

# 多次元データの分析手法について

—自転車運動時生体機能分析へのAHP手法の応用

新潟大学大学院自然科学研究科 張 炳江(Bingjiang Zhang)

新潟大学大学院自然科学研究科 馬場 裕子(Yuko Baba)

新潟大学大学院自然科学研究科 田中 環(Tamaki Tanaka)

新潟大学大学院自然科学研究科 木竜 徹(Thoru Kiryu)

Graduate School of Science and Technology, Niigata University

## 1. はじめに

社会現象, 自然現象のいずれを問わず, 要因と結果の関係, 要因間の関係は複雑である. 従来は, この現象を分析するとき, ある程度条件を簡素化して処理してきた. しかし, 社会が進歩し競争が激しくなると, 複雑さも分析しなければならなくなった. 統計科学だけでなく, 数理計画においても多次元データの分析の理論や手法があり, 多次元データから必要な情報を分辯し, ある基準に従って最適なものを取り出すことが数理計画とも考えられる.

1970 年は, システム工学が華やかに宣伝され, エネルギー問題や環境問題などの社会問題にも応用されようとしていた時代であった. このような社会問題においては, それまで急速に発展してきた最適制御の数学理論や手法のみでは不十分で, 意思決定における価値判断の問題をどのように処理するかが重要な課題であった. それまでの数理計画の1つの延長として, 目的関数が複数ある場合の多目的最適化に対して主として理論面での研究が行われ, 1980 年代に入ると, 多目的意思決定に関する様々な応用研究が行われるようになってきた. 多目的計画法の数学的性質はそれ自身非常に美しい理論構造をもち, 手法も最近ではできる限り手続きを単純化されてい

る. この分野では, 凸解析学や非線形解析学に関する研究が必要とされると同時に, 実際に計算機でその解を求めるアルゴリズムの開発が必要とされてきた.

本研究の内容は, 多次元データの指標に対して, 算数平均, 幾何平均及び集合値写像の特徴付けなどのいくつかの手法を用いて, 具体的な多次元データの分析を行うことである. 特に集合値写像をスカラー化する関数についてはその性質を明らかにし, 定式化された多目的計画問題をいくつかのスカラー化の指標を用いて, 特徴付けを与えることである.

本研究では, 数学的立場から理論的に研究されている上で, 分析手法の客観的正当性と科学的裏付けを与えることができると考える. 分析に使用したデータはアシスト付き自転車の負荷制御と人間の運動特性の関係を移動体の設計に反映させる応用研究で用いられた多次元データである. 具体的には, アシスト付き自転車を利用して運動を行う複数の被験者の心拍変動情報と筋活動の情報に関する客観的指標を計測し, 加えて主観的データとして, 精神的要求などの6つの評価項目から構成されている評価指標の素点をアンケート方法で集計したものである. そこで, どのようにこれらの主観的データを数学的に分析すれば, 自転車運転時生体機能の変化を推定できるの

かというのが、本研究の目的である。どの主観的要因が自転車運動時生体機能の変化にどんな影響を与えるかまたグループを集合として考えた場合どんな特性を持っているかを分析する際、各要因特徴づける必要がある。そこで、NASA-TLX手法、AHP手法及び集合写像のスカラー化を用いて、有益な情報をその多次元データから取り出す方法を考案した。

これは、統計的なデータの見方に平均とか分散などの計算を用いるのが、常に未知のものに対する推論あるいは予測に関係することからみると自然であるが、個人の主観や多次元データの変数間になんらかの依存関係がある場合などはデータの構造をよく反映した評価指標が必要になるかもしれない。そこで、上述のようないくつかの数理的方法を組合せてデータマイニング式にそのような評価指標を与える手法を考案する同時に、データの集まりを集合としてとらえ、数理計画の立場からなるべく少ないパラメータでその集合を特徴づけるアルゴリズムを提案することに至った。

## 2. NASA-TLX

### 2.1 概要

NASA-TLX(National Aeronautics and Space Administration Task Load Index)はアメリカで一般的に用いられるメンタルワークロードの主観的評価手法である。表1に示す6つの尺度項目、すなわち精神的要求(MD: mental demand)、身体的要求(PD: physical demand)、時間的圧迫感(TD: temporal demand)、作業達成度(OP: own performance)、努力(EF: effort)、不満(FR: frustration level)から構成されている。NASA-TLX 評価尺度の定義は表1において具体的に与えられる<sup>2)</sup>。これらの6つの尺度項目について、低い(Low)/高い(High)または良い(Good)/悪い(Poor)の両極をもつ線分上に印をつけさせる。NASA-TLX 評価用紙として図1のようなものが用いられる。

NASA-TLX の特徴は、対象作業に関して6つの項目の全ての組み合わせ15通りを比較し、どの項目がよりメンタルワークロードへの寄与が高いと思うかを、被験者自身の判断によって得られることである。一対比較の結果はよりメンタルワークロードへの寄与が高いと判断された回数を数えることによって処理され、この回数をそのまま重み付け係数

項目	端点	説明
精神的要求 (MD)	低い/高い	どの程度、精神的かつ知覚的活動が要求されましたか。 例えば、思考、意思決定、計算、記憶、観察など。今回の自転車作業が容易でしたか、それとも困難でしたか。
身体的要求 (PD)	低い/高い	どの程度、身体的活動が必要でしたか。 例えば、漕ぐ、回す、操作など。ゆっくりしていましたか、それともきびきびしていましたか。
時間的圧迫感 (TD)	低い/高い	自転車作業の速さにどの程度、時間的圧迫感を感じましたか。 作業ペースはゆっくりしていて暇でしたか、それとも急速で大変でしたか。
作業達成度 (OP)	良い/悪い	被験者自身にとって、設定された作業の達成目標の遂行について、どの程度成功したと思いましたか。
努力 (EF)	低い/高い	作業達成レベルに到達するのにどのくらい一所懸命作業を行わなければなりませんでしたか。
不満 (FR)	低い/高い	自転車作業中、どのくらい不安、いらいら、不快感、あるいは安心、満足、リラックス、自己満足を感じましたか。

表1 NASA-TLX 評定尺度の定義

とする。その後、この重み付け係数を各素点にかけたものの総和は総合寄与となる(図2)。

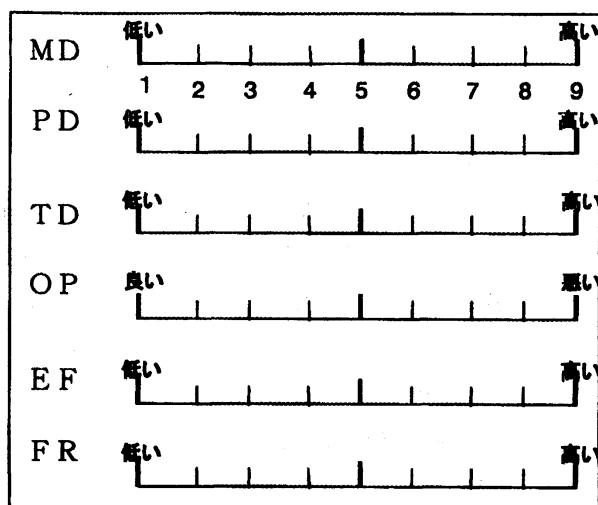


図1 NASA-TLXの評価用紙

験者は自分の思う素点を読み取る。本研究では、各項目は被験者が瞬時に答えやすいように素点を1~9点とした。そして、各素点をトライアル終了毎に口頭で報告してもらった。高いまたは悪い素点はよりメンタルワークロードへの寄与が高いと解釈される。つまり、精神的活動また身体的活動がかなり必要となる項目と考えられる。

### 3. 階層化意思決定法(AHP)

#### 3.1 AHPの特徴

相対的評価を可能とする解決手法の「階層化意思決定法 AHP(Analytic Hierarchy Process)」は、1971年、Thomas L. Saatyにより提唱された不確定な状況や多様な評価基準における意思決定手法である。この手法は、問題分析において、主観的判断とシステムズ・アプローチをうまくミックスした問題解決型意思決定手法の1つ

である。AHPを使って問題を解決するには、次の3つの原則がある。それらは、優先事項の分解、相対的な判断及び総合の原則である[1]。分解原則とはその問題の基本的な要素を捕らえるために構造を階層化することである。つまり、問題を図3のような階層図のように目標、評価基準、代替案に分解することである。相対的な判断という原則は、最も単純に2つずつ比べる一対比較を意味する。この一対比較は、測定の尺度が全然存在しないケースでは、問題を解いている個人またグループにより行われた判断において行われてよい。一対比較では基準尺度の定義に基づき、表2のように数値化を行う。ただし、2, 4, 6, 8中間値として適宜使うことにする。一対比較の結果からウェイト(重み)を合成し、総合ウェイトを求める。

PD	TD	OP	FR	EF	TD	OP	FR	EF	OP	FR	EF	FR	EF	EF
MD	MD	MD	MD	MD	PD	PD	PD	PD	TD	TD	TD	OP	OP	FR

■ は上の項目と下の項目とを比べて、選ばれた項目である。

MD (5)	60	×	5	=	300
PD (1)	70	×	1	=	70
TD (1)	80	×	1	=	80
OP (3)	30	×	3	=	90
FR (3)	40	×	3	=	120
EF (2)	65	×	2	=	130
合計=15			総合寄与	=	800

図2 重みづけられたTLXの計算例

#### 2.2 実際のデータの採り方

本研究において使われたデータはNASA-TLXの手法で採られた。実は、NASA-TLXの6つの評価項目について、低い/高いまたは良い/悪いという両極をもつ12cmの長さの線分上に印をつけさせる。いわゆる、Visual Analogue Scaleによって評価させるものである。このような線分上に印された位置を0~100の数値として素点とする。被

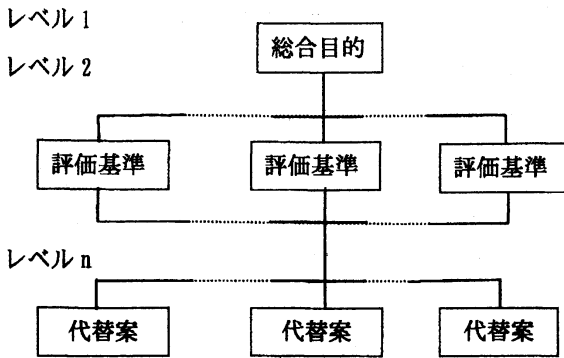


図3 階層構造

要素 <i>i</i> が要素 <i>j</i> に比べて	$a_{ij}$	$a_{ji}$
同程度に重要	1	1
やや重要	3	1/3
かなり重要	5	1/5
非常に重要	7	1/7
圧倒的に重要	9	1/9

表2 基準尺度

本研究では、各被験者を代替案とし、精神的要求などの6つの項目をAHP手法の評価基準として、自転車運動時生体機能分析問題を階層化し、NASA-TLX手法で集計された素点を用いて、各評価項目及び各被験者のウェイトを算出することにする。

### 3.2 AHPのウェイト算出

本研究では、幾何平均法を用いて各項目及び各被験者のウェイトを算出することにした。幾何平均は、要素の幾何平均

$$w_i = \left( \prod_{j=1}^n (a_{ij}) \right)^{\frac{1}{n}} \quad (1)$$

を求め、ウェイトを算出する方法である。 $k=1, 2, \dots, L-1$ の順に次の操作をおこない、ウェイトを合成する。ここで、 $L$ はレベルの数である。いま、レベル*k*の要素*i*のウ

イトをとする。また、親要素*i*に関するレベル*k+1*の子要素*j*のウェイトを $v_{ij}$ とする。そのとき、

$$w_{k+1j} = \sum_{i \in F_j} w_{ki} v_{ij} \quad (2)$$

によってレベル*k+1*の要素*j*の合成ウェイトを求めることができる。ただし $w_{11} = 1$ とする。 $F_j$ は*j*の親要素の集合である。 $w_L$ は最終レベルにある要素の総合的ウェイトを示す[8][4]。

## 4. 実験

実験は新潟大学構内の周回経路で行った。

実験に用いた車両はタイヤ径 20 インチの電動ハイブリッド自転車(Yamaha 発動機社製, PX20)である。被験者は日常運動を行っている健康な成人である。実験に先立ち、被験者に対して、口頭と地図で事前に走行経路を説明した。また、実験中には、トライアル終了毎に NASA-TLX の用紙を用いて主観的評価指標の素点を口頭で報告してもらった。勾配に伴う生体機能の変化を見るために、勾配に走行経路を6つの phase に区切った。今回の実験は、運動時での自転車と生体の関連性を観察するために、車両情報であるトルクと生体情報である筋電図を求めた[4]。

## 5. 結果

### 5.1 各項目のウェイト

被験者 Y.K. の1周目の6項目を一対比較した結果を例として表3に示す。一対比較の基準尺度に基づいて各項目のウェイトを算出するが、本研究では、NASA-TLX手法で採られた素点をそのまま実際の配点とした。その後、AHP手法の手順で各項目のウェイトと総合評価の値を算出することにした[4]。

Y. K.		MD	PD	TD	OP	EF	FR	ウェイト
		5	3	4	1	1	3	
MD	5	5/5	5/3	5/5	5/1	5/1	5/3	0.294
PD	3	3/5	3/3	3/4	3/1	3/1	3/3	0.176
TD	4	4/5	4/3	4/4	4/1	4/1	4/3	0.235
OP	1	1/5	1/3	1/4	1/1	1/1	1/3	0.059
EF	1	1/5	1/3	1/4	1/1	1/1	1/3	0.059
FR	3	3/5	3/3	3/4	3/1	3/1	3/3	0.176

表3 被験者 T.Y. の1周目の各項目のウェイト

## 5.2 SDRR と GDRR での特徴分析

心拍変動の特徴から、トライアル毎の特徴を R-R 間隔時系列の時間的ふるまいから、運動時と休憩時とで R-R 間隔時系列が大きく変化する場合 (SDRR) とあまり変化しない場合 (GDRR) に分けた<sup>7)</sup>。すべて SDRR を示したセットでは、トライアル数が増加するにつれて、6つの項目のメンタルワークロードへの総合寄与がより高くなった。一方、すべて GDRR を示したセットでは、各項目のメンタルワークロードへの寄与が異なっても、生体機能の変化過程は共通していた。例として対象とした被験者 T.Y. の SDRR と GDRR での特徴分析結果を図4に示す。SDRR では、メンタルワークロー

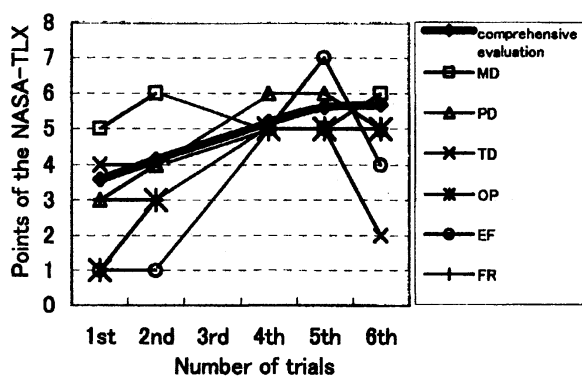


図4(a) SDRR の特徴

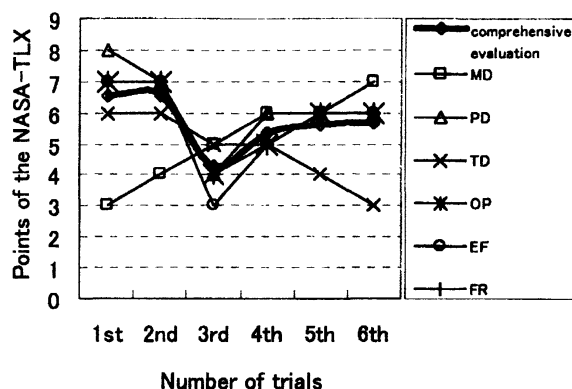


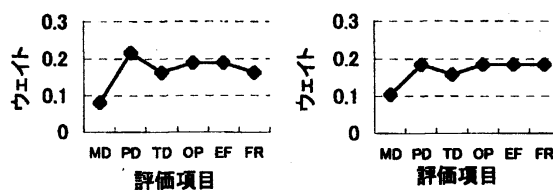
図4(b) GDRR の特徴

図4 SDRR と GDRR の特徴

ドへの総合評価値(太線)が高くなった(図4(a))。一方、GDRRの場合、全体から見ればメンタルワークロードへの総合評価値が減少する傾向にあった(図4(b))。

## 5.3 各項目のメンタルワークロードへの寄与

AHPで計算された重み付け係数により、トライアル毎にどの項目がメンタルワークロードへの寄与が高いかを判断した。例えば、被験者 T.Y. の GDRR トライアルでは、メンタルワークロードへの寄与は1周目と2周目での精神的要求(MD)が他の項目より低かった。逆に1周目と2周目での身体的要求(PD)が高かった。また、3周目以後では、MDが他の項目と比べて高くなることが分かった。さらに、5周目と6周目では時間的圧迫感(TD)のメンタルワークロードへの寄与が低くなった(図5参照)。



(a) 1周目

(b) 2周目

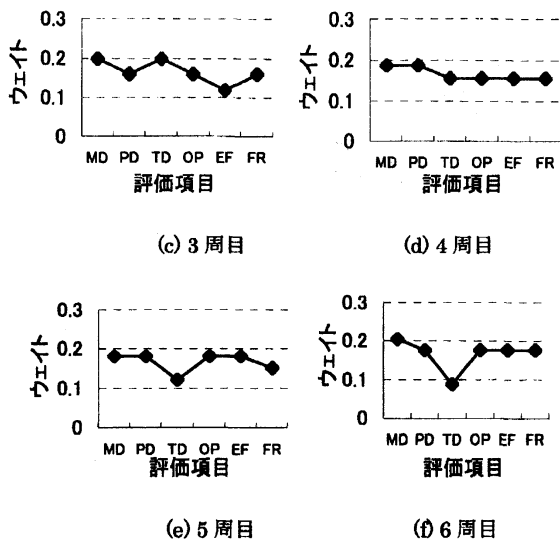


図5 各項目のメンタルワークロードへの寄与

#### 5.4 総合評価

各項目評価値を通じて被験者の生体機能の変化を次のように解釈する。総合評価が高い場合は、被験者のMDとPDがかなり要求されたと考えることができる。図5を見ながら、被験者T.Y.(GDRR特徴)の総合評価の変化(図6参照)を分析してみる。1周目と2周目では、アシストOFFとしたため、PDがかなり必要となった。また、作業達成レベルに到達するため、一生懸命作業を行ったことが分かる。3周目からアシスト付きとなり、各項目の寄与が低くなった。特に、3周目で努力(EF)がかなり低くなり、4周目以後では、トライアル数が増加するにつれて、TDを除いて各項目の寄与が高くなった。その結果、トルク負荷制御によるアシストがある場合とない場合

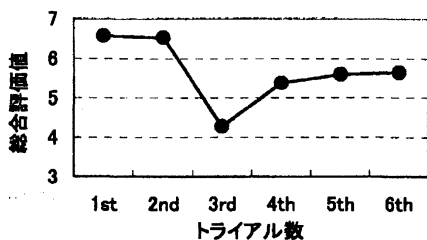


図6 被験者個人の総合評価

とで、尺度項目が変化し(図5)、図6にある様に明らかな違いを示した。

#### 5.5 被験者間の評価

電動ハイブリッド自転車による運動において、どの項目の寄与がより高いかを被験者間の対比較を行うことによって推察してみる。図7のパターンより、被験者M.W.の各項目の寄与は他の被験者と比べてMDとTD以外の項目がより高かった。また、被験者T.Y.の各項目の寄与は0.15から0.20までの間に集中した。さらに、被験者S.K.の各項目の寄与は0.17から0.29へと大きく変動し、そして、被験者Y.K.の各項目の寄与は、他の項目と比べて、TDが高かった。その結果、同じGDRRトライアル、アシストOFFであるが、この5人の被験者の中では、被験者T.Y.は特にひとつの尺度項目に集中していなかったが、被験者S.K.はTDに集中する等、重点をおく尺度項目には個人差が見られた。

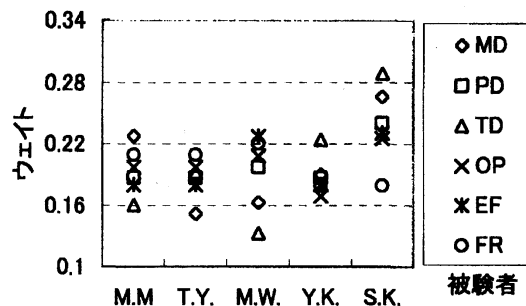


図7 被験者間の評価

#### 6. 考察

本来ならば、主観的6項目に対して、AHPによって重要度を設定することを前提に、各項目に対して対比較できるようアンケート調査が必要となる<sup>1)</sup>。しかし、本研究では、NASA-TLX手法で採られた素点をそのままAHPの配点として対比較した。今後の実験では、6つの評価項目に対して、実

測する前にも被験者に対するアンケートをとり、その配点が高い項目を重点的に検討する必要がある。

また、本研究での被験者は学生(平均年齢21.9歳)であったため、何人のなかでいくつかの作業を行う場合には、各作業にこの一対比較を行わなければならない、どの被験者が他の被験者と同じグループであるかと推察しにくい。一方、被験者数が多い場合には、AHPを用いて、各被験者及び各項目のウェイトは算出できるが、あるウェイトはその被験者の特徴を反映することができない。例えば、ある被験者の不満の素点が小さいとすると、不満に対するウェイトは0になる可能性がある。これはその被験者がFRを評価要素として最も低く認識していると解釈されるが、被験者にとって評価されたFRの素点が常に0であるとは限らない。ウェイトが0付近になると、自転車運動の過程においてFRがあまり関与しないことになる。この問題点は、グループに分けて、ウェイトの最小値を0にしないことにより解決できると考えている。

## 7. ベクトルと集合のスカラー化

今回の実験では、NASA-TLX手法とAHP手法で13人の被験者のデータを分析できるが、被験者数が多い場合には、何人のなかでいくつかの作業を行わなければならない、大量のデータから必要な情報を分離し取り出すのが困難なものである。それで、新しい考え方が必要となった。それは、目的関数が複数ある場合の数理計画問題として考え、集計されたデータを集合とする、シミュレーションモデルを考え、そのスカラー化について考察する。

### 7.1 多目的計画問題

今回取り扱う問題は、ある制約条件を有する最小化問題( $SP'$ )として次のように定式化

される。

$$\begin{cases} \text{minimize} & F(x) := \bigcup_{y \in Y} \{f(x, y)\} \\ \text{subject to} & x \in X \end{cases} \quad (3)$$

ここで、 $f(x, y)$ は被験者 $x$ の $y$ 周目の個人的寄与である。 $f_1, f_2, f_3, f_4, f_5, f_6$ をそれぞれMD, PD, TD, OP, EF, FRの個人的寄与とし、 $f(x, y) = ((f_1(x, y), \dots, f_6(x, y)))$ を考える。

### 7.2 スカラー化

Pareto最適解を求めるためには、問題(Mp)を何らかのスカラー最適化問題(通常の数理計画問題)に変換することが必要である。この際、スカラー最適化問題は適当なパラメータベクトルを含む族を形成するのが普通である。

#### 7.2.1 従来の線形加重と最小化

多目的計画問題に対し、その目的関数 $f_1(x), \dots, f_p(x)$ の重みベクトル $w \in R^p$ による加重和を目的関数にもつスカラー化問題を

$$\begin{cases} \text{minimize} & \langle w, f \rangle = \sum_{i=1}^p w_i f_i \\ \text{subject to} & x \in X = \{x \in R^n \mid g(x) \leq 0\} \end{cases} \quad (4)$$

とする。

#### 7.2.2 本研究で扱ったスカラー化手法

まず、本研究で取り扱った多目的関数のベクトル $f(x, y)$ をスカラー化する方法を説明する。

まず、順序錐 $C$ を $R_+^p$ に限って説明するが、一般化できるため、 $C$ の表現を使うことにする。まず、ベクトル $z \in R_+^p$ のスカラー化の指標として、方向ベクトル $k \in \text{int } C$ を選んで次の関数を考える。

$$h^-(z;k) := \inf\{t \mid z \in tk - C\} \quad (5)$$

また, 同様に

$$h^+(z;k) := \sup\{t \mid z \in tk + C\} \quad (6)$$

というスカラー化関数を定義する. ここで, 方向ベクトル  $k \in \text{int } C$  の働きは

- ① スカラー化関数  $h^-$  と  $h^+$  を利用して, 集合値写像  $f(x,y)$  を特徴付けする.
- ② Pareto 曲面上の最適値(最適運動値)を求める.

となる.

また, 順序錐は  $C = R_+^6 = (\text{MD}, \text{PD}, \text{TD}, \text{OP}, \text{EF}, \text{FR})$  となる. トライアルを複数繰り返して, 得られたデータはベクトルの集まりで, つまり集合をなしている. その集合の特徴付けを与えるために上記のスカラー化が同様に利用できる.

## 8. おわりに

自転車運動時生体機能変化の分析に関して, 精神的要求などの6つの主観的評価基準がメンタルワークロードへの寄与がそれぞれの程度なのか, 階層化意思決定法(AHP)の一对比較をすることにより, 人間の行動様式に決定できる手法を検討した. また, 被験者数が多い場合には, 多次元ベクトル空間に自転車運動時生体機能変化のデータから構成されている集合のスカラー化について考察し, 具体的に計算することによって, 最適な運動状態を推察できるようにした. これらの点は, 従来の自転車運動データ分析の手法には無いユニークな点である. さらに, 自転車運動以外のスポーツに対する主観的データ分析にも, 生体機能の変化を推定する方法として AHP 手法を応用できると考えている.

## 参考文献

- [1] T.L.Saaty : Axiomatic Foundation of the Analytic Hierarchy Process , Management Science 32, pp.841-855, 1986.
- [2] 三宅晋司, 神代雅晴 : メンタルワークロードの主観的評価法, 日本人間工学会, pp.399-408, 1993.
- [3] 木下栄蔵 : 意思決定論入門, 近代科学社, 2000.
- [4] 刀根薫, 眞鍋龍太郎 : AHP 事例集, 日科技連, 2000.
- [5] 入島和代, 木竜徹, 守屋貴於, 水野康文 : アシスト機能を持つ自転車運動時での生体機能の変化, 第 16 回生体生理工学シンポジウム論文集, pp.411-414, 2001.
- [6] Bingjiang Zhang , Hui Liang and Tamaki Tanaka : Multipurpose Decision-Making in House Plan by Using AHP, Multi-Objective Programming and Goal-Programming, pp. 421-427, 2002.
- [7] 加藤慎也, 木竜徹, 水野康文, 守屋貴於, 生体情報を用いたパワーアシスト付け自転車の設計, 第 18 回生体・生理工学シンポジウム論文集, pp.133-134, 2003.