

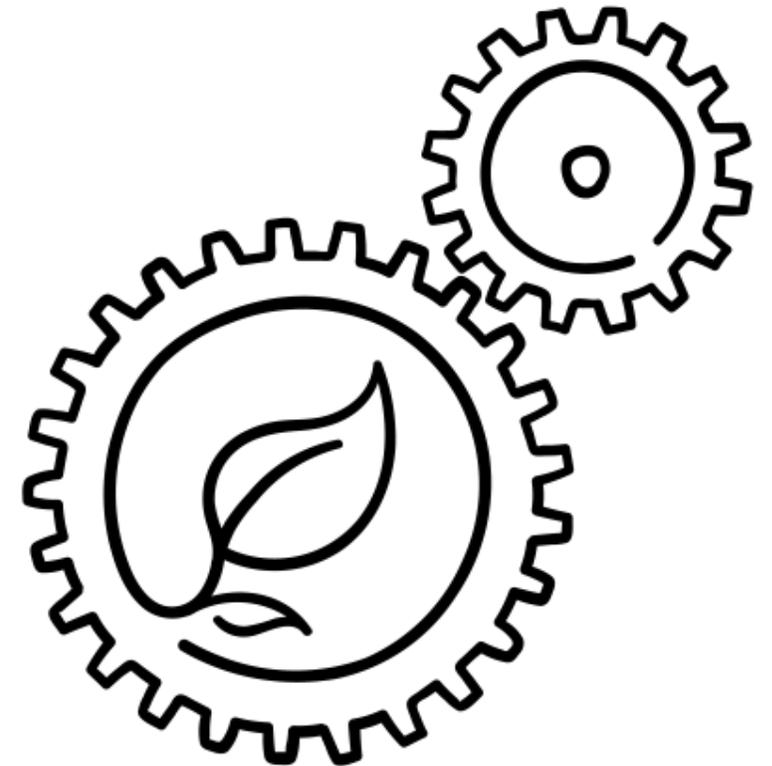
技術の環境価値を測るには

- ライフサイクルアセスメントの概要と最新動向 -

早稲田大学

カーボンニュートラル社会研究教育センター

天沢逸里



天沢 逸里（あまさわ えり）

カーボンニュートラル社会研究教育センター 准教授

専門・研究内容

- LCAを使った、技術やビジネスモデル、消費者行動の環境影響評価
- サステナビリティ評価手法の開発
- 対象：リサイクル材料・プロセス、繊維製品、サーキュラーエコノミービジネスモデル

学歴

- Ph.D.（サステナビリティ学），
東京大学大学院新領域創成科学研究科 サステナビリティ学グローバルリーダー養成大学院プログラム
- M.S. in Mechanical Engineering at University of Washington, Seattle
- B.S. in Materials Science and Engineering at University of Washington, Seattle

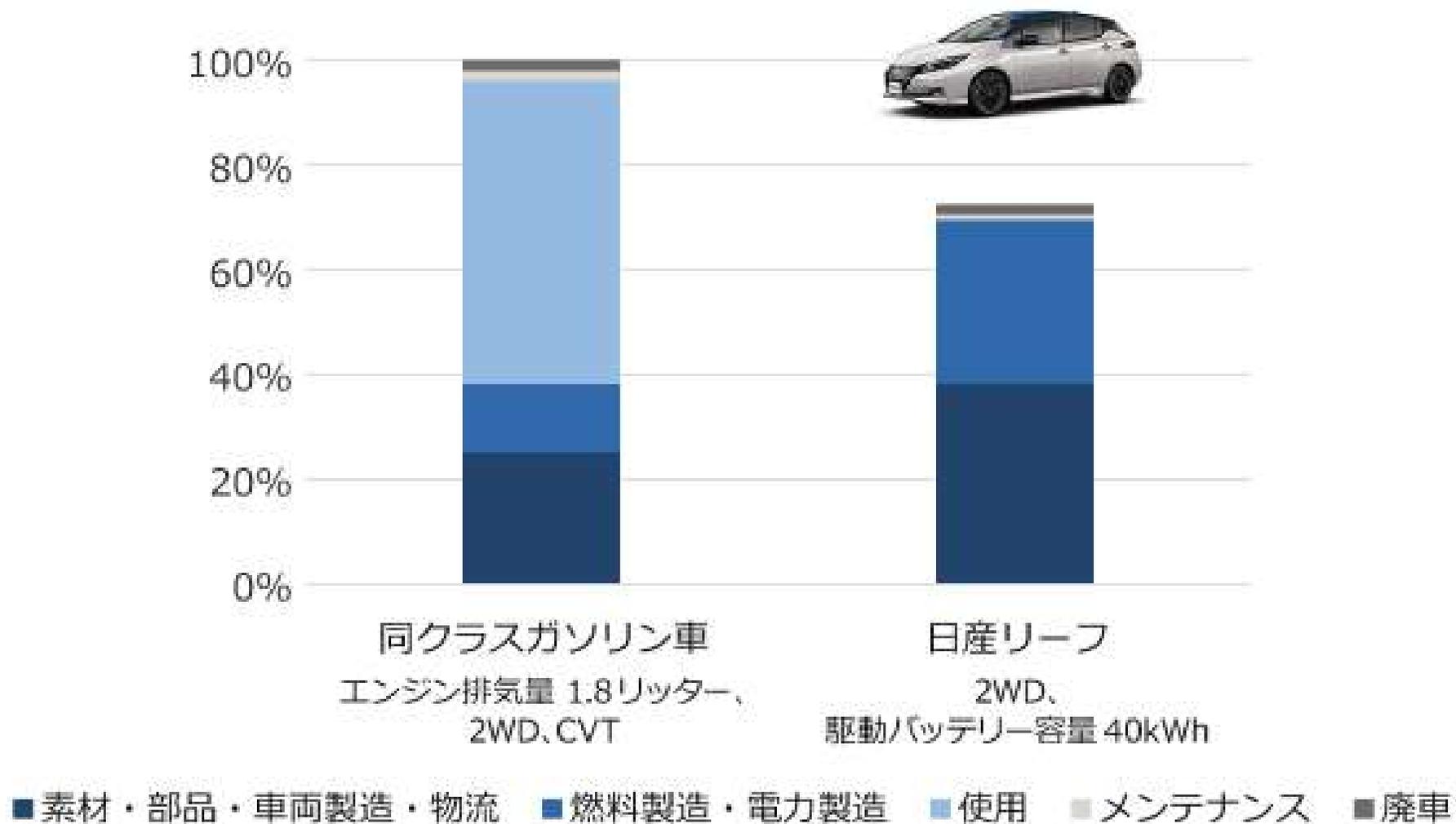


こんな「環境にやさしい」
見たことありますか？



プラ脱却はエコ？

EVはエコ？



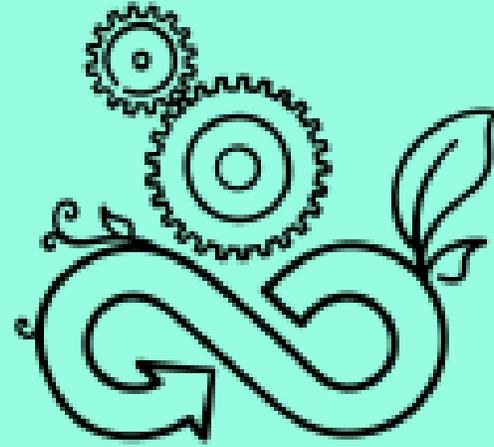
日本における環境政策の最新動向

- 2021
- 地球温暖化対策推進法の改訂（2050年カーボンニュートラル宣言）
 - 2050年までに温室効果ガス(GHG) 排出量ゼロを目指す
 - 企業のGHG排出量の算定・報告・公表制度が位置付けられる
- 2022
- プラスチック資源循環促進法
 - ライフサイクル全体での資源循環を促す。
 - 使い捨てプラの削減、回収・リサイクルの義務づけ・努力義務
- 2025
- GX推進法、資源法 …

資源効率向上 → ライフサイクル全体の
GHG排出削減 → カーボンニュートラル達成

本講演の概要

1. 環境問題を工学的に理解する – LCA入門 –
2. 「環境にやさしい」ものづくりに向けたLCA
海洋生分解性をもつバイオマスプラスチック
3. LCAを実務に繋げるには



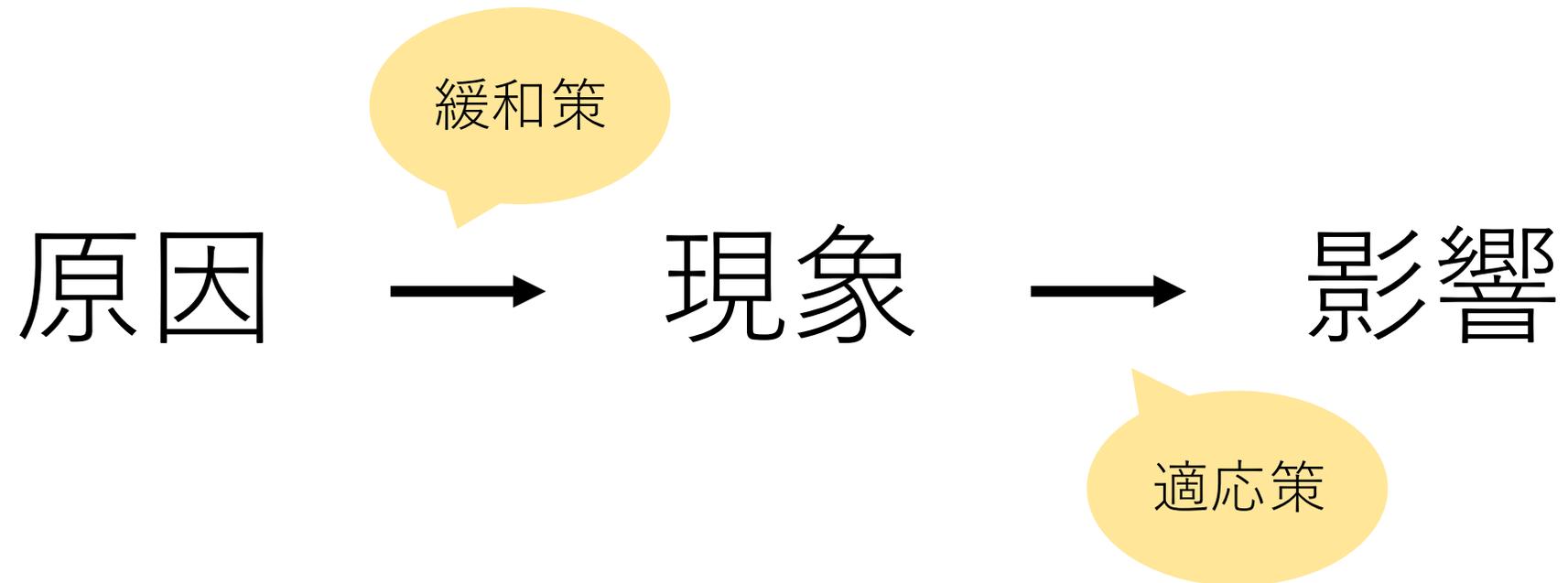
1. 環境問題を工学的に理解する

LCA入門

「環境問題」と聞いて、何を思い浮かべますか？

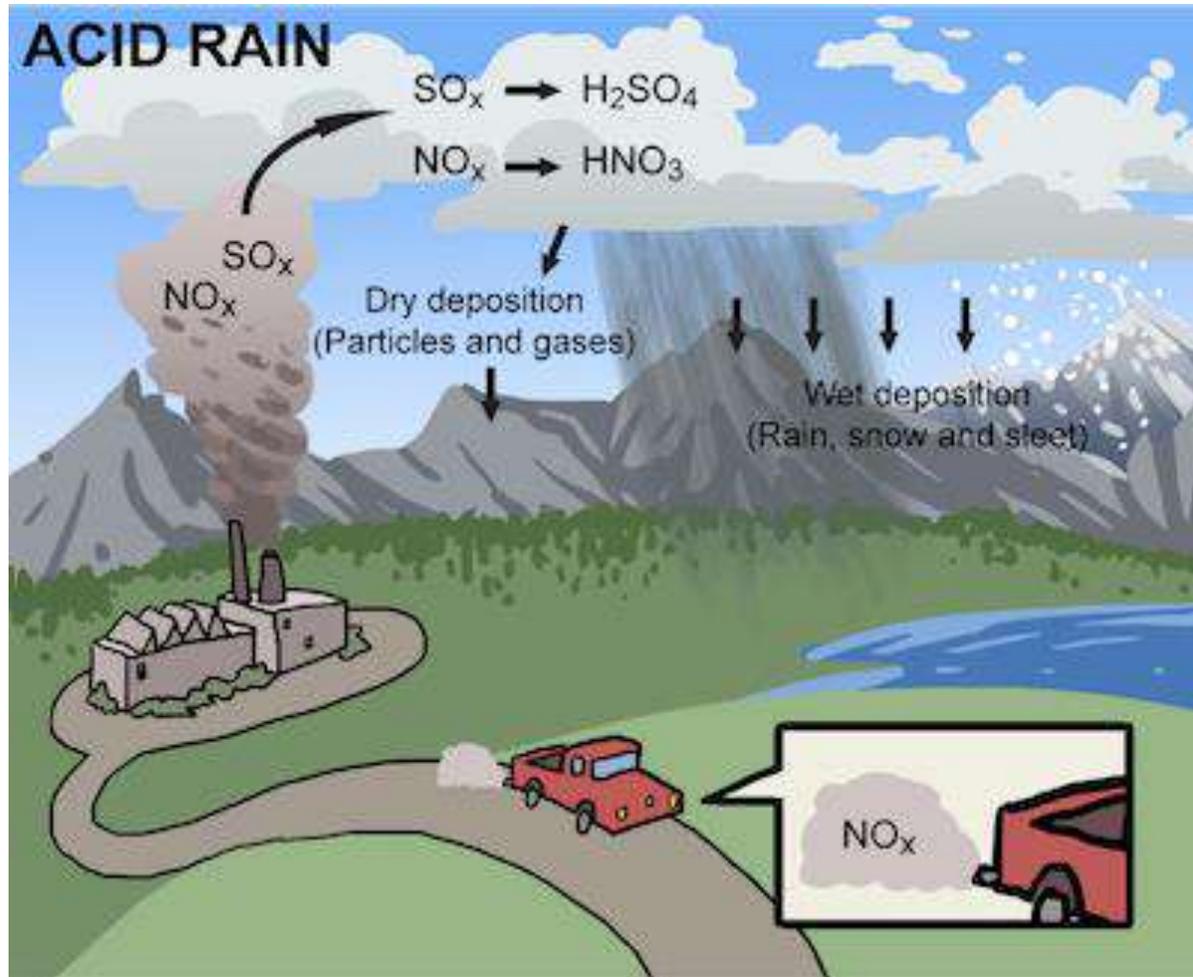
- 「人類の活動の結果、周囲の環境の変化により発生した問題」
- 環境省が言及する9つの地球環境問題
 1. 地球温暖化
 2. オゾン層の破壊
 3. 酸性雨
 4. 熱帯林の減少
 5. 開発途上国の公害
 6. 砂漠化
 7. 生物多様性の減少
 8. 海洋汚染
 9. 有害廃棄物の越境移動
- 騒音、異臭も環境問題

環境問題の構造



- 最終的に環境影響を食い止める、または最小限に止めるために対策を導入する
- 対策には2種類ある

酸性雨



原因： SO_x , NO_x の排出

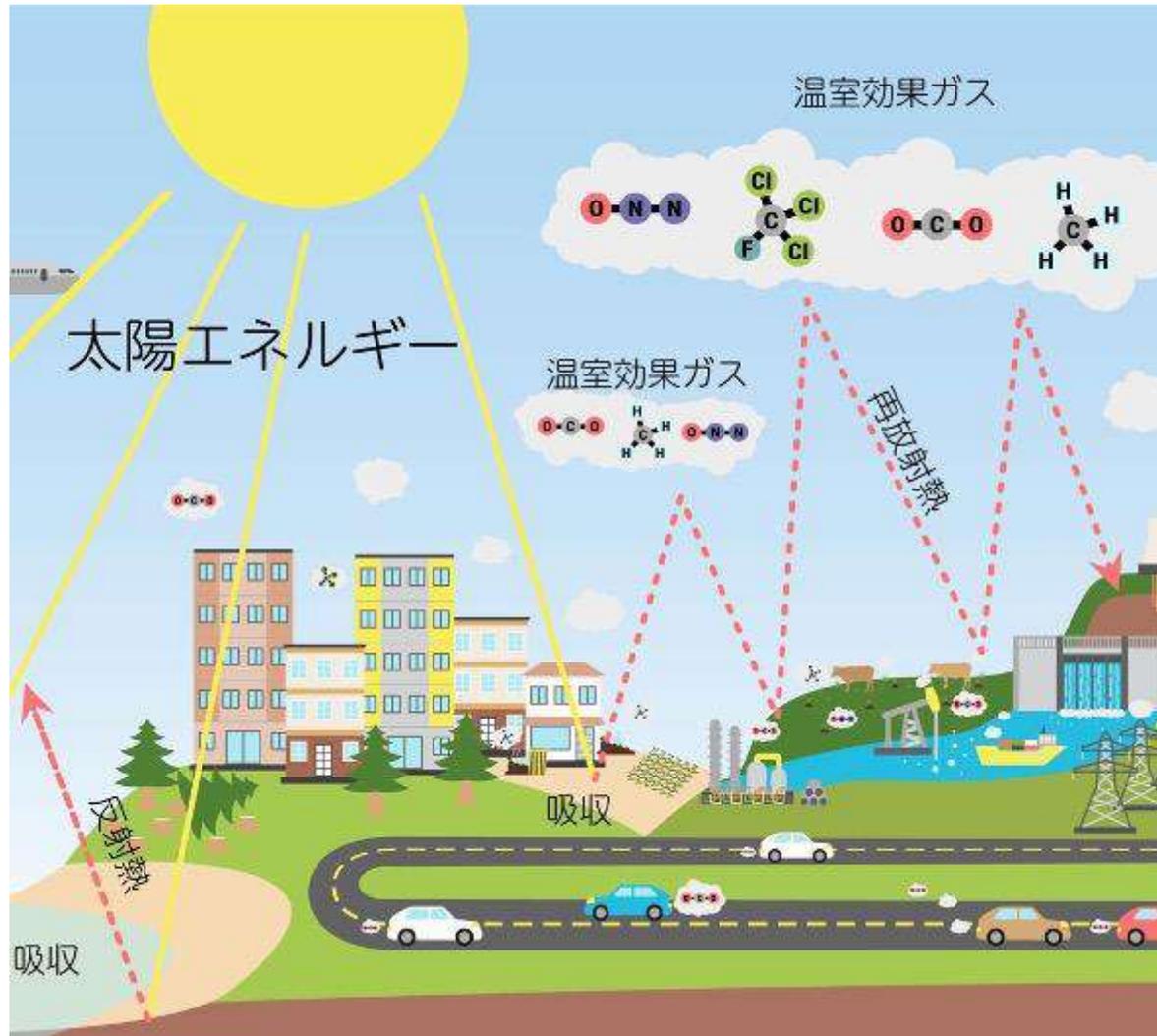
緩和策？

現象：酸性雨

適応策？

影響：森林破壊

地球温暖化



原因：温室効果ガスの排出

緩和策？

現象：地球温暖化

適応策？

影響：異常気象、生物多様性の劣化、海面上昇…

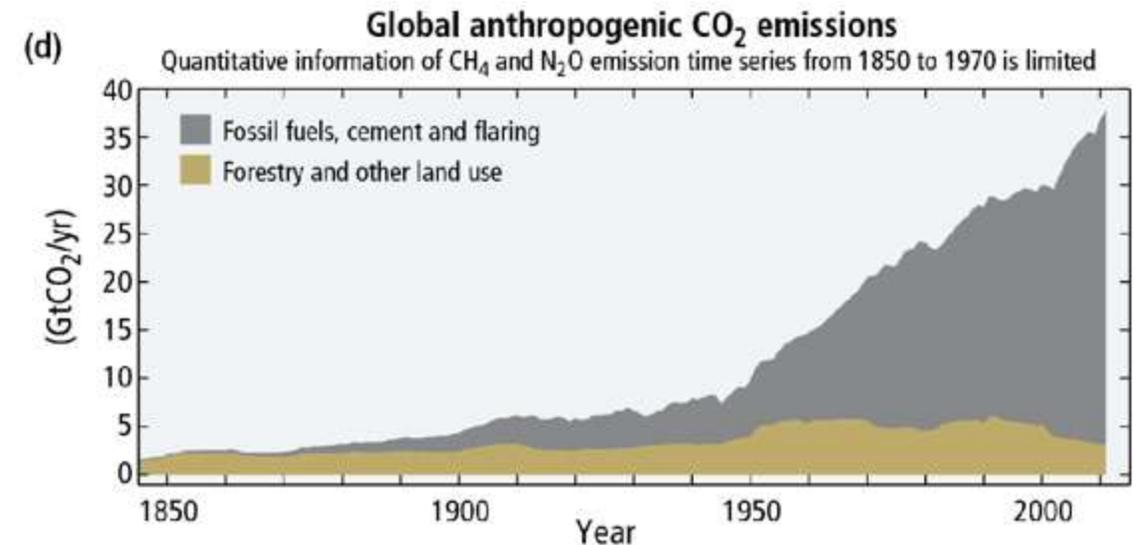
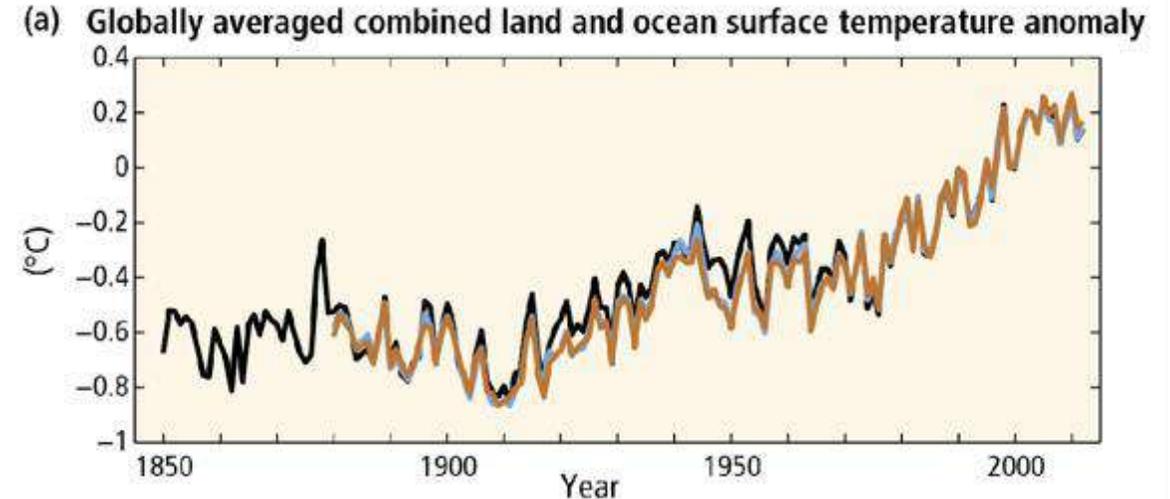
IPCCが訴える環境問題とその原因

“人間活動の影響が20世紀半ば以降に観測された温暖化の支配的な (dominant) 要因であった可能性が極めて高い (95 %以上)”

—IPCC AR5 WG1 (2014)

そもそも「人間活動の影響」とはどのくらい？

影響の要因、そして私たちは何ができるのか？



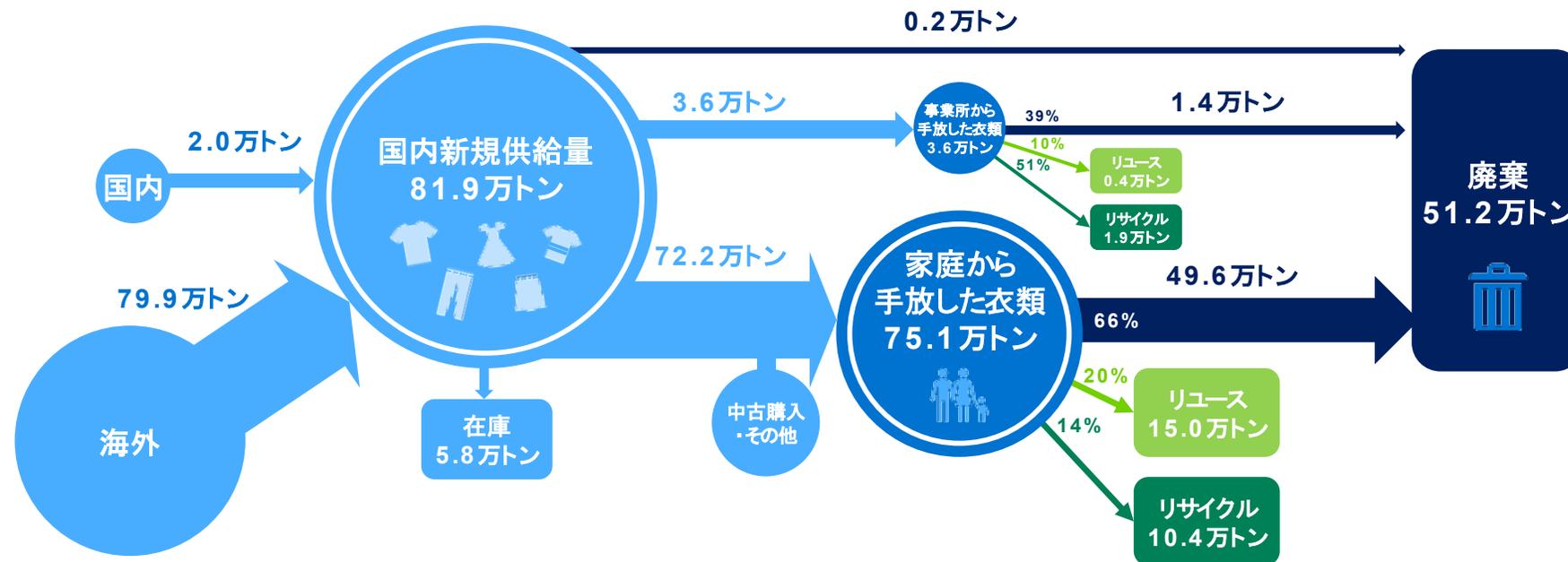
環境影響評価手法

- マテリアルフロー分析 (Material Flow Analysis; MFA)
- 産業連関分析 (Input-Output Analysis; IOA)
- ライフサイクルアセスメント (Life Cycle Assessment; LCA)

マテリアルフロー分析 (MFA)

あるシステム境界（工場、地域、国など）における物質やエネルギーのフローやストックを分析することで、人間活動と環境との関係を把握する

2020年版 衣類のマテリアルフロー



産業連関分析 (IOA)

- 経済の各部門での需要と投入を表にした「産業連関表」を使う
 - 基本分類 (445部門 x 391部門) による取引基本表 (2020年版)
 - 国、9つの地域、都道府県・市レベルで作成が進む
 - 5年に1度作成 (2020年版は2024年6月に公開)
- 経済構造の将来予測や価格分析、変動要因分析を行うための手法
- 産業連関表による環境負荷原単位データブック (3EID)
 - (独) 国立環境研究所が作成
 - 産連表の約400部門の単位生産活動 (百万円相当の生産) に伴い直接間接的に発生する環境負荷量を算出

図1 産業連関表の構造

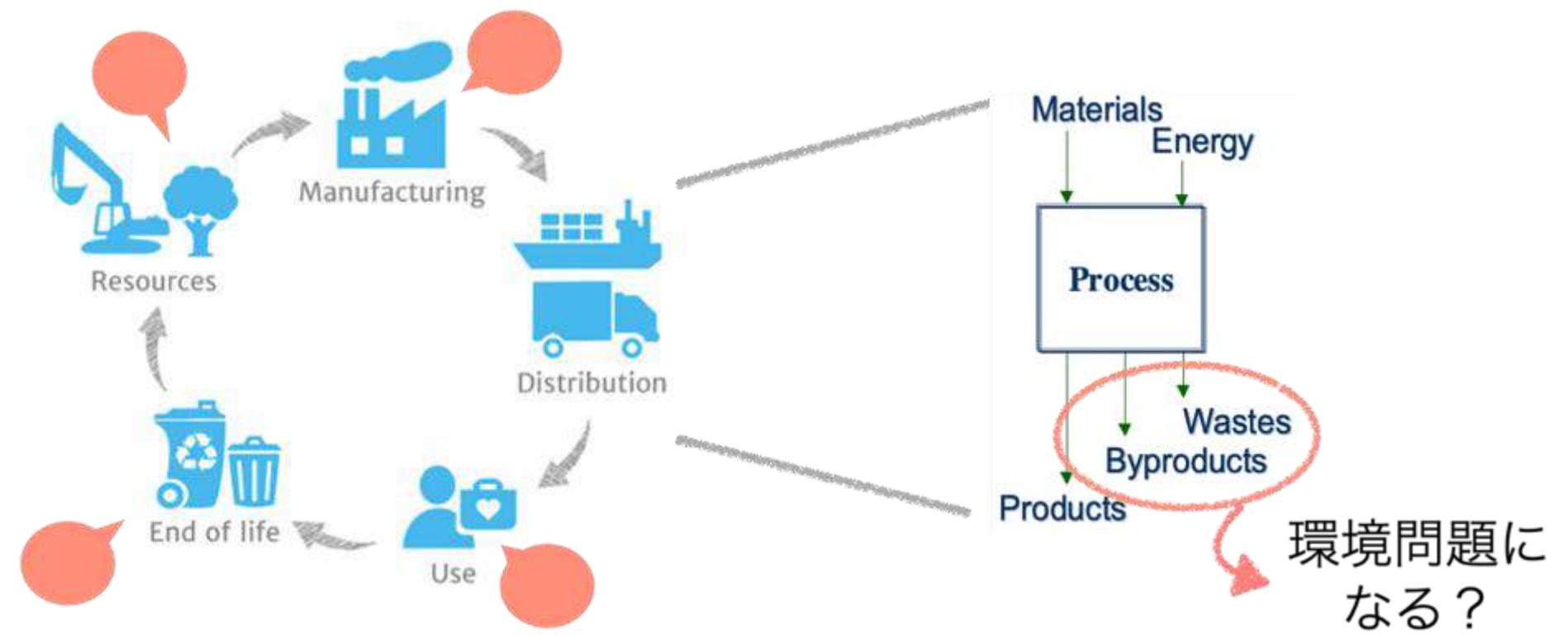
需要部門(買い手)		中間需要				最終需要				(控除)輸入	国内生産額		
		1	2	3	計	消	資	在	輸			計	
供給部門(売り手)		農	鉱	製	計	費	本	庫	出	B	C	A+B-C	
		林	業	造									業
		(生産される財・サービス)											
中間投入	1 農林水産業		原材料及び粗付加価値の費用構成(投入)										
	2 鉱業												
	3 製造業												
	(供給される財・サービス)												
	計 D									B*	C*		
粗付加価値	家計外消費支出 雇用者所得 営業余剰 資本減耗引当 間接税 (控除)補助金												
	計 E											E*	
国内生産額 D+E													

・行方向の国内生産額(A+B-C)と列方向の国内生産額(D+E)は一致する。
 ・粗付加価値合計(E*)と最終需要-輸入(B*-C*)の合計は一致する。

経産省「産業連関表の仕組み」
https://www.soumu.go.jp/toukei_toukatsu/data/io/system.htm

ライフサイクルアセスメント

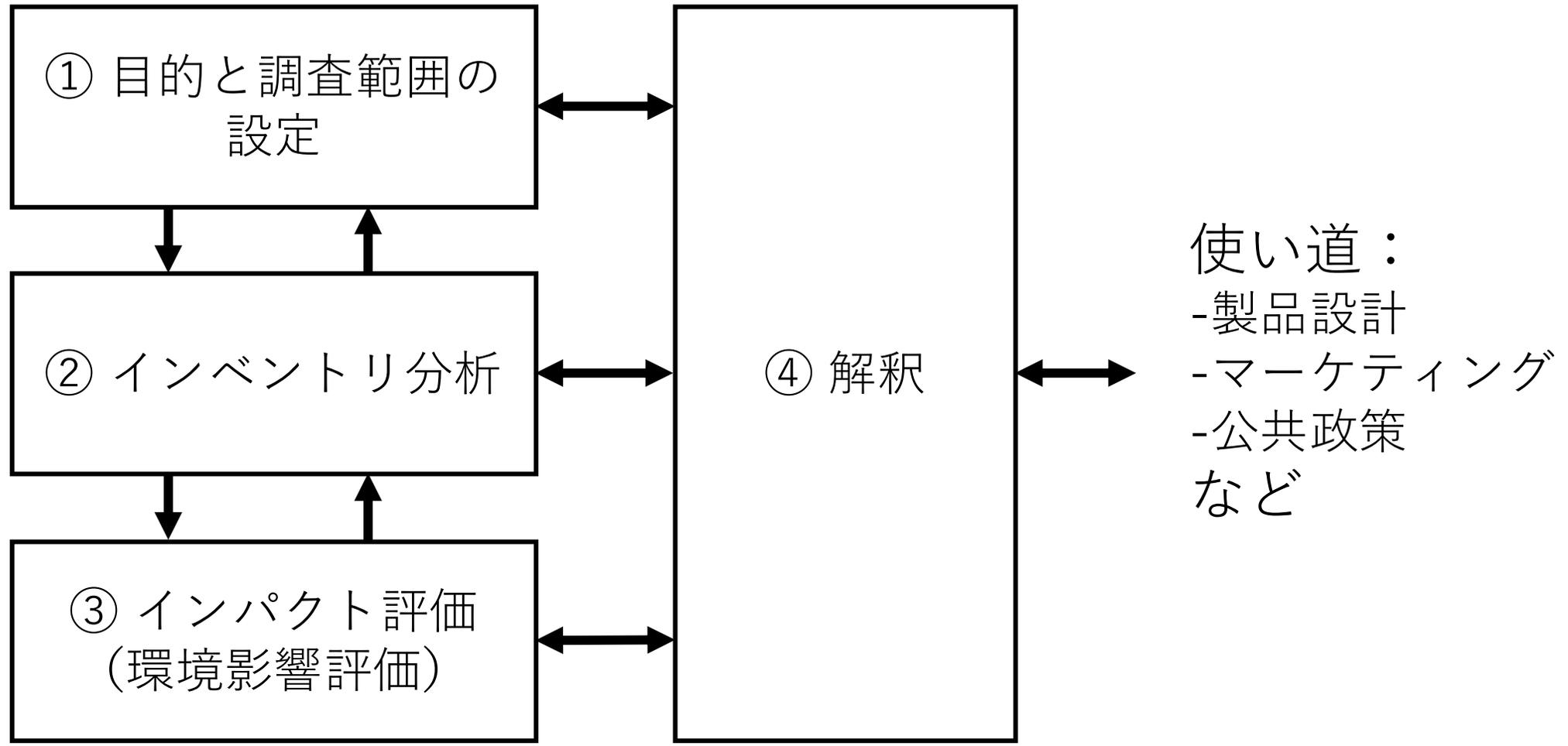
- 製品やサービスが一生において及ぼす影響を数値で評価する
- ISO14040; 14044で規格化



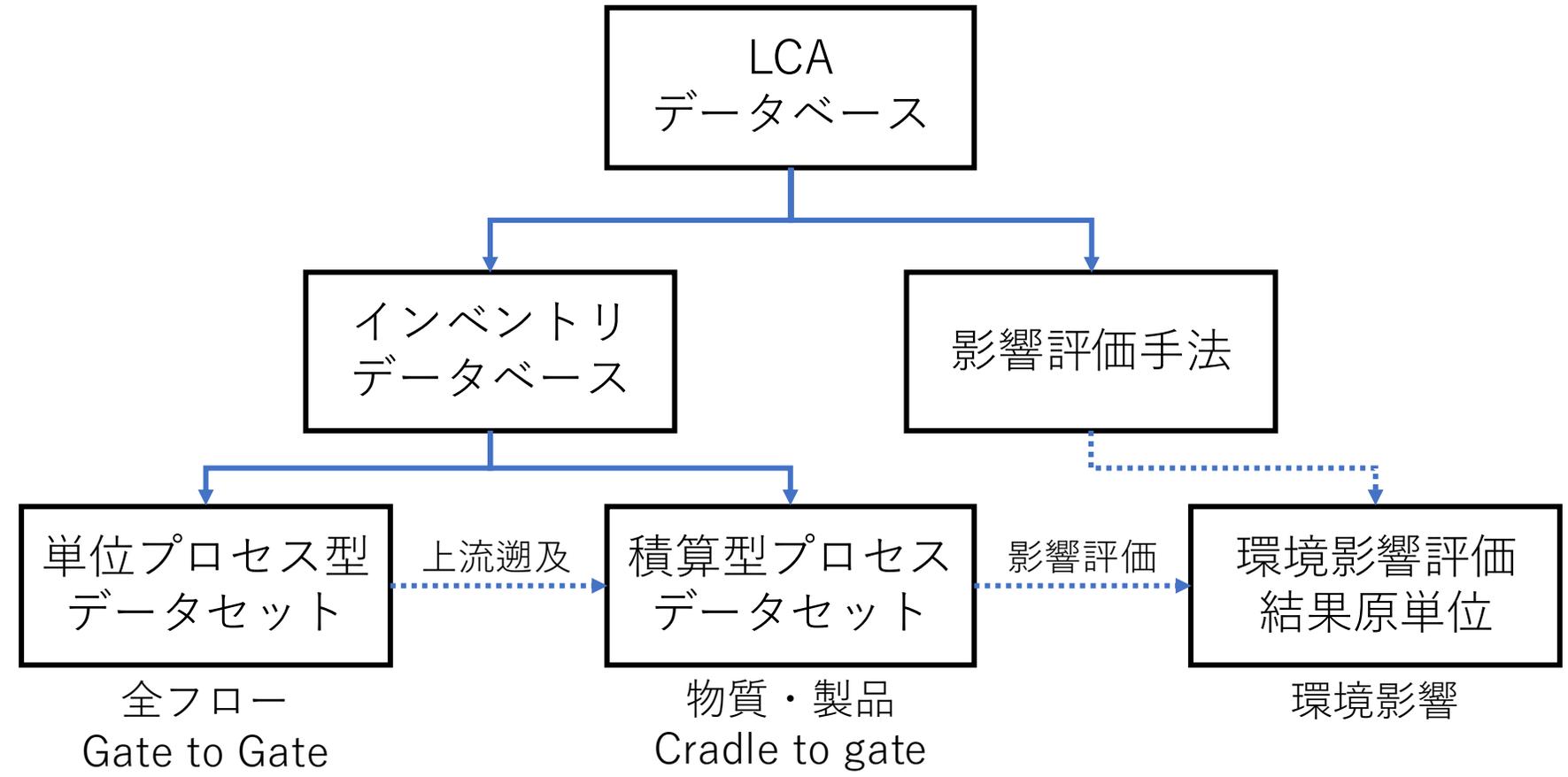
LCAが評価する「影響」

- 基本的には環境への影響のみ
 - 主な環境影響領域：地球温暖化、水の消費、エネルギー消費、オゾン層破壊、生態毒性、酸性化、廃棄物、富栄養化…
 - 酸性化を定量化：酸性化原因物質の排出量 (kgSO₂, kgNO_x, kgHCl)
 - 地球温暖化を定量化：温室効果ガス排出量 (kgCO₂-eq)
- 他の影響も考えられるが…
 - 経済影響：利益、原材料の安定供給、経営戦略など
 - 社会影響：雇用、経済開発、児童労働、労働者の健康、など
 - データ収集、数値化が難しい

ISO14040におけるLCAの手順



LCAに関するデータベースの全体イメージ



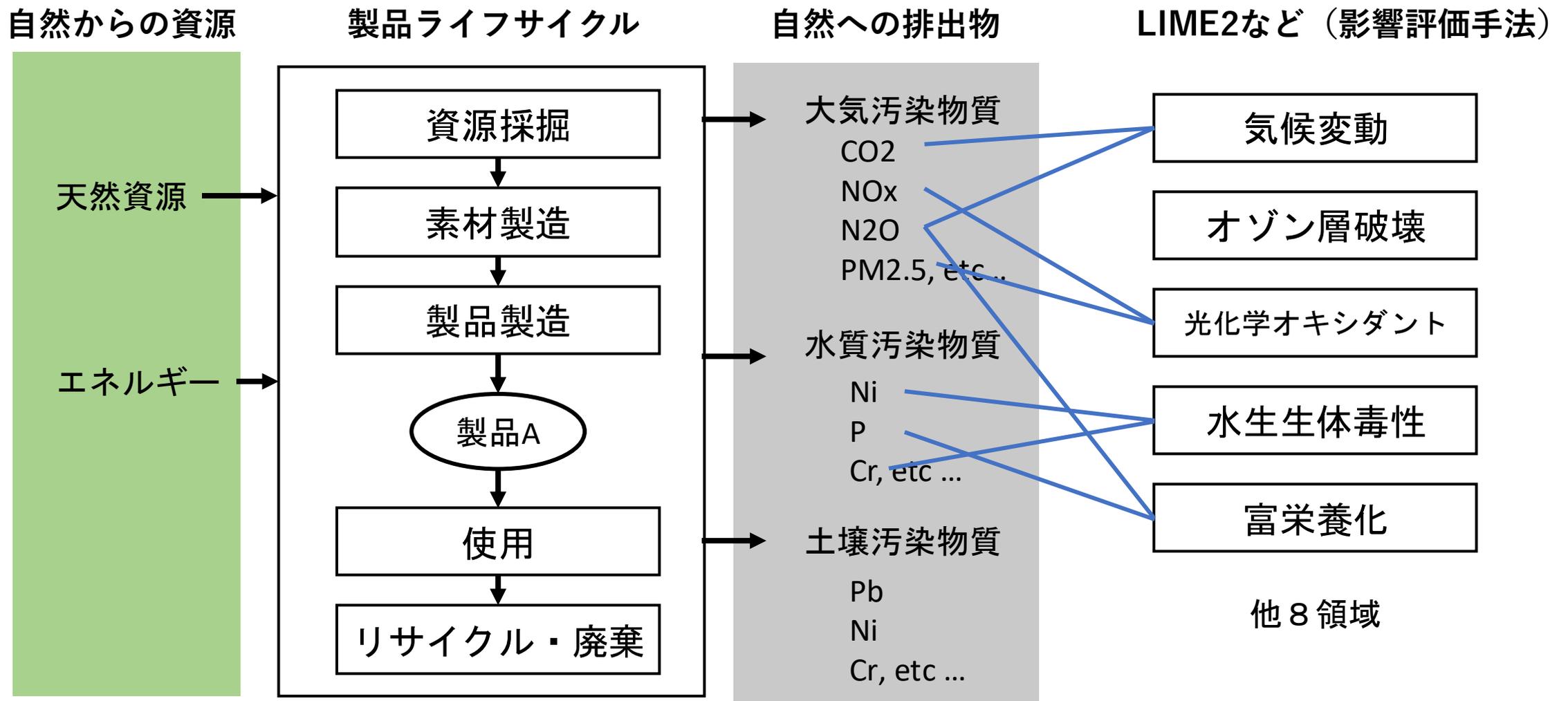
データ計算、透明性、柔軟性

複雑・高い



簡単・低い

インベントリデータベースの構造



LIME2 (Life-cycle Impact Assessment Method based on Endpoint Modeling)



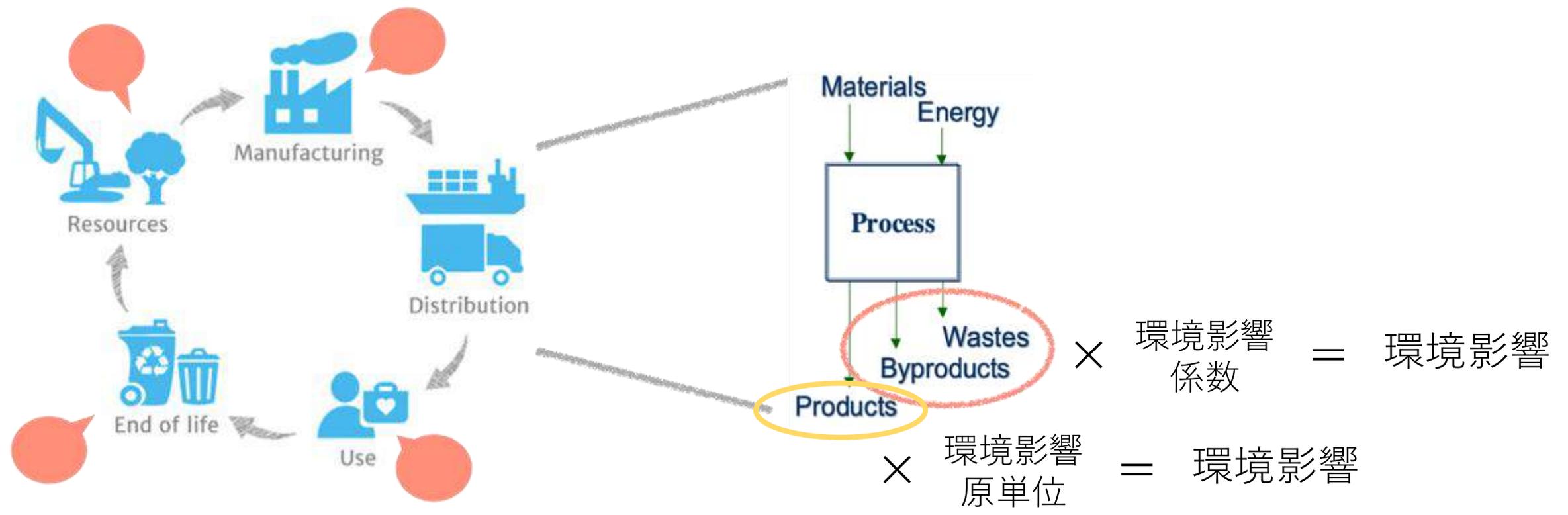
「LIME2: 意思決定を支援する環境影響評価手法」より

国内外のインベントリデータベース

- 日本
 - IDEA (Inventory Database for Environmental Analysis)
 - 産業技術総合研究所
 - 積み上げ型
 - 日本の統計などをもとに作成し、最新版では海外平均のフローも含む
 - LCA日本フォーラムデータベース
 - 3EID
- 海外
 - ecoinvent (スイス ETH発)
 - GaBi (ドイツ, Sphera Solutions)
 - その他: cm.chemicals, PlasticEurope Eco-profiles, IPCC Emissions Factor Database, など。各国の省庁や民間協会が無料で配布している場合もある (e.g., AusLCI, <https://www.auslci.com.au/>)

環境影響算定の流れ

LCAによる環境影響の算定は大きく分けて2通りある



原単位を用いた環境負荷の算定

$$\sum (\text{活動量} \times \text{原単位}) = \text{算定結果}$$

(例) ガソリン車走行 1 km \times 224 gCO₂eq / km = 224 gCO₂eq

玄米	玄米	0.02 kg	\times	1.4 kgCO ₂ eq / kg	=	0.028 kgCO ₂ eq
おにぎり	塩	0.001 kg	\times	3.1 kgCO ₂ eq / kg	=	0.0031 kgCO ₂ eq

玄米おにぎり1個あたり： 0.0311 kgCO₂eq

- 原単位のある製品やサービスであれば、簡易的な算定が可能
- 温室効果ガスの原単位は広く整備されているが、他の環境影響の原単位は少ない

環境影響係数を用いた環境負荷算定

(例) ガソリン車で1 km 走行した時の温室効果ガス排出量

環境への排出 (/km走行)			地球温暖化係数		CO ₂ 換算排出量
二酸化炭素 (CO ₂)	217 g		1		217
メタン (CH ₄)	0.24 g	×	25	=	6
一酸化二窒素 (N ₂ O)	0.0037 g		298		1.1
PFC-14 (CF ₄)	1.33 x 10 ⁻¹² g		7390		1 x 10 ⁻⁸

→ 環境へ排出された物質のうち、地球温暖化を引き起こす物質を抽出

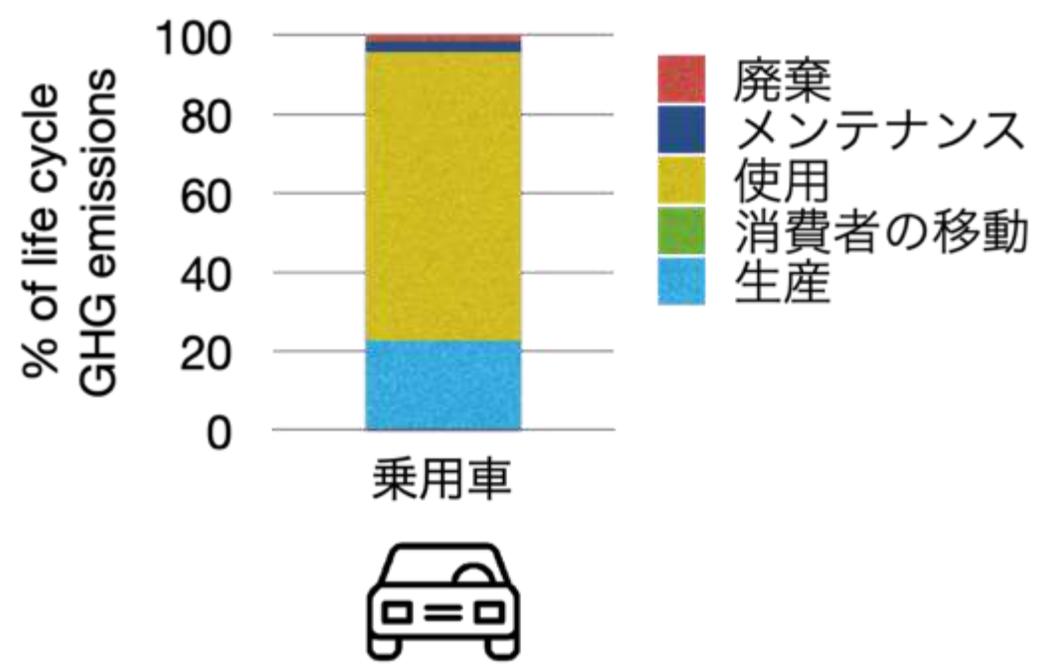
→ 物質別の係数。IPCCや、領域ごとにモデルが存在する

224 gCO₂eq / km

LCAができること

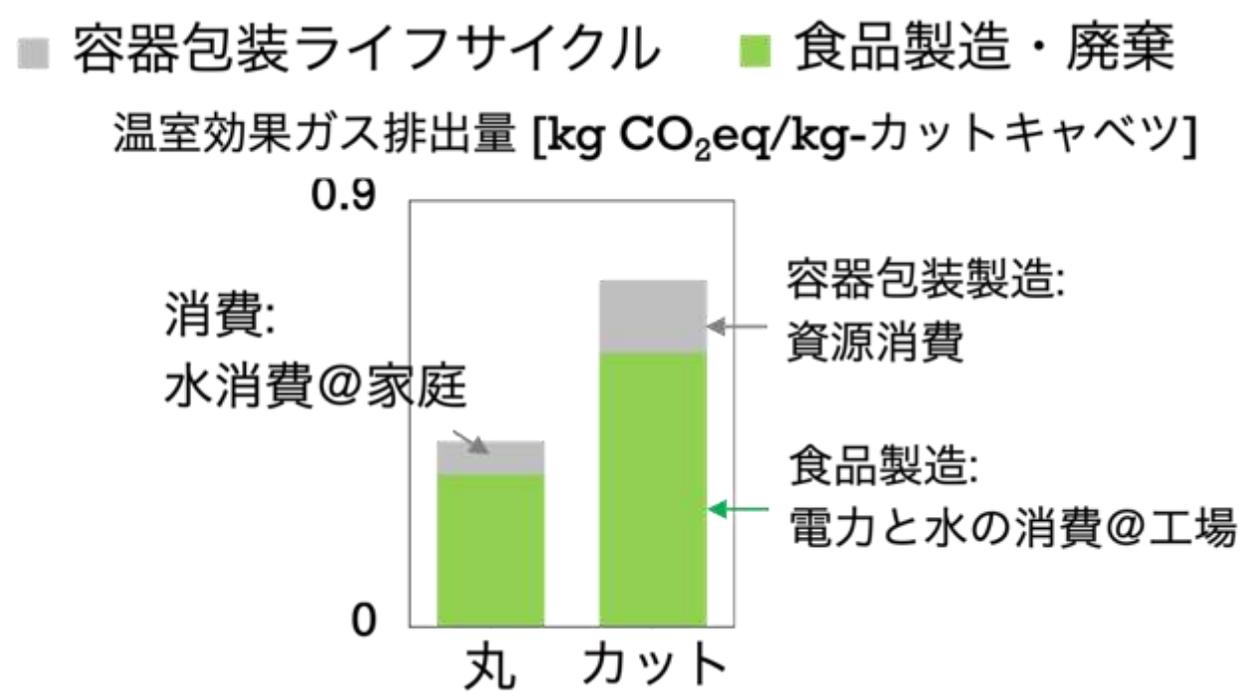
1. 環境影響ホットスポット分析

どの段階で環境影響が大きい？



2. 比較分析

どの製品が環境負荷が低い？



どの袋が環境にやさしい？をライフサイクル思考から



Photo by Daniela Simona Temneanu from Noun Project



Photo by Daniela Simona Temneanu from Noun Project



- 答え：It depends. 製品ライフサイクルの状況と場合による。
 - 原材料は何か？（リサイクルプラ？リサイクル紙？）
 - どの環境問題で比較するか？（地球温暖化？水消費量？生態毒性？）
 - 使用回数はどのくらいと考えるか？
 - リサイクルできる地域で使う？

Nissan LEAF: Gas powered everything commercial (2011)



2. 「環境にやさしい」 ものづくりに向けたLCA

海洋生分解性をもつバイオマスプラ

E. Amasawa et al., Environ Sci Technol, (2020), 55 (5), 3380-3388

プラスチックの環境問題

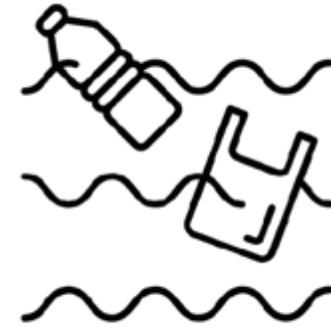
1. 気候変動



- 世界で生産される**90%**以上のプラはバージン化石資源由来 (Ellen MacArthur Foundation, 2016)
- 世界の温室効果ガス排出量の**3.8%**はプラのライフサイクル由来 (Zheng and Suh, 2019)

→ 植物資源由来のプラスチック

2. 海洋汚染



- 廃棄されたプラスチックの**80%**が埋立場、または海に行き着く (Geyer et al., 2017)
- **60-80%**の海洋ゴミはプラ (Andrady, 2011)

→ 生分解性プラスチック



ヨーロッパ連合のバイオプラ・生分解性プラ視点

「バイオベース、生分解性、堆肥化可能なプラスチックなどの代替プラスチックは、化石由来の非生分解性プラスチックに比べ、より持続可能な選択肢となり得る。しかし、これらにも独自の持続可能性上の課題とトレードオフが存在し、慎重に評価・検討する必要がある。」

- Biobased, biodegradable and compostable plastics

(European Commission, 2022)

バイオ由来・生分解性プラをライフサイクル思考から

植物資源栽培
の環境影響

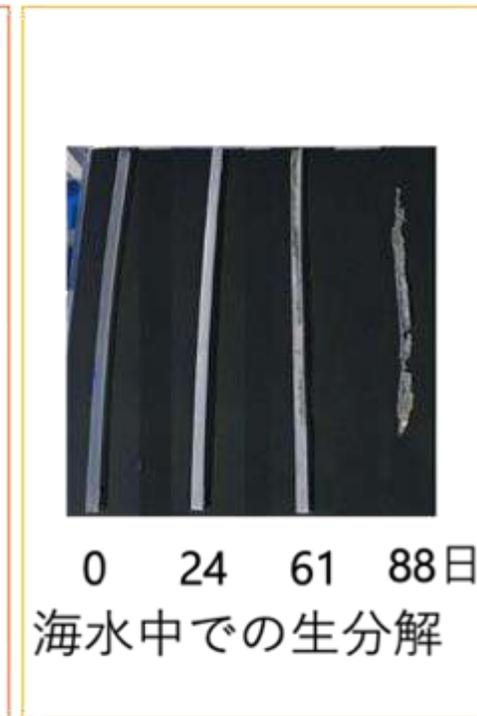
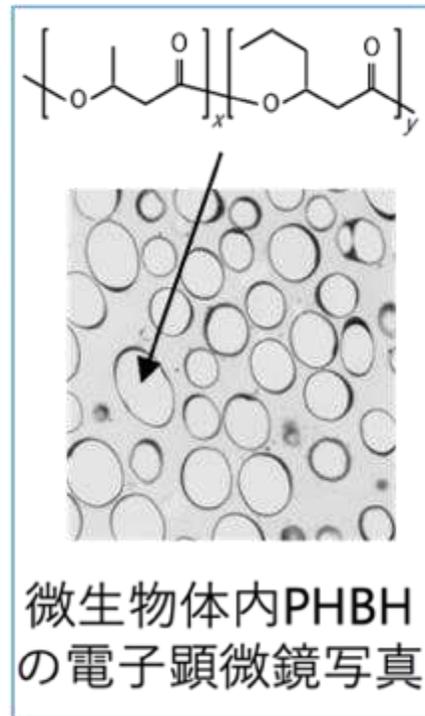
製造工程の
環境影響

海洋ゴミは
どう評価？

分解
= $\text{CO}_2 + \text{CH}_4$



夢のプラスチック？PHBHの登場



Poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyhexanoate) (PHBH)

- 植物油から微生物体内で生合成される (Sato et al. 2015)
- 土壌や淡水、海水中で微生物により代謝され生分解する (Nakatama et al. 2019)
- 硬い製品から柔らかい製品まで作成可能

PHBHのLCAに向けた問題設定

Q1. PHBHは石油由来のプラスチックと比べて、環境にやさしい？

- 関連する環境問題：気候変動と海洋プラスチックごみ
- ペレット製造までの環境影響を比較

Q2. PHBHはどんな製品に導入すべき？

- 製品によって使われているプラスチックの種類も違うため、「環境にやさしい」かどうかが変わりうる
- どんな製品 = どんな地域に導入すべきか

評価対象の単位と指標

機能単位：機能が同じ野菜袋とスプーン（製品あたり）



評価指標：

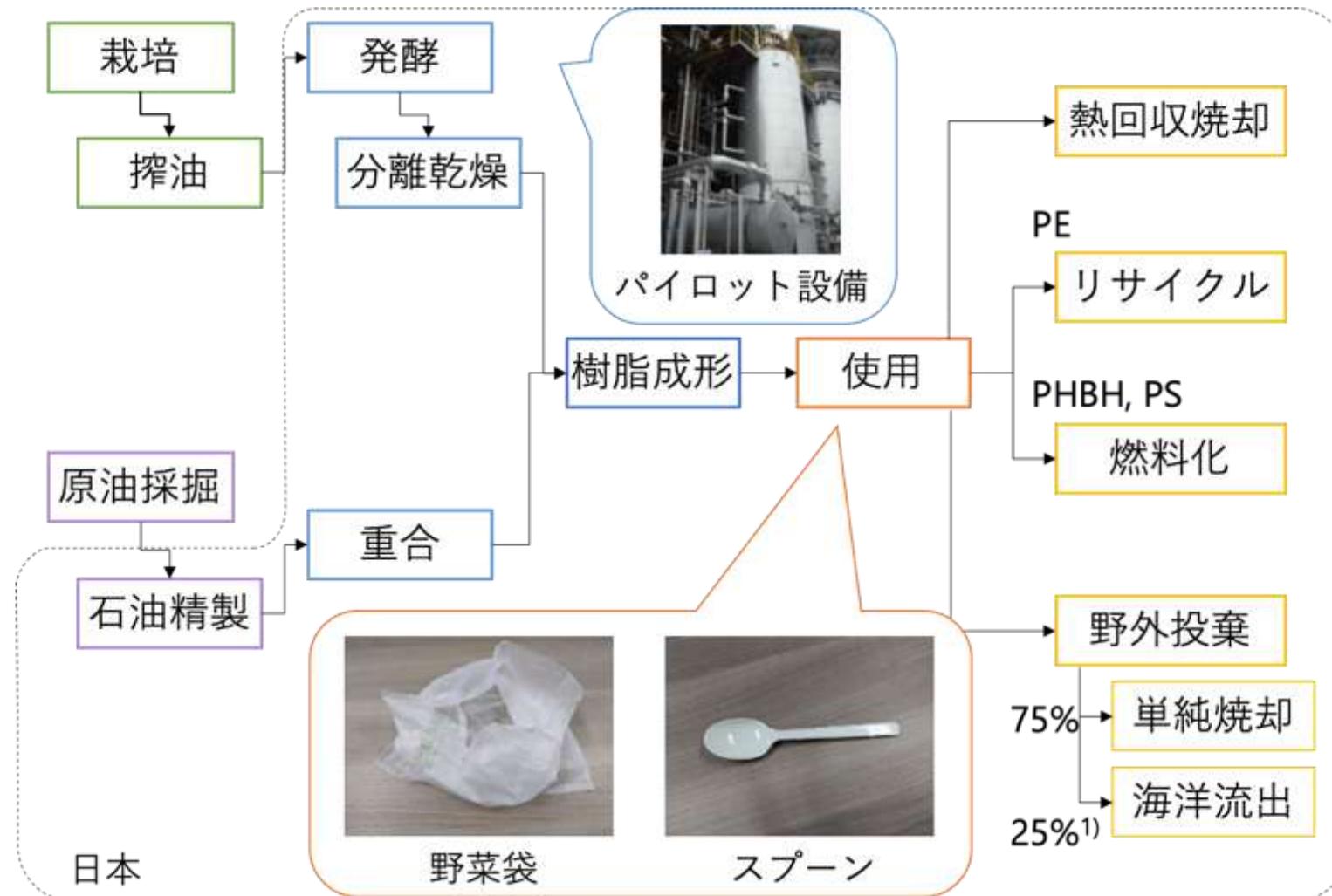
気候変動

- 温室効果ガス排出量 [kgCO₂-eq / 製品]

海洋プラスチック → 新しく指標を提案

- 海洋ゴミ蓄積量 … 毎年一定量製品の使用があった場合、海に蓄積する量

システム境界



廃棄シナリオ

製品とプラスチック材料別に廃棄シナリオを設定

Category	Scenario		Material	代替資源
管理されたプラスチックごみの廃棄方法	マテリアルリサイクル		PE, PS	バージン樹脂
	燃料化 (RPF)		PHBH, PE, PS	化石資源
	熱回収焼却		PHBH, PE, PS	電力
その他のプラスチックごみ・一般廃棄物の廃棄方法	埋立	準好気	PHBH, PE, PS	—
		嫌気	PHBH, PE, PS	—
		ガス発電	PHBH, PE, PS	電力
	堆肥化		PHBH	—
	メタン発電		PHBH	電力
不法投棄	解放投棄		PHBH, PE, PS	—

PHBHの評価結果

PHBH製造プラント

(https://www.bioplasticsmagazine.com/en/news/meldungen/20191220_Kaneka-5000.php)

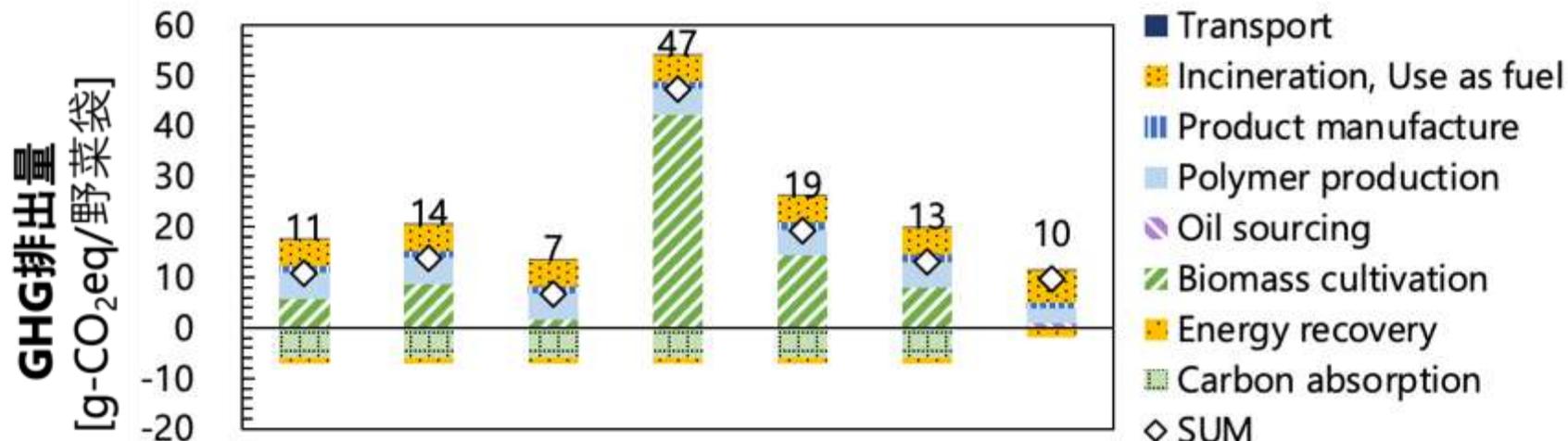


PHBHのCO₂原単位

ライフサイクルのステージ	[kg-CO ₂ e / kg-PHBH]	データ元
炭素吸収	-2.39	パーム油の組成式から概算
パーム油製造 (栽培, 搾油, 精製)	2.31	Ecoinvent (v3.5) “market for palm oil, refined”, GLO, APOS
発酵における菌体代謝	0.31	製造プロセスデータ
発酵、分離乾燥における原材料	0.25	IDEA (v2.2) と Ecoinvent (v3.5) と製造プロセスデータ
発酵、分離乾燥におけるユーテリティ	1.49	IDEA (v2.2) と製造プロセスデータ
合計	1.97	

- 植物油が占める排出量が多い (かつ、不確実性が高い)
- 一般的なプラは1.8 ~ 3.5 kgCO₂e / kg-granule

植物栽培（パーム油）の影響

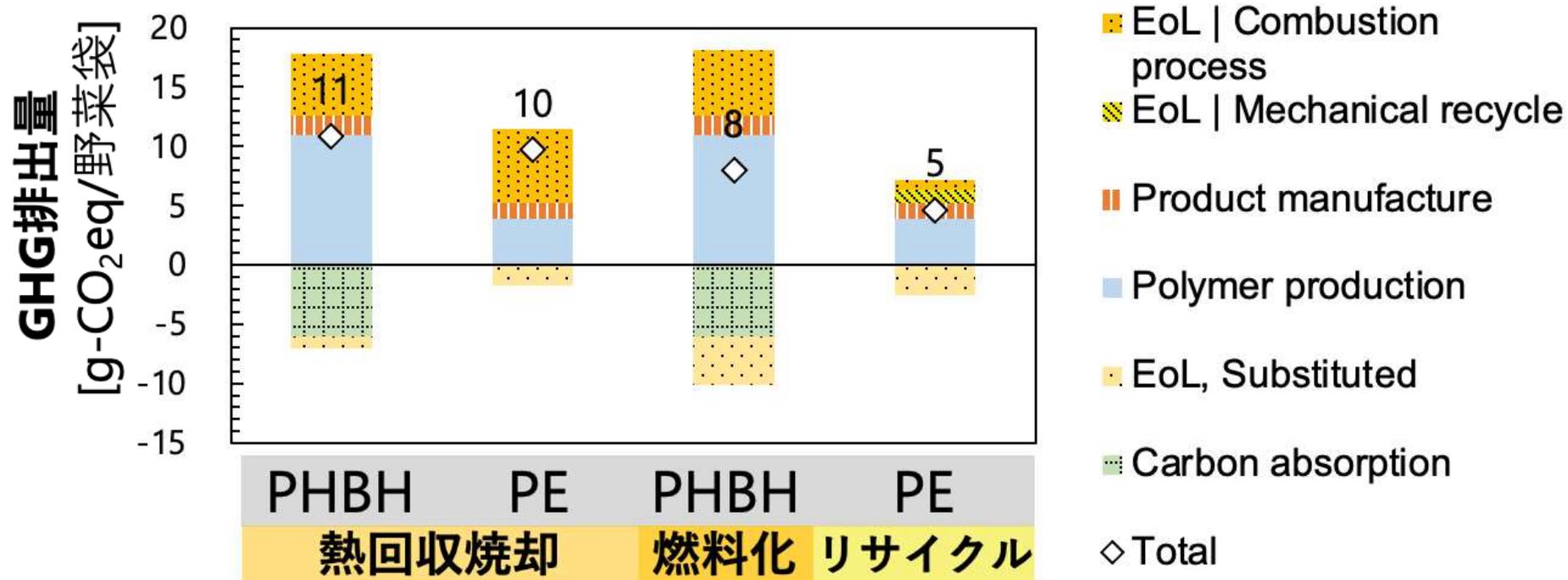


素材	PHBH				PE	
植物栽培	パーム油				大豆油 ¹⁾	砂糖 ¹⁾
	世界平均 ¹⁾	マレーシア ¹⁾	管理良 ²⁾	管理悪 ³⁾		
土地面積 [m ² year]	2.0				13.6	1.8
End-of-Life	熱回収焼却					

1) The ecoinvent database ver.3.5
 2) Y. Choo et al., *Int J LCA* 16, 669 (2011)
 3) Z. Hashim et al., *Int J LCA* 23, 1201 (2018)

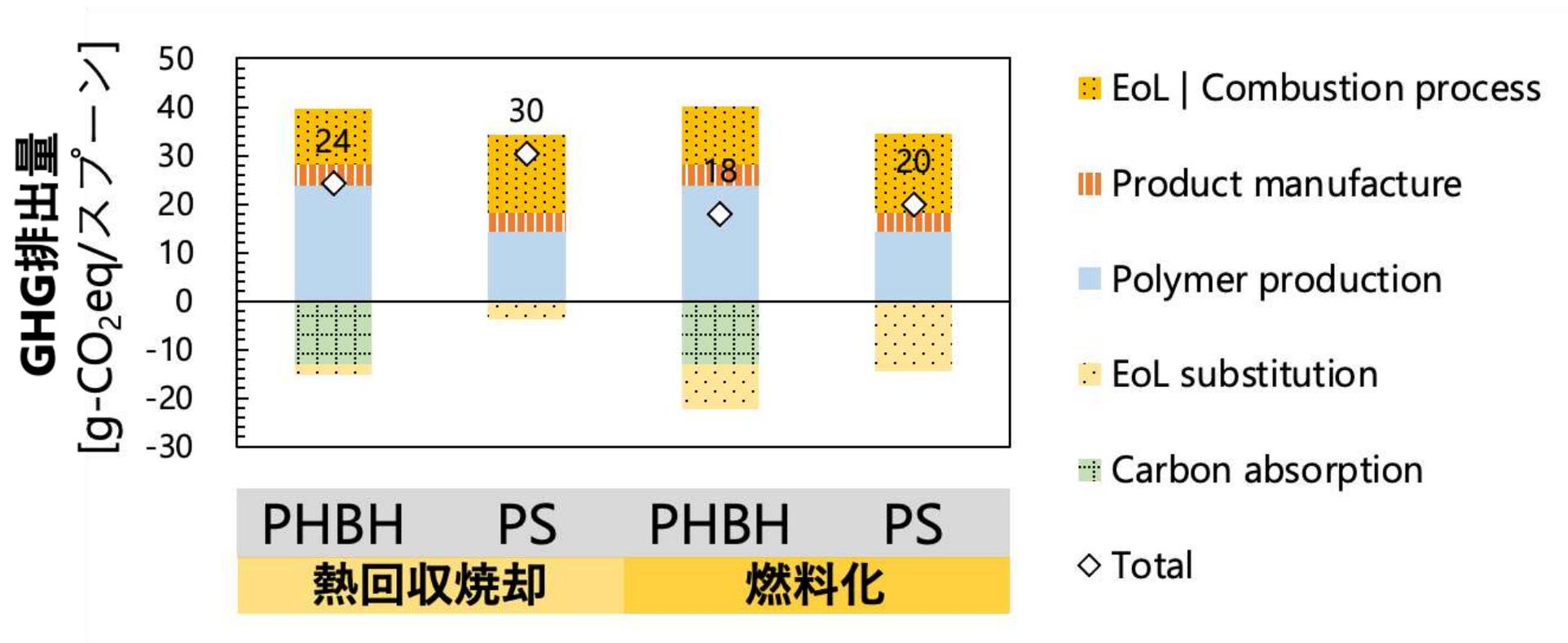
- パーム油の栽培は、農地の管理状況によって排出量が極端に異なる
- 植物の種類によっても、排出量は大きく違う

野菜袋



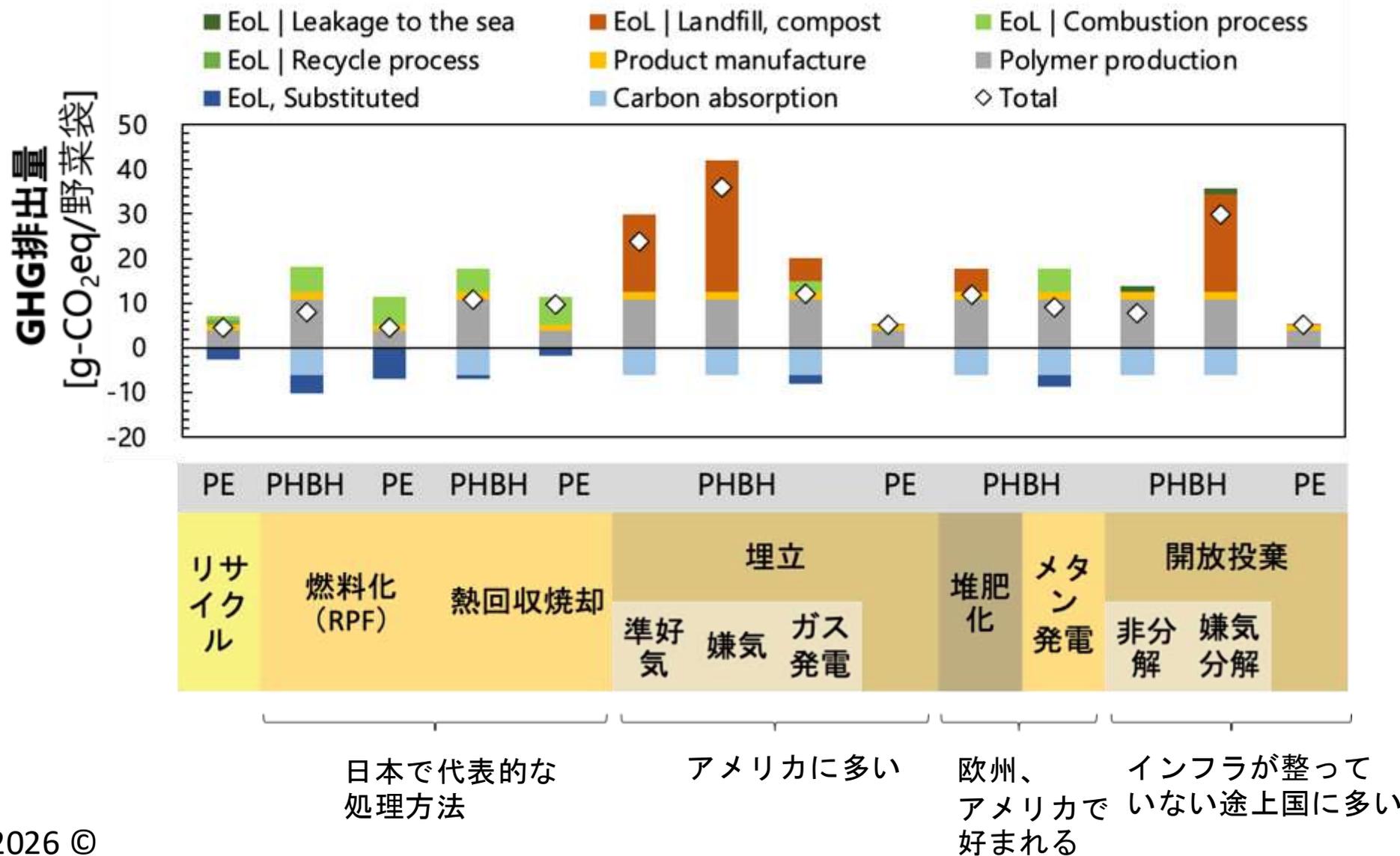
- 可燃ごみとして処理された場合（熱回収焼却）
PHBHとPEのGHG排出量は同程度
- PEのリサイクルシナリオが一番GHG排出量が小さい
→ リサイクルされている製品では、PEの方が有利

スプーン



- PHBHの方が製品あたりに使用する樹脂量が少ないため、どの廃棄シナリオの場合もPHBH < PSになる
- 樹脂製造の負荷が大きい材料を代替するほど削減効果が大い

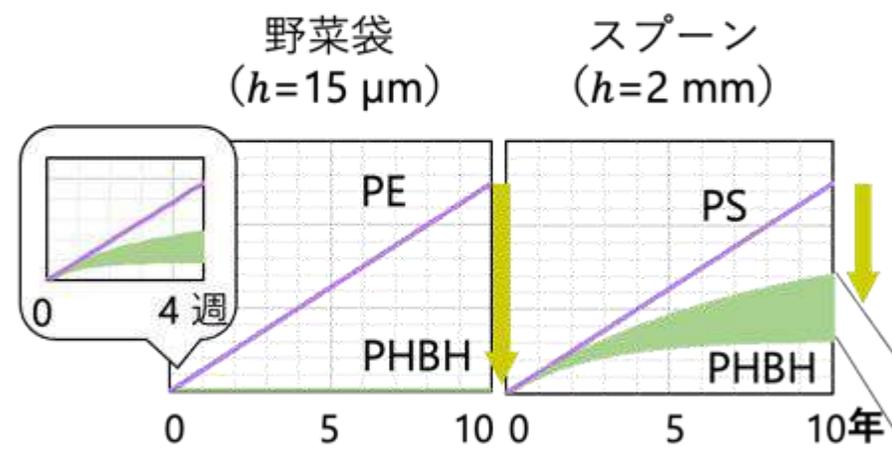
廃棄シナリオによるばらつき：野菜袋の例



海洋ゴミ蓄積量

野菜袋	スプーン
PHBH	PE
PHBH	PS
野外投棄または開放投棄	

海洋流失率が同じ場合



製品分解速度 R_i [day⁻¹]¹⁾

$$R_i = \frac{2r}{\rho h_i}$$

r 樹脂分解速度
 h_i 製品*i*初期厚さ

$$r = 0.04 \sim 0.12 \text{ mg day}^{-1} \text{ cm}^{-2}$$

海洋ごみの蓄積量 x_i [t]

$$\frac{dx_i}{dt} = m_i l_i - R_i x_i$$

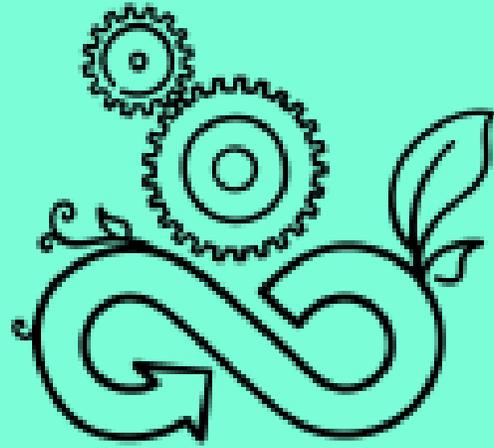
m_i 製品年間使用量
 l_i 海洋流出率

生分解速度低
生分解速度高

薄く表面積の大きい製品
(野菜袋) ほど分解が
早いため、海洋ゴミ削減に効果的

PHBHはどのように活用すべきか？

- Q1. PHBHは化石資源由来プラと比べて…
 - 気候変動の観点から
 - 野菜袋：すべての廃棄シナリオにおいてPHBHは劣勢
 - スプーン：生分解しないシナリオにおいてPHBHが優勢
 - 海洋ゴミ量の観点から…PHBHが有利
- Q2. どんな製品・地域にPHBHを導入すべき？
 - 製品化したときに、PHBHより質量が高い製品 (i.e. PSスプーン)
 - プラスチックのリサイクルインフラが整っている地域
 - 海洋ゴミだけ考えるのなら、PHBHが有利



3.LCAを実務に繋げるには

現社会におけるLCAの位置付け

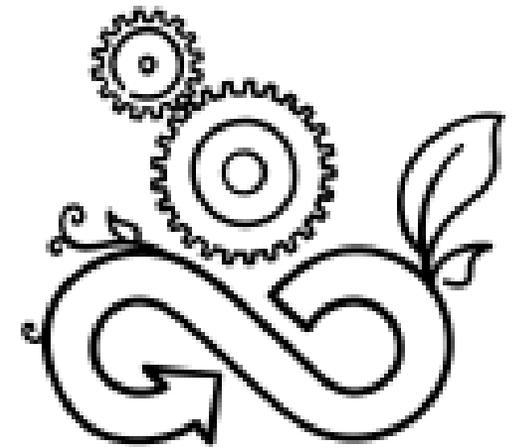
- 温室効果ガス (GHG) 算定手法として
 - カーボンニュートラル促進に向けて、企業活動や製品・サービスの温室効果ガス排出量の算定が推進
 - ヨーロッパでは算定の義務化が進む (デジタル・プロダクト・パスポートなど)
 - しかし、消費者への情報提供・行動変容ツールとしてはまだまだ機能していない
- GHGの算定のみではLCAとは言わない
 - 国内ではGHGのみが多いが、ヨーロッパでは複数の影響領域での算定を求められることも

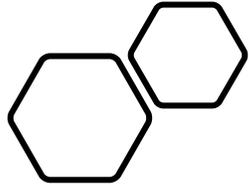
「LCAをやってみよう」と思ったら

- 何のために実施したいのか、何を対象に評価するのかを明確にする
- 専門家に相談する
 - 大学・研究所 → 対象とする分野によって専門家が異なる
 - 環境コンサルタント → 全般可能
- LCA人材育成講座

LCA手法 — 喫緊の課題

1. LCAデータの隔たりと不確実性
 - 繊維産業、製薬産業などは特にデータが欠如
 - インベントリごとに値が異なったり、バージョンアップによって結果が異なる場合がある
2. 影響評価指標の開発
 - Material circularity
 - Marine pollution など
3. 新規技術のLCA
4. LCA結果をどのように意思決定に反映するか
5. LCA人材不足
 - LCA知識の認証は必要か？





Thank you
amasawa@waseda.jp

