

1. 都市基盤施設への地球温暖化の影響 —枠組みと考え方—

EFFECTS OF GLOBAL WARMING ON INFRASTRUCTURE
—FOR BETTER RESPONSE STRATEGIES—

環境工学委員会

楠田 哲也*

Tetsuya KUSUDA

ABSTRACT; Global warming causes the sea level rise and local climate changes; in particular the increase in precipitation and warming around the freezing point, which give critical effects to the infrastructure in urban areas. Against the effects, the infrastructure should be improved on safety. However decision making on the investment to the infrastructure for keeping the same safety level will depend on the result of cost-benefit analysis regarding the total risk and benefit in the urban area. In this study, various kinds of risk and benefit existing in urban areas are classified and a general formula to calculate the net benefit is presented. Minimizing the cost and maximizing the net benefit is exemplified by inundation in urban areas. Further research work is still necessary for determination of the order of investment to maximize the net benefit in an urban area.

KEY WORDS; global warming, climate change, sea level rise, precipitation change, inundation, infrastructure, cost-benefit analysis

1. はじめに

地球温暖化の影響予測が行われ、中位の条件（Business as usual）でも21世紀末には、気温は1.5–4.5℃上昇、海水面は65cm上昇、さらには台風のような異常気象も増加すると予測されている。このような事態の到来を回避できるように種々の温暖化防止策を前もって実行していくことが何よりも肝要である。しかし、現実にはいずれの防止策も個人レベルや社会レベルにおいて動きの分かる段階にまで至っていない。そこでこのような温暖化の影響が徐々に生じるときの対応をどのような事項に対して如何に取るべきか、その考え方を検討しておく必要がある。

21世紀のわが国は、生産人口の減少、産業構造の変化による生産力の低下、高齢化社会への移行による福祉費の増大等が合わさり、社会基盤施設の建設更新に費やせる金額は低下すると予測されている。このため社会の安全性の維持に費やしうる費用の比率は徐々に低下しそうである。快適性、安定性を含めトータルとして従前と同程度の便益を確保するには、投資に対する意志決定過程の改善が必要と思われる。本報告では、まず都市における温暖化の影響を概観し、次いで都市の総合的な便益・リスクの項目を整理し、安全性を含めた便益を最大にするための施策の選択方法について検討を加え、さらに都市と住民の意志決定の様式を整理する。そして、都市浸水を例に取り雨量変化の影響について考察する。

*九州大学工学部建設都市工学科

Department of Civil Engineering, Kyushu University

2. 温暖化の影響と対策の概要

地球が温暖化すると、降水量の変化や海面上昇、さらには台風発生などの異常気象の頻度が増加すると予測されている。このような温暖化の影響を大別すると、1次、2次、さらに高次の影響に分けられる。1次影響には、気温の上昇、降水量の変化（増減）、海水面上昇の3種が考えられている。さらにこの1次影響は細分化され、降水量の増加では冠水、地下水位上昇、湿潤化、河川流量増加などとなる。また、2次影響は1次の事象が生じたことにより誘起される影響で、人命の損失、疾病

表－1 温暖化の影響の概略

			二 次 影 響							対 策			
			人命の損失	疾病の増加	資産価値の低減	交通の障害	災害の誘発	生活スタイルの変化	社会システムの変化	生態系の変化	都市基盤施設の改変	構造物の構造の変化	食料生産
一次影響	気温の上昇	冷房時間増加						●				●	
		暖房時間減少						●				●	
		生物成長速度変化								●			●
		蒸発量変化								●		●	
		積雪量の減少						●		●	●	●	●
		凍結時間変化						●		●	●	●	●
	降増水量加	冠水	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
		地下水位上昇			●		●			●		●	●
		湿潤化			●			●		●		●	●
		河川流量増加									●	●	
	降減水量少	水不足	●		●			●	●	●	●	●	●
		地下水位低下								●		●	●
		乾燥化		●						●		●	●
	海面上昇	浸水	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
		水位上昇					●			●	●		
		河口部の変化				●	●			●	●		
		塩水侵入			●					●			●
		塩分変化								●			●
		水際線の後退			●		●			●			●
		水深増加					●			●	●		

の増加、資産価値低減、交通障害、災害の誘発、生活スタイルの変化、生態系の変化（食料生産、水産資源への影響、植生変化）などがある。これらの影響とそれらに対する対策を大きく取りまとめたものが表－1である。この表から解かるように、冠水・浸水・水位上昇、および水不足のように水位・水量に関わるものが、都市基盤施設や構造物の構造、住民の生活スタイル、生態系等に圧倒的な影響を与えている。また、気温上昇は、0℃前後のところでは都市施設への影響が大きい。生態系への影響も看過できないが、本論の趣旨とは異なるので、その検討は他に譲る。したがって、次節以降では水位・水量に関わるものを中心にして都市基盤施設への影響について考える。

3. 都市基盤施設への影響

都市基盤施設には、学校・病院・市民センターのような建物、電力線・ガス管・水道管・下水道管・ポンプ場・通信線・浄水場・下水処理場・廃棄物焼却場のようにライフラインとなるもの、道路・鉄道・空港・港湾のように輸送をつかさどるもの、ダム・河口堰のように水資源を確保するもの等がある。それぞ

れの地域の都市基盤施設はそこでの気象条件や海水位に適応するように設計されているが、この条件に変化が生じ設計時の条件を外れると機能しなくなることがある。その例を簡略化して、表－２にとりまとめる。

表－２ 水位上昇、水量増加などが都市基盤施設に及ぼす影響と対応

項 目	影響のある都市基盤施設	対 応
浸水・冠水	鉄道、道路、空港、電力線、通信線	耐浸水性の増強
水不足	各種活動、医療施設、宿泊施設、公園、消火活動	ダム建設、海水淡水化、水循環利用施設 生活スタイルの変更
海水位上昇	港湾施設、ポンプ場、放流施設、堰	施設改善
積雪減少	ダム	交通の改善
凍結減少		交通の改善、上水道施設の簡易化

4. 都市における便益・リスク・費用

温暖化影響により都市基盤施設に何らかの影響が生じた場合、直ちにその手直しをすればよいことはいうまでもない。しかしながら、その費用を住民の負担で捻出しなければならないとすると、支出に対する意志決定、つまりその手直しは他にそれと同じ額の投資をした場合に得られる効用と比較の上選択されることになるはずである。都市における効用＝（便益－リスク－経費）であるので、まず選択対象となる個々の項目について取りまとめる。

4. 1 都市の便益

都市では、人口が集中し、投資が行われ、財産の集積度が高く、さらに情報も集中していることから、その便益は大きい。この便益には、雇用、社会の安定、快適な生活、災害に対する安全性、医療施設の充実、文化的催し物への参加の容易さ、娯楽施設の豊富さ、輸送所要時間の節約、情報入手・伝達の容易さ、経済活動、景観、匿名性に関わるものなどがある。これらの便益は、それを直接生じさせた原因、それを作り出した2次原因というように因果関係が網目状に連なっている。また、次に述べるリスクの削減は便益の増加ともいえる。

4. 2 都市のリスク

都市では、人々は便益に加えてリスクも負担している。そのリスクの原因には、資産が集中し密度が高いことによるもの、人口が集中していることによるもの、社会的なもの、それらの影響を受ける個人に関わるもの、システム化されていることによるものなどがある。また、個々のリスクとして自然災害、都市災害、社会活動、物質廃棄、健康に関わるリスク、生態系に関わるリスクなど多数ある。都市リスクの例を表－３に示す。リスクの軽減には防災施設建設とその維持のようなハードウェアだけでなく、リスクを回避するための訓練、情報伝達、緊急物資備蓄、社会システム作りなどのソフトウェアに属する部分も含まれる。

4. 3 費用

都市では便益を得るために、住民は税としてかなりの額を負担している。使用料や直接的支払いとして個人が負担している部分も少なくない。むろん、次世代が便益として享受する部分については、債権の償還を次世代が行うように考えられている。なお都市周辺には構造上の「フリーライダー」もかなり存在する。

表－3 都市のリスク

	直接原因	二次原因	三次原因	4次原因	素 因
自然系	構造物倒壊	強度不足	軟弱地盤		地震
	構造物倒壊	強度不足			台風、津波
	河口部浸水	排水能力不足	高海水面（低気圧）		多雨
	浸水	排水能力不足	高流出率	地形	多雨、水位上昇
人工系	都市型水害	雨水管の能力不足	流出係数増加	地盤沈下	多雨
	交通事故	運転者不注意 回避動作不良	道路構造不備 車両故障 被害者不注意	整備不良	車の運転 過密
	水不足	消費増大、供給不足	貯水池不足		少雨
社会系	暴動・騒乱	警備力	精神異常		過密・人間の欲 ストレス 外出（不運）
	放火	可燃性構造物	精神異常		
	交通事故	相手の不注意	道路構造不備		過密
	騒音	大量交通	道路構造		過密
	多量廃棄物	ライフスタイル	生産思想		
	大気汚染	廃ガス処理不良	工場立地		過密
複合系	生態系変化	過剰開発	都市計画不良		過密
	システム機能 不作動	余裕度低下	効率性の追求		一部機能の停止
	システム構成 の変化	システムへの依存			

注）都市リスクの検討対象となるものはかなりあるが、ここではリスクに対し操作性、制御性、置換性のあるものに限っている。

5. 対応策選択法の基本的枠組み

5. 1 都市便益の算定

便益は人間にとって直接的、間接的に望ましい事象の単位時間当たりの発生確率に発生した際の一事象当たりの便益を乗じたものと定義する。つまり、ある一つの便益に対し、次のように表せる。

$$\text{便益（便益／単位時間）} = \text{頻度（事象／単位時間）} \times \text{便益の大きさ（便益／1事象）} \quad (1)$$

5. 2 都市リスクの算定

リスクは、集団としての人間にとって望ましくない事象の発生による被害の大きさの程度と定義される。具体的には、人間にとって直接的、間接的に望ましくない事象の単位時間当たりの発生確率に発生した際の一事象当たりの損失を乗じたものと定義する。つまり、ある一つのリスクに対し、次のように表せる。

$$\text{リスク（被害損失／単位時間）} = \text{頻度（事象／単位時間）} \times \text{被害の大きさ（被害損失／1事象）} \quad (2)$$

5. 3 便益とリスクの包括化

経済的評価が可能なリスク群の包括リスクを R_0 とする。経済的評価が不可能なリスク群、例えば人命の損失や疾病のリスクは、人命に相当するリスクと疾病などのリスクの和とし、疾病のリスクは人命のものに対する比で示されうるものとする。この場合の包括リスクを R_0 とする。また、包括便益を B_0 とすると、

便益とリスクを包括化した指標 B_n は、

$$B_n = B_c - R_c - \alpha R_n - C \quad (3)$$

ここに、 C はコスト、 α は人命として社会的に容認されている価値係数とする。この係数値は決定しづらいが、現実には、生命保険、事故死に対する補償金として与えられている¹⁾。

都市、農山村を問わず、その居住者は個人として、 T を個人の収入として

$$T + B_c - R_c - \alpha R_n - C \rightarrow \max \quad (4)$$

が最大になるように願い、できればそうなるように行動すると思われる。

5. 4都市経営から見た純便益の最大化

都市の経営を、政治的判断を抜きに行うとした場合、税などの収入を T 、都市基盤施設の建設、更新、維持管理、原価償却等費用の総和を C 、都市住民の便益の総和を B 、都市住民のリスクの総和を R とすると、行政体としては収支が赤字にならないようにし、その中で純便益が最大となるようにする、つまり

$$T - C = 0 \quad (5)$$

$$B - R \rightarrow \max \quad (6)$$

とするのが普通であるが、工学的には、コストを含めた純便益が最大になるようにし、必要コストの総額を税とする、つまり

$$B - R - C \rightarrow \max \quad (7)$$

$$T = C \quad (8)$$

が望ましいと考えられる。

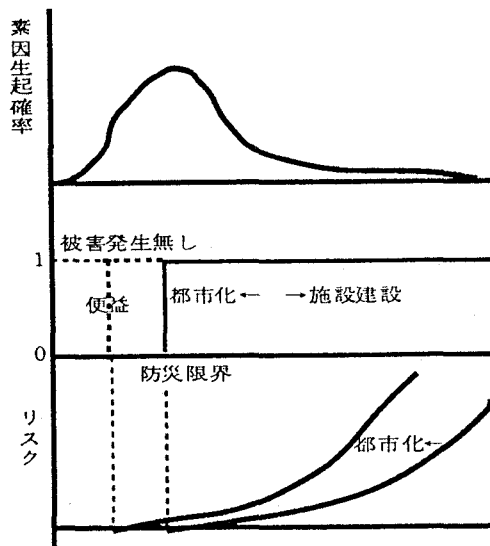
したがって、財源制約が生じる21世紀には式(7)、(8)にて意志決定されるようになるであろう。

6. 対策選択の決定法

都市における温暖化の影響を緩和しないしは回避していくための方策の導入に当たっては、先に述べたように都市の純便益を最大化するのが望ましい。このためには、便益とリスクを生み出す事象に対応するすべての便益、リスク、費用を勘定し総和を求めて判断すればよい。

しかしながら、この作業はあまりにも膨大である。そこで便益とリスクを生み出す事象すべてが独立しているわけではないことを利用し、関係する事象をグループ化し、その中で純便益とコストの関係を得ておく方が効率的である。また、このようなグループ化ができたとしてもすべての事象を検討対象とすることは不可能であるので重要度が高いものを選択し、それらについて検討していくことになる。

さらに、都市の便益とリスクは常に変動していることも留意しておく必要がある。たとえば、防災施設の建設、避難行動の訓練等がなされると、リスクは低減する。一方、都市リスクの低い都市は、魅力があるので人口の増加と都市域の開発が一層進み、流出率の増加や水道供給の広域化に見られるように、都市リスクは徐々に増加することになる。人の心理から見ると、人間は常にそのときの状況に対応しつつ生活を営み、危機管理を心掛けている。したがって、リスクが高い状態にあるときにはそれなりの準備をしているのでリスクは



図一 1 便益とリスクの動的変化

結果的に低くなる。逆に極めて安全度が高い（便益の多い）場合には、リスク管理をする必要がなくなり結果としてのリスクは極めて高くなるこのように、リスクの予測に際しては被害の生じない限界値が常に変動している点に注意しなければならない。この例を図－１に示す。

7. 温暖化による被害金額の考え方

IPCCの活動としての海面上昇についての予測²⁾にも見られるように、この種の報告における被害予測はいずれもそのポテンシャル（最大の可能性）値を示している。つまり、ある時点で瞬間的にある状態となるときに生じる被害の程度を推定したものである。しかしながら、現実の温暖化の影響による被害は、このポテンシャルとはかなり異なったものと推定される。温暖化の影響が出始めると、おそらく安全率を現行と同じ程度になるように、前述した純便益を最大にすることを念頭に置き対策を順次取っていくことが予想される。その結果、ある事象、たとえば海面上昇や降雨強度増加による浸水は外挿的推定ほどには大きくならないと思われる。どの程度の対応を取っていくかはそのときの社会の意志決定によるが純便益最大の原則からは大きく外れないように判断されていくと思われる。むろん、対策を取るか被害が生じるままにするかも選択による。

予め対策を徐々にとっていくとしたときには、対策を取るために必要な経済的な負担においてもポテンシャル値との差は生じる。既に求められている影響ポテンシャルが生じないようにする施設費を、現時点で単年で負担するときと、これから先々仮に今の社会と同じような状況で推移するものとし既に求められている影響が生じないようにある期間毎年同一比率で投資するときとは、利率を５％とすると、５年で単年の９０％、１０年で８１％、２０年で６５％、５０年で３８％となる。このような低減は利率の割り戻し効果による。さらに、これらの投資額は、災害が生じたときの被害額と復旧費の和よりはるかに少なくなるのが通例である。したがって、温暖化の影響は単なる物理的なものに加えて、人の対応を考慮したものも想定しておく必要がある。

8. 都市浸水防止の純便益の計算事例

都市における純便益の算定は容易ではない。ここでは地球温暖化により降雨強度が増加したときに必要となる流出抑制、あるいは内水排除に関する便益、リスク、費用をある例について解析したものを要約して述べ、どの程度の確度で純便益を算定できそうであるかを考えてみる。

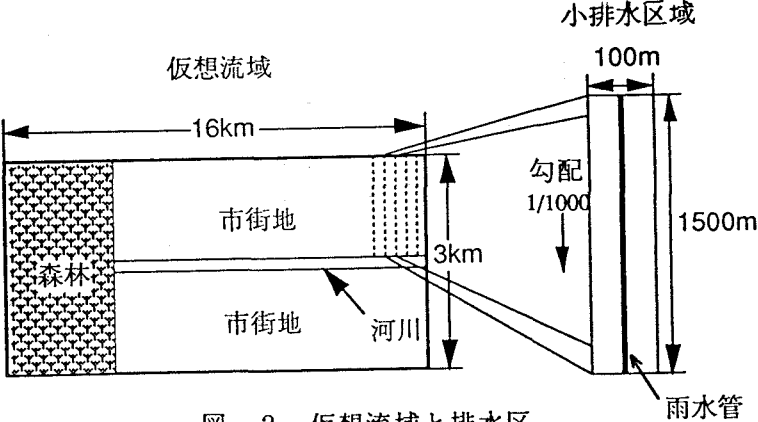
ある流域においてある降雨があるときに、浸水を防除するには、いくつかの方策が考えられる。原理別に分けると、

- A. 流出率の減少：植林、新規開発防止、土壌浸透
- B. 流出の遅延：調整池の設置、管内貯留
- C. 流下能力の増加：雨水管渠の整備、ポンプ排水能力の増強、河川堤防の強化
- D. 施設の防災化：高床、遮水壁、土盛り
- E. 避難施設：避難道路、誘導施設、避難建物、救助設備、救護施設、通信施設
- F. 避難訓練：情報伝達、訓練

がある。浸水によるリスクをどのような手法によりどの程度削減するのが最も効果的かを氾濫解析により推定することにする。いま、図－２に示す流域を想定する。このここ取りうる手法は、

- 1) 雨水管を建設して雨水を排除する、
- 2) 森林を育成し流出率を削減する、
- 3) 浸透施設（浸透ます、浸透トレンチ、透水性舗装、浸透井、浸透性側溝のいずれか）を設置し雨水浸透を図る、

4) そのまま浸水させる、
とする。そこで、浸水にともなう直接、
間接被害の算定を表－4のように、浸
水防止による便益を表－5のように定
め、表－6のように計算することにす
る。なお、雨水管渠の設計条件は表－
7、浸透施設の建設費は表－8に示す
とおりである。なお、降雨は東京都の
降雨強度式からハイエトグラフを作成
し、合理式を用いて単位時間5分の中



図－2 仮想流域と排水区

表－4 被害項目と算定方法

	被害項目	算定方法
直接被害	家屋・家財被害 事業所資産被害 農産物・農漁家 資産被害	治水経済調査方式
	公共施設・公益 事業等被害	実績による推定
	人命損失	統計的生命の価値 自動車事故の対人賠償額
	怪我・病気	医療費＋収入減＋慰謝料
	文化財被害	修復費＋文化財価値の減少
間接被害	事業所営業停止 損失	治水経済調査方式
	清掃費	実績による推定
	交通の遅滞	被害者数×損失時間×時間評 価額
	水質汚濁被害	消毒費、魚介類生産高低下等
	精神的損害	家屋・家財被害の50% ³⁾

表－7 雨水管の設計条件

	下水道
計画規模代替案	3年、5年、10年、 20年、30年
降雨強度算定式	東京都の降雨強度式
流出量算定式	合理式
到達時間の算定	流入時間5分
管渠の勾配	0.001
管渠の粗度係数	0.013
地表面の等価粗度	道路：0.02 その他：0.25
流域の諸元	流域面積 48 km ² 単位排水区の面積 15 ha

表－5 便益の項目と内容

項目	内容
リスクの減少	内水被害額の減少
環境の質の改善	内水被害額の減少による住環境 等の質の改善
経済的効果	対象地域の環境の質の改善や安 全性の向上等が人口や社会資本 に与える効果（雇用の創出等）
精神的効果	安全性向上による住民の安心感

表－6 便益の算定方法

項目	内容
環境の質の改善	整備地域と未整備地域との家屋 や土地の価値の差 ⁴⁾
経済的効果	整備地域と未整備地域（対象地 域）との一人当たりの所得格差 ×対象地域の就業人口
精神的効果	1) 安心感を得ることに対する 支払意志額をアンケート調査で 調べる 2) 同様の安心感を得るため に取る他の手段（引っ越し、保険 等）にかかる費用で推定

表－8 浸透施設の費用

	浸透ます	浸透トレンチ	透水性舗装	浸透井	浸透側溝	森林
施設単価	299,500 円/個	13,900 円/m	6,700 円/m ²	1,335,000 円/本	11,000 円/m	64,000 円/m ²
浸透量当たり単価 (円/(リットル/分))	6,900	1,100	11,300	2,700	6,900	150,000

央集中波形で継続時間3時間のハイドログラフを作成している。
また、この流域の資産額は東京都の赤羽程度としている。いま、
確率年3年に相当する排除能力はこの流域に既に備わっているものとし、それをより増強するための費用
を各手法について比較する。その結果は、図－3のようになる。ここで、森林の育成は極めて高価なもの
であり、都市における他の効用を考慮しない限り全く導入に値しない結果となった。

9. おわりに

都市における純便益を最大にしつつ地球温暖化に備えて行くには、政策決定のための支援システムを整備する必要がある。ここで示した簡単な例においてですら確度をより高めるにはかなりの時間が必要なので、全体を見通せるようなものにするための本格的な作業をできるだけ早く始める必要がある。

参考文献

- 1) 植田和弘、落合仁司、北畠佳房、寺西俊一 (1991) : 環境経済学、有斐閣ブックス
- 2) 環境庁地球環境部監修 (1994) : 地球環境の行方
- 3) 鈴木 章 (1990) : 浸水被害額の定量化方法に関する検討、下水道協会誌、Vol.27, No.312
- 4) Dixon, J.A. et al. (長谷川弘訳) (1991) : 環境はいくらか、環境の経済評価入門、築地書館。

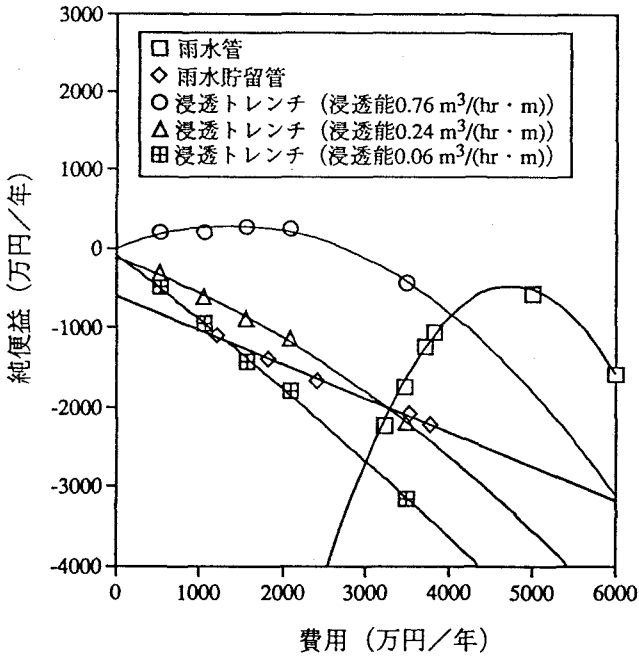


図-3 各施設の費用と純便益との関係