

地球温暖化に対する都市システムの適応策検討に関する基礎的研究

A basic framework for examining of adaptation policies against various impacts of climate change on urban systems

加知 範康*

Noriyasu Kachi

加藤 博和*

Hirokazu Kato

林 良嗣*

Yoshitsugu Hayashi

ABSTRACT: Incorporating with uncertainties, this study aims at developing a basic framework for grasping and evaluating damages of climate change on urban-system for examining adaptation strategies. Damages of climate change on urban-system are decided by capability and adaptability of each urban-system and external force (magnitude of climate change). Information about external force is given by IPCC. However capability and adaptability, and method, which are assessed or used in each component study, are very important factors for evaluating impact of climate change on urban-system. This study clarifies the distribution of shortage of information about capability and adaptability, and analysis method. It is difficult to set information of capability and adaptability, which is closely related to socio-economic condition in the future. Socio-economic condition is also fundamental information for SRES scenarios in predicting climate changes. Sensitivity analysis with information about capability and adaptability, which includes a lot of uncertainties, is very important and this framework formulates the concept via risk assessment approach.

KEYWORD; Climate Change Impact, Adaptation, Urban System, Uncertainty, Risk Assessment

1 はじめに

地球温暖化は、海面上昇や降雨の変化などの気候変動を引き起こし、人間活動と生態系に様々な影響を及ぼすと予想される。地球温暖化対策として第一に取り組むべきは、温室効果ガス排出の削減であるが、それが十分に行われ温暖化防止効果を発揮する保証はない。そこで、事後的な対策として、温暖化の進行に地球システムを順応させていく適応策(adaptation)が必要となってくる。これは人間活動やそれに関連する自然・生態系のあらゆる場において必要であり、むしろ、多くの人間が生活の場として様々な活動を行っている都市においても同様である。しかし、地球温暖化が都市システムにどのような影響を及ぼすかに関する全体メカニズムは明らかになっていない。これは、都市システムは既存の多くのセーフティネットに守られているために、地球温暖化に伴う影響も緩慢であると予想される上に、温暖化・気候変動予測そのものの不確実性ととも都市システムにおいては社会経済、土地利用などの不確実性を持った変動要因が多く存在するため、温暖化の影響予測がそれらの不確実性ノイズの中に埋もれてしまうためであると考えられる。

そこで本研究では、都市における地球温暖化の影響と適応策を総合的に評価するために、温暖化によって都市システムが受ける被害を、不確実性を組み込んだリスク評価の枠組みの中で定量的に把握するための基本フレームの構築を目的とする。さらに、このフレームを用いて、総合評価を行うために不足している情報の分布を明らかにすることを目指す。

*名古屋大学大学院環境学研究科 Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University

2 地球温暖化が都市システムに与える影響に関する既往研究の整理

2.1 既往研究の特徴

まず、「IPCC 第3次報告書」¹⁾「温暖化の日本への影響 2001」²⁾などの公式報告書や既往の各個別研究、出版物等を広くレビューし、気候変動が都市システムに与える影響予測に関する研究の実施状況について把握する。ここで都市システムとは、「人間の社会・経済活動」「それらを支える都市施設・制度等のインフラ」「両者の相互関係」から構成されるものとして定義する。影響としては主に表1のようなものが挙げられる。

レビューの視点としては、適応策検討を容易にするために、都市施設そのものの「供給」に対する影響と、都市施設利用者の「需要」に対する影響に分類する、都市計画や交通計画・土地利用計画との関連を明らかにする、被害算定に必要な各段階に関わる都市システムの感受性・適応力を合わせて整理する、研究の結果示された影響の大きさに関する予測値はもとより、その予測の前提となっている条件を合わせて調査し、研究によってそれが大きく異なっていることを明らかにする、といった点に注意する。

レビューの結果、各個別研究によって、a)気候変動予測値、b)分析対象地域や地理的範囲、c)対象年次、d)分析手法に違いがあり、それが全体として総合的に評価する場合の不確実性の一因となっていることが明らかとなった。例えば気候変動予測値についてみると、IPCC 第3次報告書¹⁾では、1990年から2100年までに全球平均で気温が1.4度から5.8度上昇、海面水位が9cmから88cm上昇すると報告されている。一方、表2に例を示すように、各個別研究では、この範囲からいくつかの値が選択されて分析の前提条件に使用されている。分析の対象が同じ場合には温暖化の影響が発生する気候変動の閾値の算出を行うことができるが、対象が異なる場合には両者を比較し総合的な評価を行うことは困難である。また、分析手法に関しても、気温と熱中症の発生の相関をとる統計的分析や流出モデルを用いて降水量から河川流量を求めるプロセスを重視した分析などさまざまであり、結果をどう統合したらよいかという問題が生じる。これらの点について3章以降で詳しく論じる。

表1 温暖化が都市システムに与える影響の概要

外力	一次的影響	二次的影響
気温上昇	水質低下	水産業への影響
	水需要増加	渇水
	人間行動の変化	汚水排出量の増加
	道路凍結減少	インフラ施設に対するニーズの変化
	暖房使用量減少	凍結による道路破損減少
	冷房使用量増加	除雪費の費用削減
		凍結による事故減少
海面上昇	地下水水位上昇	電力消費減少
	高潮・津波・沿岸侵食	電力消費増加
		地盤液状化危険度増加
降雨変化	洪水強度の増大による内水・外水氾濫	地下水・河川水の塩水化
	雪崩	沿岸域インフラへの被害
	鉄道線路変形	冠水・土砂崩れによる交通ネットワークの切断、建物・家財の損失
熱波	地下埋設物の破損	地下街の浸水
		交通ネットワークの切断、建物・家財の損失
		列車事故の発生
		運行速度規制
		隣接するインフラへの被害

表2 各個別研究が分析に使用している気候変動予測値の例

研究	研究内容	外力	使用している予測値
地球温暖化に伴う海面上昇に対する国土保全研究会	海面上昇の国土への影響	海面上昇	0, 10, 30, 50, 90cm上昇
中辻ら ³⁾	大阪湾の高潮に及ぼす影響	海面上昇	0, 30, 65, 110cm上昇
安原 ⁴⁾	地下水水位上昇による1)地盤支持力低下と2)液状化強度、3)河川水位が堤体斜面安定、への影響	海面上昇	0, 65, 110, 200cm上昇
尾尻ら ⁵⁾	渇水発生の影響	気温上昇	0, 3℃上昇
		降水量変化	変化なし, 10%増加

2.2 影響伝播図の作成

総合的評価の基本フレーム構築のための基本的な整理として、温暖化が都市システムに及ぼす影響が発生するプロセスの全体を「影響伝播図」として図1に示すようなフローチャートにまとめる。最上位となる「外力」は、1)降雨強度増加・2)気温上昇・3)海面上昇を対象とする。適応策検討を容易にするために、都市施設そのものに対する影響とその利用者に対する影響に分類するとともに、都市計画や交通計画、土地利用計画との関連を明らかにする。また、被害算定のために、各段階に関わる都市システムの感受性・適応力を合わせて整理する。構築においては、既往の学術研究の成果にとどまらず、地球温暖化に関する出版物やインターネット上の情報等をもとに広く仮説を設定し、さらに2次的影響も組み込むことを試みている。その結果として、既往研究が極めて断片的なレベルに留まっていることが明らかにされた。

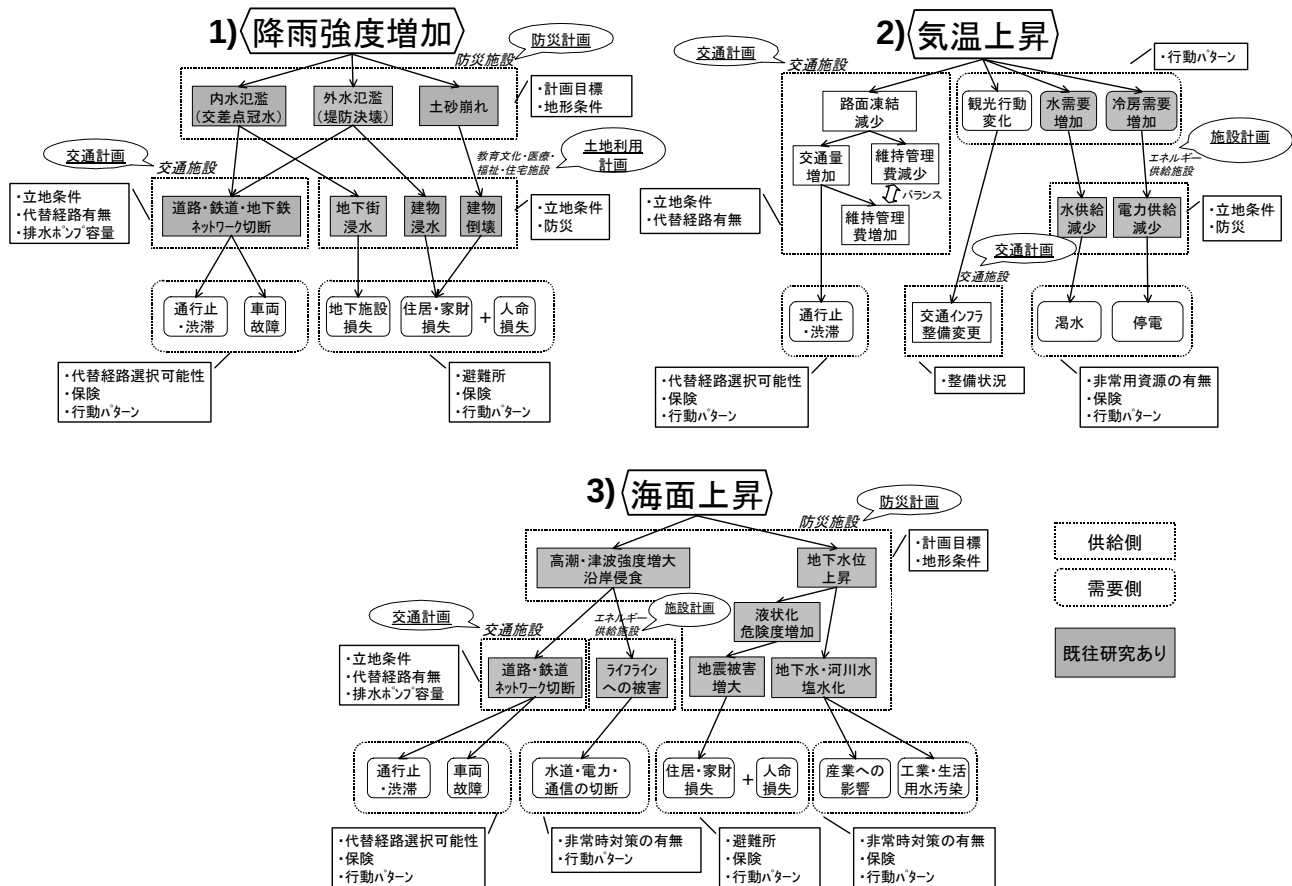


図1 影響伝播図

3 評価における不確実性の原因(リスクファクター)の整理

前章で、地球温暖化の影響研究が断片的で、かつ前提となる入力条件がまちまちであることを指摘した。その理由として、a)IPCC 報告書¹⁾で明らかにされる「外力」が個別研究に反映されるまでには時間がかかること、b)都市の場合局地的な影響が卓越し、世界的な「外力」の予測結果のみでは入力変数として不十分なこと、c)個別研究で必要な説明変数の種類と IPCC 予測値のそれとが整合していないことなどが挙げられる。そこで、各要素研究が前提条件として用いている以下の各項目に関して「不確実性」という視点から整理を試みる。

3.1 気候変動予測値

各要素研究では主に、IPCCにより報告された全球での気温・海面水位上昇の予測値の範囲から値を選択し入力値として用いている。しかし、気候変動は地域差をもって生じることから、詳細スケールの予測値が必要となる。特に近年発生頻度が増加しているとも言われ、都市システムへの影響も大きい台風や集中豪雨などの異常気象の考慮にとっては重要である。更に、気候変動の予測が将来の社会・経済状況に応じた温室効果ガスの排出シナリオ(SRES(Special Report on Emission Scenarios)シナリオ)毎に GCM(General Circulation Model)を用いて計算されているので、影響評価においてどの SRES シナリオに基づく気候変動予測値を用いたかを明示するとともに、想定している社会・経済状況を分析に組み込んでいくために各シナリオの内容を明らかにしていく必要がある。

3.2 分析対象年次

IPCC 報告書¹⁾において温暖化の影響評価のインプットとなる外力(気温 海面上昇など)は、1990 年から 2100 年までの 110 年間について予測されている。多くの研究は 2100 年における気候変動予測値の範囲からいくつかの値を選択して分析を行っているが、適応策の検討を行うためには時系列で考え、どの時点で適応策を実施することが効果的かを分析する必要がある。しかし、2100 年だけを対象としている研究や時系列で分析している研究が混在し、時系列の中にも様々な分析期間のものが混在している。単年度で分析しているものと時系列で分析しているものの分析結果をどう統合するかが問題となる。更に、IPCC により報告されている気候変動予測値を用いている研究のほかに、気候変動モデルを独自で開発し詳細な分析をしている研究⁶⁾が混在している。

3.3 分析手法

分析手法は大きく統計モデルと構造モデルの 2 つに分類される。統計モデルは入力と出力のみから内部構造を想像するもので、内部構造はブラックボックスとなる。対象とするシステムに対する知識が乏しい場合に利用する。構造モデルは社会・経済学的原理、物質・エネルギー収支則など、対象とするシステムに対する先験的知識が豊富な場合に利用する。統計モデルに比べて構造モデルのほうが普遍性を持っていると考えられるが、様々な要因が絡む複雑な分析においては統計モデルが有効な場合があり、プロセスを重視している構造モデルが一概に統計モデルより精度が高いということとはできない。アウトプットの出し方も、地震発生時の液状化危険度⁴⁾や住居や家財、インフラの損失額²⁾など様々なものがみられ、アウトプットの単位を揃える必要がある。

3.4 分析スケール

分析対象によって様々な分析スケールが存在する。例えば、洪水被害の分析であれば対象河川の流域が分析スケールとなり、気温と熱中症の発生をとる統計的分析では都道府県単位のような大きな分析スケールとなる。このような分析スケールの違う分析結果をどう統合するかという問題がある。また、対象スケールが大きくなると影響は平均化されてしまい、適応策を実施するスケールと大きく異なる場合には適応策検討を適切に行うことが困難となる。例えば、「地球温暖化の日本への影響 2001」²⁾によると、気温上昇による熱中症の発生数の分析において、回帰分析の結果、東京において日平均気温、日最高気温がそれぞれ 27℃、32℃を越えると熱中症患者数が指数関数的に増大することが示されている。すなわち、平均気温が熱中症の発生閾値付近にある場合には 1℃の違いが熱中症の発生数に大きく影響することから、日全国平均値を用いると過少評価のおそれがあることになる。この例のように、閾値を越えると指数関数的に増加するような影響の場合には、平均値を用いることによる不確実性が大きく生じることには注意が必要である。このことから、適応策の実施スケールを考慮した分析スケールの選択が必要であると考えられる。さらに、小さなスケールの

ものと大きなスケールのものを統合する際には、各分析の精度が異なることに注意が必要である。

3.5 感受性・適応力に関する情報不足

温暖化による被害は各都市システムが持っている特性(脆弱性)に依存する。例えば、洪水(外水氾濫)の分析において、対象河川流域の地理的条件を「対象河川からの距離」のみで表現していた場合、河川に近いほど被害が大きくなる。対象河川流域の標高が分かれば氾濫経路を考慮した被害分布が予測でき、不確実性の改善が可能である。また、対象河川流域の住居や各種施設が既に洪水に備えて床を高くしていたり、排水施設を完備しているなどの特性によって、立地場所が同じでも被害の大きさは異なってくる。湯水発生時の被害を算定するためには工場など各活動主体が持っている予備用の水の量や、平常時に必要としている水供給量の情報が不足している⁵⁾。高潮・津波による水道、電力、通信などのライフラインの切断による被害の算定においても、各活動主体が持っている非常時対策の有無に関する情報が不足している。このように都市施設やインフラを利用する側は個別に対策を持っており、適応力・感受性の詳細な情報を入手することが困難である。

4 不確実性を考慮した被害算定モデルの枠組み

4.1 リスク評価によるモデルの定式化

地球温暖化への適応策検討を行うには、3章で述べた被害算定の各段階に存在する不確実性を明らかにした上で、不確実性の原因(リスクファクター)を軽減するための対策とそれによる全体の不確実性軽減との関係を把握する必要がある。一般に、被害は気候変動に伴う外力に比例し、都市システムの感受性と適応力の差に反比例すると考えられる。さらに、分析方法・スケールによる不確実性を組み込んだ被害算定モデルの定式化を行う。

気候変動予測値 EF は、SRES シナリオの値

を $SRES$ 、その不確実性を U_s ・GCM の不確実性を U_g とすると、

$$EF=f(SRES,U_s,U_g) \quad (1)$$

個別研究 i から得られる脆弱性 V_i は、分析方法の不確実性を U_m ・感受性と適応力の情報不足をそれぞれ C 、 A とすると、

$$V_i=f(EF,|C_i-A_i|^{-1},U_m) \quad (2)$$

全体として脆弱性 V は、統合化における分析対象年次・分析手法・分析スケールの違いによる不確実性をそれぞれ U_{d_v} 、 U_{d_m} 、 U_{d_s} とすると、

$$V=f(V_1,V_2,\dots,V_n,U_{d_v},U_{d_m},U_{d_s}) \quad (3)$$

また、全体としての不確実性 U は、

$$U=f(U_s,U_g,U_m,C,A,U_{d_v},U_{d_m},U_{d_s}) \quad (4)$$

となる。以上をまとめたのが図2である。被害算定に存在する不確実性には、a)気候変動予測に関わる SRES シナリオの設定 U_s ・GCM U_g 、要素研究における b)分析方法 U_m ・感受性 C と適応力 A の情報不足、統合化における c)分析対象年次 U_{d_v} ・分析手法 U_{d_m} ・分析スケール U_{d_s} の違い、が存在し、これらの不確実性に

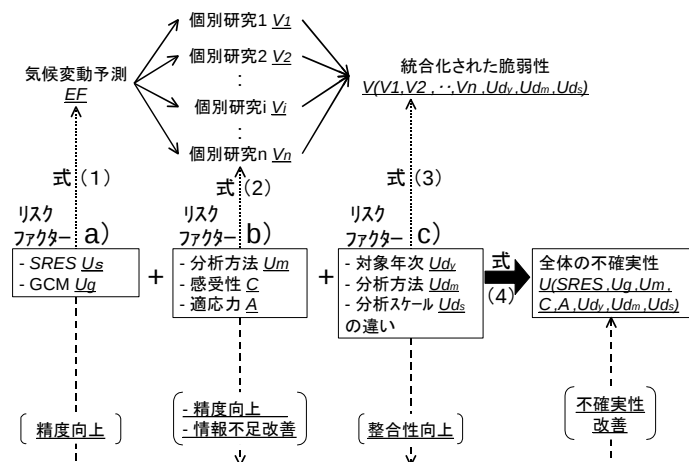


図2 不確実性を考慮した評価モデルの枠組み

よって最終的な被害算定の不確実性 $\underline{U}$ が決定されると考えられる。これら a), b), c) において精度の向上、情報不足の改善、整合性の向上により、全体として不確実性がどれだけ改善されるかを把握することである。

4.2 不足している情報の分布

評価において問題となる、不足情報(感受性 $\underline{C}$ ・適応力 $\underline{A}$ の情報、分析手法 $\underline{Ud}_m$ 、対象年次 $\underline{Ud}_y$)に着目した、既往の個別研究の状況を表3に示す。分析対象年次は各要素研究が用いている値が2100年の予測値の範囲から選択しているので2100年と考えられるが、実際は社会・経済条件の変化を考慮した分析を行っていない場合がほとんどであり、分析対象年次を特定しているとはいえない。

5 結論

本研究では、都市における地球温暖化の影響と適応策を総合的に評価するために、リスク評価の枠組みの中で不確実性を定量的に把握するための基本フレームを構築した。さらに、このフレームを用いて、評価において不足している情報の分布を明らかにした。その結果、感受性・適応力に関する情報が不足していることが分かった。これらの情報は、将来の社会・経済状態と密接に関係するものである。不確実性が大きいために値の設定が困難だと考えられる。また、将来の社会・経済状態は、気候変動予測に用いるSRESシナリオ作成のための基本となる情報でもある。故に、影響評価に用いた気候変動予測値に対応したSRESシナリオの条件となった社会・経済状態を考慮して、感受性・適応力の設定を行うとともに、これらの情報について感度分析をしておく必要がある。

表3 感受性 $\underline{C}$ ・適応力 $\underline{A}$ の情報、分析手法 $\underline{Ud}_m$ 、対象年次 $\underline{Ud}_y$ の分布

		感受性 $\underline{C}$	適応力 $\underline{A}$	分析手法の違い $\underline{Ud}_m$	分析対象年次の違い $\underline{Ud}_y$
海面上昇	地下水位上昇			統計モデル	2100年
	液化化深さ増加			構造モデル	2100年
	地震による住居・家財の損失			統計モデル	2100年
	地下水・河川水の塩水化			構造モデル	2100年
	工業・生活用水汚染			統計モデル	2100年
	高潮・津波強度増大、沿岸侵食	海岸部の地理的条件	防波堤	構造モデル	2100年
	道路・鉄道ネットワークの切断	ネットワークの地理的分布		構造モデル	2100年
	通行止・渋滞				2100年
	ライフラインの切断	ライフラインの地理的分布		構造モデル	2100年
	産業・市民への被害			統計モデル	2100年
気温上昇	水需要増加			統計モデル	2100年
	渇水			統計・構造モデル	2100年
	冷房需要増加			統計モデル	2100年
	停電			統計モデル	2100年
	路面凍結減少	道路構造	道路構造	構造モデル	2100年
	交通量増加			統計モデル	2100年
	通行止・渋滞				2100年
	維持管理費減少				2100年
	内水氾濫(交差点冠水)	地形条件	計画目標	構造モデル	2100年
	外水氾濫(堤防決壊)	地形条件	計画目標	構造モデル	2100年
降雨強度増大	土砂崩れ	地形条件	計画目標	構造モデル	2100年
	住居・家財の損失			統計モデル	2100年
	建物浸水			統計モデル	2100年
	地下街浸水			統計モデル	2100年
	道路・鉄道・地下鉄ネットワーク切断			構造モデル	2100年
	通行止・渋滞				2100年
	車両故障				2100年

* 未記入部分は情報の不足箇所

参考文献

1)IPCC 編, 気象庁・環境省・経済産業省監修(2002): IPCC 地球温暖化第三次レポート
2)環境省地球温暖化問題検討委員会温暖化影響評価ワーキンググループ(2001): 地球温暖化の日本への影響 2001
3)中辻啓二・村岡浩爾・栗田秀明・山根伸之(1993): 地球温暖化が大阪湾の高潮に及ぼす影響に関する研究, 第一回地球環境シンポジウム, pp.209-215
4)安原一哉(1993): 気候変動が土木構造物・基礎地盤に及ぼす影響, 第一回地球環境シンポジウム講演集, pp.222-227
5)尾尻利治(1996): 水資源より見た地球温暖化の影響評価, 第四回地球環境シンポジウム講演集, pp.13-18
6)高橋潔, 原沢英夫, 松岡譲(1998): 気候変動による食糧生産への影響—経済的影響の評価—, 第六回地球環境シンポジウム講演集, pp.167-173