

Social Hazard 概念に基づく都市システムの気候変動に対する脆弱性評価

Social Hazard Index: A Model Evaluating of Vulnerability of Urban System with Climate Change

加知 範康*, 加藤 博和*, 林 良嗣*

Noriyasu KACHI*, Hirokazu KATO* and Yoshitsugu HAYASHI*

ABSTRACT ; This study aims to develop an evaluation method of the impacts of climate change on Social Hazard, which represents the general vulnerability of urban systems. Various kinds of vulnerabilities are not only caused by the impacts of climate change, but also by various urban problems in an urban system, for example, the increase of automobile traffic, urban sprawling, and location in the disaster hazardous area. Social Hazard of a housing lot, the social life cycle cost per one Quality Of Life (QOL) unit, is defined as a comprehensive indicator for vulnerability caused by these urban problems. This study proposes the representation of Quality of Life, by using the Quality Adjusted Life Year, originally developed in the medical field. This evaluation method of the vulnerability of an urban system by Social Hazard Index is applied for the examination of adaptation and retreat measures against climate change.

KEYWORDS ; Social Hazard, Quality Adjusted Life Year, Vulnerability, Climate Change, Urban System

1 はじめに

人間活動による温室効果物質の排出増大は、地球温暖化や降雨変化などの気候変動を引き起こし、さらに海面上昇などを通じて人間活動と生態系に様々な影響を及ぼすと予想される。対策として第一に取り組むべきは温室効果ガス排出自体の削減であるが、それが十分に行われ効果を発揮する保証はない。そこで、事後的な対策として、気候変動に地球システムを順応させていく適応策(Adaptation)や撤退策(Retreat)の準備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が対象となり、むろん、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。

都市システムにおいては気候変動の影響のみならず、公害問題、犯罪増加、災害危険性、景観悪化、公共サービス不便地域の出現といった、さまざまな都市問題に起因する脆弱性が従来から存在する。そこで、気候変動に対する撤退策・適応策を都市政策に反映していくためには、都市システムの一般的な脆弱性を表す指標を定義し把握した上で、これに気候変動を組み込んで評価することが必要である。言い換えると、気候変動に対する都市システムの脆弱性を、都市システムの他の脆弱性と比較してその大小を把握しておくことが求められる。

*名古屋大学大学院環境学研究科都市環境学専攻

Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, Aichi, Japan

そこで本研究では、都市システムが持つ一般的な脆弱性を表現する「Social Hazard」概念を提示し、気候変動に対する都市システムの脆弱性を Social Hazard に換算して表現する手法を構築することを目的とする。ここで、Social Hazard とは、居住によって得られる生活の質(Quality Of Life : QOL)と居住に伴う社会的費用(Social Cost)との比と定義する。さらに QOL 指標としては、貨幣評価ではなく余命指標 QALY(Quality Adjusted Life Year)を用いる。そして、構築した手法を用いた都市システムの脆弱性評価と、適応・撤退策の検討の方法について述べる。

2 都市システムの脆弱性指標としての Social Hazard

現在、都市システムの脆弱性を高める都市問題の多くは、人口流入による都市の高密化とモータリゼーション進展を原動力とするスプロールに起因するものであり、大気汚染等の居住環境の悪化、災害危険地域への立地、インフラ整備地域の拡大などが挙げられる。

Social Hazard(SH)は、これら都市問題に起因する脆弱性を総合的に評価するための指標として定義されるものであり、都市住民の居住地の生活環境質(Quality of Life : QOL)と居住地を維持するために必要な社会的ライフサイクルコスト(Life Cycle Cost : LCC)によって決定づけられると考える。ライフサイクルを考えるのは、居住地を支えるインフラ等の性能はライフサイクルの各段階で発生する費用が賄われることで維持され、その結果 QOL 向上に長期にわたって安定的に寄与していると言えるためである。

SH は式(2.1)に示すように QOL 1 単位あたりに投入される LCC と定義する。QOL が大きいほど小さくなり、LCC が大きいほど大きくなる。

$$SH = \frac{LCC}{QOL} \quad (2.1)$$

3 余命指標を用いた生活環境質評価

3.1 地区への居住から得られる QOL の評価手法

生活環境質を定量評価する調査研究は従来から多数存在している。これらは大きく、貨幣価値による評価とそれ以外の評価に分けられる。非貨幣評価による QOL 指標の例として、杉山ら¹⁾は 5 つの評価軸を用いた QOL 指標を提案している。また、吉田ら²⁾は W.H.O.による生活の質の 4 大規定要因(安全・健康・快適・

表-1 本研究における LPs 階層構造と属性

		評価要素		指標の例	
		評価要素		指標の例	
LPs	AC	就業利便性		通勤距離	
		教育・文化利便性		通学距離	
		健康・医療利便性		病院までの距離	
		買物・サービス利便性		スーパーマーケットまでの距離	
	AM	居住空間使用性		誘導居住水準住宅／最低居住水準住宅	
		建物景観調和性		よい／悪い	
		周辺自然環境性		自然が多い／少ない	
		局地環境負荷性		騒音レベル	
	H	地震危険性		被害なし／50%の建物が全半壊	
		洪水危険性		被害なし／床上浸水	
		犯罪危険性		1年当たりの犯罪発生件数	
		交通事故危険性		1年当たりの交通事故発生件数	

利便性)を意識して、利便性・快適性・安全性からなる「生活の質」指標を提案し、それら 3 つを潜在変数とする共分散構造分析によって定量化している。これら 3 要素にも当てはまるものである。これらを参考に本研究では、居住地の生活環境質を、1)居住地から主要施設への移動抵抗により決まるアクセシビリティ(AC)、2)景観・居住快適性・周辺自然環境・局地環境負荷からなるアメニティ(AM)、3)地震・洪水・犯罪・交通事故危険性からなるハザード(H)、という土地自身のもつ 3 要素と、これら 3 要素を需要する居住者が持っている価値観との組み合わせで決定されるものとする。

各地区の生活環境質を評価するためには、その構成要素である AC, AM, H に影響を与える環境の物理量、すなわち、社会資本や公共・民間施設の充実度、眺望や景観の良好度、災害からの安全性といった“生活環

境質向上のための機会” (本研究ではこれらを“生きがいを得られる機会(Life Prospects : LPs)”と呼ぶ)が, どの程度供給され, どの程度 QOL 向上に貢献するかを定量的に把握する必要がある. 本研究が想定する LPs を説明する要素の階層構造を表-1 に示す. そして, この LPs に「居住者の価値観を表す重み」を乗じたものを“居住地から得られる生きがい”すなわち生活環境質(QOL)と定義し, 式(3.1)のように定式化する.

$$QOL(p, l) = \langle LPs(l), W(p) \rangle = \langle [AC(l), AM(l), H(l)], [w_{AC}(p), w_{AM}(p), w_H(p)] \rangle \quad (3.1)$$

ここで, $QOL(p, l)$: 個人 p の地区 l における生活環境質,
 $LPs(l)$: 地区 l における“生きがいを得られる機会”, $W(p)$: 個人 p の価値観,
 AC : アクセシビリティ, AM : アメニティ, H : ハザード.

3.2 個人の価値観の定量化

個人の価値観を表す重み W は, コンジョイント分析によって定量化することが可能である. アンケート調査により, 居住希望の強さを基準としたプロファイルの順位関係を得ることができれば, 式(3.2), (3.3)に示すランクロジットモデルのパラメータを最尤法を用いて推定することにより, 属性間の重み, すなわち W が推計される.

$$P_p(1, 2, \dots, J | W) = \prod_{j=1}^{J-1} \frac{\exp(W_p \mathbf{x}_j)}{\sum_{i=j}^J \exp(W_p \mathbf{x}_i)} \quad (3.2)$$

$$U_{ip} = W_p \mathbf{x}_i + \varepsilon_{ip} \quad (3.3)$$

ここで, $P_p(1, 2, \dots, J | W)$: 選好全順序データが得られる確率, W_p : 個人 p の属性に対する重みベクトル,
 $\mathbf{x}_i$: 選択肢 i の属性ベクトル, U_{ip} : 個人 p の選択肢 i に対する好ましさ ($i=1, 2, \dots, J$),
 J : プロファイル数, ε_{ip} : 誤差項.

3.3 余命算出モデルによる QOL の評価

W によって複数要素が統合された QOL 評価尺度として, 本研究では「Quality Adjusted Life Year (QALY)」^{3) 4)}を用いる. QALY とは, 健康状態に基づく生活の質により調整される生存年数のことで, 医療分野で資源の最適配分のために開発された. この QALY を本研究では「QOL によって調整された余命」と再定義し, 式(3.4)に示すように定式化する.

$$QALY(p) = \int_a^{a+LE(p)} W_{QOL}(p; t) C t \exp(-\beta t) \exp\{-r(t-a)\} dt \quad (3.4)$$

ここで, $QALY(p)$: 個人 p の QALY, a : 調査開始年, $LE(p)$: 個人 p の調査開始年 a における期待余命,
 $W_{QOL}(p; t)$: t 年での個人 p の生きがいによる重み, $C t \exp(-\beta t)$: 年齢間の重み,
 $\exp\{-r(t-a)\}$: 時間割引率.

式(3.4)は QALY を, 生きがいを表す重みを期待余命に関して積分した値として定義するものである. しかし, 式(3.2), (3.3)で推計される重み W を QALY の値に直接変換することが困難である. そこで, 式(3.2), (3.3)の W と, 式(3.5)により求められる「地震による損失余命(Lost of Life Expectancy : LLE)」を用いて, 各要素 1 単位における損失余命換算値を算出する. さらに式(3.6)を用いて, 個人の獲得余命(Gain of Life Expectancy : GLE)を算出する.

$$LLE_1 = \sum_{e=1}^E \{ND_e \times P_e(T, 1)\} \quad (3.5)$$

ここで, LLE_1 : 地震による損失余命, ND_e : 地震 e による死亡者数,
 $P_e(T, 1)$: 地震 e の最後の発生から T 年経過した時点でその後の 1 年間に地震 e が発生する確率.

$$GLE(p, l) = -\frac{w_{AC}(p)}{w_H(p)} \sum_{k=1}^4 w_{AC_k}(p) AC_k(l) - \frac{w_{AM}(p)}{w_H(p)} \sum_{k=1}^4 w_{AM_k}(p) AM_k(l) \\ - LLE_1 + \left\{ \sum_{k=2}^4 \left(-\frac{w_{H_k}(p)}{w_{H_1}(p)} H_k(l) \right) \right\} \quad (3.6)$$

ここで, $GLE(p, l)$: 個人 p の地区 l における獲得余命, LLE_1 : 地震による損失余命,
 $w_i(p)$: 個人 p の評価要素 $i(i=AC, AM, H)$ に対する重み,
 $w_{ik}(p)$: 個人 p の評価要素 i の k 番目の要素に対する重み($k=1 \sim 4$).

次に, 式(3.7)に示すように, 期待余命に GLE (“生きがい増加[減少]により得られる[失う]余命”)を加える[減じる]ことにより $QALY$ を算出する.

$$QALY(p, l) = LE(p) + GLE(p, l) \quad (3.7)$$

ここで, $QALY(p, l)$: 個人 p の地区 l における $QALY$, $LE(p)$: 個人 p の期待余命.

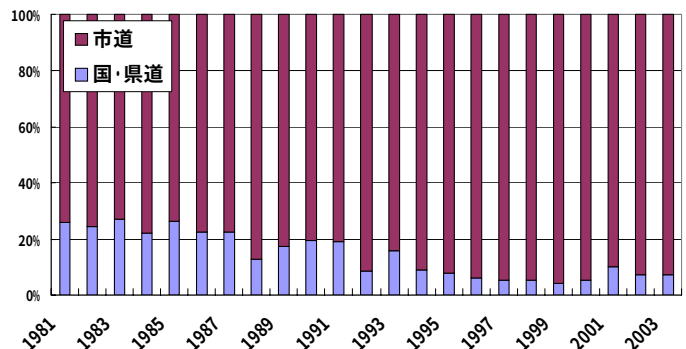
さらに, 式(3.7)に示される $QALY$ を個人について加え合わせたものが, 対象とする地区から得られる“生きがい”であり, 式(3.8)のように定式化される.

$$QALY(l) = \sum_{p=1}^{P(l)} QALY(p, l) = \sum_{p=1}^{P(l)} \{LE(p) + GLE(p, l)\} = \sum_{p=1}^{P(l)} LE(p) + \sum_{p=1}^{P(l)} GLE(p, l) \quad (3.8)$$

式(3.8)の第 1 項は対象とする地区における全居住者の期待余命の合計値であり, 地域別の簡易生命表をもとに算出することができる. また, 第 2 項は対象地区における全居住者の損失余命の合計値である. 式(3.8)は, LPs の各要素の属性値と属性間の重み(個人の価値観: w)から $QALY$ (QOL 評価値)決定される形となっている.

4 居住地維持のための社会的なライフサイクルコスト

居住地を維持するために必要なライフサイクルコスト LCC を, a)内部コスト: 対象地区の居住者のためにのみ投入されているコストと, b)外部コスト: 対象地区外で, 対象地区内の居住者のために投入されているコスト, とに分けて考える必要がある. a)の例として, 区画街区や支線上下水道, b)の例として幹線道路・下水道が挙げられる. a)は地区内の居住者数と比例関係にあると考えられるが, b)



図—1 長野県 A 市(人口約 10 万人)における市道と国・県道への維持管理費支出の割合

は必ずしもそうならない。

本研究では、このうち a)に該当するもののみを考慮し、b)に該当するものは考慮しない。その理由として、検討すべき気候変動に対する対策、特に撤退策を実施する際に、幹線インフラ施設の利用も完全に中止されるということは通常考えられないことが挙げられる。また、**図-1**に示すように、ある市の主要道路に対する支出は対道路橋梁費で 10%、対ライフサイクルコストでは 0.9%であり、主要下水道維持管理費とあわせても総ライフサイクルコストに対して少ない割合となり、b)に該当するライフサイクルコストを考慮しないことの問題は小さいと考えられる。

これらを踏まえたうえで、対象都市各地区におけるライフサイクルコストを 4 次メッシュ単位で整備する。

5 都市システムの気候変動に対する脆弱性評価と撤退・適応策の検討方法

5.1 気候変動に対する脆弱性の Social Hazard 評価

本研究で構築してきた居住地の SH 評価手法において、都市システムの気候変動に対する脆弱性は**図-2**に示すように都市住民にとっての LPs の減少という形で評価され、さらに都市システムの持つ脆弱性を示す一般的尺度である SH に換算して表現される。この手法によって、実際の都市システムを対象に気候変動の

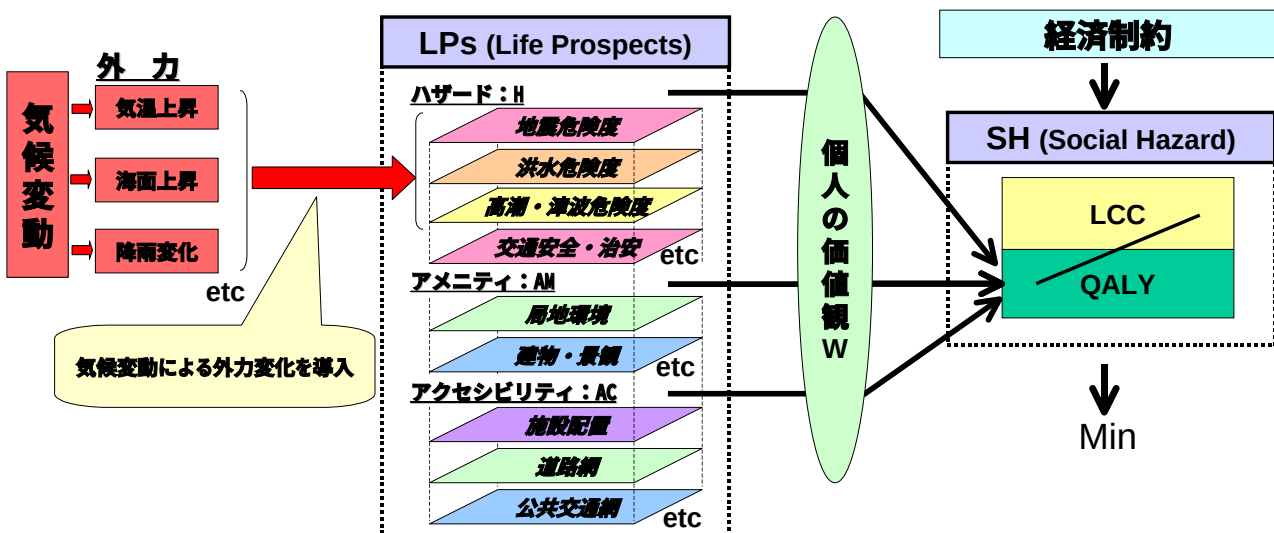


図-2 気候変動による外力変化の「Social Hazard」への導入概念図

態様による SH の感度分析を行うことができる。気候変動の影響は主にハザード H に対して現れると考えられる。例えば、外力として降雨を考えた場合、その変化は洪水発生頻度の増加や規模増大を引き起こす。その結果、LPs が下がり最終的に SH を増加させることになる。

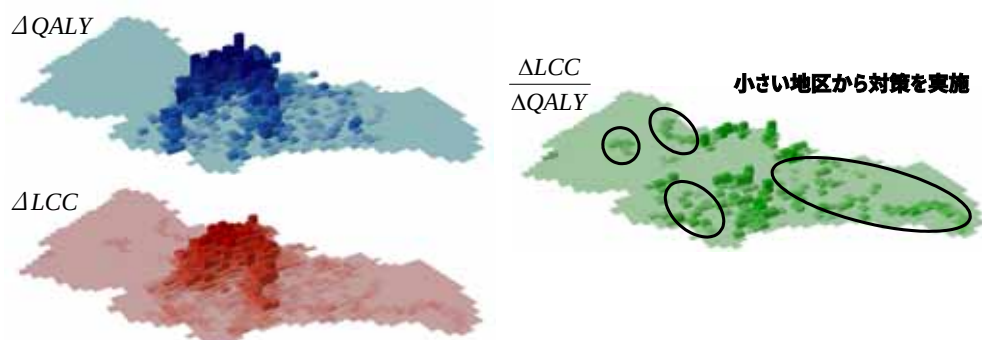
5.2 適応・撤退策の検討方法

適応・撤退策の検討には、1)適応・撤退策のいずれを実施するのかという選択、2)どの地区から対策を実施していくのかという優先順位、という視点が考えられる。

1)適応・撤退策の選択については、式(3.9)に示す QALY を 1 単位改善するのに必要な対策実施費用を比較し、対策実施費用(=LCC 増加)が小さい対策オプションを選択する。

$$\frac{\Delta LCC}{\Delta QALY} = \frac{LCC_w - LCC_{w/o}}{QALY_w - QALY_{w/o}} \quad (3.9)$$

ここで、 ΔLCC ：対策実施に必要な追加的費用、 $\Delta QALY$ ：対策実施による QALY の改善度合、 LCC_w ：対策を実施したときの LCC、 $LCC_{w/o}$ ：対策を実施しなかったときの LCC、



図－3 $\Delta QALY \cdot \Delta LCC \cdot \Delta QALY / \Delta LCC$ の計算結果のイメージ

表－2 適応策・撤退策検討表の概念

地区	適応策1		適応策L	撤退策1		撤退策M	選択された対策		
	$\frac{\Delta LCC}{\Delta QALY}$		$\frac{\Delta LCC}{\Delta QALY}$	$\frac{\Delta LCC}{\Delta QALY}$		$\frac{\Delta LCC}{\Delta QALY}$	$\frac{\Delta LCC}{\Delta QALY}$	$\Delta QALY$	ΔLCC
1	対策オプションの選択						実施地区 の 優先順位		
2								$\Sigma \Delta QALY \geq 0$	
								経済制約	
N								$\Sigma \Delta QALY$	$\Sigma \Delta LCC$

$QALY_w$ ：対策を実施したときの QALY, $QALY_{w/o}$ ：対策を実施しなかったときの QALY.

また、 $\Delta QALY$ は、式(3.6)、(3.8)より属性間の重み(個人の価値観： w)が変化しないものとする式(3.10)のように定式化され、気候変動による外力変化に伴う PLs 要素、特にハザードの変化(ΔLLE_1 , ΔH_k)として表現される。

$$\Delta QALY(p, l) = -\frac{w_{AC}}{w_H} \sum_{k=1}^4 w_{AC_k} \Delta AC_k - \frac{w_{AM}}{w_H} \sum_{k=1}^4 w_{AM_k} \Delta AM_k - \Delta LLE_1 - \sum_{k=2}^4 \left(\frac{w_{H_k}}{w_{H_1}} \Delta H_k \right) \quad (3.10)$$

2)実施地区の優先順位を決定する方法として、1)において選択された対策オプションを地区間で比較し、QALY を 1 単位改善するのに必要な対策実施費用の小さい地区から対策を実施していくことが考えられる。計算結果のイメージを図－3 に示す。ただし、対策検討においては、a)対象都市域全体における生活環境質を低下させないこと、b)経済制約を満足していること、が前提条件として必要となる。そこで、表－2 に示すような表を作成しこれらの条件を満たしているかのチェックを行う。

6 おわりに

都市システムの気候変動に対する脆弱性の評価方法として、余命換算型の生活環境質指標 QALY を用いた Social Hazard 概念を導入した。これにより、気候変動に対する適応策・撤退策の検討を、従来から行われている経済的側面からだけでなく、生活の質 QOL の面から行うことが可能となる。また、提案した Social Hazard 指標が QALY を用いていることから、気候変動の影響研究の中で行われている気温上昇に伴う熱中症の増加といった人間健康に関わる研究成果との統合が容易であるとともに、災害増加による被害の評価にも適合しやすいと考えられる。

参考文献

- 1) 林良嗣・土井健司・杉山郁夫：生活質の定量化に基づく社会資本整備の評価に関する研究，土木学会論文集，No. 751/IV-62，pp.55-70，2004.
- 2) 吉田朗・鈴木淳也・長谷川隆三：近隣環境における「生活の質」の計測に関する研究，都市計画学会論文集 33，pp.37-42，1998.
- 3) Petrou S・Renton A：The QALY: a guide for the public health physician，Public Health 107(5)，pp.327-336，1993.
- 4) 池上直己・池田俊也・土屋有紀 監訳：医療の経済評価，医学書院，2000.