

道路交通による大気汚染死亡リスクの貨幣評価法に関する研究*

*Monetary Valuation of Chronic Mortality Risk Caused by Air Pollution from Road Transport**

今長 久** 谷下 雅義*** 鹿島 茂****

by Hisashi IMANAGA**, Masayoshi TANISHITA***, Shigeru KASHIMA****

1. はじめに

自動車交通の社会的費用の主要な項目の 1 つに、交通事故や大気汚染に起因する死亡リスクがある。それらの貨幣評価方法の 1 つとして、人々のリスク回避への選好から評価する方法 (Willingness to pay approach) があり、この方法を用いた交通事故リスクの評価が、数多く行われている。

一方、大気汚染による死亡リスクについては、近年 SPM の人体への影響など関心は高まっているが、その評価は、交通事故と大気汚染の死亡リスクの特徴の違いを考慮して間接的に推計されることが多い。

例えば、WHO¹⁾の研究では、大気汚染による損失の評価を、交通事故リスクから計測した損失評価値 140 万 Euro をベースに、両リスクにおける平均死亡年齢の違いを考慮し、大気汚染死亡リスクの損失評価値を交通事故の 69%に割り引き、91.5 万 Euro と推計している。また、Rabl²⁾は、損失の評価を生涯での評価値(人が一人死亡した場合に発生する損失額)である統計的生命的価値をベースにしたものではなく、1 年寿命が短くなることによる損失を 8.4 万 Euro/年と ExternE Program での推計値である損失評価値 310 万 Euro から推計している。

大気汚染と交通事故リスクの大きな違いとして、①大気汚染では汚染物質への長期暴露が肺癌などの慢性疾患を引き起こすため、高齢になればなるほど

死亡する確率は高くなると考えられる一方、交通事故については、高齢者の被害が増加傾向にはあるが、大気汚染と比較して相対的に年齢とリスクの大きさの因果関係は薄いこと、②事故による死亡は事故発生と死亡との間隔が短い、慢性疾患による死亡の場合には、疾患の発生から死亡に至るまでに健康状態が徐々に悪化していき、その間の負効用も大きな評価要素である、ことが挙げられる。これらの特徴から、交通事故の損失評価値から間接的に求めるのではなく、大気汚染による死亡リスクから損失評価値を、直接推計することも必要であると考えられる。

そこで、本研究では、年齢の増加とともに増加する大気汚染リスクによる損失評価値 v を、直接 CVM を用いて計測する方法を提案する。まず、本研究で用いる損失評価値 v を定義し、次に、調査から得られる大気汚染リスク削減への WTP と大気汚染による死亡リスク及び、それ以外の要因による死亡リスクから損失評価値 v を導出する過程を整理する。続いて、 v の導出に必要な各種リスクを設定し、最後にケーススタディーとして実施した調査の結果とリスクの設定の違いによる評価への感度の分析を示すこととする。

2. 大気汚染死亡リスクの損失評価値

本研究で推計する損失評価値 v は、ある個人が大気汚染死亡リスクにより死亡した場合に失う死亡時点での期待余命の 1 年当たりの価値と定義する。つまり、年齢 t で死亡した人が失う損失 L_t は、損失評価値 v および、年齢 t での期待余命 T_t を用いて式(1)のように表される。

$$L_t = v \cdot T_t \quad \cdots (1)$$

* キーワーズ:大気汚染, 健康被害, 貨幣評価, CVM

** 学生員, 工修, 中央大学大学院

理工学研究科土木工学専攻

(東京都文京区春日 1 丁目 13 番地 27 号)

TEL: 03-3817-1644 e-mail: q@kc.chuo-u.ac.jp)

*** 正員, 博(工), 中央大学理工学部土木工学科

(東京都文京区春日 1 丁目 13 番地 27 号)

****正員, 工博, 中央大学理工学部土木工学科

(東京都文京区春日 1 丁目 13 番地 27 号)

なお損失評価値 v は、年齢により変化しないものと仮定する^(註1)。

3. 損失評価値の導出

(1) 期待余命の計測

ある個人は、①大気汚染死亡リスク r_t 、および②一般死亡リスク q_t の2種類のリスクにより死亡する可能性がある。大気汚染死亡リスク r_t は、すべての人が一定の大気汚染濃度に生涯さらされたという前提のもと、年齢 t の人が $t+1$ になるまでに大気汚染が原因で死亡するリスクである。同様に、一般死亡リスク q_t は、年齢 t での大気汚染以外の死亡要因による年間あたり死亡リスクである。なお、 r_t と q_t は独立であると仮定する^(註2)。よって、年齢 t の人が $t+1$ 歳になるときに生きている割合（これを生存率 S_t とする）は、式(2)のようになる。ただし、 RQ_t は年齢 t で生きている人が $t+1$ 歳になった時に、生きている確率を示す条件付確率である。

$$S_{t+1} = (1-r_t) \cdot (1-q_t) \cdot S_t \equiv RQ_t \cdot S_t \quad \cdots(2)$$

ここで、年齢 $t = age$ の期待余命について考える。この人は現在生存しているので、生存率 $S_{age} = 1$ であり、期待余命 T_{age} は式(3)のように表される。

$$T_{age} = \sum_{t=age}^{\infty} (t-age) \cdot (1-RQ_t) \prod_{u=age-1}^{t-1} RQ_u \quad \cdots(3)$$

(2) 対策による便益としての余命の変化

期待余命 T_{age} を失うことによる損失を L_{age} とする。 L_{age} は、式(1)のように期待余命 T_{age} および損失評価値 v の積の形で表される。

対策により大気汚染死亡リスクが r_t から r'_t に削減される（ RQ_t は $R'Q_t$ になる）とする。リスクが r'_t に削減されたときの期待余命及びその損失は、それぞれ T'_{age} 、 L'_{age} に変化する。よってこの対策による便益は、式(4)のようになる。

$$L'_{age} - L_{age} = v \cdot (T'_{age} - T_{age}) \quad \cdots(4)$$

(3) リスク削減に対する WTP

本研究では、大気汚染死亡リスク r_t を r'_t に削減する対策に対して、毎年の WTP（支払意志額）を W とする。この W は毎年1回生存期間中、同額を支払うものと仮定する。よって、死亡した場合には WTP は支払わないので、支払う WTP の期待値は式(5)のようになる。

$$WTP_{age} = W \cdot T'_{age} \quad \cdots(5)$$

式(4)および(5)より、式(6)に示すように対策の便益に対する WTP の支払いが等しくなるように損失評価値 v は決定される。式中の係数 α_{age} は、死亡リスクにより決定される係数であり、各年齢ごとに1つの値をとる。本研究では、式(6)を用いて損失評価値 v を計測する^(註3)。

$$\begin{aligned} L'_{age} - L_{age} &= WTP_{age} \\ \Leftrightarrow v(T'_{age} - T_{age}) &= W \cdot T'_{age} \\ \Leftrightarrow v &= \frac{T'_{age}}{T'_{age} - T_{age}} \cdot W \equiv \alpha_{age} \cdot W \end{aligned} \quad \cdots(6)$$

4. リスクの設定

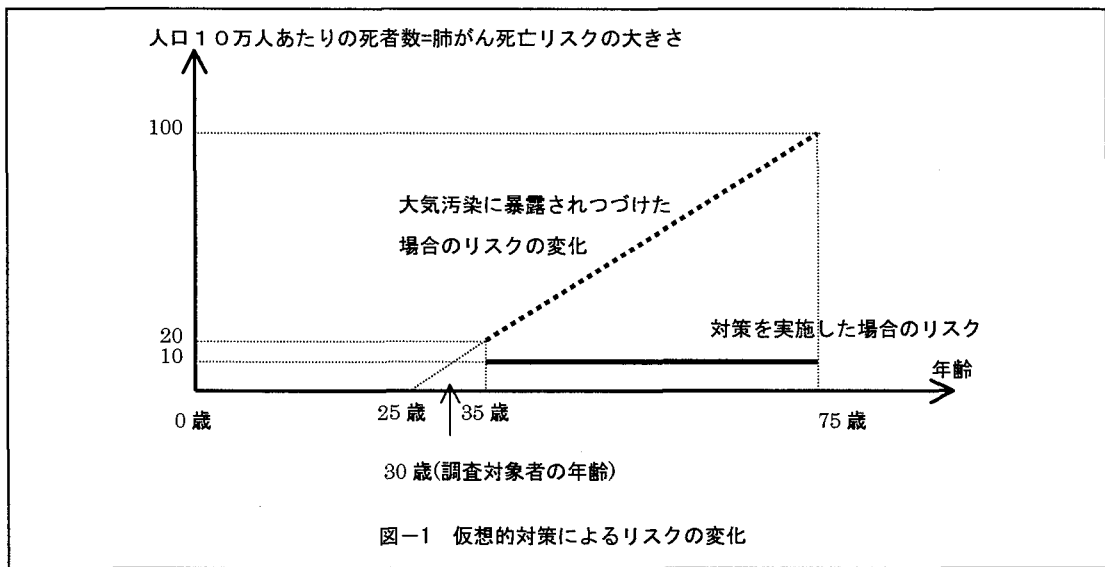
(1) 大気汚染死亡リスク

大気汚染死亡リスクは一般に、ある濃度に生涯さらされたときに死亡する確率である生涯リスク R_H により定量化される。この生涯リスクは、大気汚染以外の原因により死亡しなかったときに、大気汚染が原因で死亡する確率を示すものである。生涯リスクは、生涯での死亡確率であるため、これを年齢の増加に伴いリスクも線形的に増加すると仮定し、式(7)に示すように各年齢にリスクを分配する。

$$r_t = \beta \cdot (t - T_0) \quad \cdots(7)$$

T_0 は、リスクの開始年齢、 β はリスクの増加率を示す。この r_t が式(8)を満たすように、生涯リスク R_H 及び一般死亡リスク q_t を所与として係数 β を決定する。

$$\sum_{t=0}^{\infty} r_t \prod_{u=0}^t (1-q_u) \cdot (1-r_u) = R_H \quad \cdots(8)$$



ただし、今回は、CV 質問を作成する際に、リスクの変化量は認識しやすい大きさに設定する必要があるため、大気汚染物質と死亡リスクとの用量作用関係を疫学研究等の結果^(注4)を考慮して $T_0 = 25$ 歳、 $\beta = 2/100,000$ と設定した。ただし、現在より5年間は、大気汚染死亡リスクの疾患から死亡に至るまでのタイムラグとして、死亡リスクを0とする。以上を整理すると大気汚染リスクは、式(9)となる。

$$r_t = \begin{cases} 0 & (age \leq t < age + 5) \\ 2 \cdot (t - 25) / 100,000 & (t \geq age + 5) \end{cases} \quad \dots (9)$$

(2)一般死亡リスク

一般的に、一般死亡リスク q_t は、厚生労働省の発表している生命表のように毎年徐々に生存率が減少していくものである。しかし、本研究では、アンケート時に回答者にリスク r_t および q_t を定量的に認識してもらう必要があり、このような詳細な生存率の減少を回答者が定量的に認識することは困難であると考え、式(10)に示すような設定とした。

$$q_t = \begin{cases} 0 & (0 \leq t < T_c) \\ 1 & (t = T_c) \end{cases} \quad \dots (10)$$

この設定では、平均寿命 T_c を設定し、その寿命以前に大気汚染リスク r_t 以外で死亡することはないが、 T_c で必ず死亡し、それ以上生存する可能性はないものとする。なお今回は、 $T_c = 75$ と設定した。

(3)対策により削減される大気汚染死亡リスク

このような2種類のリスクにさらされている状況の回答者に対して、大気汚染対策を実施することで死亡リスクを現状の水準(回答者の現在の年齢のリスク水準)に抑えることができるという死亡リスク対策を提示する。図-1に大気汚染リスク及び対策により削減されたリスク(図は30歳の設定)の関係を示す。対策により削減されたリスク r'_t は式(11)のようになる。

$$r'_t = \begin{cases} 0 & (age \leq t < age + 5) \\ 2(age - 25) / 100,000 & (t \geq age + 5) \end{cases} \quad \dots (11)$$

5. 調査

(1)調査概要

調査概要を表-1に示す。対象地域を、神奈川県川崎市としたのは、以前公害による健康被害が問題となったことから大気汚染への関心が高く調査への協力が得やすいと考えたためである。また調査は、

表-1 調査概要

調査地区	川崎駅周辺住民
サンプル数	16
年齢分布	
20代	1人
30代	3人
40代	1人
50代	10人
60代	1人
調査期間	2002年8月～

あなたは大気汚染が原因の肺癌で死亡する可能性があります。現在は肺癌ではないので、5年間は死亡することはありません。ただし5年後に死亡する可能性は、 20×10^{-5} あり、リスクはだんだん増加していき20年後にはその可能性は 50×10^{-5} となります。

そこで、空気清浄器を家に取り付けることで死亡リスクを現状の水準(30歳のときのリスク水準)に抑えることができます。

この空気清浄器のフィルターの費用として年間1回(毎年)最大でいくらまでなら支払いますか。ただし、清浄器の効果はあなたのみに有効です。

図-2 死亡リスク回避へのWTPの質問

設定した質問の難易度及び、回答の所要時間の長さが回答者に与えるストレスあるいは集中力の低下といった影響を考慮し面接方式で行った。そのため、サンプル数が少なく回答者の年齢にもバラつきがある。これは今後改善する予定である。

質問は図-2に示すように、その他のリスクで死亡する可能性はないが75歳で必ず死亡するリスク q_t と大気汚染リスク r_t がある仮定のもと、図-1に示すように大気汚染リスク r_t を r'_t にする対策への年一回毎年支払うWTPを質問した。WTPは①金額のオーダーを選択肢から選ぶ、②オーダー内での自由回答方式、と2段階で質問した。

(2)調査結果

図-3に今回得られたサンプルに対して、4章で説明した $T_c = 75$ 、 r_t および q_t より求まる式(6)中の係数 α_{age} (表-3の設定1に相当)を用いて推計された損失評価値 v をその値の大きい順に並べて示す。この結果を単純に集計すると損失評価値は、平均値で1億3,200万円/年、中央値3,800万円/年となる。

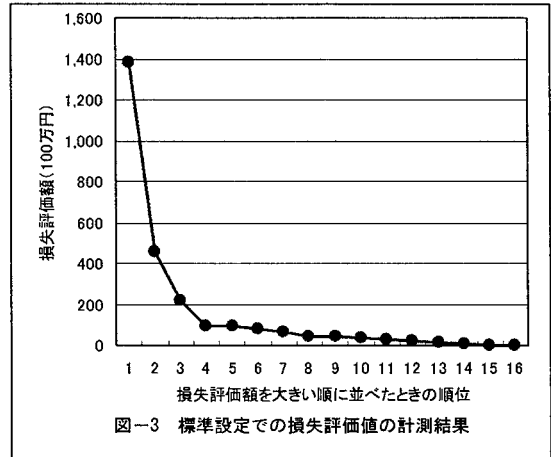


図-3 標準設定での損失評価値の計測結果

6. 感度分析

ここでは、今回の設定に加え、 $T_c = 78, 80$ の場合と平成13年の生命表から一般リスク q_t を設定したときに、その違いが損失評価値の計測に用いる係数 α_{age} に与える影響を検討する。表-2に設定を整理する。

それぞれの設定における q_t および r_t を基に、式(6)における係数 α_{age} を推計した結果が表-3である。

まず、設定1,2,3の比較から、平均寿命 T_c の設定により係数 α_{age} は変化することがわかる。今回は、 $T_c = 75$ と仮定してWTPを回答してもらっているが、この設定は、回答者自身の寿命についての考えなどの影響があった場合、損失評価値を過大あるいは、過小に評価することになる。

例えば、平成13年の生命表での男性の平均余命は78.01歳なので、回答者が $T_c = 78$ と考えた場合、今回の設定1と設定3とを比較すると60歳では、 $1343/932 \approx 1.4$ 倍の評価結果となる。

T_c の設定については、回答者が自分の考える主観的な期待寿命の方が、認識しやすいことも考えられ今後どちらがよいのかを検討する必要がある。

また、 q_t の設定も結果に影響を与えることがわかる。設定0と設定2はほぼ平均寿命が同じであるが、設定2の方が高年齢層の係数を大きく推計する。

最後に、それぞれの設定の場合に今回調査から得たWTPを用いて、損失評価値を求めたものが表-4である。サンプルが少数であるためこの値を持って損失評価値ということは出来ないが、大きさを検討

表-2 感度分析用のリスクの設定

設定	q_t の形状	T_e (歳)
設定0	平成13年生命表(男性)における死亡率	78.07
設定1	$q_t = \begin{cases} 0 & (0 \leq t < T_c) \\ 1 & (t \geq T_c) \end{cases} \dots (10)$	75
設定2		78
設定3		80

表-3 設定の違いによる評価式*の係数 α の変化

年齢	設定0	設定1	設定2	設定3
		$T_c=75$	$T_c=78$	$T_c=80$
25	118	121	115	115
30	141	149	140	139
35	170	189	174	172
40	209	247	223	217
45	261	335	296	284
50	335	483	410	386
55	442	755	608	556
60	605	1343	993	868

*本文中の式(6) $v = \alpha_{age} \cdot W$ の係数 α

表-4 設定別の損失評価値の試算

設定	平均値 (100万円/年)	中央値 (100万円/年)
設定0	78	23
設定1	132	38
設定2	111	37
設定3	98	31

すると、Rabl²⁾の評価値である8.4万Euro/年比較して、2倍～4倍の大きさになっている。Rablが推計の際に用いたExternEの評価値310万Euroは、死亡リスク評価値としては、大きめな値であるため¹⁾、この8.4万Euroも大きめな値であると考えられる。この影響は、本研究では、WTPに関する時間割引をしていないことや、サンプルの偏り、回答したWTPを生涯支払い続けると仮定してWTPを回答してもらい評価値を計算しているが、実際にはそれが年齢とともに変化する可能性（今回は加齢とともに損失である余命が小さくなると考えているのでWTPも小さくなることも考えられる）、死亡前の疾患がWTPに与えている影響などが考えられる。今後検討が必要である。

7. おわりに

本研究では、大気汚染による死亡リスクが年齢の増加とともに増加すると仮定した場合に損失の評価指標である死亡による期待余命の損失1年当たりの

価値に相当する損失評価値 v の計測方法を示した。

また、実際に調査を行い小サンプルではあるが、試算した結果損失評価値は3,800万円/年となった。そして、この調査手法には、平均寿命の設定が評価に大きな影響を与えるという知見を得た。

今後、対策により削減されるリスク r'_t の設定についてや、大気汚染死亡リスク削減対策に対して一定額を支払い続けると設定しているWTPが、それが将来変化する可能性などについて検討する。また死亡前の疾患による損失の評価は、今回はWTPに含まれるものとしているが、この部分についてはより詳細に考慮する必要がある。

補注

- (1) ある年齢を1年間生きることの価値が、年齢により変化することは、十分に考えられる。WTPが年齢と関係をもっている理由の一つもそこにあると思われる。この点については今後十分な検討が必要である。
- (2) 死亡原因が大気汚染に起因するものか否かを区別することは実際には難しいが区別可能と仮定して、調査時には、回答者に対し大気汚染死亡リスク r_t を説明する。
- (3) 今回は、将来の生命の価値は、余命が短くなることで小さくなっていくと仮定している。前述の損失評価値の年齢による変化の可能性とあわせて時間割引が必要かどうかについては、検討が必要である。また、個人においてWTPが年齢により変化しないと仮定しているが実際には変化する可能性も考慮する必要がある。
- (4) 大気汚染物質の濃度と死亡リスクとの用量作用関係を定量化する方法には、大きく①動物実験の結果を人間に外挿する方法、②疫学的研究（コホート分析）、の2つの方法がある。

①は、ラットなどの動物に対して、汚染物質を吸わせたときの死亡率とその実験条件（暴露濃度、暴露時間）から人の影響を推計する方法である。この外挿の際には、体重または、体表面積などから換算するが、異なった種族間でのリスク値の外挿には多くの難しい問題がある。

一方②は、暴露濃度の異なる地域あるいは対象群の濃度および暴露時間とリスクとの関係を検証する手法である。この方法の問題点としては、対象を長期にわたって観測する必要があること、サンプルが大量に必要なことなどがあげられる。

ここでは、大気汚染物質の中で近年特に注目されている SPM について、いくつかの研究結果を紹介する。まず、海外の研究として、Pope ら³⁾や Dockery ら⁴⁾がある。Pope らは PM₁₀ の人体に与える影響について、1982-1989 の間に全米 151 の都市に住む約 55 万人を対象とした疫学的調査から、PM₁₀ の濃度が 24.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ でのリスク率(暴露濃度の大きい対象と小さい対象での死亡率の比)を 1.17 と推計している。Dockery らは、全米 6 都市 8,111 人についての 14-16 年間にわたる疫学調査よりリスク率を 1.26 と推計している。また、Rabl²⁾は Pope の結果を利用して、PM₁₀ のリスクを 4.3×10^{-4} / (person · year) per $\mu\text{g}/\text{m}^3$ としている。

わが国における研究としては、岩井ら⁵⁾がある。前者は、動物実験からの推計で後者は Garshick⁷⁾らの疫学研究をもとにした推計である。自動車排ガスによる肺がんのユニットリスク(単位濃度の汚染物質に一生さらされたときの死亡確率)をそれぞれ 12.27×10^{-5} 、 41.6×10^{-5} (death/person) per ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) としている。

結果に大きな違いがあることや、外国とわが国においては、平均的な体格の差や PM の成分などに違いがあることから、わが国におけるリスクの研究を今後も精力的に行う必要がある。

今回は、大気汚染リスク r_t を、このユニットリスクと暴露する濃度を設定し生涯リスク(ある濃度に一生さらされたときの死亡確率であり、ユニットリスクに汚染物質濃度を乗じたものに等しい)に換算しそれをベースに設定する。ただし、生涯リスクには年齢との関係が含まれていないため、今回はこれを 25 歳から年々増加し、75 歳で死亡すると設定している。たとえば、ユニット

リスクが 22.5×10^{-5} で大気汚染濃度が $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ となると生涯リスクは 2250×10^{-5} となる。この値に近くなるように本文中式(7)のパラメータ β を $2/100,000$ と設定した。今回の設定は、調査票で用いる数字の区切りの良さなどを考慮したため、多少大きめの設定になっている。リスクの大きさの設定は今後の課題である。

また、CV の質問においては今回設定した r_t の様に前年の生存率に対するリスクとではなく現在($t=\text{age}$)の生存率に対するリスクとして説明しているが、今回のような q_t の設定においては、両者の違いが最も大きくなる 75 歳でも 0.1% 程度と推計にはほとんど影響ない。

参考文献

- 1) IWW/INFRAS: 「External Costs of Transport」 2000
- 2) A. Rabl: 「Mortality Risks of Air Pollution: the Role of Exposure-Response Functions」 Journal of Hazardous Materials, 61, pp91-98, 1998
- 3) C.A. Pope, et al.: 「Particulate Air Pollutions as a Predictor of Mortality in a Prospective Study of U.S. Adults」 Critical Care Medicine, Vol 151, pp669-674 1995
- 4) D.W. Dockery et al.: 「An Association Between Air Pollution and Mortality in Six U.S. Cities」 The England Journal of Medicine, Vol 329, pp1753-1759, 1993
- 5) 岩井和郎ら: 「ディーゼル排出粒子成分の人肺癌リスク試験 I. 動物実験からの計算値」 大気汚染学会誌, 第 27 巻, 第 6 号, pp289-302, 1992
- 6) 岩井和郎ら: 「ディーゼル排出粒子成分人肺癌リスク試験, II. 疫学データからの計算と動物実験および人肺沈着量からの計算値との比較」 大気汚染学会誌, 第 27 巻, 第 6 号, pp296-303, 1992
- 7) E. Garshick et al.: 「A Case-control study on lung cancer and diesel exposure in railroad workers, Amer」 Rev. Respir. Dis., 135, pp1242-1248, 1987
- 8) 岸本充生: 「浮遊粒子状物質による健康影響の定量評価および経済評価の現状」 資源と環境 Vol.9, No.4, 2000

道路交通による大気汚染死亡リスクの貨幣評価法に関する研究*

今長 久** 谷下 雅義*** 鹿島 茂****

本研究では、自動車交通による大気汚染の死亡リスクによる損失を死亡により失う余命と考え、その 1 年当たりの損失を損失評価値と定義し、CVM を用いて推計する手法を提案した。大気汚染による死亡リスクの特徴は、その大きさが年齢の増加に伴い増加していくことである。そこで、一般に疫学研究などから得られる生涯での死亡リスクを、年齢とともに線形的に増加すると設定し、リスク削減への WTP を調査した。結果、サンプルが少数であるが、損失評価値を試算した。そして、調査票の設計において、寿命の設定等に注意が必要であることを示した。

Monetary Valuation of Chronic Mortality Risk Caused by Air Pollution from Road Transport *

by Hisashi IMANAGA**, Masayoshi TANISHITA***, Shigeru KASHIMA****

This study aims to evaluate the risk of chronic mortality in monetary term from road transport using CVM. In this study, the value of mortality risk is defined as losing one year from life expectancy. Mortality risk due to air pollution is set to be linear with age. The value of the risk is estimated, although the sample size was limited. The results indicate the importance of carefully setting the lifespan in survey design.