自己組織型記憶モデル

生天目　章[†]　濱川　孝一郎[†]

本論文では，自律した記憶スキーマの集団（社会）として記憶モデルを定式化する．また，分権型記憶社会としての自己組織型記憶モデルの構成法について提案をし，記憶モデルとしての諸性質について明らかにする．各記憶スキーマは，自己の評価（目標）関数を最適にするよう自己の活性レベルを決定する．そのような自律した記憶スキーマの動作プロセスを分権型意思決定問題として定式化する．さらに各種均衡解を具体的に求め，記憶モデルとしての性質を明らかにする．また，記憶社会の構造として多重階層型の組織構造を提案する．多重階層型構造は，再帰構造および入れ子構造にその特徴がある．自己組織性は，外部からの入力を得ることなしに自らの力で自己の組織構造を変化できる性質をいう．自律した記憶スキーマどうしの相互作用によって競争状態と協調状態との間の相転移が生じることを示す．また相転移の性質を用いて新しい記憶を追加したり，また一度記憶した内容を想起することが可能な自己組織型記憶モデルの構成法を示す．

A Self-organizing Model of Memories

AKIRA NAMATAME[†] and KOUICHIROU HAMAKAWA[†]

We present the model of a society of memories formulated as the dynamic decision-making problem of independent schema agents. We provide the formulation of the dynamic competitive and cooperative decision-making problem among schema agents and show that the model of schema-agents provides the unified theory of realizing high-level cognitive functions. We show that various interesting properties of the long-term memory can be investigated through the asymptotic equilibrium behaviors of those schema-agents. This paper also provides the hyperstrucutral memory model with the composite and recursive architectures, where each component schema agent is modeled to be another group of schema agents. The hyperstrucutral memory model uses the concept of a generalization hierarchy and uses the concepts of composition and recursion for integrating many heterougeneous schema agents.

1. はじめに

人間の知能は，保有する知識に依存するというのが人工知能の研究における一般的な考え方である[1]．しかしながら知識は頭脳の中にどのように記憶され，そしてどのようにして想起されるのであろうか[2),3)]．ミンスキーによれば，記憶は膨大な数の小さなエージェントと呼ばれるプロセスから構成され，記憶は，これらの小さなプロセス間のつながり方によって蓄積されるとしている[4]．また知能の大部分はそれを構成する要素やその内部にあるわけではなく，構成要素の間の相互作用の中に見い出すことができるというのが複雑系システム論的アプローチによる知能のとらえ方である[5)~7)]．すなわち，知能を構成する要素に知能の起源が見い出されるのではなく，内部モデルを持つ要素たる個の間の行為に基づく相互作用として知能は分散されて存在するという考え方である．さらに，要素たる個はいくつも集まることにより，より高次の個（主体）を形成する．つまり，個は，相互に結合をして重合することにより，より複雑な知能が実現されるという考え方である．一方，ニューラルネットワークに基づく記憶モデルは，莫大な数の，しかも比較的単純な処理要素のネットワークとして構成される．ニューラルネットワークモデルは，高度並列型および超分散型の記憶モデルを構成することができ，またモデル自身が自律的に自己の内部表現を構築することができるといった点に特長がある[8),9)]．しかしながら，1つ1つのニューロンやモジュールに分権性や自律性の性質を持たせた高次のモジュールに関する研究は，あまり行われていない[10),11)]．

本論文では，分権型記憶スキーマ社会としての自己組織型記憶モデルの構成法について提案をし，記憶モデルとしての諸性質について明らかにする．すなわち

† 防衛大学校情報工学教室
Department of Computer Science, National Defense Academy

自律した記憶スキーマの集団（社会）として記憶モデルを定式化する．各記憶スキーマは，自己の目標関数を最適にするよう自己の活性レベルを決定する．そのような自律した記憶スキーマの動作を分権型意思決定問題として定式化する．また，それらの各種均衡解を具体的に求め，それらを分析することにより記憶モデルとしての性質を明らかにする．また，記憶スキーマ社会の構造として多重階層型の組織構造を提案する．多重階層型組織構造は，再帰構造および入れ子構造にその特徴がある．シミュレーションにより，多重階層型記憶モデルの諸性質について分析する．さらに，記憶スキーマ間の相互作用関係を記憶スキーマどうしが自律的に操作することにより，記憶スキーマ社会の競争状態を協調状態へ，また逆に協調状態を競争状態へ自律的に変化させる（相転移）ことが可能であることを示す．記憶とは，学習したことを覚える（表現する）だけでなく思い出すこと（抽出，想起）でもある．すなわち，学習したことを構造化された情報として蓄積されるとき記憶されたという．したがって，記憶構造が想起に大きな影響を及ぼす．知識が，ある構造を持って体系的に記憶されるほどあとで想起されやすくなる．また，そのような記憶構造も記憶モデルの自己組織性によって作り出されなければならない．また，自己組織性は，外部からの入力を得ることなしに自らの力で自己の組織構造を変化できる性質をいう．以上の相転移の性質を利用することにより，自己組織型記憶モデルの構成法について提案する．自己組織型記憶モデルは，自律した記憶スキーマどうしが相互作用をし，競争状態と協調状態とを相転移することにより，新しい記憶を追加したり，また一度記憶した内容を想起することが可能な性質を持つ記憶モデルである．

2. 複雑系システム論と自己組織性

複雑なシステム現象を理解するうえにおいて，複雑系システム論が注目されている[12),13)]．複雑系システムの構成要素は，独自の行動ルール（意思決定機構）と複雑な内部状態を持つ個（主体またはエージェントともいう）である．個々に評価関数（目標関数）を持ち，それを最適にするための行動を決定するための機能や自律性を持つ複数の個が集まったとき，集団全体としての集団的行動が出現する．また，そのような集団的行動は，個々の個の機能を超えたところにあり，そのような性質が発生する源は，集団を構成する個と個の間の相互作用にあるとされている．すなわち，異種で多様な個の間の活動が相互作用することにより，個々の個にはないシステム全体としての高次の性質が現われる．

また，システムの自己組織性も構成要素である個の間の相互作用が，その源泉になっているとされている．自己組織性とはシステムが自らの手で，自らの組織と構造を変える性質をさす[14)~16)]．自己組織性は自己が自己のメカニズムによって自己を変化させることであり，理論的には外からの影響がなくても自らを変化させうることを意味する．このように自己組織性は，その内部からシステムを変えようとする構成要素（個）の自発的な努力の成果であると考えられている．システムがいくつかの個から構成される場合，個を下位のシステム，それによって構成される全体システムを上位のシステムともいう[17)]．生物の世界を見ると，多数の種があるいは競合し，あるいは協調して共存した多重階層構造を有している．したがって，自己組織性を有する複雑系のシステムには，その構成要素である個にシステム全体の情報だけでなく，自らの組織構造を再編していく機構が作り込まれていると考えられる[18)]．典型的な例は，物理学における散逸構造である．散逸構造とは，ある構造は安定した状態では１つの平衡状態を保っているが，内部や外部パラメータなどが変化して系としての臨界点に近づくと，もともと系に存在する小さなゆらぎがマクロに成長して，大きくなり，もはや系は持ちこたえられず，急激に系全体が新しい別の平衡状態に遷移するという過程である．すなわち相転移が生じる．したがって，自己組織型システムの構築には，以上のような相転移の概念が重要と思われる．

3. 記憶スキーマ社会モデル

3.1 記憶スキーマ社会の定式化

本節では，記憶モデルを数多くの自律した記憶スキーマの集団（社会）モデルとして定式化する．自律した数多くの記憶スキーマの集団とその相互作用を記憶社会と定義する．記憶スキーマは，それぞれ固有の状態と目標を持ち自律的に行動する．したがって，記憶スキーマ間の相互作用として，各記憶スキーマの目標関数上の相互作用と状態レベルでの相互作用とを考える．そのような自律した記憶スキーマの競争原理または協調原理に基づく行動によって，記憶社会全体としての大域的な秩序が形成され，また維持される．本節では，特に単層構造での記憶社会モデルについて定式化を行う．各記憶スキーマは，想起されることによりある一定の価値を持つものとする．また，その価値は想起された強さに比例するものとする．本論文では，その強さを記憶スキーマの状態レベルによって表

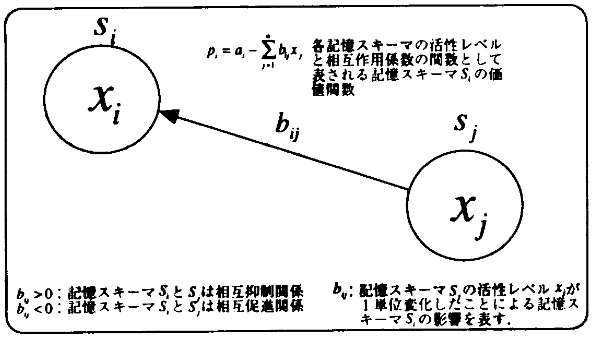


図 1　記憶スキーマ間の相互作用モデル
Fig. 1　An interaction model among schema-agents.

す．また，その価値は他の記憶スキーマの想起された強さ，すなわち他の記憶スキーマの状態レベルにも依存し，その関係も比例関係にあると仮定をする．すなわち，記憶スキーマ S_i, $i = 1, 2, \ldots, n$ は，自己の状態レベル x_i および他の記憶スキーマの状態レベル $x(i) = (x_1, \ldots, x_{i-1}, x_{i+1}, \ldots, x_n)$ で定義される価値関数 $p_i(x_1, \ldots, x_n)$ によって，想起することによる価値を持つものとする．また，そのような価値関数を一次関数として

$$p_i = a_i - \sum_{j=1}^{n} b_{ij} x_j \tag{3.1}$$

で与える．そのような価値関数を持つ各記憶スキーマ間の相互作用の意味あいについて図 1 に示す．

式 (3.1) の価値関数の係数である a_i と b_{ij} は以下のように解釈することができる．a_i は，記憶スキーマ S_i が単独で想起された場合の固有の価値を表している．またその固有の価値が変更されるのは，その記憶スキーマの上位レベルの記憶スキーマからの影響，または下位レベルの記憶スキーマからの影響があった場合である．そのような上位または下位レベルの記憶スキーマからの影響については，6 章で論じる．また価値関数の係数 b_{ij} は，記憶スキーマ S_j の活性レベル x_j が 1 単位変化したことによる記憶スキーマ S_i の価値に及ぼす影響，つまり記憶スキーマ S_j と記憶スキーマ S_i の目標関数上の相互作用を表している．想起することによる記憶スキーマの価値や各記憶スキーマの想起上の相互作用をどのように定量化するかは大変重要な課題ではあるが，生物学的観点からそのような価値やコストは活動レベルに比例をすることが多いと報告されている[18]．本論文では，そのような生物学的知見を参考にして，式 (3.1) のような価値関数を仮定する．したがって，それぞれの記憶スキーマが，あるレベルで想起することによる価値は，次の 2 次関数で与える．

$$\begin{aligned} g_i(x(i), x_i) &= x_i p_i(x_1, \ldots, x_n) - k_i x_i^2/2 \\ &= x_i \left(a_i - \sum_{j=1}^{n} b_{ij} x_j \right) - k_i x_i^2/2 \end{aligned} \tag{3.2}$$

ここで，$x_i p_i(x_1, \ldots, x_n)$ は，記憶スキーマ S_i の状態レベル x_i での総価値，および $k_i x_i^2/2$ は状態レベル x_i における一種のコスト（費用）を表す．各記憶スキーマは，式 (3.2) で与えられる独自の目標関数を持ち，他の記憶スキーマと相互作用を繰り返しながらそれを最適にするよう自己の状態レベルを調整する．

記憶社会を構成をする個々の記憶スキーマは，自己の目標を最適にするような自己の状態レベルを決定する．また，そのような最適化行動を合理的な行動をという．そのような記憶スキーマの合理性に基づく自律的行動が，記憶社会における競争や協調状態を生み出すための源泉であるととらえる．各記憶スキーマの目的関数は，他記憶スキーマの状態レベルにも依存していることから，自己の目的を最適にする状態レベルを決定するうえにおいて他記憶スキーマの状態や目的をも考慮する必要がある．各記憶スキーマの目標関数を最適にする解は，

$$\begin{aligned} \partial g_i / \partial x_i &= a_i - \sum_{j \neq 1}^{n} b_{ij} x_j - b_{ii} x_i - k_i x_i \\ &= 0, \qquad i = 1, 2, \ldots, n \end{aligned} \tag{3.3}$$

を満足する解として与えられる．式 (3.3) を記憶社会を構成するすべての記憶スキーマに対して同時に満足する解を，記憶社会の競争解（ナッシュ解）として定義する．すなわち，そのような競争解は，次式の行列方程式の解として求められる．

$$(B + B_1 + K)x = a \tag{3.4}$$

ここで，B は式 (3.1) の相互作用係数 b_{ij}, $i, j = 1, 2, \ldots, n$ を要素とする $n \times n$ 行列，B_1 は b_{ii}, $i = 1, 2, \ldots, n$ を対角要素とする対角行列，K は，k_i, $i = 1, 2, \ldots, n$ を対角要素とする対角行列を表す．

次に記憶社会の協調解を求める．協調解は，社会を構成する記憶スキーマの目標関数の総和として定義される共通の目標関数

$$\begin{aligned} S(x_1, \ldots, x_n) &= \sum_{i=1}^{n} g_i(x(i), x_i) \\ &= \sum_{i=1}^{n} \left[x_i \left(a_i - \sum_{j=1}^{n} b_{ij} x_j \right) \right. \end{aligned}$$

$$- k_i x_i^2/2\Big] \quad (3.5)$$

を最適にする解として定義する．そのような協調解は

$$\partial S/\partial x_i = a_i - \sum_{j=1}^{n} b_{ij} x_j - \sum_{j=1}^{n} b_{ij} x_j - k_i x_i = 0, \qquad i = 1, 2, \ldots, n \quad (3.6)$$

を同時に満足する解として与えられる．したがって，協調解は，次の行列方程式の解として与えられる．

$$(B + B^T + K)x = a \quad (3.7)$$

ここで，B^T は B の転置行列である．

3.2 動的問題の競争的均衡解と協調解

本節では記憶社会のモデルを動的な観点から定式化し，動的問題の競争解と協調解を求める．各記憶スキーマの活性状態を状態方程式として次の線形方程式で表す．

$$x(t+1) = Ax(t) + u(t) \quad (3.8)$$

ここで A は $n \times n$ 行列，x および u はそれぞれ $n \times 1$ の列ベクトルである．各記憶スキーマ間の相互作用には，式 (3.2) で定義した目標関数間の相互作用と式 (3.8) の状態レベル間の相互作用とがある．式 (3.8) の相互作用を表す行列 A の各要素 a_{ij} は，記憶スキーマ S_j の活性レベル x_j が1単位変化したことによる記憶スキーマ S_i の状態レベルへ及ぼす影響を表す．特に，記憶スキーマ間に上位・下位関係のない対等性を仮定し，状態レベルでの相互作用行列は対称行列 $A = A^T$ とする．以下では，解析を容易にするため相互作用行列の対称性を仮定する．

各記憶スキーマの短期目標を次式の2次関数として定式化する．

$$g_i(x(t+1), u(t)) = x_i(t+1)\left\{a_i - \sum_{j=1}^{n} b_{ij} x_j(t+1)\right\} - k_i u_i^2(t)/2 \quad (3.9)$$

記憶スキーマは，自己と他の記憶スキーマの活性状態 x_i, $i = 1, 2, \ldots, n$ によって定義される自己の目標関数を最適にする u_i を決定する問題を定式化する．以上の記憶スキーマの短期目標 S_i を最適にする行動は，次の方程式の解として与えられる．

$$\begin{aligned}\partial g_i/\partial u_i(t) &= a_i - \sum_{j=1}^{n} b_{ij} x_j(t+1) - b_{ii} x_i(t+1) - k_i u_i(t) \\ &= a_i - \sum_{j \neq i}^{n} b_{ij}\left[\sum_{k=1}^{n} a_{kj} x_k(t) + u_j(t)\right] \\ &\quad - 2b_{ii}\left(\sum_{k=1}^{n} a_{ki} x_k(t) + u_i(t)\right) \\ &\quad - k_i u_i(t) \\ &= 0 \end{aligned} \quad (3.10)$$

動的な競争的均衡解は，次の行列方程式の解として与えられる．

$$(B + (B_1 + K)(I - A))x = a \quad (3.11)$$

以上の式において，$A \equiv 0$，すなわち状態レベルが動的に推移しない場合には，

$$(B + B_1 + K)x = a \quad (3.12)$$

となり，式 (3.4) で求めた静的な問題の競争的均衡解と同じになる．

次に動的な問題の協調解を求める．社会を構成する各エージェントの目標関数の総和として定義される目標関数

$$\begin{aligned} S &= \sum_{i=1}^{n} g_i(x(t+1), u(t)) \\ &= \sum_{i=1}^{n}\left[x_i(t+1)\left\{a_i - \sum_{j=1}^{n} b_{ij} x_j(t+1)\right\} - 1/2 k_i u_i^2(t)\right] \end{aligned} \quad (3.13)$$

で定義する．以上の目標関数を最適にする協調解は，

$$\begin{aligned} &\partial S/\partial u_i(t) \\ &= a_i - \sum_{j=1}^{n} b_{ij} x_j(t+1) - \sum_{j=1}^{n} b_{ji} x_j(t+1) - k_i u_i(t) \\ &= a_i - \sum_{j=1}^{n} (b_{ij} + b_{ji}) x_j(t+1) - k_i u_i(t) \\ &= a_i - \sum_{j=1}^{n} (b_{ij} + b_{ji})\left[\sum_{k=1}^{n} a_{kj} x_k(t) + u_j(t)\right] - k_i u_i(t) \\ &= 0, \qquad i = 1, 2, \ldots, n \end{aligned} \quad (3.14)$$

を同時に満足する解として与えられる．式 (3.8) の定常解と式 (3.14) より，動的な問題の協調解は，次の行列方程式の解として与えられる．

$$(B + (B^T + K)(I - A))x = a \quad (3.15)$$

4. 記憶モデルとしての諸性質

本章では，記憶社会の競争解と協調解とを具体的に求め，それらを分析することにより記憶モデルとしての諸性質について明らかにする．まず最初に，式(3.4)の相互作用係数を要素とする行列 B の対角要素が同じ係数 d，および非対角要素が同じ係数 $b\,(0<b\le d)$ とする．また，対角行列 K および列ベクトル a も同じ要素，すなわち $k_i=k$, $a_i=a$, $i=1,2,\ldots,n$ とする．特に，$b\ll d$ の場合は，相互依存度の低い，また $b\cong d$ の場合は，相互依存度の高い記憶社会である．競争解および協調解における各記憶スキーマの活性レベルは，記憶社会を構成する記憶スキーマの数 n の関数として以下の式で与えられる．

$$x_i^0(n)=a/(2d+k+b(n-1),\quad i=1,2,\ldots,n \qquad (4.1)$$

$$x_i^*(n)=a/(2d+k+2b(n-1)),\quad i=1,2,\ldots,n \qquad (4.2)$$

これらの式から，各記憶スキーマの協調解における活性レベルは競争解における活性レベルより低くなることが分かる．

次に，同時に多数の記憶スキーマを連想するために必要なエネルギーについて考察する．各記憶スキーマのコスト関数の係数が $k_i=0$, $i=1,2,\ldots,n$ の場合を考える．この場合競争解 $x^0=(x_1^0,\ldots,x_i^0,\ldots,x_n^0)$ における各記憶スキーマ S_i, $i=1,2,\ldots,n$ の価値関数は，

$$\begin{aligned}
&p_i(x_1^0,\ldots,x_i^0,\ldots,x_n^0)\\
&\quad=a_i-b_{ii}x_i^0-\sum_{j\ne i}^{n}b_{ij}x_j^0\\
&\quad=\left\{a_i-\left(a_i-\sum_{j\ne i}^{n}b_{ij}x_j^0\right)\Big/2\right\}\\
&\qquad-\sum_{j\ne i}^{n}b_{ij}x_j^0\\
&\quad=\left(a_i-\sum_{j\ne i}^{n}b_{ij}x_j^0\right)\Big/2\\
&\quad=b_{ii}x_i^0
\end{aligned} \qquad (4.3)$$

となる．したがって，競争解における各記憶スキーマの目標関数の値は，次式で与えられる．

$$\begin{aligned}
&g_i(x_1^0,\ldots,x_i^0,\ldots,x_n^0)\\
&\quad=p_i(x_1^0,\ldots,x_i^0,\ldots,x_n^0)x_i^0\\
&\quad=b_{ii}(x_i^0)^2
\end{aligned} \qquad (4.4)$$

一方，協調解 $x^*(x_1^*,\ldots,x_i^*,\ldots,x_n^*)$ における記憶スキーマ S_i の価値関数は，

$$\begin{aligned}
p_i(x_1^*,\ldots,x_i^*,\ldots,x_n^*)&=a_i-\sum_{j=1}^{n}b_{ij}x_j^*\\
&=\sum_{j=1}^{n}b_{ij}x_j^*
\end{aligned} \qquad (4.5)$$

で与えられる．また，協調解における各記憶スキーマの目標関数の値は次式で与えられる．

$$\begin{aligned}
&g_i(x_1^*,\ldots,x_i^*,\ldots,x_n^*)\\
&\quad=p_i(x_1^*,\ldots,x_i^*,\ldots,x_n^*)x_i^*\\
&\quad=b_{ii}(x_i^*)^2+\sum_{j\ne i}^{n}b_{ji}x_j^*x_i^*
\end{aligned} \qquad (4.6)$$

一方，n 個の記憶スキーマで構成される記憶社会において，1つの記憶スキーマを連想するのに必要なエネルギーを

$$e_i(n)=E/n-g_i(n) \qquad (4.7)$$

で表す．ここで，E は記憶社会全体で利用可能なエネルギーとする．E/n は，それを記憶社会を構成する各記憶スキーマに均等に配分された値で，各記憶スキーマが利用可能なエネルギーを表す．また，$g_i(n)$ は記憶スキーマ S_i の目標関数を表す．すなわち，利用可能なエネルギー (E/n) から，記憶スキーマ S_i の獲得した目標関数の値 $g_i(n)$ を差し引いた値によって，記憶スキーマ S_i が連想されるための必要なエネルギーとする．したがって，各記憶スキーマが自己の目標関数 $g_i(n)$ を最大化にするための行動は式(4.7)のエネルギー関数を最小化する問題として定式化される．n 個の記憶スキーマで構成される記憶社会における必要なエネルギーの総量を

$$\begin{aligned}
G(n)&\triangleq\sum_{i=1}^{n}e_i(n)\\
&=E-\sum_{i=1}^{n}g_i(n)
\end{aligned} \qquad (4.8)$$

で定義する．

式(4.1)および(4.2)を式(4.4)または(4.6)に代入することにより，競争解および協調解における各記憶スキーマの目標関数の値は，それぞれ次式で求められる．

$$g_i^0(n)=a^2d/(2d+b(n-1))^2 \qquad (4.9)$$

$$g_i^*(n)=a^2/4(d+b(n-1)) \qquad (4.10)$$

したがって，記憶社会の均衡解における各記憶スキーマの目標関数の総和は，次式で与えられる．

$$G^0(n)=\sum_{i=1}^{n}g_i^0(n)=a^2dn/(2d+b(n-1))^2 \qquad (4.11)$$

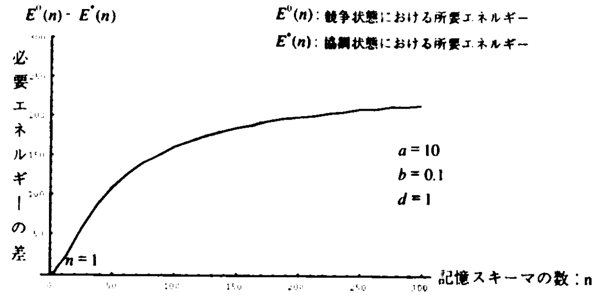


図 2　同時多数の記憶スキーマを連想するうえで必要となるエネルギー差の推移

Fig. 2　The amount of energies for reminding many schema-agents simultaneously.

$$G^*(n) = \sum_{i=1}^{n} g_i^*(n) = a^2 n / 4(d + b(n-1)) \tag{4.12}$$

一方，記憶社会の競争解および協調解において，同時に多数の記憶スキーマを連想するために必要とされるエネルギー量は，記憶社会全体で利用可能なある一定のエネルギーレベル E から $G^0(n)$ または $G_i^*(n)$ を引いた値，すなわち

$$E^0(n) = E - G^0(n) \tag{4.13}$$

$$E^*(n) = E - G^*(n) \tag{4.14}$$

によって表される．また式 (4.12) において，記憶スキーマの数 n を無限大にすることにより

$$\lim_{n \to \infty} G^*(n) = a^2/4b \tag{4.15}$$

が得られる．したがって，協調解においては，記憶スキーマの数が増大しようとも一定のエネルギーで，同時に多数の記憶スキーマを連想することが可能であることが分かる．しかしながら，競争解においては，式 (4.11) より

$$\lim_{n \to \infty} G^0(n) = 0 \tag{4.16}$$

を得る．したがって，記憶スキーマ数が増大するにつれ競争解の方が協調解よりは，より多くエネルギーを必要とし，その差は

$$\lim_{n \to \infty} (E^0(n) - E^*(n)) = \lim_{n \to \infty} (G^*(n) - G^0(n)) = a^2/4b \tag{4.17}$$

で与えられる．具体的に記憶スキーマの個数によって同時に多数の記憶スキーマを連想するために必要とされるエネルギーの差がどのように変化するかについて図 **2** に示す．

5. 競争状態と協調状態の相転移

本章では，記憶社会の競争状態と協調状態の相転移の概念について示す．式 (3.11) および (3.15) より，記憶社会の動的な競争解と協調解は次式で求められた．

$$\begin{cases} (B + (B_1 + K)(I - A))x = a \\ (B + (B^T + K)(I - A))x = a \end{cases} \tag{5.1}$$

行列 B の各要素は，各記憶スキーマの目標関数上の相互作用を表している．また，行列 A の各要素 a_{ij} は状態レベルでの相互作用を表す．特に，$a_{ij} > 0$ の場合は，記憶スキーマ S_i と S_j は相互促進の関係にあり，$a_{ij} < 0$ の場合には相互抑制の関係にあるといえる．行列 B で表される各記憶スキーマの目標レベルでの相互作用と行列 A で表される状態レベルでの相互作用の両方を考慮したのが動的モデルである．また，それらの 2 つの相互作用を同時に均衡させるのが式 (5.1) の解である．$A > 0$ すなわち状態レベルにおいて相互促進型の記憶スキーマは，$(B_1 + K)(I - A)$ の要素を負にする効果がある．すなわち，目標関数の相互作用を表す B の各要素の値を負の方向，すなわちそれぞれの記憶スキーマの目標関数に相乗効果のある相互作用になる．したがって，均衡状態において各記憶スキーマの状態レベルを高める効果がある．しかしながら，各記憶スキーマの状態レベルを高めるために新たなエネルギーは必要としない．このような効果は，各記憶スキーマの状態レベルでの相互促進すなわち，相互相乗効果によってもたらされる．逆に，A に負の要素が含まれると，$(B_1 + K)(I - A)$ の要素を正にすることになり，目標関数上の競合状態を高め状態レベルを低くすることになる．すなわち状態レベルが相互抑制型の関係にある記憶スキーマは，多くのエネルギーを使って低いレベルでしか活性化することができない．

次に，記憶社会の競争状態と協調状態の相転移について述べる．相転移とは，組織構造が質的に異なる別の構造へ変更されることをいう．記憶スキーマ間の目標関数上の相互作用は，式 (3.1) の各記憶スキーマの価値関数によって定義された．これは，いわば記憶社会の外部からの制約条件であるとしてきた．これらの制約条件の下で，記憶社会における競争または協調状態が形成された．しかしながら，状態レベルの推移モデル，すなわち各記憶スキーマの内部状態の相互作用係数を操作することにより，競争状態でありながら協調状態と同じ状態を実現することができ，またその逆も可能になることを示す．動的な記憶モデルの競争解

と目標関数上の相互作用だけを考慮した静的な問題の協調解はそれぞれ次式で求められた.

$$(B+(B_1+K)(I-A))x^0=a \tag{5.2}$$

$$(B+B^T+K)x^*=a \tag{5.3}$$

ここで $x^*=x^0$ となるための A の条件を求めると

$$B^T+K=(B_1+K)(I-A)$$

$$A=(B_1+K)^{-1}(B_1-B^T) \tag{5.4}$$

となる．特に，$K\equiv 0$ の場合，および，結合係数を正規化することにより $b_{ii}=1,\ i=1,2,\ldots,n$ とすることができ，したがって，B_1 が $n\times n$ の単位行列の場合は，

$$A=B_1^{-1}(B_1-B^T)$$

$$=I-B^T \tag{5.5}$$

を得る．すなわち状態レベルの相互作用行列を式 (5.5) のように設定することにより，静的な記憶社会の競争状態を協調状態へ相転移させることができる．同様に，協調解から競争解への相転移の条件を求める．静的な問題の協調解と動的な問題の競争解の条件式は，次式で与えられた．

$$(B+B_1+K)x^0=a$$

$$(B+(B^T+K)(I-A))x^*=a \tag{5.6}$$

式 (5.7) の均衡解において $x^0=x^*$ となるような A を求めると，

$$B_1+K=(B^T+K)(I-A)$$

$$A=(B^T+K)^{-1}(B^T-B_1) \tag{5.7}$$

特に，$K\equiv 0, B_1\equiv I$ のとき

$$A=I-(B^T)^{-1}B_1$$

$$=I-(B^T)^{-1} \tag{5.8}$$

となる．相互作用行列 A を式 (5.5) または (5.8) に設定することにより，記憶社会の競争解から協調解へ，または協調解から競争解へとそれぞれ均衡状態を転相することができる．以上のような記憶社会における相転移の概念図を図 **3** に示す.

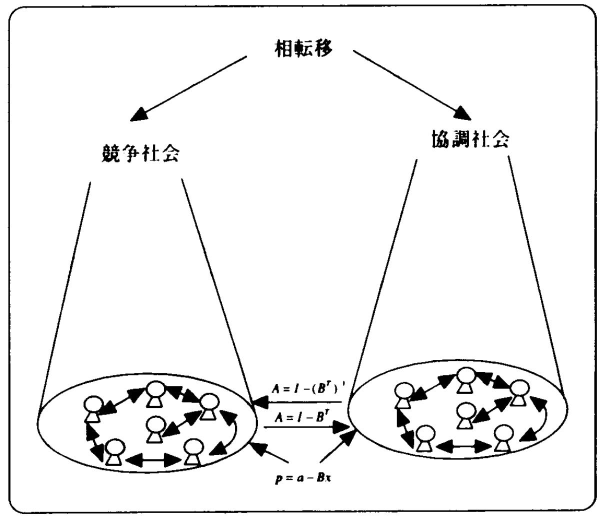


図 3 相転移の概念
Fig. 3 Concept of synergatics : Transition from competitive states to cooperative states.

6. 自己組織型記憶モデルの構成法

本章では，前章で明らかにした相転移に基づき自己組織型記憶モデルの構成法について示す．生物システムは，細胞，器官，個体，集団など，さまざまな階層レベルから構成されている．そしてそのどの階層レベルをとってみても，より上の階層レベルに対しては，それの部分となっている面を同時に持っている．ある階層レベルの要素には，多くの構成要素の集団が，それより下位の階層レベルのシステムとして掩蔽化されて含まれており，その階層レベルの構成要素の集団はさらに上位の階層レベルの構成要素に含まれた入れ子構造になっている．また，このように生物システムの階層レベルの要素間の関係は再帰的で，どのレベルをとってみても全体でありかつ部分であるとともに，どの階層レベルの要素も同じような内部構造を有している．さらに生物システムは，どの階層レベルにおいてもそこで全体としてまとまった面を持っているとともに，より上位の階層レベルにいくと下の階層レベルではみられない新しい抽象化された性質が現われる．階層レベルによって異なる性質が現われるのは，構成要素間の相互作用によって生じえると考えられる[17),18)]．以上の構成要素間の複雑な相互作用，すなわち，異なる階層レベル間での相互作用および同じ階層レベルでの相互作用の中から，生物システムの自律性や自己組織性が生じると考えられている．また，このような性質は，生物システムの再帰的で多重階層型の組織構造から生じるものと考えられている[13),16)]．生物システムの組織構造の概念を取り入れた多重階層型の記憶モデルを考える．多重階層型の組織構造を持つ記憶スキーマ社会は，相互に関連のあるいくつかの下位記憶スキーマから構成され，その下位記憶スキーマがまた順次もっと低いレベルの，そしてそれ以上分解することができない基本的な下位記憶スキーマに至るまで，それぞれ階層的な構造を持って連なったものとしてモデル化する．以上の組織構造を持つ記憶スキーマの社会を多重階層型記憶モデルと呼ぶことにする．単層の記憶モデルを多重レベルに拡張したのが図 **4** に示す多重階層型記憶モデルである．多重階層型記憶モデルの挙動について図 4 を用いながら説明をする．図 4 において上位記憶スキーマの活性状態は，下位レベルの記憶スキーマすべてに対して影響を与える．また，下位

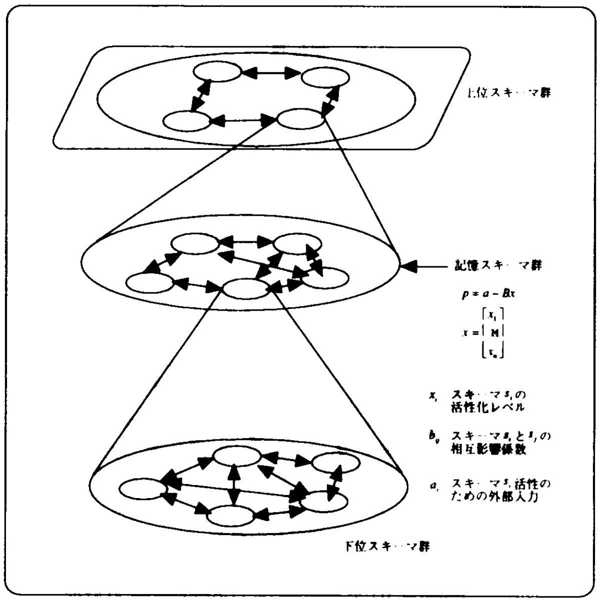


図 4　多重階層型記憶モデルの基本原理
Fig. 4　A principle of multi-level hierarchical memories.

スキーマの活性状態の総和はその上位レベルの記憶スキーマに影響を与える．この相互作用の仕組みにより記憶社会全体で定常状態になるまで相互作用が行われる．定常状態の収束性は，式 (5.6) の右辺の行列の安定性に関する特性によって決定され，特に対角要素が非対角要素の和より大であれば収束性は保証される．したがって，定常状態の収束性は相互作用行列 B の特性によって決定さる．従来の階層型記憶モデルにおいては，記憶スキーマ間の処理は並列である．一方，多重階層型記憶モデルは，記憶スキーマの並列処理と逐次処理の両方の性質を持ちあわせたモデルである．すなわち，同じ層内の記憶スキーマ群における競争または協調のある均衡した状態がまず生成され，その均衡状態が次のステップで上位または下位の層のスキーマ群に伝搬される．すなわち，同じ層内では並列処理が行われるが，層間では逐次処理である．一般に，人間の記憶は並列と逐次処理が混在しているとされている．したがって，記憶モデルとしては多重階層型記憶モデルの方が適切であると考えられる次に，**表 1** に示す例を用いて多重階層型記憶モデルの諸性質をシミュレーションによって明らかにする．表 1 に示すような 30 個で構成される記憶スキーマの集合体を考える．各層間の記憶スキーマの関係，すなわち上位記憶スキーマと下位記憶スキーマの関係を表 1 は示している．$S_1 \sim S_7$ は第 1 層，$S_8 \sim S_{16}$ は第 2 層そして $S_{17} \sim S_{30}$ は第 3 層の記憶スキーマである．

ケース 1：S_1 と S_2 を初めて想起した場合すなわち，ベクトル $a = (a_1, a_2, \ldots, a_{30})$ において S_1 と S_2 に対応する a_1 と a_2 を 10 とし，他を 5 とした場合：これは，異なるものどうしを想起した場合どうなるかについて分析するものである．

ケース 2：S_1 と S_3 を初めに想起した場合：これは似たものどうしを想起した場合どうなるかについて分析するものである．

それぞれのケースにおける均衡解を，**表 2** (a)，2 (b) にそれぞれ示す．いずれのケースについても以下のことがいえる．すなわち，多重階層型記憶モデルは，活性レベルならびに固定価値が階層を隔てるごとに変化していく．また多重階層型記憶モデルは，特徴をより大きく表現することに成功している．占有率で見るとそのことがよりはっきりとしている．多重階層型記憶モデルは，階層ごとに状態レベルを再活性することにより，顕著な特徴を伝搬することに成功している．

次に，多数の記憶スキーマを連想するために必要なエネルギー量の観点から多重階層記憶モデルと階層記憶モデルとの比較を行う．図 4 の入れ子構造の多重階層型記憶モデルにおいて，k 個の記憶スキーマがそれぞれ n 個の記憶スキーマを入れ子構造として持つ場合の競争解における必要なエネルギー量を求め，それを階層型記憶モデルの場合と比較する．階層型記憶モデルにおいては，$k \times n$ 個の記憶スキーマが競争解において獲得する目標値の総和は式 (4.11) より

$$G_1^0 = G^0(kn) = a^2dkn/(2d + b(kn-1))^2 \tag{6.1}$$

で与えられる．同様にして多重階層型記憶モデルの場合は

$$G_2^0 = kG^0(n) = a^2dkn/(2d + b(n-1))^2 \tag{6.2}$$

で与えられる．したがって，両者の相対比は，

$$G_2^0/G_1^0 = \left(\frac{2d + b(nk-1)}{2d + b(n-1)}\right)^2 \approx O(k^2) \tag{6.3}$$

で与えられ，n が大きくなるにつれ k^2 オーダで与えられる．また，階層型記憶モデルにおいて，$k \times n$ 個の記憶スキーマを同時に連想するために必要なエネルギー量 E_1 は，

$$E_1 \triangleq E - G_1^0 \tag{6.4}$$

多重階層記憶モデルによる所要エネルギー量は，

$$E_2 \triangleq E - G_2^0 \tag{6.5}$$

で与えられるので，両者の比は，

表1 記憶スキーマ間の上位および下位関係
Table 1 Hierarchical relations among schema-agents.

上位下位関係/記憶スキーマ	上位記憶スキーマ	下位記憶スキーマ
S_1		S_8 S_9 S_{10} S_{14} S_{15}
S_2		S_9 S_{11} S_{12} S_{13} S_{14}
S_3		S_8 S_9 S_{10} S_{14}
S_4		S_8 S_9 S_{14} S_{15}
S_5		S_9 S_{16}
S_6		S_9 S_{16}
S_7		S_8 S_9 S_{15}
S_8	S_1 S_3 S_4 S_7	S_{25} S_{26} S_{27}
S_9	S_1 S_2 S_3 S_4 S_5 S_6 S_7	S_{20} S_{21} S_{22} S_{30}
S_{10}	S_1 S_3	S_{17} S_{29}
S_{11}	S_2	S_{17} S_{19} S_{23} S_{27} S_{28} S_{29}
S_{12}	S_2	S_{17} S_{19} S_{23} S_{24} S_{25} S_{27} S_{28} S_{29}
S_{13}	S_2	S_{17} S_{19} S_{25} S_{29}
S_{14}	S_1 S_2 S_3 S_4 S_5 S_7	
S_{15}	S_1 S_4 S_7	S_{17} S_{18} S_{19} S_{28}
S_{16}	S_5 S_6	S_{17}
S_{17}	S_{10} S_{11} S_{12} S_{13} S_{15} S_{16}	
S_{18}	S_{15}	
S_{19}	S_{11} S_{12} S_{13} S_{15}	
S_{20}	S_9	
S_{21}	S_9	
S_{22}	S_9	
S_{23}	S_{11} S_{12}	
S_{24}	S_{12}	
S_{25}	S_8 S_{12} S_{13}	
S_{26}	S_8	
S_{27}	S_8 S_{11} S_{12}	
S_{28}	S_{11} S_{12} S_{15}	
S_{29}	S_{10} S_{11} S_{12} S_{13}	
S_{30}	S_9	

$$E_1/E_2 = (1 - G_1^0/E)/(1 - G_2^0/E) \approx 1 - (G_1^0 - G_2^0)/E \quad (6.6)$$

ここで，E を $E = \alpha G_1^0$ $(\alpha > 1)$ で与えると

$$E_1/E_2 = 1 - (1 - G_2^0/G_1^0)/\alpha \approx (1 - 1/\alpha) + (G_2^0/G_1^0)/\alpha \quad (6.7)$$

を得る．したがって多数の記憶スキーマを同時に連想するのに必要なエネルギーにおいて階層型記憶モデルは，多重階層型記憶モデルと比較して k^2 に比例して，増大することが分かる．

次に，記憶モデルにおける競争と協調状態の相転移の役割について考察する．記憶モデルの中心的課題のひとつとして自己組織性の問題がある．自律的に振る舞う構成要素（記憶スキーマ）がそれぞれ独立にある評価値を最適化するための行動の結果として，記憶全体としての秩序形成，すなわち，記憶した内容を思い出す過程（想起）や新しい記憶の追加や安定した記憶体系が外部からの刺激（入力）なしに，どのようにして行われるのであろうか．以上の記憶モデルの自己組織性の問題を解く鍵は，競争解と協調解の相転移にあると考える．前章で述べたように，記憶社会において，協調解と比較し競争解の方が各記憶スキーマの活性レベルが高くなる．したがって，すでに記憶された内容を思い出す行為は，協調状態を作り出し安定した記憶体系を競争状態に相転移させることであると考えることができる．また，この相転移は，各記憶スキーマの状態間の相互作用係数を操作することにより，自律的に行わせることができる．競争状態を作り出すことにより，各記憶スキーマは以前より高いレベルの状態で均衡する．さらに，その高いレベルでの活性状態は，上位記憶スキーマまたは下位記憶スキーマ群に対しても伝搬される．それによって，上位または下位層におけるそれぞれの記憶スキーマ群は新しい条件の下で均衡するように動作を行い，結果として関連する上位または下位記憶スキーマが想起される．以上のような相転移により，一度記憶した内容を記憶スキーマの集合の外部からの入力や刺激無しでも自力で想起する．すなわち自己組織化することができる．一方，競争解は協調解と比較し，同時に多数の記憶スキーマを維持す

表2 多重階層記憶モデルのシミュレーション結果の一例
Table 2 Simulation results of a multiple hierarchical memory model.

(a) S_1 と S_2 を初期値として刺激

$(B+B_1+k)x=a$

階層	第1層							第2層								
記憶スキーマ	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}	x_{12}	x_{13}	x_{14}	x_{15}	x_{16}
状態	2.87	2.87	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.63	3.4	0.86	0.48	0.48	0.48	3.01	1.25	0.25
占有率	0.25	0.25	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.13	0.28	0.07	0.04	0.04	0.04	0.25	0.10	0.02

階層	第3層													
記憶スキーマ	x_{17}	x_{18}	x_{19}	x_{20}	x_{21}	x_{22}	x_{23}	x_{24}	x_{25}	x_{26}	x_{27}	x_{28}	x_{29}	x_{30}
状態	1.08	0.20	0.69	0.93	0.93	0.93	0.10	0.00	0.66	0.33	0.66	0.53	0.56	0.93
占有率	0.12	0.02	0.08	0.10	0.10	0.10	0.01	0.00	0.07	0.03	0.07	0.06	0.06	0.10

(b) S_1 と S_3 を初期値として刺激

$(B+B_1+k)x=a$

階層	第1層							第2層								
記憶スキーマ	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}	x_{12}	x_{13}	x_{14}	x_{15}	x_{16}
状態	2.87	1.1	2.87	1.1	1.1	1.1	1.1	2.27	3.42	1.5	0.00	0.00	0.00	3.03	1.27	0.27
占有率	0.25	0.09	0.25	0.09	0.09	0.09	0.09	0.19	0.3	0.13	0.00	0.00	0.00	0.26	0.11	0.02

階層	第3層													
記憶スキーマ	x_{17}	x_{18}	x_{19}	x_{20}	x_{21}	x_{22}	x_{23}	x_{24}	x_{25}	x_{26}	x_{27}	x_{28}	x_{29}	x_{30}
状態	0.74	0.25	0.14	0.99	0.99	0.99	0.00	0.00	0.52	0.59	0.52	0.18	0.22	0.99
占有率	0.11	0.03	0.02	0.14	0.14	0.14	0.00	0.00	0.07	0.08	0.07	0.02	0.03	0.14

るためのエネルギーを多く必要とする．したがって，安定した記憶社会の維持や新しい記憶スキーマを既存の記憶社会に追加するためには，協調状態を作り出すものと考えられる．したがって，記憶社会が競争状態として均衡しているのであれば，それを協調状態に相転移させる必要がある．この場合にも，状態レベルでの相互作用係数をそれぞれの記憶スキーマが自律的に変更することによって実現することができる．すなわち，競争解と協調解との間の相転移を利用することにより，自己組織型の記憶モデルの構成が可能になる．図5に相転移を利用した多重階層型記憶モデルに基づく自己組織型記憶モデルの概念図を示す．

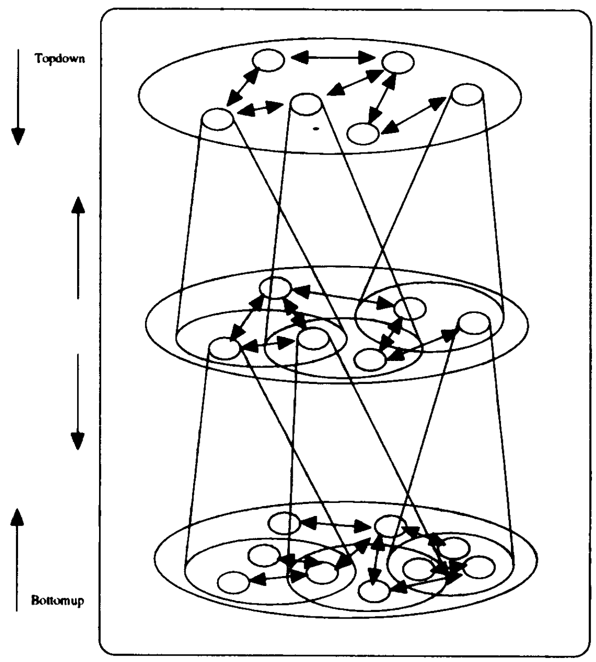


図5 自己組織型記憶モデル
Fig. 5 A self-organizing memory model.

7. まとめ

本論文では，多数の自律した記憶スキーマの集団（社会）としての記憶モデルの構成法について提案した．従来の記憶モデルでは，その構成要素は分権性や自律性を持つまでには至っておらず，本研究においてはそれらの諸性質を記憶スキーマに付与することを可能とした．各記憶スキーマは，競争原理または協調原理に基づき，自己の目標関数を最適にするための合目的な行動をとるものとし，自律した記憶スキーマの行動を静的および動的な意思決定問題として定式化した．また，競争解と協調解の一般解をそれぞれ求め，シミュレーションによって，記憶モデルとしての諸性質について分析した．記憶スキーマ間の状態レベルでの相互作用を変更することによって，競争状態から協調状態へ，また逆に協調状態から競争状態へ相転移させることが可能になることを示した．この相転移の概要を用いて自己組織型記憶モデルの構成法について提案をした．

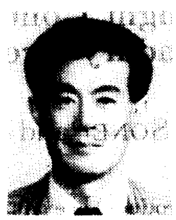
現在，記憶スキーマをそのデータと手続きとともに

オブジェクトとしてカプセル化することによって，独立した処理単位としてオブジェクト指向モデルに基づく実装を行っている．記憶スキーマのオブジェクト化とは，スキーマ間の関係情報やその更新手続きをカプセル化することである．すなわち，内部モデルを持ち，自己の目標を最適にするよう自律的に振る舞い，また状況の変化に対し自らの内部モデルの構造を変更するための自己組織型の記憶モデルの構築を行っているが，オブジェクト指向モデルとしての実装法や記憶モデルとしての評価が今後の課題である．

参考文献

1) P.N. ジョンソン レアード：心のシミュレーション，新曜社 (1989).
2) Anderson, J.A.: Cognitive and Psychological Computation with Neural Models, *IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics*, Vol.SMC-21, pp.799–814 (1983).
3) Arbib, M.A. and Conklin, E.J.: *From Schema Theory to Language*, Oxford University Press (1987).
4) M. ミンスキー（著），安西祐一郎（訳）：心の社会，産業図書 (1991).
5) M.A. アービブ（著），金子隆芳（訳）：ニューラルネットと脳理論，サイエンス社 (1992).
6) 市川ほか（編）：自律分散宣言，オーム社 (1995).
7) 往住彰文：心の計算理論，東京大学出版 (1991).
8) Kohonen, T.: *Self-organization and Associative Memory*, Springer-Verlag (1988).
9) Barnden, J.A. and Pollack, J.B.: *High-level Connectionist Models*, Ablex Publishing (1991).
10) 石川真澄：コネクショニズムと学習，認知科学の発展，Vol.4, No.4, pp.51–77 (1991).
11) 石川真澄：モジュール構造のネットワーク学習，人工知能学会誌，Vol.7, No.4, pp.567–574 (1992).
12) フローレンス・ウィノグラード：コンピュータと認知を理解する，産業図書 (1989).
13) ヴァレラ・マトーラナ（著），河本英夫（訳）：オートポイエーシス：生命システムとは何か，国文社 (1991).
14) 今田高俊：自己組織性—社会理論の復活，創文社 (1986).
15) 吉田民人：情報と自己組織化の理論，東京大学出版 (1990).
16) H. ウルリッチ（著），徳安（訳）：自己組織化とマネジメント，東海大学出版 (1992).
17) J.M. ワインバーガー（著），松田武彦（訳）：一般システム思考入門，紀伊国屋書房 (1976).
18) McFarland, D. and Bosser, T.: *Intelligent Behavior in Animal and Robot*, MIT Press (1993).
19) 清水　博：生命を捉えなおす，中公新書 (1990).
20) 鈴木光男：新ゲーム理論，勁草書房 (1994).

(平成8年3月15日受付)
(平成8年9月12日採録)



生天目　章（正会員）
1973年防衛大学校卒業（応用物理学専攻）．1977および1979年スタンフォード大学大学院修士および博士課程修了（Ph.D.）．同年航空幕僚監部勤務．1987~1988年ジョージメイソン大学客員助教授．現在，防衛大学校情報工学教室教授．人工知能，ニューラルネットワーク，意思決定工学等の研究に従事．人工知能学会，情報処理学会，ソフトウェア科学学会，神経回路学会，AAAI，ACM，IEEE学会各会員．

濱川孝一郎（学生会員）
1991年防衛大学校卒業（応用物理学科専攻）．1996年同大学校研究科（オペレーションズリサーチ専攻）修了．現在，航空自衛隊研究開発集団勤務．情報処理学会，人工知能学会各会員．