

種々の危険の経年変化に関する研究

<その1……リスクの定義とモデル>

名古屋大学 工学部 建築学科 防災安全工学講座

磯 達雄

《卒論目次》

第1章. 研究の目的と方法

第2章. リスクの定義

第3章. リスクを因子とする行動分析モデル

第4章. リスクの経年変化モデル

第5章. リスク経年変化の数式モデル

第6章. 統計値と計算値の比較

第7章. 考察とまとめ

●参考文献

1. 研究の目的と方法

安全な建築物を設計することを目標として、考えられうる限りの手段をつくしたところで、危険を完全になくすることはできない。そこで、人間がここまでなら許容できるという危険の基準値レベルを設定してやる必要があるわけだが、そのレベルを定めるための手法はいまのところ確立していない。最終的に目指すべきは、そうした手法の開発であるが、人間に関わる危険の構造は、非常に複雑なものであり、その全体像を明らかにすることがとりあえず必要である。

危険については、すでにスターが、自動車や農業用トラクターによる死亡事故を例に挙げて、利用する人間の割合が増えるにつれてリスクは減じていくが、あるレベルまで達するとそれ以上は下がらずに安定することを指摘している¹⁾。しかし、このリスクの安定がいかなるメカニズムによって達成されるのかについては明確にされていない。

本研究では、まず危険の尺度としてリスクを定義し、人間の危険に関する行動分析モデルを組み立てる。そして、そのモデルから経年とともに変化するリスクを数式としてモデル化し、最後に数式からシミュレートした計算値と実際の統計値の比較を試みることにする。

2. リスクの定義

危険の尺度（リスク）として、これまでに多くの提案がなされてきた。この章では、フレックとスタレンによる研究²⁾をもとにこれまでに提案された定義のうちのいくつかを比較検討し、本研究に最もふさわしいと考えられる定義を採用することとする。

リスクの定義として代表的なものを以下に挙げる。

①損失の大きさ $R_1 = L$

ある行動をとるとき、こうむると考えられる損失の大きさが L であるとき、その L をリスクの定義とするものである。 L は、例えば損失に対して費やされる金銭の額として算出される。この定義は、人命の損失といった回復できない損失に対して適していない。ホフマン方式など、人命を金銭的に評価する計算方法もあるが、あくまでも補償額としての評価であって、社会的には「命はお金に替えられない」という考え方が広く認められている。

②損失の不効用 $R_2 = u(L)$

損失 L は、単純に足し合わせることができない場合がある。例えば、2億円の損失1件と、1億円の損失2件を比べると、損失の大きさでは等しいものの、それによりこうむる影響は異なることもある。そこで、何らかの方法により、損失額を単純に足し合わせのできるような値に換算し直すという考え方がある。この換算値を不効用という。リスクとして不効用を用いる考え方は、安全に関する法律の基礎となっている。この定義を用いるためには、損失から不効用を求める換算方法が問題となる。

③損失の確率 $R_3 = p$

ある行動をとるとき、結果として損失をこうむる確率が p であるとする。このとき、その行動のリスクは確率 p で表されるという考え方である。この定義では、損失の大きさ L を考慮しない。人間の死亡など回復不可能な損失に対してこの定義は適している。前述のスターによるリスクの定義「人間が行動にかかわる時間あたりの死亡率」も、この考え方に基づいている。

④損失の確率と不効用の積 $R_4 = p \cdot u(L)$

ある行動をとるときの不効用の期待値をリスクの定義とするものである。この定義によれば、ある行動の結果として起こるそれぞれ別個の損失についてそれらのリスクを足し合わせることで、総合的なリスクを算出することが可能である。

そのほかにも各種の定義が提案されているが、それらのいずれにもっとも妥当性があるのかを判断するのは非常に困難である。現実には、以上挙げた様々なり

スクの定義が時と場合に応じて使い分けられていると考えられる。

本研究ではリスクの定義に③損失の確率 ($R_3 = p$) を用いることとして、スターが行った危険に関する研究¹⁾ にならって、危険の尺度 (リスク) を以下のように定義する。

「対象とする行動にかかわる時間あたりの死亡率をリスクとする」

ここで死亡率とは、かかわる人間の数あたりの死亡者数のことである。この定義は前記のとおり、損失の大きさを考慮しないもので、すなわち、負傷についてはその傷害の程度にかかわらず考慮しないこととし、死亡のみを取り上げている。死亡についてはそれがいかなる人間であろうとも (ホフマン方式のような評価をおこなわずに) まったく等価のものとして扱っている。死亡のみを取り上げ、負傷を考慮しないのは、第一に死亡は元に戻すことができない非常に重大な危険であること、第二に負傷に関する詳細な統計データを入手することは困難であり、危険という複雑な問題を取り扱うためにはとりあえず問題を単純化する必要があること、以上二つの理由からである。また、リスクを「時間あたり」の死亡率としたのは、それが人間の行動に関してもっとも単純な単位であると考えられるからである。この単位を採用することにより、まったく異なる種類の行動の危険について、例えば、飛行機に乗っていて事故で死亡するリスクと、家庭で火災により死亡するリスクとを直接に比較することも可能となる。この定義では、対象となる行動にかかわる時間を正確に算出することが必要となるが、その方法は新たな問題となる。まず考えられるのが、公的に行われている統計の利用である。しかし、かかわる時間を直接表現する統計値が示されていることはまずありえず、したがって、統計に示されている様々な統計値からなんらかの方により算出する方法をとらなければならないわけだが、その計算方法の妥当性には問題も残る。また、かかわる時間を算出するための適当な原データを手にいれることができない場合もある。そこで、かかわる時間を算出するのが非常に難しい行動については、時間あたりの死亡率にできるだけ近く、かつ、比例すると判断される値を用いることとした。別種の行動のリスクを相互に比較することは不可能になってしまうが、本研究の主な目的は単一の行動のリスクが経年とともにいかに変化するかを考えることにあるので、差し支えはない。—— 例えば、交通機関のリスクを算出する際には距離あたりの死亡率をリスクとすることが考えられる。本研究では自動車事故による自動車運転者及び乗員のリスクとして、自動車走行台キロあたりの死亡率を用いている。

3. リスクを因子とする行動分析モデル

人間がリスクをどのように知覚し、知覚したリスクに対してどのように行動しているかを説明するためのモデルが図1である。このモデルを組み立てるにあたっては、ワイルドが提唱した³⁾「事故率と自動車運転者の行動の関係をあらわす恒常性モデル」を応用した。ワイルドの研究は自動車運転者の運転中の個人行動についてのものであるが、それ以外の行動にも拡張して考え、自動車運転者以外の様々な行動や、個人を合わせた人間の社会行動にも応用できると考える。

このモデルは、リスクの経年変化を、フィードバックによる自動制御の問題として扱おうとするものである。

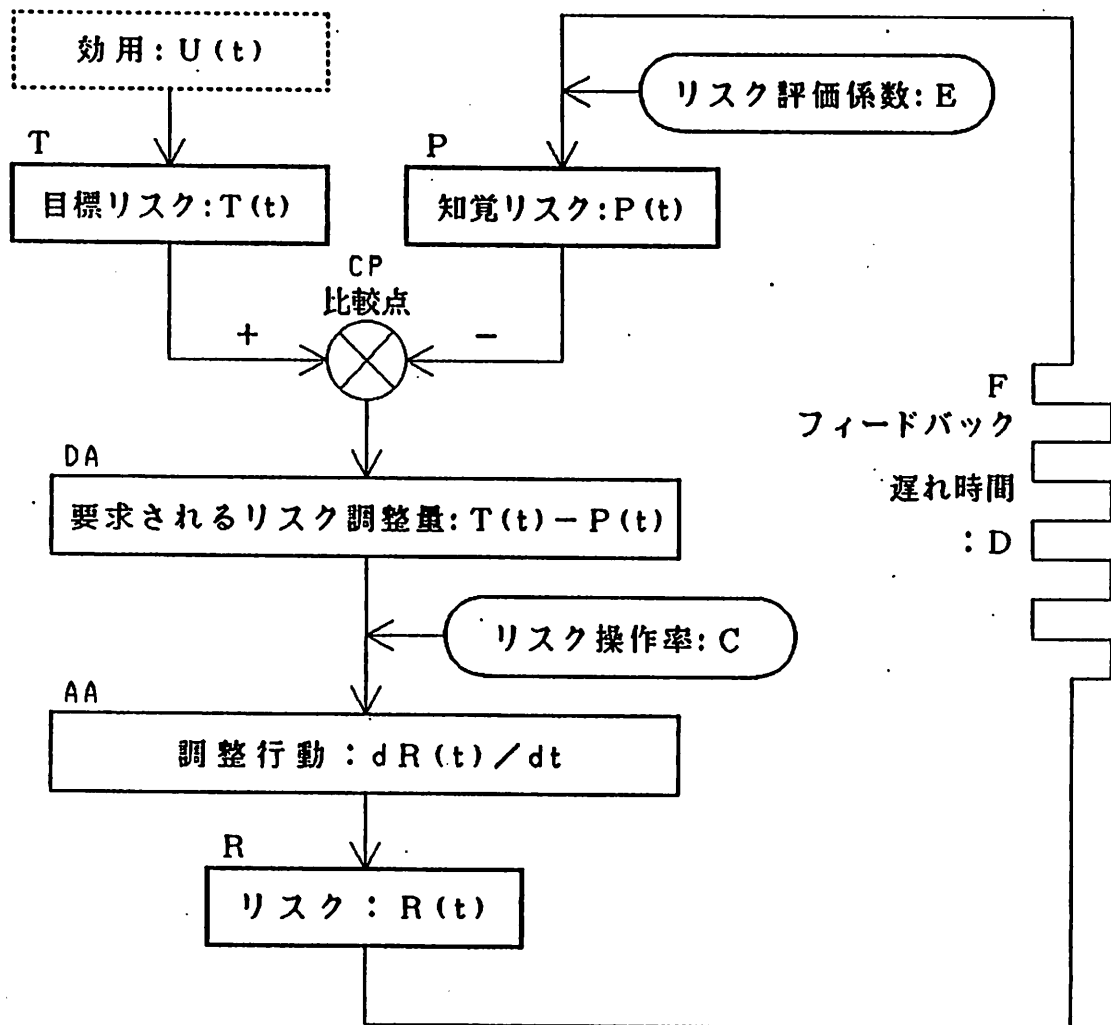


図1. リスクを因子とする行動分析モデル

まず、図1の各項目について説明する。

①効用 U

行動によってこうむる利益と損失に対する総合的評価であり、人間がその行動を取ろうとする動機の大きさに直接関連するものである。損失に対して利益が大きいほど効用は大きい。「人間がある特定の乗り物を使って移動する」という行動を例にとると、利益として考えられるものには、その乗り物を使うことによって節約される時間、時間的節約から得られる金銭上の利益、乗っているときの爽快感、などがある。また、損失として考えられるものには、乗り物を利用するために支払われる金銭（切符代、ガソリン代など）などがある。こうした様々な利益と損失のバランスから効用は導き出される。多様な要因の影響により、効用 U は経年に従って変化するものと考えられるので、経年の関数 $U(t)$ とする。

スターは、前述の研究で、人間がある行動を取るときその行動が自発的な行動であるときその行動のリスクは比較的高い値に収束し、非自発的な行動であるときその行動のリスクは比較的低い値に収束することを指摘しているが、この「自発的か非自発的か」という尺度も、効用 U に含めて考えることができる。効用が高いからこそ人間は自発的に行動するわけで、すなわち、自発的な行動は効用が高く、非自発的な行動は効用が低い。

②目標リスク T

目標リスク T は、ここまでなら冒してもかまわない、言い替えれば、これ以上は受忍することができないというリスクのレベルである。目標リスク T は効用 U により定まる値で、 U が大きければ大きいほど（損失に対して利益が大きいほど） T も大きい。 T の単位はリスクの単位と同じであり、第2章で採用した定義を用いれば、かかわる時間あたりの死亡率（対象とする行動による死亡者数／かかわる人数／かかわる時間）として表現される。経年とともに効用 U が変化すれば目標リスク T もそれにしたがって変化する。よって、 T は経年による関数 $T(t)$ で表す。

効用 U から目標リスク T がどのように決まるのかはあきらかでないが、スターの前述の研究によれば、各種鉱業労働者の時間あたり賃金とそれぞれの労働災害によるリスクのデータから、ある行動を取ることにより冒されるリスクのレベルは得られる賃金の3乗に比例していることを指摘した。この関係が一般性をもつとすれば、効用 U と目標リスク T もこれに類する関係を持つことが考えられる。

③知覚リスク P

たいていの人間は自動車に乗っているときよりも飛行機に乗っているときの方

が不安を感じる。しかし、統計から算出されるリスクを比べると、飛行機よりも自動車の方が圧倒的にリスクは高いのである。このように、統計からはじき出されるリスクのレベルと人間が感じているリスクのレベルの食い違いは、人間行動の様々な場面においてしばしば見られる。こうした、対象となる行動に対して人間が主観的に感じているリスクのレベルを、ここでは知覚リスクPと呼ぶこととする。同じ行動に対しても、個人個人がそれぞれ異なる知覚リスクのレベルを持っている。人間の態度や立場の違いに基づく知覚リスクの食い違いをパーセプション・ギャップという。一般に、科学や技術に好意的でない態度の持ち主は知覚リスクが高めになり、リスクの発生する場面に深く関わっている者は知覚リスクが低めになる傾向がある（木下、1987⁴¹）。個人の知覚リスクは総合されて社会的な知覚リスクのレベルをつくりあげているものとする。また、知覚リスクPは、得られる情報に大きな影響を受ける。個人の場合なら、例えば、知人が交通事故で死亡したという情報を得たとすれば知覚リスクPは大きくなるであろう。また、社会の場合は、例えば、交通事故による死亡者数が急激に増加しているということが報道でひろまれば知覚リスクPは大きくなると考えられる。このように、知覚リスクPは経年により変化する値であるので、経年 t の関数 $P(t)$ と表す。単位は、目標リスクと同様にリスクの単位と同じで、第2章で採用した定義を用いれば、かかわる時間あたりの死亡率（対象とする行動による死亡者数／かかわる人数／かかわる時間）として表現される。

④比較点 CP

このポイントで目標リスクと知覚リスクの大小が比較される。すなわち、 $T - P$ という計算を行っているということである。人間があらゆる場面においてこのような計算を意識的に行っているわけではないにせよ、人間がある行動を取ろうとするときには、漠然とした形であれ、こうした計算は必ず行われているはずである。

⑤要求されるリスク調整量 DA

比較点CPでの計算結果が出力される。 T と P の値が等しければ、人間にとって理想的な状態だが、どちらか一方がもう一方に対して大きいときには、両者の値が等しくなるようにしたいという要求が生じる。 $T - P$ は要求されるリスク調整量を表す。単位はリスクの単位である。

⑥調整行動 AA

T と P の差をゼロにしたいという要求に対して、人間は様々な反応行動をとる。自動車に乗るという行動を例にとれば、目標リスク T が知覚リスク P より小さい

とき、人間は速度を上げるのを控え目にする、シートベルトを締める、慎重な運転を心がける等の対策をこうじるであろう。 $dR(t)/dt$ は、こうした調整のために実行される行動の量を表すものである。

⑦ リスク R

様々な人間が様々な調整行動を行なった結果が総計されてリスクRとしてはじき出される。リスクRは、対象となる行動の客観的な危険の尺度を示す値であり、統計調査のデータから算出される。リスクの定義としてここでは、第2章に記したとおり、対象とする行動にかかわる時間あたりの死亡率（あるいはそれに準じたもの）を用いることとする。経年によって変化する値であるので、経年 t の関数 $R(t)$ と表わす。リスクRは、このモデルのシステム全体のアウトプットである。

⑧ フィードバック F

リスクRはフィードバックして知覚リスクPに作用する。リスクRが知覚リスクPに影響を与えるまでには、ある程度の時間の経過が必要となる。例えば、それは統計データを集計するのに要する時間や、統計に関する情報がマスメディアによって広まるのに要する時間などである。遅れ時間をDで表わす。

⑨ リスク評価係数 E

知覚リスクの項で述べたように、実際のリスクのレベル（リスク）と人間が感じているリスクのレベル（知覚リスク）はしばしば異なっている。リスク評価係数Eは、リスクに対する知覚リスクの大きさを決める係数である。前に挙げた例でいえば、自動車に乗るという行動では評価係数が小さく、飛行機に乗るという行動では評価係数が大きいということになる。リスク評価係数Eは無次元数である。

⑩ リスク操作率 C

DAで要求されるリスク調整には、そのための方策を見つけ出し決定するための技術や、行なおうとした方策を確実に実行するための技術が必要となる。リスク操作率Cは、そうした技術の大きさを示すものである。安全工学においてなされている研究は、大部分がこのリスク調整率を高めることに関わっていると考えられる。単位としては、[行動量/リスク]で表わされる。

次に、このモデルのシステムについて解説する。

まず、取ろうとしている行動から予想される効用により、目標リスクTが決まる。Uが大きいほどTも大きい。Tの決定に並行して、知覚リスクPが決まる。TとPは、比較点で大小が比較され、 $T - P$ の計算結果が要求されるリスク調整量DAとしてはじき出される。DAの大きさに応じて、その要求を満たすような

企てが実行されるが、そこにはリスク操作率Cが関わっている。多数の人間によって調整をうけた行動が、ある期間で総計されて、リスクRとして出力される。リスクは、このシステム全体の出力である。Rは統計値などの形で、遅れ時間Dを伴いながら、リスク評価係数Eの作用を受けて、知覚リスクPにフィードバックする。こうして、 $P \rightarrow CP \rightarrow DA \rightarrow AA \rightarrow R \rightarrow F \rightarrow P$ というループがつくられる。T、P、Rは経年tによって変化する関数 $T(t)$ 、 $P(t)$ 、 $R(t)$ である。ただし $T(t)$ は、ループの外にあるので、 $U(t)$ 以外の項には影響を受けない。

なお、このモデルでは、効用U、目標リスクT、知覚リスクP、リスクRの4つの項を経年の関数として扱っているが、実際には遅れ時間D、リスク評価係数E、リスク操作率Cも経年とともに変化していると考えられる。しかし、本研究では、単純化のために定数として取り扱うこととする。

4. リスクの経年変化モデル

図1の行動分析モデルのメカニズムによって、リスク $R(t)$ の経年による変化が $P(t)$ とどのように関係しているのかを、概念的にあらわした例が図2である。ここでは、単純化のために、目標リスク $T(t)$ が一定($T(t)=T$)としている。

第3章で説明したように、 $R(t)$ は T と P の差を打ち消すように調整行動がおこなわれた結果を示す値である。したがって、経年 t において、 $T(t) > P(t)$ の期間($II < t < IV$, $VI < t < VIII$)では $R(t)$ は増加し、 $T(t) < P(t)$ の期間($I < t < II$, $IV < t < VI$)では $R(t)$ は減少する。また、 $T - P$ の値が最大となる t (III, VII)において $R(t)$ が増加する速度は最大となり、 $T - P$ の値が最小となる t (I, V)において $R(t)$ が減少する速度は最大となる。RからPまでのフィードバックに遅れ時間 D があるので、 $P(t)$ は $R(t)$ に対してつねに D だけ遅れて変動する。

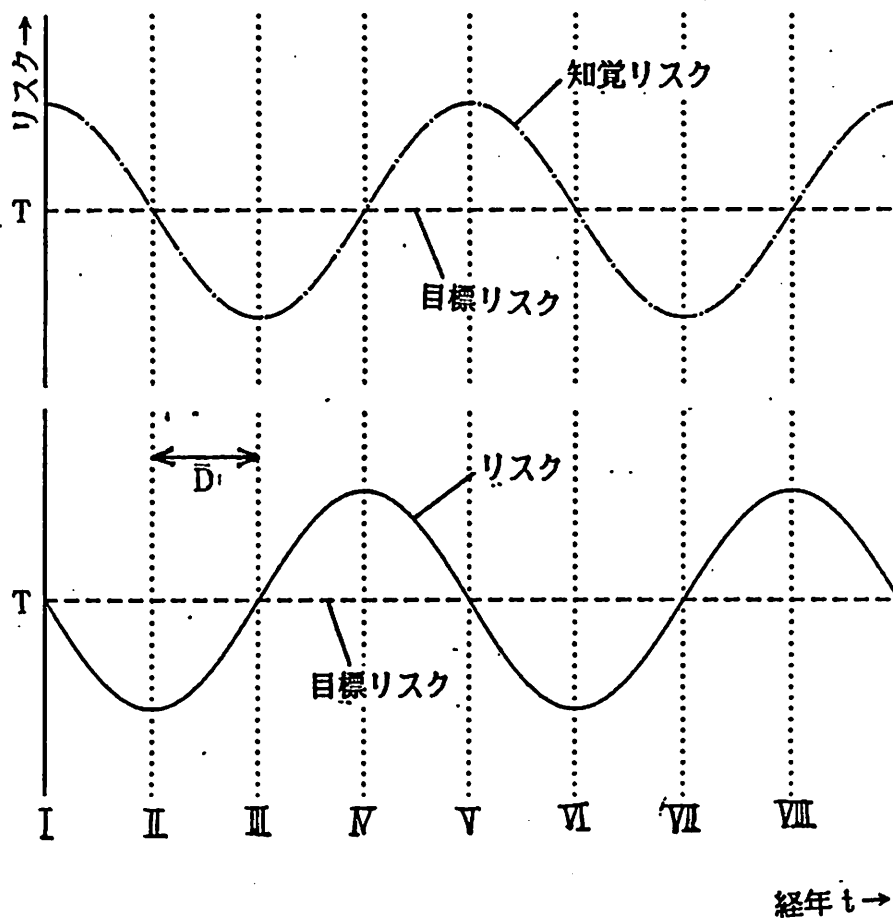


図2. リスクの経年変化モデル

5. リスク経年変化の数式モデル

図1のモデルから、 $T(t)$ 、 $P(t)$ 、 $R(t)$ の3つのリスクの関係を数式により示す。
 $P(t)$ は、 D 期間前の R に E が係数としてかけられたものとして、

$$P(t) = E \cdot R(t-D) \quad \dots\dots (a)$$

と、あらわすことができる。また、 $T(t)$ と $P(t)$ の差から要求されるリスク調整量にリスク操作率 C をかけたものが調整のためにおこなわれる行動量であるとして、

$$\frac{dR(t)}{dt} = C \cdot \{T(t) - P(t)\} \quad \dots\dots (b)$$

と、おくことができる。(a)、(b)の2式より、 $R(t)$ を以下の式で示すことができる。

$$\frac{dR(t)}{dt} = C \cdot \{T(t) - E \cdot R(t-D)\} \quad \dots\dots (c)$$

これで、 C 、 E 、 $T(t)$ およびある期間 D における $R(t)$ を与えてやれば、 R が t の関数として求められることになる。

単純化のために、 T が一定($T(t) = T$)であるとする。このとき(c)式は、

$$\frac{dR(t)}{dt} = C \cdot \{T - E \cdot R(t-D)\} \quad \dots\dots (c)$$

となる。ここで、期間 $0 \leq t \leq D$ で $R(t) = R_0$ とすると、
 $(0 \leq t \leq D : R(t) = R_0)$

$$D \leq t \leq 2D : R(t) = R_0 - D \cdot K + K \cdot t$$

$$2D \leq t \leq 3D : R(t) = R_0 - D \cdot K + (1 + C \cdot E \cdot D) \cdot K \cdot t - \frac{1}{2} \cdot C \cdot E \cdot K \cdot t^2$$

$$3D \leq t \leq 4D : R(t) = R_0 - D \cdot K + (1 + C \cdot E \cdot D) \cdot K \cdot t - \frac{1}{2} \cdot (1 + C \cdot E \cdot D) \cdot C \cdot E \cdot K \cdot t^2 + \frac{1}{6} \cdot K \cdot (C \cdot E)^2 \cdot t^3$$

⋮

$$nD \leq t \leq (n+1)D : R(t) = R_0 - D \cdot K + (1 + C \cdot E \cdot D) \cdot K \cdot \sum_{i=1}^{n-1} \frac{(-C \cdot E)^{i-1}}{i!} \cdot t^i + \frac{K \cdot (-C \cdot E)^{n-1}}{n!} \cdot t^n$$

$$\text{ただし } K = C \cdot (T - E \cdot R_0)$$

これを書き換えると、

$$nD \leq t \leq (n+1)D : R(t) = R_0 + \left(\frac{T}{E} - R_0 \right) \cdot \left\{ 1 + \frac{C \cdot E \cdot D \cdot (-C \cdot E \cdot t)^n}{n!} - (1 + C \cdot E \cdot D) \cdot \sum_{i=0}^{n-1} \frac{(-C \cdot E \cdot t)^i}{i!} \right\}$$

C、E、Dの値により、 $R(t)$ は発散、収束、振動収束、振動発散と、様々な変化の形をとる。Cを変えたときの計算例を図3に、Dを変えたときの計算例を図4に示す。

C、Dの値にかかわらず、収束するとき、その収束値は T/E である。

とくに、 $D=0$ のときは、 $T(t)=T$ （一定）として、

$$R(t) = \left(R_0 - \frac{T}{E} \right) \cdot e^{-C \cdot E \cdot t} + \frac{T}{E} \quad \dots\dots (d)$$

となる。図5に示すように、Cは収束する速度を決定する因子である。

この数式モデルから、リスク操作率Cを高めても、リスクが目標リスクに達するまでの時間を短縮させはするものの、最終的に収束していくリスクのレベルを下げることはできないことがあきらかになる。

そしてさらに、リスクが収束するまでの時間を最短にするリスク操作率が存在することがあきらかとなる。つまり、例えば図3において、 $C=0.2$ では単調に減少しながらTに収束し、 $C=0.7$ では振動しながらTに収束しているが、 $C=0.2$ と $C=0.7$ のあいだに振動しない範囲で最小となる $C=C_x$ が存在し、そのときリスクRは最も短い時間で収束することになる。

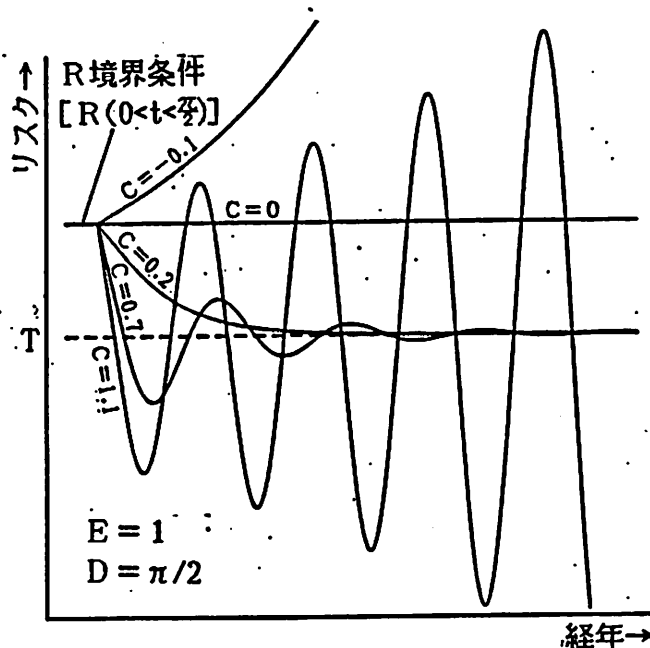


図3. 数式モデル計算例 (A)

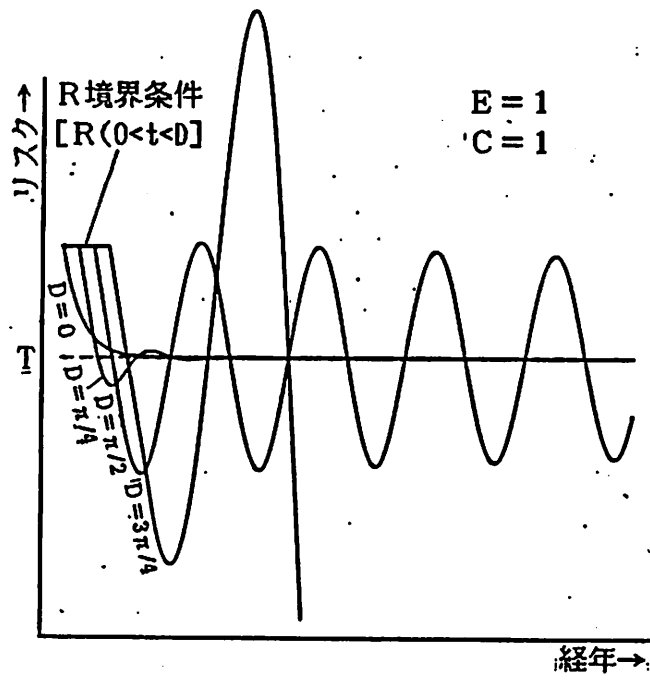


図4. 数式モデル計算例 (B)

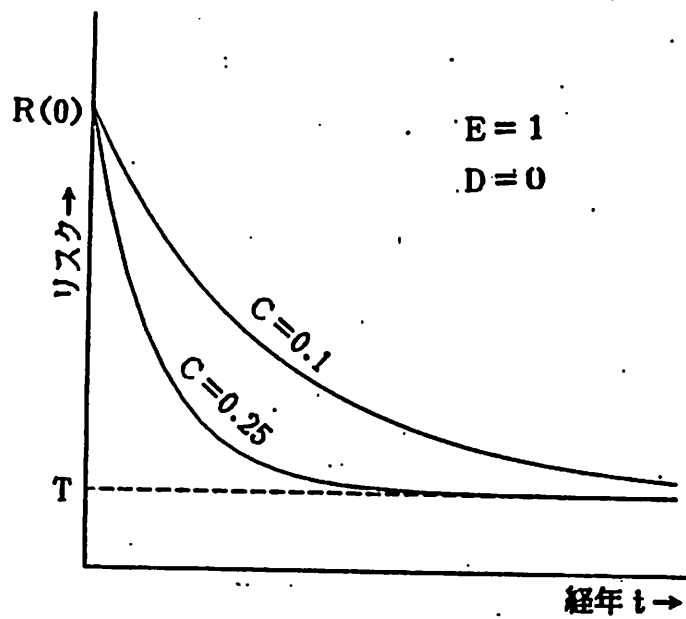


図5. 数式モデル計算例 (C)

6. 統計値と計算値の比較

前章で求めたリスク経年変化の数式モデルからシミュレートされる計算値と実際の統計値とを、自動車事故のリスクにおいて比較する。

図6は自動車運転者と乗員の自動車事故のリスクの計算値と統計値を重ねたものである。最初のD期間（1959年から1960年まで）の各年のリスクを直線で結んだものをRの境界条件として、そのあとの期間（1960年から1985年まで）を第3章の(c)式からパーソナル・コンピュータによって計算している。リスクをあらわす統計値として、ここでは輸送人キロあたりの死亡者数を用いた。使用した統計資料は、死亡者数が人口動態統計⁵⁾⁶⁾、輸送人キロが道路統計年報⁷⁾である。計算にあたっては、 $T(t) = T$ （一定）として、 T 、 C 、 E 、 D の値をそれぞれ仮定している。

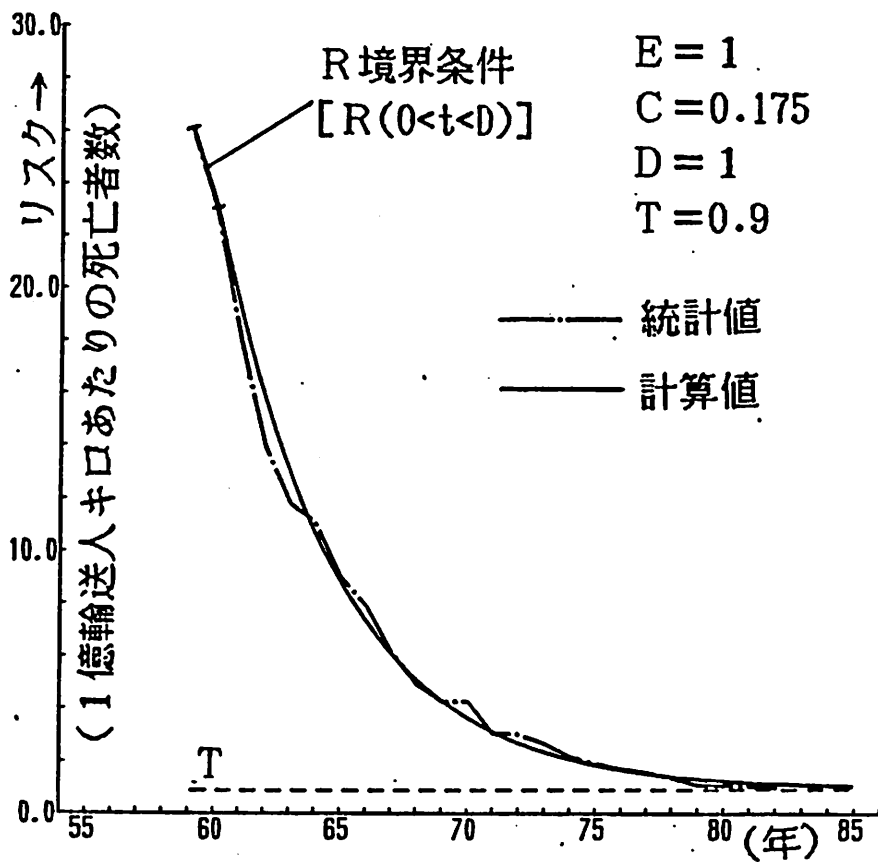


図6. 運転者・乗員の自動車事故リスク

図7は歩行者の自動車事故のリスクの計算値と統計値を重ねたものである。最初のD期間（1957年から1963年まで）の各年のリスクを直線で結んだものをRの境界条件として、そのあとの期間（1963年から1985年まで）を同じく第3章の(c)式からパーソナル・コンピュータによって計算している。リスクをあらわす統計値として、ここでは日本の総人口あたりの死亡者数を用いた。使用した統計資料は、死亡者数、総人口ともに人口動態統計^{5) 6)}である。計算にあたっては、 $T(t) = T$ （一定）として、 T 、 C 、 E 、 D の値をそれぞれ仮定している。

ここでは、1980年以降で統計値と計算値が大きく食い違っている。その原因としては、歩行することの効用（損失に対する利益の大きさ）が変化していることが考えられる。ある地点から別の地点に移動するとき、乗り物（自動車、バス、地下鉄など）に乗って移動するのと歩行で移動するのを比べると通常の場合、歩行の方が時間の損失が大きい。時間の損失について非常に重くみるようになって、効用が減少し、その結果、目標リスク T が現実にはここで仮定した値よりもかなり小さくなってきていることは十分に想像されることである。

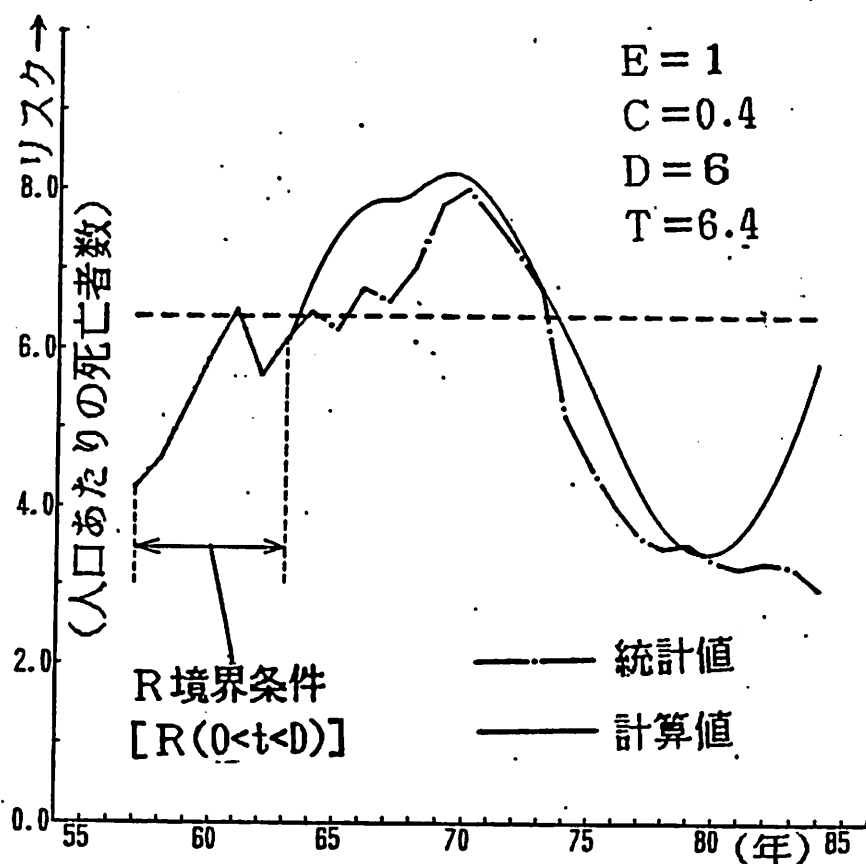


図7. 歩行者の自動車事故リスク

7. 考察とまとめ

本研究で使った危険に関する行動分析モデルと、それをもとにしてつくられた数式モデルにより、危険に関わるさまざまな要素が、リスクの経年変化にどのように影響を与えるかがある程度まであきらかになった。すなわち、

①一般的に、リスクは目標リスクに対して主観的に感じているリスクのレベル（ T/E ）に収束していく。このことは、スターのいうリスク安定化現象をよく表現している。

②リスク操作率を高めることは、リスクが収束するまでの時間を短縮させはするものの、最終的に収束するリスクのレベルを下げることはできない。すなわち、危険に対して工学的な対策を施してみても、一時的な効果はあるものの、リスクを本質的に下げたことにはならない。リスクを恒久的に下げるには工学的な対策とともにリスクに対する人間の考え方が変わることが必要である。

③リスクを最短時間で収束させるリスク操作率が存在する。リスク操作率がそれより小さいと目標リスクに達するまでの時間が長くなり、それより大きいと振動してしまう。工学的な安全手段をどんなに積み重ねても、それは危険の制御に関して最適な方法ではなく、適度な安全対策が結局は最も効率的な危険制御の方法となる。

本研究では、リスクの収束レベルを決める最大因子である目標リスクがどのようにして定められるのかという問題についてはふれることができなかった。具体的な危険行動について、このモデルの適用を進めていくには、この問題の解明がまず必要とされる。

●参考文献

- 1) Chouncey Starr, Social Benefit versus Technological Risk, Science 165, September 1969
- 2) Charles Vlek and Pieter-Jan Stallen, Rational and Personal Aspect of Risk, Acta Psychologica 45 1980
- 3) Gerald J. S. Wilde, The Theory of Risk Homeostasis: Implications for Safety and Health, Risk Analysis, Vol.2, No.4, 1982
- 4) 木下富雄, 安全の心理学 — リスクとリスク知覚の問題を中心に — , Isotope News 1987年5月号 別刷
- 5) 厚生省大臣官房統計調査部, 不慮の事故及び有害作用死亡統計(人口動態統計特殊報告), 1984
- 6) 厚生省大臣官房統計調査部, 人口動態統計, 昭和32~60年版
- 7) 建設省道路局企画課, 道路統計年報, 1984年版