



政策研究大学院大学
NATIONAL GRADUATE INSTITUTE
FOR POLICY STUDIES

政策研究大学院大学 科学技術イノベーション政策研究センター ワーキングペーパー (SciREX-WP)
National Graduate Institute for Policy Studies, Science for RE-Designing Science,
Technology and Innovation Policy Center (SciREX Center) Working Paper

[SciREX-WP-2022-#02]

論文・特許クラスター分析を用いた脳型AIアクセラレータの学術研究・技術開発動向調査

Investigation of Academic Research and Technology Development Trends of Brain-Inspired AI Accelerator Using Paper and Patent Cluster Analysis

2022/07

Tatsuo Sasaki (National Graduate Institute for Policy Studies)

佐々木達郎(政策研究大学院大学 専門職)



SciREX Center
WORKING PAPER

政策研究大学院大学科学技術イノベーション政策研究センター (SciREX センター)
ワーキングペーパー SciREX-WP-2022-#02

政策研究大学院大学

科学技術イノベーション政策研究センター (SciREX センター)
ワーキングペーパー SciREX-WP-2022-#02

[SciREX-WP-2022-#02]

論文・特許クラスター分析を用いた脳型AIアクセラレータの学術研究・技術開発動向調査

Investigation of Academic Research and Technology Development Trends of Brain-Inspired AI Accelerator Using Paper and Patent Cluster Analysis

2022年7月

佐々木 達郎

政策研究大学院大学SciREXセンター 専門職

※. 本ワーキングペーパーの著作権は、著者もしくは政策研究大学院大学科学技術イノベーション政策研究センターに帰属しています。本ワーキングペーパーに含まれる情報を、個人利用の範囲を超えて転載、またはコピーを行う場合には、政策研究大学院大学科学技術イノベーション政策研究センターによる事前の承諾が必要となりますので、以下までご連絡ください。

【連絡先】政策研究大学院大学科学技術イノベーション政策研究センター
TEL: 03-6439-6318 / E-Mail: scirex-center@grips.ac.jp

目次

Abstract	4
エグゼクティブサマリー	5
1 イントロダクション	6
2 分析手法.....	7
3 分析結果.....	7
3.1 分析データの抽出.....	7
3.2 対象データの二次元可視化.....	9
3.3 基本統計.....	13
3.4 時系列変化.....	17
3.5 国・地域別、機関別集計.....	24
4 まとめ	38
謝辞	39
参考文献	39

Abstract

We extracted 4,426 papers and 929 patents related to Brain-Inspired AI Accelerator and visualized them by clustering analysis using text data such as titles and abstracts. It was found that the “reservoir computer,” “neural network accelerator,” and “variable resistive memory/element” are centered on the “neuromorphic” area.

The number of papers has been rapidly increasing since 2012, especially in the areas of “biological synapse-mimetic devices,” “spike timing-dependent plasticity devices,” “neuromorphic devices,” “PRAM transistor devices,” and “low-consumption neural network accelerators.” In addition to the number of papers, the number of research institutes and researchers has been increasing. It was confirmed that research has been actively progressing in recent years.

Patent applications began to increase after 2017, concentrating on “signal processing of neural network accelerators” and “synaptic load regulation”. The low number of patent applications compared to the number of published papers and the fact that individual research areas have their own unique topics suggest that each research area is in the process of developing fundamental understanding independently of each other. Technologies such as signal processing, for which patent applications are in progress, are not directly expressing the functions of new products, but are considered to have fundamental characteristics necessary for further research.

In the research field of Brain-Inspired AI Accelerator in 2020, the development of fundamental understanding and basic technologies is in the active stage, and if the connection with products directly linked to social implementation such as edge computing can be confirmed in the future, it will contribute to the creation of scenarios for calculating economic benefits.

エグゼクティブサマリー

脳型AIアクセラレータに関連する論文4,426件と特許929件を抽出し、タイトル・アブストラクト等のテキストデータを用いたクラスタリング分析による可視化を行った。【ニューロモーフィック】を中心としてその周囲に【リザーバー・コンピュータ】【ニューラル・ネットワーク・アクセラレータ】【可変抵抗型メモリ・素子】の領域が存在していることが明らかになった。

論文数が2012年以降に急激に増加を見せており、なかでも「生物的シナプス模倣デバイス」「スパイクタイミング依存可塑性デバイス」「ニューロモーフィック・デバイス」「PRAMトランジスタ・デバイス」「低消費ニューラル・ネットワーク・アクセラレータ」の領域では論文数に加えて研究機関数・研究者数も増加していた。近年になって研究が活発に進んでいることが確認された。

特許出願が増加し始めたのは2017年以降であり、「ニューラル・ネットワーク・アクセラレータの信号処理」や「シナプス荷重調整」に集中している。出版されている論文数と比較して特許出願数が低く、個々の研究領域が独自のトピックを有することから、各研究領域で互いに独立して基礎的な理解を深めている段階と考えられる。特許出願が進んでいる信号処理等の技術は新製品の機能を直接発現するものではなく、研究を進める上で必要な基盤的な特性を持つ技術と考えられる。

2020年の脳型AIアクセラレータの研究分野においては、基礎的な理解と基盤技術の開発を盛んに進めている段階であり、将来エッジコンピューティング等の社会実装に直結する製品と接続が確認できれば経済効果算出のシナリオ作成に貢献すると考えられる。

論文・特許クラスター分析を用いた脳型AIアクセラレータ技術の学術研究・技術開発動向調査

1 イントロダクション

科学技術・イノベーション(STI: Science, Technology and Innovation)が経済・社会システムの中でどのような影響をもたらしているかを明らかにすることは、政策と研究の両面から重要な課題である。特に、第6期科学技術・イノベーション基本計画では、人文・社会科学も含む「総合知」の概念も導入され、科学技術・イノベーションと経済社会システムの関係性を理解し、政策に実装することが重要な課題となっている。

我々は2011年に開始された科学技術・イノベーション(STI)政策における「政策のための科学」推進事業 (Science for RE-designing Science Technology and Innovation Policy: SciREX事業)の中で科学技術・イノベーション政策の経済社会効果評価を中核的な課題と位置付けて研究に取り組んできた。2021年度からは共進化実現プログラムの研究プロジェクト(科学技術・イノベーション政策の経済社会効果分析の政策形成プロセスへの実装)にて、研究開発投資戦略の文書の内容(科学技術シナリオ)を経済モデルに投入するパラメータに変換するためのプロトコル開発に取り組んでいる。

経済パラメータへの変換を行うためには、着目する研究開発分野において、①どのような学術研究がなされているか、②学術研究からどのような技術が生まれているのか、③新しい技術を採用した新製品・サービスとして社会に普及すると産業にどのような影響を及ぼすのか、の3つの要素を明らかにすることが重要である。我々は研究開発投資に関わる政策文書や論文・特許データを用いてこれらの関係性を求め、技術ロードマップの形で整理した上で経済モデルベースのシミュレーター(黒田ら、2016; CRDS,2016)に投入していく予定である。

本稿では上記①②の要素を明らかにするため、近年注目が集まっている脳型AIアクセラレータ技術を事例として採用し、論文・特許データを用いて分析した結果を示す。具体的には脳型AIアクセラレータの要素技術ごとに学術研究および技術開発動向を可視化し、国・地域・機関ごとの特徴を明らかにするため、論文・特許の俯瞰分析を実施した結果を報告する。

脳型 AI アクセラレータとは「次世代の人工知能技術に求められる効率的な学習、外界・環境の認識・理解、予測に基づく判断などの柔軟で高度な情報処理を、人間の脳のエネルギー効率に迫る桁違いの低消費電力で行うことが可能なAI処理に特化した専用のプロセッサ」を指す(CRDS, 2021)。AIの情報処理はクラウド上で豊富な計算パワーを持って実施されてきたが、手元の端末や自動車・ロボットなどエッジでのAI処理も重要になっている。クラウドと異なりエッジでは十分な電力が供給されているとは限らないため、低消費電力でAI処理を効率よく行う機能が必要とされている。これらの要求を満たす技術として脳型AIアクセラレータに注目が集まっている。脳型 AI アクセラレータを実現するには、細胞・神経・脳の情報処理機能を参考として新たな数理モデル・アルゴリズムを開発し、情報の保持・変更を超低消費電力で実行可能なデバイスに実装する必要がある。

分析の結果、脳型AIアクセラレータに関しては要素技術が4領域に分かれており、一部の技術については論文数・研究機関数・研究者数が急増し、近年になって研究が活発に進んでいることが確

認められた。出版されている論文数と比較して特許出願数が低く、各研究領域が互いに独立して基礎的な理解を深めている段階と考えられる。

2章で分析手法の流れを示し、3章で分析データについて解説を行い、4章で全体の総括を行った。

2 分析手法

科学技術・イノベーション投資が経済効果を生み出すまでのプロセスを検討する上で、“新製品・サービスの普及が産業に及ぼす影響は、採用されている技術の質によっても大きく変動する”という性質は重要な意味を持つ。すなわち研究開発分野の全体像に加えて、要素技術毎に学術研究・技術開発の動向を明らかにしていく必要がある。

そこで本調査においては脳型AIアクセラレータに関連する論文・特許を分析対象として抽出し、自然言語処理によって類似する文献群(クラスター)を作成して集計・可視化を行った。

主な分析の流れを下記に示す。

1. 分析データの抽出: 検索キーワードを設定し、論文(Web of Science: 1980年-2020年収録2021年6月調達)および特許(TotalPatentOne)を用いて検索することで関連する論文・特許を抽出した。
2. 対象データの2次元可視化: 論文・特許の抽象化等のテキストデータを用いてトピックモデル(LDA: Latent Dirichlet Allocation; 潜在的ディリクレ配分法)による類似度評価を行い、トピック配分が類似する文献が近くに配置されるように2次元可視化することで研究・技術俯瞰図を作成した。
3. 基本統計: 抽出した論文・特許全体の文献数推移および国別文献数推移を作成した。
4. 時系列変化: 全体の年次推移を参考にして期間を分割し、期間毎に研究・技術俯瞰図を作成した。文献数および文献数の伸び率に基づいてヒートマップを作成し、研究開発が盛んな領域の可視化を行った。
5. 国・地域別、機関別統計: 論文・特許の国・地域別、機関別文献数推移を集計し、それぞれの研究・技術俯瞰図を作成した。

3 分析結果

3.1 分析データの抽出

戦略プロポーザル「脳型AIアクセラレータ ～柔軟な高度情報処理と超低消費電力化の両立～」(CRDS, 2021)の記述を参考に検索キーワードを設定し、論文(Web of Science)、特許(TotalPatentOne)のデータベースにて検索を実施した。検索条件と検索された文献数を表1に示す。脳型AIアクセラレータに関連する論文のうち、重複・酷似・記載の短いものを除外して6,075件、特許をファミリーの重複・英語機械翻訳欠損・記載の短いものを除外して2,364件抽出した。

表 1 脳型AIアクセラレータ 母集団検索式と件数

No.	分類	WoS正規表現*	WoS 件数	特許検索式†	特許件数
1	リザーバーコンピューティング	reservoir.{0,2}(computer computing) liquid.{0,2}state.{0,2}(machine computer) echo.{0,2}state.{0,2}network	1630	TAC:((reservoir PRE0 computer*) OR (reservoir PRE0 computing*) OR (Liquid PRE0 State PRE0 machine*) OR (Liquid PRE0 State PRE0 computer*) OR (Echo PRE0 State PRE0 network*)) AND (IPC:(G06) OR CPC:(G06))	389
2	エッジAI	edge.{0,2}(AI artificial intelligence neural.{0,2}network machine.{0,2}learning)	1460	TAC:((Edge PRE0 AI) OR (edge PRE0 artificial PRE0 intelligence*) OR (edge PRE0 neural PRE0 network*) OR (edge PRE0 machine PRE0 learning*)) AND PG:(Application) AND (IPC:(G06) OR CPC:(G06))	105
3	ブレインモルフィックコンピューティング	brain.{0,2}(morphic like type inspired)[^\$]*?%s+?([^\$]+?%s+?)0,2(computer chip circuit)	361	TAC:(((brain PRE0 morphic*) OR brainmorphic* OR (brain PRE0 like*) OR (brain PRE0 type*) OR (brain PRE0 inspired*)) PRE2 (comput* OR chip* OR circuit*)) AND (IPC:(G06) OR CPC:(G06)) AND PG:(Application)	68
4	脳型アクセラレータ	(AI artificial.{0,2}intelligence machine.{0,2}learning neural.{0,2}network)[^\$]*?%s+?accelerator	291	TAC:((AI PRE0 accelerator*) OR (artificial PRE0 intelligence PRE0 accelerator*) OR (machine PRE0 learning PRE0 accelerator*) OR (neural PRE0 network PRE0 accelerator*)) AND (IPC:(G06) OR CPC:(G06))	897
5	超低消費電力での記憶・演算	ultra.{0,2}low[^\$]*?%s+?([^\$]+?%s+?)0,1(power consumption) AND memory CPU storage integrated.{0,2}circuit comput	998	TAC:(((ultra PRE0 low) PRE1 (power* OR consumption*)) NEARs (memory* OR CPU* OR storage* OR (integrated PRE0 circuit*) OR comput*)) AND (IPC:(G06 OR H01 OR G11) OR CPC:(G06 OR H01 OR Y02D OR G11))	557
6	インメモリコンピューティング	in.{0,2}memory[^\$]*?%s+?([^\$]+?%s+?)0,1comput	804	TAC:((in PRE0 memory) PRE1 comput*) AND PG:(Application)	1047
7	ニューロン動作模倣回路	(neuromorph spiking.{0,2}neural.{0,2}network)[^\$]*?%s+?([^\$]+?%s+?)0,2(comput circuit device)(comput circuit device)[^\$]*?%s+?([^\$]+?%s+?)0,2(neuromorph spiking.{0,2}neural.{0,2}network)	2280	TAC:((neuromorph* OR (spiking PRE0 neural PRE0 network*)) NEAR2 (comput* OR circuit* OR device*)) AND (IPC:(G06 OR H01 OR G11) OR CPC:(G06 OR H01 OR Y02D OR G11))	1015

*Web of Scienceで全ての分類に共通する論文検索条件は「2001 ≤ pubyear ≤ 2020、doctype1=Article or Proceedings Paper、has_abstract=Y」である。

†TotalPatent Oneで全ての分類に共通する特許検索条件は、PG:(Application) AND PD:[2001-01-01 TO *] AND PC:(CN OR EP OR JP OR KR OR US OR WO OR CA OR DE OR FR OR GB OR TW)である。

3.2 対象データの二次元可視化

脳型AIアクセラレータに関する論文6,075件について、タイトルとアブストラクトの文章を対象として、トピックモデルを用い1000次元弱のトピックを抽出した。その上で各テキストのトピックデータについて、多様体学習により2次元に圧縮して可視化した。図1中、赤破線楕円は筆頭トピックが共通である文献をまとめた。KW(Keyword)は、集積の源となった筆頭トピックに含まれる上位5キーワードを示す。更に目視により、関連する上位概念的技術を紫色の楕円で囲った。各領域の名称は、以下のデータの順で、参考にして決定した。①トピックのキーワード、②RAKE(Rapid Automatic Keyword Extraction)によるキフレーズ、③WoSのkeyword、④WoSのkeyword_plus、⑤タイトル、要約のテキスト。

なお、本稿では筆頭トピックが共通する文献群を赤破線で囲った領域キーワードを「」で、上位概念である紫色で囲った領域キーワードを【】で示す。

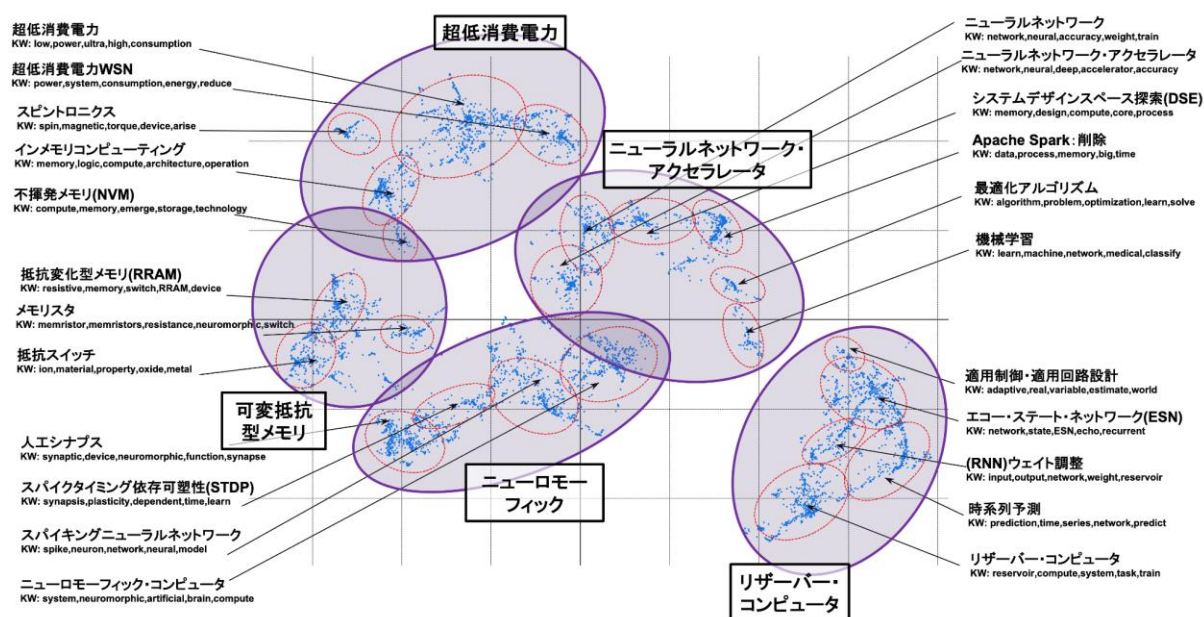


図1 脳型AIアクセラレータ論文トピックモデル計算の多様体学習による2次元可視化(ノイズ除去前)

論文に基づく脳型AIアクセラレータの領域は大きく5つに分けられた。

- ニューロモーフィック
- ニューラルネットワーク・アクセラレータ
- 超低消費電力
- 可変抵抗メモリ
- リザーバー・コンピュータ

配置を見ると、【ニューロモーフィック】と【ニューラルネットワーク・アクセラレータ】、【超低消費電力】、【可変抵抗メモリ】は互いに関連性が高いためか、接するように位置している。【リザーバー・コンピュータ】は他とやや離れて位置している。

2次元に圧縮した結果では各領域が比較的しっかりと分離されていることから、きれいに分類されており、著しいノイズは見当たらないといえる。但し、超低消費電力の領域には、計算とは関連の低い技術も含まれている。

次に、キーワードに基づく検索式で抽出された論文内容を調査し、専門家を交えて脳型AIアクセラレータに関連する技術との適合性を確認した。超低消費電力の領域内の論文はほぼ脳型アクセラレータと無関係であったので、表1の検索式中の「No.5: 超低消費電力での記憶・演算」で検索された他の領域の文献とともにノイズとして除外した(図2中 赤)。但し、No.5と同時に別の検索式でも該当した文献は復活採用とした(図2中 紫)。【ニューロモーフィック】の領域で復活が多い。また、他にも検索式No.6: インメモリコンピューティングで検索された他の論文も、必ずしも脳型アクセラレータでないので除外した(図2中 黄緑)。こちらも別検索でヒットした場合は復活とした。

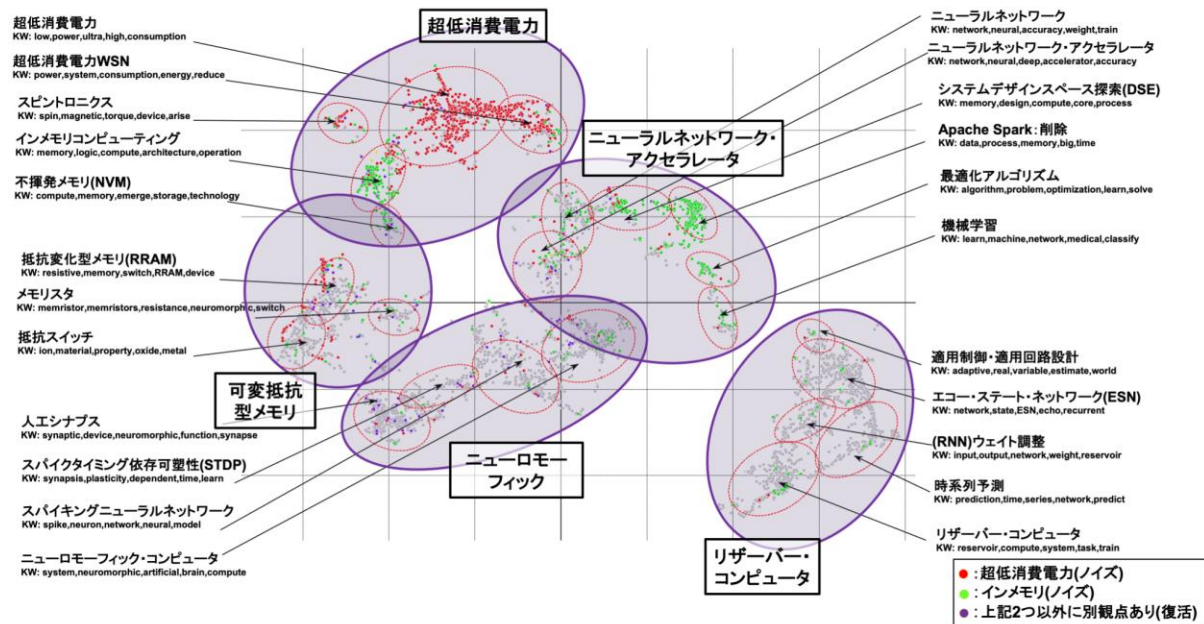


図2 脳型AIアクセラレータ 論文トピックモデル計算の多様体学習による2次元可視化(ノイズ判定)

次に脳型AIアクセラレータに関する特許2,364件について、アブストラクトの文章を用いて、論文同様に分析を行った結果を図3に示す。

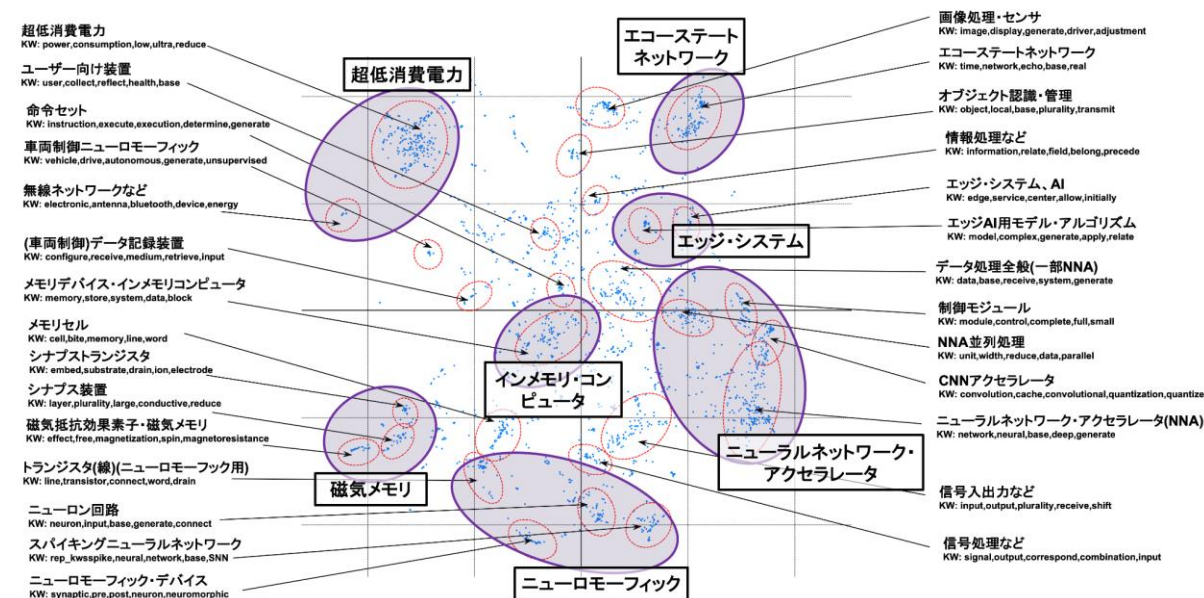


図3 脳型AIアクセラレータ 特許トピックモデル計算の多様体学習による2次元可視化

特許では脳型AIアクセラレータに関連する技術が俯瞰図周辺に配置され、中心部には汎用的な技術が集まる傾向が見られている。リザーブ・コンピュータに関する特許は少数であり、領域を形成する規模ではなかった。

論文と同様に特許に関してもキーワードに基づく検索式で抽出された内容を調査し、専門家を交えて脳型AIアクセラレータに関連する技術との適合性を確認した。「超低消費電力」と「インメモリコンピューティング」の領域については脳型AIアクセラレータについて記載された特許が少なく、今回の分析母集団から除外することとした。ただし、除外した特許のうち脳型AIアクセラレータの他キーワード検索で該当する特許については分析母集団に加えることとした。ノイズ判定を行った結果を図4に示す。図中で赤と黄緑で示す特許を分析対象から除外し、更に年次上限を論文データと統一して2020年に限定を行った上で、最終的に残った929件の特許を分析対象とした。

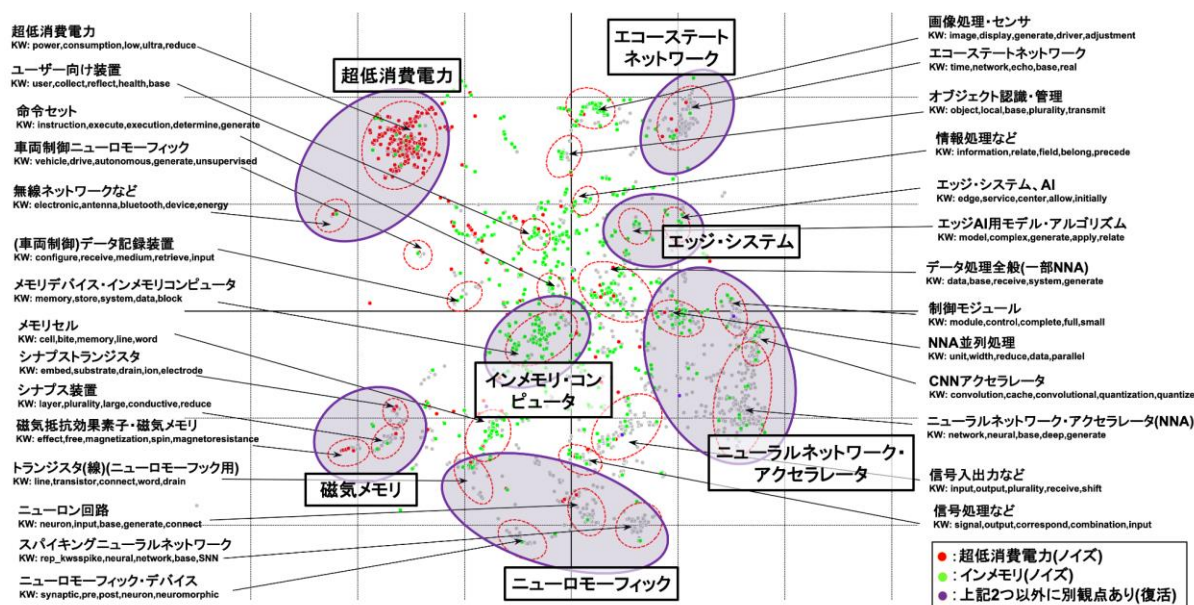


図 4 脳型AIアクセラレータ 特許トピックモデル計算の多様体学習による2次元可視化(ノイズ判定)

最後に、脳型AIアクセラレータに関する論文4,426件と特許929件を合計した5,355件について、同様に分析した。結果を図5に、文献数のヒートマップを図6に示す。

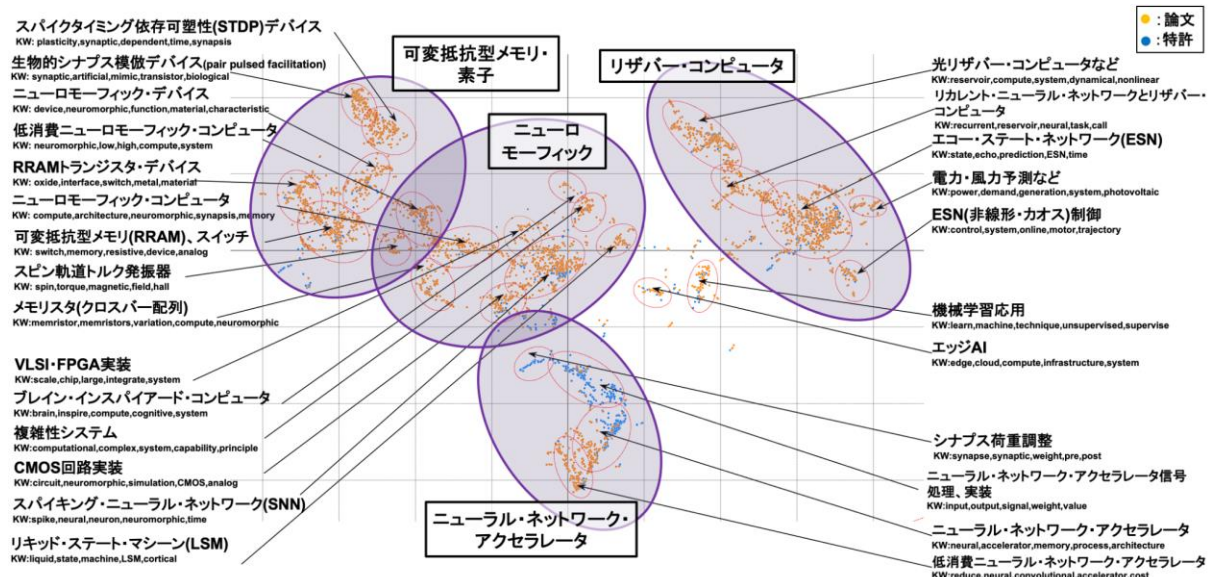


図 5 脳型AIアクセラレータ 論文+特許 トピックモデル計算の多様体学習による2次元可視化

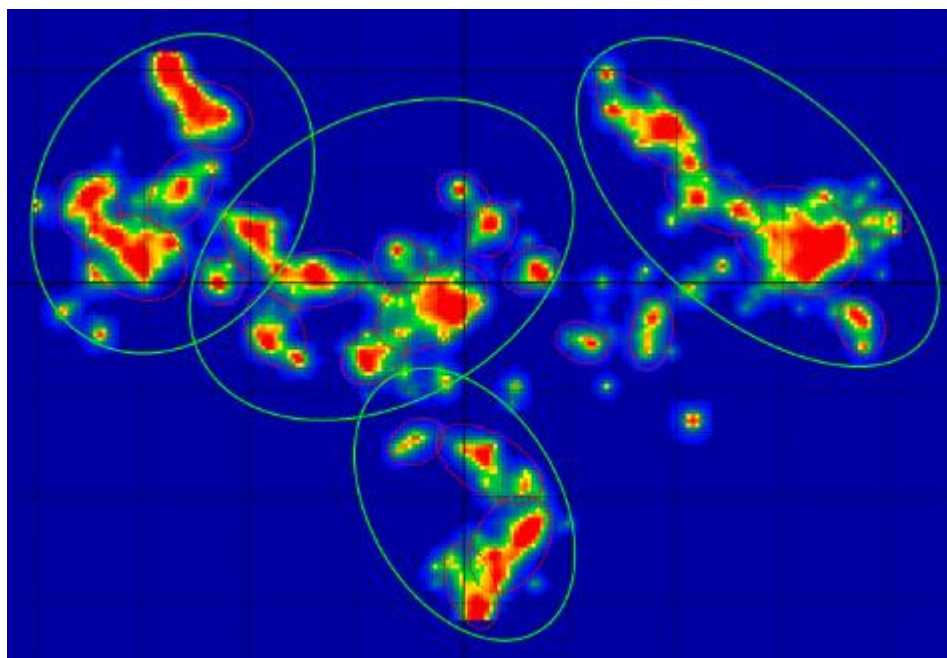


図 6 脳型AIアクセラレータ 論文+特許 トピックモデル計算の多様体学習による2次元可視化(ヒートマップ)

論文と特許を混合した本試行では【ニューロモフィック】を中心とし、周囲に【リザーバー・コンピュータ】【ニューラル・ネットワーク・アクセラレータ】【可変抵抗型メモリ・素子】の3領域が位置している。

【ニューロモフィック】領域の中心に「スパイクング・ニューラル・ネットワーク」が位置し、その周囲に「CMOS」「VLSI, FPGA」等による実装が配置されている。リザーバー・コンピュータの一種である「リキッド・ステート・マシーン」は【リザーバー・コンピュータ】領域との境界寄りに位置した。【リザーバー・コンピュータ】領域は「エコー・ステート・ネットワーク」を中心に、周囲に「ESN(非線形・カオス)制御」「電力・風力予測等」などの応用先が位置している。技術の応用先と思われる領域では特許がやや多くなっている傾向が見られた。【ニューラル・ネットワーク・アクセラレータ】領域は、エネルギーや

効率を含んだ論文の多い領域と、それらの記述のない特許の多い領域に分かれた。【可変抵抗型メモリ・素子】領域は「抵抗変化型メモリ」を中心に、その周囲に「スパイクタイミング依存可塑性(STDP)デバイス」「メモリスト」などが配置された。

3.3 基本統計

脳型AIアクセラレータに関する世界の論文・特許についての基本統計を示す。なお、Web of Science(2021年6月調達)のデータにおいて、2020年分の論文収録状況に約1割程度の欠損が確認された。これは論文バルクデータ調達時期による収録の差異による影響と考えられる。特許はファミリー重複削除を行っているため、登録年はファミリー内の登録特許中の最古年を採用した。また、特許の国籍は発行国でなく、優先権主張先国とした。但しEPOに直接出願した特許などはEPのままとして特定の国に加算せずにEPとして集計した。

論文と特許を合計した文献数推移を図7に示す。脳型AIアクセラレータに関連する文献総数は増加傾向を示している。論文数は2001年当初より増加傾向であったが、2012年以降増加の割合が上がっている。特許(公開)は2016年まで一定であったのがその後急激に増加している。特許(登録)数は特許(公開)数と比較すると件数が少なく、権利化はまだ活発ではない様子が伺える。

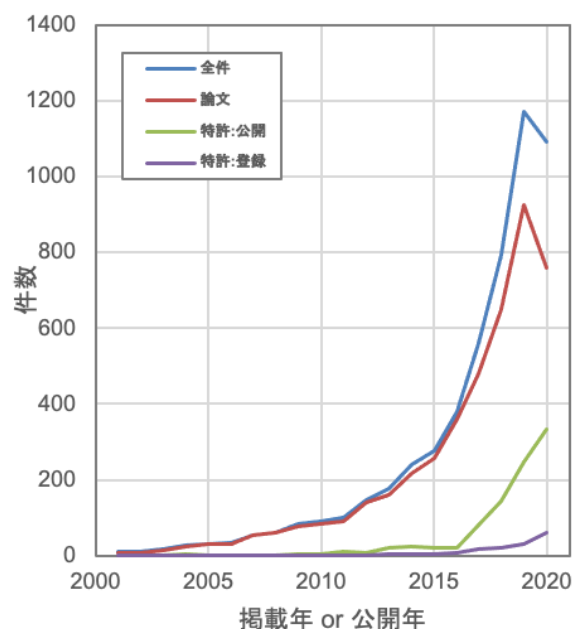


図7 脳型AIアクセラレータ 論文+特許 全体文献数推移

国・地域別の文献数を図8に示す。米国と中国が際立って多く、以下、韓国・ドイツ・日本・英国・フランスと、アジアと欧州の国が続いている。

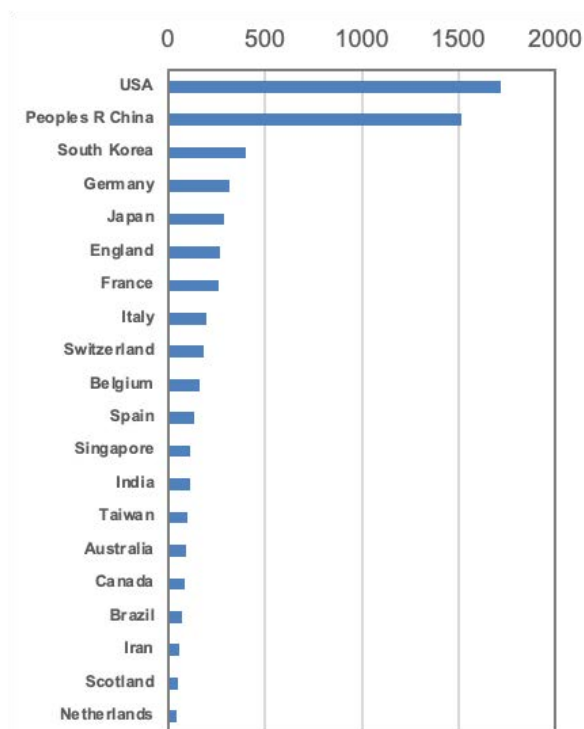


図 8 脳型AIアクセラレータ 論文+特許 国・地域別文献数

文献数上位6カ国の年次推移を図9に示す。2013年以降中国の増加が著しく、直近では首位米国を抜いている。また、3位 韓国の文献数の伸びが顕著に見られている。ドイツ・日本・英国も全て文献数が増加傾向にあるが、米国・中国・韓国と比較して伸び方が緩やかである。

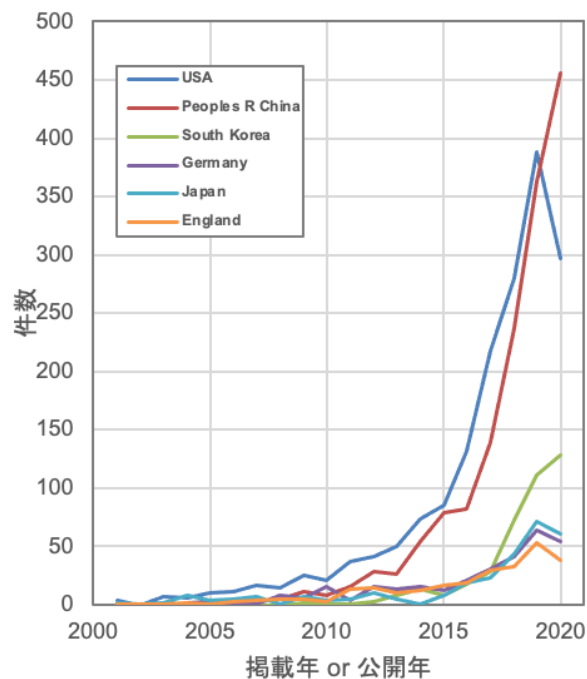


図 9 脳型AIアクセラレータ 論文+特許 国・地域別文献数推移(文献数上位6カ国)

論文・特許が集中している領域の差異を求めめるため、脳型AIアクセラレータについて論文・特許の全体、論文のみ、特許のみの3パターンについて分布を求めた。ヒートマップによる可視化結果を図10に示す。

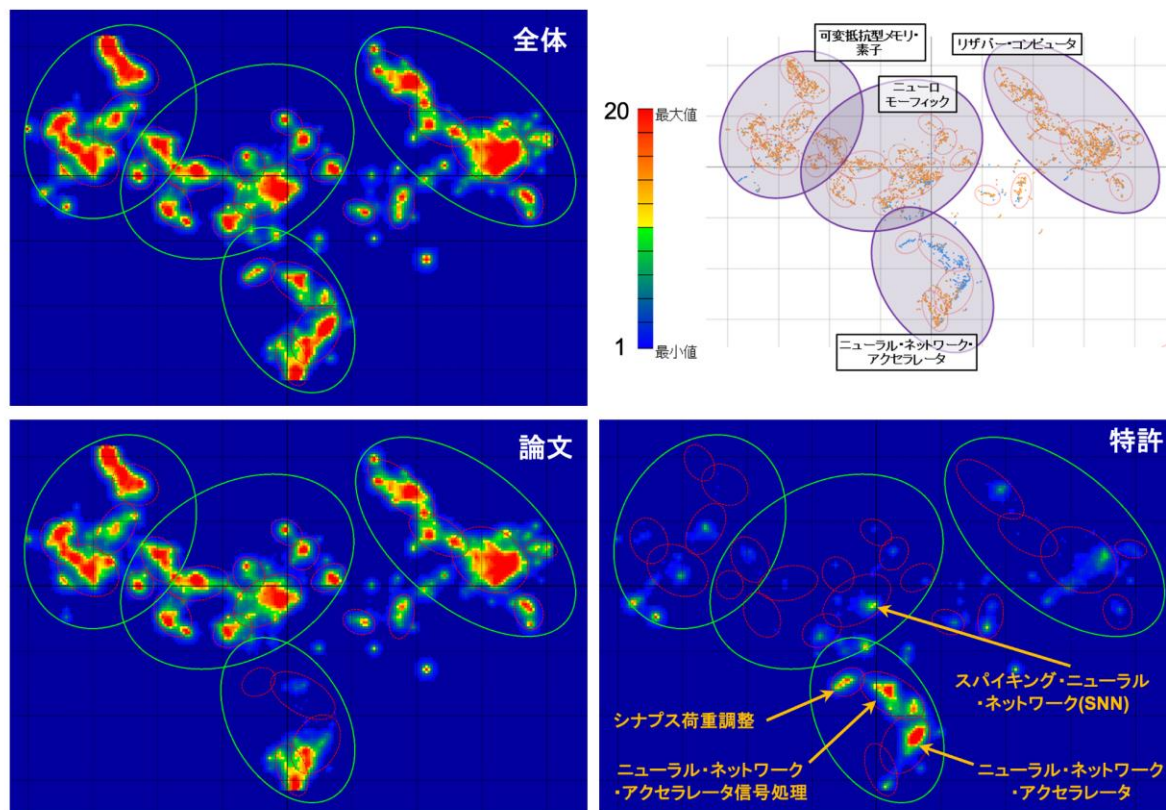


図 10 脳型AIアクセラレータ 論文+特許トピックモデル計算の多様体学習による2次元可視化：論文、特許別分布

全体文件数の83%を論文が占めるため、全体分布と論文のみの分布はほぼ類似する結果となっている。

特許は「ニューラル・ネットワーク・アクセラレータ」「ニューラル・ネットワーク・アクセラレータ信号処理」「シナプス荷重調整」など【ニューラル・ネットワーク・アクセラレータ】領域に集中している。但し、【リザーバー・コンピュータ】【ニューロモρφック】【可変抵抗型メモリ】などの領域にも少数ながら存在している。

次に研究領域において学術研究(論文)と技術開発(特許)のどちらが活発に進んでいるかを可視化するため、俯瞰図を縦横0.5×0.5のメッシュに分割して、各メッシュ内の論文の割合を求めた。論文の割合を20%ごとに分割して可視化結果を図11に、論文割合を偏差値化して可視化した結果を図12に示す。

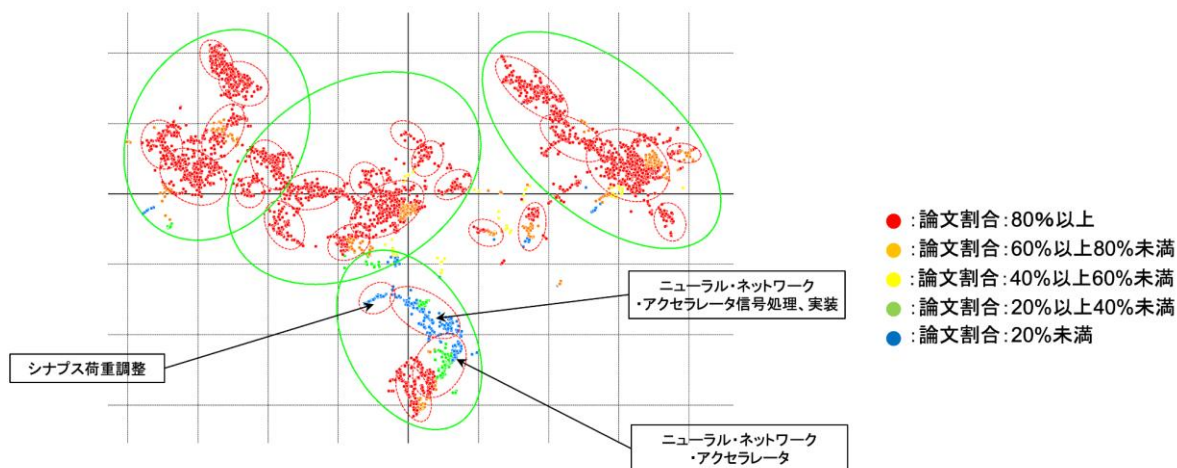


図 11 脳型AIアクセラレータ 論文+特許 : 論文と特許の割合分布(論文割合)

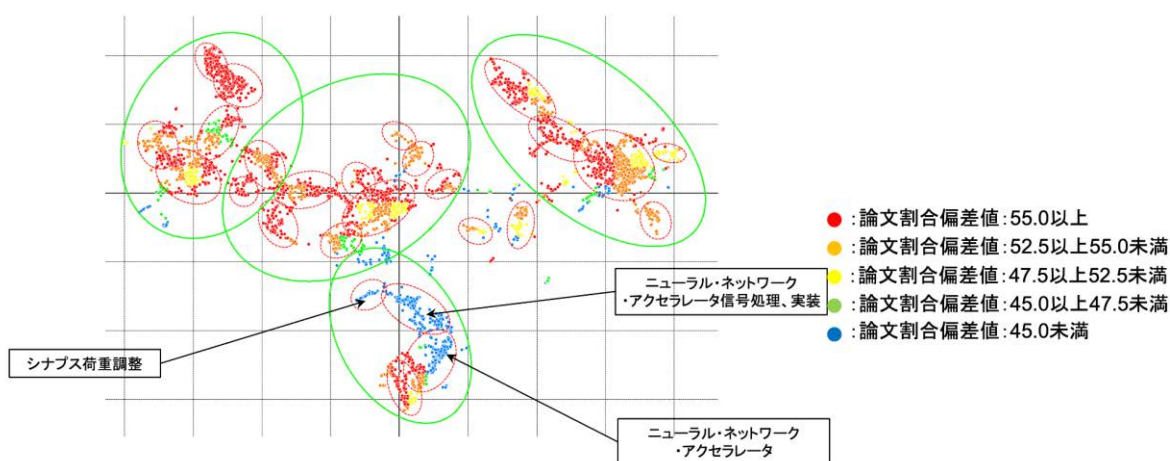


図 12 脳型AIアクセラレータ 論文+特許 : 論文と特許の割合分布(論文割合偏差値)

全体的にどの領域においても論文数の割合が高く、偏差値化した結果(図12)によって領域間の相対的な違いを可視化した。

脳型AIアクセラレータではどの領域も論文数の割合が極めて高く、産業応用よりも基礎的な理解が進められている分野と考えられる。俯瞰図中央の近くに比較的特許割合が高い「ニューラル・ネットワーク・アクセラレータ信号処理、実装」分野が配置されている様子が確認された。

トピックモデルで計算された俯瞰図において、特定のトピックのウェイトが大きい論文が集まって密集領域を形成する。この局所的な集積の原因となる特徴的なトピックを主要トピックと呼ぶ。俯瞰図を縦横0.5×0.5のメッシュに分割し、各メッシュ内のトピック群に対して主要トピックが占める割合を算出し、各研究分野の独立性・関連性を評価した。主要トピック割合が高い領域は、他の領域では使われていない特徴的なトピックが集中的に存在していることになるため、独立性の高い技術と判断できる。一方で主要トピック割合が低い領域は、他の領域でも使われているトピックを多く含むことから、広範囲に応用されている適用先の広い技術と考えることができる。主要トピック割合に応じて色分けしてプロットした結果を図13に示す。

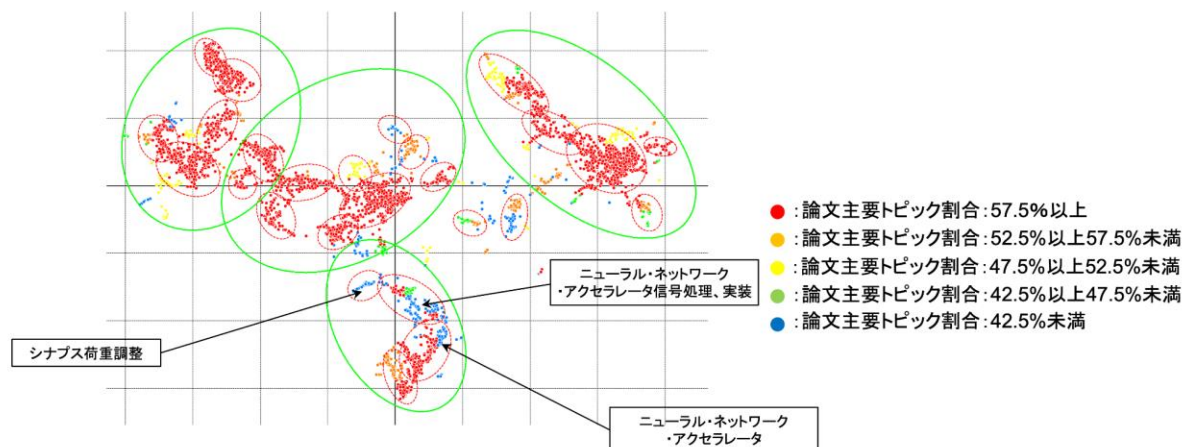


図 13 脳型AIアクセラレータ 論文+特許 : 論文主要トピック(ウェイト3.5%以上のトピック)割合プロット

全体的に主要トピック割合の高い領域が多い結果となり、要素技術は互いに独立的で相互依存が少ない可能性が考えられる。脳型AIアクセラレータはまだ技術として成熟しておらず、要素技術が複数独立に併存している状況と解釈できる。【ニューラル・ネットワーク・アクセラレータ】領域は特許の割合が高いため、論文トピックとしては特徴的なものが見られなかった。

次に特許に関して主要トピック割合に応じて色分けしてプロットした結果を図14に示す。各メッシュにおける主要トピック割合が低いほど、他領域においても広くトピックが使われており、応用への普及がなされていると解釈することができる。

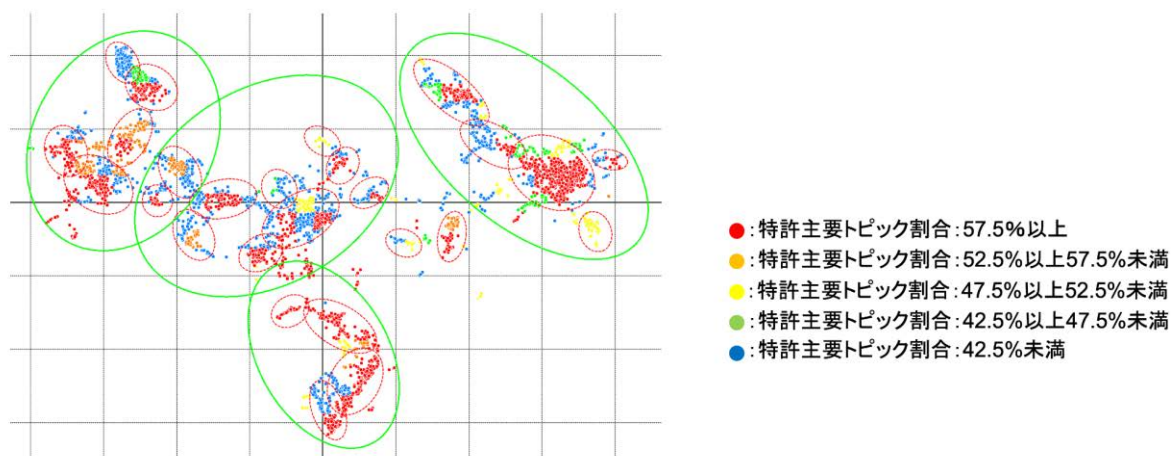


図 14 脳型AIアクセラレータ 論文+特許 : 特許主要トピック(ウェイト3.5%以上のトピック)割合プロット

全文献数に対して特許数の割合が低いため、分析精度は論文より劣る点に留意する必要がある。

3.4 時系列変化

脳型AIアクセラレータの研究が時系列を追ってどのような分野で研究が進んできたかを明らかにするため、文献数の年次推移(図7)に基づいて4つの期間に分割して設定して可視化を行った。文献数は当初緩慢に増加した後に直近で急激に増加しているため、2001-2010(10年間)、2011-2015

(5年間)、2016-2018(3年間)、2019-2020(2年間)と最近になるほど間隔を狭めた。どの期間においても2年当たりの文件数が色として表示されるようにヒートマップの感度を調整して可視化した結果を図15に示す。

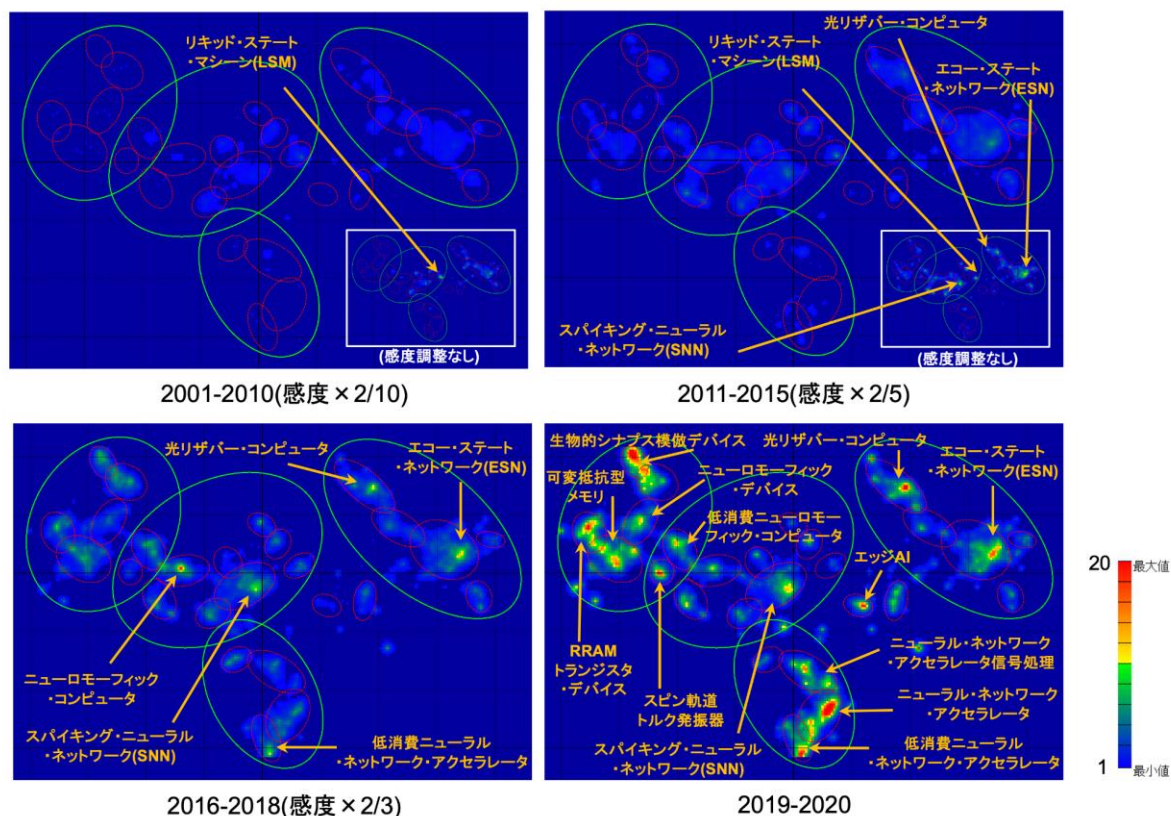


図 15 脳型AIアクセラレータ 論文+特許 トピックモデル計算の多様体学習による2次元可視化：4期間ごと

全体の文献数が少ない2001年当初では「リキッド・ステート・マシン」の文献のみが表れている。その後、2011年以降になると「エコー・ステート・ネットワーク」の文献数が増加した。2016年以降からは「スパイキング・ニューラル・ネットワーク」「低消費ニューラル・ネットワーク・アクセラレータ」の論文数増加が始まっている。直近の2019年以降は「ニューラル・ネットワーク・アクセラレータ」の文献数が急増し、特許出願も増加している。また「ニューロモーフィック・コンピュータ」や、それに利用される「生物的シナプス模倣デバイス」「可変抵抗型メモリ」「スピン軌道トルク発振器」などでも文献数の増加が著しい。「エコー・ステート・ネットワーク」や「リザバー・コンピュータ」なども継続的に研究が増強されているが、「ニューラル・ネットワーク・アクセラレータ」ほどではない。

次に脳型AIアクセラレータの論文に限定して図15と同様の可視化を行った結果を図16に、特許に限定して可視化を行った結果を図17に示す。

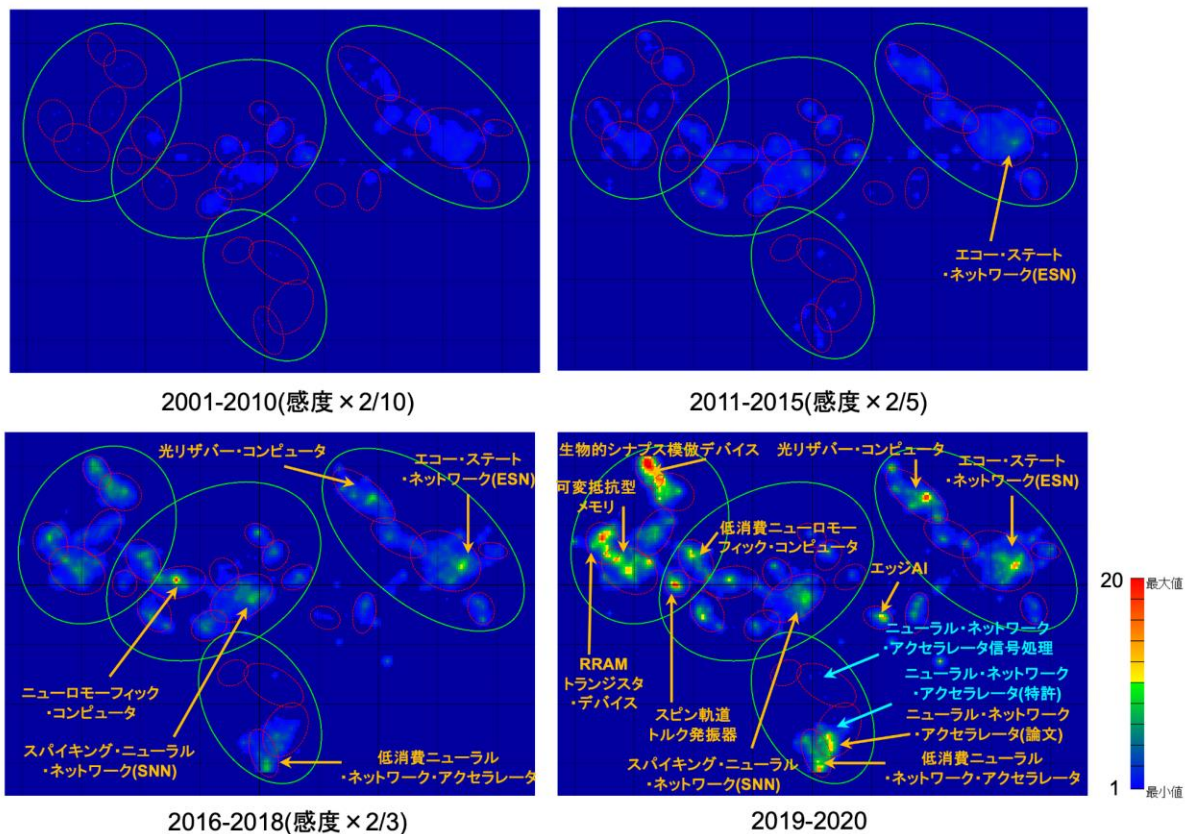


図 16 脳型AIアクセラレータ 論文 トピックモデル計算の多様体学習による2次元可視化：期間ごと

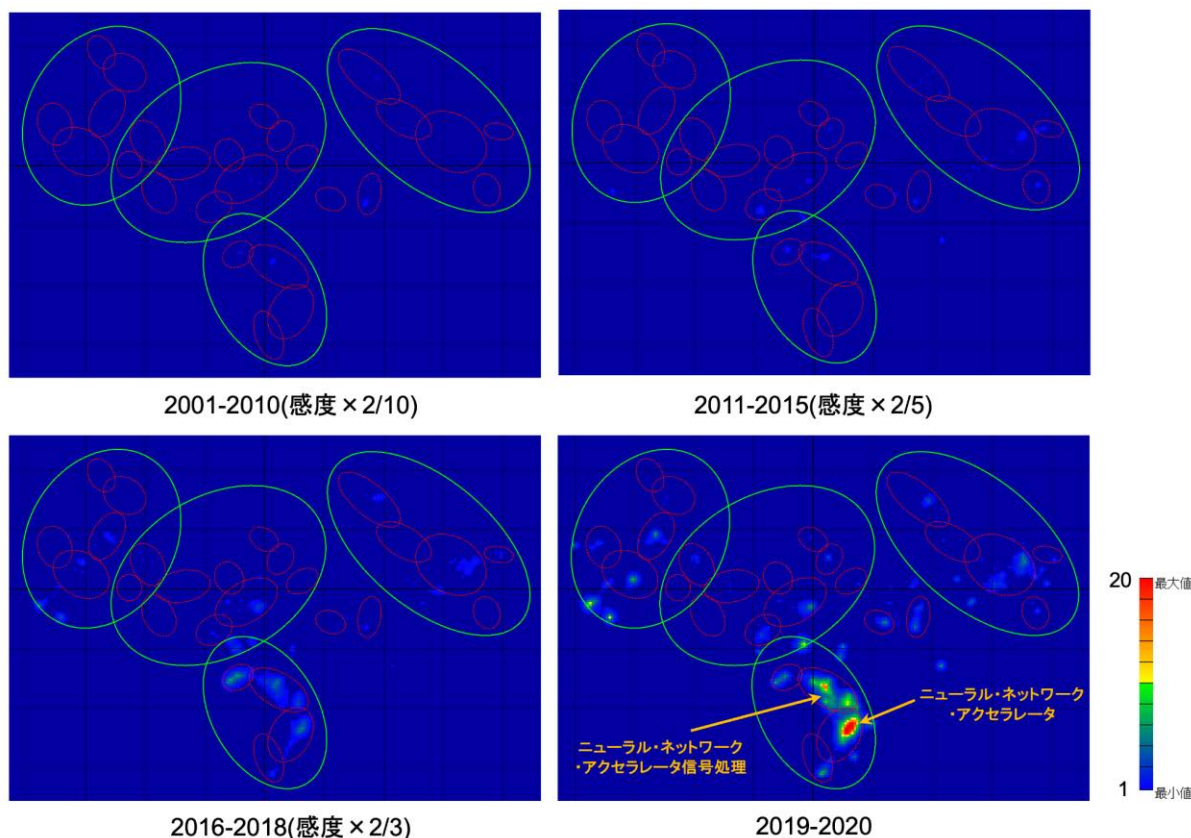


図 17 脳型AIアクセラレータ 特許 トピックモデル計算の多様体学習による2次元可視化：期間ごと

2016年までほぼ論文のみが出版されて特許出願が少ない期間であり、図15と図16がほぼ同様の結果となった。2019年以降で顕著に差が現れる。論文(図16)では「ニューラル・ネットワーク・アクセラレータ」「エコ・ステート・ネットワーク」「リザーブ・コンピュータ」においてほぼ同程度の論文が出版された。一方、特許(図17)では2019年以降に「ニューラル・ネットワーク・アクセラレータ」で集中的に特許が出願されていることが確認された。

研究開発が今後も活発に続き、論文や特許が増加しているエマージング領域を明らかにするため、文献数の増加度合いに着目して可視化を行った。俯瞰図を縦横0.5×0.5のメッシュに分割して、メッシュ毎に成長曲線(ロジスティック関数)フィッティングを行い、立ち上がり年を求めた。領域ごとに立ち上がり年に基づいて可視化を行った結果を図18に示す。立ち上がり年が新しい(暖色系で表示)と今後の文献数の増加が予測され、立ち上がり年が古い(寒色系で表示)と増加ピークを過ぎたことを示している。ここでは論文バルクデータの収録状況を鑑みて2019年までのデータを用いて可視化を行った。脳型AIアクセラレータ全般で文献数が増加傾向にあるため、全域的に今後の成長が見込まれる(立ち上がり年が2015年以降)結果となった。

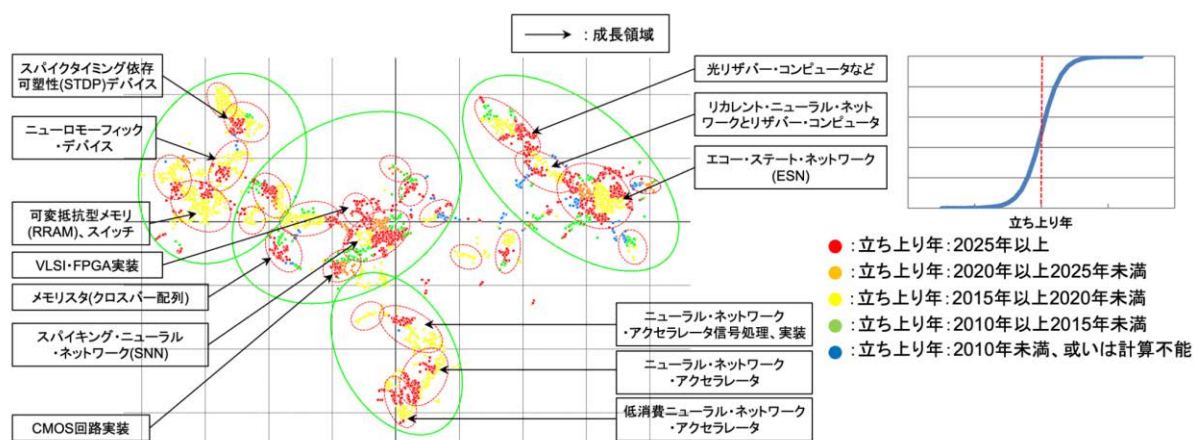


図 18 脳型AIアクセラレータ 論文+特許 成長曲線フィッティングによる立ち上がり年評価 絶対件数 : 全体

次に、論文・特許の文献数を全体平均で除して相対化することで、2020年の論文データも分析に使用して図18と同様の可視化を行った。単に文献数が増加しているだけでなく、全体平均以上に文献数が増加している領域を求めた結果を図19に示す。

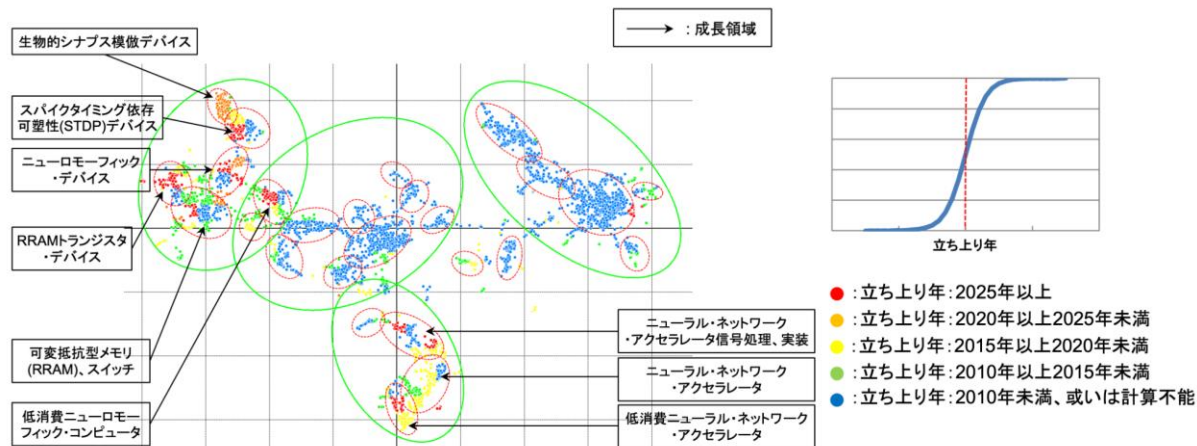


図 19 脳型AIアクセラレータ 論文+特許 成長曲線フィッティングによる立ち上がり年評価 相対件数 : 全体

基礎的な技術が多い俯瞰図中心部では成長領域が少なく、やや周辺の領域が成長している様子が確認された。密集領域の周辺部や複数の領域にまたがる接合部において成長領域が見られた。これは技術が改良・応用されて文献数が増加していることを示唆している。主な成長領域は「ニューラル・ネットワーク・アクセラレータ」「可変抵抗型メモリ」「ニューロモーフィック・コンピュータ」である。「リザーバ・コンピュータ」の文献数自体は増加しているものの、分野の平均以下の増加に留まった。

論文データのみで図19と同様の成長評価と可視化を行った結果を図20に示す。

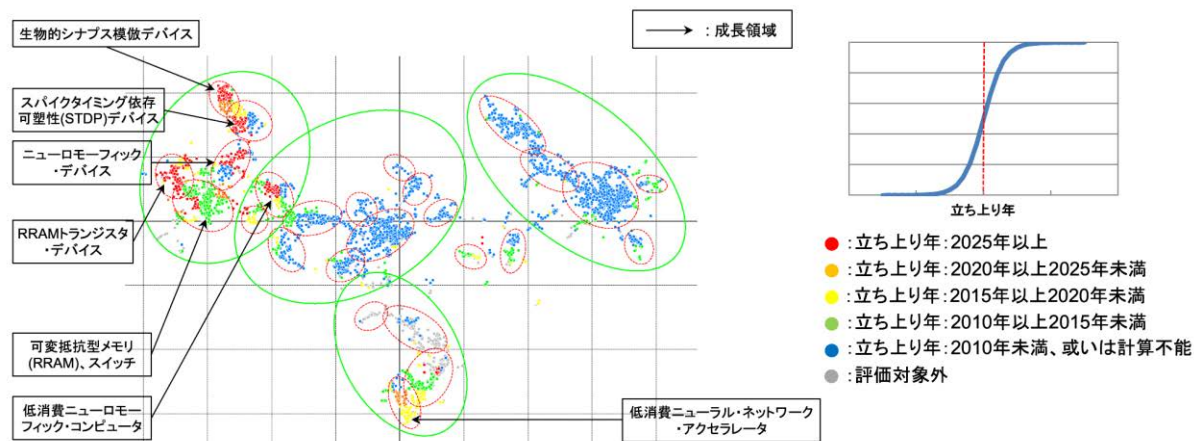


図 20 脳型AIアクセラレータ 論文 成長曲線フィッティングによる立ち上がり年評価 相対件数 : 全体

論文のみで評価を行うと、【ニューラル・ネットワーク・アクセラレータ】領域では相対的に文献数の伸びが小さくなった。「可変抵抗型メモリ」では既に成長がほぼ止まっているが、隣接した「PRAMトランジスタ」「ニューロモーフィック・デバイス」「スパイクタイミング依存可塑性デバイス」「生物学的シナプス模倣デバイス」等は今後の論文数の増加が見込まれる領域となった。

特許データのみで図20と同様の成長評価と可視化を行った結果を図21に示す。

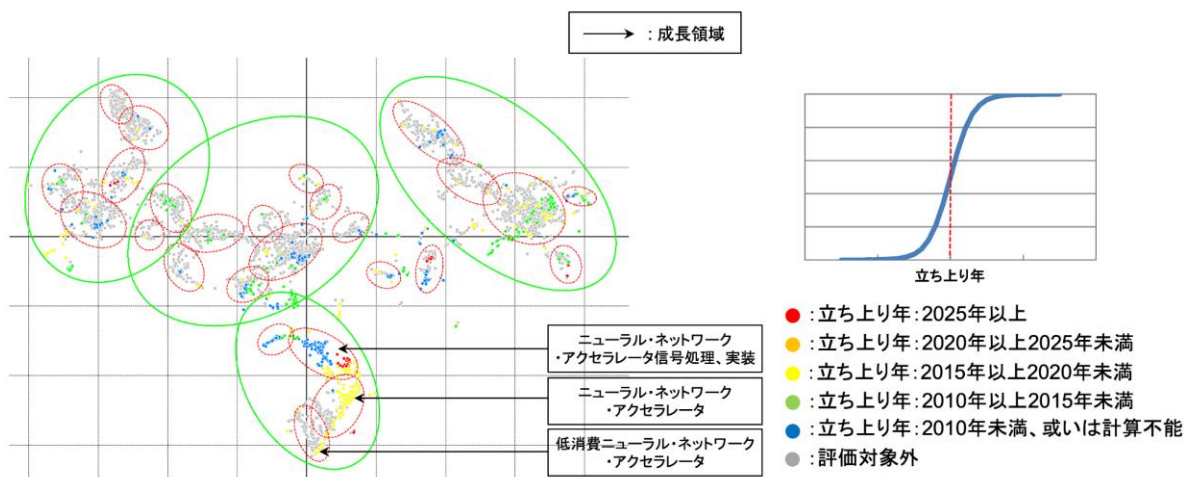


図 21 脳型AIアクセラレータ 特許 成長曲線フィッティングによる立ち上がり年評価 相対件数：全体

特許のみでは「ニューラル・ネットワーク・アクセラレータ」が成長領域と判定され、特に「ニューラル・ネットワーク・アクセラレータ」寄りの「ニューラル・ネットワーク・アクセラレータの信号処理、実装」部分において今後の特許件数増加が見込まれる判定となった。

ここまでエマージング領域を論文・特許数に基づいて可視化してきたが、研究に参入して論文を出版する研究機関が増加する領域においては、成長しているエマージング領域と判断することができる。そこで論文を出版した研究機関数の年次増加割合を指標として評価を行った。参入する研究機関数が多い領域を求めた結果を図22に示す。なお、論文の研究機関名の同定には、WoSのorganization1を用いた。

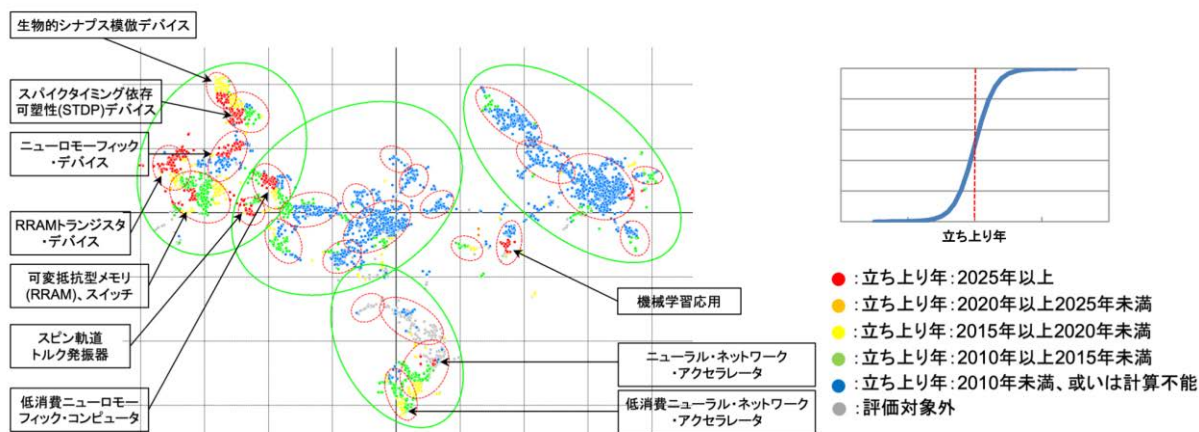


図 22 脳型AIアクセラレータ 論文 エマージングな研究領域の探索:成長曲線フィッティングによる立ち上がり年評価 相対件数：論文 研究機関

論文数を指標とした場合にエマージング領域と判定された【可変抵抗型メモリ・素子】領域内の「生物的シナプス模倣デバイス(paired pulse facilitationを有するデバイス)」において、ユニークな研究機関数を指標とした場合には論文数の割合ほど増加していない結果となった。これらの論文が中国を中心に研究されていることから、中国の研究機関が集中的に論文を出版していることが反

映された結果と考えられる。逆に「スピン軌道トルク発信器」「機械学習応用」では論文を発表する研究機関数が増加しており、論文数は少ないながら、参入機関は多くなっている。

次に特許に関してユニークな特許出願人の年次増減を用いて評価を行った。参入する出願人数が多い領域を求めた結果を図23に示す。

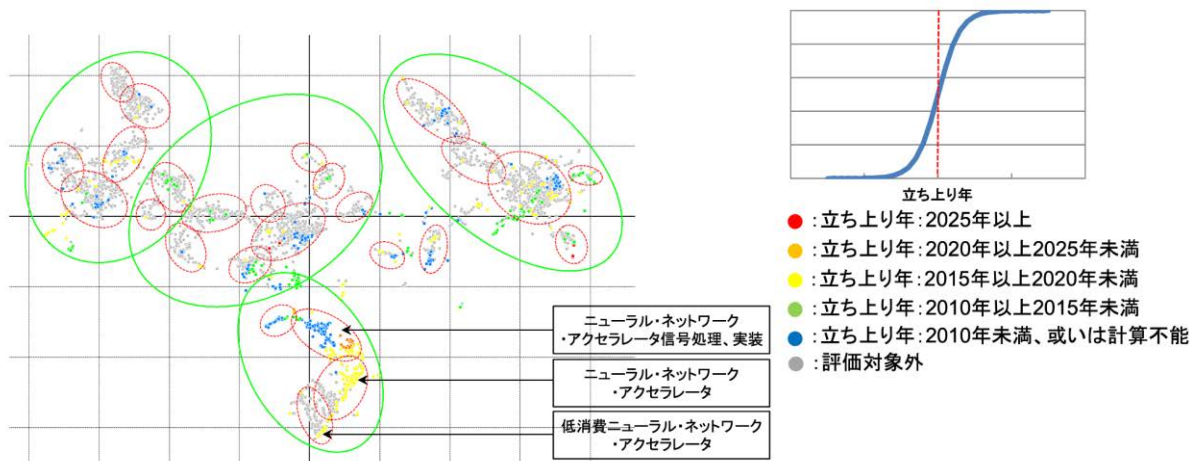


図 23 脳型AIアクセラレータ 特許 エマージングな研究領域の探索:成長曲線フィッティングによる立ち上り年評価 相対件数 : 特許 出願人

ユニークな出願人数での評価は、特許件数による評価(図21)と大きな差が無い評価となったが、全体的に成長領域と判定された領域が狭くなる傾向が見られた。「ニューラル・ネットワーク・アクセラレータ信号処理、実装」の領域では、ユニークな出願人の数の伸びは特許件数の伸びより低い結果となった。

次に論文を出版したユニークな論文著者数の年次増減をエマージング指標に用いて評価を行った。人的資源をより投入している領域を求めた結果を図24に示す。なお、論文著者の同定には、WoS付与のfull_name(roleはauthorに限定)を用いた。

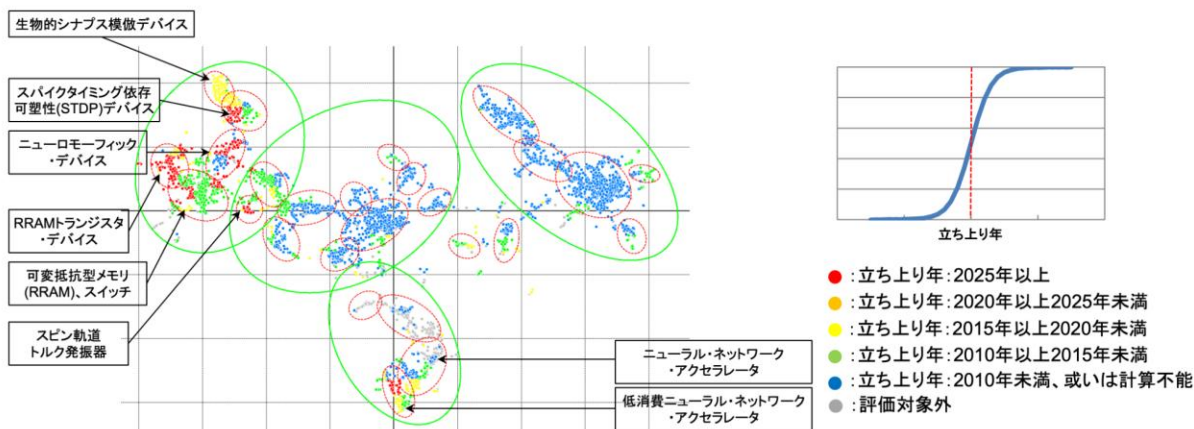


図 24 脳型AIアクセラレータ 論文 エマージングな研究領域の探索:成長曲線フィッティングによる立ち上り年評価 相対件数 : 論文著者

論文のユニークな著者数で評価を行ったところ、論文数や研究機関数による判定よりも更に成長領域が狭い結果となった。「RRAMトランジスタ・デバイス」「ニューロモフィック・デバイス」など応用領域においてはユニークな論文著者数が増加しているエマージングな領域と判定された。他の領域では実績のある研究者が継続して論文を出版しているものと考えられる。

3.5 国・地域別、機関別集計

脳型AIアクセラレータに関する論文について、国・地域別の出版件数を集計した。国・地域別の出版件数を図25(A)に、上位6カ国の論文数の推移を図26(A)に示す。European Patent Organisationに属する38カ国をまとめて欧州として集計した結果を図25(B)および図26(B)に示す。

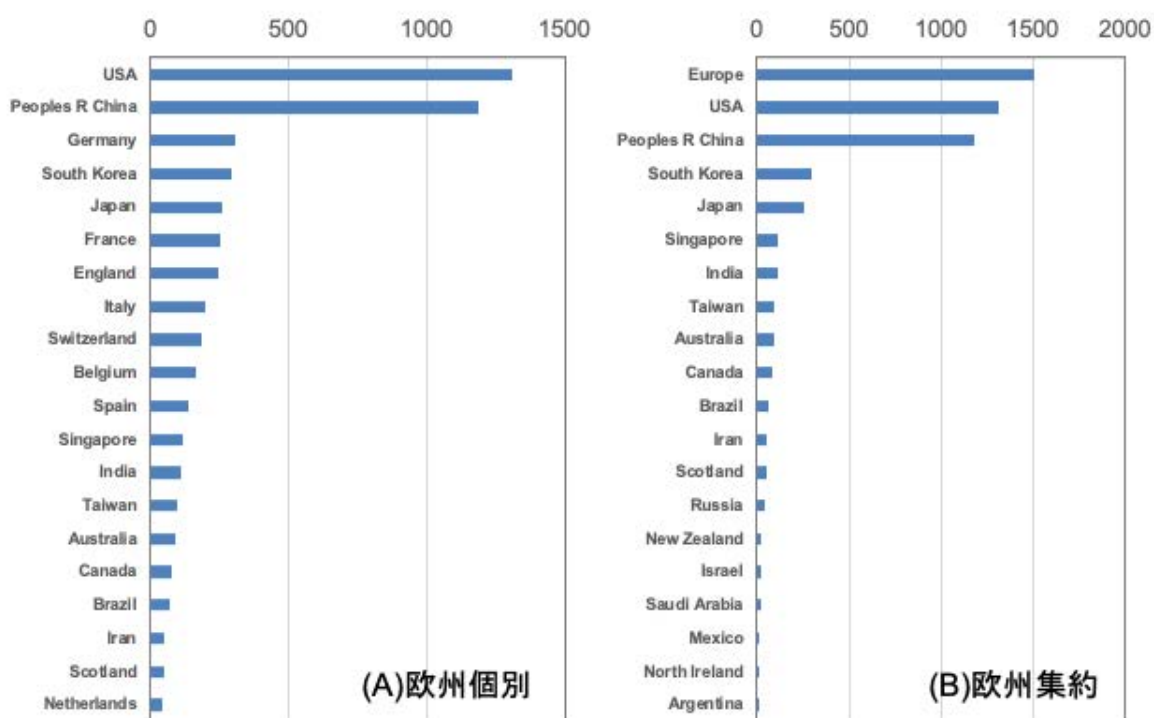


図 25 脳型AIアクセラレータ 論文 国・地域別件数:(A)欧州各国を個別に集計 (B)欧州を合算して集計

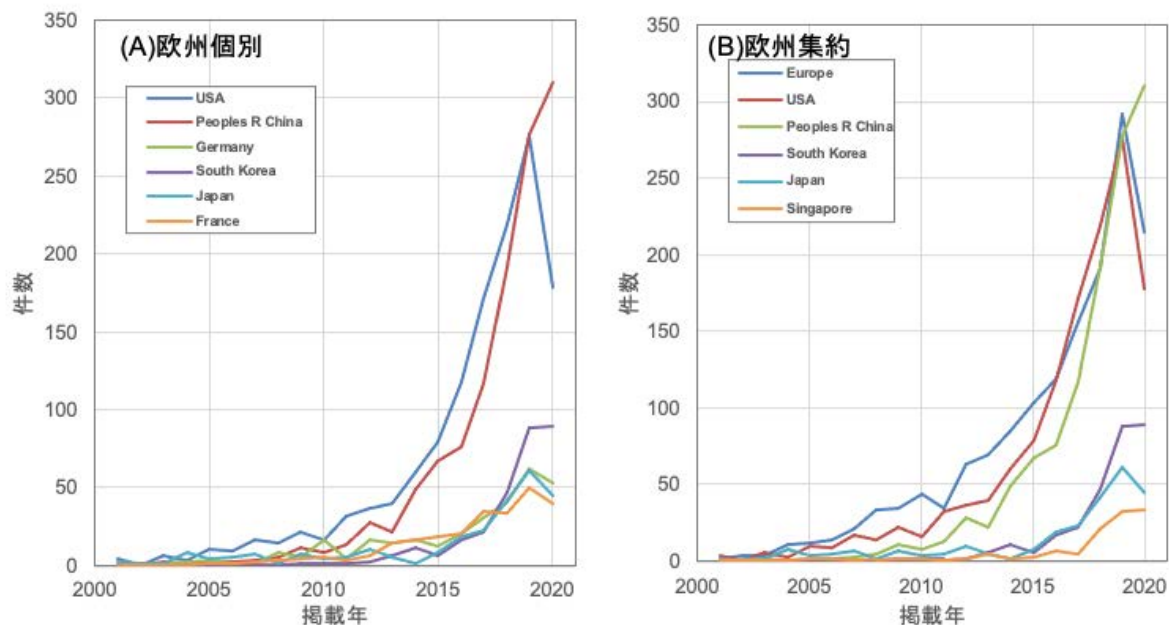


図 26 脳型AIアクセラレータ論文 国・地域別件数推移:(A)欧州各国を個別に集計 (B)欧州を合算して集計

同様に脳型AIアクセラレータに関する特許について、国・地域別の特許出願件数を図27(A)に、上位6カ国の出願数の推移を図28(A)に示す。European Patent Organisationに属する38カ国をまとめて欧州として集計した結果を図27(B)および図28(B)に示す。

なお、特許の国籍は発行国でなく優先権主張先国とし、EPOに直接出願した特許などはEPのままとして特定の国に加算せずにEPとして集計した。

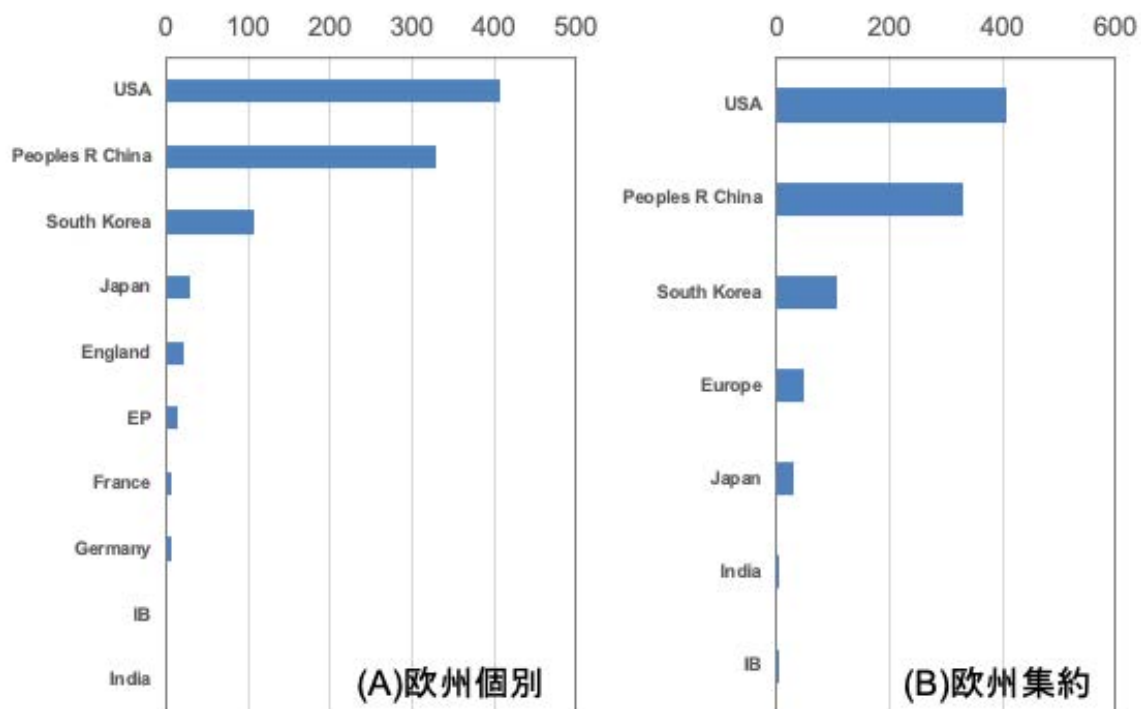


図 27 脳型AIアクセラレータ 特許 国・地域別件数:(A)欧州各国を個別に集計 (B)欧州を合算して集計

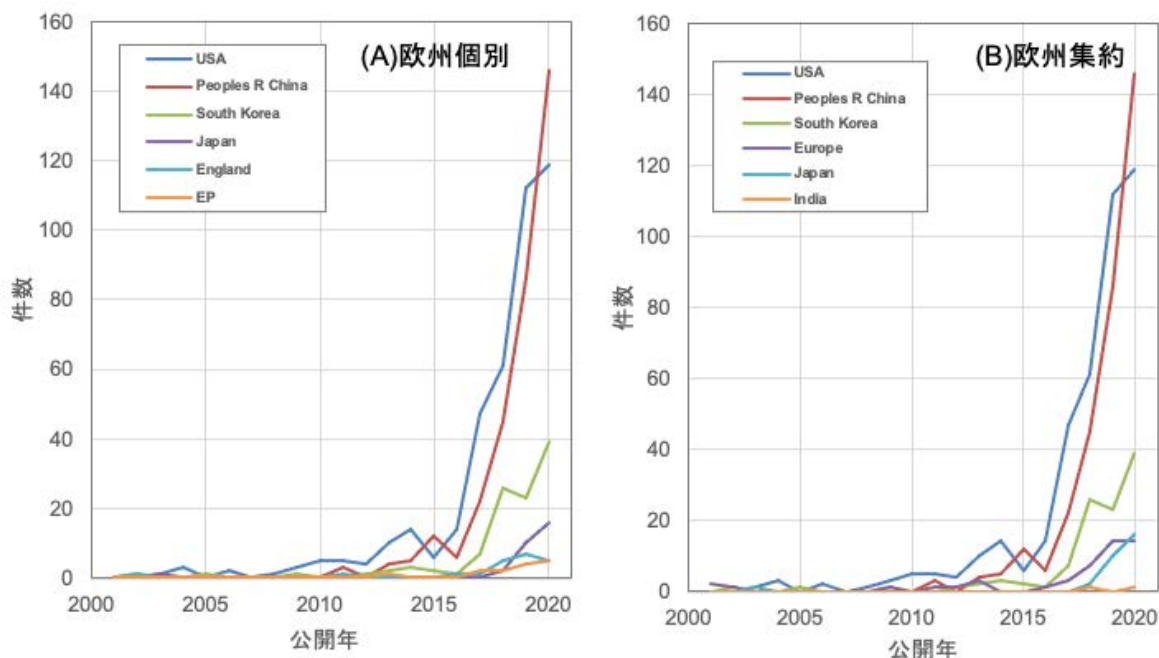


図 28 脳型AIアクセラレータ 特許 国・地域別件数推移:(A)欧州各国を個別に集計 (B)欧州を合算して集計

米国・中国が急激に論文数・特許数ともに増加させているが、立ち上がりは米国が早く中国が追いかけて伸ばしている形となっている。欧州としてまとめて集計すると論文数では米国に先んじて2016年から論文数が急激に増加しているが、特許数は4位に留まっている。

文献数では米国・中国・欧州が上位を占め、その次が韓国となっている。韓国の論文数は2018年まで日本と同程度であったが、2019年以降で大きく増加している。韓国の特許数は2018年から急増していることから、脳型AIアクセラレータの技術分野に注力している様子が窺える。

脳型AIアクセラレータで論文数・特許数の多かった米国・中国・欧州・韓国・日本について、国ごとに論文出版・特許出願が多い領域を明らかにするため、論文及び特許からなる技術俯瞰図においてヒートマップによる可視化を行った。結果を図29に示す。

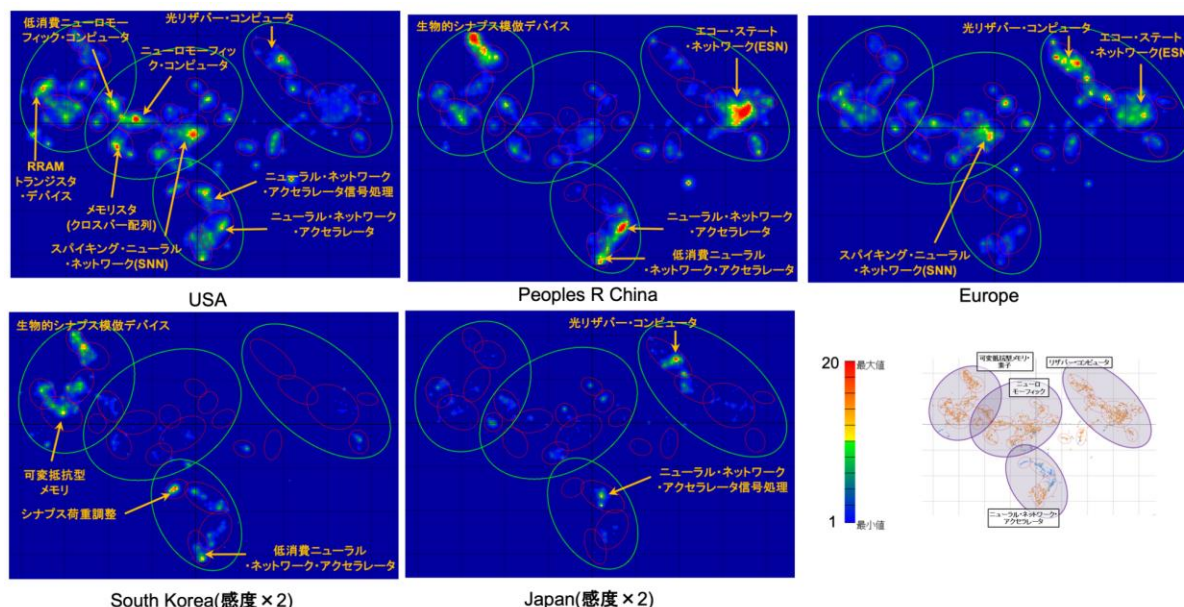


図 29 脳型AIアクセラレータ 論文+特許 トピックモデル計算の多様体学習による2次元可視化 :国・地域ごと

図29で赤く表示される文献数が多い領域の分布を比較すると、国・地域によって文献数が多い領域が異なっている。米国の文献は「エコ・ステート・ネットワーク」以外のほぼ全領域に存在しており、特に中心部の「スパイクング・ニューラル・ネットワーク」「ニューロモーフフィック・コンピュータ」に集中している。中国の文献は「エコ・ステート・ネットワーク」「ニューラル・ネットワーク・アクセラレータ」「生物学的シナプス模倣デバイス(paired pulse facilitationを有するデバイス)」に集中しており、いずれも俯瞰図外周部に位置している。欧州の文献は「光リザバー・コンピュータ」「エコ・ステート・ネットワーク」と分散した領域で多くなっている。韓国の文献は「低消費ニューラル・ネットワーク・アクセラレータ」「生物学的シナプス模倣デバイス」の領域に、日本の文献は「光リザバー・コンピュータ」「ニューラル・ネットワーク・アクセラレータ」に集中している。

同様に国ごとに論文出版が多い領域を明らかにするため、論文のみからなる技術俯瞰図においてヒートマップによる可視化を行った。結果を図30に示す。

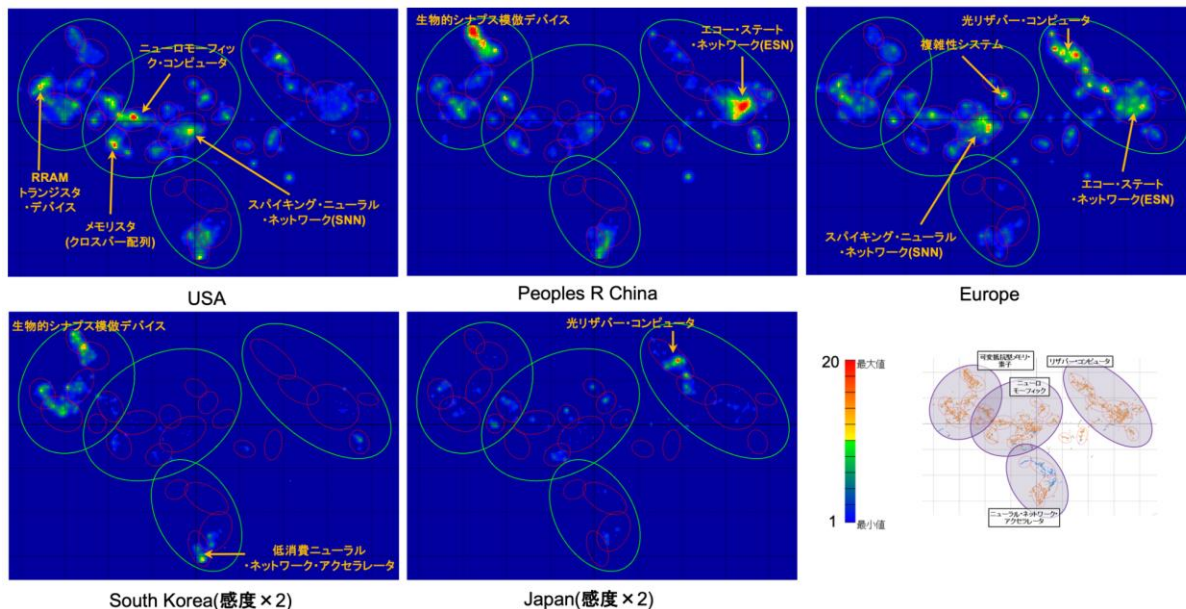


図 30 脳型AIアクセラレータ 論文 トピックモデル計算の多様体学習による2次元可視化 :国・地域ごと

米国の論文は「スパイキング・ニューラル・ネットワーク」「ニューロモーフィック・コンピュータ」「ニューラル・ネットワーク・アクセラレータ」に集中している。中国の論文は「エコー・ステート・ネットワーク」「生物的シナプス模倣デバイス」「ニューラル・ネットワーク・アクセラレータ」にやや集中している。欧州の論文は「スパイキング・ニューラル・ネットワーク」「エコー・ステート・ネットワーク」「光リザバー・コンピュータ」に集中しており、「ニューラル・ネットワーク・アクセラレータ」では比較的論文数が少ない傾向にあった。韓国の論文は「生物的シナプス模倣デバイス」「ニューラル・ネットワーク・アクセラレータ」に集中し、日本の論文は「光リザバー・コンピュータ」に集中している様子が確認された。

同様に国ごとに特許出願が多い領域を明らかにするため、特許のみからなる技術俯瞰図においてヒートマップによる可視化を行った。結果を図31に示す。

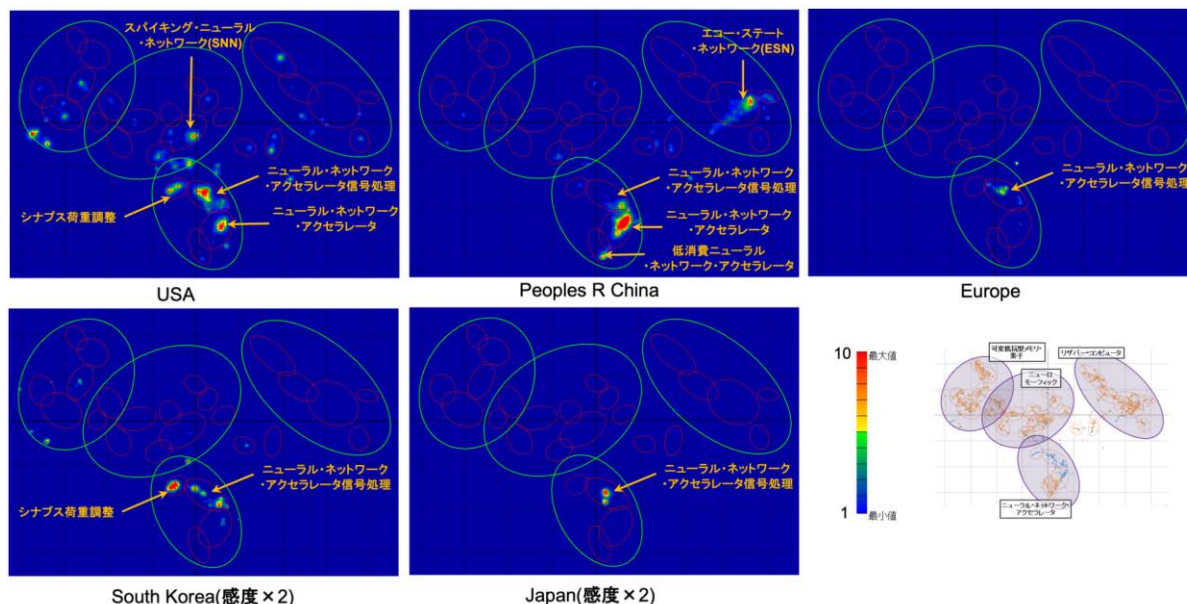


図 31 脳型AIアクセラレータ 特許 トピックモデル計算の多様体学習による2次元可視化 :国・地域ごと

特許のみに限定すると、各国・地域とも全体的に「ニューラル・ネットワーク・アクセラレータ」に集中する傾向がある。米国の特許は「ニューラル・ネットワーク・アクセラレータ」に最も集中し、次いで「スパイクング・ニューラル・ネットワーク」となっている。中国の特許も「ニューラル・ネットワーク・アクセラレータ」に最も集中しており、次いで「エコー・ステート・ネットワーク」であった。韓国・欧州・日本の特許は「ニューラル・ネットワーク・アクセラレータ」のみに集中していると見られる。

脳型AIアクセラレータに関する論文について、出版した研究組織毎に出版数の集計を行った。なお、今回分析に用いたWeb of Scienceのバルクデータでは収録状況の影響により2020年において約1割程度の欠損が確認されている。論文出版数の集計結果を図32に、論文出版数の推移を図33に示す。

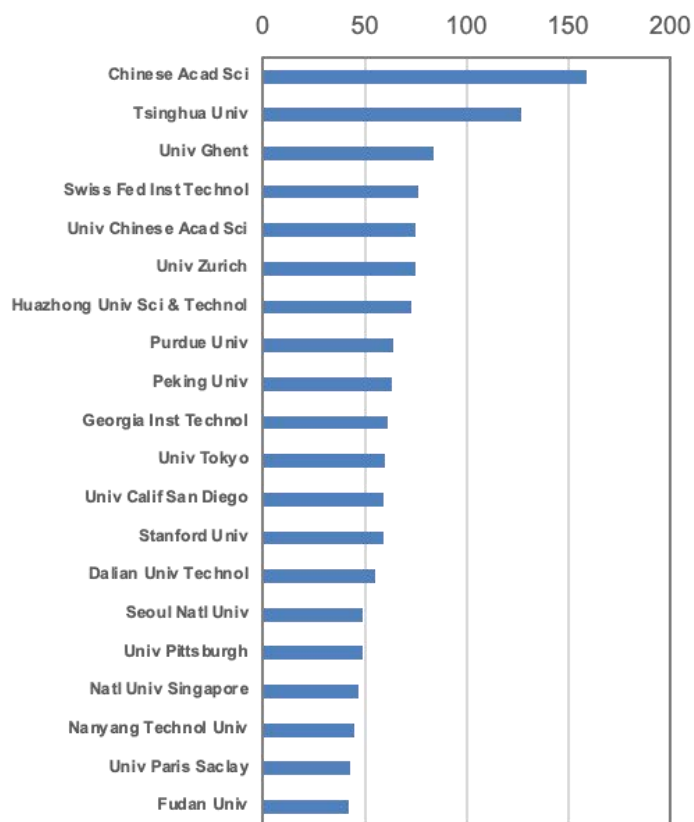


図 32 脳型AIアクセラレータ論文 研究機関別件数

最も論文出版数の多い国は米国であったが、研究機関としては中国の中国科学院が最多であった。次いで、中国の精華大学、ベルギーのゲント大学、スイス連邦工科大学と中国、欧州の機関となった。米国の最高位は8位のパデュー大学である。日本の最高位は東京大学で11位であった。

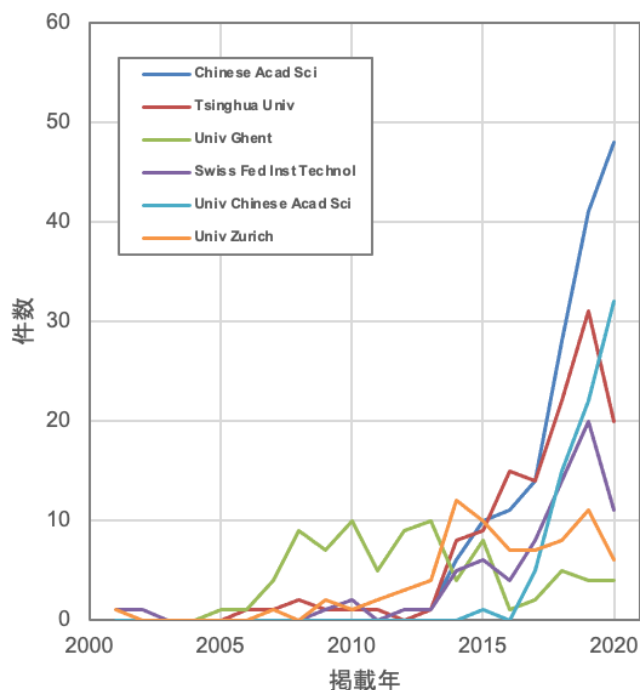


図 33 脳型AIアクセラレータ論文 研究機関別件数推移

首位の中国科学院や5位の中国科学技術大学など、中国の研究機関から出版される論文数の増加が著しい。3位のベルギー、ゲント大学は減少傾向にある。6位のチューリッヒ大学も減少の可能性はある。

技術俯瞰図において12の研究機関毎に論文分布の可視化を行った。結果を図34～図36に示す。

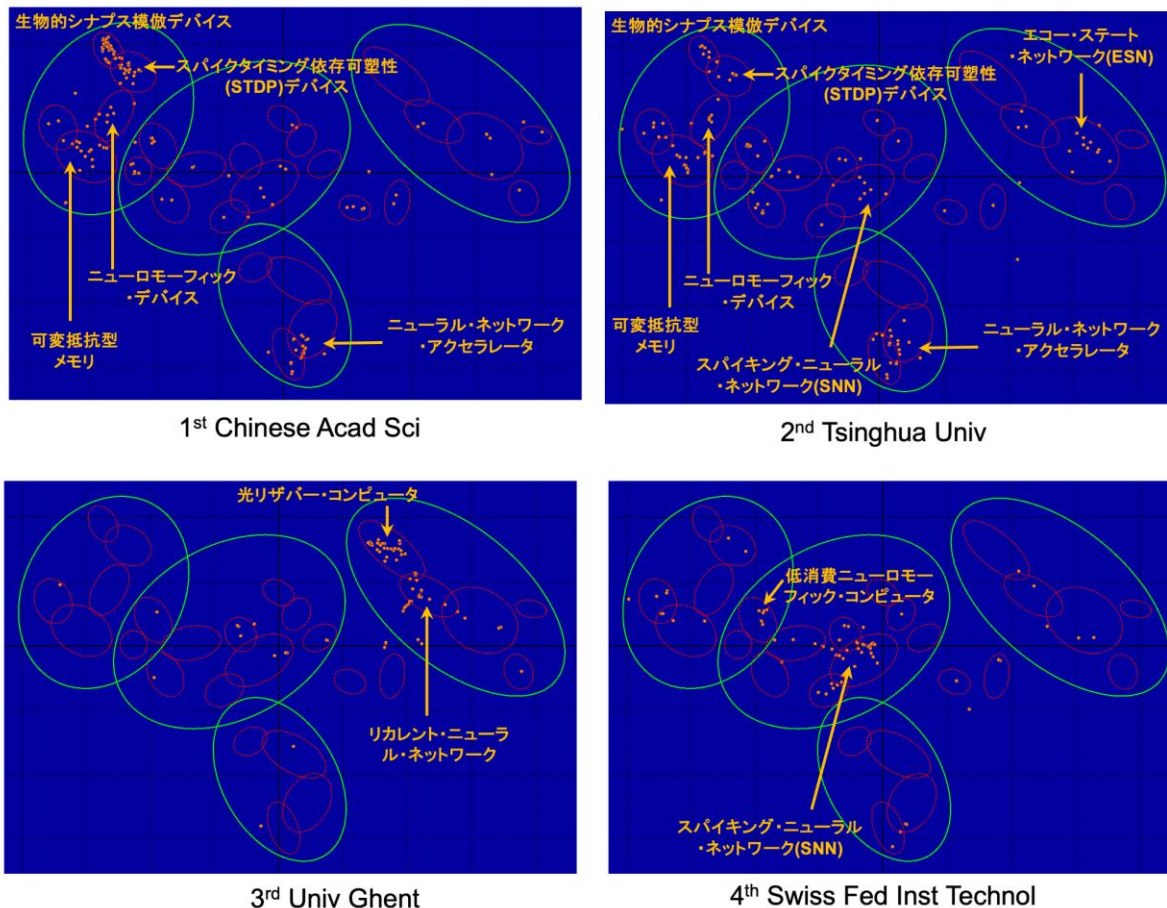


図 34 脳型AIアクセラレータ 論文 トピックモデル計算の多様体学習による2次元可視化 :研究機関ごと 論文数1位~4位

首位の中国科学院と2位の精華大学においては研究領域に多くの共通点がある。共通して「スパイクタイミング依存可塑性デバイス」「生物学的シナプス模倣デバイス(paired pulse facilitationを有するデバイス)」「ニューロモーフィックデバイス」「ニューラルネットワークアクセラレータ」に集中している。精華大学は「エコー・ステート・ネットワーク」「スパイクング・ニューラル・ネットワーク」の領域で中国科学院よりも多くなっている。3位のベルギーのアントワープ大学は「光リザバー・コンピュータ」「リカレント・ニューラル・ネットワーク」など【リザバー・コンピュータ】関連に集中している。4位のスイス連邦工科大学は「スパイクング・ニューラル・ネットワーク」「量子誤り訂正」「低消費ニューロモーフィックコンピュータ」に集中している様子が確認された。

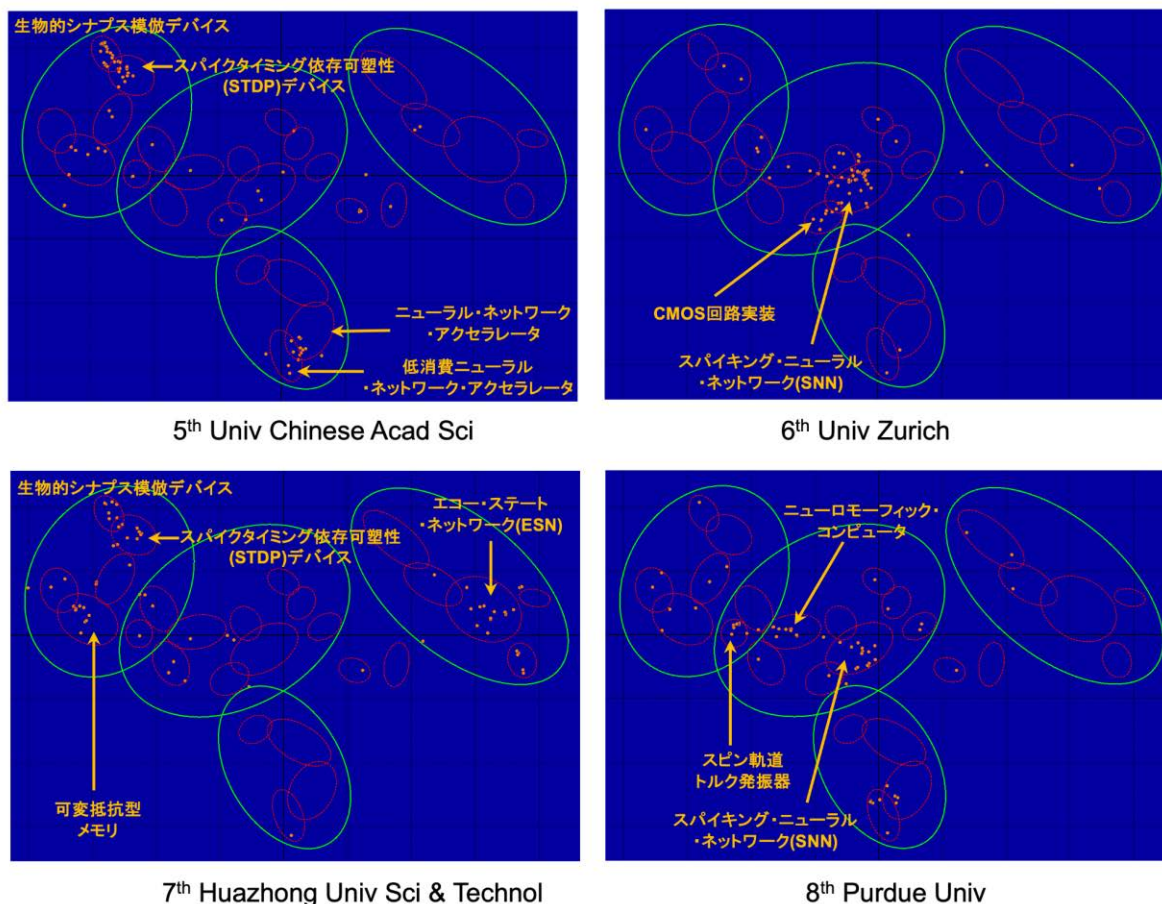


図 35 脳型AIアクセラレータ 論文 トピックモデル計算の多様体学習による2次元可視化 :研究機関ごと 論文数5位~8位

5位の中国科学技術大学においては「スパイクタイミング依存可塑性デバイス」「生物学的シナプス模倣デバイス(paired pulse facilitationを有するデバイス)」「ニューラル・ネットワーク・アクセラレータ」に集中している。6位のチューリッヒ大学は「スパイクング・ニューラル・ネットワーク」「CMOS回路実装」に、7位の華中科技大学も「スパイクタイミング依存可塑性デバイス」「生物学的シナプス模倣デバイス(paired pulse facilitationを有するデバイス)」「エコー・ステート・ネットワーク」に、8位のパデュー大学は「スパイクング・ニューラル・ネットワーク」「ニューロモーフィック・コンピュータ」に集中している。

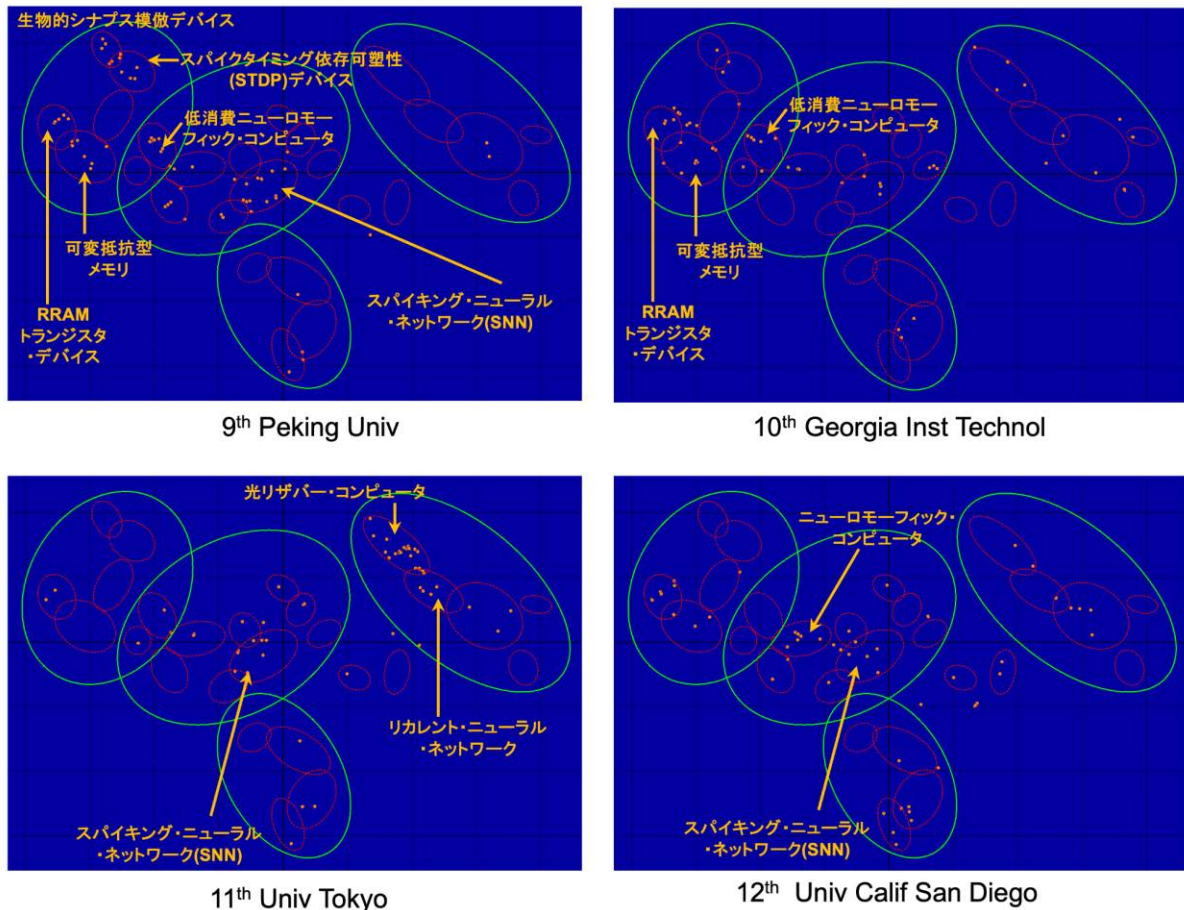


図 36 脳型AIアクセラレータ 論文 トピックモデル計算の多様体学習による2次元可視化 :研究機関ごと論文数9位~12位

9位の北京大学も「スパイクタイミング依存可塑性デバイス」「生物学的シナプス模倣デバイス(paired pulse facilitationを有するデバイス)」「ニューラル・ネットワーク・アクセラレータ」に主に集中している。「スパイキング・ニューラル・ネットワーク」に集中している点は他の中国の機関には見られない特徴である。10位のジョージア工科大学は「ニューロモーフック・コンピュータ」「可変抵抗型メモリ」に、11位の東京大学は「光リザパー・コンピュータ」「リカレント・ニューラル・ネットワーク」「スパイキング・ニューラル・ネットワーク」に、12位のカリフォルニア大学サンディエゴ校は「スパイキング・ニューラル・ネットワーク」などのニューロモーフック・コンピュータに集中している。

脳型AIアクセラレータに関する特許について、出願人毎に特許出願数の集計を行った。特許はファミリー重複削除を行っているため、登録年はファミリー内の登録特許中の最古年を採用した。特許出願数の集計結果を図37に、特許出願数の推移を図38に示す。

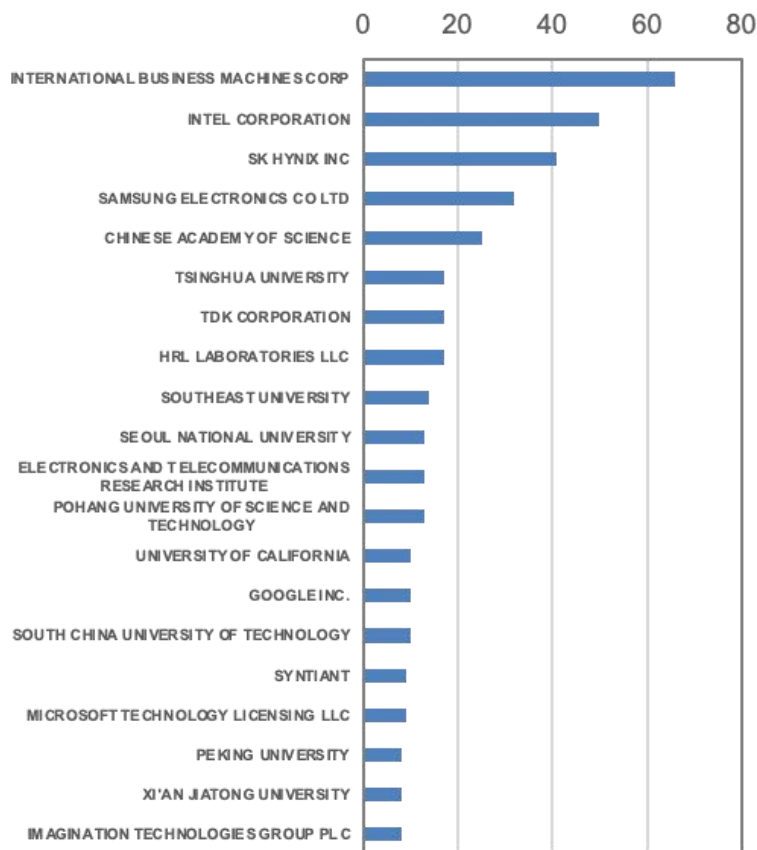


図 37 脳型AIアクセラレータ 特許 出願人別件数

最も特許出願数の多い国は米国であり、出願人別でもIBMとなった。次いでインテル、韓国SKハニックス、サムスン電子、中国科学院と精華大学となっている。

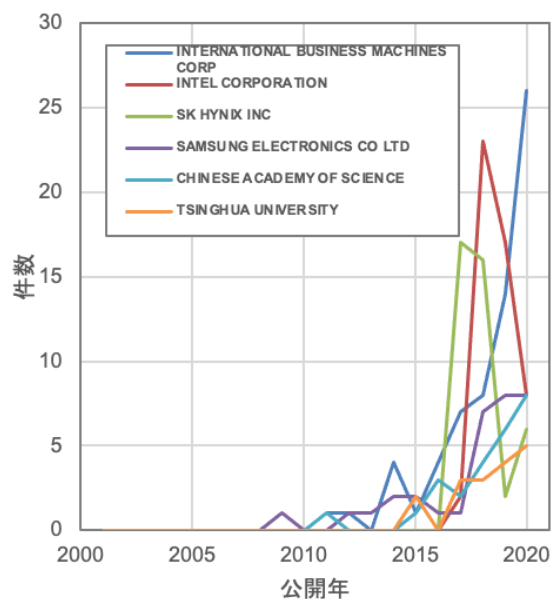


図 38 脳型AIアクセラレータ 特許 出願人別件数推移

2019年からのIBMの特許数の増加が著しい。2位のインテルや3位のSKハイニックスは減少している一方で中国の機関は出願件数が増加している。

技術俯瞰図において、12の機関毎に特許分布の可視化を行った。結果を図39～図41に示す。

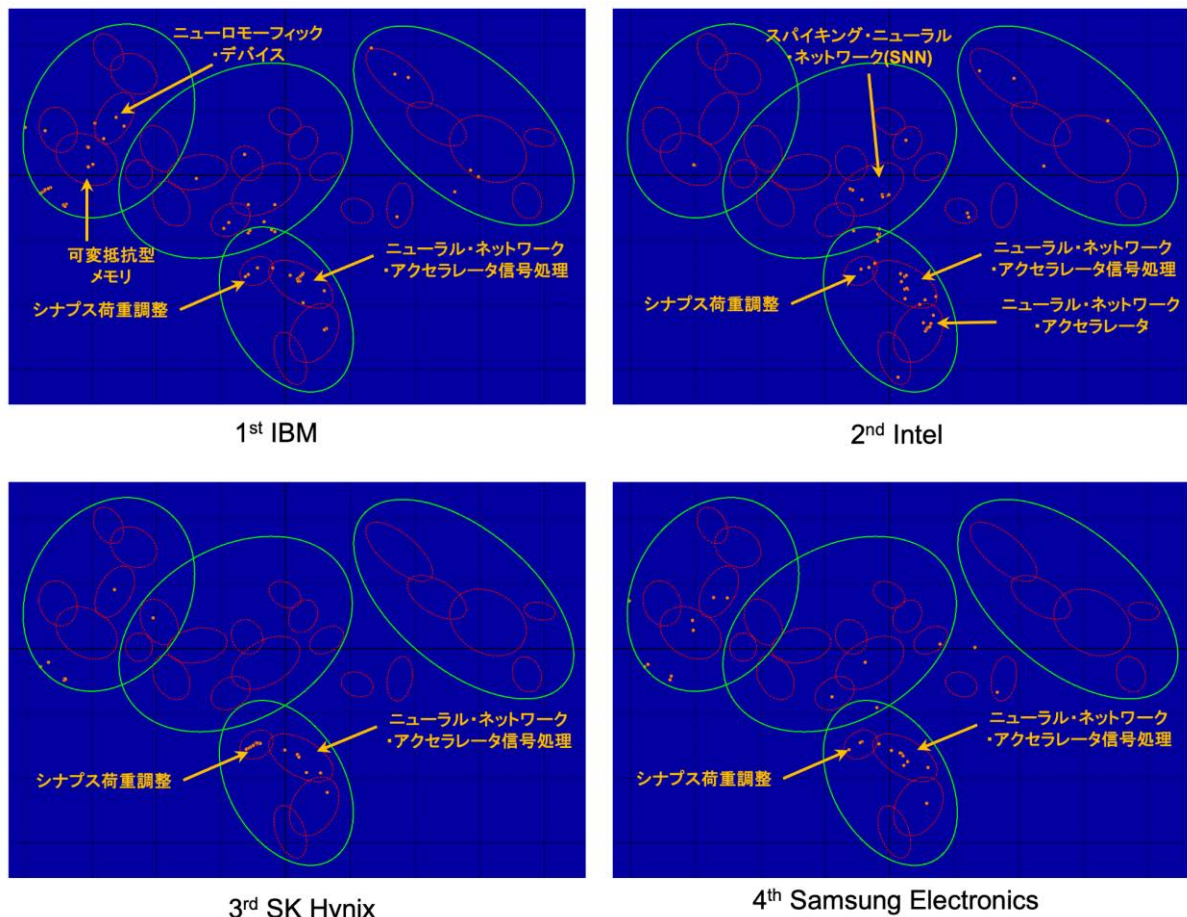


図 39 脳型AIアクセラレータ 特許 トピックモデル計算の多様体学習による2次元可視化 :研究機関ごと 特許出願数1位～4位

脳型AIアクセラレータの特許は、ほぼ【ニューラル・ネットワーク・アクセラレータ】領域で出願されている。

1位のIBMは【ニューラル・ネットワーク・アクセラレータ】以外に「ニューロモーフィック・デバイス」「可変抵抗型メモリ」に出願している。2位のインテルは【ニューラル・ネットワーク・アクセラレータ】以外に「スパイクング・ニューラル・ネットワーク」に出願している。3位のSKハイニックスと4位のサムスン電子は、ほぼ【ニューラル・ネットワーク・アクセラレータ】に集中している。

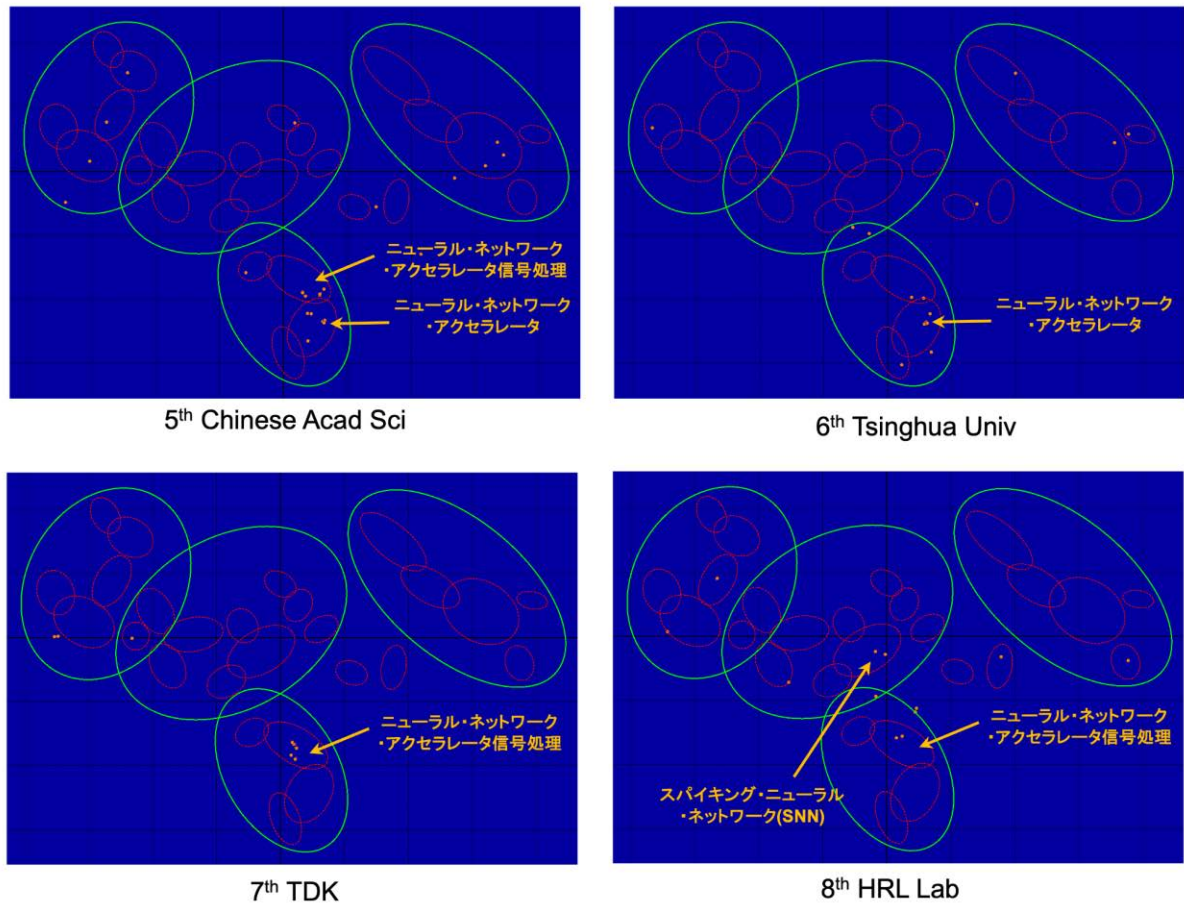


図 40 脳型AIアクセラレータ 特許 トピックモデル計算の多様体学習による2次元可視化 :研究機関ごと 特許出願数5位~8位

5位の中国科学院、6位の精華大学、7位のTDK、8位のHRL(ヒューズ・リサーチ・ラボラトリー)は、いずれもほぼ【ニューラル・ネットワーク・アクセラレータ】に集中している。

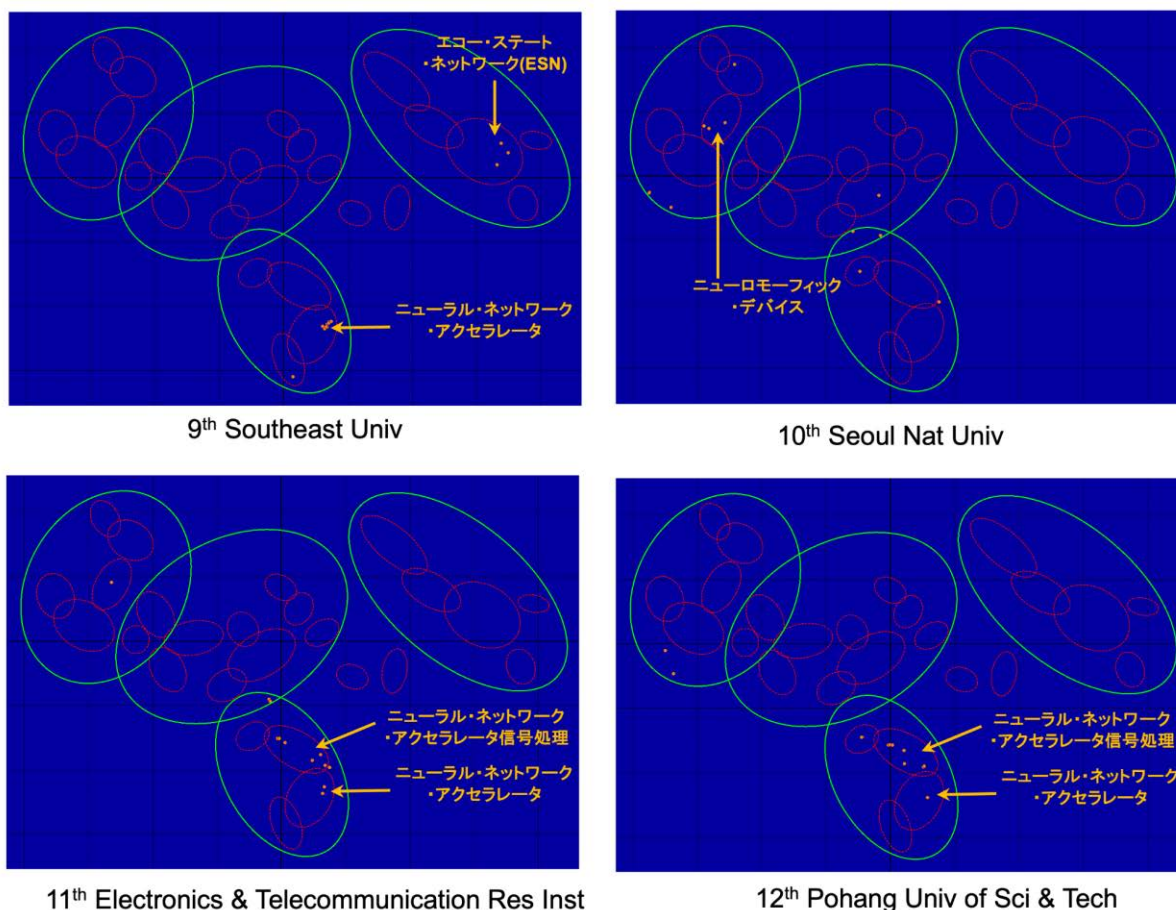


図 41 脳型AIアクセラレータ 特許 トピックモデル計算の多様体学習による2次元可視化 :研究機関ごとと 特許出願数9位~12位

9位の中国 東南大学は【ニューラル・ネットワーク・アクセラレータ】以外に「エコー・ステート・ネットワーク」に出願し、10位のソウル大は「ニューロモーフィック・デバイス」に集中している。11位の韓国電子通信研究院(ETRI)と12位の浦項工科大学校は【ニューラル・ネットワーク・アクセラレータ】に集中している。

4 まとめ

脳型AIアクセラレータに関連する論文・特許を抽出し、タイトル・アブストラクト等のテキストデータを用いたクラスタリング分析を行うことで、学術研究および技術開発の動向を二次元的に可視化した俯瞰図を作成した。

論文4,426件と特許929件から作成した俯瞰図から、脳型AIアクセラレータに関しては大きく4領域に分かれており、【ニューロモーフィック】を中心としてその周囲に【リザーバー・コンピュータ】【ニューラル・ネットワーク・アクセラレータ】【可変抵抗型メモリ・素子】が存在していることが明らかになった。

論文数が2012年以降に急激に増加を見せており、なかでも「生物的シナプス模倣デバイス」「スパイクタイミング依存可塑性デバイス」「ニューロモーフィック・デバイス」「PRAMトランジスタ・デバイス」「低消費ニューラル・ネットワーク・アクセラレータ」の領域では論文数に加えて研究機関数・研究者数も増加していた。近年になって研究が活発に進んでいることが確認された。

特許出願が増加し始めたのは2017年以降であり、「ニューラル・ネットワーク・アクセラレータの信号処理」や「シナプス荷重調整」に集中している。出版されている論文数と比較して特許出願数が低く、個々の研究領域が独自のトピックを有することから、各研究領域で互いに独立して基礎的な理解を深めている段階と考えられる。特許出願が進んでいる信号処理等の技術は新製品の機能を直接発現するものではなく、研究を進める上で必要な基盤的な特性を持つ技術と考えられる。2020年の脳型AIアクセラレータの研究分野においては、基礎的な理解と基盤技術の開発を盛んに進めている段階であり、将来エッジコンピューティング等の社会実装に直結する製品と接続が確認できれば経済効果算出のシナリオ作成に貢献すると考えられる。

図29に基づいて国・地域ごとの研究開発動向の概要を表2にまとめた。脳型AIアクセラレータの分野において米国が広い領域で研究を行っている一方、中国や欧州は一部の分野に集中して研究を行っていることが明らかとなった。今回の一連の分析から、日本の科学技術投資を検討する際に、注力すべき研究分野を俯瞰して検討することが重要であることが示唆された。

表 2 国・地域ごとの研究開発動向整理 (図29に基づく)

	米 国	中 国	欧 州	韓 国	日 本
生物的シナプス模倣デバイス	○	○	×	○	×
ニューロモーフイック・コンピュータ	○	×	○	×	×
スパイクング・ニューラル・ネットワーク	○	○	○	×	×
光リザバー・コンピュータ	○	×	○	×	○
エコー・ステート・ネットワーク (ESN)	×	○	○	×	×
シナプス荷重調整	○	×	×	○	×
ニューラル・ネットワーク・アクセラレータ	○	○	×	×	×
低消費ニューラル・ネットワーク・アクセラレータ	○	○	×	○	×
ニューラル・ネットワーク・アクセラレータ信号処理	○	×	×	○	○

謝辞

CRDS馬場 寿夫フェローに文献抽出の条件設定に関する議論で協力頂いた。

本研究は文部科学省共進化実現プログラム池内プロジェクト「科学技術・イノベーション政策の経済社会効果分析の政策形成プロセスへの実装」の助成を受けて実施された。

参考文献

黒田 昌裕, 池内 健太, 原 泰史

2016.「科学技術イノベーション政策における政策オプションの作成 -政策シミュレーターの構築- (モデル構築編)」, 政策研究大学院大学 科学技術イノベーション政策研究センター SciREX Working Paper 2016-#01, <http://doi.org/10.24545/00001570>

CRDS調査報告書

2016.「科学技術イノベーション政策の科学における政策オプションの作成～ICT分野の政策オプション作成プロセス～」, CRDS-FY2015-RR-07, 2016年3月

政策研究大学院大学科学技術イノベーション政策研究センター (SciREX センター)
ワーキングペーパー SciREX-WP-2022-#02

CRDS戦略プロポーザル

2021.「脳型AIアクセラレータ～柔軟な高度情報処理と超低消費電力化の両立～」、CRDS-
FY2020-SP-04、2021年3月



SciREX Center



政策研究大学院大学
NATIONAL GRADUATE INSTITUTE
FOR POLICY STUDIES

科学技術イノベーション政策研究センター

Science for RE-Designing Science, Technology and Innovation Policy Center (SciREX Center)

〒106-8677 東京都港区六本木 7-22-1 / Tel 03-6439-6318/ Fax 03-6439-6260

7-22-1 Roppongi, Minato-Ku, Tokyo 106-8677 JAPAN

Tel +81-(0)3-6439-6318 / Fax +81-(0)3-6439-6260