

4 章 The Definition and Promise of Network Science (ネットワーク科学の定義と将来性)
(pp.26-29)

以前の章で、委員会はネットワークの重要性を一般社会（特に軍）へ明示した。
そして、かなり多くの市民的・軍事的応用においてネットワーク特性に関する研究へ関心があることを立証した。

委員会はまた、切迫の国家的必要性が

“ネットワーク挙動を表す複雑なシステムやプロセスの知識を進歩させるための、
ネットワーク科学と呼ばれる新しい調査領域の創造 (=the creation of a new field
of investigation called network science to advance knowledge of complex
systems and processes that exhibit network behavior)”

のために存在していることを立証した (the statement of task)。

この章では、ネットワーク科学が

- ・どのように定義されるべきか
- ・位置づけられるか という疑問へ注目する。

WHAT IS NETWORK SCIENCE? (ネットワーク科学とは何であろうか?)

the statement of task (Box 1-2, Chap.1, p.8) の最初の項目は問う、
ネットワーク科学と呼ばれ委員会によって考察される、
「新しい調査領域がどのように定義されるべきか？」
一見したところ簡単な委員会のこの問いを通じて調査は複雑な返答を生んだ。

ネットワーク科学の意向は率直である。それは、
「科学的方法を用いたネットワーク研究に基づく、組織化されたネットワークの知識」。
この意向は科学（技術から分離している）においてすぐに役立つ。
人類の歴史の至る所で、技術はその元となる科学的知識よりも度々急速に発展してきた。

Ex. 冶金科学 と 金属の道具・武器技術

これはネットワークにとっての今日のケースである。

- ・ 通信・情報ネットワークの基礎をなす技術 かなり進歩している
- ・ 科学的知識を基礎にする技術 いくぶんか初歩的なものに留まっている…

再び、冶金のアナロジー

物理的通信や情報ネットワークに関する知識の現在の様子は 16 世紀ヨーロッパにおける武器や道具のための冶金の知識とよく似ている。

16 世紀… 精巧な鋼の剣と銃は経験的なプロセスによって製造された。

(ナノ知識を知ることなく、鋼を作って形成した！)

20 世紀… 原子レベルの冶金の発展は軽重量・高張力材料（タービンプレード等）での量子飛躍（quantum leap）を可能にした。

しかし、16～19 世紀の（経験的技術を使用による）武器はヨーロッパ人がその時代の世界を支配することを可能にした。まさに現代の IT が 21 世紀の戦場を変えつつあるように。現代の通信や情報ネットワークの構成要素：物理、化学、材料科学から生じる基礎的知識に基づく技術の結果である。

しかし、それらはネットワーク科学を基礎として得られネットワークの挙動の原理を熟考することよりも、経験的知識を大いに基礎としている。

本報告書では、委員会が（物理ネットワーク構築技術の調査からの）経験的知識の事情よりもむしろ（ネットワーク科学の調査からの）基礎的知識の事情を調査する。

このことは報告書を理解するために正しく認識されなければならない深みのある基礎的な区別である。

その趣旨を発見と発明概念の対比によって説明する。新しい基礎的知識を追い求める科学研究において、発見は研究対象がどのように振舞うかに関して達せられる。

Ex. 固体原子中の 3 次元ネットワークの研究

原子間の相互作用ネットワークモデルの精巧な分析から予想

→ 相転移反応の実験的に発見された！（Binney et al., 1992）

これはネットワーク科学における「発見」である。

「どのタイプのネットワーク構造・ダイナミクスが挙動を予測するために必要となるか」

Cf. これとインターネットの OSI 参照モデル・TCP/IP 参照モデル（Tanenbaum, 2003）

との対比をする。これらモデルはいくつか仮定された条件下においてコンピュータ間で信頼できるコネクションをもたらすために「発明」された。本質的に異なるネットワーク構

造にとってこれら条件が満足されても必ずしも適応されないとき、それらは機能する (Jackson, 2005)。それらは創発挙動を出現させるかもしれない動作をするネットワーク下に条件が存在するかどうかというような問題进行处理しない；例えば、ある挙動はその要素の挙動が知られていることから予測できない。

しかし、ネットワーク科学が論理的に考えられることは、その概念が実際に実現されている事ではない。専門用語「ネットワーク科学」は異なる応用分野において異なるイメージを呼び起こす。

- 通信エンジニア達：
 - 複雑なネットワーク通信 (Ex. インターネット、テレフォンシステム) の設計に必要となる認識
- 社会学者：
 - 影響のネットワーク (Ex. 取締役会、社会組織)
- ビジネスパーソン：
 - 会社が役割を果たすために役立つインフォーマルな人的ネットワーク (Ex. 大規模な組織内での供給ネットワーク及び影響ネットワーク)
- 物理学者：
 - 複雑ネットワークの理論 (Ex. 相転移、自己組織化、創発現象)
- 電力エンジニア達：
 - 電力グリッドの設計及び制御の下にある認識を予想する
- 細胞生物学者：
 - 細胞機能を機能させるモデル (Ex. 遺伝ネットワーク、新陳代謝ネットワーク)

etc. etc.

委員会はこの状況に 2 つの質問を行う事によって取り組んだ。

- 1、大学で教授するネットワーク科学の趣旨になると考えられるような広範に渡る知識体系があるか？ (Chap. 5, App. C)
- 2、ネットワークの様々な応用の専門家へネットワーク科学の見解について。(Chap. 6, App. D)

委員会が発見したこと

- ネットワークモデル表記のために各メジャー応用領域で各々特定の学術用語を有している。
- これらの表記は重複するものの同一ではない。

Finding 4-1. 今日ネットワーク R&D の専門家の実践や認識を反映するネットワーク科学を取り巻くものはない。

委員会の観点は、

ネットワーク科学の作戦上の定義 (operational definition) : 自身を調査領域で作業することと見渡す研究者のコミュニティが実際に行うであること。なぜなら密集するコミュニティは様々な応用領域を横断しては存在しないため、1つの機会が軍にとってリーダーシップや資金提供の方針によってこのような領域をコアにするために存在する。この機会は現実のものである、なぜならコアの“ネットワーク科学”が何を取り巻くのだろうかについて適度な合意がネットワーク研究者間に存在するからである。

そして、ネットワーク科学はその専門家達が創造するいかなるものへも発展するだろう。

Chap.5, 6 でこの急速に発展する領域の現在の様子を記述する。

Finding 4-2. ネットワークの科学の見解は進化している、そして、その最も重要な範囲と趣旨 (ultimate scope and content) の限定された理解がある。

ネットワーク科学が出現すると期待されるコミュニティは、多くの学際領域・応用領域を取り巻いている。今日、これらコミュニティは様々な学術用語、モデルや(議論のどの側面が最も重要であるかについての) 意見によって特徴付けられる。

新たな単語や概念は激増する。

いくつかは多くの分野を横断し共通—例えば統計学、経済学、社会学、生物学を横断する。他はたった一つもしくは2, 3のサブ分野で見つかる—例えば、分子生物学、神経学、疫学、生態学である(すべて生物学内である)。

いくつかは異なる分野内において本質的には同じことを意味しているのだけれど、異なるラベルを与えられる。Chap.5 で記述されるように、まだ生じていないがいずれ利用されるだろう共通の学術用語やコア知識の集まりを成文化する普及している認識があるように思われる。

→ “ネットワーク科学と呼称される新しい調査領域” sensible で timely である!

科学が創発するかもしれない実際のコミュニティ (the communities of practice) を記述することはネットワーク科学の作戦上の定義を与えるには十分ではない。加えて我々はその範囲と内容を記述しなければならない。この領域の急速な発展が認められるため、これは抽象概念の高いレベルで遂行されなければならない。そのうち詳細は意味深く変わるだろう。

ネットワークの観念は実験的に観測される物理的、生物学的、社会関係から抽象化される。ネットワークはその構造 (e.g. ノードとリンク)、そのダイナミクス (ノードとリンクの時間的特質)、そしてその振る舞い (ノードとリンク間の相互作用の結果ネットワークが何を“行う”か) によって記述される (Chap. 5, 6)。

このように、ネットワークはいつも観測できる表現もしくはモデルであるが、現実自身と

いうことではない。これは特異な現象の特定のネットワーク描画の独特さについて興味深い疑問を引き起こす一例えば、新陳代謝進行のネットワークモデルである。社会的もしくは生物学的プロセスの好結果なネットワークモデルが、電磁波の伝播が関連した物理的環境に依存することを一意に記述するマクスウェルの方程式の感じで、唯一であると確立する事は難しい。

The statement of task はネットワーク科学と呼ばれる新しい調査領域がどのように定義されるべきであるか問う。ネットワーク科学の観念が発展しているため、この疑問の回答は短命であろう、ネットワーク科学の範囲と趣旨も発展するだろう。正式な定義（formal definition）を提案する事は2つの付加的なリスクを伴う。

- ・ 1、様々なネットワーク応用コミュニティはこのトピックを異なる方法で認知するため、いくつかは提案されたいかなる定義であっても批判・拒絶するだろう。
- ・ 2、この可能性を考慮して、定義を越えた意見の違いはこの報告書の内容を考慮に入れない理論的根拠になるかもしれない。

このようなことにもかかわらず、委員会は軍へ次に示す仮の提案をする。

Finding 4-3. ネットワーク科学は物理的、生物学的、社会的現象の（これら現象の予測モデルを導く）ネットワーク表現の研究から成り立つ。

表現の基本となるモデル及び特性の発展へ注力することによって、この新しい科学的調査領域はツール、技術、複合応用領域に適用するモデル発展の将来性を提示する。また多様な学術用語集や語彙集を平易にして成文化する、適当な見通しも示す。このように、1つはネットワーク科学と呼ばれる領域の創造が、複雑ネットワークの工学的設計の予測可能性を改善する正確な結果の集合を提供するだけでなく、多様な応用領域における基礎研究のスピードアップをも提供するだろうことを適切に予測するかもしれない。（ネットワーク特性の定義及びその振る舞いの調査は Chap.6.）

POSITIONING OF NETWORK SCIENCE （ネットワーク科学の位置づけ）

科学は我々に世界がどのように操作をしているか教えてくれる、そして技術は我々にその見識結果の実際的応用を与える。

- ・ ヘルスケア： 医療機器、手続き、治療
- ・ 経済： 生産、サービス
- ・ 教育センター： 教科書、教室
- ・ 政府： 法律・管理
- ・ 軍： 武器・通信

これらは科学の様々な部門を通じてそれらの方法をつくる。

軍事的強さ、ヘルスケアの卓越、訓練された労働力及び経済活況すべてを引っ張る方針は

それら豊富な多様性の中で科学から技術、制度的形態や応用に及ぶ流れに従う。

これらの方針はすべて始まりと終わりを持っている、異なる点において方法に沿う特殊なタスクや特性とともに。それらは形成に始まり、変化点や急速な成長へ達し、それらの応用がすでに理解され広がっているときに成熟しそののち最終的に古くなり衰退する。ライフサイクルの4分の1は形成、成長、成熟そして衰退である。それらは生物学的な生命ばかりではなく自然の生物やおまけに経済をもコントロールする (Perez, 2002)。

- ・ 発芽し、花咲き枯れる種子
- ・ R&D を経て商業界そののち各家庭へ出回る製品
- ・ 軍事性へ広まり、そののち一般社会へ広がる、深遠から偏在、最終的には廃れる、先駆的システム

最終的には、すべてのサイクルは別のサイクルによって超される一有機体、製品もしくは武器システムのそれになる—それは現存の周囲へよりよく順応する。このライフサイクル文脈の中では、先の10年においてネットワーク科学は「形成」され、テイクオフのバランスが取れた成長の終端にいくらか近い場所に位置する。

新しいパラダイムが始めに現れたとき、付随する科学コミュニティは社会的組織をほとんどあるいはまったくもたない。それらサイクルの成長フェーズにおいて、より成熟した科学の共著者のグループや“見えない学会”の特徴はそれらの知的集まりの周辺で発展する。ネットワーク科学はこの始めの相を完全なものにする準備ができていないが、成長ステージへ入る準備はできていない。今、軍は変遷を促進する中で決定的な役割を担える。

また、本当に驚きに値する結果が体系的なネットワーク科学の研究から生じるかもしれない。例えば、本国と外国でテロリズムに関連する発展している前兆や機会を表現するために、改訂された軍事的パラダイムが必要とされているということが広く考えられている。これらの兆候はネットワークの振る舞い、特に通信・情報ネットワークの能力への社会ネットワークの順応から現れている (Arquilla and Ronfeldt, 2001; Berkowitz, 2003)。適応性のある現象は何世紀以上も観測されてきた。典型的に、精神の社会的振る舞いのある集合と一緒にデザインされた工学的なネットワークは常にそれらめいめいの目的によって分裂された要素 (e.g. 犯罪者達はテロリスト達) によって利用された。

このことは一般的な歴史的パターンである

- ・ 18世紀： 海賊による商船混乱
- ・ 19世紀： 列車強盗、
- ・ 20世紀： 航空機ハイジャック
- ・ 21世紀： 9.11における破壊手段、テロリズムとサイバー犯罪

巨大基盤ネットワークは絶えず発展する

→ 社会はネットワークの相応しい役目により依存するようになる

→ 始めは予想される事なかったネットワークの制御や耐故障性へ社会は挑戦する。

社会はネットワークに分裂要素を適応させることによって応じる、しかし適応性は一般的

に総合的には満足でない。これは基盤ネットワーク自身とそれらに利用される社会ネットワーク両方のよりよい設計と操作の知識の需要を生み出す。この需要は存在している知識によっては満たされることはない、なぜならそれをつくる周囲はネットワークが設計され構築されたときには予想されないからである。

Finding 4-4. ネットワークについて現在役立てられる知識と、我々市民の幸福が依拠するところの大規模複雑な物理的、情報、生物学的、社会的ネットワークの特徴づけ、設計及び操作するために必須の知識との間にギャップが存在する。

このギャップを埋めることは喫緊の課題である、なぜなら社会は信頼の置ける、複雑大規模な通信の頑健な操作、情報、輸送、電力及びビジネスネットワークへ依存するようになってきているからである。テロリストもしくは犯罪者の敵対者相互間の社会ネットワークによって、これらネットワークの分裂もしくは利用が明らかとなった脅威、戦略的騒ぎばかりではなく政治的に急を要するネットワーク科学へ投資すべきである。

Finding 4-5. ネットワーク科学の最前線は国家のセキュリティにとって最重要の脅威に取り組む事ができる。

要約すると、今日ネットワーク科学についての普遍的な一致はないけれども、それが将来なるであろうものについて現出している合意がある。すなわち、科学から広まることが期待される基礎的知識に関して急を要する請求事項がある。そのため、ネットワーク科学は新しい調査の分野の成長曲線の、やむにやまれぬ国家的な興味、そして軍が核となるために唯一の機会を持つ1つの始まりとして位置する。では委員会がこの現出している分野の内容、状態及び挑戦の研究結果の博覧会にかかわる (Chap.5,6)。それは軍が新しい分野を核にしてその成長をサポートする事によってどのように価値を作る事ができるかをはっきり述べる (Chap.7)。

REFERENCES

Arquilla, J., and D. Ronfeldt. 2001. *Networks and Netwars: The Future of Terror, Crime, and Militancy*. Santa Monica, Calif.: RAND.

Berkowitz, B. 2003. *The New Face of War: How War Will Be Fought in the 21st Century*. New York, N.Y.: Free Press.

Binney, J.J., N.J. Dowrick, A.J. Fisher, and M.E.J. Newman. 1992. *The Theory of Critical Phenomena*. Oxford, England: Clarendon Press.

Diamond, J. 1999. *Guns, Germs and Steel: The Fates of Human Societies*. New York, N.Y.: W.W. Norton.

Jackson, J. 2005. The Interplanetary Internet. IEEE Spectrum Online. Available at <http://www.spectrum.ieee.org/WEBONLY/publicfeature/aug05/0805inte.html>. Accessed August 22, 2005.

Perez, C. 2002. Technological Revolutions and Financial Capital: The Dynamics of Bubbles and Golden Ages. Cheltenham, England: Edward Elgar Publishers.

Tanenbaum, A.S. 2003. Computer Networks, 4th edition. Upper Saddle River, N.J.: Prentice Hall PTR.

5章 The Content of Network Science (ネットワーク科学の趣旨)

(pp.30-32)

この章では、委員会がネットワーク科学とその研究(=“新しい調査領域”)の境界を含む話題を決定する。ネットワーク科学の範囲と趣旨の決定を手伝うために案内する活躍をこの章は記述し、委員会の事実上の発見を提示する。

HOW DO WE KNOW? (我々はどうのように知るか?)

ネットワーク科学の定義に到達し、取り巻くだろう話題を同定するために、委員会は2つの行動へ着手した。

- ・ 1、工学、物理学、生物学、社会ネットワークの分野の話題内容を決めるために利用可能な大学講座をレビューした。(App. C)。
- ・ 2、ネットワーク科学の核心に関わる応用領域の1,000人以上の専門家へ題目の内容に相応しい用語の定義とそれらの観念を尋ねるために質問表(App. D)の結果を回覧した。用語“ネットワーク科学”が異なる構成員及びコミュニティ内で異なるメンタルモデルを想起させた、とこれらの結果が明らかにした。

CONTENT (趣旨)

ネットワーク科学は異なる人々にとって異なる事を抱かせる(Chap.4)。今日、研究の密集したような分野は存在しない。現在の研究への広がりを試験されるであろう、そのように行う実用品の1つのテストは異なった応用領域を超える中心の内容を見せる。

質問表の結果(Chap.6)は委員会の **statement of task** の核心に関する分野の操作上の定義を作るを手助けする、これら多様な応用中に共通の要素がある ということを明らかにする。とりわけ、ネットワーク科学の共通の中心が、振る舞いと反応は輪郭のはっきりした(ことによるとダイナミックに)方針の集合にまたがるサブシステム間のやり取り及び相互作用によって決定される、複雑システムの研究であるという普及した合意があるように思える。最も重要な点はネットワークの挙動が方針(構造)と交換・相互作用(ダイナミクス)の両方によって決定されるということである。さらに、構造自身が動的であるかもしれない(いつもそうである)。これは多様な応用領域において柔軟な解釈を許す柔軟な定義である。

Finding 5-1. ネットワーク科学は現出している学際分野である、そしてその範囲は発展している。

一般に定量的なモデルに埋め込まれる、核の原理は、入力としてネットワークの構造とダイナミクスを与えられるネットワーク挙動の予想を可能にするべきである。これら予想

は経験的に試験可能でなければならぬため事実と確かめられるか虚偽と証明されるかいずれかである。そして、核の原理とそれら関連するモデル及びテストは核となるカリキュラムにおいて取り込まれる必要があるだろう。

Finding 5-2. ネットワーク科学の中心のような趣旨を含む合意が専門家間の会合に存在する。

主要な観念はネットワークがその構造とダイナミクスによって記述されるという事であり、そして構造とダイナミクスは結合してその特質（役割と挙動を含む）の完全な詳細事項を提供する。

ネットワークの構造はノードが他のノードへ接続される事およびリンクが方向無しかバイダイレクトかどうかを示す事によって特徴付けられる。この情報からネットワーク構造を特徴付けるに値する多くの図を決定できる。教科書やメジャーなレビュー記事はこの話題にはっきりと現れている（Albert and Barabási, 2002; Dorogovtsev and Mendes, 2003; Newman, 2003; Watts, 2004）。ネットワークのための構造モデルの様々な階層にとってこれら図の計算メ리트はネットワーク上の進路の主要項目であり、ネットワーク科学の核心の本質要素である。

ネットワークダイナミクスの詳細事項はむしろ率直ではない、なぜならダイナミクスは多様な応用領域において随分異なりがちだからである。

- ・ 物理系における相転移の解析である一例えば、固体内の磁気を帯びた原子である。ここでダイナミクスは磁気を帯びた原子のスピン間の相互作用によって特徴付けられる、そしてそれは概してそれら間の距離の役目として様々である（Binney et al., 1992）
- ・ 化学と生物学では、ネットワークモデルは化学反応の連続を記述するために使用されている。一般的にノードは反応物質と生成物である、それらの化学反応になるリンクとともに。論理的なモデル、割合方程式（rate equations）もしくは個別の反応の確率モデル（stochastic model）によってダイナミクスを特徴付けられる（Bower and Bolouri, 2001）。
- ・ 社会学では、一般的にノードは人々であり、リンクは彼らの相互作用である。ダイナミクスは いくつかの内部素因（internal predisposition、度々統計的に特徴付けられる）はもちろん彼／彼女らの交流と一緒に、状態モデル（ある人物の状態が他の人物の状態へ依存する）によって度々特徴付けられる。そのため、コアコースにおいて紹介するモデルダイナミクスは一般的に教師が考慮する応用の講義に依存する。

ネットワーク科学の真髄はネットワークの特質（いったんその構造とダイナミクスが特徴付けられると）についてテスト可能な予測を作る事である。ネットワークを分析するための標準的なモデルやツールについての知識の塊は常に蓄積されている（App. C）。これらのモデルとツールは複合的な領域において度々再利用される知識に留まるため、それらは

ネットワーク科学の核心内容において留まる要素なのである。

ネットワーク科学の核心内容は基本科学、Table2-2 の専門用語集で低いトポロジ的な複雑さに振舞う小さいネットワークの分析にとって相応しい平易なモデルとテクニックから成り立っている。ネットワーク構造の分析はネットワークダイナミクスのそれよりもより高等である。もし適した構造的データが利用可能であるならば、コンピュータツールを使用したより巨大でより複雑なネットワークへ構造分析テクニックを適用できる。中心的内容におけるモデル分析の出力は見識理解で定性的な理解であり、工学的デザインではない。

Table2-1 と 2-2 で記述するアーキテクチャの特質や物理的ネットワークの設計は工学応用領域の分野である。その Table でふれられる生物学的・社会的ネットワークの構造、定義や役割は基本研究の主題である。パワーグリッド設計への電磁気理論の応用は有用なアナロジーを与える。電磁気学における大学院物理コースでさえ Table2-1 と 2-2 で記されるパワーグリッド設計において、ほとんど直接使用ではない。ネットワーク科学の中心内容における資料は電磁気学における大学院や学部コースで教授されるものに類似している。

Finding 5-3. ネットワーク科学の核心内容に寄与する研究は国防総省機密区分大綱 (DOD) 内の基礎研究 (6.1) である。

ネットワーク科学への要求が現在の科学的知識の様子 (App. C) と比較されるとき、進路からそれたギャップが姿を現す。圧力状態下で大規模ネットワークの特性予測を許す、認められた理論を応用は求める。現在の知識は比較的小さくシンプルなネットワークを分析する、平易なモデルやツールから成り立つ。ネットワーク科学の核心的内容の重大な開発がそれによってその意図された応用にとって十分になるために要求されるということは、委員会には明らかなようだ。

Finding 5-4. ネットワーク科学の核心内容の重要な研究は、複雑ネットワークの特徴づけ、分析、設計や操作という現在の要求を満たす十分な知識を作る事ために要求される。

ネットワークは巨大で複雑になりがちである (Chap.2)。もしそれらが、インターネット、局地的なパワーグリッド、チップ上のトランジスタのような物理的ネットワークにとって一般的に 100 万以上の多くの相互作用する構成要素をもつならば、それらは巨大である。また、それら構成要素が知られている挙動で振る舞うけれども、これら挙動の我々の知識がすべてのネットワークの挙動を予測するのに十分でないならば、それらは複雑である (Boccaro, 2004)。このような複雑なネットワークは創発挙動を振舞うと言われる、もしそれらの構成要素が、設計によってこの挙動を作る中心のコントローラがないのに、思いがけない—“創発する”—ネットワーク挙動を導くならば。例から、コンピュータチップ上

のトランジスタのネットワークがいつもは創発挙動を振舞うと見做されないが、一方でアリの集落 (ant colony) や WWW はそう見做される (Boccaro, 2004)。

基本科学における調査が社会・生物学ネットワークの振る舞いを記述するために要求されるだろうということはひろく受諾されているようである。基本科学における似たような要求がインターネット、局地的なパワーグリッド、もしくはチップ上のトランジスタのような技術的に高度な物理的ネットワークにとって反直感的に現れるかもしれない。しかし、反射の 2・3 の瞬間がこれら物理的ネットワークも創発挙動を振舞うということを明らかにする。インターネットは予期されたノイズに対して頑健であるが、コンピュータウイルスのような予期されないそれに対してはもろい (Doyle et al., 2005)。局地的なパワーグリッドはグリッド設計者によって予期されない環境下でたまに故障するが避けられず、そしてグリッドパワーコントロールシステムによって適切に対処されない。高等技術の実装者の取り組みや願いに反して、複雑な物理的ネットワークはいまだ完全に予測可能ではない。さらに言えば、それらの構成要素における技術の改良へ費やす事はこの状態を改善しないだろう (つまり、ネットワークへ注力すべき)。レーダの発展が電磁気学の基礎科学を待っていたように、そして核兵器発展が核分裂の発見を待っていたように、複雑ネットワークを我々の生活の中でコントロールする能力は今現在思いがけないような発見をネットワークの科学において待っているのである。

委員会が周知の事としてカリキュラム開発をすることもしくは科学学問の研究内容を特徴付けることの技量に欠けているため、この委員会はどちらも実行する計画はない。軍が投資する価値のある研究の密集した領域と見做されるネットワーク科学という事柄の試験と上記で議論された、分析を提示する (App, C)。委員会はネットワーク科学がこの試験を十分に通過していると考ええる。

REFERENCES

- Albert, R., and A.L. Barabási. 2002. Statistical mechanics of complex networks. *Reviews of Modern Physics* 74(1): 47-97.
- Binney, J.J., N.J. Dowrick, A.J. Fisher, and M.E.J. Newman. 1992. *The Theory of Critical Phenomena*. Oxford, England: Clarendon Press.
- Boccaro, N. 2004. *Modeling Complex Systems*. New York, N.Y.: Springer.
- Bower, J.M., and H. Bolouri. 2001. *Computational Modeling of Genetic and Biochemical Networks*. Cambridge, Mass.: MIT Press.
- Dorogovtsev, S.N., and J.F.F. Mendes. 2003. *Evolution of Networks: From Biological Nets to the Internet and WWW*. Oxford, England: Oxford University Press.
- Doyle, J.C., D. Alderson, L. Lun, S. Low, M. Roughan, S. Schaalunov, R. Tanaka, and W. Willinger. 2005. The "Robust yet Fragile" Nature of the Internet. *Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)* 102(41): 14497-14502.

IEEE Spectrum. 2004. The Unruly Power Grid. IEEE Spectrum August 2004: 22-27.

Newman, M.E.J. 2003. The structure and function of complex networks. SIAM Review 45(2): 167-256.

Watts, D. 2004. The "new" science of networks. Annual Review of Sociology 30(1):243-270.

6章 Status and Challenges of Network Science (ネットワーク科学の様子と挑戦)

(pp.33-38)

今日存在するネットワーク科学と呼ばれる調査の領域である研究コミュニティにおいて普遍的な合意はないけれども、多くの研究者たちは彼らの業績を潜在的に関連のあるこれらの領域として記述している。ネットワークを設計し分析する多くの技法が様々な応用領域において存在する (Chap.5)。本章では、委員会がこれら領域をはかる一揃いの共通特徴及び考えを識別するための質問票からの反応を描く。質問票は活動的な研究者、文学研究からの認識、コラボレイティブベンチャーの再帰的搜索、会議出席者、メーリングリスト、最近の本及び評論の著者との面談によって配布された。はじめに、委員会は質問表のプロセスと反応を記述する。次に、それはネットワーク科学の可能な領域の存在、実物や挑戦の応答者たちの評価を要約する。更なる分析や議論は App. D にて提供される。

KEY MESSAGES

多数の質問表の反応の分析から、委員会は4つのメッセージを抽出した。

- ・ 研究者間に今存在するネットワーク科学の領域を同一のものと確認できる普遍的な合意はない、なぜならネットワーク科学の学問かもしれないという確立した定義がある程度ないからである。
- ・ 定義の分析は新しいものが出た、そして反応の調査上の興味はネットワーク科学に基づくトピックの共通のコアを設置できた入力属性と出力特性の一揃いへ関係する。
- ・ 異種領域をまたぐ研究者たちはネットワークが単独のトポロジー以上であるという暗黙の理解を共有している。それは接続性、資源交換行動の局所性をも引き起こす。
- ・ 7つのメジャーな挑戦の識別、ネットワークシステムにおけるダイナミクスと情報フローの特性評価を最も決定的に取り巻く??? ; モデリング、分析及び極度に巨大なネットワークにとっての経験的データの獲得 ; 頑健で大規模ネットワークの設計と総合のための正確なツール。

質問表のプロセス QUESTIONNAIRE PROCESS

質問表は、statement of task の分析とともに始まり、対話式プロセスを通して開発された。βテスト段階後には、Dec. 20, 2004 から May 31, 2005 まで質問表の最終版は Web 上に公表された。質問表の完全の本文は App. D にある。それは回答者、彼らの業績、領域としてのネットワーク科学に対する彼らの見解を問うた。それはまた回答者へ彼らが望むようなより進んだ情報を提供する機会を与えた。

質問表招待プロセスを確実にする目標は巨大で種々の、そして研究資源の範囲内でふさ

わしそうな多くの関連がある研究コミュニティのサンプルの表現するように達することであった。全般的に、回答者たちから明るみにしここで表現される発見は委員会メンバーが抱く見解と一致するということである。これは質問表における適用範囲の深さと幅もしくは他の制限に関する懸念を克服することを促進した。基本的な雪だるま式効果、悪ふざけ回答を検出すること、研究者コミュニティの範囲の規模の決定を除いて到達するような問題は App. D にて議論される。

回答者 THE RESPONDENTS

Finding 6-1. 質問表の回答は概念と関心事を共有する多様でワールドワイドなネットワーク研究コミュニティを明らかにする。

Finding 6-2. 質問表回答者の分析結果は回答者の横断する異なるサブグループから成り立つ。

回答するコミュニティは地理的分布や表現された興味の幅といった点で多様である。回答は 29ヶ国と米国 39州から得られた。14領域は少なくとも回答者 10%によって選択された、そして回答者各々は平均で 3.6領域選択した。本報告書内で表される発見は研究領域もしくは回答者の場所に著しくは依存しないが、彼らの大部分（72%）がアカデミックなコミュニティにいるという事実により制限されうる。より詳細は App. D 内にて。

反対の声 DISSENTING VOICE

Finding 6-1. 質問表回答者の 70%はネットワーク科学が研究定義をできるというアイデアを承認した。

ネットワーク科学の領域の存在が定義可能という回答者間に質問表分析は広範囲に渡り関係するが、普遍的な合意ではない。「ネットワーク科学」のような領域はないと言うための理由が分析されるとき、それは 5種類の懸念を通じて取り壊す：

- ・ フレーズが首尾一貫する（コアな）定義を持っていない（Unclear, no core）
- ・ or ほとんど愚問と言ってよいほど広範囲である（Too broad）
- ・ or このような領域を定義することはあまりに早すぎる（Emerging）
- ・ or すでに存在している領域の新しい名前にすぎない（Other broad）
- ・ or このような領域を定義することは誤ったアプローチである（Wrong approach）

加えて、回答者も誇大な喧伝のあおりを受ける領域であると注意を促す。これら回答の分布を Figure 6-1 に示す。

回答の 70%は質問 Q3a：「ネットワーク科学の同一視できる領域はあるのか？」を肯定した。回答者の 23%は否定し、7%は答えなかった。これらパーセンテージは回答者のバック

グラウンドにわずかばかり依存する。

回答するコミュニティを横断する反対者意見の普及はネットワーク科学の領域の明らかな定義にとっての必要性を強化して、関係する研究者の表現されたアプローチを根付かせた。それはまたこのような領域で何が達成できるかを誇張して受けと止められないようにせねばならない注意という考えも補強する。用語「ネットワーク科学」のはっきりとした定義をより肯定的に述べることはこれら懸念のいくつかを表現することである。

領域を定義する **DEFINING THE FIELD**

ネットワーク科学が起こりうる領域を考慮するなかの最初の質問はこれである：「何がその内容と範囲だろうか？」質問 3a と 3b はこの問題を直接表現し現在の研究者たちによって実践されるようなネットワーク科学の性質上の経験的データを与える。他の 4 つの質問の回答はより高度な関わりであると判明した。より進んだ分析は **App. D** を見よ。

委員会は 2 つの基本的質問によってその分析を組み立てた：「何がネットワークの属性を定義するだろうか？」「何が導出された関心事の特性であるか？」。もしこれら質問が多く応用ドメインを横断する共通の答えを持っているのならば、ネットワーク科学は与えられたネットワークの所望の出力特性と入力属性間のマッピングを片方にさせる洞察、語彙集、測定法、理論、ツール及び技法として明らかにされるかもしれない。マッピングは 2 側面から必要である：

- (1) 特定の入力属性から現れる出力特性を決めること
- (2) 新たなネットワークを通じて設計されうる、もしくは特定の出力特性を実現する手段として存在するネットワークへの干渉によって得られうる入力属性を決めること

もしネットワーク科学が役立つ方法において存在せねばならないのならば、これらアプローチもまたドメインを特定する一般的なツール、方法、モデルを適用するためよく理解された技法を持って多くの応用ドメインを超えて有効でなければならない。仮説の例として、あるものはサイズ尺度・時間尺度ともに大規模なネットワークモデルを扱う、特定の応用ドメインにカスタマイズするモデルライブラリの成長する一式一例えば、生態ネットワーク、新陳代謝ネットワーク、輸送ネットワークなどなどを扱うシミュレーションツールを予想するかもしれない。

ネットワークの属性 **Attributes of a Network**

Finding 6-4 回答の分析はネットワークの 3 つの共通の属性を現す：

- (1) それらはリンクによって接続されるノードから成り立つ
- (2) ノードはリンクを横切り資源を交換する
- (3) ノードは直接結合を通じて相互作用するだけである

3 つの属性すべてを捉えた回答はほとんどなかったが、3 つすべてが主要ドメインの広範

囲にわたって（よりドメイン特定のエンタリイにおいては）明確的にもしくはほのめかしのどちらか一貫して現われる。明確に言及された属性における回答率は Figure 6-2 で指し示す。略して、これら属性は「接続性：connectivity」「交換性（交流、やりとり）：exchange」「局所性：locality」と明示される。

- **Connectivity** ネットワークは各々不連続な実体（グラフ理論用語で言う“node”）他ノードへの有限の定義された接続を持つうまく定義された接続トポロジーを有している。一般的に、これらリンクはダイナミックである。
- **Exchange** 接続トポロジーはノード間の1つあるいはそれ以上の資源のクラスを交換するために存在する。本当に、2ノード間の1リンクが存在する、もしそしてその場合に限りネットワークドメインにとって重大な資源が直接交換されうる。
- **Locality** 交換される資源は届けられる、その効果はローカルな相互作用においてのみ起こる（ノードからリンク、リンクからノード）。相互作用のこの局所性は局所的利用できる状態で行動する自律エージェントを含意する。

これら属性の詳細は App. D において議論される。

ネットワークの導出される特性 **Derived Properties of Network**

Finding 6-5 回答者たちは広い応用範囲を横断する質問の共通な集合に回答する手段を提供するためネットワーク科学の必要性を述べた。

回答の 33%はネットワークの出力特性に関係する定義を提供した。提案された定義の分析は幅広い応用ドメインに及ぶ6つの出力特性を識別した：

- 特徴 (characterization)
- コスト (cost)
- 効率 (efficiency)
- 発展 (evolution)
- 回復力 (resilience)
- スケーラビリティ (scalability)

しかし、回答の 7%はこれら特性の派生を表現する手段のクラスを明確に言及した。最も頻繁な言及はモデリング、シミュレーション、最適化であった。これらテーマもまた回答者たちの研究の挑戦において現われた、下記で議論する。

ネットワーク科学にとっての提案されたドライビングアプリケーションという回答は研究の 5つのメジャーコミュニティを一般的にきっちり結びつけたより高度に本質の異なる応用の集合を示した：技術的、生物学的、社会科学、学際的、物理科学と数学。これら応答の分布を Figure 6-3 に示す。

質問表回答の分析はまた多くの関連する挑戦の困難さやそれらを表現するよう要求される研究効果を説明する3つの重大な問題要因 (problem dimension) も識別した：

- ・複雑性
- ・相互作用規模の幅広さ
- ・ネットワークとネットワークの相互作用。

ネットワーク科学定義の将来発展 **Future Evolution of the Definition of Network Science**

ネットワークとそれら関係する研究プログラムは 3 つの記述的カテゴリどれかを基礎にして分類され分析されえた：入力、出力もしくは問題要因。それはより正確な形式的ネットワーク科学定義にとって基礎になれたカテゴリでもある。質問表回答は次の根拠を与える

- ・ ネットワーク科学上ですでに行っている認識可能な密集する共通のコアがある
- ・ 発生期の領域の範囲は研究するに十分厳密だけでなく応用ドメインの明確な幅をまたいで立ち返る関心事を捉えるには十分深い。

研究の挑戦 **RESEARCH CHALLENGE**

Finding 6-6. 回答者たちは実質的な将来の業績を要求する 7 つのメジャーな挑戦を識別した。

- 1、ネットワークにおけるダイナミクス、空間的位置、情報伝播。ネットワークアーキテクチャとその機能との関係をよく理解することが必要である。
- 2、大規模ネットワークのモデリングと分析。ノイズで不完全なデータによって特徴付けられたネットワークのモデリング技法はもちろん、大規模ネットワークについて推論を認めるツール、抽出法、概略が必要とされる。
- 3、ネットワークの設計と総合。技法は所望の特性（セクション“**Derived Properties of Network**”で議論された出力特性のような）を得るためネットワークを設計あるいは修正するために必要とされる。
- 4、厳密で数理的な構造のレベルを増進すること。質問表の多くの回答者たちはネットワーク科学における技術の現状は厳密な数学的基礎を適度に持っていないと感じた。
- 5、領域を横断する共通概念を抽出すること。本質的にことなる学問はネットワーク科学を横断して定義される共通概念が必要である。
- 6、ネットワーク構造のよりよい実験と測量。大規模ネットワーク上の現在のデータ集合はまばらな傾向である、そしてそれら構造及び機能を調査するツールが限られている。
- 7、ネットワークの頑健性と機密性。最後に、要素の変化に頑健（局所的故障を含む）で敵意を持った人の故意に対してセキュアなネットワーク化されたシステムを

よりよく理解し設計することが明らかに必要である。

ネットワーク科学の社会的構造 THE SOCIAL STRUCTURE OF NETWORK SCIENCE

質問表データはネットワーク科学における見てわかる社会的構造の分析のため、米インディアナ大学情報科学助教授 Katy Borner から提供された。彼女の分析はネットワーク科学研究者の 1241 のユニークな名前を質問表と引用研究の中で識別した。名前は回答者の匿名性を保持するためユニークな識別番号によって置き換えられた。初期の招待者、回答者、認識された共同者間の関係を Figure 6-5 で表す。

Figure 6-6 は NSRN (Network Science Researcher Network) の結果のメジャー要素 (10 ノード以上の大きいサイズのグラフを接続してる) を示す。Pajek は 1241 の一意な研究者たちの 630 人をしめす、そして質問表プロットを完璧にする共同と招待によって彼らの関連を示す (Batagelj and Mrvar, 1997)。各研究者はノードで表現される。ノードは質問表を提出した研究者 (茶色) とそうでないもの (オレンジ) を認識するため符号化される。他の研究者によって言及される回数を円のサイズは反映する。

視覚化分析の詳細は App. D の Box D-1 で提供される。分析結果を評価する上で、委員会はネットワーク科学の提案された領域の経験的な状態の上で次の 2 つの Finding を含めることを承認した。

Finding 6-7 回答者の社会的及び共同ネットワークの分析はネットワーク科学が創発している研究領域であるという付加的な根拠を提供する。

Finding 6-8 回答者の社会的及び共同ネットワークの分析はネットワーク科学の学際的な特性の付加的な根拠を提供する。

REFERENCE

Batagelj, V., and A. Mrvar. 1997. Pajek: Program Package for Large Network Analysis. Univ. of Ljubljana, Slovenia. Available at <http://vlado.fmf.uni-lj.si/pub/networks/pajek/>. Accessed August 18, 2005.

7章 Creating Value from Network Science: Scope of the Opportunity (pp.39-45)

(ネットワーク科学から価値を創る：機会の幅)

前章まで委員会はネットワーク科学の定義、内容、研究チャレンジを議論した。本章では一般的に国家にとってそして特に軍にとってネットワーク科学における投資がどのように価値を創るか、焦点を当てる。

研究知識から経済的価値を創る CREATING ECONOMIC VALUE FROM RESEARCH KNOWLEDGE

基本及び応用研究における投資—「科学」において—それは新たな知識を創出する。それらはまた訓練された研究職員も輩出し、そして知的財産（例えば、特許）を生成するかもしれない。それらは直接エンドカスタマ（or エンドユーザ）へ配分される経済的価値を生成しない。それどころか、活動の長いバリューチェーン（a long value chain of activities）は役立つ商業的もしくは軍事的応用の終わりから新しい知識の創出の始まりを分離している（Duke, 2004）。そのため、研究結果がどのように利用されるかを知ることはネットワーク科学における研究支援から軍が獲得しうる最終的価値の最重要な評価である。

リアルオプション分析の概念はここで有用である（Amram, M., and N. Kulatilaka. 1999; Boer, F.P. 2002; Mun, J. 2002）。研究活動へのオプション分析の適用は、顧客（この場合軍）が供給者に金を払って作らせ配分させることをいとわない最終的な能力を創るために生成される知識を利用する義務（ここには「オプション」という用語が入る）ではなく、機会創出とみなされる研究を考慮する。これらオプションはリアルオプション分析の標準技法を利用することを高く評価されうる（Mun, J. 2002）。

多くの商業会社（Commercial firms）はこの方法論を用いて彼らの R&D 投資を計画する（Boer, F.P. 1999）。委員会は本報告書で多くの金融分析方法を追い求めないけれど、根底にある概念はそれに軍にとって利用可能な機会の幅を評価することを許している、なぜならそれがネットワークの新たな科学を創出するための投資の代替を評価するからである。この評価を下記に示す。

バリューチェーンのシナリオ SCENARIOS FOR VALUE CREATION

軍が創るために決定するかもしれない異種オプションの機会を検討するため、委員会は軍がネットワークセントリック闘争（NCW : network-centric warfare）能力と説明された基本的に異なるレベルの投資を表現する 3 つのシナリオを高める研究に有限の投資を決めるだろうことを想定する。これら 3 つのはっきりと異なるシナリオを簡潔に記述した後に、委員会はそのネットワーク科学進展の支援によって軍がどのように価値を創出するかについての発見（findings）を提出する。現在ネットワーク科学は存在していないから、その潜在的価値を評価するために委員会はその将来の進展に関していくつか推定してきた。3 つの

シナリオ全てが動いているターゲットを必要とするが、これらターゲットの本質はあるシナリオからもう一方まで異なる。次に続く記述は軍に役立つ各シナリオと選択によって決定される指示の意識 (a sense of direction) を提供する。シナリオの詳細を App. E で提供する。

Scenario 1, Building the Base

シナリオ 1 は 6.1 基礎研究にとっての軍の現在の計画に合う適度なレベルの資金 (~10 ミリオンドル/年=1,000 万ドル/年) を必要とする。軍のリスク資本財源の少量は NCW 能力を提供しようとするとき生じる実際的な問題をそれが攻撃できる知識や職員の基地を創るために投資される。この理由からシナリオは「Building the Base」と呼ばれる。

予期した投資は重要な学際的試みへ投資するにはあまりに小額過ぎるため、ネットワーク科学に関連する分野において勢いのある存在する研究 (leveraging existing research) へ注目するべきである。Chap. 5 や 6 で議論したように、ネットワーク科学のコアは急速に進展しており、シナリオ 1 はそれが具現化することをひょっとしたら促進するかもしれない。

委員会は研究の試みがメジャー研究大学へ設置されるかもしれないということを思い描いている。計画の重要な見地は軍研究所もしくは施設 (PIs=the principal investigators 主要な研究者たちが 1 年の業績の報告を報告する) で年 1 回の会議になるかもしれない。計画は多様な PIs のインタラクションを通じる学際的業績を支援するため見識のあるマネジメントを必要とする。計画の本質は国家のネットワークを通じて集散的に組織化される特別に生まれつき才能ある個人のみ気前のよい投資によって統計物理、応用数学、社会現象の数理モデルの発展等を基礎とするネットワーク研究における基礎的な前進の達成であろう。

このような計画はネットワーク科学の必要性を述べるそれ自体最初のものであろう。それはネットワーク研究にそれらアーキテクチャ、構造、ダイナミクスによって特徴付けられる密集する実体としてささげられるだろう。広範の定理や方法論フォーカスの意識的な採択によって、計画は根本的に斬新な考えの創出を奨励するだろう。アプローチの広範囲に渡る相違は長期成功の重要な特徴になりうる。目標を広く柔軟に保つことは軍がこのような相違を育むことを認め、その一方で計画を偏狭に定義することはブレークスルーや新アイデアにとっての可能性創出の多くを削減するだろう。

軍の必要性は実質上広範で基礎的である：大規模で、相互作用する、階層ネットワークの予測の記述をどのように創るかのアプローチを習得せねばならないこと。基礎的な科学の計画はこの分野の特殊な軍の問題に取り組むために必要とされる才能の危機的集団を建てる最初の段階である。この適当なアプローチは軍が関係する研究コミュニティを確認しそれを組織化することを許しただろう、そのためそれはより特殊な必要性に取り組むために結局要求されえた。

提案されたアプローチは NSF (the National Science Foundation) や NIH (the National Institute of Health) のようなそれ自体ネットワーク科学へ注力する政府機関において存在する計画から異なっている。研究の重大な量はネットワーク科学に取り組むコミュニティで起こる一方、ほとんどこの研究はひたむきなネットワーク科学計画によって投資されない。

軍と国防総省 (DOD = Department of Defense) 代表者の議論の結果として、委員会は効果的な NCO に基づく基本的な問題がソーシャルドメインに存在するということを実現するようになってきた。依然としてどのように人々がインタラクションし技術もしくは共有される知識に基づく意思決定を利用するかということは軍の現在の基本研究のポートフォリオにおいてほとんど検討されていない分野である。生物学、工学、物理科学への応用もまた軍事応用にとって不可欠であるが、軍はすでにこれら分野の研究へ投資をしている。委員会は最重要な問題はどのようによりよい衛星、戦車もしくは薬を作るかではなく、だんだんグローバルで絶え間なく変動している地理的政策的競争の場を超えて知能を集めるため、物資を配達するため、争いを遂行するため、無数の個人をどのように組織化させるかであると 2 次的に示唆する (Garstka, and Alberts, 2004.)。しかし、これは伝統的に科学の領域ではない途方もない問題である。それどころか直観 (intuition)、経験、伝統の混同を通じて扱われてきた。提案された計画の重要な部分は理論的モデリング、データ分析、対照実験の組み合わせを通じて取り組まれる科学的問題というこの組織的で問題の多い方法へ取り組むべきである。

シナリオ 1 (App. E) において、委員会は 4 つの広範な領域 (ネットワーク構造、ネットワークダイナミクス、ネットワークの頑健性と脆弱性、ネットワークサービス) において見込みのある研究トピックを示す。各領域は理論的、経験的、実験的な要素を有している。ネットワーク科学のこれら領域の各々における基本研究投資は軍へ価値を提供するだろう。委員会はまたネットワーク科学における基本研究が管理される方法でのある程度の変動による投資収益率 (ROI=Return on Investment) の改善にとって提案も申し出る。

シナリオ 2、次世代研究開発 Scenario 2, Next-Generation R&D

シナリオ 2 は、産業的 R&D マネジメントにおける最良の習慣 (best practices) を基礎及び応用ネットワーク科学を結合させるプロジェクトにおける軍の投資へ充当することを予想する。とりわけ、委員会はこれらプロジェクトの目的が所望の能力を与えるために軍及びベンダーによって行使される技術投資オプションの明確な表現になるだろうことを期待している。この投資総額は年間 25~100 ミリオンドルであろうと予想される、およそプロジェクトあたり 25 ミリオンドル。基本的研究のための大学コミュニティ及び応用的研究のための軍組織内の活動や商社への投資が期待される。しかし、委員会は R&D プロジェクトが現在の軍組織内と外部の中心が管理される方法とは大いに異なる方法において管理されるだろうと予想する。

投資されるだろうプロジェクトの選択はトップレベルの軍のチームによって運営管理されるマーケットである。基本的及び応用研究分割の関係がより親密になるであろうと予測される。現在のインターネットコラボレーティブツールは工業生産のグローバルデザインのおよその類似において日常業務を管理することに使用されている。活動はゆるくネットワーク化された仕方で総合プロジェクトへ統合される特定のサブプロジェクトに没頭する小さく、親密なグループにおいて管理される。人々は時を越えてある小さなグループからもう一方へ流動する。全チームはより小さく、よりタイトに結ばれたソーシャルネットワークから成り立つソーシャルネットワークを作り上げる。要するに、このシナリオは現代の通信ネットワーク及びツールの応用と、軍の R&D プロジェクト管理へ変換する現代のソーシャルネットワーク理論の見識を思い描く。

App. E において、委員会は詳細を提供する。次世代 R&D モデルは eBay、Intel、GE のようなネットワーク化された組織のアプローチと似ているが新しく異なるアプローチである。迅速に市場で売買するため良質の製品及び性能を得る必要のあった多くの成功した会社にとって機能してきた原理にそれは基づく：**Think Big, Start Small, Scale Fast and Deliver Value**。我が戦士たちが国家の戦争に勝てるような知識、研究、技術を果たしうる、この型の次世代モデルである。

マーケット運営のアプローチはそれを機能させるために軍と国防総省のシニアリーダーシップや産業界・学会における彼らのパートナーから強い加担を要求する。

3、4 年委託され、より高く動機付けられ、産業界・学会と密接にうまくいく、最良で有望な軍の戦闘 R&D スペシャリストの小規模チームによってリードされていくだろう。

軍はこの新たなモデルの開発及び実装におけるリーダーシップの機会を有している。国防総省において、NCO (noncommissioned officer: 下士官) は参加取り組みをすべきである、そして軍において提供された後に新たな R&D モデルたるべきである。このモデルを実装するために積極的に前進することによって、軍は自身を国防総省にとってのリーダとして確立でき、統合ネットワークを中心とする戦闘能力の進歩へかなり貢献する機会を獲得できる。

The statement of task は委員会へ「ネットワーク科学の領域を進歩させるための特定の研究問題、理論的、実験的、実践的な挑戦を識別すること」を要求する。

簡潔にはっきりと、このような問題は Chap. 3-6 において議論された。

- ・ 「“net-centricity” ネット中心性」の現在の軍事的概念はネットワーク科学における基本的研究の結果からはおそらく取り去られたコンピュータや情報技術の応用に基づく。
- ・ 現在の投資方針及び優先事項がネットワーク中心の軍事作戦を促進する複雑ネットワークについての十分な基礎知識提供することは思いもよらない。
- ・ 複雑性のすべてのレベルにおいて企まれた、生物学的、社会的ネットワークへ関係するコミュニティによってネットワーク科学の基本は異なる方法において理解される。

そして、メジャーな挑戦、4番目の問題もまたネットワーク科学を促進するために軍がもたらす投資から価値を手に入れるだろう。基本的研究(6.1)においてのみ、関連する挑戦はシナリオ1で識別される。基本と応用を結合する研究の場合においては(6.1-6.3)、シナリオ2でプロジェクトが予想をした、挑戦は研究のトピックに慎重に依存する。次世代R&Dプロジェクトの範囲と規模を市場運営マネジメントで描くため、ネットワーク応用の社会的、工学的、生物学的領域を巻き込むシナリオ2にとってサンプルとなるプロジェクトとして3つのプロジェクトが委員会のメンバーによって展開された、そしてそれはApp. Eに含まれる。これらプロジェクトはネットワーク科学を促進するためすべての領域において同程度に必要となるだろう研究という委員会の大意を根底とするために多様な領域から選択された。

社会科学ドメインにおけるサンプルプロジェクトは戦闘環境における局所的な意思決定の研究の輪郭を描く。NCOにとって思い描かれる種類の先進的なITを局所的意思の質を高める目標を持って使用した。

工学ドメインにおける2番目のプロジェクトは人々と輸送機関双方にとって大規模領域を(小都市のサイズと複雑性を大雑把に)モニタリングするネットワークの設計、構築、検査を提案する。

3番目は生物学的脅威の発生を検知するための生物学的監視システムのプロトタイプの構築と検査を描く。このようなシステムもまた監視と直接のふさわしい反応の結果を分析できた。

全サンプルプロジェクトがネットワーク科学を促進させる潜在能力を備えている一方で、それらは「買い物リスト」のように構築されるべきではなく、委員会はそれらの実装をそれらのコスト及び利益と他の研究プロジェクトそれとの念入りな比較なしでは推薦しない。

シナリオ3、頑健なネットワークセントリック戦闘/軍事作戦能力の創出

Scenario 3, Creating a Robust Network-centric Warfare/Operations Capability

The statement of taskは委員会へ「ネットワークセントリック戦闘成功へのプロセスが可能となる投資を軍がすべきであるというあれら関係する研究領域を推薦するように」指図する。このトピックに関する文献をDODOFT(国防総省変革局 the Office of Force Transformation)から委員会が調査したとき、OFTウェブサイト上の文書「conceptual framework」に記述されているように、NCWの概念が拡張された概念NCOによって取って代わられているということを発見した(Cebrowski, Garstka, 1998, <http://www.usni.org/Proceedings/Articles98/PROcebwski.htm> (米国海軍研究所内); Garstka, Alberts, 2004)。メンバーが軍とDODから代表者へインタビューしたとき、彼らは述語体系や本質共に関して広範囲にわたり変化したNCW及びNCOのオプションを見つけた。さらに言えば、トピックの文献は多くの新たな報告書や出版物ダイナミックである。この報告書は公文書を意図されているため、委員会は参考文献として「conceptual

framework description ver.2.0 (Garstka, Alberts, 2004)」を利用することに決めた。

シナリオ 3 は国家的な観点を取り入れる。その目的は、もし NCO の戦略的ビジョンが実行されるならば国家は何を行わなければならないかを問うことである。委員会はこのシナリオで提起された問題の解決を課されていなかったが、その最重要な国家的緊急的解決を考慮する。

委員会は今日我々が有しているネットワークの知識が予測可能で、セキュアな、頑健的グローバルネットワークの設計を認めるには十分ではないと強調してきた。メンバーはどのように NCO の将来の軍事能力への「変化」は技術創出の伝統的アプローチによってはおそらく成就しないだろうというプレゼンを聞いて報告書を読んだ。

委員会はこれら可能性を今のところ獲得していた政策と慣習が複雑ネットワークの設計と実装の理解の最新の状態における不確実な習性を考慮に入れれないということ認識するようになった。そのため、この簡単なシナリオの目的は、予想される NCO の可能性の設計、検査、操作の任務が極めて高い複雑性であり、マンハッタン計画もしくは月への NASA の競争と同等に真剣にアプローチされるべきであるということ強調することである。

もしも非常な切迫とこの任務の深い難しさに気づきそこなったのならば、委員会の責務は怠慢であったろう。タイムリーな NCO 可能性の引渡しの機会や入手できる方法が、将来の戦闘のはっきりとした挑戦に首尾よく応じるため注目される、中心的リーダーシップのもとで全サービスの主導権の結合、国家的主導権によって急増している。米国軍事の変化（現状から NCO のために予測されるもの：conceptual framework...で記述されるそれまで）は米国政府史上おそらく最も複雑な事業であろう (Garstka, Alberts, 2004)。功を奏した第二次世界大戦及びソビエト連邦との冷戦の遂行と似ている。長期間にわたる、困難な、コストのかかる、リスクな事業である。

現在まで構築された最も複雑な武器システム的设计任務についての思考によって始めよう、例えば、巨大航空母艦。これに衛星を経由して動きやすい戦場の戦士へのセキュアで信頼できる無線通信を連想する物理ドメインにおける複雑化を付け加える。情報ドメインでは、ストレージ、検索、実時間内の大規模オーダーのデータ検索を連想するハードウェア及びソフトウェアの挑戦を付け加える、これらデータのセキュリティ及び信頼性を確実にすることを連想する挑戦のみならず。認知ドメインにおいて、全軍事サービスにおける多様なレベルで資源から情報を処理するローカル（モバイル）ワークステーションでの次席航海士(junior officer)を連想する問題を加える。ソーシャルドメインでは、全情報処理能力を利用するための戦術及び訓練を連想する、この情報が豊富な、実時間環境問題で意思決定プロセスを画策する複雑化を加える。委員会は武器システムを設計して獲得する現存の方法がこの偉大なタスクを達成するのに十分であろうとは大いに考えられないようそれを見なしている。サービス自身における現在の経験はこの観点をサポートしている (Brewin, 2005)。そのうえ、委員会は米国軍の現状を NCO にとって明言されるビジョンへ変換する

ことの任務を正しく理解されるようなものよりも大いにやりがいあることと見なしている。

脅かすような複雑職務だけでなく、それを成し遂げるのに必要な知識が今まで存在していない。似ているケースに、マンハッタン計画と NASA 初期の時代が残すようになった、注目される、長期的国家的主導権は要求した、そしておそらく似ている何かがこのケースにおいてのように要求するように思える。したがって、シナリオ 3 は 1 つである、そしてその中で、今後 10 年間の全軍事サービスにおいて NCO の可能性を構想し配置するため米国が注目される、範囲でマンハッタン計画と比較できる、国家的主導権に着手する。

シナリオの含み Implication of the Scenarios

3 つのシナリオの主要な含み (implication:含蓄、言外の意味) はネットワークの科学の創造をサポートすることによって軍が価値創出できる多様な方法があるということである。それを選択する方法は委員会が知ることの不可能な事情への依存だろう。

Finding 7-1. 軍は多くの異なる方法で創発しているネットワーク科学領域への重大な投資から価値創出可能である。

シナリオ 1 からの答申 FINDINGS FROM SCENARIO 1

Chap. 5 において委員会はネットワーク科学の基礎の内容を議論した。よくあるように、巨大物理ネットワークの経験的な技術やエンジニアリングは技術の科学的な基礎よりも先に起こる。これは歴史の至る所で共通している。冶金術の科学が発展する以前 1,000 年間、人間は道具と武器を金属から作成していた。その状況は生物学的・社会的ネットワークにとって微妙に異なる、そしてそれら科学はこれらネットワークがどのように機能するかを把握することに奉げられる。それら自然の工学をいじくりまわすことは将来もたいていある。「技術」はうまく開発される、しかし自然でなく人によってである。全 3 ケース (物理的、生物的、社会的ネットワーク) において、技術は技術が機能してきたことの科学的理解をはるかに追い越す。

Finding 7-2. ネットワーク科学はその発展の初期のステージにあるため、基本・応用の研究の広範囲にわたるポートフォリオはより注目されるポートフォリオよりも優れた価値を生むことが期待される。

Finding 7-3. もし有限の投資 (例えば、年 10 ミリオン\$もしくはそれ以下) のみであるならば、基本的科学の広範のポートフォリオは軍にとっての価値を創出する最も有望なアプローチである。

基本的研究の投資による主要な価値は大学コミュニティ内における思想リーダーへのアク

セス、大学のプロジェクトにおける彼らの業績を通じた学生のトレーニング、軍がその実践的な問題に取り組むためにアクセスできるコミュニティの発展、応用の多様な領域へインパクトを与えるための研究資金の効果的な使用を含む。

新たな方法において研究に従事する事もまた価値を生成できる。複雑な問題へ取り組むため、調整が必要とされる。依然としてクリエイティブな人々によって得られた個々の洞察はいつもこのような問題の解答の根源にある。軍はどのようにして両方の同時期に手に入れるのだろうか？期待を寄せられる才能ある者を結びつける小規模の密集するグループは個人が寄与する創造的な潜在能力を犠牲にすることなく相互に建設的にやりとりする緩やかに結び付けられるネットワークを通して選出されうる、ということを経験研究は暗に言っている (Malone, 2004; Watts, 2003)。ネットワーク科学へのこのようなアプローチを軍によって創出、テスト、洗練する事は他のドメインにおいて広範囲に及ぶ (far-reaching) 結果を持つのだろう。

軍のネットワーク研究ポートフォリオは NSF、NIH、DOE (Department of Energy) のそれとは異ならなければならない。これはされうる、もし軍がネットワークの特定の応用へ当ててるのではなくそれ自体へ焦点を当てるのであるならば。おそらくより重要な、軍は上述した事に沿って複雑な問題への新たなネットワークアプローチを探求できる。この意向は軍と NSF、他間によって従事される現在の研究の中心のそれから明確に異なる。普通中心に現れないネットワークアプローチの本質的要素は正確に形成された複雑な問題へ取り組むための異なるドメインの専門家の多様なグループが密集して調整された行動である。これはまさに学際的サポートやコラボレーティブ研究ではない。そのうえ、協調して作業する専門家のドメインの多様なグループによって以前に特定された問題上の激しく注目された考慮を要求する。代表的な軍の研究所、NSF センターもしくは DOE ユーザ施設で起こる試みよりも、大企業もしくはマンハッタン計画において適した参照モデルは生産開発を含む。

NCO にとっての概念的フレームワークは4つの明確な技術ドメイン内で相互作用するネットワークから成り立つ：物理学的、情報、認知的、社会的 (Graska and Alberts, 2004)。軍は現在最初の投資をしている、ネットワーク通信基盤及びネットワーク通信基盤上に構築された応用の有限のポートフォリオを連想する R&D 内において、もしも排他的でないならば。言い換えると、現在の軍の R&D ポートフォリオは NCO の実行にとって必要不可欠な4ドメインのうち2つのみ (物理と情報) に及んでいる。

物理的情報基盤への投資は戦闘効力を改良するけれども、基盤から利用可能な情報で戦士達が何をやるかに依存している。彼らの決定及び行動は認知的社会的ドメインにある、そしてそれは現在の DODR&D ポートフォリオで未探求のままである。よい知らせはこれらドメイン内の現存する知識がそれら各々の NCO ドメイン内における応用のためになりうることであり、悪い知らせはこれら領域の知識が初歩的で典型的であることであり、その理解は本来質的であり、精密な予測をするにはたいてい役に立たない (Malone, 2004; Watts,

2004)。関係するモデル及び概念が軍にとっての NCO 能力の発展にとっての予想される方法において応用される前に、基本的・応用研究双方への重大な投資が必要となる。

Finding 7-4. ネットワークセントリック作戦へのシフトが多く、社会的行動の問題を提起するから、軍のネットワーク科学ポートフォリオは社会的・認知的ドメインを取り扱うためにネットワーク思考の応用を可能にする、発展している基本的知識を広げるべきである。

ネットワーク科学の状態はとても初歩的であるため、領域の中心的問題はよく認識されることでも正確に提出する事でもない。その進化のこのステージでは、ネットワーク科学はより重要なシーンにおける基本的研究である：基礎的質問は今でも組み立てられている (Watts, 2003)。他の学問における以前の経験（例えば、相対性理論・量子理論へのアインシュタインの貢献）は、大多数の才能ある人々にとって最良の一組の演じるフィールドであって、次のステップへ研究を進める個人のフィールドではないということを示唆する。この領域への投資から軍にとって価値を生むことによって、異なる任務で、特に優れている才能あるものを補充し維持しなければならない。

Finding 7-5. ネットワーク科学における最も優秀な研究者を魅了する方法を軍は見つけないなければならない。これは投資の安定性、興味を持つ同業者の多様性と相互作用する機会、それが導く所はどこでも投資された研究に追従する柔軟性を必要とするだろう。

Finding 7-6. ネットワーク科学における最も優秀な研究者を魅了するために、軍は彼らへ投資するべきである、非軍事的領域における応用であったとしても。

Finding 7-7. ネットワーク科学における最も優秀な研究者を魅了するために、軍は出版物上及び外国での制限を置く事を避けねばならない。

委員会はこれら 3 つの Finding が「ママ」に象徴されるアメリカの実家や実家での生活のように議論が好きではないように思えるかもしれないということをよく知っている。残念な事に、これは事例ではない。今日のグローバル経済では、ずば抜けた技術的タレントは広範囲に渡る国際的な機会を有している。世界の才能に恵まれた人々の多くはもはや米国へ来る事を望まない。彼らは米国軍事のために働きたいとは願わない。豊富な機会がどこか他所にも存在する。基本的研究から価値を創出するためには、軍はトップタレント魅了せねばならない。委員会はこの試みにおいて成功の良いチャンスが軍にあり、3 つの Finding へ耳を傾けるにちがいないということを考えている。

シナリオ 2 及び 3 からの答申 FINDINGS FROM SCENARIO 2 AND 3

経済的価値を引き出すため技術的・マネジメント的リスクを評価する事は過去 10 年におけるビジネス文献においてホットトピックになった (Boer, 1999; Branscomb, Auerswald, 2001; Chesbrough, 2003; Cooper et al., 2001)。生産開発が本質的に非線形なプロセスで、フィードバックループがたくさんあり、思いがけない事があるということは産業界で広く認識されている (Branscomb, Auerswald, 2001; Reinertsen, 1997)。とにかく、これら同じ概念は DOD へ基本的な研究を申し込む (NRC,2005)。そのため、ビジネスの文脈で発展した概念を軍によるネットワーク科学における研究のマネジメントへ適用する事はもっともらしい。

Finding 7-8. 軍は R&D についてビジネス部門から最良のマネジメントの慣行を学べる。

商業的組織における R&D マネジメントはそれらの基本的研究の活動と知られていないもしくは期待されていない応用とを結びつける。これは集中を提供して市場での売買を寄り急速に可能にさせる (Branscomb, Auerswald, 2001; Chesbrough, 2003; Cooper et al., 2001)。委員会はこのような慣習の研究と相似の慣習を適応する事から軍が利益を得ることができるということを考えている。

Finding 7-9. 付加的価値はネットワーク科学における軍の 6.1 基本的研究投資から、下流の応用研究及び技術開発の試みへそれらを結びつけることによって、引き出されうる。

Finding 7-10. もしも軍も関係する応用研究へ重要な資源を奉げるのであれば、ネットワーク科学における基本的研究の結果はおそらくより急速に軍の挑戦に応じるようになるであろう。

これらの finding は App. E (: 委員会が管理プロセスと社会的、工学的、生物学的範囲内の 3 つのサンプル研究プロジェクト記述している。)中のシナリオ 2 にとって基本である。全てはビジネス部門での R&D マネジメント (ソフトウェアプロジェクトを含む) のために使用される現在のモデルとツールに基づいており、その説明に役立つ (Poppendieck, Poppendieck, 2003)。App. E のシナリオ 2 で現われた材料は軍がどのように新しい R&D 慣習とその R&D プログラム 6.1、6.2、6.3 を統合する方法で有効に試みるだろうかを記述する。シナリオにおいて展開されるサンプルの 3 つのプロジェクトはまた findings 7-9 及び 7-10 の真相を説明することにも役立つ。それらは軍のネットワーク設計プロセスのフロントエンド R&D のパフォーマンスを改良できるけれども、商業的 R&D の最良のマネジメントはより基礎的な変化を追加されなければならない、もしも DOD が NCO 能力を習得することになっているのならば。R&D は全バリューチェーン中の 1 ステップでしかない。

軍事的調達のパリチェーンは商社におけるそれよりもいっそう複雑である。大企業の R&D マネジメントの最良の慣習の場合は (1) 科学が十分に発達している (2) 市場の要求がフェアな確さで決定される、中でそれらがうまく機能するということが知られている。ネットワーク科学のアウトプットを軍にとっての NCO 能力の獲得へ適用する場合どちらかは真ではない。商業的な最良の慣習はおおよそ成功することになっている、それらが情報基盤の出所を探ることを供給される時。しかし、ここでさえ、成功の見通しは確かではない。

GIG (Global Information Grid) のアーキテクチャへ統合される無線・有線通信基盤のパフォーマンスを予測できるこの時点で「科学」はない。科学は個々の要素 (例えば、ラジオもしくはコンピュータ) のパフォーマンスを予想することはできるが、ネットワーク全システムについてはできない。よくてもせいぜい、戦士達がこのようなシステムのためにおそらく発展するだろうという応用は領域でたいていきっと心にいだかれテストされるだろう、彼らが作戦や政策を刻み込まれる前に。

社会学的モデルの現状はこのようなネットワークの使用をシミュレートすることに頼もしく適用されるにはそれらにとってあまりにも初歩的である。物理的ネットワークへ「市場」の要求を決定させるためにシミュレーションさせることさえリスクである、なぜならそれは現在の知識を越えた状態だからである。

NCO にとって予想される範囲と複雑さのネットワークを組み合わせること一式をどのように設計するかということを決めようとするため、DOD はメジャーな挑戦へ直面している。委員会は下記に述べる総合のエンドトゥーエンドのソーシングプロセスについての懸念を捉えた。

Finding 7-11. オーバーラッピングの設計、テスト、開発と、ネットワークセントリックオペレーション概念のため描かれる物理、情報、認知、社会ネットワークが現在軍の能力を超えている。それらはタイムリーで入手しやすい (affordable) 流れの中で成就させるために共同の国際的試みを必要とする。

頑健なネットワークセントリック戦闘/軍事作戦能力を創出するために、この finding は 3 番目のシナリオを動機付けた。NCO が実装すると予想されるような、大規模な複雑ネットワークの設計と獲得は現在の慣習を使用する入手しやすい流れの中ではされえないという委員会の仮定に対する返答である。

米国は過去に同様の挑戦へ直面してきた。たとえば、1940 年代の核兵器の設計 (LANL, 1986)。効果的にこのような挑戦へ応じることは注目される、密集する、賛成される国家的な (政府、産業界、学会のパートナーを関係させる) 試みと毎年何百ミリオンドル投資を 10 年以上もかけて必要とした。

さらに言えば、ネットワーク組織の最近の洞察は、このような国家的な試みが巨大工学的

プロジェクトよりもいくぶん異なって組織化されてマネージされるべきである、ということを示唆している (Malone, 2004)。シナリオ 3 は App. E で探求されるが、広範なアウトラインのみではない、なぜならば委員会はこのトピックにおいて専門的アドバイスを提供するために選任されているわけでないからである。ネットワーク科学の組織的実装における現在の知識は委員会に、シナリオがネットワーク科学における投資から大きく最も確実な成果を得るために軍が統率すべき方針を描くということを示唆するように案内する。

REFERENCES

- Amram, M., and N. Kulatilaka. 1999. *Real Options: Managing Strategic Investment in an Uncertain World*. Boston, Mass.: Harvard Business School Press.
- Boer, F.P. 1999. *The Valuation of Technology: Business and Financial Issues in R&D*. Hoboken, N.J.: Wiley.
- Boer, F.P. 2002. *The Real Options Solution: Finding Total Value in a High-Risk World*. Hoboken, N.J.: Wiley.
- Branscomb, L.M., and P.E. Auerswald. 2001. *Taking Technical Risks: How Innovators, Managers, and Investors Manage Risk in High-Tech Innovations*. Cambridge, Mass.: MIT Press.
- Brewin, R. 2005. DoD Mulls Network Coordination. Available at <http://www.few.com/article88939-05-23-05-Print/>. Accessed May 31, 2005.
- Cebrowski, A., and J. Garstka. 1998. Network centric warfare. *Proceedings of the United States Naval Institute* 24: 28-35.
- Chesbrough, H. 2003. *Open Innovation: The New Imperative for Creating and Profiting from Technology*. Boston, Mass.: Harvard Business School Press.
- Cooper, R.G., S.J. Edgett, and E.J. Kleinschmidt. 2001. *Portfolio Management for New Products*, 2nd edition. Reading, Mass.: Perseus Books.
- Duke, C.B. 2004. Creating economic value from research knowledge. *Industrial Physicist* 10(4): 29-31.
- Garstka, J., and D. Alberts. 2004. *Network Centric Operations: Conceptual Framework Version 2.0*. Vienna, Va.: Evidence-Based Research, Inc.
- Los Alamos National Laboratory (LANL). 1986. *Los Alamos 1943-1945: The Beginning of an Era*. LASL-79-78 Reprint.
- Malone, T.W. 2004. *Network the Future of Work: How the New Order of Business Will Shape Your Organization, Your Management Style and Your Life*. Cambridge, Mass.: Harvard Business School Press.

Mun, J. 2002. *Real Options Analysis: Tools and Techniques for Valuing Strategic Investments and Decisions*. Hoboken, N.J.: Wiley.

National Research Council (NRC). 2005. *Assessment of Department of Defense Basic Research*. Washington, D.C.: The National Academies Press.

Poppendieck, M., and T. Poppendieck. 2003. *Lean Software Development: An Agile Toolkit*. Boston, Mass.: Addison Wesley.

Reinertsen, D.G. 1997. *Managing the Design Factory: A Product Developer's Toolkit*. New York, N.Y.: Free Press.

Watts, D.J. 2003. *Six Degrees: The Science of a Connected Age*. New York, N.Y.: W.W. Norton.

Watts, D.J. 2004. The "new" science of networks. *Annual Review of Sociology* 30(1): 243-270.