

## 2.1.7 都市の水・物質循環

～流域圏の持続可能な水・廃棄物代謝システム～（渡辺 義公）

### （1）はじめに

昨年、約3.5万人の土木関係の技術者、研究者、学生を会員とする土木学会は、土木技術者の倫理規定を「現代の世代は未来の世代の生存条件を保証する責務があり、自然と人間を共生させる環境の創造と保存は、土木技術者にとって光栄ある使命である」と定めた。

“環境の創造と保全”に関して、北澤宏一氏は「社会や環境に対する正義感におけるイノベーションが第4の価値を導く」と述べている。第1次産業の生産性向上は第2次産業の展開を可能にし、第2次産業の生産性向上は第3次産業の展開を可能にした。350万人の失業者を救う道は、第4次産業の展開を可能にすること、すなわち、「第4の価値」を作ることであると述べている。第4の価値は、21世紀の日本のアイデンティティを“理想を追求する国日本（キーワードは、仲間・調和・楽しさ・文化・美・生き甲斐・生涯学習・環境・安心）”に置くことで生まれるとしている。

社会基盤の整備を担ってきた土木工学は、元々が「第4の価値」を生む産業であるにもかかわらず、倫理観の欠如から本来の道を外れてきた面が顕在化したとの批判があるのも事実である。著者は土木工学が本来の姿に再生され、第4の価値を生み出すには、ホロニック・パス的発想<sup>1)</sup>による持続可能な社会の実現に貢献すること、すなわち土木技術者の倫理の実践にあると考えている。ホロニック・パスとは、英国の小説家であり科学評論家のアーサー・ケストラーが、ギリシャ語の「全体」を意味する「holos」と個や部分を表す「-on」を合成して作った「holon」を、当時の大平首相の私的勉強会が形容詞化した造語「holonic」と、行動の方針を意味する「path」を結合させた言葉である。科学技術や組織の巨大化を目指す「hard path」と、その対極にある「soft path」の中庸にあり、個の自律性（独自性）を尊重しながら全体の調和を図る意味である。具体的には、茅陽一氏<sup>2)</sup>らが提唱する(1)ハードな技術とソフトな技術の統合的な発展、(2)連携の技術の発展普及、(3)社会の協力が必要である。

著者が専門とする上・下水道について考えてみる。単純大規模システムによる高速大量輸送技術を基盤として一括的な水供給と汚水排除を行い、20世紀の都市水代謝を支えてきた近代上・下水道は、構造的な湯水と水質汚濁に対処できず破綻しようとしている。毎年10%以上増加しているボトル水の売り上げに代表される国民の水道水離れや、環境ホルモ

ン等の微量化学物質による水環境汚染に対処するには、従来の技術や発想の部分修正では無理である。よって、総合的な水資源開発、水の効率的な利用、水循環サイクルの小規模化などによる 21 世紀型リサイクル社会へのパラダイムシフトをベースとした、第 4 の価値へのホロニック・パス的発想による「流域圏の統合的水管理」の発想が生まれた<sup>3)</sup>。廃棄物問題についても同様である。北海道大学は平成 15 年度「21 世紀 COE プログラム」の〈機械、土木、建築、その他工学〉分野に「流域圏の持続可能な水・廃棄物代謝システム」(拠点リ - ダ - ; 渡辺義公)を申請し採択された。本 COE 拠点の教育研究分野を新たに環境社会工学(Socio-Environmental Engineering)と呼び、その教育・研究構想を図 - 1 のようにまとめた。本文では、本 COE プログラムの概要とこれまでの研究成果の一部を報告する。

## (2) プログラムの概要

本プログラムでは流域圏を研究対象空間とした。流域圏を自然生態保存森林域、生産緑農地域、都市域及び沿岸域から構成される自然のみならず社会的にもまとまった地域と定義する。概ね大・中規模河川の流域に相当する概念である。第二期科学技術基本計画で設定された科学技術の 4 つの戦略的重点分野の 1 つである「環境」では、都市域水・物質・エネルギー - 循環システムの再生と創造及び流域圏自然循環・共生システムの維持と創造を具体的目標として掲げている。このような社会の要請に対して本拠点は、土木工学の担う役割と責任はホロニック・パス的発想(個の自律性を尊重しながら全体の調和を図る)による持続可能な社会の実現にあると認識し、対象として、(1)流域圏の水代謝システム、(2)流域圏の廃棄物代謝システム、及びこれらの構築と運用を支える(3)社会基盤施設管理システム、の三つのサブテーマを設定した。

流域圏の持続可能な「水・廃棄物代謝システム」の構築のためには、安全な用水の供給と下・排水のリサイクル使用のための先端的水処理システムの開発、都市鉱山(Urban mine)と都市森林(Urban forest)を創出するための資源リサイクル技術の開発、リサイクル不能廃棄物の適正処理処分法の開発、建設廃棄物の発生を抑えるための長寿命新材料の開発と構造物延命化のための補修・補強技術の開発などの新たな土木技術の創出と、健康便益とリスク、環境便益とリスク、資源・エネルギー - の生産と消費及び時間スケールと合意形成手法を考慮した新たなマネ - ジメントの開発が必須である。本 COE 拠点は、流域圏の「水」と「廃棄物」の輸送系と質変換系を自律・分散型として、適切な時空間スケ

- ルで計画・建設・運用する社会基盤システムを、ホロニック・パス的発想に立って構築するための研究者・技術者を養成するプログラムである。図 - 1 は本 COE 拠点が目指す環境社会工学 (Socio-Environmental Engineering) の教育体系である。流域圏の持続可能な水・廃棄物代謝システムの構築のためには、水・廃棄物の「質の利用・質変換」のためのハードな技術と、人間の反応への対応や環境管理のためのソフトな技術を、「先端技術と融合させた新しい教育体系が必要である。

### (3) 流域圏の持続可能な水代謝システム

20 世紀の百年間で世界の人口増加率は 3.5 倍 (17 億人から 60 億人へ)、水使用量 (農業用水 + 工業用水 + 生活用水) 増加率は 10.5 倍 (500 Km<sup>3</sup>/年から 5300 Km<sup>3</sup>/年へ) であった。この傾向が続けば、水問題が 21 世紀の最大の課題となるとの世界銀行や国際水マネジメント研究所、等の警告を真摯に受け止めなければならない。幸いにも日本では量的側面での水不足は局所的かつ時期的問題に留まっているが、質的側面を考えると生活用水 (水道水) の問題はすでに全国的に顕在化していると考えべきである。また、日本は年間 3,000 万トンの穀物をはじめ多くの食糧を外国から輸入している。これらを生産するに要する水、特に農産物の生産に使用される水は “Green Water” と呼ばれ膨大な量である。1 トンの穀物の生産には 1,000m<sup>3</sup> 程度の水が必要なので、日本は穀物のみで 300 億 m<sup>3</sup> の水を輸入先の米国、カナダ、オーストラリア、等で使用していることになる。この水量は日本の農業用水 (600 億 m<sup>3</sup>/年) の半分に相当する。この例からも、水問題をグローバルな視点で捉える必要性は明らかである。2025 年における世界の水問題の予測では欧米、中国全域を含む世界的な水不足が生ずるとしている。21 世紀のキーワードである「持続的発展 (Sustainable Development)」を実現するためには、水資源開発をダムによる貯留や長距離導水によって水資源を調整する 20 世紀型パラダイムから 21 世紀型リサイクル社会のパラダイム (水の効率的利用、水循環サイクルの小規模化を含めた総合的水資源開発) へと転換しなければならない。著者らは「安全でおいしい飲用水は非汚染水源から取水し余分な質変換を伴わない「膜ろ過」で浄水して供給し、非飲用系の生活用水を下水処理水の間接的再利用でまかなう新しい都市水代謝システムの構想を提案し、それを実現するための要素技術開発に関する研究プロジェクト [科学技術振興事業団 戦略的基礎研究推進事業 (CREST)] を平成 8 年度から 13 年度の 5 年間にわたり実施した。本 COE プロジェクトはこの延長上にあると位置づけている。このシステムの具体的設計と実現には、対象地

域の水事情、経済力、民意、等が関係するので数十年を要する長期構想となる。既に上・下水道が完備しているわが国の都市では、段階的に構想を実現するための戦略が必要である。本 COE プログラムでは、現在の一過性都市上・下水道システムを“質の利用を中心にした都市水代謝システム”に再構築するために必要な先端的水処理システムの研究を展開している。以下にこの研究成果を報告し、それを札幌圏（豊平川流域）に適用した場合の事例研究を説明する。

#### （４）シナリオ作成のための技術開発

1970年に英国でいわゆる Jegar Report (Taken for Granted、当然とすべきこと)が刊行された。その第10章勧告の最後のとりまとめの項に、「将来の下水道行政組織」が考慮すべきこととして次のような明言された。下水処分の機能は水の保全と河川の水量・水質の管理とみ水循環全体の一部として考えねばならない。今日までこのコンセプトが実行されなかったのには多くの理由がある。特に、この機能を担保する実行可能な下水処理技術が構築されなかったことが大きな理由である。20世紀の代表的下水処理法である活性汚泥法が処理水を河川や海域へ捨てるための水質を満足すれば十分であったのに対して、要求される下水処理法は下水の水資源としての再利用と下水に含まれる有用資源（特に、枯渇が懸念されるリン）の回収を可能にする能力を要求される。その要求を満たす下水処理法として、著者は図-2のような新たな凝集沈澱処理・生物酸化・膜分離を組み合わせた先端的水処理システムを開発した。ハイブリッド下水処理システムは、水のリサイクルを基本とする流域水代謝システムの中核となる水処理技術として期待されている“分離膜”を用いた“膜分離バイオリアクタ(MBR)”を主プロセスとして構成される。分離膜は現在浄水処理でEU、米国、オーストラリアなどで10万m<sup>3</sup>/日を超える規模の浄水場で実用化されている。わが国にも350箇所を超える膜ろ過浄水場があるが、最大規模でも2万m<sup>3</sup>/日程度である。しかし、8万m<sup>3</sup>/日規模の膜ろ過浄水場が計画中である。膜ろ過を大規模水道システムの既存の管路から取水した現行基準で飲料可の水道水を、ユザの近くでさらに上質化して給水できるような分散・ブロック化したシステムに再構築に膜ろ過を利用することも可能である<sup>3)</sup>。MBRは下水中の有機物やアンモニア性窒素の生物学的酸化を担う微生物と処理水を微生物と分離する分離膜により構成される。微生物（寸法は数μm）は分離膜の再孔径（0.1μm程度）より小さいので、MBRから微生物は流出しない。そのため、MBR内には高濃度（10-20g/L）の微生物が保持され微

生物や他の懸濁粒子を含まない清澄な処理水が得られる。MBR は内分泌攪乱物質や医薬品由来有機物などの微量汚染物質も高効率で除去できるので、その処理水を河川上・中流部や処理場近くの水路へ放流や地下水涵養もできる。身近な水環境へ下水処理水を放流する場合、特に病原性微生物に由来するリスク管理が求められる。水によって媒介される伝染病の大部分は消化器系のもので、人、家畜や野生動物の糞便とともに排出される腸内病原性細菌によって汚染された飲料水や環境水との何らかの接触によって感染する恐れがある。本 COE プロジェクトでは、従来の培養に基づく大腸菌群数の測定に代わって、培養を必要としない分子生物学的手法（T-RFLP や Real-Time PCR 法）を用いることにより、迅速・簡便に糞便汚染の定量と汚染源の特定を同時に行うことのできる Real-Time PCR 法の開発を行っている。また、開発する手法を新たな糞便性汚染指標の確立を目標として、人や牛のような反芻動物の糞便から最も多く検出され、腸内蛋白質分解細菌の最優先種である *Bacteroides* 属や *Prevotella* 属の細菌に着目し、この挙動を同時に追跡するフィールド実験も行った。その結果、図 - 3 に示すように人、豚、牛の糞便汚染を個々に特定できることが明らかになり、新たな糞便性汚染指標となりうる可能性が示唆された。

前凝集沈殿によって発生する汚泥は、下水中の有機物やリン等の有用な資源を含んでいる。特にリンは枯渇に直面している資源であり、リサイクル利用が必須である。下水には大量のリンが含まれている。下水には有害な重金属や病原微生物も含まれるので、有用なリンを選択的に回収する MBR を中核とした下水処理システムの構築が望まれる。著者らは本 COE プログラムにおいて、下水のリサイクルによる水資源の確保と新たな水環境の創生及びリンと有機物からのエネルギー回収を可能にする新しい下水処理システムを研究している。図 - 4 は、回収されたリンを植物の持つリン吸収機能に関する農学分野の研究成果と結合させてリサイクルするための概念である。図中の ZS はジルコニアメゾ構造体である。ZS は数ナノメートルの規則的な細孔を持ち、リン酸イオンをイオン交換によって選択的に吸着する。その吸着飽和量は  $3500 \mu\text{mol/g as PO}_4^{3-}$  に達し既存のリン酸吸着剤の 2 倍にも達する吸着能を持つ。以上のように、下水から水資源とリンなどの有用資源を回収できる 21 世紀型の新たな下水処理法の開発によって、リサイクル社会における流域圏水代謝システムの構築が可能となった。その具体的設計は流域圏の特性を十分考慮してなされる。

#### (5) 札幌圏水代謝システムの再構築

札幌市は都市化の進展によって減少した「水辺と緑」を復元するための長期的視野に立った「水と緑のネットワーク基本構想」を立案した。ここでは、水環境の保全・復元、豊かな河川・緑環境の形成および安全な都市生活のための河川空間の活用、を三本柱としている。この構想の一つの具体的計画として「茨戸川清流ルネッサンス」計画が作成された。この計画では、茨戸湖の水の回転率を上げて富栄養化を抑制するためと干上がった札幌市北部の河川を再生し「水」と「緑」を取り戻すために、豊平川からの導水を計画している。この構想を実現するには、現在ほぼ全量が石狩湾に捨てられている下水処理水を豊平川の上・中流に戻せるような都市水代謝システムの構築が必要である。そうすることで、札幌市の地下水量も増加するし、消滅した河川の再生のために豊平川からの導水も可能になる。積雪寒冷地の水道にとって冬季・春季の低水温期は、水処理の面での困難さと共に給湯に要するエネルギーの面からも大きな負担となっている。札幌市の水道水の冬季平均水温は 3.8℃ である。しかし、札幌市中心部は既に 15 万 m<sup>3</sup>/日の地下水を非飲用水として使用していて、低水温期には給湯システムでの相当の省エネルギーを達成しているはずである。増加した地下水を広い範囲で非飲用水として利用することで更なる省エネルギーが可能となる。下水処理水は冬季でも水温は 10℃ 以上あるので、ハイブリッド MBR 処理水を利用した図 - 5 のような融雪システムを構築できる。融雪水は透水性歩道を通して地下浸透し地下水を涵養する。札幌圏のような積雪寒冷地では、地下水や下水処理水の持つ熱源としての「質」の利用を考えるべきである。図 - 6 は水の「質・量」の利用を考慮して現在の札幌圏の水代謝システムを再構築するための基本デザインである。

#### (6) おわりに

本文では、北海道大学 21 世紀 COE プログラム「流域圏の持続可能な水・廃棄物代謝システム」と「自然共生型流域圏・都市再生技術研究イニシャティブ」との関わりについて報告した。本 COE プログラムで開発される要素技術は、すべての流域圏で汎用的に用いられるものである。しかし、それらの適用は流域圏のランドデザインによって変わる。個々の要素技術をシステム化して個々の流域圏の持続可能な社会の構築に貢献する研究の展開が望まれる。

参考文献

- 1)石井威望：ホロニック・パス、(株)講談社、昭和60年
- 2)高橋 裕、竹内和彦(編):地球環境学9、岩波書店、1998年
- 3)渡辺 義公：上水道から見た健全な水代謝システム - 21世紀型水道システムの提案、水環境学会誌、24(7),12-15,2001

図 - 1 本拠点のめざす環境社会工学「Socio-Environmental Engineering」の教育研究体系

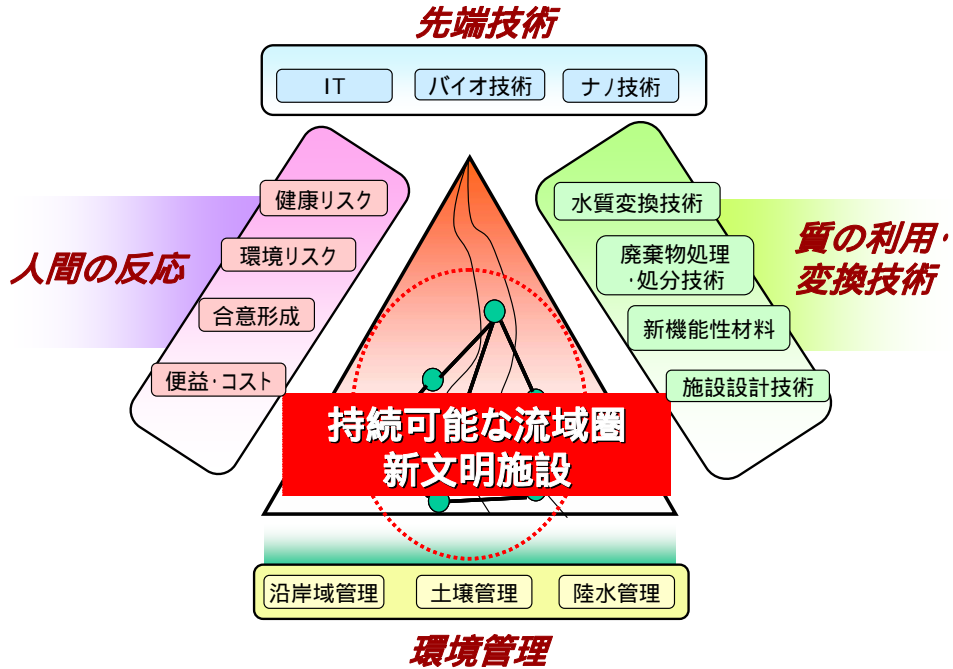
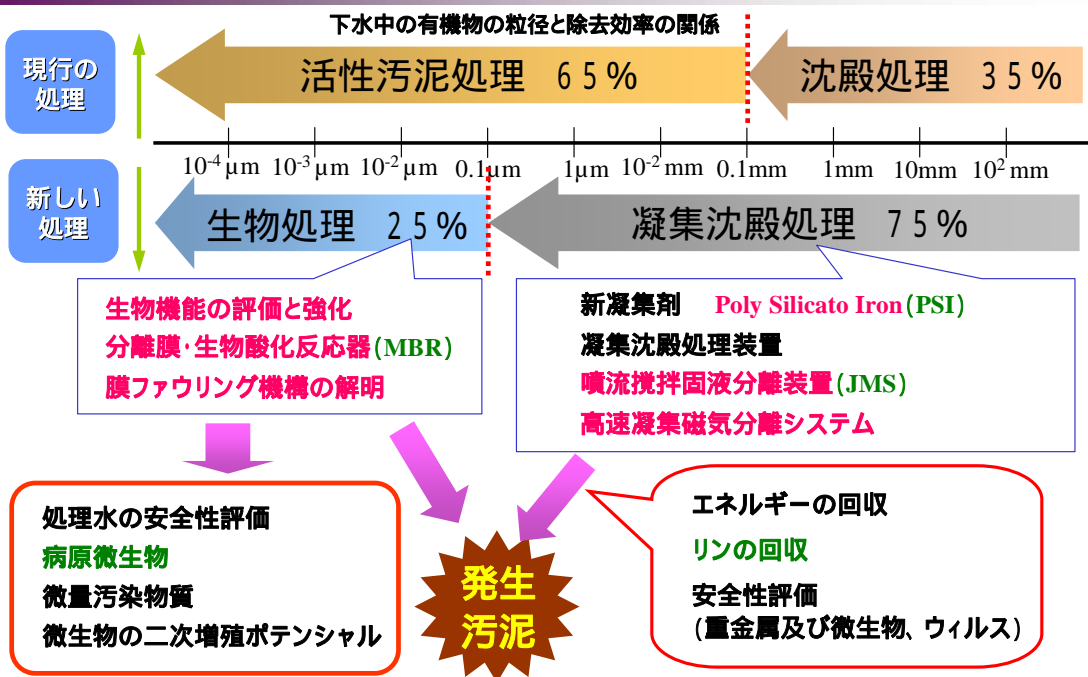


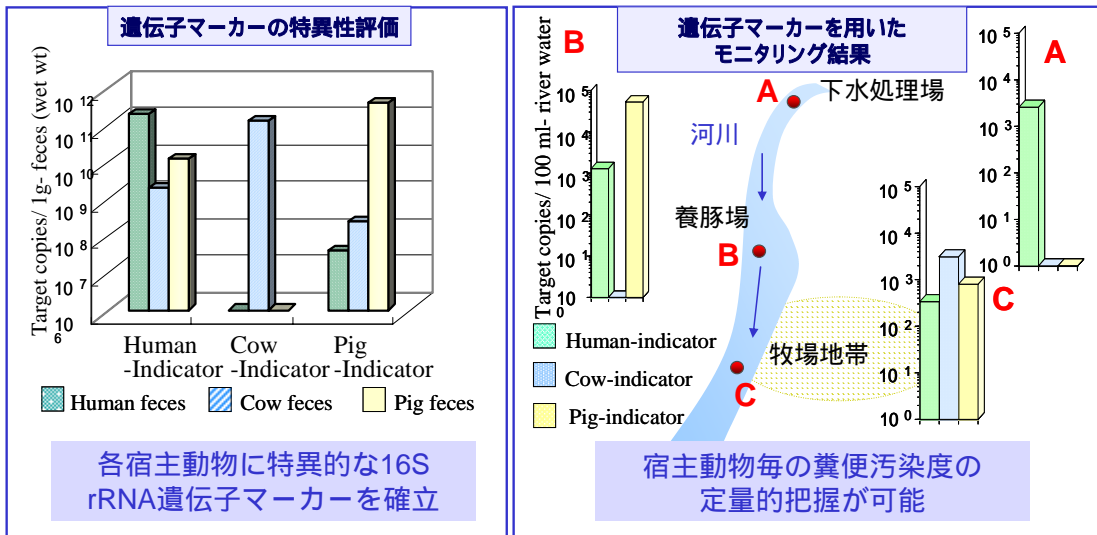
図 - 2 ハイブリッド型高効率下水処理システム





## 図 - 3 新たな糞便性汚染指標のモニタリング技術の開発

新たな糞便性汚染指標として哺乳動物の糞便中に最も優占的に存在する *Bacteroides-Prevotella* 属の16S rRNA遺伝子を採用し、各宿主動物に特異的な16S rRNA遺伝子配列(遺伝子マーカー)を決定し、Real-Time PCR法による迅速かつ高感度な糞便性汚染度および汚染源の評価手法を開発した。



## 図 - 4 下水からのリンのリサイクルのための機能性酵素と有機酸の利用

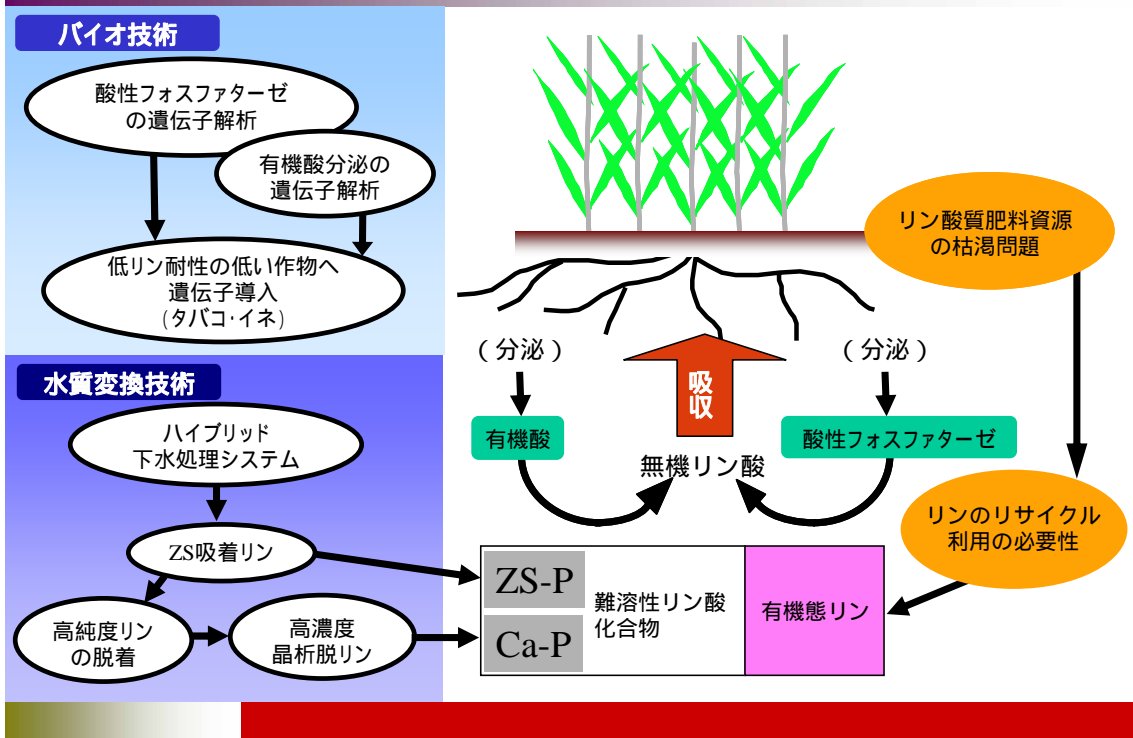


図 - 5 流域圏の持続可能な社会基盤管理システム

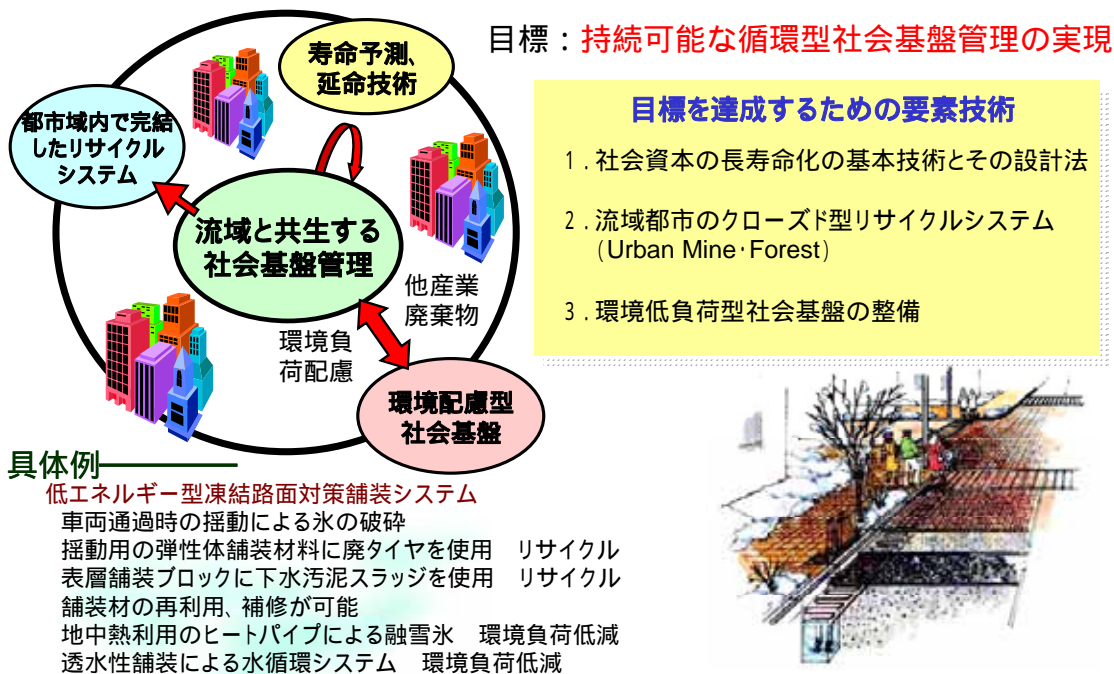


図 - 6 研究のまとめ(札幌市における新しい水代謝)

