

海面上昇対策による世帯便益の定義について*

DEFINITION OF HOUSEHOLD'S BENEFIT BY COUNTERMEASURES AGAINST SEA LEVEL RISE

大野栄治**, 森杉壽芳***, 星 健一****, 高木朗義*****, 高橋靖英****

By Eiji OHNO, Hisayoshi MORISUGI, Kenichi HOSHI, Akiyoshi TAKAGI, Yasuhide TAKAHASHI

Environmental problems by global warming are often discussed in recent years, where the problem of SEA LEVEL RISE must be treated as the most serious matter. Most of previous studies, however, focused on prediction of SEA LEVEL RISE and measurement of physical damage cost only, but did not take account of uncertainty and psychological damage. Moreover, relationship between household's damage cost and benefit was not clear in those studies. The purpose of this study is to define household's damage cost by SEA LEVEL RISE and household's benefit by countermeasures against SEA LEVEL RISE under uncertainty by applying concept of Equivalent Variation (EV) to expected utility level of household, and to clarify relationship between household's damage cost and benefit from their definitions.

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 ・ CF_4 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。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℃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。特に、人口・資産が集中している三大都市圏を沿岸域に持つ東京湾・大阪湾・伊勢湾ではその影響が顕著に現れる。松井・立石²⁾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850 km^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が2.5倍以上の2400 km^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8900 km^2 、人口1542万人、資産378兆円になることが予測されている。

IPCC³⁾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

*キーワード：海面上昇，世帯便益，世帯被害費用

** 正会員 工博 岐阜大学助手 工学部土木工学科

*** 正会員 工博 岐阜大学教授 工学部土木工学科
(〒501-11 岐阜市柳戸1-1)

****学生会員 岐阜大学大学院博士前期課程

***** 正会員 工修 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)
(〒460 名古屋市中区錦1-8-6)

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で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・護岸の嵩上げ等が必要とされる対策費の総額は、運輸省所管の堤防・護岸については約12兆円⁴⁾、建設省所管の堤防・護岸については約6兆円⁵⁾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の生起に関する不確実性が考慮されておらず、さらに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の定義についての関係が明確にされていない。本研究では、世帯被害費用と世帯便益の定義を不確実性下で展開すること、また世帯被害費用と世帯便益の関係を明確にすることを目的とする。

2. 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。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、図2に示すような水位 H だけで説明される関数 $f_0[H]$ ($=f[H, 0]$) 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、近年の朔望平均満潮面の分布で与える(朔望平均満潮面とは大潮時の各月の最高満潮面を1年以上にわたって平均した高さのことで、 $H.W.L.$ と略記される⁶⁾)。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(この仮定は現象が解明されていないことによるものである)。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3に示すような関数 $f_1[H, L]$ ($=f[H, L]$) となる。

$$\text{ただし、} \int_{-\infty}^{\infty} f_0[H] dH = 1 \quad (1.1)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f_1[H, L] dH dL = 1 \quad (1.2)$$

H : 水位

L : 海面上昇量

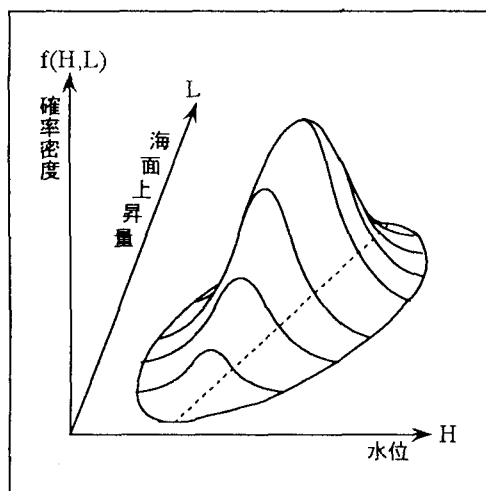


図1 水位の生起確率密度

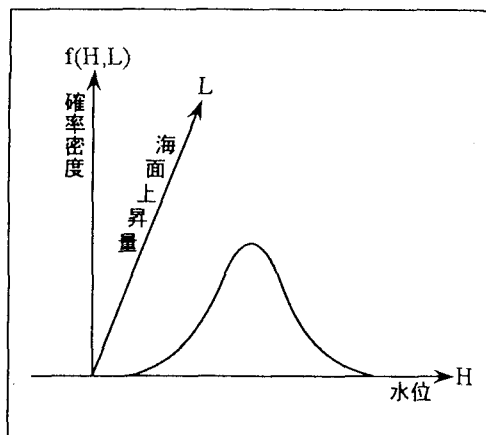


図2 現状における水位の生起確率密度

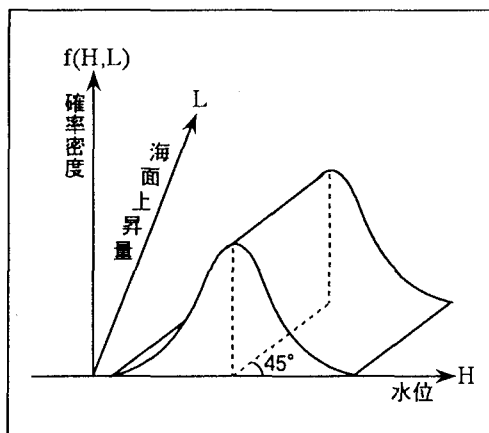


図3 将来における水位の生起確率密度

3. 世帯の効用レベル

3.1 効用レベル

世帯の達成可能な効用レベル U が、水位 H 、所得 Ω 、水位 H と堤防建設費 C によって決まる被害額 $P[H, C]$ の関数 $U[H, \Omega, P[H, C]]$ で表されると仮定する。ここで、被害額は本来なら水位と堤防の高さで決まると思われるが、堤防の建設プロジェクトの効果分析を簡単にするために、堤防の高さが建設費に比例すると仮定することにより、堤防建設費 C の被害額 P への導入が可能となる。このとき、効用レベル U は関数 $U[H, \Omega, C]$ と表され、水位

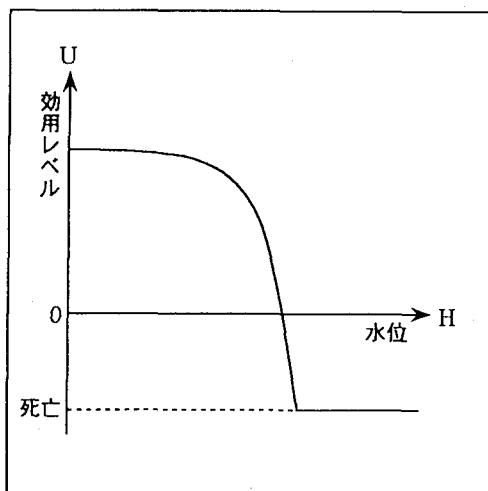


図4 水位と効用レベルの関係

H に応じて図4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（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。

3.2 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4の効用レベル $U[H, \Omega, C]$ を掛けたもの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 および堤防建設費 C の関数 $EU[\Omega, C]$ となり、次式のように表される。

$$EU[\Omega, C]$$

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

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) 現状の期待効用レベル

$$EU_0[\Omega, C^*]$$

$$= \int_{-\infty}^{\infty} f_0[H] \cdot U[H, \Omega, C^*] dH \quad (3.1)$$

(b) 将来、対策なしの場合の期待効用レベル

$$EU_1[\Omega, C^*]$$

$$= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f_1[H, L] \cdot U[H, \Omega, C^*] dH dL \quad (3.2)$$

(c) 将来、対策ありの場合の期待効用レベル

$$EU_1[\Omega, C^b]$$

$$= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f_1[H, L] \cdot U[H, \Omega, C^b] dH dL \quad (3.3)$$

ただし、 f_0 : 現状における水位の生起確率密度関数
 f_1 : 将来における水位の生起確率密度関数
 a, b : 対策なし, 対策ありの場合

ここで、(b)の期待効用 $EU_1[\Omega, C^*]$ 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 $EU_0[\Omega, C^*]$ よりも小さくなる ($EU_1^* < EU_0^*$)。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 。

$[\Omega, C^*]$ よりも大きくなり ($EU_1^b > EU_0^*$)、効果が小さいならば(a)よりも小さくなる ($EU_1^b < EU_0^*$)。また、堤防建設費の差 $C^b - C^*$ は、堤防・護岸の嵩上げ等の海面上昇対策の費用を意味し、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。なお、この海面上昇対策に排水施設整備が加わると、一回の高潮災害の被害額を軽減することもできる。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。

4. 世帯被害費用および世帯便益の定義

不確実性下での海面上昇による世帯被害費用および海面上昇対策による世帯便益を求めるために、等価的偏差 (Equivalent Variation; EV) の概念を拡張する^{7) 8) 9) 10)}。

4.1 世帯被害費用の定義

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⁷⁾、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。

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

(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。対策ありの場合は対策なしの場合よりも海面上昇時の期待効用は大きいので、 $Y > X$ 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。

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

4.2 世帯便益の定義

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。

世帯被害費用の定義と同様に、この補償額の受取方式として一定価格方式を採用し、世帯便益を以下のように定義する。すなわち、次式を満足する Z の値がそれである。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。

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

5. 各定義の検討

5.1 現状および将来の期待効用レベル

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であると仮定する。

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

このとき、現状と将来の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。

(a) 現状の期待効用レベル

$$\begin{aligned} EU_0[\Omega, C] &= \int_{-\infty}^{\infty} f_0[H] \cdot U[H, \Omega, C] dH \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} f_0[H] \cdot g[H, C] \cdot \Omega dH \\ &\quad + \int_{-\infty}^{\infty} f_0[H] \cdot U'[H, C] dH \\ &= G_0[C] \cdot \Omega + \int_{-\infty}^{\infty} f_0[H] \cdot U'[H, C] dH \quad (8) \end{aligned}$$

$$\text{ただし、} G_0[C] = \int_{-\infty}^{\infty} f_0[H] \cdot g[H, C] dH$$

(b) 将来の期待効用レベル

$$\begin{aligned} EU_1[\Omega, C] &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f_1[H, L] \cdot U[H, \Omega, C] dH dL \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f_1[H, L] \cdot g[H, C] \cdot \Omega dH dL \\ &\quad + \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f_1[H, L] \cdot U'[H, C] dH dL \\ &= G_1[C] \cdot \Omega + \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f_1[H, L] \cdot U'[H, C] dH dL \quad (9) \end{aligned}$$

$$\text{ただし、} G_1 [C] = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f_1 [H, L] \cdot g [H, C] dHdL$$

5.2 海面上昇による世帯被害費用

(1)海面上昇対策なしの場合の世帯被害費用

この場合の世帯被害費用は、将来において対策なしの場合の期待効用と現状の期待効用の差を貨幣タームで捉えたものとして定義することができる。この期待効用の差は次式で表されるが、高水位の生起確率の違いによって第1項の値が第2項の値より小さくなるので、負値で与えられる。

$$EU_1 [\Omega, C^*] - EU_0 [\Omega, C^*] \quad (10)$$

ここで、この場合の世帯被害費用の定義式 (4)式の両辺から $EU_0 [\Omega, C^*]$ を引くと、その左辺が(10)式と等しくなる。すなわち、

$$EU_1 [\Omega, C^*] - EU_0 [\Omega, C^*] = EU_0 [\Omega + X, C^*] - EU_0 [\Omega, C^*] \quad (11)$$

となる。(11)式の右辺は、

$$\begin{aligned} \text{右辺} &= \int_{\Omega}^{\Omega+X} \frac{\partial EU_0 [\Omega, C^*]}{\partial \Omega} d\Omega \\ &= G_0 [C^*] \cdot X \end{aligned} \quad (12)$$

となり、この場合の世帯被害費用 X が次式のようになる。

$$X = \frac{EU_1 [\Omega, C^*] - EU_0 [\Omega, C^*]}{G_0 [C^*]} \quad (13)$$

(13)式は(10)式を貨幣タームで捉えたものである。

ここで、(12)式において $\partial EU_0 / \partial \Omega = G_0 [C]$

($\because$ (8)式) という関係式を用いた。

(2)海面上昇対策ありの場合の世帯被害費用

海面上昇対策なしの場合と同様に、この場合の世帯被害費用は、将来において対策ありの場合の期待効用と現状の期待効用の差を貨幣タームで捉えたものとして定義することができる。この期待効用の差は次式で表されるが、その値の正負は対策の効果の大きさによって決まる。

$$EU_1 [\Omega, C^b] - EU_0 [\Omega, C^*] \quad (14)$$

ここで、この場合の世帯被害費用の定義式 (5)式の両辺から $EU_0 [\Omega, C^*]$ を引くと、その左辺が(14)式と等しくなる。すなわち、

$$\begin{aligned} &EU_1 [\Omega, C^b] - EU_0 [\Omega, C^*] \\ &= EU_0 [\Omega + Y, C^*] - EU_0 [\Omega, C^*] \end{aligned} \quad (15)$$

となる。(15)式の右辺は、

$$\begin{aligned} \text{右辺} &= \int_{\Omega}^{\Omega+Y} \frac{\partial EU_0 [\Omega, C^*]}{\partial \Omega} d\Omega \\ &= G_0 [C^*] \cdot Y \end{aligned} \quad (16)$$

となり、この場合の世帯被害費用 Y は次式のようになる。

$$Y = \frac{EU_1 [\Omega, C^b] - EU_0 [\Omega, C^*]}{G_0 [C^*]} \quad (17)$$

(17)式は(14)式を貨幣タームで捉えたものである。

5.3 海面上昇対策による世帯便益

海面上昇対策がなければ世帯の被害費用は大きい。対策が行われることによって被害費用は小さくなる。この世帯被害費用の減少は、海面上昇対策が行われることによるものであるから、これを海面上昇対策による世帯便益として捉えることができる。したがって、(14)式と(10)式の差が海面上昇対策の便益であり、次式で表される。

$$EU_1 [\Omega, C^b] - EU_1 [\Omega, C^*] \quad (18)$$

ここで、世帯便益の定義式 (6)式の両辺から $EU_1 [\Omega, C^*]$ を引くと、その左辺が(18)式と等しくなる。すなわち、

$$\begin{aligned} &EU_1 [\Omega, C^b] - EU_1 [\Omega, C^*] \\ &= EU_1 [\Omega + Z, C^*] - EU_1 [\Omega, C^*] \end{aligned} \quad (19)$$

となる。(19)式の右辺は、

$$\begin{aligned} \text{右辺} &= \int_{\Omega}^{\Omega+Z} \frac{\partial EU_1 [\Omega, C^*]}{\partial \Omega} d\Omega \\ &= G_1 [C^*] \cdot Z \end{aligned} \quad (20)$$

となり、世帯便益 Z が次式のようになる。

$$Z = \frac{EU_1 [\Omega, C^b] - EU_1 [\Omega, C^*]}{G_1 [C^*]} \quad (21)$$

(21)式は(18)式を貨幣タームで捉えたものである。

ここで、(20)式において $\partial EU_1 / \partial \Omega = G_1 [C]$

($\because$ (9)式) という関係式を用いた。

5.4 X , Y , Z の関係

海面上昇対策ありの場合と現状との期待効用の差から、海面上昇対策なしの場合と現状との期待効用の差を差し引いたものが、海面上昇対策による世帯便益となる。このとき、(13), (17), (21)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。

$$Y - X = \frac{G_1 [C^*]}{G_0 [C^*]} Z \quad (22)$$

(22)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を示すのではなく、Zに係数 (G_1^*/G_0^*) を掛ける必要があることを示している。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。

6. 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EVの概念を適用することによって、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。さらに、世帯被害費用と世帯便益との関係を検討した結果、対策ありの場合と対策なしの場合との世帯被害費用の差がそのまま海面上昇対策による世帯便益とはならないことがわかった。これは、with and without分析のフレームにおいて、両者(被害費用と便益)の計測基準が異時点にあることによるものであり、その調整係数の導入が必要であることを示している。

今後の課題として、本定義に基づく便益計測の際に、世帯の効用関数をどのように特定化するのか、また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。前者の問題に対する直接的な解答として、一対比較形式のアンケート調査による方法(価値意識法)が考えられる。別の解答としては、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本定義を展開し、便益を消費者余剰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¹¹⁾。

後者の問題については、一般均衡理論のフレームで海面上昇対策による社会経済の変動を捉え、その結果として得られる効用レベルの変化分を用いることによって社会的純便益を計測することができる(プロジェクトの効果は個人の効用の変化分に集約されるという考えに基づく)。

【参考文献】

- 1) IPCC WG I: Climate Change - The IPCC Scientific Assessment -, Cambridge University Press, p.365, 1990.
- 2) 松井貞二郎、立石英機: 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.
- 3) IPCC WG III CZMS: Strategies for Adaptation to Sea Level Rise, p.122, 1990.
- 4) 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)、みなとの防災114号、pp.57~62、1992.
- 5) 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、REPORT OF VULNERABILITY ASSESSMENT FOR JAPAN SUBMITTED TO THE IPCC COASTAL ZONE MANAGEMENT SUBGROUP WORKSHOP 'THE RISING CHALLENGE OF THE SEA', p.28、1992.
- 6) 岩垣雄一: 最新海岸工学、森北出版、p.78、1990年.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 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、No.359/IV-3、pp.91~98、1985.
- 10) 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.
- 11) 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.