

デバイス自ら学習して判断する「意思決定イオニクスデバイス」を發明 ～イオン・分子濃度を計算処理とメモリに利用 新しい人工知能システムに向けて前進～

配布日時：平成30年9月5日14時

国立研究開発法人物質・材料研究機構（NIMS）

概要

1. NIMS は、経験をイオンや分子の濃度変化として記憶し、デバイス自ら迅速に意思決定を行う「意思決定イオニクス⁽¹⁾デバイス」を發明し、その動作実証に成功しました。このデバイスでは、過去の経験をコンピュータのメモリで蓄積する必要がなく、それに基づく意思決定のための計算処理も不要のため、状況変化に効率的に適応⁽²⁾して判断を行うことができます。このデバイス開発により、ソフトウェアの働きでデジタル情報処理をする従来の人工知能(AI)システムと全く異なり、ハードウェアの物性を利用してアナログ情報処理を行う新しいAIシステムの開発が期待されます。

2. 情報通信、製造、経済や娯楽などの様々な社会活動において、状況を素早く判断して最適な行動を意思決定するためのAIシステムの開発が重要となっています。近年、そのための技術として、高度なプログラムを用いながらコンピュータで計算処理を行うAI開発が精力的に進められています。しかし、膨大な情報と高度なプログラム処理に基づいて判断するため、選択する課題が複雑化して情報量が更に増加すると、処理時間が長くなり消費電力も増加するという課題がありました。

3. 本研究グループは、固体電解質⁽³⁾内の水素イオンの移動が引き起こす電気化学現象を利用して動作する意思決定イオニクスデバイスを開発しました(図1)。正しい判断を繰り返すことで、一方向に反応が進み、イオンや分子の濃度が偏り、よりその判断をしやすくなります。この仕組みを用いて、無線通信において、混雑した通信ネットワークの状況変化に適応して通信量を最大化するための最適な通信チャンネル(周波数帯域)⁽⁴⁾を選択することに成功しました(図2)。さらに、複数の利用者が互いにチャンネルを譲り合って全体の通信量を最大化するという、より高度な問題においても最適なチャンネルの選択が可能でした。

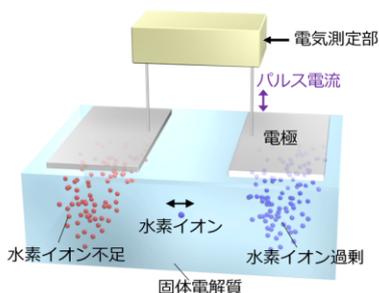


図1 水素イオンの移動による電気化学現象を利用して学習と判断を行う意思決定イオニクスデバイスの概略図。

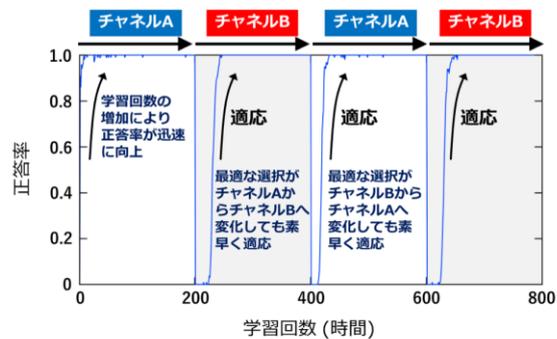


図2 外部からの通信チャンネルAとBの使用状況を学習して、自己の通信量を最大化するにはどのチャンネルの利用が最適かを迅速に判断できることを示す。図中のチャンネルAおよびチャンネルBはその時間帯での最適なチャンネルを表す。

4. 今後、本成果をもとに高性能・高集積化等を行い、通信ネットワーク問題だけでなく、製造、金融取引など、報酬確率が異なる複数の選択肢から利益を最大化する選択を行う複雑な問題の解決を目指します。さらには、この技術を応用して、生物の様にプログラム無しでも動作する新しい原理のAIシステム(人工脳)の開発へと発展させる予定です。

5. 本研究は、国際ナノアーキテクニクス研究拠点ナノイオニクスデバイスグループの土屋敬志主任研究員、鶴岡徹主幹研究員、金成主 NIMS 特別研究員(現 慶應大学特任准教授)、寺部一弥グループリーダーと同研究拠点青野正和エグゼクティブアドバイザーとの共同によって行われました。

6. 本研究成果は、米国科学誌「Science Advances」誌のオンライン版にて現地時間2018年9月7日午後2時(日本時間8日午前3時)に掲載されます。

研究の背景

今日の社会活動や産業活動の様々な場において、刻一刻と変化する状況を迅速に認識して適切に判断することの重要性が益々高まっていることから、人間の意思決定能力を上回る人工知能（AI）システムの技術開発が積極的に進められています。これまでの AI 技術は膨大な情報をプログラムに沿ってコンピュータ処理して判断をするものであり、意思決定は高度なプログラム処理による学習によって成されています。そのため、コンピュータに使われているデバイスは、単に情報データの蓄積と計算をするために用いられてきました。この AI 技術の進歩において、取り扱う問題や情報が複雑化すると処理時間が指数関数的に増加してしまうという課題がありましたが、コンピュータの年々の性能向上によって解決してきました。しかし、近年では、膨大な数のデバイスを搭載した集積回路の動作限界などによりコンピュータの性能向上が見込めなくなってきました。そのため、従来の高度なプログラム開発とコンピュータの性能向上に依存した AI 技術の開発だけでなく、ニューロコンピュータなど革新的な AI 技術の開発が大いに期待されています。

研究内容と成果

本研究グループは、デバイスの材料特性を利用することにより、デバイス自身が学習して意思決定を担う機能を持つ新しいデバイスを開発しました。このデバイスは、デバイス材料である固体電解質中のイオン移動に起因する電気化学現象を利用することによって動作することから、意思決定イオニクスデバイスと呼んでいます。我々は、このデバイスを用いて多腕バンディット問題⁽⁵⁾と呼ばれる最適な選択を探す問題を解くことに成功しました。多腕バンディット問題とは、報酬確率が異なる複数のスロットマシンの中から利益を最大化するために適切なスロットマシンを選択する数理問題で、現代の社会活動の幅広い分野でその応用が期待されています。実施例として、無線通信における多腕バンディット問題に注目し、混雑した通信ネットワークの状況変化に適応して損失を避けながら通信量を最大化する最適な行動選択を行いました。

意思決定イオニクスデバイスの基本構造は、水素イオンを輸送することが可能なナフィオンと呼ばれる固体電解質に白金電極を取り付けた構造であり、このデバイスには電流を印加したり電圧を測ったりする電気測定部、およびその計測制御とデータ処理をするためのコンピュータが接続しています（図3左）。このイオニクスデバイスにパルス電流（2 Hz）を印加すると、電極界面ではナフィオン内の水素イオンの移動に伴う電気化学現象（電気二重層の充電、酸化還元反応⁽⁶⁾等）が起きるため、水素イオンや分子（水素、酸素、水等）の濃度変化が生じることによるキャパシタや濃淡電池⁽⁷⁾の作用により回路開放時に電位差（電圧）が生じます（図3右）。固体電解質内で生じるこの電気化学現象を利用することにより、迅速に学習して適切な判断を行う機能をデバイスに持たせました。更に、このデバイスでは、水素イオンの移動に伴う電気化学現象を巧みに利用することにより、新しい経験を重視して適応するという適応挙動の機能も持たすことができました。

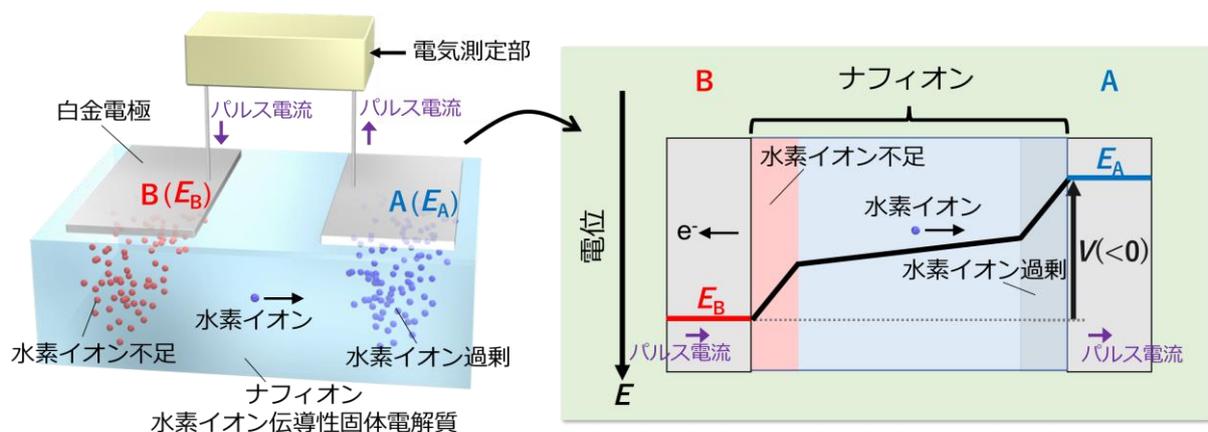


図3. 水素イオンの移動による電気化学現象を利用して学習と判断を行う意思決定イオニクスデバイスの模式図（左）と電極 A に負のパルス電流を印加し電気二重層が充電された際の電極間の電位差の変化の模式図（右）。電位差がより大きくなると、電極界面で水素や酸素の酸化還元反応が起こる。

この意思決定イオニクスデバイスを利用して、通信成功確率（確率 P と略す）が異なる2つのチャンネル（周波数帯域）A、Bに対する多腕バンディット問題を解きました。無線通信の利用者は、これらの確率 P_A 、 P_B を前もって知りません。チャンネルA、Bに割り当てられた電極A、Bの電位 E_A 、 E_B を測定して、高い電位を示す電極に対応するチャンネルを選択するよう定めます。選択したチャンネルを用いてデータ送信の成功もしくは失敗が確率事象として与えられ、その結果をデバイスに学習させます。ここでは、通信が成功（失敗）した場合、選択したチャンネルに対応する電極に正（負）のパルス電流を印加します。この電流が電気化学現象を引き起こして電極間の電位差が変調されることによってチャンネルの持つ確率を学習するとともに、その時点で次回に選択するチャンネルを電位として出力します。また、イオニクスデバイスの機能を利用する意思決定の方法は、同グループの金らによって提案された綱引き（tug-of-war）理論^⑧による数理モデルを利用して行いました。

実際に意思決定イオニクスデバイスを用いて、多腕バンディット問題を解いた実験結果を図4に示します。ここでは、通信が成功する確率 P が様々に異なったチャンネルAとBの組み合わせの条件で実験を行いました。例えば、青線で示された場合では、2つのチャンネルAとBに対する確率が $P_A=0.9$ と $P_B=0.1$ を割り当てられた条件です。当初はチャンネルAとBについて何ら情報を学習しておらずAとBの選択をランダムに行うため、正答率は0.5程度の値を示します。しかし、選択試行を繰り返して学習回数を増やして行くと、次第に正答率が完全正解の1.0に近づいていきます。これは、試行回数を増やして成功・失敗した経験をより多く学習することによって $P_A=0.9$ のチャンネルAが最適な選択であることを正しく判断することを示しています。この後は、チャンネルAを選び続けているので、送信に成功したデータ量は順調に増えていきます。

学習回数200回目で突如として正答率が0まで急落します。これは、無線通信の混雑状況の変化^⑨を模擬するために、チャンネルAとBに割り当てた確率 P を意図的に $P_A=0.1$ と $P_B=0.9$ へと逆転したためです。逆転した当初は、まだチャンネルAが正しい選択と学習したままなのでAを誤って選択し続け、非常に低い正答率に留まります。しかし、試行回数を増やして学習を増やして行くことによって、チャンネルBが正しい選択であると迅速に判断することにより正答率が再び完全正解の1.0に急回復します。同様の逆転を繰り返しても、学習による迅速な適応を繰り返すことができます。また、 P_A と P_B を他の確率の組み合わせにした条件でも類似の適応挙動が得られます。ただし、赤線で示された場合（ $P_A=0.6$ と $P_B=0.4$ ）では正答率が0.9程度に留まっています。これは2つのチャンネル間の確率の差が小さく難解な選択問題であるためであり、今回用いた学習回数とデバイス性能では完全正解に至りませんでした。

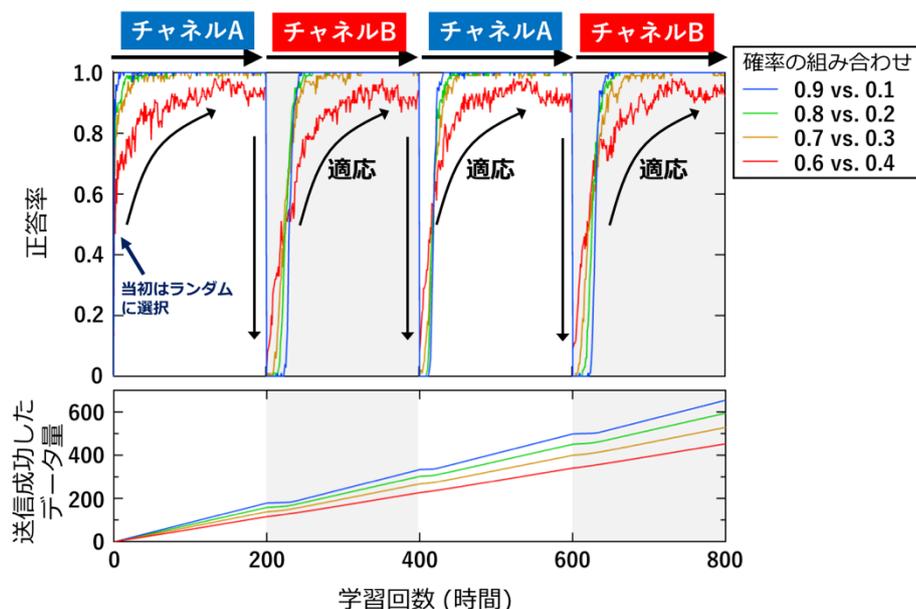


図4. 外部からの通信チャンネルAとBの使用状況を学習して、自己の通信量を最大化するにはどのチャンネルの利用が最適化を迅速に判断している。最適なチャンネルを利用することにより送信成功したデータ量が増加していく。

さらに、我々は3個の電極を有する2つの意思決定イオニクスデバイスを結合することによって、2人の利用者が3つのチャンネルの通信ネットワークを利用する高度な競争的多腕バンディット問題⁽¹⁰⁾を解くことにも成功しました。図5aに示すように、2人の利用者が自分勝手に最も良いチャンネル（この例ではチャンネルA）を利用しようとすると、重複による混雑で通信が失敗しやすくなり、全体の通信量（利用者1と2の通信量の合計）が低くなるので効率的ではありません。このような状況はナッシュ均衡⁽¹¹⁾と呼ばれます。全体の通信量を最大化するという観点からは、このナッシュ均衡を避け、互いにチャンネルを譲り合う方が有利です（図5b）。私達の意思決定イオニクスデバイスを利用して計算することにより、互いにチャンネルを譲り合うことによって全体の通信量を最大化するための最適な選択を計算することができました（図6a）。図6(b)に意思決定イオニクスデバイスによって得られた通信量を示します（赤実線）。ナッシュ均衡状態で得られる通信量を超え、理論的境界に肉薄する高い通信量を実現していることがわかります。

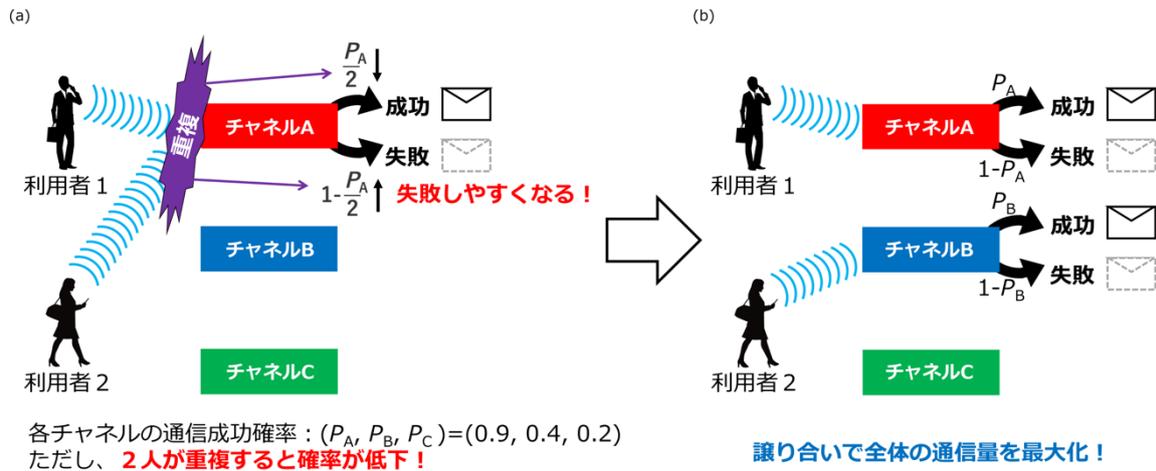


図5. 2人の利用者が通信ネットワークを利用する競争的多腕バンディット問題の模式図。自分勝手な利用者が最も良いチャンネルを重複して利用しようとする場合 (a)、利用者2人が重複を避けて譲り合うことで全体の通信量を最大化しようとする場合 (b)。

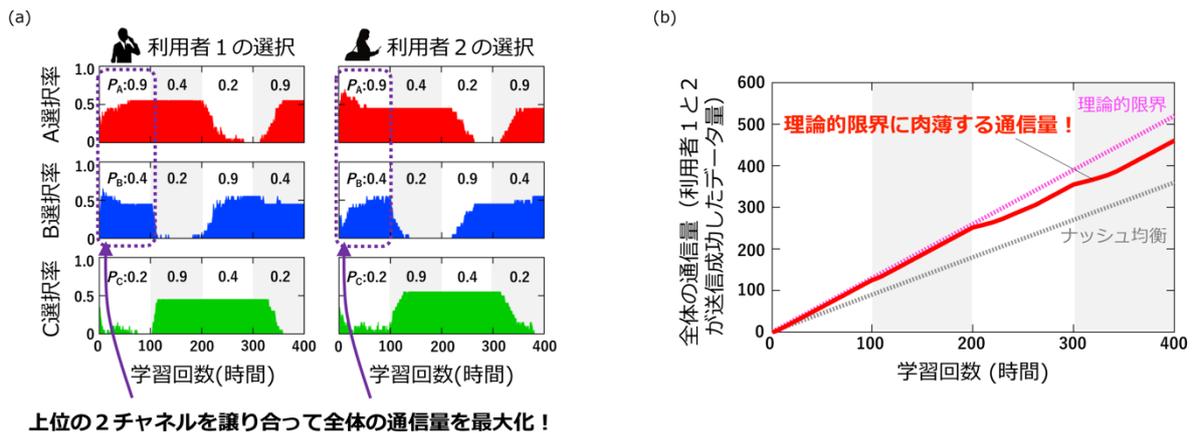


図6. 意思決定イオニクスデバイスで実現した利用者1と2のチャンネル選択 (a)。譲り合いによる全体（利用者1と2）の通信量の最大化 (b)。

今後の展開

今後、本成果を基にして、微細加工技術による高性能・高集積化等を行い、より複雑かつ難しい数理問題を解くことができる意思決定イオニクスデバイスを搭載した AI システムへと進歩させて行きます。さ

らには、これらの技術を応用して、生物の様にプログラム無しでも動作する革新的な AI システム（人工脳）へと発展させたいと考えています。

掲載論文

題目：Ionic Decision-maker Created as Novel, Solid-state Devices

著者：Takashi Tsuchiya, Tohru Tsuruoka, Song-Ju Kim, Kazuya Terabe, and Masakazu Aono

雑誌：Science Advances

掲載日時：現地時間 2018 年 9 月 7 日 14 時（日本時間 8 日 3 時） オンライン掲載

DOI：10.1126/sciadv.aau2057

用語解説

(1) イオニクス

イオンの輸送現象を解明して、それを応用する分野。電子の輸送現象を解明して、それを応用する分野であるエレクトロニクスとは対置される。

(2) 適応

経験に基づいて状況を把握し、状況に合致するように行動の仕方を変える振る舞い。刻一刻と変化する状況に適応するには、古い経験より新しい経験を重視して意思決定する機構が必要となる。

(3) 固体電解質

イオンの移動によって電流が流れる固体。

(4) チャネル(周波数帯域)

無線通信で情報の送受信に用いられる電波の周波数帯域。

(5) 多腕バンディット問題

異なる報酬確率を持つ複数のスロットマシンから、利益を最大化するために最も良いスロットマシンを逐次的に探す数理論題。情報通信、製造、ウェブ広告、株取引、医療機器、コンピュータ囲碁等、広範な応用が期待されている。

(6) 酸化還元反応

電子のやり取り(授受)を伴う化学反応。

(7) 濃淡電池 電極付近のイオンや気体等の濃度の違いによって生じる電位差(電圧)を用いた電池。濃度差が大きいほど電位差が大きくなる。

(8) 綱引き (tug-of-war) 理論

粘菌の光刺激回避行動に着想を得た、報酬確率が高い行動を迅速に選択するためのアルゴリズム。

(9) 無線通信の混雑状況の変化

無線通信ではチャネルの混雑具合が刻一刻と変化します。ここでは 100 回データ送信を行う度に(学習回数が 100 進む度に)各チャネルが持つ通信成功確率を人為的に変化させ、混雑具合の変化を模擬しています。

(10) 競争的多腕バンディット問題

複数の利用者が関わる多腕バンディット問題。

(11) ナッシュ均衡

ゲーム理論における解の一種で、他の利用者の選択を前提条件とした場合、どの利用者も自分の選択を変更することによってより高い通信成功確率を得ることができない選択の組み合わせのこと。ナッシュ均衡の下では、どの利用者も選択を変更する誘因を持たない。例えば図5(a)のように利用者1と2が共にチャンネル1を選択した場合、重複により両者の通信成功確率が0.45 ($1/2P_A$) となるが、この確率はチャンネルBよりも依然として高い($P_B=0.4$)ので、利用者1と2は選択を変更しようとならない。その結果、誰もチャンネルAの高い P_A を利用することが出来ず、全体(利用者1+2)が不利益を被ることになる。1994年にゲーム理論に関する功績によりノーベル経済学賞を受賞した数学者ジョン・フォーブス・ナッシュにちなんで名付けられた。

本件に関するお問い合わせ先

(研究内容に関すること)

国立研究開発法人 物質・材料研究機構 国際ナノアーキテクトニクス研究拠点
ナノシステム分野 ナノイオニクスデバイスグループ
主任研究員 土屋 敬志 (つちや たかし)
TEL: 029-860-4563
E-mail: TSUCHIYA.Takashi@nims.go.jp

国立研究開発法人 物質・材料研究機構 国際ナノアーキテクトニクス研究拠点
ナノシステム分野 ナノイオニクスデバイスグループ
グループリーダー 寺部 一弥 (てらべ かずや)
TEL: 029-860-4383
E-mail: TERABE.Kazuya@nims.go.jp

(報道・広報に関すること)

国立研究開発法人 物質・材料研究機構 経営企画部門 広報室
〒305-0047 茨城県つくば市千現 1-2-1
TEL: 029-859-2026, FAX: 029-859-2017
E-mail: pressrelease@ml.nims.go.jp