



OSAKA UNIVERSITY


# Multi-objective Optimization of Renewable Energy Mix and Synergy Utilization of Ecosystem Services

@第11回エネルギー持続性フォーラム

## 再生可能エネルギーミックスの 多目的最適化と生態系サービスの シナジー利用

松井 孝典 (大阪大学大学院工学研究科)

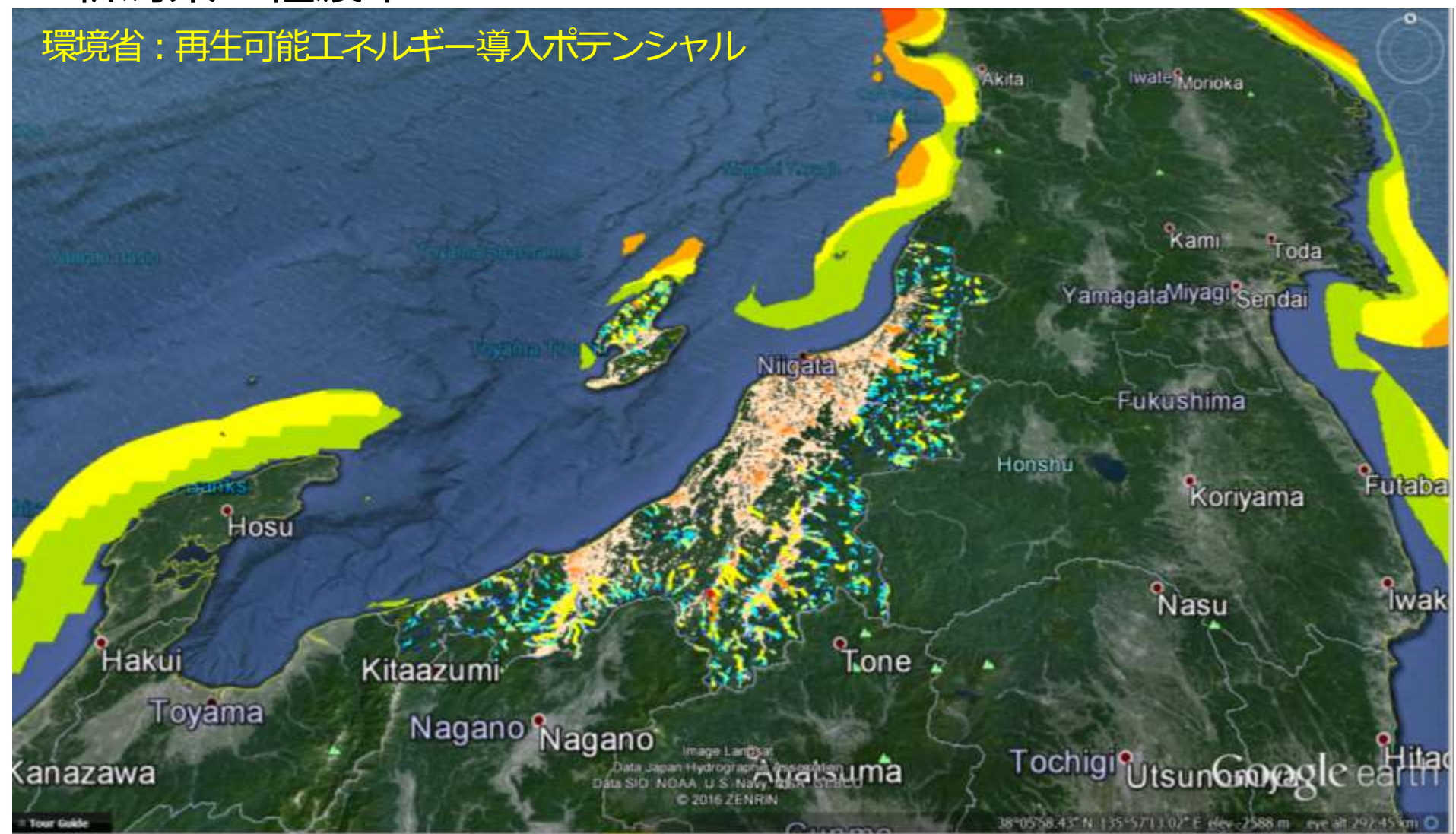
問 1：再生可能エネルギーの  
“最適な”ミックスとは何か



# 1 | 再生可能エネルギーデータベース

## ●新潟県 佐渡市

環境省：再生可能エネルギー導入ポテンシャル



# 1 | 再生可能エネルギーデータベース

## ● データ種と主な出典

データ種		推計方法	出典
供給ポテンシャル	太陽光・熱	設置可能面積を市区町村別に推計	環境省「平成22年度再生可能エネルギー導入ポテンシャル調査報告書」
	地熱発電	GISで空間解析	
	中小水力発電		
	風力発電		
バイオマスエネルギー	データを直接利用	NEDO「バイオマス賦存量・有効利用可能量の推計(2011年)」	
エネルギー需要 参考：倉阪秀史 「永續地帯2012年版報告書」	人口等で按分	資源エネルギー庁「都道府県別エネルギー消費統計(2010年)」	

## 2 | 制約条件

最適化条件

式

意味

$$x_i \leq X_i$$

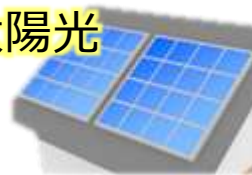
各再生可能エネルギー

導入量

≦ 供給ポテンシャル

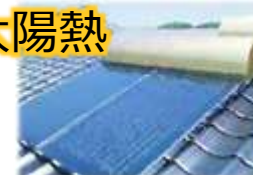
$$\frac{x_{sei}}{F_{ei}} + \frac{x_{sti}}{F_{ti}} \leq X_{ai}$$

太陽光



V.S

太陽熱



制約条件

$$\left( \frac{x_{bei}}{M_{ei}} + \frac{x_{bci}}{M_{ci}} \right) \times \frac{100 - U_i}{100} \leq X'_{bi}$$

発電



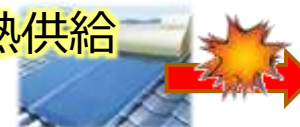
V.S

コージェネレーション



$$y_{fjk} \leq D_{fjk}$$

熱供給



≦

熱需要



$$\sum_i x'_{wi} \leq X_{wc}$$

風力発電連系可能  
容量を超えない

WIND POWER  
LIMIT



## 問 2 :

導入時に“何を”最適化するのか

- RE達成目標制約下での経済性最大化問題？
- 経済資源制約下でのCO<sub>2</sub>排出量最小化問題？
- 系統電源への安定接続制約下でのRE最大化問題？

# 3 | 評価指標

分類	評価指標	単位	設計方法
Safety	再生可能エネルギー利用率	%	$\frac{\text{再生可能エネルギー導入量}(J)}{\text{対象地域のエネルギー需要}(J)} \times 100$
Economic Efficiency	経済収支	円/年	売電収入(円/年)+化石燃料代替利益(円/年) - 運転費用(円/年)-初期費用(円)/耐用年数(年)
Energy Security	<b>多様性指数</b>	なし	$1 - \sum_i \left( \frac{x_i}{\sum_i x_i} \right)^2$
	CO <sub>2</sub> 削減率	%	$100 - \frac{\sum_i x_i a_i}{\sum_i x'_i a_i} \times 100$ <div style="display: inline-block; vertical-align: middle; margin-left: 10px;"> <math>\left[ \begin{array}{l} \bar{x} : \text{各エネルギーの最適導入量}(J) \\ x' : \text{現在の各エネルギー利用量}(J) \\ a : \text{CO}_2 \text{排出係数}(t\text{-CO}_2\text{eq}/J) \end{array} \right.</math> </div>
Environment	<b>バイオマス資源循環率</b>	%	$\frac{\text{廃棄バイオマスを利用した量}(Dw - t)}{\text{廃棄バイオマスの利用可能量}(Dw - t)} \times 100$
	<b>生態系影響面積</b>	ha	$\sum_i x_i b_i$ <div style="display: inline-block; vertical-align: middle; margin-left: 10px;"> <math>\left[ \begin{array}{l} \bar{x} : \text{エネルギーの最適導入量}(J) \\ b : \text{各エネルギーの生態系影響面積原単位}(ha/MJ) \end{array} \right.</math> </div>

# 再生可能エネルギーミックス シナリオ設計支援環境

Renewable Energy

Regional Optimization Utility Tool for Environmental Sustainability

## 開発担当者 連絡先

大阪大学工学研究科環境・エネルギー工学専攻  
博士前期課程 堀 啓子 (Keiko HORI)  
keiko.hori@ge.see.eng.osaka-u.ac.jp

## ご協力：

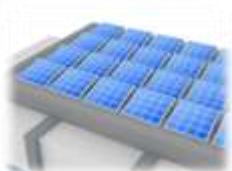
大阪大学産業科学研究所 福井健一 准教授  
鹿児島大学大学院理工学研究科 小野智司 准教授  
早稲田大学 理工学術院 蓮池隆 准教授



# REM最適化支援環境 REROUTES

## 市区町村別データベース

●再生可能エネルギーの供給能力



太陽



風力



水力



地熱



バイオマス

●エネルギー需要 = 消費量

民生業務

民生家庭

農林水産業

最適化

## 組み合わせを評価する指標



Y<sub>1</sub>:再生可能エネルギー自給率



Y<sub>2</sub>:経済収支



Y<sub>3</sub>:CO<sub>2</sub>削減率



Y<sub>4</sub>:生態系影響面積



Y<sub>5</sub>:バイオマス資源循環率

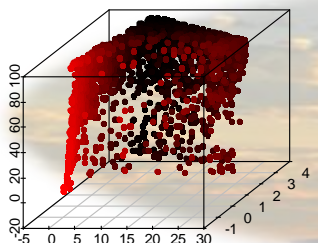


Y<sub>6</sub>:多様性指数



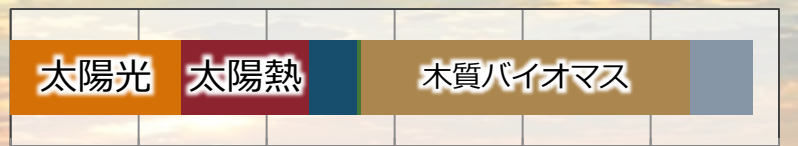
引用

解候補の算出



意見を聞き  
絞り込む

再生可能エネルギーの組み合わせ最適解



0 100 200 300 400 500 600

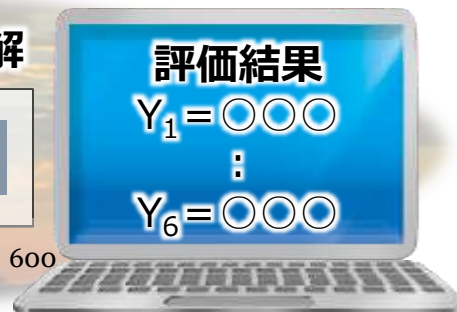
TJ/年

評価結果

Y<sub>1</sub> = ○○○

:

Y<sub>6</sub> = ○○○



# 4 | REMのシナリオ生成

都市名

## 新潟県佐渡市

## 東京都千代田区

地理	新潟県西部の島嶼地域	東京都心の人口集中地区
面積	855.6 [km <sup>2</sup> ]	11.66[km <sup>2</sup> ]
人口	約5万8千人	約4万8千人(住民)

### 基本方針

→ 自然共生・地産地消・地域振興・温室効果ガス排出を抑制

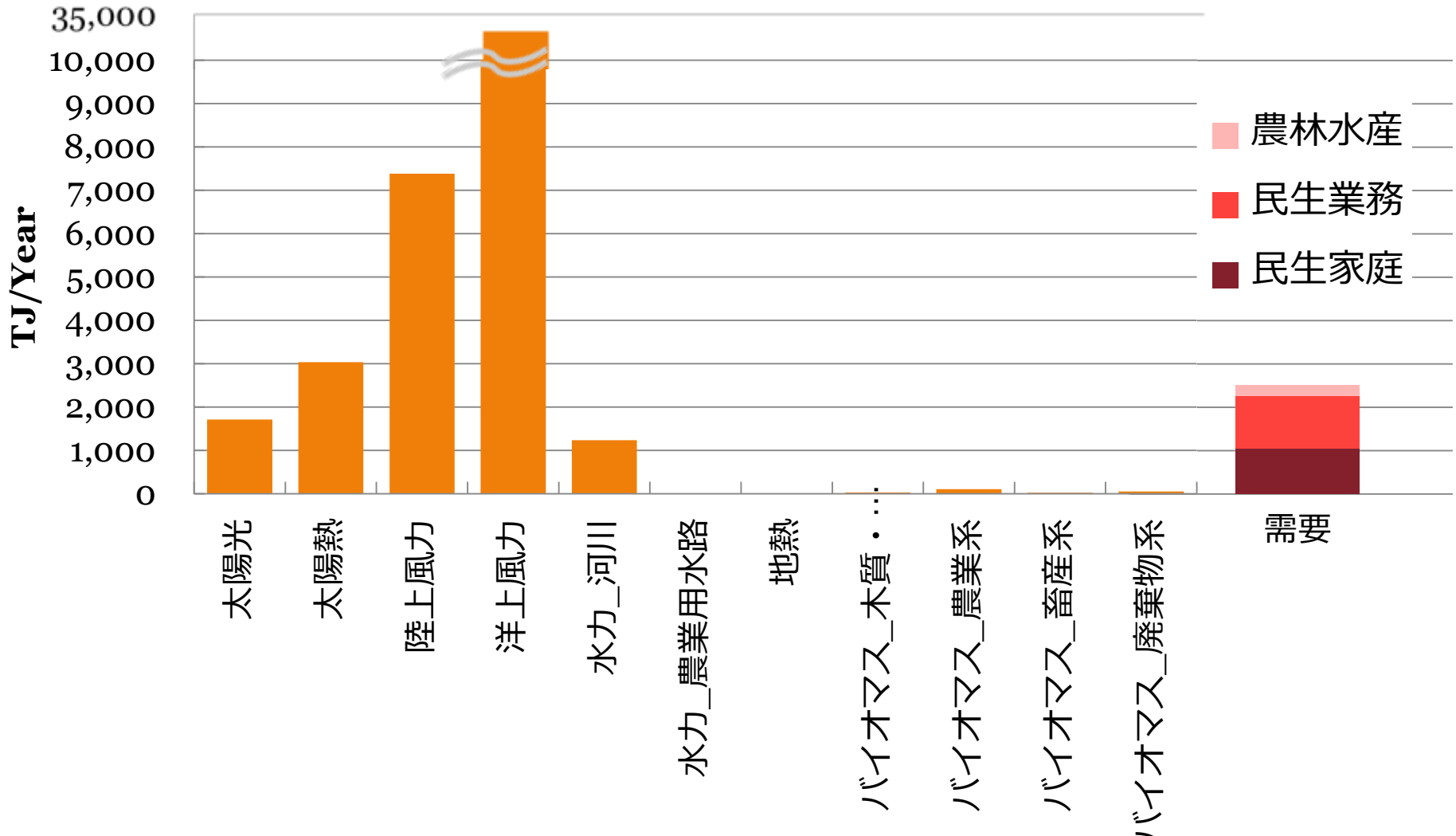
### 重点事業

→ 太陽光・木質バイオマス・バイオディーゼル・中小水力・クリーンエネルギー自動車

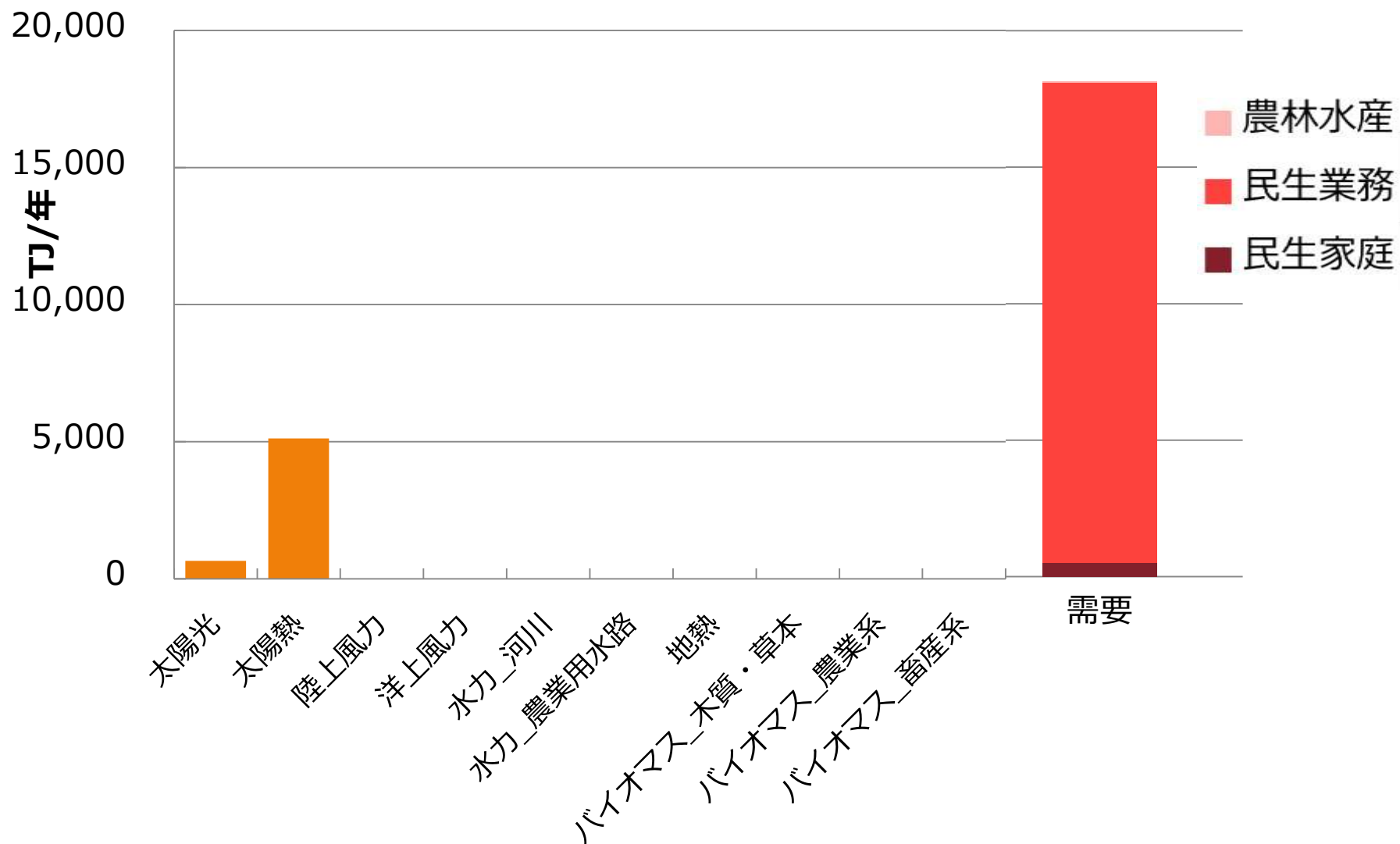
- ・大丸有地区のスマートシティ化  
⇒ 面的エネルギー利用の促進
- ・地中熱利用
- ・ZEB（ネット・ゼロ・エネルギー・ビル）の導入

エネルギー  
計画の特徴

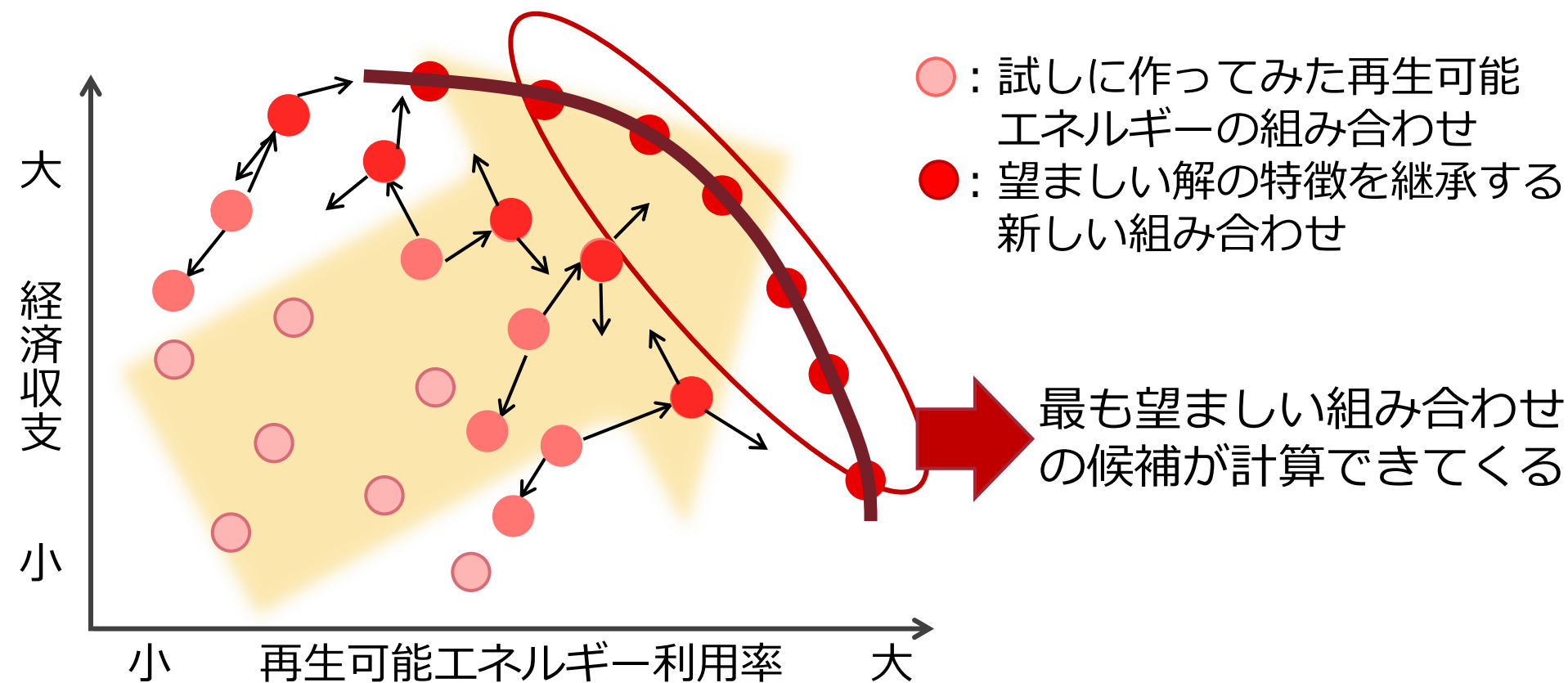
# ● 佐渡市の事情：供給ポテンシャル



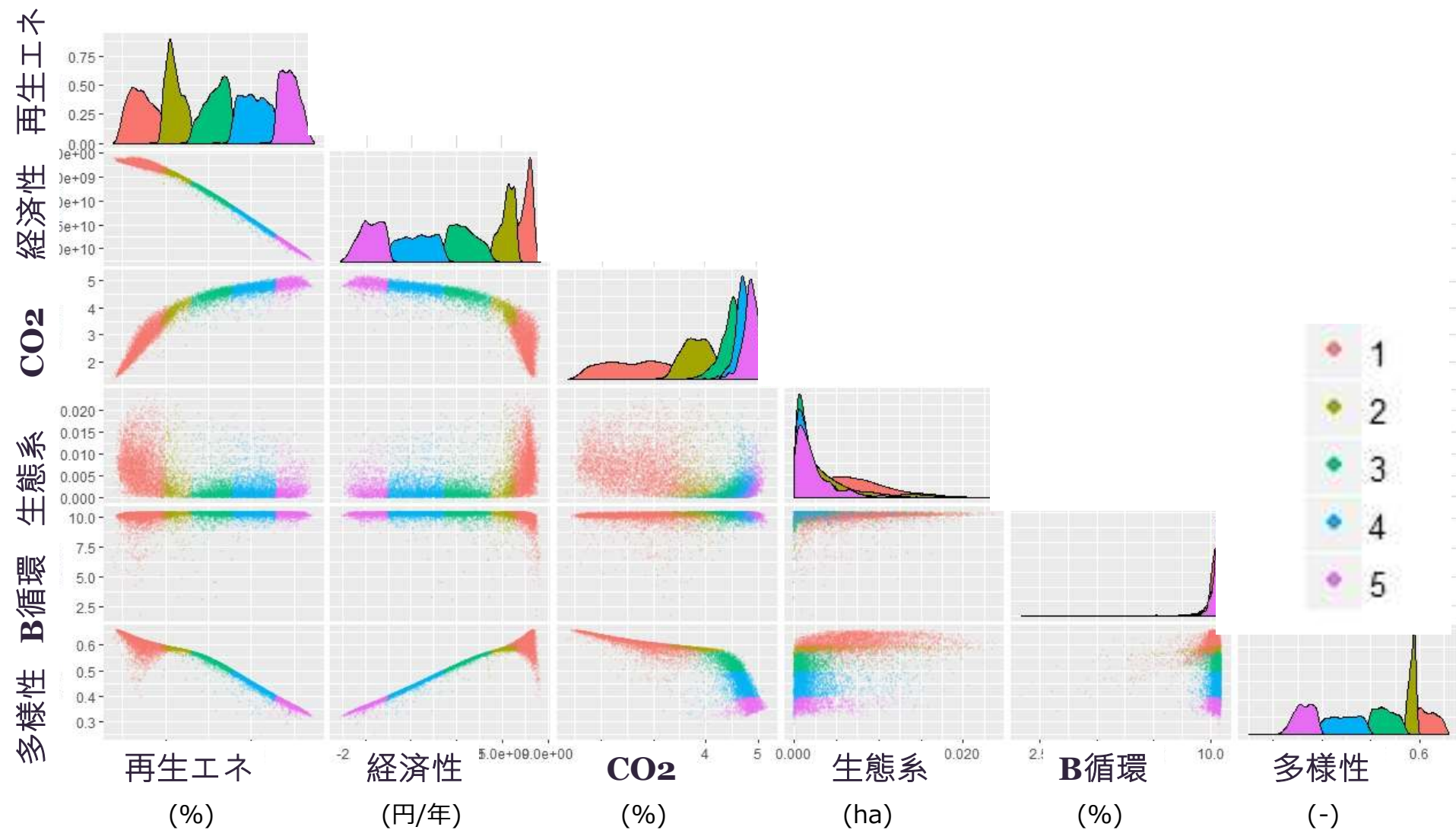
# ● 千代田区の事情：供給ポテンシャル



# 5 | エネルギー生命体を進化させて、パレートフロントをみる

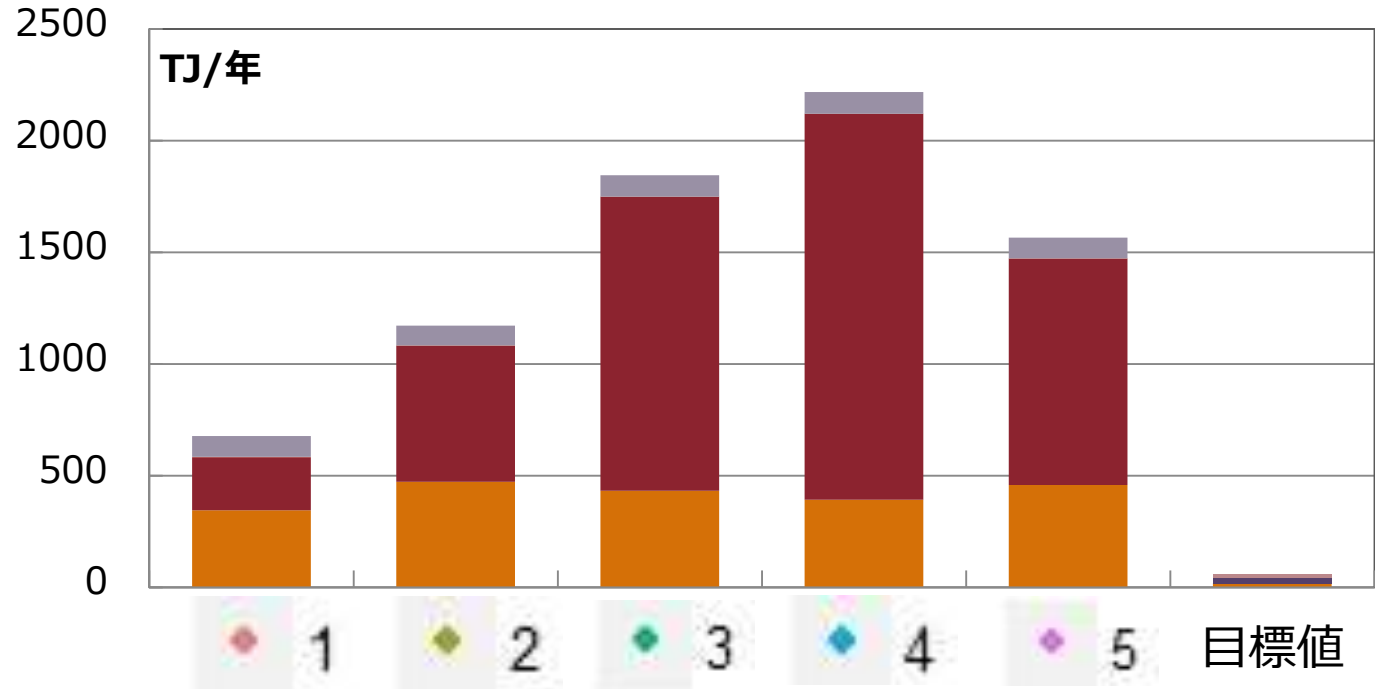


# ● 東京都千代田区の場合



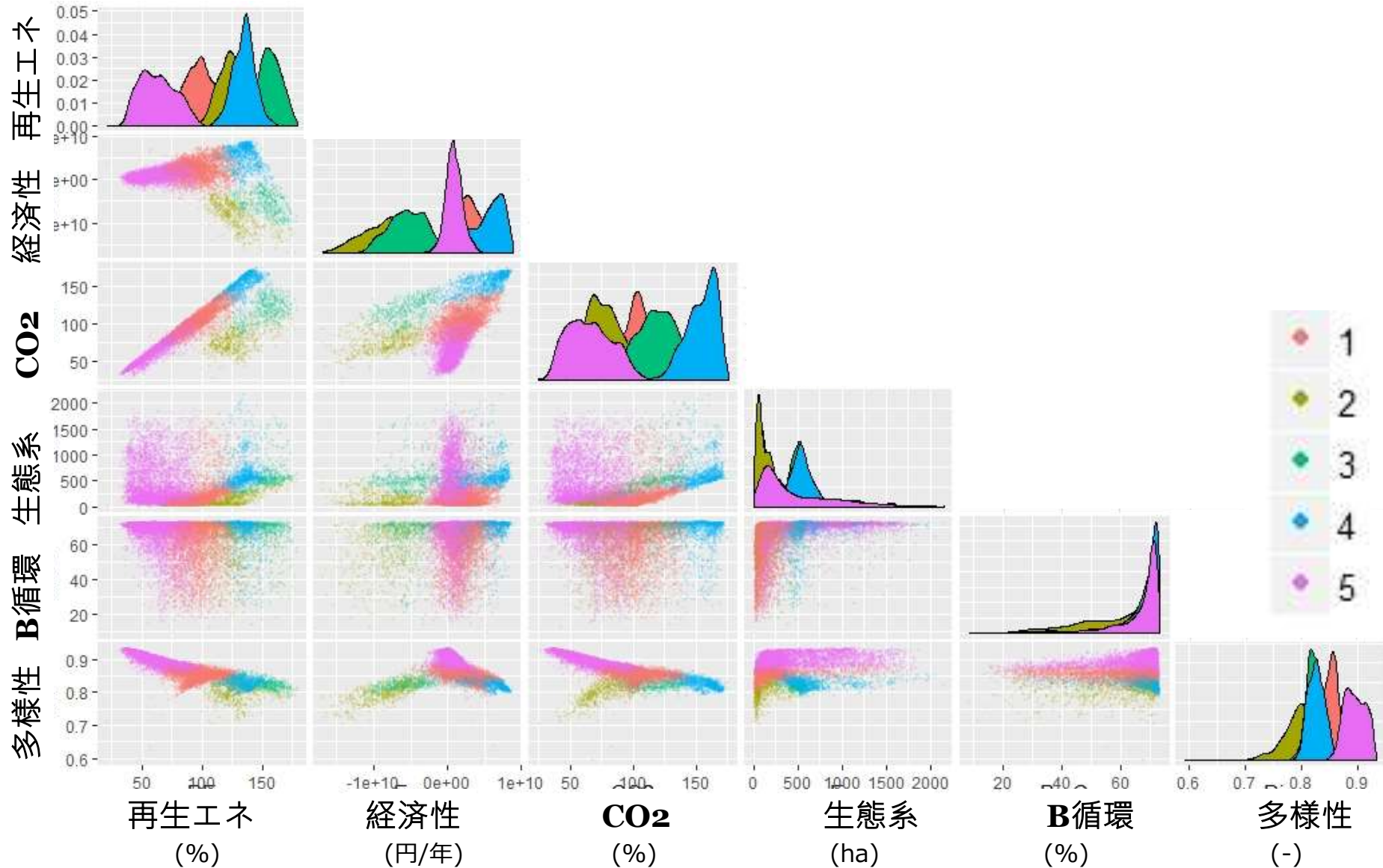
# ● 東京都千代田区の場合

- 廃棄物系バイオマス
- 畜産系バイオマス
- 農業系バイオマス
- 木質・草本バイオマス
- 地熱
- 農業水路水力
- 河川水力
- 洋上風力
- 陸上風力
- 太陽熱
- 太陽光



再生可能エネルギー利用率(%)	3.7	6.5	10.2	<b>12.2</b>	8.6
経済収支(百万円)	<b>-2,415</b>	<b>-6,389</b>	<b>-14,527</b>	<b>-19,354</b>	<b>-11,007</b>
CO <sub>2</sub> 削減率(%)	2.8	4.1	4.7	<b>4.9</b>	4.5
生態系影響面積(ha)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
バイオマス資源循環率(%)	9.4	8.9	9.5	<b>9.8</b>	9.2
Div多様性指数	<b>0.6</b>	0.6	0.4	0.4	0.5

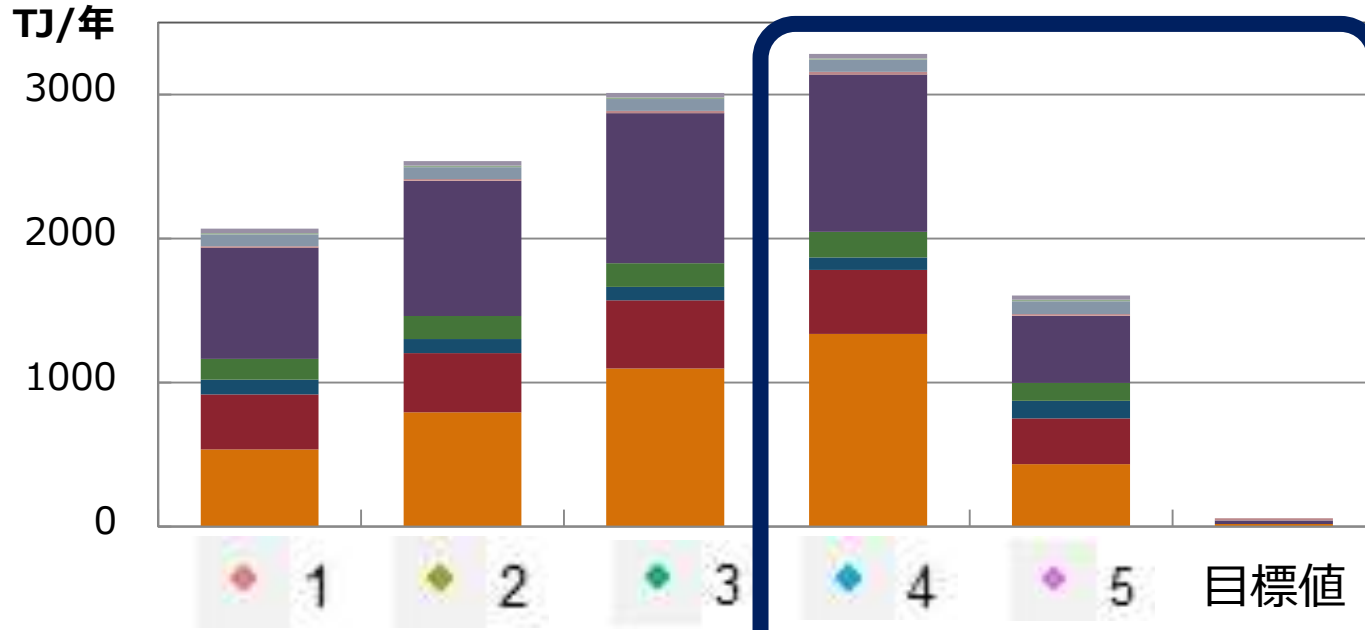
# 新潟県佐渡市の場合





# 新潟県佐渡市の場合

- 廃棄物系バイオマス
- 畜産系バイオマス
- 農業系バイオマス
- 木質・草本バイオマス
- 地熱
- 農業水路水力
- 河川水力
- 洋上風力
- 陸上風力
- 太陽熱
- 太陽光



再生可能エネルギー利用率(%)	82.4	101.0	119.8	130.7	63.9
経済収支(百万円)	200.1	934.6	972.3	1839.4	-264.5
CO <sub>2</sub> 削減率(%)	85.5	107.9	128.5	143.5	64.6
生態系影響面積(ha)	516.2	832.2	1129.5	1464.3	631.2
バイオマス資源循環率(%)	51.7	49.9	52.0	53.0	58.2
多様性指数	0.9	0.9	0.8	0.8	0.9

※望ましい値ほど濃く網掛け

# 問 3: 結局、生物資源(バイオマス)は “使っていいのか、ダメなのか”

	1	2	3	4	5
再生可能エネルギー利用率(%)	82.4	101.0	119.8	<b>130.7</b>	<b>63.9</b>
経済収支(百万円)	200.1	934.6	972.3	<b>1839.4</b>	<b>-264.5</b>
CO <sub>2</sub> 削減率(%)	85.5	107.9	128.5	<b>143.5</b>	<b>64.6</b>
生態系影響面積(ha)	<b>516.2</b>	832.2	1129.5	<b>1464.3</b>	<b>631.2</b>
バイオマス資源循環率(%)	51.7	49.9	52.0	<b>53.0</b>	<b>58.2</b>
Div多様性指数	0.9	0.9	0.8	<b>0.8</b>	<b>0.9</b>

# 森林生態系サービスの 多目的シナジー利用 設計モデル

モデル開発担当者 連絡先

大阪大学工学研究科環境・エネルギー工学専攻  
博士前期課程 舘林 香菜  
Kana.tatebayashi@ge.see.eng.osaka-u.ac.jp

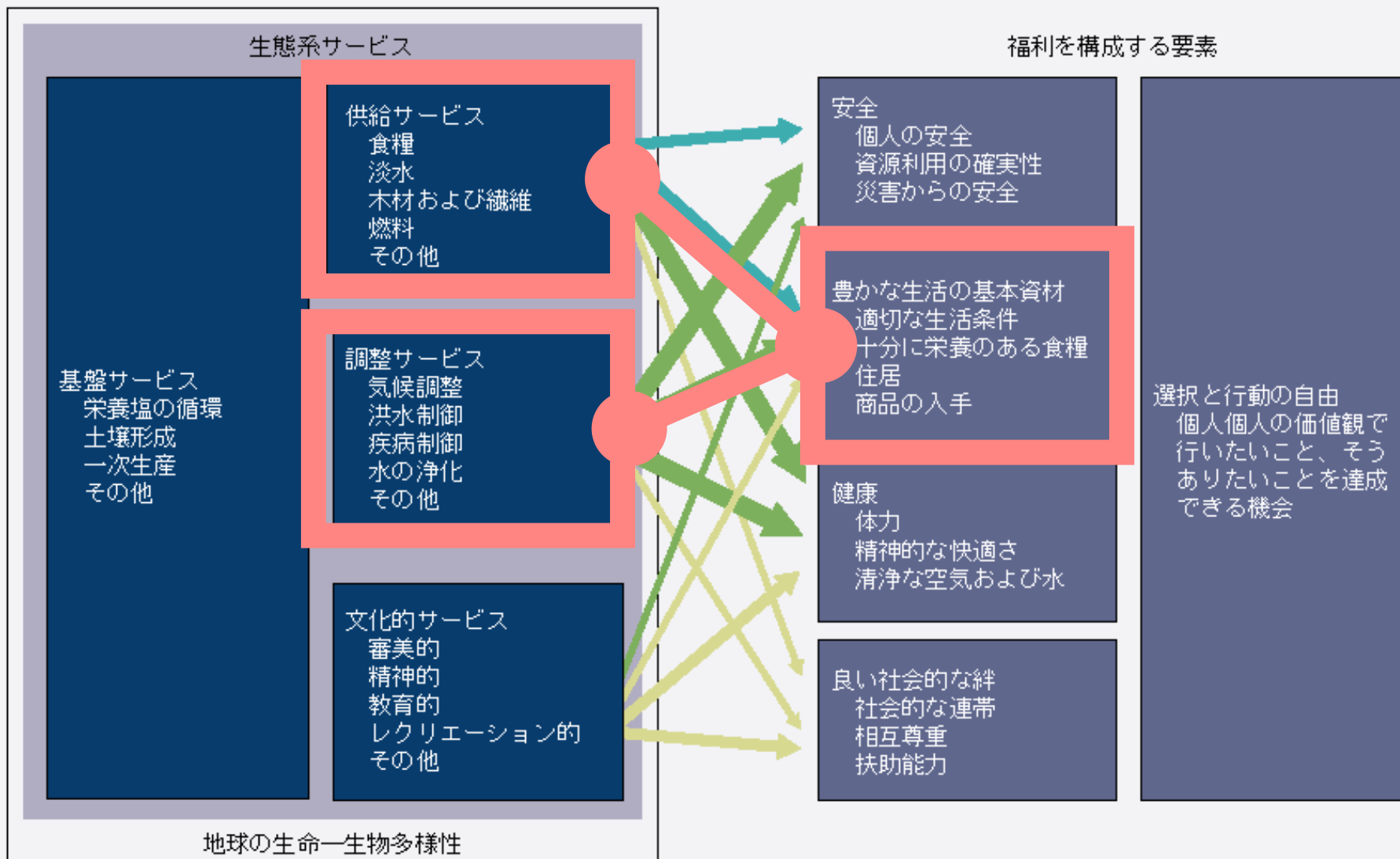
ご協力：

国立環境研究所 大場真 主任研究員  
和歌山大学システム工学部 山本祐吾 准教授



# 生態系サービスのコンセプト

## 生態系サービスと人間の福利の関係



# 6 | 森林生態系サービスの供給

供給端：森林生態系



一般的にトレードオフが発生する！  
→見てみよう。

# 7 | 和歌山県 有田川・日高川流域



(有田市, 有田川町, かつらぎ町, 高野町, 湯浅町, 広川町, 日高川町, 日高町, 由良町, 美浜町, 御坊市, 印南町, みなべ町)

年降水量\*\* : 1748.5 [mm]  
年平均気温\*\* : 16.1[°C]  
人工林面積 : 47,000[ha]  
人口 : 62,560[人]      \*\*気象庁

主たるエネルギー需要：  
**園芸・温浴施設への石油・灯油  
などの熱需要**

# 8 | 供給端 : 森林管理モデルBGC-ES

## 2000-2100までの主伐・間伐の効果をシミュレーション

### サブモデル:

#### ① バイオマス成長

樹高の成長によって代表・  
最大個体数密度により  
最大材積が決定

#### ② ③ 水収支, 炭素・窒素循環

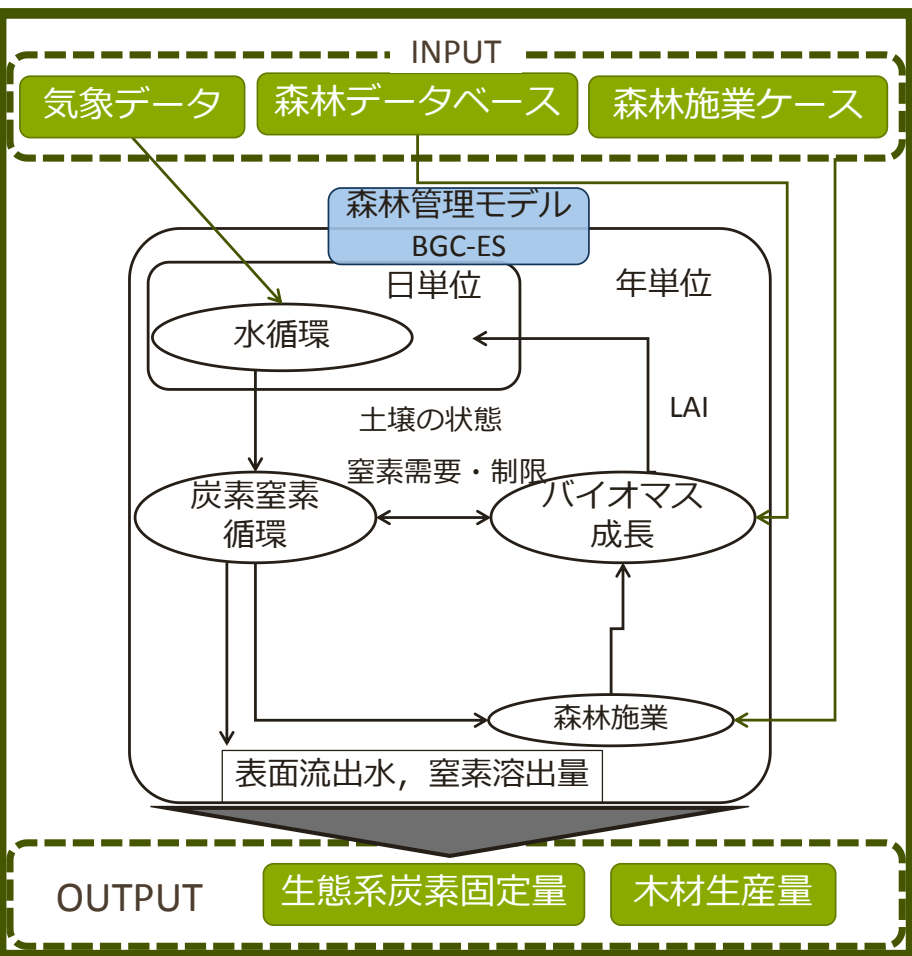
バイオマス・リター・  
土壌間の移動を表現

#### ④ 森林施業

主伐・間伐によるバイオマスの  
個体数の変化

### 出力値:

生態系炭素固定量, 木材生産量



# 9 | 供給端 : 森林施業ケース設計による炭素管理

## 主伐・再植林

目的：木材生産

- 木材生産量 **(+++)**  
大量の主伐材を得られる
- 生態系炭素固定 **(-)**  
再植林で成長速度が促進されるが  
木材搬出により**炭素固定量減少**

## 間伐

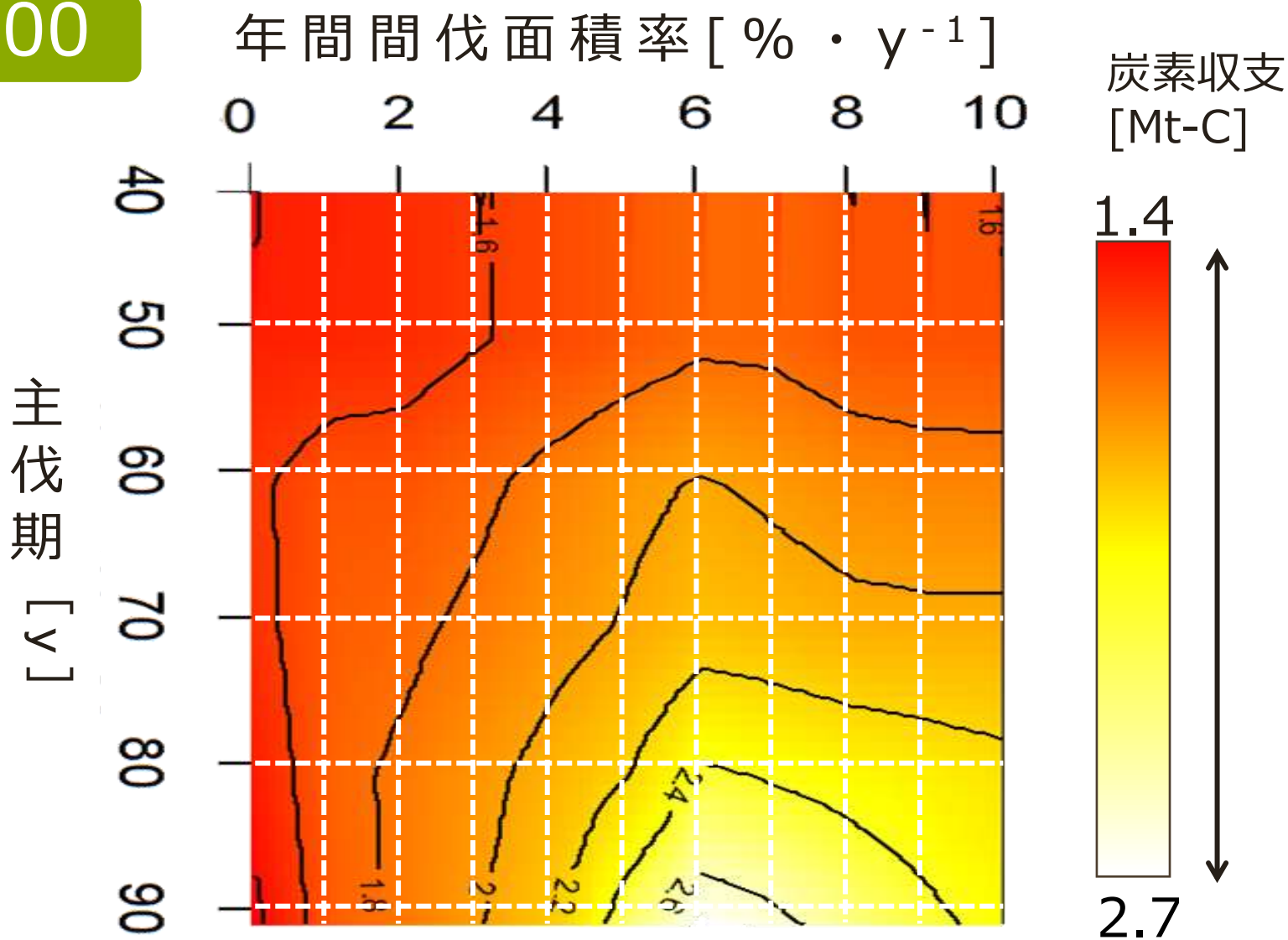
目的：種内競争の制御

- 木材生産量 **(+)**  
少量の間伐材を得られる
- 生態系炭素固定 **(+)**  
光を多く取り入れ、成長速度が  
促進され森林の**炭素固定量増加**

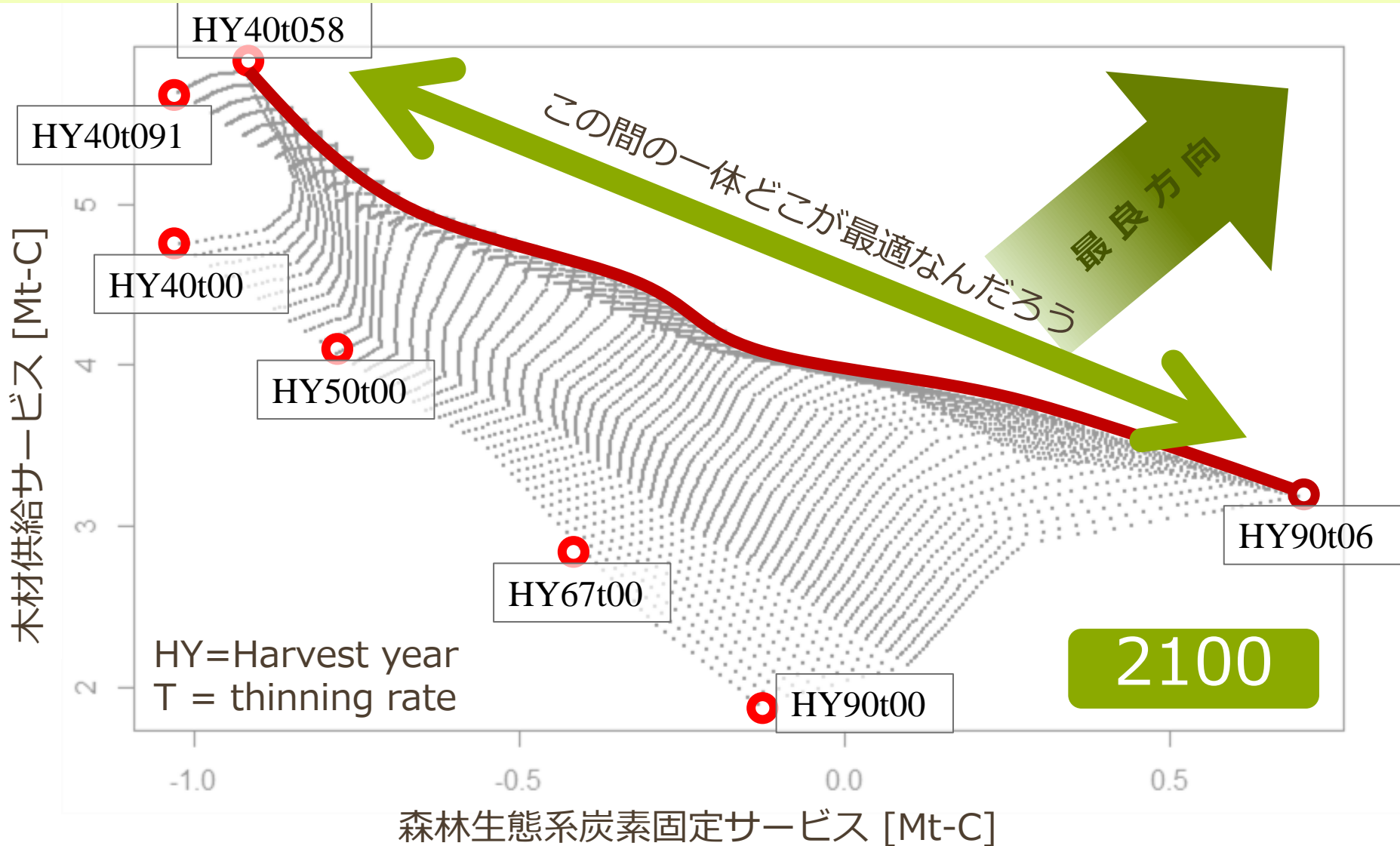


# 10 | グリッドサーチによる最適化

2100



# 11 | 供給端：木材供給サービスと森林炭素固定サービスのパレートフロント



# 12 | 森林生態系サービス需給システムの 組み合わせ最適化によるシナジー利用



勝負は需要端システムで決まる → 見てみよう。

# 13 | 木質バイオマス利用ケースの設定

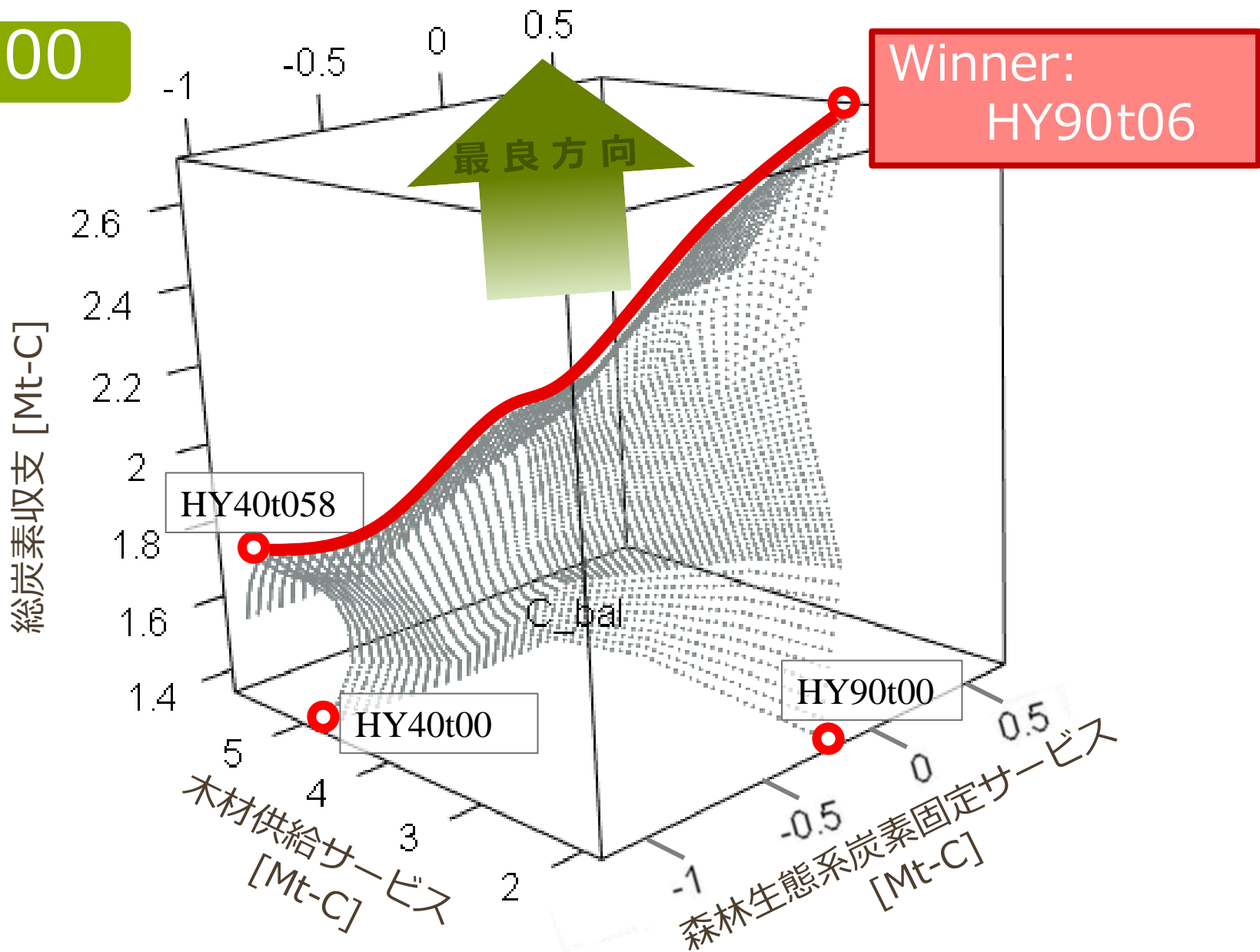


優先順位	部位	形態	炭素削減効率の例 [t-C · oven-dry t <sup>-1</sup> ]	代替例
1	A・B	用材	—	—
2	C・D	熱	パウダー 0.33	灯油・ 天然ガス
3			ペレット 0.30	A重油
4		電気	発電 0.10	化石燃料

\*木質バイオマス燃料の単位発熱量 [GJ · oven-dry t<sup>-1</sup>] × 代替元エネルギーの炭素排出量[t-C · GJ<sup>-1</sup>]により算出

# 14 | 生態系サービスのシナジー利用解

2100



# 発表の関連論文

- "Development and Application of the Renewable Energy Regional Optimization Utility Tool for Environmental Sustainability: REROUTES" (Keiko Hori, Takanori Matsui, Takashi Hasuike, Kenichi Fukui, Takashi Machimura, Renewable Energy, in press (2016))
- "多面的な環境指標を加えた再生可能エネルギーミックスの地域別最適化及び評価ツールの開発", (堀啓子, 松井孝典, 町村尚, 土木学会論文集G(環境), Vol. 70, No. 6, pp. II\_195-206 (2014))
- "低炭素化のための木材生産・利用システムの最適化モデルの開発", (舘林香菜, 松井孝典, 大場真, 町村尚, 谷佑亮, 中尾彰文, 山本祐吾, 土木学会論文集G(環境), Vol. 71, No. 6, pp. II\_297-308 (2015))