

# 博士論文

ネットワーク分析手法による  
ロボット研究の知の構造の把握

内 藤 理

# 目次

<b>第1章</b>	<b>序論</b>	<b>1</b>
1.1	背景	1
1.2	目的	1
1.3	知の構造の把握と関連研究	2
1.4	社会的ネットワーク分析の関連用語	6
1.5	分析ツール	9
1.6	論文構成	10
<b>第2章</b>	<b>日本のロボット工学分野の研究者ネットワークの現状</b>	<b>11</b>
2.1	対象データ	11
2.2	表記揺れの発生	12
2.3	対象データの特徴	13
2.3.1	研究者ネットワークの時系列的生成	13
2.3.2	ネットワークを構成する集団	16
2.4	複雑ネットワークとしての評価	18
2.4.1	スケールフリー性(次数分布のべき乗則)	18
2.4.2	スモールワールド性	19
2.4.3	クラスター性(局所凝集性)	20
2.4.4	評価結果	21
2.5	コアメンバーの抽出	22
2.6	中心性分析	25
2.7	クラスター分析	28
2.7.1	クラスターの近縁関係	29
2.7.2	NEDOプロジェクトの効果	31
2.7.3	クラスター間の構造(ネットワークの粗視化)	32
2.8	本章のまとめ	35

<b>第3章</b>	<b>日本出身研究者が採るべき国際的な連携戦略</b>	<b>37</b>
3.1	対象データ	37
3.2	日本出身研究者の定義	37
3.3	研究者ネットワークの国際比較	38
3.4	研究者ネットワークの連携速度	41
3.5	集団内のネットワーク構造	42
3.6	連携戦略(1)：構造的空隙を埋めるネットワーク活動	46
3.6.1	国際的な研究者ネットワークにおける連携の作り方	46
3.6.2	誰をターゲットにすべきか	47
3.6.3	第2集団の場合	47
3.6.4	第3集団の場合	48
3.7	連携戦略(2)：集団内での中心性向上	50
3.8	研究支援機関の役割	53
3.9	本章のまとめ	54
<b>第4章</b>	<b>ロボットに関する学術研究の現状</b>	<b>55</b>
4.1	対象データ	55
4.2	掲載された学術雑誌の主題分野	57
4.3	引用論文ネットワークの中心	61
4.4	引用論文ネットワークのクラスター構造	63
4.4.1	四大クラスターの登場	63
4.4.2	成長が予想される中小クラスター	67
4.4.3	Cluster 1 (移動ロボット) の分析	69
4.4.4	Cluster 2 (マニピュレータ) の分析	74
4.4.5	Cluster 3 (手術ロボット) の分析	79
4.4.6	Cluster 4 (リハビリ) の分析	84
4.5	本章のまとめ	90
<b>第5章</b>	<b>結論</b>	<b>92</b>
5.1	本論文のまとめ	92
5.2	本論文の寄与	96
5.3	今後の課題	97
	<b>謝辞</b>	<b>99</b>

# 目次

1.1 「知」を頂点とするピラミッド構造 . . . . .	4
1.2 「知」の構造 . . . . .	4
1.3 ノード (Node), リンク (Link), 次数 (Degree) . . . . .	6
1.4 ネットワークを構成する集団: 連結成分 (Component) . . . . .	7
1.5 連結成分の中のクラスター (Cluster) . . . . .	8
1.6 構造的空隙 (Structural Hole) のイメージ . . . . .	9
2.1 ロボット工学分野の研究者ネットワーク (1990 年) . . . . .	14
2.2 ロボット工学分野の研究者ネットワーク (1995 年) . . . . .	14
2.3 ロボット工学分野の研究者ネットワーク (2000 年) . . . . .	15
2.4 ロボット工学分野の研究者ネットワーク (2005 年) . . . . .	15
2.5 ロボット工学分野の研究者ネットワーク (2010 年) . . . . .	16
2.6 メインコンポーネント (2,032 ノード) における次数分布 . . . . .	19
2.7 コアメンバーの研究者ネットワーク (2010 年) . . . . .	23
2.8 コアメンバー (710 ノード) における次数分布 . . . . .	24
2.9 モジュラー数 $Q$ による最適なクラスター分割数 . . . . .	28
2.10 クラスターの系統樹 . . . . .	30
2.11 NEDO プロジェクトで連結されたクラスター . . . . .	31
2.12 研究者ネットワークの粗視化 . . . . .	32
3.1 IEEE/T-RO の研究者ネットワーク (2004 年下半期~2010 年末) . . . . .	39
3.2 日本ロボット学会誌の研究者ネットワーク (2004 年下半期~2010 年末) . . . . .	39
3.3 IEEE/T-RO の最大集団 CP01 (68 名) . . . . .	43
3.4 IEEE/T-RO の第 2 集団 CP02 (51 名) . . . . .	44
3.5 IEEE/T-RO の第 3 集団 CP03 (35 名) . . . . .	45
3.6 第 2 集団 (CP02) における媒介中心性の高いノード . . . . .	47
3.7 第 3 集団 (CP03) における媒介中心性の高いノード . . . . .	49
3.8 最大集団 (CP01) のネットワーク (変更前) . . . . .	50

3.9	最大集団 (CP01) のネットワーク (変更後)	51
4.1	引用論文ネットワークの生成手順	56
4.2	ロボット研究の引用論文ネットワーク	56
4.3	掲載学術雑誌の主題分野の分類	57
4.4	引用論文ネットワークにおける次数中心性の分布	61
4.5	クラスターを構成する論文数の分布	63
4.6	上位4クラスターのネットワーク形状	64
4.7	上位4クラスターの論文発行件数の推移	66
4.8	Cluster 1 における次数中心性の分布	69
4.9	Cluster 1 のサブクラスターを構成する論文数の分布	70
4.10	Cluster 1 の上位8サブクラスターにおける論文発行の累積件数	72
4.11	Cluster 2 における次数中心性の分布	74
4.12	Cluster 2 のサブクラスターを構成する論文数の分布	75
4.13	Cluster 2 の上位7サブクラスターにおける論文発行の累積件数	77
4.14	Cluster 3 における次数中心性の分布	79
4.15	Cluster 3 のサブクラスターを構成する論文数の分布	80
4.16	Cluster 3 の上位6サブクラスターにおける論文発行の累積件数	82
4.17	Cluster 4 における次数中心性の分布	84
4.18	Cluster 4 のサブクラスターを構成する論文数の分布	86
4.19	Cluster 4 の上位10サブクラスターにおける論文発行の累積件数	88

# 表目次

2.1	日本ロボット学会誌の査読付き論文と著者 (1983~2010 年) . . . . .	12
2.2	ロボット工学分野の研究者ネットワークを構成する集団 . . . . .	17
2.3	コアメンバーとメインコンポーネントと全ノードの関係 . . . . .	22
2.4	ココアメンバー (710 ノード) の中心性 . . . . .	27
2.5	クラスター間のブリッジの強さ . . . . .	33
2.6	粗視化されたネットワーク (27 クラスター) の中心性 . . . . .	34
3.1	IEEE/T-RO と日本ロボット学会誌の掲載論文の比較 . . . . .	38
3.2	研究者ネットワークを構成する集団の比較 . . . . .	40
3.3	研究者ネットワークの連携速度の比較 . . . . .	41
3.4	第2集団 (CP02) における次数中心性と媒介中心性 . . . . .	48
3.5	第3集団 (CP03) における次数中心性と媒介中心性 . . . . .	49
3.6	最大集団内における中心性の変化 . . . . .	52
4.1	学術雑誌の主題分野毎の掲載論文数 . . . . .	58
4.2	上位4クラスターの特徴 . . . . .	64
4.3	上位4クラスターの特徴を示すキーワード . . . . .	65
4.4	成長が予想される中小クラスター . . . . .	67
4.5	成長が期待される中小クラスターにおける上位5ヶ国と5研究機関 . . . . .	68
4.6	Cluster 1 の上位8サブクラスター . . . . .	71
4.7	Cluster 1 の上位8サブクラスターにおける上位5ヶ国と5研究機関 . . . . .	73
4.8	Cluster 2 の上位7サブクラスター . . . . .	76
4.9	Cluster 2 の上位7サブクラスターにおける上位5ヶ国と5研究機関 . . . . .	78
4.10	Cluster 3 の上位6サブクラスター . . . . .	81
4.11	Cluster 3 の上位6サブクラスターにおける上位5ヶ国と5研究機関 . . . . .	83
4.12	Cluster 4 の上位10サブクラスター . . . . .	87
4.13	Cluster 4 の上位10サブクラスターにおける上位5ヶ国と5研究機関 . . . . .	89

# 第1章 序論

## 1.1 背景

ロボットという言葉が初めて使用されたのは、チェコの作家カレル・チャペックの1920年発表、1921年初演の戯曲R.U.R.（ロッサム万能ロボット会社）の中と言われている [1].

ロボットは、それ以降しばらくは、映画やSF小説や漫画の中で活躍するにとどまっていたが、1961年に世界初の産業用ロボットとして米ユニメーション社からユニメート、米AMF社からバーサトランが登場し、実社会との関わりが始まった [2]. そして、産業ロボット元年と言われた1980年以降、産業ロボットが我が国を中心に急速に普及した [3]. さらに、近年、人間と共生する各種のサービスロボットも登場し、実社会でロボットが活躍する場が工場以外にも広がりつつある。特に、2000年に米インテュイティヴ・サージカル社のダ・ヴィンチが米国食品医薬品局（FDA）から承認を受けてから、手術ロボットの普及が急速に進んでいる [4].

このようなロボットと実社会との関係の深化により、ロボットに関する研究も多様化しており、ロボットを研究する学術分野も工学のみならず、医学、生物学、心理学、哲学などに拡大している。そのため、ロボット研究の知の構造を把握することは、人材の有効活用や重点分野の選択などロボットに関するイノベーションを促進する上で極めて重要であると考えられる。

## 1.2 目的

本論文の目的は、ロボットに関するイノベーションを促進するために、ネットワーク分析によって、ロボットに関する研究の知の構造を明らかにすることである。

そのため、共著と引用という学術研究において生じる代表的なネットワーク活動に着目し、学術論文の共著関係から導き出される研究者ネットワークと、学術論文の引用関係から導き出される引用論文ネットワークを分析対象とすることとした。

まず、研究者ネットワークについては、近年、イノベーションを創発するシステムとして多くの研究者に認識されており、研究者ネットワークを対象とした研究が様々な分野で実施されている状況にある [5, 6, 7, 8, 9, 10].

社会的ネットワーク分析を実社会に適用すると、人間関係の潜在的構造を顕在化させるため、躊躇するところが多々あるものの、コミュニティの外部者や新規参入者に対して、ネットワークの中心 (Hub) や見えざる大学 (invisible college) などの貴重な情報を与えてくれる [7]. そのため、研究者ネットワークの社会的ネットワーク分析は、広範な産学官がヒトとの共生を目指してロボット工学の研究開発戦略を検討する上で、有効な判断材料を与えてくれるものと考えられる. ここで、見えざる大学という言葉は、ボイルの法則で有名なボイルらが 1640 年代に自分たちの私的会合に対して使い始めたもので、伝統的な中世大学に劣らぬ優れた知的活動を行おうという自負を示すものであった. 現在は、異なる研究機関に所属していても個人的な接触によって優れた業績を上げる研究者の集団という意味で用いられている.

また、社会的ネットワーク分析は、コミュニティの内部者に対しても、構造的空隙の存在場所を教示することができる. この構造的空隙を埋めるネットワーク活動を行う者は、重要な情報を獲得でき、仲介者としての利益を得るとともに、当該ネットワークの社会的資本価値の向上に貢献するとされている [11, 12]. そのため、イノベーションを促進する観点からは、このような構造的空隙を埋めるネットワーク活動をいかにして増加させるかが重要な課題とされている.

本論文では、日本におけるロボット工学の研究者ネットワークの特性・構造を把握するとともに、社会的ネットワーク分析の応用例として、国際的なロボット工学の研究者ネットワークと比較することで、国際的な研究者ネットワークの中で日本出身研究者が採るべき連携戦略を示すこととした.

次に、引用論文ネットワークについては、学術論文データベースの大規模化が進んだ今日、爆発的に増加する学術論文から、分野毎の重要論文の抽出や新たに出現する研究テーマの発見などに極めて効果的な分析ツールであるという認識が広がっている [13, 14].

本論文では、工学のみならずあらゆる学術分野のロボット研究の学術論文から引用論文ネットワークを構築し、クラスター分割や中心性の分析を行う [15, 16, 17, 18]. これにより、実社会との関係性を深めることで多様化しているロボット研究全体を俯瞰し、イノベーションの方向を把握することを目的としている. これにより、ロボットに関心を有する研究者が今後の研究テーマを検討する際や、研究支援機関が政策資源の配分計画を検討する際に有益な情報となることを期待している.

### 1.3 知の構造の把握と関連研究

近年、学術研究に代表される「知識」が爆発的に増加するとともに、専門領域の細分化が進んでいる. これにより、その道の専門家であっても必要な「知識」を探すことに苦勞し、

また、専門領域外の「知識」については、その価値を理解することが困難になり、活用できない状態となっている。一方、単独で存在する「知識」はなく、個々の「知識」は他の「知識」と相互に何らかの関連を持っていると考えられている。これに着目して、「知識」の間に存在する関係の構造から、「知識」の集合、すなわち、「知」を理解しようという研究が始まっている。

2000年に東京大学の「知の構造化」プロジェクトを提唱した小宮山宏によれば、それぞれの「知識」の間に存在する関係性に着目して、情報技術を用いて膨大な「知識」を関連付けて「知識」の集合体（ネットワーク）を構築すれば、分散して存在する「知識」であっても、全体像を把握し、分野を超えて「知識」を活用できるようになるとしている。具体的には、「知識」の間の関連を図にすると「知識」のネットワークとなり、ネットワークの大きさを影響力の尺度と考えることも可能であるとしている。そして、ネットワークのハブを探すことで重要な「知識」を探すことが可能になり、ひとつの「知識」から他の「知識」を次々と辿ることが容易になるとしている。その上、「知識」を構造化することで暗黙知も利用可能になるとしている。また、ネットワークの参加者にとっては、全体の中での位置を知ることによって今後の行動を検討できるとともに、「知識」の間の関連付けを意識的に実践することでイノベーションを起こす環境を醸成することができるとしている。さらに、研究者のネットワーク分析を研究資源の配分に利用することや、政策立案の資源として専門家の「知識」を構造化することを提案している [19]。

その後、「知の構造化」プロジェクトは、東京大学総合研究機構及び知の構造化センターにおいて、松島克守らによって研究が行われ、爆発的に増加する各種の「知識」を対象にして、情報技術を用いて「知識」の集合体（ネットワーク）を構築することで、「知」の構造を明らかにし、多くの成果を生んでいる [20, 21, 22, 23, 24]。

ここで、用語の整理をしつつ、小宮山らの概念を紹介することとする。まず、「知」がどのような要素から構成されているかについて、小宮山らの考え方を図 1.1 に紹介する。なお、小宮山のオリジナルでは、「知」は「知恵」となっている。また、知の構造化センターのホームページでは、「知」＝「知識システム」となっている。そこで、「知」＝相互に関連付けられた「知識」の集合ということで統一することとする [19, 25]。

「知識」については、相互の関係性を有する様々な形態が想定されるが、本論文では、個々の研究者や個々の学術論文がこれに当たる。そして、それぞれの「知識」の間に存在する関係性に着目して、「知識」を関連付けて「知識」の集合体を構築することを「知識」の構造化と呼び、そこに形成された構造を「知」の構造と呼ぶ。

次に、小宮山らが想定する「知」の構造を図 1.2 に紹介する。なお、小宮山のオリジナルを改変し、「把握されていない関連」と「構造化されていない知識」という説明を付加するとともに、「把握されていない関連」の表示を実線から点線としている [19]。

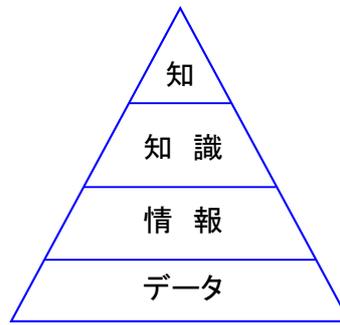


図 1.1: 「知」を頂点とするピラミッド構造

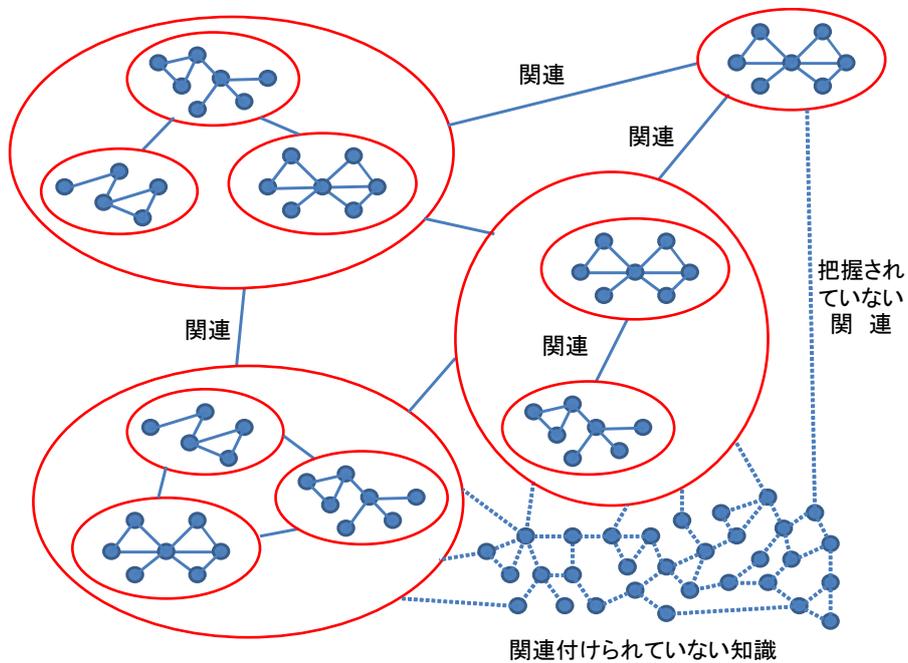


図 1.2: 「知」の構造

図 1.2 を見てわかるように、「知」は、クラスター構造を有するネットワークとして記述され、ネットワーク分析を行うことで、「知」の構造を把握することができる。そして、一般的に、「知」の構造を把握するためのネットワーク分析は、全体構造を俯瞰するマクロレベル、クラスターに分割して分析するセミマクロ（メソスケール）レベル、ノードの位置付けに着目するマイクロレベルの 3 層構造で行われるとされている。これによって、視点を変えて「知識」を科学的・経済的・社会的・文化的価値に結びつけ、分野を超えて有効に活用できるようになる。

「知」の構造は、ネットワークとして図示できるものであり、「知」の構造の解析にネットワーク分析手法を適用することが可能である。そこで、ネットワーク分析の端緒を開いた社会的ネットワーク分析に関する研究の流れを見てみることにする。

まず、社会的ネットワーク分析は、分析対象の個々の属性ではなく、周囲との関係の構造に着目して、諸々の現象を説明しようとするものである [26].

社会的ネットワーク分析の発展の歴史を辿ると、まず、20世紀初頭のドイツで W.Kohler らによって提唱された心理学のゲシュタルト理論に影響されたドイツ人研究者のグループが 1930 年代に米国に移住してきたことに始まる [27, 28, 29, 30]. 彼らの中から、グループ・ダイナミクス研究の K.Lewin や 1933 年にソシオグラムを考案した J.Moreno が現れた [31, 32]. また、F.Harary は、グラフ理論を導入し、グループ・ダイナミクスに数学的な理論付けを行った [33].

社会的ネットワーク分析のもうひとつの源泉は、英国の社会人類学者 A.Radcliffe-Brown の研究とされている [34, 35]. この流れは、米国と英国でふたつに分かれて発展した。ひとつは、1930 年代のハーバード大学の W.Warner や G.Mayo のグループで、工場内やコミュニティ内の人間関係を研究し、インフォーマルな対人関係に着目するものであった [36, 37]. もうひとつは、1950 年代のマンチェスター大学の M.Gluckman や J.Barnes や E.Bott のグループで、コミュニティ構造の中で起こる葛藤と権力の行使に着目するものであった [38, 39, 40]. これらを集大成し、社会的ネットワーク分析の枠組みの基礎を築いたのが 1960 年代末の C.Mitchell であった [41].

こうした中で、1970 年前後に H.White に率いられたハーバード・ブレイク・スルーと呼ばれる社会的ネットワーク分析の急激な発展が起こった [42]. その鍵となったのは、グラフ理論に加えて集合理論を用いて、ネットワーク内の関係構造をブロックモデルとして表現するとともに、多次元尺度法を用いてネットワーク内のブロックモデルを生成する CONCOR というアルゴリズムを確立したことであった。

このようにして体系が整備された社会的ネットワーク分析は、研究対象を純粋な対人関係から、組織と人間の関係や組織と集団の関係に拡げ、社会関係資本 (social capital) を分析する組織論に展開していった。その代表的な研究としては、M.Granovetter の『『弱い』紐帯の強さ』(1973 年) や R.Burt の『構造的空隙』(1992 年) がある [11, 12].

これらの社会的ネットワーク分析の流れとは全く別に、ネットワーク分析を社会に導入することを提案した者がいた。同種の内容の学術論文を効率的に検索するため、学術論文の引用索引 (citation index) を 1955 年に提案した E.Garfield である [43]. Garfield は、このアイデアを実用化するため、1960 年に Institute for Scientific Information (現・トムソン・ロイター社 ISI 部門) を設立した。そして、学術論文の発行件数が爆発的に増加するのにもともない、巨大な引用論文ネットワークを形成することとなった。21 世紀に入ると、K.Borner

やH.Smallらによって、この巨大なデータベースを活用して、サイエンスマップ（学術俯瞰マップ）を可視化するとともに、重要な論文や伸張する研究領域を探し出そうという研究が始まった [13, 14, 15].

一方、コンピュータの進歩により、大量のデータを取り扱えるようになり、インターネットのルータやウェブページのネットワーク、生物の食物連鎖のネットワーク、エイズ感染のネットワーク、学术论文の引用ネットワークなどの大規模なネットワークを分析できるようになった。その結果、現実の大規模ネットワークは、正方格子のように規則的でもないし、ランダムグラフほど無秩序でもないことがわかってきた。1990年代末頃にD.WattsやA.Barabasiらによって、この複雑ネットワーク（complex networks）の研究が始められ、スケールフリー性（次数分布のべき乗則）やスモールワールド性やクラスター性（局所凝縮性）といった性質が存在することが明らかにされた [44, 45, 46, 47].

## 1.4 社会的ネットワーク分析の関連用語

ノード、リンク、次数： 図 1.3 に示すように、ネットワークの基本要素は、ノード（Node）とリンク（Link）である。そして、方向性のないリンクをエッジ（Edge）とよび、方向性のあるリンクをアーク（Arch）とよぶ。また、各ノードが有するリンクの数を当該のノードの次数（Degree）とよび、更にリンクがアークの場合は、入次数と出次数に分けることがある。また、同一リンクが複数回実行される場合、リンクに重みを付けることもある。

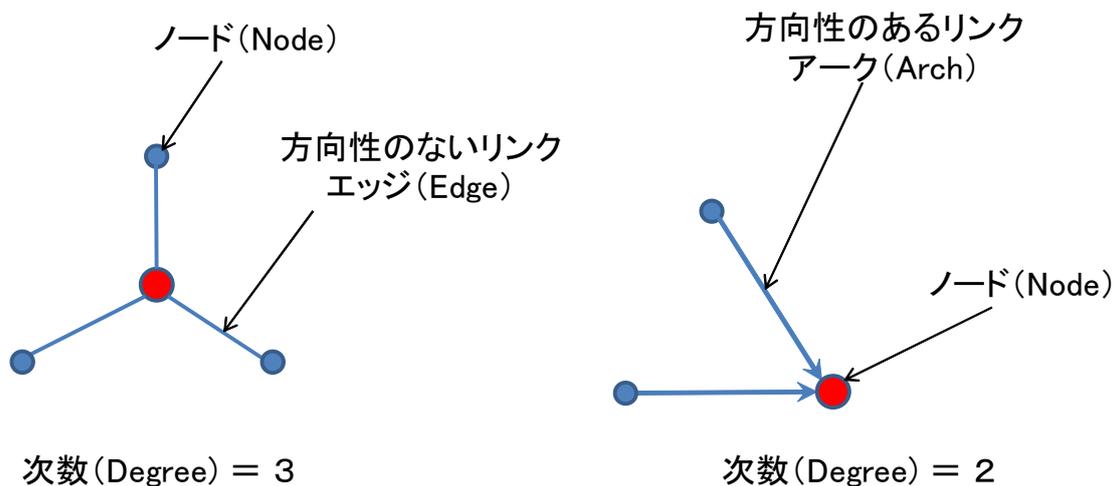


図 1.3: ノード（Node）、リンク（Link）、次数（Degree）

学術論文の共著関係から構成される研究者ネットワークにおいては、著者がノード、共著関係がエッジとなる。学術論文の引用関係から構成される引用論文ネットワークにおいては、学術論文がノード、引用関係がアークとなる。

なお、本論文では、第一著者と共著者の間の協力関係について、上司として指導したのか、部下として指示に従ったのか、まったく対等の立場で共同作業を行ったのかを判定できないため、第一著者と共著者との間のリンクに方向を付与せず、エッジとしている。また、大規模な社会的ネットワークの分析では、ノード同士が直結しているのか、その間の距離がどのくらいなのか、どのリンクが希少性を有するのかといったことが主な関心事項であるため、複数回実行された共著関係にも重みを付加していない。そのため、本論文で扱う研究者ネットワークは、重みなしの無向グラフとなっているが、共著関係のネットワーク分析に関する過去の研究においても、多くの場合、重みなしの無向グラフが採用されている [47, 48]。

ネットワークを構成する集団：連結成分：次に、ネットワークを構成する集団について説明する。ネットワークを構成するノードは、必ずしも全てのノードが連結している訳ではない。通常は、図 1.4 に示すように、いくつかの集団：連結成分 (Component) に分かれている。その中で、通常、最大連結成分 (Main Component) をネットワーク分析の対象としている。

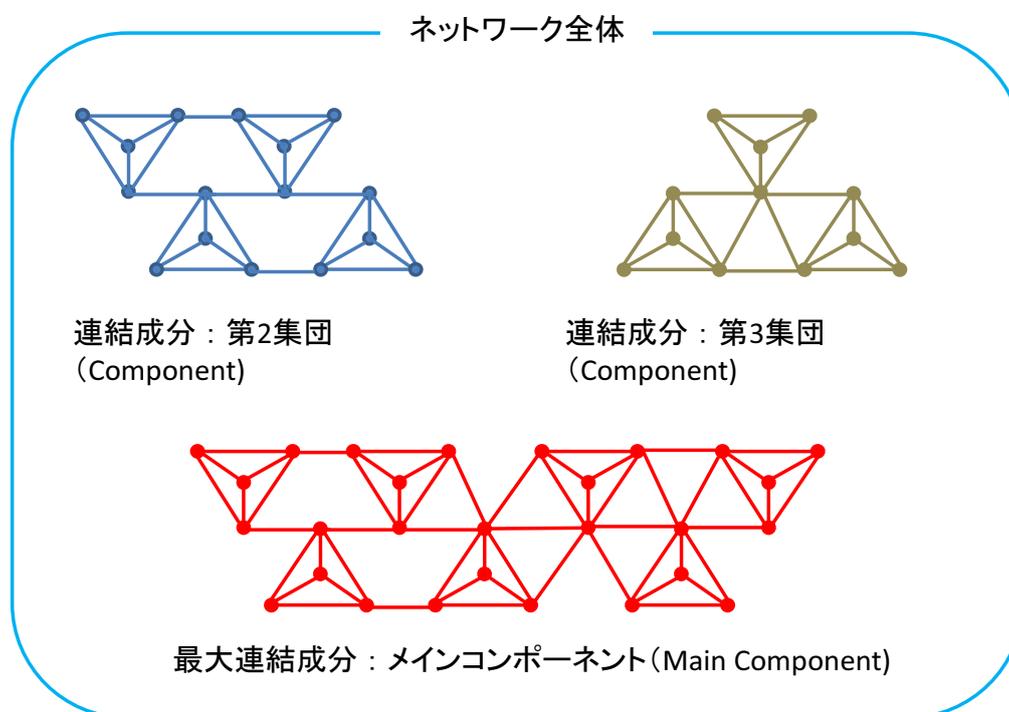


図 1.4: ネットワークを構成する集団：連結成分 (Component)

**クラスター (Cluster):** 一般に、大規模なネットワークでは、リンクは、均一に存在している訳ではない。特定のノード群の内部ではリンクが密に存在し、それらのノード群の間ではリンクは疎らなものとなっている。そのため、図 1.5 に見るとおり、ブドウの房のような塊が形成されることになる。これをコミュニティ (Community) 又はモジュール (Module) とよぶこともあるが、本論文では、クラスター (Cluster) とよぶこととする。

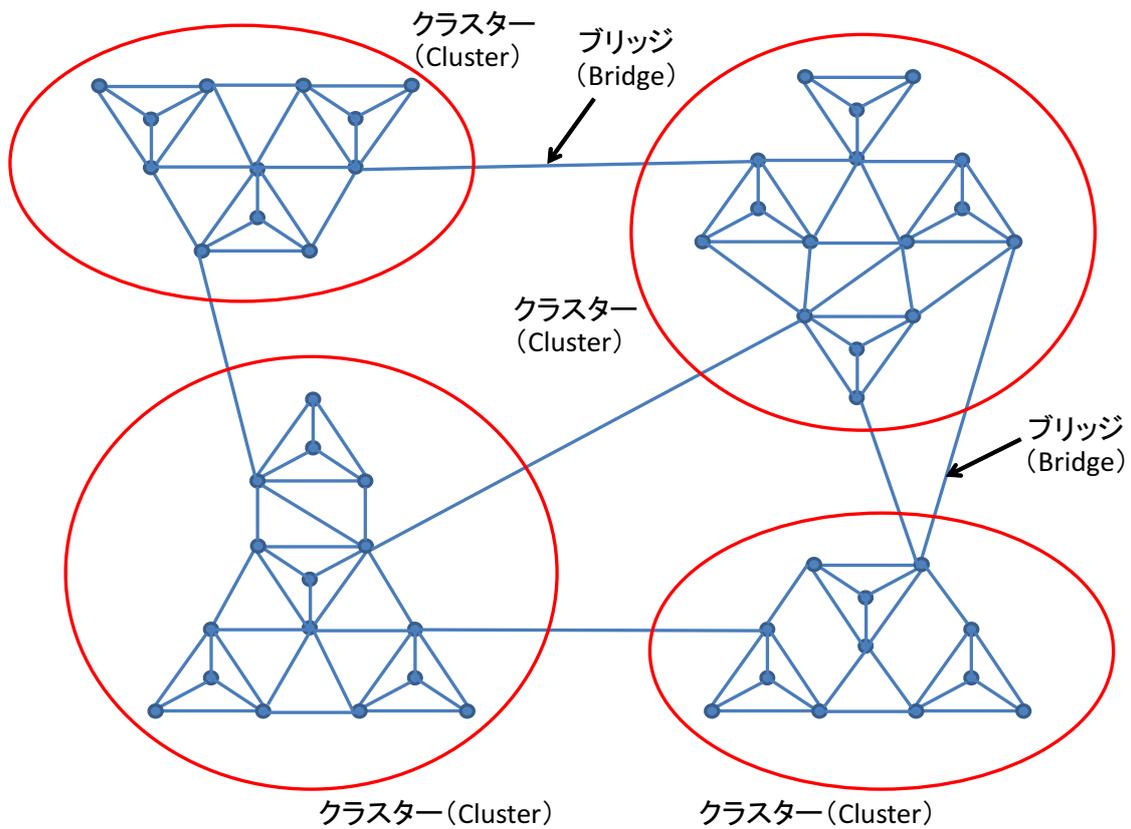


図 1.5: 連結成分の中のクラスター (Cluster)

**構造的空隙 (Structural Hole) :** ネットワークをクラスターに分割すると、図 1.6 のように、リンクが存在しない又は疎らにしか存在しない部分が明らかになる。この部分を構造的空隙 (Structural Hole) とよび、社会的ネットワーク分析では重視されている。

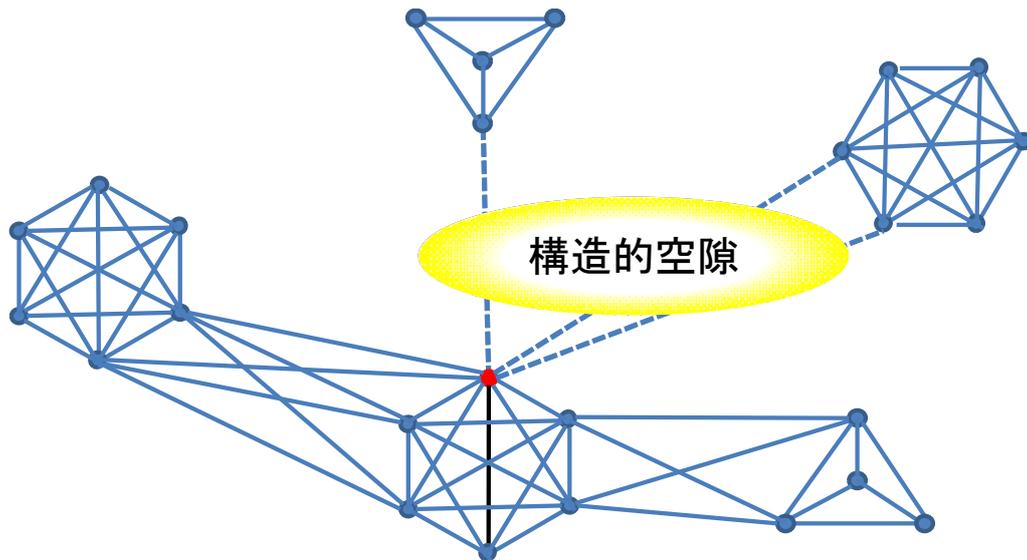


図 1.6: 構造的空隙 (Structural Hole) のイメージ

## 1.5 分析ツール

研究者ネットワークについては、社会的ネットワーク分析の代表的なソフトウェアである UCINET (Ver.6.207) を用いて、対象データを分析した。このソフトウェアは、S.Borgatti, M.Everett, L.Freeman によって開発され、現在、米 Analytic Technologies 社によって配布・販売されている。また、ネットワークのグラフ化には Pajek (Ver.1.02) を、クラスター分析には NetDraw (Ver.2.083) を利用した。どちらのソフトウェアも UCINET に組み込まれており、データの相互利用が可能となっている [49, 50, 51]。

引用論文ネットワークについては、東京大学総合研究機構イノベーション政策研究センターで開発された学術俯瞰マップ作成システムを用いて、対象データを分析した [52]。

## 1.6 論文構成

本論文の構成は、以下のようになっている。

**第2章：日本のロボット工学分野の研究者ネットワークの現状** 日本ロボット学会誌の創刊（1983年）から2010年末までの間に掲載された査読付き論文の共著関係から、ネットワークを生成し、日本におけるロボット工学分野の研究者ネットワークを分析する。

まず、日本におけるロボット工学の研究者ネットワークには、スケールフリー性、スモールワールド性、クラスター性という複雑ネットワークとしての一般的な特徴を有していることを確認する。

そして、コアメンバーを抽出し、そのネットワーク内の中心性を評価する。

また、クラスター分析を行うことで、研究者グループの間の近縁関係を明らかにする。さらに、ノードに代わってクラスター単位で研究者ネットワークを粗視化し、研究者ネットワークの全体構造を簡潔に示す。

**第3章：日本出身研究者が採るべき国際的な連携戦略** 研究者ネットワークの分析の応用例として、IEEE/T-ROの創刊（1983年下期）から2010年末までの間に掲載された査読付き論文の共著関係から生成される研究者ネットワークと、同じ時期の日本ロボット学会誌に掲載された査読付き論文から生成される研究者ネットワークを比較する。

そして、ロボット工学分野の日本出身研究者が国際的な研究者ネットワークでどのような連携戦略を採ることが効果的なのかを検討する。

**第4章：ロボットに関する学術研究の現状** タイトル、キーワードおよび抄録に”Robot\*”を含む1898年から2011年までの間に発行された全ての学術分野の英語論文の引用関係から引用論文ネットワークを生成し、ロボットに関する学術研究の現状を俯瞰する。

まず、掲載された学術雑誌の主題分野分類から、ロボットに関する学術研究がどのような学術分野で行われているのかを明らかにする。

そして、ネットワーク内の中心性を評価し、引用論文ネットワークのハブとなっている学術論文を把握する。

また、クラスター分析を行い、ロボットに関する学術研究の分野毎の特徴を把握する。

**第5章：結論** 各章の内容をまとめ、本論文の寄与について説明する。最後に、本論文の研究成果を踏まえた今後の課題と展望について述べる。

## 第2章 日本のロボット工学分野の研究者ネットワークの現状

社会的ネットワーク分析の代表的な手法を用いて、日本のロボット工学分野の研究者ネットワークの特徴を分析した。

### 2.1 対象データ

共著関係から研究者ネットワークを作成する場合、その基になるデータとしては、学術講演会での発表論文（Conference Paper）と、学術雑誌の掲載論文（Transactions Paper）があるが、本章では、Transactions Paper を選択している。

その理由は、Conference Paper には、Transactions Paper よりも 1 桁多い著者が参加するものの、共著関係のネットワークデータを生成する際に必須となる著者間の名寄せが困難であるという欠点があるためである。ここで、名寄せとは、対象となるすべての論文の著者から、表記揺れや改姓や同姓同名者などの影響を排除して、同一人物であることを確認する作業をいう。一方、Transactions Paper には、年間に掲載される著者数に限りがあるため、研究者ネットワークを十分に表現にできるだけのデータを蓄積するには時間がかかってしまうという難点があるものの、著者間の名寄せが容易であるなど、研究者ネットワークについて、より確実な関係データを提供してくれるという長所があるためである。

日本におけるロボット工学の研究者は、その研究成果の発表の場として、日本ロボット学会のほか、日本機械学会、計測自動制御学会、人工知能学会、日本人間工学会などに投稿しているが、日本ロボット学会にまったく関与しない研究者は少ないものと考えられる。また、ロボット工学の研究が盛んに行われるようになったのは比較的新しく、日本ロボット学会の発展の歴史と重なるところが大きい。

そこで、本研究では、日本ロボット学会誌の掲載論文を対象として、著者と共著関係を抽出することで、日本におけるロボット工学の研究者ネットワークを把握することとする。具体的には、1983 年創設～2010 年末までの間に日本ロボット学会誌に掲載された査読付き論文（1,912 件）を対象データとした。そこから表 2.1 に示すように、著者（2,736 名、延べ 6,253 名）と、その共著関係（6,531 本）を抽出し、ネットワークデータを生成した。

表 2.1: 日本ロボット学会誌の査読付き論文と著者 (1983～2010 年)

	1983～1990年	1991～1995年	1996～2000年	2001～2005年	2006～2010年	1983～2010年
査読付き論文数	244	369	508	362	429	1,912
延べ著者数	713	1,071	1,593	1,247	1,629	6,253
1本当たり平均著者数	2.92	2.90	3.14	3.44	3.80	3.27
名寄せ後の著者(Node)数	443	632	872	733	986	2,736
複数回執筆著者数	120	202	294	194	265	866
延べ共著関係数	846	1,215	2,106	1,926	3,014	9,107
名寄せ後の共著関係(Edge)数	700	963	1,631	1,467	2,351	6,531
1人当たり平均共著関係数	1.58	1.52	1.87	2.00	2.38	2.39
複数回実行された共著関係数	93	171	287	223	397	1,223
論文賞の件数	9	11	14	14	13	61
論文賞の延べ受賞者数	23	36	42	42	49	192
名寄せ後の初出受賞者数	22	34	32	35	36	159

## 2.2 表記揺れの発生

データ入力の過程で問題となったのは、氏名表記の揺れの多発であった。866名の複数回、論文を執筆した著者のうち、62名(7.2%)の著者に表記揺れが発生していた。誤字や脱字のように出版印刷側に責があるものもあったが、多くは著者自らが引き起こしたと思われるものであった。

本論文では、手作業でこれらの表記揺れを補正したが、ネット検索で研究者の業績を調査する場合には、表記揺れを吸収するように十分に注意する必要があると考えられる。また、研究者自身も、自らの業績が実際よりも低く評価されることを避けるために、表記揺れに注意することが望まれる。

[氏名表記の揺れの例]

- 誤字: 「斉」と「齋」, 「齊」と「齋」, 「亨」と「享」, 「崇」と「崇」, 「男」と「夫」と「雄」など
- 異体字の混用: 「斉」と「齊」, 「齋」と「齋」, 「広」と「廣」, 「沢」と「澤」, 「実」と「實」, 「国」と「國」など
- 旧姓の併記: カッコ書きで旧姓を表記

- アルファベット表記とカタカナ表記の混用
- アルファベット表記と漢字表記の混用
- ローマ字表記の揺れ: Naito, Naitou, Naitoh

## 2.3 対象データの特性

### 2.3.1 研究者ネットワークの時系列的生成

図 2.1-図 2.5 に、5 年ごとの研究者ネットワークの成長過程を示す。なお、黄色のノードは、論文賞を受賞した研究者を示している。

ここから、2000 年頃には、かなり複雑なネットワークを形成していることが見て取れる。中心部にある最大連結成分 (Main Component) に含まれるノードの比率を見ても、1990 年で 9.9 %、1995 年で 30.6 %、2000 年で 59.3 %、2005 年で 67.8 %、2010 年で 74.3 % となっており、2000 年頃までに多くのノードがひとつに繋がり、メインコンポーネント (最大連結成分) が成長したことが分かる。

しかし、このことが 2000 年頃に初めて日本のロボット研究者の間に緊密なネットワークが形成されたということを示すものではない。人数は今よりも少なかったにしろ、1983 年以前から日本のロボット研究者の間には緊密なネットワークが存在していたはずである。日本のロボット工学の研究者のネットワーク活動 (共著) の連携速度では、おおよそのノードを連結し、社会的ネットワークを説明できるようになるには、15~20 年かかるというように見るべきであろう。

一方、2000 年以降は、ネットワーク全体のノードの増加数と、メインコンポーネントに属するノードの増加数がほぼ一致しており、新規参入者の多くがメインコンポーネントに参加するようになったことを示している。新規参入者は、ネットワークを分散化するのではなく、メインコンポーネントへの集中度を高める方向に作用している。

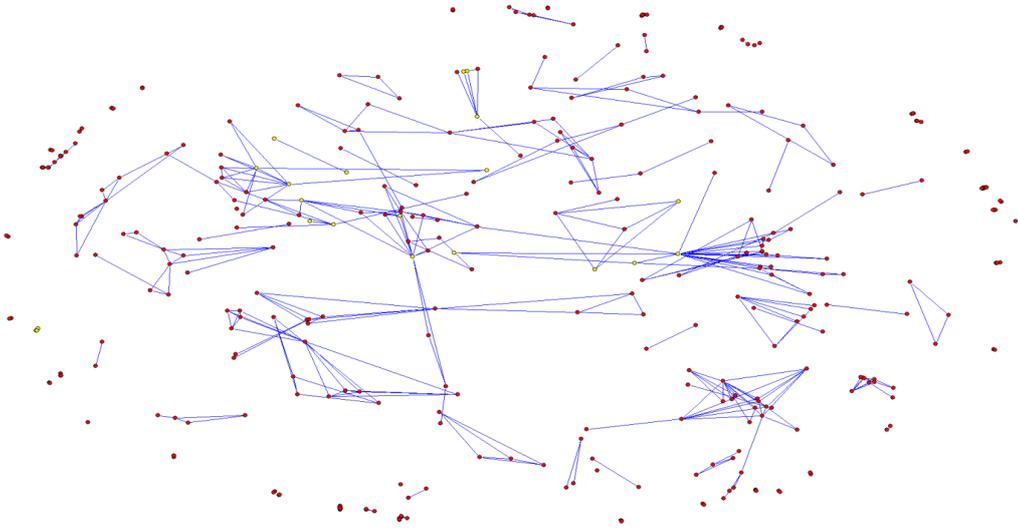


図 2.1: ロボット工学分野の研究者ネットワーク (1990 年)  
443 ノード (うち 44 ノードが Main Component), 700 エッジ

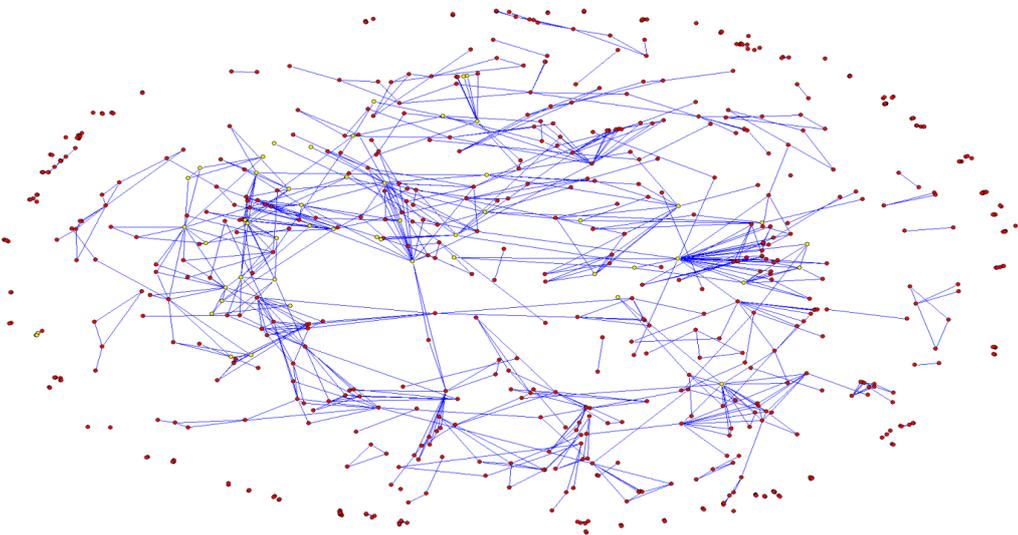


図 2.2: ロボット工学分野の研究者ネットワーク (1995 年)  
924 ノード (うち 283 ノードが Main Component), 1,573 エッジ

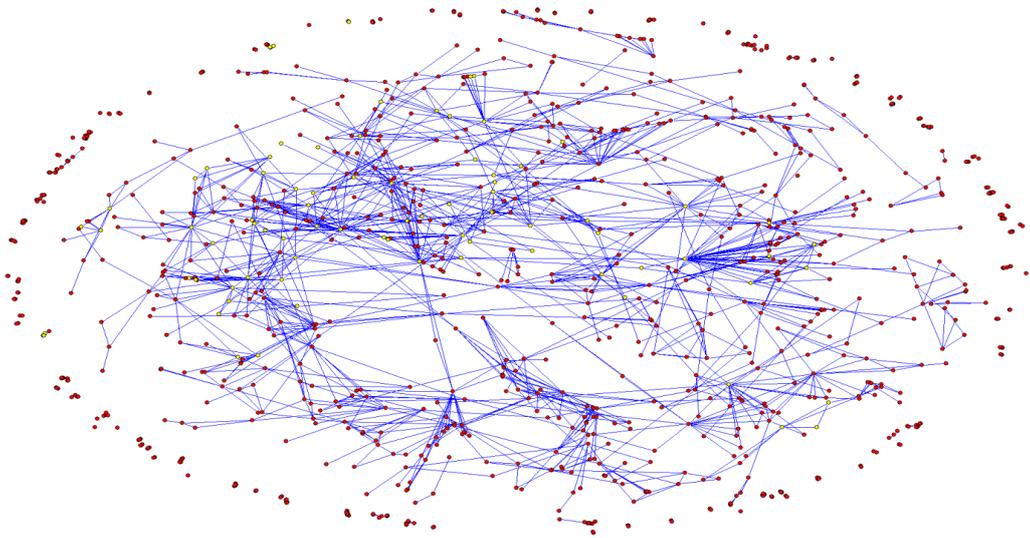


図 2.3: ロボット工学分野の研究者ネットワーク (2000 年)  
1,544 ノード (うち 915 ノードが Main Component), 3,063 エッジ

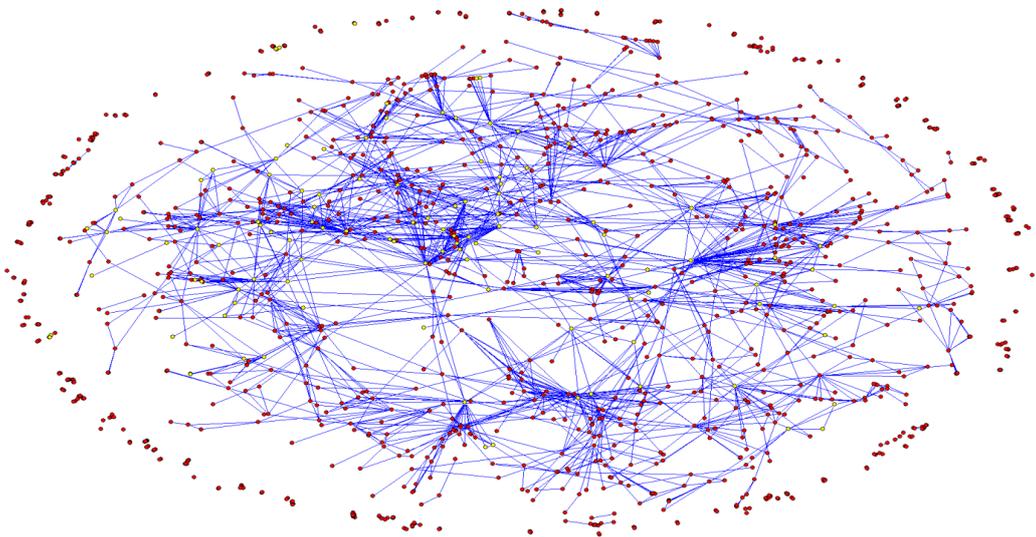


図 2.4: ロボット工学分野の研究者ネットワーク (2005 年)  
2,033 ノード (うち 1,378 ノードが Main Component), 4,371 エッジ

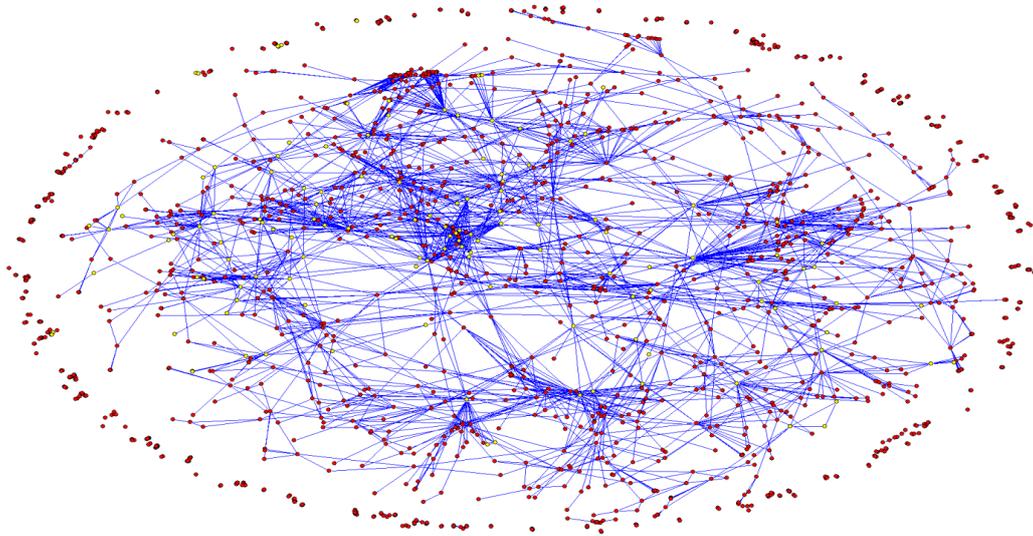


図 2.5: ロボット工学分野の研究者ネットワーク (2010 年)  
2,736 ノード (うち 2,032 ノードが Main Component) , 6,531 エッジ

### 2.3.2 ネットワークを構成する集団

2010 年における日本のロボット研究者ネットワークを構成する 148 個の集団を表 2.2 に示す。ここで言う集団とは、共著関係を辿ることにつながっている連結成分 (Component) のことである。

最大集団であるメインコンポーネント (最大連結成分) には、全著者 2,736 名のうち 2,032 名 (74.3 %) が所属しており、第 2, 3 集団になると構成員は各 18 名 (0.7 %) に過ぎない。図 2.5 において、メインコンポーネントは、中央の大規模なネットワークとして表示され、メインコンポーネント以外の独立した 147 集団は、環状の点として表示されている。

表 2.2: ロボット工学分野の研究者ネットワークを構成する集団

		構成員数	集団数
メインコンポーネント		2,032	1
独立 コン ポー ネン ト	第2～3集団	18	2
	第4集団	15	1
	第5集団	14	1
	第6集団	13	1
	第7集団	11	7
	第14～15集団	10	2
	第16～20集団	9	5
	第21集団	8	1
	第22～24集団	7	3
	第25～35集団	6	11
	第36～53集団	5	18
	第54～80集団	4	27
	第81～117集団	3	37
	第118～148集団	2	31
合 計		2,718	148
孤立ノード		1	18

## 2.4 複雑ネットワークとしての評価

社会的ネットワーク分析において、大規模な複雑ネットワークには、スケールフリー性、モジュール性およびクラスター性という3つの特性が存在すると言われている [46, 47]. 日本のロボット研究者ネットワークがこれらの特性を持つならば、大規模な複雑ネットワークに関する先行研究の成果を活用することができると考えられる. そこで、日本のロボット研究者ネットワークの中のメインコンポーネントの部分について、これらの特性が認められるか検証することとした.

### 2.4.1 スケールフリー性 (次数分布のべき乗則)

スケールフリー性とは、大多数のノードはわずかなノードとしか繋がっていない一方で、少数のノードが沢山のノードと繋がっており、大きな次数を持つという性質である. 言い換えると次のようになる. ノード間にランダムにエッジが存在するランダムグラフの場合は、各ノードの次数の分布はポアソン分布となり、平均値というスケール (尺度) が意味を有する.

しかし、大規模な複雑ネットワークでは、各ノードの次数  $k$  の分布  $p(k)$  は、べき指数  $\gamma$  のマイナスのべき乗に比例しているということである.

$$p(k) \propto k^{-\gamma} \quad (2.1)$$

次数分布がべき乗則に従うネットワークでは、小さな次数を有する沢山のノードと、大きな次数を有する少数のノードが共存することになる. そして、次数の高いノードは、ハブとよばれ、ネットワークの中で重要な役割担うものとされている. このようなスケールフリー性とハブの存在は、1999年にバラバシらによって初めて報告されたものである [46].

ここで、2010年の研究者ネットワークの各ノードの次数と順位をプロットする. 縦軸は順位の対数となっているので、べき乗則に沿っているならば、プロットしたラインは直線を描くことになる [47]. 図 2.6 を見ると、次数の少ない領域で歪みがあるものの、ほぼ直線を描いており、日本におけるロボット工学の研究者ネットワークにおいても、スケールフリー性が存在していることが分かる.

なお、メインコンポーネントに所属する 2,032 名の研究者のうち、10 人以上の共著者を有する研究者は 227 名しかおらず、次数 3 以下の者が 979 名を占めている.

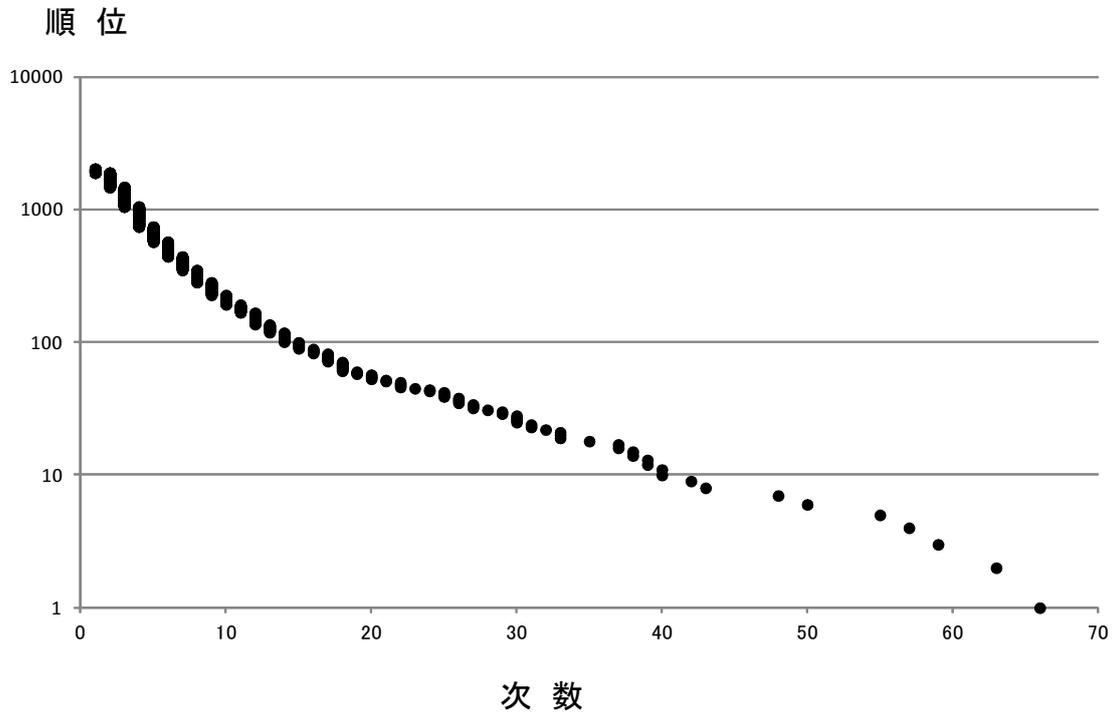


図 2.6: メインコンポーネント (2,032 ノード) における次数分布

#### 2.4.2 スモールワールド性

スモールワールド性とは、世間は意外に狭いという特性である。スモールワールドを示したものとしては、ミルグラム (Milgram) による 1967 年のチェーンメール実験が有名である。その実験は、マサチューセッツ州シャロンの神学部大学院生の妻とボストンの株式仲買人を目標人物として、カンザス州ウィチトーとネブラスカ州オマハの 160 人を無作為に選び、「同封した写真の人物を知っていたら、この手紙を送って下さい。この方を知らない場合は、あなたの住所氏名を書き加えた上で、あなたの親しい友人の中でこの方を知っていそうな人に、この手紙を送って下さい。」という手紙を送ったところ、42 通が届き、届くまでのステップは平均 5.5 であったというものである。その後、1991 年にジョン・グエアが発表した戯曲「あなたまでの 6 人 (Six Degrees of Separation)」がブロードウェイで大成功し、世界は 6 次の隔たり (Six Degrees of Separation) という有名な仮説が広まった。なお、この仮

説の源は、ハンガリーのフリジェシュ・カリンティによる 1929 年の小説『鎖』とされている [46, 53].

さて、ノード数が増加したとき、ネットワークの直径（2 ノード間の最短距離の平均値）がノード数の対数のオーダーで緩やかに増加する範囲内にとどまれば、スモールワールド性があるとされている [47]. そこで、メインコンポーネントの直径を 2000 年と 2005 年と 2010 年について求めると、次のようになる。

- 2000 年 : 915 ノード, 直径 8.16034
- 2005 年 : 1,378 ノード, 直径 6.66874
- 2010 年 : 2,032 ノード, 直径 6.52483

日本におけるロボット工学の研究者ネットワークでは、ネットワークの成長（ノードの増加）とともに、逆にネットワークの直径が縮小していることが分かる。これは、ネットワークが成長するに従って、遠方のノードとショートカットするエッジが増えるためと推測される。少なくとも、ノードの増加がネットワークの急膨張を引き起こさないという意味で、現在の日本におけるロボット工学の研究者ネットワークもスモールワールド性を有していると考えられる。なお、後ほど述べるコアメンバーの 2010 年のネットワークについて直径を求めると、710 ノード, 直径 5.95802 である。コアメンバーのネットワークとの比較においても、スモールワールド性は維持されていると言える。

### 2.4.3 クラスタ性（局所凝集性）

クラスタ性とは、いわばヒトは群れたがるという特性であり、私の友達の友達がやはり私の友達だったという（クラスタを形成する）場合の確率で表される。この確率をクラスタリング係数とよぶが、必ずしもネットワーク密度が高くない大規模な複雑ネットワークにおいても高い数値を示すことでクラスタ性の存在が示される。ここで、ネットワーク密度とは、実際に存在するエッジ数を、存在するノードが完全グラフを構成したとした場合のエッジ数で除したものである。クラスタリング係数とは、各ノードごとにクラスタを形成する確率を算出し、その平均を採ったものである。クラスタリング係数は、完全グラフでは 1 に、ツリー構造では 0 になる。現実には、各種のネットワークにおいては 0.1~0.7 という数値が計測されている [54].

そこで、メインコンポーネントのネットワーク密度とクラスタリング係数を求めると下記のようになる。ここから、日本におけるロボット工学の研究者ネットワークは、ネットワーク密度が疎であるにもかかわらず、極めて強いクラスタ性を有していることが分かる。こ

のことは、逆に仲間内の結束が堅く、新たな共著者を迎え入れることが少ないという問題が存在する可能性を示すことになる。

- ノード数：2,032
- エッジ数：5,423
- ネットワーク密度：0.0026
- クラスタリング係数：0.7856

なお、後ほど述べるコアメンバーのネットワークについても密度とクラスタリング係数を求めると下記のようになり、コアメンバー同士でもクラスター性が十分に存在していることが分かる。

- ノード数：710
- エッジ数：1,839
- ネットワーク密度：0.0073
- クラスタリング係数：0.6240

#### 2.4.4 評価結果

以上の評価から、日本におけるロボット工学の研究者ネットワークは、スケールフリー性、スモールワールド性、クラスター性という複雑ネットワークとしての一般的な特性を有していることが分かった。その結果、インターネットのルータやウェブページのネットワーク、生物の食物連鎖のネットワーク、エイズ感染のネットワーク、新技術の普及ネットワークなどの先行研究の成果から、システムの故障耐性や弱点、流行の拡散、構造的空隙を埋めるブリッジの重要性（弱い絆の強さ）などの知見を得ることができると考えられる。

また、日本におけるロボット工学の研究者ネットワークにおいて特徴的なことは、2000年、2005年、2010年とネットワークが成長するに従って、逆にネットワークの直径が縮小していることである。その原因として、離れた関係にある既存ノードの間をバイパスする機能の存在が推測される。

## 2.5 コアメンバーの抽出

大学の大規模な研究室の場合，論文発表を1回だけ行う学生が数多く存在するため，共著者である指導教官の中心性などが過剰に評価されてしまう．その反対に，一人立ちした研究者同士の繋がりが相対的に埋没してしまう恐れがある．そのため，メインコンポーネント（2,032名）の中から，発表回数が1回しかない著者や，複数回の発表を行っても共著者が1人（次数=1）しかいない従属的な著者を除くことで，表 2.3 に示すコアメンバー（710名）を抽出した．

表 2.3: コアメンバーとメインコンポーネントと全ノードの関係

	ネットワーク全体	メインコンポーネント	コアメンバー
査読付き論文数	1,912	1,576	1,576
著者 (Node)数	2,736	2,032	710
共著関係 (Edge)	6,531	5,423	1,839
論文賞の件数	61	57	57
論文賞の受賞者数	159	144	108

これから行う中心性の評価やクラスター分析においては，図 2.7 に示すコアメンバーによるネットワークを対象とすることとした．なお，黄色のノードは，論文賞を受賞した研究者を示している．

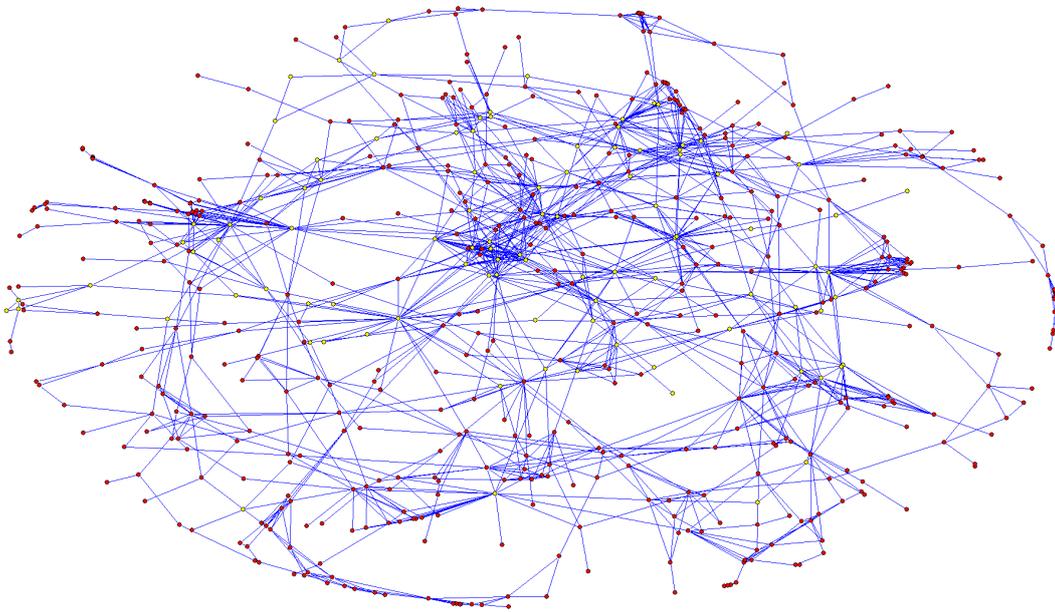


図 2.7: コアメンバーの研究者ネットワーク (2010 年)  
710 ノード, 1,839 エッジ

分析対象をコアメンバーのネットワークに絞り込むと，異分野からゲスト的に共著者となった研究者を除いてしまうという副作用があるが，対象とする論文数がメインコンポーネントのネットワークよりも減少する訳ではないので，分析対象となるロボット工学の範囲は狭くならないと考えられる．

ここで、従属的な著者を除くことで、スケールフリー性が大きく損なわれることが懸念される。しかし、図 2.8 に示すように、コアメンバーだけのネットワークは、スケールフリー性が維持されているばかりではなく、次数の少ない領域での歪みも解消し、次数分布がべき乗則により合致している。また、コアメンバーに所属する 710 名の研究者であっても、10 人以上の共著者を有する研究者は 84 名しかおらず、次数 3 以下の者が 328 名を占めている。

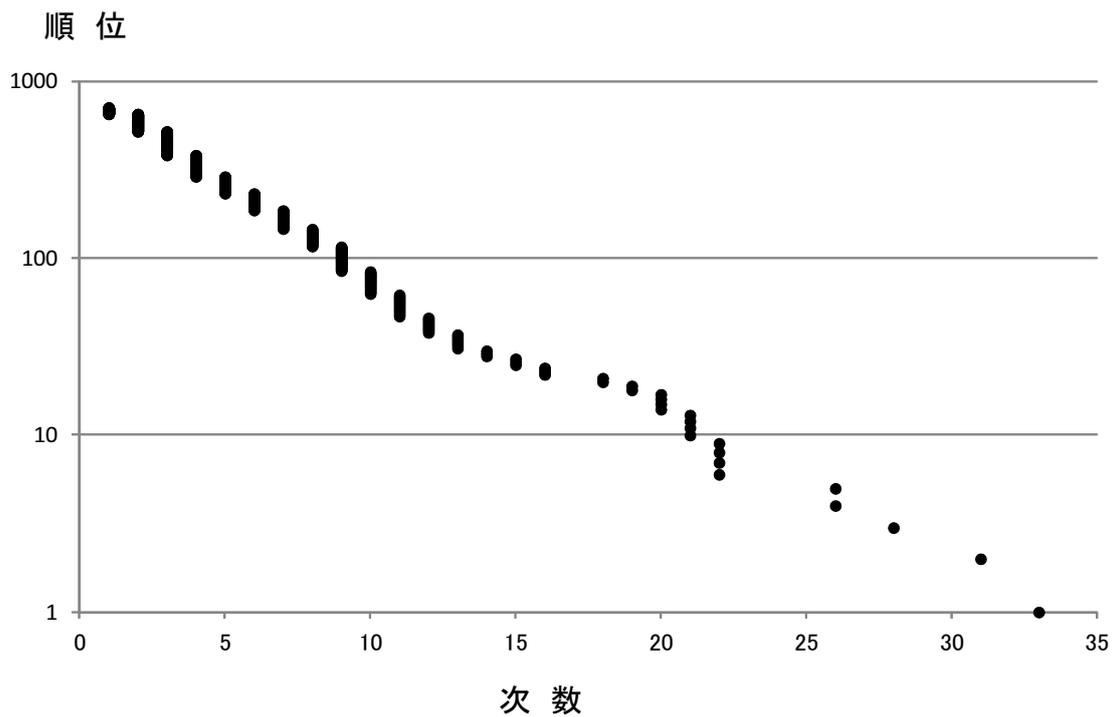


図 2.8: コアメンバー（710 ノード）における次数分布

## 2.6 中心性分析

社会的ネットワーク分析では、ネットワークの中で中心的な役割を果たす者を示すため、様々な中心性が定義されている [26, 27, 47].

以下では、ネットワークのノード数が  $N$  であるとし、各ノードを  $v_i$  ( $i = 1, \dots, N$ ) と書くこととする.

**(1) 次数中心性 (Degree Centrality) :** 当該ノードが有する次数 (エッジ数) を示す指標である. 当該ノードがネットワーク内で占める位置の効果は考慮していないが、ネットワーク内での活動量が分かる.

$$d(v_i) = k_i \quad (2.2)$$

ここで、 $k_i$  はノード  $v_i$  の次数とする.

**(2) 媒介中心性 (Betweenness Centrality) :** 情報伝達のハブの役割を果たすノードを示す指標であり、次数中心性の次に利用されることが多い [47]. ノード間の最短経路上に位置すると、当該ノードの媒介中心性が高くなるので、多くのノードを効率良く (最短で) 結ぶゲートキーパー役を示すことになる.

$$b(v_i) = \sum_{i_s=1; i_s \neq i}^N \sum_{i_t=1; i_t \neq i}^{i_s-1} \frac{g_i^{(i_s i_t)}}{N_{i_s i_t}} \quad (2.3)$$

ここで、 $g_i^{(i_s i_t)}$  は、始点  $v_{i_s}$  から終点  $v_{i_t}$  へ行く最短経路の中で、 $v_i$  を通るものの数とする. また、 $N_{i_s i_t}$  は、始点  $v_{i_s}$  から終点  $v_{i_t}$  へ行く最短経路の総数とする.

**(3) 固有ベクトル中心性 (Eigenvector Centrality) :** 当該ノードと繋がっているノードが他のノードと、どの程度繋がっているかを示す指標である. 多くの重要な (次数の高い) ノードと繋がっていると、当該ノードの固有ベクトルは高い値を示すことになる.

次の漸化式を考える.

$$\mathbf{u}(t+1) = A\mathbf{u}(t) \quad (2.4)$$

ここで  $A$  は隣接行列であり、 $t$  は更新回数とする。  $\mathbf{u}$  を  $v_i$  の中心性を並べた  $N$  次元ベクトルとすると、この漸化式の反復は、あるノードの中心性に、隣接ノードの中心性を次々と加味してゆくと解釈できる。発散を防ぐため、反復ごとに  $\mathbf{u}$  の要素の和が 1 になるように正規化すると、  $\mathbf{u}$  は  $A$  の最大固有ベクトルに収束する。これを固有ベクトル中心性とする。すなわち、  $A$  の最大固有値を  $\lambda_N$  としたとき、固有ベクトル中心性は、以下の  $\mathbf{u}$  で定義される。

$$\lambda_N \mathbf{u} = A\mathbf{u} \quad (2.5)$$

**(4) 近接中心性 (Closeness Centrality) :** 当該ノードから全ノードに到達するために最低必要なステップ数の総和の逆数である。どのノードをリーダーにすれば、情報伝達が効率的かを示す。

$$c(v_i) = \frac{N-1}{\sum_{j=1; j \neq i}^N d(v_i, v_j)} = \frac{1}{L_i} \quad (2.6)$$

ここで、  $d(v_i, v_j)$  は、  $v_i$  から  $v_j$  への距離とする。

また、  $L_i$  は、  $v_i$  から他の  $N-1$  個のノードへの距離の平均とする。

本論文では、コアメンバー 710 名のネットワークについて、上記の 4 種類の中心性の分析を行った。その結果を表 2.4 に示す。なお、ノード名の後ろの括弧内の数字は、当該ノードの次数を示している。

これを見ると、次数中心性の高い研究者が他の中心性においても高い値を示すことが多いものの、ND31 (次数 12) のように次数に比して高い媒介中心性を示す研究者が存在する。ND31 は、著名な大学研究室の出身で、海外の大学に在籍した経験もあり、国内でも流動性の高い職歴を有する研究者である。また、ND42~46 のように大規模なナショナルプロジェクトに参加した研究者の固有ベクトル中心性が次数に比して高くなる傾向が見られた。さらに、ND33 (次数 11)、ND59 (次数 11)、ND60 (次数 10) のように、ロボット工学の中心的な研究機関で長期間にわたって多様な研究テーマに従事した研究者が次数に比して近接中心性で高い順位を占めることも分かった。

表 2.4: ココアメンバー（710 ノード）の中心性

順位	次数中心性 Freeman Degree		媒介中心性 Freeman Betweenness		固有ベクトル中心性 nEigenvector		近接中心性 nCloseness	
	1	ND01(33)	33	ND01(33)	40.030	ND04(26)	44.82	ND03(28)
2	ND02(31)	31	ND02(31)	32.794	ND03(28)	43.87	ND04(26)	25.48
3	ND03(28)	28	ND10(21)	25.716	ND07(22)	42.79	ND01(33)	25.28
4	ND04(26)	26	ND03(28)	24.965	ND06(22)	40.07	ND07(22)	25.13
5	ND05(26)	26	ND17(20)	24.637	ND14(20)	36.87	ND14(20)	25.01
6	ND06(22)	22	ND31(12)	22.024	ND15(20)	33.92	ND11(21)	24.75
7	ND07(22)	22	ND11(21)	21.863	ND29(14)	33.34	ND06(22)	24.57
8	ND08(22)	22	ND12(21)	21.278	ND42(12)	29.40	ND12(21)	24.18
9	ND09(22)	22	ND14(20)	20.829	ND43(12)	29.40	ND33(11)	24.16
10	ND10(21)	21	ND05(26)	20.162	ND44(11)	27.84	ND15(20)	23.88
11	ND11(21)	21	ND21(18)	18.021	ND45(12)	25.35	ND59(11)	23.85
12	ND12(21)	21	ND13(21)	15.302	ND46(10)	24.93	ND18(19)	23.41
13	ND13(21)	21	ND32(10)	13.914	ND01(33)	24.42	ND60(10)	23.41
14	ND14(20)	20	ND26(15)	13.796	ND47(8)	22.42	ND02(31)	23.37
15	ND15(20)	20	ND33(11)	13.766	ND12(21)	21.13	ND48(11)	23.37
16	ND16(20)	20	ND04(26)	13.701	ND48(11)	20.93	ND29(14)	23.35
17	ND17(20)	20	ND34(9)	13.694	ND49(8)	20.19	ND45(12)	23.22
18	ND18(19)	19	ND24(16)	13.645	ND50(10)	18.64	ND10(21)	23.18
19	ND19(19)	19	ND35(5)	13.146	ND51(7)	18.55	ND20(18)	22.99
20	ND20(18)	18	ND36(13)	12.638	ND52(11)	17.15	ND46(10)	22.90
21	ND21(18)	18	ND16(20)	12.484	ND53(10)	16.96	ND41(10)	22.89
22	ND22(16)	16	ND08(22)	12.428	ND54(10)	14.69	ND08(22)	22.88
23	ND23(16)	16	ND25(15)	12.214	ND08(22)	10.82	ND54(10)	22.77
24	ND24(16)	16	ND09(22)	11.877	ND55(4)	10.66	ND42(12)	22.72
25	ND25(15)	15	ND37(4)	11.773	ND56(8)	8.85	ND43(12)	22.72
26	ND26(15)	15	ND38(11)	11.056	ND33(11)	7.41	ND44(11)	22.72
27	ND27(15)	15	ND39(5)	10.773	ND11(21)	7.36	ND61(10)	22.64
28	ND28(14)	14	ND40(5)	10.423	ND18(19)	6.68	ND52(11)	22.55
29	ND29(14)	14	ND18(19)	10.269	ND57(11)	6.40	ND62(6)	22.41
30	ND30(14)	14	ND41(10)	9.537	ND58(8)	6.26	ND63(10)	22.37

は、次数中心性が30位超のノードを示す。

## 2.7 クラスタ分析

エッジの媒介中心性に着目した Girvan-Newman 法により，コアメンバーをクラスターに分割する．時折，クラスターの間を繋ぐノードを反対側のクラスターに属するものと判断するなど，Girvan-Newman 法は完璧ではないが，社会的ネットワーク分析の世界ではクラスター分割の定番となっている．分割数の適合性は，モジュラー数  $Q$  に表れるので，図 2.9 で最大値 (0.820) を示す分割数 27 を採用する．なお，モジュラー数  $Q$  は，通常，0.3~0.7 と言われており，コアメンバーのネットワークは，極めて強いクラスター構造を持っていると言える [55]．

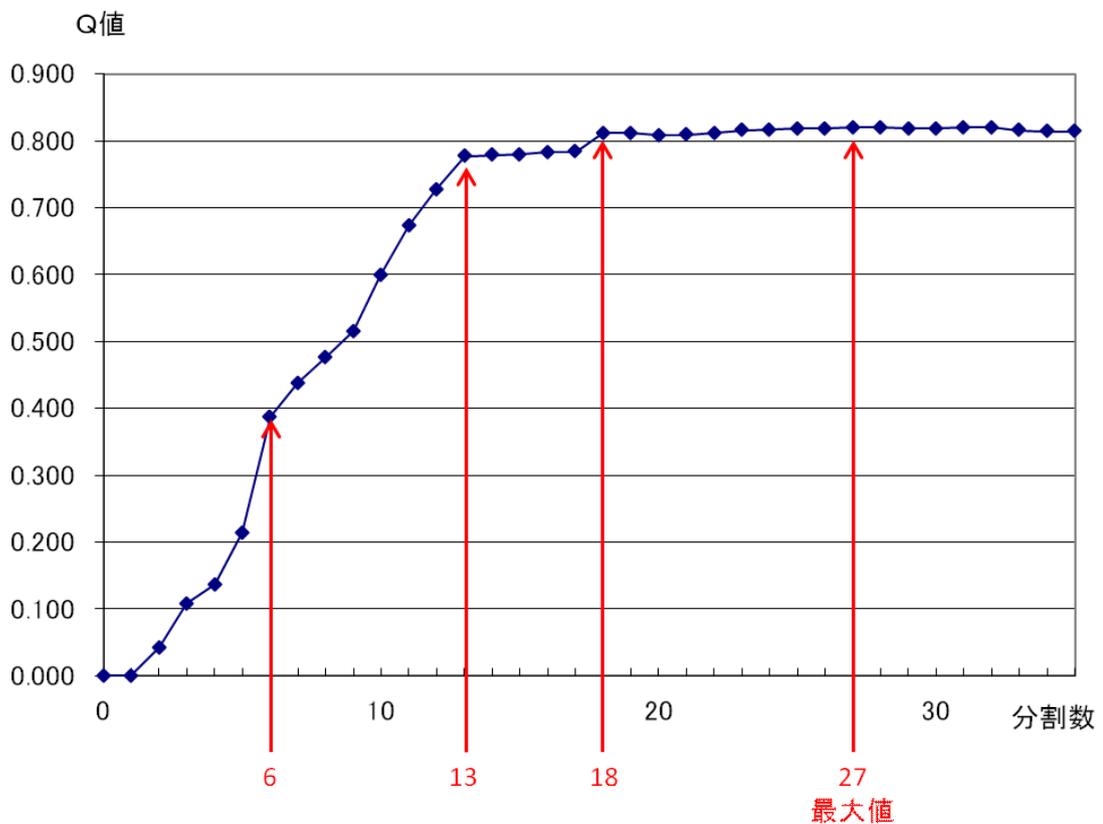


図 2.9: モジュラー数  $Q$  による最適なクラスター分割数

27個のクラスターの中で、CL01が最大クラスター（83名）となっており、CL06（66名）とCL18（64名）が続いている。ここでクラスターという用語が2.4.3節における意味とは異なっていることに注意していただきたい。2.4.3節のような複雑ネットワークの研究においては、クラスターは3つのノード間に3本のエッジがすべて存在する状態を示す。一方、社会的ネットワーク分析では、クラスターは、後ほど述べる図2.11のCL01、CL06、CL17に見るとおり、ブドウの房のようなノードの塊という本来の意味で使用する。このような場合、複雑ネットワークの研究では、コミュニティまたはモジュールとよぶことが多い[47]。本論文では、社会的ネットワーク分析の用語に従い、敢えてクラスターという用語を使用している。

### 2.7.1 クラスターの近縁関係

分割数を増やしていく過程で親クラスターから分岐する時期によって、クラスター間の近縁関係を判断し、その結果を図2.10に系統樹（Dendrogram）として示す。これを見ると、CL2～5、CL26は最大クラスターCL01から遠い所に位置するが、その中には、日本ロボット学会の論文賞を輩出するような著名な大学研究室も含まれている。系統樹の幹との距離と研究業績とは必ずしも一致するものではないことに留意していただきたい。

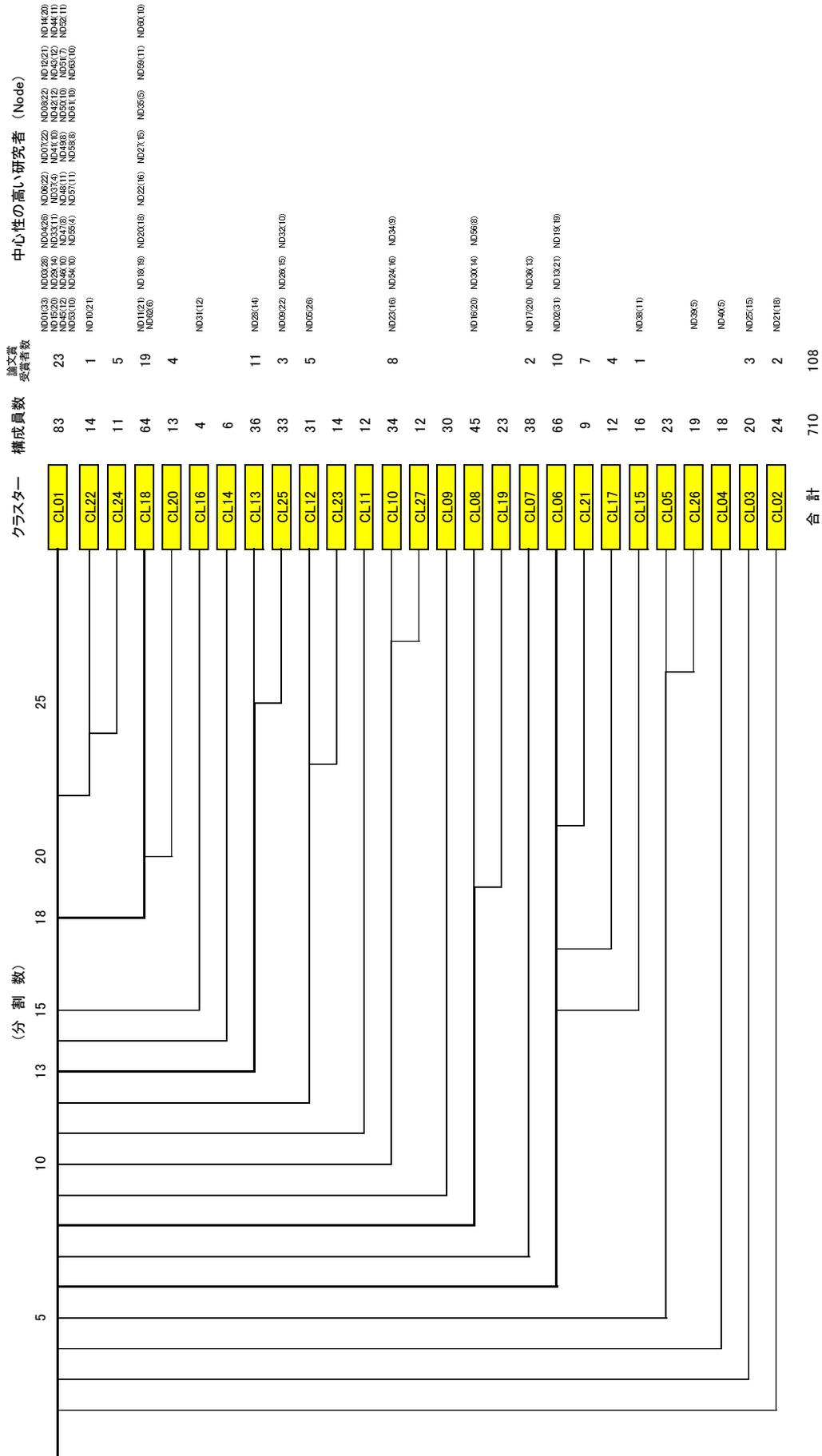


図 2.10: クラスターの系統樹

## 2.7.2 NEDO プロジェクトの効果

研究者ネットワークの成長ということでは、CL17が2009年に、CL04が2010年に、それぞれメインコンポーネントに繋がるという出来事があった。特に、CL17は、特定の研究分野に強い研究者集団であり、1984年に登場して以来、2008年末の時点でコアメンバー以外を含めて総勢29名の集団となっていたが、独立コンポーネントのままであった。そこに、図2.11に示すようなNEDOの助成プロジェクトが実行され、ロボット工学以外の分野の研究者NDaが媒介者となって、CL17は、CL01とCL06に連結することになった。多様な研究グループを融合させるという面で、NEDOは良い仕事をしたと言える。そして、このNDaとNDbとNDcによる共著論文は、日本ロボット学会の論文賞を受賞しており、今後の発展も期待できるものと考えられる。

なお、NDcは、2003年に登場した時からCL01に所属していたが、2009年にNEDOプロジェクトの成果の論文を発表した後になると、分析ツールUCINETは、NDcをCL17に所属すると判定していることが分かった。そのため、改めてNDcを手動でCL01に振り替えることとし、図2.10の構成員数と論文賞受賞者数や表2.5のブリッジの強さや表2.6の構成員数なども補正した。このような事象が起こった原因は、NDcをCL01に含まれるとしてもCL17に含まれるとしても、エッジの媒介中心性が等価であるためである。

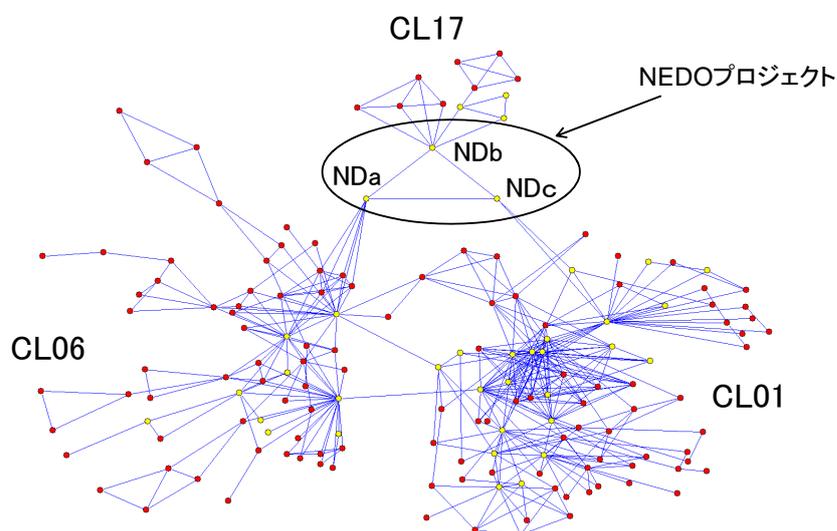


図 2.11: NEDO プロジェクトで連結されたクラスター

### 2.7.3 クラスタ間の構造（ネットワークの粗視化）

コアメンバー710名に絞っても、エッジが重なり合ってしまい、図2.7のようにネットワークの構造は判然としない。そこで、クラスター同士の隣接関係を調べることで、図2.12のようにネットワークの粗視化（Coarse Graining）を行う。

なお、図2.12において、クラスターを表す円の面積は、構成員数を示している。また、ブリッジの線の太さは、ブリッジを構成するエッジの本数を示している。

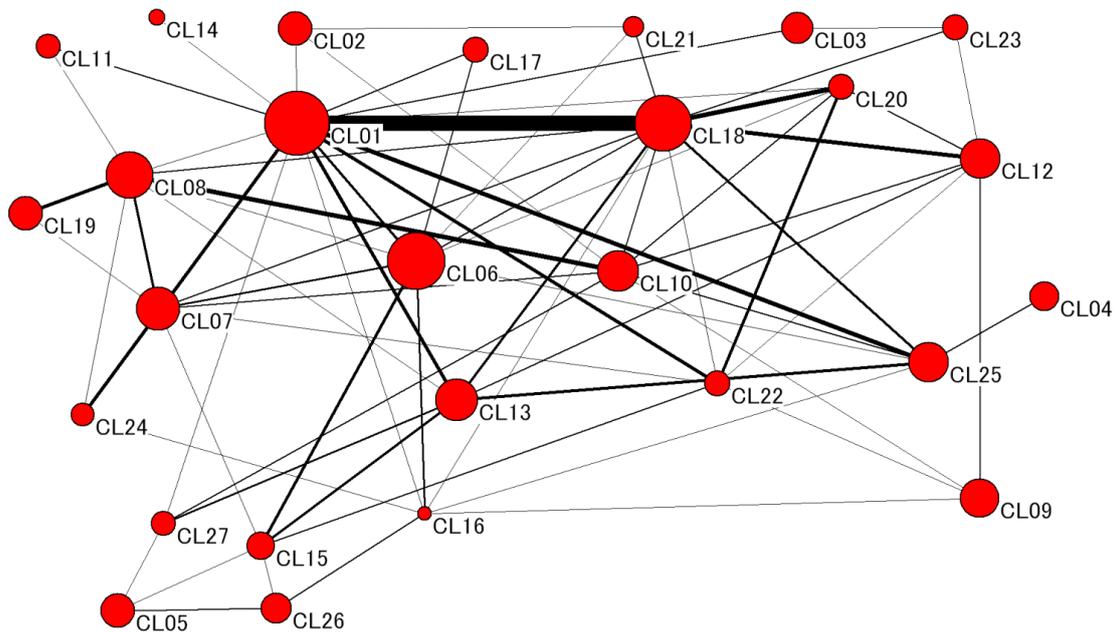


図 2.12: 研究者ネットワークの粗視化

ここで、クラスター間を橋渡ししているエッジすなわちブリッジに着目する。このブリッジは、表 2.5 に示すように全部で 73 本あるが、ノード単位のエッジに分解して見ると、33 本はお互いのクラスターを 1 本だけのエッジで結ぶ弱い（細い）結合である。一方、ノード単位の 5 本以上のエッジで繋がれているブリッジは 13 本に過ぎない。

クラスター内ではエッジが濃密に存在する一方で、クラスター間にはエッジは疎らにしか存在していない状態を社会的ネットワーク分析では、構造的空隙（Structural Hole）とよび、それを埋めるエッジをイノベーションを促進するものとして重視している [11, 12]。実際、表 2.5 のブリッジに関与する研究者を見てみると、優れた業績を生み出した研究者が並んでいる。例えば、ブリッジに関与する研究者は 198 名いるが、そのうち日本ロボット学会の論文賞の受賞者が 62 名（31.3%）いる。一方、ブリッジに関与しない研究者 512 名のうち、受賞者は 46 名（9.0%）しかおらず、その差は歴然としている。

表 2.5: クラスター間のブリッジの強さ

ブリッジの強さ	ブリッジの名称				
26	CL01-CL18				
8	CL01-CL25	CL08-CL10	CL18-CL20		
7	CL12-CL18				
6	CL01-CL13	CL01-CL22	CL01-CL24	CL08-CL19	
5	CL01-CL06	CL06-CL15	CL13-CL25	CL20-CL22	
4	CL07-CL08	CL13-CL15	CL13-CL18	CL18-CL25	
3	CL06-CL07	CL06-CL16	CL13-CL27		
2	CL01-CL03	CL01-CL11	CL04-CL25	CL05-CL26	CL06-CL18
	CL07-CL10	CL07-CL18	CL07-CL22	CL08-CL18	CL09-CL12
	CL10-CL12	CL10-CL18	CL10-CL20	CL10-CL25	CL10-CL27
	CL12-CL13	CL12-CL20	CL15-CL22	CL16-CL26	CL18-CL21
	CL18-CL23				
1	CL01-CL02	CL01-CL08	CL01-CL14	CL01-CL16	CL01-CL17
	CL01-CL20	CL01-CL27	CL02-CL10	CL02-CL21	CL03-CL23
	CL05-CL15	CL05-CL27	CL06-CL08	CL06-CL17	CL06-CL20
	CL06-CL21	CL06-CL25	CL07-CL15	CL07-CL19	CL07-CL22
	CL08-CL11	CL08-CL13	CL08-CL24	CL09-CL10	CL09-CL16
	CL09-CL22	CL12-CL22	CL12-CL23	CL15-CL26	CL16-CL18
	CL16-CL24	CL16-CL25	CL18-CL22		

は、CL16が関係するブリッジを示す。

さらに、粗視化されたネットワークについて、中心性の分析を行った結果を表 2.6 に示す。なお、クラスター名の後ろの括弧内の数字は、当該クラスターのノード数（人数）を示している。

これを見ると、2.6 節で紹介した ND31(12) が率いる CL16 が構成員数 4 名にも関わらず、高い中心性を有していることが分かる。今後、CL16 にプロジェクトやイベントの中核的な役割を担ってもらうことは、ロボット工学の発展に効果的であると考えられる。一方、CL04 のように中心性の低いクラスターを共同研究プロジェクトに巻き込んで、新たな研究資源として活用することも重要であると考えられる。

表 2.6: 粗視化されたネットワーク（27 クラスター）の中心性

順位	次数中心性 Freeman Degree			媒介中心性 Freeman Betweenness			固有ベクトル中心性 nEigenvector			近接中心性 nCloseness		
1	CL01	83 人	15	CL01	83 人	102.31	CL18	64 人	56.03	CL01	83 人	70.27
2	CL18	64 人	13	CL18	64 人	42.02	CL01	83 人	51.60	CL18	64 人	65.00
3	CL06	66 人	10	CL06	66 人	28.96	CL06	66 人	43.11	CL06	66 人	61.90
4	CL08	45 人	9	CL25	33 人	27.11	CL08	45 人	38.53	CL13	36 人	57.78
5	CL10	34 人	9	CL08	45 人	26.51	CL10	34 人	36.05	CL08	45 人	56.52
6	CL13	36 人	7	CL16	4 人	25.06	CL25	33 人	33.96	CL22	14 人	56.52
7	CL22	14 人	7	CL10	34 人	23.87	CL20	13 人	33.12	CL16	4 人	56.52
8	CL16	4 人	7	CL15	16 人	17.14	CL13	36 人	32.95	CL10	34 人	55.32
9	CL25	33 人	7	CL07	38 人	14.14	CL22	14 人	31.90	CL25	33 人	55.32
10	CL07	38 人	7	CL13	36 人	12.73	CL07	38 人	31.43	CL07	38 人	54.17
11	CL12	31 人	7	CL27	12 人	12.12	CL16	4 人	30.08	CL20	13 人	52.00
12	CL20	13 人	6	CL22	14 人	11.72	CL12	31 人	29.32	CL27	12 人	50.00
13	CL15	16 人	6	CL12	31 人	7.37	CL15	16 人	20.42	CL12	31 人	49.06
14	CL27	12 人	4	CL26	19 人	2.99	CL09	30 人	17.00	CL15	16 人	49.06
15	CL09	30 人	4	CL20	13 人	2.83	CL27	12 人	16.90	CL24	11 人	47.27
16	CL24	11 人	3	CL02	24 人	2.81	CL24	11 人	16.05	CL02	24 人	47.27
17	CL02	24 人	3	CL23	14 人	2.53	CL21	9 人	15.07	CL09	30 人	46.43
18	CL21	9 人	3	CL03	20 人	2.36	CL02	24 人	13.72	CL17	12 人	44.83
19	CL23	14 人	3	CL09	30 人	1.93	CL17	12 人	12.65	CL11	12 人	44.83
20	CL26	19 人	3	CL05	23 人	1.70	CL23	14 人	12.54	CL21	9 人	44.07
21	CL05	23 人	3	CL21	9 人	1.23	CL11	12 人	12.04	CL03	20 人	44.07
22	CL17	12 人	2	CL24	11 人	0.56	CL19	23 人	9.34	CL23	14 人	42.62
23	CL11	12 人	2	CL17	12 人	0.00	CL03	20 人	8.56	CL26	19 人	41.94
24	CL03	20 人	2	CL11	12 人	0.00	CL26	19 人	7.54	CL14	6 人	41.94
25	CL19	23 人	2	CL19	23 人	0.00	CL14	6 人	6.89	CL19	23 人	39.39
26	CL14	6 人	1	CL14	6 人	0.00	CL05	23 人	5.99	CL05	23 人	38.81
27	CL04	18 人	1	CL04	18 人	0.00	CL04	18 人	4.53	CL04	18 人	36.11

## 2.8 本章のまとめ

日本ロボット学会誌の創刊（1983年）から2010年末までの間に掲載された査読付き論文は、1,912件あった。そこから名寄せをすることで、2,736名の著者と6,531本の共著関係を抽出した。

代表的な社会的ネットワーク分析ソフトウェアであるUCINET（Ver.6.207）を用いて、共著関係からネットワークを作成すると、2,032名（74.3%）が最大連結成分となっており、これを日本におけるロボット工学の研究者ネットワークとした。

日本におけるロボット工学の研究者ネットワークは、スケールフリー性、スモールワールド性、クラスター性という複雑ネットワークとしての一般的な特徴を有していることが分かった。

これにより、複雑ネットワークに関する先行研究の成果を適用することが可能であると考えられる。

例えば、インターネットのルータやウェブページのネットワーク、生物の食物連鎖のネットワーク、エイズ感染のネットワークに関する研究成果である [46, 56, 57, 58, 59, 60, 61]。

そこから言えることは、個々のノードが故障してもシステムの健全性は保たれるが、ハブ（中心性の高いノード）を集中攻撃されるとシステムが破壊されることや構造的空隙を埋めるブリッジの重要性である。

また、抽出されたコアメンバー710名に関する中心性の評価から、日本のロボット工学の研究者ネットワークでハブとなっている研究者を把握することができた。

また、次数（共著関係の数）以上に、研究者ネットワークの中で重要な位置を占める研究者が存在するという事実を浮かび上がらせることもできた。

さらに、クラスター分析を行うことで、研究者グループの間の近縁関係を明らかにすることができた。また、独立集団を研究者ネットワークに取り込んだり、遠い関係のクラスターを繋いだりしているNEDOプロジェクトの存在を明らかにするとともに、そこから学術論文が優れた評価を受けていることを確認できた。

そして、ノードに代わってクラスター単位で研究者ネットワークを粗視化し、全体構造を簡潔に示すことができた。特に、クラスター間を繋ぐブリッジの役を担っている研究者198名のうち62名（31.3%）が日本ロボット学会の論文賞を受賞しており、ブリッジとは無関係の研究者512名の場合は46名（9.0%）しか論文賞を受賞していないということを明らかにし、構造的空隙を埋めるネットワーク活動とイノベーションの関係の深さを示すことができた。また、クラスター同士の中心性を分析することで、構成員数以上に研究者ネットワークの中で重要な役割を担う可能性を有するクラスターの存在を浮かび上がらせることができた。

これらの成果は、ロボット工学の研究開発戦略の検討や研究プロジェクトの立案・推進に資するものと考えられる。

また、ロボット工学関連のイベントや標準化活動を企画・実行する場合にも有益な情報となるものと考えられる。

さらには、研究者ネットワークの中で高い中心性を有する研究を守ることで、日本のロボット技術の流出防止に役立てることも可能であると考えられる。

また、ロボット工学の研究者、特に、若手研究者には、多様な研究者と共同研究を行うことで、多様な研究ノウハウを蓄積することが望まれる。

これにより、研究者ネットワーク内での役割を高めるとともに、自らの研究成果を伝播させることができるからである。

理想的には、クラスター間のブリッジとなり、構造的空隙に位置することでイノベーションの起点になることが期待される。

## 第3章 日本出身研究者が採るべき国際的な連携戦略

前章の結果を踏まえて、研究者ネットワークの分析の応用例として、ロボット工学分野の日本出身研究者が国際的な研究者ネットワークでどのような連携戦略を取ったら効果的なのか検討した。

### 3.1 対象データ

本節では、ロボット工学のみを専門分野とする学術雑誌の中で、トムソンロイター社が発表する EigenFactor が 2010 年時点で最も高い IEEE/T-RO (Transactions on Robotics) を分析対象に選び、掲載された査読付き論文から著者および共著関係を抽出した。なお、IEEE/T-RO は、IEEE/T-RA (Transactions on Robotics and Automation) が 2004 年 6 月に終了し、2004 年下期から IEEE/T-ASE (Transactions on Automation Science and Engineering) と分離する形で創刊されたため、創刊された 2004 年 8 月～2010 年末までを対象期間とした。日本ロボット学会誌については、1983 年 10 月に創刊されているが、IEEE/T-RO に期間を合わせて、2004 年下期～2010 年末までに掲載された査読付き論文から著者と共著関係を抽出した。それらの結果を表 3.1 に示す。

ここで、延べ著者数とは、名寄せ前の著者数である。また、名寄せ後の著者数とは、著者を名寄せして、複数回執筆した者を 1 名とカウントし直した後の著者数、すなわち、ノード数を示す。さらに、延べ共著関係数とは、1 件の論文の中の共著関係を共著者 2 名の組み合わせに分解した名寄せ前の共著関係数である。また、名寄せ後の共著関係数とは、共著者 2 名の組み合わせを名寄せして、複数回実行された組み合わせを 1 本の共著関係とカウントし直した後の共著関係数、すなわち、エッジ数を示す。

### 3.2 日本出身研究者の定義

本論文では、日本国籍の有無ではなく、日本で最初の大学教育を受けた論文著者を日本出身研究者とした。そして、現在の住所が海外であるか国内であるかは問わないこととした。

表 3.1: IEEE/T-RO と日本ロボット学会誌の掲載論文の比較

	Transactions on Robotics (2004下期～2010末)	日本ロボット学会誌(RSJ) (2004下期～2010末)
査読付き論文数	778	543
延べ著者(Author)数	2,318	2,049
1本当たり平均著者数	2.98	3.77
名寄せ後の著者(Node)数	1,707	1,163
複数回掲載された著者数	367	321
単著のみの著者数	26	13
単著のみの著者の論文数	29	18
延べ共著関係数	2,875	3,714
名寄せ後の共著関係(Edge)数	2,618	2,811
1人当たり平均共著関係数	1.53	2.42
複数回実行された共著関係数	204	491

### 3.3 研究者ネットワークの国際比較

図 3.1 は, 2004 年下期～2010 年末までの間に, IEEE/T-RO に掲載された論文の共著関係のネットワークである. 環状の中にある 9 個の集団 (連結成分: Component) は, 表 3.2 の上位 9 位までの集団を示している. 残りの 338 個の集団は, 環状に位置している.

図 3.2 は, 2004 年下期～2010 年末までの間に, 日本ロボット学会誌に掲載された論文の共著関係のネットワークである. 環状の中央に最大集団 (Main Component) があり, 残りの 123 個の集団が環状に位置している.

IEEE/T-RO と日本ロボット学会誌の研究者ネットワークを構成する集団を表 3.2 に示す.

IEEE/T-RO の研究者ネットワークを構成する集団を見ると, 最大集団 (Main Component) には 16 ノードの日本出身研究者が含まれているものの, 第 2 集団や第 3 集団には日本出身研究者がまったく含まれていない. 構成員 12 ノード以上の上位 21 集団までを見ても, 日本出身研究者が含まれる集団は, 最大集団, 第 4 集団, 第 5 集団, 第 6 集団および第 21 集団の 5 集団にしか過ぎず, 日本出身研究者が広範囲に分布している状況ではない.

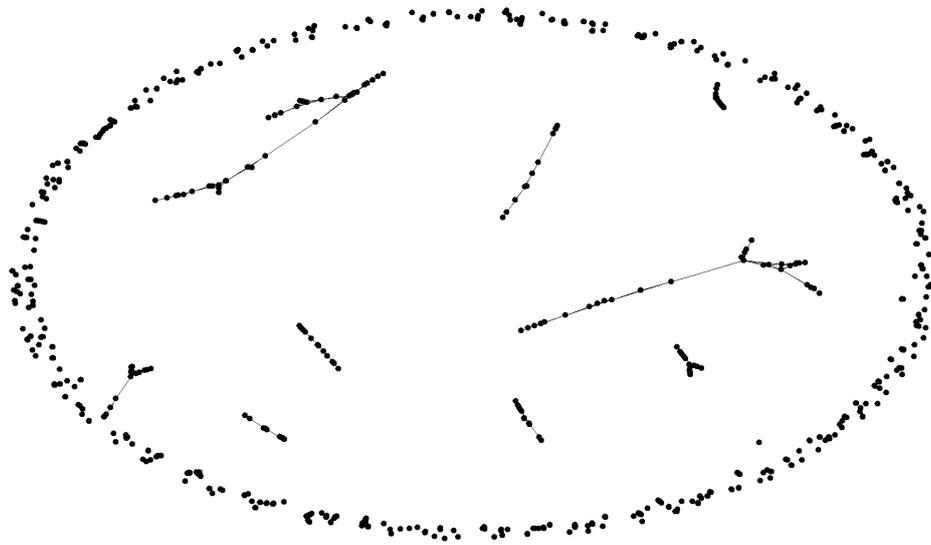


図 3.1: IEEE/T-RO の研究者ネットワーク (2004 年下半期～2010 年末)  
 1,707 ノードうち 68 ノードがメインコンポーネントを構成, 2,618 エッジ

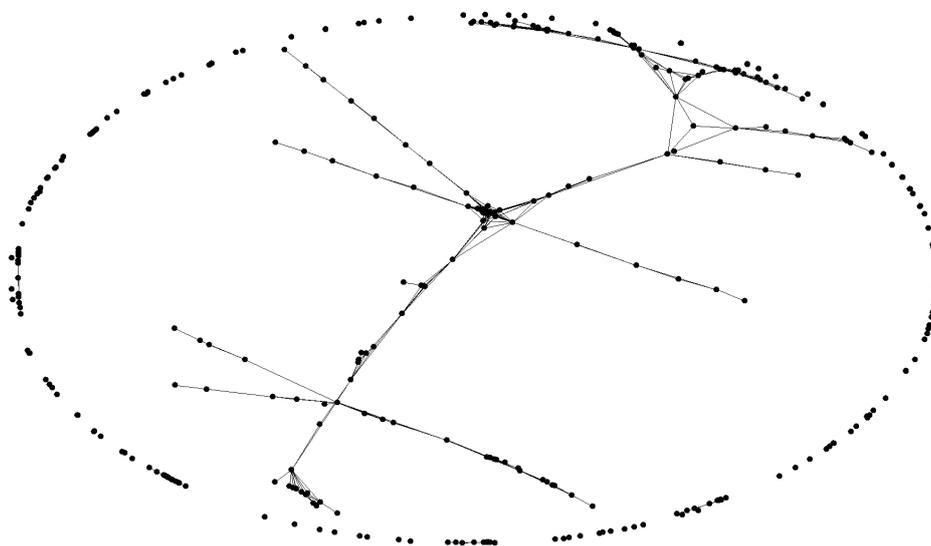


図 3.2: 日本ロボット学会誌の研究者ネットワーク (2004 年下半期～2010 年末)  
 1,163 ノードうち 235 ノードがメインコンポーネントを構成, 2,811 エッジ

表 3.2: 研究者ネットワークを構成する集団の比較

順位	IEEE/TRO		日本ロボット学会誌
	構成員数	うち 日本出身者	構成員数
Main Component	68	15	235
第2集団	51	0	60
第3集団	35	0	56
第4集団	28	11	40
第5集団	23	18	35
第6集団	20	1	34
第7集団	20	0	29
第8集団	19	0	26
第9集団	17	0	26
第10集団	16	0	23
第11集団	16	0	22
第12集団	15	0	22
第13集団	14	0	20
第14集団	14	0	17
第15集団	14	0	15
第16集団	13	0	13
第17集団	13	0	13
第18集団	12	0	13
第19集団	12	0	12
第20集団	12	0	12
第21集団	12	6	11
:	:	:	:
:	:	:	:
第124集団	:	:	2
:	:	:	
:	:	:	
第347集団	2	2	
孤立ノード	1×26	2	1×13
合計 (Total)	1,707	174	1,163

### 3.4 研究者ネットワークの連携速度

ここで、ネットワークの連携速度とは、ネットワーク内の集団（連結成分: Component）の成長速度を意図している。ネットワークの連携速度が大きければ、最大集団（Main Component）に所属するノード数が増加するとともに、集団同士が合併することでネットワークを構成する集団数の増加が抑制される。本章では、最大集団に所属するノードの年間増加数をネットワークの連携速度の代表値として採用し、IEEE/T-RO の研究者ネットワークと日本ロボット学会誌の研究者ネットワークを比較することとした。なお、IEEE/T-RO の最大集団が確立したのは2008 年末であり、日本ロボット学会誌の最大集団が確立したのは2005 年末であった。そのため、2009 年と2010 年における最大集団に所属するノード数の年間増加数を表 3.3 に示す。

表 3.3: 研究者ネットワークの連携速度の比較

		2009年	2010年
IEEE/T-RO	メインコンポーネント内のノードの年間増加数	14	6
	集団(コンポーネント)の年間増加数	44	30
	ネットワーク全体のノードの年間増加数	(287)	(197)
日本 ロボ ット 学会 誌	メインコンポーネント内のノードの年間増加数	55	111
	集団(コンポーネント)の年間増加数	11	10
	ネットワーク全体のノードの年間増加数	(177)	(177)

一般に海外の方が転職等の人的な移動が活発と言われており、IEEE/T-ROの方がネットワークの連携速度が大きいことが予想されていた。しかし、2009年と2010年の最大集団に属するノードの年間増加数を見ると、IEEE/T-ROの方は、14ノード/年、6ノード/年であるのに対して、日本ロボット学会誌の方が55ノード/年、111ノード/年と圧倒的に大きく、ネットワークの連携速度が大きいことが分かった。

実際に、図 3.1 と図 3.2 を見ると、図 3.2 の日本ロボット学会誌の方が最大集団が大きく、図 3.1 の IEEE/T-RO の方が多数の小集団に分かれていることが分かる。すなわち、IEEE/T-RO の方が構造的空隙がより多く存在し、その解消に時間もかかるということである。

その原因としては、地理的な距離が大きいことや論文 1 件当たりの共著者数が表 3.1 に示すように日本ロボット学会誌 3.77 人に対して IEEE/T-RO 2.98 人と少ないことが考えられる。

日本ロボット学会誌が創刊された 1983 年まで遡ったデータに基づく研究者ネットワーク (図 2.5) では、構成員 2,736 ノードのうち 74 % に当たる 2,032 ノードの研究者が最大集団に含まれ、ひとつの集団として繋がっている。このレベルまで IEEE/T-RO の研究者ネットワークが繋がるには、相当程度長い時間がかかるものと予想される。

### 3.5 集団内のネットワーク構造

IEEE/T-RO の研究者ネットワークを構成する集団のうち、上位 3 集団について、集団内部のネットワーク構造を分析した。最大集団のネットワーク図において、白丸のノードは、日本出身研究者を示している。なお、各ノードの所属機関の表示は、原則として最新時点のものとしたが、一部のノード同士において、前職や客員研究員の関係が強いと推測される場合には、どちらかの所属機関に統合して図の簡素化を行っている。

まず、図 3.3 の 68 ノードで構成される最大集団を見ると、下半分を占める産業技術総合研究所と仏 CNRS（国立科学研究センター）の AIST-CNRS ロボット工学連携研究体を中核とする 33 ノードの研究者グループが主体となっていることが分かる。そして、フランスの CNRS にローマ大学スピノザ校が架橋することによって、シェナ大学、ポローニア大学とイタリアの大学が連なってネットワークが伸びている。また、シェナ大学にはペンシルバニア大学の研究者グループおよびスタンフォード大学と民間企業の研究者グループが結びついている。さらに、東北大学と東京大学の研究者グループや香港大学などもシェナ大学に繋がっている。ここで登場する研究機関の中には、ペンシルバニア大学の GRASP（General Robotics, Automation, Sensing and Perception）や、スタンフォード大学の Biorobotics Laboratory や、ローマ大学スピノザ校の Robotics Laboratory のようにロボット工学の専門組織が設立されているところがある。

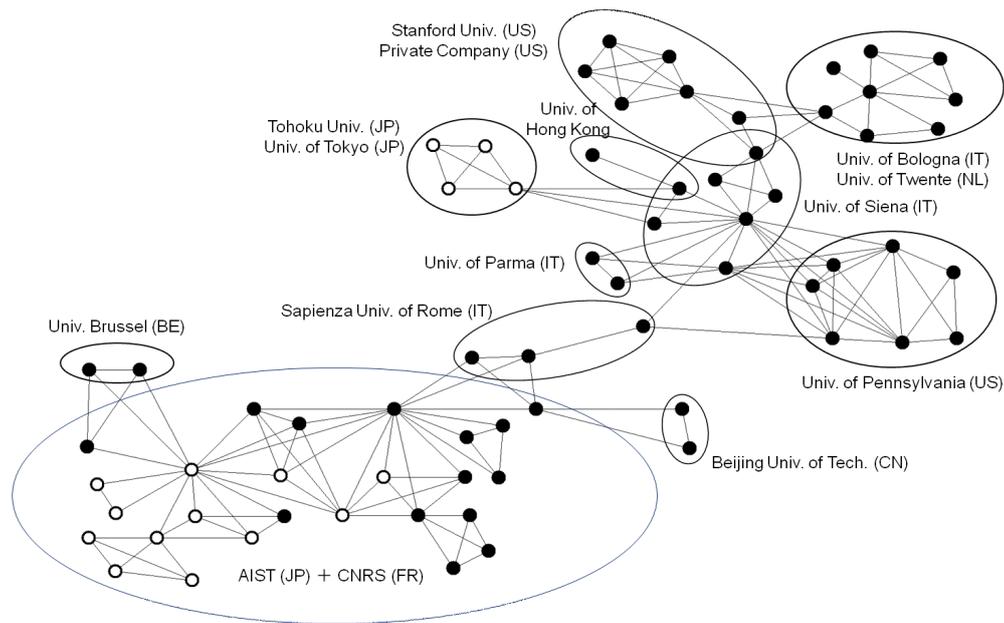


図 3.3: IEEE/T-RO の最大集団 CP01（68 名）

次に、図 3.4 の 51 ノードで構成される第 2 集団を見てみると、フランスの INRIA（国立情報学自動制御研究所）と仏ブレーズ・パスカル大学を中核とする 22 ノードの研究者グループに、イギリス、ドイツ、スペイン、ポルトガル、オーストラリアの研究者が繋がっている。また、フランスの CNRS を媒介として、スタンフォード大学のフランス出身研究者と繋がり、そこから、アメリカ、韓国、ポルトガル、ドイツ、オーストリアの研究者が連なっている。ここで登場する研究機関の中には、ドイツの DLR（航空宇宙センター）の Institute of Robotics and Mechatronics やポルトガルのコインブラ大学の ISR（Institute of Systems and Robotics）のようにロボット工学の専門組織が設立されているところがある。

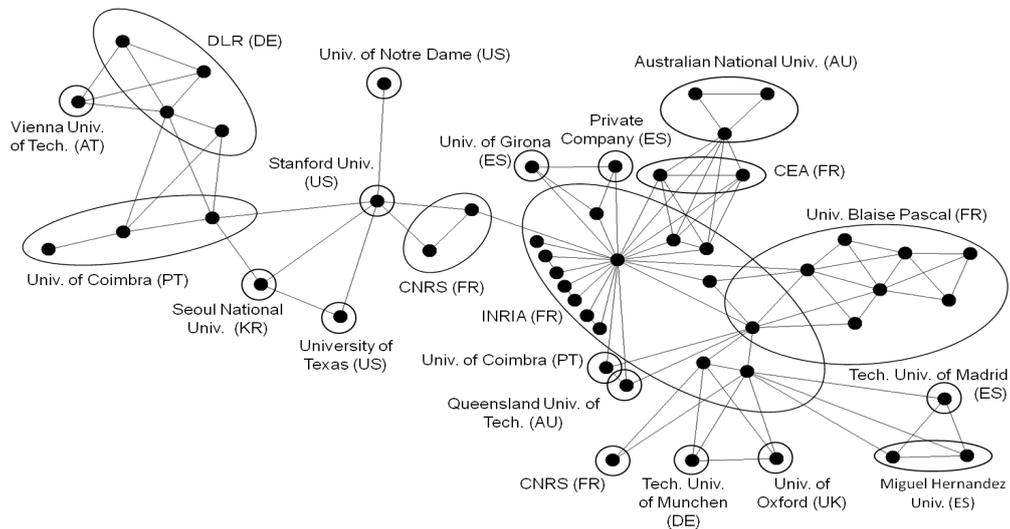


図 3.4: IEEE/T-RO の第 2 集団 CP02 (51 名)

さらに、図 3.5 の 35 ノードで構成される第 3 集団をしてみると、イタリアの聖アンナ大学院大学の CRIM (Center for Research in Microengineering) 研究所を中核とする 12 ノードの研究者グループに、ギリシアの FORTH (ギリシア研究技術財団) の研究者が繋がっている。また、アメリカのバンダービルド大学を媒介として、アメリカ、カナダの多くの大学の研究者が繋がっている。この第 3 集団に所属する研究者の研究テーマを見ると、医工連携に関するもの多いのが特徴となっている。

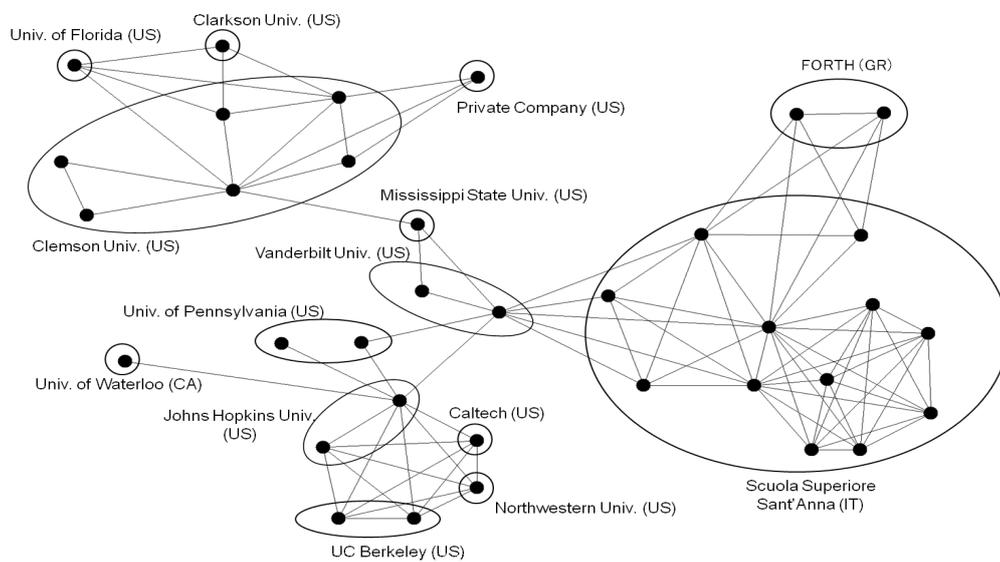


図 3.5: IEEE/T-RO の第 3 集団 CP03 (35 名)

### 3.6 連携戦略(1)：構造的空隙を埋めるネットワーク活動

競合関係にあるグループとの間で競争原理が働くことは、イノベーションの促進力のひとつであるが、社会的ネットワーク分析では、そのグループ間に存在する構造的空隙を埋めるネットワーク活動を異なる研究ノウハウの融合と研究成果の伝搬などによりイノベーションを一層促進するものとしてさらに重視している。

IEEE/T-RO における研究者ネットワークには、日本ロボット学会誌の研究者ネットワークに比して、構造的空隙がより多く存在し、その解消に時間もかかるという特徴がある。そのため、日本出身研究者には、意図的に自らが所属する集団以外の集団と連携し、IEEE/T-RO の研究者ネットワークの構造的空隙を埋めることが望まれる。これにより、日本出身研究者は、多様な研究ノウハウを取得することができるとともに、自らの研究成果や研究思想を広く伝播することが期待できる。さらには、ロボット工学のイノベーションの起点となって、社会経済の発展に寄与することが期待できる。

日本ロボット学会誌の研究者ネットワークは、1983年まで遡れば、図 2.5 に示したように、かなり多く（74%）の研究者がひとつに繋がっているため、日本出身研究者が含まれている集団とは、日本ロボット学会誌の研究者ネットワークのレイヤーを通じて、ある程度の繋がりがあると考えられる。そのため、連携相手の集団を選択する際、表 3.2 の第 2 集団や第 3 集団のように日本出身研究者が含まれていない集団を選ぶことが望ましい。

#### 3.6.1 国際的な研究者ネットワークにおける連携の作り方

IEEE/T-RO の研究者ネットワークにおいては、客員研究員や留学生の交換などの人的交流や共同研究プロジェクトの実施や国際共同研究組織の設立が連携の切っ掛けとなっていることが著者略歴から読み取れる。そのため、日本出身研究者においても、客員研究員や留学生の交換などの人的交流を積極的に行うとともに、共同研究プロジェクトおよび国際共同研究組織に参加することやそれらの新規提案を行うことが望まれる。

なお、これらの連携が過剰になされた結果、あるノードが周囲との間であまりに密な連携を有すると、周囲のノードと同じような情報しか入手できず、その役割を他者に代替されたり、行動の自由を阻害される危険性がある。しかし、IEEE/T-RO の研究者ネットワークの連携速度が低いことや古い連携が風化していくことを考えると、大多数のノードでは、その心配は少ないものと考えられる。

### 3.6.2 誰をターゲットにすべきか

連携（共著）相手を選ぶときには、相手方のネットワークの中で中心的な役割を担うノードを選ぶことが望ましい。一方、社会的ネットワーク分析では、このようなノードを示すために、2.6節に示すような様々な中心性が定義されている。

日本出身研究者が連携相手の集団の中で直接の連携相手を選ぶ場合、一般には、次数中心性の高いノードを選ぶことが望ましい。しかし、このようなノードは、ハブと呼ばれるように集団内での地位も高く、諸事多忙であり、日本出身研究者側の意向に沿えないことも多い。そのような場合には、次数中心性に代わって、媒介中心性の高いノードと連携することが有益である [26, 27]。

### 3.6.3 第2集団の場合

日本出身研究者が含まれていない集団で最も大きな第2集団のネットワークで見ると、図3.6と表3.4に示すように、ノードAが次数21という圧倒的な次数中心性を示し、媒介中心性もトップである。しかし、次数3に過ぎないノードBが媒介中心性では第2位となり、ネットワーク左方への要になっていることが分かる。また、ネットワーク右方に着目するならば、媒介中心性第4位のノードDが候補となる。第2集団との繋がりを持つとする場合、ノードAが最良ではあるが、ノードB～Eも有力な候補となる。

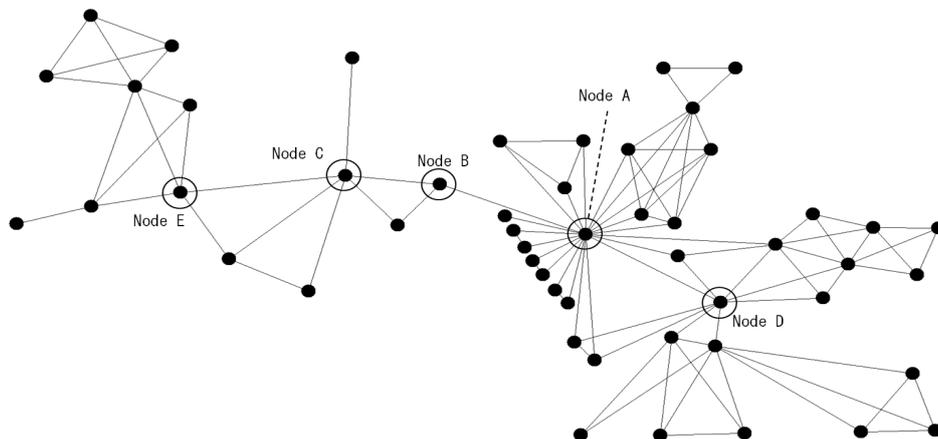


図 3.6: 第2集団（CP02）における媒介中心性の高いノード

表 3.4: 第 2 集団 (CP02) における次数中心性と媒介中心性

	次数中心性	媒介中心性
ノードA	21	76.7
ノードB	3	39.3
ノードC	6	36.2
ノードD	9	33.0
ノードE	5	24.6

### 3.6.4 第 3 集団の場合

次に、第 3 集団のネットワークで見ると、図 3.7 と表 3.5 に示すように次数中心性がトップであるノード J の媒介中心性が第 5 位と低くなっている。その原因は、ノード J が隣接するノード K と媒介性を分かち合っていることによる。第 3 集団全体との繋がりを持つとする場合、ノード F が最良の選択になる。また、ネットワーク左上方に着目するならば、媒介中心性第 3 位のノード H が候補となる。同じくネットワーク左下方の場合には、媒介中心性第 4 位のノード I が候補となる。

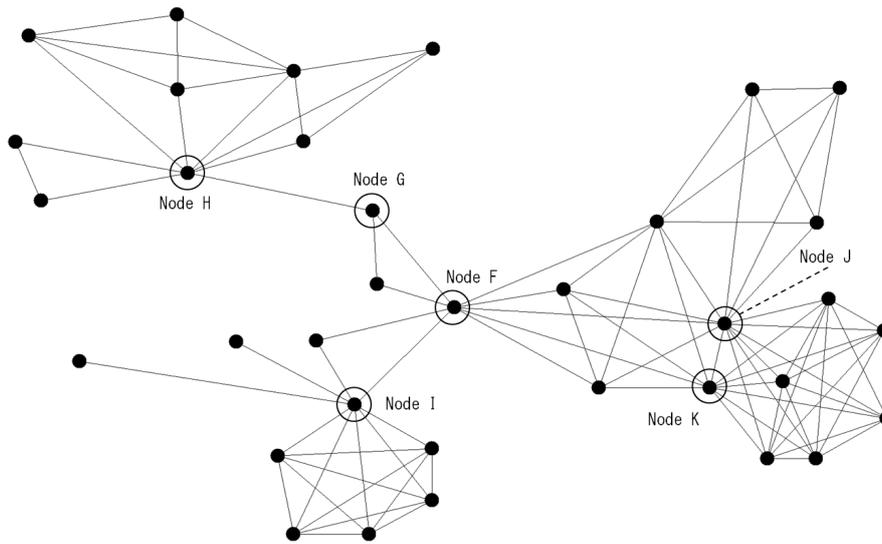


図 3.7: 第3 集団 (CP03) における媒介中心性の高いノード

表 3.5: 第3 集団 (CP03) における次数中心性と媒介中心性

	次数中心性	媒介中心性
ノードF	9	67.6
ノードG	3	40.1
ノードH	8	39.6
ノードI	9	35.7
ノードJ	14	22.5
ノードK	11	12.8

### 3.7 連携戦略(2)：集団内での中心性向上

社会的ネットワークの中での役割を強化するためには、中心性を高めることが有効とされている [26, 27]. そのためには、まず、新たな共著者との論文を数多く執筆し、次数中心性を高めて行くという地道な方策が必要とされる. しかし、短期間に多様なエッジ（共著関係）を得ることは難しいものと考えられるので、効率的に媒介中心性を高められるようなノードと連携（共著）することが有効な方策であると考えられる.

そこで、図 3.8 に示す最大集団（Main Component）を例にして、日本出身研究者が媒介中心性を高めることのできる相手側ノードの例を示すこととする. なお、白丸のノードは、日本出身研究者を示している.

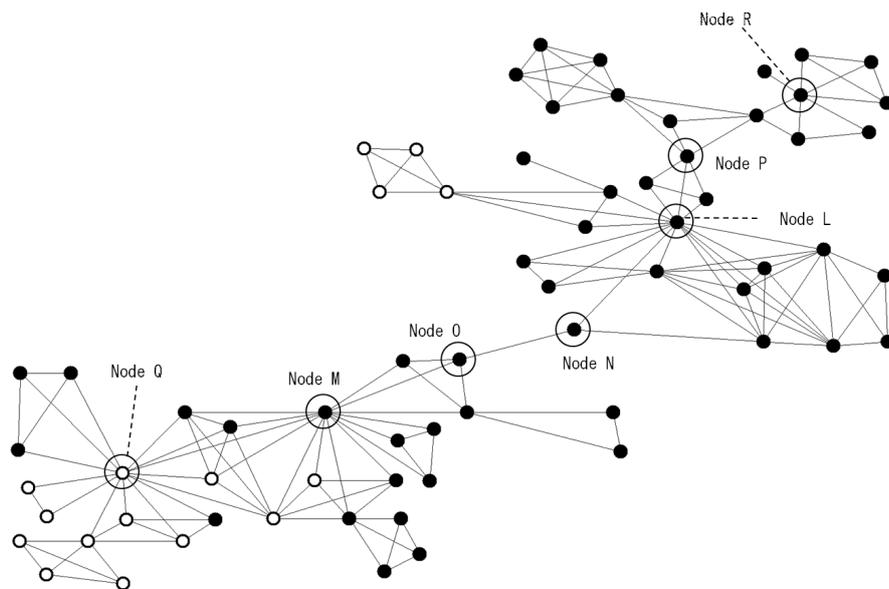


図 3.8: 最大集団（CP01）のネットワーク（変更前）

まず、日本出身研究者の代表としてノード Q を選ぶ。現時点では、ノード Q は、次数中心性が第 2 位であるものの、媒介中心性は第 6 位となっている。そこで、ノード Q から見て遠いところに位置するノード R を連携相手に選び、ノード Q とノード R の間にエッジを 1 本追加する。そうしてできた新たな研究者ネットワーク図を図 3.9 に示す。

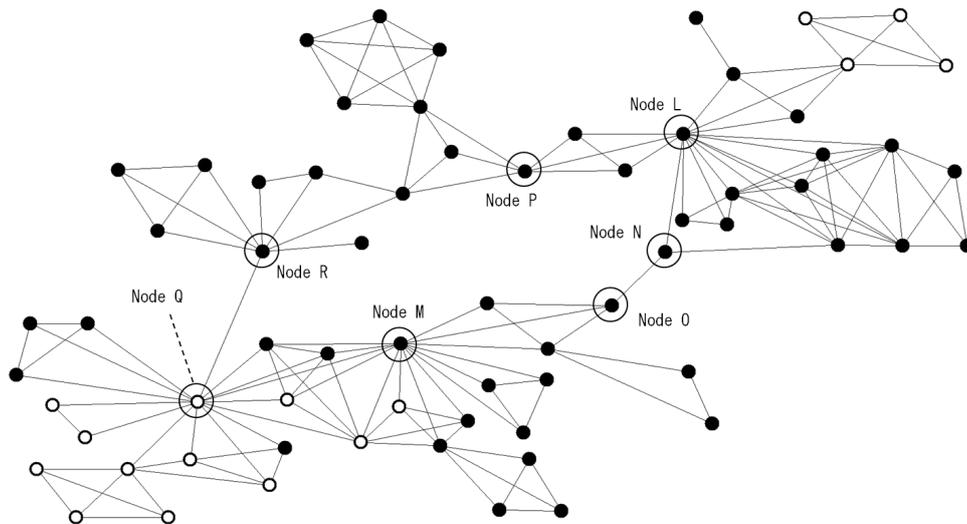


図 3.9: 最大集団 (CP01) のネットワーク (変更後)

その結果，表 3.6 に示すように，ノード Q の媒介中心性は第 1 位になるとともに，ノード R の媒介中心性も第 8 位から第 4 位に上昇する．したがって，ノード Q とノード R の連携は，双方にとって，メインコンポーネント内でおのこの役割を強化する上で，有効であると考えられる．このように，集団内で自らから見て遠いところに位置するノードと意図的に連携することで，媒介中心性を大きく向上させることが可能である．

表 3.6: 最大集団内における中心性の変化

	次数中心性	媒介中心性
ノード L	15	60.6 → 39.3
ノード M	14	53.5 → 36.8
ノード N	3	50.7 → 24.5
ノード O	4	50.5 → 24.8
ノード P	6	33.5 → 19.7
ノード Q	14 → 15	31.8 → 43.7
ノード R	7 → 8	12.9 → 31.1

実際に，ノード Q の研究者にインタビューをしたところ，既に，ノード R の研究者とは面識があるとのことであり，共同研究をすとしたら，可変剛性アクチュエータに関するテーマが考えられるとのことであった．しかし，現状では，ノード R との共同研究に積極的に取り組む環境ではなく，その意向もないとのことであった．すなわち，何かしらの切っ掛け（政策的支援）がなければ，ノード Q とノード R の連携は生じない状況にある．

### 3.8 研究支援機関の役割

NEDO や JST や JSPS などの研究支援機関には、客員研究員や留学生の交換などの人的交流や、共同研究プロジェクトの実施などを支援する際に、それが構造的空隙を埋めるようなネットワーク活動である場合、特に強力な支援を行うことが期待される。さらに一歩進めて、国際的な研究者ネットワークにおいて、我が国から見てどこに構造的空隙があるかを把握し、その情報を提供するとともに、その構造的空隙を埋めるような共同研究プロジェクトを立案することなどが期待される。

さらに、研究支援機関には、我が国がロボット工学の指導的立場を維持していくために、日本出身研究者を国際的なリーダーに育てることも期待される。そのために、国際的な研究者ネットワークにおいて、中心性を高めるような共同研究プロジェクトに対して、インセンティブを与えることが期待される。

また、産業技術総合研究所とフランスの CNRS（国立科学研究センター）の AIST-CNRS ロボット工学連携研究体は、近年の欧州におけるヒューマノイド研究を盛り上げ、多くの研究者を育成するとともに、日本出身研究者の業績を欧州に広めるなど、良い成果を生んでいる。これを参考として、日本出身研究者が含まれていない研究者集団をターゲットにした国際連携共同研究体の設立を支援する施策が期待される。この国際連携共同研究体は、AIST-CNRS より小規模で期間限定の組織であってもよいが、複数の共同研究プロジェクトを持ち寄って実施することで、重層的な協力関係を構築できるようにすることが望ましい。支援策の内容も資金提供だけではなく、小規模な研究組織でも国際連携共同研究体の設立に取り組めるように、構造的空隙に関する情報の提供に始まり、契約交渉や海外研究者の受入手続きなどに対する事務的なサポートも併せて提供することが望ましい。

実際には、これらの支援策のいくつかについては、すでに、大学間交流協定の締結や JSPS の研究拠点形成事業などの施策が講じられている。それらの今後の成果に大いに期待するとともに、それらの施策が制度的に多様性を獲得しつつ定着することを期待するものである。

### 3.9 本章のまとめ

研究者ネットワークの分析の応用例として、ロボット工学分野の日本出身研究者が国際的な研究者ネットワークでどのような連携戦略を採ることが効果的なのかを検討した。

そのため、IEEE/T-RO の創刊（1983 年下期）から 2010 年末までの間に掲載された査読付き論文 778 件から生成される研究者ネットワークと、同じ時期の日本ロボット学会誌に掲載された査読付き論文 543 件から生成される研究者ネットワークを比較した。

その結果、まず、IEEE/T-RO の研究者ネットワークは、日本ロボット学会誌のそれよりもネットワークの連携速度が遅いことが分かった。

そのため、IEEE/T-RO の研究者ネットワークには多くの構造的空隙が存在している。

イノベーション促進の観点からは、その構造的空隙を埋めるようなネットワーク活動を増加させることが望ましい。

構造的空隙を埋めるようなネットワーク活動は、日本出身研究者にとっても、多様な研究ノウハウを取得するとともに、自らの研究成果や研究思想を広く伝播することが期待できる。

特に、国際的な研究者ネットワークの中で、日本出身研究者が活躍するためには、日本出身研究者が含まれていない集団との連携が重要である。

その際、相手となる集団の中で、次数中心性だけでなく媒介中心性などから適切な相手研究者を選んで連携することが望ましい。

また、研究者ネットワークの中で、自らの役割を強化するためには、中心性を高めることが有効であるが、適切な連携相手を選べば、一気に中心性を高めることが可能であることが分かった。

しかし、調査対象とした研究者の事例では、連携候補の研究者とは既知の関係であっても、積極的に共同研究に取り組める状況とはなっておらず、何かしらのインセンティブ（政策的支援）が求められていた。

NEDO や JST や JSPS などの研究支援機関においては、構造的空隙に関する情報提供を行うとともに、上記の観点を踏まえて戦略的に、客員研究員や留学生の交換などの人的交流や共同研究プロジェクトなどを支援することが期待される。

また、小規模な研究組織でも国際連携共同研究体の設立に取り組めるように、資金提供のみならず事務的なサポートも含めた支援策を構築することも期待される。

## 第4章 ロボットに関する学術研究の現状

学術論文の引用関係を分析することで、ロボット工学のみならず、すべての学術分野におけるロボットに関する研究の現状を俯瞰した。

### 4.1 対象データ

本章では、ロボットに関する学術論文を収集するためのデータベースとして、米 Thomson Reuters 社の Institute for Scientific Information (ISI) 部門によって提供されている下記の3つを用いた。なお、収録されている学術論文は、英語で書かれたものに限定されている。

- Science Citation Index Expanded (SCI-EXPANDED)
- Social Sciences Citation Index (SSCI)
- Arts and Humanities Citation Index (A-HCI)

これらのデータベースを検索し、書誌情報を抽出するインターフェースとしては、米 Thomson Reuters 社が提供する Web of Science を使用した。2012年6月8日に下記の検索クエリーを Web of Science へ投入することにより、ロボットに関する学術論文 (53,500 件) を抽出した。

$$Topic = (robot*) \cap YearPublished = (1898 - 2011) \quad (4.1)$$

ここで、Topic とは、タイトル、著者キーワード、Keyword Plus (ISI 独自のキーワード) および抄録を意味している。

抽出された 53,500 件の学術論文の引用関係から、東京大学総合研究機構イノベーション政策研究センターで開発された「学術俯瞰マップ作成システム」を用いて、図 4.1 に示す手順でネットワークを生成した [52]。その結果、図 4.2 に示すような 34,948 件の最大連結成分 (Main Component) を得ることができた。以下、これをロボット研究の引用論文ネットワークとよぶこととする。

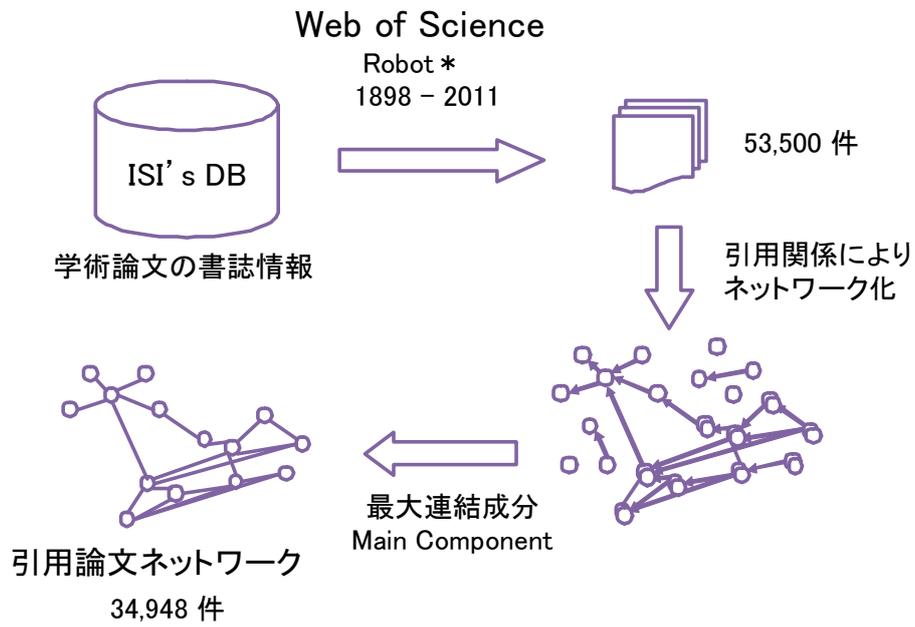


図 4.1: 引用論文ネットワークの生成手順

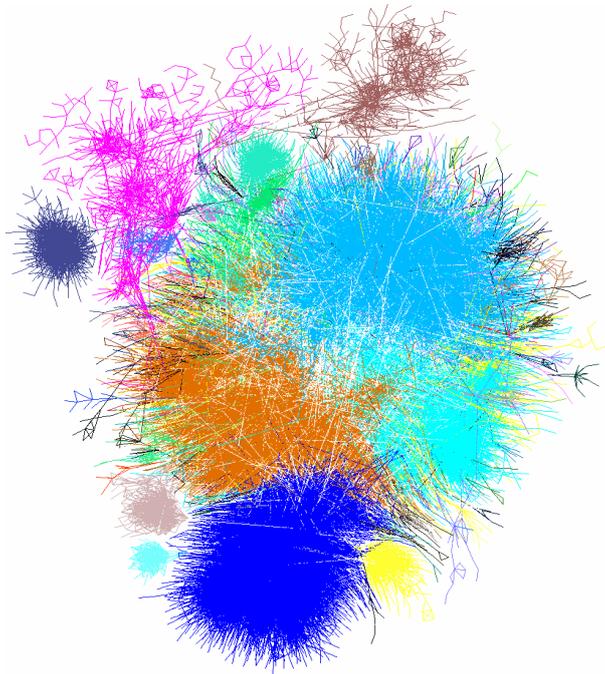


図 4.2: ロボット研究の引用論文ネットワーク  
34,948 ノード, 218 クラスター

## 4.2 掲載された学術雑誌の主題分野

引用論文ネットワークを構成する 34,948 件の論文について、学術雑誌毎に掲載数を集計し、さらに、主題分野用語で学術雑誌の主題を分類すると、図 4.3 と表 4.1 に示すようになった。なお、ひとつの学術雑誌が複数の主題を有する場合があるため、分類結果の掲載数の合計は、58,202 件となっている。

主題分野の分類で見ると、Technology (技術) 43,550 件、Life Sciences & Biomedicine (生命科学・生体臨床学) 10,207 件、Physical Sciences (自然科学) 3,160 件、Social Sciences (社会科学) 1,197 件、Arts & Humanities (芸術・人文) 88 件となっている [18]。Technology (技術) が全体の約 75 % を占めているが、Life Sciences & Biomedicine (生命科学・生体臨床学) も約 18 % と無視できない件数がある。

また、個別の主題分野で 1,000 件以上の論文が掲載されているのは、Engineering (工学) 11,002 件、Computer Science (コンピュータサイエンス) 9,892 件、Robotics (ロボット工学) 9,882 件、Automation & Control Systems (オートメーション・制御システム) 7,754 件、Surgery (外科学) 1,842 件、Instruments & Instrumentation (機器・計装) 1,777 件、Urology & Nephrology (泌尿器学・腎臓学) 1,500 件、Mathematics (数学) 1,065 件、NeuroSciences & Neurology (神経科学・神経学) 1,008 件となっている。

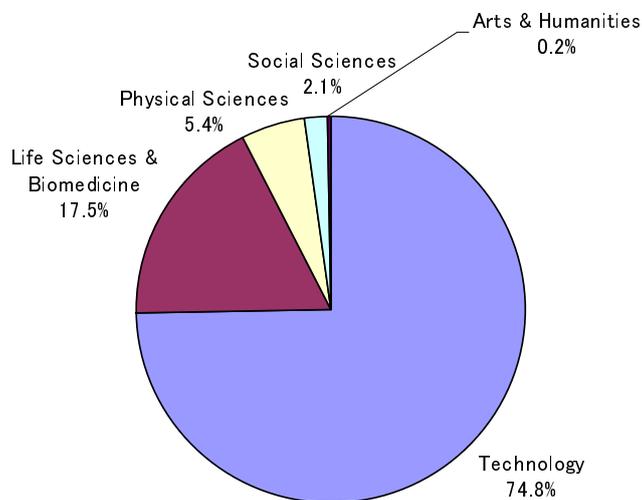


図 4.3: 掲載学術雑誌の主題分野の分類

表 4.1: 学術雑誌の主題分野毎の掲載論文数

Technology (技術)		
Engineering	工学	11,002
Computer Science	コンピュータサイエンス	9,892
Robotics	ロボット工学	9,882
Automation & Control Systems	オートメーション・制御システム	7,754
Instruments & Instrumentation	機器・計装	1,777
Operations Research & Management Science	オペレーションズリサーチ・経営科学	750
Mechanics	力学	676
Materials Science	物質科学	545
Science & Technology - Other Topics	科学技術 - その他のトピックス	436
Acoustics	音響学	171
Telecommunications	電気通信	158
Metallurgy & Metallurgical Engineering	冶金・冶金工学	81
Construction & Building Technology	土木技術・建築技術	79
Imaging Science & Photographic Technology	イメージング科学・写真技術	74
Remote Sensing	リモートセンシング	61
Spectroscopy	分光法	61
Transportation	交通運輸	56
Nuclear Science & Technology	核科学・核技術	46
Information Science & Library Science	情報科学・図書館学	20
Microscopy	顕微鏡検査	16
Energy & Fuels	エネルギー・燃料	13
	(合 計)	43,550

Life Sciences & Biomedicine (生命科学・生体臨床学)		
Surgery	外科学	1,842
Urology & Nephrology	泌尿器学・腎臓学	1,500
Neurosciences & Neurology	神経科学・神経学	1,008
Biochemistry & Molecular Biology	生化学・分子生物学	500
Cardiovascular System & Cardiology	循環器系・心臓学	466
Rehabilitation	リハビリテーション	378
Oncology	腫瘍学	353
Orthopedics	整形外科	265
Nuclear Medicine & Medical Imaging	核医学・医用画像	245
Radiology	放射線学	245
Agriculture	農学	240
Obstetrics & Gynecology	産婦人科学	240
Respiratory System	呼吸器系	216
Life Sciences & Biomedicine - Other Topics	生命科学・生態臨床医学 - その他のトピックス	195
Sport Sciences	スポーツ科学	193
Biophysics	生物物理学	187
Pharmacology & Pharmacy	薬理学・薬学	161
General & Internal Medicine	一般医療・内科学	148
Biotechnology & Applied Microbiology	バイオテクノロジー・応用微生物学	146
Otorhinolaryngology	耳鼻咽喉科学	134
Pediatrics	小児科学	107
Physiology	生理学	107
Medical Informatics	医療情報学	106
Medical Laboratory Technology	臨床検査技術	106
Behavioral Sciences	行動科学	104
Environmental Sciences & Ecology	環境科学・生態学	104
Gastroenterology & Hepatology	消化器病学・肝臓学	104
Research & Experimental Medicine	研究・実験医学	73
Cell Biology	細胞生物学	58
Food Science & Technology	食品科学・食品技術	58
Anesthesiology	麻酔学	51
Zoology	動物学	51
Health Care Sciences & Services	ヘルスケア科学・サービス	48
Genetics & Heredity	遺伝学・遺伝	28
Reproductive Biology	生殖生物学	27
Marine & Freshwater Biology	海洋生物学・淡水生物学	26
Pathology	病理学	24
Plant Sciences	植物学	23
Veterinary Sciences	獣医学	21
Ophthalmology	眼科学	19
Evolutionary Biology	進化生物学	18
Immunology	免疫学	18
Transplantation	移植	18
Dentistry	歯科学	16
Environmental & Occupational Health	環境衛生学・労働衛生学	16
Hematology	血液学	16
Oral Surgery & Medicine	口腔外・医療	16
Geriatrics & Gerontology	老年医学・老年学	14
Anatomy & Morphology	解剖学・形態学	13
Anthropology	人類学	13
Endocrinology & Metabolism	内分泌学・新陳代謝	13
Legal Medicine	法医学	13
Psychiatry	精神医学	13
Entomology	昆虫学	12
Emergency Medicine	救急医学	10
Audiology & Speech-Language Pathology	聴覚学・言語病理学	9
Dermatology	皮膚病学	9
Developmental Biology	発生生物学	9
Virology	ウイルス学	7
Mathematical & Computational Biology	数理生物学・計算生物学	6
Nursing	看護	5
Toxicology	毒物学	5
Infectious Diseases	感染症	4
Microbiology	微生物学	4
Rheumatology	リウマチ学	4
Fisheries	水産学	3
Medical Ethics	医療倫理	3
Mycology	菌類学	3
Nutrition & Dietetics	栄養・栄養学	3
Paleontology	古生物学	3
Forestry	林学	2
Allergy	アレルギー	1
Tropical Medicine	熱帯医学	1
	(合計)	10,207

Physical Sciences (自然科学)		
Mathematics	数学	1,065
Chemistry	化学	672
Physics	物理学	401
Meteorology & Atmospheric Sciences	気象学・大気科学	254
Optics	光学	222
Electrochemistry	電気化学	102
Oceanography	海洋学	96
Geology	地質	85
Crystallography	結晶学	73
Astronomy & Astrophysics	天文学・宇宙物理学	62
Geochemistry & Geophysics	地球化学・地球物理学	42
Polymer Science	高分子科学	31
Water Resources	水資源	21
Mining & Mineral Processing	採鉱・選鉱	12
Thermodynamics	熱力学	12
Physical Geography	自然地理学	10
	(合 計)	3,160

Social Sciences (社会科学)		
Psychology	心理学	452
Social Sciences - Other Topics	社会科学 - その他のトピックス	192
Education & Educational Research	教育学・教育研究	164
Mathematical Methods In Social Sciences	社会科学の数学的手法	106
Business & Economics	ビジネス・経済	76
Communication	コミュニケーション	76
Linguistics	言語学	68
Public	公共学	16
Social Issues	社会問題	10
International Relations	国際関係	9
Public Administration	行政学	9
Sociology	社会学	7
Biomedical Social Sciences	生物医学社会科学	4
Women's Studies	女性学	3
Archaeology	考古学	1
Area Studies	地域研究	1
Cultural Studies	文化研究	1
Geography	地理学	1
Urban Studies	都市研究	1
	(合 計)	1,197

Arts & Humanities (芸術・人文)		
Philosophy	哲学	33
Literature	文学	15
History & Philosophy of Science	科学史・科学哲学	11
Art	芸術	9
Religion	宗教	7
Arts & Humanities - Other Topics	芸術・人文 - その他のトピックス	5
Music	音楽	5
Architecture	建築	1
Film	映画	1
Radio & Television	ラジオ・テレビ	1
	(合 計)	88

### 4.3 引用論文ネットワークの中心

引用論文ネットワークを構成する 34,948 件の論文の入次数，すなわち被引用回数を見ると，図 4.3 に示すとおり，2つの論文が突出していることが分かる。

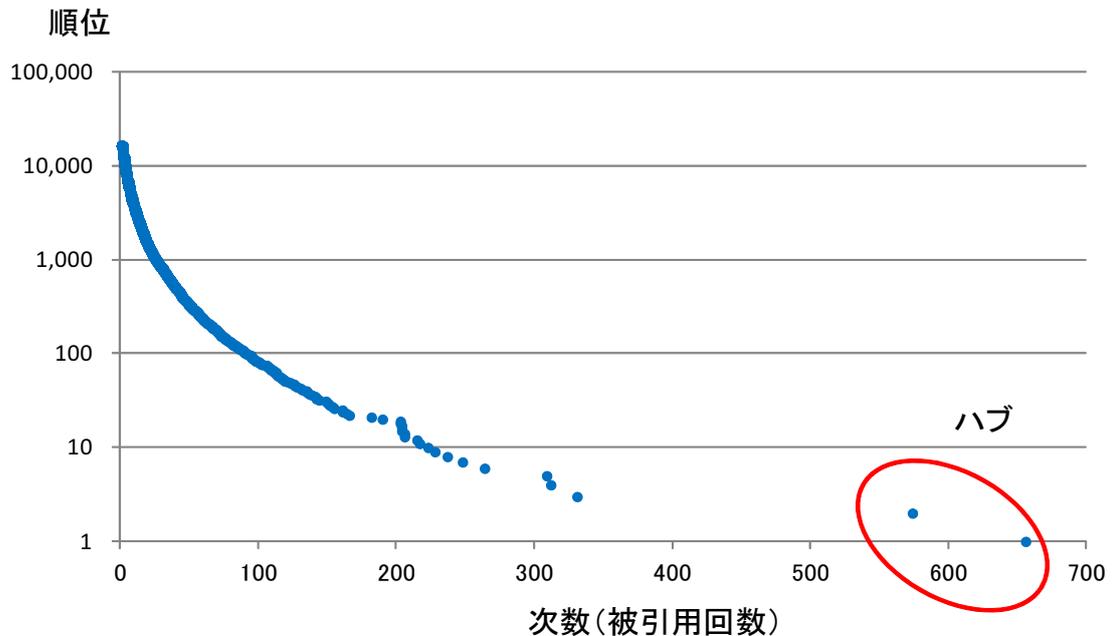


図 4.4: 引用論文ネットワークにおける次数中心性の分布

このように高い次数中心性を示すノードをネットワーク分析では，ハブ（Hub）とよび，重視している．その2つは，下記の論文である．

Rodney A. Brooks（MIT AI ラボ）：

“ A ROBUST LAYERED CONTROL-SYSTEM FOR A MOBILE ROBOT, ”

IEEE TRANSACTIONS ON ROBOTICS AND AUTOMATION, vol.2, pp.14-23, 1986

引用論文ネットワーク内の被引用件数：656回

Web of Science 全体での被引用回数：1,645回

所属クラスター：Cluster 1

Oussama Khatib (Stanford Univ. AI ラボ) :

“REAL-TIME OBSTACLE AVOIDANCE FOR MANIPULATORS AND MOBILE ROBOTS”

INTERNATIONAL JOURNAL OF ROBOTICS RESEARCH, vol.5, no.1, pp.90-98, 1986

引用論文ネットワーク内の被引用件数 : 574 回

Web of Science 全体での被引用回数 : 1,359 回

所属クラスター : Cluster 1

この2つの論文は、研究内容が優れていることは当然のことであるが、発行年がともに1986年と古く、著者も米国の著名大学のロボット・人工知能を専門とする研究所に所属しており、先行研究として後続の研究者から引用されやすい状況にあった。その結果、現在のロボットに関する研究に大きな影響を及ぼしていると推測される。

## 4.4 引用論文ネットワークのクラスター構造

### 4.4.1 四大クラスターの登場

学術俯瞰マップ作成システムを用いてクラスタリングした結果，図 4.5 に示すように，引用論文ネットワークは 218 個のクラスターに分割された。

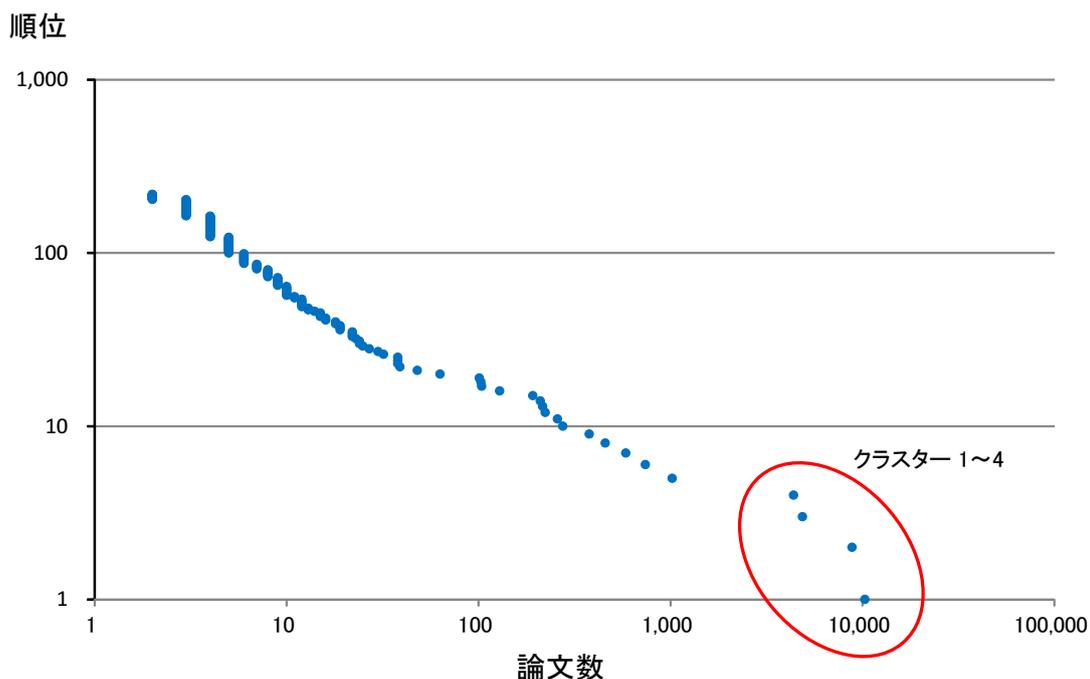


図 4.5: クラスターを構成する論文数の分布

上位 4 個のクラスターと，それ以下のクラスターの間には，構成する論文数の面で大きな差がある．そのため，上位 4 クラスターについて特徴を分析した．その結果を表 4.2 に示す．なお，ノード間のリンクについては，引用/被引用の方向性があるため，序章で説明したように弧 (Arc) とよんでいる。

また，上位 4 クラスターのネットワーク形状を図 4.6 に示す。

表 4.2: 上位 4 クラスターの特徴

	引用論文ネットワーク 全 体	Cluster 1	Cluster 2	Cluster 3	Cluster 4
平均発行年	2003.45	2004.16	2000.97	2007.13	2005.05
ノード数 (比率)	34,948 100%	10,295 29%	8,825 25%	4,871 14%	4,378 13%
アーク数	153,143	43,762	37,335	30,247	15,160
アーク/ノード	4.38	4.25	4.23	6.21	3.46
特 徴	平均発行年		古いクラスター	新しいクラスター	
	アーク密度			密なクラスター	疎らなクラスター
	キーワード	移動ロボット	マニピュレータ	手術ロボット	リハビリ

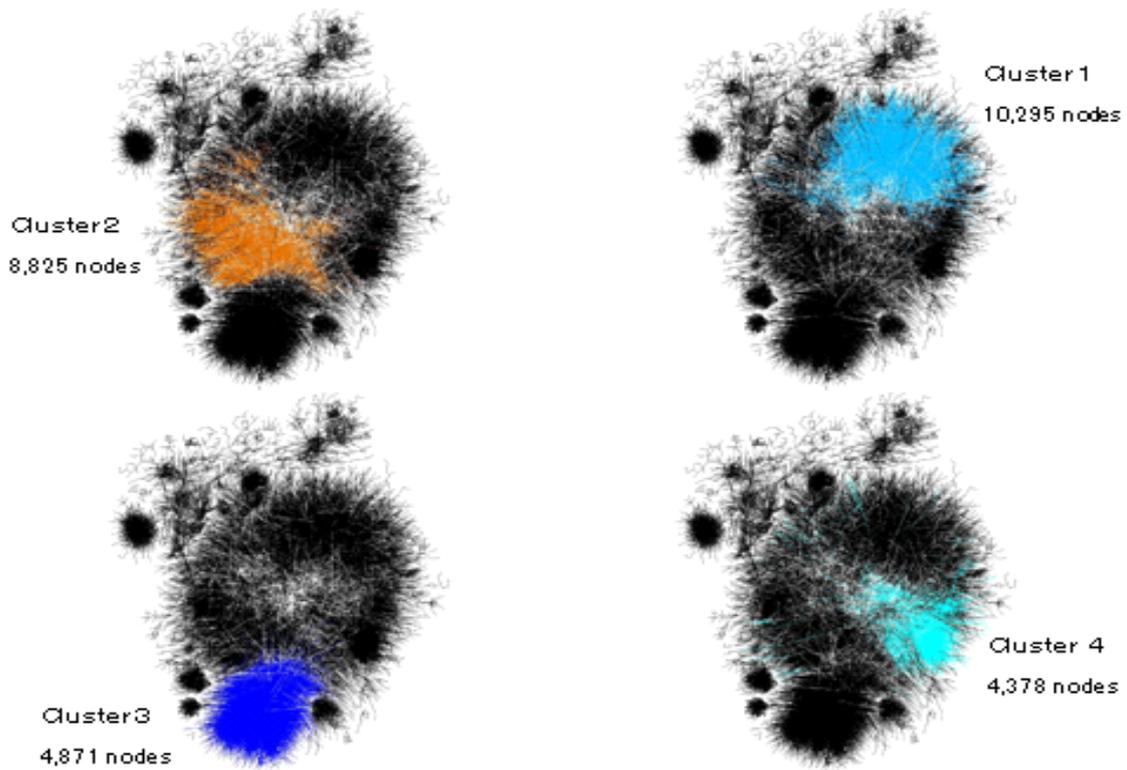


図 4.6: 上位 4 クラスターのネットワーク形状

次に、上位4クラスターの特徴語 (Keyword) を表 4.3 に示す。クラスターの特徴語としては、クラスター同士の差異を顕す TF-ICF (Term Frequency - Inverse Category Frequency) の値が上位20位までのものを選んだ。ただし、引用論文ネットワーク全体の特徴語については、TF (Term Frequency) を採用している [62]。

$$TF = \text{クラスター内の当該単語の出現回数} \div \text{クラスター内の総単語数} \quad (4.2)$$

$$TFICF = TF \times \log(\text{総クラスター数} / \text{当該単語を含むクラスター数}) \quad (4.3)$$

特徴語からクラスターに名称を付けるとすれば、Cluster 1 は移動ロボット、Cluster 2 はマニピュレータ、Cluster 3 は手術ロボット、Cluster 4 はリハビリとなる。

表 4.3: 上位4クラスターの特徴を示すキーワード

	引用論文ネットワーク全体	TF	Cluster 1	TFICF	Cluster 2	TFICF	Cluster 3	TFICF	Cluster 4	TFICF
1	robot	0.01442	learning	0.00210	manipulator	0.00478	laparoscopic	0.01207	rehabilitation	0.00282
2	system	0.00897	navigation	0.00196	controller	0.00276	surgery	0.01059	stroke	0.00238
3	control	0.00818	mobile	0.00191	control	0.00240	patient	0.00823	force	0.00178
4	robotic	0.00452	mobile robot	0.00180	robot manipulator	0.00187	prostatectomy	0.00724	movement	0.00175
5	based	0.00391	agent	0.00165	joint	0.00183	surgical	0.00669	motor	0.00173
6	model	0.00374	localization	0.00163	dynamic	0.00177	assisted	0.00497	patient	0.00172
7	paper	0.00338	path	0.00154	adaptive	0.00163	radical	0.00494	muscle	0.00165
8	manipulator	0.00318	environment	0.00145	force	0.00162	radical prostatectomy	0.00434	locomotion	0.00163
9	time	0.00309	obstacle	0.00133	flexible	0.00152	assisted laparoscopic	0.00416	human	0.00163
10	motion	0.00302	sensor	0.00128	parallel	0.00148	cancer	0.00406	training	0.00161
11	result	0.00302	behavior	0.00125	kinematic	0.00137	robot assisted	0.00341	therapy	0.00161
12	dynamic	0.00291	autonomous	0.00123	inverse	0.00131	surgeon	0.00327	control	0.00128
13	approach	0.00256	vehicle	0.00121	nonlinear	0.00130	complication	0.00289	subject	0.00121
14	design	0.00229	network	0.00112	stability	0.00128	invasive	0.00288	foot	0.00120
15	problem	0.00220	algorithm	0.00105	neural	0.00125	nephrectomy	0.00273	hand	0.00110
16	proposed	0.00217	human	0.00100	kinematics	0.00125	prostate	0.00260	exoskeleton	0.00107
17	controller	0.00217	controller	0.00096	adaptive control	0.00124	outcome	0.00260	actuator	0.00107
18	environment	0.00209	neural	0.00095	learning	0.00122	robotic assisted	0.00245	sensor	0.00105
19	used	0.00201	task	0.00094	parallel manipulator	0.00120	endoscopic	0.00240	spinal	0.00103
20	task	0.00199	motion	0.00091	torque	0.00116	hysterectomy	0.00229	upper	0.00103

次に、毎年の論文の発行件数を見ると、図 4.7 に示すように 1983 年から Cluster 2（マニピュレータ）が急増している。これは、1980 年から始まった産業ロボットの普及を反映したものと考えられる。

現在のロボット研究の主流である Cluster 1（移動ロボット）は、1998 年に Cluster 2（マニピュレータ）を抜いて、年間トップのクラスターになった。このころから、ヒューマノイドロボットをはじめサービスロボットの研究が盛んになったことを表しているものと考えられる。

上位 4 つのクラスターの中で、平均発行年（Average year）が最も若く、新しい研究分野と考えられる Cluster 3（手術ロボット）を見ると、2003 年に Cluster 4（リハビリ）を抜いて年間 3 位になり、2008 年には Cluster 2（マニピュレータ）を抜いて年間 2 位になった。さらに、2011 年には 908 件となり、年間トップの Cluster 1（990 件）に肉薄している。これは、近年の医工連携による手術ロボットの成功と、ロボット研究の医学界への広がりを映しているものと考えられる。まさに、手術ロボットは、サービスロボットのキラーアプリケーションになっていると考えられる。

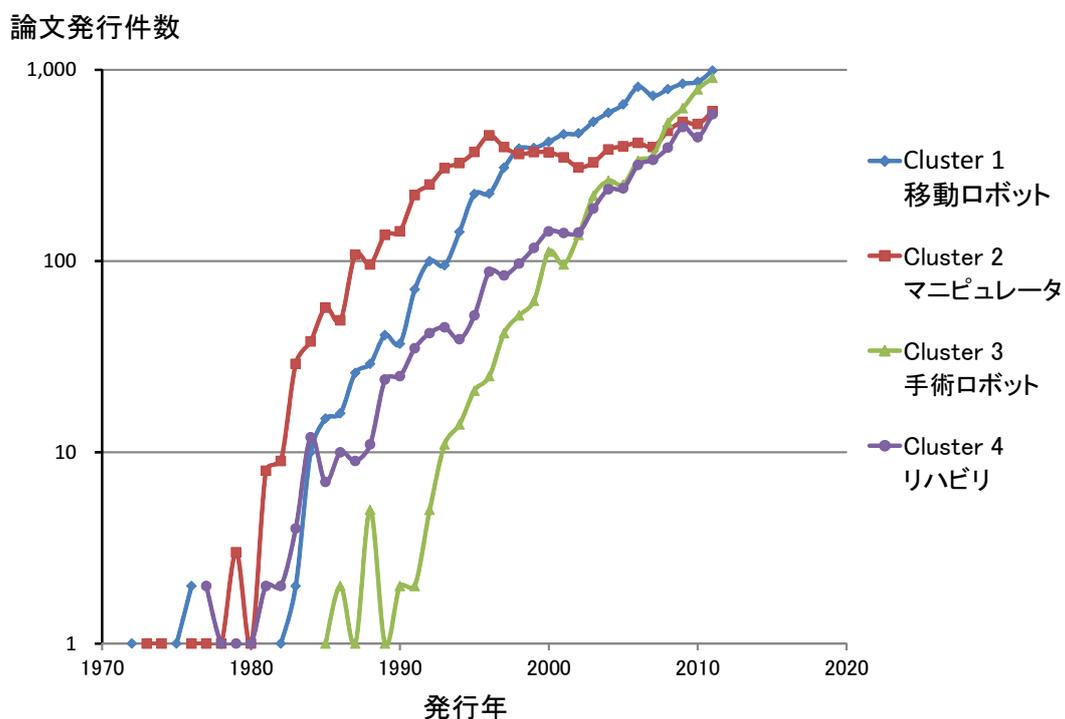


図 4.7: 上位 4 クラスターの論文発行件数の推移

#### 4.4.2 成長が予想される中小クラスター

続いて、5位以下の中小クラスターの中で、今後、成長する可能性が高いと考えられるものについて分析する。平均発行年が若いクラスターは、最近の研究活動が活発であるため、今後、成長するものと考えられる。そこで、平均発行年が2006年よりも若く、所属する論文数が20件以上あるクラスターを分析対象に選ぶと、表4.4に示す9個のクラスターとなる。

表 4.4: 成長が予想される中小クラスター

	引用論文ネットワーク全体	Cluster 9	Cluster 13	Cluster 17	Cluster 23
平均発行年	2003.45	2006.98	2007.53	2006.67	2007.58
ノード数	34,948	378	216	104	38
(比率)	100%	1.08%	0.62%	0.30%	0.11%
アーク数	153,143	1,657	795	253	67
アーク/ノード	4.38	4.38	3.68	2.43	1.76
キーワード	robot	aeronet	radiosurgery	flight	elastomer
	system	modis	cyberknife	insect	dielectric
	control	dust	stereotactic	wing	dielectric elastomer
	robotic	aerosol	tumor	aerodynamic	actuator
	based	optical	radiotherapy	aerodynamics	artificial muscle
	model	robotic network	patient	vortex	muscle
	paper	retrieval	treatment	stroke	elastomer actuator
	manipulator	optical thickness	radiation	force	dea
	time	optical property	stereotactic radiosurgery	insect flight	dielectric elastomer actuator
motion	radiative	spinal	edge vortex	polymer	
	Cluster 25	Cluster 26	Cluster 30	Cluster 31	Cluster 33
平均発行年	2007.21	2007.53	2006.08	2007.13	2008.23
ノード数	38	32	24	24	22
(比率)	0.11%	0.09%	0.07%	0.07%	0.06%
アーク数	56	82	27	30	26
アーク/ノード	1.47	2.56	1.13	1.25	1.18
キーワード	scaffold	action	moral	fault	sound
	tissue	human	ethic	nonlinear system	sound source
	tissue engineering	imitation	agent	nonlinear	microphone
	tissue spheroid	mirror	law	isolation	localization
	fabrication	biological motion	ethical	class of nonlinear	source
	cell	movement	human	lipschitz	speech
	biofabrication	biological	moral consideration	fault detection	interaural
	spheroid	automatic imitation	machine ethic	observer	speaker
	deposition	cortex	consciousness	class	sound localization
	bone	mirror neuron	moral agent	estimator	audition

それぞれの特徴語からクラスターに名称を付けるとすれば、Cluster 9 は地球観測，Cluster 13 は放射線治療，Cluster 17 は飛行昆虫ロボット，Cluster 23 は人工筋肉，Cluster 25 は骨再生医療，Cluster 26 は運動模倣，Cluster 30 は倫理・道徳，Cluster 31 は障害検出・分離，Cluster 33 はロボット聴覚となる。これら9個のクラスターの中で、8個は工学系，医学系の色彩の強いクラスターであるが，Cluster 30 だけは人文系の色彩の強いクラスターである。Cluster 30

が扱うロボット倫理学（Roboethics: Robot Ethics）は、今後、ヒト共生型のサービスロボットが社会に受け入れられて行く上で、重要な役割を果たすことが期待される。2002年にイタリアの Gianmarco Veruggio によって Roboethics という用語が提案されてから、2004年には、故・谷江和雄氏他により、IEEE RAS に、Technical Committee on Robo-Ethics（現在は、Roboethics）が設立されるなど、ロボット倫理学が発展する環境は整いつつある [63, 64, 65].

次に、上記の9個のクラスターにおいて、学术论文の発行件数の多い国と研究機関を表4.5に示す。なお、学術俯瞰マップ作成システムでは、共著の場合には、著者の所属機関毎に件数をカウントしている。例えば、著者Aの所属がM国X研究機関、著者Bの所属がM国Y研究機関、著者Cの所属がN国Z研究機関、著者Dの所属がN国Z研究機関の場合、M国2件、N国1件、X研究機関1件、Y研究機関1件、Z研究機関1件としている。

表4.5を見ると、Cluster 26（運動模倣）や Cluster 33（ロボット聴覚）のように日本が強味を見せている分野もあるが、Cluster 9（地球観測）、Cluster 23（人工筋肉）、Cluster 25（骨再生医療）、Cluster 30（倫理・道徳）、Cluster 31（障害検出・分離）のように日本と日本の研究機関のどちらも Top5 に入っていない分野がある。

表 4.5: 成長が期待される中小クラスターにおける上位5ヶ国と5研究機関

	全 体 ロボット (34,948件)	Cluster 9 地球観測 (378件)	Cluster 13 放射線治療 (216件)	Cluster 17 飛行昆虫ロボット (104件)	Cluster 23 人工筋肉 (38件)
著者の所属機関 の国籍	USA 18,360	USA 703	USA 297	USA 62	USA 24
	Japan 4,541	Peoples R China 97	Germany 68	Japan 20	New Zealand 10
	Germany 2,974	France 96	Italy 52	Germany 12	Switzerland 7
	Peoples R China 2,965	Germany 55	France 38	Peoples R China 10	South Korea 7
	South Korea 2,678	Italy 30	Japan 22	South Korea 8	Italy 5
	Spain 30				
著者の所属機関	MIT 543	NASA 194	Stanford Univ 60	Univ Delaware 11	Univ Auckland 7
	Carnegie Mellon Univ 517	Chinese Acad Sci 49	Univ Pittsburgh 38	CALTECH 10	MIT 5
	Stanford Univ 353	Univ Maryland Baltimore Cty 45	Univ Calif San Francisco 15	Univ Ulm 8	Sungkyunkwan Univ 5
	Univ Tokyo 353	Univ Maryland 38	Univ Toronto 14	Harvard Univ 7	N Carolina State Univ 4
	NASA 330	Sci Syst & Applicat Inc 36	Accuray Inc 13	Univ Calif Berkeley 6	Harvard Univ 4
	Cluster 25 骨再生医療 (38件)	Cluster 26 運動模倣 (32件)	Cluster 30 倫理・道徳 (24件)	Cluster 31 障害検出・分離 (24件)	Cluster 33 ロボット聴覚 (22件)
著者の所属機関 の国籍	USA 57	Japan 21	USA 19	USA 7	Japan 19
	Singapore 14	England 15	Netherlands 3	France 6	Taiwan 6
	Canada 10	USA 11	England 2	Australia 5	Germany 5
	South Korea 9	Italy 9	Canada 1	Peoples R China 5	Thailand 3
	Latvia 3	France 5	Italy 1	Canada 3	Peoples R China 3
Germany 3		Wales 1	Italy 3	South Korea 3	
		South Korea 3			
著者の所属機関	Univ Illinois 25	UCL 6	Rensselaer Polytech Inst 6	Wright State Univ 3	Honda Res Inst Japan Co Ltd 5
	Natl Univ Singapore 13	Kyoto Univ 4	Univ Twente 2	Nanjing Univ Aeronaut & Astronaut 2	Natl Chiao Tung Univ 4
	Dankook Univ 9	Osaka Univ 3	Texas A&M Univ 2	Univ Melbourne 2	Tokyo Inst Technol 4
	Ecole Polytech 6	Univ Coll Dublin 3	Yale Univ 2	Concordia Univ 2	Kyoto Univ 3
	Sandia Natl Labs 6	Carnegie Mellon Univ 3	Univ Sussex 2	Kyungpook Natl Univ 2	Chiang Mai Univ 3
Med Univ S Carolina 6		Univ Memphis 2	Northeastern Univ 2		

#### 4.4.3 Cluster 1（移動ロボット）の分析

Cluster 1 を構成する 10,295 件の論文の中の入次数，すなわち次数中心性を見ると，図 4.8 に示すようになる。

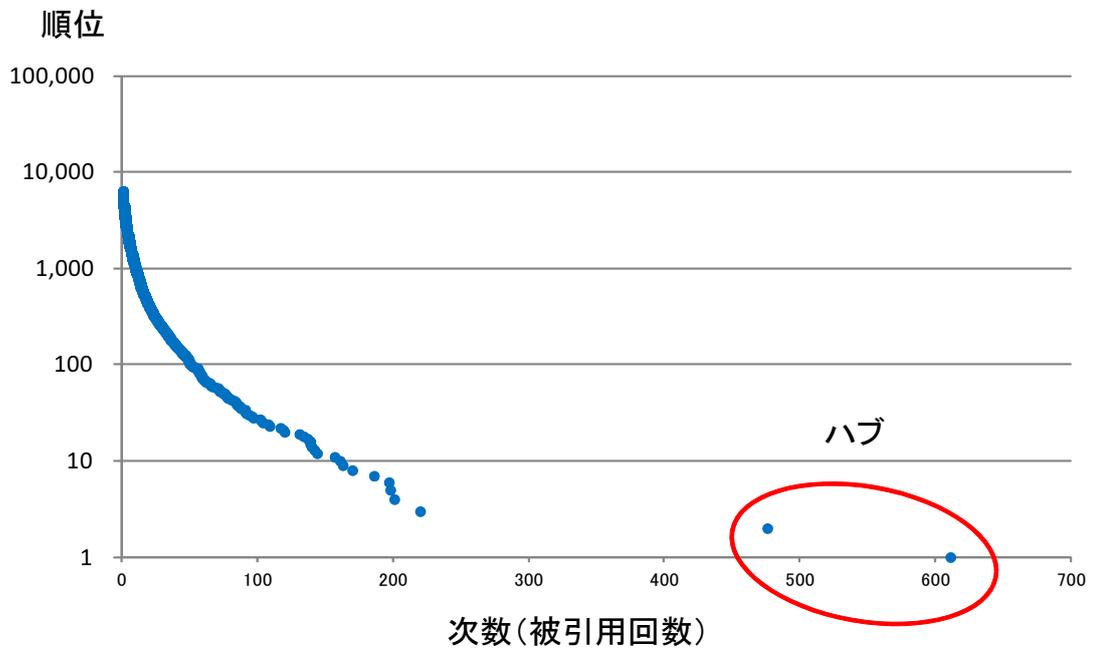


図 4.8: Cluster 1 における次数中心性の分布

そして，引用論文ネットワーク全体のハブとなっていた 2 つの論文が Cluster 1 のハブにもなっている。

Rodney A. Brooks (MIT AI ラボ) :

“ A ROBUST LAYERED CONTROL-SYSTEM FOR A MOBILE ROBOT, ”

IEEE TRANSACTIONS ON ROBOTICS AND AUTOMATION, vol.2, pp.14-23, 1986

クラスター 1 内の被引用件数 : 611 回

Web of Science 全体での被引用回数 : 1,645 回

所属サブクラスター : SubCI-4

Oussama Khatib (Stanford Univ. AI ラボ) :

“REAL-TIME OBSTACLE AVOIDANCE FOR MANIPULATORS AND MOBILE ROBOTS”

INTERNATIONAL JOURNAL OF ROBOTICS RESEARCH, vol.5, no.1, pp.90-98, 1986

クラスター 1 内の被引用件数 : 476 回

Web of Science 全体での被引用回数 : 1,359 回

所属サブクラスター : SubCI-2

次に, 学術俯瞰マップ作成システムを用いて, Cluster 1 をサブクラスターに分割したところ, 図 4.9 に示すように 36 個に分割された.

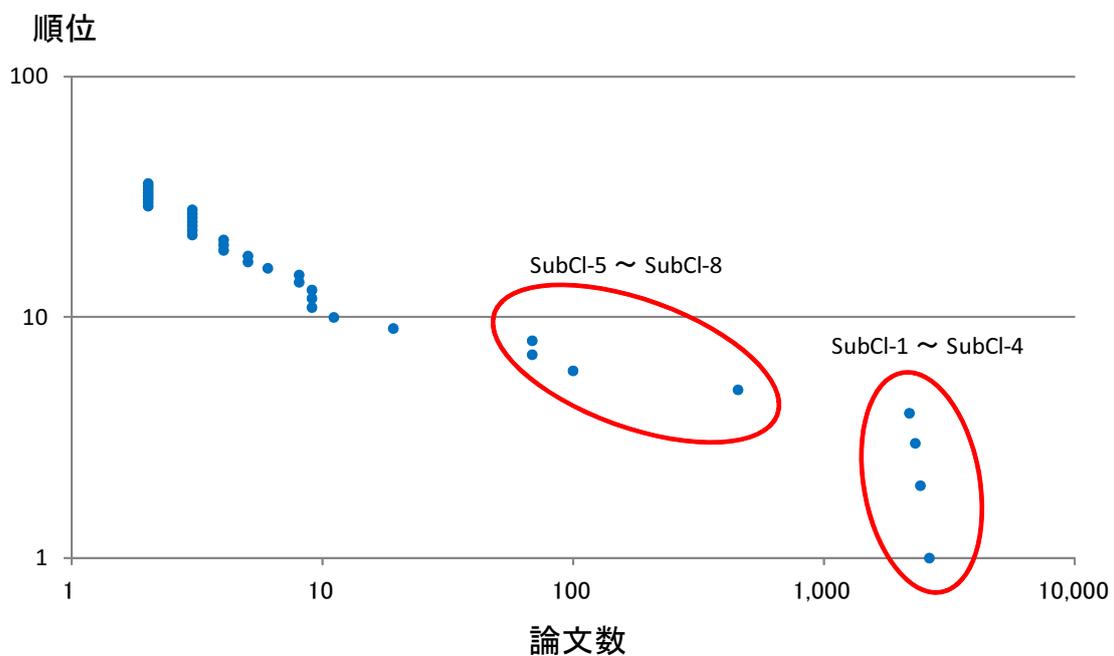


図 4.9: Cluster 1 のサブクラスターを構成する論文数の分布

そのうち、上位8つのサブクラスターについて特徴を分析した。その結果を表4.6に示す。特徴語からサブクラスターに名称を付けるとすれば、SubCl-1は生体模倣、SubCl-2は経路計画、SubCl-3はSLAM・ナビゲーション、SubCl-4は車輪型ロボット、SubCl-5はヒューマンインタラクション、SubCl-6はセンサーネット、SubCl-7は探索型ロボット、SubCl-8はロボットビジョンとなる。なお、Cluster 1の特徴語については、TF (Term Frequency) の上位10個を採用しているため、表4.3と異なっている。

表 4.6: Cluster 1 の上位 8 サブクラスター

	Cluster 1 全 体	SubCl-1	SubCl-2	SubCl-3
平均発行年	2004.16	2004.76	2002.17	2004.63
ノード数	10,295	2,608	2,402	2,291
(比率)	100%	25.33%	23.33%	22.25%
アーク数	43,809	10,216	9,347	7,975
アーク / ノード	4.26	3.92	3.89	3.48
キーワード	robot	learning	planning	localization
	system	neural	path	map
	control	locomotion	path planning	slam
	based	evolutionary	trajectory	sensor
	mobile	self	fuzzy	image
	algorithm	walking	collision	navigation
	environment	human	manipulator	filter
	model	swarm	optimal	landmark
	paper	agent	obstacle	vision
mobile robot	control	motion planning	estimation	
	SubCl-5	SubCl-6	SubCl-7	SubCl-8
平均発行年	2006.37	2004.65	2002.94	2004.04
ノード数	450	99	68	68
(比率)	4.37%	0.96%	0.66%	0.66%
アーク数	950	118	195	91
アーク / ノード	2.11	1.19	2.87	1.34
キーワード	human	sensor	graph	vergence
	social	sensor network	exploration	disparity
	human robot	wireless	graph exploration	log polar
	interaction	network	bound	polar
	child	coverage	node	image
	human robot interaction	vehicle	tree	vergence control
	robot interaction	node	edge	vision
	people	control	competitive	log
	emotion	controller	polygon	stereo
participant	navigation	log	bino cular	

論文の発行件数（累積）を見ると，図 4.10 に示すように，SubCl-5（ヒューマンインタラクション）の成長が著しい．ヒト共生型のサービスロボットが実社会に入っていくために，この分野の研究者が増えていることの表れであると考えられる．

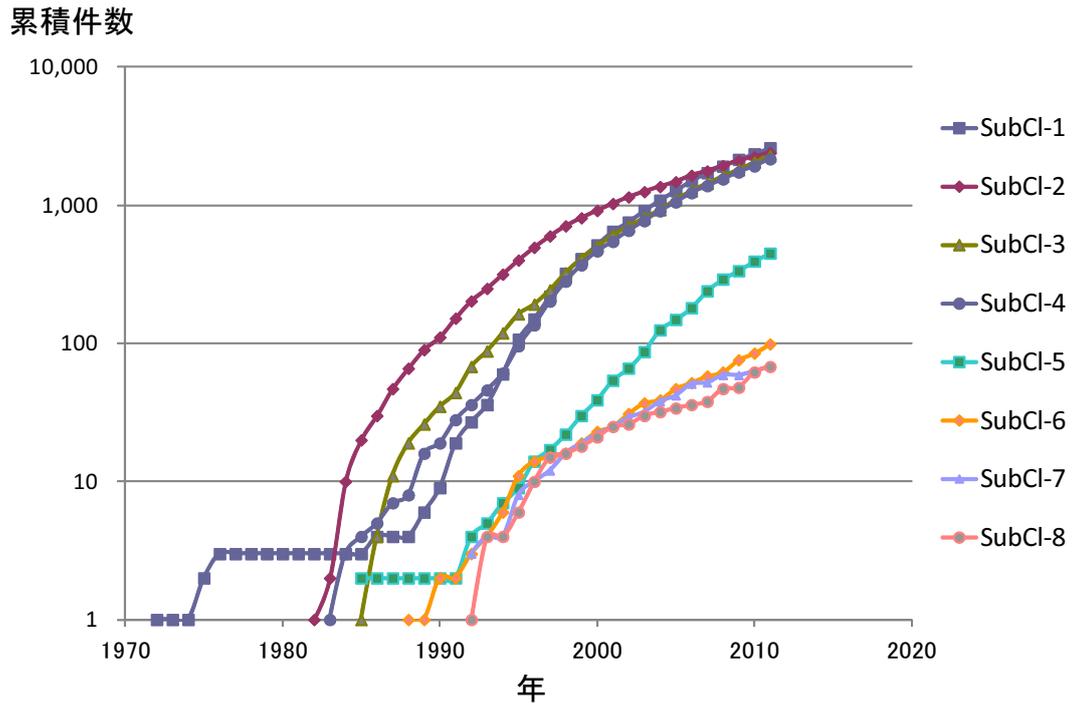


図 4.10: Cluster 1 の上位 8 サブクラスターにおける論文発行の累積件数

上記の上位8サブクラスターにおいて、学术论文の発行件数の多い国と研究機関を表4.7に示す。なお、学術俯瞰マップ作成システムでは、共著の場合には、著者の所属機関毎に件数をカウントしている。例えば、著者Aの所属がM国X研究機関、著者Bの所属がM国Y研究機関、著者Cの所属がN国Z研究機関、著者Dの所属がN国Z研究機関の場合、M国2件、N国1件、X研究機関1件、Y研究機関1件、Z研究機関1件としている。

表4.7を見ると、SubCI-1（生体模倣）、SubCI-4（車輪型ロボット）、SubCI-5（ヒューマンインタラクション）、SubCI-8（ロボットビジョン）のように日本が強味を見せている分野もあるが、SubCI-7（探索型ロボット）のように日本と日本の研究機関のどちらもTop5に入っていない分野がある。

表 4.7: Cluster 1 の上位 8 サブクラスターにおける上位 5ヶ国と 5 研究機関

	Cluster 1 移動ロボット (10,295件)	SubCI-1 生体模倣 (2,608件)	SubCI-2 経路計画 (2,402件)	SubCI-3 SLAM・ナビゲーション (2,291件)	SubCI-4 車輪型ロボット (2,171件)
著者の所属機関の国籍	USA 4,471 Japan 1,584 Germany 923 South Korea 812 Peoples R China 788	USA 1,119 Japan 640 England 358 Germany 298 Switzerland 237	USA 1,017 South Korea 244 Canada 214 Japan 204 Peoples R China 183	USA 833 Spain 304 Germany 280 South Korea 253 Italy 238 South Korea 162	USA 1,142 Japan 276 Peoples R China 265 Italy 238 South Korea 162
著者の所属機関	Carnegie Mellon Univ 347 MIT 236 Univ So Calif 172 Univ Tokyo 157 Osaka Univ 138	Univ So Calif 86 Ecole Polytech Fed Lausanne 83 MIT 74 Osaka Univ 63 CNR 60	Carnegie Mellon Univ 73 Univ Illinois 68 Stanford Univ 38 Indian Inst Technol 33 MIT 33	Carnegie Mellon Univ 103 MIT 65 CALTECH 46 Univ Freiburg 46 Univ Malaga 35	Carnegie Mellon Univ 89 Georgia Inst Technol 41 Univ Penn 40 Univ S Florida 37 Univ So Calif 37
	SubCI-5 ヒューマンインタラクション (450件)	SubCI-6 センサーネット (99件)	SubCI-7 探索型ロボット (68件)	SubCI-8 ロボットビジョン (68件)	
著者の所属機関の国籍	USA 250 Japan 163 England 54 South Korea 54 Germany 43	USA 38 South Korea 27 Spain 19 Taiwan 14 Japan 10	USA 37 France 31 Germany 22 Canada 18 Italy 12	England 19 Japan 16 Spain 12 Peoples R China 9 Greece 8	
著者の所属機関	Univ Hertfordshire 26 MIT 23 Carnegie Mellon Univ 23 Osaka Univ 20 Vanderbilt Univ 20	Natl Pingtung Univ Educ 6 Univ Malaga 5 MIT 3 Rensselaer Polytech Inst 3 Univ Jaume I 3 Univ Almeria 3 Waseda Univ 3 Yonsei Univ 3 OSAKA UNIV 3 Univ Carlos III Madrid 3 Korea Inst Sci & Technol 3 Korea Adv Inst Sci & Technol 3	Univ Paris 11 10 Univ Quebec 9 Univ Quebec Outaouais 6 Univ Liverpool 4 Univ Bordeaux 1 4 Weizmann Inst Sci 4 Univ Bonn 4	Democritus Univ Thrace 8 Univ Sheffield 5 Univ Ulster 5 Tokyo Metropolitan Univ 5 Univ Valencia 4 Univ Essex 4	

#### 4.4.4 Cluster 2（マニピュレータ）の分析

Cluster 2 を構成する 8,825 件の論文の中の入次数，すなわち次数中心性を見ると，図 4.11 に示すようになる。

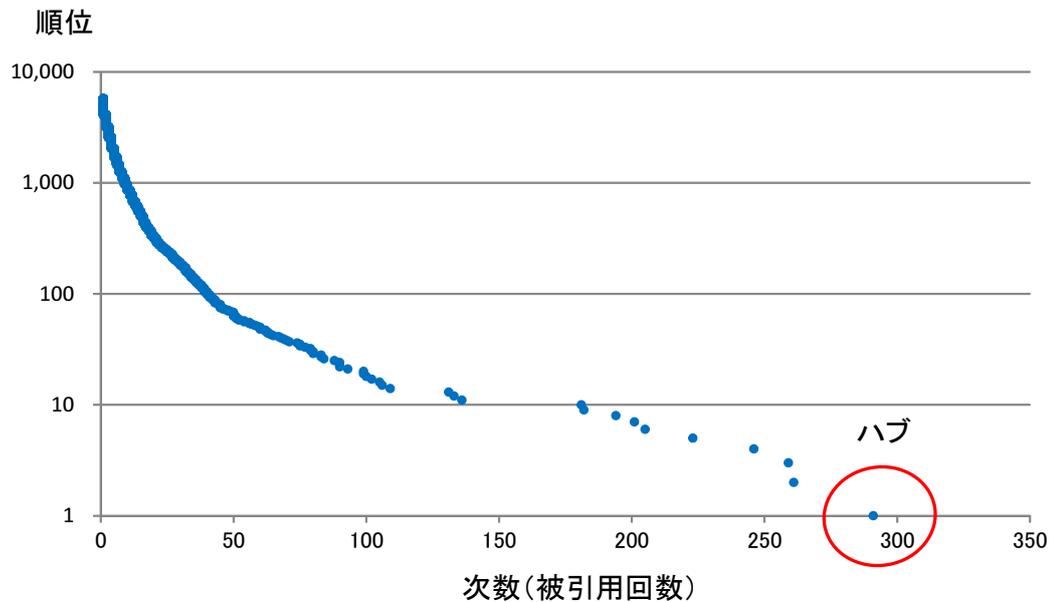


図 4.11: Cluster 2 における次数中心性の分布

そして，Cluster 2 のハブとなっている論文は，下記の論文である。

Jean-Jacques E. Slotine; Weiping Li (MIT, Nonlinear Systems ラボ) :  
“ ON THE ADAPTIVE-CONTROL OF ROBOT MANIPULATORS ”  
INTERNATIONAL JOURNAL OF ROBOTICS RESEARCH, vol.6, no.3, pp.49-59, 1987  
Cluster 2 内の被引用回数： 291 回  
Web of Science 全体での被引用回数： 505 回  
所属サブクラスター： SubCI-1

次に、Cluster 2 をサブクラスターに分割すると、図 4.12 に示すように 23 個に分割された。

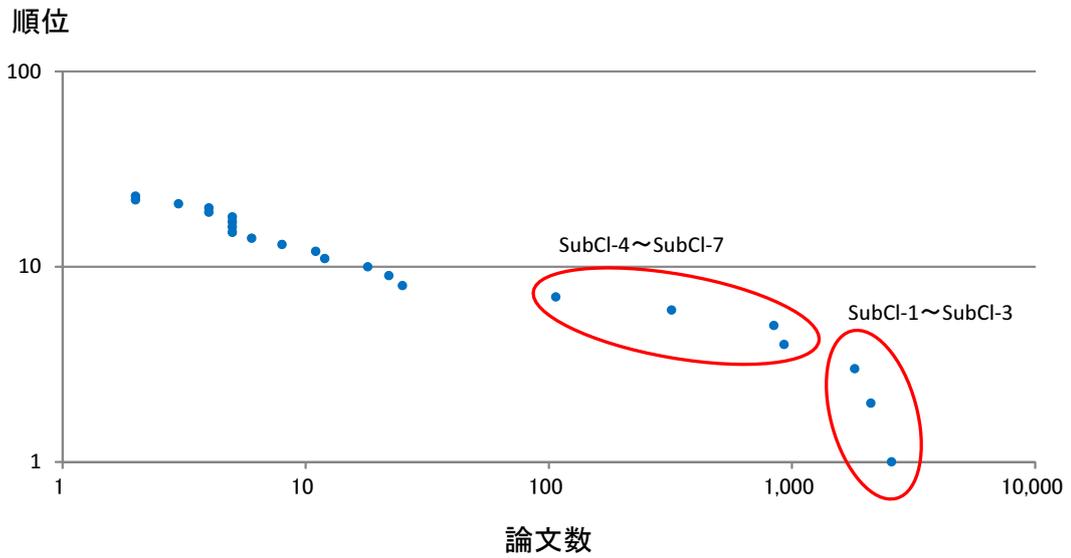


図 4.12: Cluster 2 のサブクラスターを構成する論文数の分布

そのうち、上位7つのサブクラスターについて特徴を分析した。その結果を表 4.8 に示す。特徴語からサブクラスターに名称を付けるとすれば、SubCI-1 は適応制御・水中ロボット、SubCI-2 はパラレルマニピュレータ、SubCI-3 はビジュアルサーボ、SubCI-4 はフレキシブルマニピュレータ、SubCI-5 は学習制御、SubCI-6 はキャリブレーション、SubCI-7 はトルク制御となる。なお、Cluster 2 の特徴語については、TF (Term Frequency) の上位 10 個を採用しているため、表 4.3 と異なっている。

表 4.8: Cluster 2 の上位 7 サブクラスター

	Cluster 2 全 体	SubCI-1	SubCI-2	SubCI-3
平均発行年	2000.97	2000.38	2002.14	2000.81
ノード数	8,825	2,566	2,112	1,812
(比率)	100%	29.08%	23.93%	20.53%
アーク数	37,366	10,131	7,802	6,641
アーク / ノード	4.23	3.95	3.69	3.67
キーワード	control	fin	parallel	visual
	robot	fish	singularity	camera
	system	adaptive	parallel manipulator	object
	manipulator	dynamic	workspace	servoing
	dynamic	swimming	platform	image
	controller	tracking	manipulator	visual servoing
	model	sliding	mechanism	force
	method	control	redundant	vision
	based	underwater	parallel robot	grasping
paper	controller	joint	hand	
	SubCI-4	SubCI-5	SubCI-6	SubCI-7
平均発行年	1999.82	2002.11	1998.60	2000.52
ノード数	929	842	320	107
(比率)	10.53%	9.54%	3.63%	1.21%
アーク数	3064	2156	851	160
アーク / ノード	3.30	2.56	2.66	1.50
キーワード	flexible	learning	calibration	torque
	link	fuzzy	measurement	drive
	vibration	learning control	robot calibration	joint torque
	flexible manipulator	neural	accuracy	joint
	fuzzy	iterative learning control	error	motor
	am	iterative learning	pose	torque sensor
	elastic	network	kinematic calibration	linear brushless
	dynamic	neural network	identification	disturbance
	flexible link	ilc	kinematic	sensor
link flexible	adaptive	repeatability	drive train	

論文の発行件数（累積）を見ると，図 4.13 に示すように，1990 年以降，SubCl-6（キャリブレーション）の成長が鈍化している．これは，レーザセンサやビデオカメラなどによるキャリブレーション技術が成熟してきたことを反映しているものと考えられる．

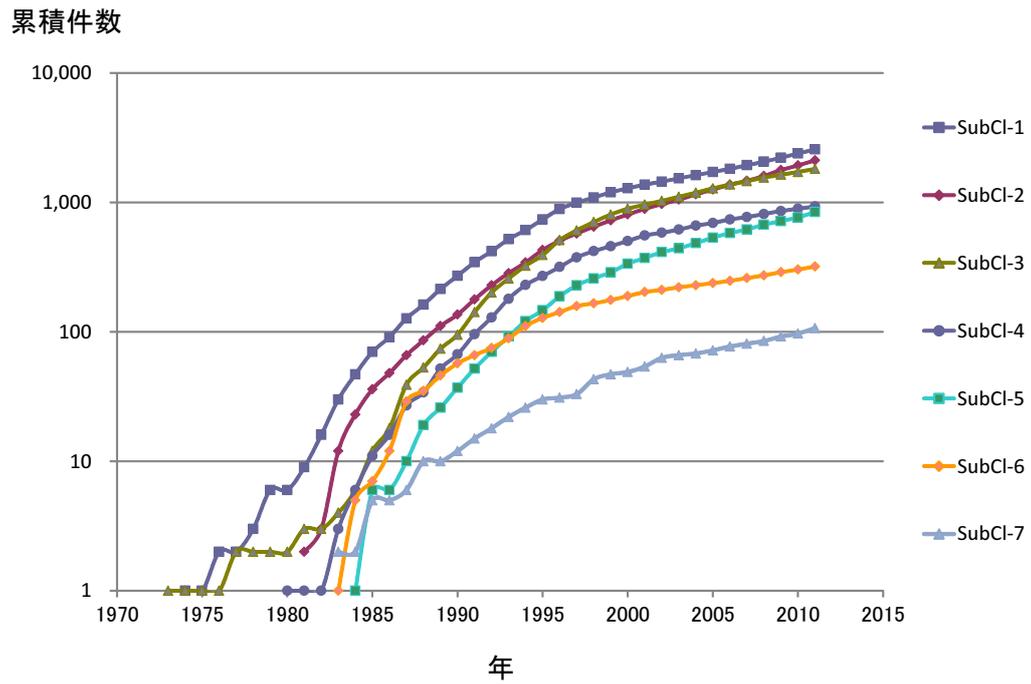


図 4.13: Cluster 2 の上位 7 サブクラスターにおける論文発行の累積件数

次に、上記の上位7サブクラスターにおいて、学术论文の発行件数の多い国と研究機関を表4.9に示す。なお、学術俯瞰マップ作成システムでは、共著の場合には、著者の所属機関毎に件数をカウントしている。例えば、著者Aの所属がM国X研究機関、著者Bの所属がM国Y研究機関、著者Cの所属がN国Z研究機関、著者Dの所属がN国Z研究機関の場合、M国2件、N国1件、X研究機関1件、Y研究機関1件、Z研究機関1件としている。

表4.9を見ると、Cluster 2（マニピュレータ）の各分野では、おしなべて日本が強味を見せているが、SubCl-6（キャリブレーション）のように日本が国と研究機関のどちらもTop 5に入っていない分野がある。

表 4.9: Cluster 2 の上位 7 サブクラスターにおける上位 5ヶ国と 5 研究機関

	Cluster 2 マニピュレータ (8,825件)	SubCl-1 適応制御 水中ロボット (2,566件)	SubCl-2 パラレル マニピュレータ (2,112件)	SubCl-3 ビジュアルサーボ (1,812件)
著者の所属機関 の国籍	USA 2,487 Peoples R China 1,162 Japan 896 Canada 845 South Korea 650	USA 740 Peoples R China 319 Canada 223 Japan 223 South Korea 193	USA 630 Peoples R China 409 Canada 267 Japan 149 South Korea 141	USA 533 Japan 311 France 188 Peoples R China 177 South Korea 136
著者の所属機関	Nanyang Technol Univ 138 Shanghai Jiao Tong Univ 97 Nat'l Univ Singapore 83 Harbin Inst Technol 75 Clemson Univ 75	Nanyang Technol Univ 47 Harbin Inst Technol 36 CICESE 29 Carnegie Mellon Univ 27 MIT 26	Shanghai Jiao Tong Univ 34 Tsinghua Univ 34 McGill Univ 32 Tianjin Univ 29 Univ Laval 28	Shanghai Jiao Tong Univ 36 Ritsumeikan Univ 28 Chinese Univ Hong Kong 24 Nanyang Technol Univ 21 CARNEGIE MELLON UNIV 20
	SubCl-4 フレキシブル マニピュレータ (929件)	SubCl-5 学習制御 (842件)	SubCl-6 キャリブレーション (320件)	SubCl-7 トルク制御 (107件)
著者の所属機関 の国籍	USA 231 Canada 112 Japan 90 Peoples R China 67 Iran 64	USA 182 Peoples R China 139 Taiwan 134 South Korea 79 Japan 69	USA 108 South Korea 30 Peoples R China 29 Canada 23 England 20	Japan USA Canada Taiwan Germany
著者の所属機関	Natl Univ Singapore 32 Univ Sheffield 28 Iran Univ Sci & Technol 28 Univ Toronto 17 Clemson Univ 15	Nanyang Technol Univ 31 Yuan Ze Univ 22 Nat'l Univ Singapore 19 Bogazici Univ 14 Monash Univ 14	Harbin Inst Technol 8 FLORIDA ATLANTIC UNIV 8 Birla Inst Technol & Sci 6 Univ Zaragoza 6 Ajou Univ 5	Canadian Space Agcy 7 Osaka Univ 5 McGill Univ 5 MIT 4 Univ Utah 4 Linkoping Univ 4

#### 4.4.5 Cluster 3（手術ロボット）の分析

Cluster 3 を構成する 4,871 件の論文の中の入次数，すなわち次数中心性を見ると，図 4.14 に示すようになる。

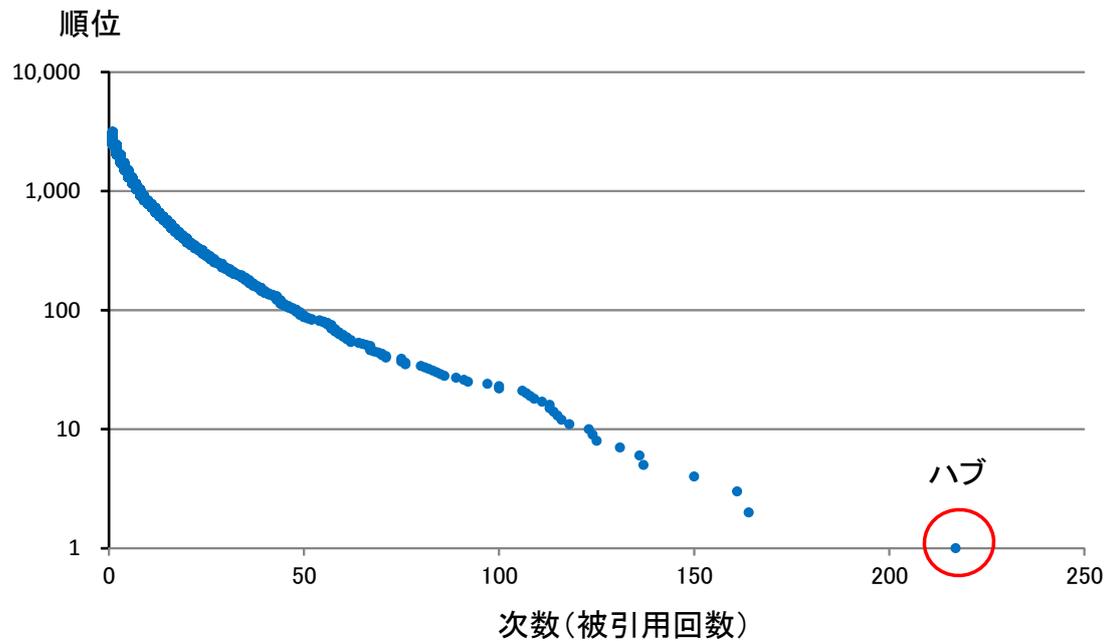


図 4.14: Cluster 3 における次数中心性の分布

そして，Cluster 3 のハブとなっている論文は，下記の論文である。

Thomas E. Ahlering, Douglas Skarecky, David Lee, Ralph V. Clayman (Department of Urology, University of California-Irvine) :

“ Successful transfer of open surgical skills to a laparoscopic environment using a robotic interface: Initial experience with laparoscopic radical prostatectomy ”

JOURNAL OF UROLOGY, vol.170, no.5, pp.1738-1741, 2003

Cluster 3 内の被引用回数：217 回

Web of Science 全体での被引用回数：267 回

所属サブクラスター：SubCl-3

Cluster 3 をサブクラスターに分割すると，図 4.15 に示すように 31 個に分割され，6 個のサブクラスターが上位を占めた。

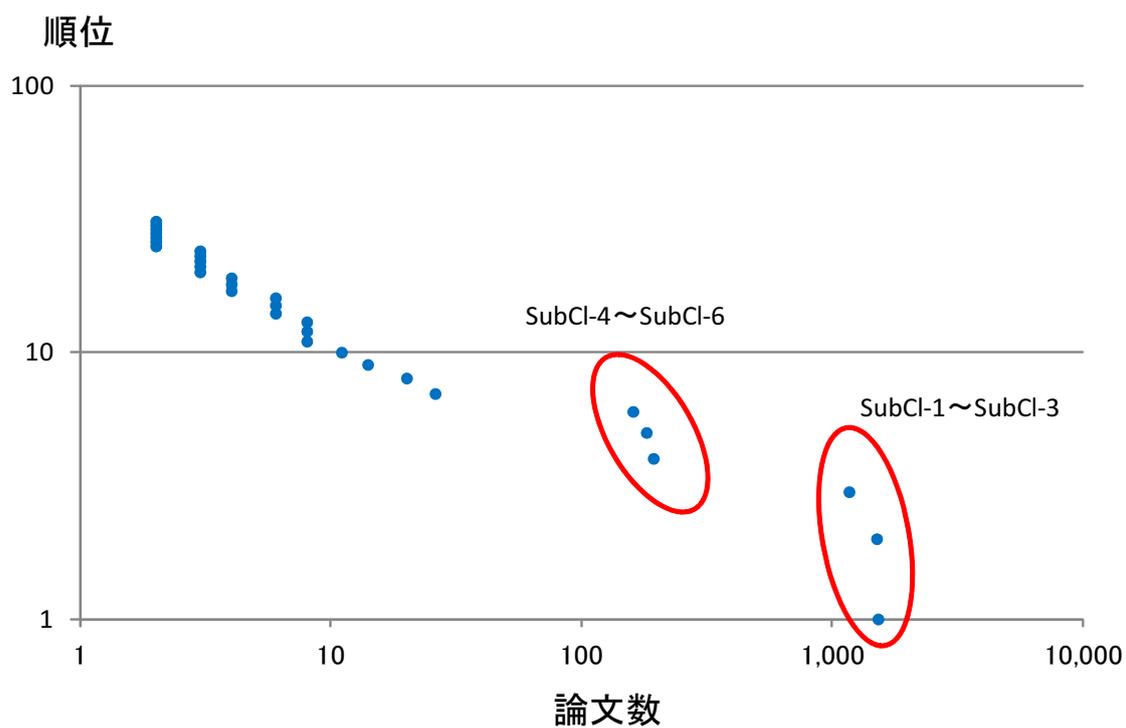


図 4.15: Cluster 3 のサブクラスターを構成する論文数の分布

その6個のサブクラスターに関する分析結果を表4.10に示す。

特徴語からサブクラスターに名称を付けるとすれば、SubCI-1は子宮手術、SubCI-2は心臓手術、SubCI-3は前立腺手術、SubCI-4は腎臓手術、SubCI-5は膀胱手術、SubCI-6はカテーテル手術となる。SubCI-1からSubCI-5は、人体の特定部位の手術に関する研究分野であるが、SubCI-6（カテーテル手術）は手術手法の研究分野である。なお、Cluster 3の特徴語については、TF（Term Frequency）の上位10個を採用しているため、表4.3と異なっている。

表4.10: Cluster 3の上位6サブクラスター

	Cluster 3 全 体	SubCI-1	SubCI-2	SubCI-3
平均発行年	2007.13	2006.35	2005.87	2008.84
ノード数	4,871	1,519	1,500	1,164
(比率)	100%	31.18%	30.79%	23.90%
アーク数	30,296	10,526	5,455	6,998
アーク / ノード	6.22	6.93	3.64	6.01
キーワード	robotic	hysterectomy	coronary	prostatectomy
	surgery	laparoscopic	force	radical
	patient	pyeloplasty	artery	radical prostatectomy
	robot	vinci	valve	continence
	laparoscopic	patient	system	prostate
	surgical	cancer	mitral	cancer
	assisted	operative	needle	margin
	system	assisted laparoscopic	bypass	ralp
	prostatectomy	system	coronary artery	patient
time	robotic surgery	heart	retropubic	
	SubCI-4	SubCI-5	SubCI-6	
平均発行年	2009.37	2009.15	2009.18	
ノード数	193	181	160	
(比率)	3.96%	3.72%	3.28%	
アーク数	856	965	434	
アーク / ノード	4.44	5.33	2.71	
キーワード	nephrectomy	cystectomy	catheter	
	partial nephrectomy	radical cystectomy	ablation	
	partial	bladder	aneurysm	
	renal	bladder cancer	atrial	
	rpn	diversion	pancreatic	
	tumor	radical	catheter ablation	
	laparoscopic partial nephrectomy	urinary diversion	navigation	
	lpn	rarc	pancreatectomy	
	laparoscopic partial	urinary	fibrillation	
	assisted partial nephrectomy	node	aortic	

論文の発行件数（累積）を見ると，図 4.16 に示すように，1980 年代末に SubCI-1（子宮手術），SubCI-2（心臓手術）で始まった手術ロボットの研究は，2000 年以降，多様化が進んでいる．その中でも SubCI-3（前立腺手術）の成長が著しい．

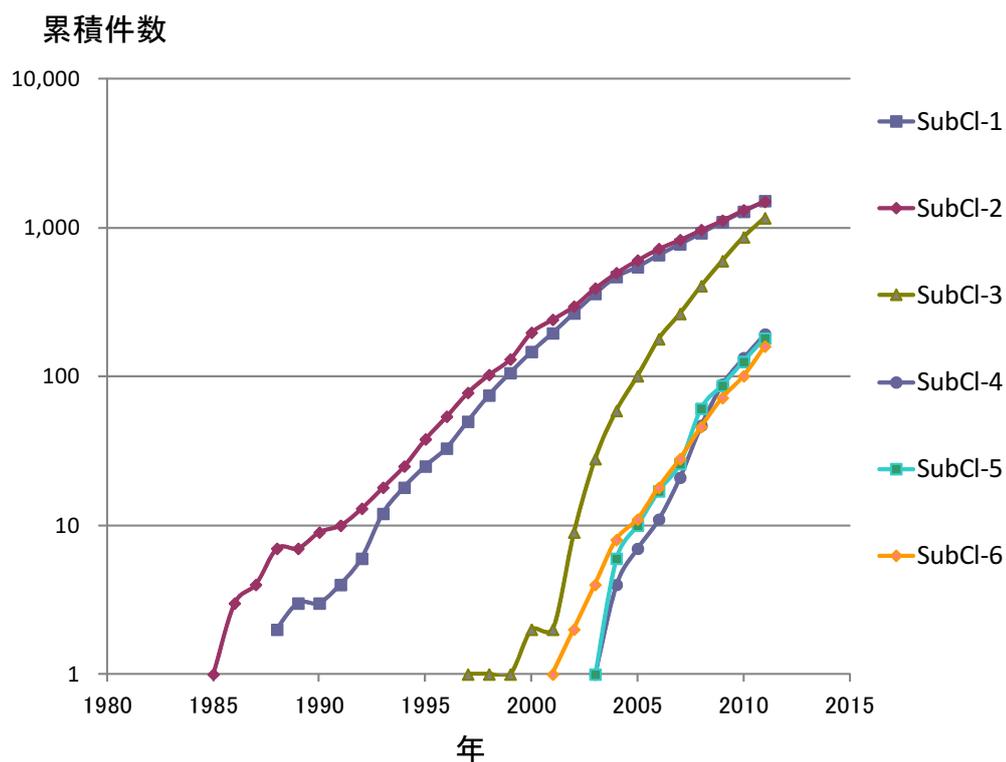


図 4.16: Cluster 3 の上位 6 サブクラスターにおける論文発行の累積件数

上位6サブクラスターにおいて、学術論文の発行件数の多い国と研究機関を表4.11に示す。なお、学術俯瞰マップ作成システムでは、共著の場合には、著者の所属機関毎に件数をカウントしている。例えば、著者Aの所属がM国X研究機関、著者Bの所属がM国Y研究機関、著者Cの所属がN国Z研究機関、著者Dの所属がN国Z研究機関の場合、M国2件、N国1件、X研究機関1件、Y研究機関1件、Z研究機関1件としている。

表4.11を見ると、Cluster 3（手術ロボット）の各分野では、SubCI-2（心臓手術）を除いて、日本は、国と研究機関のどちらもTop 5に入っていない。一方、アジアの国では韓国、アジアの研究機関では Yonsei University が存在感を示している。

また、SubCI-6（カテーテル手術）に係わる技術は、内視鏡の技術に近いものがあるため、我が国の医療機器メーカーや医療機関の活躍が期待される場所である。しかし、関係企業数社にヒアリングしたところ、カテーテル手術ロボットに進出する意向を示す企業はなかった。

このように、サービスロボットのキラーアプリケーションとなっている Cluster 3（手術ロボット）において我が国の存在感が薄いのは、技術的な問題というよりも、法制度や保険制度などの社会的要因によるものと考えられる。

表 4.11: Cluster 3 の上位 6 サブクラスターにおける上位 5ヶ国と 5 研究機関

	Cluster 3 手術ロボット (4,871件)		SubCI-1 子宮手術 (1,519件)		SubCI-2 心臓手術 (1,500件)		SubCI-3 前立腺手術 (1,164件)	
著者の所属機関 の国籍	USA	4,644	USA	1,375	USA	1,290	USA	1,277
	Germany	748	Germany	226	Germany	354	South Korea	163
	France	554	France	193	England	207	France	120
	England	514	England	112	Japan	203	Italy	118
	South Korea	391	Italy	100	Canada	197	England	103
著者の所属機関	Johns Hopkins Univ	165	Univ Illinois	43	Johns Hopkins Univ	130	Yonsei Univ	79
	Yonsei Univ	151	Yonsei Univ	41	Univ Western Ontario	73	Univ Calif Irvine	59
	Univ Western Ontario	124	Cleveland Clin Fdn	38	Univ London Imperial Coll Sci Technol & Med	73	Univ Chicago	54
	Univ London Imperial Coll Sci Technol & Med	111	Ohio State Univ	37	E Carolina Univ	59	Univ Penn	48
	Cleveland Clin	111	Univ Nebraska	34	Innsbruck Med Univ Cleveland Clin	58	Cornell Univ	44
	SubCI-4 腎臓手術 (193件)		SubCI-5 膀胱手術 (181件)		SubCI-6 カテーテル手術 (160件)			
著者の所属機関 の国籍	USA	217	USA	231	USA	123		
	Belgium	13	England	43	Italy	33		
	Italy	12	Germany	22	England	26		
	South Korea	12	Sweden	15	Canada	22		
	England	11	Spain	14	South Korea	21		
著者の所属機関	Henry Ford Hosp	25	Univ N Carolina	25	Univ Illinois	20		
	Washington Univ	16	Roswell Pk Canc Inst	23	Univ London Imperial Coll Sci Technol & Med	15		
	NCI	13	SUNY Buffalo	17	Univ Western Ontario	10		
	NYU	9	Wake Forest Univ	10	Univ Pisa	8		
	Cleveland Clin	9	Guys Hosp	10	Vrije Univ Amsterdam	7		

#### 4.4.6 Cluster 4 (リハビリ) の分析

Cluster 4 を構成する 4,378 件の論文の中の入次数，すなわち次数中心性を見ると，図 4.17 に示すようになる。

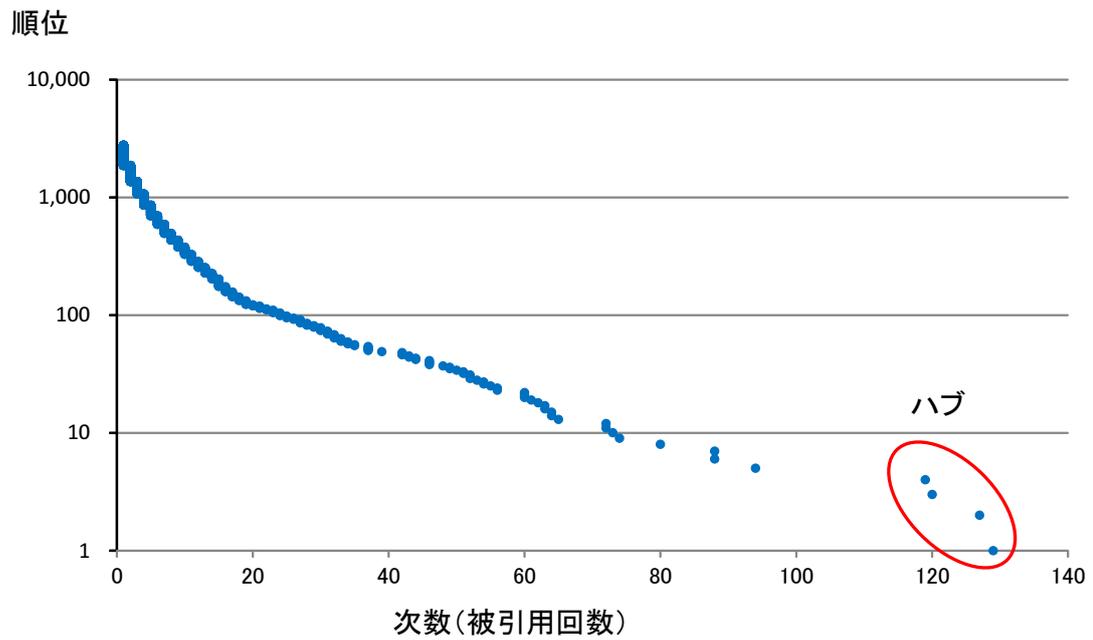


図 4.17: Cluster 4 における次数中心性の分布

そして、Cluster 4 のハブとなっている論文は、下記の4つの論文である。

Reza Shadmehr; Ferdinando A. Mussa-Ivaldi (MIT Dept. of Brain and Cognitive Sciences):

“ Adaptive representation of dynamics during learning of a motor task ”

JOURNAL OF NEUROSCIENCE, vol.14, no.5 (part 2), pp.3208-3224, 1994

Cluster 4 内の被引用回数：129回

Web of Science 全体での被引用回数：875回

所属サブクラスター：SubCI-4

Peter S. Lum; Charles G. Burgar; Peggy C. Shor; Matra Majmundar; Machiel Van der Loos  
(Virginia Commonwealth Univ.) :

“ Robot-assisted movement training compared with conventional therapy techniques for the rehabilitation of upper-limb motor function after stroke ” ARCHIVES OF PHYSICAL MEDICINE AND REHABILITATION, vol.83, no.7, pp.952-959, 2002

Cluster 4 内の被引用回数：127回

Web of Science 全体での被引用回数：284回

所属サブクラスター：SubCI-4

Steve Collins; Andy Ruina; Russ Tedrake; Martijn Wisse (Cornell Univ.) :

“ Efficient bipedal robots based on passive-dynamic walkers ”

SCIENCE, Vol307. no.5712, pp.1082-1085, 2005

Cluster 4 内の被引用回数：120回

Web of Science 全体での被引用回数：416回

所属サブクラスター：SubCI-1

Colombo, G; Joerg, M; Schreier, R; Dietz, V Gery Colombo; Matthias Joerg; Reinhard Schreier;  
Volker Dietz (スイス Univ. Hospital Balgrist) :

“ Treadmill training of paraplegic patients using a robotic orthosis ”

JOURNAL OF REHABILITATION RESEARCH AND DEVELOPMENT, vol.37, no.6,  
pp.693-700, 2000

Cluster 4 内の被引用回数：119回

Web of Science 全体での被引用回数：290回

所属サブクラスター：SubCI-2

Cluster 4 をサブクラスターに分割すると、図 4.18 に示すように 42 個に分割され、10 個のサブクラスターが上位を占めた。

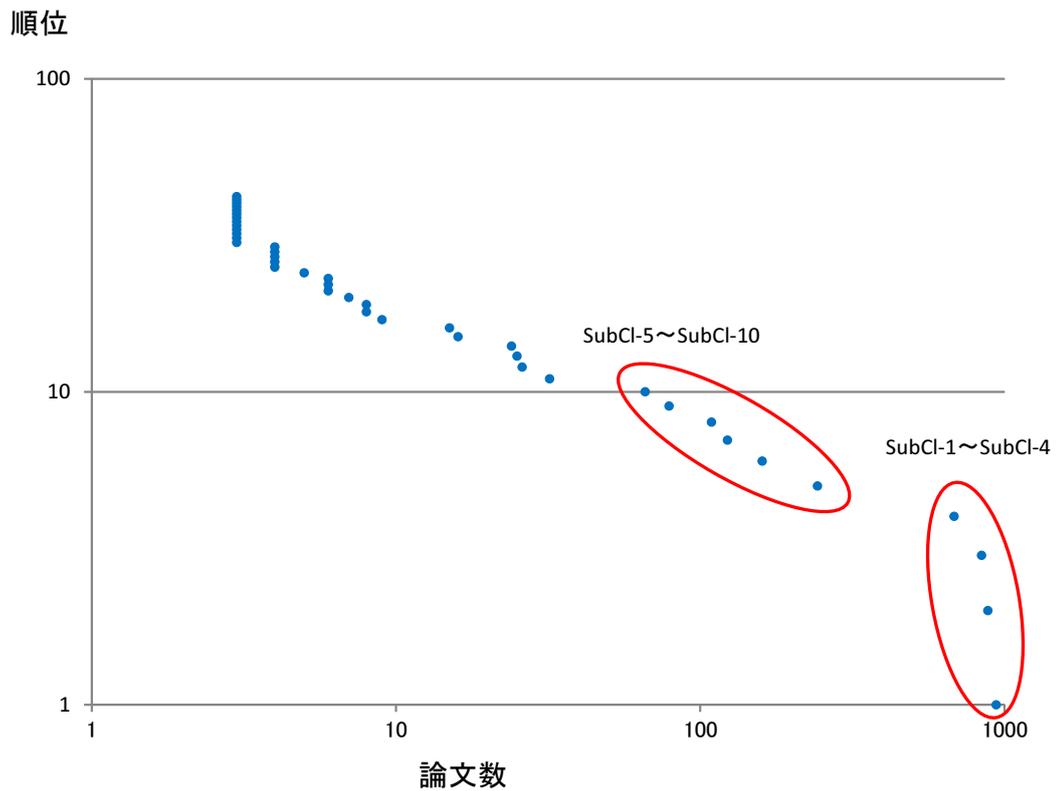


図 4.18: Cluster 4 のサブクラスターを構成する論文数の分布

その 10 個のサブクラスターに関する分析結果をその結果を表 4.12 に示す。

特徴語からサブクラスターに名称を付けるとすれば、SubCI-1 は 2 足歩行，SubCI-2 は脊髄損傷リハビリ，SubCI-3 は遠隔操作，SubCI-4 は脳卒中リハビリ，SubCI-5 は空気圧筋肉，SubCI-6 は柔軟物の把持，SubCI-7 は脚型ロボット，SubCI-8 は建設ロボット，SubCI-9 は車椅子ロボット，SubCI-10 は配管検査ロボットとなる。なお，Cluster 4 の特徴語については，TF (Term Frequency) の上位 10 個を採用しているため，表 4.3 と異なっている。

表 4.12: Cluster 4 の上位 10 サブクラスター

	Cluster 4 全 体	SubCI-1	SubCI-2	SubCI-3	SubCI-4
平均発行年	2005.05	2005.65	2006.42	2004.75	2005.79
ノード数	4,378	939	883	841	683
(比率)	100%	21.45%	20.17%	19.21%	15.60%
アーク数	15,175	3,423	3,047	2,154	3,421
アーク / ノード	3.47	3.65	3.45	2.56	5.01
キーワード	robot	biped	training	internet	stroke
	control	walking	gait	climbing robot	rehabilitation
	system	gait	spinal	teleoperation	therapy
	walking	biped robot	spinal cord	climbing	motor
	force	bipedal	rehabilitation	delay	upper
	paper	humanoid	patient	gecko	subject
	robotic	dynamic walking	exoskeleton	remote	movement
	human	locomotion	cord	time delay	patient
	model	running	stroke	operator	recovery
	design	humanoid robot	brain	adhesion	training

	SubCI-5	SubCI-6	SubCI-7	SubCI-8	SubCI-9	SubCI-10
平均発行年	2005.34	1999.96	2002.37	2004.06	2001.27	2004.59
ノード数(構成比)	243	160	123	109	79	66
(比率)	5.55%	3.65%	2.81%	2.49%	1.80%	1.51%
アーク数	516	247	212	153	108	103
アーク / ノード	2.12	1.54	1.72	1.40	1.37	1.56
キーワード	pneumatic	fabric	walking	construction	wheelchair	pipe
	muscle	food	gait	welding	human	inspection
	actuator	handling	terrain	cobot	power wheelchair	pipeline
	artificial muscle	gripper	legged	steerability	quartz resonator	pipe robot
	pneumatic muscle	material	walking robot	cobots	emotion	inspection robot
	artificial	industry	walking machine	pipe	sensory motor fusion	pipe inspection
	pneumatic artificial	product	quadruped	construction robot	motor fusion	gas pipeline
	pneumatic artificial muscle	limp	leg	torch	resonator	gas
	mckibben	food industry	legged robot	cutting	path	tube
	pressure	garment	planning	ssrms	sensor	diameter

論文の発行件数（累積）を見ると，図 4.19 に示すように，上位 4 つのサブクラスターがほぼ同じような動きしているが，その中でも近年，SubCl-2（脊髄損傷リハビリ）の伸びが大きく，平均発行年も若くなっている．これは，脊髄損傷者に対するリハビリが普及してきたことを反映していると考えられる．また，SubCl-6（柔軟物の把持）の伸び方が 1990 年代半ばから低下している．

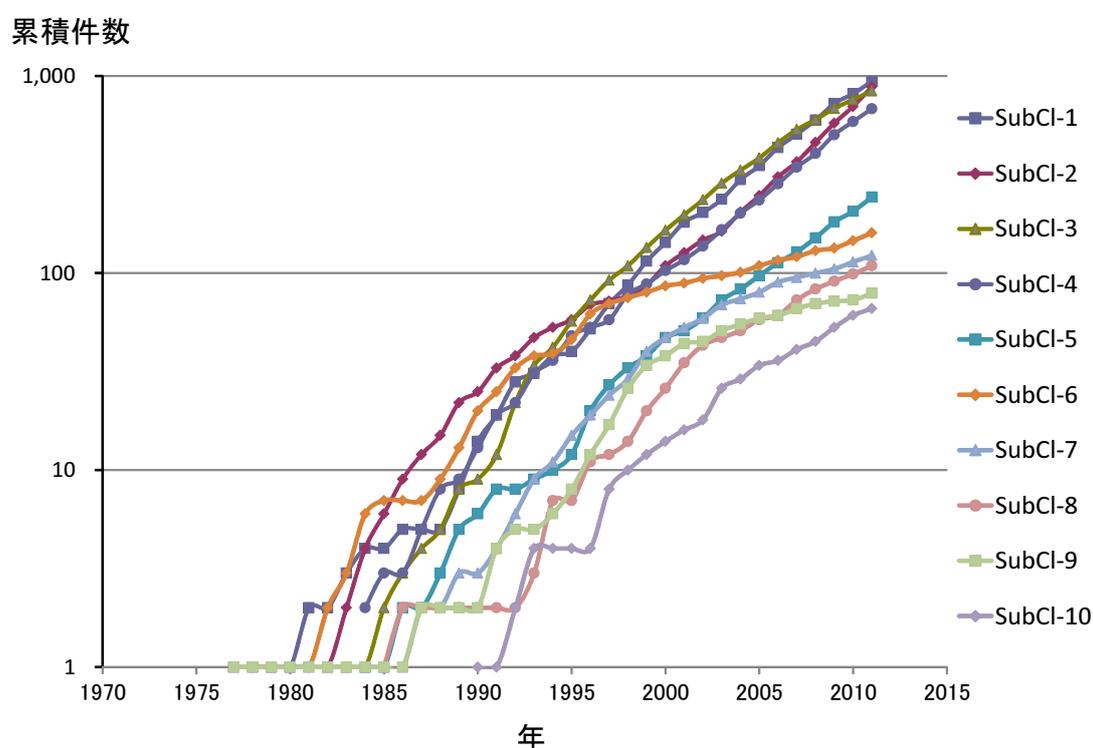


図 4.19: Cluster 4 の上位 10 サブクラスターにおける論文発行の累積件数

上位 10 サブクラスターにおいて、学術論文の発行件数の多い国と研究機関を表 4.13 に示す。なお、学術俯瞰マップ作成システムでは、共著の場合には、著者の所属機関毎に件数をカウントしている。例えば、著者 A の所属が M 国 X 研究機関、著者 B の所属が M 国 Y 研究機関、著者 C の所属が N 国 Z 研究機関、著者 D の所属が N 国 Z 研究機関の場合、M 国 2 件、N 国 1 件、X 研究機関 1 件、Y 研究機関 1 件、Z 研究機関 1 件としている。

表 4.13 を見ると、Cluster 4 の分野では、SubCl-4（脳卒中リハビリ）を除いて、日本が Top 5 に入っている。

表 4.13: Cluster 4 の上位 10 サブクラスターにおける上位 5ヶ国と 5 研究機関

	Cluster 4 リハビリ (4,378件)	SubCl-1 二足歩行 (939件)	SubCl-2 脊髄損傷リハビリ (883件)	SubCl-3 遠隔操作 (841件)	SubCl-4 脳卒中リハビリ (683件)
著者の所属機関 の国籍	USA 2,901 Japan 940 Italy 517 South Korea 396 Canada 390	USA 412 Japan 255 France 125 South Korea 114 Peoples R China 100	USA 799 Japan 208 Italy 198 Switzerland 139 Germany 90	USA 372 Japan 164 Peoples R China 124 Spain 119 England 98	USA 947 Canada 162 Italy 152 England 96 Netherlands 58
著者の所属機関	MIT 170 Northwestern Univ 136 Univ Calif Irvine 104 Univ Michigan 88 Harvard Univ 73	Univ Michigan 37 Korea Adv Inst Sci & Technol 23 Ohio State Univ 22 Delft Univ Technol 22 Tokyo Inst Technol 21 MIT 21 Univ Calif Berkeley 21	Univ Calif Los Angeles 64 Univ Calif Irvine 50 Northwestern Univ 48 Scuola Super Sant Anna 39 Univ Michigan 30	Keio Univ 28 Univ Portsmouth 28 Univ Calif Berkeley 19 Michigan State Univ 18 Univ Politecn Madrid 17	MIT 107 Northwestern Univ 65 Cornell Univ 52 Univ Calif Irvine 49 Univ Maryland 44
	SubCl-5 空気圧筋肉 (243件)	SubCl-6 柔軟物の把持 (160件)	SubCl-7 脚型ロボット (123件)	SubCl-8 建設ロボット (109件)	SubCl-9 車椅子ロボット (79件)
著者の所属機関 の国籍	USA 101 Japan 68 South Korea 43 France 32 Peoples R China 24	USA 36 England 32 Japan 13 Portugal 12 Greece 12 South Korea 12	Japan 34 USA 28 Italy 13 Poland 13 Spain 11 South Korea 11	USA 53 Japan 40 South Korea 35 Spain 10 Germany 9	Japan 33 USA 32 Greece 8 Australia 6 France 6
著者の所属機関	Univ Ulsan 16 Tokyo Inst Technol 11 Vanderbilt Univ 9 Okayama Univ 7 Huazhong Univ Sci & Technol 7 Zhejiang Univ 7	Univ Coimbra 9 Hong Kong Polytech Univ 8 Univ Toronto 7 Univ Patras 6 Univ SW Louisiana 6	Warsaw Univ Technol 9 Nanyang Technol Univ 9 Univ Penn 5 CSIC 5 Erciyes Univ 5	Hanyang Univ 12 Northwestern Univ 8 Univ Delaware 6 Korea Univ 6 Univ Pittsburgh 5	Univ Pittsburgh 9 Univ Tokyo 8 Natl Tech Univ Athens 5 Hiroshima Univ 4 SUNY Stony Brook 3 Univ Porto 3 Australian Natl Univ 3
	SubCl-10 配管検査ロボット (66件)				
著者の所属機関 の国籍	Peoples R China 19 Japan 16 South Korea 15 England 8 USA 7				
著者の所属機関	Shanghai Jiao Tong 6 Sungkyunkwan Univ 4 Toshiba Corp 3 Univ Durham 3 Harbin Inst Technol 3 Korea Atom Energy Res Inst 3				

## 4.5 本章のまとめ

米 Thomson Reuters 社の Institute for Scientific Information (ISI) 部門によって提供されている3つのデータベース (SCI-EXPANDED, SSCI, A-HCI) において、トピックに”Robot\*”を含む論文は、米 Thomson Reuters 社が提供する Web of Science を使用して検索すると、2011年末の時点で53,500件あった。

東京大学総合研究機構イノベーション政策研究センターの学術俯瞰マップ作成システムを利用して論文間の引用関係からネットワークを作成すると、34,948件 (65.3%) が最大連結成分となっており、これを引用論文ネットワークとした。

掲載された学術雑誌の主題分野分類を見ると、Technology (技術) が全体の約75%を占めているが、Life Sciences & Biomedicine (生命科学・生体臨床学) も約18%と無視できない件数があることがわかった。その他、Social Science (社会科学) が1,197件 (2.1%)、Arts & Humanities (芸術・人文) が88件 (0.2%) 存在し、ロボットに関する研究が理系の学術分野を超えて多様化していることを明らかにした。

また、個別の主題分野で1,000件以上の論文が掲載されているのは、Engineering (工学) 11,002件、Computer Science (コンピュータサイエンス) 9,892件、Robotics (ロボット工学) 9,882件、Automation & Control Systems (オートメーション・制御システム) 7,754件、Surgery (外科学) 1,842件、Instruments & Instrumentation (機器・計装) 1,777件、Urology & Nephrology (泌尿器学・腎臓学) 1,500件、Mathematics (数学) 1,065件、Neurosciences & Neurology (神経科学・神経学) 1,008件であった。

引用論文ネットワーク内のリンクは十分に発達しており、1986年発表の2件の論文が圧倒的な次数中心性を示し、引用論文ネットワークのハブとなっていることが分かった。

また、引用論文ネットワークをクラスタリングすると、218個のクラスターに分割することができたが、上位4クラスターと、それ以下のクラスターの間には、所属する論文数の面で大きな差があった。

上位4クラスターの発達の経緯は、ロボットと実社会の関係を映したものとなっていることが分かった。

特に、Cluster 3 (手術ロボット) は、2000年に米インテュイティヴ・サージカル社のダ・ヴィンチが米国食品医薬品局 (FDA) から承認を受けて以降、医工連携による応用研究が急増しており、サービスロボットのキラーアプリケーションとなっていることがうかがわれる。

5位以下の中小クラスターについても、今後の成長が期待できるという観点から、平均発行年が若い9個のクラスターについて分析した。

その中で、ロボット倫理学 (Roboethics: Robot Ethics) を扱う Cluster 30 (倫理・道徳) を発見できた。

ヒト共生型のサービスロボットが社会に受け入れられて行く上で、この研究分野が重要な役割を果たすものと予想される。

さらに、上位4クラスターをより詳細に分析する観点から、各クラスターをひとつのネットワークと見なして、そのハブとなっている論文を特定した。

また、各クラスターをサブクラスターに分割して分析した。

その結果、Cluster 1（移動ロボット）のSubCI-5（ヒューマンインタラクション）やCluster 3（手術ロボット）のSubCI-3（前立腺手術）のように急成長している研究分野を発見できた。

一方、日本のロボット研究は、英語論文というハンデを負いながらも現時点では、多くの研究分野で世界的に存在感を示している。

しかし、Cluster 3（手術ロボット）、Cluster 9（地球観測）、Cluster 23（人工筋肉）、Cluster 25（骨再生医療）、Cluster 30（倫理・道徳）、Cluster 31（障害検出・分離）のように日本の存在感が薄い分野がある。

さらに、サブクラスターまで見ると、Cluster 1（移動ロボット）のSubCI-7（探索型ロボット）、Cluster 2（マニピュレータ）のSubCI-6（キャリブレーション）、Cluster 4（リハビリ）のSubCI-2（脊髄損傷リハビリ）のように日本の存在感が薄い分野がある。

ここで特に問題と考えられるのは、世界で急速に成長し、サービスロボットのキラーアプリケーションともいえるCluster 3（手術ロボット）の分野である。SubCI-2（心臓手術）を除いて、日本は、国と研究機関のどちらもTop 5に入っていない。一方、アジアの国では韓国、アジアの研究機関ではYonsei Universityが存在感を示している。また、SubCI-6（カテーテル手術）に係わる技術は、内視鏡の技術に近いものがあるため、我が国の医療機器メーカーや医療機関の活躍が期待される場所であるが、進出意欲を示すところは見あたらない。このように、Cluster 3（手術ロボット）において、我が国の存在感が薄いのは、技術的な問題というよりも、法制度や保険制度などの社会的要因によるものではないかと考えられる。

以上のような分析を利用すれば、研究者個人レベルでは、研究室の研究テーマを成長分野に振り向けていく、または、先人の業績を含めて成熟した研究分野を集大成してその分野の大家を目指すなどの研究戦略を検討することができると考えられる。

また、研究支援機関においては、日本が不得手としている研究分野に政策資源を優先配分して早期にキャッチアップを図る、または、選択と集中の観点から日本が優位性を示している分野に政策資源を重点配分するなどの施策展開を検討することができると考えられる。

## 第5章 結論

ここまでの各章において、本論文の背景、目的及び「知」はネットワーク構造を有するとされていること等について説明した後、ネットワーク分析手法によってロボット研究の知の構造を把握することを試みた。具体的には、日本のロボット工学分野の研究者ネットワークの現状、日本出身研究者の採るべき国際的な連携戦略及びロボットに関する学術研究の現状について分析した。

本章では、5.1 節で各章の内容をまとめ、5.2 節で本論文の寄与について説明する。最後に、5-3 節で本論文の研究成果を踏まえた今後の課題と展望について述べることとする。

### 5.1 本論文のまとめ

第1章では、本論文の背景として、実社会との関係の深化により、ロボットに関する研究が急増するとともに、その内容も多様化しており、人材の有効活用や重点分野の選択などでロボットに関するイノベーションを促進するためには、ロボット研究に関する知の構造を把握することが重要であると考えられることを述べた。

そのために、共著と引用という学術研究において生じる代表的なネットワーク活動に着目し、学術論文の共著関係から導き出される研究者ネットワークと、学術論文の引用関係から導き出される引用論文ネットワークを分析対象として、ロボットに関する研究の知の構造を明らかにすることが本論文の目的であることを説明した。

さらに、東京大学の「知の構造化」プロジェクトを基に、「知」はクラスター構造を有するネットワークとして記述され、ネットワーク分析を行うことで「知」の構造を把握できることを説明した。また、ネットワーク分析についての関連研究を整理するとともに、社会的ネットワーク分析の基本的な用語と使用した分析ツールを説明した。

第2章では、日本におけるロボット工学分野の研究者ネットワークを分析した。まず、日本ロボット学会誌の創刊（1983年）から2010年末までの間に掲載された全ての査読付き論文1,912件を対象として、2,736名の著者と6,531本の共著関係を抽出した。そして、代表的な社会的ネットワーク分析ソフトウェアであるUCINET（Ver.6.207）を用いて、共著関係のネットワークを作成し、2,032名からなる最大連結成分を日本におけるロボット工学の研究者ネットワークとし、分析対象とした。

この研究者ネットワークは、スケールフリー性、スモールワールド性、クラスター性という複雑ネットワークとしての一般的な特徴を有していることが分かった。これにより、複雑ネットワークに関する先行研究の成果を適用することが可能となるものと考えられる。

また、抽出されたコアメンバー 710 名に関する中心性の評価から、研究者ネットワークでハブとなっている研究者を把握することができた。また、次数（共著関係の数）以上に、研究者ネットワークの中で重要な位置を占める研究者が存在するという事実を浮かび上がらせることもできた。

さらに、クラスター分析を行うことで、研究者グループの間の近縁関係を明らかにした。また、独立集団を研究者ネットワークに取り込んだり、遠い関係のクラスタを繋いだりしている NEDO プロジェクトの存在を明らかにするとともに、そこから生まれた学術論文が優れた評価を受けていることを確認できた。

そして、ノードに代わってクラスター単位で研究者ネットワークを粗視化し、全体構造を簡潔に示した。特に、クラスター間を繋ぐブリッジの役を担っている研究者の重要性を日本ロボット学会の論文賞の受賞比率から明らかにし、構造的空隙を埋めるネットワーク活動とイノベーションの関係の深さを示すことができた。また、クラスター同士の中心性を分析することで、研究者ネットワークの中で、構成員数以上に重要な役割を担う可能性を有するクラスターの存在を浮かび上がらせることができた。

第3章では、研究者ネットワークを対象とした分析の応用例として、ロボット工学分野の日本出身研究者が国際的な研究者ネットワークにおいて、どのような連携戦略を採ることが効果的なのかを検討した。まず、IEEE/T-RO の創刊（1983 年下期）から 2010 年末までの間に掲載された査読付き論文 778 件の共著関係から生成される研究者ネットワークと、同じ時期の日本ロボット学会誌に掲載された査読付き論文 543 件の共著関係から生成される研究者ネットワークを比較した。

その結果、当初の予想に反して、IEEE/T-RO の研究者ネットワークの方が日本ロボット学会誌よりもネットワークの連携速度が遅いことが分かった。そのため、IEEE/T-RO の研究者ネットワークには、より多くの構造的空隙が存在していることになる。イノベーションを促進する観点からは、その構造的空隙を埋めるようなネットワーク活動が重要とされており、日本出身研究者も積極的にこれを担うことが期待されている。また、構造的空隙を埋めるようなネットワーク活動は、日本出身研究者にとっても、多様な研究ノウハウを取得するとともに、自らの研究成果や研究思想を広く伝播することが期待できるなどの利点がある。特に、国際的な研究者ネットワークの中で、日本出身研究者が活躍するためには、日本出身研究者が含まれていない集団との連携が重要である。その際、相手となる集団の中で、次数中心性だけでなく媒介中心性などから適切な相手研究者を選んで連携することが望ましい。

もうひとつの連携戦略としては、国際的な研究者ネットワークにおける自らの役割を強化

するために、ネットワーク内の中心性を高めることである。その際、適切な連携相手を選べば、一気にネットワーク内の中心性を高めることが可能であることを示すことができた。しかし、分析対象とした研究者の事例では、連携候補の研究者とは既知の関係であっても、積極的に共同研究に取り組める状況とはなっておらず、何かしらのインセンティブが求められていた。

NEDO や JST や JSPS などの研究支援機関においては、構造的空隙に関する情報提供を行うとともに、上記の観点を踏まえて、戦略的に客員研究員や留学生の交換などの人的交流や共同研究プロジェクトなどを支援することが期待される。また、小規模な研究組織でも国際連携共同研究体の設立に取り組めるように、資金提供のみならず事務的なサポートも含めた支援策を構築することも期待される。

第4章では、実社会との関係が深化するにともない、多様化が進むロボットに関する学術研究の全体を俯瞰した。まず、米 Thomson Reuters 社の Institute for Scientific Information (ISI) 部門によって提供されている3つのデータベース (SCI-EXPANDED, SSCI, A-HCI) において、トピックに“Robot\*”を含む論文を米 Thomson Reuters 社が提供する Web of Science を使用して検索した。2011 年末の時点で抽出された論文 53,500 件の引用関係から東京大学総合研究機構イノベーション政策研究センターが開発した学術俯瞰マップ作成システムを利用してネットワークを作成すると、34,948 件 (65.3%) が最大連結成分となっており、これを引用論文ネットワークとした。

掲載された学術雑誌の主題分野分類を見ると、Technology (技術) が全体の約 75% を占めているが、Life Sciences & Biomedicine (生命科学・生体臨床学) も約 18% と無視できない件数があることがわかった。その他、Social Science (社会科学) が 1,197 件 (2.1%)、Arts & Humanities (芸術・人文) が 88 件 (0.2%) 存在し、ロボットに関する研究が理系の学術分野を超えて多様化していることを明らかにした。

引用論文ネットワーク内のリンクは十分に発達しており、1986 年発表の2件の論文が圧倒的な次数中心性を示し、引用論文ネットワークのハブとなっていることが分かった。また、研究分野ごとの特徴を見るため、引用論文ネットワークをクラスタリングすると、218 個のクラスターに分割することができたが、上位4クラスターと、それ以下のクラスターの間には、所属する論文数の面で大きな差があった。上位4クラスターとは、第1位クラスター (移動ロボット)、第2位クラスター (マニピュレーター)、第3位クラスター (手術ロボット) 及び第4位クラスター (リハビリ) である。上位4クラスターの発達の経緯は、ロボットと実社会の関係を映したものとなっていることが分かった。特に、第3位クラスター (手術ロボット) は、2000 年に米インテュイティヴ・サージカル社のダ・ヴィンチが米国食品医薬品局 (FDA) から承認を受けて以降、医工連携による応用研究が急増しており、サービスロボットのキラーアプリケーションとなっていることを示しているものと考えられる。

第5位以下の中小クラスターについても、今後の成長が期待できるという観点から、平均発行年が若い9個のクラスターについて分析した。その中で、ロボット倫理学（**Robotics: Robot Ethics**）を扱う第30位クラスターを発見できた。今後、ヒト共生型のサービスロボットが社会に受け入れられて行く上で、この研究分野が重要な役割を果たすものと予想される。

さらに、上位4クラスターをより詳細に分析するために、各クラスターをひとつのネットワークと見なして、そのハブとなっている論文を特定した。また、各クラスターをサブクラスターに分割して分析した。その結果、移動ロボットのクラスターの中の第5位サブクラスター（ヒューマンインタラクション）や手術ロボットのクラスターの中の第3位サブクラスター（前立腺手術）のように急成長している研究分野を発見できた。

一方、著者が所属している研究機関の国籍を基に各国のロボット研究の現状を比較すると、日本のロボット研究は、英語論文というハンデを負いながらも現時点では、多くの研究分野で世界的に存在感を示している。しかし、手術ロボットのクラスター、第9位クラスター（地球観測）、第23位クラスター（人工筋肉）、第25位クラスター（骨再生医療）、第30位クラスター（倫理・道德）、第31位クラスター（障害検出・分離）のように日本の存在感が薄い分野があった。さらに、サブクラスターまで見ると、移動ロボットのクラスターの第7位サブクラスター（探索型ロボット）、マニピュレータのクラスターの中の第6位サブクラスター（キャリブレーション）、リハビリのクラスターの中の第2位サブクラスター（脊髄損傷リハビリ）のように日本の存在感が薄い分野があった。

ここで特に問題と考えられるのは、世界で急速に成長し、サービスロボットのキラーアプリケーションともいえる手術ロボットの分野である。第2位サブクラスター（心臓手術）を除いて、日本は、国と研究機関のどちらも **Top 5** に入っていない。一方、アジアの国では韓国、アジアの研究機関では **Yonsei University** が存在感を示している。また、第6位サブクラスター（カテーテル手術）に係わる技術は、内視鏡の技術に近いものがあるため、我が国の医療機器メーカーや医療機関の活躍が期待される場所であるが、進出意欲を示すところは見当たらない。このように、手術ロボットのクラスターにおいて、我が国の存在感が薄いのは、技術的な問題というよりも、法制度や保険制度などの社会的要因によるものではないかと考えられる。

以上のような分析を利用すれば、研究者個人レベルでは、研究室の研究テーマを成長分野に振り向けていく、または、先人の業績を含めて成熟した研究分野を集大成してその分野の大家を目指すなどの研究戦略を検討することができると考えられる。

また、研究支援機関においては、日本が不得手としている研究分野に政策資源を優先配分して早期にキャッチアップを図る、または、選択と集中の観点から日本が優位性を示している分野に政策資源を重点配分するなどの施策展開を検討することができると考えられる。

## 5.2 本論文の寄与

本研究では、「知」がクラスター構造を有するネットワークとして記述可能とされていることに着目して、ネットワーク分析の手法を用いて、研究者ネットワークと引用論文ネットワークを対象として、ロボット研究の「知」の構造を分析した。

その結果、第2章では、日本のロボット工学のイノベーションを創発する基盤としての研究者ネットワークの構造を把握することができた。これにより、今後、研究者ネットワークの構造を利用した研究プロジェクトやイベントや人材活用などを進めることが望まれる。さらには、研究者ネットワークの構造を積極的に変化させるような政策資源配分やロードマップ策定も望まれる [66]。

第3章では、国際的な研究者ネットワークは、ネットワークの連携速度が遅く、多くの構造的空隙があることがわかった。このような状況を活用して、研究支援機関が国際共同研究プロジェクトの実施や客員研究員・留学生の交換などを戦略的に講じ、日本出身研究者が国際的な研究者ネットワークの中で大きな役割を果たせるよう育成策を検討することが望まれる。

さらに、第4章では、工学のみならず全ての学術分野の引用論文ネットワークからロボットに関する学術研究の全体構造を俯瞰することができた。これにより、個々の研究者は、研究分野の成長性又は成熟度に合わせた研究戦略を採用することができるものと考えられる。また、研究支援機関が研究分野毎の我が国の優位／劣位を戦略的に考慮した施策を展開する際に効果を発揮するものと考えられる。

以上の成果を総合的に活用することで、研究者個人においては、構造的空隙を埋めるような共同研究相手を研究者ネットワーク内で選択し、成長性の高い研究分野で共同研究を実施することができるようになると考えられる。また、この点を研究支援機関に訴求することで、政策資源の獲得も容易になることが期待される。さらに、研究成果である学術論文も論文賞の受賞確率も高いので、引用論文ネットワーク内での中心性も高くなることが期待される。

日本ロボット学会のような学術団体においては、研究者ネットワークの中から適切な人材やクラスターを選択し、組織運営、資金配分、イベント実施、標準化等の公益活動を担当してもらうことで、コミュニティの活性化を図ることができるようになると考えられる。

研究支援機関においては、成長性の高い研究分野や有力な研究者の発見に役立つだけでなく、構造的空隙を埋めるような研究プロジェクトの支援策や国際的な研究者ネットワークの中で活躍できるような若手研究者の育成策や我が国のロボット技術の流出防止策を検討できるようになる。これによって、財政当局から政策資源の拡大を獲得し、ロボットに関するイノベーションを促進することが期待される。

### 5.3 今後の課題

学術論文レベルでのイノベーションが社会に普及していく過程では、特許等の知的財産権が重要な役割を果たすと考えられており、ロボットの分野においても、特許庁において網羅的な調査が行われている [67]。また、学術論文と特許の関連性を測るサイエンスリンケージの研究が各分野で行われている [18, 68]。

今後の課題としては、本論文で把握した日本のロボット工学分野の研究者ネットワークと出願特許の発明者データをマッチングすることが考えられる。これにより、人材育成の面で学術研究がどのような効果を発揮しているかを明らかにすることが考えられる [6]。

また、ロボットに関する特許の共同出願のデータから共同開発ネットワークを構成することも重要な課題であると考えられる。これにより、産学連携や企業間連携の実態を明らかにするとともに、産学連携の促進策を検討することが考えられる [69]。

さらに、特許出願の際に発明者が明細書中に記載する引用文献の中の特許（いわゆる引用特許）を基に、引用特許ネットワークを構成することも重要な課題であると考えられる。これにより、産業技術面からのロボット技術の発展の流れを明らかにするとともに、ロボット業界における技術の中心（ハブ）を把握することが考えられる [70, 71]。

## 謝辞

まず、最初に、御多忙中にも関わらず、本論文の審査をしていただいた池内克史教授、須藤修教授、稲葉雅幸教授、坂田一郎教授、大石岳史准教授に御礼申し上げます。

さて、1981年3月に情報工学の修士課程を修了してから実に27年ぶりに博士課程に戻ってきた私に、東京大学生産技術研究所の池内研究室は、素晴らしい研究環境を与えてくれました。

本研究を進めるに当たって、池内克史教授、工藤俊亮特任助教（現・電気通信大学大学院情報システム学研究科准教授）、大石岳史准教授、佐藤啓宏特任研究員及び岡本泰英特任助教から親切な御指導をいただきました。本研究をまとめることができたのは、皆様の寛容さと優れた指導力のお陰であると感謝しています。

影澤政隆助教、長谷川仁則技官及び秘書の方々には、通信環境の整備や物品の購入や学会発表の事務手続きで、大変、お世話になりました。お陰様で極めて快適な研究生生活を送ることができました。

また、父親と変わらない年齢であるにも拘わらず、友人として受け入れてくれた院生の皆様にも感謝しています。様々な国籍の若い人達と本当に楽しい思い出を作ることができました。

社会的ネットワーク分析の手ほどきをしていただいた七丈直弘・東京大学大学院情報学環准教授（現・文部科学省科学技術政策研究所科学技術動向研究センター上席研究官）には、心からお礼申し上げます。七丈先生の光触媒研究におけるコミュニティ形成の研究が本研究を始める切っ掛けでした。

安田雪・関西大学社会学部教授と松尾豊・東京大学総合研究機構准教授には、ご多忙中にもかかわらず、社会的ネットワーク分析の進め方と心配りについて貴重なアドバイスをいただきました。お陰様で大過なく本研究を進めることができました。

引用論文ネットワークに関して、共同研究を受け入れていただいた東京大学総合研究機構イノベーション研究センターの岩見紫乃さん、森純一郎特任助教（現・東京大学総括プロジェクト機構特任講師）、梶川裕矢特任講師（現・東京工業大学大学院イノベーションマネジメント研究科准教授）には、学術俯瞰マップ作成システムの利用方法を御指導いただくとともに、データの解釈について有益な議論をさせていただきました。本研究において、共著と引用という学術研究において生じる代表的なネットワーク活動をバランス良く分析できた

のは、皆様の御協力の賜物だと思っています。

52歳になって、突然、社会人院生生活を始めた父親を応援してくれた3人の子供達にもお礼を言いたいと思います。人生にはいつでも学ぶ機会があると、君達を感じてくれたのなら、望外の幸せです。

最後に、私の我が儘を7年にわたり暖かく見守ってくれた家内にも、この場を借りて最大限の感謝の意を表します。これからは、できるだけ我が家で夕食を一緒に食べるようにするので、待っていてください。

## 参考文献

- [1] カレル・チャペック: “ロボット (R. U. R.)”, 岩波文庫 32-774-2, 岩波書店, 1989年4月17日.
- [2] 渡辺茂監修, 日本産業用ロボット工業会編: “産業用ロボットの技術”, 日刊工業新聞社, 1979年8月
- [3] 日本ロボット工業会: “21世紀を切り開く日本のロボット産業”, <http://www.jara.jp/other/dl/industry.pdf>
- [4] 日本ロボット外科学会: “da Vinci の紹介”, <http://j-robo.or.jp/da-vinci/index.html>
- [5] 七丈直弘, 馬場靖憲: “イノベーションの創発ネットワーク”, 数理科学, no.537, 2008.
- [6] 馬場靖憲, 後藤晃: “産学連携の実証研究”, 東京大学出版会, 2007.
- [7] 安田雪, 松尾豊: “人工知能学会における研究者ネットワークの分析”, 第19回人工知能学会全国大会 (JSAI 2005), 2A3-02, 2005.
- [8] 安田雪, 松尾豊, 武田英明: “人工知能学会におけるネットワーク構造と変化”, 第20回人工知能学会全国大会 (JSAI 2006), 1F2-1, 2006.
- [9] 松尾豊, 浅田洋平, 石黒周, 松原仁, 橋田浩一: “Webからのロボット研究者のネットワークの抽出”, 第5回計測自動制御学会システムインテグレーション部門学術講演会 (SI2004), pp.326-327, 2004.
- [10] エティエンヌ・ウエンガー, リチャード・マクダーモット, ウィリアム・M・スナイダー, “コミュニティ・オブ・プラクティス”, 翔泳社, 2002年12月17日.
- [11] M. Granovetter: “The Strength of Weak Ties”, The American Journal of Sociology, vol.78, no.6, pp. 1360-1380, 1973年5月.
- [12] ロナルド・S・バート: “競争の社会的構造”, 新曜社, 2006年10月1日.
- [13] K. Borner, C. Chen, K.W. Boyack: “Visualizing knowledge domains”, Annual Review of Information Science and Technology, vol.37, no.1, pp.179-255, 2003.

- [14] H. Small: “ Tracking and predicting growth areas in science ”, *Scientometrics*, vol.68, no.3, pp.595-610, 2006.
- [15] N. Shibata, Y. Kajikawa, Y. Takeda, K. Matsushima: “ Detecting emerging research fronts based on topological measures in citation networks of scientific publications ”, *Technovation*, vol.28, no.11, pp.758-775, 2008.
- [16] N. Shibata, Y. Kajikawa, Y. Takeda, I. Sakata, K. Matsushima: “ Detecting Emerging Research Fronts in Regenerative Medicine by the Citation Network Analysis of Scientific Publications ”, *Technological Forecasting and Social Change*, vol.78, no.2, pp.274-282, 2011.
- [17] 橋本正洋, 坂田一郎, 梶川裕矢, 武田善行, 松島克守: “ サービスイノベーションの分析 ”, 研究・技術計画学会 2008 全国大会予稿集 2B04, 2008.
- [18] 坂田一郎, 佐々木一, 梶川裕矢, 森田朗: “ 特許とイノベーションに関する学術研究の俯瞰 ”, 東京大学・京都大学合同国際シンポジウム 2009, 2009 年 6 月,
- [19] 小宮山宏: “ 知識の構造化 ”, オープンナレッジ, 2004 年 12 月 24 日
- [20] Y. Kajikawa, J. Ohno, Y. Takeda, K. Matsushima, H. Komiyama: “ Creating an academic landscape of sustainability science: an analysis of the citation network ”, *Sustainability Science*, vol.2, no.2, pp.221-231, 2007
- [21] Y. Kajikawa, O. Usui, K. Hakata, Y. Yasunaga, K. Matsushima: “ Structure of knowledge in the science and technology roadmaps ”, *Technological Forecasting and Social Change*, vol.75, no.1, pp.1-11, 2008
- [22] 松島克守, 梶川裕矢, 武田善行, 柴田尚樹, 坂田一郎: “ 知の構造化の技法と応用 ”, 俯瞰工学研究所, 2011 年 12 月 8 日
- [23] N. Shibata, Y. Kajikawa, I. Sakata: “ Link Prediction in Citation Networks ”, *Journal of the American Society for Information Science and Technology*, vol.63, no.1, pp.78-85, 2012
- [24] V. Ittipanuvat, K. Fujita, I. Sakata, Y. Kajikawa: “ Finding linkage between technology and social issue: A Literature Based Discovery approach ” *Journal of Engineering and Technology Management*, vol.32, pp.160-184, 2014
- [25] 東京大学: “ 知の構造化センター ”, [http://www.cks.u-tokyo.ac.jp/japanese/summary/j\\_summary.html](http://www.cks.u-tokyo.ac.jp/japanese/summary/j_summary.html)

- [26] 安田雪: “実践ネットワーク分析”, 新曜社, 2001.
- [27] 金光淳: “社会ネットワーク分析の基礎”, 勁草書房, 2003年12月.
- [28] 松本康: “ジョン・スコット 社会的ネットワーク分析の発展”,  
<http://www.rikkyo.ne.jp/web/ymatsumoto/library/scott2.pdf>
- [29] 松尾豊: “社会ネットワーク分析輪読会”, <http://ymatsuo.com/surveySNA/SNA1-2.pdf>.
- [30] W. Kohler: “The Mentality of Apes”, K. Paul, Trench, Trubner & Company, Limited, 1925.
- [31] K. Lewin: “Principles of topological psychology”, McGraw-Hill, 1936.
- [32] J.L. Moreno: “Who Shall Survive: A New Approach to the Problem of Human Interrelations”, Nervous and Mental Disease Publishing Co., 1934.
- [33] D. Cartwright, F. Harary: “Structural balance: a generalization of Heider’s theory.”, Psychological Review, vol 63(5), pp.277-293, Sep 1956.
- [34] A.R. Radcliffe-Brown: “The Andaman Islanders”, Cambridge University Press, 1922.
- [35] A.R. Radcliffe-Brown: “On Social Structure”, The Journal of the Royal Anthropological Institute of Great Britain and Ireland, vol.70, no.1, pp.1-12, 1940.
- [36] W.L. Warner, L.Srole: “The social systems of American ethnic groups”, Yale University Press, 1945.
- [37] E. Mayo: “Human problems of an industrial civilization”, The Macmillan Company, 1933.
- [38] M. Gluckman: “Custom and conflict in Africa”, Blackwell, 1956.
- [39] J.A. Barnes: “Class and committees in a Norwegian island parish”, Human Relations, vol.7, pp.39-58, 1954.
- [40] E. Bott: “Urban families”, Human Relations, vol.8, pp.345-384, 1955.
- [41] J.C. Mitchell (ed): “Social Network in Urban Setting”, Manchester University Press, 1969
- [42] F. Lorrain, H.C. White: “Structural equivalence of individuals in social networks”, Journal of Mathematical Sociology, vol.1, no.1, pp.49-80, 1971.
- [43] E. Garfield: “Citation indexes for science. A new dimension in documentation through association of ideas”, Science, vol.122, no.3159, pp.108-111, 1955.

- [44] D. Watts, S. Strogatz: “ Collective dynamics of ‘small-world’ networks ”, *Nature*, vol.393, pp.440-442, 1998.
- [45] A.Barabasi, R.Albert: “ Emergence of Scaling in Random Networks ”, *Science*, vol.286, pp.509-512, 1999.
- [46] アルバート＝ラズロ・バラバシ: “ 新ネットワーク思考 ”, 日本放送出版協会, 2002 年 12 月 20 日.
- [47] 増田直紀, 今野紀雄: “ 複雑ネットワーク ”, 近代科学社, 2010 年 4 月 30 日.
- [48] 杉山浩平, 大崎洋之, 今瀬眞: “ 論文の引用・共著関係から何が分かるか? ”, 電子情報通信学会技術研究報告 IN2006-15, pp.85-90, 2006.
- [49] 安田雪: “ ネットワーク分析用ソフトウェア UCINET の使い方 ”, 赤門マネジメント・レビュー, vol.4 no.5, 2005 年 5 月.
- [50] 稲水伸行, 竹嶋斎: “ ネットワーク可視化の技法－ Pajek の使い方 ”, 赤門マネジメント・レビュー, vol.4 no.6, 2005 年 6 月.
- [51] 竹嶋斎, 稲水伸行: “ ネットワーク可視化の技法－ NetDraw の使い方 ”, 赤門マネジメント・レビュー, vol.4 no.7, 2005 年 7 月.
- [52] 東京大学総合研究機構イノベーション政策研究センター: “ 学術俯瞰マップ作成システム ”, <http://academic-landscape.com/>.
- [53] 松尾豊: “ スモールワールドとチャンス発見 ”, 人工知能学会誌, vol.18, no.3, 2003 年 5 月.
- [54] Reka Albert, Albert-Laszlo Barabasi: “ Statistical mechanics of complex networks ”, *REVIEWS OF MODERN PHYSICS*, VOLUME 74, pp.47-97, 2002 年 1 月
- [55] 財団法人未来工学研究所: “ 知識社会研究報告知識構造の可視化に関する調査研究 ”, 内閣府経済社会総合研究所委託事業, 2009 年 3 月.
- [56] M. Faloutsos, P. Faloutsos, C. Faloutsos: “ On Power-Law Relationships of the Internet Topology ”, *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, vol.29, no.4, pp.251-262, 1999.
- [57] R. Albert, H. Jeong, A. Barabasi: “ Error and attack tolerance of complex networks ”, *Nature*, vol.406, pp.378-382, 2000.

- [58] H. Jeong, B. Tombor, R. Albert, Z. Oltvai, A. Barabasi: “ The large-scale organization of metabolic networks ”, *Nature*, vol.407, pp.651-654, 2000.
- [59] R. Sole, M.Montoya: “ Complexity and fragility in ecological networks ”, *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 268, no.1480, pp.2039-2045, 2001.
- [60] M.Nowak, R.May: “Virus Dynamics: Mathematical Principles of Immunology and Virology ”, Oxford Press, 2000.
- [61] R.Pastor-Satorras, A.Vespignani: “ Immunization of complex networks ”, *Physical Review E*, vol.65, 036104, 2002.
- [62] G. Salton, C. Buckley: “Term-weighting approaches in automatic text retrieval”, *Information Processing and Management*, vol.24, no.5, pp.513-523, 1988.
- [63] G. Veruggio, F. Operto: “Roboethics: Social and Ethical Implications of Robotics”, *Springer Handbook of Robotics*, Berlin: Springer Verlag, pp.1499-1524, 2008.
- [64] P. Lin, K.Abney, G.A. Bekey (eds.): “ Robot Ethics: The Social and Ethical Implications of Robotics ”, MIT Press, 2011.
- [65] 久木田水生: “ ロボット倫理学の可能性 ”, 京都大学文学部哲学研究室紀要 : Prospectus, vol.11, 2009.
- [66] 株式会社日本総合研究所, 社団法人日本ロボット学会, 社団法人人工知能学会, 人間工学会: “ ロボット分野におけるアカデミック・ロードマップ報告書 ”, 経済産業省技術戦略マップローリング事業, 2007年3月.
- [67] 特許庁: “ ロボット ”, 平成 18 年度特許出願技術動向調査報告書, 2007年3月.
- [68] 後藤晃, 児玉文雄編: “ 日本のイノベーションシステム ”, 東京大学出版会, 2006.
- [69] H. Inoue, W. Souma, S. Tamada: “ Analysis of cooperative research and development networks on Japanese patents ”, *Informetrics*, vol.4, no.1, pp.89-96, 2010.
- [70] 和田哲夫: “特許の私的経済価値指標としての特許引用と引用三者閉包”, *RIETI Discussion Paper Series 12-J-030*, 2012.
- [71] 岡本洋, 坪下幸寛: “ 特許引用ネットワーク分析 ”, *情報処理*, vol.49, no.3, pp.306-307, 2008.

## 発表文献（査読付き論文）

- [1] 内藤理, 佐藤啓宏, 工藤俊亮, 池内克史: “日本におけるロボット工学の研究者ネットワークの分析”, 日本ロボット学会誌, vol.30, no.6, pp.629-638, 2012.
- [2] 内藤理, 佐藤啓宏, 工藤俊亮, 池内克史: “共著関係から見た国際的な研究者ネットワークにおいて日本出身研究者の採るべき連携戦略”, 日本ロボット学会誌, vol.31, no.6, pp.583-590, 2013.
- [3] 内藤理, 岩見紫乃, 森純一郎, 梶川裕矢, 佐藤啓宏, 工藤俊亮, 池内克史: “実社会との関係形成で変化するロボット研究の現状”, 日本ロボット学会誌, vol.31, no.8, pp.804-815, 2013.

## 発表文献（口頭発表）

- [1] 内藤理, 佐藤啓宏, 工藤俊亮, 池内克史: “日本におけるロボット工学の研究者ネットワークの分析”, 第 28 回日本ロボット学会学術講演会, RSJ2010AC3C3-7, 2010.
- [2] 内藤理, 佐藤啓宏, 工藤俊亮, 池内克史: “日本ロボット学会誌と IEEE/T-RO における研究者ネットワークの比較及び日本出身研究者の採るべき研究戦略”, 第 29 回日本ロボット学会学術講演会, RSJ2011AC3F2-6, 2011.
- [3] 内藤理, 岩見紫乃, 森純一郎, 梶川裕矢, 佐藤啓宏, 工藤俊亮, 池内克史: “実社会との関係形成で変化するロボット研究の現状”, 第 30 回日本ロボット学会学術講演会, RSJ2012AC4M2-4, 2012.

## 発表文献（その他本論文に含まない論文）

- [1] 内藤理: “ロボカップが提案する新たな研究開発管理手法”, 日本ロボット学会誌, vol.20, no.1, pp.35-38, 2002.
- [2] 内藤理, 茂木友貴, 本山司: “アカデミックベンチャーの歴史と創造法の成果”, 日本ベンチャー学会誌, no.6, pp.15-24, 2005.
- [3] 升谷保博, 成瀬正, 長坂保典, 藤井隆司, 渡辺正人, 光永法明, 中川友紀子, 内藤理: “外部カメラを用いたヒト型ロボットによるサッカー競技”, 人工知能学会研究会資料, SIG-Challenge-A901-8(5/9), 2009.
- [4] 升谷保博, 成瀬正, 長坂保典, 藤井隆司, 渡辺正人, 光永法明, 中川友紀子, 内藤理: “外部カメラを用いたヒト型ロボットによるサッカー競技 RoboCup SSL Humanoid の提案と現状”, 第 27 回日本ロボット学会学術講演会, 3S3-01, 2009.
- [5] Tadashi Naruse, Yasuhiro Masutani, Noriaki Mitsunaga, Yasunori Nagasaka, Takashi Fujii, Masato Watanabe, Yukiko Nakagawa, Osamu Naito: “SSL-Humanoid: RoboCup Soccer using humanoid robots under the global vision”, RoboCup 2010 International Symposium, Session B1, 2010.