

ICT利活用した物流・サプライチェーンにおける温室効果ガス削減技術の研究開発



国立情報学研究所 凸版印刷(株) 日本ユニシス(株)

説明者: 佐藤一郎(国立情報学研究所)

研究目的

- 実地的なCO2排出量削減には実経済活動との親和性が必要
- 実経済活動である物流・サプライチェーンに対する新しいCO2排出量削減技術を提案
 - 物流に対する排出量削減
 - 商流による排出枠(排出権)取引

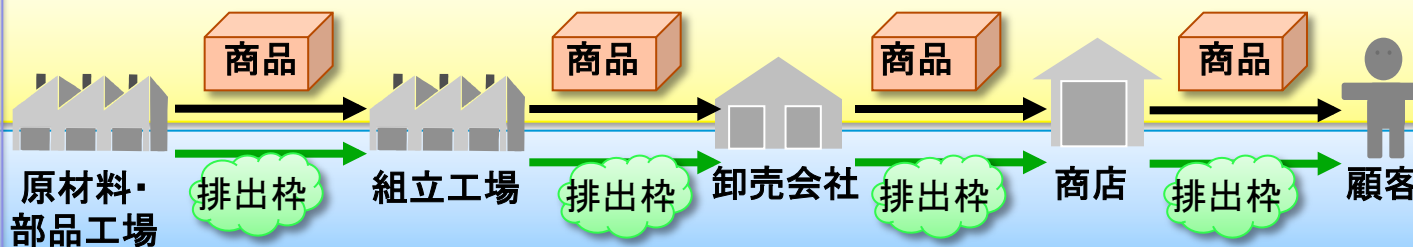
電子タグによる一体化

サプライチェーン

本研究の対象

物流トラック
排出枠付き商品

排出枠取引



本研究の効果

物流におけるCO2削減

排出枠需要の喚起

排出枠取引・カーボンオフセットの容易化

企業・個人

排出枠買取

政府

カーボンオフセット

- サプライチェーン(物流・商流)におけるCO2削減と排出量取引を提案
- 紙を原紙とする飲料缶の製造・流通に関わるサプライチェーンにおいて実証実験を実施



物流における排出量削減

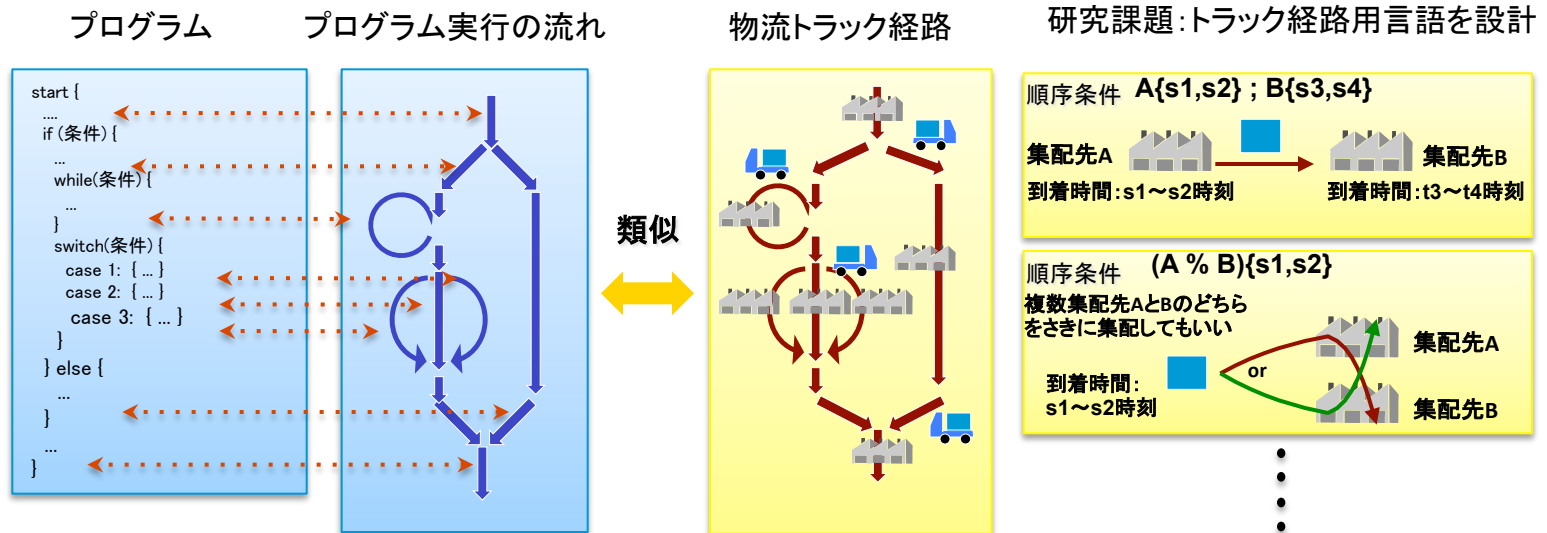


国立情報学研究所 凸版印刷(株) 日本ユニシス(株)

説明者: 佐藤一郎(国立情報学研究所)

成果:トラック経路記述言語

物流トラックの経路はプログラムの実行の流れと類似に着目



荷物の積み卸し = 集配力所(変数)とトラック(レジスタ変数)の読み書き
荷物の形、重量、数 = データの型

経路記述プログラミング言語: 多様な集配
経路・条件に対応、プロセス計算(Process
Calculus)として定式化・実装

- トラック経路を記述するプログラミング言語を設計、理論構築、実装
 - 最適化コンパイラ技術による経路の効率化
 - ソフトウェア検証技術による荷主の集配条件にあったトラックの選択

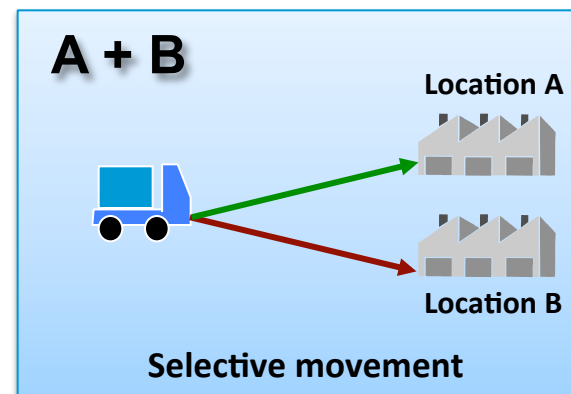
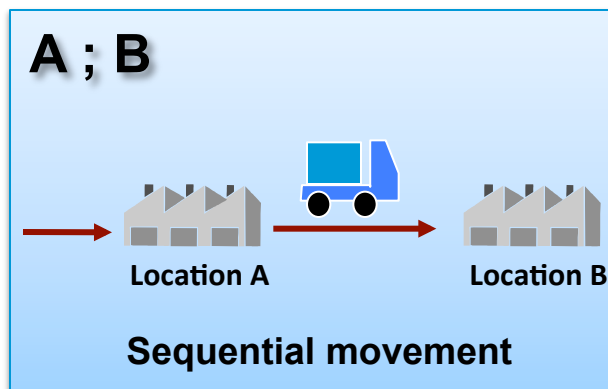
トラック経路記述プログラミング言語

■ 集配経路の記述言語(一部)

- 集配先をまわる順番、到着時間、移動時間他

$E ::= 0$ (Terminate)
| l (Destination)
| $E_1[t1,t2] ; E_2[t3,t4]$ (Sequential movement)
| $E_1 + E_2$ (Selective movement)

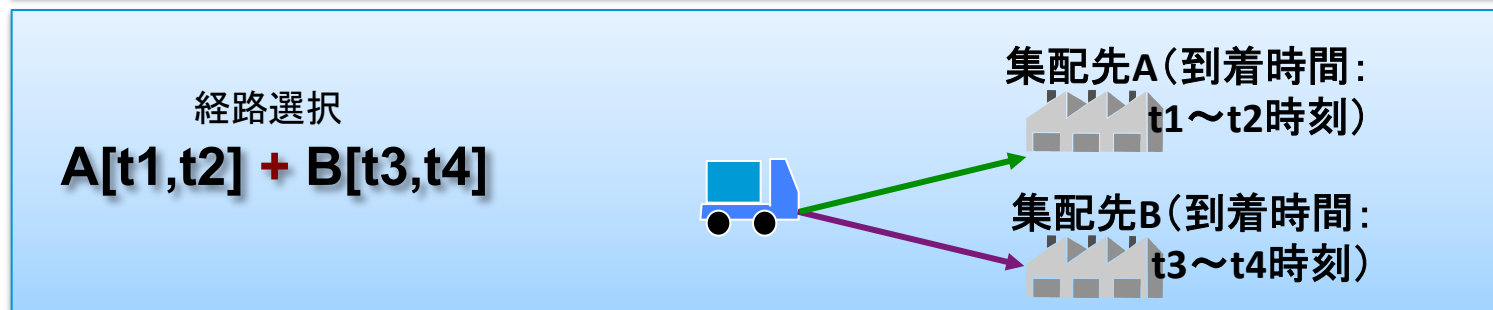
荷量と荷姿は変数
とデータ型として導
入
定義は操作意味論
に定式化



各トラックの運行計画表から経路記述プログラムに機械的変換可能(なはず)

経路記述用プログラミング言語

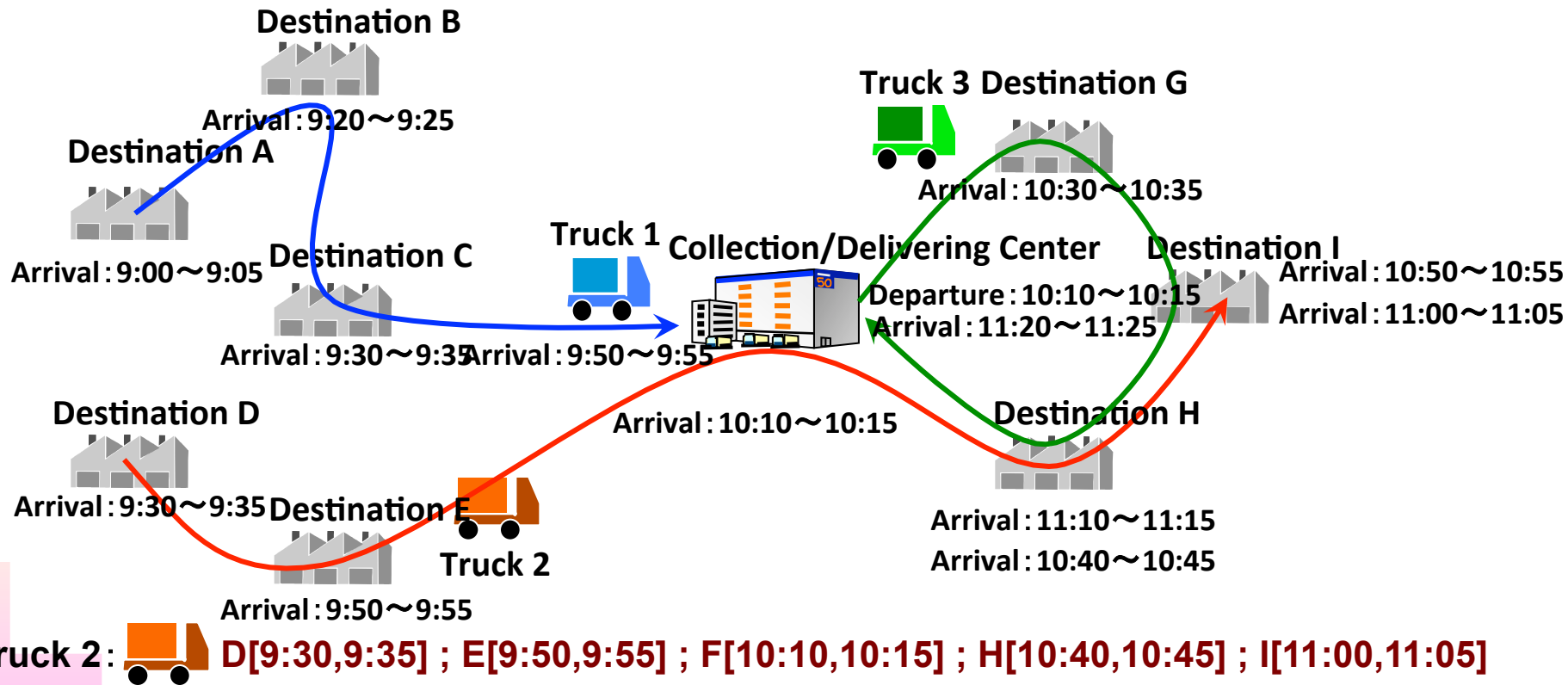
- 集配順序や集配時間の記述性をもつ専用プログラミング言語を開発



記述例

Truck 1:  A[9:00,9:05] ; B[9:20,9:35] ; C[9:30,9:35] ; F[9:50,9:55]

Truck 3:  F[10:10,10:15] ; G[10:30,10:35] ; I[10:50,10:55] ; F[11:20,11:25]



Truck 2:  D[9:30,9:35] ; E[9:50,9:55] ; F[10:10,10:15] ; H[10:40,10:45] ; I[11:00,11:05]

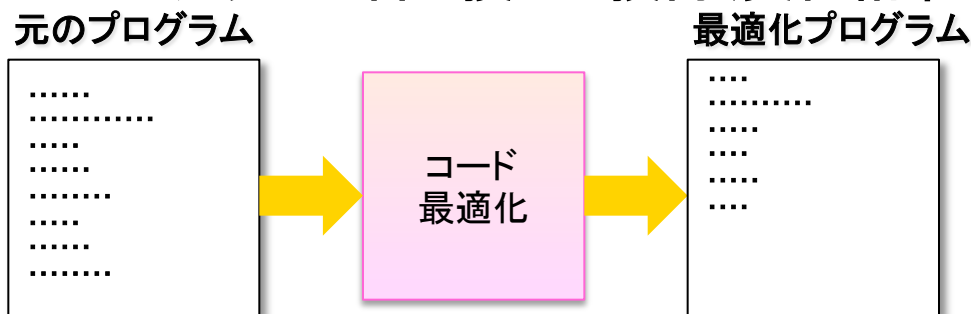
(A[9:00,9:05];B[9:20,9:35];C[9:30,9:35];F[9:50,9:55]) || (D[9:30,9:35] ; E[9:50,9:55] ; F[10:10,10:15] ; H[10:40,10:45] ; I[11:00,11:05]) || (F[10:10,10:15] ; G[10:30,10:35] ; I[10:50,10:55] ; F[11:20,11:25])

コンパイラとトラック経路

■ コンパイラのコード最適化手法

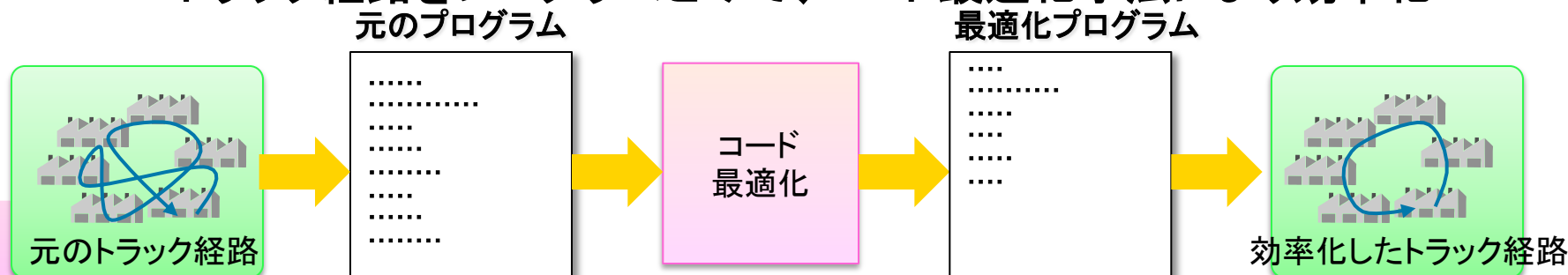
コンパイラはソースプログラムを機械語に変

- プログラムから無駄な実行を取る、実行順序を入れ替えて、効率のよいプログラムに書き換える技術(実行結果はかえない)



■ コード最適化をトラック経路の効率化に応用

- トラック経路をプログラムとみて、コード最適化手法により効率化



CO2削減効果: 実際の物流経路に対して10~20%の削減

▶ コード最適化によるトラック経路効率化

■ コンパイラのコード最適化手法によるトラック経路効率化

元のプログラム

```
t1:="文字A";  
t2:="文字B";  
t3:="文字C";  
print t1;  
print t2;
```

無駄なコードを除去、順番入れ替え

解析

```
t1:="文字A";  
t2:="文字B";  
t3:="文字C";  
print t1;  
print t2;
```

最適化

コード
移動

最適化プログラム

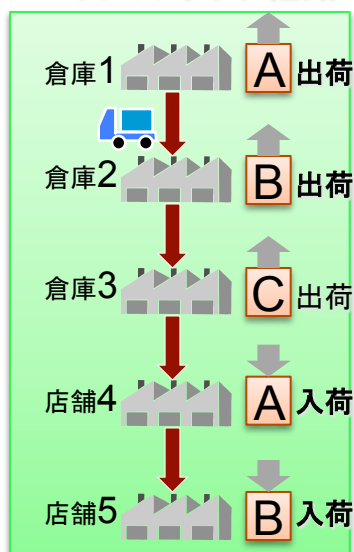
```
t1:="文字A";  
print t1;  
t2:="文字B";  
print t2;
```

コード最適化

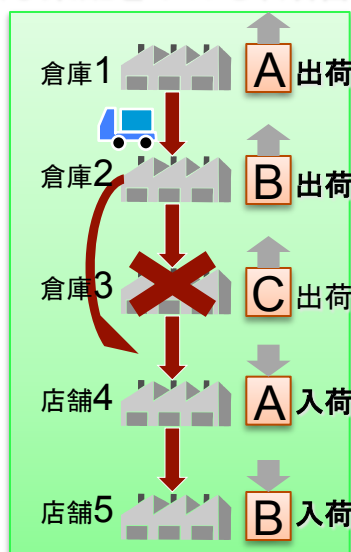
コード最適化
手法を利用

トラック経路
の効率化

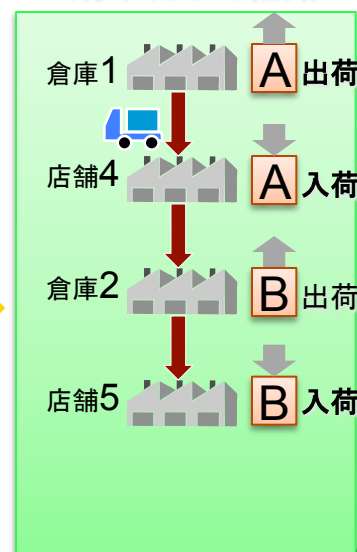
元のトラック経路



無駄な集配をやめる、順番入れ替え

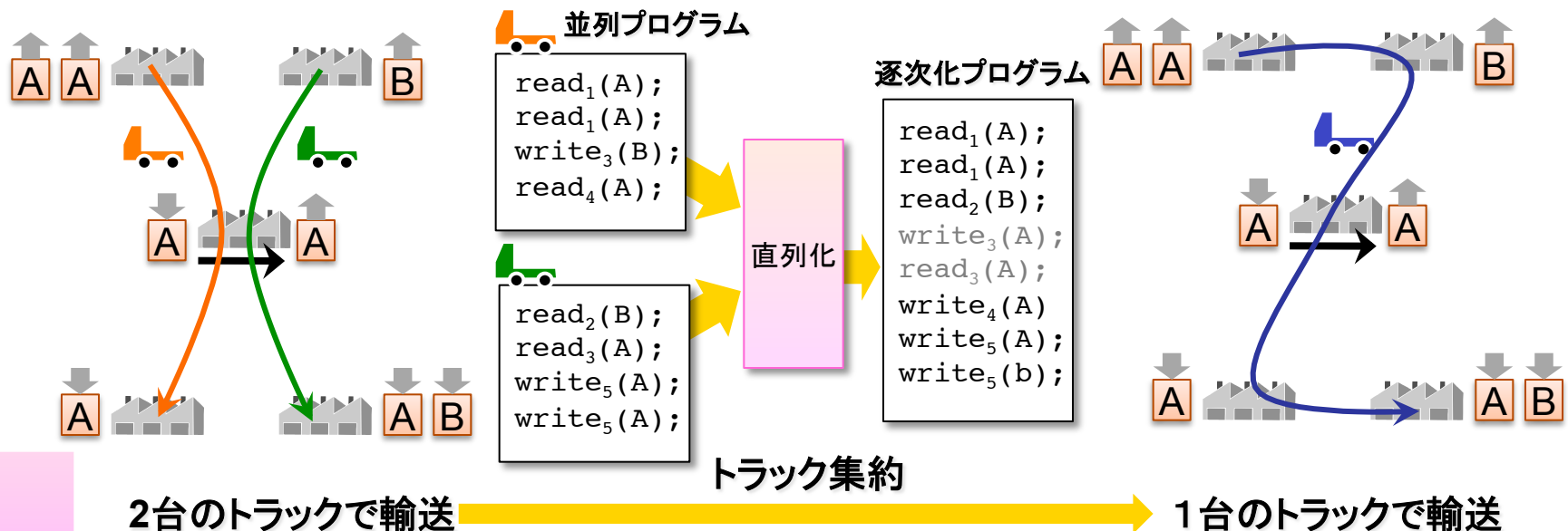


効率化した経路



トランザクション手法によるトラック台数削減

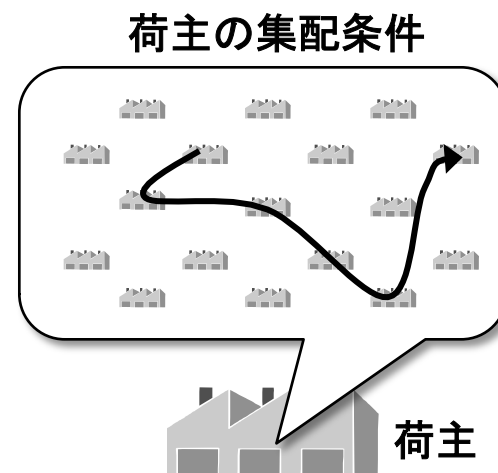
- 複数トラックによる輸送を一台のトラックに集約
 - 並列プログラム(複数トラック)を逐次プログラムに書き換え
- 集荷をデータ参照、配荷をデータ更新とみれば口座管理と同じ
 - 口座管理で使われるトランザクション(直列化)技術を利用
 - 集配(データ読み書き)に矛盾がでないようにトラック台数集約



CO2削減効果: 実際の物流経路に対して10~30%の削減

共同物流

- 多くの事業者が少数のトラックを共用する物流
 - 個々のトラックの効率化には限界
 - トラックは路線バスのように相違なルート・ダイヤで運行
 - 集配条件は複雑なので、集配を依頼するトラックを見つけるのが困難
 - 管理がたいへん(属人的な管理は無理)

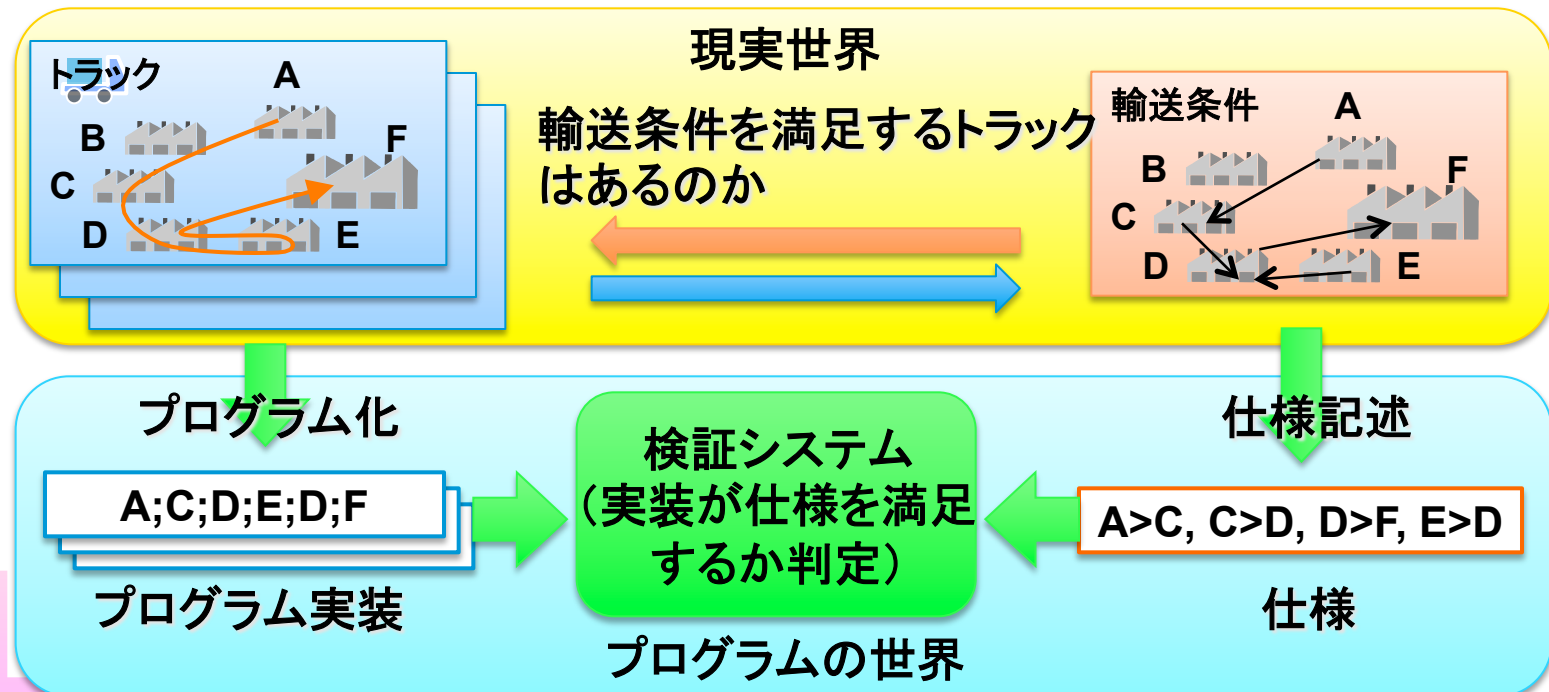


トラック数・経路が増え
るとトラック選択が困
難

トラック経路のプログラム化により、トラック選択にプログラムの手法が利用できる

ソフトウェア検証による共同物流管理

- 荷主の輸送条件をプログラムの仕様、トラック経路をソフトウェア実装として扱う
 - 実装が仕様を満足するか = トラックが輸送条件を満足するか
- PaaS型クラウドを想定した実装・提供



輸送条件を満足するもののうちで、移動距離が一番短いものを選択

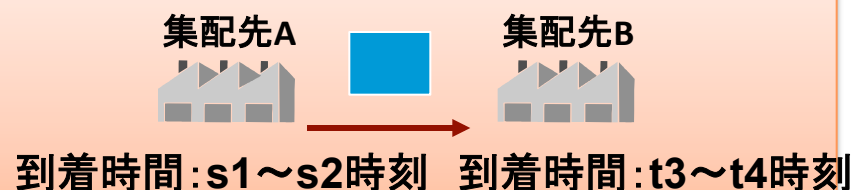
集配条件の記述(1)

■ 集配条件の記述

順序条件(時間制約付き)

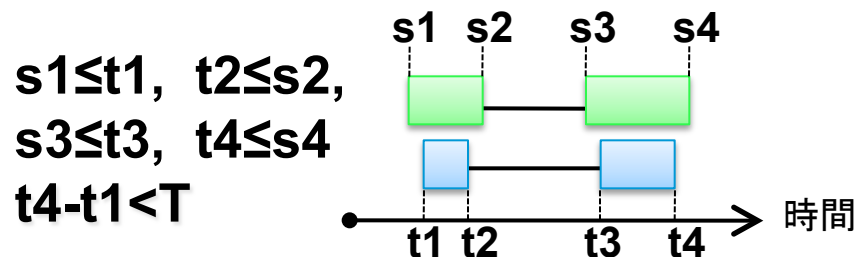
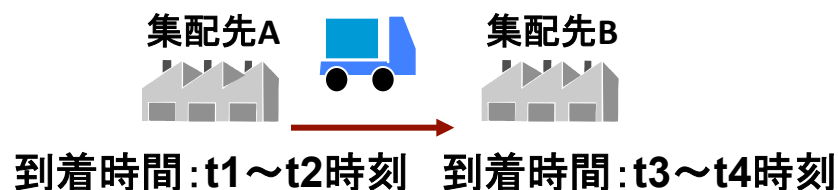
$$A\{s1,s2\} >_T B\{s3,s4\}$$

Tは最長輸送時間



条件 $A\{s1,s2\}$; $B\{s3,s4\}$ を
満足するトラック経路

$$A[t1,t2] ; B[t3,t4]$$



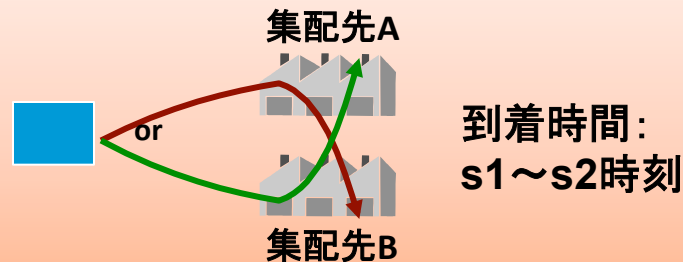
集配条件の記述(2)

■ 集配条件の記述

順序条件(時間制約付き)

$(A \% B)\{s1,s2\}$

複数集配先AとBの
どちらをさきに集配してもい

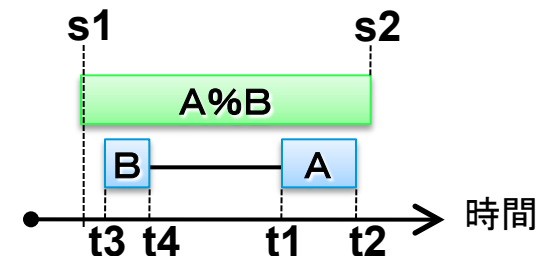
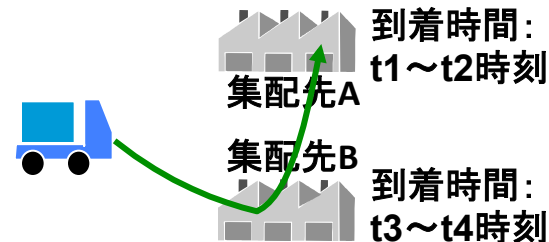
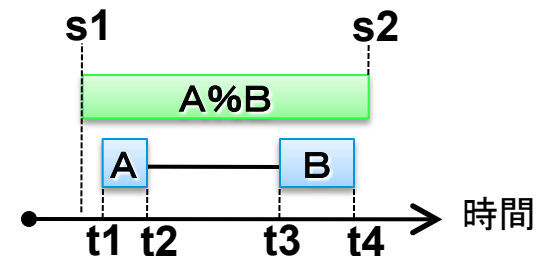
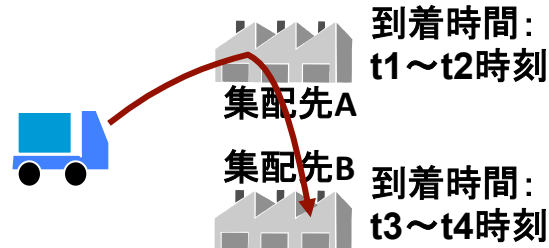


条件 $(A \% B)\{s1,s2\}$ を
満足するトラック経路

$A[t1,t2] ; B[t3,t4]$

または

$B[t3,t4] ; A[t1,t2]$



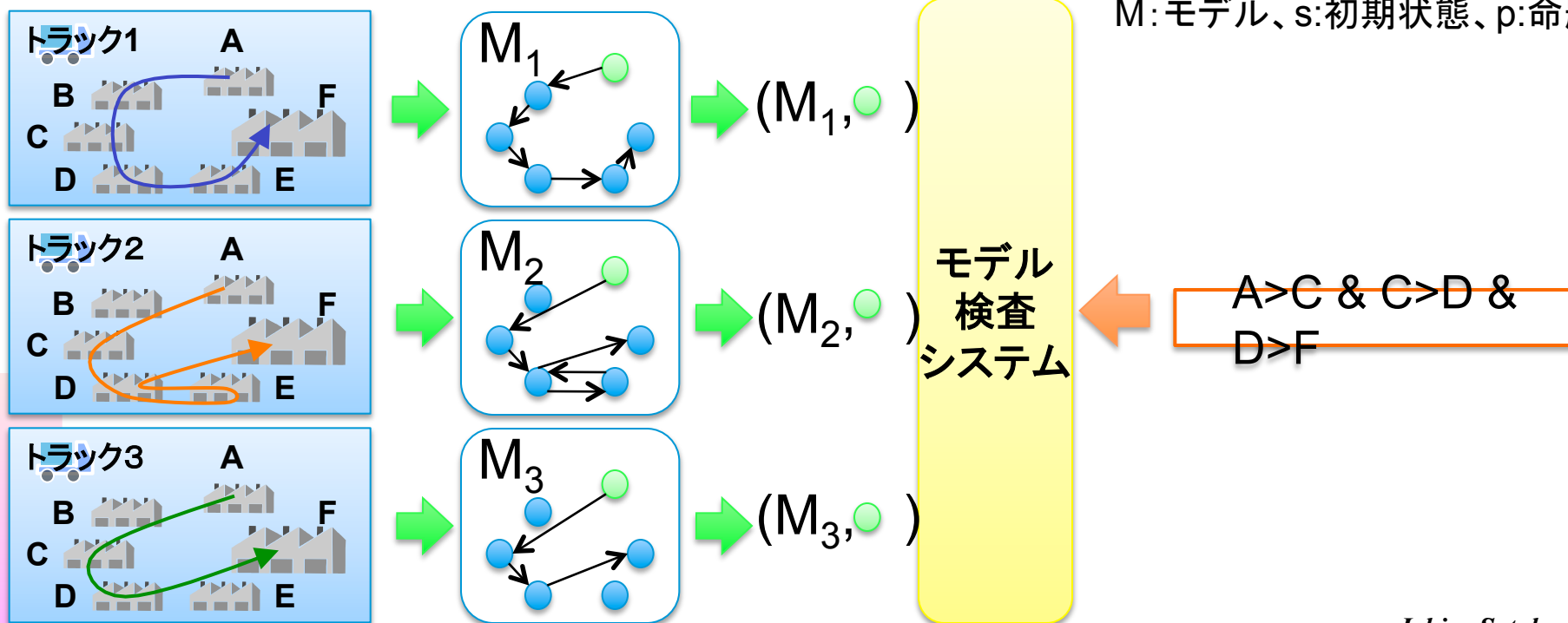
共同物流トラックの発見方法

- (実時間)時相論理のモデル検査(Model-Checking)手法を(そのまま)利用

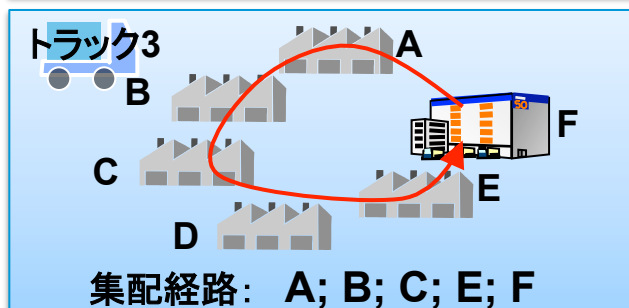
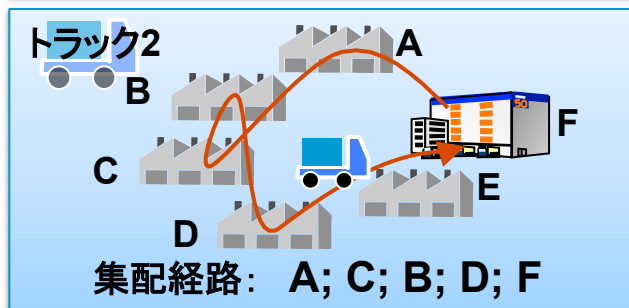
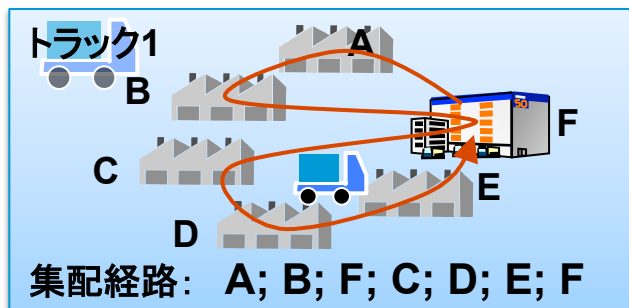
- 運行されているトラック経路をグラフ化(木構造)
- 集配条件を時相論理による命題として扱う

$$(M, s) \models p$$

M: モデル、s: 初期状態、p: 命題



共同物流トラック選択例(食品工場)

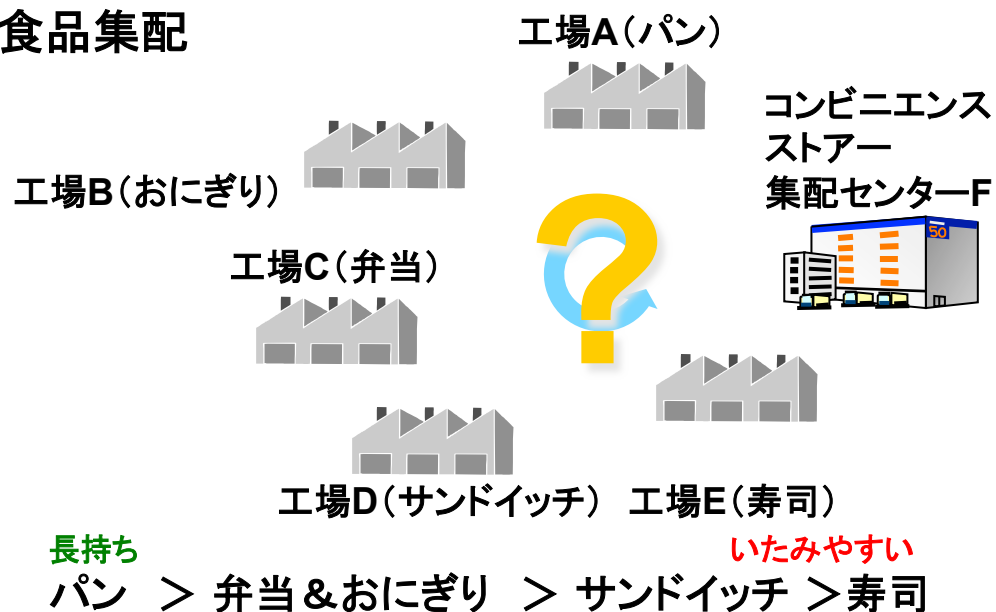


トラック1: A; B; F; C; D; E; F

トラック2: A; C; B; D; E; F

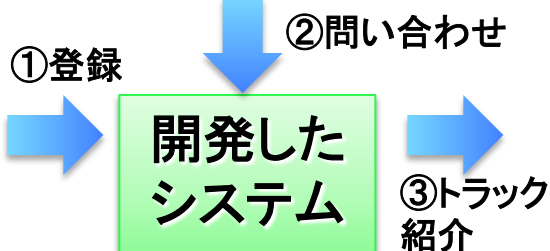
トラック3: A; B; C; E; F

食品集配



集配センター(F)の集荷対象:
パン(A)、おにぎり(B)、弁当(C)、サンドイッチ(D)

集配条件の記述: A > (B% C) > D > F



トラック2: A; C; B; D; E; F

商・金流における排出量削減



国立情報学研究所 凸版印刷(株) 日本ユニシス(株)

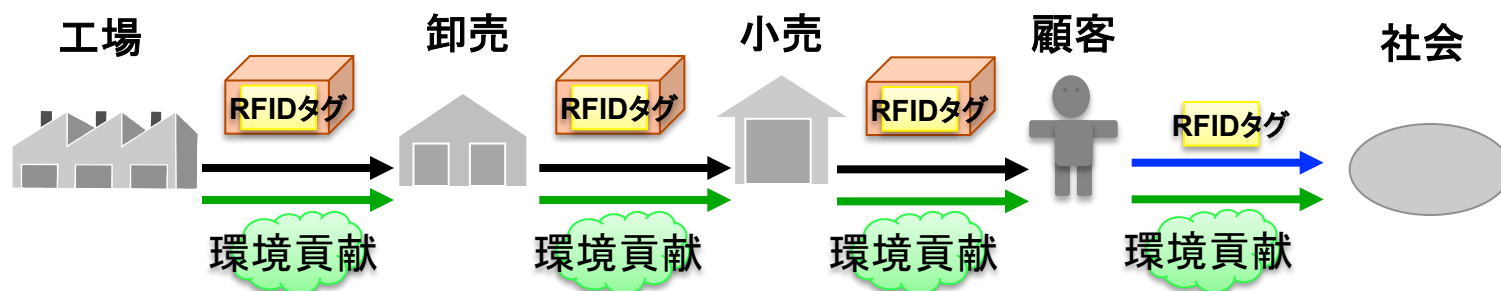
説明者: 佐藤一郎(国立情報学研究所)

▶ CO2排出削減の難しさ

- CO2排出削減は業務や活動の制限も出てきてしまう
 - 自発的・善意によるCO2排出削減は有意義だが、限界がある
- 排出権(排出枠): CO2排出削減に対して経済インセンティブ
 - CO2排出の削減を他社に売る(経済的対価をえる)
 - 排出権を購入してCO2排出を減らしたことにする(削減の再配置)
- CO2排出削減は実経済活動との親和性が必要
 - 実経済活動であるサプライチェーンを通した排出権の還流・売買
 - 排出権付き商品の実現
 - 簡単な排出量取引(排出権取引)

▶ 商流による排出枠取引

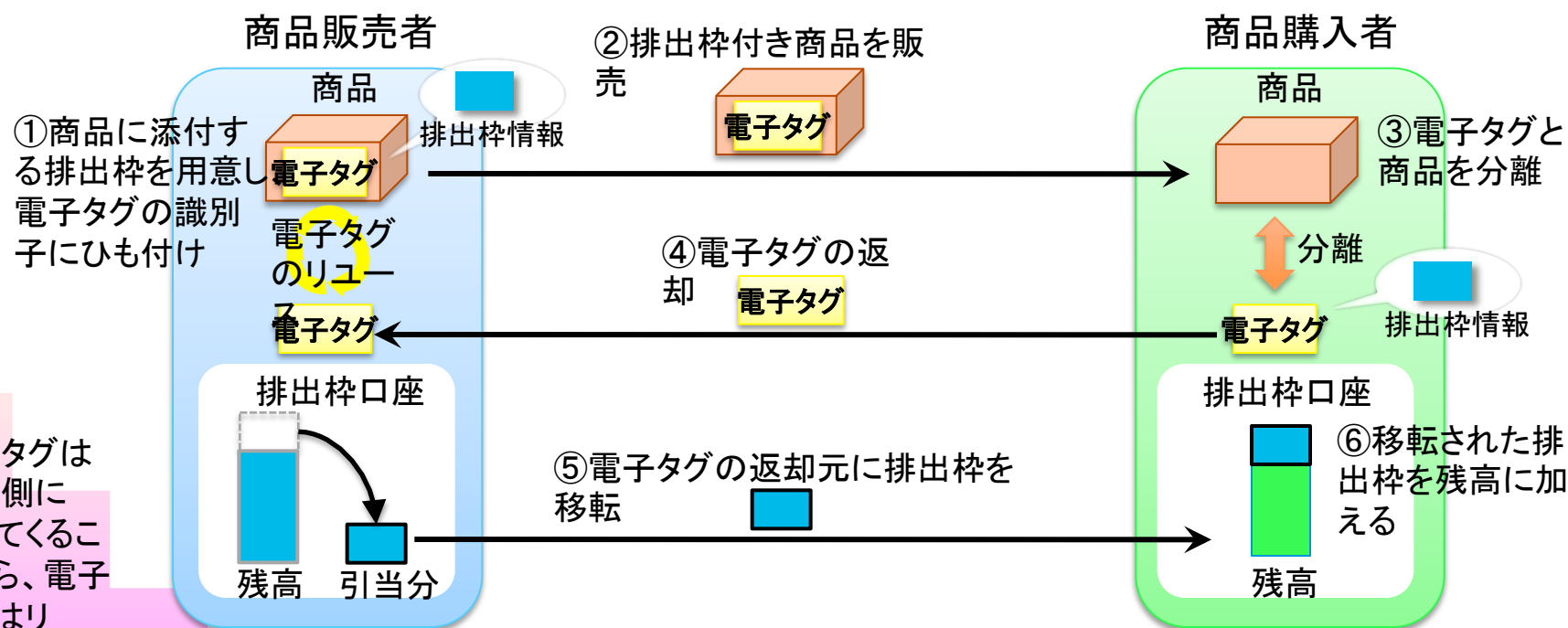
- サプライチェーンを通じて環境貢献を還流させるには
 - RFID／バーコードはサプライチェーン上を流れる商品に貼付
 - RFID／バーコードを使って環境貢献を還流



- RFID／バーコードで環境価値(例えばCO2排出権)を表せるか
 - 価値の尺度
 - 価値の交換媒体
 - 価値の貯蓄
- RFID／バーコードを排出権を表す
有価証券にできるか？

▶ 排出権付き商品

- 排出権を紐付けした電子タグ(またはバーコード)を用意
 - 電子タグを貼るだけで排出権付き商品(例:カーボンオフセット商品など)
- 商品添付の排出権が購入者に移転
 - 電子タグの返却により決済(電子的認証などの煩雑な処理をなくす)

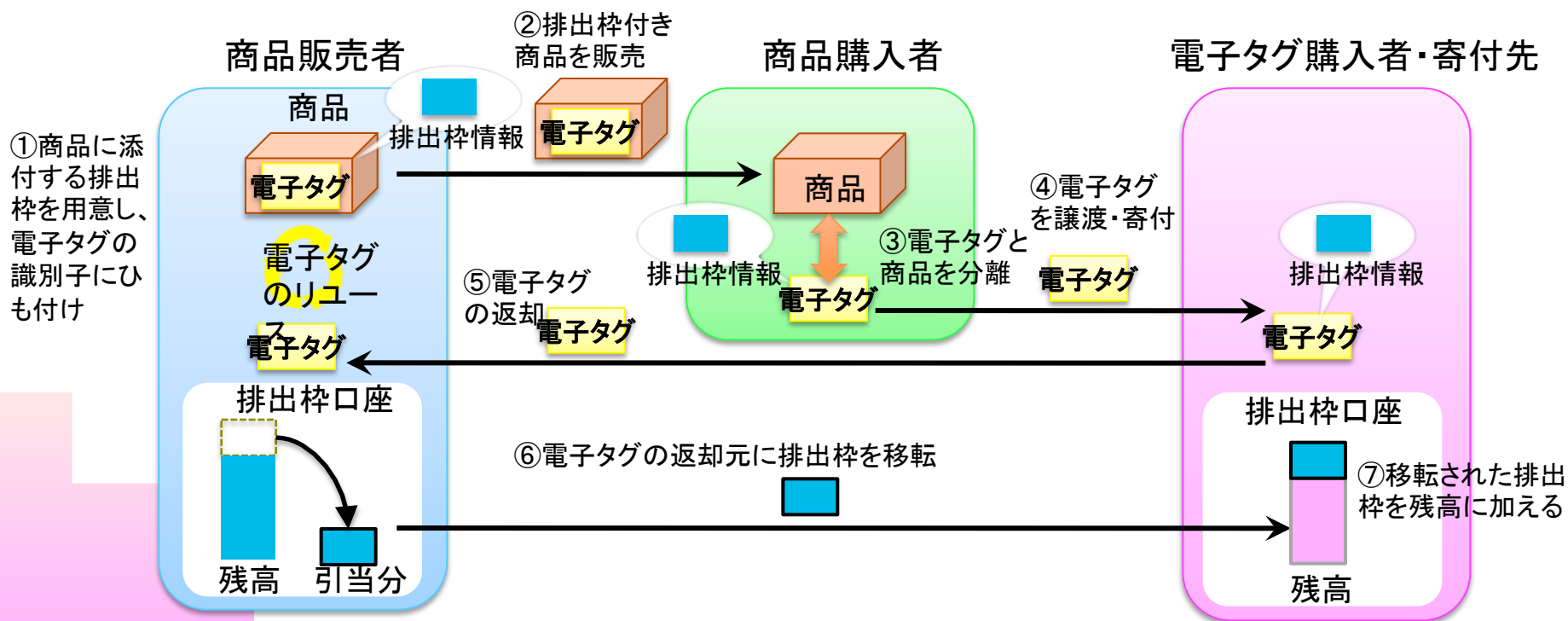


コペルニクス的なアイデア: 電子タグの返却を導入した

Ichiro Satoh

▶ 排出権取引の簡単化

- 電子タグ(またはバーコード)の受け渡しによる排出量取引
 - 電子タグの転売により排出権を第三者に寄付・譲渡(＝排出量取引)



排出権口座管理

データ構造設計は地味ですが、
研究上は一番たいへん

- 排出権は1トン単位にID、有効期間をもっている
 - 排出権口座は、お札の通し番号を全記録する銀行口座
 - 小口排出権の口座・決済システムの設計／開発は
新しい金融システムを設計／開発することと同じ
 - 排出権口座のデータ構造
 - 排出権取引のトランザクション
- } 新たに設計・開発

口座は排出権番号 $ID_1 \sim ID_N$ から構成されており、引当請求があった排出権が X 量としたとき、

$$X = \sum_{i=1}^N x_i \quad \text{ただし } x_i \leq W_i$$

口座番号	口座所有事業者	排出権識別番号	残高	引当分
00000001	X製造会社	ID_1	W_1	A_1
		ID_2	W_2	A_2
		...	...	...
		ID_N	W_N	A_N
	...	...		



口座番号	口座所有事業者	排出権識別番号	残高	引当分
00000001	X製造会社	ID_1	$W_1 - x_1$	$A_1 + x_1$
		ID_2	$W_2 - x_2$	$A_2 + x_2$
		...	...	...
		ID_N	$W_N - x_N$	$A_N + x_N$
	...	...		

補足：サプライチェーン環境貢献技術検討協議会

- 本協議会は、サプライチェーン全体でCO2排出量低減にかかわる様々な課題解決に向けた情報交換と、その仕組みの構築について協議する場として、CO2排出量低減に前向きな企業の関係者が集まり、設立された(会長：坂内正夫(国立情報学研究所・所長))



国立情報学研究所



凸版印刷(株)



日本ユニシス(株)



(株)セブン&アイ・ホールディングス



三菱UFJリース

三菱UFJリース(株)



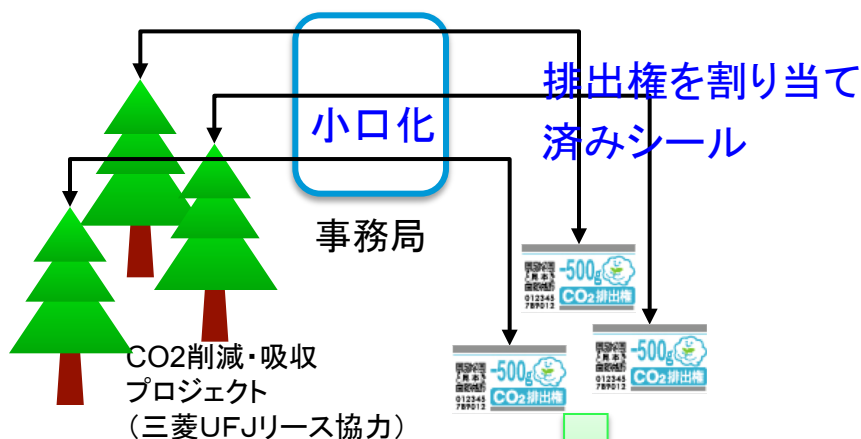
(株)ポッカコーポレーション

実験概要



サプライチェーン環境貢献技術検討協議
(国立情報学研究所、凸版印刷(株)、日本ユニシス(株)、
(株)セブン&アイ・ホールディングス、三菱UFJリース(株)他)

- RFIDタグまたはバーコードを埋め込んだシールを小口化した排出権に関する有価証券のように扱い、実際に取引・決済



実験実施者

サプライチェーン環境貢献技術検討協議会

実験期間

2011年2月9日～2月22日(対象商品販売期間)

実施場所

イトーヨーカドーアリオ北砂店(江東区)

シール返却者が指定する口座に移転

商品にシール添付

工場

販売

購入

シールを剥がす

シール提出

事務局

個人・
家庭

地域・
学校・
NPO

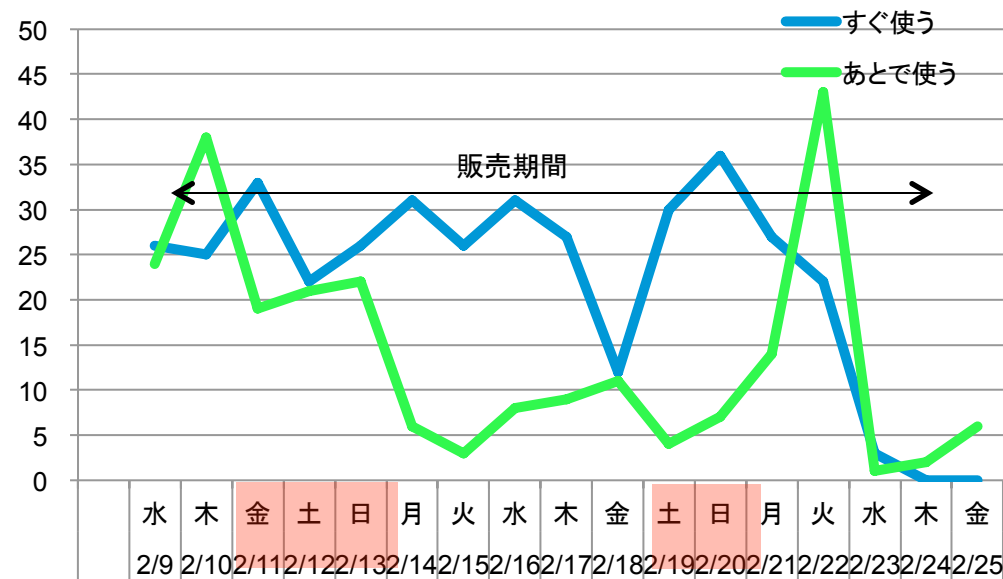
販売店(イトーヨーカドー北砂店) 消費者

サプライチェーン上流
における実証実験
(ポッカコーポレーション
他の協力)

実証実験・評価

実証実験上で一番難しいのは、
現場運用するための仕組み・準備

- 排出権シール付き商品の販売数(約5千個)
 - 平均販売数(実験前週の販売数)に対して、**3.5倍**
 - **排出権シール回収率:35%** (販促イベントと比べて30倍)
- 提案手法をパッケージング化
 - 専門知識がなくても排出権付き商品及び取引を実現可能に



実験概要

東北の排出権購入

東北の森林を
育てる活動資金
(=震災地域
への経済支援)

復興支援&環境貢献

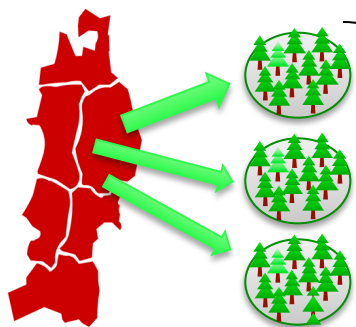
- 岩手県県有林における森林吸収量取引プロジェクト(岩手県)、
- 釜石地方森林組合による集約化施業(森林整備活動)を用いた温室効果ガス吸収事業(岩手県釜石市)、
- 三田農林株式会社 間伐促進型プロジェクト(岩手県盛岡市)

お客様が選択された
団体に排出権を寄贈

東北の復興支援
団体を支援！
(活動におけるCO2
をオフセット)

復興支援&環境貢献

排出権購入(復興資金)



東北地方(岩手県)3カ所が
販売する排出権(J-VER)



排出権

カーボンプロバイダー
(三菱UFJリース)

排出権

実験事務局の
店内カウンター

カード代金



排出権付き
カード

カードを贈られる方

プレゼント

排出権付き
カード

カードを受け取られる方

登録・選択
(QRコード)



012345
789012

実験事務局の
Webサイト

オフセット手続きは
三菱UFJリースが代行



▶ 実用化に向けて

- 実用化に道筋を付けるために、机上・シミュレーションだけでなく、実世界(実際のサプライチェーン、実顧客)で、**実用運用を想定した実証実験を実施**
 - **電子タグによる排出権取引**
 - 地方自治体(岩手県、富山市、仙台市)から実施依頼
 - 民間会社(カルビー(株)、三田農林(株)、ニッタ(株))から実施依頼(この他、問い合わせは多数)
 - 実施マニュアルなどの整備
 - **トラック物流効率化**
 - トラック側の改造は不要(実施費用は小さい)
 - 経産省の国内クレジットへの提案(協議中)
 - 既存方式(巡回セールスマン問題)より、実際向き

まとめ

- サプライチェーンを前提にしたCO2排出削減及び排出権取引手法を提案し、その実証実験を進めた

- 論文などの成果

本研究開発による成果数一覧

	平成 21 年度	平成 22 年度	平成 23 年度	合 計	当初目標* ⁵
読付き論文数* ¹	2 件 (1 件)	12 件 (10 件)	12 件 (11 件)	25 件 (20 件)	13 件 (-件)
の他の誌上発表数* ³	2 件 (0 件)	4 件 (3 件)	3 件 (1 件)	9 件 (4 件)	14 件 (-件)
頭 発 表 数 * ⁴	2 件 (0 件)	3 件 (1 件)	7 件 (0 件)	12 件 (1 件)	14 件 (-件)
請 特 許 数	0 件 (0 件)	1 件 (1 件)	2 件 (1 件)	3 件 (2 件)	9 件 (-件)
道 発 表 数	1 件 (0 件)	2 件 (0 件)	1 件 (0 件)	4 件 (0 件)	6 件 (0 件)

注：() 内は、外国語による件数を内数で記載

本研究に関わる論文の参照数:33

- 実用化に向けた成果

- 実際のサプライチェーン上で実証実験を行い、実用化に道筋
- 実施コストの削減手法(必要ICT設備を最小化、通信切断への対応、バッチ処理化、バーコードで代用他)