

汽水域環境の保全・再生に関する研究

国土交通省国土技術政策総合研究所 環境研究部長

環境研究部河川環境研究室 主任研究官

やまもと あきら
山本 聡
なかむら けいご
中村 圭吾

1. はじめに

汽水域は、川と海の双方から潮位、波浪、洪水、土砂、水質汚濁などの影響を受け、複雑かつ固有の環境を有している。汽水域には、この環境に適応した特有の生物が生息し、とりわけ干潟は生物多様性や水質浄化、あるいは景観の観点から環境上重要な役割を果たしている。一方で、汽水域を有する沿岸や河口域は、漁港や港湾などに利用されてきたほか、国土の狭いわが国においては埋立地などにも使用されるなど、その自然景観は大きく改変されてきた。

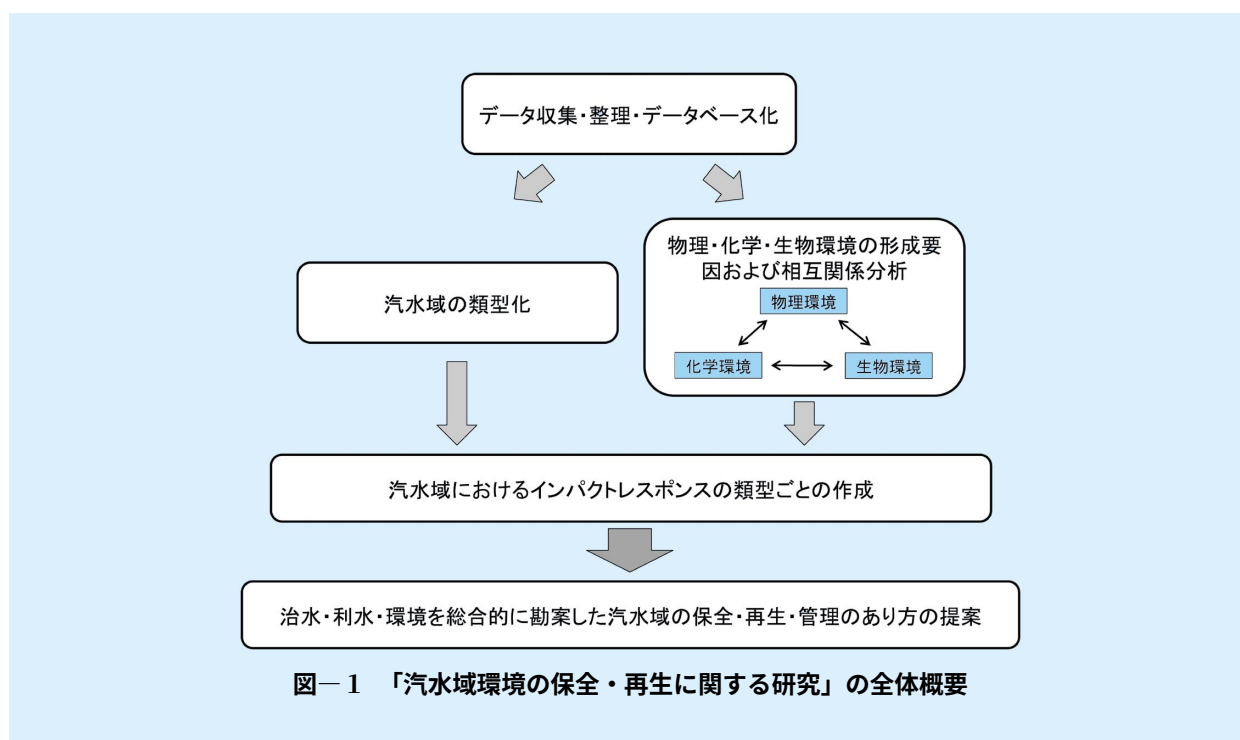
そのため、汽水域においては、干潟の保全事業や創出などの自然再生事業が行われることがあるが、当初の想定どおりに干潟が維持できていないケースも見受けられ、その計画・設計・維持管理手法の改善が求められている。加えて、近年、豪雨による河川災害が頻発していることから、汽水域の河川管理においても環境と治水の両面が調和した河道の管理が求められている。

しかしながら、先述のように汽水域は環境がとりわけ複雑であることもあり、河口域の河道管理を適切に行っていく上で、十分かつ体系的な学術的・技術的知見がないのが現状である。なかでも、河川汽水域¹⁾と呼ばれる河川側の汽水域の環

境については、これまで生態工学的な観点からの研究事例が少なく、適切な河道管理に必要な知見が不十分な状況である。

本プロジェクト研究は、このような複雑な物理・化学的環境を有する河川汽水域を主な対象として、図-1に示す検討を行った。まず、(1)汽水域に関するデータ収集・整理・データベース化を実施した。次に、このデータベースを活用し、主に物理環境から(2)河川汽水域の類型化を行った。同時に、このデータベースを活用し、河川汽水域の(3)物理・化学・生物環境の形成要因および相互関係分析を実施した。そして類型区分ごとの相互関係分析を活用して、実際に河道掘削や出水などの大きなインパクトがあった河川汽水域において(4)インパクトレスポンス（河道掘削等の人為作用や出水等自然作用によって生じる河川環境の応答）を検討した。最後に、これらの結果に基づいて治水・利水・環境を総合的に勘案した(5)汽水域の保全・再生・管理についてのガイドライン作成のためのとりまとめを行った。

なお、本稿で用いる河川汽水域とは、実際に海水が遡上する部分で、河川と海洋の環境の遷移領域になっており、物理的、化学的、生物的環境が複雑に影響し合う場と定義され、水位が潮汐の影響を受ける区間である感潮域よりもやや狭い範囲を示している。



2. 研究成果

(1) 汽水域に関するデータ収集・整理・データベース化

全国の一級水系（109水系）を対象に河川汽水域のデータベースを作成した。具体的には、物理・化学・生物環境に関する調査データを収集・整理し、座標値やファイル形式など必要な修正、変換を行い、地形を基盤とした環境情報の重ね合わせによる分析や検討を行うことができるようにGISデータベースを作成した。

(2) 河川汽水域の類型化

複雑で固有性の高い河川汽水域であるが、河川汽水域を環境特性により類型化することができれば、同じタイプの河川の中から人為的改変の程度が異なる河川を選んで、これらの環境を比較することで、特定の人為的改変の環境影響を評価することが可能になる。また、比較的人為的改変の少ない河川を選んで、その環境を調査し、これを目標とする河川環境とすることで、同じタイプの河川汽水域の環境目標を客観的に設定することが可能に

なるといった利点がある。このようなねらいと目的を実現するため、河川汽水域を規定すると考えられる自然環境要素を抽出し、全国一級水系において河川汽水域の類型化を実施した¹⁾。

ここでは平時の河川汽水域を規定する要因（平常時の環境形成要因）による検討例を示す。平常時の環境形成要因としては、単位幅当たり低水流量、河床勾配、潮汐差を指標に、主成分分析およびクラスター分析などの統計的手法により分析した。

表－1に平常時の環境形成要因の主成分分析結果を示す。さらに平常時の環境形成要因のうち影響が大きいと考えられる成分を図化し、分類したものを図－2に示す。

平常時の環境形成要因については、クラスター分析により五つのグループに分けることができた。主成分1の値が正の水系は、潮汐差が大きいグループであり、負の水系は単位幅当たりの低水流量が大きい水系である。主成分2については、主に河床勾配が支配的要素であり、値が小さいほど勾配が大きい水系である。

表－2には対象河川をそれぞれ5類型に分類した結果およびその特徴、主な河川例を示す。平常時の環境形成要因に関して、潮汐の影響が比較的

表－１ 平常時の環境形成要因による主成分分析結果

主成分番号	固有値	寄与率 (%)	累積寄与率 (%)
1	1.51	50.18	50.18
2	1.02	33.96	84.14
3	0.48	15.86	100.00
固有ベクトル	主成分 1	主成分 2	主成分 3
潮汐差 (m)	0.7133	0.0267	0.7003
河床勾配	－0.3008	－0.8909	0.3403
単位幅当たり低水流量 (m ² /s)	－0.6330	0.4534	0.6275

大きい「潮汐Ⅰ型」は、伊勢湾等の内湾の周辺部に多く、潮汐の影響が非常に大きい「潮汐Ⅱ型」は、干満の差が大きいことで知られる有明海や瀬戸内海の周辺河川が分類された。流量の影響が比較的大きい「流量Ⅰ型」は太平洋側や日本海側に広く見られ、流量が大きく勾配の緩い「流量Ⅱ型」は、主に日本海側の大河川が分類された。また、北陸・中部地方の3,000mクラスの山地から流れ落ちる急流河川は「勾配型」に分類され、汽水の影響が小さい河川といえる。

(3) 物理・化学・生物環境の形成要因および相互関係分析

① 物理環境

作成した(1)のGISデータベースから、河川汽水域における河口干潟の分布や形状を規定する物理環境について検討した。その結果、潮汐や波浪の

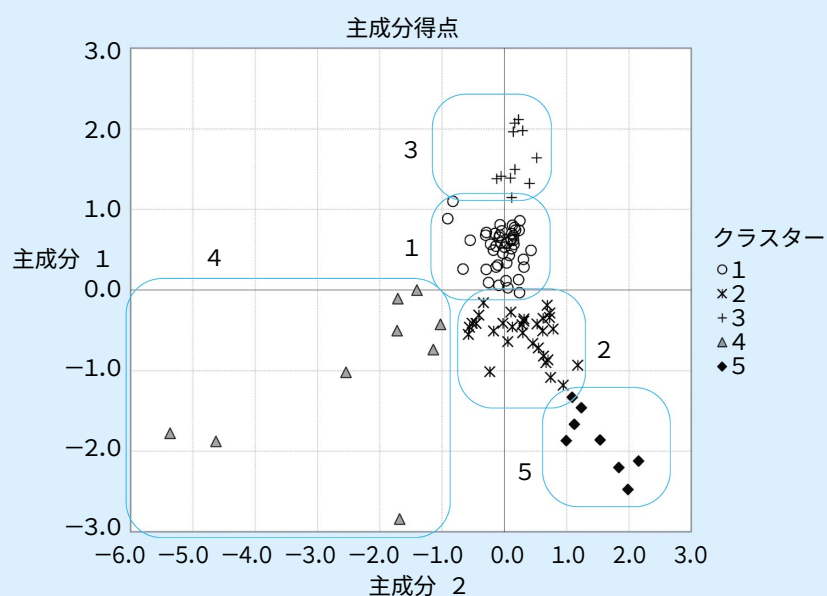
影響の大きい河川汽水域においても、その河道地形の骨格は通常の河道と同じ物理条件で説明できるという結果を得ることができた。

つまり、河道形状は通常の河川と同様に砂州などの中規模河床形態でおおむね説明がつき、平均年最大流量時の川幅水深比やそれに河床勾配の0.2乗を乗じたもので領域区分が可能であることが分かった⁴⁾。したがって、これまで河川の分野で蓄積された技術を活用しながら、河口干潟の保全や創出について検討することが可能であることが明らかとなった。

② 化学環境（塩分）

ここでは、河川汽水域に最も強い影響を与える塩分の動態に関する研究結果について紹介する。

河川汽水域での海水混合は空間的に不均一かつ時間的変動が大きいものであり、海水と淡水の混合状態の解析には、より詳細な視点が必要であ



図－２ 平常時の環境形成要因による類型化

表－2 平常時の環境形成要因による類型

クラスター	名称	特徴	水系の分布	河川例
1	潮汐Ⅰ型	潮汐がやや大きい	太平洋側	多摩川、木曽川、吉野川
2	流量Ⅰ型	河川流量がやや多い	日本海側、太平洋側	北上川、利根川、信濃川
3	潮汐Ⅱ型	潮汐が非常に大きい	有明、瀬戸内海の一部	太田川、筑後川、菊池川
4	勾配型	勾配が大きい	北陸～中国、東海	黒部川、手取川、大井川
5	流量Ⅱ型	勾配が緩く流量が多い	主に日本海側の大河川	米代川、最上川、阿賀野川

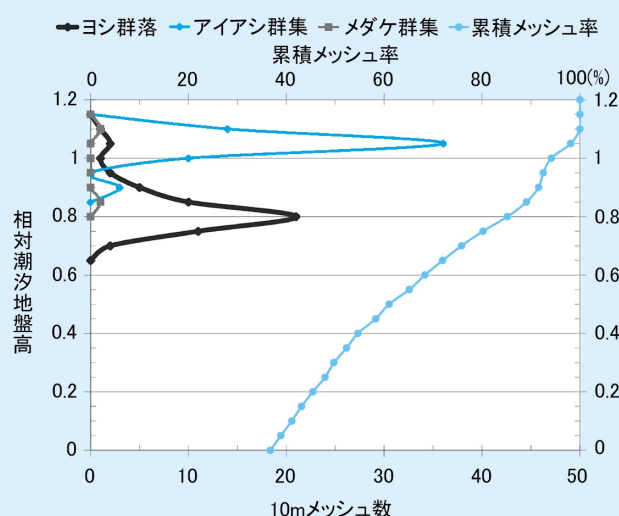
る。そこで、海から潮の満ち引きにより供給された塩分や集積する赤潮藻類が、河川汽水域の時空間的に複雑な流れの影響を受けて、どのように混合滞留するかについて、滞留時間も解析可能となるように新たに開発した数値解析モデルを用いた検討を行った。さらに、河川改修や自然再生を念頭にいた地形条件の改変について定量的な評価を実施した。

滞留時間は、通常のダム湖等であれば、湖の容積を時間当たりの流入量で割った時間のことを意味する。しかし、汽水域においては、塩分の滞留は複雑な挙動を示すため同様な指標を使うことはできない。汽水域における滞留時間の評価を実施するに当たっては、上記の狭義の滞留時間とは別に、例えば貧酸素水塊の形成について評価する際には、海側から汽水域に流入した水塊の流入してから経過時間が重要であるし、赤潮藻類の動きについて評価する際には、汽水域のある領域に存在する藻類の当該領域における残留時間が必要な

指標となる。そこで、本研究では、河川汽水域において任意の水域における塩分と藻類などの懸濁物の「経過時間」と「残留時間」の分布について計算できる準3次元モデルを開発した^{6,7)}。このモデルにより、河川汽水域における物質の化学変化を検討する基礎的な道具立てができるとともに、人為改変等に伴う河川汽水域の海水滞留への影響を的確に評価できるようになり、河川汽水域で問題となる貧酸素水塊や赤潮発生分析等に活用が期待される。具体例については、後ほど(4)インパクトレスポンスにおいて記載する。

③ 植生分布を例にした相互関係分析

河川汽水域における生物環境を規定する相互関係分析の例として、植生分布の検討例を紹介する。本研究では、データの豊富な名取川、吉野川、筑後川等を対象に、植生と地盤高との関係性を潮汐を勘案して分析を行い、ヨシや塩沼植物の分布特性を明らかにした^{8,10)}。図－3は筑後川の相対潮汐地盤高と種ごとの植生分布の例を示す。



図－3 地盤高と植生群落の関係（例：筑後川）

ここで、相対潮汐地盤高とは、(地盤高－朔望平均干潮位)/(朔望平均満潮位－朔望平均干潮位)であり、潮汐に対する相対的な地盤高を指標している。この指標を用いて全国の河川のヨシ群落等について分析したところ共通性が見られたため、この指標値を主に用いて分析を行った。このように、河川汽水域に生育する植物の地盤高等を詳細に分析することにより、これら生物の最適な生息環境を明らかにすることができた。これらの関係性は今後検証しながら河川改修影響の最小化（ミティゲーション）や自然再生計画に活用できるものである¹⁰⁾。

(4) インパクトレスポンス

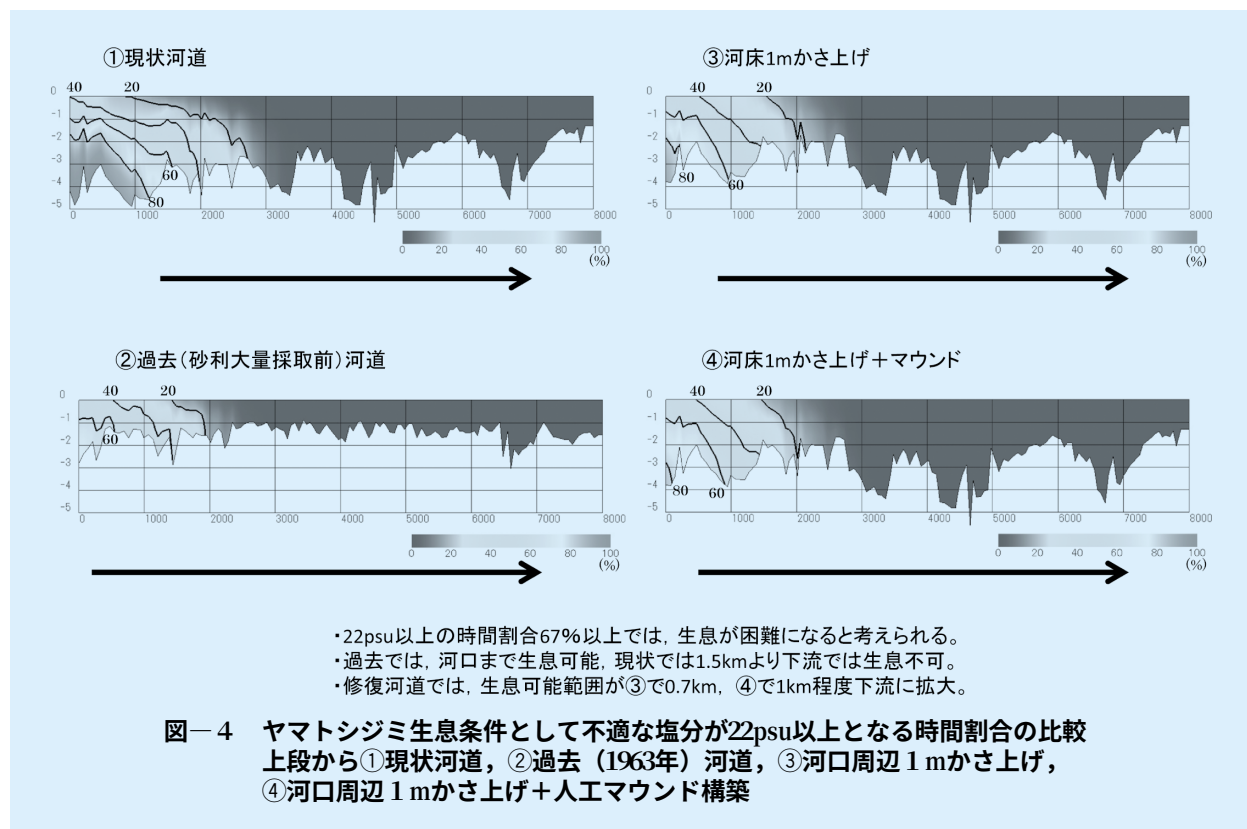
ここではインパクトレスポンスの検討例として、ヤマトシジミの漁獲高の減少が問題となっている菊池川河口域の例を紹介する。

菊池川は、熊本県阿蘇市(標高1,041m)を源流とする流域面積996km²、幹川流路延長71kmを有する熊本最北端の一級河川である。菊池川河口は、平均河床勾配が1/3,000程度と緩勾配であり、流入する有明海の潮汐差が大きいことから、

海洋の影響を強く受けている。河口部の汽水域では、かつてヤマトシジミの漁獲が盛んであったが、1987年以降漁獲量が大幅に減少し、回復の兆しが見えない状況である。河口部周辺での人為的環境インパクトとして想定される最大のものは河道内における砂利採取であり、大幅な河床低下が認められる1960年代から1980年頃にかけては、統計が残る分だけでも毎年10万m³程度の砂利採取が記録されている。現地においては、ヤマトシジミの生息環境の保全や修復が望まれており、修復による効果の検討が期待されている。

そこで、(3)②で紹介した塩分の動態を表現するモデルに、ヤマトシジミの生息環境を水質条件として組み合わせ、過去のインパクトの影響や今後の自然再生の効果について検討した。

ヤマトシジミの生息条件として、塩分環境については、成貝に関して塩分濃度22psuを超える時間割合が67%以上で生息不適とした。また放出された卵子が受精するための最適な塩分としては、4～6psuとし、そのような条件となる時間割合を算定することで評価した。また、ヤマトシジミの浮遊幼生の移流拡散現象についてもモデルに組



み込み評価した。

ヤマトシジミの成員の生息域の評価としては、現状、過去、修復2パターンの合計4ケースについて検討した。ここで、過去とは砂利採取が行われる以前で、シジミの漁獲高が大きかった1963年とした。修復の2パターンは、河床低下のインパクトを緩和するために、河口周辺の河道を1mかさ上げさせた場合と河床かさ上げ1mに加え河口にマウンドを形成させた場合である。河床かさ上げ1mは治水に大きな影響を与えないとして菊池川河川事務所が設定した値である。

図-4は、ヤマトシジミ成員の生息条件として不適な塩分が22psu以上となる時間割合を比較したものである。これより生息に不適な時間割合67%以上となるのは①現状河道条件では、河口から1.5km周辺までで、②過去はほぼ河口まで生息が可能であったことが分かる。また、③河床1mかさ上げ条件により、生息可能範囲が0.7km程度下流に拡大し、④河床1mかさ上げに加えて河口にマウンドを設置した条件では生息可能範囲が1km程度下流に拡大するという評価結果になった。これらのことより、河床を1m程度上昇させる修復により、生息地としての機能の修復が図られる可能性が十分あることなどが示された⁹⁾。これらの分析に加えて、ヤマトシジミの受精の適地や浮遊幼生の挙動についてもモデルを用いた評価を行い、物理環境をベースにした生物生息環境の評価を可能にした。

(5) 汽水域の保全・再生・管理についてのガイドライン作成のためのとりまとめ

これらの成果を踏まえ、治水・利水・環境を総合的に勘案した汽水域の保全・再生・管理についてのガイドラインを今秋完成を目指して、現在作成しているところである。

3. おわりに

3カ年にわたる本研究成果により、河川汽水域

の保全・再生のための基本的な道具立てを準備することができた。しかしながら、河川汽水域は研究としては、新しいフィールドであり、その知見の集積はまだ十分といえないものである。本研究成果をベースに、今後研究と実践での検証を得ることにより、河川汽水域の保全再生のための技術開発が進化していくものと期待される。

【参考文献】

- 1) 岸田弘之, 天野邦彦, 大沼克弘, 遠藤希実: 河川汽水域の環境管理技術確立のための全国一級水系の汽水域環境類型化, 水工学論文集, 第55巻, pp. 1273-1278, 2011
- 2) 大沼克弘, 藤田光一, 望月貴文, 天野邦彦, 佐藤泰夫, 阿部徹: 太田川放水路における河床変動特性と干潟の安定機構に関する考察, 水工学論文集, 第54巻, pp. 781-786, 2010
- 3) 大沼克弘, 藤田光一, 天野邦彦: 河口干潟の物理環境の多様性, 土木技術資料, 第52巻第10号, pp. 18-21, 2010
- 4) 大沼克弘, 遠藤希実, 天野邦彦: 河川汽水域における河道形状と干潟分布に関する分析, 水工学論文集, 第56巻, pp. 1207-1212, 2012
- 5) 大沼克弘, 藤田光一, 望月貴文, 天野邦彦: 太田川放水路を事例とした河口干潟の設計・管理方法の枠組みに関する研究, 河川技術論文集, 第17巻, pp. 185-190, 2011
- 6) 天野邦彦, 遠藤希実, 大沼克弘: 河口汽水域における塩水滞留時間の算定手法開発, 河川技術論文集, 第16巻, pp. 283-288, 2010
- 7) 天野邦彦, 大沼克弘, 遠藤希実: 河川汽水域への海水浸入後経過時間および海水残留時間の数値解析による評価, 土木学会論文集G(環境), 第67巻第7号, III 367-374, 2011
- 8) 大沼克弘, 遠藤希実, 天野邦彦: 河川汽水域沿岸の植生分布と潮位の関係解析, 水工学論文集, 第55巻, pp. 1345-1350, 2011
- 9) 天野邦彦, 遠藤希実, 大沼克弘: ヤマトシジミの生息域として見た菊池川河口域の環境変遷と修復の可能性評価, 水工学論文集, 第56巻, pp. 1561-1566, 2012
- 10) 大沼克弘, 遠藤希実, 天野邦彦: 河川汽水域における河道形状と植生分布の関係解析, 河川技術論文集, 第18巻, pp. 17-22, 2012
- 11) 遠藤希実, 天野邦彦, 大沼克弘: 東北地方太平洋沖地震に伴う地盤沈下が汽水域植生に与える影響の分析, 河川技術論文集, 第18巻, pp. 53-58, 2012

都市におけるエネルギー需要・供給者間の連携と温室効果ガス排出量取引に関する研究

国土交通省国土技術政策総合研究所 下水道研究部下水処理研究室 室長
都市研究部都市施設研究室 室長

はらだ いちろう
原田 一郎
ふじおか けいたろう
藤岡 啓太郎

1. 都市におけるエネルギー利用連携の重要性と研究のねらい

京都議定書目標達成計画（平成17年4月28日閣議決定、平成20年3月28日改定、以下「達成計画」という）では、エネルギーの需要・供給に関連する主体は「他のエネルギー需要・供給者と連携してエネルギー効率の更なる向上を目指す」とこととされている。下水道事業においても、下水汚泥を原料とするバイオ燃料を他の需要者に供給するなど、都市の公益事業相互の連携や公益事業と民間

主体との連携等によって効率的に温室効果ガス（以下「GHG」という）の排出を削減できる可能性が高いものと期待される。そこで、下水道等のエネルギー連携技術の事例評価と適用可能な最新技術メニューを整理するとともに、連携技術の事業性診断手法を開発し、あわせて事業化までの検討手順や留意事項について整理することとした。

また、達成計画では、エネルギーの効率的な利用について都市政策での対応として「街区レベルや地区レベルでの面的な対策を導入することにより低炭素型都市の構築を推進する」ことが求められた。これまで面的なエネルギー対策について

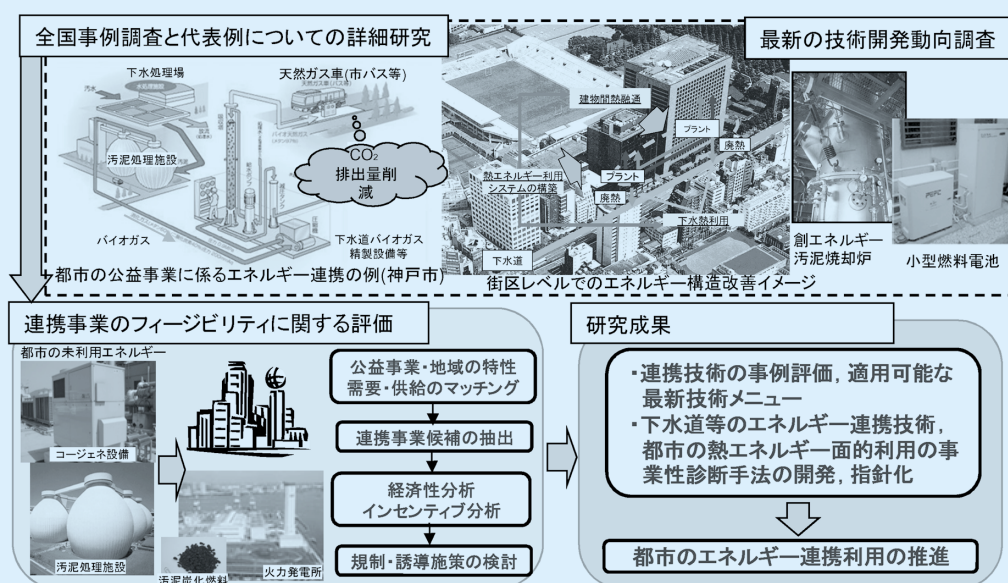


図1 都市におけるエネルギー利用連携の研究の概要

は、大都市を中心とする限られたエリアにおいて、市街地の面整備に併せて地域冷暖房が導入されてきたが、今後は既成市街地の再整備が中心となる中で、新たな推進手法が求められている。そこで、地冷だけでなく小規模な熱エネルギーの融通（建物間熱融通）も併せて推進するため、事業性評価診断手法を開発することとした。

2. 適用可能な最新技術メニュー

(1) 下水道等のエネルギー連携技術の事例評価と適用可能な最新技術メニュー

下水道と他事業のGHG排出削減対策に関する連携技術の代表事例として、下水汚泥由来の固形燃料の発電への活用、下水処理水および下水等を熱源とした地域冷暖房等への熱供給および消化ガスの都市ガス等への供給に関して事例評価を行い、GHG排出削減量や技術的課題について整理した。その結果より、下水道に大量に存在する未利用熱・エネルギーを連携事業に円滑に活用するには、連携技術の必要エネルギーの削減等の技術開発が必要と考えられた。

適用可能な最新技術メニューとして、下水道・他事業相互連携には用いられていないが今後有望と考えられる技術の例として、「下水汚泥ガス変換発電システム」（下水汚泥中の可燃分をガス化後、酸素と反応させ、一酸化炭素や水素などの燃料ガスに改質し、ガスエンジンにより発電するシステム）について検討した。結果として、適用に際しては、大規模・長期連続運転による信頼性・安定性の確認、熱・ガス供給方法の検討、長期・

安定的な連携供給先の確保、施設の設計・建設・維持管理等も含めた運営に関する事業方式の検討が必要と考えられた。

(2) 熱エネルギーの面的利用に関する適用可能な最新技術メニュー

六つの最新技術（太陽光発電、太陽熱利用、燃料電池、焼却廃熱利用、河川水等の熱利用、エリア・エネルギー・マネジメント）の建物単体レベルでの導入事例を調査し、既存の面的な熱エネルギー技術（地域熱供給、地点熱供給、建物間熱融通）との組み合わせの可能性と有効性を明らかにした。

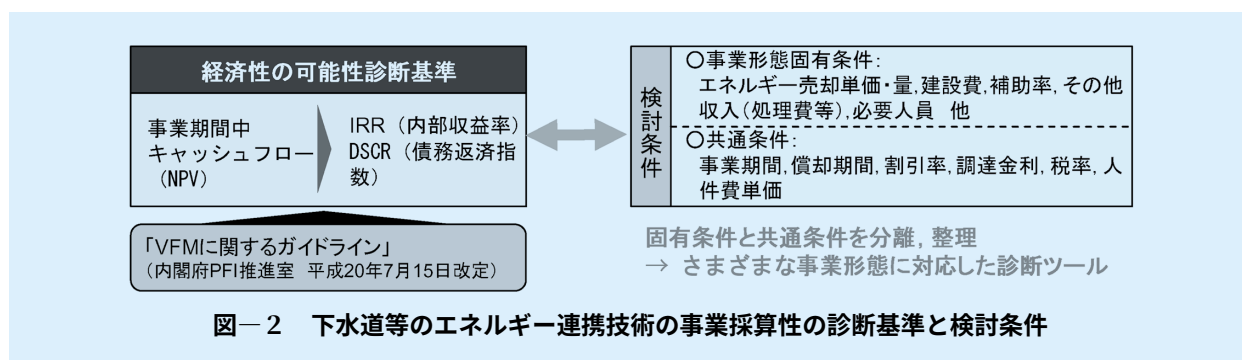
3. 事業性診断手法

(1) 下水道等のエネルギー連携技術の事業性診断手法

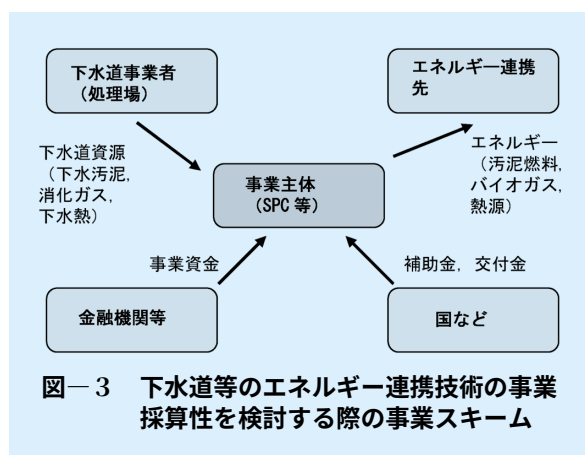
下水道等のエネルギー連携事業の実施可能性について、地方公共団体等の事業者が簡便に診断できるよう、補助金や別収入等も考慮した事業採算性について試算可能なソフトウェアを開発した。

事業性診断の対象は、今後導入件数の増加が期待される「下水汚泥と生ごみ等からのバイオガス製造事業」「汚泥燃料の火力発電利用事業」「消化ガスからの都市ガス製造事業」の3事業とした。

事業採算性の診断は、「VFM（Value For Money）に関するガイドライン」（内閣府PFI推進室 平成20年7月15日改定）に基づき、おおむね15年間の事業期間のキャッシュフローを算出し、IRR（内部収益率）等の投資効率指標を算出



図ー2 下水道等のエネルギー連携技術の事業採算性の診断基準と検討条件



することにより行った。図-2に、診断基準の具体的項目（図左側）、および算出に際して決定する必要がある入力条件（事業固有の条件および共通条件：図右側）を示す。また、検討に当たって想定した事業スキームは、図-3に示すとおり、公共と民間の特定目的会社（SPC等）によるPFI事業（民間資金等活用事業）またはそれに類する事業とした。

（2）熱エネルギーの面的利用に関する事業性診断手法の開発

2(2)の検討結果に加えて、本省都市計画課により公開された「低炭素都市づくりガイドライン」との連携を図り、「低炭素都市づくりガイドライン」の「エネルギー分野」に記載されているメニューを可能な限り全て含めた、熱エネルギーの面的利用によるCO₂削減効果を評価するソフトウェア（研究用）を開発した。

本ソフトウェアは、建物の用途（6種類の中から選択）、床面積、熱源方式（7種類の中から選択）、必要な熱融通配管の距離、活用する再生可能エネルギー・未利用エネルギーの条件を入力す

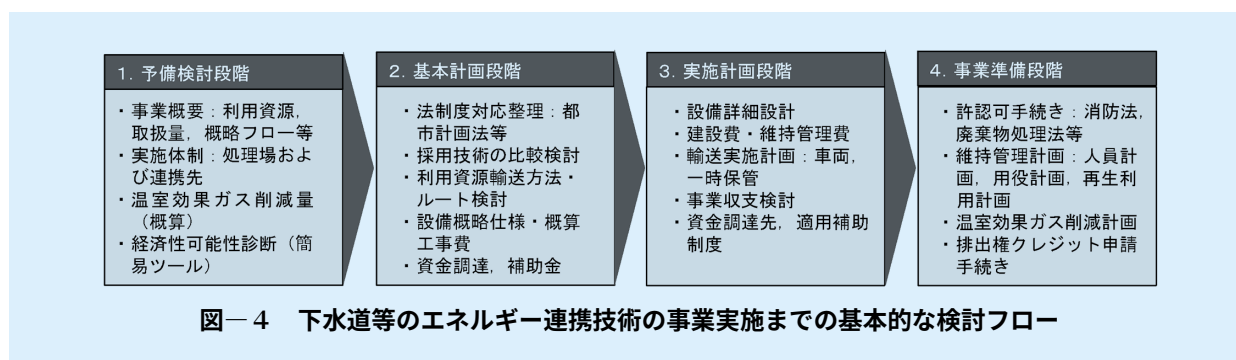
れば、事業導入前後について、一次エネルギー消費量、CO₂排出量、建設費の増加額、ランニングコスト削減額、単純投資回収年数、年間経費等を出力するものである。

4. 下水道等のエネルギー連携事業の事業化までの検討手順や留意事項

下水道等のエネルギー連携事業の事業化までの検討手順や留意事項について整理した結果、基本的な検討フローを図-4に示すとおり策定した。これは、予備検討、基本計画、実施計画および事業準備の各段階において、必要な事項を検討するものである。

また、現在、下水道事業におけるエネルギー連携事業は実施義務を伴う事業ではないことから、新規着手する事業者がいる一方で、コストや維持管理上の問題などから事業を中止する事業者もあり、実施者総数は大きく増加していない。今後、エネルギー連携事業の実施数を増やしていくためには、下水道事業者にも事業実施のメリットを享受できるようにすることが必要である。

さらに、下水道におけるエネルギー連携事業は、建設や維持管理費用面においても、石炭や天然ガスのような他のエネルギー資源に比して経済的メリットが小さいものが多いが、事業に対して経済性とは別の意義やメリットが存在する場合、エネルギー連携事業を推進するきっかけとなる場合がある。例えば、家畜糞尿の処理や周辺地域への臭気問題がきっかけとなった場合、自治体が策定した上位計画の中で「環境事業の推進」を明確に打ち出している場合等の事例もあった。



5. 「熱エネルギーの面的利用による低炭素まちづくりの手引き」の作成

「熱エネルギーネットワークによる低炭素都市づくり研究会」（座長：横浜国立大学佐土原教授）を立ち上げ、エネルギーの面的利用を推進する事業者、本省都市計画課の低炭素都市づくりガイドラインを担当する部署等、関係各方面のメンバーからご意見をいただき、地方自治体のまちづくり部局担当者に向けた、熱エネルギー面的利用の導入を検討するための手引きを作成した。

本手引きでは、これまで主として地域冷暖房において取り組みが推進されてきた、面的市街地整備事業などの個別プロジェクトの企画構想段階で導入適性を検討する場合だけでなく、都市計画マスタープランなどで熱エネルギー面的利用促進地域を指定して、積極的に事業を推進していく地域を検討する場合を設定し、これら二つの異なる場合について、検討に必要な抽出条件や判断基準の詳細を含む検討フローを示した（図－5参照）。

併せて、3(2)で開発したソフトウェアを活用して、具体的な都市に検討フローを適用し、実際に導入適地を試算・検討した場合のプロセスと結果を例示した。

また、特にまちづくりの担当者にとっての身近な話題として建物用途混合によるエネルギー負荷平準化の効果が実感できるよう、3(2)のソフトウェアを部分的に抜粋し、インターフェースを改善した簡易計算ソフト（一般用）を作成している。

6. 今後の展開

今後は、下水道等のエネルギー連携技術の事業性診断手法や検討手順等を公開し、広く地方公共団体の下水道管理者等に活用されることで連携事業の推進を図ることとしている。

また、現在、「低炭素都市づくりガイドライン」の「エネルギー分野」は、改訂に向けた検討が実施されており、この検討において本研究の成果が活用される予定である。

