

概念分類課題に見られる知識構造の 成熟的差異の検討

前田 洋士

キーワード：知識構造、熟達度、概念分類課題

問題

人間の知識について、これまで心理学では、宣言的知識、手続き的知識の区別で論じられることが多かった (e. g. Anderson, 1983)。Ryle (1949) は、宣言的知識を、ある対象、事象、または、ある事柄に対しての認識と定義した。宣言的知識は、スキーマ (Rumelhart & Ortony, 1977) として説明されることがある。スキーマは、知識の構造的かたまりとして定義される。一つのスキーマは他のスキーマと関連しあっている。宣言的知識によって、学習者は認識が可能なのである。

手続き的知識は、いかに学習者がそれらの宣言的知識を活用させるかにかかわる知識である。手続き的知識は、スキーマと相互関係にある。問題を解決し、計画を練り上げ、そして、実行するという一連の過程には手続き的知識が必要なのである。これらの活動を行う際、学習者は、適切なスキーマにアクセスする。そして、相互に関係づけ、そして、状況に適用されるために、適切な属性を抽出するのである。また、スクリプト (Schank & Abelson, 1977) とは、更に複合的なスキーマのパターンのことであり、手続き的知識とスキーマが発展したものである。ある特殊な技術は、熟達者でも明言できない知識によって成り立っている可能性がある (Polanyi, 1966)。したがって、基本

となる宣言的知識を明言化することは、実行者にとって難しいであろう。宣言的知識を考慮しなくてもよいほど自動化されている専門的知識も存在するのである。

構造的知識は、ある領域についての概念が互いに関係しあっている知識のことである (Diekhoff, 1983)。ある知識は他の知識と複雑に関わり合い、一つの間接関係を作りさらに上位の概念を形成するのである。再生法で測定された知識だけでは、構造的知識を再現するのに十分ではない。それらの知識が如何に関連しあっているのかを知って初めて構造的知識を表現することができるのである。例えば、「暖かい空気が上昇する」と言うことは、「空気」は「冷たい」とどうなって「暖かい」とどうなるかという関係を知っている必要がある。そうして始めて、暖かい空気が上昇するということが予測可能となるのである。このように構造的知識は、複雑なスキーマやスクリプトを関連づけて利用するのに不可欠なものなのである。

構造的知識は、認識の構造を表現したものである。従って、構造的知識は、概念的知識と定義されることもある。概念的知識とは、ある領域における知識が意味的に統合された構造である (Tenyson & Cocciarella, 1986)。構造的知識は、概念間の関係のパターンであるともいわれている (Preece, 1976)。それは単なる宣言的知識の貯蔵された結果ではなく、概念間の操作的構造である。構造的知識は、宣言的知識を有効な知識構造へと導く役割を果たすのである。

構造的知識は、問題解決にも重要な役割を果たしている。熟達者の問題解決者の知識構造は、初心者のそれらと異なるのだ。熟達者は、初心者と異なる方法で問題空間を表象する。例えば、初心者は、問題の表面上の文字情報にこだわってしまうのに対して、熟達者は、物理学の原理を初めに表象して実行に移すのである (Chi, Feltovich, & Glaser, 1985)。

構造的知識が問題解決に関連している研究の例として他に、熟達者と初学者の主な差を扱ったものがある。熟達者の構造的知識には、問題を解決するための豊富なスキーマが存在するというのである (Larkin, McDermott, Simon,

& Simon, 1980)。これらのスキーマは、熟達者のある領域に関する構造的知識に他ならない。熟達者は、様々な精巧なスキーマを有し、抽象的原理に対して問題を表象することができる。それに対して、初学者は、その問題の逐語的特性に関して問題を表象してしまうのである。

本研究では、これらのことを検討するのに、第一実験として概念分類課題を行った。概念分類課題は、ある領域に関する一連の概念を関連のあるもの同士でまとめ、相互の関係を表現させるものである。この方法により、ある領域に対しての被験者の知識状態を構造的知識として表現することができる。このようにして表現された結果は、各被験者における個人差が見られることが推察される。この個人差は、物理学に対しての理解の状態から反映された構造的知識による表現の差であると仮定できる。このような理解の状態には、ある程度規則性というものが存在するのであろうか。すなわち、知識構造は、段階的にかつ連続的に発達するものであるのか、あるいは不連続に行われていくのであろうか。このことを検証するために、分類課題によって得られた結果を改めていくつかのレベルに分類することを試みた。また、このレベルに連続性が見られるのかを検証するために、第二実験としてコンピュータシミュレーションを行った。人工知能などの領域ではコンピュータによるシミュレーションは長い歴史を持つが、発達研究者の多くはモデルのコンピュータシミュレーションの手法になじみがない。コネクショニズムでは、このようなシミュレーションは中心的役割を果たしている。シミュレーションは単なる言語的な記述のみの場合に陥りがちなあいまい性を排除して厳密に仮説を構築することが可能である。理論をコンピュータモデルとしてインプリメントすることは、その理論に論理的欠陥や矛盾があれば、それが露呈せざるをえないレベルの正確さ詳細さで記述することを理論に要求する。また、非線型なゆえに、行動の予測が不可能なコネクショニストモデルは、発見的な結果を示すことが可能である。つまり、実証的実験の役割を果たすのである。このような理由から今回は、Elman (1990) の単純再帰型ネットワークモデルを応用して、コンピュータシミュレーションを行い、連続的に行わ

れる学習の過程に見られる特徴を検討してみた。

◆第一実験：概念分類課題

目的：

第一実験では、以下の操作を通じて表現される知識構造における個人差を熟達度という観点から検討する。

1. 概念分類課題を行わせ、古典力学における各被験者の概念構造の個人差を表現させる。
2. 顕在化した被験者間の個人差を、熟達度と仮定し検討する。

方法：

a. 被験者：国際基督教大学教養学部生29名（自然科学専攻14名、人文および社会科学専攻15名）、大学院生3名（自然科学専攻1名、人文および社会科学専攻2名）。

b. 実験日時：1998年3月～6月。

c. 実験場所：国際基督教大学心理学実験室（ILC334cおよびILC343）にて行われた。

d. 実験器具：

概念のコマ：高校生用物理学の参考書を参考に、46の物理学用語を選び出した。これらを発泡スチロール（縦2cm×横4cm×高さ0.5cm）の上面に記入し、将棋の駒様にして使用した。使用した物理学用語を表1に示す。なお表1は、シミュレーションソフトの入力のために符号化した各概念について

表1 分類課題に使用した概念とその情報

概念	L	L	L	2	3	3	3	4	4	4	5	5	5	5	6	6	6	7	7	7
力の大きさsize of force	0	0	0	1	0	1	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0
力のはたらきfunction of force	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
力の表現expression of force	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
弾性力elastic force	0	0	1	1	0	1	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0
力の種類type of force	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
電気力electric force	0	0	1	1	0	1	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0
磁気力magnetic force	0	0	1	1	0	1	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0
近接力contact force	0	0	1	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
遠隔力remote force	0	0	1	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
力の向きdirection of force	0	0	0	1	0	1	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0
作用点point of action	0	1	1	1	0	0	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0
ベクトルvector	1	1	0	1	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
力の合成composition of force	0	0	0	1	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
合力resultant force	0	0	1	1	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
分力component force	0	0	1	1	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
力のつりあいequilibrium of force	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
作用action	0	1	1	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
反作用reaction	0	1	1	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
万有引力universal gravitation	0	0	1	1	0	1	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0
重力gravity	0	0	1	1	0	1	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0
重さweight	1	0	1	1	0	0	1	1	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0
質量mass	1	1	1	1	0	0	1	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0
垂直抗力normal component of reaction	0	0	1	1	0	1	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0
摩擦力frictional force	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0
静止摩擦力static friction	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1	1	1	0	1	0	0	0	0
最大静止摩擦力maximum frictional force	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1	1	1	0	1	0	0	0	0
静止摩擦係数coefficient of static friction	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1	1	1	0	1	0	0	1	0
摩擦角angle of friction	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1	1	1	0	1	0	0	1	0
動摩擦力kinetic friction	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1	1	1	0	1	0	0	0	0
気圧atmosphere	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
浮力buoyancy	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
パスカルpascal	1	1	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
圧力pressure	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
水圧water pressure	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
大気圧atmosphere pressure	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
モーメントmoment	1	1	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0
偶力couple of force	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0
重心center of gravity	1	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0
剛体rigid body	1	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
質点mass point	1	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
エネルギーenergy	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
角運動量angular momentum	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
中心力central force	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
原点origin	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
時間time	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
外力の作用action of external force	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

注. Lは共通文字情報、数字は2を最上位概念として以下7までの下位概念層を示す。

の情報も同時に掲載した。

その他の器具：分類課題盤としてホワイトボード（80×60cm）を使用した。記録用ホワイトボード用マーカー3本（赤、青、黒）、ホワイトボード用イレイサー、記録用ビデオカメラ（VictorGR-EX7）。

e. 実験手順：

ホワイトボードに、46個の概念を概念間のつながりを持たせながら並べるように指示する。概念間のつながりなどの関係が存在すると判断したときには、マーカーで記入するように指示を与える。被験者の作業は、ビデオテープにて記録した。

結果：

1. 一次データの作成：被験者の作業を記録したビデオテープをもとに、B4版の白紙に被験者が並べたコマの結果を書き写した。

2. カテゴリー化の基準設定：

得られた分類結果のカテゴリー化のために、以下の基準を設定した。

基準1. 文字をたよりに分類したもの：コマに書かれた概念間で、共通する文字同士で分類してしまう方法。例えば、「質点」、「質量」と括ってしまった場合、いずれも「質」という文字が共通するが、意味的には遠い関係である。

基準2. 教科書理論的整合性：教科書に配列してあるような仲間同士のみを集めた場合である。例えば、「気圧」、「圧力」、「パスカル」と括った場合、いずれも圧力を説明する概念である。

基準3. 理論的に整合しない分類：ある理論についての概念の固まりなのであるが、熟達していないために理論的に整合しない概念を含んでしまう例。例えば、「質量」、「時間」、「エネルギー」、「重さ」、「力の種類」、「浮力」、「電気力」、「磁気力」、「遠隔力」、「近接力」、「中心力」を一つのカテゴリーとして括ってしまった場合、スカラー量とベクトル量が混合していることになる。

基準4. より深い理論的整合性：教科書の単元をいくつかまたがってある物理現象を説明するような場合。例えば、「剛体」、「作用点」、「原点」、「質点」、「重心」という集め方は、力学的な作用に関するいくつかの領域についての十分な理解に基づかなければ行えない。

3. 出現パターンの抽出：

これらの基準に照らしあわせ、分類を行った結果、熟達度を示すと思われる3つのパターンが得られた。それらを、便宜的に「初学者レベル」、「中級者レベル」、「上級者レベル」と設定した。各レベルの説明は、以下の通りである。

初学者レベル：基準1もしくは基準3が多く見られる場合。

中級者レベル：基準1はほとんど見られない。基準2と基準3が混在する。

上級者レベル：基準1と基準3はほとんど見られない。出現するのは主に基準2だが、基準4もみられるようになる。

表2 初学者レベルと判定できる結果

分類 カテゴリー	分類された概念	解説
基準1	外力の作用、分力、合力、偶力、中心力	力という言葉を中心に集めている
基準1	力の表現、力の大きさ、力の働き、力の釣り合い、力の合成、力の向き	力のという言葉で分けている
基準1	質量、重さ、重心、重力、浮力	浮くという言葉とその逆の沈むという言葉から重いという言葉を連想している
基準1	原点、時間	原点を取り巻く世界を考えたときに時間を連想した
基準1	パスカル、万有引力	パスカルからニュートンを連想して万有引力を連想した
基準1	ベクトル、力の種類、摩擦力、力の表現	動的な感じで集めてみた
基準2	摩擦力、静止摩擦力、動摩擦力、静止摩擦係数、摩擦角	摩擦の概念で集めた
基準2	磁気力、電気力	力学の領域に含まれないと判断した
基準2	圧力、気圧、水圧、大気圧、パスカル	圧力の概念を集めた
基準3	作用、反作用、作用点、質点	作用の概念で集めた。
基準3	力の種類、作用、反作用、作用点、質点	力の種類として4つの下位概念を設定してしまった。
基準3	エネルギー、磁気力、電気力	エネルギーの下位概念として磁気力と電気力を包含してしまった。

実際に見られた各レベルの代表例を一例ずつ表2～4に示した。初学者レベルにおいては、ベクトル、モーメント、エネルギーを上位概念としてそれぞれを分類しているが理論的に整合しない。静的、動的という感覚的な表現

表3 中級者レベルと判定できる結果

分類 カテゴリー	分類された概念	解説
基準2	摩擦力、静止摩擦係数、最大静止摩擦力、摩擦角、動摩擦力、静止摩擦力	摩擦に関係あるものを集めた
基準2	圧力、水圧、大気圧、気圧、パスカル	圧力の概念でまとめた
基準2	剛体、質点	古典物理学の概念
基準2	ベクトル、重力、合力	ベクトルで表現できるもので集めた
基準2	力の種類、浮力、電気力、磁気力、遠隔力、近接力、中心力	力の種類を集めた
基準3	原点、作用点、外力の作用、力の働き	てこの原理をイメージして集めたが外力の作用は包含されない
基準3	質量、時間、エネルギー、重さ、力の種類、浮力、電気力、磁気力、遠隔力、近接力、中心力	スカラーで集めたが力の種類、浮力、電気力、磁気力、遠隔力、近接力、中心力はベクトル量である。
基準3	力の釣り合い、作用、反作用、重心、	力の釣り合いを上位概念としているが作用、反作用は不適切。

で分類をしている。中級者においては、基準2についてのカテゴリー分類が理論的に整合している分類が見られる。スカラー量とベクトル量にカテゴリー分けしたのが特徴である。しかしながら、スカラー量が理論的に整合していない。上級者においては、基準2についてのカテゴリー分類が理論的に整合している分類が見られる。本稿では表現していないが、特徴としては、カテゴリーが有機的に繋がっている点である。また、方向、剛体、釣り合いなどの比較的広範な観点からカテゴリー化がなされているのが特徴である。

表4 上級者レベルと判定できる結果

分類 カテゴリー	分類された概念	解説
基準2	力の種類、摩擦力、万有引力、磁気力、近接力、遠隔力、弾性力、中心力	力の種類で集めた
基準2	垂直抗力、摩擦力、静止摩擦力、最大静止摩擦力、動摩擦力、摩擦角、静止摩擦係数	摩擦の概念で集めた
基準2	気圧、圧力、水圧、大気圧、浮力、パスカル	圧力の概念で集めた
基準2	力の合成、合力、分力	力の合成の概念で集めた
基準2	重さ、質量	重さの概念で集めた
基準2	作用、反作用、外力の作用	外力の作用が不適切
基準2	力の表現、垂直効力、最大静止摩擦力、静止摩擦力、動摩擦力、重力、電気力、圧力	力の表現法
基準2	万有引力、重力	重力の概念で集めた
基準2	中心力、角運動量	
基準4	力の向き、モーメント、ベクトル	方向を示すもの
基準5	剛体、作用点、原点、質点、重心	剛体のどこに働くかという観点
基準6	力の釣り合い、偶力	釣り合いという観点

◆第二実験:T-Learnシミュレーション

目的:

第二実験では、コンピュータシミュレーターを用いて、以下の目的で学習のシミュレーションを行った。

1. 概念学習のメンタルモデルを構築し、それをもとにしたコンピュータシミュレーションを行い、学習過程に見られる特色を検討する。
2. 第一実験で得られた結果とコンピュータシミュレーションの結果を比較し、熟達の経緯について検討する。

方法：

a. 実験機材：

シミュレーター：学習シミュレーションソフト「T-Learn for Windows95 ver. 1.0.1 (以下、T-Learnと記す)」(Oxford University)を使用した。これはコネクショニストモデル専用、シミュレーションソフトウェアである。

パーソナルコンピュータ：SHARP Mebius (MN-570-H23)。

b. 実験手続き：

(1) 概念の符号化及びクラスター分析：46個の概念の関係を、T-Learnを用いて学習のシミュレーションを行った。個々の概念には階層および並列関係の情報を与えた。階層および並列の情報については高校生用物理学の参考書(近角, 1998)を指標とした。上位階層には下位概念を包含する概念群が分類の対象となる。例えば、「力のはたらき」「力のつりあい」などは、いくつかの概念を包含するので比較的上位の概念になる。同じ階層に属する並列概念群は、二進法でカテゴリー化した。ある上位概念に包含される下位概念は、その上位概念のカテゴリー化された数値を与えられ、さらに下位概念同士で同様にカテゴリー化された。下位階層においての上位概念の情報は無とされた。これらをまとめてT-Learnにてクラスター分析した結果を図1に示す。T-Learnは、このクラスター構造を目標に各概念間のつながりを学習していくのである。

共通文字情報については、概念の階層性に関わらず概念間で共有する文字

を含む場合に同じカテゴリとみなし、同様に二進法で情報を付与した（表1参照）。

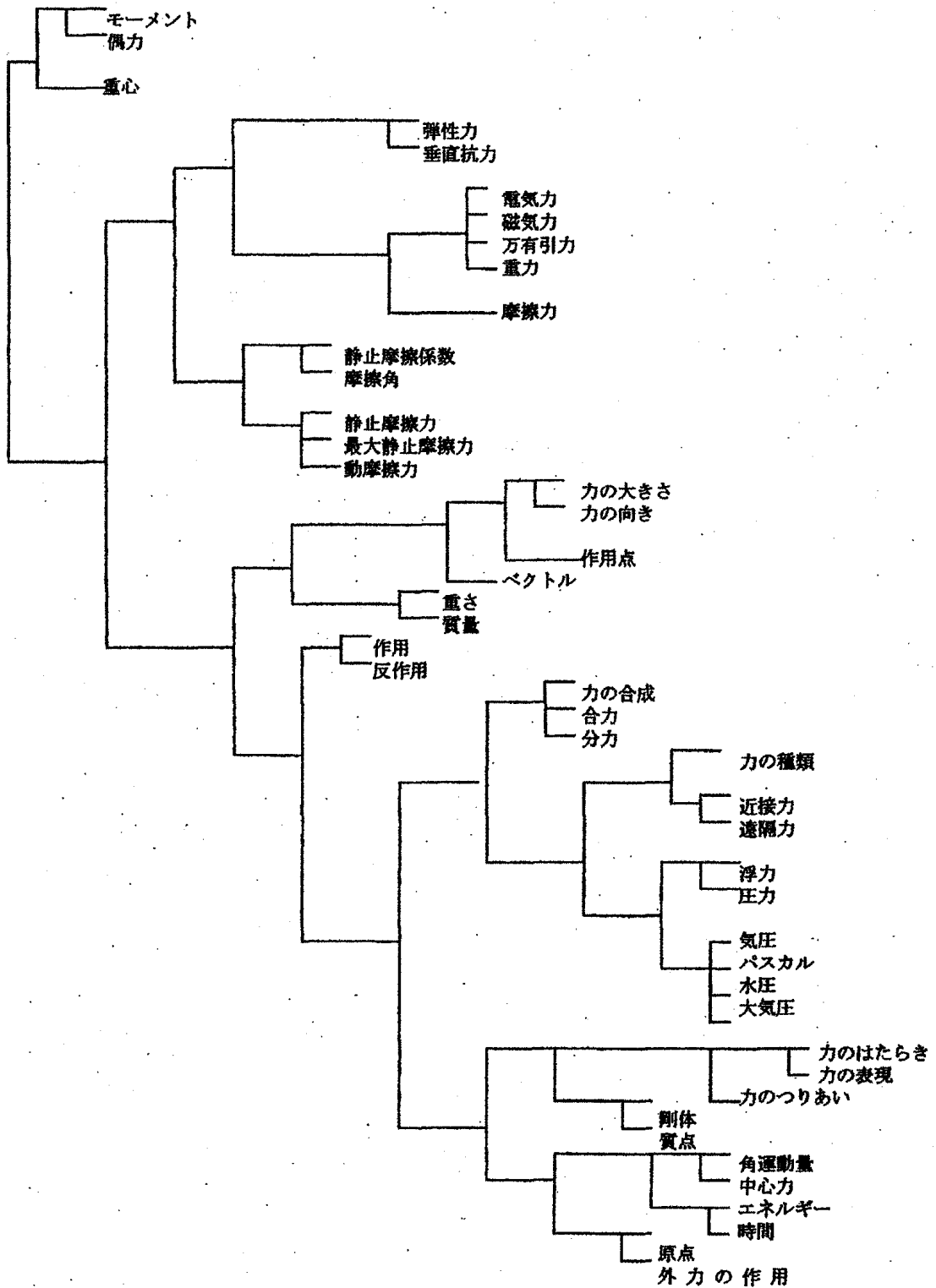


図1 T-learnを用いたクラスター分析の結果

(2) T-Learnシミュレーションに使用した学習ネットワークの構築：

Elman (1990) の単純再帰型ネットワークをもとに学習モデルを構築した。このシミュレーションでは、ネットワークに一度に一つずつ一連の概念情報が与えられ、各概念についての判断を行う。つまり、各概念がどのような分類に従うかを決定しなければならないのである。学習アルゴリズムは、一段階ごとにネットワークの重みを調整するために、判断された状態（つまり計算された出力）と目標状態の差を利用する。何度も試行を重ねて、ネットワークは次の出力の状態の正確さを増していくのである。

流れとしては、概念情報は、まず中間処理層へ入力される。与えられた情報をもとにネットワークは概念についての判断を出力する。中間処理層で処理された系列情報は、文脈ユニットに送られる。送られた情報は、文脈ユニットで動的記憶として保存される。文脈層 (context layer) は、入力の特別な部分集合で、外的な入力を受け取らないが、直前の処理の結果を内部表現へ

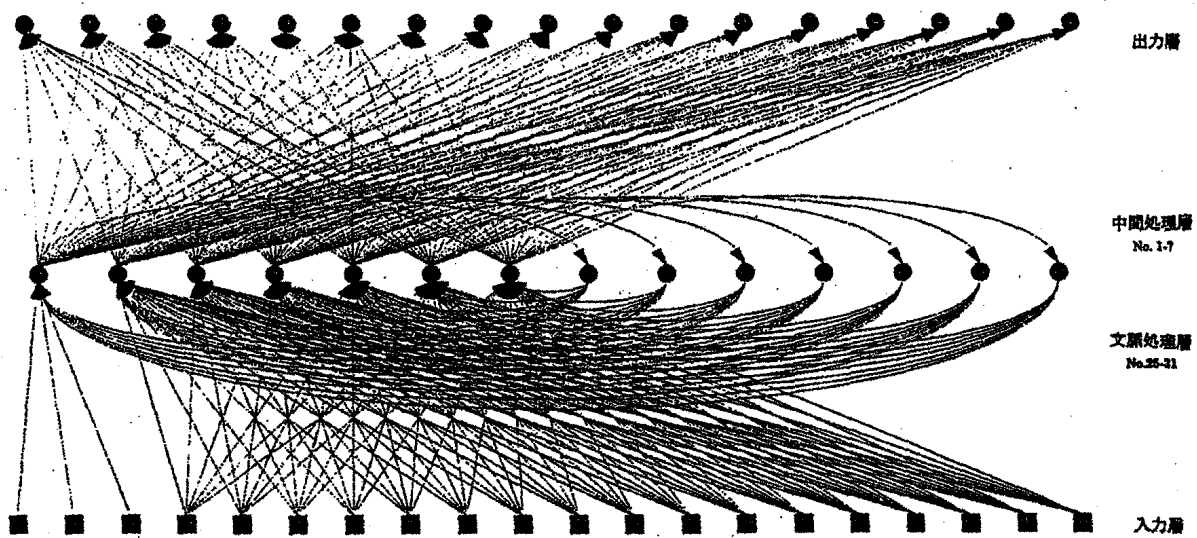


図2 シミュレーションに使用した3層のネットワークモデル

フィードバックする。2回目以降のループでは、中間処理層 (hidden layer) に2回目以降の入力情報と同時に、文脈層からも情報が送られる。すると、第一回目の処理結果を同時に処理することになる。こうしてネットワークは、入力の系列的な性質を反映することができる。その結果、概念判断について、ネットワークは創発的に仮説を生成していくのである (図2参照)。

結果：

概念獲得のメンタルモデルを構築し、46の概念を記号化し、入力形式を整え、学習を行わせた。学習曲線を検討した結果、第一実験で得られた学習状況の3つのレベルにほぼ対応した結果が見られることがわかった(図3参照)。図が示しているのは、誤答率 (平均二乗誤差) の減少の推移である。グラフから読み取れることは、学習が段階的に行われているということである。まず、初心者段階から中級者段階にかけて速やかに行われる。中級段階において漸次学習が行われた後、上級者レベルに達していくのが読み取れるのである。すなわち、各レベルの後半部に、やや誤答率の減少が停滞するというパターンが見られたのである。図3にパターンの見られる位置を示した。また、学習の初心者段階、中級者段階、上級者段階の3つに対応した、各概念に対する学習状況を表5～7に示す。表における数値は、0～1までの範囲をとり、1もしくは0に近いほど学習がなされていることを示す。0.5あたりは、ランダムに反応していることをしめす。表の各列の数値は、表1の入力の次元に対応している。段階が進むに連れて、数値が顕著に両端にすなわち0もしくは1に近づくことがわかる。各階層において、0もしくは1に近い数値の出現するが、それらの行ごとの出現パターンを比較すると、類似したパターンがいくつかの概念同士に見られることが分かる。これらの組み合わせは、先にあげたクラスター分析での分類に一致していることが読み取れる。特に上級者レベルになると、数値のパターンが顕著に読み取れるようになる。幾つか見られる共通パターンの一例を挙げよう。「電気力」と「磁気力」においては、第2、第3、第6階層が共に1に近似した値をとり、第4階層では共

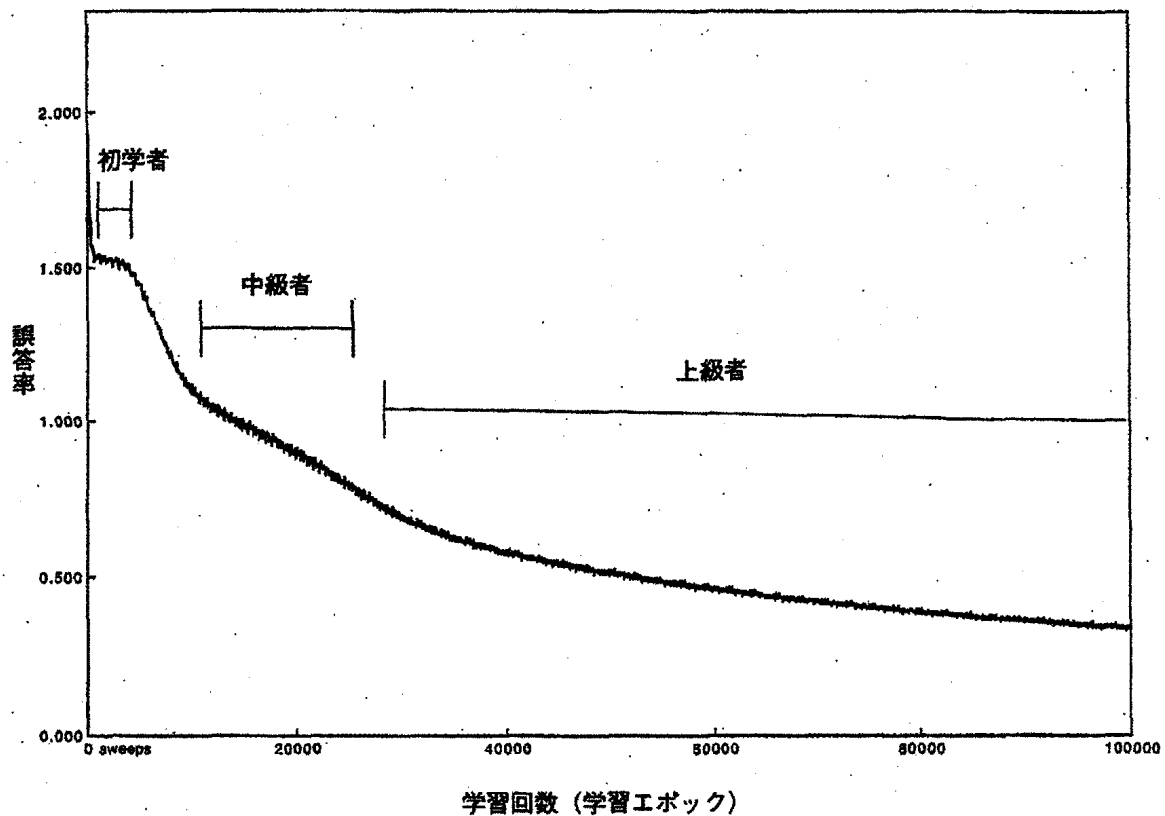


図3 T-Learnによる学習曲線

に0に近似した値をとるのである。このようにして共通したパターン同士を付き合わせてみると、カテゴリ化がなされていることが読み取れるのである。

考察：

概念分類課題を行わせた結果、4つの基準を通して3つのレベルに分類できることが示された。これは、特定の領域に関する宣言的知識あるいは意味的な理解の状態が、表現された構造的知識に反映されていたことを示すものである。つまり、ある領域固有の知識に対しての個人の理解の程度は、宣言的知識を基にして構造的知識として表象されうるということが示唆されるのである。従来は、宣言的知識レベルの知識の存在を示すのに、検索までの反応時間を測定したりして構造を推測するという方法が主流であった (e. g. Anderson, 1983)。今回のように直接に概念を分類させる方法では、宣言的知

表5 初級者レベルでの学習段階

概念	文字情報	第一階層	第二階層	第三階層	第四階層	第五階層	第六階層
力の大きさ	0.562	0.748	0.651	0.670	0.642	0.719	0.678
力のはたらき	0.711	0.805	0.721	0.737	0.772	0.769	0.797
力の表現	0.715	0.820	0.710	0.731	0.785	0.780	0.807
弾性力	0.744	0.873	0.844	0.843	0.849	0.820	0.851
力の種類	0.719	0.849	0.785	0.787	0.806	0.795	0.839
電気力	0.745	0.870	0.831	0.830	0.832	0.819	0.839
磁気力	0.747	0.871	0.832	0.830	0.833	0.820	0.840
近接力	0.747	0.867	0.799	0.808	0.820	0.818	0.840
遠隔力	0.746	0.867	0.798	0.808	0.820	0.818	0.840
力の向き	0.718	0.896	0.772	0.776	0.797	0.848	0.829
作用点	0.738	0.870	0.712	0.729	0.769	0.832	0.791
ベクトル	0.706	0.853	0.704	0.747	0.793	0.821	0.810
力の合成	0.716	0.884	0.812	0.799	0.852	0.841	0.855
合力	0.746	0.886	0.813	0.800	0.853	0.842	0.856
分力	0.747	0.886	0.813	0.800	0.854	0.842	0.857
力のつりあい	0.718	0.812	0.714	0.723	0.787	0.793	0.805
作用	0.737	0.835	0.722	0.711	0.806	0.826	0.815
反作用	0.737	0.836	0.722	0.711	0.807	0.827	0.816
万有引力	0.745	0.870	0.831	0.829	0.831	0.818	0.838
重力	0.747	0.871	0.832	0.830	0.833	0.820	0.840
重さ	0.745	0.856	0.767	0.783	0.821	0.796	0.816
質量	0.736	0.860	0.758	0.786	0.815	0.797	0.807
垂直抗力	0.745	0.874	0.845	0.844	0.850	0.821	0.852
摩擦力	0.711	0.881	0.849	0.849	0.847	0.817	0.845
静止摩擦力	0.710	0.875	0.850	0.832	0.848	0.804	0.842
最大静止摩擦力	0.710	0.875	0.849	0.832	0.847	0.803	0.842
静止摩擦係数	0.710	0.872	0.844	0.837	0.836	0.804	0.829
摩擦角	0.710	0.871	0.844	0.837	0.836	0.804	0.829
動摩擦力	0.710	0.875	0.849	0.832	0.847	0.803	0.842
気圧	0.716	0.860	0.840	0.806	0.849	0.822	0.857
浮力	0.746	0.861	0.811	0.786	0.834	0.815	0.850
パスカル	0.708	0.859	0.840	0.805	0.849	0.822	0.857
圧力	0.716	0.861	0.811	0.786	0.833	0.815	0.850
水圧	0.715	0.859	0.840	0.805	0.848	0.821	0.857
大気圧	0.716	0.860	0.840	0.806	0.849	0.822	0.857
モーメント	0.708	0.855	0.708	0.694	0.791	0.822	0.778
偶力	0.744	0.853	0.706	0.692	0.789	0.821	0.775
重心	0.742	0.852	0.681	0.689	0.779	0.824	0.779
剛体	0.735	0.832	0.735	0.757	0.803	0.777	0.813
質点	0.735	0.833	0.736	0.758	0.804	0.777	0.814
エネルギー	0.706	0.795	0.663	0.684	0.743	0.764	0.750
角運動量	0.733	0.793	0.688	0.664	0.729	0.763	0.735
中心力	0.743	0.793	0.688	0.664	0.729	0.763	0.735
原点	0.734	0.783	0.700	0.675	0.769	0.735	0.767
時間	0.734	0.793	0.661	0.683	0.742	0.762	0.748
外力の作用	0.714	0.783	0.701	0.675	0.769	0.735	0.767

表6 中級者レベルでの学習段階

概念	文字情報	第一階層	第二階層	第三階層	第四階層	第五階層	第六階層
力の大きさ	0.609	0.941	0.219	0.974	0.013	0.848	0.005
力のはたらき	0.820	0.687	0.191	0.297	0.933	0.873	0.918
力の表現	0.827	0.868	0.032	0.263	0.884	0.949	0.719
弾性力	0.910	0.804	0.950	0.988	0.749	0.171	0.532
力の種類	0.829	0.624	0.659	0.743	0.946	0.844	0.928
電気力	0.913	0.788	0.960	0.993	0.483	0.354	0.409
磁気力	0.910	0.795	0.964	0.994	0.455	0.335	0.385
近接力	0.910	0.867	0.704	0.927	0.795	0.856	0.600
遠隔力	0.914	0.866	0.683	0.920	0.812	0.866	0.624
力の向き	0.835	0.955	0.061	0.891	0.087	0.958	0.042
作用点	0.886	0.965	0.008	0.555	0.068	0.965	0.035
ベクトル	0.795	0.938	0.014	0.502	0.541	0.970	0.216
力の合成	0.824	0.775	0.381	0.920	0.811	0.929	0.281
合力	0.911	0.776	0.374	0.916	0.823	0.931	0.300
分力	0.912	0.776	0.372	0.915	0.824	0.932	0.303
力のつりあい	0.831	0.558	0.142	0.195	0.956	0.893	0.947
作用	0.888	0.095	0.082	0.109	0.977	0.931	0.965
反作用	0.885	0.092	0.084	0.112	0.976	0.929	0.963
万有引力	0.906	0.776	0.962	0.993	0.457	0.338	0.377
重力	0.910	0.795	0.964	0.994	0.452	0.333	0.383
重さ	0.915	0.984	0.058	0.935	0.201	0.576	0.041
質量	0.891	0.984	0.072	0.936	0.192	0.618	0.040
垂直抗力	0.907	0.815	0.955	0.989	0.723	0.158	0.499
摩擦力	0.794	0.857	0.968	0.997	0.386	0.086	0.253
静止摩擦力	0.788	0.867	0.973	0.995	0.118	0.033	0.073
最大静止摩擦力	0.784	0.868	0.974	0.995	0.112	0.032	0.068
静止摩擦係数	0.784	0.840	0.977	0.996	0.071	0.021	0.045
摩擦角	0.783	0.840	0.977	0.996	0.071	0.021	0.044
動摩擦力	0.783	0.868	0.974	0.995	0.110	0.032	0.068
気圧	0.829	0.104	0.964	0.904	0.974	0.445	0.958
浮力	0.909	0.202	0.759	0.715	0.978	0.835	0.950
パスカル	0.804	0.097	0.958	0.884	0.979	0.482	0.965
圧力	0.835	0.202	0.759	0.715	0.978	0.835	0.950
水圧	0.837	0.096	0.958	0.885	0.979	0.481	0.965
大気圧	0.835	0.096	0.960	0.888	0.978	0.474	0.964
モーメント	0.801	0.978	0.011	0.098	0.061	0.945	0.018
偶力	0.904	0.979	0.012	0.113	0.050	0.940	0.014
重心	0.909	0.980	0.009	0.085	0.040	0.942	0.012
剛体	0.888	0.916	0.041	0.473	0.820	0.749	0.521
質点	0.894	0.914	0.038	0.444	0.844	0.767	0.565
エネルギー	0.801	0.425	0.045	0.079	0.918	0.917	0.941
角運動量	0.891	0.616	0.053	0.046	0.796	0.920	0.866
中心力	0.908	0.620	0.052	0.046	0.796	0.920	0.867
原点	0.893	0.539	0.105	0.083	0.948	0.856	0.954
時間	0.893	0.412	0.045	0.077	0.919	0.918	0.941
外力の作用	0.823	0.535	0.106	0.083	0.948	0.856	0.954

表7 上級者レベルでの学習段階

概念	文字情報	第一階層	第二階層	第三階層	第四階層	第五階層	第六階層
力の大きさ	0.532	0.094	0.549	0.997	0.001	1.000	0.004
力のはたらき	0.441	0.896	0.259	0.698	0.939	0.587	0.981
力の表現	0.435	0.948	0.040	0.565	0.971	0.829	0.505
弾性力	0.687	0.900	0.994	0.991	0.933	0.033	0.423
力の種類	0.429	0.782	0.901	0.841	0.945	0.856	0.978
電気力	0.672	0.344	0.997	0.999	0.055	0.409	0.905
磁気力	0.689	0.322	0.997	0.999	0.048	0.401	0.897
近接力	0.689	0.803	0.974	0.974	0.668	0.963	0.625
遠隔力	0.678	0.821	0.970	0.971	0.701	0.964	0.654
力の向き	0.427	0.339	0.265	0.977	0.003	1.000	0.153
作用点	0.859	0.557	0.014	0.950	0.002	0.999	0.154
ベクトル	0.911	0.564	0.013	0.954	0.739	0.996	0.062
力の合成	0.440	0.268	0.862	0.977	0.979	0.992	0.013
合力	0.665	0.253	0.867	0.978	0.978	0.991	0.014
分力	0.667	0.256	0.865	0.977	0.979	0.991	0.015
力のつりあい	0.417	0.542	0.051	0.905	0.971	0.272	0.992
作用	0.853	0.004	0.006	0.950	0.995	0.875	0.993
反作用	0.850	0.004	0.005	0.951	0.995	0.870	0.993
万有引力	0.677	0.319	0.997	0.999	0.054	0.420	0.880
重力	0.688	0.320	0.997	0.999	0.048	0.401	0.896
重さ	0.909	0.978	0.012	0.990	0.344	0.079	0.041
質量	0.967	0.980	0.031	0.989	0.455	0.364	0.048
垂直抗力	0.701	0.903	0.994	0.992	0.933	0.034	0.422
摩擦力	0.669	0.767	0.990	0.999	0.280	0.024	0.789
静止摩擦力	0.681	0.907	0.997	0.994	0.028	0.009	0.540
最大静止摩擦力	0.688	0.907	0.997	0.994	0.027	0.009	0.527
静止摩擦係数	0.688	0.578	0.998	0.995	0.008	0.005	0.047
摩擦角	0.686	0.556	0.998	0.996	0.008	0.004	0.040
動摩擦力	0.686	0.899	0.997	0.995	0.027	0.009	0.486
気圧	0.787	0.053	0.995	0.959	0.993	0.221	0.973
浮力	0.668	0.136	0.927	0.869	0.994	0.888	0.967
パスカル	0.896	0.050	0.994	0.954	0.993	0.215	0.976
圧力	0.764	0.137	0.927	0.867	0.994	0.889	0.968
水圧	0.762	0.051	0.994	0.953	0.993	0.216	0.977
大気圧	0.763	0.049	0.995	0.955	0.993	0.220	0.975
モーメント	0.897	0.997	0.584	0.024	0.005	0.986	0.005
偶力	0.708	0.997	0.557	0.026	0.005	0.986	0.004
重心	0.915	0.998	0.175	0.010	0.003	0.985	0.003
剛体	0.968	0.991	0.013	0.614	0.995	0.134	0.250
質点	0.965	0.991	0.013	0.593	0.996	0.147	0.269
エネルギー	0.908	0.351	0.014	0.121	0.756	0.942	0.996
角運動量	0.965	0.960	0.251	0.007	0.122	0.873	0.990
中心力	0.710	0.963	0.246	0.007	0.117	0.872	0.991
原点	0.967	0.839	0.081	0.011	0.917	0.106	0.996
時間	0.966	0.341	0.014	0.105	0.739	0.942	0.996
外力の作用	0.446	0.832	0.081	0.011	0.922	0.108	0.996

識の構造そのものを表象させるのは困難である。しかし、実際に問題を解くときに使う手続き的知識までの媒介的役割を果たす構造的知識を検討することで、宣言的知識の構造を検討することが成熟度を示すことで可能となった。しかし、今後の課題として、宣言的知識から構造的知識に受け取られる過程などは依然検討する必要がある。

今回の研究で考えられる問題点の一つは、対象となった知識領域の構造そのものの検討が不十分である点である。確かに、被験者の状態を成熟段階を想定して分類することができた。しかし、この領域における概念の構造はある程度の系統性はあるものの、かなり複雑に絡み合っていて、今回のクラスター分析のように一律に固定できるものではない。また、個々の概念がもつ意味の広さに対しての情報も明らかではない。このような点から、固有の科学領域との直接比較ができないのである。やはり領域固有の知識そのものを検討することの重要性は課題として残される。つまり、ある科学領域が客観的実在として存在していて、たとえエキスパートであっても人間の認識の中での物理学的構造とは異なっているのか。あるいは、科学史的視点に立ってある科学領域の知識は常に変化していくものなのか。このような問題に当たるには、今回の課題の方法では、明らかに不十分である。

しかし、本研究では、固有の科学領域の客観的な指標との比較ではなく、あくまでも、被験者の構造の相対的比較である。従って、学習対象は、構造的なものであれば問題はないのである。すなわち、今回扱ったような構造的な知識を学習する際には、今回得られたような学習過程を通して行われることがいえる。重要なのは、真に客観的な科学的な実在が存在したとして、それに対して人間はどのように取り組んでいくのかということである。

コンピューターシミュレーションで重要なのは、実際の人間では入手が困難なデータを短時間にして示すことができることである (Elman, et al.,1996)。しかし、シミュレーターに入力するデータが妥当なものであるかどうか、シミュレーションのモデルが妥当なものであるかの検討が必要である。これは、実際の人間のデータを蓄積した上で帰納されたモデルを使用して、検証して

みればある程度の妥当性が確かめられる。今回の場合、Elman (1990) のモデルを参考に、処理構造を構築した。これによって、実際の人間の被験者と同様のあるいは人間の被験者に対しての仮説が検証されたわけである。Elmanのモデルはコネクショニストのパラダイムで構築されたもので、従来の記憶理論 (e. g. G. R. Loftus & E. F. Loftus, 1976) や学習理論 (e. g. Tulving, 1983) とはスキーマなどの概念の点で若干考え方が異なる。従って、従来の意味記憶や長期記憶などの枠組みと単純に比較することはできないが、入力された後、理論的構造は異なるもののスキーマに類似した文脈層に処理されるなど、類似点は多い。

人間の被験者で得たデータと、コンピューターのシミュレーションの結果を合わせて考察して総じていえることは、ある領域における一連の概念の関係は、熟達されながら徐々に学習されていくということである。一つの内容も、他の概念と互いに関わりながら、調整をしつつ熟達するようである。また、科学という領域においては、習得する目標がある程度明確である。熟達における過程を検討した結果、一度中級者レベルまでは短期間で一息に学習するが、中級者から上級者までは漸次的に緩やかに移行していくようである。つまり、物理学の概念をマスターするには、中級者段階からの継続的な学習が必要であるということが示唆される。

今回は、初心者から上級者までの成熟の言わば、垂直的關係における個人差を検討したことになる。しかし、同じレベルにある被験者において表される表象にも相変わらず個人差が顕著に見られる。これは、個人差における水平的側面である。この個人差が、学習の熟達に対してどのような要因として働くかは今回のデータからは説明できない。手続的限界により、検討が困難なためである。今後の課題として、この水平的側面における個人差の検討が示唆されるのである。そして、この個人差が学習のどの側面に影響するかを検討する必要がある。これには、複数の知識領域における構造的知識を検討するなどして、一つの領域に与えるバイアスの大きさを検討することなどが考えられる。また、各領域が如何に関係しあって現在のような知識状態を構

成しているかを検討するには、それまでにいたった発達的な過程を検討する必要がある。

参考文献

- Action, W. H., Johnson, Peder J., & Goldsmith, T. E. (1994). Structural knowledge assessment: Comparison of referent structures. *Journal References*, 86 (2), 303-311.
- Anderson, J. R. (1983). *The architecture of cognition*. Harvard University Press.
- Chi, M. T., Feltovich, P.J., & Glaser, R. (1985). Categorization and representation of physics problems by experts and novices. *Cognitive Science*, 5, 121-152.
- 近角聡信 (1995). *理解しやすい物理 I B・II* 文英堂
- Diekhoff, G. M. (1983). Relationship judgements in the evaluation of structural understanding. *Journal of Educational Psychology*, 75, 227-233.
- Elman, J. L. (1990). Finding structure in time. *Cognitive Science*, 14, 179-211.
- Elman, J. L. & et al. (1996). *Rethinking inertness: A connectionist perspective on development*. Massachusetts: The MIT Press.
- Goldsmith, T., Johnson, P. J. & Action, W. H. (1991). Assessing structural knowledge. *Journal of Educational Psychology* 83 (1), 88-96.
- Jonassen, D. H. & Grabowski, B. L. (1993). *Handbook of individual differences, learning, and instruction*. New Jersey: LEA.
- Karmiloff-Smith, A. (1992). *Beyond modularity: A developmental perspective on cognitive science*. Massachusetts: The MIT Press.
- Larkin, J. H., McDermott, J., Simon, D. P. & Simon, H. A. (1980). Models of competence in solving physics problems. *Cognitive Science*, 4, 317-345.
- Loftus, G. R. & Loftus, E. F. (1976). *Human memory: The processing of information*. LEA.

- Plunkett, Kim & Elman, J. L. (1997). Exercises in rethinking inertness. Massachusetts: The MIT Press.
- Polanyi, M. (1966). The tacit dimension. New York: Doubleday.
- Preece, P. F. W. (1976). Mapping cognitive structure: A comparison of methods. *Journal of Educational Psychology* 68 (1), 1 – 8.
- Quin, Y. & Simon, H. (1990). Laboratory replication of scientific discovery processes. *Cognitive Science* 14, 281–312.
- Roth, W-M., Gabel, D. , Brown, L. & Rice D. (1992). A combined method of indscal and cognitive mapping for describing changes in students' cognitive structure. *Educational and Psychological Measurement* 52, 769–779.
- Rumelhart, D. E., & Ortony, A. (1977). The representation of knowledge in memory. In R. C. Anderson, R. J. Spiro, & W. E. Montague (Eds.) , *Schooling and the acquisition of knowledge*. Hillsdale, NJ: LEA.
- Ryle, G. (1949). *Collected papers, Vol II. Critical essays*. London: Hutchinson.
- Schank, R. & Abelson, R. (1977). *Scripts, plans, goals, and understanding*. Hillsdale, NJ: LEA.
- Tennyson, R. D., & Cocciarella, M. J. (1986). An empirically based instructional design theory for teaching concepts. *Review of Educational Research*, 56, 40–71.
- Tulving, E. (1983). *Elements of episodic memory*. Oxford University Press.
- Zhang, J. & Norman, D. A. (1994). Representations in distributed cognitive tasks. *Cognitive Science* 18, 87–122.

Eliciting the Maturity in Structural Knowledge through Concepts Sorting Task

Hiroshi Maeda

KEY WORDS: Structural knowledge, maturity in knowledge, pieces-sort-task

SUMMARY

Structural knowledge is an intermediate type of knowledge, that mediates the translation of declarative knowledge into procedural knowledge and facilitates the application of procedural knowledge. Therefore structural knowledge reflects structure or architecture of declarative knowledge. In this research, forty-six concepts in dynamics were used as pieces-sort-task as to represent structural knowledge in thirty-two university students. The results could be categorized into three levels as beginner, intermediate, and advanced. To find out whether these three levels came from a continuous entity, computer simulation was executed using the connectionist modeling simulation software T-Learn. The results of the simulation expressed three developmental phases as learning proceeded serially as rapidly learning phase, stagnant learning phase, and gradually learning phase. These results suggest that learning these kind of concepts may have stage-like developmental characteristics. The individual differences in structural knowledge through concepts sorting task may reflect partly degree of maturity in learning systematic scientific concepts.