

◆特集：自然と共生する国土の再構築に向けて◆

GISを活用したシミュレーションモデルによる 流域圏再生シナリオの検討

藤田光一* 伊藤弘之** 小路剛志*** 安間智之****

1. はじめに

水物質循環の健全化、生物・生態系の保全、ヒートアイランド現象の緩和などに向けては、これらが、人間の活動や土地利用を介して相互に影響し合っているため、課題解決を個別に検討するよりも、包括的な解決方策を検討することが重要である。このために、複数の環境問題の解決に資する施策パッケージについて、シミュレーションモデル(以下「モデル」)等を通じて、わかりやすい形で効果把握を行うことがまず必要となる。著者らはこれまで、水物質循環モデルを活用して、霞ヶ浦流域を対象として水環境改善に焦点を当てた検討を行っている^{1),2)}。今回は東京湾とその流域を対象とし、水物質循環モデルだけでなく、水域生態系モデルや熱環境モデルも用いて、より幅の広い施策群の検討を行った³⁾。

2. GISとモデルとの連携

様々なモデルを用いた検討において、入力データの作成の際に、GISを含めた情報基盤が整備されていることが検討を行う上で効率的である。モデルによる再生シナリオの検討において、基盤情報として整備したGISデータベースを活用するとともに、モデルの入力データとして追加的に必要となるデータについては新たにGISデータとして作成した。

また、モデルを政策検討ツールとして活用するため、水物質循環モデルと水域生態系モデルについては、GISをベースとしたユーザーインターフェイスを合わせて整備した。これにより、種々の流域対策や地域活動の効果を簡便に評価できることから、行政と地域住民との協働による流域圏再生シナリオの策定に向けて、モデルが活用されることを期待するものである。

3. モデルの説明

本章では、包括的な施策の評価を行うために用いた水物質循環モデル、水域生態系モデル、熱環境モデルの概要を説明する。モデルの再現性の検証結果の詳細は文献³⁾を参照されたい。

3.1 水物質循環モデル

水物質循環モデルは、流域モデルと湾モデルから成る。計算対象物質は、窒素(T-N)、リン(T-P)、COD(化学的酸素要求量)であり、流域モデルにはBOD(生物化学的酸素要求量)を、湾内モデルにはChl-a(クロロフィルa)とDO(溶解酸素)を加えている。表-1にモデルの内容を示す。

流域モデルは、自然系水循環の流出過程を表現する分布型流出モデル⁴⁾をもとに、農業・工業・生活等の用水・排水といった人工系水循環を組み込み⁵⁾、さらにその水を介して流動する栄養塩等の物質循環を表現するモデルを組み込んだもの⁶⁾である。モデルの構造は、東京湾流域を約1km×1km(国土数値情報の3次メッシュ)の15,558メッシュに分割し、図-1に示す6分類の土地利用条件をメッシュ毎に与え、鉛直方向に表層・不飽和層・地下水層の3層に重ねたタンクモデルを用いるというものである。一方、湾モデルは、流動モデルと低次生態系モデルにより、東京湾内の水と物質の循環を表現するものである。

3.2 水域生態系モデルについて

「東京湾干潟等の生態系再生研究会」⁷⁾などでも注目されているアマモを対象として、HEP(Habitat Evaluation Procedures)を用い、生息生育場評価を行う。HEPとは、対象生物について生息生育に影響を及ぼす環境要因を整理し、各要因について生息生育環境をSI(Suitability Index)

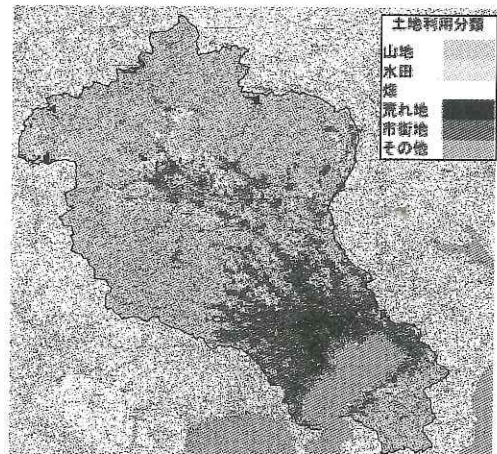


図-1 東京湾流域の土地利用分布

表-1 水物質循環モデルの概要

	水循環モデル	物質循環モデル	
陸域モデル	表層モデル	降雨を表面流、早い中間流、地下浸透流に分離。 表面流はManning則が成り立つものとして基礎式を決定。 早い中間流出量、地下浸透量は浸透能（タンク水位と流出孔との差に比例）に比例。 水平方向へは落水線に沿って流下。（不飽和帯、地下水モデルも同様） 蒸発散はPenman式。	降雨負荷、面源負荷の地表面への堆積による汚濁負荷は表層流（表面流+早い中間流）の掃流力によって流出。 堆積物の流出負荷量は流量のべき乗に比例。 不飽和タンクへは表層流と同じ水質で浸透。
	不飽和帯モデル	遅い中間流は不飽和透水係数（水分量に比例）に比例し、動水勾配が近似的に地形勾配に等しいとして流出量を計算。 地中浸透量は不飽和透水係数に比例し、動水勾配を1として計算。	地中浸透した汚濁負荷は土壌内に蓄積し、蓄積物に吸脱着する過程を考慮。 蓄積物から溶脱した汚濁負荷は中間流により流出。
	地下水モデル	地下水タンクへは中間流と同じ水質で浸透。 被圧地下水はタンク水位に比例し、不圧地下水はタンク水位と不圧地下水発生高の差の2乗に比例。	地中浸透した汚濁負荷は土壌内に蓄積し、蓄積物に吸脱着する過程を考慮。 蓄積物から溶脱した汚濁負荷は基底流により流出。
	人工系モデル	上水、工業用水、農業用水は、当該メッシュの地下水もしくは河道から取水。 排水（生活系、農業系、工業系）は、当該メッシュの表層モデルに与える。ただし、下水処理の排水については処理場から表層または湾モデルに与える。	生活系・畜産系・産業系の排出負荷量はメッシュごとにGISを用いて原単位法により計算し、表層モデルの入力条件とする。 ただし、下水処理の負荷については処理場から表層又は湾モデルに与える。
	河道モデル	水の挙動（水位、流速）の基礎式：1次元Kinematic-waveモデル。（対象河川：利根川（江戸川分派点まで）、江戸川、荒川、中川、隅田川、多摩川、鶴見川等26河川）	各タンクから河道に流出した汚濁負荷について河床への沈降・吸着を考慮。
湾モデル	水域分割：500mメッシュに分割した4層モデル。 （第1層：0～5m、第2層：5～15m、第3層：15～30m、第4層：30m～） 流動：潮汐流、吹送流、密度流を考慮したマルチレベルモデル。	流入流出過程と移流拡散過程を考慮。 当該物質の反応過程を低次生態系モデルとして表現。	

として点数化し、それらを合わせて1点満点の数値として生息生育地選好指標（HSI: Habitat Suitability Index）を算出するものである。

既往の知見^{8),9)}を踏まえ、水深、水中光量、塩分、泥分率を環境要因として250mメッシュ毎にSI値を設定した。各環境要因の影響は同等と仮定し、各要因のSIの積からHSIを算出した。

3.3 熱環境モデル

首都圏全体を包含する半径50km圏内のスケールでヒートアイランド対策の効果を推定するために、吉谷・木内のモデル¹⁰⁾を用いる。これは、米国で開発された汎用型気象モデルMM5を基本とし、地表面の状態を表す情報として細密数値情報を用い、地表面における水熱移動過程、人工排熱の時空間変動などを組み込んだメソスケールモデルである。

3.4 各モデルが扱う現象間の相互作用の考慮

各モデルが扱う現象の間には大なり小なり相互作用がある。それを考慮することは、施策間の相乗効果の評価につながり、施策群のあり方を考える上で重要な情報をもたらす可能性がある。ここでは、図-2に示すように、水物質循環モデルから出てくる水質改善効果と水域生態系モデルから出てくる生育場改善効果の間の相互作用の計算を

試みた。

具体的には、まず、水物質循環モデルにより求めた東京湾のCOD値の改善度（アマモの生育特性から6月の数値を用いる）を、実測値から求めたCODと透明度の関係式より透明度の改善度に変換し、その透明度と全日射量から環境要因である水中光量を求め、アマモのHSIに及ぼすCOD値改善の影響を算出する。次に、求めたアマモのHSI値（0～1）の変化を被度（0～100%）の変化に線形換算することで、アマモの変化が今度は湾内の水質浄化に新たに寄与する度合いの算定を以下のように行う。アマモのHSIが1の時（被度100%）の1m²あたりの窒素浄化量を、参考文献^{11)～14)}から90mgN/m²/dayとおく。また、リンについては、アマモ体中の窒素とリンの重量割合から¹⁴⁾、その浄化量を18mgP/m²/dayと設定する。これ

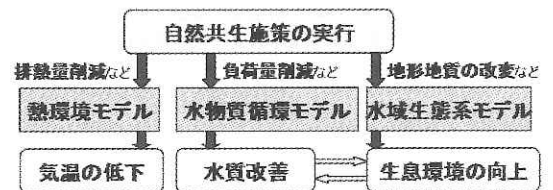


図-2 モデルで扱う現象間の相互作用について

らの浄化量を HSI が高くなった箇所に相当するブロックの窒素・リンの底泥溶出速度から差し引いた条件で、湾内水質の年間計算を再度行う。

4. 施策群の実施効果の計算結果

4.1 計算の前提条件

以下では、前章で説明したモデル群を用いて種々の施策の熱環境改善に関わる効果を推定する。再生のターゲットとなる年次を概ね 20～30 年後と置いた。これに合わせ、施策効果の計算は、将来の数値がある程度公式に推計されているものについては、その推計値を与えて行った。具体的には、人口について、市町村ごとに算定された国立社会保障・人口問題研究所による 2030 年の中位推計値を与えた。これにより、図-1 のエリアでの東京湾流域圏における現況人口の設定値を 2897 万人 (2000 年国勢調査)、ターゲット年次の将来人口の設定値を 2816 万人 (2.8% 減少) とした。

気象 (気温、降水、潮位変動など) については、現在 (2001 年) と同一の条件を与えた。土地利用、産業などの社会経済活動にかかわる条件については、施策と連動させて与えることとし、対象とする施策がその条件の制御を直接含んでいない場合は、現況 (2001 年時点) を与えて計算した。

4.2 対象とした施策群

検討を行う 3 つの施策群を表-2 に示す。施策群 1 は「インフラ整備主体型」と呼べるもので、下水処理場での高度処理または高度合併浄化槽整備や透水性・保水性舗装などハード的な施設整備を実施するものである。施策群 2 は「産業・生活スタイル転換型」と呼べるもので、汚濁負荷、排熱負荷の排出を抑制するように環境に配慮した生活行動・産業活動を実践するものである。施策群 3 は「自然機能回復型」と呼べるもので、都市内で

の緑地の確保、荒川と多摩川沿いで連続的な緑地の確保、湾岸での干潟再生など、自然機能の回復を、土地利用改変を含めて行うものである。本論での施策群の組み合わせ方については、現状 (施策群 0)、施策群 1、施策群 1+2、施策群 1+2+3 の 4 種類を取り上げる。

各施策をモデル上で表現するための条件やパラメータ設定に際しては、既往の文献を極力参考にした。ただし、明確な根拠を持って与えることが現時点では難しく、割り切って設定しているものもある。以下に述べる結果は、種々の環境改善施策に概ね対応するようにパラメータや条件を変えて、モデルの感度分析を行ったものとして見るべきものである。なお、本計算では、施策が機能するまでの経過時間 (事業期間) は考慮していない。また設定条件の詳細は次節以降に示す。

4.3 施策群の実施効果-水質-

表-3 に基づき水物質循環モデルを用いて計算を行った。計算結果から、東京湾に流入する全河川を対象に流量で重み付け平均した水質を求め (以後、「平均水質」と呼ぶ)、各施策群の実施による現況からの改善効果として図-3 にまとめた。図-3 から、排出負荷量の 6 割を生活排水で占める東京湾流域では、合流改善や下水の高度処理化、高度処理合併浄化槽の整備など生活排水対策の効果が相対的に大きい傾向にあることが把握できる。生活排水対策につながる非ハード的対策 (下水処理場への負担を減らすことを含む)、すなわち排水量や排出負荷量の削減を流域住民自らが実践することの重要性も計算結果に現れている。

施策 (群) の組合せ効果 (各施策を包含する施策群単位の棒グラフにより表示) を見ると、複数の施策の実施により、効果が着実に増大することが確認できる。このことは、単独の施策では目的

表-2 東京湾流域圏再生にかかわる施策群の設定内容

施策群	施策内容	モデルで設定する内容		
		水物質循環モデル	水域生態系モデル	熱環境モデル
施策群 0	現況	—	—	—
施策群 1	ハード的な事業の実施	下水高度処理、合流改善 (既整備地域+整備予定地域) 高度処理型合併浄化槽の設置 (下水道整備予定外地域) 透水性・保水性舗装	水質の改善 (水物質循環モデルの結果の反映)	保水性舗装
施策群 2	循環型社会の構築を目指した産業・生活スタイルの転換	環境保全型ライフスタイルの転換 環境保全型農業 下水処理水の再利用 家畜し尿の農地還元 雨水貯留浸透施設の整備 (屋上緑化)	水質の改善 (水物質循環モデルの結果の反映)	環境保全型ライフスタイルの転換 エコカーの普及 屋上緑化 保水性建材の利用
施策群 3	面的な土地利用の改変により緑地、干潟の回復	都市部および荒川、多摩川の両岸に緑地の確保 調整池の確保 干潟の造成	水質の改善 (水物質循環モデルの結果の反映) 底質、水深 (幕張・いなげの浜の再生)	緑地への転換 (都市部および荒川、多摩川の両岸)

に達しない場合に、施策(群)の組み合わせ実施を進めることの重要性を改めて示すものである。

図-4は、施策群を1、1+2、1+2+3と重ね合わせていく毎に東京湾の水質分布がどうなっていくかを示したものである。COD、T-N、T-Pのいずれについても、施策群の重ね合わせが進むと効果が増していき、濃度の高いエリアが湾全体にわたって縮小していく計算結果になっていることがわかる。

4.4 施策群の実施効果—アマモ生育場—

施策群の実施のやり方とアマモ生育場HSIとの関係を、やはり図-4に示す。また図-5は、三番瀬と幕張・いなげエリアの各メッシュのHSI値を合計した値を示したものである。施策群1や施策群1+2のような施設整備を中心とする取り組みや産業・生活スタイルの転換による水質改善だけでも、透明度の改善を介して、三番瀬ではHSIが少し向上する。施策群1+2+3の段階になると、施策群3における幕張・いなげの浜の再生や底質環境の改善という直接的な取り組みが加わるため、干潟再生地域を中心に生育場の評価値が大きく向上する結果となっている。

以上から、湾内生物の生息生育状況を改善するために、干潟再生などの直接的な再生策とともに、

表-3 水物質循環モデルでの設定内容

水環境政策	対策流域
下水道の整備：下水道処理計画区域の全域に下水道整備を行う	流域
合流改善：日雨量25mm(現況5mm)以下までは処理排水を排出	流域
下水の高度処理化：処理場からの排出負荷量をBOD,COD,TNは8.0(mg/l)、TPは0.4(mg/l)と設定	流域
単独浄化槽の合併処理化：下水道整備予定外の地域全体について、単独浄化人口を全て合併浄化人口に転換	流域
高度処理合併浄化槽整備：下水道整備予定外の地域全域に高度処理合併浄化槽を整備(排出負荷量はBOD,COD,TNは2.5g/人日、TPは0.25g/人日)	流域
透水性・保水性舗装整備：市街地メッシュのうち幹線道路面積について表層タンクのパラメータを畑・荒地の値を設定する	流域
環境保全型ライフスタイルの実践：全住民が環境保全型ライフスタイルを実行することにより排水量が36%削減されると設定。また生活雑排水未処理人口の生活雑排水からBOD,CODは28%、TNは30%、TPは20%の削減	流域
環境保全型農業：環境保全型農業の推進により田畑への施肥量を削減し、作物の生長に必要な分以外を100%削減すると設定	流域
下水処理水の再利用：全下水処理水の10%を生活用水として再利用することで生活用水取水量と排水量を削減	流域
家畜し尿の農地還元：全家庭し尿を農地に還元することで家畜由来の負荷量を100%削減すると設定	流域
各戸雨水貯留・浸透：全家庭の屋根全体(建坪率)に貯留浸透施設を設置し表面流出を抑制(市街地メッシュのうち宅用地面積について表層タンクのパラメータを畑・荒地の値を設定)	流域
市街地の緑地化：市街地メッシュの3割と荒川、多摩川の河道メッシュを緑地化(土地利用を「森林」に設定)	流域
調整池の整備：市街地メッシュのうち公共施設、中高層住宅地について雨水の流出を一時貯留させる調整池を設定(600m ³ /ha)	流域
干潟の再生：幕張・いなげの浜に干潟を再生し、植生・土壌・生態系等の機能を活用した浄化を図る(7.5km ²)	湾内

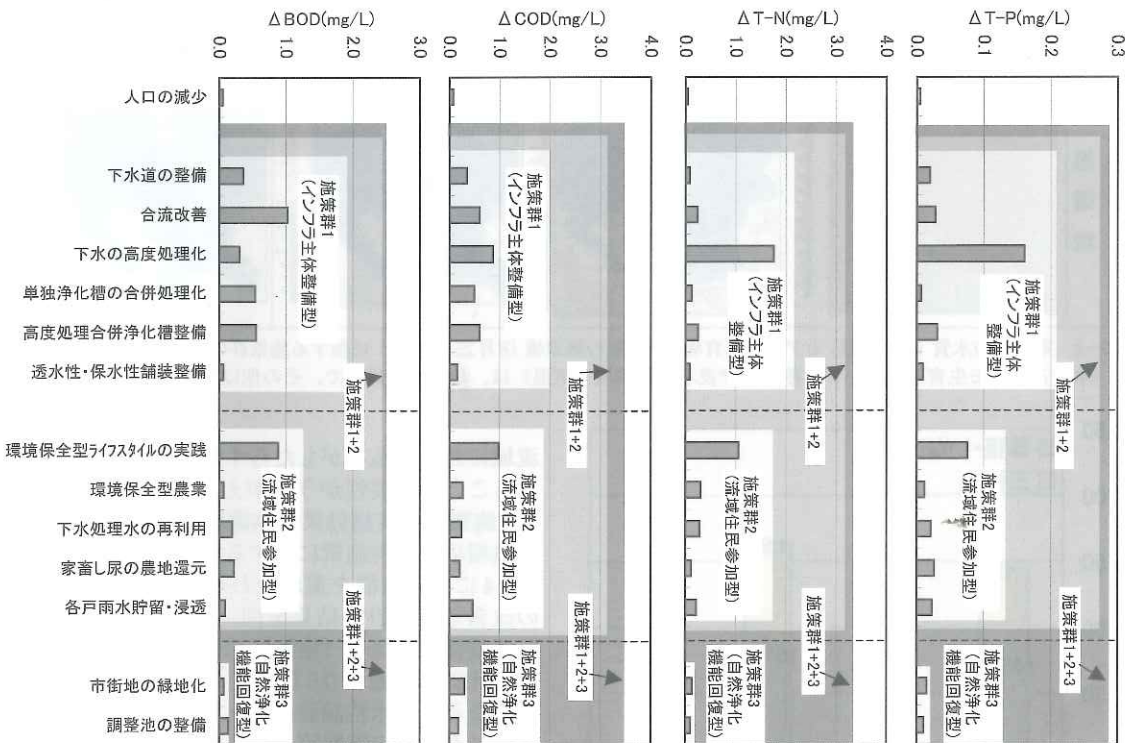


図-3 東京湾流入河川の平均水質に関する施策(群)の個別・重ね合わせ効果の計算(現況との差分で表示)
(現況(計算値)：BOD 4.3mg/l、COD 6.9mg/l、T-N 5.8mg/l、T-P 0.46mg/l)

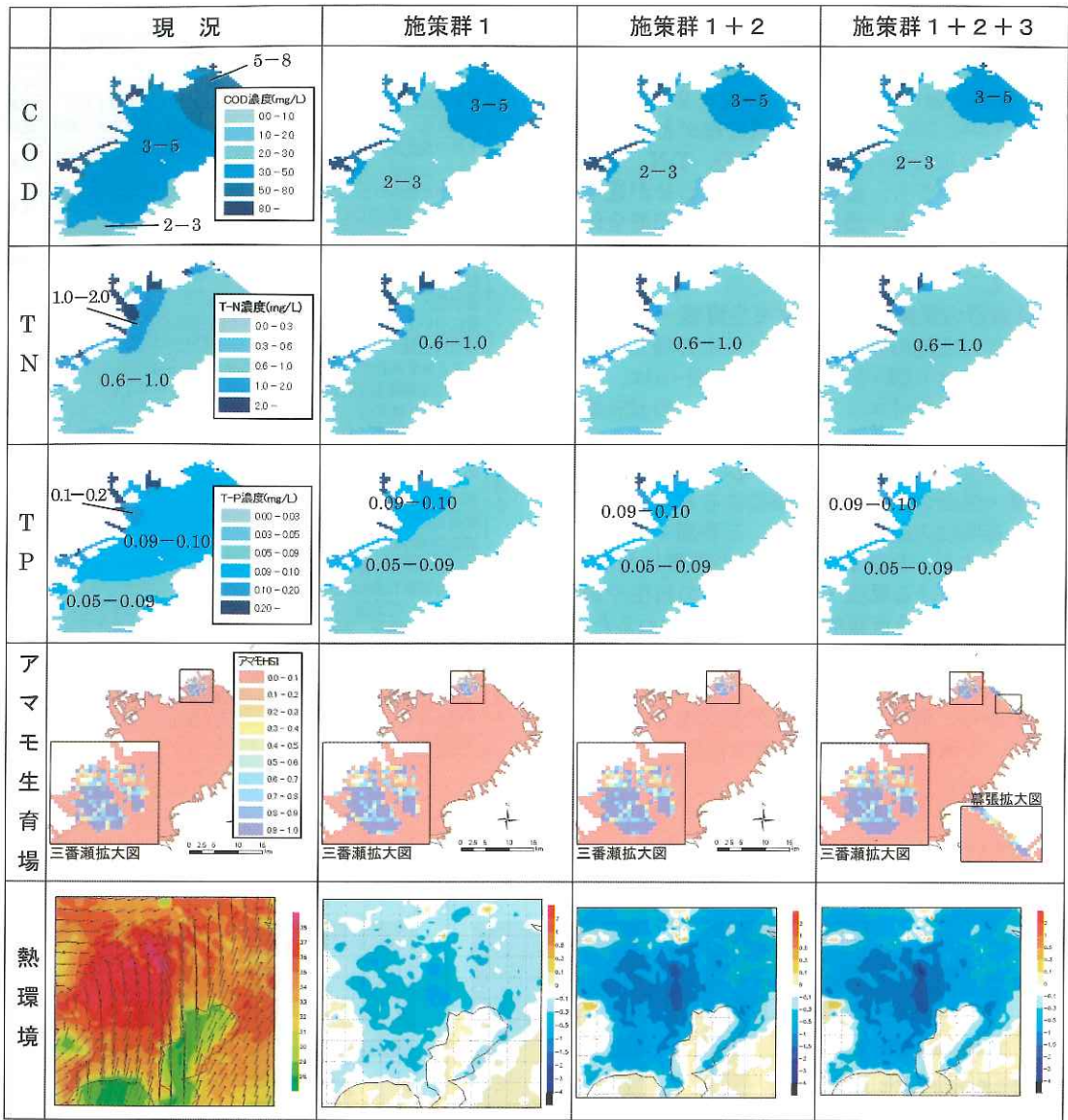


図-4 東京湾の水質(7月15日)とアマモ生育場、首都圏の熱環境(8月25日14時)に関する施策群の重ね合わせ効果の計算(水質とアマモ生育場については絶対値で表示。熱環境(気温)は、現況は絶対値で、その他は現況との差分で表示)

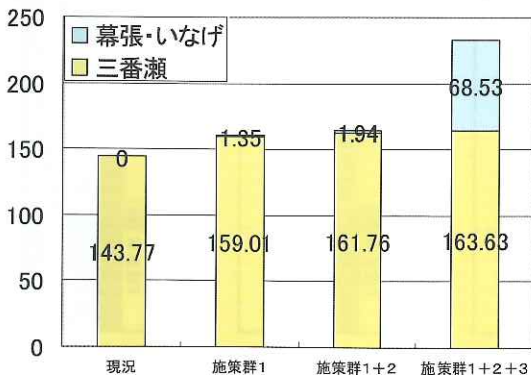


図-5 アマモHSI値に与える施策群重ね合わせ効果

流域における施策がもたらす効果も合わせて考慮することの重要性がうかがえる。

4.5 施策群の実施効果—熱環境の改善—

熱環境の改善施策に関する具体的な設定条件を表-4に、施策群を重ね合わせていく毎の熱環境の改善効果の計算結果を図-4に示す。保水性舗装を整備した場合(施策群1)、都心部を中心に現況と比較して最大0.5℃程度の気温が低下する結果となる。保水性舗装に加えて、環境に配慮した生活スタイルの実践等による排熱量の削減や屋上緑化や保水性建材の利用を加えることで(施策群1+2)、都心では最高気温が現況から最大2℃弱

表-4 熱環境モデルでの設定内容

熱環境政策	
施策群 1	保水性舗装：「道路」の保水率を変更 環境保全型ライフスタイルの転換：全「建物用地」について冷熱を50%削減
施策群 2	エコカーの普及：「道路」の排熱量を1割削減 屋上緑化：全「建物用地」に屋上緑化を行い、緑被率を向上
施策群 3	保水性建材の利用：全「建物用地」の保水率を変更 緑地への転換：市街地の30%と荒川、多摩川の河川沿い500mを緑地に転換

まで低下する結果となっている。さらに市街地の3割と荒川と多摩川の河川沿い500m幅を緑地に転換した場合（施策群1+2+3）、若干の気温低減効果が働き、最高気温に現況に比べ最大2℃強の低下が生じるとの結果となった。

5. まとめ

本論では、自然共生型流域圏の再生を図るために、東京湾とその流域圏を対象として、政策シナリオの検討につながる施策群を具体的に設定し、水物質循環モデル・水域生態系モデル・熱環境モデルを適用して、施策群に応じた環境改善度合いを評価した。水質、生育場評価値、気温が各モデルの出力値として定量化されることにより、施策群実施後の流域環境がある程度描かれることは、自然共生型流域圏の構築に向けて有用な情報になるものと考えられる。今後は、政策シナリオの実践に向けて地域活動・施策を活性化し、行政施策と協働して効率的に持続していくための仕組みの研究を進めることが必要である。

謝辞

熱環境モデルの検討においては、木内豪元土木研究所主任研究員（現福島大学助教授）に指導を頂いた。ここに謝意を表します。

参考文献

1) 藤田光一、伊藤弘之、小路剛志、安間智之：GIS、流域水物質循環モデルを活用した水政策検討、土木

技術資料, Vol.46-7, pp20-25, 2004.

2) 藤田光一、伊藤弘之、小路剛志、安間智之：水環境問題解決への水物質循環モデル適用の試みとその課題、土木学会水工学委員会河川部会、河川技術論文集, Vol.11, pp59-64, 2005.

3) 福田晴耕、藤田光一、伊藤弘之、長野幸司、小路剛志、安間智之：自然共生型流域圏再生のための東京湾とその流域における政策シナリオの検討、第33回環境システム研究発表会講演集, pp365-374, 2005.

4) 吉野文雄、吉谷純一、堀内輝亮：分布型流出モデルの開発と実流域への適用、土木技術資料, Vol.32-10, pp54-59, 1990.

5) 安陪和雄、大八木豊、辻倉裕喜、安田佳哉：分布型流出モデルの広域的適用、水工学論文集、第46巻, pp247-252, 2002.

6) 辻倉裕喜、安陪和雄、大八木豊、田中伸治：湖沼流域管理のための総合的な水循環・物質流動モデルの構築、水工学論文集、第47巻, pp217-222, 2003.

7) 国土交通省港湾局、環境省自然環境局編：干潟ネットワークの再生に向けて～東京湾の干潟等の生態系再生研究会報告書～, pp87-110, 2004.

8) 川崎保夫・飯塚貞二・後藤 弘・寺脇利信・渡辺康憲・菊池弘太郎：アモモ場造成法に関する研究、電中研研報総合報告U14, 1988.

9) 日本資源保護協会：アモモ類、環境が海藻類に及ぼす影響を判断するための「判断基準」と「事例」、pp.38-47, 1992.

10) 吉谷純一、木内 豪：都市空間におけるヒートアイランド現象の軽減に関する研究（その2）、土木研究所資料、第3783号, 2001.

11) 飯泉仁：海草類の栄養塩取り込みについて、月刊海洋, Vol.21, No.6, pp317-321, 1989.

12) 生物の多様性分野の環境影響評価技術検討会：生物の多様性分野の環境影響評価技術（Ⅱ）生態系アセスメントの進め方について 生物の多様性分野の環境影響評価技術検討会中間報告書, <http://assess.eic.or.jp/houkokusho/tayousei0008/>, 2000.

13) 輪島毅、有松健、伊東永徳、豊原哲彦、吉澤 忍、福島朋彦：東京湾藻場分布調査一アモモ場調査のまとめ一、日本海洋生物研究所年報, pp31-37, 2004.

14) 平塚純一、山室真澄、石飛 裕：アモモ場利用法の再発見から見直される沿岸海草藻場の機能と修復・創生、土木学会誌, Vol.88, No.9, pp79-82, 2003.

藤田光一*



国土交通省国土技術政策総合研究所環境研究部河川環境研究室長、工博
Dr. Koh-ichi FUJITA

伊藤弘之**



国土交通省国土技術政策総合研究所総合技術政策研究センター建設マネジメント技術研究室長（前 河川環境研究室主任研究員）
Hiroyuki ITO

小路剛志***



国土交通省国土技術政策総合研究所環境研究部河川環境研究室研究員
Takeshi ORO

安間智之****



国土交通省国土技術政策総合研究所環境研究部河川環境研究室交流研究員
Tomoyuki ANMA