

特集

2

配電網の最適経路を探索し、配電ロスを最小化へ

「超高速アルゴリズム」に できること

電気をムダなく効率よく送る「スマートグリッド」の実現には、最適な配電経路を求める技術的基盤も必要だ。ところが、日本の標準的な規模の配電網（人口数十万人規模）では、そのスイッチの組み合わせが 10^{140} （10の140乗）通りもあると計算される。この中から最適な経路を見つけ出すのは至難の技だとされてきたが、北海道大学の湊真一教授らが開発した「超高速アルゴリズム」では、その解を得ることができるのだ。



湊 真一

みなと・しんいち

北海道大学大学院情報科学研究科 教授

1965年生まれ。京都大学工学部情報工学科卒業、同大学大学院工学研究科情報工学専攻修了。博士(工学)。日本電信電話株式会社LSI研究所、米国スタンフォード大学客員研究員などを経て、2004年から北海道大学准教授、10年から現職。大規模論理データ処理、知識索引技術の研究に従事。09年からJST ERATO湊離散構造処理系プロジェクト研究総括。

ERATO湊離散構造処理系プロジェクトのサーバ室にて。ZDD、BDDなどの「超高速アルゴリズム技法」を使うには大容量のメモリが必要となるため、1台で1TB（テラバイト）のメモリを集中して搭載するサーバを使用している。今後さらに1TBの追加を計画中。



スマートグリッド実用化には大きな壁が立ちはだかっていた

IT技術を駆使して、電力の流れを供給側と需要側の両方から効率的に管理する「スマートグリッド」。この言葉は、「スマート（賢い）+グリッド（電力網）」の合成語だ。福島第一原子力発電所事故の影響による電力事情への危機感からにわかに注目され、研究が加速している。

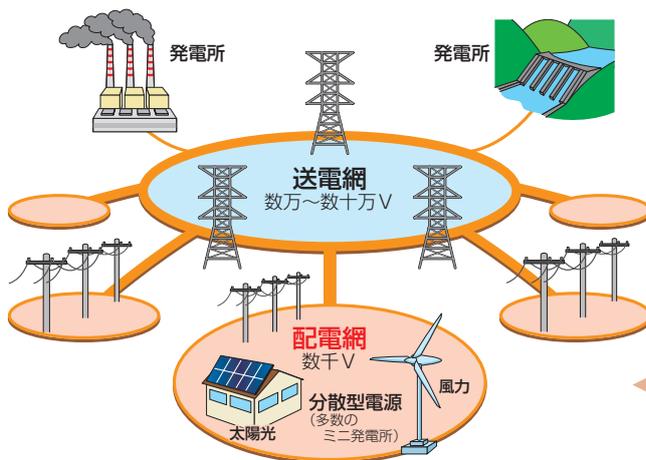
スマートグリッドの導入は、再生エネルギー利用の上でも期待されている。というのも、再生エネルギーの柱ともいべき太陽光発電や風力発電などは気象条件で発電量が大きく変わるため、既存の電力系統にそのまま取り込むと、電力の品質劣化、停電などの不具合を引き起こすからだ。

こうした複雑化する電力系統の需要・供給を適切に予測し、電力を必要な箇所に必要に応じて分配するための基盤技術の確立が急務となっている。この技術の確立と実用化に向けて、注目すべき成果を上げているのが、ERATO「湊離散構造処理系プロジェクト」だ。

超高速アルゴリズムで配電網の効率化を実現

電力系統は、「送電網」と「配電網」に大きく分けられ、送電網では発電所から変電所までを数万ボルトの高電圧でつないでいる。これに対し、配電網では、最後の変電所で低電圧に落とした電力を事業所や各家庭に送り届けている。この配電網の経路を切り替えるためのスイッチが多数存在し、そ

■送電網と配電網



電力供給網は、数万~数十万ボルトの高電圧で長距離を効率よく送電する送電網と、比較的低い電圧(数千ボルト)で近距離・地域をカバーする配電網からなる。太陽光発電、風力発電などの分散型電源も配電網に接続される。

のオン/オフ(切り替え)によって、天文学的ともいえる膨大な数の組み合わせの中から1つのつなぎ方を選んでいるのだ。しかし、従来の技術ではスイッチのすべての組み合わせを完全に調べ尽くすことができず、「経験と実績」で最適だと考えられる経路を求めていた。このため、実現可能な組み合わせは何通りあるのか、真に最適な経路はどれかなどについては、把握されていないのが実状だった。そこで、北海道大学教授の湊真一さんは、早稲田大学先進グリッド技術研究所所長の林泰弘さんと共同で、配電網のスイッチ構成を調べる「超高速アルゴリズム※1」の研究、開発を行った。その結果、最適な配電経路を見つけ出すことに成功し、スイッチのオン/オフにより配電ロスを最小化する方法を見出したのだ。

配電網を最適化するためには、どのよう

な問題があり、どのような制約条件を満たす必要があるのだろうか？

「配電網は下図のような構成になっている、スイッチのオン/オフで電気の流れる経路が決まります。経路は『幾何学的条件』と『電気的な制約条件』を満たす必要があり、その中から最適だと考えられるものを探し出すのです。

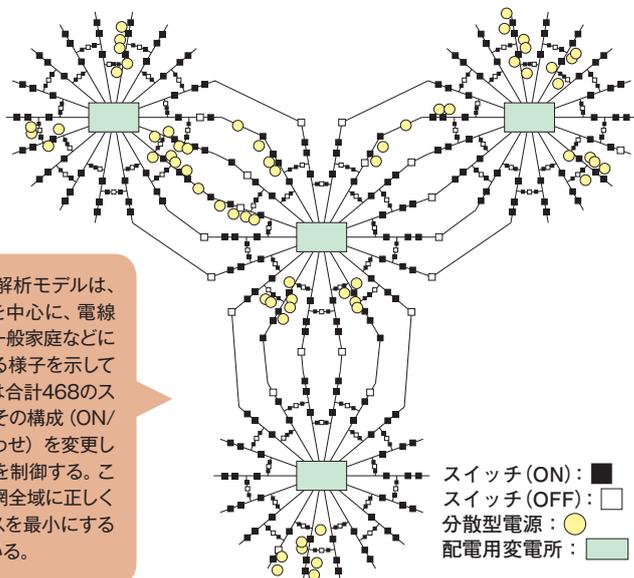
この幾何学的条件とは、『各家庭(実際には町内)は停電せず、しかも2つの変電所とつながってはいけない』、そして電気的な制約条件とは、『電線の各区間で許容電流を超えない』ことです」と湊さん。

下図は実際の配電網に非常に近いものだ。数十万人規模のブロックで468か所のスイッチがあり、そのオン/オフの組み合わせは 2^{468} 通り、つまり10の140乗に達するという。まさに天文学的な数字だ。それだけに、この中から最適な経路を、現実的な時間内に探し出すのは不可能だった。

湊さんらのグループは、まず幾何学的な条件、電気的な制約条件の2つを満たす経路の抽出を試み、湊さんが開発した「ZDD (Zero-suppressed BDD=ゼロサプレス型二分決定グラフ)」と呼ばれる超高速圧縮アルゴリズム技法によって、わずか10分程度ですべての可能な組み合わせから制約条件を満たす 10^{63} 通りにまで絞り込むことに成功した。

さらにこの 10^{63} 通りの中から配電網内に正確に、効率よく電力を供給できる経路を探索するアルゴリズムを新規に開発し、それにより、さらに20分程度の時間

■配電網の標準解析モデル



配電網の標準解析モデルは、4つの変電所を中心に、電線に接続された一般家庭などに電力を供給する様子を示している。電線には合計468のスイッチがあり、その構成(ON/OFFの組み合わせ)を変更して電力の流れを制御する。この図では配電網全域に正しく給電、送電ロスを最小にする構成を表している。

スイッチ(ON): ■
スイッチ(OFF): □
分散型電源: ●
配電用変電所: ■

【用語解説】

※1 アルゴリズム

コンピュータで問題を解いたり、課題を解決するための計算手順、処理手順を意味する。

で配電ロスを最小とする経路を発見するに至ったのだ。

数十万人規模の配電網で真に最適な経路を明らかにしたのは、世界初の快挙だという。

「配電の最適経路を発見することにより、従来の配電ロスを3%削減できました。これは電力全体の0.02%に相当します。一見、小さい数字に見えますが、日本全体に単純換算すると、スイッチの切り替えだけで、火力発電所の0.1基分を増設するのと同じ効果があります」

配電ロスが3%削減できる効果も大きいですが、「条件を満たす組み合わせをすべて知り尽くす」ことによる成果も大きい。条件を満たすスイッチのすべての組み合わせをデータベース化することで、今後、「昼夜の需要変動に一番強い経路を探したい」「事故が起きたときの停電を回避するベストな経路を至急知りたい」といった現実的な要望に対し、瞬時にそのスイッチ組み合わせを提示できるからだ。

ZDDで魔法のように高速の演算ができる

膨大な演算を20分という短時間で魔法のように解き明かすアルゴリズムとは、どのようなものなのか？

コンピュータには、ハードウェアとソフトウェアの両輪が必要だ。アルゴリズムはソフトウェアの鍵となる計算手順、処理手順のことである。もし膨大な演算を高速なハードウェアで処理したいなら、スーパーコンピュータを使うことになる。演算回数は変わらないが、1回ごとの処理速度が高速になる。ただし、誰もが気軽に使えるものではない。

これに対し、アルゴリズムは「人の知恵で、演算回数そのものを減らす技術」（湊さん）。処理方法を工夫して、100分の1の演算回数に圧縮し、同じコンピュータでも演算時間を100分の1に短縮しようというものである。

「数学でいうなら、これまで100行をかけて書いて

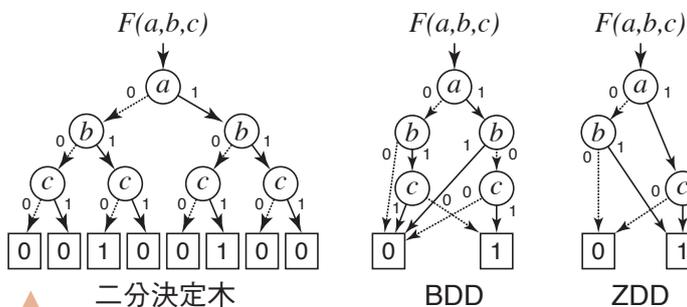
人間の知恵が生み出すアルゴリズムには、大きな可能性があります。

若いスタッフたちと日々熱い議論を交わしながら研究を進めています。



北海道大学のERATO湊離散構造処理系プロジェクトメンバー。1TB（テラバイト）のメモリ搭載サーバで検証作業を行うが、アルゴリズム研究の成果は頭脳が雌雄を決する。

■二分決定木、BDD、ZDDの違い



「0」「1」で分岐する構造の二分決定木に対して、BDD、ZDDを使うと分岐先の数（処理数）を大幅に圧縮することができ、高速処理が可能となる。

いた証明を、1本の補助線を考えつくことで、たった10行で書けたというようなイメージです」

上図を見ていただきたい。これは「二分決定木」と呼ばれるものだ。「0」「1」のどちらかで分岐するため、3回の分岐で $2^3=8$ 通りとなる。スイッチが468個あれば、 2^{468} ＝約 10^{140} 通りをくまなく調べなければならない。このように、 2^n 個の場合分けはnがたった1つ増えるだけでも組み合わせ数が急速に増えるため、ハードウェアの計算能力が1万倍高速になっても、対応していくことは難しい。

そこで、処理数を減らすことを考えてみよう。「0でも1でも分岐先が同じ場合は分岐しないで直結」「共通の行き先を持つ分岐が2個以上あれば1個にまとめて他を削除」と考えると、その数を大幅に圧縮できる。これが「BDD（二分決定グラフ: Binary Decision Diagram）」という表現方法で、1986年に米国カーネギーメロン大学教授のランディ・ブライアント氏が高速な構築アルゴリズムを考案した。

「大学院生の頃からVLSI（大規模集積回路）の設計でBDDを使っていました。その後1993年頃のことですが、回路設計のため

に巨大な表をBDDで表現しようとしたら、そのセルのほとんどが0になる例がよくあるのですが、BDDではすべてに「0」と書き込まなければならない、これはもっと改良できると考えました」

そのとき「1のときの行き先が『空集合』であれば、削除する」という新しい圧縮ルールを思いついた。これこそがZDDだ。ZDDは、スーパーマーケットの商品構成を考えると理解しやすい。例えば、あるスーパーでは1万アイテムが販売されていて、Aさんが10個の商品を買ったとすると、残り9990個は買われなかったアイテムの集合「空集合」になる。この空集合は、Aさんにとって「最初からなかった」と同じ意味になる。このように、ほとんどのデータを0と見なすことでZDDは、BDDに比べて100倍、1000倍以上の高速処理が可能になる。だからこそ、スマートグリッドの基盤技術となる配電網の天文学的な数の全経路の検索、最適経路の発見に活用できるわけだ。また、遺伝子探索やWeb上での知識発見、膨大なデータの中から知見を抽出するデータマイニングなど、大規模なデータベースの分野でも、ZDDの有効性が発揮されつつある。



離散構造処理系は“Art”を探究する技術領域

湊さんが推進しているJST ERATO「湊離散構造処理系プロジェクト」とは何を目指しているのだろうか？

「『離散構造処理系』は、計算理論などの離散数学の“Science”領域とデータマイニングや統計解析などといった応用分野である“Engineering”の間をつなぐ実装技術、つまり“Art”を探究する技術領域です」と湊さんは言う。そしてこのプロジェクトでは開発されたプログラムなどのツールを研究者、産業界に広く使いやすく提供したいと考えている。

ポイントとなるのは異分野の研究者、技術者との「知の交流」である。湊さんは熱く語る。

クヌース博士の評価を得たことが、研究を加速させるきっかけとなりました。



「物理や生物分野の研究では、世界で1台しかない実験装置を持っていれば、それだけで人が集まることもあるでしょう。最新装置を使うことで、成果を上げることもできるかもしれません。しかし、情報系、特にアルゴリズムの研究には、残念ながらそのような装置はありません。

では、成果を上げるために必要なものは何か？ 私は「人が集まって議論をすること」だと考えています。ERATO湊離散構造処

理系プロジェクトでは、核となるテーマは離散構造処理、ZDDという非常にシャープなものに絞り込みます。しかし、そのテーマが波及する分野は幅広い。その核になるところで異分野の研究者、技術者が集い、議論して、またそれぞれの分野、持ち場に戻っていく。それがプロジェクトの成否の鍵を握っていると考えています」

確かに「スマートグリッド」そのものは湊さんの研究対象分野ではなかったかもしれない。早稲田大学先進グリッド技術研究所の林研究室との研究協力体制があったからこそ、画期的な成果が実った。当初、共同研究にはさまざまな困難があった。情報系の湊研究室、電力系の林研究室がぶつかった「言葉の壁」もその1つだ。例えば湊研究室では流れを遮断することを「ゲートを閉じ

ZDDが取り上げられた、クヌース博士主著書の『The Art of Computer Programming Vol.4』と博士からの湊さん宛の手紙。湊さんは当初、BDDの改良版という意味で「ZBDD」とよんでいたが、クヌース博士が「BDDと同じ価値があるから、文字数も3文字にそろえたほうがいい」とメッセージをもらい、ZDDと短縮した。

る」というが、同じことを林研究室では「スイッチを開く」というのだ。互いの言葉を学びあい、共通認識を作り上げる作業に3か月を要した。しかし、どちらか1つの研究室だけで進めていけば10年かかったかもしれない研究成果を、共同研究によりわずか1年で成し遂げることができたのだ。

札幌を情報系若手研究者の梁山泊にしていきたい

「ZDDは一部の専門家にはよく知られていますが、情報処理の分野全体から見れば、無名

に近い存在でした。それが、クヌース博士※2ご本人がライフワークとする著書『The Art of Computer Programming』に大々的に取り上げられたのです。日本人の研究が『アルゴリズムのバイブル』とされる同誌に独立項目として掲載されるのは初めてのことでした。これによって、雪崩を打ったかのように、さまざまな異なる分野の専門家が離散構造処理系、ZDDの世界に入ってこようとしています。それだけに、私たちも研究をさらに深化させて、国際的にイニシアチブを取り続けていきたいと考えています」

そして湊さんは、ERATOの本プロジェクトについてこう語った。

「日本では、東京と関西に『研究の場』が集中しています。良くも悪くも札幌という土地は東京、関西から遠く離れて独立しているので、落ち着いて研究に取り組める空気があります。だから、ERATOプロジェクトの拠点であるここを研究者にとつての『梁山泊』（りょうざんぱく:優れた人物たちが集まる場所の意）のような場所にしていきたいです。

『若き研究者よ、大志を抱け』——と。クヌース博士ならぬ、クラーク博士ではないですけれどね(笑)」

【用語解説】

※2 クヌース博士

ドナルド・エルビン・クヌース (Donald Ervin Knuth)。1938年生まれ。スタンフォード大学名誉教授、数学者、情報工学者。アルゴリズム研究の権威で、主著『The Art of Computer Programming』のシリーズはプログラミングに携わるものの間ではバイブル的な存在だ。アルゴリズム解析と呼ばれる分野を開拓し、計算理論の発展に多大な貢献をしている。

JSTの担当者から見た「ERATO湊離散構造処理系プロジェクト」 「日本発」のアルゴリズム技術で社会に貢献できるプロジェクトです。

「ERATO」は30年以上続く歴史ある基礎研究推進事業ですが、アルゴリズム（計算手順）の分野は湊PJ（プロジェクト）が初めてです。「ZDD」は湊先生が独自に考案した「日本発」のアルゴリズム技術であること、大規模データの高速処理が求められる多くの分野で活用できることなどから、湊PJには大きな期待が寄せられています。

アルゴリズム技術によって効率のよい計算手順を見い出せば、たとえコンピュータの性能が最新でない「カメ」でも、最新のコンピュータ「ウサギ」が遠回りする（冗長な計算手順をたどる）より速くゴールにたどり着くことができます。この「ZDDにより計算量を減らす」技術はスマートグリッドだけではなく、遺伝子探索や消費者データ分析、産業プロセスの最適化・検証といったさまざまな実問題へ適用で

きる可能性を秘めています。

湊PJは北海道大学のほかに東京と大阪にも研究グループを設置し、日本各地の研究者との連携を深めると共に、企業からの出向者を積極的に受け入れることで、アカデミアに閉じない研究体制を構築しています。そのためグループ間をTV会議システムでつなぎ、毎日のように顔を合わせて議論を進めています。身の回りの情報量が急速に増大し、その中から短時間に有益な情報を見つけ出す技術が求められる現代社会において、湊PJが提案するスマートな情報処理にどうぞご期待ください。

JST 中島高弘

