

# マテリアルフローと環境負荷から見た エアコン事業におけるCE戦略の 望ましい組み合わせの探索

東京大学 大学院工学系研究科  
村上進亮、篠嶋伸明、吉村文武之進

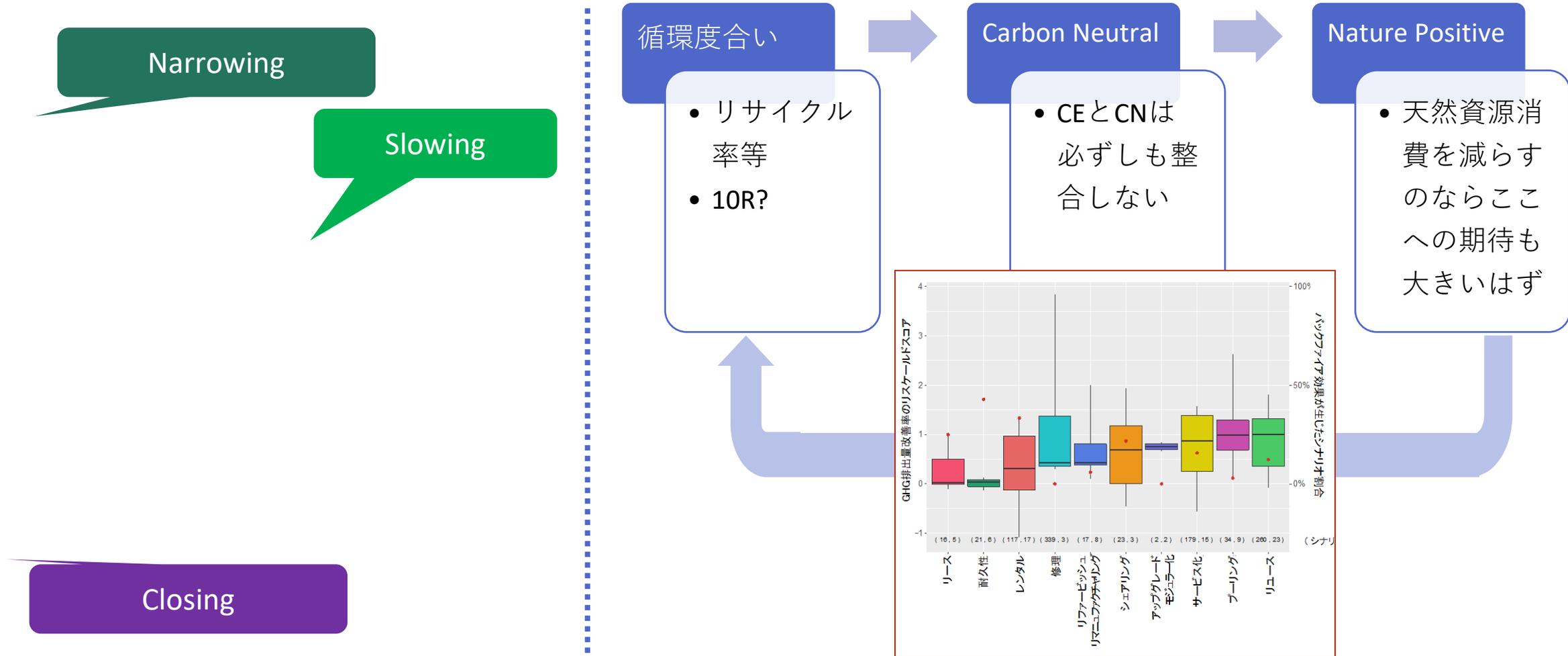
# CEのややこしさとCircularity (ISO59020)

- Circular economy: **economic system** that uses a systemic approach to maintain a circular flow of resources , by recovering, retaining or adding to their value, while contributing to sustainable development
- Circular: aligned with the principles for a circular economy
- **Circularity: degree of alignment with the principles for a circular economy (3.1.1)**
- Circularity aspect: element of an organization's activities or solutions that interacts with the circular economy (3.1.1)
  - 例 : Durability, recyclability, reusability, repairability, recoverability
- **Circularity performance:** degree to which a set of circularity aspects (3.1.4) align with the objectives and principles for a circular economy (3.1.1)
- Circularity **measurement:** process to help determine the circularity performance (3.3.1) through collection, calculation or compilation of data or information
- Circularity **assessment:** evaluation and interpretation of results and impacts from a circularity measurement (3.3.2)

ちなみに、CEの同床異夢っぷりについては↓がよくまとめています

- Kirchherr, Julian, Denise Reike, and Marko Hekkert. 2017. "Conceptualizing the Circular Economy: An Analysis of 114 Definitions." *Resources, Conservation and Recycling* 127 (April): 221–32. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005>.
- Kirchherr, Julian, Nan-Hua Nadja Yang, Frederik Schulze-Spüntrup, Maarten J. Heerink, and Kris Hartley. 2023. "Conceptualizing the Circular Economy (Revisited): An Analysis of 221 Definitions." *Resources, Conservation, and Recycling* 194 (107001): 107001. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107001>.

# 循環度合いの測定からインパクトへ



Koide, R., S. Murakami, and K. Nansai. 2021. "Prioritising Low-Risk and High-Potential Circular Economy Strategies for Decarbonisation: A Meta-Analysis on Consumer-Oriented Product-Service Systems." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, November, 111858. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111858>.

# 本研究の目的

マテリアルフローシミュレーターを作成

- リサイクル率等を制御変数として用意

制御変数を用いてグローバル感度分析

- 結果的にみたいインパクト他の値(GHG等)がどう変わるのかを見る

望ましいものの流れを探索

- その結果を他グループに渡す

望ましい流れを社会で実現する

- ビジネスモデルや法制度作りはまた別の仕事

DOI: 10.1111/jiec.13623

METHODS ARTICLE

JOURNAL OF INDUSTRIAL ECOLOGY WILEY

## Regional sensitivity analysis to assess critical parameters in circular economy interventions

An application to the dynamic MFA model

Yusuke Fujii<sup>1</sup> | Ken Matsuoka<sup>1</sup> | Ryu Koide<sup>1,2,3</sup> | Nobuaki Shinojima<sup>1</sup> | Shinsuke Murakami<sup>1</sup>

シミュレーターの手法にご興味あれば↓あたりを参照ください

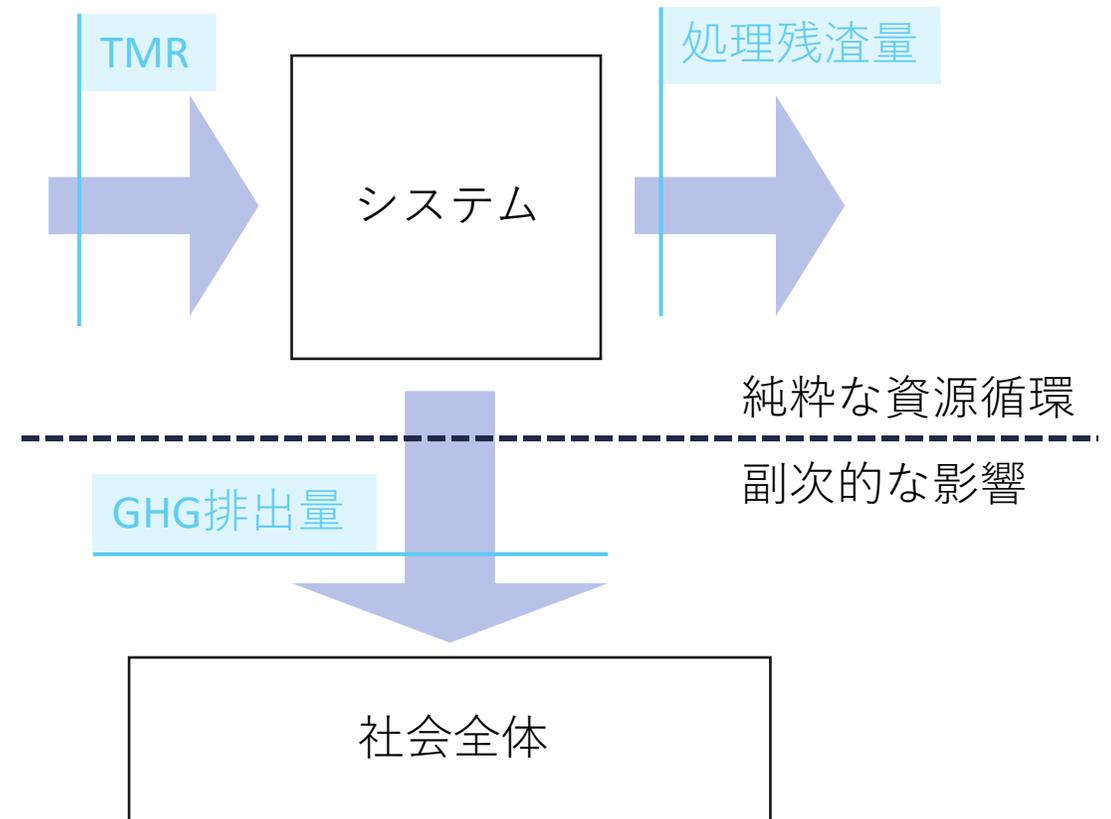
Fujii, Yusuke, Ken Matsuoka, Ryu Koide, Nobuaki Shinojima, and Shinsuke Murakami. 2025. "Regional Sensitivity Analysis to Assess Critical Parameters in Circular Economy Interventions: An Application to the Dynamic MFA Model." *Journal of Industrial Ecology*, February. <https://doi.org/10.1111/jiec.13623>.

Matsuoka, Ken, Yusuke Fujii, Nobuaki Shinojima, Tatsuya Kojima, Ryu Koide, and Shinsuke Murakami. 2024. "Seeking a Better Path for the Circular Economy of Solar Panels: Global Sensitivity Analysis Focused on Socioeconomic and Physical Factors." *Sustainable Production and Consumption* 50 (August): 526–35. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2024.08.027>.

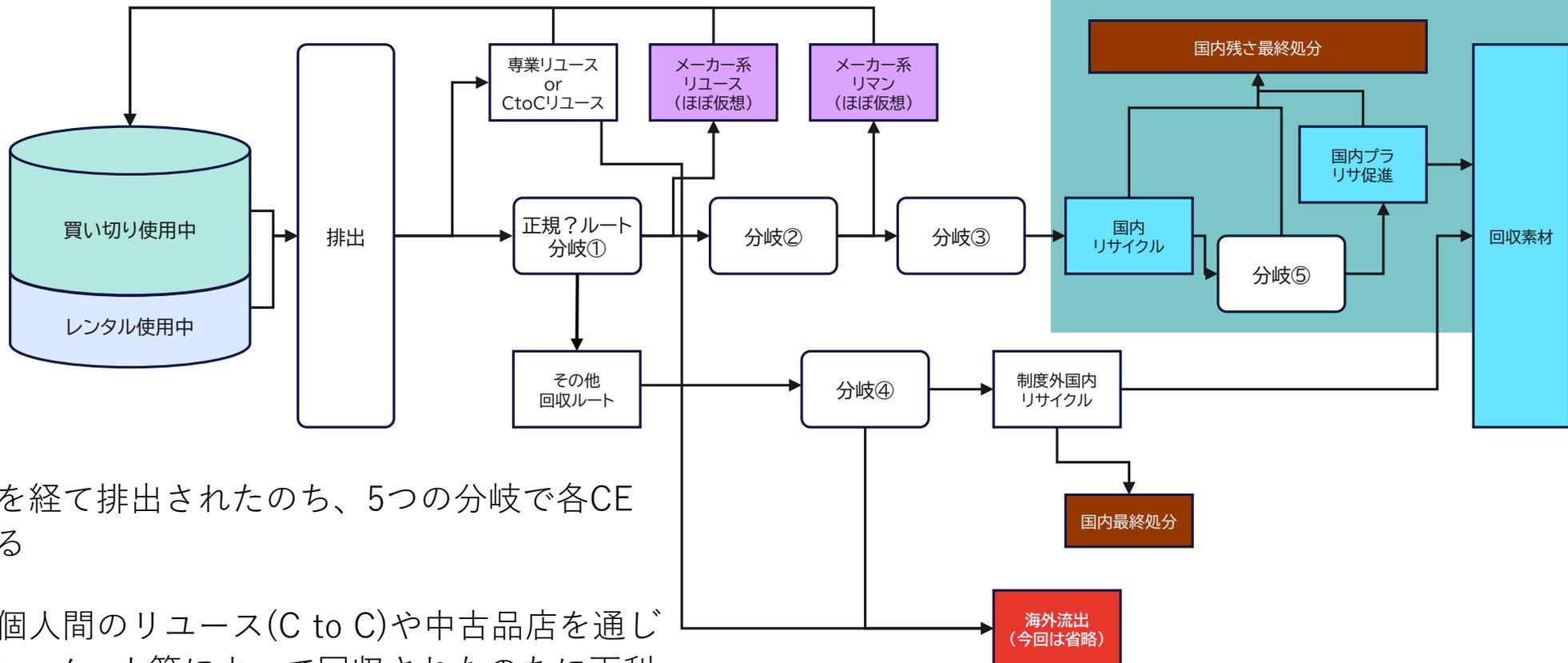
# 手法 評価指標

評価指標として、関与物質総量（Total Material Requirement; TMR）、処理残渣量、温室効果ガス（Green House Gas; GHG）排出量の3つを採用した

- TMRとは、システム内の天然資源等投入量の合計に、資源採取等に伴った目的の資源以外についての隠れたフロー（エネルギー、鉱山採掘の際の土砂等）を足し合わせた指標である
- 処理残渣量とは、使用済製品のうちリユースやリサイクルがされず廃棄される量のことを指す
- 循環性を測定する際には、純粋な資源循環とそれに伴う副次的な影響の2つの観点があるが、純粋な資源循環について、システムへの投入をTMRが、システムからの排出を処理残渣量が評価し、副次的な影響のうち環境影響についてGHG排出量が評価する



# 手法 シミュレーション概要 製品のフロー

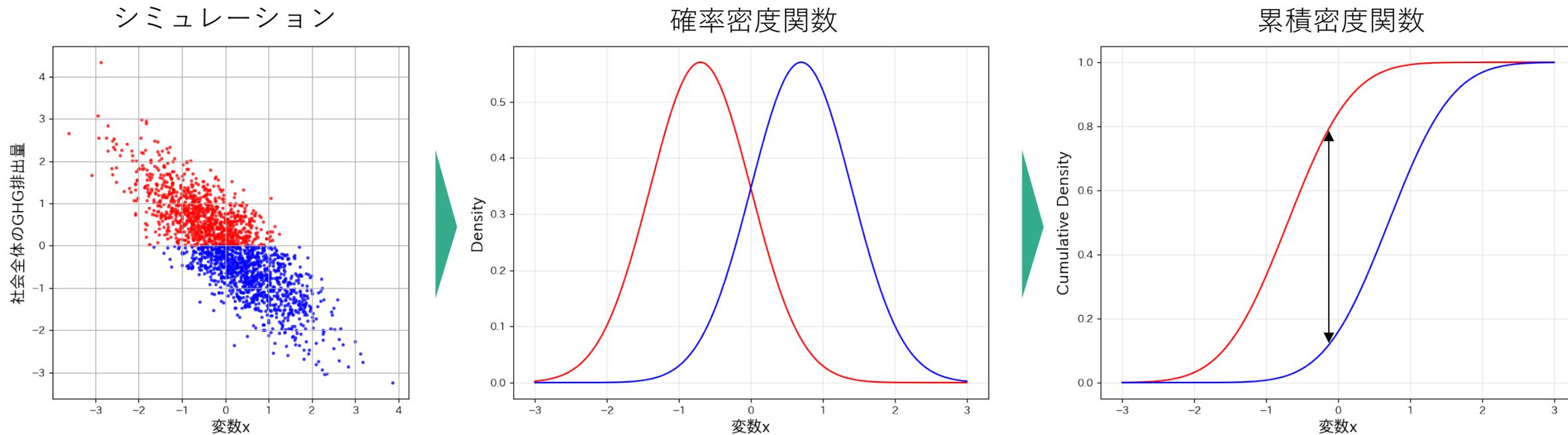


- 使用期間分布を経て排出されたのち、5つの分岐で各CE戦略を考慮する
- リユースは、個人間のリユース(C to C)や中古品店を通じたリユース1と、メカ等によって回収されたのちに再利用できる製品がピックアップされた場合のリユース2を考慮する (2は仮想)
- リサイクルは、家電リサイクル法制度内でのルートで回収された製品由来のリサイクル1と、その他回収ルートからのリサイクル2を考慮する

- 個人所有かレンタルか、新品か中古品かで、流通している製品を4タイプに分けている (A: 新品×所有、B: 中古×所有、C: 新品×レンタル、D: 中古×レンタル)
- 故障後に修理された製品を再度個人が所有するフローだけでなく、レンタル品として企業が所有するケースも多くあることを考慮し、リマン後の製品がレンタルの新品に移るように設計されている

# 手法 RSA (1/2)

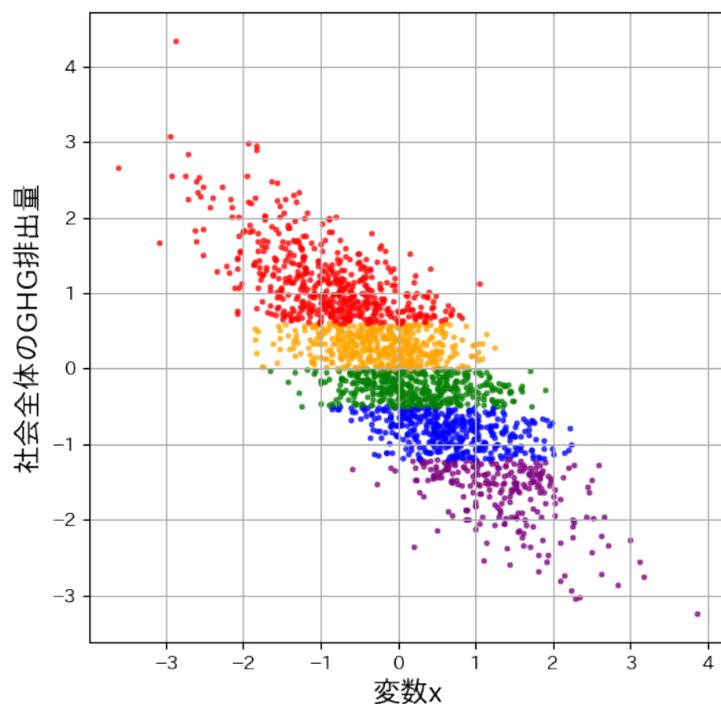
- RSAは、あるモデルに対して出力が特定の値になるような入力変数の領域を特定することができる手法
- 具体的な流れは以下の通りである
  - ① すべての変数を一度に動かし、モンテカルロシミュレーションを行う
  - ② 出力結果を2つに分けるような閾値を決めて、**B** (Behavioral) と  $\bar{B}$  (Non-Behavioral)に分ける
  - ③ 入力変数の累積密度関数に着目し、2つのグループに有意な差があるかを調べる  
(Kolmogorov-Smirnov検定：KS検定)



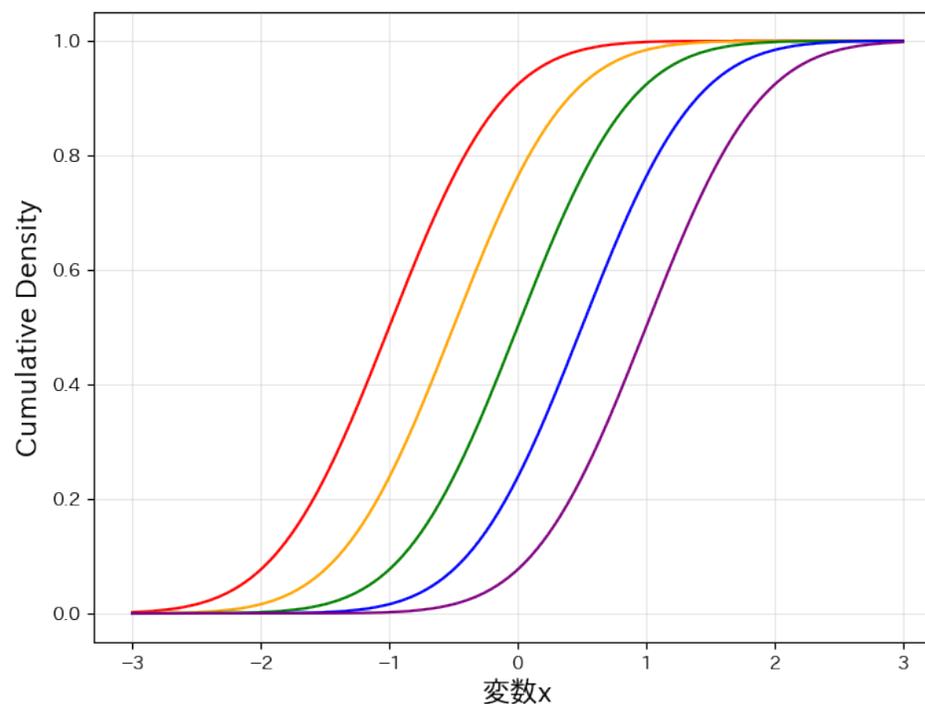
# 手法 RSA (2/2)

- 出力結果を2つに分ける閾値の設定が恣意的であるため、結果を等分する手法が考案されている
  - 下の図は結果を5等分した例である
- 本研究では各指標について結果を10等分して結果を比較した

シミュレーション



累積密度関数



# ケーススタディ 概要

- プラスチックの資源循環ニーズが高まる中で、家電の循環がどのような役割を果たせるのかを検討する例として、日本国内の家庭用エアコンを対象にケーススタディを実施した
- 試行回数は10,000回
- 入力変数の分布として、一般化第一種ベータ分布を使用した
- データについては、審議会資料等から得られるもの、LCAデータベースからえられるものなどを用いているが、今後三菱電機社内のデータに差し替える予定

各入力変数のパラメータ

変数	最頻値	最小値	最大値
リユース率1	0.159	0	1
リユース率2	0.0394	0	1
リマン率	0	0	1
金属リサイクル率1 (制度内)	0.915	0	1
金属リサイクル率2 (制度外)	0.447	0	1
プラリサイクル率1 (制度内)	0.2	0	1
プラリサイクル率2 (制度外)	0.2	0	1
レンタル率	0	0	1
使用期間延長割合	0	-0.2	0.5
回収率：分岐①で正規へ行く率	0.206	0	1
リユース品使用期間	0.700	0.3	0.9
レンタル期間(年)	0.250	0.036	1.0
レンタル品使用頻度	1.50	1.0	2.0
戦略導入期間(年)	25.0(年)	10	30

# ケーススタディ RSA 結果 (1/2)

- 10,000組のパラメータセットを作成し、14変数の結果をFig. 1~3に示した
- グループ間のCDFの差が大きい変数の方が評価指標に与える影響が大きいいため、14変数の中でも、回収率やリユース率、金属リサイクル率1、金属リサイクル率2などが大きな影響を持っていることがわかる
- それぞれの評価指標について、変数が大きくなると指標が減少する、つまりCE戦略の導入が進むと循環性が高まり、環境負荷が軽減されることが確認された
- プラスチックリサイクルに関する変数は、指標に与える影響が小さいことが分かった

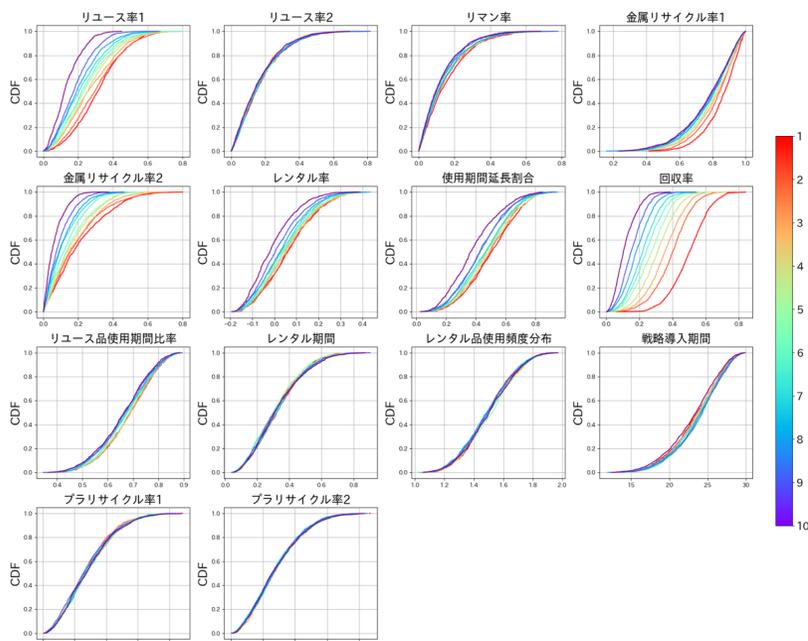


Fig. 1 TMRに関するCDF

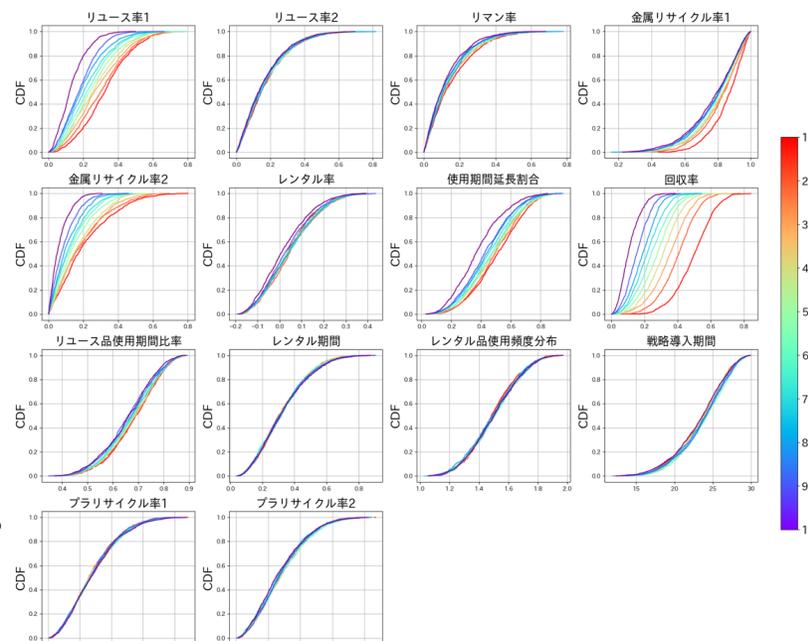


Fig. 2 処理残渣量に関するCDF

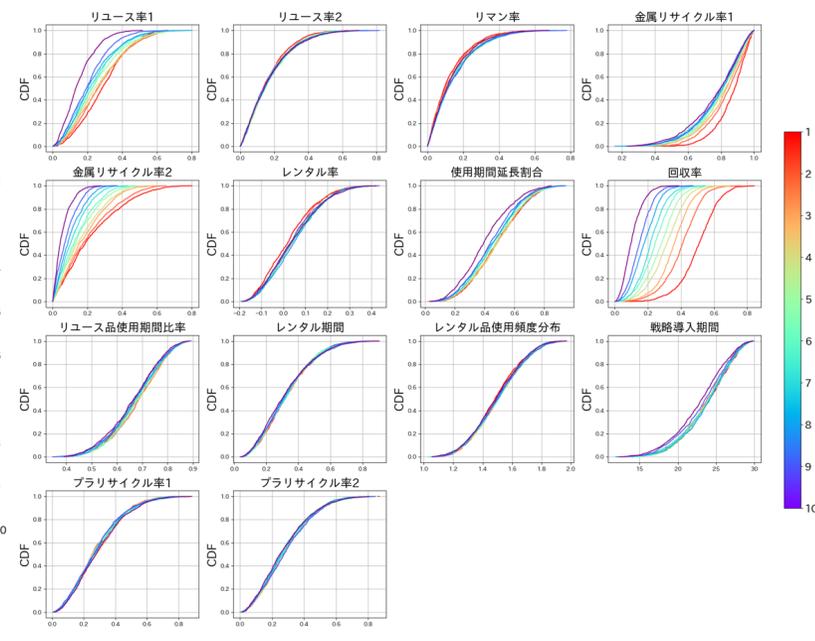
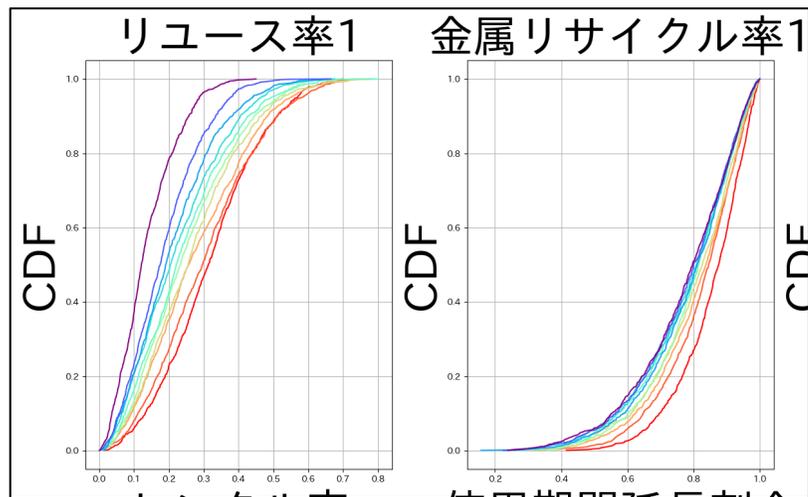


Fig. 3 GHG排出量に関するCDF

# ケーススタディ RSA 結果 (2/2)



- 14変数のうち影響の大きい6変数の結果をFig. 4~6に示した
- 評価指標が特に大きいグループ（紫色）で特に乖離が大きいのは、リユース1（個人間や中古品店）、使用期間延長割合
  - CE戦略が浸透していない世界では、これらのパラメータが特に重要になる **まずはSlowing**
- 評価指標が特に小さいグループ（赤色）で特に乖離が大きいのは、金属リサイクル率1（法制度内のリサイクル）と回収率
  - CE戦略が十分に浸透した世界では、これらのパラメータが特に重要になる **Closingは最後？**

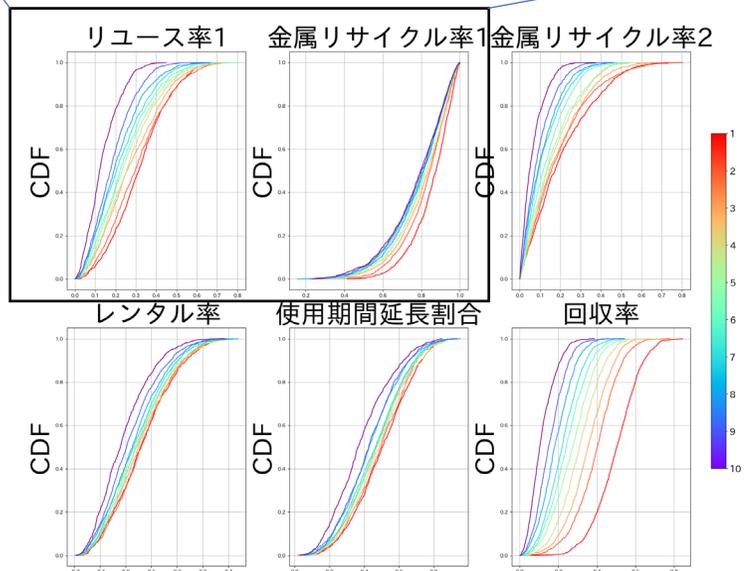


Fig. 4 TMRに関するCDF

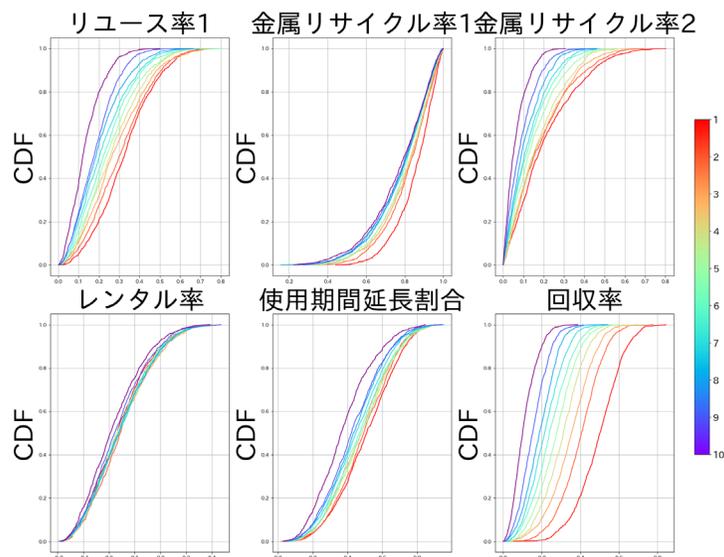


Fig. 5 処理残渣量に関するCDF

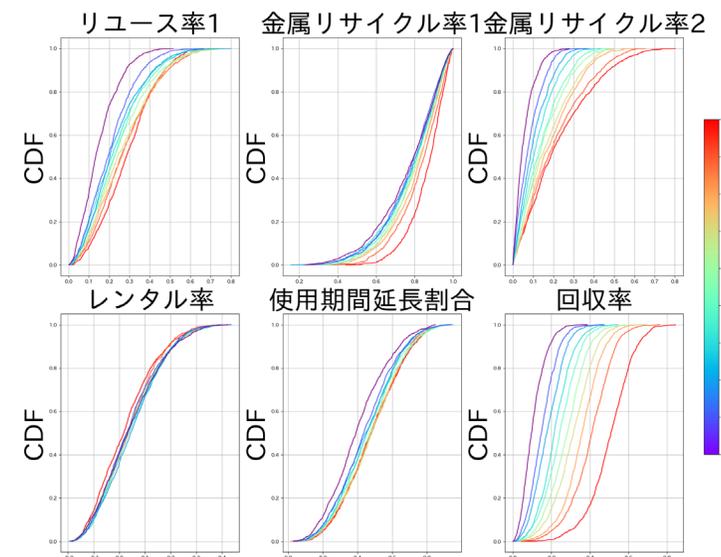


Fig. 6 GHG排出量に関するCDF

# この段階での結論

## まとめ

- マテリアルフローに基づいたストックフローダイナミクスをモデル化し、家庭用エアコンのケーススタディを通じてその機能を確認した
- 入力変数の感度やCE戦略の組み合わせについて、定量的な評価をベースに分析を実施した
- 家庭用エアコンについて、①使用済製品の回収率が評価指標に最も大きな影響を与えていること、②プラスチック資源のリサイクルが環境影響に与える影響が限定的である可能性、が明らかになった

## 課題と今後の展望

- 使用するデータ・ケーススタディ、評価指標を拡充させ、精度の高いモデル構築を目指す
- 例えば
  - ケース：Critical Metal含有の小さなパーツ(磁石など)のリサイクルを導入する。
  - 評価指標：上記に合わせて資源安全保障的な文脈での効果を定量的に評価する（TMRには希少性は多少反映されているがgeopoliticalな側面はない）
  - 評価指標：LCAデータが充実すれば水、土地改変なども
  - リユース、リマンの設定の修正