

海面上昇が及ぼす高潮頻度の増大による 世帯被害費用の定義と計測

DEFINITION AND MEASUREMENT OF HOUSEHOLD'S DAMAGE COST SUFFERED FROM
INCREASE IN STORM SURGE TIDE FREQUENCY DUE TO SEA LEVEL RISE

森杉壽芳* 大野栄治** 星 健一*** 高木朗義**** 高橋靖英*****
Hisayoshi MORISUGI, Eiji OHNO, Kenichi HOSHI, Akiyoshi TAKAGI, Yasuhide TAKAHASHI

ABSTRACT; Most of previous studies on the problem of sea level rise focused on prediction of sea level rise and measurement of physical damage cost, but did not consider uncertainty and psychological damage on the risk of storm surge disaster. Moreover, relationship between household's damage cost by sea level rise and benefit by countermeasures against sea level rise was not clear in those studies. The purpose of this study is to define and measure household's damage cost and benefit under uncertainty by applying concept of equivalent variation to expected utility level of household's, to clarify that relationship.

KEYWORDS; SEA LEVEL RISE, HOUSEHOLD'S DAMAGE COST, STORM SURGE DISASTER

1. はじめに

近年、切迫した国際問題として認識されつつある環境問題の中で、深刻なものとして地球温暖化が挙げられる。地球温暖化は、我々がより快適な生活を求めて森林を伐採し、石油・石炭等の化石燃料を大量に消費してきた結果、大気中の CO_2 ・ CH_4 ・ CFC 等の温室効果ガスが増大したことが主な原因とされている。そして、これらの温室効果ガスの増大により地球の平均温度が上昇すると、海水の熱膨張、氷河の溶解等が起き、地球全体の平均海面が上昇するとされている。気候変動に関する政府間パネル(IPCC)¹⁾では、将来 CO_2 の大気中濃度が産業革命以前のレベルの2倍になるとすると、2025年までに平均で 2.5°C の温度上昇が起り、その温度上昇によって2100年までに65cm(30~110cm)の海面上昇が生じると予測されている。

この海面上昇は、大きな経済集積を特徴とする日本の沿岸域に大きな影響を与えると予想される^{2) 3) 4)}。松井・立石⁵⁾によれば、全国の沿岸域に関して、現状満潮時で水面下面積 850km^2 、人口200万人、資産54兆円であるのが、1mの海面上昇によって水面下面積2.5倍以上の 2400km^2 、人口410万人、資産109兆円に増大し、高潮または津波発生時には水面下面積 8900km^2 、人口1542万人、資産378兆円になることが予測されている。

IPCC⁶⁾では、海面上昇に対する対応策を、災害を回避するために新たな位置へ移動する対策(撤退策)、災害が生じてもその被害を顕在化させない対策(順応策)、災害を生じさせない対策(防護策)の3種類で捉えている。わが国では、これらの対策のうち防護策が最も有効であるとされており、海岸における堤防

*岐阜大学教授 工学部土木工学科 Department of Civil Engineering, Gifu Univ., **筑波大学講師 社会学系 Institute of Socio-Economic Planning, Tsukuba Univ., *** (財)計量計画研究所 The Institute of Behavioral Sciences, ****岐阜大学大学院博士後期課程・中日本建設コンサルタント(株) Nakanihon Engineering Consultants Co., Ltd., *****岐阜大学大学院博士前期課程

・護岸の嵩上げ等に必要な対策費の総額は、運輸省所管の堤防・護岸については約2兆円⁷⁾、建設省所管の堤防・護岸については約6兆円⁸⁾と試算されている。

このように、従来の研究では、海面上昇そのものの予測、あるいは海面上昇による物的被害・対策費用の計測に焦点が当てられており、不安感等の心理的被害、また海面上昇や高潮頻度の増大による危険性の増大に関する不確実性が考慮されていない。そこで本研究では、これらを考慮した世帯の被害費用の定義と計測を行うことを目的とする。また、世帯便益についても同様にして定義と計測を行い、さらに両者の関係の明確化も行う。

2. 世帯被害費用および世帯便益の定義

2.1 海面上昇を考慮した水位の生起確率密度関数

現在、多くの研究者が地球温暖化による海面上昇の予測を行っているが、気候や海洋等の自然のメカニズムが完全に解明されていないことにより、将来の環境変化（海面上昇量）を確定的に予測することは困難であると思われる。したがって、将来の海面上昇量は確率変量として捉えるのが妥当である。

そこで、ある水位の生起確率密度 f が、図1のような水位 H と海面上昇量 L の2つの変数で説明される関数 $f[H, L]$ で表されると仮定する。現状の生起確率密度関数 f_0 は、現状において海面上昇が起きていない ($L=0$) と考えることにより、水位 H だけで説明される関数 $f_0=f[H, 0]$ となる。ここで、海面上昇量を0に固定した場合の水位の生起確率密度は、近年の年最高潮位の分布で与える。また、海面上昇が起こることによって、水位の生起確率密度は現状より海面上昇量分だけシフトすると仮定する。簡略化のために、将来においてある高さまで海面上昇が起こる確率が一定であると仮定すると、将来の生起確率密度関数 f_1 は、図2に示すような関数 $f_1=f[H, L]$ となる。

$$\text{ただし、} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f[H, L] dL dH = 1 \quad (1.1)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} f[H, 0] dH = 1 \quad (1.2)$$

H : 水位, L : 海面上昇量

2.2 世帯の効用レベル

世帯の達成可能な効用レベル U が、所得 Ω 、水位 H と堤防の高さ C によって決まる被害額 $P[H, C]$ の関数 $U[\Omega, P[H, C]]$ で表されると仮定する。このとき、効用レベル U は関数 $[H, \Omega, C]$ と表され、水位 H に応じて図3のように変化すると考えられる。すなわち、水位が増加するにつれて、効用レベルは徐々に減少し、ある水位（

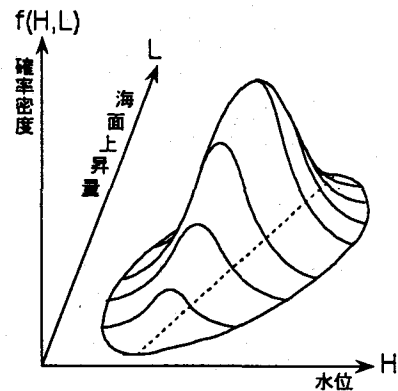


図1 水位の生起確率密度

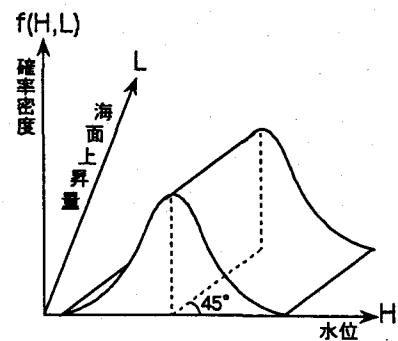


図2 本研究で仮定する水位の生起確率密度

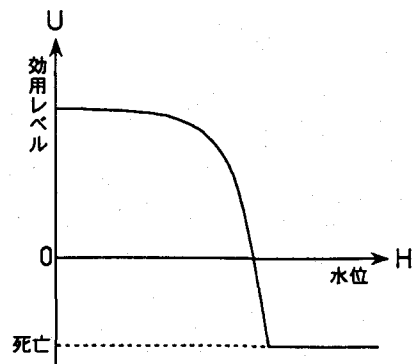


図3 水位と効用レベルの関係

高潮災害等の発生時)を境に急落する。さらに水位が増加すると死亡という状態に至り、そこで効用レベルはある値で一定になると考えられる。

2.3 世帯の期待効用レベル

世帯の期待効用レベル EU (効用レベルの期待値) は、図1の水位の生起確率密度 $f[H, L]$ と図3の効用レベル $U[H, \Omega, C]$ の積の積分値で表現できる。したがって、期待効用レベル EU は、所得 Ω および堤防の高さ C の関数 $EU[\Omega, C]$ となり、次式のように表される。

$$EU[\Omega, C] = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f[H, L] \cdot U[H, \Omega, C] dL dH \quad (2)$$

ここで、各状態(現状、海面上昇対策なし、海面上昇対策あり)における期待効用レベルを考えると、以下のように表すことができる。

$$(a) \text{現状の期待効用: } EU_0[\Omega, C^a] = \int_{-\infty}^{\infty} f[H, 0] \cdot U[H, \Omega, C^a] dH \quad (3.1)$$

$$(b) \text{将来, 対策なしの場合の期待効用: } EU_1[\Omega, C^a] = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f[H, L] \cdot U[H, \Omega, C^a] dL dH \quad (3.2)$$

$$(c) \text{将来, 対策ありの場合の期待効用: } EU_1[\Omega, C^b] = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f[H, L] \cdot U[H, \Omega, C^b] dL dH \quad (3.3)$$

ただし、 Ω は Ω^a であり、 a, b : 対策なし, 対策ありの場合

また、 Ω は Ω^a であり、 a, b : 現状, 将来

ここで、(b)の期待効用 $EU_1[\Omega, C^a]$ は、高水位の生起確率が大きくなることから(a)の期待効用 $EU_0[\Omega, C^a]$ よりも小さくなる ($EU_1^a < EU_0^a$)。しかし、(c)の期待効用 $EU_1[\Omega, C^b]$ は、海面上昇対策の効果が大きいならば(a)の期待効用 $EU_0[\Omega, C^a]$ よりも大きくなり ($EU_1^b > EU_0^a$)、効果が小さいならば(a)よりも小さくなる ($EU_1^b < EU_0^a$)。また、堤防の高さの差 $C^b - C^a$ は、堤防・護岸の嵩上げ等の海面上昇対策による嵩上げ高を意味し、この直接的な効果は高水位の生起確率を下げることにある。このように、堤防・護岸の嵩上げ等の海面上昇対策による効果は、高潮災害に対する安全性の確保であるといえる。

2.4 海面上昇による世帯被害費用

不確実性下での海面上昇による世帯被害費用を求めるために、等価的偏差 (Equivalent Variation; EV) の概念を拡張する^{9) 10) 11) 12)}。

海面上昇ありの場合(将来)の期待効用レベル $EU_1[\Omega, C]$ を維持するという条件のもとに、海面上昇なしの場合(現状)において世帯が妥当と考える最小受取補償額(この場合は負値)を海面上昇による世帯被害費用とする。この補償額の受取方式として、水位(高潮災害等の発生)に関係なく常に一定の補償額を受け取るという一定価格方式 (Option Price; OP) を採用し⁹⁾、世帯被害費用を以下のように海面上昇対策なしの場合とありの場合に分けて定義する。

(1) 海面上昇対策なしの場合の世帯被害費用

次式を満足する X の値がそれである。海面上昇によって期待効用が現状よりも小さくなるので、 X は負値で与えられる。

$$EU_1[\Omega, C^a] = EU_0[\Omega + X, C^a] \quad (4)$$

(2) 海面上昇対策ありの場合の世帯被害費用

次式を満足する Y の値がそれである。海面上昇時の対策ありの期待効用は対策なしの場合よりも大きいので、 $Y > X$ となる。なお、海面上昇対策の効果が大きいならば Y は正值、小さいならば負値で与えられる。

$$EU_1[\Omega, C^b] = EU_0[\Omega + Y, C^a] \quad (5)$$

2.5 海面上昇対策による世帯便益

世帯被害費用の場合と同様に、等価的偏差 EV の概念を拡張する。すなわち、海面上昇対策ありの場合の期待効用レベル $EU_1[\Omega, C^b]$ を維持するという条件のもとに、海面上昇対策なしの場合において世帯が妥当と考える最小受取補償額を海面上昇対策の便益とする。このとき、次式を満足する Z の値を世帯便益と定義する。対策によって期待効用は大きくなるので、 Z は正值で与えられる。

$$EU_1[\Omega, C^b] = EU_1[\Omega + Z, C^a] \quad (6)$$

2.6 世帯被害費用と世帯便益の関係

世帯の効用関数 $U[H, \Omega, C]$ が、次式のように所得に関して線形な Gorman 型である場合を考える。

$$U[H, \Omega, C] = U'[H, C] + g[H, C] \cdot \Omega \quad (7)$$

このとき、期待効用レベルは以下のようになり、期待効用関数も所得に関して線形となることがわかる。

$$\begin{aligned} EU[\Omega, C] &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f[H, L] \cdot U[H, \Omega, C] dL dH \\ &= G[C] \cdot \Omega + \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f \cdot U' dL dH \end{aligned} \quad (8)$$

$$\text{ただし、} G[C] = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f[H, L] \cdot g[H, C] dL dH$$

また、式(8)を式(4),(5),(6)に適用すると、海面上昇対策なし・ありの場合の世帯被害費用 $X \cdot Y$ および世帯便益 Z は次式のように表される。

$$X = \frac{EU_1[\Omega, C^a] - EU_0[\Omega, C^a]}{G_0[C^a]} \quad (9)$$

$$Y = \frac{EU_1[\Omega, C^b] - EU_0[\Omega, C^a]}{G_0[C^a]} \quad (10)$$

$$Z = \frac{EU_1[\Omega, C^b] - EU_0[\Omega, C^a]}{G_1[C^a]} \quad (11)$$

ここで、(9),(10),(11)式より、対策なしの場合の世帯被害費用 X 、対策ありの場合の世帯被害費用 Y 、世帯便益 Z の間には次の関係があることがわかる。

$$Y - X = \frac{G_1[C^a]}{G_0[C^a]} Z \quad (12)$$

(12)式は、対策ありの場合の世帯被害費用 Y から対策なしの場合の世帯被害費用 X を差し引いたものが、そのまま世帯便益 Z を示すのではないことを示している。これは、with and without 分析に基づく便益計測理論の適用に際し、被害費用 X, Y の計測基準が現状（海面上昇なし・対策なし）にあり、便益 Z の計測基準が将来（海面上昇あり・対策なし）にあるという違いに起因している。

3. 事例研究

世帯被害費用および便益の計測を行うために、以下の3つの仮定をおく。

- ① 将来の水位の生起確率密度関数は、図3のような分布をしていると仮定する。また、その上限として0.3m, 0.5m, 1mの3つのケースを考える。
- ② 状態が、平常時（サフスクリプト）と高潮災害時（サフスクリプトd）の2つしかないものとし、その境界を $H_d = 4.5m$ とする。
- ③ 海面上昇対策としての高潮堤防の嵩上げは、現在の堤防高に上限の海面上昇量分だけ行われるものとする。また、その嵩上げ高を C とする。

3.1 生起確率密度関数の特定化

水位の生起確率密度関数の分布については、近年の年最高満潮位の分布で与えるため、式(13)に示すようなガンベル分布に従うと仮定する。

$$f[H, L] = \omega \cdot J \cdot \exp[-J] \quad (13)$$

$$\text{ただし、} J = \exp\{-\omega(H + L - \eta)\}$$

$$\text{分散：} \sigma^2 = \pi^2 / 6 \omega^2$$

$$\text{平均：} \mu = \eta + \gamma / \omega, \quad (\gamma = 0.577)$$

$$\eta : \text{モード (最頻値)}$$

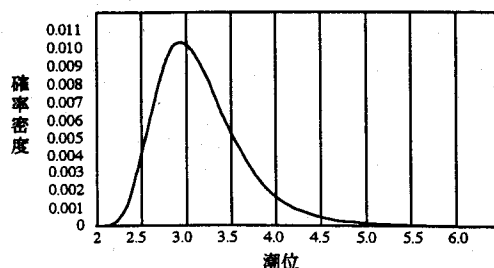


図4 水位の生起確率密度関数の推定

ここで、 $L=0$ とし、名古屋港における昭和24年から平成5年までの45年間の年最高潮位データを用いて平均と分散を求めると、平均 $\mu=3.0766$ 、分散 $\sigma^2=0.2136$ となる。さらに、この平均と分散から η 、 ω を求めて式(13)に代入すると、生起確率密度関数として図4のような分布形が得られる。

3.2 世帯の効用関数の特定化

世帯の効用関数には、式(14)のような線形関数を仮定し、地盤沈下の被害費用の測定に関する研究¹²⁾で推定されたパラメータを用いる。なお、この適用は、海面上昇と地盤沈下が相対的な現象であることから妥当であると考えられる。

$$U_j = \alpha_1 \Omega + \alpha_2 X_1 + \alpha_3 X_2 + \alpha_4 (I - t) + \alpha_5 X_3 + \alpha_6 X_4 + \alpha_7 FL + \alpha_8 A \quad (14)$$

ただし、 X_1 :敷地面積、 X_2 :延床面積、 X_3 :公共サービスの便(便利:1,不便:0)、 X_4 :下水・都市ガスサービスの整備(整備:1,未整備:0)、 Ω :所得、 t :通勤時間、 FL :高潮による浸水の指標(有:1,無:0)、 j :平常時 o 、高潮時 d 、 $I=150$ 、 $A=200$ 、 $\alpha_1=0.054$ 、 $\alpha_2=0.029$ 、 $\alpha_3=0.048$ 、 $\alpha_4=0.077$ 、 $\alpha_5=2.417$ 、 $\alpha_6=1.434$ 、 $\alpha_7=-30.058$ 、 $\alpha_8=0.055$ (年利率5%)

3.3 世帯被害費用および世帯便益の計測

(a) 世帯被害費用

式(13)、(14)を式(2)に代入して期待効用を求め、それを対策ありの場合と対策なしの場合の世帯被害費用の定義式(4)(5)および世帯便益の定義式(6)に代入すると、世帯被害費用 X 、 Y および世帯便益 Z は次式のように表される。

$$X = \frac{\alpha_7}{\alpha_1} (F - E) \quad (15) \quad Y = \frac{\alpha_7}{\alpha_1} (G - E) \quad (16) \quad Z = \frac{\alpha_7}{\alpha_1} (G - F) \quad (17)$$

$$\text{ただし、} E = \int_{H_d}^{\infty} f[H, 0] dH \quad (18.1) \quad F = \int_{H_d}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f[H, L] dL dH \quad (18.2)$$

$$G = \int_{H_d+C}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f[H, L] dL dH \quad (18.3)$$

ここで、 E 、 F 、 G はそれぞれ現状の高潮確率、将来・対策なしの場合の高潮確率、将来・対策ありの場合の高潮確率を示しており、その値を表1に示す。

世帯当たりの被害費用と便益を求めると表2および表3のようになる。次に、海面上昇によって全国で影響を受ける可能性のある世帯数を掛け合わせることで全国での被害費用と便益を求めることができるが、海面0.5m上昇の場合(453万世帯に影響)には表4のようになる。このときの対策費用を現在価値換算(年利率5%、年あたり)すると約10兆円となり、3.5mの嵩上げ対策を考えた場合の対策費用とほぼ等しくなり、便益が費用よりも大きいことがわかる。

表1 高潮の発生確率

上昇量	E	F	G
現状	0.012302		
0.3m		0.019192	0.008395
0.5m		0.026584	0.006708
1 m		0.064378	0.004215

表3 世帯便益 (万円/年)

上昇量	0.3m	0.5m	1 m
世帯便益	6.009763	11.06329	33.48829

表2 世帯被害費用 (万円/年)

上昇量	対策なしの場合	対策ありの場合
0.3m	3.835178	-2.1745849
0.5m	7.949728	-3.1135634
1 m	28.98721	-4.5010741

表4 被害費用 (億円/年)

上昇量	被害費用		便益
	対策なし	対策あり	
0.5m	3601.227	-1401.044	5011.671

4. おわりに

本研究では、水位の生起確率密度関数に海面上昇量を変数として組み込むことにより、海面上昇や高潮の生起に関する不確実性を考慮した生起確率密度関数とすることができた。また、水位の生起確率密度と世帯が達成可能な効用レベルから期待効用レベルを定義し、そこに等価的偏差E Vの概念を適用することによって、不確実性下での海面上昇による世帯被害費用と海面上昇対策による世帯便益を定義した。また、本定義に基づいてケーススタディを行った結果、0.5mまでの海面上昇を考慮した場合、全国の子帯における対策なしの被害費用は約3600億円、対策ありの被害費用は約-1400億円、便益は約5000億円となった。また、このときの対策便益は現在価値換算で約10兆円となり、3.5mの嵩上げ対策を考えた場合の対策費用とほぼ等しくなり、便益が費用よりも大きいことがわかる。

便益計測において、本研究では効用関数を直接推定しなければならない方法を用いたが、一般均衡理論のフレームで構築された社会経済モデルの中で便益の定義式を展開し、便益を消費者余剰の形に変形することにより、効用関数を直接扱わないで便益計測を行うという方法も考えられる¹³⁾。また、本研究では世帯のみを対象としていることから、企業や政府などを含んだ社会経済全体の総便益をどのように計測するのかという問題が残されているが、海面上昇対策による便益が市場メカニズムを通じて世帯の効用レベルの変化分に集約されるという考え方もある¹³⁾。

なお、本研究は環境庁平成5年度地球環境総合推進費を得て行われた研究成果の一部である。

【参考文献】

- 1) IPCC WG I: Climate Change-The IPCC Scientific Assessment-, Cambridge University Press, p.365, 1990.
- 2) 伊藤隆夫、根木貴史：海面上昇による影響の対応戦略について、第1回地球環境シンポジウム講演集、pp. 228~233、1993。
- 3) 中辻啓二、村岡浩爾、栗田秀明、山根伸之：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1回地球環境シンポジウム講演集、pp.209~215、1993。
- 4) Shoichi Kitajima, Takao Ito, Nobuo Mimura, Yasushi Hosokawa, Masatosi Tsutsui and Koji Izumi : Impacts of sea level rise and cost estimate of countermeasures in japan, VULNERABILITY ASSESSMENT TO SEA-LEVEL RISE AND COASTAL ZONE MANAGEMENT Proceedings of the IPCC Eastern Hemisphere Workshop Edited by Roger McLean & Nobuo Mimura, pp.115~123、1993。
- 5) 松井貞二郎、立石英樹：海面上昇に伴う日本の沿岸域の浸水影響予測、海岸工学論文集、Vol.39、pp. 1031~1035、1992。
- 6) IPCC WG III : Strategies for Adaptation to Sea Level Rise, p.122, 1990。
- 7) 根木貴史：海面水位上昇等による臨海部の社会経済活動への影響とその対策に関する調査(第2報)、みなどの防災114号、pp.57~62、1992。
- 8) 三村信男、磯部雅彦：日本に対する海面上昇の影響と対応策、p.28、1992。
- 9) 森杉壽芳、大野栄治、高木朗義：治水事業の便益評価手法、土木計画学研究・講演集、No.15(1)、pp. 787~792、1992。
- 10) 森杉壽芳：地球温暖化の経済評価の考え方、第1回地球環境シンポジウム講演集、pp.118~125、1993。
- 11) 森杉壽芳、大島伸弘：渇水頻度の低下による世帯享受便益の評価法の提案、土木学会論文集、N0.359/IV-3、pp.91~98、1985。
- 12) 森杉壽芳、岩瀬広：地盤沈下の被害費用の測定に関する研究、土木計画学研究・講演集、No.7、pp.109~116、1985。
- 13) 大野栄治：ランダム効用理論による交通便益の定義とその計測手法に関する研究、京都大学博士論文、1992。