 運転時の負荷が大きい上下水道施設の環境負荷の評価, 土木建設業における環境負荷評価(LCA)研究小委員会講演要旨集, pp. 57-62, 1997.
- 12) 稲葉陸太, 中谷隼, 荒巻俊也, 花木啓祐: 複合的な対策による諏訪湖水環境改善および副次的 CO₂ 排出による地球温暖化への影響の統合的評価, 水環境学会誌, Vol. 25, No. 11, pp. 635-640, 2002.
- 13) 稲葉陸太, 花木啓祐, 中谷隼, 荒巻俊也: 諏訪湖水環境改善効果と対策に伴う地球環境への影響の費用便益換算による統合的評価, 環境システム研究論文集, Vol. 29, pp. 37-45, 2001.
- 14) 稲葉陸太, 花木啓祐, 荒巻俊也: 下水の高度処理導入による地球及び地域への環境負荷変化量の統合的評価, 環境システム研究論文発表会講演集, Vol. 28,

- pp. 55-60, 2000.
- 15) 阿部俊, 前田剛志, 近藤光男, 廣瀬義信: 土木工事の施工に伴う各種環境負荷の貨幣価値による統合評価, 第28回環境システム研究論文発表講演集, pp. 121-129, 2000.
 - 16) 尾崎平, 三浦浩之, 和田安彦, 渡邊雅巳: 環境効率指標による都市内河川環境改善事業の評価, 土木学会論文集, No. 734/VII-27, pp. 55-66, 2003.
 - 17) 多田律夫, 和田安彦, 三浦浩之, 大山秀格: 水自給型都市構築システムの環境効率評価, 水環境学会誌, Vol. 23, No. 2, pp. 93-100, 2000.
 - 18) 多田律夫, 三浦浩之, 和田安彦, 大山秀格: 分散型水供給システムのエコデザインによる評価, 環境システム研究論文集, Vol. 28, pp. 201-206, 2000.
 - 19) 三浦浩之, 尾崎平, 和田安彦: エコデザインによる都市内水供給システムの再生, 水環境学会誌, Vol. 25, No. 7, pp. 417-424, 2002.
 - 20) 松永薫児, 柏谷衛: LCC及びLC-CO₂による汚水収集システムの評価に関する研究, 土木学会論文集, No. 685/VII-20, pp. 49-68, 2001.
 - 21) 松井康弘, 山田正人, 井上雄三, 河村清史, 田中勝: し尿・浄化槽汚泥等の液状廃棄物処理施設のライフサイクルインベントリー分析, 土木学会論文集, No. 706/VII-23, pp. 19-29, 2002.
 - 22) 岡寺智大, 盛岡通, 吉田登: 環境負荷の地域間相互誘発構造に着目した環境効率改善施策導入の効果に関する研究 中国長江流域・珠江流域を対象として, 環境システム研究論文集, Vol. 28, pp. 453-458, 2001.
 - 23) 山本良一: 戦略環境経営エコデザイン, ダイヤモンド社, pp. 12, 1999.
 - 24) 和田安彦, 三浦浩之: 分流式下水道の雨天時流出に伴う汚濁負荷流出モデルとその適用, 土木学会論文集, No. 369/II-5, pp. 287-293, 1986.
 - 25) 和田安彦, 田内和三: 用途地域別路面堆積負荷の定量と特性, 用水と廃水, Vol. 26, No. 7, pp. 35-42, 1984.
 - 26) 和田安彦: 非点源負荷における路面堆積負荷の定量と流出シミュレーションに関する研究, 水質汚濁研究, Vol. 4, No. 3, pp. 31-43, 1981.
 - 27) 和田安彦, 三浦浩之: 都市域ノンポイント汚染源負荷の堆積・流出挙動モデルと流出制御に関する研究, 土木学会論文集, No. 559/VII-2, pp. 61-71, 1997.
 - 28) (社)産業環境管理協会: LCA実務入門 (CD-ROM) Appendix3
 - 29) 齋巻峰夫, 野池達也: LCA手法を用いた排水処理の評価手法に関する研究, 土木学会論文集, No. 643/VII-14, pp. 11-20, 2000.
 - 30) 電力中央研究所: 温室効果から見た化石燃料の比較, 1990.



第3章 下水道施設のリアルタイムコントロールによる合流式下水道の改善に関する研究^{1)~6)}

3.1 緒論

国土交通省は、平成16年度に今後の新たな下水道技術の開発・導入の内容および方策を示した「第3次下水道技術五箇年計画」を策定した。同技術五箇年計画では、32の技術開発項目が設定され、その一つに流域の水質を良好に保全するための課題として、合流式下水道からの雨天時越流水等の汚濁負荷の削減技術が取り上げられている⁷⁾。

合流式下水道では、雨天時にある一定量の雨水が下水道へ流入すると、未処理のまま公共用水域に放流されることから、これを「合流式下水道越流水」と呼び、英語では“Combined Sewer Overflows”（以下、本章において「CSOs」という）という。この合流式下水道越流水は、公共用水域の水質汚濁、公衆衛生、景観等に悪影響を与えている。国土交通省は、同技術五箇年計画の策定に先立ち、平成13年に「合流式下水道改善対策検討委員会」を設置し、その成果として今後10年の間に、汚濁負荷量の削減、未処理放流回数の半減、夾雑物の流出防止を行うことを掲げ、合流式下水道越流水対策として取り組むべき改善目標を示している⁸⁾。また、下水道技術開発プロジェクト（SRIRIT21）における最初の課題として、合流式下水道改善対策に必要な技術が対象となる等⁹⁾、CSOs対策は急務な課題として取り組まれており、和田らは従来から研究を行っている^{1)~6)}。

CSOs対策として、雨水滞水池や貯留管の設置等が挙げられるが、これらは、設置コストや都市部における施設設置用地確保の困難性等から、整備には長期間を要するという問題がある。これに対し、海外では既存下水道施設を適正に制御し、その能力を最大限活用するリアルタイムコントロール（以下、本章において「RTC」という）が効率的な合流式下水道改善対策として実施されており^{10)~12)}、我が国においても一部でその導入が検討され、改善効果が期待されている¹³⁾。合流式下水道越流水対策としてRTCを行うメリットは、既存施設に堰やゲート、監視装置を設置し、既存施設を活用することで、貯留施設の建設よりも安価に合流式下水道越流水対策が可能である。また、滞水池等を整備する場合と比べて整備に要する期間を短縮できるため、越流水量、負荷量

の削減に即効性がある。

しかしながら、R T Cは、降雨状況や管きょネットワーク内の流量・水質といった情報を基に下水道施設の制御を行うため、適切な施設制御が必要である。そのためには刻々と変化する複雑な雨水流出状況を正確に把握することが必要である。これに対し、欧米で開発された分布型モデルは下水道ネットワークにおいて任意地点での雨水流出水量・水質の挙動を把握できる等、複雑な雨水流出現象を再現可能なツールとして、我が国でも近年利用され始めている。

以上に示す背景から、本研究では、雨水滞水池が設置されている合流式下水道排水区を対象に、分布型モデルを用いた解析により、R T Cを実施した場合の合流式下水道改善効果を定量することで、その有効性を明らかにする。

3.2 本研究の位置づけ

合流式下水道改善としてのR T C実施には、管きょネットワーク上の水量・負荷量の流出挙動を把握する必要がある。その手法の一つとして分布型モデルの活用がある。分布型モデルによる合流式下水道からの雨天時流出汚濁解析の研究において、古米ら¹⁴⁾は、S Sを対象に解析を行い、汚濁負荷解析において地表面や管きょ内の初期条件の取り扱い方が重要であることを示している。また、雨水幹線を活用した汚濁負荷の削減効果について、雨水幹線へのゲートの設置や堰の調整により負荷削減効果があることを明らかにしている。脇岡ら¹⁵⁾は分布型モデルにG I Sデータの活用を検討しており、雨水流出および汚濁負荷解析に下水道台帳データおよびG I S情報である細密数値情報から排水区のモデル化を行い、これにより雨水流出特性に関するパラメータの決定方法を提案し、妥当なハイドログラフを得ることができることを示している。

しかし、分布型モデルによる汚濁負荷解析においては、我が国の合流式下水道越流水の水量、負荷量予測に適用可能かどうかについての研究は未だ少なく、行われてきた研究においても、S Sのみを対象とした事例である¹⁴⁾。「合流式下水道越流水の汚濁負荷量の削減目標に係る水質項目はB O Dを原則とする」と指針¹⁶⁾に明記されていることから、自治体の多くは、改善目標の水質項目をB O Dとしており、B O DとS Sの両者について適用可能かどうかの検討が必要である。

R T Cに関して、ドイツのAachenでは、貯留タンクの流出弁の最適な配置を行うことにより、越流負荷量を平均約70%、B O D負荷量を約50%削減できるとしている¹⁰⁾。また、ドイツのDresdenでは、分布型モデルであるHYSTEM-EXTRANPによって管内の流れの挙動と汚濁物の輸送をシミュレーションし、管内16地点に設置されたコントロール装置により、貯留池や処理プラントへの流入をコントロールしている。これにより越流水量を平均で約40%、越流負荷量(C O D)を約55%削減できるとしている¹¹⁾。スペインのバルセロナでは「都市下水道システムのリアルタイムコントロール」(R T C U D S)を導入している。このR T C U D Sは、まず降雨予測から合流式下水道越流水の汚濁負荷量を予測し、次に貯留施設の遠隔操作によりC S O sを削減し、下水処理場流入量の制御を行っている。その制御により越流水量を年間で40%、B O D負荷量を30%以上削減できるとしている¹²⁾。このように、海外ではR T Cを行うことにより効率的にC S O sを削減できるとの事例が多く発表されている。

これに対し我が国では、東京都において、降雨予測や管きよ内水位データ等を基にポンプの高水位運転を行い、それにより既設管きよを貯留管として活用するR T Cが試験的に導入されている¹³⁾。また、分流式下水道整備地区のノンポイント汚染対策として金ら¹⁷⁾が、汚濁制御、洪水制御、水利用の三機能を持つ雨水貯留施設のR T Cを行うことにより、単独降雨、特に後期集中型の大降雨において、R T Cを行わないケースよりS S負荷量が約20%削減できることを示している。

しかし、我が国における合流式下水道越流水対策としてのR T C実施に関する研究は少なく、年間を通してのR T Cによる汚濁負荷削減効果や、それによるR T C導入の有効性の評価をしたものは見られない。

本研究では、現在の下水道事業としての取り組みが急務とされている合流式下水道越流水対策の方法の一つとして、実際の下水处理場やポンプ場における雨天時放流量、放流水質等の調査結果からモデルを構築し、R T Cの運用方法ならびにその効果について検討した。

R T Cは、既存下水道施設の能力を最大限活用するため、費用や即効性の面において効率的な合流式下水道改善対策として、その改善効果を明らかにすることは非常に有用性が高いと考える。本研究で得られた結果は、今後の合流式下水道越流水対策の有効な方法として役立つものである。

3.3 対象排水区およびRTCの制御方法

3.3.1 RTCの概要

RTCは、既設の下水道施設の能力を最大限活用することを目的に、降雨量等の情報を基にして、各施設を監視しながら制御を行う。図-3.1にRTCシステムの構成を示す。

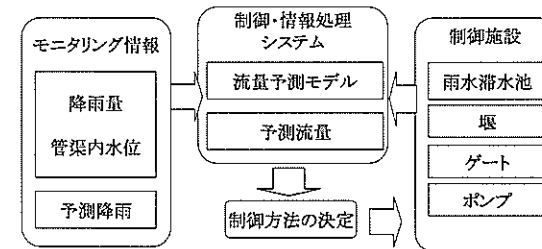


図-3.1 RTCシステムの構成

RTCシステムは、リアルタイムのモニタリング情報（降雨量、管きょ内流量（水位）・水質、予測降雨）とモニタリング情報を基に制御方法を決定する監視・情報処理システムおよび制御施設（貯留管きょ、雨水滞水池、分水堰、ゲート、ポンプ）から構成される。経時変化する降雨量や管きょ内の水位等を予測し、その情報に基づいて、ゲートやポンプ等の施設を適正に制御することにより、既設管きょの貯留能力等を最大限活用し、合流式下水道越流水対策として、越流頻度の最小化と併せて越流負荷の削減を図ることができる。

3.3.2 対象排水区の概要と下水の流れ

本研究では、合流式下水道が整備された「排水区①」（389ha）および「排水区②」（472ha）を対象にRTCを検討した。排水区の概要図と処理システムを図-3.2に示す。

排水区から流出した下水（合流雨水）は、それぞれの分水堰を経由し、晴天時はB処理場へ送水される。雨天時において、 $3Q_s$ （ Q_s ：晴天時時間最大汚水量）以下の下水は処理場に流入し、 $1Q_s$ （ $4.6\text{m}^3/\text{s}$ ）までは高級処理、それ以上は簡易処理され、それぞれ放流されている。分水堰を越流した下水（ $3Q_s$ 以上）は、ポンプ場への流入きょを経てAポンプ場へと流下し、沈砂池の前に設置されたゲートにより流入が制御され

ている。制御は流入井に設置された水位計により行われ、水位が一定以上になるとゲートが開く。沈砂池へ流入する下水は、2 台のポンプにより A ポンプ場内に設置された雨水滯水池へ送水される。雨水滯水池満水後は、ポンプの運転を切り替え、河川へ放流される仕組みとなっている。雨水滯水池に貯留された下水は、降雨終了後、B 処理場へ送水され高級処理される。A ポンプ場の概要を表-3.1 に示す。

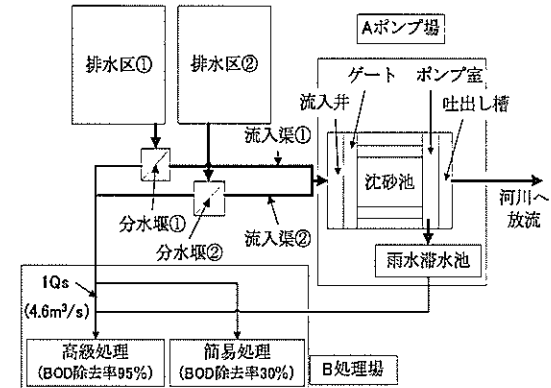


図-3.2 対象排水区の概要

表-3.1 A ポンプ場の概要

	排水区①(389ha)	排水区②(472ha)
流入きよ	A. 3,900mm × 3,900mm L=370m B. 3,400mm × 3,400mm L=200m	A. 3,750mm × 3,240mm L=310m B. 3,400mm × 3,400mm L=200m
雨水滯水池容量	10,000m ³ (流域換算: 1.2mm)	
ポンプ排水量	6.7m ³ /s × 4 台, 4.5m ³ /s × 4 台	

3.3.3 RTCの制御方法

本研究では、排水区に設置されている雨水滯水池と分水堰から A ポンプ場への流入きよの貯留能力を最大限活用し、放流負荷を削減することを検討した。この地点を選定した理由は、ポンプ場への流入きよであることから、下水幹線ではないため、堰等の機械が作動しない場合であっても、浸水を引き起こすような危険性が少ないためである。また、流入きよ周辺での浸水は懸念されるが、ポンプ場のポンプには十分な吐出能

力（8 台合計：44.8m³/s）があり，分水堰の故障等により，可動堰が作動しない場合でも，流入きよの貯留容量程度であれば，浸水が生じる前にポンプにより十分放流可能である。

本対象排水区においてRTC導入に必要なシステムの概要を以下に示す。

- ①モニタリング情報として，降雨量，管きよ内水位，雨水滞水池内水位および予測降雨量（3時間先）を用いる。
- ②分布型雨水流出解析モデルを用いて，制御地点の流量の予測を行う。
- ③制御対象構造物は分水堰，ポンプ場手前のゲートとし，①および②からの情報を基に制御を行い，雨水滞水池，ポンプ場流入きよの貯留能力を最大限活用する。

以上の考え方を基に提案した制御方法を図-3.3に示す。

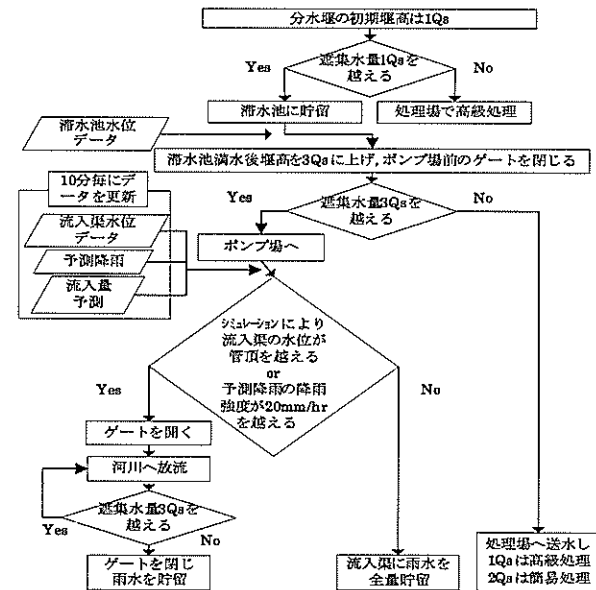


図-3.3 RTCの制御方法

本研究では，排水区①および②からのポンプ場への流入きよがポンプ場手前で合流していることならびに分水堰の下流(処理場側)においても合流しているから，排水区①および②は分水堰より上流では二つの排水区であるが，分水堰より下流では，一つの排水区と考えられる。そのた

め、排水区①および②ともに同様のRTCの制御方法を適用するとした。

分水堰高を1Qs、ポンプ場前のゲートは開けた状態に設定した上で、降雨初期の比較的高濃度な下水(1Qs)は処理場で高級処理する。1Qs以上の下水は分水堰を越え、流入きよを通過してAポンプ場に流入し、滞水池に貯留する。貯留水は晴天時に処理場へ送水後、高級処理を行う。次に、滞水池満水後は分水堰高を3Qsまで上げ、ポンプ場前のゲートを閉じる。そのため、3Qsまでの下水は処理場へ送水され、1Qsは高級処理、それ以上は簡易処理により放流する。分水堰を越流した下水(3Qsを越える下水)は、予測降雨を用いた流量予測解析結果を基に、ポンプ場流入きよに全量雨水を貯留可能な場合は全量貯留する。なお、貯留水は晴天時に処理場に送水し、高級処理する。

解析の結果、全量貯留が不可能な場合は、ゲートを開門しポンプを用いて河川へ放流し、降雨後半になり分水堰を越流しなくなると予測された時点でゲートを閉じ、流入きよ内の雨水を貯留する。ここで、ポンプ場流入きよに貯留可能、不可能の判断は、流入きよの水位が管頂に到達する、もしくは降雨強度20mm/hr以上の強い降雨があると予測された場合とした。なお、降雨強度20mm/hr以上の場合としたのは、この条件を越える降雨強度が発生すると流入きよが満管になる場合があるためである。

3.4 分布型モデルによる雨天時汚濁負荷解析

本研究では、分布型モデルであるInfoWorks CSを用いてシミュレーションを行い、RTCによる放流負荷削減効果を算定した。InfoWorks CSでは、下水道ネットワーク、地表面特性、降雨データ、流出に関するパラメータ等の各データを定義するファイルがあり、これらを作成、設定することによりシミュレーションが実行できる。また、RTCの解析も可能である。

3.4.1 雨水流出・汚濁負荷解析の手法

(1) 雨水流出モデル

雨水流出解析には、第2章と同じ有効降雨モデルおよび地表面流出モデルを用いた。地表面流出モデルでは、汚濁負荷解析も併せて行うことから、単一線形貯留池モデルを適用した。有効降雨は、地表工種毎に凹

地貯留による初期損失を与え、不浸透域には流出係数、浸透域には浸透能をそれぞれ用いることにより算出した。また、地表流出モデルは、単一線形貯留池モデルの基本式と連続式をそれぞれ式(1)にて算出した。

$$S = KQ \quad (1-a)$$

$$\frac{dS}{dt} = i - Q \quad (1-b)$$

ここで、 S ：流域に貯留された雨水量(m^3)、 K ：線形貯留係数(sec.)、 Q ：流域からの流出量(m^3/s)、 i ：有効降雨量(m/s)である。

(2) 汚濁負荷流出モデル

汚濁負荷解析は、晴天時の地表面堆積モデルと雨天時の掃流による流出モデルを用いた。評価項目は、合流式下水道越流水対策の目標値として利用されているBODとした。なお、InfoWorks CSにおける地表面からの管きよ内への流入BOD負荷量は、SSに付着していると仮定されていることから、次には地表面から管きよへ流入するSS負荷量とBOD負荷量の算出式を示す。

晴天時SS堆積負荷量は、式(2)にて算出した。

$$\frac{dM}{dt} = P_s - k_1 \cdot M \quad (2-a)$$

$$M_0 = M_i \cdot e^{-k_1 \cdot ND} + \left(\frac{P_s}{k_1} \right) \cdot (1 - e^{-k_1 \cdot ND}) \quad (2-b)$$

ここで、 M ：単位面積当たりのSS堆積負荷量(kg/ha)、 P_s ：堆積係数($kg/ha \cdot day$)、 k_1 ：減衰係数($1/day$)、 M_0 ：晴天時終了後のSS堆積負荷量(kg/ha)、 M_i ：単位面積当たりの初期SS堆積負荷量(kg/ha)、 ND ：先行晴天日数(day)である。

地表面からの掃流によるSS流出負荷量は、式(3)にて算出した。

$$M_e = K \cdot F \quad (3-a)$$

$$\frac{dM_e}{dt} = K_a \cdot M - F \quad (3-b)$$

$$K_a = C_1 \cdot i^{C_2} - C_3 \cdot i \quad (3-c)$$

ここで、 M_e ：降雨により浸食されるSS負荷量(kg/ha)、 K ：線形貯留係数(sec.)、 F ：SS流出負荷量($kg/ha \cdot s$)、 K_a ：降雨浸食係数($1/s$)、 M ：SS堆積負荷量(kg/ha)、 $C_1 \sim C_3$ ：係数、 i ：有効降雨量(m/s)である。

また、BOD等の汚濁物については、溶存態と懸濁態に分けられるが、地表面から管きよへ流入するBOD負荷量は懸濁態のみと仮定されてお

り、そのBOD負荷はSS負荷に付着して管きよへ流入するとして、式(4)により算出した。

$$F_n = K_{pn} \cdot F \quad (4-a)$$

$$K_{pn} = C_4(i_{max} - C_5)^{C_6} + C_7 \quad (4-b)$$

ここで、 F_n : BOD流出負荷量(kg/ha・s), K_{pn} : BOD負荷掃流係数(ポテンシー係数), i_{max} : 5分間最大降雨強度(mm/hr), $C_4 \sim C_7$: 係数である。

3.4.2 シミュレーション結果およびその検証

(1) 排水区のモデル化

解析を行うには、排水区のマンホールおよび管きよのネットワークデータを作成し、次にマンホール毎の集水面積と地表面の工種別面積のデータを入力する必要がある。そこで、マンホールと管きよのネットワークは、排水区図および下水道台帳から必要なデータを抽出し、作成した(ノード数1,872, リンク数1,642)。また、集水域の工種別面積は、10m×10mメッシュの細密数値情報をGIS上で整理し、地表工種を道路、屋根、浸透域の3種類に分け、既往研究¹⁴⁾で示されている土地利用毎の道路、屋根、浸透域の割合を用いて、表-3.2に示すとおり、それぞれ算出を行った。

表-3.2 排水区土地利用割合

	面積(ha)	工種割合(%)
道路	201	23.3
屋根	378	43.9
浸透域	281	32.8
全体	861	100

(2) 晴天時汚水量および濃度の検証

晴天時汚水量は、処理場での実測値を流域内下水道処理人口(約73,000人)で割り戻した1人1日当たり排水量にて設定を行った。流域内には一部工場も存在するが、その排出量が不明のため、前述の方法を用いた。また、時間変動は、実測の時間変動を基に設定した。晴天時汚水量の実測値(晴天が3日間続いた後の実測値)と解析値の比較を行った結果を図-3.4に示すが、解析値はほぼ実測値を再現することができ

た。

晴天時汚水濃度の設定は、汚水中のBODは懸濁態と溶存態が存在するため、まずSSについて実測濃度の一日当たりの平均値を入力し、溶存態については実測値に合うように設定した。晴天時汚水濃度の実測値と解析値を比較した結果を図-3.5に示す。午前10時のみ実測値が突出している理由は不明であり、それは表現できていないが、それ以外の時間帯において解析値は実測を概ね再現できている。これらの結果から設定した晴天時汚水量・濃度が妥当であると判断した。

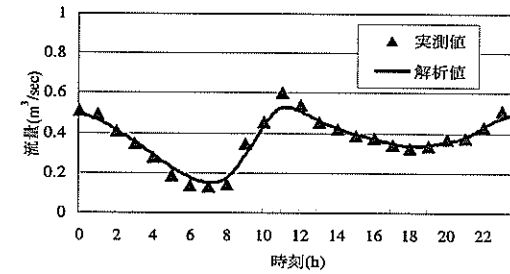


図-3.4 晴天時流量解析結果

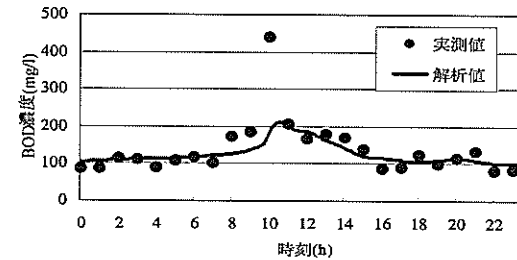


図-3.5 晴天時水質解析結果

(3) 対象降雨

雨天時の水量、負荷量のパラメータの同定には、Aポンプ場にて雨天時調査を行い、流量、水質の実測データがある4降雨を用いて評価を行った。降雨の特徴を表-3.3に示す。対象とした降雨は、様々な降雨強度や先行晴天期間のパターンがあり、モデルを検証するのに適したデータであると考えられる。

表-3.3 解析対象降雨の概要

年月日	先行晴天時間 (hr)	総降雨量 (mm)	降雨継続時間 (hr)	最大降雨強度 (mm/hr)
2002.6.30	108	10.0	3	15
2003.6.23	123	37.0	8	12
2003.7.8	63	13.0	7	18
2003.9.24	52	14.0	10	6

(4) 雨天時流出水量・負荷量の解析

流出水量のパラメータの設定は初期損失と流出係数を屋根、道路、浸透域それぞれに与えた。初期損失については、修正RRL法等で一般的に用いられている凹地貯留量（屋根：0.0mm/hr、道路：2.0mm/hr、浸透域：6.0mm/hr）を用いた。設定した流量パラメータを表-3.4に示す。

表-3.4 流出パラメータ

	不透透域		浸透域
	道路	屋根	
初期損失 (mm)	2.0	0.0	6.0
流出係数	0.8	0.9	
浸透能 (mm/hr)			10

BOD負荷量のパラメータの設定は、地表面堆積負荷については、これまでの調査結果を考慮して、排水区の実測値に合うように設定した。また、降雨浸食係数については、モデルのデフォルト値（初期設定値）で解析したところ、ピーク負荷量が低い結果となったため、新たに設定を行った。また、BOD負荷掃流係数（ポテンシー係数）については、デフォルト値を用いて解析した結果、BOD負荷量が実測値と比較して低い結果となったため、デフォルト値よりも大きく設定した。

ここで、デフォルト値とは主にヨーロッパの平坦地での実測を基に設定されたものであり、日本に適用する場合に勾配の少ない平坦な市街地等都市形態が類似しているところが望ましいことから、今回の対象地域が平坦な市街地であり、デフォルト値を一部修正して用いた。

その他のパラメータに関しては、デフォルト値を用いた。管きよ内の初期条件は、先行晴天期間中の汚水のみを対象とした解析を行い、その最終の管きよ内堆積負荷量を雨天時解析時の管きよ内初期堆積負荷量として与えた。設定した負荷量のパラメータを表-3.5に示す。なお、雨天時流出水量、負荷量のパラメータ設定の検証（キャリブレーション）に用いた実測値は、Aポンプ場の吐出水量、負荷量とした。

表-3.5 汚濁負荷パラメータ

	項目	設定値
地表面堆積 の設定値	M_d (kg/ha)	0.0
	P_s (kg/ha·day)	4.0
	K_1 (1/day)	0.100
地表面浸食 に関する係 数	C_1	2.0×10^4
	C_2	2.022
	C_3	29.0
BODに関す る係数	C_4	0.75
	C_5	0.000
	C_6	-0.572
	C_7	0.000

解析結果の一例として、2003年7月8日の降雨での実測値と比較した結果を図-3.6および図-3.7に示す。ここで、流量の実測数とBOD負荷量の実測数が異なる理由は、流量の実測値がポンプ場の吐出量（ポンプ場データ）を基にしているのに対して、水質はオートサンプラーによる採水を行っているため、採水本数に限度（採水開始後2時間まで10分間隔）があるためである。また、本研究では、解析結果の適合性の評価手法として合致率と適合度を用いた。合致率の算定式を式(5)に、適合度を式(6)に示す。なお、合致率、適合度の評価は、実測値がある期間を対象とした。解析を行ったすべての降雨についての合致率と適合度を表-3.6に示す。

結果について、全体として見ると、流量、BOD負荷量とも合致率・適合度の値は良好であり、排水区の流量、BOD負荷量の挙動を再現できていると判断できる。

$$E_Q = \left\{ 1 - \sqrt{\sum (Q_{sm} - Q_s)^2 + TQ_{sm}} \right\} \times 100 \quad (5-a)$$

$$E_L = \left\{ 1 - \sqrt{\sum (L_{sm} - L_s)^2 + TL_{sm}} \right\} \times 100 \quad (5-b)$$

$$TD_Q = TQ_s / TQ_{sm} \quad (6-a)$$

$$TD_L = TL_s / TL_{sm} \quad (6-b)$$

ここで E_Q ：流量の合致率(%), Q_{sm} ：実測流量(m^3/s), Q_s ：解析流量(m^3/s), TQ_{sm} ：実測総流出量(m^3/s), E_L ：BOD負荷量の合致率(%), L_{sm} ：実測BOD負荷量(kg/ha), L_s ：解析BOD負荷量(kg/ha), TL_{sm} ：実測総BOD負荷量(kg/ha), TD_Q ：流量の適合度, TQ_s ：解析による総流出量(m^3/s), TD_L ：BOD負荷量の適合度, TL_s ：解析による総BOD負荷量(kg/ha)である。

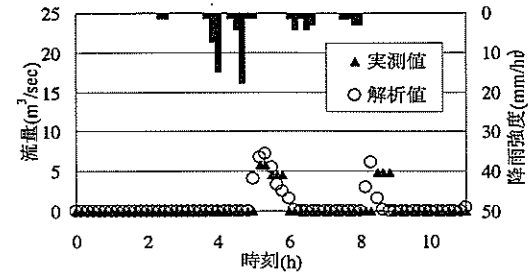


図-3.6 雨天時流入水量の実測値と解析値の比較

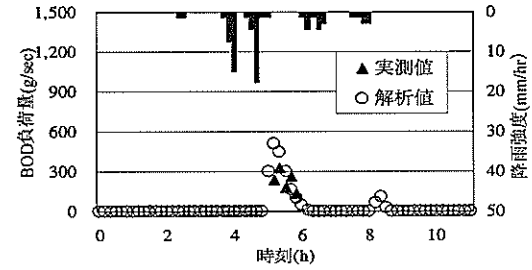


図-3.7 雨天時流入BOD負荷量の実測値と解析値の比較

表-3.6(1) 解析結果(流量)の合致率, 適合度

年月日	合致率(%)	適合度	データ数
2002.6.30	77	0.98	5
2003.6.23	89	1.00	55
2003.7.8	71	1.06	9
2003.9.24	67	1.18	6

表-3.6(2) 解析結果(BOD負荷量)の合致率, 適合度

年月日	合致率(%)	適合度	データ数
2002.6.30	79	1.40	4
2003.6.23	69	0.82	8
2003.7.8	70	1.37	5
2003.9.24	79	1.02	3

3.5 RTC実施による放流負荷量削減効果の定量

3.5.1 RTCの評価範囲

RTCの評価は, 雨天時における次の①~④とし, 評価水質項目はB

ODとした。また、高級処理の除去率は95%、簡易処理の除去率は30%とした。

- ① 高級処理放流負荷量（処理場）
- ② 簡易処理放流負荷量
- ③ 高級処理放流負荷量（雨水滞水池）
- ④ 越流負荷量の排水区から発生する雨天時の総放流負荷量

3.5.2 検討ケース

RTCの評価に当たっては、降雨パターンによる影響を把握するため、モデル降雨を用いることとした。本排水区で平年に近い降雨であった2000年度（総降雨量1,310.5mm）を基に各独立降雨（1降雨）の総降雨量を抽出した結果、総降雨量10mm以下が全体の50%、20mm以下まで含めると70%を占めていた。

そのため、本研究では総降雨量10mmと20mmの2ケースとし、降雨継続時間を10mmの場合が5時間、20mmの場合が10時間とした。降雨の配分は対象地域の降雨強度曲線を用いて、降雨パターンを前方集中型、中央集中型、後方集中型に分類し、それぞれのモデル降雨を作成し（表-3.7）、RTCの評価を行った。

表-3.7 RTC評価対象降雨

降雨CASE	総降雨量 (mm)	降雨継続時間 (hr)	10分間最大降雨強度 (mm/hr)	降雨パターン
A	10	5	16	前方集中
B	10	5	16	中央集中
C	10	5	16	後方集中
D	20	10	22	前方集中
E	20	10	22	中央集中
F	20	10	22	後方集中

3.5.3 独立降雨の解析によるRTCの効果

(1) 総降雨量10mmの解析結果

解析結果を図-3.8に示す。総降雨量10mmにおいて、RTCを実施した場合、現状では雨水滞水池満水後に越流していた下水を管きよ内に

全量貯留できる。また、初期堰高を 1Qs とすることで、現状では簡易処理されていた降雨初期の比較的高濃度の下水が雨水滞水池に流入し高級処理できる。RTC実施による簡易処理負荷量が現状の場合よりも増大する理由は、現状の場合に放流されていた雨水が管きよ内に貯留されており、その雨水が処理場に流入するためである。したがって、RTCを実施することにより、総放流負荷量に対する簡易処理負荷量は増大するが、雨天時越流を防ぐことができ、現状と比較して約 25~35%の総放流負荷量の削減効果が得られる。

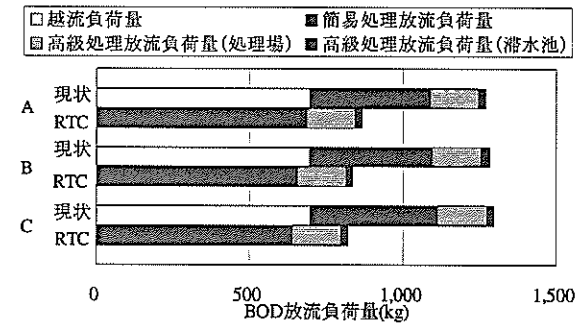


図-3.8 RTC解析結果 (降雨量10mm)

(2) 総降雨量 20mm の解析結果

解析結果を図-3.9 に示す。総降雨量 20mm の場合、ポンプ場流入水量が管きよの貯留量を越えることから、滞水池満水後の下水を全量貯留することはできない。しかし、初期堰高を 1Qs としているため、簡易処理放流負荷量の削減はできる。また、ポンプ場への流入が終了すると予測された時点でゲートを開閉することにより、現状よりも流入きよに雨水を多く貯留でき、未処理放流負荷量を削減することが可能である。これにより総降雨量 20mm の場合でも 10~20%の放流負荷量の削減効果が得られる。

降雨パターン別に見ると、前方集中型の削減率が最も低く、中央集中型、後方集中型の順に削減率は高くなる。前方集中型では、降雨初期の比較的高濃度の流出時に越流が生じる。一方、後方集中型では、降雨後半の比較的低濃度の流出時に越流が生じる。そのため、前方集中型の場合の方が越流負荷量は多くなるため、負荷削減率は低くなる。

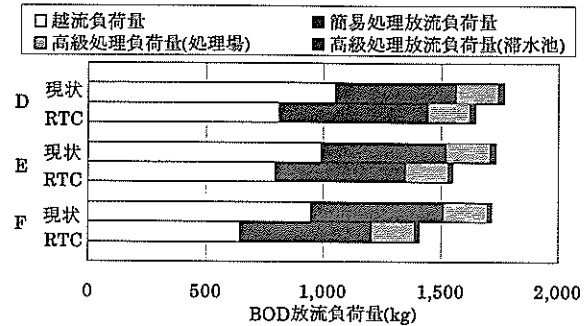


図-3.9 RTC解析結果 (降雨量20mm)

(3) RTC導入による効果

独立降雨による解析の結果、総降雨量 10mm 程度の場合、流入きよに下水を全量貯留でき、越流回数、負荷量とも削減できる。しかし、総降雨量 20mm 程度の場合、その削減効果は小さくなる。

これらの結果から、本研究で提案したRTCは降雨量が小さい降雨の場合に大きな削減効果を得ることが可能であり、また、降雨パターンで見ると、後方集中型の降雨の場合に特に効率的な削減効果が得られる。

3.6 年間解析によるRTCの合流式下水道越流水対策効果の評価

3.6.1 対象降雨

年間解析により、RTC導入による合流式下水道越流水対策効果の評価を行った。年間での放流負荷量の算出は、降雨の降り方により負荷量が異なるため、本排水区で平均的な降雨量であった 2000 年度 (総降雨量 1,310.5mm) を平均降雨年とし、1990 年度 (総降雨量 1,725.0mm) を多雨年、1994 年度 (総降雨量 772.0mm) を少雨年として、RTC実施による放流負荷削減効果の定量と総降雨量の違いによる削減効果の比較を行った。各年の降雨特性を表-3.8に示す。

表-3.8 年間解析の対象降雨の概要

	総降雨量(mm)	降雨回数(回)
2000年度(平均降雨年)	1,310.5	76
1990年度(多雨年)	1,725.0	95
1994年度(少雨年)	772.0	85

3.6.2 RTC導入による合流式下水道越流水対策効果

(1) 越流回数

年間の越流回数を図-3.10に示す。越流回数は、RTCの実施により、平均降雨年で14%、多雨年で19%、少雨年で29%の削減ができる。これは、前章で示したとおり、RTCを実施することで、管きょ内に貯留可能な総降雨量10mm程度の降雨が年間の降雨回数で大きな割合を占めているためである。

また、降雨年別に見ると、少雨年で最も削減効果が高く、以下多雨年、平均降雨年の順に削減効果が低くなった。これは、総降雨量10mm程度の割合が、小雨年、多雨年、平均降雨年の順に高いことからこのような結果になっている。越流回数は、総降雨量が多い程、頻繁になるが、RTCを実施することにより、10mm程度の降雨が多い場合、越流回数の削減率は高くなる。

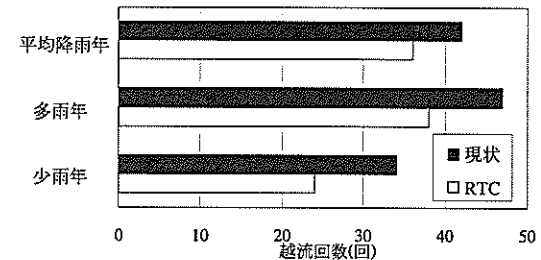


図-3.10 越流回数

(2) 放流負荷量

RTC実施による各年の放流負荷量の結果を図-3.11に示す。また、降雨区分毎の結果を表-3.9に示す。

RTCを実施することにより、現状と比較して平均降雨年で18%、多雨年で22%、少雨年で26%放流負荷量を削減できる。内訳を見ると、越流負荷量が18~34%、簡易処理放流負荷量が27~33%削減される。放流負荷量でも越流回数と同様に総降雨量10mm程度の降雨が大きな割合を占めることから、このような削減効果が得られたと考える。

総放流負荷量についても、越流回数と同様に、総降雨量が多い程、越流負荷量も増加するが、RTCを実施することにより、10mm程度の降雨が多い場合は、その削減割合は高くなる。

ここで、前章のモデル降雨による解析では、総降雨量10mmの場合、現

状よりもRTCの方が簡易処理放流負荷量は増加していたが、年間解析ではいずれの年度においてRTCの方が簡易処理放流負荷量は減少している。これは、年間解析の場合、降雨の降り方によっては、10mm以下の降雨において、現状、RTCのいずれの場合にも越流が生じないこととなる。そのため、現状とRTCの初期段階での堰高の違い(現状：3Qs, RTC：1Qs)により、RTCの方が初期の降雨を流入きよに貯留し、晴天時に高級処理するため、簡易処理放流負荷量が減少する。したがって、このように現状において越流が生じない場合には、RTCを実施することで、より多くの放流負荷量の削減が可能である。

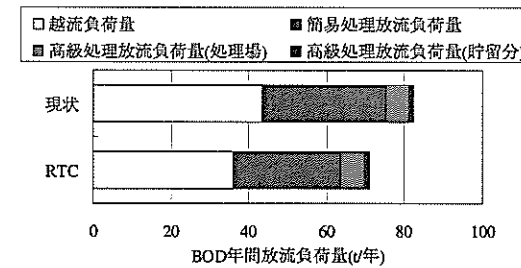


図-3.11(1) 放流負荷量の年間解析結果(平均降雨年)

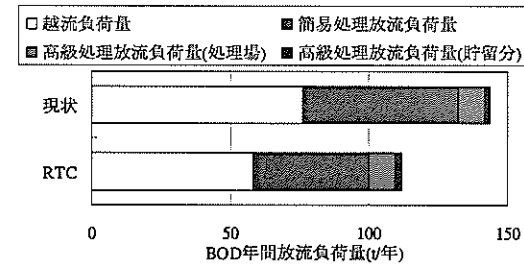


図-3.11(2) 放流負荷量の年間解析結果(多雨年)

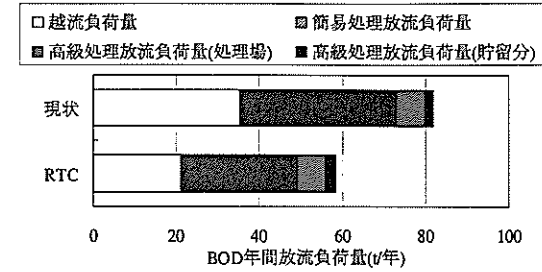


図-3.11(3) 放流負荷量の年間解析結果 (少雨年)

表-3.9(1) 降雨区分毎の放流負荷量 (平均降雨年)

降雨区分	降雨回数(回/年)	現状/RTC	越流回数(回/年)	BOD負荷量(t)					削減率
				高級処理(処理場)	高級処理(滞水池貯留)	簡易処理	越流	合計	
0.5~10mm	38	現状	4	1,192	188	5,656	377	7,413	33.3%
		RTC	0	1,206	263	3,472	0	4,941	
10~20mm	16	現状	16	1,870	527	10,437	13,344	26,178	20.0%
		RTC	14	1,956	637	10,008	8,346	20,947	
20~30mm	13	現状	13	1,820	337	10,610	15,852	28,619	10.9%
		RTC	13	1,866	449	9,797	13,379	25,491	
30~40mm	4	現状	4	473	107	2,506	4,334	7,420	2.1%
		RTC	4	480	142	2,063	4,580	7,265	
40~50mm	2	現状	2	182	25	862	1,953	3,022	5.6%
		RTC	2	180	37	767	1,870	2,854	
50mm以上	3	現状	3	343	54	2,111	7,723	10,231	1.2%
		RTC	3	343	86	1,899	7,782	10,110	

表-3.9(2) 降雨区分毎の放流負荷量 (多雨年)

降雨区分	降雨回数(回/年)	現状/RTC	越流回数(回/年)	BOD負荷量(t)					削減率
				高級処理(処理場)	高級処理(滞水池貯留)	簡易処理	越流	合計	
0.5~10mm	53	現状	6	3,490	621	17,562	997	22,670	37.3%
		RTC	0	3,479	1,072	9,665	0	14,216	
10~20mm	13	現状	13	1,680	437	10,738	10,761	23,616	34.3%
		RTC	9	1,659	528	8,519	4,804	15,510	
20~30mm	9	現状	9	1,220	292	8,363	14,325	24,200	23.3%
		RTC	9	1,204	346	7,248	9,753	18,551	
30~40mm	6	現状	6	774	196	4,947	9,233	15,150	-0.2%
		RTC	6	757	259	4,326	9,835	15,177	
40~50mm	5	現状	5	818	168	5,848	11,373	18,207	21.4%
		RTC	5	766	176	4,709	8,665	14,316	
50mm以上	9	現状	9	1,343	247	8,863	29,209	39,662	13.7%
		RTC	9	1,316	393	7,424	25,092	34,225	

表-3.9(3) 降雨区分毎の放流負荷量(少雨年)

降雨区分	降雨回数(回/年)	現状/RTC	越流回数(回/年)	BOD負荷量(t)					削減率
				高級処理(処理場)	高級処理(滞水池貯留)	簡易処理	越流	合計	
0.5~10mm	56	現状	7	2,926	496	14,270	1,649	19,341	38.5%
		RTC	0	2,927	1,023	7,938	0	11,888	
10~20mm	19	現状	19	2,636	950	15,639	17,696	36,921	34.1%
		RTC	12	2,710	907	13,841	6,872	24,330	
20~30mm	5	現状	5	869	214	4,389	7,043	12,515	18.3%
		RTC	5	672	223	3,689	5,644	10,228	
30~40mm	3	現状	3	362	109	2,129	5,219	7,819	14.9%
		RTC	3	343	133	1,456	4,701	6,653	
40~50mm	2	現状	2	197	117	1,217	3,613	5,144	-1.8%
		RTC	2	199	113	969	3,954	5,235	
50mm以上	0	現状	-	-	-	-	-	-	-
		RTC	-	-	-	-	-	-	

3.6.3 RTC導入の有効性

合流式下水道越流水対策としてRTCを導入することの有効性を検討するために、RTC実施による放流負荷削減効果と同効果を得る合流式下水道越流水対策として、雨水滞水池を新たに整備した場合の費用を用いて評価した。

(1) 雨水滞水池容量の算出

平均降雨年であった2000年度の降雨において、現状の10,000m³の雨水滞水池を20,000m³に増加させた場合の放流負荷削減量を算出し、これを基に現状の滞水池容量から放流負荷量を1t削減するために必要な滞水池容量を求めた。その値にRTC実施による放流負荷削減効果を乗じて、RTC実施による放流負荷削減量と同等の雨水滞水池容量を求めた。その結果、RTCの実施は、約8,000m³の滞水池を新たに整備した場合と同等の放流負荷削減効果が得られることを明らかにした。

(2) RTC実施による費用効果

約8,000m³の雨水滞水池を建設するのに必要な建設費用を積算基準等から算出したところ、表-3.10に示すとおり、14.5億円という結果を得た。このことから、合流式下水道越流水対策としてRTCを実施することは費用効果の観点から有効性が高いことを示した。

表-3.10 RTC実施による費用効果

雨水滞水池容量(m ³)	RTC実施による費用効果(億円)
8,313	14.5

3.7 結 論

本研究では、合流式下水道越流水対策として、既存施設を活用することで環境負荷の排出量が少なく、かつ、建設コストを低減化できる効率的なRTCについて、シミュレーションを基に放流負荷量削減効果と費用効果で見た場合の導入の有効性について評価を行った。

ここで得られた知見を以下に示す。

- 1) モデル降雨10mmおよび20mmの独立降雨で解析を行った結果、今回検討したRTCは、総降雨量10mmの場合、分水堰を越えた下水を管きよに全量貯留できることから、越流を防ぐことが可能となり、全体で放流負荷量を約25～35%削減できる。総降雨量が20mmの場合、分水堰を越えた下水を管きよに全量貯留することはできないが、初期堰高を1Qsとして制御を行うことで、総放流負荷量を10～20%削減できる。また、独立降雨によるRTCの効果を前方集中型、中央集中型、後方集中型の3種類の降雨パターンで見ると、後方集中型が最も削減効果が高く、中央集中型、前方集中型の順に削減効果は低くなる。
- 2) 総降雨量の異なる（平均降雨年：総降雨量1310.5mm、多雨年：同1725.0mm、少雨年：総降雨量772.0mm）年間降雨を用いて解析を行ったところ、現状と比較して年間で放流負荷量を18～26%削減、越流回数を14～29%削減できることが分かった。また、年間解析結果を降雨区別に検討した結果からは、総降雨量30mm以下の場合において雨天時BOD放流負荷量を約10～40%削減できることを明らかにした。
- 3) RTCの有効性について、同じ効果が得られる雨水滞水池を新たに整備した場合の費用により評価した結果、約14.5億円の効果（価値）があることを示した。

以上より、現在の下水道事業としての取り組みが急務とされている合流式下水道越流水対策の方法の一つとして、今回検討したRTCの運用方法は、特に越流頻度が多い30mm以下の強度の雨天時BOD放流負荷量および越流回数の削減に有効であり、価値の高い方法である。

【参考文献】

- 1) 和田安彦, 尾崎 平, 村岡 基: 下水道施設のリアルタイムコントロールによる合流式下水道改善に関する研究, 土木学会論文集G, Vol.62, No.1, pp.201-210, 2006.
- 2) 和田安彦, 三浦浩之: 大規模雨天時下水幹線の適正制御による合流式下水道の改善に関する研究, 土木学会論文集, No.573/VII-4, pp.39-47, 1997.
- 3) Wada, Y. and Miura, H. : Combined Sewer Overflow Control Using Large-scale Storage Pipe for Flood Control, 8th ICUSD, Sydney/Australia, pp.1663-1670, 1999.
- 4) 和田安彦, 三浦浩之, 岩倉正門: 滞水池を含む合流式下水道システムへのRTC導入に関する研究, 土木学会関西支部年次学術講演会, pp.VII-16-1~2, 2001.
- 5) 和田安彦, 三浦浩之, 大山秀格, 竹田好男, 卜部賢一: 前島ポンプ場滞水池における合流改善について, 第38回下水道研究発表会講演集, pp.123~125, 2001.
- 6) Wada, Y., Miura, H. and Ozaki, T.: Evaluation and Analysis of CSO Control with Storm Water Reservoir in Osaka, JAPAN, 9th ICUD, (Page numbers is unknown), Portland/America, 2002.
- 7) 藤生和也: 今後の下水道に求められる技術—下水道技術五箇年計画—, 下水道協会誌, Vol.41, No.499, pp.4-8, 2004.
- 8) 国土交通省: 合流式下水道の改善対策に関する調査報告書, 2002.
- 9) 武亨: 合流式下水道改善に見る最新技術の動向, 下水道協会誌, Vol.41, No.499, pp.19-26, 2004.
- 10) Schutze, M. and Einfalt, T.: Off-line Development of RTC Strategies a General Approach and the Aachen Case Study, 8th ICUSD, pp.410-416, 1999.
- 11) Fuchs, L., Gunther, H. and Scheffer, C.: Comparison of Quantity and Quality Oriented Real Time Control of a Sewer System, 8ICUSD, pp.432-439, 1999.
- 12) Quer, J. L., Malgrat, P. and Marti, J. : Implementation of Real Time Control In Barcelona's

Urban Drainage System, 8th ICUSD, pp.1621-1626, 1999.

- 13) 篠崎孝一：篠崎ポンプ所流域におけるリアルタイムコントロール現状調査，東京都下水道局技術調査年報，pp.371-382，2001.
- 14) 古米弘明，市川新，脇岡靖明：分布型モデルを用いた浸水対策用雨水幹線を有する合流式下水道における雨天時流出汚濁負荷解析，下水道協会誌，Vol.38，No.467，pp.99-111，2001.
- 15) 脇岡靖明，古米弘明，市川新：下水道台帳データと細密数値情報を利用した分布型モデルによる大都市下水道排水区の流出解析，下水道協会誌，Vol.38，No.469，pp.79-89，2001.
- 16) (社)日本下水道協会：合流式下水道改善対策指針と解説，pp.65-67，2002.
- 17) 金泰成，山田淳，文亨夫：雨水貯留施設による雨天時ノンポイント流出汚濁物のリアルタイム制御，環境システム研究論文集，Vol.28，pp.105-113，2000.



第4章 管きよ更生工法のライフサイクルアセスメントに関する研究

4.1 緒 論

下水道は、国民の安全で快適な生活環境の実現と公共用水域の水質保全に大きく貢献している。しかしながら、我が国において早期より下水道事業に着手した自治体では、下水管きよの耐用年数を50年として考えた場合、昭和30年代から第一次石油危機が起こった昭和48年頃の高度経済成長期にかけて整備されたものが、これから順次更新時期を迎えることになる。また、近年の下水道事業予算の減少等もあって、自治体は財政的に厳しい局面を迎えており、老朽管の改築工事における低コストを掲げた工法の技術開発が活発化している。

本研究では、技術開発が進み、施工実績を重ねつつある管きよ更生工法のうち、反転工法、形成工法、製管工法の中から代表的な自立管の工法を選定し、ライフサイクルアセスメント（以下、本章において「LCA」という）による環境負荷の比較評価を行うものである。また、従来工法である開削工法との比較も行い、下水管きよの更生工法の環境負荷の定量化ならびに環境面において優れた手法を明らかにする^{1) - 3)}。

4.2 本研究の位置づけ

地球環境問題への対応という視点から、公共事業においても環境負荷を軽減し、持続可能な社会システムを構築していくための取り組みが求められている。

特に、温暖化ガスについては、京都議定書の発効により、我が国における総排出量を2008年から2012年の間に基準年である1990年レベルから6%削減することが課せられており、下水道事業を含む公共事業において、地球温暖化を招く温室効果ガス等の環境負荷排出量を抑える必要があるとされている。そのため、下水管きよの改築に関しても、経済性だけでなく、環境負荷排出量も考慮した素材や工法の選定を行う必要に迫られている。

下水管きよの改築について、経済性のみならず環境負荷排出量の点からも、環境を配慮した経済面で評価が高い工法が求められてきている。本研究で得られた結果は、老朽管が原因となった道路陥没等の不慮の事故が発生しないように、市民の足下の安全を確保するといった地域

の環境改善に役立つ管きよ更生工法を対象に、地球環境への影響を定量化するLCAによって、環境負荷の比較評価を従来から多用されている開削工法との間だけでなく、管きよ更生工法管でも行うものである。

4.3 管きよ更生工法のLCA評価の方法

4.3.1 評価範囲および評価項目

下水管きよの更生工法に係る評価範囲は、次のア～ウとした。

ア.製品製造時

イ.運搬時(資材・機材の運搬、処理・処分のための運搬)

ウ.施工時

また、評価項目は、次の①～④とし、各プロセスにおける燃料や資材の消費量に原単位^{4)・8)}を乗じて算出した。

- ① エネルギー消費量
- ② CO₂排出量
- ③ NO_x排出量
- ④ SO_x排出量

4.3.2 対象とする 更生工法

下水管きよの更生工法のうち、非開削工法としては反転工法、形成工法、製管工法および鞘管工法があるが、本研究ではこれらの中で、反転工法(加熱硬化)、形成工法(加熱硬化)、製管工法の中から代表的な自立管工法を選定した。選定した各工法の形状および施工上の特徴等は、表-4.1のとおりである。

さらに、本研究では、非開削工法との比較評価のため、開削工法も対象に選

表-4.1 各管きよ更生工法の特徴

工法名	特徴
反転工法	硬化性樹脂を含浸した長い袋状のライナー材を水圧あるいは空気圧により既設管内に反転挿入し、熱あるいは光で硬化させて管内に密着した樹脂パイプを形成する工法である。
形成工法	対象とする管の形状に合わせて、あらかじめ製作した管きよまたははライナー材を既設管内に牽引挿入し、これを水圧あるいは空気圧により拡張の上、熱あるいは光で硬化させて管きよ内面に更生管を形成する工法である。
製管工法	既設管内で新管を製管し、既設管との間に裏込材を充填する工法である。

定した。ここで使用した開削工法の比較モデルは、腐食劣化した既設ヒューム管の敷設替えを目的とし、管径の適合性と耐食性を考慮して、既設管きよと同じヒューム管は用いず、硬質塩化ビニル管を新設することを条件とする。また、比較モデルに適用した管径は、公共下水道事業を実施している自治体において、公道下に埋設されている汚水幹線としての採用例が豊富な管径という観点から 400mm と 600mm を選定した。

4.3.3 建設コストの算出条件

検討ケースは、CASE 1 を 400mm、CASE 2 を 600mm とした。また、既設管の敷設条件について、表-4.2 に CASE 1 を、表-4.3 に CASE 2 をそれぞれ示す。

表-4.2 既設管の敷設条件 (CASE 1)

項目	開削工法	管きよ更生工法
管種	鉄筋コンクリート管 (HP管)	
管径	φ 400mm	
人孔間距離	50.00m	
上・下流人孔	1号人孔 (内径 900mm)	
管体延長	49.10m	
土被り	2.00m	
対象道路	一般市町村道 (幅員 5.0m)	
舗装構成	表層：アスファルト t = 5cm 路盤：粒調碎石 t = 15cm	

表-4.3 既設管の敷設条件 (CASE 2)

項目	開削工法	管きよ更生工法
管種	鉄筋コンクリート管 (HP管)	
管径	φ 600mm	
人孔間距離	50.00m	
上・下流人孔	1号人孔 (内径 900mm)	
管体延長	49.10m	
土被り	2.00m	
対象道路	一般市町村道 (幅員 5.0m)	
舗装構成	表層：アスファルト t = 5cm 路盤：粒調碎石 t = 15cm	

新設管の建設コストの算出条件のうち、開削工法と管きよ更生工法の条件を次に示す。

(1) 開削工法におけるCASE別の条件

① CASE 1 :

(新設管)

- ・管種：硬質塩化ビニル管 (VU管)
- ・管径：φ400mm

② CASE 2

(新設管)

- ・管種：硬質塩化ビニル管 (VU管)
- ・管径：φ600mm

(2) 開削工法におけるCASE 1とCASE 2の共通条件

① 製品製造時における環境負荷

- ・管材料，砂，購入土を対象

② 運搬時における環境負荷

- ・施工現場：都心部
- ・管材料運搬距離：50km
(工場立地場所から都心部までの運搬を想定)
- ・上記以外材料運搬距離：10km
(都市近隣郊外から都心部までの運搬を想定)
- ・建設機械運転距離：10km
(都市近隣郊外から都心部までの運転を想定)
- ・処理，処分地までの運搬距離：30km
(都心部から臨海埋立地または山間処分地までを想定)

③ 施工時における環境負荷

- ・取付管は考慮せず

(3) 管きよ更生工法におけるCASE 1とCASE 2の共通条件

① 製品製造時における環境負荷

- ・主材料のみ対象

② 運搬時における環境負荷

- ・施工現場：都心部
- ・管きよ更生材料運搬距離：50km
(工場立地場所から都心部までの運搬を想定)
- ・建設機械運転距離：10km
(都市近隣郊外から都心部までの運転を想定)
- ・処理，処分地までの運搬距離：30km
(都心部から臨海埋立地または山間処分地までを想定)

③ 施工時における環境負荷

・取付管は考慮せず

(4) エネルギー資源の環境負荷原単位

エネルギー資源の環境負荷原単位を表-4.4に示す。

表-4.4 エネルギー資源の環境負荷原単位⁹⁾

	単位	エネルギー消費 (kcal)	CO ₂ 排出 (kg)	NO _x 排出 (kg)	SO _x 排出 (kg)	摘要
軽油	/L	10,000	2.84	0.00624	0.00343	
灯油	/L	9,710	2.72	0.00624	0.00343	
ガソリン	/L	9,210	2.55	0.000997	0.00151	
水	/m ³	227	0.271	0.00229	0.00108	

※ 1cal=4.186 J

注釈1:「水」は、「LCAデータベース 1995年産業連関分析データ版 ver2.2」
((社)日本建築学会, 2003年7月7日修正版)による。

注釈2: エネルギー資源としての化石燃料の環境負荷原単位は、エネルギー資源の採取、輸送、精製および転換に伴い間接的に発生する環境負荷量を含んだものとする。

注釈3: 表-2.11にある軽油のCO₂排出原単位は0.721kg-C/Lであるが、ここにある軽油のCO₂排出に係る環境負荷原単位は参考文献が異なるものの、炭素: Cの原子量に着目すると、
Cの原子量=12
CO₂の原子量: 12+16×2=44
 $2.84\text{kg/L} \times (12/44) = 0.775\text{kg-C/L} \approx 0.721\text{kg-C/L}$
となり、近似した値となる。

(5) 車両輸送における環境負荷

輸送車両毎の燃費を表-4.5に示す。

表-4.5 輸送車両の燃費⁶⁾

積載可能利用	燃費
2t	8.0 km/L
4t	5.5 km/L
10t	3.5 km/L
20t	2.2 km/L

4.3.4 流下能力の評価

管きよ更生を行った場合、既設管の内側にライニングもしくは製管されるため、既設管より内径が小さくなるが、粗度係数が小さくなり、管きよ更生工法施工後の流下能力（流速・流量）は、既設管の流下能力（流速・流量）以上になる。

事例として、CASE 1, CASE 2について、既設管および管きよ更生工法施工後の流下能力（流速・流量）を勾配4.0パーミルの値で算出したところ、表-4.6および表-4.7に示すとおり、管きよ更生工法施工後の流下能力（流速・流量）は、既設管の流下能力（流速・流量）以上になった。なお、流量計算公式は、クッター公式を使用した。表-4.6および表-4.7の評価欄は、既設管の流下能力を基準として、その値以上あるものについて○印を付した。

表-4.6 流下能力評価 (CASE 1)

工 法		更生厚 (mm)	内 径 (mm)	粗度係数	流 速 (m/s)	流 量 (m ³ /s)	評 価
既設管:HP φ 400mm		—	400	0.013	1.023	0.129	—
管きよ更生 工法 (自立管)	反転工法	9.0	382	0.010	1.373	0.157	○
	形成工法	5.0	390	0.010	1.393	0.166	○
	製管工法	20.0	360	0.010	1.316	0.134	○
開削工法:VU φ 400mm		—	400	0.010	1.419	0.178	○

表-4.7 流下能力評価 (CASE 2)

工 法		更生厚 (mm)	内 径 (mm)	粗度係数	流 速 (m/s)	流 量 (m ³ /s)	評 価
既設管:HP φ 600mm		—	600	0.013	1.377	0.389	—
管きよ更生 工法 (自立管)	反転工法	12.0	576	0.010	1.832	0.477	○
	形成工法	8.5	583	0.010	1.847	0.493	○
	製管工法	25.0	550	0.010	1.774	0.422	○
開削工法:VU φ 600mm		—	600	0.010	1.884	0.533	○

4.4 管きよ更生工法および開削工法のLCAの算出評価

本研究では、数ある更生工法のうち、反転工法、形成工法、製管工

法の中から代表的な自立管の工法ならびに開削工法について、詳細な積み上げ方式によるLCA計算結果に基づき評価を行った。

4.4.1 エネルギー消費および環境負荷量

各ケース(CASE1, CASE2)の各工法(反転工法, 形成工法, 製管工法, 開削工法)の項目別のエネルギー消費および環境負荷量を一覧にして表-4.8に示す。

表-4.8 (1) エネルギー消費および環境負荷総括表 (CASE1)
(既設管: HP管φ400mm, 新設管: VU管φ400mm, 管きよ延長: 50m)

工 法	エネルギー消費 (Mcal)	環境負荷量			
		CO ₂ 排出 (kg)	NO _x 排出 (kg)	SO _x 排出 (kg)	
管きよ 更生工法	反転工法	14,283	3,679.3	4.070	3.254
	形成工法	11,484	3,306.7	4.211	3.229
	製管工法	<u>5,088</u>	<u>1,612.7</u>	<u>2.977</u>	<u>1.185</u>
開削工法	27,719	6,064.1	12.791	8.349	

※下線を引いた値は、各環境負荷における最小値を示す

表-4.8 (2) エネルギー消費および環境負荷総括表 (CASE2)
(既設管: HP管φ600mm, 新設管: VU管φ600mm, 管きよ延長: 50m)

工 法	エネルギー消費 (Mcal)	環境負荷量			
		CO ₂ 排出 (kg)	NO _x 排出 (kg)	SO _x 排出 (kg)	
管きよ 更生工法	反転工法	25,623	6,523.5	6.246	5.471
	形成工法	23,409	6,758.2	7.759	6.375
	製管工法	<u>9,985</u>	<u>3,001.5</u>	<u>5.459</u>	<u>2.260</u>
開削工法	46,345	9,018.4	17.723	12.218	

※下線を引いた値は、各環境負荷における最小値を示す

CASE1の各工法のエネルギー消費および環境負荷を基準(1.000)とした場合のCASE2の値の一覧を表-4.9に示す。

表-4.9 CASE 1 (φ400mm)とCASE 2 (φ600mm)の
エネルギー消費および環境負荷比較表

工 法		エネルギー 消費比率	環境負荷量比率		
			CO ₂ 排出	NO _x 排出	SO _x 排出
管きよ 更生工法	反転工法	1.794	1.773	1.535	1.681
	形成工法	2.038	2.044	1.843	1.974
	製管工法	1.962	1.861	1.834	1.907
開削工法		1.672	1.487	1.386	1.463

表-4.9 から、次の事項が明らかとなった。

- 1) 管きよ径 600mm と 400mm の円周 ($2\pi r$) 比は 1.5 ($0.600/0.400$)、
断面積 (πr^2) 比は 2.25 ($0.600^2/0.400^2$) であり、反転工法
および開削工法の管きよ径 600mm と 400mm の各環境負荷の比は円
周比に近い値である。また、開削工法の管きよ径 600mm と 400mm
のエネルギー消費の比は円周比に近い値である。
- 2) 形成工法および製管工法の管きよ径 600mm と 400mm の各環境負荷
の比は、円周比 (1.5) と断面積比 (2.25) のほぼ中間の値である。ま
た、反転工法および製管工法の管きよ径 600mm と 400mm のエネル
ギー消費の比は、円周比 (1.5) と断面積比 (2.25) のほぼ中間の値で
ある。
- 3) 形成工法の管きよ径 600mm と 400mm のエネルギー消費の比は、断
面積比 (2.25) に近い値である。
- 4) いずれの工法においても、管きよ径の増加による環境負荷の増加
割合は、円周比から円周比と断面積比の中間程度である。

4.4.2 エネルギー消費および環境負荷の評価

(1) 評価方法

本研究では、エネルギー消費量に加えて、CO₂排出量、NO_x排出
量、SO_x排出量を算出した。評価方法として、式(1)に示すように、
各項目の最小値を基準 (1.000) とし、各工法を相対的に表現した。さ
らに、環境負荷項目については、その項目の重要度 (式(2)の a, b,
c, d) についての検討が必要であると考えられるが、ここではすべて
の重要度 (a=b=c=d=1.0) が等価と考え、式(2)により各工法の評
価点を算出し、表-4.10 に示した。すなわち、合計値が大きい工法ほ
ど同じ条件下での管きよ更生において、トータル環境負荷の排出量
が少なく、評価が高い工法であることを意味する。

$$\text{各項目の評価点} = \frac{\text{各環境負荷量の中の最小値}}{\text{各環境負荷量}} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{評価点合計} = & a \cdot \text{エネルギー消費の評価点} \\ & + b \cdot \text{CO}_2 \text{の評価点} + c \cdot \text{NO}_x \text{の評価点} \\ & + d \cdot \text{SO}_x \text{の評価点} \end{aligned} \quad (2)$$

表-4.10 (1) 評価点を用いた各工法の評価結果 (CASE 1)
(既設管: HP管φ400mm, 新設管: VU管φ400mm, 管きよ延長: 50.00m)

工 法		評価点				評価点 合計
		エネルギー消費	CO ₂ 排出	NO _x 排出	SO _x 排出	
管きよ 更生工法	反転工法	0.356	0.438	0.733	0.364	1.891
	形成工法	0.443	0.488	0.707	0.367	2.005
	製管工法	1.000	1.000	1.000	1.000	4.000
開削工法		0.184	0.266	0.233	0.142	0.825

※最小環境負荷量を1.000とする。

表-4.10 (2) 評価点を用いた各工法の評価結果 (CASE 2)
(既設管: HP管φ600mm, 新設管: VU管φ600mm, 管きよ延長: 50.00m)

工 法		評価点				評価点 合計
		エネルギー消費	CO ₂ 排出	NO _x 排出	SO _x 排出	
管きよ 更生工法	反転工法	0.390	0.460	0.874	0.413	2.137
	形成工法	0.427	0.444	0.704	0.355	1.930
	製管工法	1.000	1.000	1.000	1.000	4.000
開削工法		0.215	0.333	0.308	0.185	1.041

※最小環境負荷量を1.000とする。

(2) 評価結果および考察

各工法のエネルギー消費および環境負荷の比較結果は、以下のとおりである。

a) エネルギー消費

各工法のエネルギー消費の算出結果を図-4.1に示す。

<開削工法と管きよ更生工法の比較>

- 1) 開削工法と管きよ更生工法(反転工法, 形成工法, 製管工法)の総エネルギー消費量について, 開削工法のCO₂排出量の方が管きよ更生工法のエネルギー消費量よりもCASE 1 (φ400mm)の場合,

約 2~5.5 倍, C A S E 2 (φ 600mm) の場合, 約 2~4.5 倍多い.

- 2) 管きよ更生工法の総エネルギー消費量は, 開削工法のプロセス 1(製造)における塩化ビニル管の製造よりも少ない.
- 3) エネルギー消費量の面から下水管きよの更生には, 開削工法よりも非開削である管きよ更生工法の方が優れている.

<管きよ更生工法間の比較>

各管きよ更生工法におけるエネルギー消費に係る考察は, 次のとおりである.

- 1) C A S E 1 (φ 400mm), C A S E 2 (φ 600mm) はともに, 製管工法の総エネルギー消費量が最も少ない.
- 2) 各工法の特徴として, プロセス毎でのエネルギー消費量について, 製管工法はプロセス 1(製造)のエネルギー消費量が最も多く, 総排出量の約 80%を占めている.
- 3) 反転工法と形成工法のプロセス 1(製造)のエネルギー消費量は, それぞれ約 70%, 60%を占めている.
- 4) 製管工法の更生管の原材料が塩化ビニルに対し, 反転工法と形成工法は樹脂(ポリエステル)であり, 製管工法では, 裏込材の使用量が多いため, プロセス 1(製造)のエネルギー消費量が多くなっている.
- 5) 製管工法の施工時のエネルギー消費量が他の工法よりも少ないため, 相対的にプロセス 1(製造)のエネルギー消費量が多くなっており, このことが管径の増大に伴う製管工法のエネルギー消費量の伸びを抑える要因となっている.

以上から, エネルギー消費量の観点からは, 製管工法が優位な工法と言える.

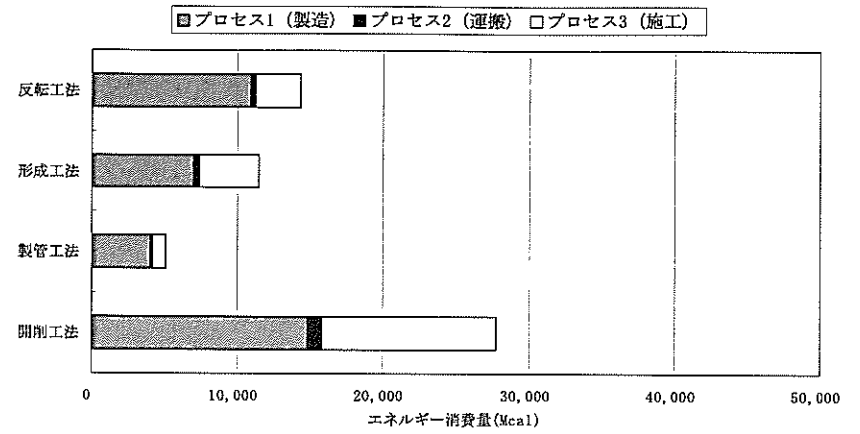


図-4.1(1) 各工法のエネルギー消費量 (CASE 1: φ400mm)

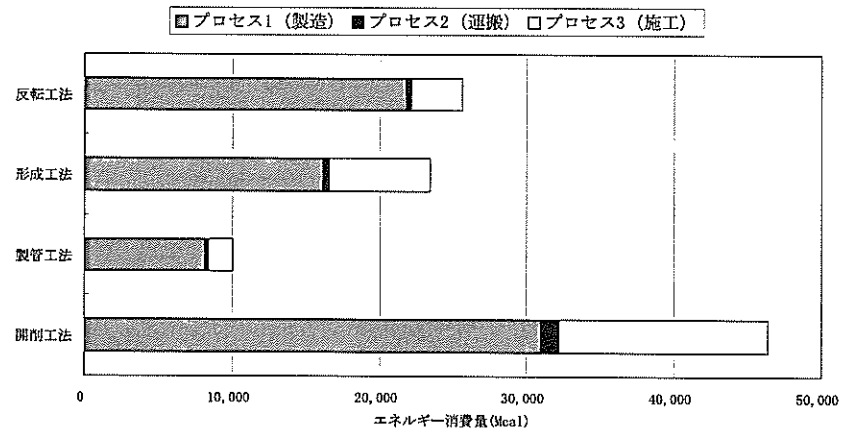


図-4.1(2) 各工法のエネルギー消費量 (CASE 2: φ600mm)

b) CO₂排出量

各工法のCO₂排出量の算出結果を図-4.2に示す。

<開削工法と管きよ更生工法の比較>

- 1) 開削工法と管きよ更生工法の総CO₂排出量について、開削工法のCO₂排出量の方が管きよ更生工法のCO₂排出量よりもCASE 1 (φ400mm)の場合、約1.5~4倍、CASE 2 (φ600mm)の場合、約1.5~3倍多い。
- 2) 管きよ更生工法の総CO₂排出量は、開削工法のプロセス1(製造)における塩化ビニル管の製造よりも少ない。
- 3) CO₂排出量の面から下水管きよの更生には、開削工法よりも非開削工法である管きよ更生工法の方が優れている。

<管きよ更生工法間の比較>

各管きよ更生工法におけるCO₂排出量に係る考察は、次のとおりである。

- 1) CASE 1 (φ400mm)、CASE 2 (φ600mm)はともに、製管工法における総CO₂排出量が最も少ない。
- 2) 各工法の特徴として、プロセス毎でのCO₂排出量について、製管工法はプロセス1(製造)のCO₂排出量が最も多く、総排出量の約80%を占めている。
- 3) 反転工法と形成工法のプロセス1(製造)のCO₂排出量は、約60%~70%を占めている。
- 4) 製管工法の更生管の原材料が塩化ビニルに対し、反転工法と形成工法は樹脂(ポリエステル)であり、製管工法では、裏込材の使用量が多いため、プロセス1(製造)のCO₂排出量が多くなっている。
- 5) 製管工法の施工時のCO₂排出量が他の工法よりも少ないため、相対的にプロセス1(製造)のCO₂排出量が多くなっており、このことが管径の増大に伴う製管工法のCO₂排出量の伸びを抑える要因となっている。
- 6) 反転工法と比較した場合、形成工法は管径の増大に伴う更生材の厚みが顕著に増大するため、硬化に必要な時間が延長することで、施工時のCO₂排出量が大きく伸びている。

以上から、CO₂排出量の観点からは、製管工法が優位な工法と言える。

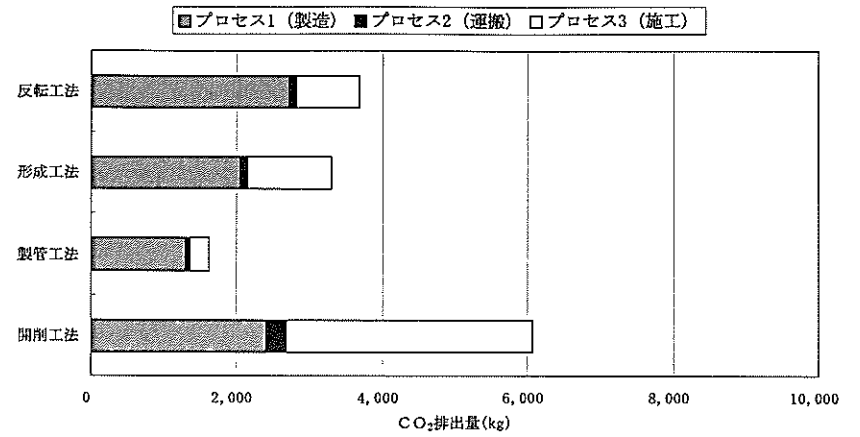


図-4.2(1) 各工法のCO₂排出量 (CASE 1: φ 400mm)

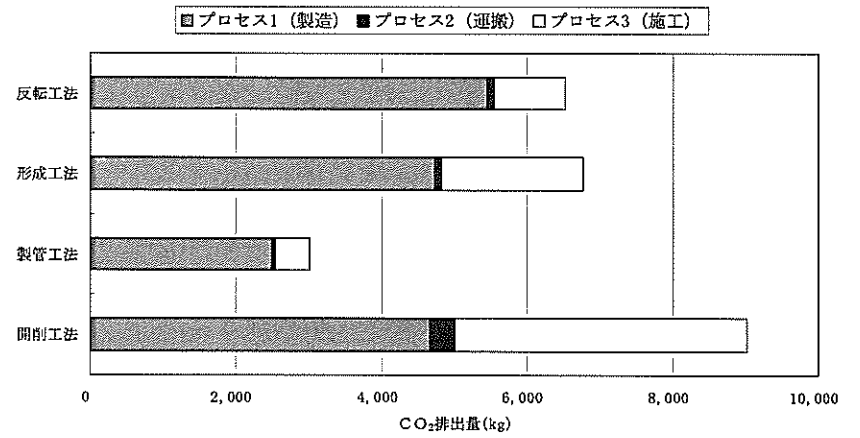


図-4.2(2) 各工法のCO₂排出量 (CASE 2: φ 600mm)

c) NO_x 排出量

各工法のNO_x排出量の算出結果を図-4.3に示す。

<開削工法と管きよ更生工法の比較>

- 1) 開削工法と管きよ更生工法の総NO_x排出量について、開削工法のNO_x排出量の方が管きよ更生工法のNO_x排出量よりもCASE 1 (φ400mm)の場合、約3~4倍、CASE 2 (φ600mm)の場合、約2.5~3倍多い。
- 2) 管きよ更生工法の総NO_x排出量はCO₂排出量と同様に、開削工法のプロセス1(製造)における塩化ビニル管の製造よりも少ない。
- 3) NO_x排出量の面から下水管きよの更生には、開削工法よりも非開削である管きよ更生工法の方が優れている。

<管きよ更生工法間の比較>

各管きよ更生工法におけるNO_x排出量に係る考察は、次のとおりである。

- 1) CASE 1 (φ400mm), CASE 2 (φ600mm)はともに、製管工法の総NO_x排出量が最も少なく、他の工法(反転工法, 形成工法)の70%程度である。
- 2) 各工法の特徴として、プロセス毎でのNO_x排出量について、いずれの工法ともプロセス1(製造)のNO_x排出量が最も多く、総排出量に対して、反転工法が約70~80%、形成工法が約60%、製管工法では約90%を占めている。
- 3) CO₂排出量では反転工法と形成工法のプロセス1での割合は小さかったが、NO_x排出量ではその割合が多くなっている。これは、表-4.11に示すとおり、製管工法の更生管の原材料である塩化ビニルと反転工法や形成工法の更生管の原材料である樹脂(ポリエステル)の環境負荷原単位において、CO₂だけが大きく異なるためである。

表-4.11 評価点を用いた各工法の評価結果 (CASE 2)

材 料	単 位	エネルギー 消費 (kcal)	環境負荷量		
			CO ₂ 排出 (kg)	NO _x 排出 (kg)	SO _x 排出 (kg)
プロファイル	/kg	11,600	1.66	0.00225	0.00208
樹脂 (ポリエステル)	/kg	13,200	3.85	0.00260	0.00315

- 4) 形成工法は、管径の増大に伴う更生材の厚みが反転工法と比較し

た場合、これが顕著に増大するため、硬化に必要な時間が延長することにより、施工時のNO_x排出量が大きく伸びている。

以上から、NO_x排出量の観点からは、製管工法が優位な工法と言える。

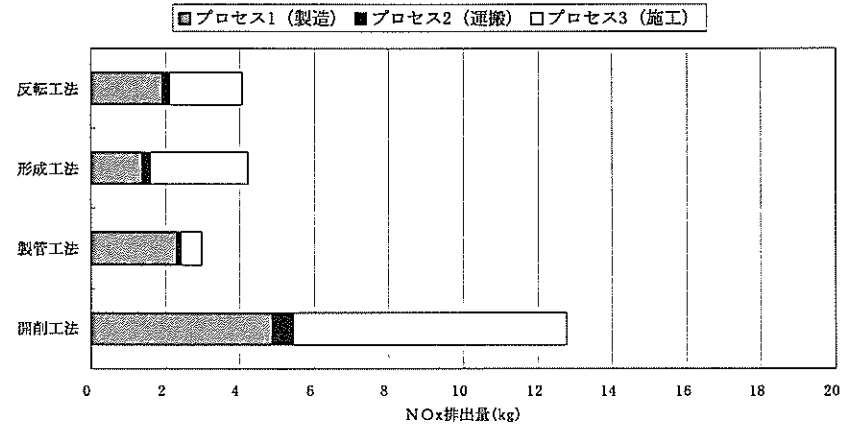


図-4.3(1) 各工法のNO_x排出量 (CASE 1: φ400mm)

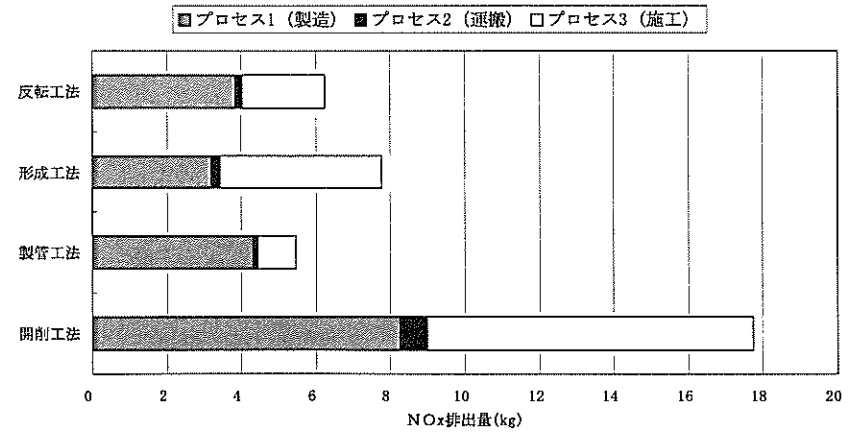


図-4.3(2) 各工法のNO_x排出量 (CASE 2: φ600mm)

d) SO_x 排出量

各工法の SO_x 排出量の算出結果を図-4.4 に示す。

<開削工法と管きよ更生工法の比較>

- 1) 開削工法と管きよ更生工法の総 SO_x 排出量について、開削工法の SO_x 排出量の方が管きよ更生工法の SO_x 排出量よりも CASE 1 ($\phi 400\text{mm}$)、CASE 2 ($\phi 600\text{mm}$) とともに 2 倍以上多い。特に、製管工法と比較すると、製管工法の SO_x 排出量が少ないため、6 倍以上開削工法の SO_x 排出量が多い。
- 2) SO_x 排出量の面から下水管きよの更生には、開削工法よりも非開削である管きよ更生工法の方が優れている。

<管きよ更生工法間の比較>

各管きよ更生工法における SO_x 排出量に係る考察は、次のとおりである。

- 1) CASE 1 ($\phi 400\text{mm}$)、CASE 2 ($\phi 600\text{mm}$) はともに、製管工法における総 SO_x 排出量が最も少なく、他の工法(反転工法、形成工法)の 30% 程度である。
- 2) これは製管工法におけるプロセス 1(製造)の裏込材(セメントと砂)製造のセメントの SO_x 原単位が非常に小さいためである。
- 3) 各工法の特徴として、プロセス毎での SO_x 排出量について、反転工法と製管工法ではプロセス 1(製造)が約 50% を占め、形成工法ではプロセス 1(製造)が約 40% を占めている。
- 4) 反転工法と比較した場合、形成工法は管径の増大に伴う更生材の厚みが顕著に増大するため、硬化に必要な時間が延長することにより、施工時の SO_x 排出量が大きく伸びている。

以上から、 SO_x 排出量の観点からは、製管工法が優位な工法と言える。

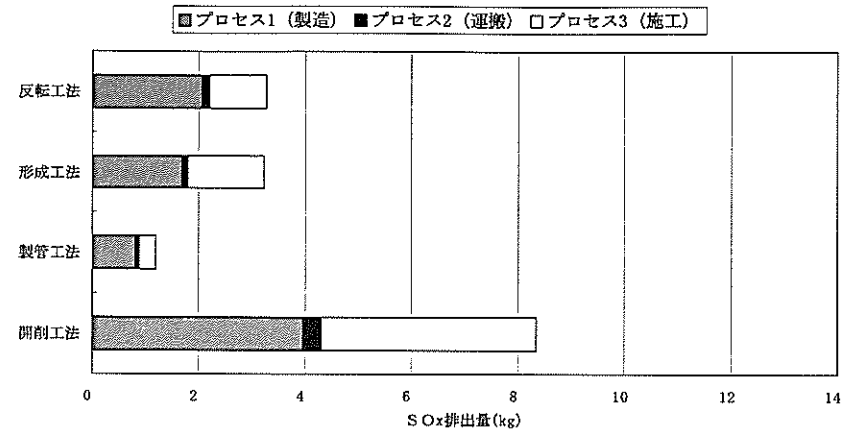


図-4.4(1) 各工法のSO_x排出量 (CASE 1: φ400mm)

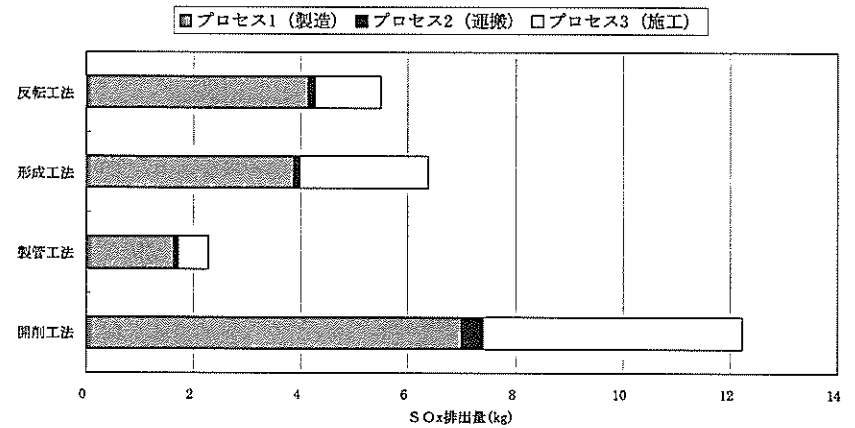


図-4.4(2) 各工法のSO_x排出量 (CASE 2: φ600mm)

4.5 管きよ更生工法のLCA評価結果および考察

4.5.1 環境負荷の算出結果

(1) 開削工法と非開削工法の環境負荷の比較

いずれの環境負荷項目においても、非開削工法の環境負荷の方が開

削工法の環境負荷より少ない。開削工法では、特に施工時の環境負荷が多く、開削工法の施工時の CO_2 排出量、 NO_x 排出量、 SO_x 排出量は、いずれも非開削工法のトータル負荷よりも多い。

以上のことから、今回の検討条件においては、開削工法と非開削工法では、非開削工法の方が環境負荷の少ない工法である。

(2) 非開削工法間の環境負荷の比較

いずれの環境負荷項目においても、製管工法の環境負荷が最も少ない。

エネルギー消費量について、いずれの工法も製造時のエネルギー消費量の割合が最も高く、反転工法と形成工法では約60~70%を占め、製管工法で80%を占める。製管工法のエネルギー消費量が少ないのは、製管工法の原材料が塩化ビニルに対して反転工法と形成工法の原材料がポリエステル系樹脂であり、本研究で使用した原単位によれば、塩化ビニルよりポリエステル系樹脂の方がエネルギー消費量は多く、また、その使用量も多いためである。このことは、 CO_2 排出量と SO_x 排出量についても同様である。

一方で、 NO_x 排出量については、製管工法の製造時の方が反転工法や形成工法の製造時よりも多い。これは製管工法の裏込材として使用するセメントの NO_x 排出量が非常に多いためである。

以上から、製管工法は、ライニング材の主原料が塩化ビニルであり、その環境負荷原単位が反転工法や形成工法の主原料であるポリエステル系樹脂よりも小さく、また、同延長の更生に必要な材料の使用量も少ない。さらに、施工時の環境負荷も反転工法や形成工法よりも小さいことからトータルの環境負荷も小さく、今回検討の対象とした工法の中で最もLCAの評価からは優位にある工法である。

4.5.2 総合評価

(1) 総合評価の方法

本研究では、エネルギー消費量に加え、 CO_2 排出量、 NO_x 排出量、 SO_x 排出量を算出した。評価方法として、式(1)に示すように、各項目の最小値を基準(1.000)とし、各工法を相対的に表現した。さらに、環境負荷項目については、その項目の重要度(式(2)のa, b, c, d)についての検討が必要であると考えられるが、ここではすべての重要度(a=b=c=d=1.0)が等価と考え、式(2)により、各工法の評価点を算出した。すなわち、合計値が大きい工法ほど同じ条件下での管きよ更生において、トータルの環境負荷の排出量が少なく、評価が高い工法であることを意味する。

$$\begin{aligned} \text{各項目の評価点} &= \text{各環境負荷量の中の最小値} \\ &\div \text{各環境負荷量} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{評価点合計} &= a \cdot \text{エネルギー消費の評価点} \\ &+ b \cdot \text{CO}_2 \text{の評価点} + c \cdot \text{NO}_x \text{の評価点} \\ &+ d \cdot \text{SO}_x \text{の評価点} \end{aligned} \quad (2)$$

(2) 総合評価結果および考察

先に示した表-4.10 から、LCA評価の観点から最も優位な管きよ更生工法は、非開削工法である製管工法である。また、反転工法ならびに形成工法の双方間にほとんど差はない。しかし、製管工法と比較すると、評価点は約半分である。また、開削工法におけるエネルギー消費、CO₂排出、NO_x排出、SO_x排出の各評価点は、製管工法の各評価点の15~25%程度であり、トータルの評価点も製管工法の20%程度である。

以上のことから管きよ更生工法について、エネルギー消費、CO₂排出、NO_x排出、SO_x排出の観点から総合的に評価した結果、製管工法が最も優位な工法であることが明らかになった。

4.6 結 論

本研究では、管きよ更生工法のうち反転工法、形成工法、製管工法の中から代表的な工法を選定し、LCAによる環境負荷の比較評価を行った。また、従来工法である開削工法との比較から、下水管きよの更生工法の環境負荷の定量化を行った。

ここで得られた知見を以下に示す。

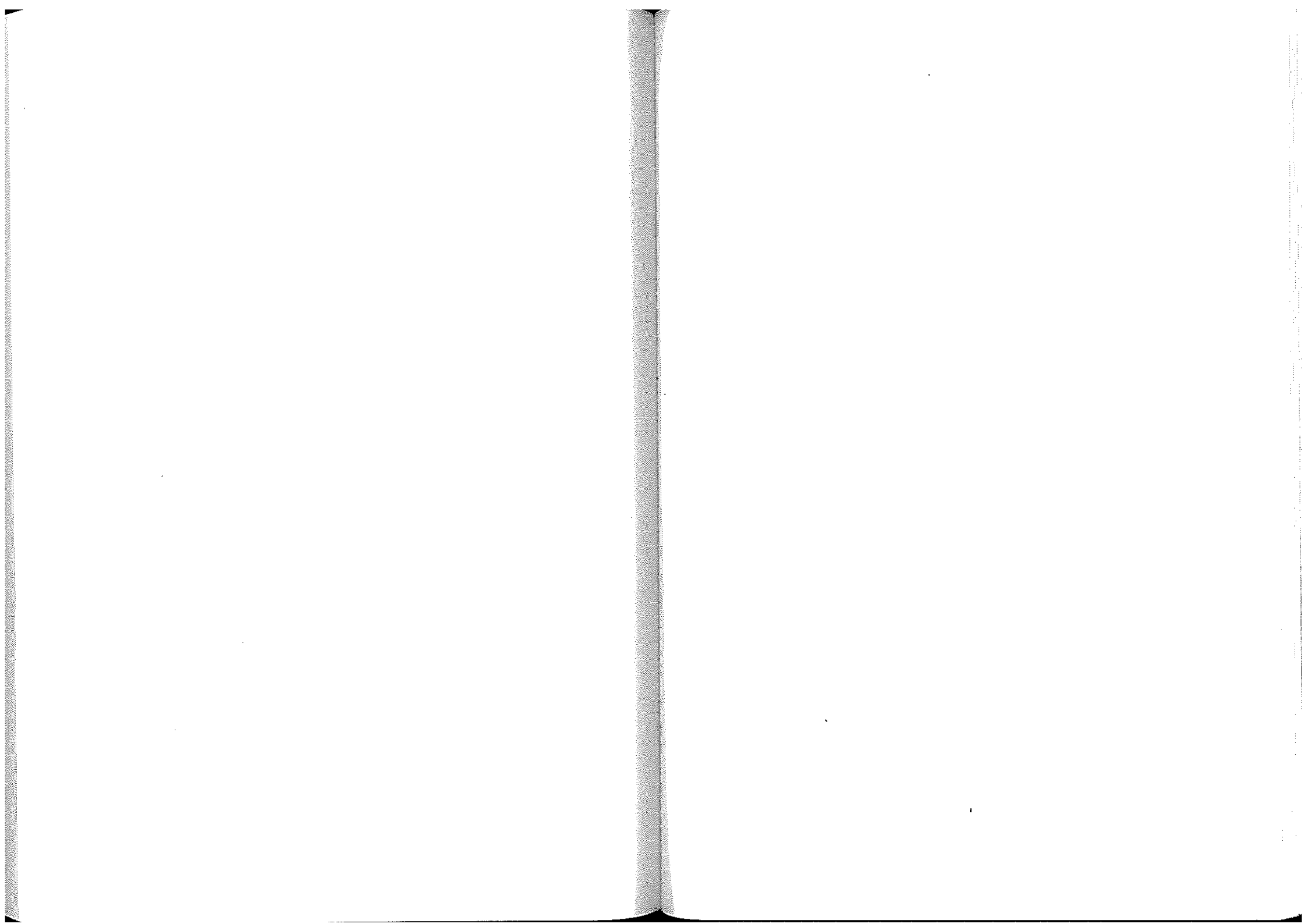
- 1) 開削工法と非開削工法の環境負荷とを比較した結果、非開削工法の環境負荷が小さい。これは開削工法では、埋戻し土の施工時の環境負荷をはじめ施工時に発生する環境負荷が非常に大きいことによる。
- 2) 非開削工法の中から反転工法、形成工法、製管工法を選定し、同条件における環境負荷を定量した結果、エネルギー消費量、CO₂排出量、NO_x排出量、SO_x排出量のいずれの項目においても、製管工法におけるエネルギー消費量および各排出量が少なく、環境面において優れた工法であることを明らかにした。
- 3) 製管工法が環境面で最も優れている理由は、製造時および施工時の環境負荷が他の工法より少ないためである。特に、製造時にお

いては、製管工法の主材料である塩化ビニルが他の工法の主材料であるポリエステル系樹脂よりも環境負荷原単位が小さく、その使用量も少ないため、環境負荷が小さくなっている。

以上より、本研究にて、管きょ更生工法のエネルギー消費量、 CO_2 排出量、 NO_x 排出量、 SO_x 排出量を定量し、総合的に評価した結果、製管工法が最も優位な工法であることを明らかにした。

【参考文献】

- 1) Motoi MURAOKA, Yasuhiko WADA: "LIFE CYCLE ASSESSEMENT OF THE REHABILITATION METHODS OF SEWER PIPES", Proceedings of The Seventh international Conference of Ecobalance, pp.347-350, Tsukuba/JAPAN, 2006.
- 2) Yasuhiko WADA, Motoi MURAOKA: "SOCIOECONOMIC EVALUATION OF THE REHABILITATION METHODS OF SEWER PIPES", Proceedings of The Seventh international Conference of Ecobalance, pp.343-346, Tsukuba/JAPAN, 2006.
- 3) 和田安彦, 村岡基: 下水道管きょ更生工法の社会経済的評価, 第44回下水道研究発表会講演集, pp.346-348, 2007.
- 4) ENVIRONMENT COMMITTEE VINYL ENVIRONMENTAL COUNCIL, REPORT ON INVESTGATION OF LCI DATA CONCERNING RECYCLING, PROCESSING AND DISPOSAL OF POLYVINYL CHLORIDE PRODUCTS, JAPAN, 2001.
- 5) (社)日本建築学会: L C A データベース1995年産業連関分析データ版, Ver2.2, 2003.
- 6) 新エネルギー・産業技術総合開発機構: 化学工業製品におけるトータル・エコバランスの分析手法に関する調査, 平成6年3月, 1994.
- 7) 経済産業省製造産業局繊維課: 繊維製品(衣料品)のL C A 調査報告書, 2004.
- 8) 塩化ビニル環境対策協議会: 塩化ビニル樹脂加工製品のL C I データ調査報告書, 1999.
- 9) REPORT ON INVESTIGATION OF LCI DATA CONCERNING RECYCLING, PROCESSING AND DISPOSAL OF POLYVINYL CHLORIDE PRODUCTS, ENVIRONMENT COMMITTEE VINYL ENVIRONMENTAL COUNCIL, JAPAN, 2001.



第5章 管きよ更生工法の社会的な評価に関する研究

5.1 緒論

下水管きよの経年管が増加するにつれて、これの改築等に伴う工事も増加することが見込まれるが、これに伴う交通渋滞や騒音・振動等の周辺環境への影響も想定され、これらも管きよ更生工法を選定する上で考慮すべき重要な項目である。

したがって、今後の下水管きよの更生工法選定に当たっては、建設費等のインシヤルコストだけでなく、工事に伴う周辺環境への影響等の環境コスト等も考慮し、総合的に評価する必要がある。

本研究では、管きよ更生工法のうち反転工法、形成工法、製管工法の中から代表的な自立管の工法を選定し、建設コスト（内部コスト）および環境コスト（外部コスト）を算出し、比較評価を行った。また、従来工法である開削工法との比較も行い、下水管きよの更生工法の建設コストと環境コストを含めたトータルコストとしての評価から経済面において優れた手法を明らかにした^{1) - 3)}。

5.2 本研究の位置づけ

近年の下水道事業予算の減少等もあって、自治体は財政的に厳しい局面を迎えており、老朽管の改築工事における低コストを掲げた工法の技術開発が活発化している。この改築工事に伴うものとして、路上工事による交通渋滞や騒音・振動等の周辺環境への影響が挙げられるが、社会背景として、地域住民の環境に対する意識の高まりから、これらも考慮すべき重要な項目となっている。

下水道工事の場合、施工費用や材料費等の建設コストは事業者の負担となるが、工事に伴う交通渋滞や騒音・振動といった被害は、事業者ではなく、地域住民が機会損失や健康・精神的な被害という形で負担している。また、環境に与える影響は許容限度内であれば無視されている。

これらに対し、社会経済では、被害がコストとして算出されない限り、事業者等が自ら影響要因を見出し、対処するというインセンティブは働きにくい。したがって、今後の下水管きよの改築工事の工法の選定に当たっては、建設コストのみならず、工事に伴い発生する周辺環境へ与える影響も環境コストとして算出し、双方を加算した結果で

あるトータルコストを評価する必要がある。

そこで、本研究では、管きよ更生工法のうち、反転工法、形成工法、製管工法の中から代表的な自立管工法を選定し、環境コストを考慮したトータルコストを算出の上、比較検討を行った。また、各工法について環境負荷の面からも考察を行った。さらに、従来工法である開削工法との比較も行い、下水管きよの改築工事において環境を配慮した経済面で評価が高い工法についても考察を加えた。

5.3 管きよ更生工法の建設コストと環境コストの算出条件

5.3.1 比較工法の選定

下水管きよの改築工事のうち、更生工法には、反転工法、形成工法、製管工法、鞘管工法がある。

本研究では、これらのうち、

ア.反転工法（温水硬化）

イ.形成工法（温水硬化）

ウ.製管工法

の3種それぞれから代表的な自立管工法を選定した。

本研究では、管きよ更生工法との比較のため、開削工法も対象に選定した。ただし、ここで使用する開削工法の比較モデルは、腐食劣化した既設ヒューム管の敷設替えを目的とし、管径の適合性と耐食性を考慮して、既設管きよと同じヒューム管は用いず、硬質塩化ビニル管を新設することを条件とした。また、比較モデルに適用した管径は、公共下水道事業を実施している自治体において、公道下に埋設されている汚水幹線としての採用例が豊富な管径という観点から400mmを選定した。さらに、工法間での算出コストの差を際立たせるため、前章の人孔間距離の倍に当たる100.00mを算出の対象とした。

5.3.2 建設コストの算出条件

建設コストの算出は、国土交通省の土木工事積算基準⁴⁾、(社)日本下水道協会の下水道用設計積算要領⁵⁾ならびに各工法の積算資料を参考に行った。建設コストの算出条件は、表-2のとおり設定した。開削工法は、腐食劣化した既設の鉄筋コンクリート管（ヒューム管）を対象とし、管径の適合性と耐食性を考慮した場合に有効的な硬質塩化ビニル管に日進量4.0mで敷設替えすることとした。また、管きよ更生工法においても、開削工法と同様の既設管を対象として、内面被覆および形成を行うこととした。

検討ケースである 400mm の既設管の敷設条件を表-5.1 に示す。また、新設管の建設コストの算出条件のうち、開削工法と管きよ更生工法の条件を次に示す。

(1) 開削工法の条件

① 新設管の仕様

- ・管種：硬質塩化ビニル管（VU管）
- ・管径：φ400mm

② 施工現場および資材等の運搬

- ・施工現場：都心部

表-5.1 既設管の敷設条件

項目	開削工法	管きよ更生工法
管種	鉄筋コンクリート管（HP管）	
管径	φ400mm	
人孔間距離	100.00m	
上・下流人孔	1号人孔（内径900mm）	
管体延長	99.10m	
土被り	2.00m	
対象道路	一般市町村道（幅員5.0m）	
舗装構成	表層：アスファルト	t = 5cm
	路盤：粒調碎石	t = 15cm

- ・管材料運搬距離：50km
（工場立地場所から都心部までの運搬を想定）
- ・上記以外材料運搬距離：10km
（都市近隣郊外から都心部までの運搬を想定）
- ・建設機械運転距離：10km
（都市近隣郊外から都心部までの運転を想定）
- ・処理、処分地までの運搬距離：30km
（都心部から臨海埋立地または山間処分地までを想定）

③ 施工範囲

- ・本管についてのみ施工を行い、取付管は考慮せず

(2) 管きよ更生工法の条件

① 施工現場および資材等の運搬

- ・施工現場：都心部
- ・管きよ更生材料運搬距離：50km
（工場立地場所から都心部までの運搬を想定）
- ・建設機械運転距離：10km

(都市近隣郊外から都心部までの運転を想定)

・処理、処分地までの運搬距離：30km

(都心部から臨海埋立地または山間処分地までを想定)

②施工範囲

・本管についてのみ施工を行い、取付管は考慮せず

5.3.3 環境コストの算出条件

一般的な土木工事において、外部周辺環境に影響を与える主な項目としては、

- ① 交通渋滞
- ② 騒音
- ③ 振動
- ④ 大気汚染
- ⑤ 水質汚濁
- ⑥ 建設副産物
- ⑦ 動植物の保全
- ⑧ 景観

等が挙げられる。

このうち⑦は、対象地域に動植物の保全は必要ないこと、⑧はある程度の影響はあると思われるが、その影響は小さいと予想されるため、本研究では①～⑥を対象とし、算出の可能性を詳しく検討する。

①は、工事の際の交通規制等によって発生する交通渋滞について算出する。

②は、建設機械の使用によって発生する騒音について算出する。

③は、建設機械の使用によってある程度の影響はあると考えられるが、その影響は小さく、また環境コストの算出の際に用いる原単位の適切な設定が現段階では困難であるため除外した。

④は、建設機械を使用することによって発生するCO₂、NO_xおよびSO_xについて算出する。

⑤は、地下水が発生しない工事区間と設定としたため、水質環境に影響はないとして除外した。

⑥は、掘削や舗装によって発生する建設発生土やアスファルト混合物の埋立てによる影響について算出する。

5.3.4 交通渋滞の算出方法

開削工事を行う際、供用中の道路の一部を占有しなければならず、それによって車線数の減少や、片側交互通行等の交通規制によって、社会的に影響を与える交通渋滞が発生する。その際の交通渋滞による

走行時間の遅れによる環境コストを算出する。

交通渋滞による環境コストの算出方法および原単位については、国土技術政策総合研究所が東京大学大学院国島正彦教授を委員長とする環境コストを組み入れた建設事業コストの低減技術に関する検討委員会を設置し、取りまとめられた「総合的な建設事業コスト評価指針（試案）」⁶⁾に示されている交通渋滞原単位（表-5.2）に従い、式（1）をもって算出する。

表-5.2 交通渋滞原単位

車種	原単位 (円/台・分)
乗用車	56
バス	496
小型貨物車	90
普通貨物車	101

交通渋滞による環境コスト（円）

$$= \sum \{ \text{渋滞による走行時間遅れ（分）} \times \text{車種別延べ台数（台）} \times \text{原単位（円/台・分）} \} \quad (1)$$

延べ台数とは交通規制時間中に通過した車種別交通量である。また、交通渋滞の考え方を図-5.1に示す。ただし、具体的には渋滞による走行時間遅れの算出条件は、以下に示すとおり設定した。

対象道路は、図-5.2および表-5.3にあるとおり2車線道路を対象とし、国土交通省の平成17年度交通量センサスを基に交通量の平均値に近い24,000台/日（大型車混入率18%）を選定した。その時間別交通量を図-5.3に示す。また、工事規制時間は9時～17時（8時間）とし、片側交互通行とした。その際の信号現示、青信号・赤信号時における通過可能台数等を考慮して25秒とし、規制区間の通過速度は、実際の徐行速度での通行は考えられないことから、法定速度に徐行速度を足し、半分に除した30km/hとした。通常時の通過速度においては、法定速度である50km/hとした。なお、規制区間長について、開削工事は日進量4.0mを考慮した上、工事車両・資材仮置場等の余裕をみて50mとし、非開削工事は、それぞれの工法の可能日進量が100mであるため、工事車両等の余裕を見込んでいずれの工法も110mとした。

ただし、渋滞による走行時間遅れの算出においては、自動車の通常時の走行速度と規制時の走行速度を求め、その差から算出した。

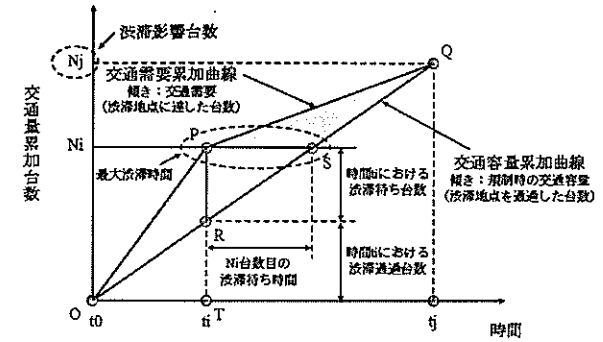


図-5.1 交通量累加曲線

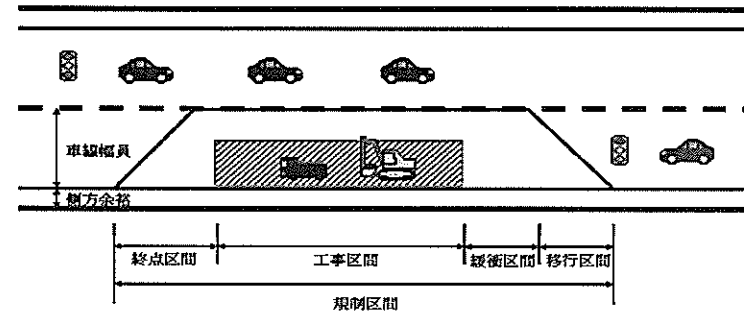


図-5.2 算出モデルイメージ

表-5.3 交通渋滞算出条件

項目	開削工法	管きよ更生工法
規制時間	9時～17時	
規制区間長(m)	50	110
信号現示(青時間)(秒)	25	
信号サイクル長(秒)	80	
道路車線数	2	
交通量(台/日)	24,000	
9時～17時交通量(台)	11,000	
大型車混入率(%)	18	
通常時走行速度(km/h)	50	
規制区間走行速度(km/h)	30	

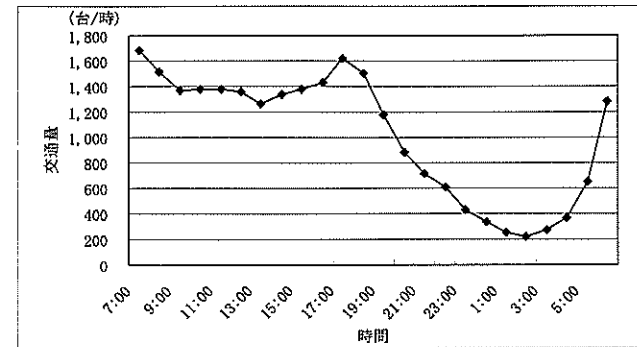


図-5.3 交通量

5.3.5 騒音の算出方法

掘削工事や舗装復旧時に発生する騒音は、周辺住民にある程度の影響を与えている。そこで、建設機械によって発生する騒音について環境コストを算出する。

騒音による環境コストの算出方法および原単位については、先に挙げた総合的な建設コスト評価指針（試案）に示された騒音原単位（表-5.4）に従い、式(2)により算出する。

表-5.4 騒音原単位⁶⁾

環境コスト項目	原単位
騒音	0.55 円/dB・m ² ・日

騒音による環境コスト（円）

$$= \{ \text{土工事騒音 (dB)} - 55\text{dB} \} \times \text{影響住居地面積 (m}^2\text{)} \\ \times \text{工事日数 (日)} \times \text{原単位 (円/dB} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{日)} \quad (2)$$

また、具体的な騒音の影響範囲は次のとおり設定した。騒音の影響範囲は、選定が困難であることから、国土交通省の工事に関する騒音基準値を用いた。ただし、環境コストを考慮した路上工事工法の評価の既往論文を参考にして、官民境界地点において測定を行ったと仮定し、開削と管きよ更生のそれぞれの工事延長を50mと110m、沿道範囲を20mとし、住宅・商業地占有率は60%とした。

5.3.6 大気汚染の算出方法

開削工事や管きよ更生工事を行う際に使用する建設機械等から発生

する排出ガスが周辺住民や地球環境へ悪影響を与えている。そこで、工事によって発生する排出ガスによる環境コストを算出する。該当する排出ガスの項目としては、 CO_2 、 NO_x 、 SO_x が挙げられるが、このうち SO_x については、環境基準達成率が一般環境大気測定局および移動測定局 99.9%、自動車排出ガス測定局 100%とともに良好な状態が続いているため⁷⁾、本研究では算出対象外とした。

大気汚染による環境コストの算出方法に関し、表-3の式では算出が困難なため、原単位だけを用いることとした。 NO_x 排出による環境コストの算出については、国土交通省北陸地方整備局神通川水系砂防事務所の方法および排出係数(表-5)⁸⁾を用い、次式により算出を行った。

$$\begin{aligned} & \text{NO}_x \text{ 排出による環境コスト (円)} \\ & = \sum \{ \text{NO}_x \text{ 排出量 (kg/h)} \times \text{稼働時間 (h)} \\ & \quad \times \text{原単位 (円/kg)} \} \quad (3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \text{NO}_x \text{ 排出量 (kg/h)} \\ & = \text{定格出力 (kW)} \times \text{NO}_x \text{ 排出係数 (kg/kWh)} \quad (4) \end{aligned}$$

定格出力の小さい建設機械においては、 NO_x 排出係数が算出できないため、“Report on Investigation of LCI Data Concerning Recycling, Processing and Disposal of Polyvinyl Chloride Products”の排出原単位(表-6)⁹⁾を参照にして算出を行った。また、燃料消費量は、防衛施設庁の土木工事標準歩掛による建設機械運転経費の値を用いた(表-7)¹⁰⁾。以下に算出式を示す。

$$\begin{aligned} & \text{NO}_x \text{ 排出による環境コスト (円) (定格出力の小さい建設機械)} \\ & = \sum \{ \text{NO}_x \text{ 排出量 (kg/h)} \times \text{稼働時間 (h)} \\ & \quad \times \text{原単位 (円/kg)} \} \quad (5) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \text{NO}_x \text{ 排出量 (kg/h)} \\ & = \text{定格出力 (kW)} \times \text{燃料消費量 (L/kWh)} \\ & \quad \times \text{NO}_x \text{ 排出原単位 (kg/L)} \quad (6) \end{aligned}$$

CO_2 については、(社)日本建設機械化協会の建設業部会による報告書「建設工事における二酸化炭素【 CO_2 】排出量の算定」の方法¹¹⁾を用い、次式により算出した。排出原単位、燃料消費量は NO_x と同じく、表-5.5および表-5.6の値を用いた。また、原単位については、先述の総合的な建設コスト評価指針(試案)に示された大気汚染原単位(表-5.7)⁸⁾に従い算出した。

CO₂排出による環境コスト（円）

$$= \Sigma \{ \text{CO}_2 \text{ 排出量 (kg/h)} \times \text{稼働時間 (h)} \\ \times \text{原単位 (円/kg)} \} \quad (7)$$

CO₂排出量（kg/h）

$$= \text{定格出力 (kW)} \times \text{燃料消費量 (L/kWh)} \\ \times \text{CO}_2 \text{ 排出原単位 (kg/L)} \quad (8)$$

表-5.5 排出原単位

項目	NO _x 原単位 (kg/L)	CO ₂ 原単位 (kg/L)
ガソリン	0.001	2.55
軽油	0.006	2.84
灯油	0.006	2.72

表-5.6 燃料消費量

建設機械名	燃料消費量 (L/kWh)
ブルドーザー	0.175
バックホウ	
ダンプトラック	0.050
トラック	
トラッククレーン	0.044
振動ローラ（ハンドガイド）	0.201
振動ローラ（搭乗式）	0.152
タンパおよびランマ	0.301
路面切削機	0.144
発動発電機	0.436

表-5.7 大気汚染原単位

環境コスト項目		原単位
建設機械	CO ₂	2.3円/kg-C
	CO ₂ （ディーゼル）	1.7円/L
	NO _x	200円/kg

5.3.7 建設副産物の算出方法

工事によって発生した建設副産物（残土、アスファルト混合物）は、埋戻し等に再利用できるが、本研究では、掘削によって発生した土やアスファルト殻は埋立地に処分することとした。そのため、社会コストが発生する。そこで建設副産物による環境コストの算出を行う。また、建設副産物によるコストの算出方法および原単位については、先に挙げた総合的な建設コスト評価指針（試案）に示された建設副産物原単位（表-5.8）に従い、式(9)により算出する。

表-5.8 建設副産物原単位⁶⁾

環境コスト項目	原単位
建設発生土	853 円/t
アスファルト混合物	1,631 円/t

建設副産物による環境コスト

$$= \text{発生量 (t)} \times \text{原単位 (円/t)} \quad (9)$$

5.4 管きょ更生工法の建設コストと環境コストの算出結果

5.4.1 建設コストの算出結果

建設コストの算出結果を表-5.9に示す。

表-5.9 建設コストの算出結果

工 法 名	建設コスト (千円)
反転工法	7,297
形成工法	6,994
製管工法	6,518
開削工法	16,463

管きょ更生工法では、製管工法が反転工法、形成工法より7~12%程安価である。工法によって歩掛りが異なることから、単純に比較できないが、製管工法が最も経済的となった理由は、他の工法よりも管きょ更生材が安価なためである。また、開削工法と非開削工法である管きょ更生工法との比較では、開削工法が新築する工法であるのに対し、管きょ更生工法は改築する工法であることから、開削工法のコストは

管きよ更生工法の 2.3~2.5 倍程度である。これは開削工法の場合は、管きよ敷設工だけでも、管きよ更生工法より高いが、さらに道路舗装工等もあることから非常に高くなっている。

5.4.2 環境コストの算出結果

環境コストの算出結果を表-5.10~5.13 に示す。これらをグラフ化した図-5.4 の各工法の環境コストより、管きよ更生工法においては、工事の日進量が多い形成工法と製管工法が反転工法より安価である。また、製管工法は反転工法、形成工法より、CO₂やNO_xの排出による環境コストが安価であることから、最も環境負荷が小さい工法である。

開削工法と管きよ更生工法の比較では、日進量が非常に少ないために作業時間が長くなり、それによって環境コストも高くなっている。また、掘削や舗装等の工事による建設機械による排出ガスや建設副産物による社会コストも高くなっている。なお、ここで言う社会コストとは、企業等によって通常負担されないコスト、すなわち外部不経済として社会が負担しているものを指す。

さらに、開削工法、管きよ更生工法ともに各環境コストの項目を比較すると、交通渋滞の環境コストの値が非常に高いものとなっている。

表-5.10 環境コストの算出結果
(反転工法)

項目	環境コスト (千円)
交通渋滞	1,370
大気汚染	5
計	1,375

表-5.11 環境コストの算出結果
(形成工法)

項目	環境コスト (千円)
交通渋滞	913
大気汚染	4
計	917

表-5.12 環境コストの算出結果
(製管工法)

項目	環境コスト (千円)
交通渋滞	913
大気汚染	1
計	914

表-5.13 環境コストの算出結果
(開削工法)

項目	環境コスト (千円)
交通渋滞	5,812
騒音	160
大気汚染	93
建設副産物	182
計	6,247

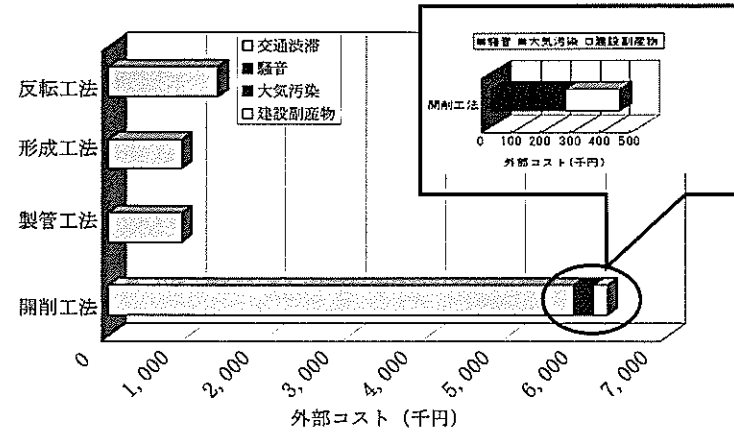


図-5.4 各工法の環境コスト

5.5 トータルコストの算出結果

建設コストと環境コストから算出したトータルコストを表-5.14と図-5.5に示す。最も経済的な手法は、建設コスト、環境コストともに最も安価な製管工法である。製管工法は、更生材が安いことから建設コストが安価になり、また工事の日進量が大きいことから環境コストも安くなっている。また、建設コストと環境コストにおいて、図-5.5に示すとおり、管きよ更生工法は環境コストの割合が建設コストと比べ、影響が極端に少ない。これは管きよ更生工法の作業時間が短いため、最も環境コストに影響のある交通渋滞が少ないことによる。一方で開削工法は、作業時間が長いために環境コストの影響が大きい。

以上のことから、開削工法と管きよ更生工法を比べると、管きよ更生工法の方が経済的であり、その中でも特に製管工法が経済的であることが明らかとなった。

なお、表-5.14および図-5.5は、既設鉄筋コンクリート管φ400mm、人孔間距離100mの管きよ更生もしくは、開削工法による敷設替えを行った場合の建設コストと環境コストを合算した結果を示している。

表-5.14 トータルコストの算出結果 (単位:千円)

名	反転工法	形成工法	製管工法	開削工法
建設コスト	(表-5.7より) 7,297	(表-5.7より) 6,994	(表-5.7より) 6,518	(表-5.7より) 16,463
環境コスト	(表-5.8より) 1,375	(表-5.9より) 917	(表-5.10より) 914	(表-5.11より) 6,247
トータルコスト	8,672	7,911	7,432	22,710

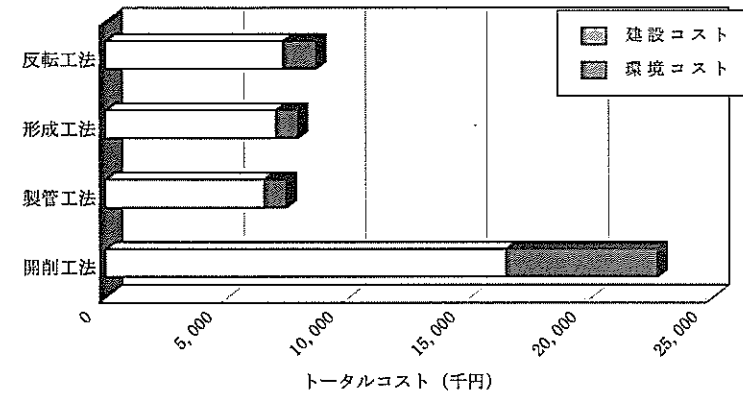


図-5.5 各工法のトータルコスト

5.6 交通渋滞の算出条件による比較

表-5.14 および図-5.5 の結果から、トータルコストに占める環境コストの割合は大きく、特に交通渋滞による環境コストの影響が非常に大きい。そこで、様々なケースにおける交通渋滞による環境コストの算出を行い、どのような影響があるのかを考察する。

5.6.1 比較算出ケース

(1) 昼間・夜間の比較

表-5.14 および図-5.5 の結果から、トータルコストを算出する際の工事時間は昼間であったが、昼間は交通量が多く交通渋滞による環境コストが非常に高くなる。そこで、夜間に工事を行った場合の交通

渋滞による環境コストを算出し、昼間とのコストを検討した。

(2) 規制区間長・信号サイクル長の比較

交通規制によって片側交互通行とした場合、規制区間長と信号サイクル長が交通渋滞に少なからず影響を与えていると考えられる。そこで、規制区間長と信号サイクル長を変化させ、環境コストにどの程度影響を与えているかを算出し評価した。

5.6.2 算出条件

算出条件は、上記トータルコストを算出する際に用いた表-5.2の算出条件を基本ケースとした。

(1) 昼間・夜間の比較

図-5.に示した基本ケースの時間別交通量を用い、昼間の工事時間は9時~17時とし、この間の交通量の合計を11,000台、夜間の工事時間は20時~6時とし、この間の交通量の合計を4,700台とした。それぞれの時間に開削工事を行ったとして、この時の交通渋滞による環境コストを算出した。算出条件を表-5.15に示す。

表-5.15 昼間・夜間の算出条件

規制時間	9時~17時	20時~6時
規制区間長(m)	120	
信号現示(青時間)(秒)	25	
信号サイクル長(秒)	80	
交通量(台/日)	24,000	
9時~17時交通量(台)	11,000	4,700
大型車混入率(%)	18	20
通常時走行速度(km/h)	50	
規制区間走行速度(km/h)	30	

(2) 規制区間長・信号サイクル長の比較

規制区間長・信号サイクル長の比較に関しては、夜間工事について行うものとした。規制区間長は、表-5.3に示した基本ケースで用いた50mを最短とし、100m、150m、200mについて算出した。また、信号サイクル長は、通過可能量を考慮した基本ケースの青時間25秒、40秒、55秒のそれぞれについて算出した。表-5.16に算出条件を示す。

表-5.16 規制区間長・信号サイクル長の設定条件

規制時間	20時～6時
規制区間長(m)	50, 100, 150, 200
信号現示(青時間)(秒)	25, 40, 55
信号サイクル長(秒)	80～160
交通量(台/日)	24,000
20時～6時交通量(台)	4,700
大型車混入率(%)	20
通常時走行速度(km/h)	50
規制区間走行速度(km/h)	30

5.6.3 算出結果および考察

算出結果を図-5.6および図-5.7に示す。図-5.6のとおり、昼間と夜間の交通量を算出し、比較したところ、昼間は夜間より交通量が多いため、環境コストも非常に高くなっており、昼間は夜間の倍以上の環境コストがかかることが分かった。

また、図-5.7では規制区間長と信号青時間(片側交互通行の信号の青時間長さ)を変化させて算出を行い、比較検討を加えた。図-5.7から規制区間長が長くなると環境コストが高くなることが分かる。これは、規制区間長が長くなることによる片側交互通行の信号サイクル長において、信号切替え時に規制区間内の車両を通過させるために両車線赤時間が長くなることによる。さらには、信号サイクルに対する青時間の割合が小さくなるためである。

これらによって、交通渋滞による環境コストが高くなるためと考えられる。また、信号サイクルにおいては、青時間を短くすると環境コストが高くなる結果となった。これも、青時間が短くなることによって、信号サイクルに対する青時間の割合が小さくなるために、交通流がスムーズでなくなり、交通渋滞による環境コストが高くなったと考える。

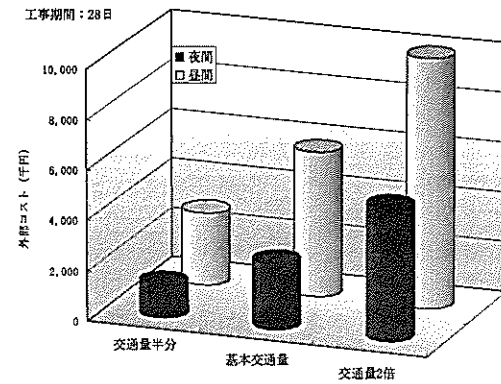


図-5.6 昼間と夜間の比較

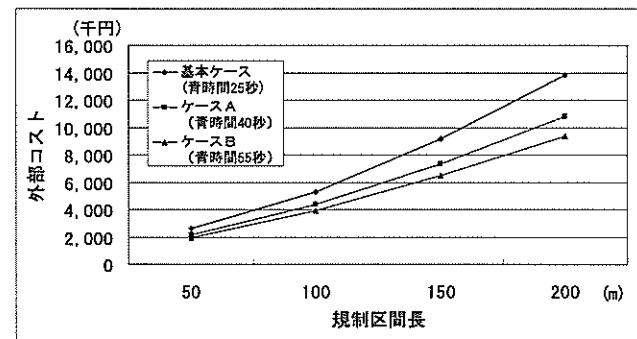


図-5.7 規制区間長と信号青時間の比較

5.7 結論

供用中の道路における下水管きよへの更生工法を用いた工事を対象とした建設コストはもちろんのこと、開削工法と各更生工法の環境コストを含めたトータルコストを算出した。また、交通渋滞による環境コストに着目して、様々な算出条件による環境コストの算出を行い、比較検討を行った。

ここで得られた知見を以下に示す。

- 1) 建設コストと環境コストはともに、管きょ更生工法は開削工法より安価であり、特に製管工法が最も安価である。
- 2) 開削工法の材料費は安い、掘削・埋戻・舗装等の工種があるため、作業時間が長く、建設コスト・環境コストともに非常に高い。
- 3) 管きょ更生工法は、開削工法よりも道路利用者や周辺環境への影響が少なく、トータルコストが安価である。
- 4) 製管工法は、反転・形成工法と比べると更生材が安価なため、建設コストが安い。
- 5) 昼間は夜間と比較すると、交通量が多いため環境コストが高くなる。
- 6) 本研究の算出条件においては、信号の青時間を短く、規制区間長を長くすると、環境コストが高くなる。

以上から、総じて管きょ更生工法は開削工法よりコスト面、環境面の双方において優位である。また、管きょ更生工法は、建設コストの多くを更生材料費が占める。そのため、更生材料価格の低減が重要である。さらに、交通渋滞が環境コストに最も影響を与えることから、路上を占有する作業の時間短縮も重要である。

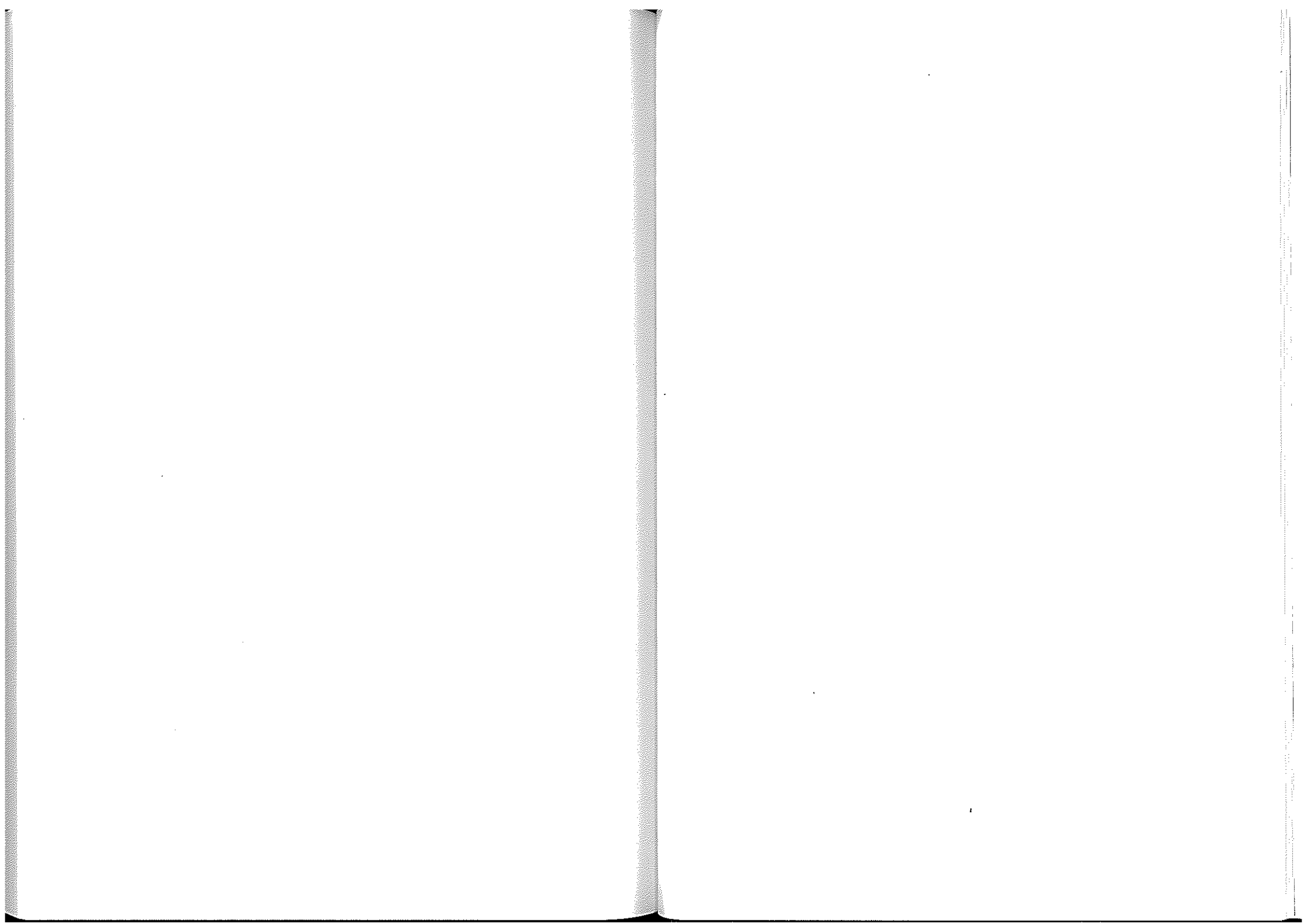
環境コストの中でも、交通渋滞による環境コストが占める割合は大きく、そのため高価になっている。よって、環境コストをより安価にするには、工事作業を交通量が少ない夜間に行うことによって影響を少なくする必要がある。

さらに、規制延長とその時間帯、信号青時間によっても環境コストは変化することから、工事延長や周辺の道路状況等を考慮した上で、工事の時間帯、規制区間長、信号青時間を設定する必要がある。

今後、公共事業の予算が厳しさを増す一方、地球規模での温室効果ガスの排出量削減がより強く求められることが予想される。社会的ニーズからも建設コストによる経済性の評価に留まらず、環境評価も加味した総合評価落札方式の導入への対応も勘案した環境的・経済的に優位性を有した事業展開が行える付加価値を常に追求することが望まれる。本研究は、この点でも、下水道の管きょ更生を通じて、今後の公共事業の工法選定において、新たな切り口を提案したものと考える。

【参考文献】

- 1) Motoi MURAOKA, Yasuhiko WADA: "LIFE CYCLE ASSESSEMENT OF THE REHABILITATION METHODS OF SEWER PIPES", Proceedings of The Seventh international Conference of Ecobalance pp.347-350, Tsukuba/JAPAN, 2006.
- 2) Yasuhiko WADA, Motoi MURAOKA: "SOCIOECONOMIC EVALUATION OF THE REHABILITATION METHODS OF SEWER PIPES", Proceedings of The Seventh international Conference of Ecobalance, pp.343-346, Tsukuba/JAPAN, 2006.
- 3) 和田安彦, 村岡基: 下水道管きよ更生工法の社会経済的評価, 第44回下水道研究発表会講演集, pp.346-348, 2007.
- 4) 国土交通省大臣官房技術調査課監修 (財)建設物価調査会: 国土交通省土木工事積算基準 (平成17年版), 2005.
- 5) (社)日本下水道協会: 下水道用設計積算要領 管路施設(開削工法)編 (2004年版), 2004.
- 6) 環境コストを組み入れた建設事業コストの低減技術に関する検討委員会: 総合的な建設事業コスト評価指針(試案), 平成14年3月, 2002.
- 7) 環境省ホームページ: 環境白書 (平成18年版), 第2章第1節5 硫黄酸化物, 2006.
http://www.env.go.jp/policy/hakusyo/h18/html/kh0602020100.html#2_2_1_7
- 8) 国土交通省北陸地方整備局神通川水系砂防事務所ホームページ: NO_xの排出率の計算について,
http://www.jinzusabo.go.jp/ems/nox_keisan.html
- 9) Environment Committee Vinyl Environmental Council: Report on Investigation of LCI Data Concerning Recycling, Processing and Disposal of Polyvinyl Chloride Products, JAPAN, 2001.
- 10) 防衛施設庁ホームページ: 土木工事標準歩掛の建設機械運転経費, pp.3-6,
<http://www.dfaa.go.jp/jplibrary/kensetsukijun/bpdf/16.pdf>
- 11) (社)日本建設機械化協会ホームページ: 建設業部会施工技術活性化分科会報告 建設工事における二酸化炭素【CO₂】排出量の算定, pp.2, 2002.
<http://www.jcmanet.or.jp/kensetsugyo/a1.pdf>



第6章 結 論

下水道施設の既存能力を活かしながら、現代に見合った下水道システム構築を行おうとしたとき、従来の建設コストの低減を目的とした取り組みだけではなく、周辺環境への影響を可能な限り抑制することをもって環境コストの低減にも取り組むように求められている。

本論文で取り上げた二題の研究テーマのうち、合流式下水道越流システムの制御は、雨天時に処理場で処理されないまま公共用水域へ放流されている未処理汚水について、処理場の既存水処理能力を活かして適正処理を行うよう制御することで、新たな雨水滞水池の建設を不要にするといった財政支出の抑制にも寄与するものである。

また、もう一つのテーマである下水管きよ更生工法の社会経済評価は、今後、増加することが見込まれている下水の老朽管に関し、まとまった期間にわたり交通支障を伴う開削工法に替えて、非開削工法である管きよ更生工法の導入を図ることで、比較的短い工期をもって、周辺環境に対する騒音、振動の影響低減だけでなく、交通渋滞による社会経済損失も抑制可能であることについて、金銭価値化した環境コストと従来から求められている建設コストを合算したトータルコストの比較から工法選定の判断材料に求めようとしたものである。

両テーマとも地球温暖化ガスの排出抑制を促す結論を導いているが、昨今の下水道行政課題に対し、当初より財政と環境に配慮した計画立案を可能にする手法となり得ることを目指した検討を行ったものである。

本論文で得られた成果をまとめると、以下のとおりである。

第1章では、まず、本研究の背景として下水道事業の現状について述べ、次に、下水道施設のシステム構築における建設コストと環境コストの抑制とこれに基づく工法選定の必要性が認識され始めている状況下における合流式下水道および管きよ更生工法のそれぞれに関し、歴史的経緯と現状について言及した。その中で特に、合流式下水道および管きよ更生工法の事業所管官庁である国土交通省が展開する施策と関連法令の整備状況について取りまとめて詳述した。

続いて、本研究の目的である「従来からの建設コストだけでなく環境コストにも配慮した総合的に経済性が高い下水道施設のシステム構築手法」に関して、合流式下水道越流システムの制御は、合流式下水道越流対策施設の評価に関する研究および下水道施設のリアルタイム

コントロールによる合流式下水道の改善に関する研究について、下水管きよ更生工法の社会経済評価は、管きよ更生工法のライフサイクルアセスメント（以下、本章において「LCA」という）に関する研究および管きよ更生工法の社会的な評価に関する研究について、それぞれの検討内容を概説した。さらに、目的に対する各研究の相関をフローに示した。

第2章では、汚水と雨水を合わせて排除する合流式下水道において、近年多発する集中豪雨に伴う都市型内水被害を回避するため、雨天時に下水道終末処理場に送水せず未処理のまま放流堰を越流する未処理下水を対象にしたシステム制御を行うに際し、越流水の汚濁負荷の削減量を指標とするのではなく、放流に伴って使用されるポンプ等の施設稼働の際に排出されるCO₂の排出量を勘案し、単位CO₂排出当たりのBODもしくはSSの越流汚濁負荷削減量の比を評価指標として算出する方法を考案した。本研究では、雨水滞水池の容量について、異なる5ケースの設定を通じてCO₂排出量を考慮した検討を行った。

その結果、今回設定したパラメータから流量、水質ともに高い合致率（70～90%）を得られたシミュレーションを用いた雨水滞水池による越流負荷削減効果の定量から、平均的な降雨年（年間降雨量1,241mm）での年間解析を行ったところ、雨水滞水池容量と総越流負荷削減量の組み合わせの相関を見出すことができた。また、ライフサイクルでのCO₂排出量の定量から、ケースにより異なるが、滞水池への送水時間を長くする運用によって、建設と比べて8～14%のCO₂排出割合を低減できることがわかった。

以上から、今回適用した評価指標は、複数事業案の中からCO₂排出量等地球環境に与える影響も考慮した効率的な事業選択の際に有用な指標であることを明らかにした。

今後、持続可能な社会システムを構築する上で、地球環境に対する影響を考慮することは必須であることから、CO₂排出量等の多い公共事業に対しては、事業により得られる効果と地球環境に与える影響のバランスを考慮した評価指標により、効率の高い事業を選定することが重要である。

第3章では、現在の下水道事業として取り組みが急務とされている合流式下水道越流対策の方法の一つとして、実際の下水処理場やポンプ場における雨天時放流量、放流水質等の調査結果モデルを構築し、リアルタイムコントロール（以下、本章において「RTC」という）の運用方法ならびにその効果について検討した。

その結果、雨天時において合流式下水道から発生する越流水を対象に、既存の管きよやポンプ等の下水道施設能力を最大限活用し、かつ、新たな施設増設等の投資を抑制する経済的な手法として、分布型モデルを用いたR T Cの導入を検討したところ、モデル降雨10mmの場合は、分水堰を越えた下水を管きよに全量貯留できるため、越流を防ぐことが可能となり、全体で放流負荷量を約25～35%削減可能であった。また、総降雨量が20mmの場合は、分水堰を越えた下水を管きよに全量貯留することはできないが、初期堰高を1Qsとして制御を行うことで、総放流負荷量を10～20%削減可能であった。独立降雨によるR T Cの効果は、後方集中型が最も削減効果が高く、中央集中型、前方集中型の順に削減効果は低くなった。

また、総降雨量の異なる（平均降雨年：総降雨量1310.5mm、多雨年：同1725.0mm、少雨年：総降雨量772.0mm）年間降雨を用いて解析を行った結果、現状と比較して年間で放流負荷量を18～26%削減、越流回数を14～29%削減できることがわかった。さらに、年間解析結果を降雨区分別に検討した結果、総降雨量30mm以下の場合において雨天時BOD放流負荷量を約10～40%削減できることを明らかにした。加えて、R T Cの有効性について、同じ効果が得られる雨水滞水池を新たに整備した場合の費用により評価した結果、約14.5億円の効果（価値）があることを示した。

以上から、現在の下水道事業としての取り組みが急務とされている合流式下水道越流水対策の方法の一つとして、今回検討したR T Cの運用方法は、特に越流頻度が多い30mm以下の強度の雨天時BOD放流負荷量および越流回数の削減に有効であり、価値の高い方法であることを明らかにした。

昨今の自治体における財政難の局面にあつて、新たな施設建設を行わずに、既存の施設能力を活用することで自治体における公共投資を抑制することが可能なR T Cの運用による経済的な事業の組み合わせまたは選定については、下水道事業だけでなく他の公共事業でも活用されることが重要である。

第4章では、早期より下水道の整備に取り組んだ都市では、既に耐用年数を経過した老朽管が存在しており、これらが原因となる道路陥没等といった不慮の事故の防止に向けた取り組みが急がれているが、近年は、非開削工法である下水管きよ更生工法が研究開発されている。本研究では、管きよ更生工法のうち反転工法、形成工法、製管工法の中から代表的な工法を選定し、LCAによる環境負荷の比較評価を行うとともに、従来工法である開削工法との比較も実施し、下水管きよ

更生工法の環境負荷の定量化ならびに環境面において優れた手法の検討を行った。

その結果、開削工法と非開削工法の環境負荷とを比較した結果、非開削工法の環境負荷が小さいことに加え、非開削工法の中から反転工法、形成工法、製管工法を選定し、同条件における環境負荷を定量した結果、エネルギー消費量、CO₂排出量、NO_x排出量、SO_x排出量のいずれの項目においても、製管工法におけるエネルギー消費量および各排出量が少なく、環境面において優れた工法であることを明らかにした。また、製造時において製管工法の主材料である塩化ビニルが他の工法の主材料であるポリエステル系樹脂よりも環境負荷原単位が小さく、その使用量も少ないため、環境負荷が小さく製管工法が環境面で最も優れていることも明らかにした。

下水道は、都市の社会基盤として基幹的な役割を果たしている一方、早くから下水道整備に着手した都市では、既に耐用年数を経過した老朽管が存在し、その延長は今後増大し続けることが見込まれていることから、老朽管対策として管きよ更生工法による施工を行う際は、地域条件を考慮しながらも、環境負荷が小さい工法を選定することが重要である。

第5章では、老朽化した下水管きよの更生工法を用いた工事の際には、路上の交通制限を設けることで交通渋滞や騒音・振動の発生といった周辺環境に対する悪影響が生じていることから、管きよ更生工法の選定においては、建設コストだけでなく、工事に伴う周辺環境への影響も考慮した総合的な評価を行う手法を考案した。本研究では、管きよ更生工法のうち反転工法、形成工法、製管工法の中から前章と同じ代表的な工法を選定し、建設コストおよび環境コストを算定の上、比較評価を行うとともに、従来工法である開削工法との比較も行い、下水管きよの更生工法の建設コストと環境コストを含めたトータルコストとしての評価から経済面において優れた手法の検討を行った。

その結果、建設コスト・環境コストともに、管きよ更生工法は開削工法より安価であり、特に製管工法がより安価であること、管きよ更生工法は、開削工法よりも道路利用者や周辺環境への影響が少なく、トータルコストが安価であること、昼間は夜間と比較すると、交通量が多いため環境コストが高くなることを明らかにした。

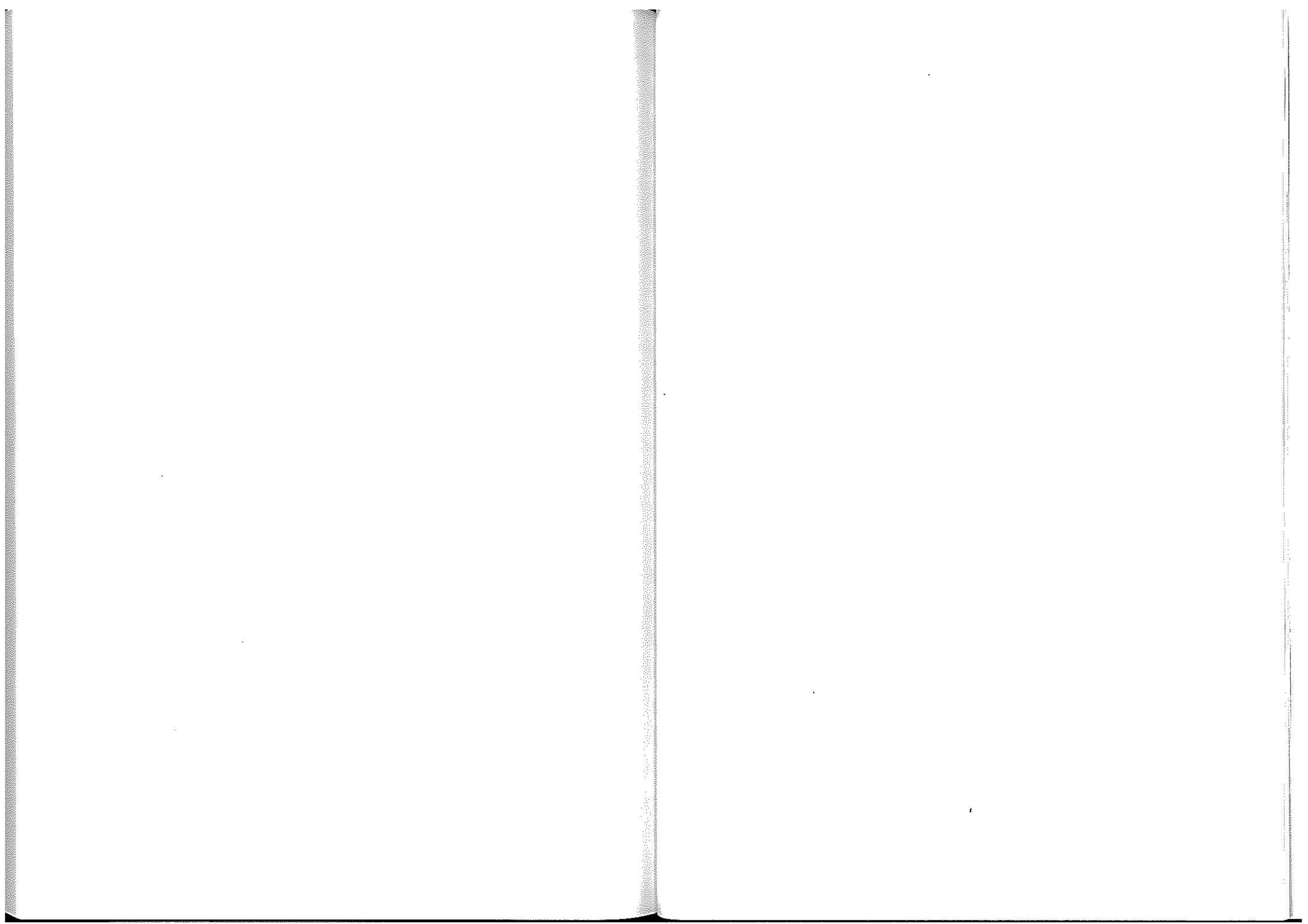
総じて、管きよ更生工法は開削工法よりコスト面、環境面の双方において優位であるが、管きよ更生工法は、建設コストの多くを更生材料費が占めることから、更生材料価格の低減が重要である。また、交通渋滞が環境コストに最も影響を与えることから、路上を占有する作

業の時間短縮化や工事作業を交通量の少ない夜間に行うことによって、交通渋滞の影響を少なくする工夫が求められる。

以上が本研究の成果であるが、本論文で取り上げた下水道事業に関し、まずは包括的に合流式下水道および下水管きよ更生工法を対象にして、それぞれの事業所管官庁である国土交通省が展開する施策と関連法令の整備状況について取りまとめて詳述した。次に、合流式下水道越流システムの制御については、合流式下水道越流対策施設の評価に関する研究では、今回適用した評価指標が複数事業案の中からCO₂排出量等地球環境に与える影響も考慮した効率的な事業選択の際に有用な指標であることを明らかにし、また、下水道施設のRTCによる合流式下水道の改善に関する研究では、今回検討したRTCの運用方法の中で、特に越流頻度が多い30mm以下の強度の雨天時BOD放流負荷量および越流回数削減に有効であり、価値の高い方法であることを明らかにした。さらに、下水管きよ更生工法の社会経済評価については、管きよ更生工法のLCAに関する研究では、開削工法と非開削工法の環境負荷とを比較したところ、非開削工法の環境負荷が小さいことに加え、非開削工法の中では製管工法が環境面において優れた工法であることを明らかにし、また、管きよ更生工法の社会的な評価に関する研究では、製造時において製管工法の主材料である塩化ビニルが他の工法の主材料であるポリエステル系樹脂よりも環境負荷原単位が小さく、その使用量も少ないため、環境負荷が小さく製管工法が環境面で最も優れていることを明らかにした。

本研究を通じて、下水道事業を実施する自治体における行財政の正常化に向けた取り組みへの寄与と併せて、都市環境施設の新たな評価手法の確立に向けたアプローチを行えた点と、都市社会基盤を維持し、市民の都市生活における安全性の確保と満足度の充足を図ることができる都市環境施設の健全化に資する評価手法の確立を図れた点から、環境を配慮した経済面で評価が高い下水道施設のシステム構築手法の提案が行えたと考える。

引き続き、環境負荷の低減を伴った下水道施設の構築、運営、維持改築を目指した研究および技術開発に微力ながら携わっていく考えている。併せて、広く様々な分野の専門家や、時には市民からも多くの意見を聞き、考えに接しながら、自らの思考を巡らせ、これらの研究成果を基にして、子孫のためにこの素晴らしい水惑星・地球の環境を守り、そして、引き継いでいくことに献身する所存にある。



研究業績一覧

1. 学術論文（査読あり）

- (1) ライフサイクルCO₂を考慮した合流式下水道越流水対策施設の評価－雨水滞水池を事例として－, 共著, 土木学会論文集, No.776/VII-33, pp.71-82, 2004.11
- (2) 下水道施設のリアルタイムコントロールによる合流式下水道改善に関する研究, 共著, 土木学会論文集G, Vol.62, No.1, pp.201-210, 2006.3
- (3) 浸水対策用貯留施設のリアルタイム制御による雨天時汚濁負荷低減に関する研究, 共著, 下水道協会誌, (投稿中)
- (4) 下水管きよの改築工事に伴う更生工法の社会経済評価, 共著, 下水道協会誌, (投稿中)

2. 学術論文（査読なし）

- (1) フミン酸原水による直接ろ過, 共著, 土木学会関西支部年次学術講演会概要集, 2.5, 衛生工学, pp.11-22, 1989.5
- (2) B D S T法によるろ過池の設計, 共著, 第42回全国水道研究発表論文概要集, 3.5, ろ過関係, pp.40, 1991.5
- (3) 下水道管きよ更生工法の社会経済的評価, 共著, 第44回下水道研究発表会講演集, pp.346-348, 2007.7

3. 国際会議

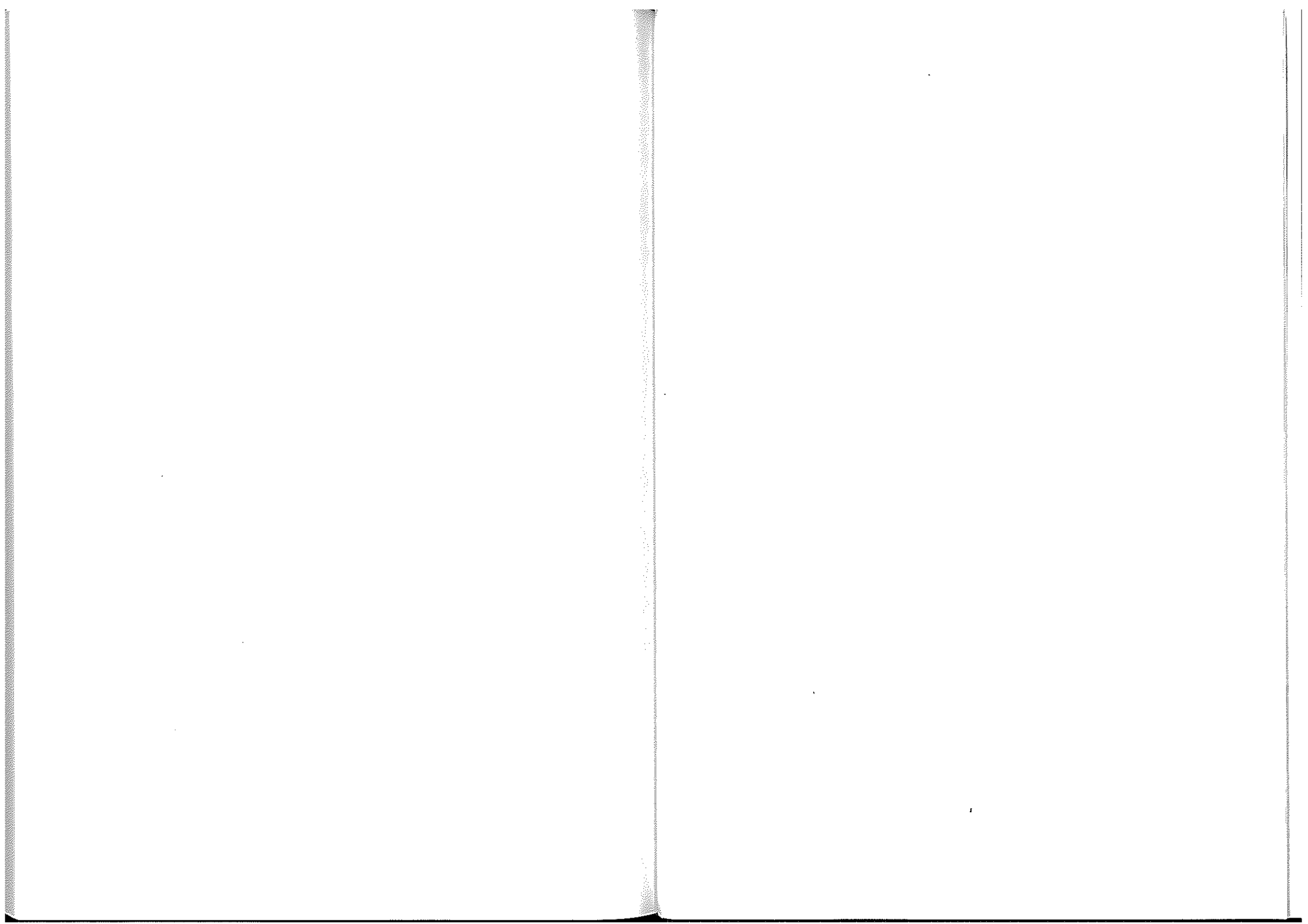
- (1) “EVALUATION AND ANALYSIS OF CSO CONTROL WITH STORM WATER RESERVOIR IN OSAKA, JAPAN”, Written Jointly, 9th International Conference on Urban Drainage Modelling, (Page numbers is unknown), Portland/USA, 2002.8
- (2) “RUNOFF AND ACCUMULATION MODELS OF BENZO(A) PYRENE IN HIGHWAY DUST AND RUNOFF MATTERS”, Written Jointly, 6th International Conference on Urban Drainage Modelling, pp.651-659, Dresden/Germany, 2004.9
- (3) “CHARACTERISTICS OF BENZO(A) PYRENE IN HIGHWAY RUNOFF POLLUTION”, Written Jointly, 10th International Conference on Urban Drainage, (CD-ROM), Copenhagen/Denmark, 2005.8
- (4) “LIFE CYCLE ASSESMENT OF THE REHABILITATION METHODS OF

SEWER PIPES” , Written Jointly, Proceedings of The Seventh international Conference of Ecobalance, pp.347-350 , Tsukuba/JAPAN, 2006.11

- (5) “SOCIOECONOMIC EVALUATION OF THE REHABILITATION METHODS OF SEWER PIPES” , Written Jointly, Proceedings of The Seventh international Conference of Ecobalance, pp.343-346 , Tsukuba/JAPAN, 2006.11

4. 口頭発表

- (1) “FORECAST OF FILTRATION QUALITY” , Written Jointly, International Water Supply Association Specialized Conference (Water Osaka '95), Poster Presentation No.4, Osaka/Japan, 1995.
- (2) 生活環境（地域社会）と下水道事業, NPO 法人水フォーラム 21 「施工環境評価」シンポジウム, 基調報告, 大阪/日本, 2004.10
- (3) 生活排水処理計画策定のコンサルティング, 第17回全国浄化槽研究集会, 浄化槽行政担当者研究会, 基調講演, 宮崎/日本, 2003.10



謝 辞

本論文は、地球温暖化ガスの排出低減と生活の安全・安心の確保を図る立場から、下水道施設のシステム構築における建設コストと環境コストの低減とこれに基づく工法選定の必要性を勘案しながら、従来からの建設コストだけでなく環境コストにも配慮した総合的に経済性が高い下水道施設のシステム構築手法について、検討を行ったものです。

本論文を結ぶに当たり、本研究の遂行に際しご指導、ご協力を賜りました方々に深く謝意を表します。

本研究の遂行に当たり、テーマの設定、研究内容、論文のまとめ方ならびにその全体にわたって懇切なご指導を賜りました関西大学大学院・環境都市工学部の和田安彦教授には、心からの感謝と御礼を申し上げます。また、研究にご協力をいただきました尾崎平助教にも深く感謝を申し上げます。

本論文をまとめるに当たり、ご多忙中にもかかわらず暖かいご助言とご示唆を賜りました関西大学環境都市工学部の石垣泰輔教授、同学部の室山勝彦教授には、厚く御礼申し上げます。

さらに、貴重な資料等を提供いただいた皆様方にも御礼申し上げます。

最後に、本研究に係る調査・解析・結果の取りまとめならびに本論文の執筆に当たり、株式会社極東技工コンサルタントの役員・社員に協力を得ました。このことに対し、ここに記して感謝の意を表します。

