



# 送電ネットワークのネットワーク 分割とその応用について

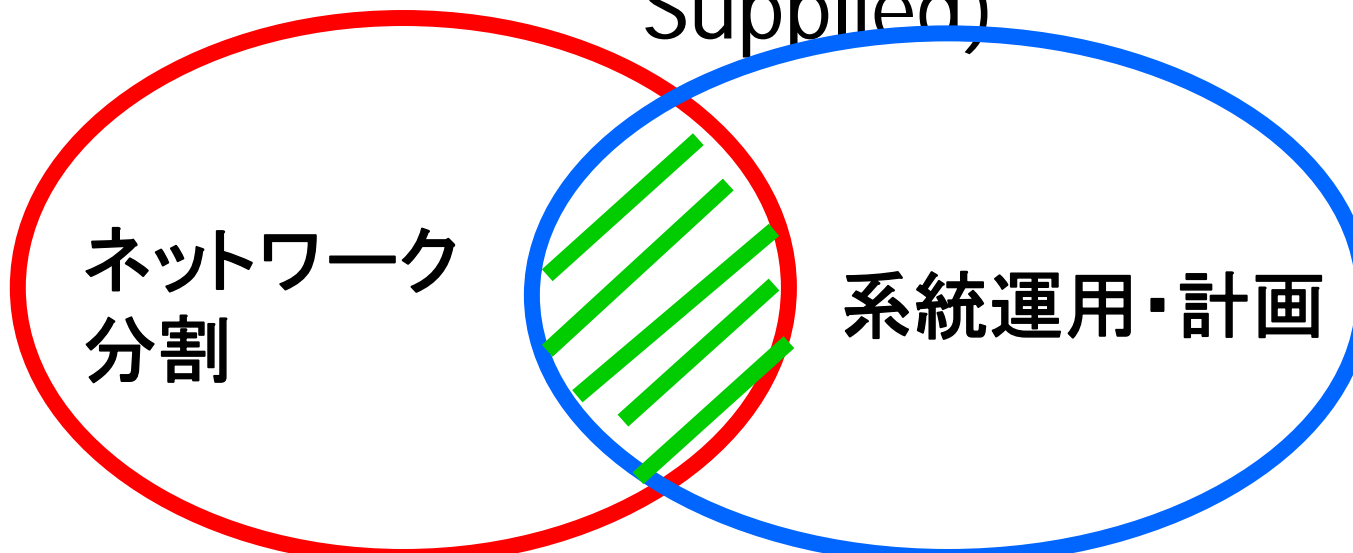
---

明治大学  
森 啓之



# アウトライン

- Part 1 状態推定のトポロジー可観測性解析
- Part 2 送電系統拡張計画(設置コスト、EENS (Expected Energy Not Supplied))





# Part 1: 状態推定のトポロ ジー可観測性解析

---

明治大学  
森 啓之

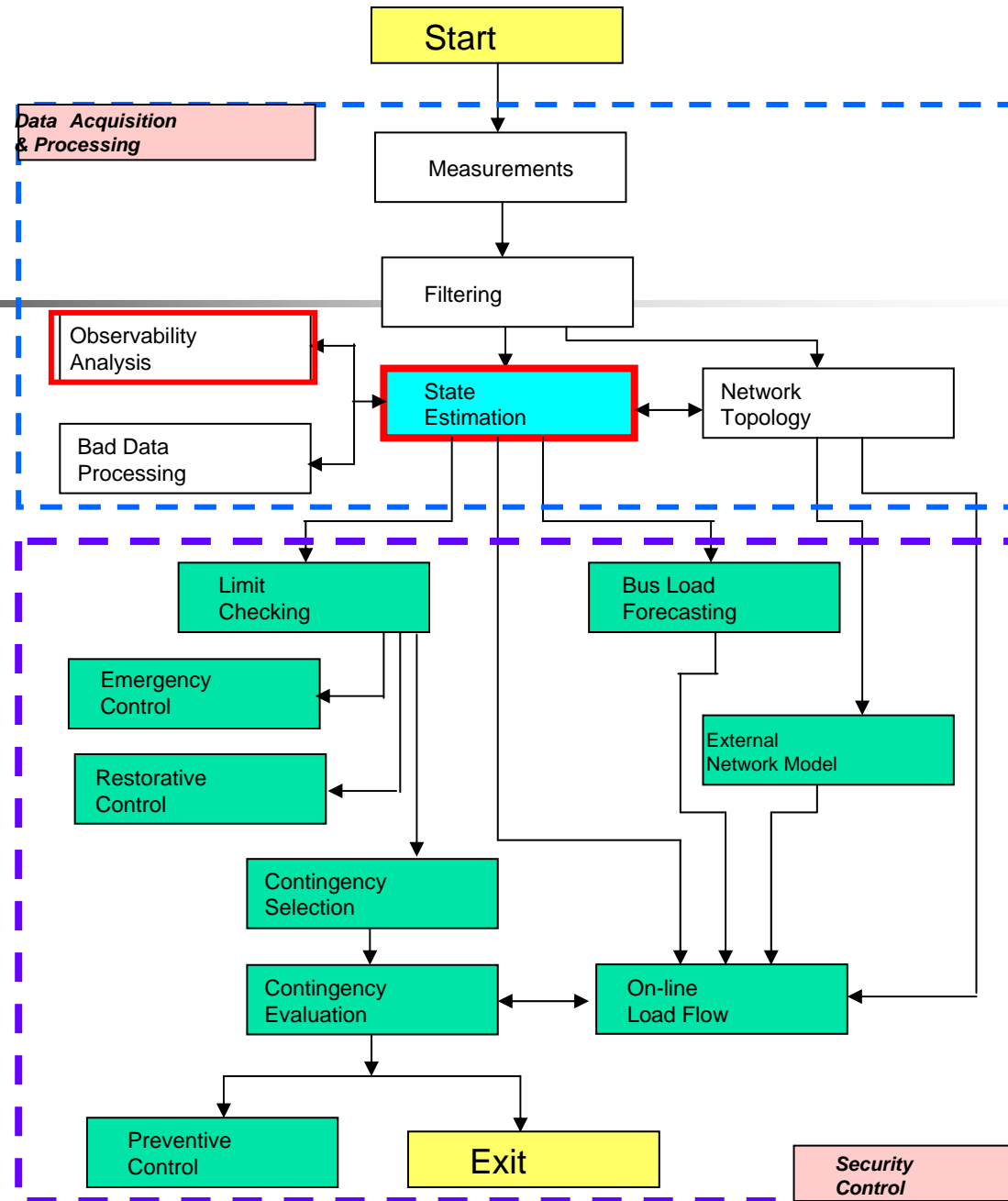
# 目的

- 送電ネットワークの状態推定のトポロジー可観測解析のための手法を提案する。

(グラフ理論のスパニングツリー+系統分割)



# 研究背景



図A セキュリティ  
コントロールにお  
ける状態推定の  
役割



## 研究背景

- スマートグリッド環境下の送電ネットワークでは

— 広域連系制御の重要性

— ネットワークの大規模化

海外ではPMU  
設置数顕著に増大

PMU(Phasor Measurement Unit)の使用

→ 系統解析手法高速化(状態推定に着目)

# PMUの設置状況

- 米国： 500台（2014年までに1200台）
- 中国： 1717台





## PMU

---

- PMUの利用により、スマートグリッドの自動化が可能
- 例として、PMU情報を利用して
  - 負荷遮断
  - 負荷制御
  - 故障検出
  - — 状態推定
  - 安定度解析など





## PMUを用いた状態推定

---

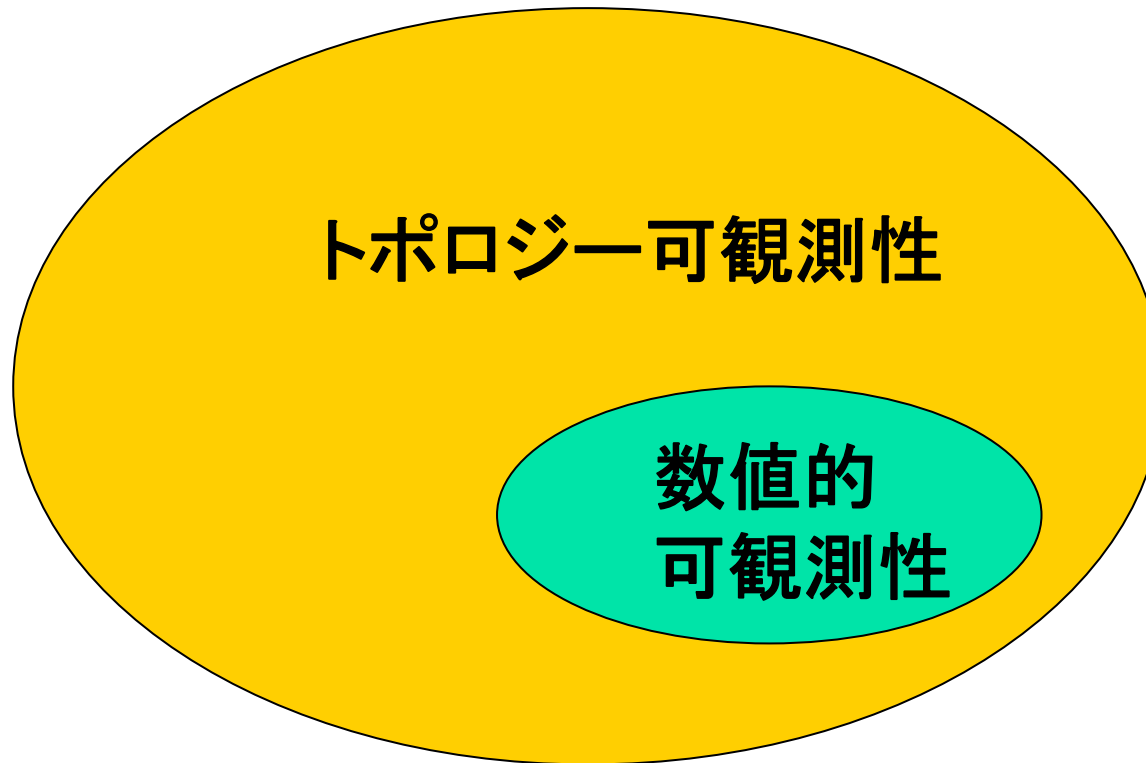
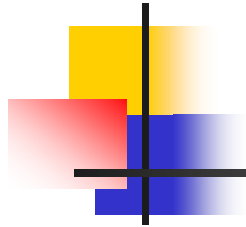
- 従来型の送電ネットワークでは、**数分**ごとにデータを収集し、状態推定を実施
- 他方、スマートグリッド環境下の送電ネットワークでは**20ms~100ms**ごとにデータ収集
  - 状態推定的高速化(まずは**1000ノード**目標)



## 状態推定の研究分野

---

- 不良データの検出と抑制
- メータの最適配置
- 状態推定の高速度化アルゴリズム
- 階層的状態推定
- ネットワークトポロジーの同定
- ロバスト状態推定
- トポロジー可観測性解析



**図B トポロジー可観測性の位置付け**



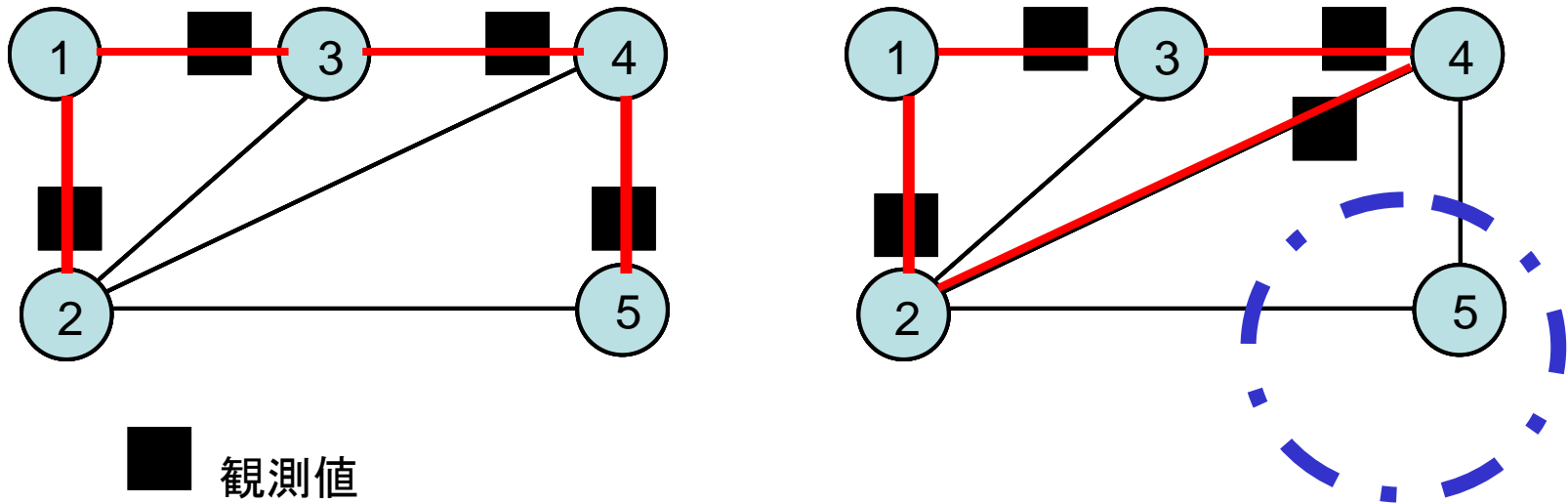
## トポロジー可観測性解析 (TOA)

---

- 状態推定を実施する前に, 系統状態が状態推定を実施できることが可能かどうかを必ず確認する必要
- 具体的には, 観測値が少なくとも一つメータに対応しているかを調べる問題。もし, 対応している場合は, 「ネットワークはトポロジー可観測である」と言う。

# トポロジー可観測性解析 (TOA) <sup>13</sup>

## とは？



(a) Observable network      (b) Unobservable network

Fig. 1. Observable and unobservable networks



## 従来のTOAの研究

---

- Wollenberg: 問題の提起
- Clements: グラフ理論
- Monticelli & Wu: 行列の行列式
- Quintana: マトロイド理論
- Mori: 最小木

# トポロジー可観測性解析の定式化 (Krumpholz, *et al.*, '80)

- $n$ 母線から構成される電力系統において  $m$  個の観測値集合
- 観測方程式

$$z = h(x) + v \quad (1)$$

- 線形化すると

$$\Delta z = H \Delta x + v \quad (2)$$

- 可観測性とは

$$\text{rank}(H) = 2n - 1 \quad (3)$$

- PQ分割して

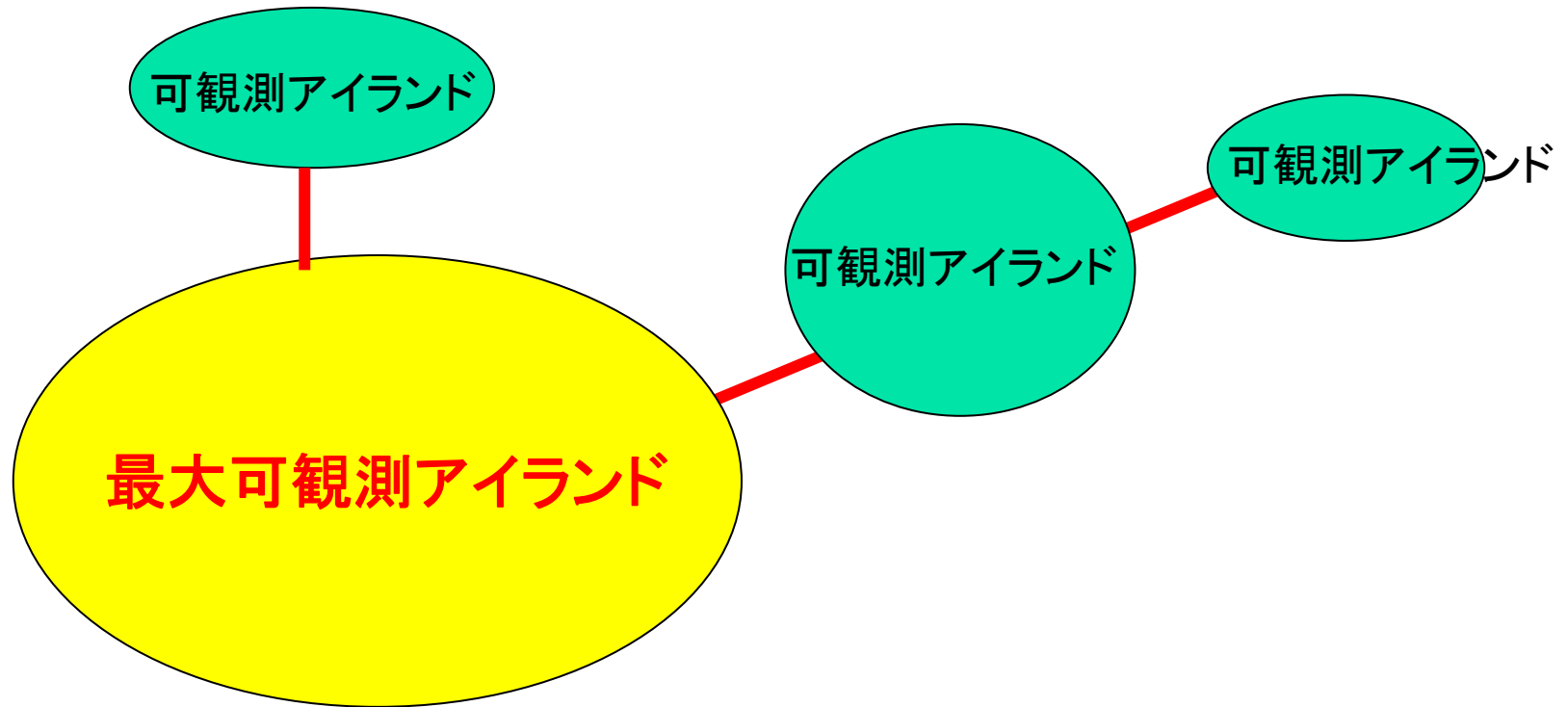
$$\text{rank}(H_{Pq}) = n - 1 \quad (6)$$

$$\text{rank}(H_{QV}) = n - 1 \quad (7)$$

# トポロジー可観測性解析における評価すべき事項<sup>16</sup>

- ネットワークがトポロジー可観測であるかどうか？
- ネットワークにおいて可観測な最大サブネットワーク(最大可観測アイランド)の同定
- ネットワーク全体を可観測にするために必要な擬似観測値が必要なノードの同定





図C 最大化観測アイランドの同定

# 最小木を用いたトポロジー可観測性解析 <sup>18</sup>

- ネットワークのブランチにメータ設置されている場合はブランチの重みを0, そうでない場合は1と定義することによってスパニングツリー(張木)の重みの総和を最小化する手法である。
- ここでスパニングツリー(張木)とはグラフ理論において与えられたグラフのノードを全て接続するツリーのことである。最小木を用いたトポロジー可観測性解析手法の数学的定式化は以下のとおりである。

# 最小木を用いたトポロジー可観測性解析(グラフ理論の応用)

- 最小木を用いたトポロジー可観測性解析手法の数学的定式化は以下のとおりである。

$$w(T_{Pq}) = \sum w_{bi} \rightarrow \min \quad (8)$$

但し,  $w(\cdot)$ : スパンニングツリー  $\cdot$  の重みの総和,  $T_{Pq}$ : グラフ  $G_{Pq}$  のスパンニングツリー,  $bi$ : ブランチ  $i$ ,  $w_{bi}$ : ブランチ  $i$  の重み



## 参考文献

---

- H. Mori and S. Tuzuki, "A Fast Method for Topological Observability Analysis Using a Minimum Spanning Tree Technique," **IEEE Trans. on Power Systems**, Vol. 6, No. 2, pp. 491-500(1991).

## 従来の系統分割の研究

手法	ノード数均 等化	カットセッ ト数最 小化	実行可能解 のチェック	ネットワークロ バスト化
Irving	○	○	X	X
Mori	○	○	○	X
提案法	○	○	○	○



## 参考文献

---

- M.R, Sterling and W.H.R. Sterling, "Optimal Network Tearinig Simulated Annealing“, **IEE Proceeding**, 137, Pt. C, No. 1, pp. 69-72,Jan , 1988.
- H. Mori and K. Takeda, “Simulated Annealing for Power System Decomposition,“ **IEEE Trans. on Power Systems**, Vol. 9, No. 2, pp. 789-795, May. 1994.



## 提案法

---

- ネットワークを複数のサブネットワークに分割し、それぞれのサブネットワークにおいて**最小木**を用いたトポロジー可観測性解析を行うことを提案する。
- ただし、ネットワークの分割法として、サブネットワーク間の**カットセット数最小化**および各サブネットワークにおける**ノード数均等化**を最適化することを考える。



## 提案法のアルゴリズム

---

- Step 1: 初期設定する。
- Step 2: ネットワーク分割を行う。
- Step 3: 得られたサブネットワークにおいて最小木を用いたトポロジー可観測性解析を行い,サブネットワークのトポロジー可観測性を評価する。





## ネットワーク分割

---

- ネットワーク分割して得られたサブネットワークはほぼ同一のノード数を持つべきである。
- サブネットワーク間のカットセット数は最小化されるべきである。
- 得られたサブネットワークは**実行可能解**であるべきである。



# ネットワーク分割の数学的定式化

目的関数:

$$H = \sum_{k=1}^K n_k^2 + b^2 + \beta \sum_{k=1}^K p_k \longrightarrow \min \quad (14)$$

制約条件:

$$\dots \quad \sum_{k=1}^K n_i = N \quad (15)$$

但し,  $n_k$ : サブネットワーク  $k$  のノード数,  $K$ : サブネットワークの総数,  $b$ : サブネットワーク間のカットセット数,  $\beta$ : 係数,  $N$ : ネットワーク全体のノード数



# ネットワーク分割の数学的定式化

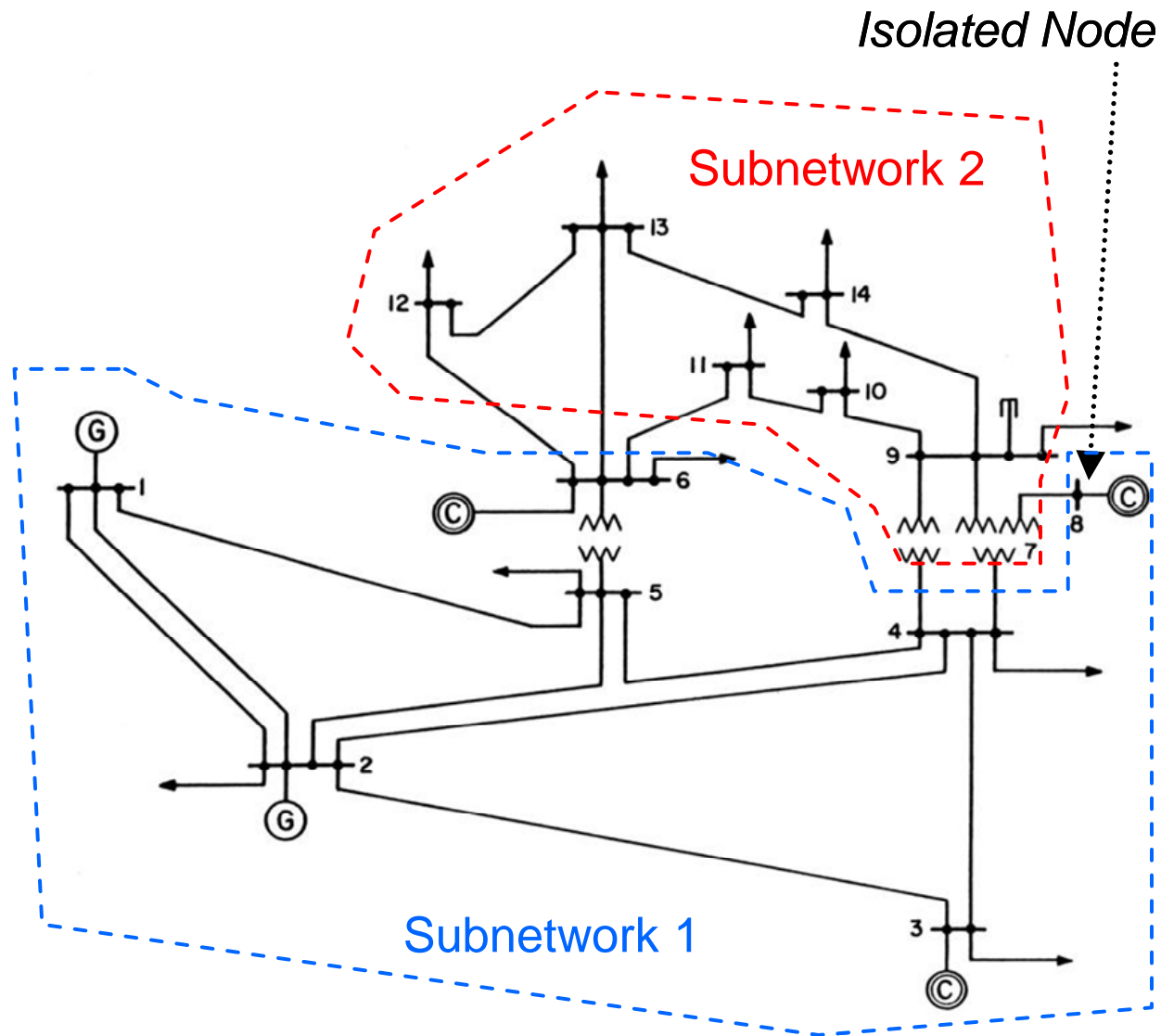
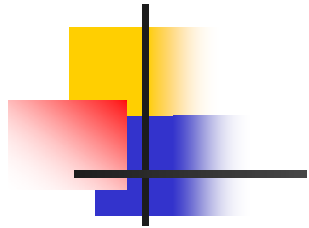
---

実行可能解がある場合

$$\rho_k = 1 / \prod \det(G_i^T G_i)$$

実行可能解がない場合

$$\rho_k = 10000$$



図D IEEE14母線系統における非実行可能解



# シミュレーション

---

## 条件

### Part 1: スパニングツリーの評価手法:

グラフ理論のクルスカル法

例題系統: IEEE 118母線、235母線、  
586母線、1169母線

### Part 2: 系統分割の最適化手法

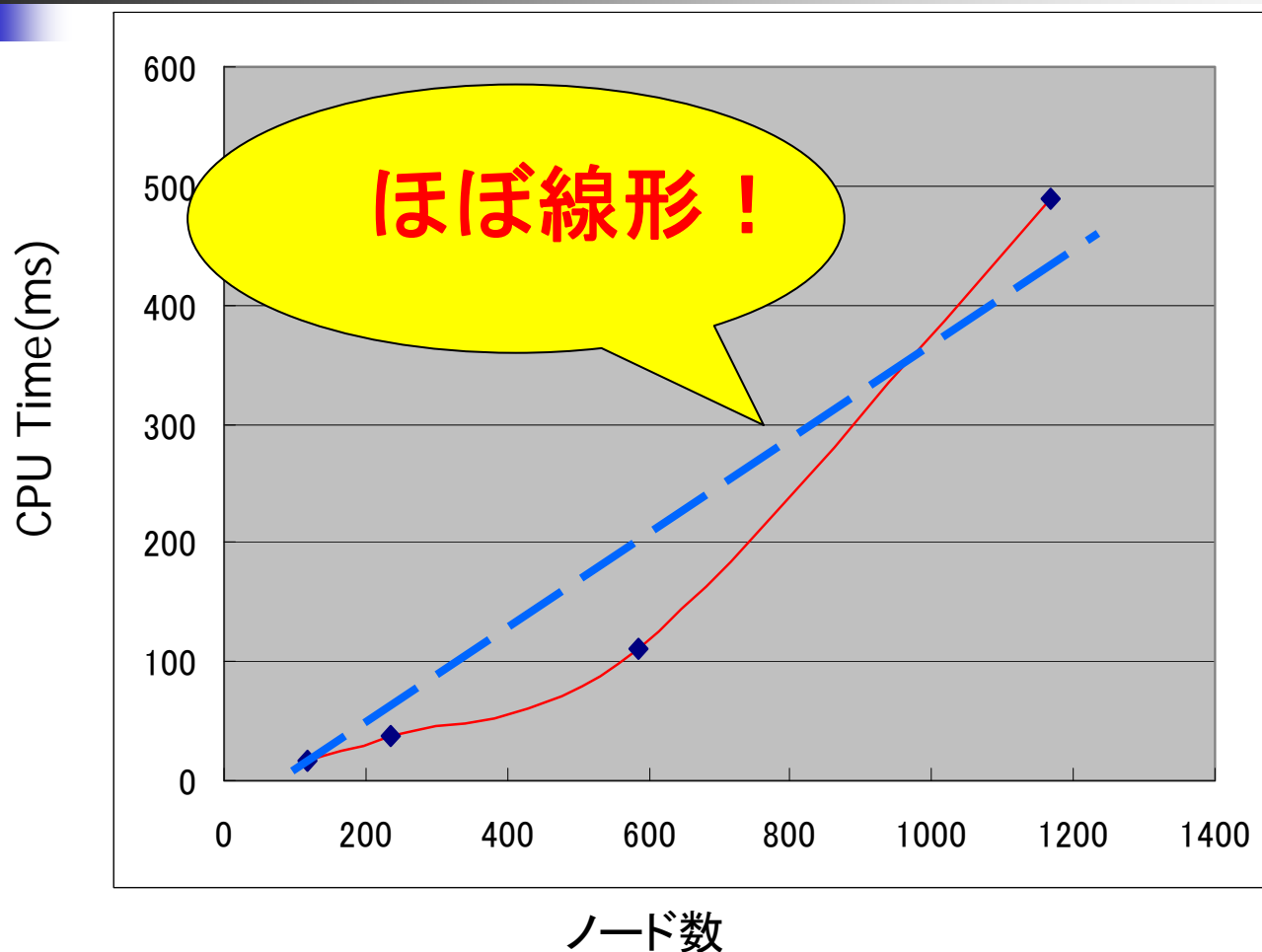
山登り法(ハミング距離2)

例題系統: W&H 6母線、IEEE14母線系統  
IEEE 30母線, Garver 46母線

初期条件: 1000個の乱数で最良値評価



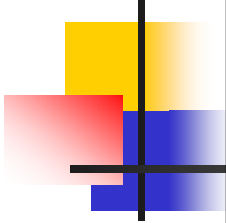
## 最小木(クルスカル法)の計算時間評価



118母線  
235母線  
575母線  
1149母線

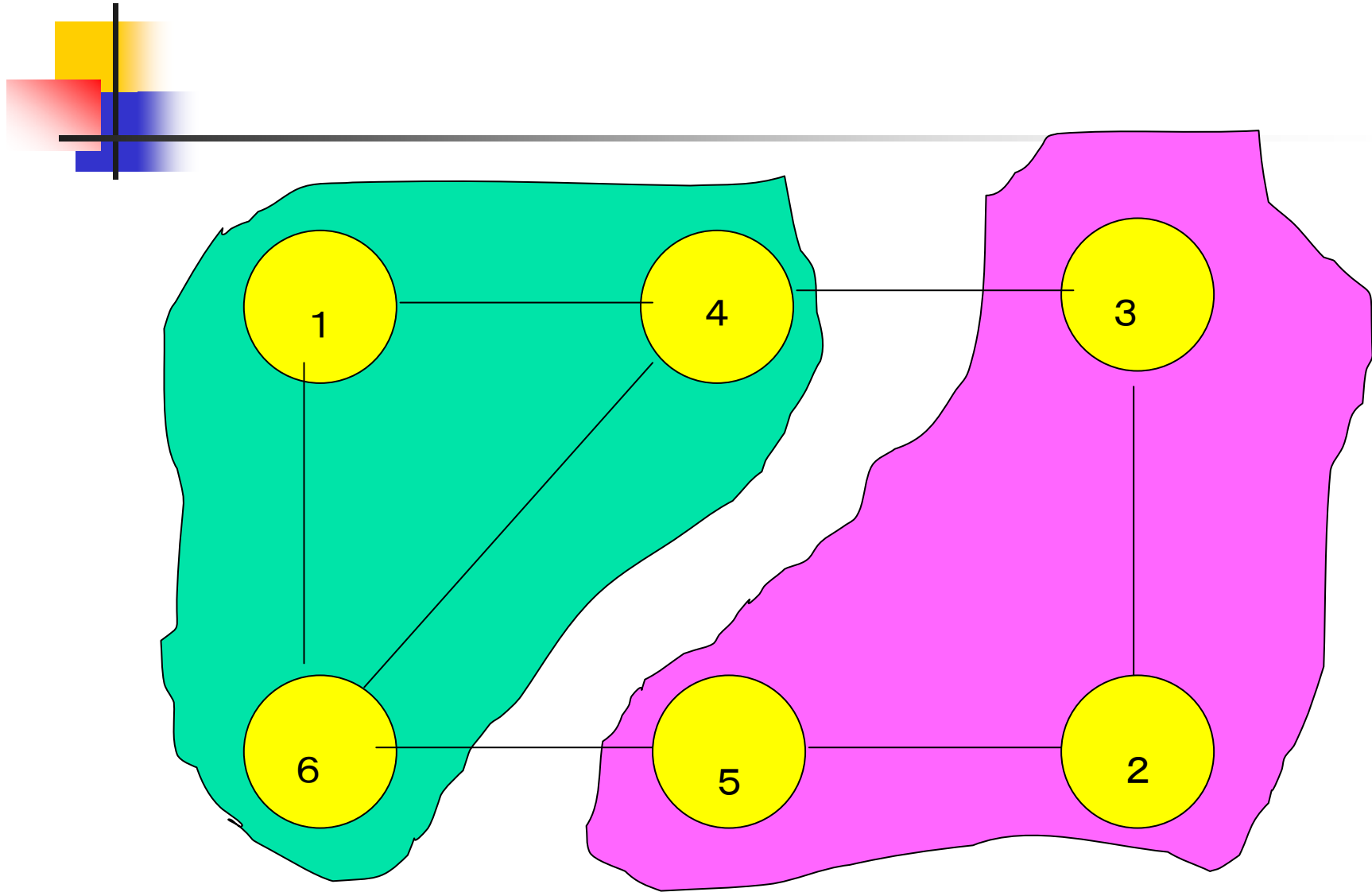
図F最小木の計算時間評価

図A 各例題系統における系統分割のコスト

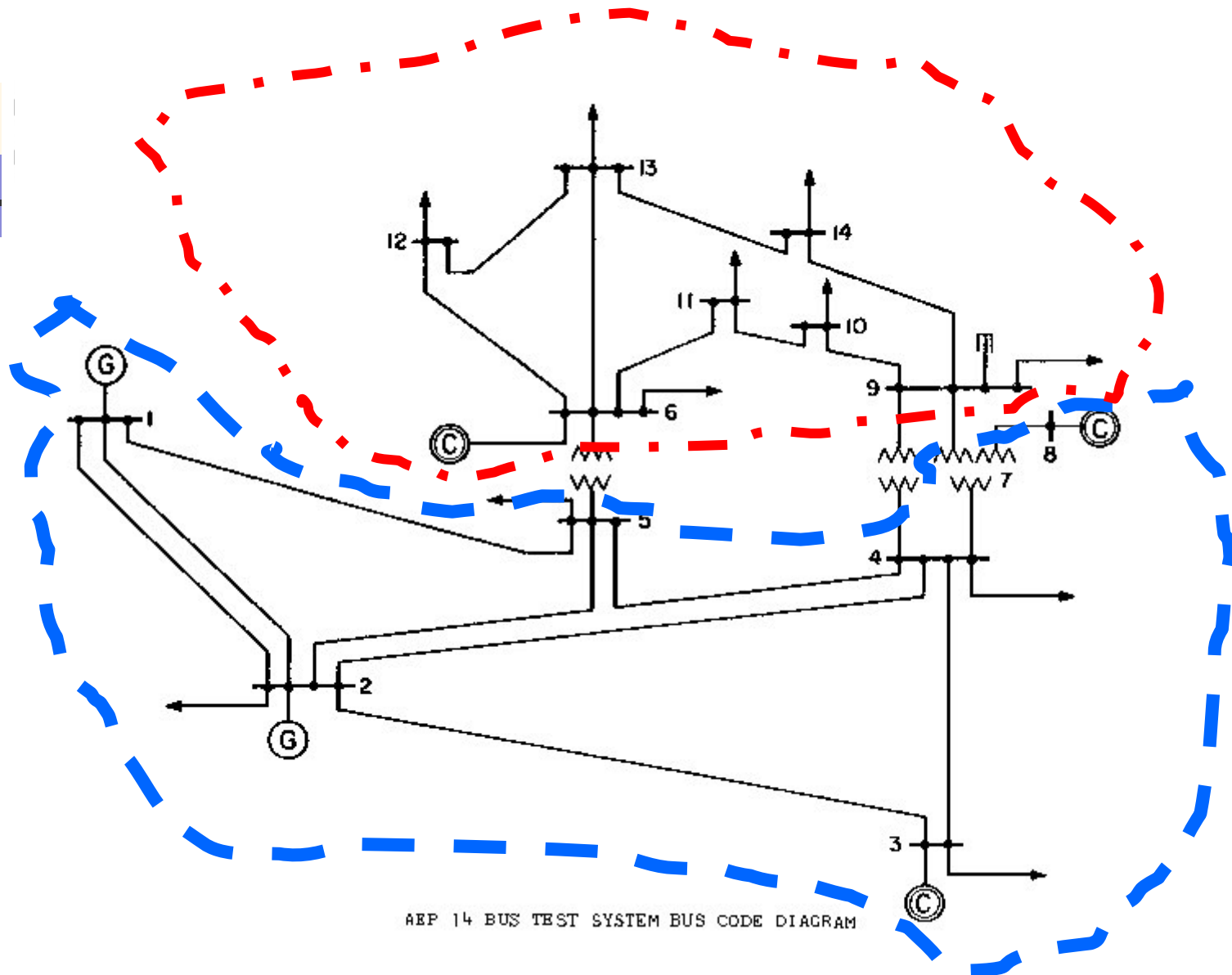
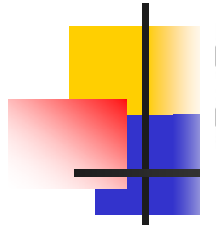


Systems	Cost
6	20
14	101
30	455
46	1064





図G Ward & Hale 6 母線において得られた解



図H IEEE14母線系統において得られた解

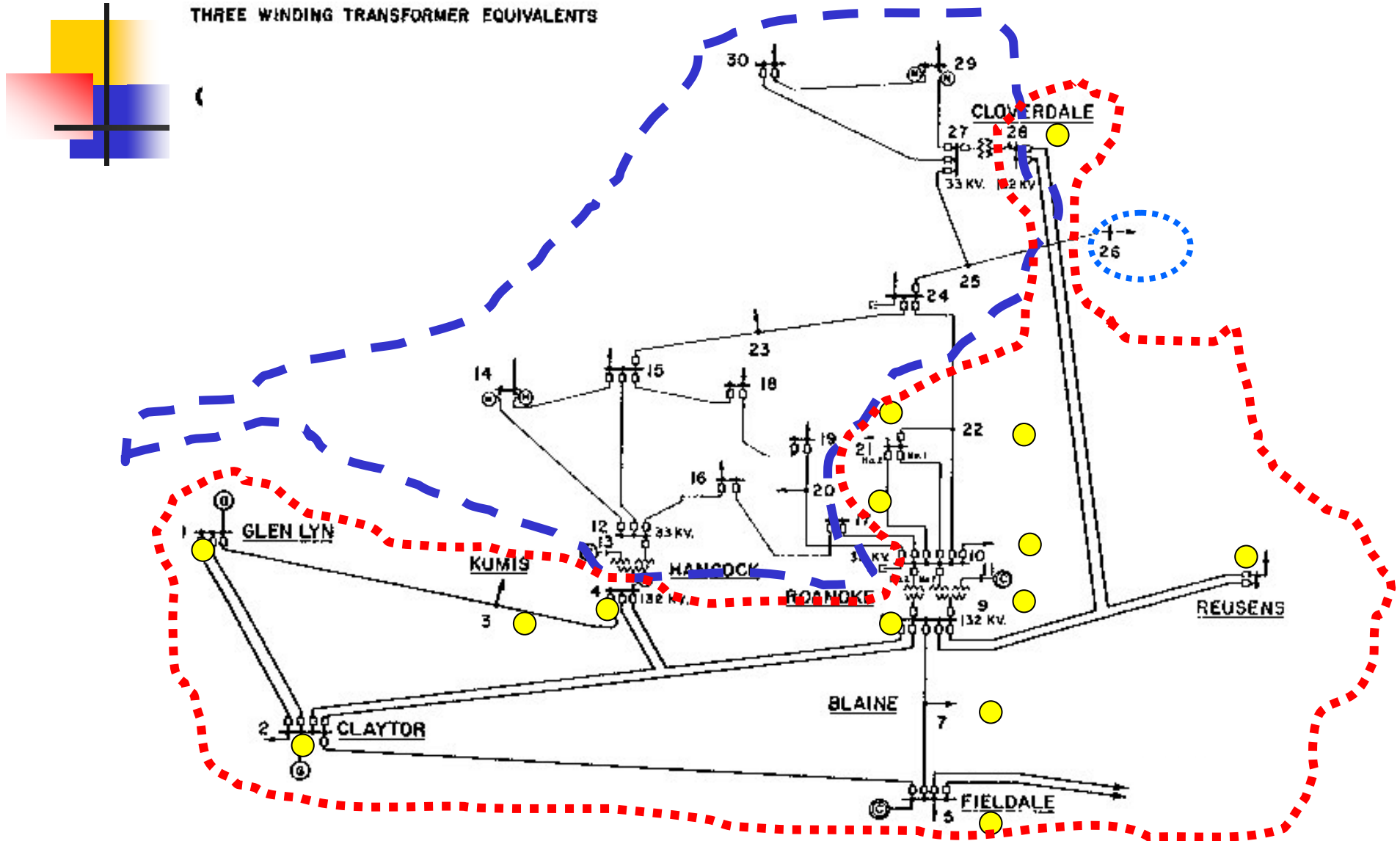
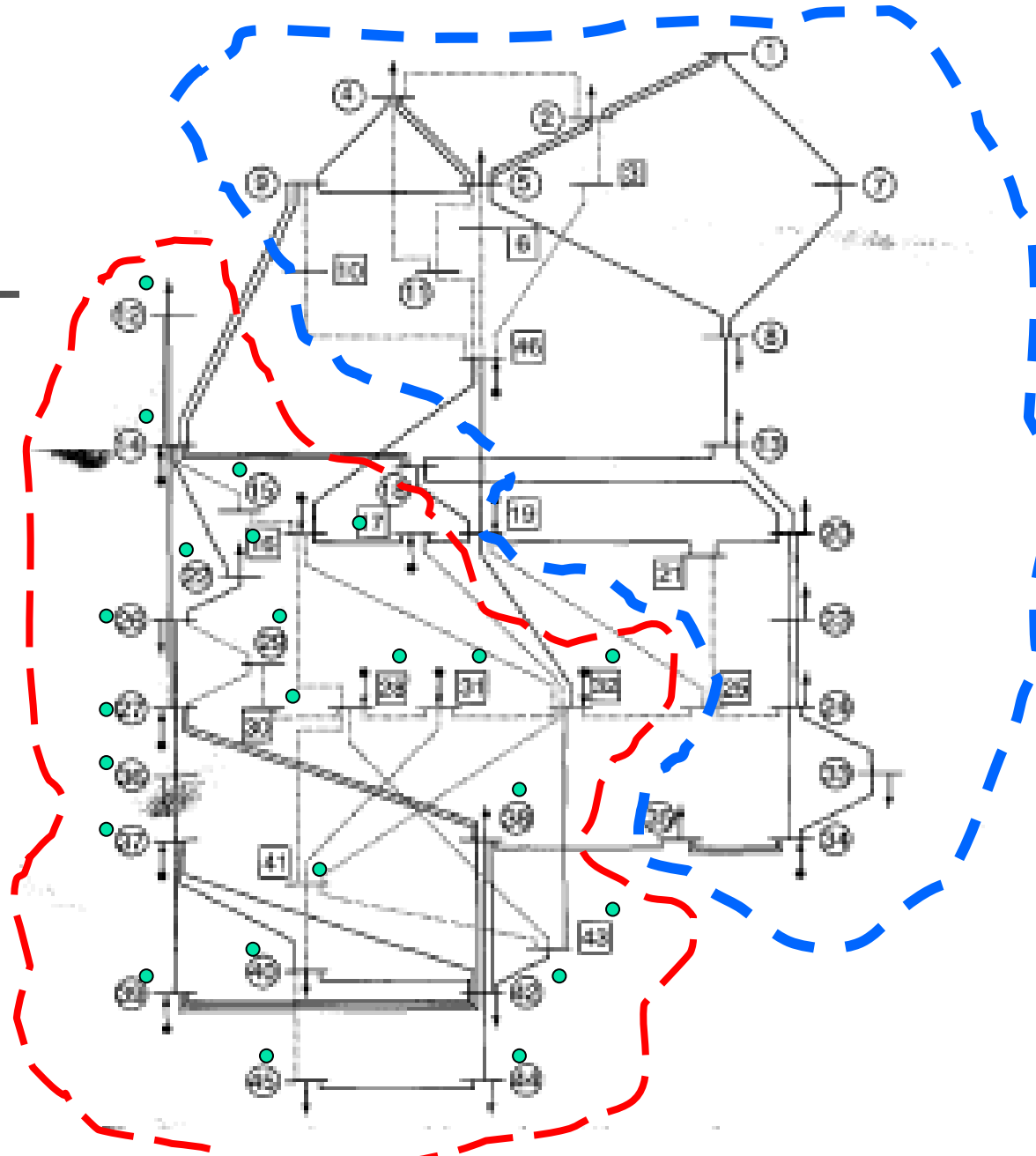
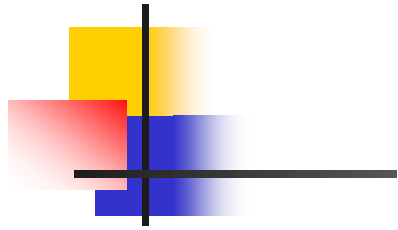


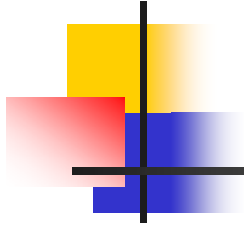
図1 IEEE30母線系統において得られた解



図J Garber 46母線系統において得られた解

# まとめ

- 本稿では,電力系統静的状態推定のトポロジー可観測性解析のための並列化手法を提案した。
- 提案する手法は,最適分割された複数のサブネットワークにおいてグラフ理論の最小木を用いたトポロジー可観測性解析を行い,ネットワーク全体がトポロジー可観測であるかどうかを評価する手法である。



# Part 2 送電系統拡張計画 のための送電系統分割

森 啓之  
明治大学

# 概要

## ■ 目的

- 背景

- 提案法

- シミュレーション

- まとめ



## 目的

---

- ✓送電系統拡張計画のための系統分割のための多目的Memetic Algorithm手法を開発する。





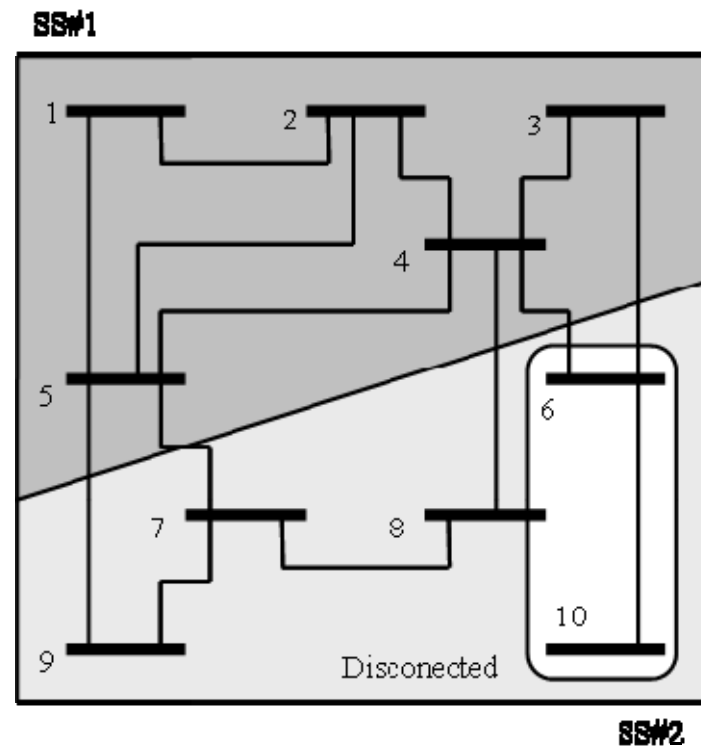
# 研究背景

---

- 送電系統拡張計画手法の動向
  - 設置コスト削減手法
  - 多目的メタヒューリスティクス応用(パレート解)を直接求める手法
  - 負荷の不確定を考慮した手法(ノード間の相関性を考慮したモンテカルロシミュレーション)
  - Probabilistic Reliability(確率的信頼度) EE NS(Expected Energy Not Supplied)を考慮した手法
  - 階層的最適化した手法

# 研究背景

- 系統分割とは



# 研究分割



従来法

単一目的最適化

$$F = w_1 f_1 + w_2 f_2$$

$$f_1 = \left\{ \frac{1}{m} \sum_i^m (n_i - n_{mean})^2 \right\}^{\frac{1}{2}}$$

$$f_2 = n_{cut}$$

従来法

- SA (Simulated Annealing) (Irving and Sterling, '90)
- PSA (Parallel Simulated Annealing) (Mori and Takeda, '94)
- ACO (Ant Colony Optimization) (Mori and Komatsu, '06)

# 多目的最適化

-- 欠点 --

単一目的最適化

- ✓ 重み付けが経験的
- ✓ 目的関数間の関係が明瞭でない

$$f = w_1 * f_1 + w_2 * f_2 + w_3 * f_3 \rightarrow \min$$

多目的最適化

スカラー化手法

重み付総和法

$\epsilon$  制約法

Minmax法

- ✓ 別の問題に変換する

$$f_1 \rightarrow \min$$

$$f_2 \rightarrow \min$$

$$f_3 \rightarrow \min$$

多目的メタヒューリスティ

- ✓ 解を直接探索し、評価する

# 提案法

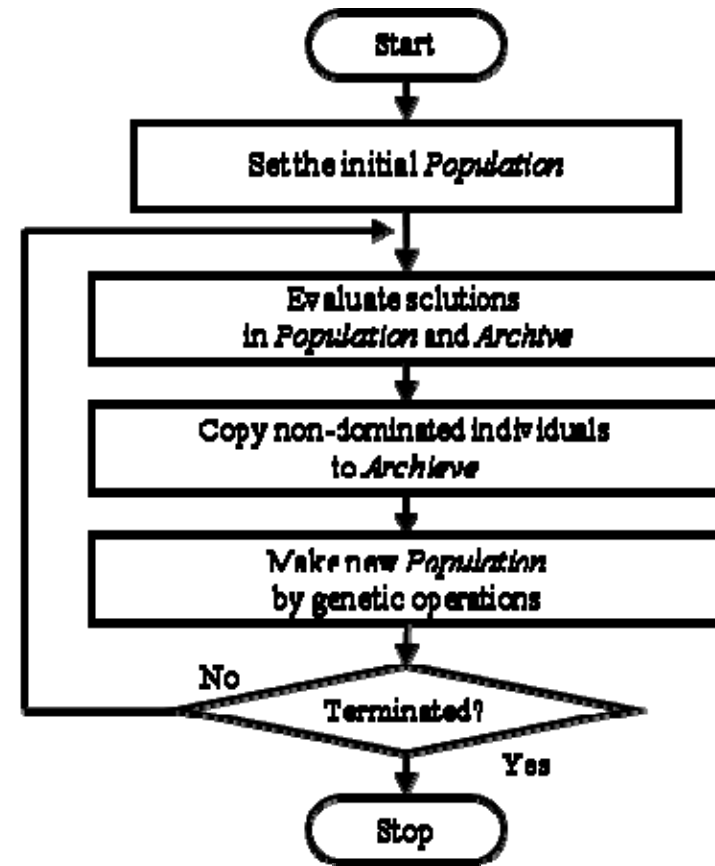
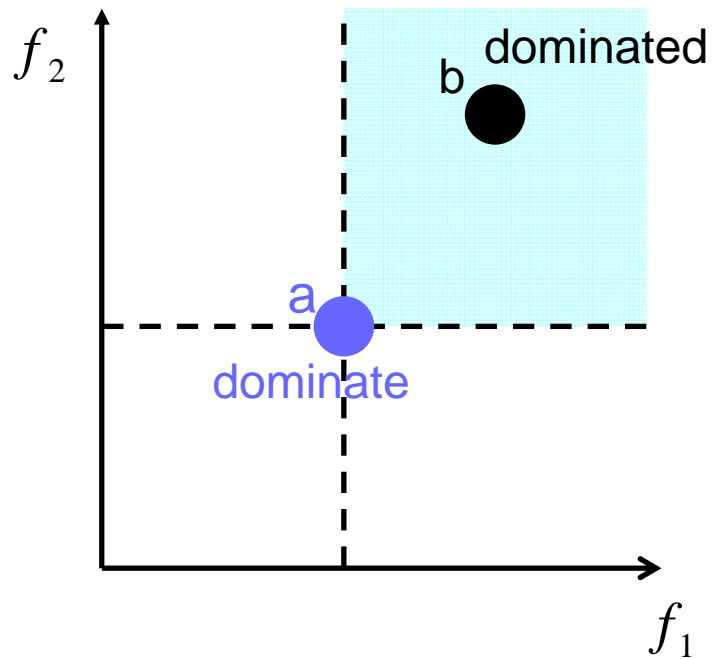
多目的メタ: SPEA2

山登り法

- Memtic Algorithm( MOMH+ Local Search )  
の開発

# Background(4/4)

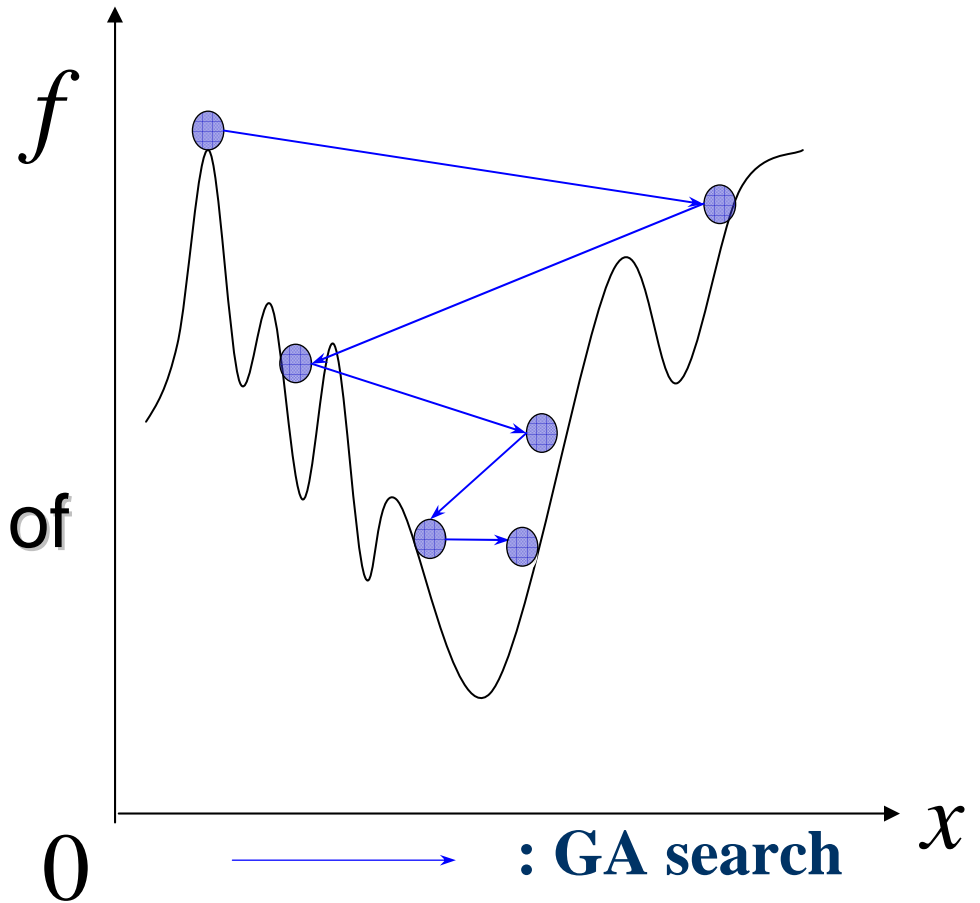
## ■ SPEA2



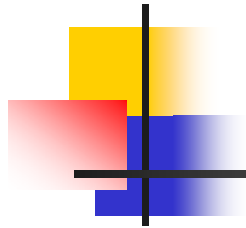


## Drawbacks of GA Search

Case 1: Inappropriate Parameter Setting  
The Insufficient Iterations of Generations

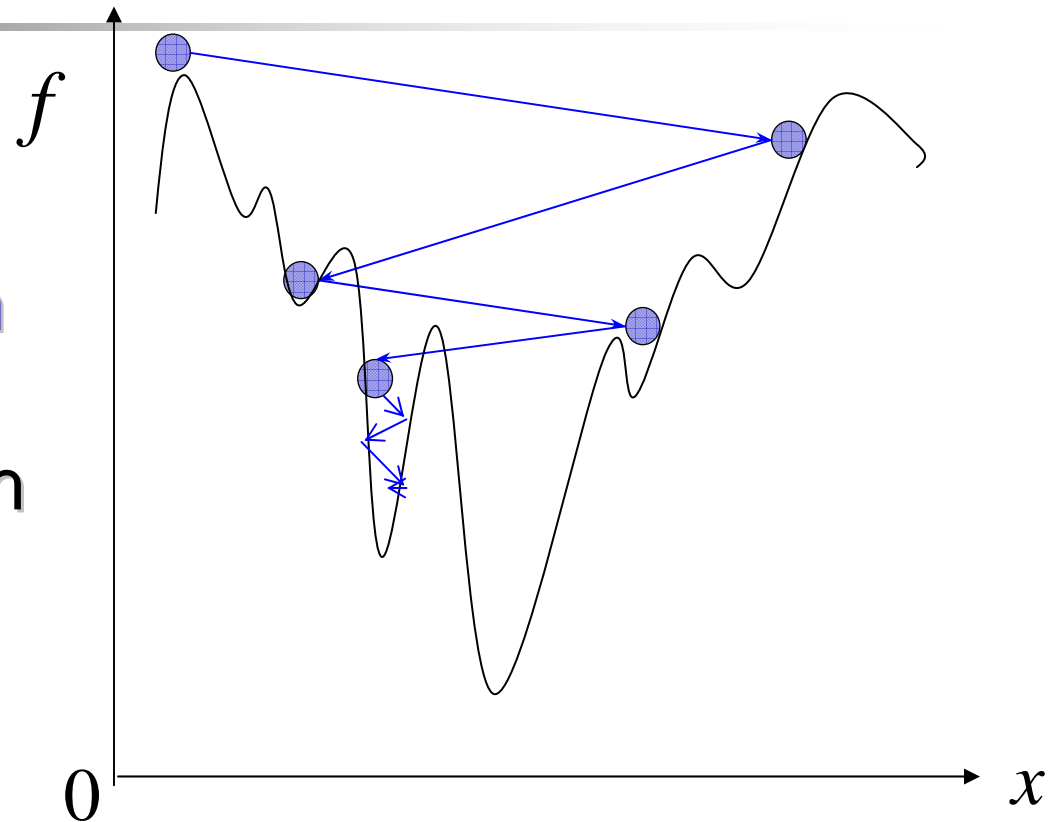


**Fig. C. Concept of Case**



**Case 2: Local Minimum**  
 The Inappropriate  
 Genetic Operators Such  
 as Mutation and  
 Crossover

In Practice, It is Hard to  
 Tune up the Parameters  
 in Large-scale problems.



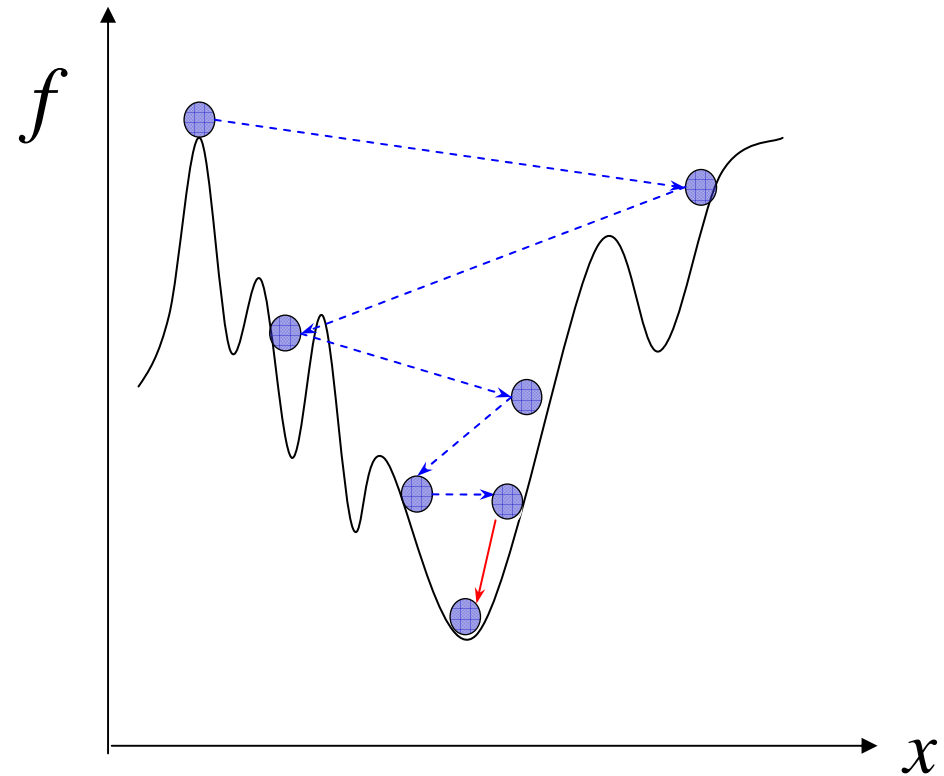
————— : GA search

**Fig. D. Concept of Case**



MA (Memetic Algorithm)  
 ( Moscato, et al., '89 )

- To Enhance Solution Qualities of Set in GA
- Search in a Way That Combines GA with LS



—→ : Search of LS

---→ : Search of GA

**Fig. E. Concept of MA**

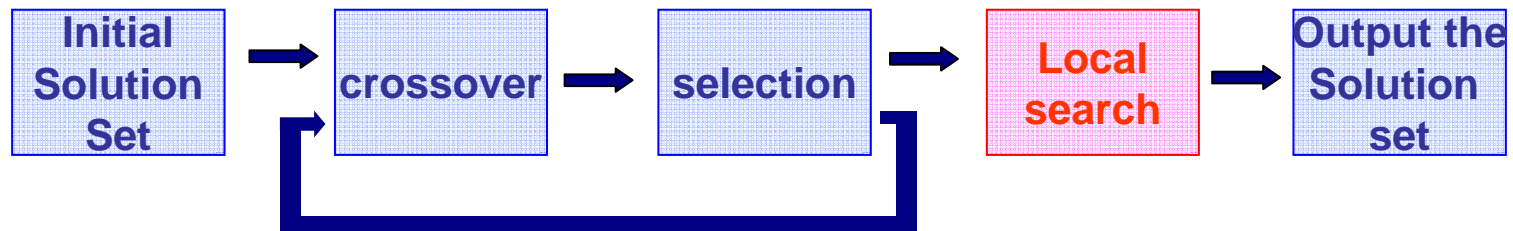
## Integration Strategies of MA

### *GA then LS*

- To Carry out LS After GA

### *GA with LS*

- To Carry out LS at Each GA Search



**Fig. F. Flowchart of GA then LS**

# 提案法

- 定式化

Objective Function :

$$f_1 = \left\{ \frac{1}{m} \sum_i^m (n_i - n_{mean})^2 \right\}^{\frac{1}{2}} + \alpha f_0 \rightarrow \min$$

ノード数均等化

$$f_2 = n_{cut} + \alpha f_0 \rightarrow \min$$

カットセット数最小化

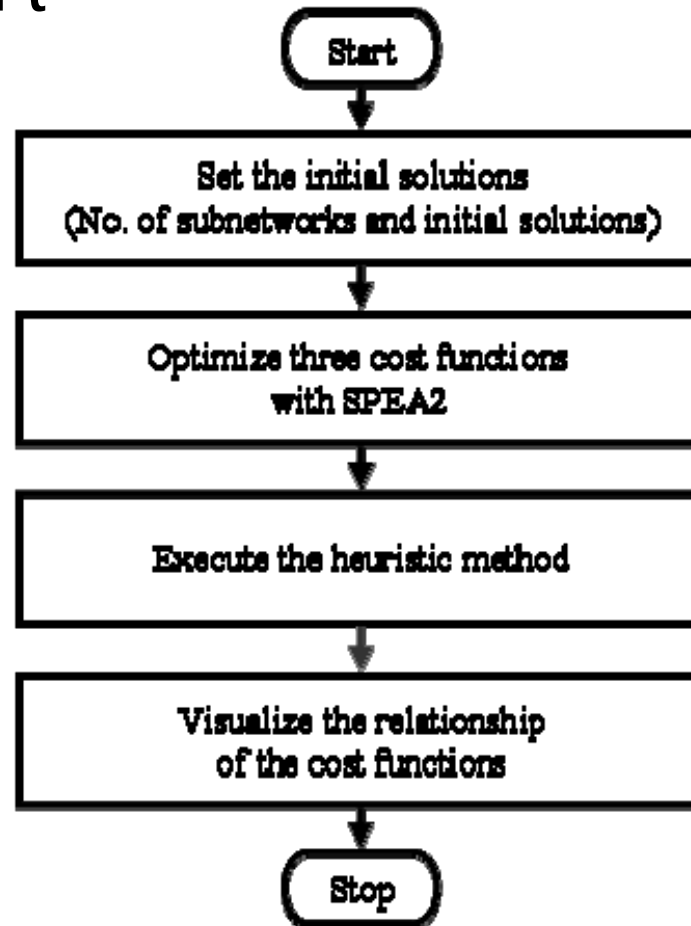
$$f_3 = \left\{ \frac{1}{m} \sum_i^m (r_i - r_{ave})^2 \right\}^{\frac{1}{2}} + \alpha f_0 \rightarrow \min$$

発電と負荷のバランス

但し, m: No. of Subnetworks,  $n_i$ : No. of Nodes,  $n_{ct}$ : No. of Cut Sets,  $r_i$ : Difference Between Generation And Load,  $f_0$ : Penalty Function Related to Connected (Connected : 0, Disconnected : 1),  $\alpha$ : Penalty Coefficient of  $f_0$

# 提案法

## Flowchart



# シミュレーション条件



---

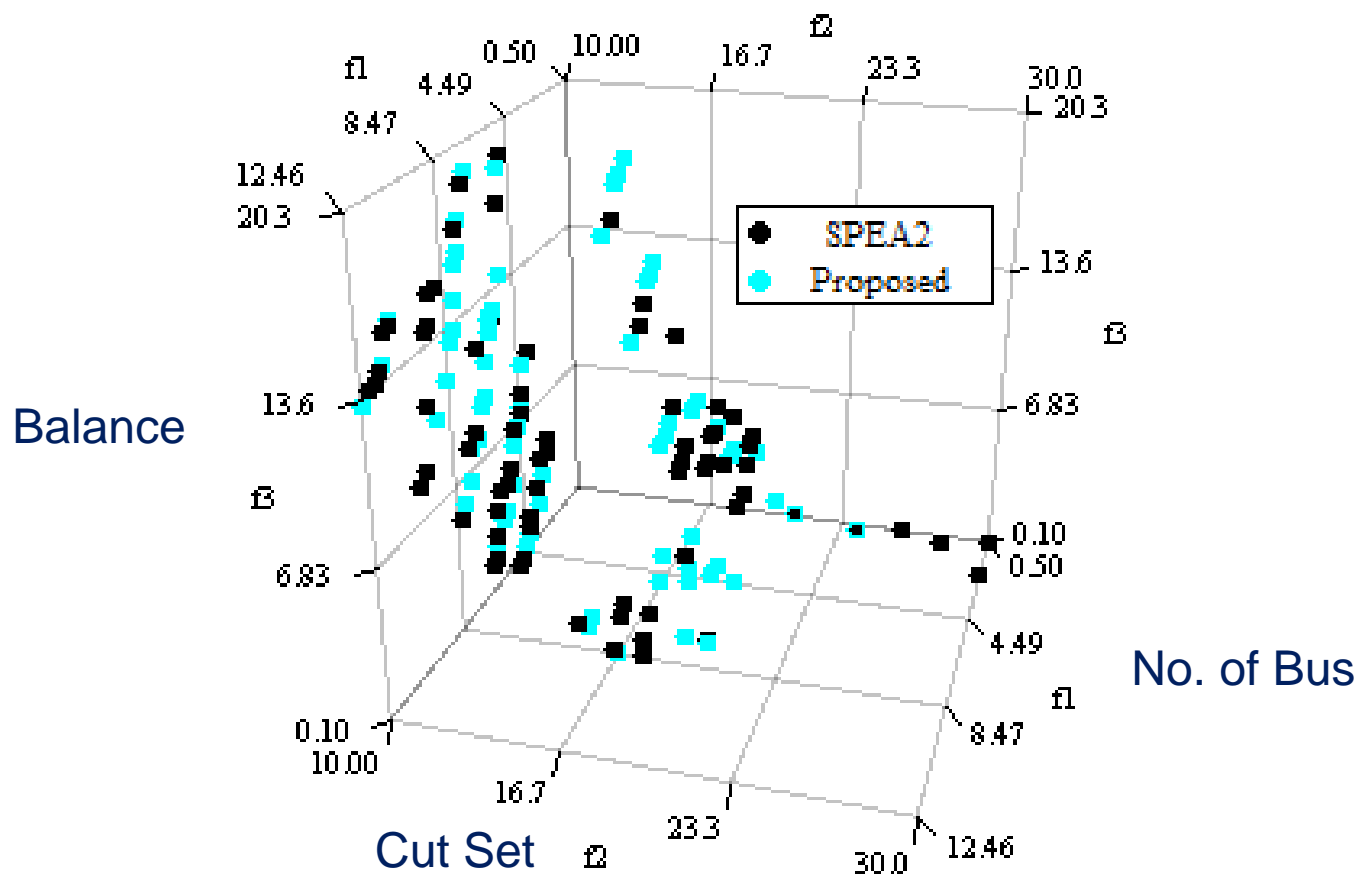
- Test System : 46-node Network with 87 Branches [6]
- No. of Subnetworks : 4
- No. of Combinations :  $2.063 \times 10^{26}$

# シミュレーション条件

## ■ Parameters

Parameter	Value
Population Size	200
Archive Size	100
Crossover Rate	1.00
Mutation Rate	0.05
Generations	5000

# シミュレーション結果

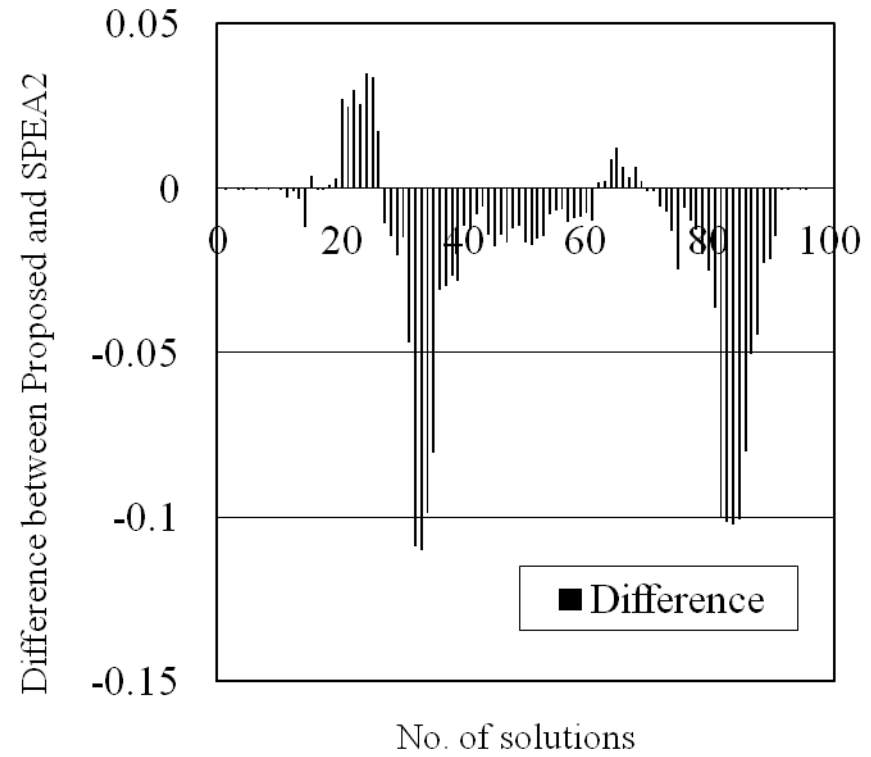
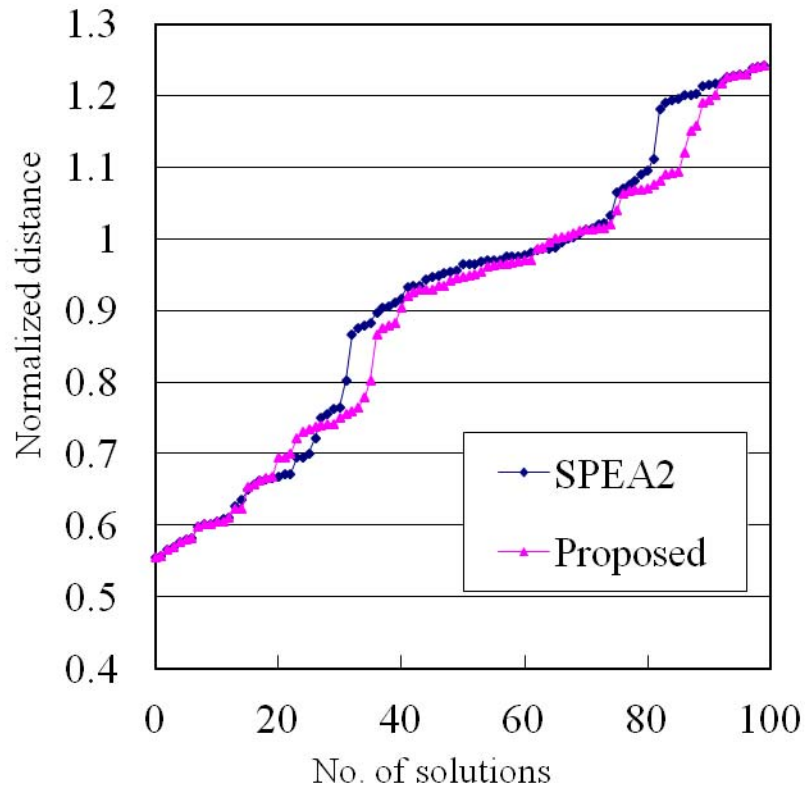
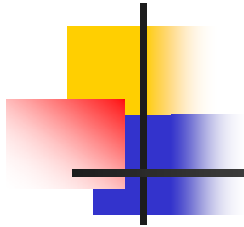


# シミュレーション結果

Method		f1	f2	f3
SPEA2	Best cost function	0.5	10	0.102
	Worst cost function	12.46	30	20.289
	Average	6.30	14.89	8.42
	No. of Pareto solutions	100		
	CPU time	346.5[s]		
Proposed	Best cost function	0.5	10	0.102
	Worst cost function	12.46	30	20.29
	Average	6.06	14.81	8.44
	No. of Pareto solutions	100		
	CPU time	662.0[s]		



# シミュレーション結果



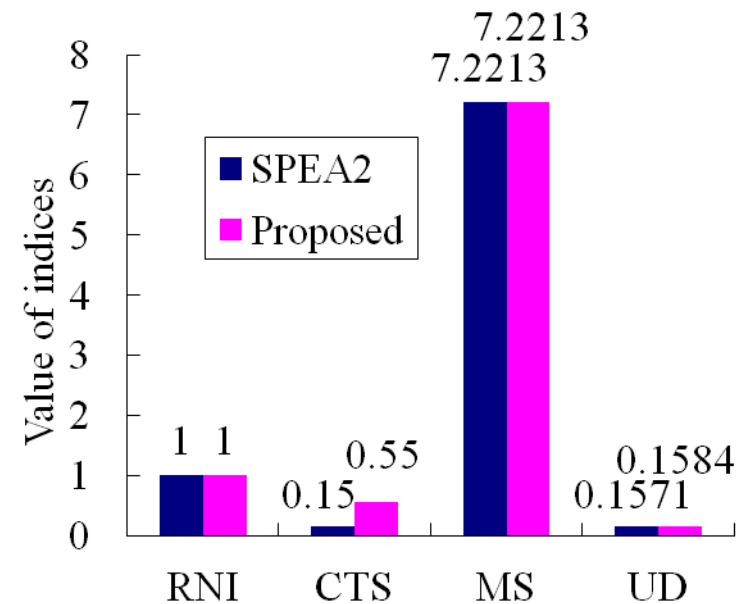
# シミュレーション結果

- RNI(Raito of Non-dominated Individuals)

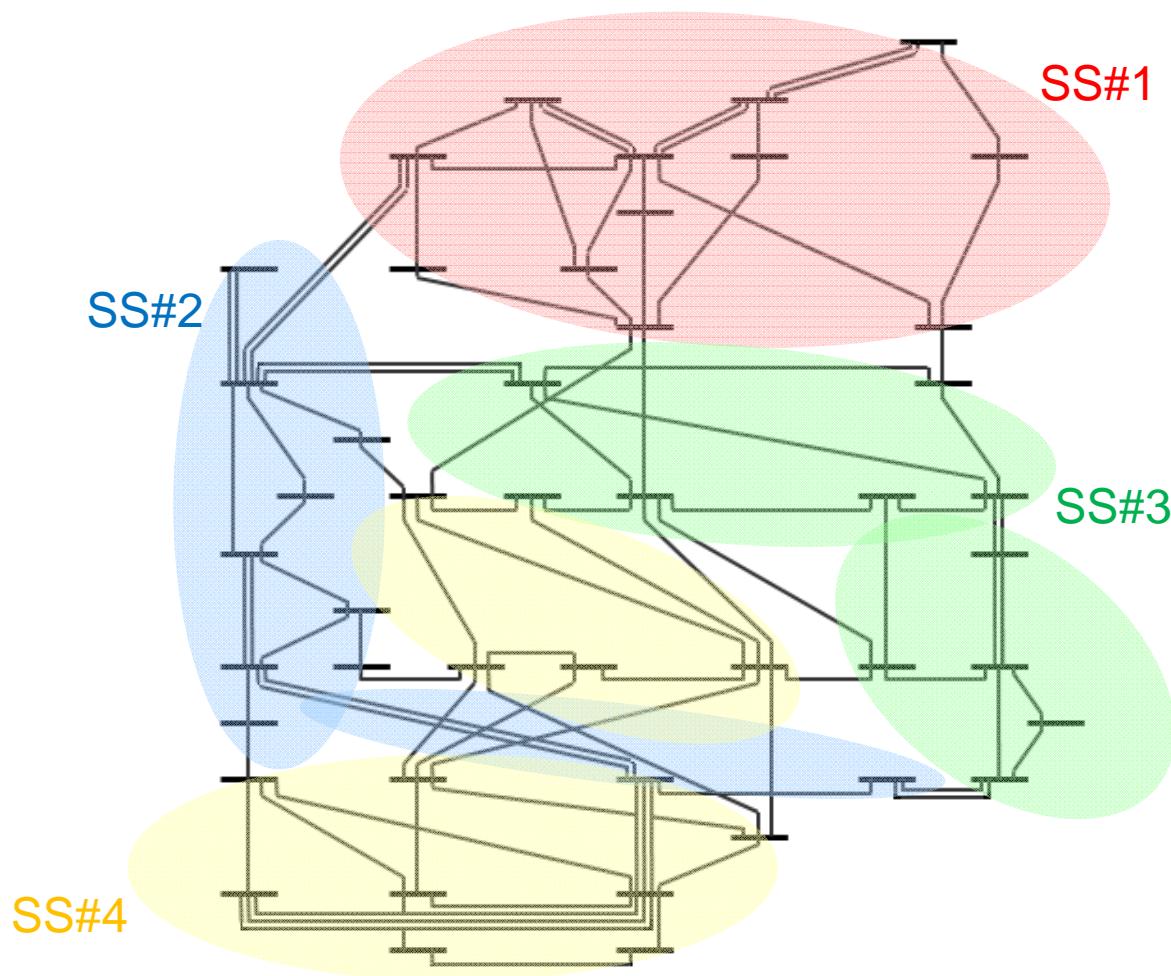
- CTS(Convergence of T

- MS(Maximum Spread)

- UD(Uniformly Distribut



# シミュレーション結果





## まとめ

---

- 系統分割のための多目的MAを開発した。例題系統に適用し、従来法のSPEA2と比較し、良好な結果を得た。