

日立と一緒に計算機の変えよう!

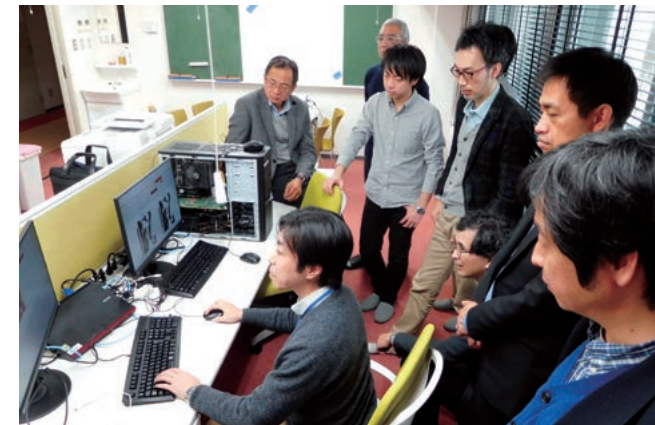
◎ 株式会社 日立製作所 研究開発グループ
基礎研究センタ 日立北大ラボ



◎ 株式会社 日立製作所 研究開発グループ
基礎研究センタ 日立北大ラボ

複雑化する社会システムの最適化に向けて 「日立北大ラボ」がめざすこと

交通渋滞の解消や物流コストの最小化、電力送電網による安定したエネルギー供給など、複雑化する社会システムの課題解決には、全体最適となる組み合わせを見いだすことが重要です。しかし、社会システムが複雑化すると、システムを記述するパラメータとその組み合わせが爆発的に増大し、最適なパラメータを決定することが困難になります。この問題は組み合わせ最適化問題と呼ばれており、日立ではこの問題を効率よく解く技術として、イジングコンピュータを開発しました。複雑化する社会システムの最適化に向けて、日立北大ラボは個別テーマを超えた組織対組織の新しい協創をめざしています。



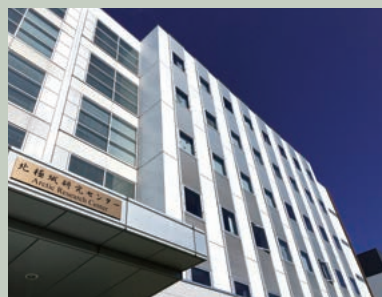
日立は、大学が有する豊かなイノベーション資源（知識・ネットワーク）と密に連携するため、2016年、国内3大学に日立北大ラボ、日立東大ラボ、日立京大ラボを開設しました。日立北大ラボでは、課題先進地域の特性を活用したソリューションの社会実証をめざし、「エリアデザイン・北極域」「北大COI※・食と健康の達人」「社会創造数学」の3テーマの研究を推進しています。

課題先進地域の特性を活用したソリューションの社会実証

北海道の地域課題解決をめざし社会実験・協創を加速

エリアデザイン・北極域

気候、経済変動予測
寒冷地の都市デザイン学



北極域研究センター

北大COI・食と健康の達人

健康コミュニティシステム
地域の自律的健康管理を支援



FMI国際拠点

社会創造数学

複雑な社会を数学モデル化
最適化問題をリアルタイムに解く



電子科学研究所

※文部科学省、国立研究開発法人科学技術振興機構が実施している「革新的イノベーション創出プログラム」(COI STREAM) にて推進されているものです。

●COI: センター・オブ・イノベーション ●FMI: フード&メディカルイノベーション

組み合わせ最適化問題とは

組み合わせ最適化問題とは、さまざまな制約のもとで多くの選択肢から、ある指標（価値）を最もよいものにする変数の値（組み合わせ）を求めることです。最適化問題を解くことは、日常生活のさまざまな場面で皆さんも経験しています。子どものときの遠足の菓子選び（菓子選択問題）を思い出してみましょう。



どの菓子を選ぶのか？



決められた総額（予算）



満足度

菓子選択問題を具体的に考えてみよう

問題

五つの菓子（チョコ、ガム、クッキー、ポテトチップス、グミ）の値段と満足度が与えられています。予算300円で満足度が最大となる組み合わせを求めなさい。

ヒント

変数 $x_1, x_2, \dots, x_5 \in \{0, 1\}$, 0: 選択しない, 1: 選択する を導入して菓子選択問題を数式で表現してみよう。

■ 価値最大化（満足度）…………… $10x_1 + 3x_2 + 4x_3 + 8x_4 + 7x_5$

■ 制約（決められた総額）…………… $120x_1 + 30x_2 + 90x_3 + 150x_4 + 120x_5 \leq 300$

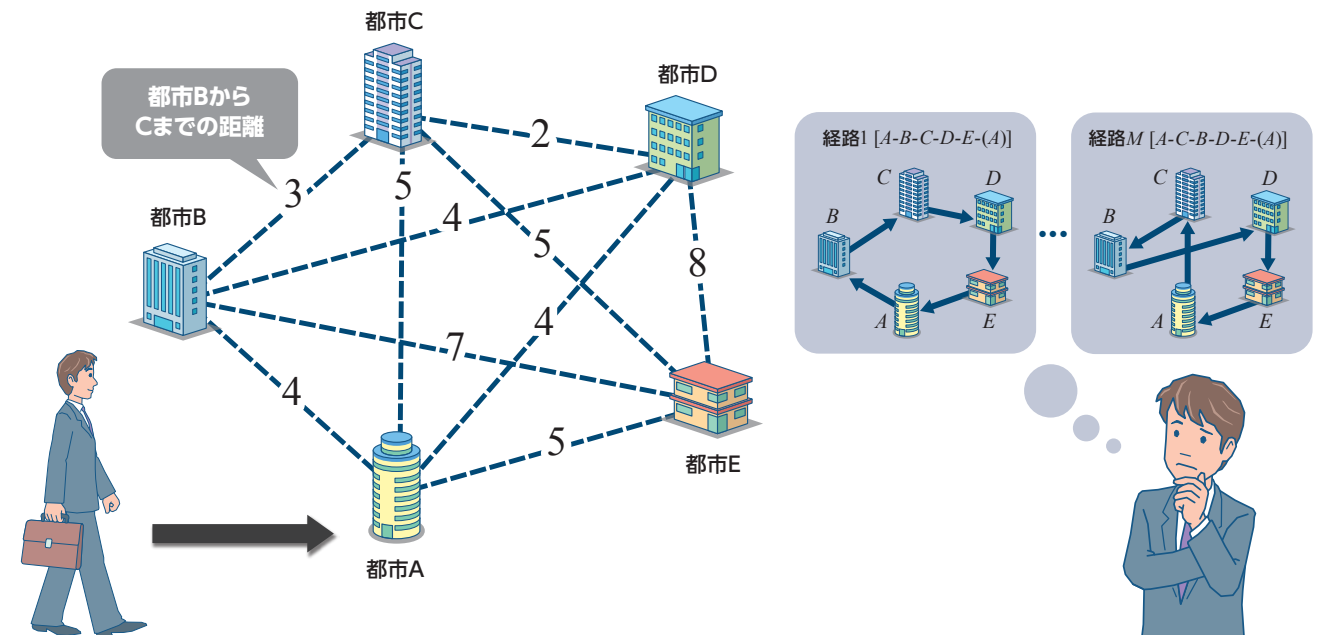
	変数	値段	満足度
	チョコ x_1	120円	10点
	ガム x_2	30円	3点
	クッキー x_3	90円	4点
	ポテトチップス x_4	150円	8点
	グミ x_5	120円	7点

制約
300円

● 答えは10ページ

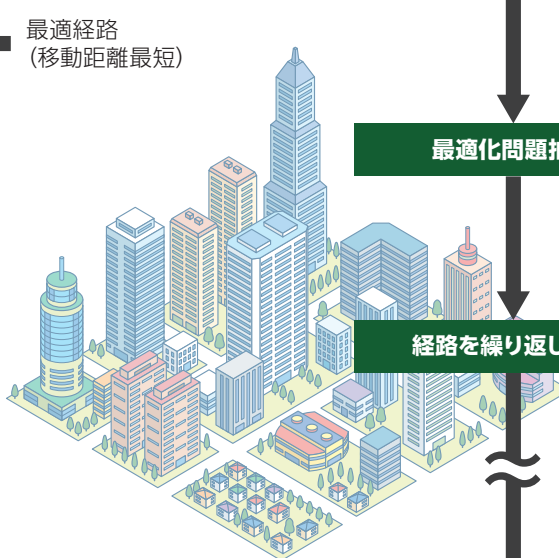
組み合わせ最適化問題の難しさ

最適化問題の別の例として、セールスマンが複数の都市をどのように訪問すれば、最短の移動経路（最適経路）で済むかを考えてみましょう。



都市数が少なければすべての候補数を調べることが可能です。しかし、都市数が増えると、候補数が爆発的に増加し、最新クラスのコンピュータでも計算を終えるのに何日もかかってしまいます。

経路の候補	移動距離
ABCDE(A)	22
ABCED(A)	24
ABDCE(A)	20
ABDEC(A)	26
ABECDA(A)	22
ABEDCA(A)	26
ACBDE(A)	25
ACBED(A)	27
ACDBE(A)	23
ACEBD(A)	25
ADBCE(A)	21
ADCBE(A)	21



従来のコンピュータとプログラミングでは実用的な速度で問題が解けない。

計算量爆発

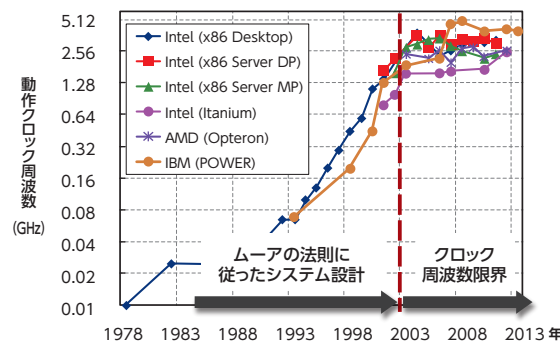
巡回する都市数 n が増えると、経路の候補が爆発的に増大 $[(n-1)!/2]$ 通り

最適経路

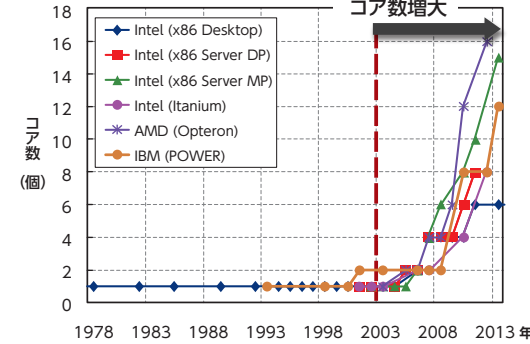
半導体微細化の終えん

従来の計算機はプログラミングによる柔軟性と汎用性を兼ね備え、さらに、ムーアの法則に従い、CPUの動作クロック周波数の向上に支えられて、計算機の性能が向上してきました。しかし、2000年代前半の半導体プロセス微細化の鈍化に伴い、クロック周波数が頭打ちとなってきています。これまでコア数増加による性能向上を図ってきましたが、今後、半導体微細化も終えんを迎え、コア数増加による向上も困難となることが予想されます。そのため、これまでの動作原理とは全く異なる計算機の開発が必要となります。

CPUの動作クロック周波数のトレンド



CPUのコア数のトレンド



イジングコンピュータの開発

日立は最適化問題に特化したイジングコンピュータを開発しました。本計算機は、従来の計算機のように逐次計算を実行するのではなく、最適化問題を磁性体のスピンの振る舞い（磁性体の物理現象）にマッピングし、その物理現象の収束動作を実行・観測することで、短時間で適切な近似解を見つけることができます。

日立が開発したイジングコンピュータ

第1世代 (CMOSイジング)



第2世代 (FPGAプロト)



イジングチップ
(12mm²の面積に約2万個の
スピンを搭載)

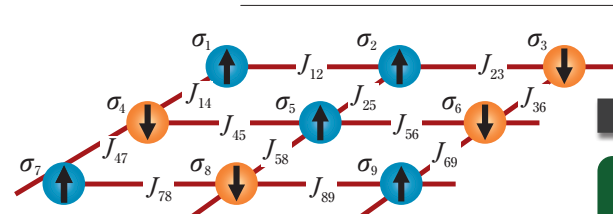
CMOSプロセスを用いた
専用ハードから、FPGAを用いた
再構成可能プロトタイプ環境を構築

イジングモデルのエネルギー関数 (三つの要素で構成)

$$H(\sigma) = \sum_{\langle i, j \rangle} J_{ij} \sigma_i \sigma_j + \sum_i h_i \sigma_i$$

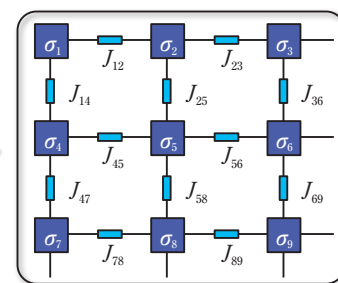
- スピンの状態 $\sigma_i: 0 = \downarrow$ or $1 = \uparrow$
- 相互作用 J_{ij}
- 外部磁場 h_i
- $\langle i, j \rangle$ は相互作用が存在するスピンの組

イジングモデル



半導体回路で模擬

スピンの状態、相互作用、
外部磁場を
メモリ ("1"/"0") で表現



イジングコンピュータによる基底状態探索

イジングコンピュータでは、最適化問題の価値・制約をイジングスピンのエネルギー関数に対応させ、エネルギー関数の最小値 (基底状態) が最適化問題の最適解に対応します。菓子選択問題の場合、スピンの値がその菓子を採用するか否か、総額が相互作用係数 (ただし、金額が決められた総額を超えないように補助スピンを導入)、満足度が外部磁場に対応します。

$$H(\sigma, y) = \gamma \left[\left(1 - \sum_{n=1}^P y_n \right)^2 + \left(\sum_{n=1}^P n y_n - \sum_{i=1}^N w_i \sigma_i \right)^2 \right] - \sum_{i=1}^N h_i \sigma_i$$

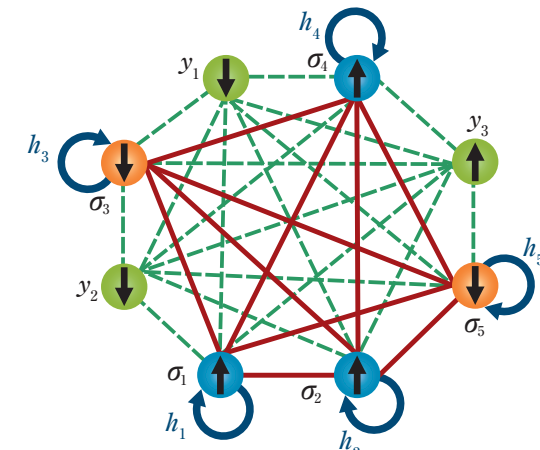
総額の候補は一つである

選択されたお菓子の総額の候補は1からPのうちの一つ

相互作用 (制約: 総額)

外部磁場 (価値: 満足度)

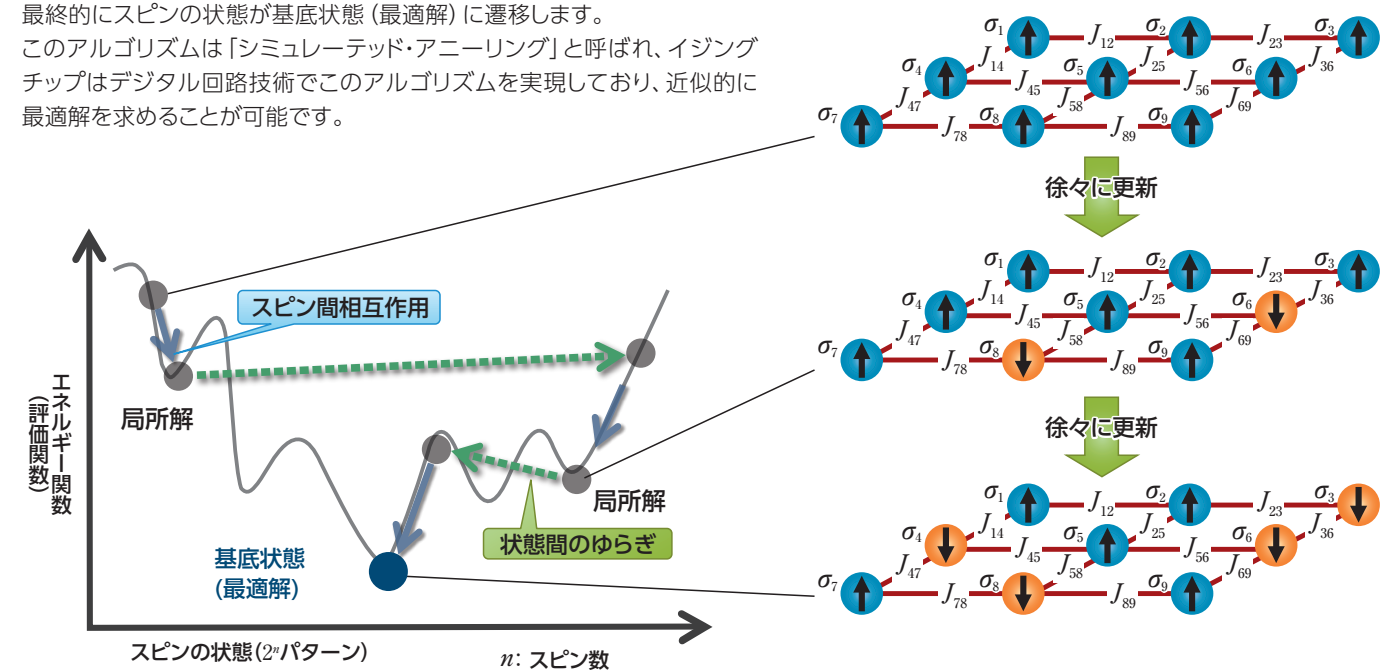
- $i=1, \dots, N$ (N : 菓子の種類数)、 $n=1, \dots, P$ (P : 決められた総額)
- σ_i : 1 or 0 (i 番目の菓子を選択するとき $\sigma_i=1$ 、選択しないとき $\sigma_i=0$)
- y_n : 不等式の制約条件を扱うための補助スピン (金額 n が $1 \leq n \leq P$ のもとで最適な総額に最も近いとき $y_n=1$ 、 $y_n=0$ ($n \neq n^*$) となるように制約する)
- w_i : 各菓子の値段、 h_i : 各菓子の満足度
- γ : 制約条件の強さに対応するパラメータ (エネルギー最小の解が、拘束条件を満たし、価値が最大の状態となるように決定する)



- $\uparrow = 1$ 選択する
- $\downarrow = 0$ 選択しない
- $\uparrow = 1$ / $\downarrow = 0$ (補助スピン)

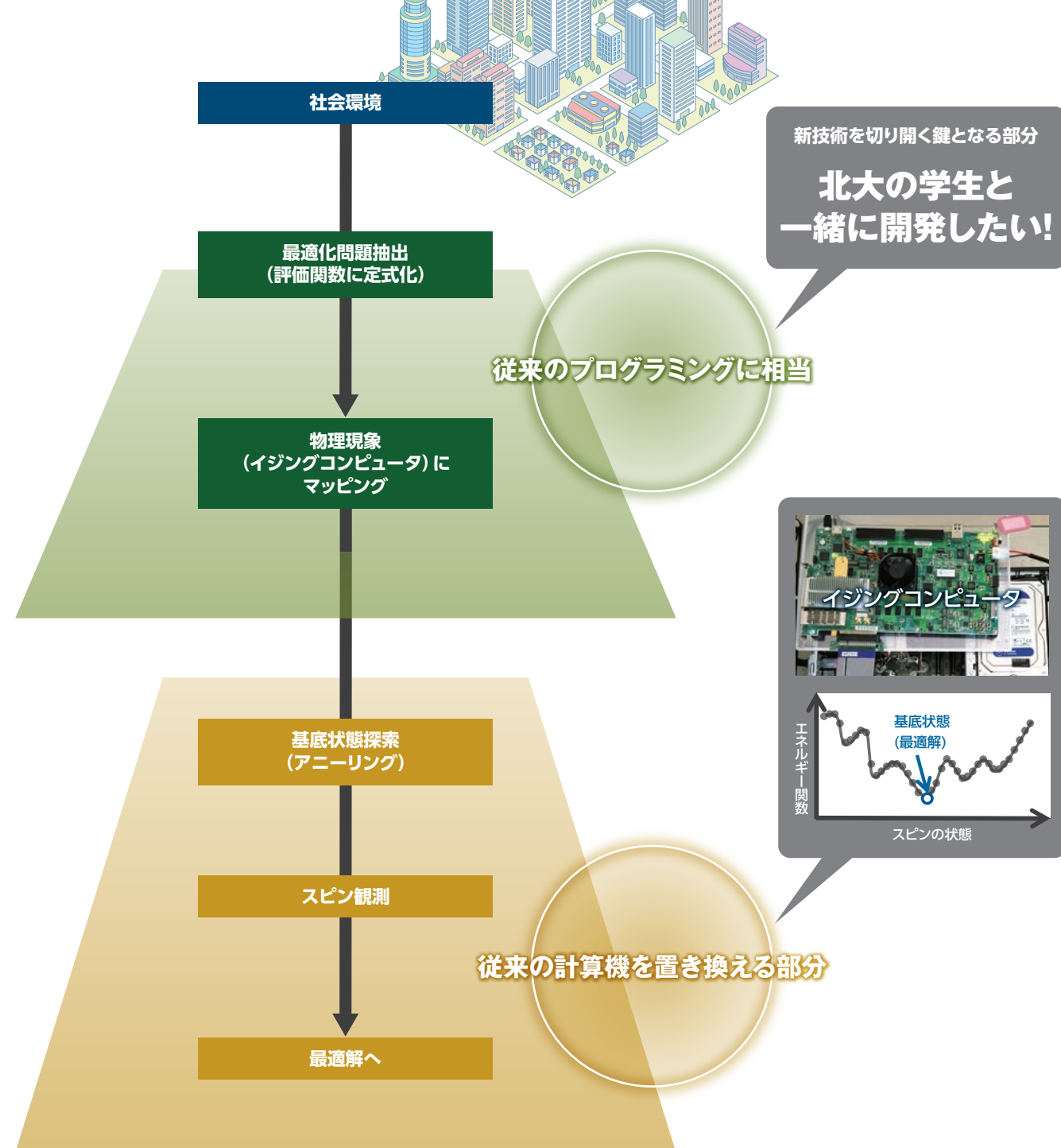


イジングチップでは、設定したスピン間相互作用・外部磁場に従い、スピン値の更新をデジタル回路で計算し、エネルギー関数が低い方向にスピンの状態を更新します。ここで、エネルギー極小値 (局所解) での停滞を回避するため、仮想的に温度による状態間のゆらぎを導入し、その温度に応じて、有限の確率でエネルギー関数が増加する方向にスピンの状態を更新させます。温度を時間とともに下げていくことで、状態間のゆらぎが徐々に収束し、最終的にスピンの状態が基底状態 (最適解) に遷移します。このアルゴリズムは「シミュレーテッド・アニーリング」と呼ばれ、イジングチップはデジタル回路技術でこのアルゴリズムを実現しており、近似的に最適解を求めることが可能です。

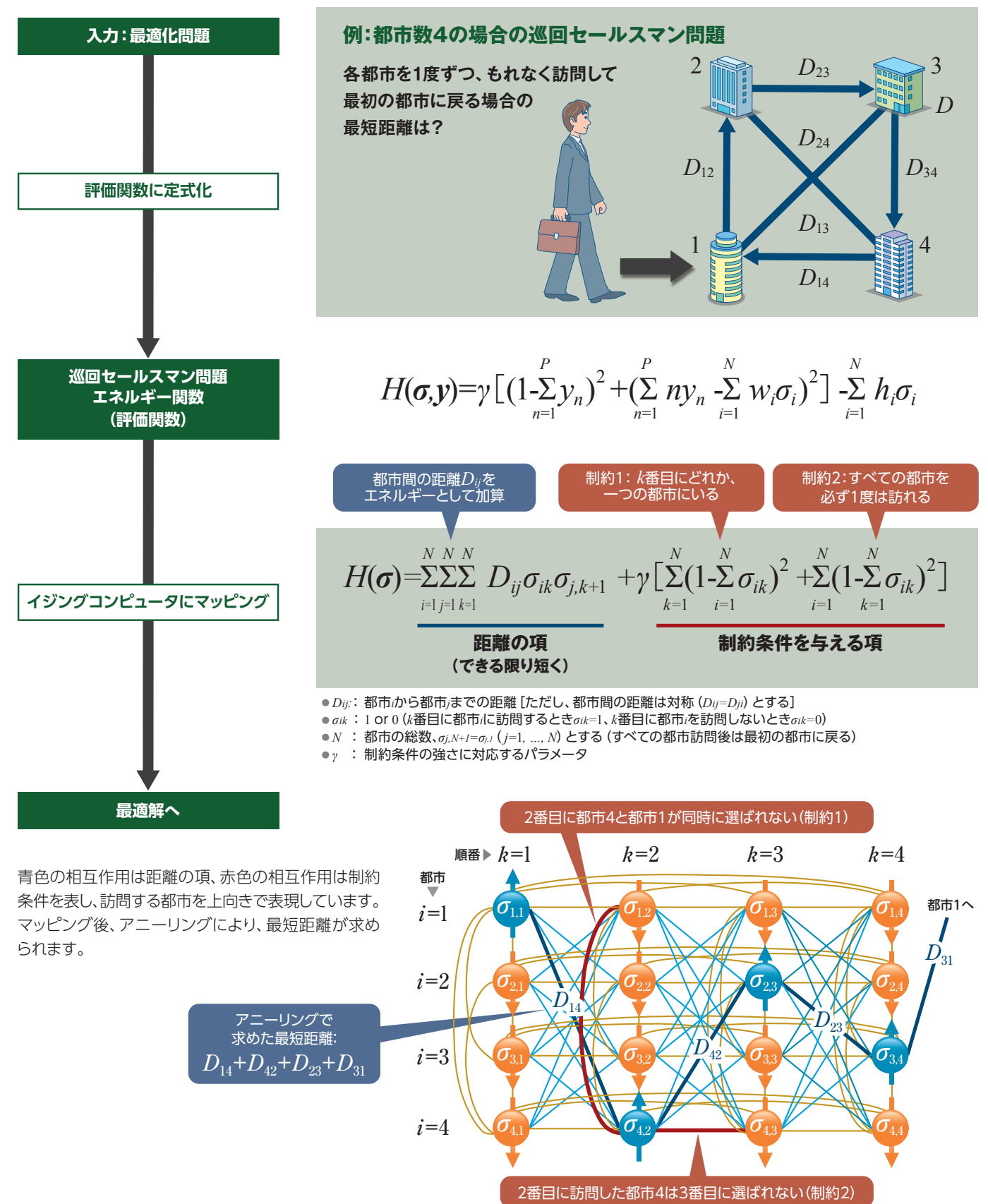


イジングコンピュータで最適化問題を解くには

イジングコンピュータを使いこなすには、従来のプログラミングに相当する、最適化問題の定式化、ハード実装可能な相互作用の変換（マッピング）が課題であり、数学の力が必要となります。これらの課題を解決できれば、イジングコンピュータは最適化問題に対する強力なツールとなり、コンピュータの歴史にイノベーションを起こす可能性を持っています。



最適化問題 (巡回セールスマン問題) をイジングスピンの基底状態探索問題に変換する方法の一例



イジングコンピュータで社会課題を解決しよう

最適化問題を見つけてイジングコンピュータで解いてみよう

交通渋滞の解消、物流・除雪コストの最小化など、日常のありとあらゆる場面で、リアルタイムで最適化する必要性が高まっている課題があり、イジングコンピュータはこれらの課題を解く有効な手段の一つです。

例えば、2015年の札幌市の除雪対策費は年間約150億円*であり、そのうち車道除雪、排雪費は約40%を占めています。

最適化により、除雪・排雪コストを20%削減することで、札幌市だけで年間12億円の経済効果が期待できます。

日立北大ラボは、複雑化する社会環境に内在する最適化問題をイジングコンピュータで解決するためのアイデアを募集しています。

また、応募いただいたアイデアは、応募者に帰属しますが、今後の弊社の研究・事業において自由に利用・公開されます。秘密情報・個人情報の開示はお控えください。

イジングコンピュータに興味を持ってくれた皆さん、日立北大ラボに加わり、ぜひわれわれと一緒に開発しませんか？

※出典元：札幌市ホームページ 雪対策実績 平成28年度の予算より <http://www.city.sapporo.jp/kensetsu/yuki/jigyuu/budget.html>

社会環境の最適化問題を具体的に考えてみよう

問題

- 交通網・物流・除雪に関して、最適化すべき制御対象を挙げなさい。
- 上記以外の社会環境に内在する最適化問題を挙げなさい。

	交通網	物流	除雪	
目的	交通渋滞の解消 	物流コストの最小化 	除雪コストの最小化 	?
入力	交通状況 各車の行き先	経路の移動コスト	降雪量 交通状況	

●答えは10ページ

海外から注目！日立のイジングコンピュータ

半導体のオリンピックといわれる国際会議ISSCC2015で、CMOSイジングコンピュータを発表し、数多くのメディアに取り上げられました。日立は、イジングコンピュータ計算機実用化に向けた研究開発を推進しており、現在、国内外から大きな注目を集めています。

2015年3月23日
株式会社日立製作所

約1兆の500兆通りの膨大なパターンから瞬時に最適な解を導く
室温動作可能な新型半導体コンピュータを試作
電力消費は従来の約1/100で電子コンピュータに匹敵する性能をもつコンピュータを実現

株式会社日立製作所執行役員社長兼COO：東原 敏昭/以下、日立は、このたび、約1兆の500兆の膨大なパターンの中から最適な解を導く「組み合わせた最適化問題」を素早くコンピュータで解く性能で、瞬時に解く新型コンピュータを試作しました。このコンピュータは従来の半導体を用いた動作のため、室温で動作する上、大規模化も容易に対応できます。また、従来のコンピュータ比べて、約1,800倍の電力効率を備えていることから、電力消費量の削減が図れます。新型コンピュータは、自然や生物に倣った構造で、問題を計算で解くのではなく、社会問題の複雑さに応じて、容易に大規模化できる実用システムの構築が可能になります。

2016年11月22日
株式会社日立製作所

新型半導体コンピュータ向けに計算規模を10倍に向上する技術を開発
パラメータの処理を複数の素子で共有することで、回路規模を約10分の1に低減

株式会社日立製作所執行役員社長兼COO：東原 敏昭/以下、日立は、イジングモデルを用いた新型半導体コンピュータ向けに、半導体デバイスのサイズを減らすことで、計算規模を10倍に向上する技術を開発しました。本技術は、演算回路と乱数発生器を複数の素子で共有するもので、FPGAと呼ばれる集積回路を用いて試作した新型半導体コンピュータに適用したところ、演算回路と乱数発生器の両方を約10分の1に低減し、回路規模と乱数発生器の半導体デバイスサイズを約10分の1の規模に削減することが可能になることを確認しました。本技術により、FPGAを用いて、大規模な計算問題を解くことが可能になります。そして、新型半導体コンピュータの社会への活用を推進することで、大規模化・複雑化する社会インフラなどの最適化問題を解くことに適した技術の確立をめざします。

2015年2月24日(火) ▲
日経産業新聞(8面)

半導体チップ
計算200倍速く
日立

日立製作所は、大規模な計算問題を解くのに適した半導体チップを開発しました。このチップは、従来の半導体チップと比べて、約1,800倍の電力効率を備えていることから、電力消費量の削減が図れます。新型半導体チップは、自然や生物に倣った構造で、問題を計算で解くのではなく、社会問題の複雑さに応じて、容易に大規模化できる実用システムの構築が可能になります。

2015年2月24日(火)
日本経済新聞(16面)

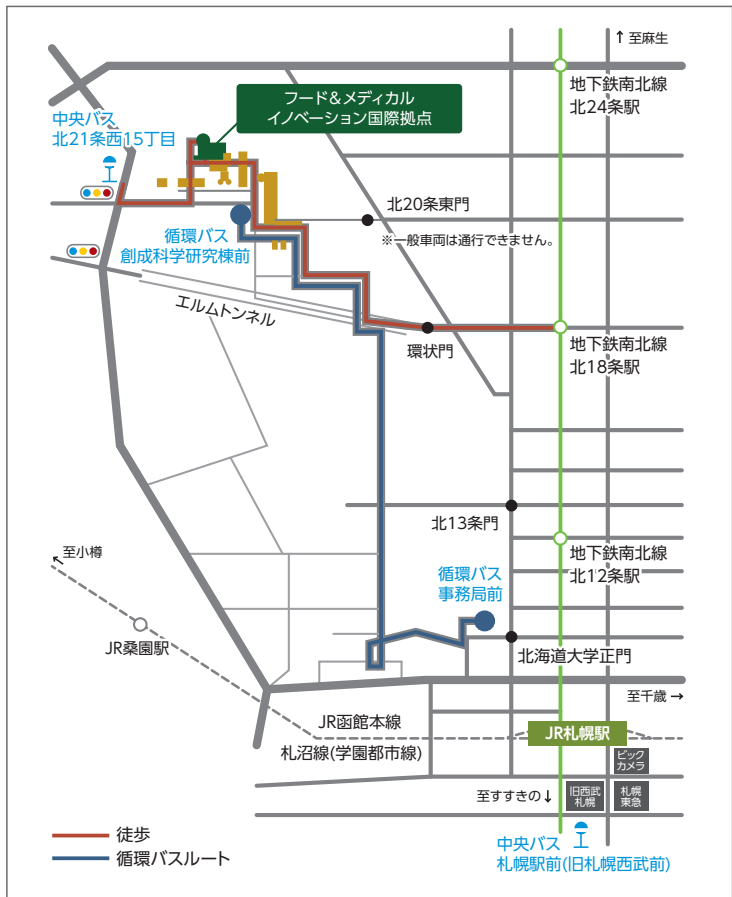
半導体チップ
計算200倍速く
日立

日立製作所は、大規模な計算問題を解くのに適した半導体チップを開発しました。このチップは、従来の半導体チップと比べて、約1,800倍の電力効率を備えていることから、電力消費量の削減が図れます。新型半導体チップは、自然や生物に倣った構造で、問題を計算で解くのではなく、社会問題の複雑さに応じて、容易に大規模化できる実用システムの構築が可能になります。

株式会社 日立製作所 研究開発グループ 基礎研究センタ 日立北大ラボ

〒001-0021 北海道札幌市北区北21条西11丁目

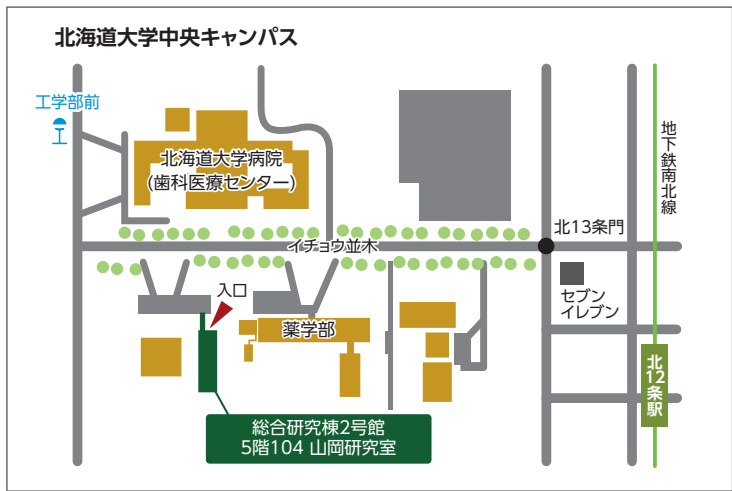
北海道大学フード&メディカルイノベーション国際拠点213



北海道大学 電子科学研究所 附属 社会創造数学研究センター 実験数理研究分野 (山岡研究室)

〒060-0811 北海道札幌市北区北12条西7丁目

北海道大学中央キャンパス 総合研究棟2号館5階104



連絡先

担当：竹本 享史
田中 咲

msc_hitachi@es.hokudai.ac.jp

〒001-0021 北海道札幌市北区北21条西11丁目
北海道大学フード&メディカルイノベーション国際拠点213