

情報学による低炭素社会の実現

現実世界のOSは作れるのか



佐藤一郎

国立情報学研究所

e-mail: ichiro@nii.ac.jp

Twitter: [ichiro_satoh](https://twitter.com/ichiro_satoh)

<http://research.nii.ac.jp/~ichiro>

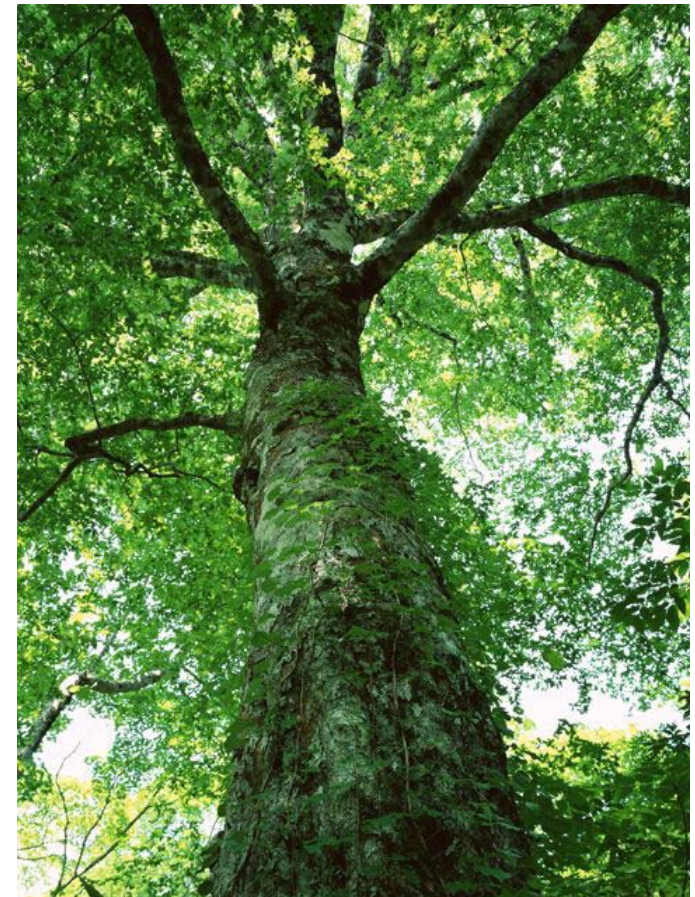


講演概要

コンピュータサイエンスを含む情報学による現実世界の効率化・低炭素化

1. はじめに
2. コード最適化による物流トラック経路の効率化
3. リソース配分としての排出量取引
4. 現実世界のOSは作れるのか
5. まとめ

配付資料に変更・加筆があります
クラウドの話はしません



Ichiro Satoh

▶ コンピュータサイエンス

- 情報学の柱の一つ。情報と計算の理論的基礎、及びその計算機上への実装と応用に関する研究分野。例えば
 - 高価かつ低性能だったコンピュータを最大限に利用する技術
 - ソフトウェアが正しく動くかを調べる技術



IBM System/360
(1964年)
8 MIPS、
128K～1024KB

Ichiro Satoh

▶ 温室効果ガスの削減

- CO2を含む温室効果ガスの削減は社会的要求となっている
 - 京都議定書における6%(1990年比)の削減目標の達成期間中(2008-2012年)は削減どころか増加
 - 既存手法による削減では限界
 - 2020年までに25%(1990年比)削減は
 - 新しい手法なくして実現できない
- ITを活用した温室効果ガスの削減手法が注目を集めている
 - 例: コンピュータを使った空調管理、在庫管理システムなど
 - ただし、ITを間接的に利用しているだけ



「コンピュータを使って」ではなく、コンピュータの手法を
直接応用できないのか

情報学は環境問題に貢献するか

- 温室効果ガスの増加を含む環境問題の背景

- 環境負荷の多くは現実世界の非効率さに起因
 - 道路渋滞、過剰在庫他
- 非効率性の解消すれば環境負荷とコストを削減



- コンピュータサイエンスは、コンピュータを効率的に利用する技術が発展

- 例:コード最適化はプログラムを効率的に実行できるように書き換える
- 例:OSは計算リソースを共有・効率利用する技術の集大成

- コンピュータサイエンスを、コンピュータではなく、現実世界に応用

- コンピュータと現実世界はちがう。どうやってコンピュータ向けの効率化手法を現実世界に応用するのか(研究のポイント)
- 現実世界の効率化や低炭素化に役立てられるのか

▶ 物流による環境負荷

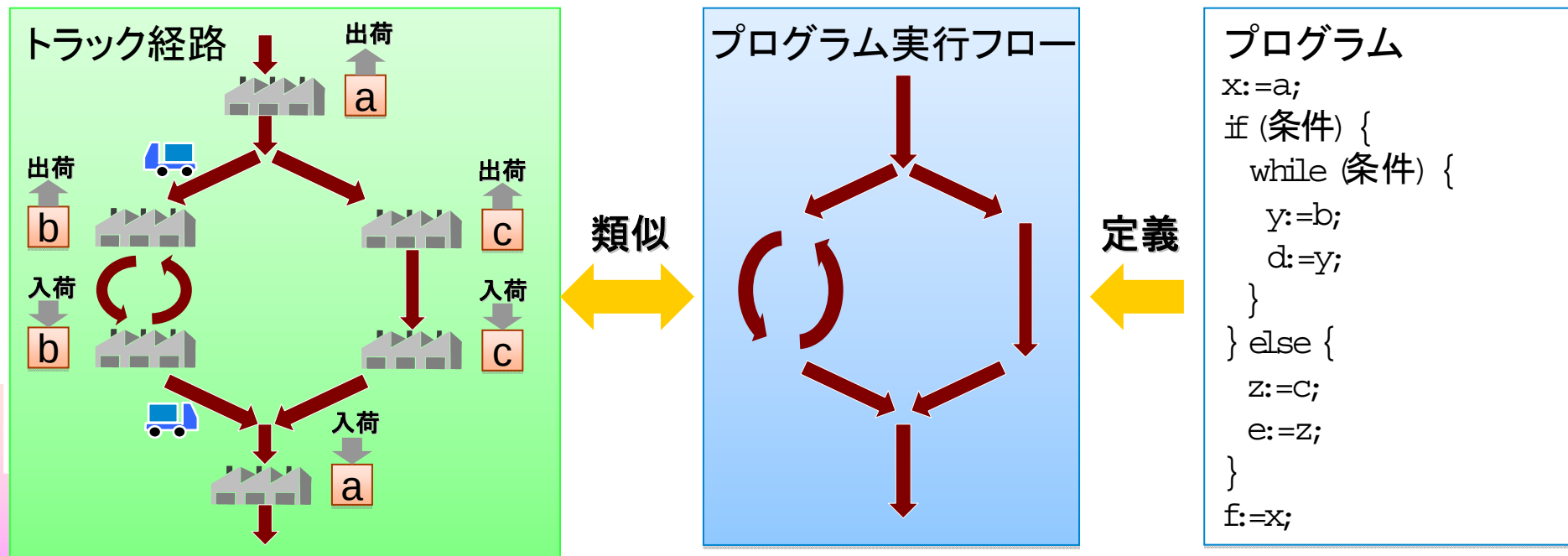
- 国内CO2排出量の約2割は運輸部門（H20年度、2億4千万トン、約9割が自動車）
 - トラックを含む自動車のCO2排出量削減は急務
 - 物流のオペレーション方法は類似（一つ削減手法で大きな効果）
 - 個々の自動車のCO2削減には限界
 - 物流トラックの運用効率化とともに、台数削減が必須
 - 自動車の生産・廃棄に関わる排出は多い



コンピュータサイエンスの効率化手法を、どのようにして物流トラックに導入するのか？

▶ プログラムとしてのトラック経路

- 物流業界からトラックの燃料代削減の相談を受け、トラック経路の運行データを見せもらう
 - **トラック経路とプログラム実行フローの類似性を発見**
- **プログラム向け手法によりトラック経路を効率化できるはず**

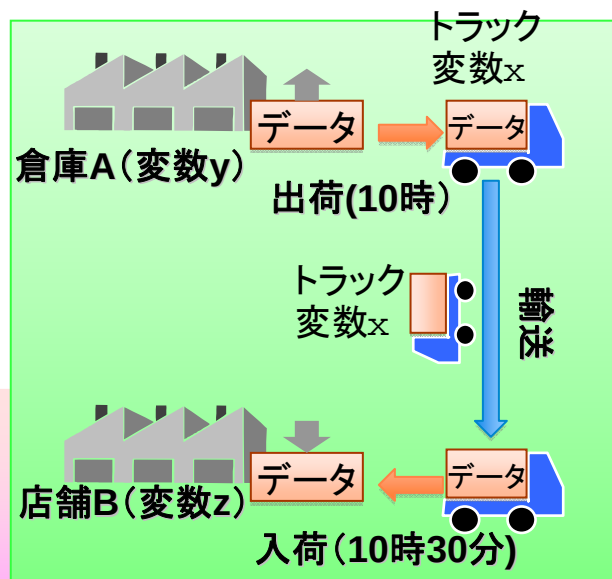


トラック経路を表すプログラミング言語を作れば、プログラム向けの技術が利用できるはず

Ichiro Satoh

▶トラック経路の記述言語

- トラック経路を記述する専用言語を設計
 - 荷物はデータ
 - トラックはデータを変数(倉庫)から変数(店舗)に運ぶプログラム
 - 到着・出発時間、輸送時間



記述



```
y ↑ x@ A [10:00]
(変数yのデータを変数xに格納)

x ↓ z@ B [10:30]
(変数xの中身を変数zに格納)
```

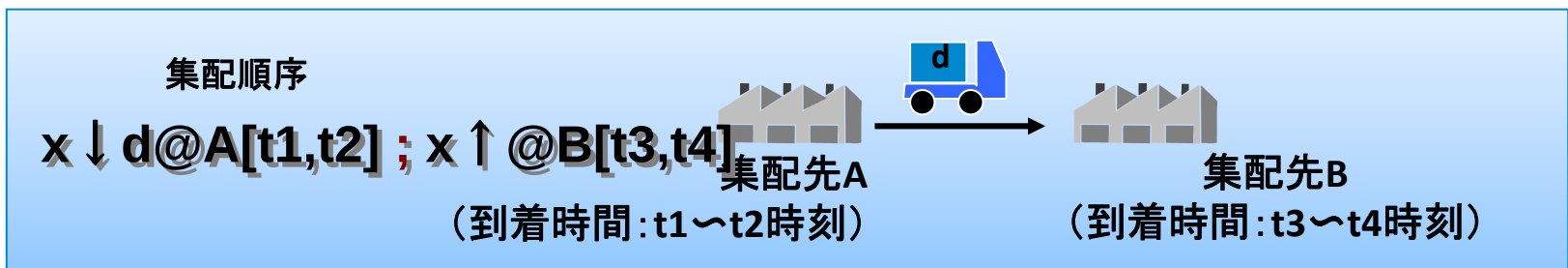
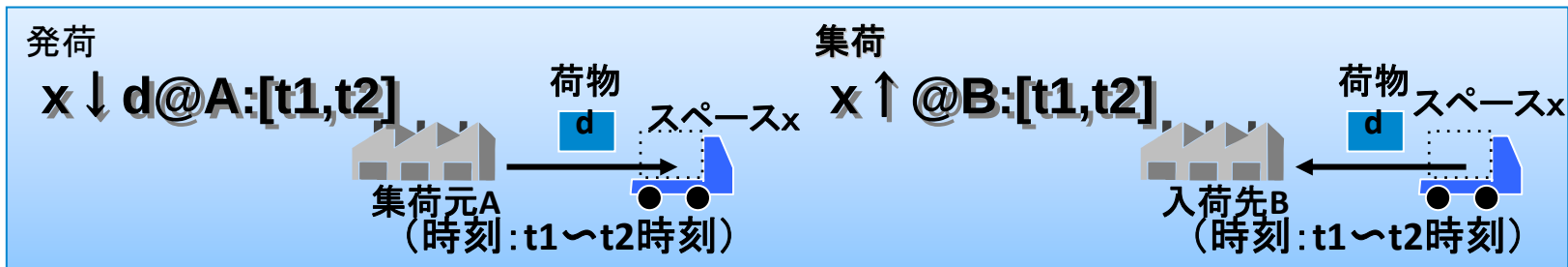
- 荷量や荷姿はデータ型として導入
- 型チェック・推論で積載可能性を調べる
- この他、条件文や繰り返し文をもつ

トラック経路を表すプログラムとして、プログラム向けの技術で効率化・管理可能

Ichiro Satoh

経路記述用プログラミング言語

- 集配順序や集配時間、発荷・集荷を表す専用プログラミング言語



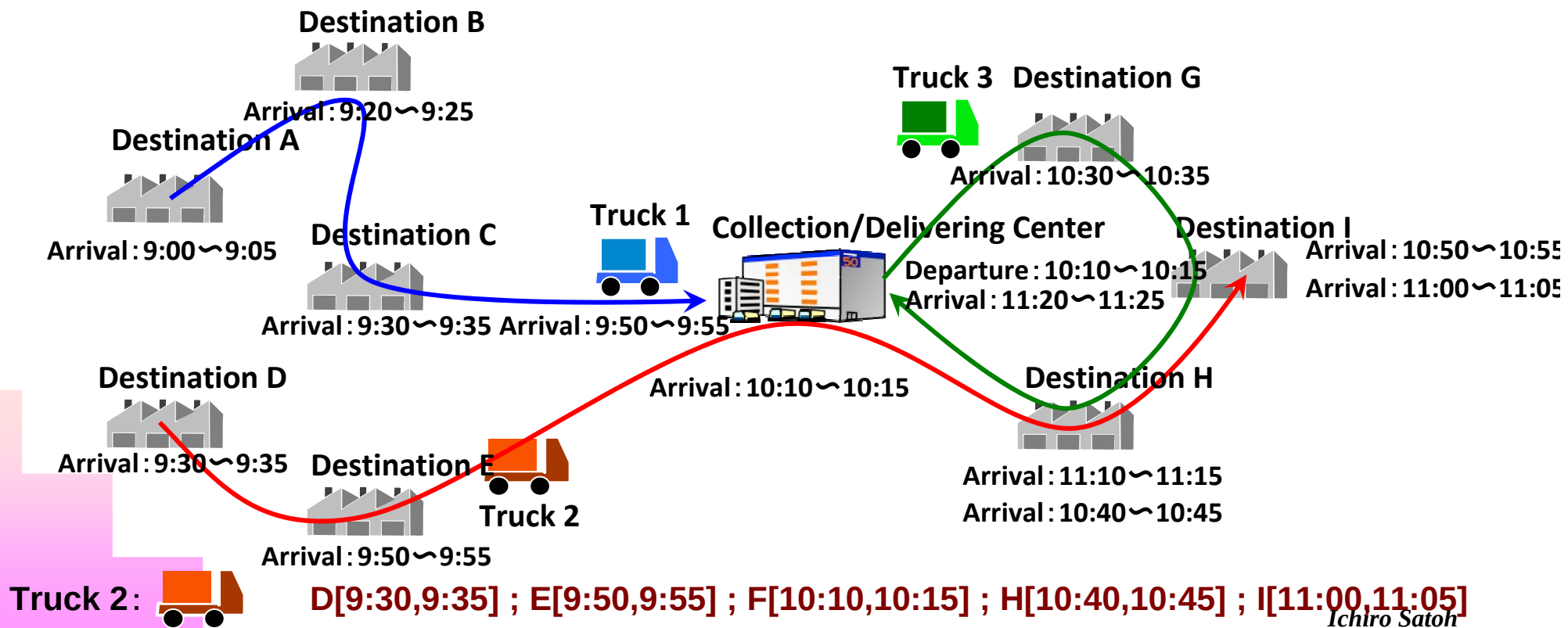
プログラミングが人間が読み書きする言語ではなく、あくまでも機械処理用言語

記述例

- ジャストインタイム輸送や物流センターの積み替えなどがプログラムとして記述可能（ただし、人間が読み書きするためのプログラミング言語ではありません）

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]



Ichiro Satoh

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

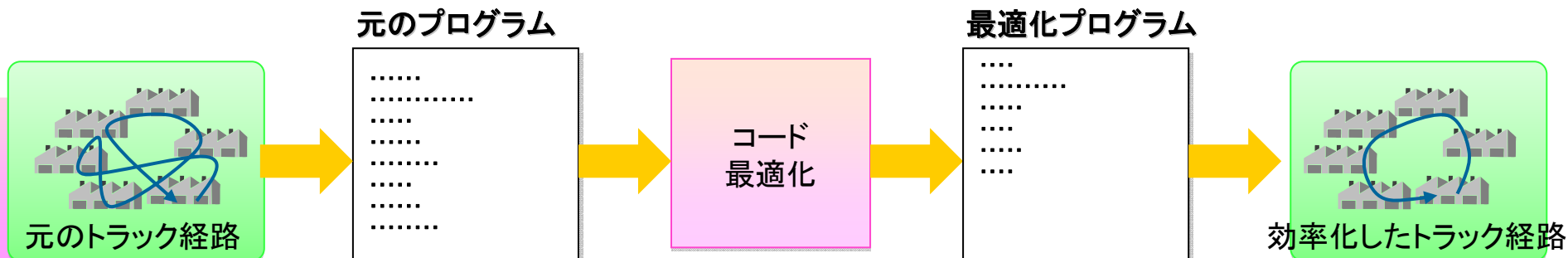
コンパイラはソースプログラムを機械語に変換

- 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



▶ 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

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;
```

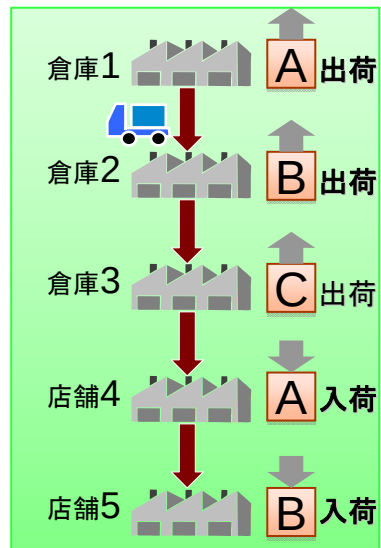
最適化

コード
移動

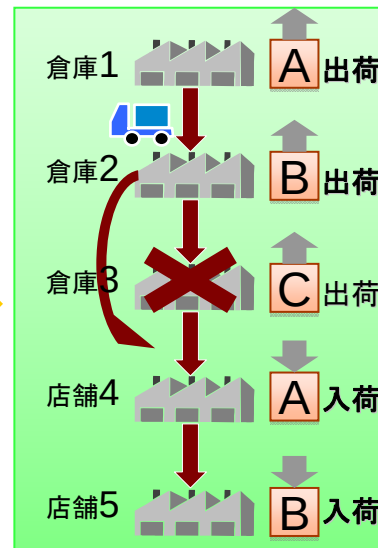
最適化プログラム

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

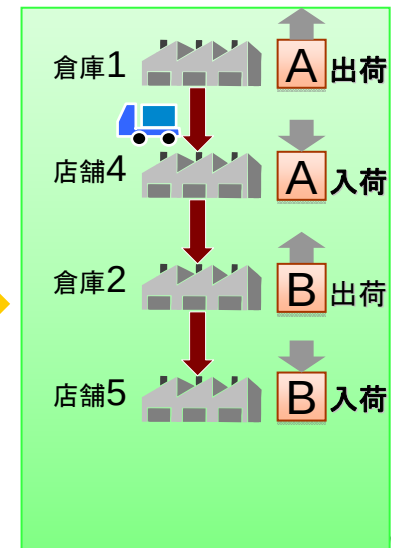
元のトラック経路



無駄な集配をやめる、順番入れ替え

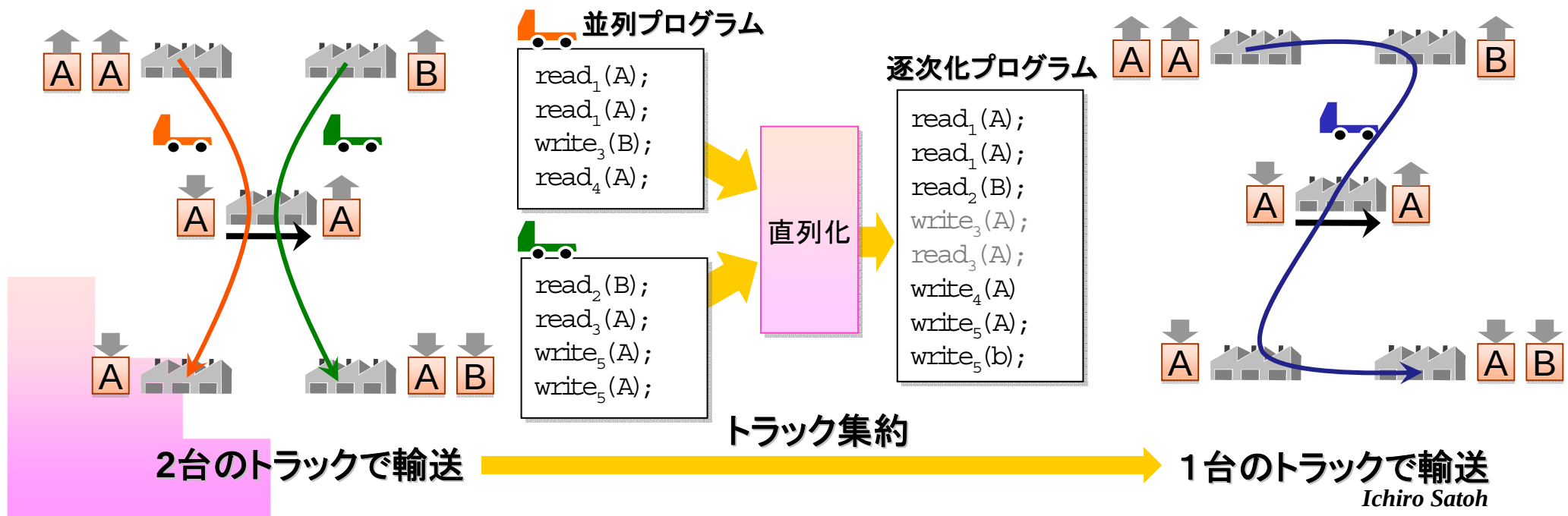


効率化した経路



トランザクション手法による トラック台数削減

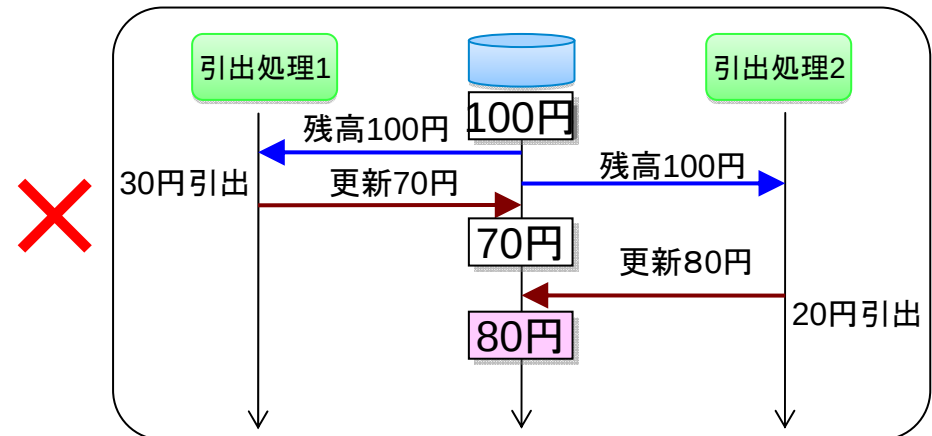
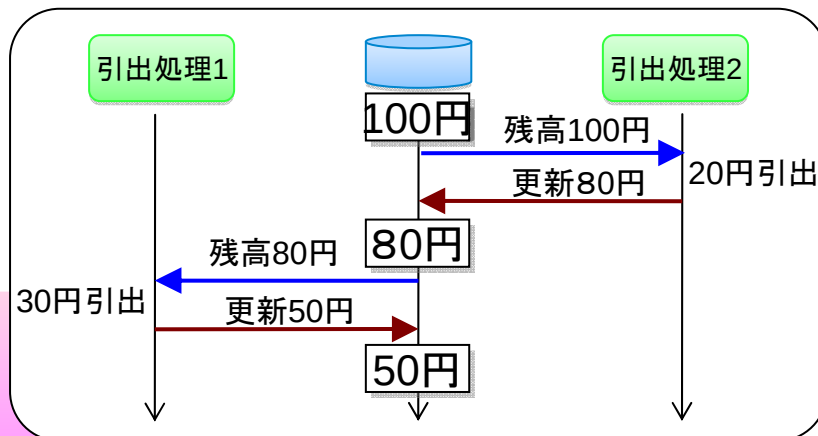
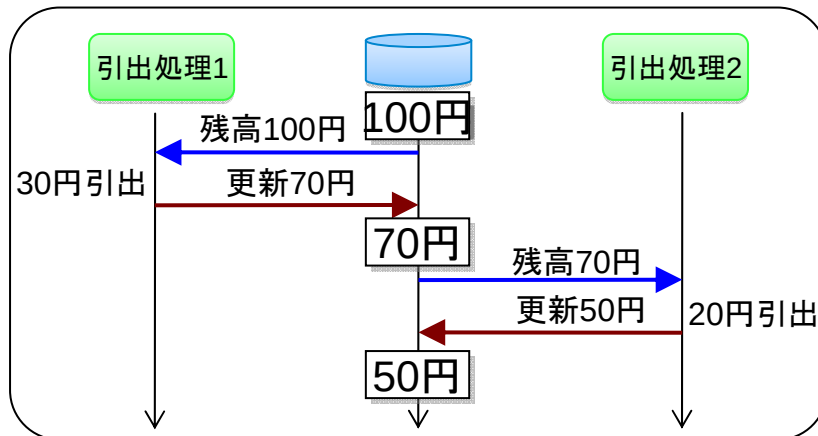
- 複数トラックによる輸送を一台のトラックに集約
 - 並列プログラム(複数トラック)を逐次プログラムに書き換え
 - 適切に書き換えないと矛盾がおきる
- 集荷をデータ参照、配荷をデータ更新とみれば口座管理と同じ
 - 口座管理で使われる直列化技術を利用(矛盾が出ない順番で一つずつ実行)



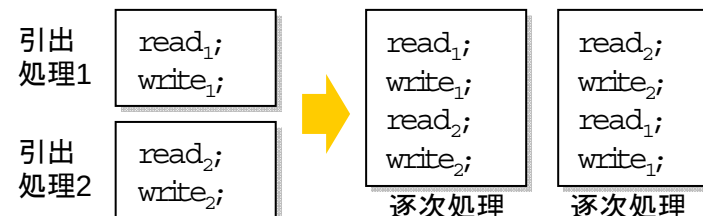
銀行口座とトラック台数

■ 銀行口座管理

■ 複数同時の引出・預入の問題



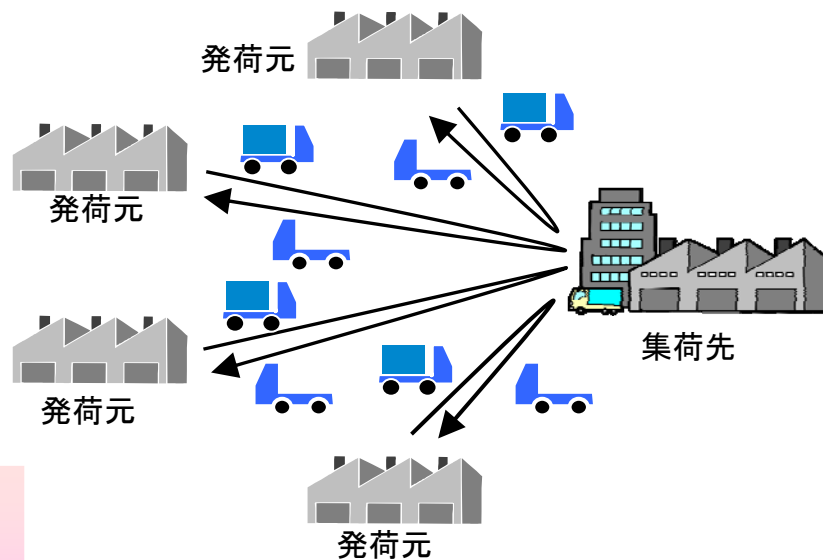
- 口座の参照・更新は一度に高々一つしか実行できない
- 同時に口座の参照・更新があったときは矛盾が起きない順番で実行



▶ ミルクラン方式をご存知ですか？

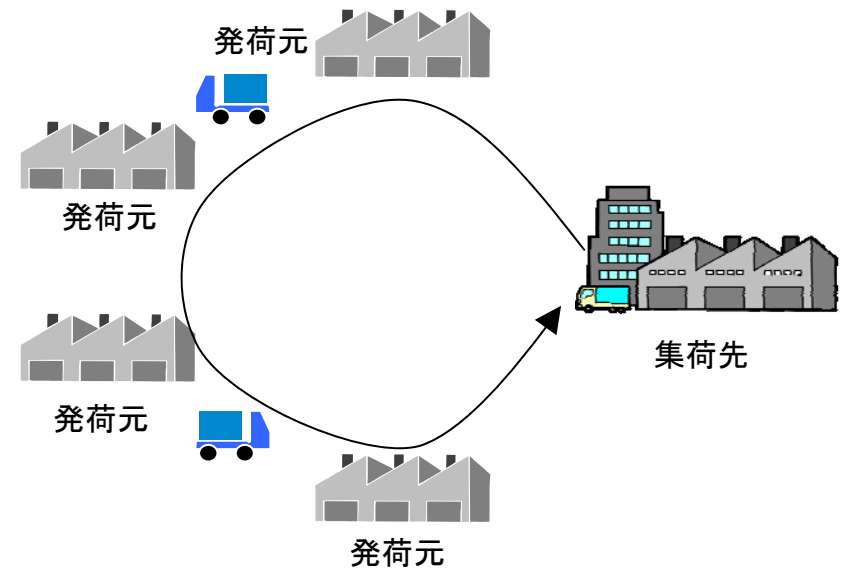
既存方式

- 各発荷元がトラックを用意(台数多)
- 復路の荷台は空(無駄な移動)



ミルクラン方式

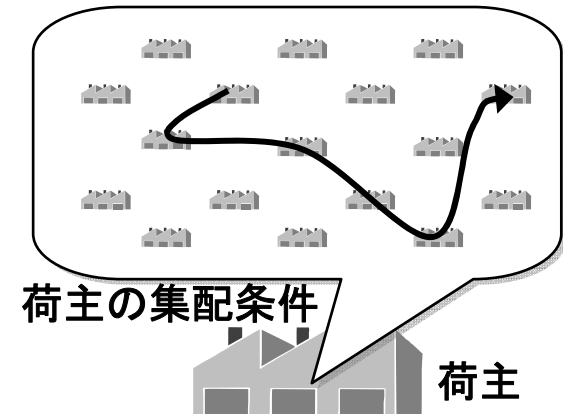
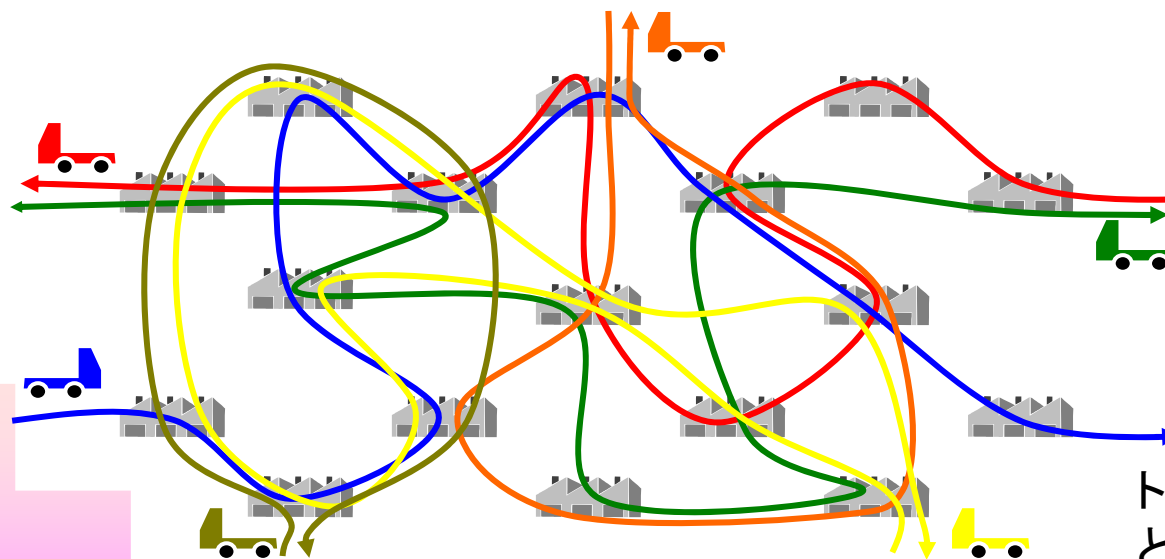
- 集荷先が少数台以上のトラックを用意
- 積載率は高い(無駄な移動が少ない)



現実世界には無駄な運用は多い
しかし、効率的な運用は管理が難しい

▶ 共同物流

- 多くの事業者が少数のトラックを共用して荷物を運ぶ物流形態
 - 個々のトラックの効率化には限界(部分最適化から全体最適化)
 - 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
- 共同物流管理が難しい(属人的な管理は無理)
 - 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



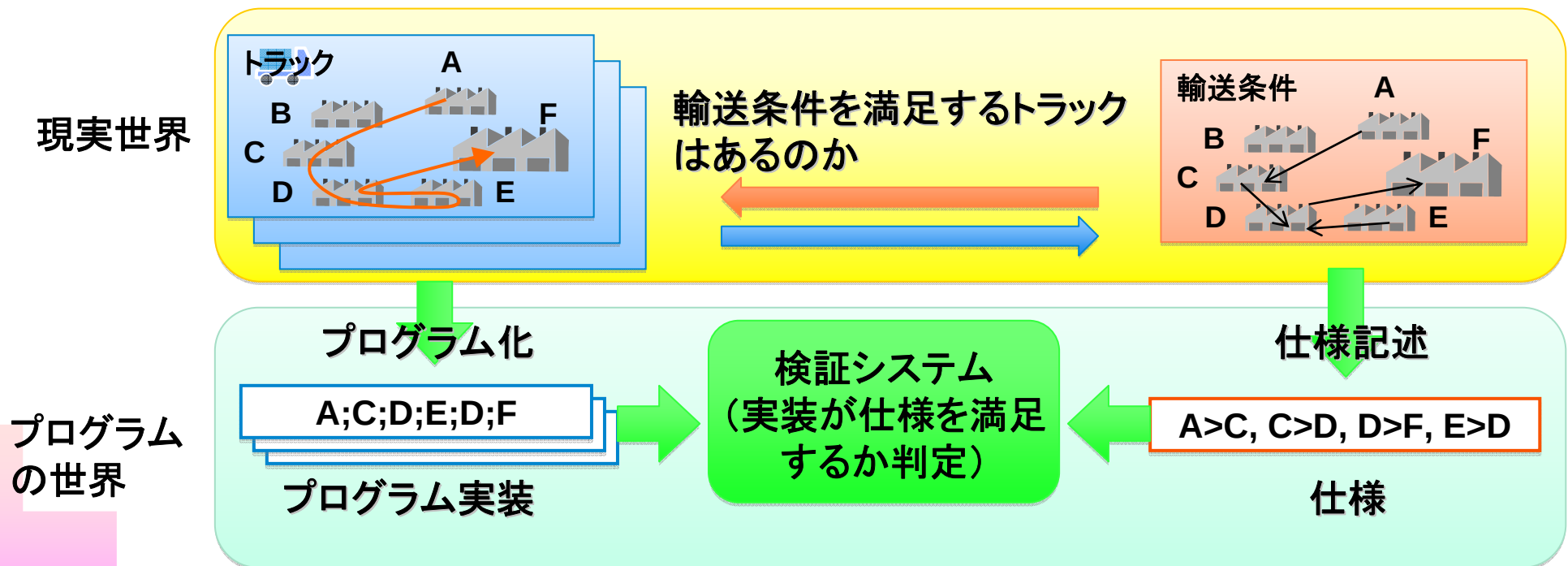
トラック数・経路が増える
とトラック選択が困難

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

Ichiro Satoh

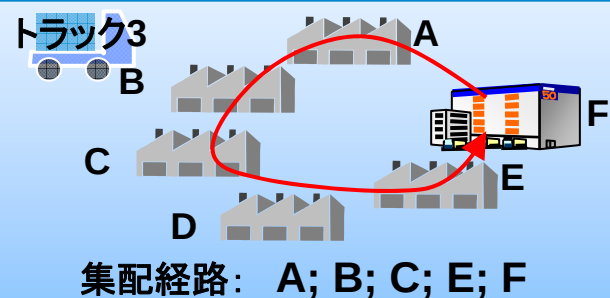
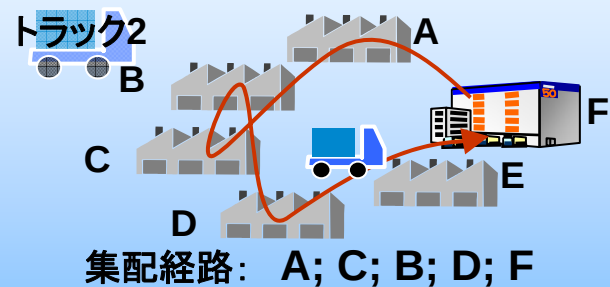
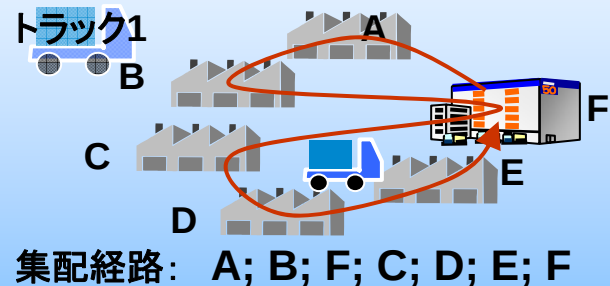
▶ プログラム検証による共同物流管理

- ソフトウェア開発では実装したプログラムが仕様を満足するか判定(検証)
- 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



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
(プログラムの実行時間(=移動距離)の予測技術を利用)

共同物流トラック選択例（食品工場）

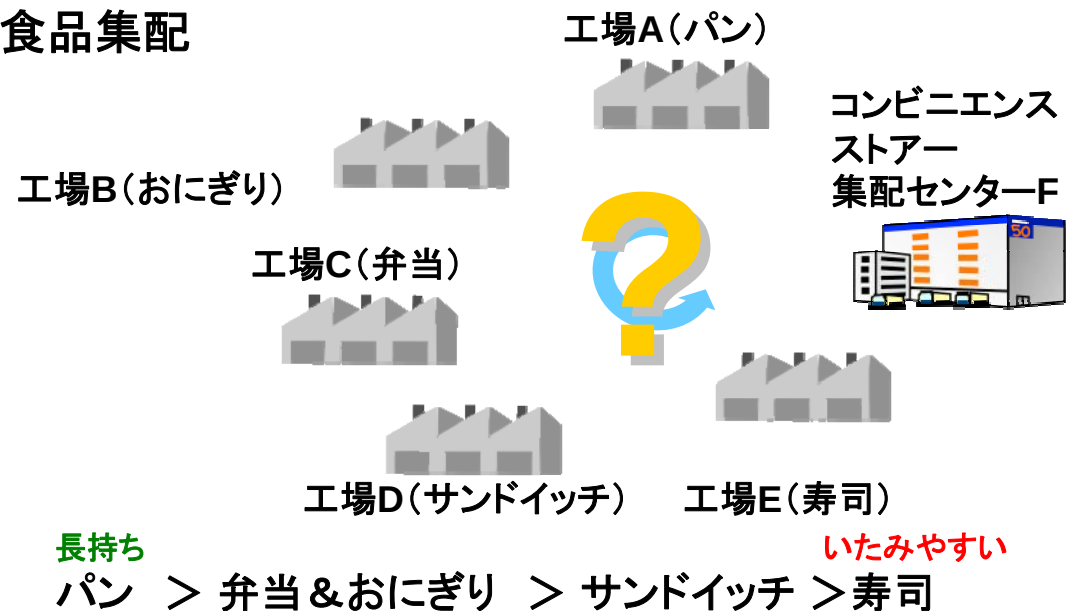


トラック1: A; B; F; C; D; E; F

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: $A > (B \% C) > D > F$

①登録

②問い合わせ

開発した
システム

③トラック
紹介

トラック2: A; C; B; D; F

Ichiro Satoh

情報学によるトラック経路効率化

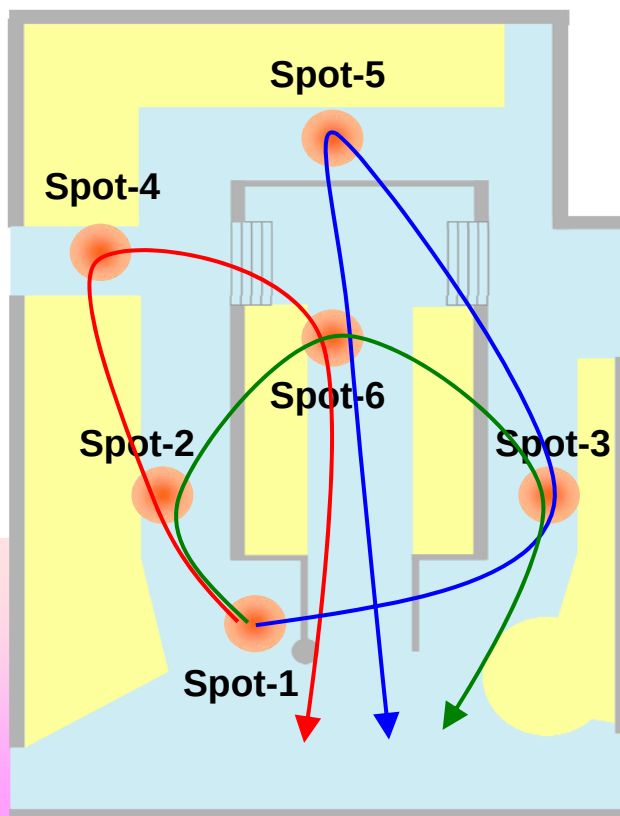
- 本研究のトラック経路の効率化・共同物流管理
 - 運送業者の運行計画表からプログラムを自動生成可能
 - 輸送中の経路変更なし(宅配業者除くと輸送中の経路変更はない)
 - 道路情報は扱わない(トラックのナビゲーションシステムで十分)
 - ドライバーは大きな経路を嫌う(段階的に効率化)
 - 巡回セールスマン問題のように大幅経路変更となりやすい方法が使われていない理由
- 課題解決指向の研究ではドメイン知識が重要
 - 学術的に有意義でも、実際に使えない研究は意味がない
 - コンピュータサイエンスが原理解明指向から課題解決指向に移行するとドメイン知識の有無が研究者を選別(自戒を込めて)

▶ 応用事例

- 本記述言語は国立科学博物館(上野)における来館者ナビゲーションシステムにおける推奨コースの記述に応用・実施済み



- スポットに立つと恐竜に関する音声解説を再生
- 同じスポットに立ってもコースによって解説内容相異



コースの記述

Course-A:
1;2;4;6

Course-B:
1;2;6;3

Course-C:
1;3;5;6



Ichiro Satoh

▶ なぜ本研究はうまくいくのか

- コンピュータと現実世界は相違
 - 本来ならばコンピュータ向けの手法は現実世界では応用できないけど
- コンピュータ向けの手法には現実世界の手法を導入したものが多い
 - 例：インターネットの通信方式は物流の影響を受けている。通信単位をパケット（小包）と呼ぶのはその名残
- コンピュータ向けの手法は高度に発達。それを現実世界に還元
 - スパコンで環境シミュレーションもいいですが、コンピュータ向け手法そのものが現実世界で応用可能

残念ながら、コンピュータサイエンスの成果を現実世界に応用しようとする研究者は少ない。現状は孤軍奮闘状態

▶ CO2排出削減の難しさ

- 非効率さに起因する排出量の削減はコスト削減にもつながる
 - CO2排出削減を行う経済的合理性がある
 - 例：道路渋滞、過剰在庫他
- 25%のCO2排出削減には非効率さの解消だけではすまされない
 - 必要な業務や活動の制限も出てきてしまう
 - 善意によるCO2排出削減は有意義だが、限界がある
- CO2削減に対してインセンティブ（例：排出権）がないと削減は進まない
 - 本研究の試み
 - サプライチェーンを利用したインセンティブの流通・取引
 - 物流効率化によるインセンティブ
 - 省電力化のインセンティブ

▶ CO2削減のインセンティブ

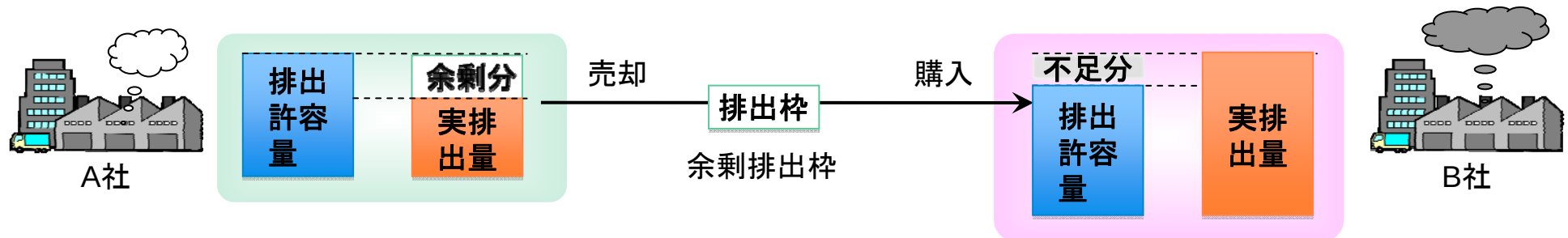
- 排出権(排出枠): CO2排出削減に対して経済インセンティブ
 - CO2排出の削減を他社に売る(経済的対価をえる)
 - 排出権を購入してCO2排出を減らしたことにする(削減の再配置)
- CO2排出削減は実経済活動との親和性が必要
 - 実経済活動であるサプライチェーンを通した排出権の還流・売買
 - 排出権付き商品の実現
 - 簡単な排出量取引(排出権取引)
- 2010年4月から東京都は一定規模以上の事業所に対して、排出削減義務と排出量取引制度を導入
 - 排出権の争奪戦がおきている

▶ 排出権取引と排出枠取引

混同している方が多い
(大手新聞・メディアを含む)

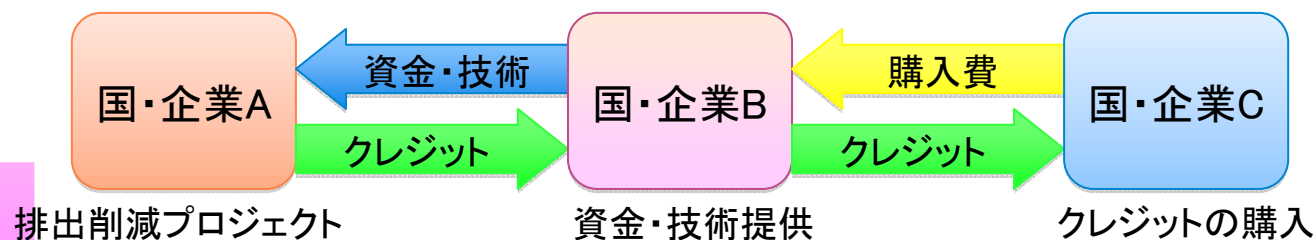
■ 排出枠取引(キャップアンドトレード)

- 企業等が政府から割り当てられた温室効果ガスの排出許容量に対して実際の排出量が少なかった場合、その差分となる排出許容量を、排出許容量よりも実際の排出量が多くなった企業に売却できる制度



■ 排出権取引(クレジット)

- 国・企業は他の国・企業に対して温室効果ガス排出削減に関する技術・支援を行い、その見返りとして削減見込み量(クレジット)を受け取り、その削減見込み量を売買できる制度



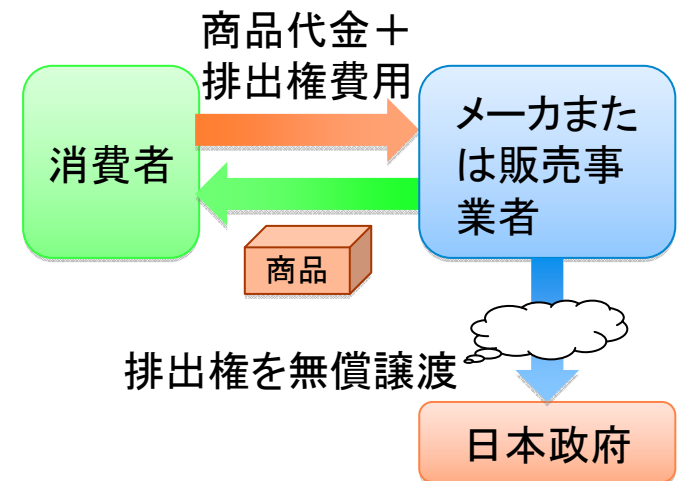
▶カーボンオフセット付き商品

■ カーボンオフセット

- 企業や国が、途上国などで削減したCO2量を排出権(クレジット)として買い取り、買い取っただけCO2を減らせたとみなすことで、地球規模でCO2排出をオフセット(相殺)

■ 数多くのカーボンオフセット付き商品が...

- 商品の使用または処分に関わるCO2排出量相当の排出権付き商品
- カーボンオフセットはメーカー・販売者が代行



日本郵便(株): オフセット付(5円)が付き年賀葉書



ユニ・チャーム(株): オフセット付きベビー用紙おむつ(3kg分を肩代わり)



佐川急便(株): オフセット付き飛脚宅配便

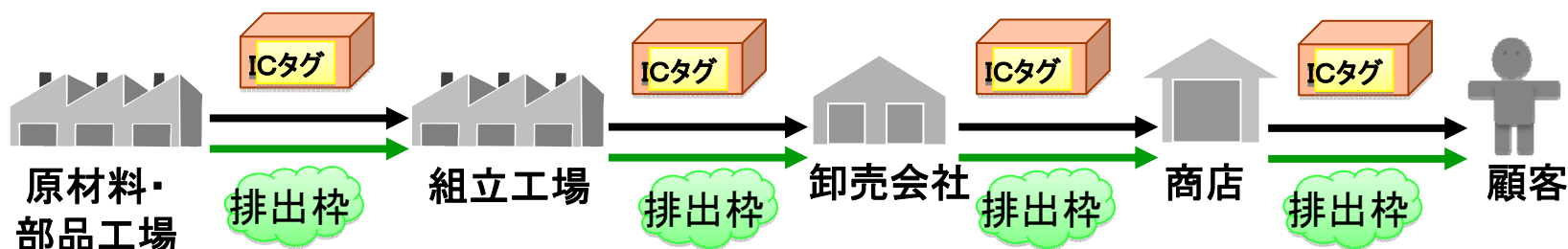
カーボンオフセット商品は川下側(対消費者)が対象

購入者に排出権は渡らない
(メーカーがオフセットするだけ)

Ichiro Satoh

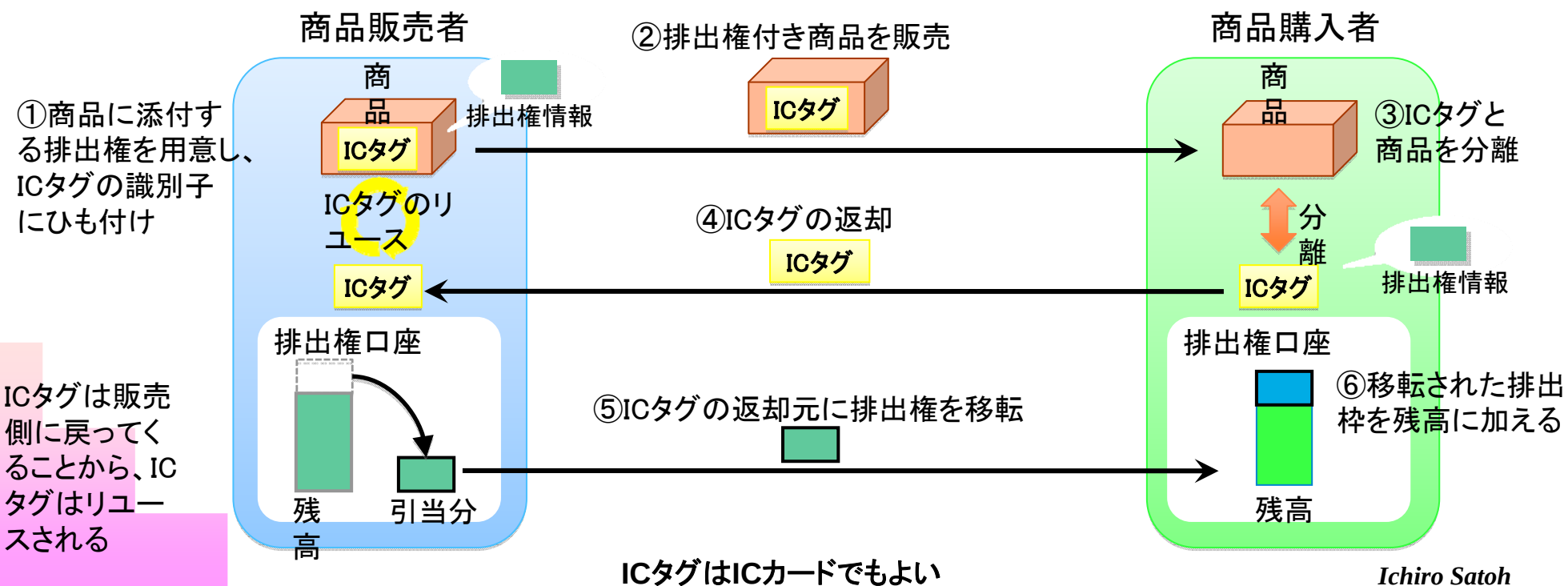
サプライチェーンによる CO2削減効果の流通・取引

- 商品に添付されるICタグに、商品情報に加えて排出枠を割り当てる
 - ICタグの受け渡しにより排出量取引を実現
 - 商品購入側はICタグの返却により排出枠を購入側に移転
 - 製品リユースに排出枠という経済的インセンティブを与える
 - ICタグを排出枠の有価証券または貨幣として利用
 - ICタグの転売により、排出枠を譲渡
 - ICタグを政府に無償譲渡より、排出枠の償却・カーボンオフセット



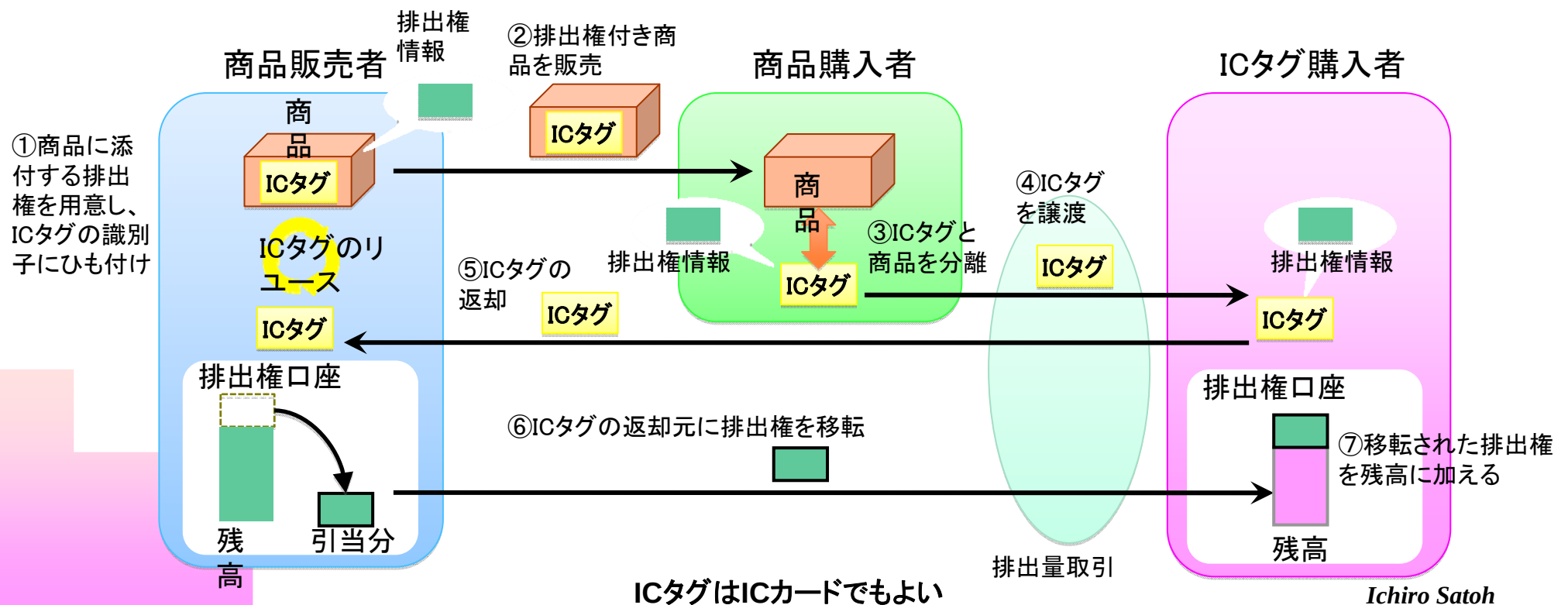
▶ カーボンオフセット商品の実現

- 商品に添付した排出権(カーボンオフセット権)とICタグの識別子をリンク
 - ICタグから排出権の情報を調べられるようにする(隠さない)
- 購買者がICタグを販売者に返すとICタグが示す排出権が購買者に移転
 - 購買者は電子的取引をすることなく、排出権をモノとして所有・転売可能



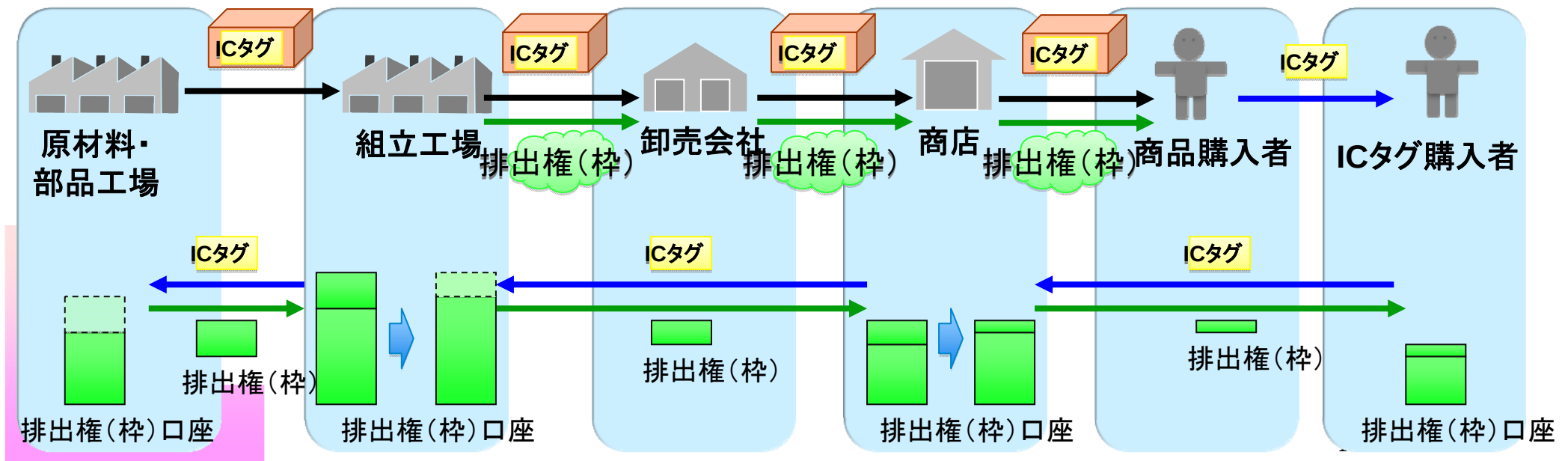
▶ 排出量取引

- ICタグの転売により排出権を第三者に譲渡できるようにする
 - ICタグの返却により譲渡先に排出権が移転（購入者認証が不要）
 - ICタグを排出権に関する有価証券または貨幣として利用



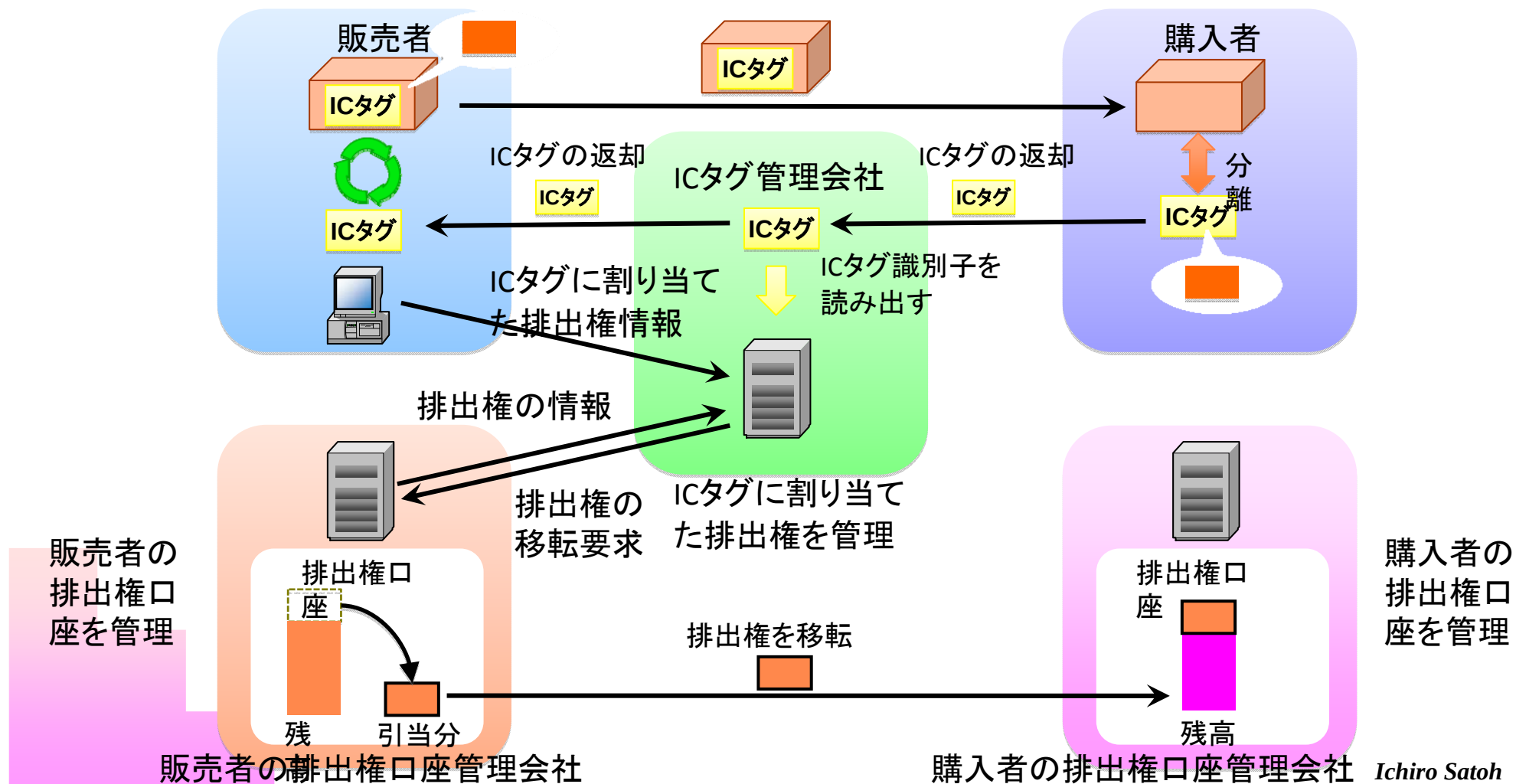
▶ 実証実験

- 国立情報学研究所、凸版印刷株式会社、日本ユニシス株式会社による共同研究「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」が、総務省・地球温暖化対策ICTイノベーション推進事業（PREDICT）の研究開発課題に採択
- 紙製飲料缶のための間伐材の伐採、製紙、印刷、容器製造、販売からなるサプライチェーンにおいて実証実験（大手スーパーで実施予定）



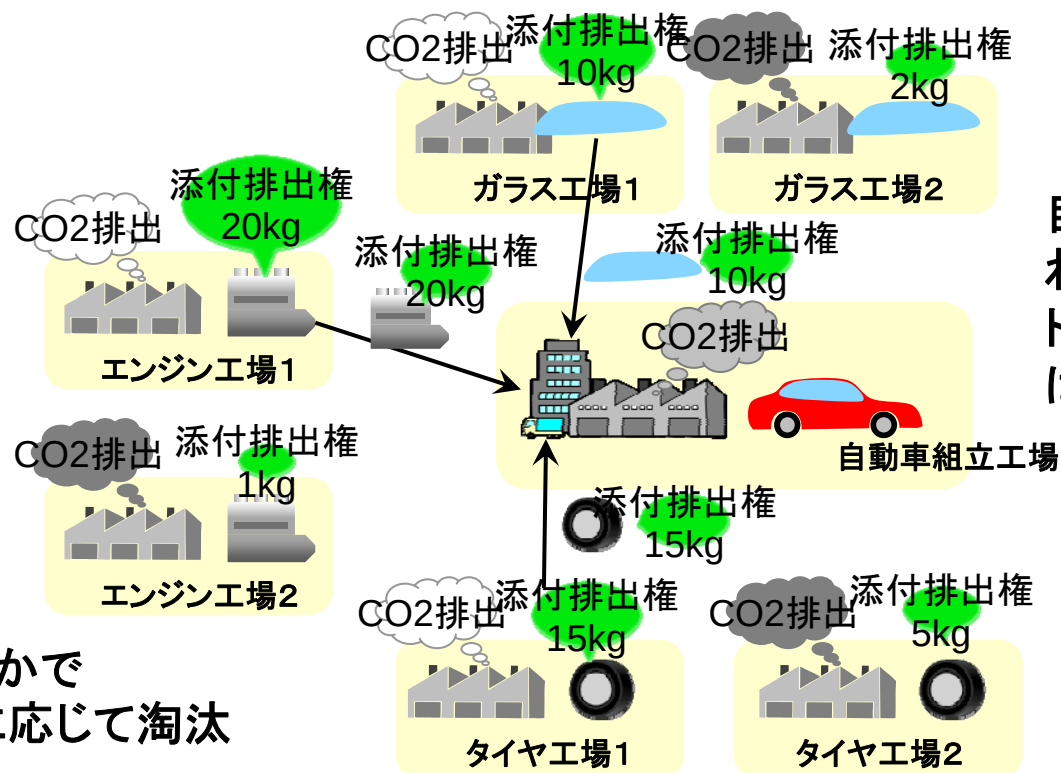
▶ 実証実験のシステム

- ICタグへの不正な排出権割当を防ぐために口座管理会社、ICタグ管理会社を導入



商品選択による排出削減

- 排出権はオマケ。購入者は排出権の多い商品を選択
 - 商品に多くの排出権を付けられる工場は、その工場の排出は少ない
 - 将来、事業者には排出削減義務
 - または他者から購入した排出権が多い（他者による排出削減が多い）

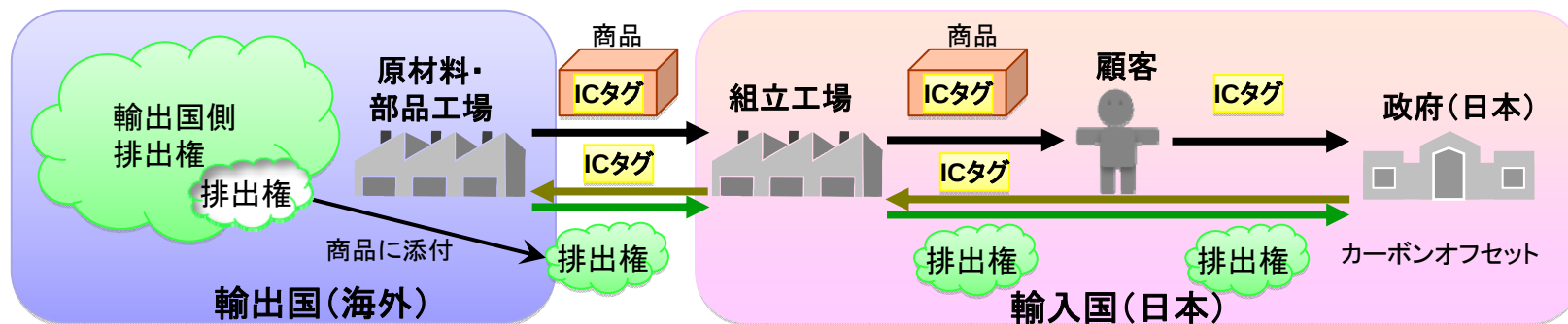


自動車組立工場は、手に入れた排出権を自社のオフセットに使ってもよいし、転売または商品に付けてもよい

同じ業種のなかで
CO2排出量に応じて淘汰

研究の狙い：海外排出権の確保

- 先進国が25%程度の排出削減目標を設定した場合は、自国の削減には限界があり、海外排出権に頼ることになる
 - 今後、排出権不足が深刻化する
- 排出権付き商品を通じて海外から排出権を確保
 - 輸出国は原材料・部品に対しても排出権を付けて輸出させる
 - 輸入国(日本)は原材料・部品の輸入を通じて海外から排出権を調達する



排出が多い国と原材料・部品の輸出国は一致。日本は排出が多い国から排出権を確保することが望まれる

▶ 本研究の狙い

- 現代社会は
 - 社会リソースの共有化は立ち後れている
 - 部分最適化はできても全体最適化は難しい
 - OSがない状態
- OSはコンピュータの計算リソース(プロセッサやメモリ、ファイル)を複数のユーザやプログラム間で全体として効率よく利用する基盤ソフトウェア
- 現実世界にもOSが必要
 - 社会リソースの共有管理
 - 全体最適化を実現するには何らかの基盤は必須



▶ 現実世界のOSへの試み

■ OS技術による現実世界のリソース共有メカニズムを提案(中)、例えば

■ 仮想記憶技術によるリソース共有

■ シェアリング自転車の再配置

シェアリング自転車は実リソース数よりも大きく見せかける技術



仮想記憶のページワップ技術により効率的な自転車再配置

■ タスクスケジューリング技術による道路制御

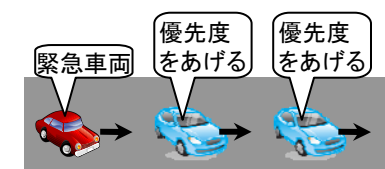
■ 優先度上限スケジューリングによる緊急車両優先制御



従来方式

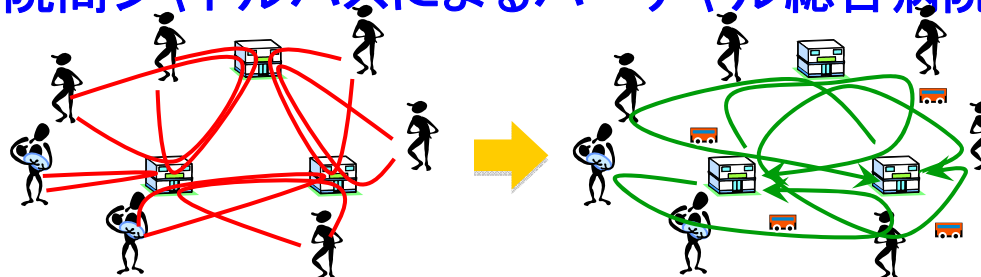


優先度上限
スケジューリング



■ ネットワーク経路制御技術によるシャトルバス制御

■ 病院間シャトルバスによるバーチャル総合病院



経路制御技術により、効率的に病院間シャトルバスを運行して、一日に相違な病院の診療科を回れるようにする(バーチャル総合病院)

Ichiro Satoh

▶ 現実世界のOSに向けて

- 現実世界のOSの実装とは社会基盤の構築
 - OSとしての制度設計、情報インフラ
- 情報学の成果として、~~速いコンピュータも重要ですが、~~
社会基盤作りのお手伝いも重要な役割
 - 現代社会は情報技術(IT)なしでは維持・運用できない
 - 情報技術(IT)と整合性のある社会基盤が求められる
- 情報学は効率化、共有化などの技術の宝庫
 - 情報学は現実世界に役立てるし、役立てて欲しい
 - しかし、現状は孤軍奮闘状態。賛同・協力者が欲しい

▶ まとめ

- 情報学の応用先はコンピュータだけではない
 - アルゴリズムや効率化手法は現実世界に応用できる
 - 情報学そのものが現実世界の効率化・低炭素化に貢献
- 情報学は原理解明から課題解決へ
 - 現実世界の複雑な問題はコンピュータなくして解決できない
 - 部分最適化から全体最適化に結びつけるにはインセンティブが必要
 - 実経済活動に応じたCO2排出削減効果の還流
- 現実世界のOSにむけて
 - 部分最適を全体最適化にかえていくにはOS相当の基盤は必須
 - コンピュータ向けOSの技術は現実世界でも有用