

A “Small-World” Network Model of Cognitive Insight

洞察のスマールワールドネットワークモデル

Melissa A. Schilling

Creativity Research Journal

2005, Vol. 17, No. 2 & 3, 131-154

Abstract

- 洞察のメカニズム（多くの研究があるが、決定的なものはない）

- グラフ理論における「スマールワールドネットワーク」の観点から洞察メカニズムを捉える
 - ◇ どのようにして洞察が起こるのか？
 - ◇ 典型的な学習プロセスとの違いは？
 - ◇ なぜ情動的な体験を伴うのか？
 - ランダムな組み換えと方向付けられたサーチを通して作られる非典型的な関係が、個々の表象ネットワークにおける「ショートカット」になるとき洞察が起こる。

- 「スマールワールドネットワーク」
 - ◇ どうも我々の世界は思ったほど大きくはないようだ
 - ◇ Milgram(1967)による実証実験
 - ネブラスカの住人からランダムに選択した人を対象に、親しい人に手紙を転送させ、最終的にボストンに住む株の仲買人に手紙を届けさせる
 - 6人程度で目的地に届いた
 - ◇ グラフ理論によるスマールワールドネットワークの発見
 - ネットワークを特徴付ける指標
 - 平均パス長：2つのノード間の距離の平均
世界の広さ
 - クラスタ係数：あるノードとつながっているノード同士もつながっている確率
世界のまとまり
 - （次数分布：ノードが持つリンク数（次数）の分布）
（スケールフリー性）
 - スマールワールドの存在
 - レギュラーネットワーク（構造化されたネットワーク）
 - ◇ 平均パス長：長，クラスタ係数：大
 - ランダムネットワーク（ランダムにリンクされたネットワーク）
 - ◇ 平均パス長：最短，クラスタ係数：小
 - スマールワールドネットワーク

◇ 平均パス長：短，クラスタ係数：大
構造化されたネットワークに少しランダムなリンクを張ると，構造化（クラスタ係数）はほとんど失われないのに，ネットワーク距離（平均パス長）は飛躍的に短くなる．

◇ 様々な分野において関係性を紐解く道具として用いられる

- 宇宙物理学：スピンネットワーク
- 工学：電力グリッド
- 情報科学：ウェブのハイパーリンク，BBS 上でコミュニケーション
- 神経生理学：神経ネットワーク
- etc.

本研究では，認知心理学における洞察プロセスの解明のために利用

Introduction

➤ これまでの洞察研究

- Aha! experience は長年研究者をひきつけてきた．
- 実験室研究 (Davidson, 1986, 1995; Davidson & Sternberg, 1986; Duncker, 1945; Finke, 1995; Kaplan & Simon, 1990; Siefert, Meyer, Davidson, Patalano, & Yaniv, 1995; Weisberg, 1986)
- 歴史的調査 (ダーウィン, アインシュタイン, ニュートンといった偉大な科学者の発見プロセス) (Csikszentmihalyi & Sawyer, 1995; Dunbar, 1995; Gruber, 1995; Ippolito & Tweney, 1995; Issak & Just, 1995; Simonton, 1995, 1999a, 1999b) .

➤ しかし，洞察プロセスのメカニズムはいまだに不明である

➤ 本研究では，洞察プロセスを説明する理論を構築

- 洞察はどのようにして生起するのか？
- どの程度一般的な学習プロセス（漸進的）と同じで異なるのか？
- なぜしばしば情動的な反応を伴うのか？

➤ 論文の構成

- 1 . 洞察の先行研究のレビュー
- 2 . 競合する先行研究の統一
 - ノードとリンクを用いたシンプルなネットワークに置き換えて説明する .
- 3 . スモールワールドネットワークとして洞察プロセスを捉える
 - どのようにしてスモールワールドと洞察の主要概念と関係付けられるのか示す .

Insight: Definitions and Alternative Views

洞察：その定義と幾つかの観点

The "Aha!"

驚き

- Aha! experience
 - ◇ 通常のルーチン的問題解決と洞察を隔てる特徴の一つ
 - ◇ 情動的な反応 (Gick & Lockart, 1995)
 - (a) 解法の非予測性(unexpectedness)
 - (b) 飛躍性(suddenness)

解は瞬間的に現れるだけでなく、問題解決初期の解決方法から断絶している。

- 洞察プロセスと典型的な学習プロセス
 - ◇ 洞察プロセスは典型的な学習プロセスからの単純な拡張で議論可能 (Davidson, 1995; Perkins, 1981; Weisberg, 1986, 1992; Weisberg & Alba, 1982) .
 - ◇ 洞察プロセスは飛躍性を含むが、そのプロセスは既知の情報処理プロセスフェーズを通して起こるはずである (Siefert et al., 1995) .

The Benefits and Costs of Deep Knowledge Reservoirs

深い知識の蓄積に対する利得と対価

- 高密度の領域知識クラスタが洞察を促進 (利得)
 - ◇ 洞察的な人々はより多くの専門知識を有している (Simonton, 1999a, 1999b) .
 - ◇ チャンク (Simon & Chase, 1973)
 - エキスパートはより多くのチャンクを持つ (チェスのグランドマスターなど)
 - 実りある発見には十分に関係付けられた情報からなる約 50000 のチャンクが必要
 - ◇ 10 年ルール (Gardner, 1993; Hayes, 1989; Simonton, 1999a, 1999b) .
 - 特定領域の問題に取り組み続けることにより、より正確な関係性のパターンが構成され、解を発見するための探索がより効果的となる (Dosi, 1988; Harlow, 1959) .

高密度の領域知識クラスタは、洞察に対しては必要だが十分でない

- 高密度の領域知識クラスタは洞察を抑制 (対価)
 - ◇ 過去経験は創造的な問題解決を抑制する (Wertheimer, 1945, 1959) .
 - ◇ 特定領域におけるトレーニングは、認知的洞察を妨げる
形式的な学校教育は知的な発見を阻害する (アインシュタイン, ピアジェ, see Feldman, 1999)
 - ◇ 特定領域に特化すると、その知識から無意識に制約を受ける
 - 構え (Luchins & Luchins, 1942)
 - 機能的固着 (Duncker, 1945)

The Role of Unexpected Connections

予期されない結合の役割

- よく定義された問題空間に対する探索は、多くの手掛かりから必然的な発見が得られるため、情動的反応は示されない(Perkins, 1995)。
- 対照的に、関連がないと思われていた概念間に結合が作られたとき、結合は予想されないものであるし、現存の関係を再構成する。
- 洞察プロセスの仮説の多くが、基礎的メカニズムに、「表象間の予想されない結合」を含む
 - (a) スキーマ完成 (completing a schema)
 - (b) 視覚的情報の再認識(recognizing visual information)
 - (c) メンタルブロックの打開(overcoming a mental block)
 - (d) 類似性の発見(finding a problem analog)
 - (e) ランダム組み換え(random recombination)

これらのプロセスはネットワークの観点から類似したものとして捉えられる。

Synthesis of Views within a Network Perspective

ネットワークの観点からの統合的な説明

- ノードの集合としてのシステム表現
 - ◇ システムは相互に結合したノードの集まりとして表現される。
e.g., ソーシャルネットワーク, グラフ理論, 複雑適応系, コネクショニズム
 - ◇ ノード間の結合の意味
トランザクションコネクション, 家族の関係, 概念間関係
- 洞察プロセスのネットワーク表現
 - ◇ スキーマ完成 (Fig. 2)
 - 死んだ男に対する知識
食べ物, 大きなリュック, 大きなリングを持っている, しかし, はっきりとした死亡原因がわからない。
 - 外的刺激によりスキーマが完成される
外的刺激: ハンカチがひらひらと地面に落ちる

パラシュートについて考える原因となり, 大きなリュック, 大きなリングに対する説明を与え, 男の死へのパスを作り, スキーマが完成される。
 - ◇ 視覚情報の再構成化 (Fig. 3)
 - Fig. 1a の解を求められた被験者は, 面積を算出するのに四苦八苦する。
 - “出っ張り” と “窪み” の等価性が “出っ張り” と “窪み” の一対一のマッピングを作る (Fig. 1b)。
 - 要素間の結合によって問題が解決される

- ◇ メンタルブロックの克服 (Fig. 4)
 - “サルとバナナと棒”問題を考える
 - 棒の使って遊ぶと棒の様々な機能が探索され、関係性が作られる (Fig. 4-1,2).
 - 熊手が与えられると、熊手は棒と同様の方法で用いることが可能であることに気づき、バナナを引き寄せることができる (Fig. 4-3, 4).
- ◇ 類似性の発見 (Fig. 5)
 - X線問題を考える
 - 要塞問題が与えられ、両者に関連があることを教示すると、問題解決が促進する。
- 各観点 (スキーマ完成, 視覚情報の再構成化, メンタルブロックの克服, 類似性の発見) の基礎となるメカニズムは同一である。
 - ◇ ノード, リンク, またはその両方の追加または変更。
 - 典型的学習プロセスと同一
 - ◇ 典型的プロセスとの大きな違い
 - ノードまたはリンクの構築によって, 表象のシフトを伴う。
- ランダム組み換えの役割
 - ◇ なぜリンク, ノードの追加が表象変化のシフトを生み出すのか?
 - ◇ もし,ランダムな組み換えを通して関係の構築が成功すると, その組み合わせは非典型的のものである可能性が高い (遠い隔たりを橋渡しする) (Simonton, 1995)。
 - 以前は遠く隔たったアイデアを近づける。
 - 同時に, 他の概念間の認識に新しい関係性を与える。
 - 非典型的結合が, 洞察を導く可能性を高くする。
- まとめ
 - (a) 洞察はノード (情報の要素, または, 情報のセット) やリンク (情報のノード間の結合または関係) の追加・変更によってなされる, 表象のシフトや拡大である。
 - (b) 表象のシフトは, それぞれが非典型的であるパス間に結合が作られることによって生起する。
 - (c) 表象のシフト: 結合の非予見性と, 表象ネットワークにおける変化の重要さの両方の関数なぜ, ある結合が, 洞察を説明する不均衡な収益 (飛躍性) を生むのか?

Insight as the Formation of Small-World Network Properties

スモールワールド特性の形成としての洞察

Small Worlds in Social Networks

社会ネットワークにおけるスモールワールド

- スモールワールドの実証的実験 (Milgram, 1967)
 - ◇ 手続き
 - 株の仲買人であるボストン (東海岸) の友人宛の手紙を, ネブラスカ (中央) から

ランダムに選択した住人に配布する．

- 株の仲買人に近づく（社会的，地理的）と思われる知人にその手紙を渡す．
- 手紙が株の仲買人に届くまでこれを続ける．

◇ 多くの手紙が最終的に株の仲買人に届き，平均 6 人（株の仲買人を含める）を介してつながることを発見．

“世界は本当は小さい”：「6 次の隔たり(six degrees of separation)」(Guare, 1990)．

➤ スモールワールドの創発

◇ ランダムネットワーク

- 隔たりの数は，ネットワークのサイズに対して，対数的に増加するため，巨大なネットワークでも平均パス長は短い．

◇ 実際の社会ネットワーク

- 実際の社会構造
 - ・ 社会ネットワークはランダムでなく，高度にクラスタ化されている．
 - ・ さらに，社会ネットワークは分散化されており，きわめて希薄である．
- 社会ネットワークに対する直感
まばらにクラスタ化されたネットワークは異なるクラスタのノードに繋がるためには長いパスを要する．
“大きな世界”
- 直感に反した実際の社会ネットワークの構造
 - ・ クラスタ化，分散化，希薄さにもかかわらず，現実世界の多くのネットワーク構造は際立った短い平均パス長を示す．

◇ スモールワールド (Fig. 6)

- 2つの極端な場合を考える．
 - ・ ケイブマンネットワーク (Fig. 6a)
クラスタ係数：高
平均パス長：長
 - ・ ランダムネットワーク (Fig. 6c)
クラスタ係数：低
平均パス長：最短
- ケイブマンネットワークとランダムネットワークの中間的ネットワーク (Fig. 6b)
 - ・ 平均パス長が 34% 減少 (5 から 3.28)．一方クラスタ係数は 12% のみ減少 (.75 から .66)

“スモールワールド”

高クラスタ化 & 短い平均パス長

- スモールワールドは多くの研究で実証
神経ネットワーク，アメリカの電力グリッド，ウェブのハイパーリンク，etc...

Small Worlds in Cognitive Networks

認知ネットワークにおけるスモールワールド

- 心的な知識要素（アイデアや概念）はランダムに結合されているわけではなく，高度に構造化されている（Anderson & Hinton, 1989; Steyvers & Tenenbaum, 2002）.
- 概念間は複数の次元における類似度に関連した確率で関係付けられている（意味的距離（semantic distance）, 意味的関連（semantic relatedness）, Collins & Loftus, 1975; Rips, Shoben & Smith, 1973）.
 - 類似性に基づく関係性はクラスタリングである．
- 概念間のリンク
 - ◇ リンクの構築と維持は，時間と努力の点においてコストを持つ(Simon, 1955)．
 - ◇ 強化されないリンクは消失する(Martindale, 1995)．
 - ネットワークを稠密にすることは難しい．
 - 認知ネットワークは，関係の近いノード間の密度の高い結合によって特徴付けられ（高クラスタ化）, 隔たった関係間のノード間はよりまばらな結合となる．
 - 知識ノードに構造と意味を与えるが，パス長は長くなる．
- 非典型的なパスの役割
 - ネットワーク内にショートカットを作り出す．
- 認知ネットワークのモデル(Fig. 7)
 - ◇ 構造化ネットワーク(Fig. 7a)
 - 各ノードは近隣の4つのノードと接続
 - 平均パス長は線形に増加：8.58(50 ノード)
 - 構造化に伴いパス長も増加する．
 - ◇ ランダムネットワーク(Fig. 7b)
 - 各ノードがランダムに他の4つのノードと接続
 - 平均パス長は緩やかに増加：2.96(50 ノード)
 - 平均パス長は短いがランダムに関係付けられた概念には意味がない．
 - ◇ スモールワールドネットワーク(Fig. 7c)
 - 構造化ネットワークの一つのリンクをランダムに張り替え
 - 40 ノードで平均パス長が減少：5.82(50 ノード)
 - クラスタ構造のわずかな損失で，結合性が大幅に増加
- 洞察と認知ネットワーク
 - ◇ ランダムまたは非典型的なパスによって平均パス長は急激に減少する（飛躍性）.
 - 漸進的な学習プロセスとの違い
 - ◇ 洞察における理解の飛躍は，新しいスモールワールドネットワークの形成が原因．

Example of Insight as the Formation of a Small World in a Semantic Network

意味ネットワークにおけるスモールワールドの形成としての洞察の例

➤ 表象ネットワークの再構成 (Fig. 8)

- ◇ 子供が犬, ネコ, 人についての表象を再構成する例
- ◇ 初期の表象 (Fig. 8a)
 - 犬とネコは動物というカテゴリに属しており, 人カテゴリとは離れている .
 - 著しい違いは足の数
 - 犬とネコは 4 本足 .
 - 人は 2 本足で, 2 本の腕を持つ .
 - 腕が犬やネコの前足に類似している可能性は, 幾つかの理由から確率が低いと考えられる .
 - ◇ 人の腕は足よりも短い
 - ◇ 前足と後ろ足の曲がる方向が逆 (Fig.8b)
 - ◇ 人は犬やネコと指の数が異なる (人は 5 本指, 犬やネコは 4 本指)
- ◇ 偶然の発見による表象の変化 (Fig.8c)
 - ある日, 家族の犬の足をくすぐっていたら, 小さな 5 番目の指を見つける .
 - 犬の前足を人間の足か腕のどちらかに関係付ける .
- ◇ 犬の骨に関する理解の再構成化 (Fig. 9a)
 - ひざだと考えられていた関節 かかと
 - かかとの上の部分 ひざ
 - 人の腕や足はほとんどに犬の足と同じ (犬は基本的に指先で歩いたことがわかる)
- ◇ 動物と人に対する表象の再構成化 (Fig. 9b).
 - 自発的に他の関係を形成または探索する .
 - さらに一つのメタ表象を作り人は動物のカテゴリに属するという結論に到達する .

➤ 洞察研究における各観点 (スキーマ完成, 視覚的情報の再構成化, メンタルブロックの克服, 類似性の発見, ランダム組み換え) で説明

- ◇ 動物と人に対する表象はすでに共通の周辺要素を共有している (例えば, 2 つの目).
- ◇ しかし, 表面上の不一致 (関節の曲がる方向, 指の数) が不適切なキューとなる (**メンタルブロック**).
- ◇ 5 番目の指の偶然の発見が犬の足と人の手足の間の結合を形成する (**外的刺激を伴ったランダムな再構成**).
- ◇ 5 つの指の存在と 5 番目の指の位置から人の手首との対応を発見する (**類似性の発見**).
- ◇ 犬の足についての概念が再構成される (**視覚的情報の再構成**).
- ◇ 2 つの表象が結合される (**スキーマ完成**).

➤ グラフ理論による説明

- ◇ 非常にシンプルな説明を与える .
- ◇ 意味ネットワークの平均パス長は 2.74 から 1.90 に減少した .

世界は小さくなった

- 種々の洞察課題における平均パス長の飛躍的变化 (Fig. 10)
 - ◇ ネットワーク図は問題と解法に関する表象を単純化しているが、解の前後でネットワークの平均パス長が急激に減少する。
単純なネットワーク統計量が、洞察の特性を表現。

Random Recombination versus Search

ランダム再結合と探索

- 認知ネットワークにおける非典型的パスの成立
 - ◇ ランダム
 - ランダム再結合プロセス (Simonton, 1995, 1999a, 1999b)
 - 外的刺激とのランダム遭遇 (Siefert et al., 1995)
 - ◇ 探索
 - ネットワークにおいてエージェントは、ランダムにノードセット間を探索するのではなく、知的な探索を行うはず (例えば識別ベクトルを用いて)。
 - 解へのパスがすぐにわからない場合、探索が意識的・無意識的になされる
 - 探索を広げる (Perkins, 1981, 1995)
 - ブライミング (Birch, 1945)
 - 類推的解決 (Holyoak, 1984)

まとめ

- (a) 洞察は、非典型的なパスが表象ネットワークでショートカットとなる場合に、起こる
 - ◇ 平均パス長の急激で有意な減少を引き起こし (飛躍的特性)
 - ◇ 表象内・間の関係が再構築され
 - ◇ 他の表象にも影響を与える (カスケード特性)
それ以外は典型的学習プロセスと同様
- (b) 非典型的なパスの形成
 - ◇ ランダムな再構成プロセスを通して形成 (Cammpbell, 1960; Simonton, 1988)
 - ◇ 無意識的・意識的に方向付けられた探索を通して形成 (Baughman & Mumford, 1995; Rips, Shoben & Smith, 1973)
- (c) 情動的な反応は以下の関数である
 - ◇ 結合の非予測性
 - ◇ クラスタのサイズと密度
- (e) 洞察をスモールワールドの観点から捉えることにより
 - ◇ 洞察プロセスに対する各観点を統合
 - ◇ 数学的証明が可能 (漸進的な学習と洞察的学習を区別可能)