

公開シンポジウム
地球環境基準設定にむけて—
地球温暖化による
環境・社会経済影響研究の方向

A report of the Symposium on Environmental and Socio-Economic Impact
Induced by Global Warming
— towards establishing global environmental standards

期日 平成元年12月12日

会場 国立公害研究所

西岡秀三 編

Edited by S. NISHIOKA

THE NATIONAL INSTITUTE FOR ENVIRONMENTAL STUDIES

環境庁 国立公害研究所

地球環境基準設定にむけて—地球温暖化による環境・社会経済影響研究の方向—
報告書刊行にあたって

本報告書は、平成元年12月12日に当研究所大山ホールにおいて開かれた公開シンポジウム「地球環境基準設定にむけて—地球温暖化による環境・社会経済影響研究の方向」の結果をとりまとめたものである。

本シンポジウムは、2件の基調講演と13件の研究状況報告及び5件の問題提起に導かれたパネルディスカッションで構成された。当日は所内外から200名を越える参加者があり、活発な討論が行われた。

シンポジウムの前半で、地球温暖化の環境・社会・経済影響研究の方向づけの一環として、先駆的に「地球環境基準」を設定するとして、そのためにはどのような考え方がいるのか、何を研究しなければならないか、についての討論を行った。後半はすでに各方向で始まっている影響研究の状況について産・官・学の各研究者から報告を得た。

本報告はこのシンポジウムの速記録を基にし、講演者が校正したものをとりまとめたものである。

本シンポジウムの実施は、国立公害研究所で本年度形成された「地球温暖化影響研究グループ」が担当し、報告書のまとめは総合解析部環境管理研究室長 西岡秀三が行い、編集作業は滝沢美幸嬢の手をわずらわした。

本報告書の刊行が、地球環境問題に対する施策を実行に移すに際し、現時点における方向づけの一助になれば幸いである。

平成2年3月24日
国立公害研究所 総合解析部長
内藤 正明

目 次

あいさつ	国立公害研究所 所長 不破敬一郎	1
第Ⅰ部 地球環境基準の設定		
1. 基調講演：地球温暖化への対応の手順	東京大学 松原 望	5
2. パネルディスカッション：地球環境基準の設定の問題点		
2.1 「環境容量」はきめ得るか	国立公害研究所 内藤 正明	18
2.2 地球環境保全政策における基準の意味	環境庁 小林 光	28
2.3 温暖化防止対策の見通し	工社連-経済研究所 小川 芳樹	32
総合討論		
第Ⅱ部 温暖化影響研究の現状		
3. 基調講演：気候変動の環境影響研究の方向	お茶の水女子大学 内嶋善兵衛	63
4. 研究状況報告		
4.1 IPCCにおける検討状況	環境庁 山村 尊房	75
4.2 米国における研究	東京大学 花木 啓祐	80
4.3 エネルギー分野	電力中央研究所 西宮 昌	86
4.4 農業分野	農業環境技術研究所 宇田川武俊	94
4.5 水文・水資源分野	土木研究所 吉野 文雄	99
4.6 沿岸影響	港湾技術研究所 細川 恭史	107
4.7 大気汚染	桜美林大学 大喜多敏一	112
4.8 健康影響	国立公害研究所 村上 正孝	115
4.9 人間居住	EX都市研究所 C. Rouviere	118
4.10 地域研究	北海道大学 山村 悦夫	135
4.11 WCIPの状況(CIES 1991年会議)	筑波大学 甲斐 憲次	138
4.12 国立公害研究所の取り組み	国立公害研究所 西岡 秀三	141
4.13 環境庁の研究計画	環境庁 国安 俊夫	143
5. パネルディスカッション：地球環境基準設定に向けた影響研究の課題		
5.1 気候予測モデルの開発状況	気象研究所 野田 彰	148
5.2 社会・経済影響をどう見るか	国立公害研究所 森田 恒幸	158
総合討論		
あいさつ	国立公害研究所 副所長 小泉 明	173

あいさつ

国立公害研究所長 不破 敬一郎

「地球環境基準設定にむけて」、副題として「地球温暖化による環境・社会経済影響研究の方向」というシンポジウムを本日、研究所の総合解析部が中心となって計画いたしました。皆さん大変お忙しい時期に、あるいは講師として、あるいはディスカッションのためにお集まりいただきまして、大変感謝にたえません。

いわゆる地球環境問題の中で、地球温暖化の問題が最も重要な課題の部分であろうと考えております。学際的、国際的、そして各省庁の境を超えて省際的の3つがうたい文句になっているようです。政府内では環境庁長官が担当の大臣ということになり、この問題に対する全体の調整役を果たすことになっています。

9月に行われた東京会議では、幾つかの提言、勧告が出ましたが、その1つに、“不確かさ”を除くためのモニタリングやサイエンティフィックな研究の必要性を最初に強調してあります。地球環境研究センターといったものを各国に設けて、国際協力のもとでこうした研究をやるべきであるということになっております。環境庁や私どももその方向に向けて努力をしているところです。

また、先ごろ、オランダでのノールドベイク宣言に、長官と環境庁のスタッフが参りまして、とりまとめを一生懸命やったというので、結果につきましてはいろいろご批判なども聞いておりますが、日本の努力で一致して宣言にこぎつけられたことに感謝もされているという事情を、あるいはご存じであろうかと思えます。

本日のプログラムを拝見いたしますと、大学、省庁、研究所の皆様、エキスパートの方々のお話が並んでおります。どうか本日一日、忌憚のないご熱心なお話とご討論をお願いする次第でございます。本日は大変ありがとうございました。

第 I 部
地球環境基準の設定

1. 基調講演 地球温暖化への対応の手順

東京大学 松原 望

「シンポジウムのねらい」中に次の5つの課題が出ておりますが、この5つの課題にどのような分析法が対応可能かということを中心に話をいたします。

- (1) 温暖化の予防には相当のコストがかかるのではないか
- (2) どこまで対策を打てば環境は守られるのか
- (3) 環境はそんなにまでして守らねばならないのか
- (4) どれくらいの変化速度ならば環境は追従できるのか
- (5) 環境に対しどのような適応策が打てるのか

「不確実性下の意思決定」ということを専門にする立場から、この温暖化問題についてどのようなアプローチが可能か、どんな方法があり得るかということについて、不確実性下の意思決定のツール・ボックスの中から、これに参考になりそうだと思う方法を少しピックアップしてみ、どんなふうの問題を切り取ってこれに対応すればいいかというお話をさせていただきます。この問題は始まったばかりで、確実にこれである、この式を解けばいいという段階まで、まだ来ていませんので、今のところは基本的にはこういう方向の対応が可能ではないかという、やや漠然とした話にならざるを得ません。

意思決定には、①対象の状況、②行動選択の範囲、③一定の状況のもとで特定の行動をとったときの結果の評価、この3つぐらいの要素があります。

私は特に不確実性を含んだ意思決定の問題を専門にしてきましたが、この問題が地球温暖化問題に非常に有効ではないかと考えます。情報は若干はあるが、確定的には何もわかっていない、しかしながら行動は今とらないと何らかの意味において手おくれになるから、不確実性のまま意思決定をしなくてはいけない。そういうやむを得ない場合において、意思決定を適切にどのように行えばいいか、この問題が不確実性下の意思決定で、通常は確率論とか統計学の課題として扱われてきました。私の専門はもともと確率論と統計学ですが、社会科学の分野に応用していますので、地球温暖化の問題はこちらから見ると良い適用の分野になります。

ふつう、「意思決定理論」というのは、「決定分析」とか「決定科学」などと言われており、非常に多様な分野を含んでおります。例えば「効用理論」がありますし、「線形計画」、「ポートフォリオ理論」、「統計的決定理論」、「ゲーム理論」など、それぞれの分野に分けることができるわけです。

具体的に言いますと、先ほど申しました不確実性下の意思決定の問題でシンボリックな例とし

てよく使われる例が、朝、家を出るときに、今日の天気の状態が晴れか曇りか雨か、3つの状態があり得るとして、それがわからない状況において、雨具を持たないでいくか、傘を持っていくか、あるいは傘を持って雨靴を持っていくか、どの行動にしようかということです。我々は朝出るときに当然迷うとともに、しかしどれかをとらなくてはいけないのです。まさかこの問題自体を理論的に解くことはありませんけれども、例えば、こういうものに含まれている本質的な問題を取り出して数理化したものが、「不確実性下の意思決定」(decision making under uncertainty) というわけです。この問題が、実は温暖化問題と共通している部分があります。将来どのような状態になるか具体的にはわからない、しかしながらどれかの行動を我々はとらなくてはならない。例えば、とるとすれば対策のどの選択肢をとるのか、あるいは全くとらないのか、それを今決めなくてはならないという問題です。これは温暖化問題にとって、最初の取り組み方であり

ます。例えば、天候の状態がきょうは3種類、朝とるべき選択肢が3つという例を、先ほどの雨の問題でいいました。一般的に言えば、状態の数は n 個、とり得る行動の数は m 個というマトリックスが考えられるわけです。この例は状態の数が4個、可能な行動の数が4個あります。この2、2、0、1という数字は、各 θ_i に対して一定の行動をとったときに、どれぐらいの利得ないしは損失が考え得るか評価が定まっている、この数字が与えられている。この表が与えられているならば、どのような行動をとればいいのか、こういう問題が意思決定の最初です。

	a_1	a_2	a_3	a_4
θ_1	2	1	0	1
θ_2	2	1	4	3
θ_3	0	1	0	0
θ_4	1	1	0	0

表1.1

意思決定理論家は、普通はいろいろなことを考えます。例えば、よく行われるのが「意思決定基準」を定めることです。ここでは「状態」の「空間」、統計学では「母数空間」といいますが、状態が k 個あり、行動が l 個あるとして、先ほどの図を u_{il} とします。 θ_i と a_j の組み合わせに対してどれぐらいの利得が得られるか、その価値を u_{il} とします。それが先ほどのマトリックスです。それに対して、どのようにこれを処理して、それから行動を抜き出すかということです。

まず、第1番目には「ラプラスの基準」があります。「ラプラスの基準」は、この表の、それぞれの θ が4分の1の確率で起こり得ると考えて、それぞれの4分の1ずつのウェイトで2、2、0、1を加重平均し、単純平均をそれぞれ考えて、最大の単純平均を与えるものを適切な行動と

0、1を加重平均し、単純平均をそれぞれ考えて、最大の単純平均を与えるものを適切な行動としてとる。

なぜ等しい確率を置くかといいますと、我々が全く何もわからないときは、等しい確率を置く以外に理由が見当たらない。やや消極的ですが、それがラプラスの基準です。

次の「ワルドの基準」は、最小利得の最大化です。2、2、0、1の中では、0が一番ひどい結果ですので、最悪の結果を想定しながら、最悪で見て最善をとる。ですから、それぞれの打つ手に対しての前歴は0、1、0、0となり、どのように見ても、常識でいえば a_2 が最悪でも1を保証します。最も保守的に考えて最悪の場合を考え、その中で最善を得る。これが「ワルドの基準」です。

「ハーヴィッツの基準」は、これは先ほどのワルドの基準とは逆で、“最善”の基準といいますが、最も楽観的に考えて、一番いいものが実現するとする。これは根拠がないのですが、とにかく、楽天的な人は最善が実現すると考えるでしょう。最も楽天的な場合と最も悲観的な場合とを一定の割合 α 、 $1-\alpha$ で入れて、それが最大になるような行動を選ぶ。これが「ハーヴィッツの基準」です。他に「サベジの基準」とか、いろいろな基準がありますが、要はいろいろな決定基準があるということです。これが意思決定理論の最もエレメンタリーな部分ですが、まとめておきます。

i) ラプラス(Laplace)の基準：平均利得の最大化

$$\lambda_l(j) = \sum_{i=1}^k u_{ij} / k$$

を最大化する a_j を a^* とする。

ii) ワルド(Wald)の基準：最小利得の最大化

$$\lambda_w(j) = \min_i \{u_{ij}\}$$

を最大化する a_j を a^* とする。マクシミン利得基準ともいう。最悪を想定するという意味で、悲観主義の立場に立つ。

iii) ハーヴィッツ(Hurwicz)の基準：ワルドの基準の緩和。 $0 < \alpha < 1$ として

$$\lambda_h(j) = \alpha \max_i \{u_{ij}\} + (1-\alpha) \min_i \{u_{ij}\}$$

を最大化する a_j を a^* とする。

第1項は、最善が実現するという楽観主義の前提に立脚している。

iv) サベジ(Savage)の基準：最大機会損失の最小化

$$\lambda_s(j) = \max_i \{r_{ij}\}$$

を最小化する a_j を a^* とする。

ただし $r_{ij} = \max_i \{u_{ij}\} - u_{ij}$ は得べかりし最大利得からの失敗量(リグレット regret という)であり、経済学では機会損失(opportunity loss)といわれる。この基準はミニマックス損失基準、リグレット基準ともいう。

これがどのように役に立つかですが、「温暖化の予防には相当のコストがかかるのではないか」という課題(1)に適用できます。先ほどの θ_1 、 θ_2 、 θ_3 、 θ_4 という4つの状態を考えて評価をしました。一定のシナリオを考えて、各シナリオごとにいろいろな対応方法を考えると、先ほどのマトリックスができます。さらに、それに対して先の意思決定基準を考えて、その基準で最適な政策を選んで、その最適な政策に対してどれぐらいのコストがかかるかと考え、さらに突っ込みが深くなります。

意思決定問題のやや詳しい問題として、「リスク管理問題」というのがあります。環境リスクという問題が非常に重要な問題となります。これは意思決定問題の各論的な部分ですが、いろいろな研究がなされており、我々として確認したいことは、よき環境を実現するために、「環境を管理する」という立場が必要であるということです。環境を管理するという考えに対し、「環境は管理できるものではない」という考え方もありますが、できるだけよき環境を実現するために適切な行動をあらかじめ打つ、不確実である場合でも、いろいろな手法を利用して適切な行動を打つ、いわば、「よき環境の管理」という立場をとったほうが結局はいいのではないかと思います。そのためには、ただ自然科学的な問題だけではなくて、工学の分野へ問題を移して、その中で、よき環境管理のためにはどのような「現象モデル」が適切かという発想でとらえていくこととなります。例えば、統計学の立場からは、現象に対する「統計的モデル」がありまして、「第一種の誤り」とか「第二種の誤り」という概念があります。これも「リスク管理」の立場に踏み込んだときの考え方の典型的なものです。

「リスク概念」についていえば、「リスクは悪いものだ」という考え方と、「リスクはよいものだ」という考え方と、「リスクはよくも悪くもある」という考え方があります。我々は通常、リスクというのは悪いと考えていますけれども、やや問題を広げてみますと、投資においては、「リスクなくして利益なし」と言われるように、リスクは、いわば企業の経営活動の源泉で、この場合にはリスクはよいものであると考えられます。もっとも、人間というものは古代から、リスクというのは悪い、不吉である、自然は人間に対していろいろな災害を及ぼす危険があるというので、「リスクは悪い」と考えられますけど、現代においては、本来は「リスクはよくも悪くもある」ということとなります。

どうして現在において「リスクが悪い」ものと考えられるようになったかといえば、近代になって人間活動の量が増し、人為的なもの、本来、自然界にないものがたくさん出現してきました。あるいは「人間」の行為の「自然」に対する介入が非常に大量に発生して、それからはね返りとして、リスクが危険なものとしてあらわれる。そういう意味において、我々としてリスクの悪い面に対応しなくてはいけない、と考えられてきているからです。

結局、我々として普通どう考えるかという、リスク概念は企業の基本概念などの基礎として認めると同時に、それから生じるあしき問題に対しては、それに対する「責任」という形で「利益の存するところに責任もまた存する」と考えて、リスクの問題を処理するということとなります。

地球温暖化問題も、学問的にいえばリスク問題として考えられます。それでは、リスク問題に対してどのような管理方法が考えられるか。「リスク管理」という立場から、地球温暖化問題に具体的に踏み込んでいけば、それが意思決定問題の立場から地球温暖化に対応する1つの方法だろうと申しました。ではリスク管理に対してどんな方法が考えられるか。幾つかの方法があると思いますが、管理思想の類型と構成要素を概括的にまず述べてみましょう。

1. 素朴確率論型管理思想 ← (例：古典的社会観察)
「ポリヤのつぼ」モデル (Polya's urn scheme)
2. ゲーム理論型管理思想 ← (例：「自然」の思想)
 - i) 零和の場合
自然対人間：自然は不動で、人間と対抗する
自然(混合戦略)対人間：自然には意思があり、人間と対抗する
 - ii) 非零和(協力ゲーム)の場合 ← 自然と人間はさまざまな関係に入りうるが、
その中には「協力」という関係もありうる。
3. 伝統的帰納理論 ← (例：疫学的因果関係)
統計的仮説(帰無仮説)
統計的観測
因果関係の同定
4. カルマン・フィルター型管理思想 (例：人工衛星の観測)
系の運動方程式(システム方程式)
系の観測方程式
最適推定(追跡)及び制御
5. 統計的決定理論型管理思想 ← (例：品質管理)
系の状態、及びその認識
統計的観測
損失・利得関数
行動決定
6. マルコフ決定過程型管理思想 ← (例：高速道路の交通量管理)
系の状態
損失・利得関数
(制御)行為
系の状態変化
7. 認知科学型管理思想 ← (例：世論と政策決定)
問題決定方式
人間の認知の本質的不確実性

1) まず、「ポリヤの壺」というモデルがあります。これは確率論的なモデルです。確率論では、しばしば壺から球を出すとか、球の色を問題にしますけれども、「ポリヤの壺」というのは非常におもしろいモデルで、最初に b 個の黒い球と r 個の赤い球がつぼの中に入っていて、その中から球を1個出して戻す。そのときに、抜かれた球と同じ色の球を c 個入れ、抜かれた球と反対の色の球を d 個入れると考えます。 c と d がいろいろと設定されますが、抜かれた球と反対の色の球だけを入れる場合を考える($c=0, d>0$)。例えば赤の球が出てきたら、黒の球を入れていきます。例えば、「赤」を交通事故といたします。赤が頻出してきますと、黒の球を入れていきます。「黒」を交通事故のキャンペーンといたしますと、それで対抗していきます。黒の球を入れていきますから、つぼの中身はだんだん黒が多くなり、「赤」つまり交通事故は起こりにくく、黒が出やすくなりますが、それは長く続かない。黒が出やすくなると、赤を入れることになり、黒が稀釈されるからです。そして、逆にまだその後進んでいくことになります。これは交通事故の「キャンペーン・モデル」と言われているモデルです。キャンペーンというのは必然的に、効果が出てくるとだんだん緩んできて、効果が出てきたときには、逆に事故が多くなるような傾向に反転するからです。

温暖化問題に対し、適当な対応をやってよくなると「これでいい」というので、人類が手を緩めてしまうということになりかねない。そういう意味において何らかのアナロジーになるが、大まかなモデルで、赤に対し黒を入れていくことで、「対応」とは言えますが、やや間接的な対応になるであろうと思います。

2) 次に、「ゲーム理論型管理思想」というのがあります。「ゲーム理論」のモデルでは、要するに人間と自然が「対抗的」にゲームをしている。自然は不動で、人間に対して荒々しき自然であり、人間と対抗する。いわば、人間と自然が仲よくお互いに人間が自然を慈しんだり、自然が人間に対して恩恵を与えるというものではない、まさに対抗的な概念です。

「協力ゲーム」もあります。自然と人間はさまざまな関係に入り得るが、その中には「協力」という関係もあり得るということで、協力ゲームという形でとらえる。これもゲーム理論的な管理思想です。哲学的で、工学的には役には立ちませんが、基本的なものの考え方、東洋の自然観という立場から考えますと、あるいは役に立つかもしれません。

3) は、いわば公害の時代の管理思想で、伝統的な帰納理論です。統計的な仮説検定で、自然の中で起こっているいろいろな現象に対して、因果関係を人間が測定して統計的に同定していく、「疫学的因果関係」とかつて言われたものがこれに相当します。自然の因果関係を探ろうというところはこれでいいんですけども、自然に対して何らかの意味において働きかけて、これを「管理する」、「行為をする」立場が、ここでは欠けているということです。

4) は「カルマン・フィルター型管理思想」です。「カルマン・フィルター」というのは、統計学、制御工学、経済学の方面で使われる動的な推論の考え方です。3)と同じようにシステムの状態に対して一定の推論をするが、3)と違うところは、システム自身は動いている、系が運動をしている——環境はそうだと思うんですけども——それを人間が統計的に観察して、その後をフォローする、この考え方が「カルマン・フィルター」です。

シミュレーションをやってみると、その結果は2つの図のようになる。点々がランダムに動くシステムです。これに対して、最初はねらいが大きく離れていますが、時間がたつに従って、ほぼ追従するようにシステムの変化状態をうまくとらえていくような観測モデルがここに出てきます。下の図の場合は、初期的な推定と真の状態にはひどい推定誤差があらわれていますけど、だんだん回を重ねるに従ってフィードバックが効いて、後には完全に系に追従するような観測をするようになる。これがカルマン・フィルターの観測モデルです。これも温暖化問題については、役に立つだろうと思います。

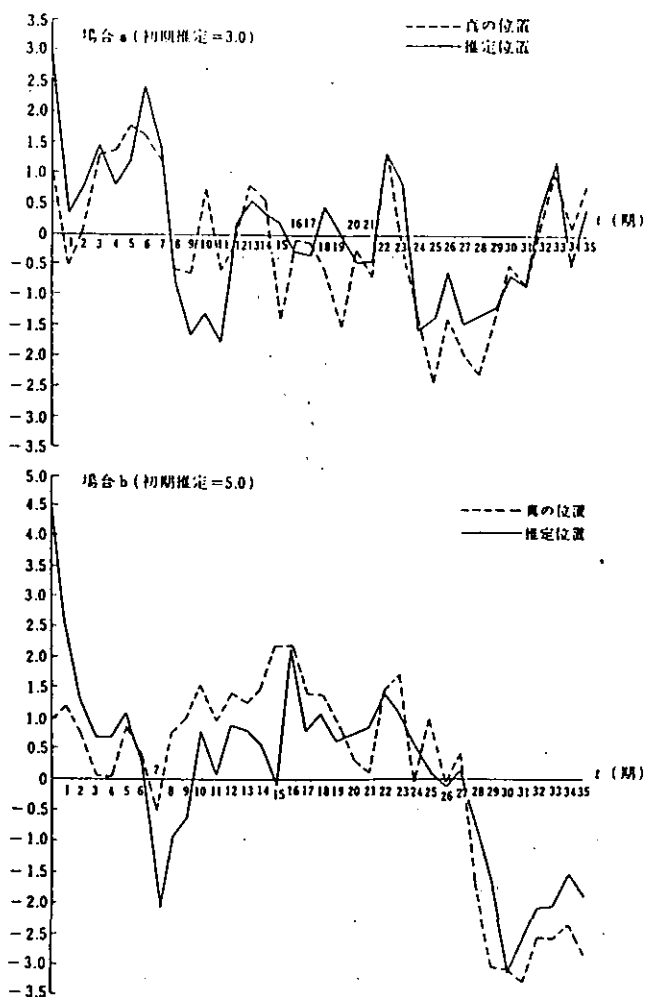


図1.1 カルマンフィルター

「カルマン・フィルター」という考え方に、さらに「制御」という考え方をつけ加えることもできます。そうしますと、典型的に人工衛星の観測のような問題になる。観測して、かつ人工衛星の軌道とか姿勢を制御するという問題が、「カルマン・フィルター型管理思想」です。「カルマン・フィルター」の問題は、地球環境がどのように動いているか、なるべく正確に追隨して観測しなさい、といっていますが、環境に対してこれを管理するという「管理行動」はこれには入っていません。これは観測モデルだけですから、管理行動をするにはカルマン・フィルターに「制御」という概念を入れればいわけです。カルマン・フィルターによる制御の問題は制御理論でしばしば行われております。

x というのは系の状態です。1 個点がついているのは変化の状態です。この

$$\dot{x}(t) = A x(t)$$

という部分が系の運動方程式です。ここに制御 $u(t)$ を加えますと、通常の「カルマン制御」という問題になります。

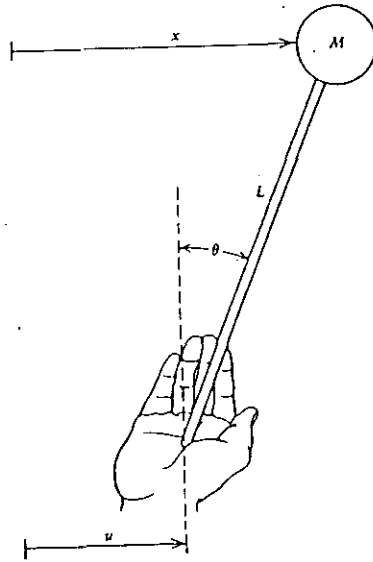


図1.2 棒たて

この図はある制御理論の本にある「棒たて」です。つまり、手の位置 u を動かすことが「制御」として考えられ、これによって M というおもりの位置 (x) と速度 (x の時間微分) を、位置はこの位置、速度はゼロにするという制御を考えます。ニュートンの運動方程式から若干の操作をやると、上のカルマン制御の方程式に当てはめることができます。「カルマン制御」の場合には、もともと制御ができるかどうか、可制御性を判定することがまず最初に重要です。できない場合もありますが、この場合はみてもわかるとおり当然できます。数学的にも、できるかできないかの判定基準があり、その判定基準を使いますと、制御できることが証明されます。

これと似たものに「皿回し」があります。ふつう、「皿回し」の場合はさおは1本しかありません。その上にさらにもう一本さおを立てて、2本つなげてその上におもりをつける。こうなりますと、明らかに制御は不可能になります。こういう目にみえるアナロジーを用いて、環境をなるべく一定の位置に、しかも余り変動のない状態で維持するには、我々が地球環境に対してどういう制御をすればいいのか、そういう制御があり得るかを考えてみればいい。これはもちろん余りにも単純なイメージですけれども、要するに、このアナロジーで地球問題を、粗く、同じ数学的形式に書ければ、地球環境は実は制御できるであろうとか、もしかしたら制御できない、ということになるのです。その客観的な基準は制御理論が与えております。ある系が思うとおり制御できるかできないかを判定する基準は、パラメーターからきちんと判定できます。

連続時間システムの可制御性：連続時間システムに対する完全可制御性の定義は、
離散時間システムの場合と全く同様である。

定義 システム

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t)$$

が完全可制御であるとは、 $x(0) = 0$ と任意に与えられた状態 x_1 に対して、有限時間 t_1 と区分的に連続な入力 $u(t)$ 、 $0 \leq t \leq t_1$ が存在して、 $x(t_1) = x_1$ となることである。

行列 A 、 B による完全可制御性の条件も離散時間の場合と同じであるが、証明はやや異なる。連続時間の場合、階数に関する条件を特定の入力関数に置き換えるためには、やや間接的な議論が要求される。しかしながら、後で示すように、条件の解釈は離散時間の場合と同じである。

定理 連続時間システムが完全可制御であるのは、可制御性行列

$$M = [B, AB, A^2B, \dots, A^{n-1}B]$$

が階数 n をもつ場合であり、そしてその場合に限る。

5) は「統計的決定理論」で、典型的には品質管理の問題です。これは生産している機械の状態と、それに対する認識を含んでいて、それから出てくるデータを統計的に観察して、それが不良品であるか良品であるかという判断をする。この際、不良品を良品と判断したり、あるいは良品を不良品と判断したりすれば、そこに損失が生じる。損失が少なくなるような判定方法を考える行動決定の問題です。不適切な管理をした場合には非常に大きな損失が生じる、という状況で、その意味を「適切に」管理するという問題に使えることになると思います。

4)、5)、6)に重要なのは、すべて「制御」や「行動」の要素が入っていること、環境システムに対して一定の働きかけをすることでそれが、今までの1、2、3とは違っている点です。

6) は「マルコフ決定過程型管理思想」というので、「高速道路の交通量管理」がその例です。全体の交通量自体はなかなか管理できないかもしれません。例えば料金所のゲートを幾つつくればいいのかという問題です。ゲートを幾つつくるかによって、そこで自動車の滞留現象が起こって、そこでコストが発生する。これを解消するために、ゲートをつくるのにコストがかかるということもあり、ここに経済的な概念が入ってくる。それに応じて、当然、ゲート近くの交通の状態が変化するという制御行為が逆にシステムの方へフィードバックされて、システム自体の状態に変化を来すという点が、このマルコフ決定過程の重要な面で、「マルコフ決定過程」の考え方は、地球の温暖化の問題に対して重要な応用を持つのではないかと、少なくとも考え方として重要であろうと思います。

7) は最近活発に議論される認知科学的発想に基づくものです。問題が呈示 (Framing) される仕組みによって、人間の行動は劇的に変化するものです。

最後に「環境はそんなにまでして守らなければならないのか」というかなり根本的な指摘がありました。これは果たして環境科学の問題であるか、については重要な論点があります。「環境は守るべきである」という前提で我々はやっているわけです。

もう一つ前に、「環境倫理」の問題がなくてはいけません。「環境倫理」の問題は、少なくとも重要な切り取り方をすることができます。それは、次世代と今世代とどちらが大切なのか、今世代が大切なのか、次世代が大切なのか、あるいは次世代も今世代も両方大切なのか、それとも今世代はこれでよい、次世代のために重要なものを守ってやらなくてはいけないかが、広く倫理学の問題になります。これは社会哲学者の課題であって、ベンサムとかロールスとかニーチェとかパレートとか、いわば社会学者、哲学者が言ったことを簡単な式に書くことができます。この式のもしどれかをとれば、ある倫理基準が採用されて、それにふさわしい政策を考えることができるのです。まとめてみましょう。

U_1 = 現世代の総効用、 U_2 = 次世代の総効用 (確率的)、 $E(\cdot)$ = 期待値、
 として、現世代の環境政策 x は

- a) Bentham的ルール $\text{Max}_x \{ U_1 + E(U_2) \}$
- b) Rawls的ルール $\text{Max}_x \text{Min} \{ U_1, E(U_2) \}$
- c) Nietzsche的ルール $\text{Max}_x \text{Max} \{ U_1, E(U_2) \}$
- d) Pareto 的ルール $\text{Max}_x \{ U_1 \mid E(U_2) \geq U_0 \}$

などで決定される。

最後の図は、プロットしてみたマウナロアのCO₂の濃度です。原系列移動平均をとってみますと、中心化8期移動平均で少しトレンドが出て、この移動平均の期数を少し長くし、12期移動平均にすると、確かにある一定速度で、この何年間かは上向きに行っていることがわかる。重要なのは傾きです。傾きが、先ほど申したカルマン制御の場合の速度に関係してくる。

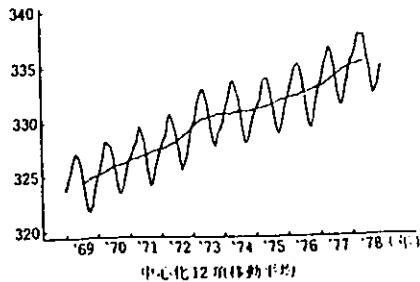
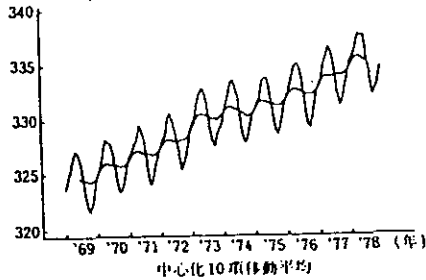
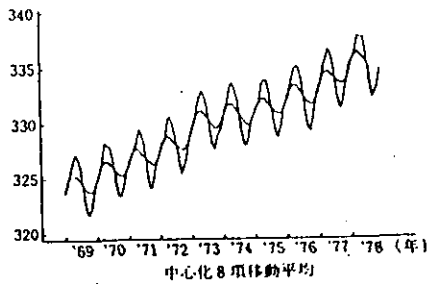
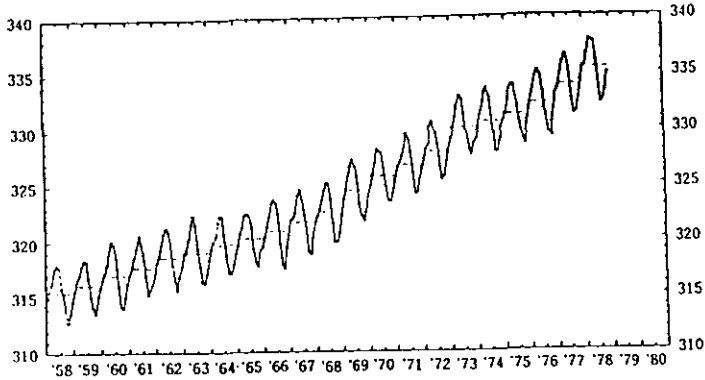


図1.3 CO₂の濃度(マウナロア山)の年時系列より

まとめましょう。(1)の「温暖化の予防には相当のコストがかかるのではないか」については、先ほど言いましたように、ある一定のシナリオを書いて、それに対して一定の決定基準を設けていけば、この問題はさらに詳しく論議できる。

(2)の「どこまで対策を打てば環境は守られるのか」というと、これは品質管理の理論に非常に似た対応がとられるだろうと思います。

(3)は「環境倫理」の問題です。世代間問題について、どのような倫理学を我々が選び出すのか。

(4)は、「どれぐらいの変化速度ならば環境に追従できるか」というのは、先ほどの「おもり」を制御する問題で、倒れる前に手をうまく出さないと、おもりほうが早く倒れます。モデルを環境問題に適用すれば、数学的には一定の共通部分がある。

(5)は、「環境に対してどのような適応策が打てるのか」というと、これは恐らく先ほどの高速道路の問題に似たような構造があるのではないか。すなわち、非常に大まかに言うと、環境をそんなにドラスティックに変えることはできません。我々は「対応策」を打てるぐらいである。高速道路で流れていく自動車の台数自身は我々にはどうにもできないんですけれども、どのようにゲートをつくって、そこに人を配置して、どれぐらいの間隔でサービスをすればいいかという問題、これが1つの流れに適應するモデルであろうと思います。これは恐らく先ほど言いました「マルコフ決定型モデル」と共通部分がある。

私が不確実性下の意思決定問題を研究してきた立場から、温暖化問題に対して考えたアイディアは以上のとおりで、これがさらに温暖化問題に対して適用できるかという適用の問題、いろいろな定数を、パラメーターをどのようにするかという問題はあると思いますが、ある場合にはそれがうまくいき、ある場合には使えないという問題ができてくる。それは今後の問題であろうと思います。

問：森田（公害研） 最後に挙げられたモデルを温暖化についてどう適用していくか、これから検討だとおっしゃいましたが、ヒントとして、7つぐらいのモデルのうち、先生が今お考えになってらっしゃる今後のモデル化の方針について、例えばこのモデルとこのモデルぐらいを組み合わせれば何とかいい方向にいくんじゃないかとか、これが適切だという見通しがおありでしたら、ちょっとご説明いただければと思います。

答：モデルを選択するときに重要なのは、モデル自身が非常に扱いやすいという点です。人間が基礎的な部分からやらなくてはいけない、余りにも時間もかかる問題ですから、その分野の専門家が、そのモデルについて蓄積を積んでいるという基準。いま一つは、アルゴリズムが明確にと定義されている、データがきちんとそろっている、それがわかりやすい、そういう基準を立ててみますと、先の「カルマン制御」のような動的管理モデルというのが1つのモデルである。これは地球温暖化のイメージにも当然合うわけです。それが第1です。

第2に、人間ができることは基本的にはわずかであるとする、グランドシステムである環境に対して、厳密には「管理」は、ある意味ではできないのです。「適応」という意味での管理ならできる。我々がそれに対していわば微調整を加える。高速道路でとうとうと車が来るのに対して、ゲートを幾つつくるか、その程度の管理はできる。その意味において、「マルコフ決定型モデル」が有効です。

第3には、地球環境はいかなる意味において守らなくてはいけないかという根拠づけをはっきりするという意味において、倫理的なモデルは重要である。この問題は社会的問題ですので、最後に「どうして地球環境を守らなくてはいけないか」ということになれば、要するに次世代と今世代とをどうするか、あるいはどのような形で議論できるか、という問題。これは倫理学的問題、あるいはメタ倫理の問題です。「このごろの若い者は」という言い方からは、「今世代」が一番しっかりしていて、「次世代」は何も守るに値しない、次世代のことは別に考えてやる必要はない、今世代のことを考えてやるのが責任ある立場だ、となればどうなるのでしょうか。先ほどのモデルになるとどれかになる、あるいは次世代のことも十分に考えてやる。いや、人類は1つだから、今世代も次世代も、幸福の足し算したものを最大にする、こういった考えがあるでしょう。

以上、3つであると思います。最初の2つはphysicalなモデル、最後の1つはsocialあるいはethicalなモデル、そんなふうを考えております。