

# 組合せ遷移の展開に向けた

計算機科学・

工学・

数学

# によるアプローチの融合

領域代表：伊藤 健洋



## A01班

代表：伊藤 健洋  
(東北大学)



## B01班

代表：川原 純  
(京都大学)



## C01班

代表：岡本 吉央  
(電気通信大学)

# 最終報告会

2023年2月21日(火)

# 学術変革領域研究 (A・B)

「新学術領域研究」を発展的に見直し、2020年度新設。  
学術変革(B)は、45歳以下の若手にフォーカス。

学術変革領域研究(A)	学術変革領域研究(B)
5年間	3年間
年5,000万～3億円程度	年5,000万円まで (領域代表者になれるのは1回限り)
計画研究には、45歳以下の代表者を複数含むこと	<b>領域代表者は45歳以下</b> 、 計画研究にも45歳以下の代表者を複数含むこと
公募研究あり	公募研究なし

2020年3月に応募締切、  
2020年10月2日に内定  
→ **実質2.5年間**

全体：650件から20件採択  
区分IV：69件から2件採択

採択率3%未満... 身の引き締まる思い

本日は、全力で駆け抜けた2.5年間の成果を見てください！

# 本日のプログラム

## 本研究領域の目的と計画 ←

A-1. 計画研究A01班の報告  
A-2. アルゴリズム基盤  
A-3. アルゴリズム基盤の展開

B-1. 計画研究B01班の報告  
B-2. 実装技術基盤  
B-3. 実装技術基盤の展開

C-1. 計画研究C01班の報告  
C-2. 数学基盤  
C-3. 数学基盤の展開

## 領域全体の報告 ←

### 3年前の計画段階

- 組合せ遷移とは？
- なぜ領域研究？
- どんな目的・世界観？

### 各計画研究班が

1. 目標と活動報告
2. 基盤構築への研究成果
3. 基盤の展開事例

という観点から発表

### 現在の組合せ遷移

- 領域全体としての活動
- 世界は、どう広がった？

# 本研究領域の目的と計画

伊藤 健洋

(領域代表, 東北大学)

# 本研究領域の目的と計画

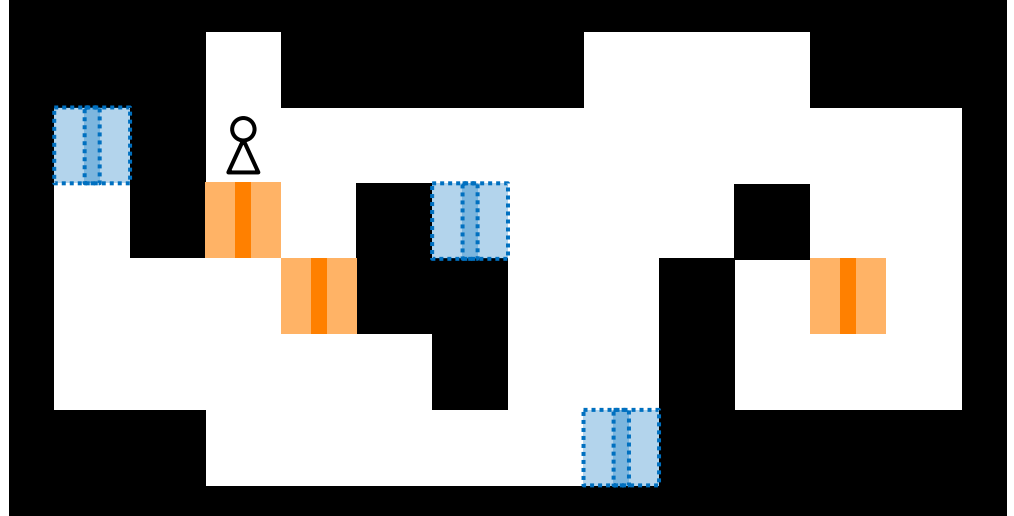
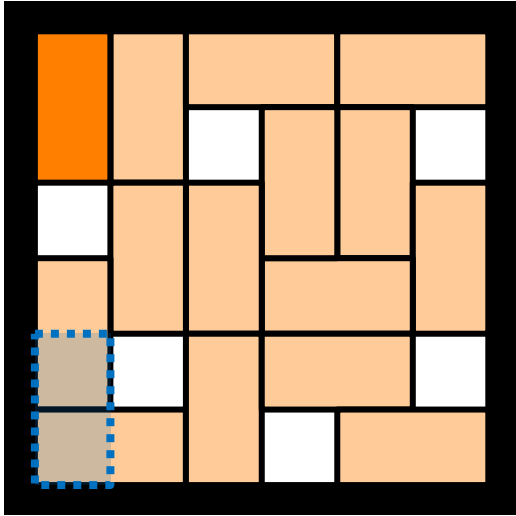
1. 組合せ遷移とは？

2. 組合せ遷移の波及

3. 学術変革(B)「組合せ遷移」の目的・体制

# 背景) スライディングブロックパズル

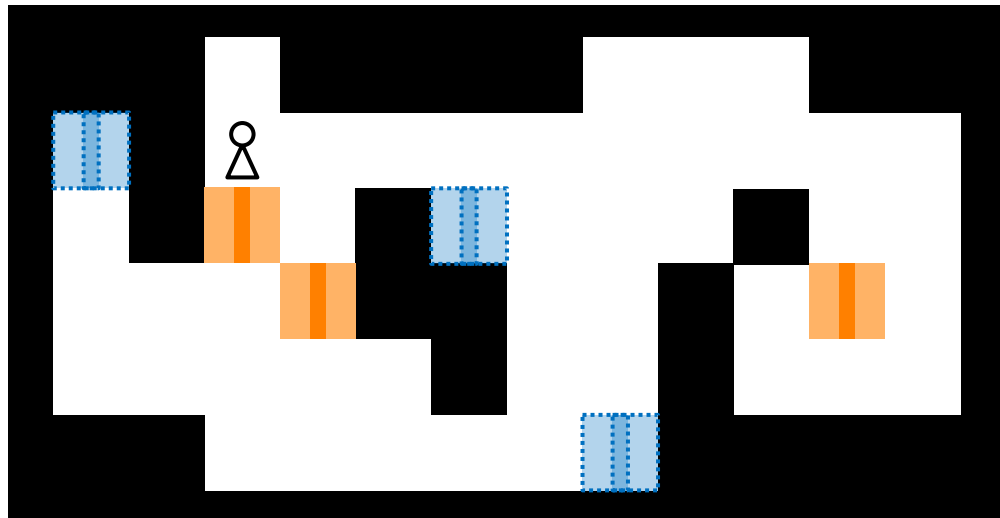
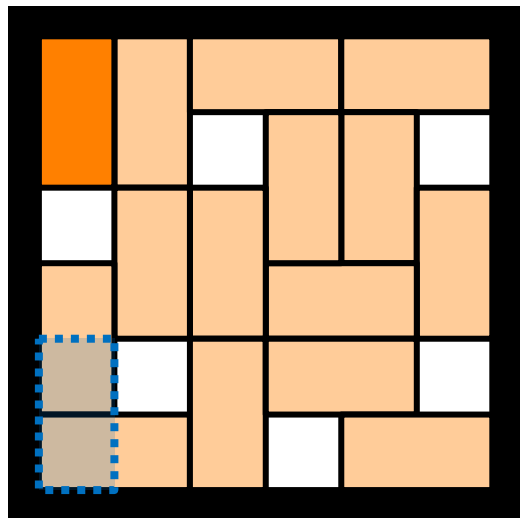
15パズル, 箱入り娘, 倉庫番, ラッシュアワー, etc



11	2	6	9
4	14	3	5
1	12	7	15
13	10	8	

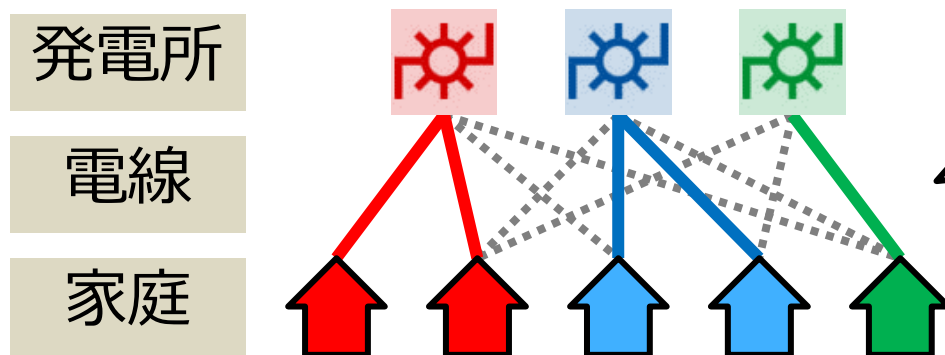
# 背景) スライディングブロックパズル

15パズル, 箱入り娘, 倉庫番, ラッシュアワー, etc



常にブロック同士が重ならないように,  
「一度に1つのブロックのスライド」を繰り返して  
特定のブロックを目標位置へ動かす.

## 例: 配電経路の切替



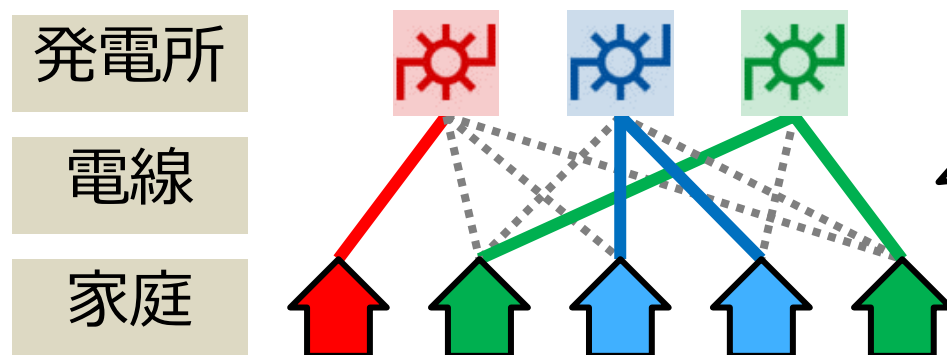
メンテナンスなどにより、  
配電経路を変える必要が  
生じる場合がある。

大前提: 停電を発生させてはいけない。

→ 「一度に1つの供給元の変更」を繰り返して、  
望ましい配電の仕方に切り替える。



## 例: 配電経路の切替



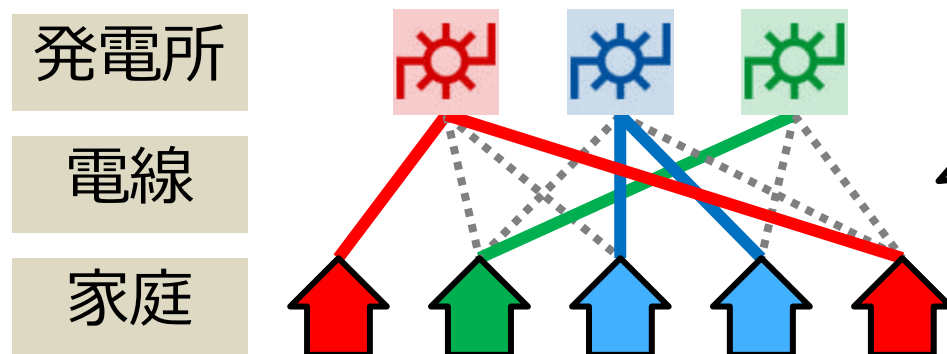
メンテナンスなどにより、  
配電経路を変える必要が  
生じる場合がある。

大前提: 停電を発生させてはいけない。

→ 「一度に1つの供給元の変更」を繰り返して、  
望ましい配電の仕方に切り替える。

# 背景) 常時稼働型システム

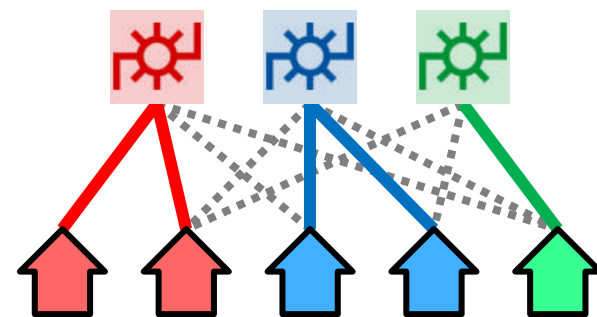
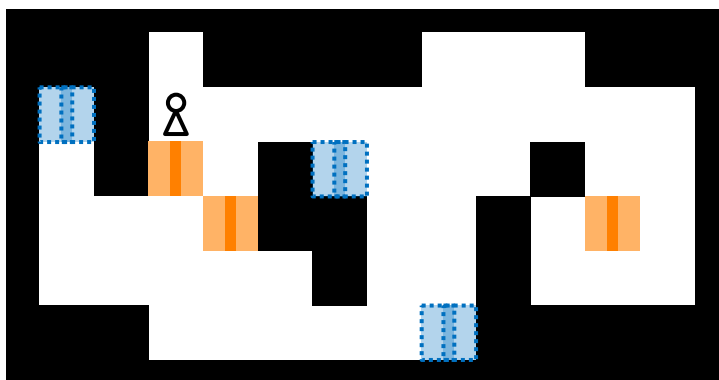
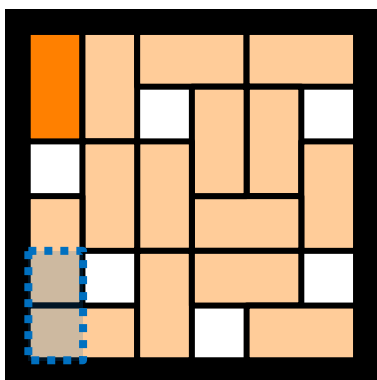
## 例: 配電経路の切替



メンテナンスなどにより、  
配電経路を変える必要が  
生じる場合がある。

大前提: 停電を発生させてはいけない。

→ 「一度に1つの供給元の変更」を繰り返して、  
望ましい配電の仕方に切り替える。



いずれの状況も・・・

- ブロック同士は重ならない
- 停電を起こさない

守るべき条件を満たしつつ  
「許される特定の変更操作」を繰り返して  
目標状態へ到達したい

- 1つのブロックをスライド
- 1つの供給元を切替

↓  
**“組合せ遷移”**として  
数理モデル化

# “組合せ遷移”とは

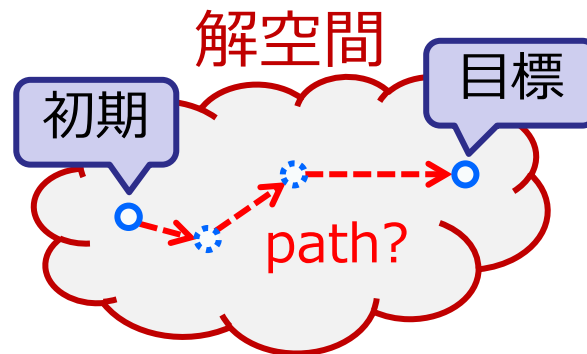
解空間の“連結性”や“到達性”を問う研究トピック



【探索問題】

実行可能解が1つでも  
存在するか判定したい

従来研究は、ほとんどこちら



【遷移問題】

実行可能解だけの経路が  
存在するか判定したい

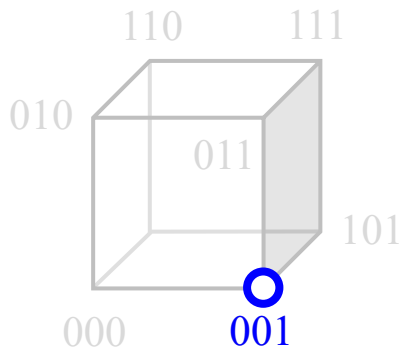
新しいアルゴリズム研究

組合せ遷移の枠組

守るべき条件を満たしつつ  
「許される特定の変更操作」を繰り返して  
目標状態へ到達したい

実行可能解

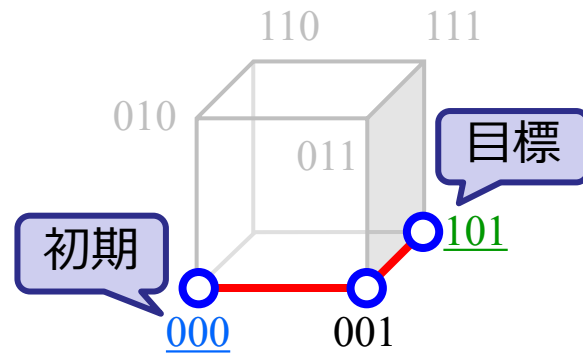
# 例) SAT



## 【探索問題】

実行可能解が1つでも  
存在するか判定したい

従来研究は、ほとんどこちら



## 【遷移問題】

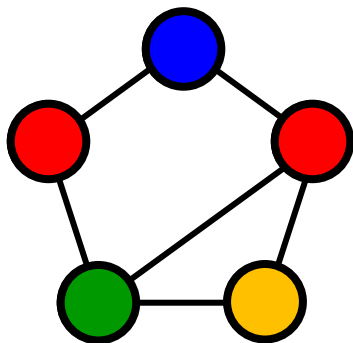
実行可能解だけの経路が  
存在するか判定したい

新しいアルゴリズム研究

例) SAT論理式 :  $f(x, y, z) = (x \vee \bar{y}) \wedge (\bar{x} \vee y \vee z) \wedge (\bar{y} \vee \bar{z})$   
 SATの実行可能解 : true (= 1), false (= 0)の真理値割当において,  
 論理式  $f$  を充足する (trueにする) もの。

# 例) 点彩色

$k = 4$

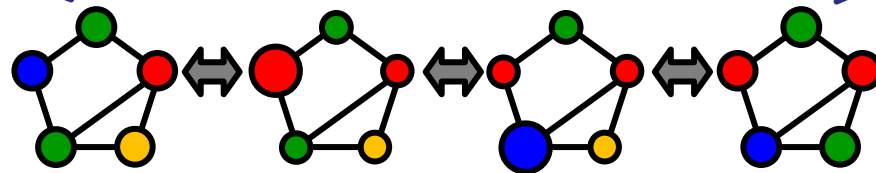


【探索問題】

実行可能解が1つでも  
存在するか判定したい

従来研究は、ほとんどこちら

初期



目標

【遷移問題】

実行可能解だけの経路が  
存在するか判定したい

新しいアルゴリズム研究

$k$ 点彩色：隣接するどの2点も異なる色になるよう、 $G$ の各点に色を割り当てる。使用できる色数は高々 $k$ 個まで。

# 「解空間」 = 「解空間グラフ」

解空間 = 基となる探索問題  
(の実行可能解) + 隣接関係



解空間グラフ = 点 + 辺

(SATの解空間) = (充足可能解) + (ハミング距離1)

(点彩色の解空間) = (点彩色) + (1点のみ塗り替え)

隣接関係の設定方法に、明確なルールは今のところない

□ 応用から派生した問題であれば、応用に従う

□ できるだけ“単純”な関係で解析

- 固定パラメータ容易性におけるパラメータ選択のような立ち位置 (あまり変な隣接関係も認められにくい)

# もちろん・・・

「組合せ遷移」という言葉自体は新しい（伊藤が作った）が、  
解空間の構造や性質の研究は、伝統的な離散数学にも現れる

- 有限束のハッセ図
- 凸多面体の1骨格
- 有限群のケーリーグラフ
- カタラン構造
- 置換群 etc.

## 「組合せ遷移」の研究モチベーション

配電のような常時稼働型システムへ応用したい

- アルゴリズムを開発したい！
- 計算量の解析が必要になってくる



# 組合せ遷移の理論フレームワーク

## 研究のきっかけ (2006年頃の産学連携研究)

配電のような常時稼働型システムのアルゴリズム解析



### 先行研究

• SATの解空間

C.H. Papadimitriou  
(UC Berkeley)

• 組合せパズルと計算量

E.D. Demaine 上原隆平 宇野 裕之  
(MIT) (JAIST) (大阪公立大)

• 点彩色の解空間

[Bonsma & Cereceda 09]

先行研究を包含する**汎用的な理論フレームワーク**を提唱。

- 独立集合やマッチング等, 理論計算機科学の根幹をなす問題に対して, 理論フレームワークを適用
- 多項式時間求解性や近似可能性といった基本手法

現在の組合せ遷移の**研究指針**となる

T. Ito, E.D. Demaine, N.J.A. Harvey, C.H. Papadimitriou, M. Sideri, R. Uehara, Y. Uno.

On the complexity of reconfiguration problems. Theoretical Computer Science 412, pp. 1054-1065 (2011)

# 組合せ遷移のアルゴリズム研究

## [2002 – 2012]

- 計算困難性の結果が多数 (PSPACE完全性)
- 解空間グラフが連結となるための十分条件

## [2013 – 現在]

- 到達性判定に対して, アルゴリズム手法が急速に整備  
2年間で20本以上の論文@arXiv (査読なし)  
→ 国際会議SODA, ICALP, STACS, ISAAC, SWAT, WADS, etc.
- 遷移の性質をきちんと捉えたアルゴリズム手法



## 組合せ遷移の 国際ワークショップ

- 第1回 2015年 日本・仙台市
- 第2回 2017年 カナダ・バンフ
- 第3回 2019年 フランス・オツソワ
- 第4回 2022年 カナダ・バンフ

2017年バンフにて (<https://www.birs.ca/events/2017/5-day-workshops/17w5066>)

2008年に理論フレームワークを提唱してから10年ほどの間に、  
**14カ国51機関90名以上の研究者が組合せ遷移の論文を出版**

(2020年調べ)

## イギリス

- ・オックスフォード大学
- ・ダラム大学 他

## ドイツ

- ・ドルトムント工科大学
- ・ハノーバー大学 他

## フランス

- ・リヨン大学
- ・ボルドー大学 他

## オランダ

- ・トゥウェンテ大学
- ・ユトレヒト大学 他

## インド

- ・数理解析研究所
- ・インド工科大学 他

## 日本

- ・東北大学
- ・京都大学
- ・九州大学
- ・北陸先端科学技術大学院大学
- ・国立情報学研究所 他

## カナダ

- ・ウォータルー大学
- ・サイモンフレーザー大学
- ・ブリティッシュコロンビア大学
- ・トロント大学 他

## アメリカ合衆国

- ・MIT
- ・UCバークレー
- ・リッチモンド大学
- ・ワシントン大学
- ・IBM研究所 他

(上記では代表的な国・機関のみ記載)

組合せ遷移のアルゴリズム研究が進む事で、  
周辺領域にも波及効果が出てきた。

# 本研究領域の目的と計画

1. 組合せ遷移とは？

2. 組合せ遷移の波及

3. 学術変革(B)「組合せ遷移」の目的・体制

# 波及) 基問題へのフィードバック

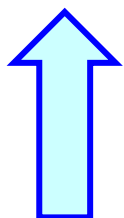
解空間の到達性や連結性を研究することで,  
その解空間を構成する**実行可能解の探索問題**へフィードバック

定理：3の倍数長の閉路がないグラフは、3色で点彩色できる

G.T. Chen, A. Saito.

Graphs with a cycle of length divisible by three.

J. Combinatorial Theory, Series B, 60, pp. 277–292 (1994)



M. Wrochnaは、3点彩色の遷移問題のアイデアを用いて、  
たった8行の**簡潔な別証明**を与えた。

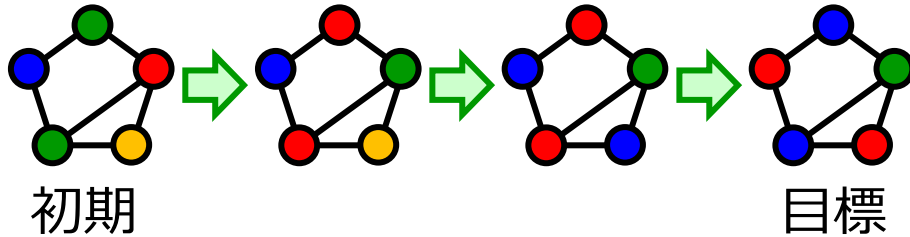
R.C. Brewster, S. McGuinness, B. Moore, J.A. Noel.

A dichotomy theorem for circular colouring reconfiguration.

Theoretical Computer Science 639, pp. 1-13 (2016)

# 波及) 統計物理サンプリング

## 【組合せ遷移】



点彩色のKempe遷移  
[BHIKMMMSW 20]

四色定理の証明でも  
重要な役割を果たす。

## 【統計物理サンプリング】

計算複雑性が未解析  
(van den Heuvel 2013)

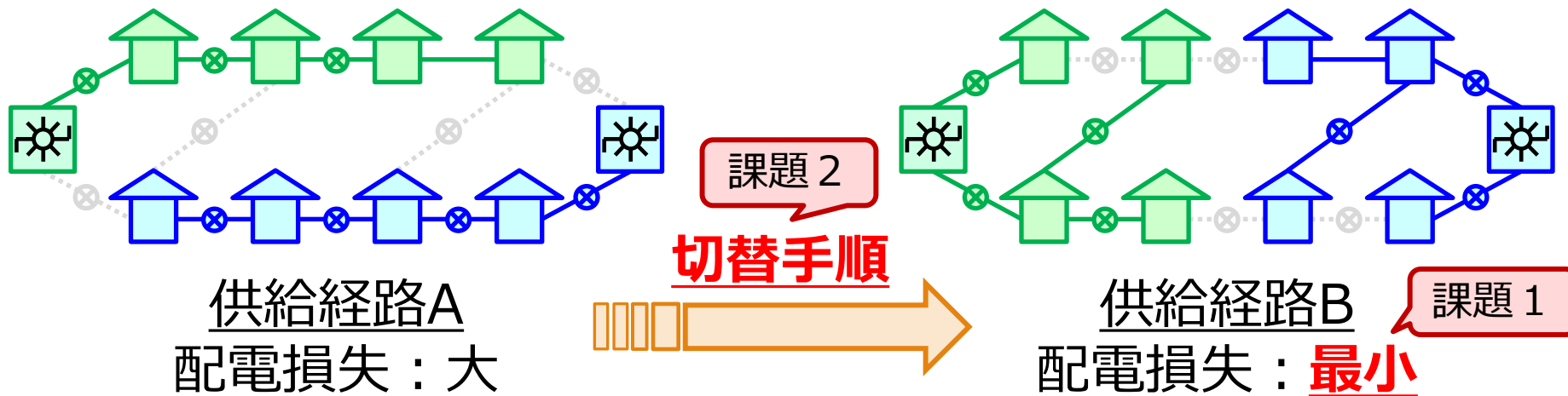
Pottsモデルの状態空間  
WSKアルゴリズム (1987年)

M. Bonamy, M. Heinrich, T. Ito, Y. Kobayashi, H. Mizuta, M. Mühlenthaler, A. Suzuki, K. Wasa.  
Shortest reconfiguration of colorings under Kempe changes.  
Proc. of STACS 2020, LIPIcs 154, pp. 35:1-35:14 (2020)

JSPS 二国間交流事業 フランスとの共同研究「組合せ遷移に対するアルゴリズム技法の開発」  
(フランス側PI: Nicolas Bousquet, 日本側PI: 伊藤 健洋)

# 波及) 配電制御システム

電力の供給経路の選び方で、配電損失は変わる



## 【課題】

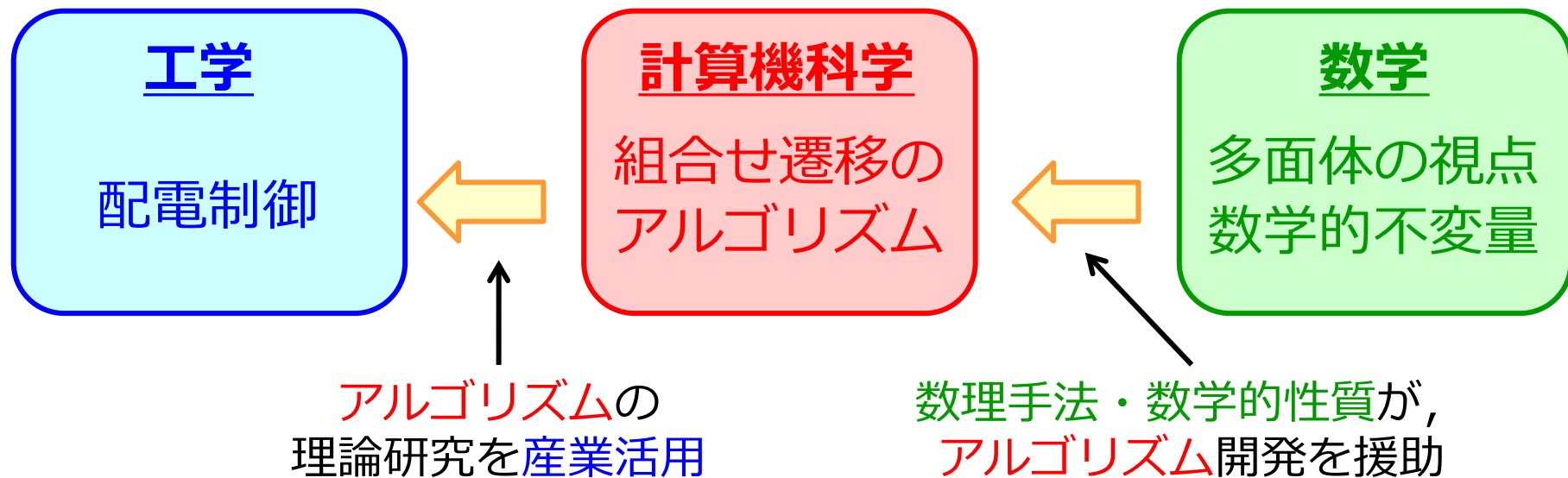
1. 最適な供給経路を見つけられるか？
2. 現在の供給経路から、最適なものへ切り替えられるか？

2019年6月27日 共同プレスリリース

- 2019年6月28日「電気新聞」4面 産業・技術  
「配電網の損失最小化 明電舎 東北大 切り替え手順まで算出」
- 2019年7月10日「化学工業日報」社説

# これらの研究を通して“楽しかった”こと

- 他分野の手法で、ずっと悩んでいた問題が解決
  - アルゴリズム理論が、実社会の問題を解決する実体験
- 個人研究では辿り着けない、チームでの研究だからこそ！



2019年、学術変革領域研究(B)の募集予告

→ ピッタリな制度では？

→ 体系的かつ戦略的に「組合せ遷移」を展開するチャンス！



# 本研究領域の目的と計画

1. 組合せ遷移とは？

2. 組合せ遷移の波及

3. 学術変革(B)「組合せ遷移」の目的・体制

# 組合せ遷移の展開に向けた

計算機科学・

工学・

数学

# によるアプローチの融合

領域代表：**伊藤 健洋**



## A01班

代表：伊藤 健洋  
(東北大学)



## B01班

代表：川原 純  
(京都大学)



## C01班

代表：岡本 吉央  
(電気通信大学)



## 総括班

事務担当：鈴木 顕  
(東北大学)

# 究極の目標

## 組合せ遷移の技術が究極に浸透した世界の実現

### [現状]

- 組合せ遷移は，研究・実務の広範な範囲に現れる
  - 組合せ遷移のアルゴリズム技術は，専門家のみが有する
- ➔ 「新たな学際的研究」の好機とも言えるが・・・

ちょっと試してみたい...  
が簡単にできるのが重要

### [一方で...]

- 機械学習 → Pythonの充実したライブラリ等
- 数式処理 → Mathematica
- 組合せ問題 → SATソルバーやIPソルバー

共通のソフトウェアが整備されると，

- 専門家の助けを求めずとも最先端の技術にアクセスできる
- 非専門家が，自領域内で問題解決できる

# 本研究領域の目的

研究でも実務でも障壁なく，組合せ遷移のアルゴリズム技術を活用するための**共通基盤**を構築する。

→ 「ちょっと試してみよう」が気楽にできる世界を作りたい

→ 組合せ遷移の**技術浸透の土台**を築き，組合せ遷移を知ってもらうことで，10年先20年先に向けた「**種蒔き**」をしたい（産業応用の**モデルケース**まで実施。魅力を伝えたい！）

B01班：  
工学



＜大目標＞

組合せ遷移に対する  
実装技術の構築と産業応用

＜2年半の目標＞

- (i) 3つの技法を用いて組合せ遷移の汎用ソルバー開発
- (ii) 配電制御システムを題材とした産業応用の実践

実装技術基盤

A01班：  
計算機科学



＜大目標＞

組合せ遷移に対する  
アルゴリズム的メタ定理の構築

＜2年半の目標＞

- (i) 論理とグラフ構造パラメータを用いたメタ定理の構築
- (ii) 近接分野のアルゴリズム手法を組合せ遷移へ導入

アルゴリズム基盤

C01班：  
数学



＜大目標＞

組合せ遷移に対する  
数学理論の構築

＜2年半の目標＞

- (i) 組合せ遷移における数学活用事例の体系的収集
- (ii) 組合せ遷移の研究に資する数理手法の開発

数学基盤

# 本研究領域のメンバー (申請時の平均年齢36.5歳)

**A01**  
計算機科学

大舘陽太	小林靖明	伊藤健洋
和佐州洋	山内由紀子	
江藤宏 (特任助教 → 九工大へ栄転)		

**B01**  
工学

(2022年4月より  
↓ 研究分担者)

川原純	戸田貴久	飯岡大輔
宋剛秀	鈴木顕	
中畑 裕	照山順一	

**C01**  
数学

野崎雄太	神山直之	垣村尚徳	岡本吉央
岩政勇仁	小関健太	小林佑輔	
前澤俊一 (博士研究員 → 2022年4月より研究分担者)			

このメンバーだから得られた成果が続々と。  
本日は、全力で駆け抜けた2.5年間の成果を見てください！