

# 混合型時間 Ambient 計算を用いた物流システムのモデル化によるコンテナ輸送経路比較システム

加藤 暢<sup>1,a)</sup> 山田 瞭太<sup>1</sup> 樋口 昌宏<sup>1</sup> 大山 博史<sup>2</sup> 河村 義顕<sup>2</sup> 大野 遼太郎<sup>2</sup>

**概要:** 現在日本の港で扱われる貿易コンテナの総数は年間約 1700 万 TEU に及ぶ。その内、荷主の判断で輸送手段が選択され主要港と地方間で運ばれる 1200 万 TEU のコンテナの 9 割はトラック輸送である。これに対しモーダルシフトの観点から、国交省や輸送会社により、内航船利用を推進する取り組みが進められている。我々は現在、SBIR 課題 (IoT 等の活用による内航近代化【ニーズ元府省：国交省】) として、物流システムのモデル化に特化した混合型時間 Ambient 計算 (HTAC) を用いて輸送経路をモデル化し、時間、コスト、CO<sub>2</sub> 排出量の観点からより良い輸送経路を荷主に提案するサービスを構築する研究に取り組んでいる。本稿ではそのサービスの中心となる輸送経路比較システムを提案する。海外から主要港に到着したコンテナを各地に配送する経路には、主に内航船かトラックという選択肢がある。内航船の場合、同じ目的地に明日出港する便、2 日後に出港する便など時間的な選択肢があり、後者に載せたほうが早く到着する場合も存在する。HTAC はこれら物理的、時間的な非決定性を陽に表現できる特徴を持つ。この特徴を利用し、本システムは複数の輸送手段とコンテナに関する情報から HTAC を拡張した HTSAC のプロセス式を生成し遷移させることで、目的地まで到達可能なあらゆる経路情報を列挙しそれらを比較可能とするものである。

**キーワード:** コンテナ物流, プロセス代数, Ambient Calculus, モーダルシフト, 内航船輸送, LCA

## The Container Shipping Route Comparison System by Modeling Logistic System with Hybrid Timed Ambient Calculus

TORU KATO<sup>1,a)</sup> RYOTA YAMADA<sup>1</sup> MASAHIRO HIGUCHI<sup>1</sup> OHYAMA HIROSHI<sup>2</sup> KAWAMURA YOSHIAKI<sup>2</sup>  
OHNO RYOTARO<sup>2</sup>

**Abstract:** Currently, the total number of trade containers handled at Japanese ports is approximately 17 million TEUs per year. Of this, 90% of the 12 million TEU containers are transported by truck between major ports and regional areas, with shippers choosing the means of transport at their discretion. In recent years, efforts have been made to promote the use of coastal vessels from the viewpoint of modal shift, but these efforts have not yet been fully successful. We are researching on a new service which provides shippers with better transportation routes in terms of time, cost, and CO<sub>2</sub> emissions. In this paper, we propose a route comparison system that is the core of the service. There are several options for delivering containers arriving from overseas to major ports, including coastal shipping and trucks. In the case of coastal shipping, there are multiple options in terms of time, such as shipping to the same destination tomorrow or two days later, and there are cases where containers arrive earlier if they are loaded on the latter. HTAC has the feature of being able to express these physical and temporal non-determinism explicitly. This system uses this feature to generate and transition HTSAC (extension of HTAC) process based on information about multiple modes of transportation and containers to list and compare all possible routes to the destination.

**Keywords:** Container Logistics, process algebra, Ambient Calculus, modal shift, coastal shipping, LCA

## 1. 序論

### 1.1 国内コンテナ輸送の現状と課題

国土交通省が公表している資料 [8] によると、輸出入コンテナ貨物の9割以上がトレーラーにより国内輸送されている。我々はこの点に注目し、内航船社の方にご協力頂いて、9割のトラック輸送について分析をして頂いた。それによると、現在日本全体の港で1年間に扱われている輸出入コンテナの総数は約1700万TEUであるが [9]、そのうち400万TEUは海外と日本の地方港の間で直接運ばれており、外航船社と内航船社間の契約に基づき内航船で主要港と地方の間で輸送されるものは90万TEUである。残り約1200万TEUの国内輸送の手配は荷主が自分で行っている。9割というのは、この1200万TEUのコンテナについてではないかとの指摘があった。従って、年間1080万TEUという膨大な数のコンテナが、荷主あるいはフォワーダー社の判断でトラック輸送されていることになる。

外航船社の方にヒアリングしたところ、外航船で運び込んだコンテナを国内の同じ目的地に送る場合でもコンテナ数によって、内航船輸送とトラック輸送を船社にとっての経済合理性に基づく判断から使い分けていることが判った。これは、外航船から先のコンテナの輸送経路選択において、内航船との連携が他の選択肢（主にトラック輸送）よりも有益と判断される現実があることを示している。

### 1.2 内航フィーダー輸送へのモーダルシフトを目的としたフィジカルインターネットサービス実現のためのフィージビリティスタディ

$CO_2$  排出量削減も含めた物流資源の適正運用の観点からモーダルシフトが推進されているが、コンテナ国内輸送の9割はトラック輸送であることを考えると、より積極的に荷主に内航船輸送を選択してもらうための情報を提示する仕組みが必要であると考えられる。営業用貨物車と比較して  $CO_2$  排出量が1/5とされている船舶 [10] を輸送経路に組み込んだ上で、単純な輸送コストによる判断から一歩踏み込んだ  $CO_2$  排出量も踏まえた経路選択を選択肢として提示することは、荷主にコンテナの内航船輸送を選択する積極的理由を与え、モーダルシフトを促進する仕組みとなり得ると考えている。

この考えのもと、我々は現在、本節表題のプロジェクトに取り組んでいる [6]。これは、外航船で国内に運び込まれるコンテナに対し、外航船の国内港到着から先、目的地までの輸送経路について、所要時間、輸送コスト、 $CO_2$  排出量それぞれの基準を満たす選択肢を提示するサービスを

構築するものである。具体的には、外航船社、内航船社、トラック事業社、それぞれがコンテナ輸送に関わる情報を持ち寄るフィジカルインターネット的な場をネット上に構築し、利用者からのリクエストベースで、コンテナ個々またはグルーピングされたコンテナ群について、利用者に指定された所要時間、輸送コスト、 $CO_2$  排出量の情報も含めた経路候補を提示するものである。

### 1.3 コンテナ配送経路比較システム

本稿では、このプロジェクトにおいて中心技術となるコンテナ配送経路比較システムを提案する。これは、外航船で国内主要港に運ばれてきたコンテナの国内輸送に対し、利用可能なトラックや船といった輸送手段を組み合わせ、トラックのみの経路や船とトラックを組み合わせた経路等、納品期限に間に合う輸送経路をすべて探し出すものである。またこの際にコストや  $CO_2$  排出量といった各輸送経路ごとの情報を取得する事で、単純な輸送コストによる判断から一歩踏み込んだ  $CO_2$  排出量も踏まえた経路を選択肢として提示できるようにする。

現実の物流において貨物を輸送する手段は、同じ出発地、目的地であるが出発日、到着日が異なるものが存在する。後発の輸送手段の方がコストや  $CO_2$  排出量等の面で優れている場合もあるため、同時に出発地に存在する同じ目的地の輸送手段のどれを利用するか(物理的・非決定性)だけではなく、同じ目的地をもち出発時間の異なる輸送手段のどれを利用するか(時間的・非決定性)を考慮する必要がある。これを実現するため我々は物流システムの持つ時間的制約を表現できる HTAC の性質を利用する。

### 1.4 構成

2章では、本研究で対象とする物流システムをモデル化するために HTAC を拡張したプロセス代数である、混合型時間 Synchronized Ambient Calculus (HTSAC) について述べる。2.1章では、我々が HTSAC で表現しようとしている物理的・時間的・非決定性について述べる。3章では、本稿で提案するコンテナ配送経路比較システム及び、このシステムが対象とする物流システムについて述べる。

## 2. 混合型時間 Synchronized Ambient Calculus

Ambient Calculus(AC) [1] とは、ネットワーク上を自律的に移動するモバイルエージェントを記述するために提案されたプロセス代数である。階層構造を持ったネットワークやその上で動作するモバイルエージェントと、階層構造を持った物流システムの中を移動するコンテナとの類似性に着目し、我々はこれまでに物流システム全体を AC 及びその拡張である多重 Ambient Calculus [2] のプロセス式でモデル化する研究に取り組んできた [3, 4, 7]。更に、現実の物流システムに存在する時間的制約を表現できるよう混合型

<sup>1</sup> 近畿大学大学院総合理工学研究科  
Kindai University, Kowakae, HigashiOsaka 3-4-1, Japan

<sup>2</sup> 広島商船高等専門学校商船学科  
National Institute of Technology, Hiroshima College

<sup>a)</sup> kato@info.kindai.ac.jp

時間 Ambient Calculus (HTAC) を提案した [15]。HTAC は、一定の時間以内に何らかの動作を行う、あるいは、一定の時間後に何らかの動作を行う、といった制約を表現できる言語であり、前者により、数日以内に同じ目的地に向かう複数の内航船のうち、そのどれかにコンテナを載せるといった時間的な非決定性を陽に表現できる。また、後者により、2日後に港に入港する船、4日後に入港する船といった現実世界の船の動静情報を表現できる。本研究では、船が港に到着してからコンテナが船から積み降ろされる、あるいは、コンテナが積み込まれてからトラックが出発するといった、物と物との間の同期的な動作も表現する必要があるため、そのような動作の表現に特化した Synchronized Ambient Calculus (SAC) [5] も利用する。

## 2.1 物理的非決定性と時間的非決定性

AC などのプロセス代数には、遷移において非決定的な選択が存在する場合がある。例えば下記の AC の式は、

$$co[in\ toHKT\_SHIP01 \mid in\ toHKT\_SHIP02] \\ \mid toHKT\_SHIP01 \mid toHKT\_SHIP02]$$

$co\ ambient$  が  $toHKT\_SHIP01\ ambient$  と  $toHKT\_SHIP02\ ambient$  のどちらに移動しても良いことを表現している。これはコンテナが複数の船のどれに載せられてもよいという実際の物流での複数経路の可能性を表している。しかし上記の式では  $co\ ambient$  の中にもそれら全ての輸送手段名を正確に記載しなければならない。これに対し HTSAC では下記のように記述することで、

$$co[in\ toHKT] \mid toHKT\#SHIP01] \\ \mid toHKT\#SHIP02] \dots$$

コンテナを載せられる可能性のある船が何隻あったとしても、単に  $in\ toHKT$  と書くだけでそれら全ての船のいずれかに積まれることが表現できる。本稿ではこれを物理的非決定性と呼称する。

HTSAC で時間的非決定性を表現した例を以下に示す。

### 例 2.1 (時間的非決定性)

```

1  KB[
2    co[in{5}toHKT.out arrive]
3  ]
4  |toHKT#SHIP01
5    [wait{1}.in KB.wait{1}.out KB.wait{3}
6    .in HKT.be arrive#SHIP01]
7  |toHKT#SHIP02
8    [wait{2}.in KB.wait{1}.out KB.wait{3}
9    .in HKT.be arrive#SHIP02]
10 |HKT[]

```

現実の物流において貨物を輸送する手段には、同じ出発地、目的地であるが出発日、到着日が異なるものが存在する。それらが貨物の納品期限に間に合う場合、最速ではな

い手段の方がコストや  $CO_2$  排出量等の面で優れている場合もあるため、出発日の異なる輸送手段のうちどれを利用するかという非決定性を考慮する必要がある。本稿ではこれを時間的非決定性と呼称する。

博多行き輸送手段であることを示す  $toHKT\#SHIP01$  と  $toHKT\#SHIP02$  がそれぞれ 4 行目と 7 行目に存在する。前者は  $wait\{1\}$  により 1 日後に神戸港に入港し、後者は 2 日後に神戸港に入港することを表している。2 行目では、コンテナを表す  $co$  が  $KB$ (神戸港) に存在し、 $in\{5\}$   $toHKT$  により 5 日以内に  $toHKT$  を接頭語に持つ  $ambient$  で表されるいずれのかの輸送手段に積み込まれることを表している。つまり、この式により、神戸港に置かれているコンテナが、1 日後に入港する船と、2 日後に入港する船のどちらかに積まれるという時間的非決定性を表現している。

## 3. コンテナ配送経路比較システム

本研究の目的は、HTSAC の持つ物理的・時間的非決定性を陽に表現できるという性質を利用して現実の物流システムをモデル化し、それら全ての非決定的な選択肢からなる経路を比較できるコンテナ配送経路比較システムを提案することである。これにより、文献 [6] の研究でトラックから内航船への積極的なモーダルシフトを促進するために、トラックのみの輸送よりも低コストかつ  $CO_2$  排出量の少ない輸送経路を提案するサービスを提案できるようになる。

この目的のため本研究では、HTSAC のプロセス式を物流書類(コンテナの情報を表す送り状や船やトラックの運行表)から生成する機能、プロセス式を遷移させる機能、全ての非決定的選択を考慮した遷移系列を生成してそれらの系列を比較する機能を実装した。本稿で提案するコンテナ配送経路比較システムとは、以上をまとめたプログラム群である。システム実装には Java 言語を用い、個々のプログラムの規模は以下ようになった。

- エクセル形式の物流書類から HTSAC のプロセス式を生成する機能: クラス数 22, 行数 約 3200 行
- HTSAC のプロセス式を受理し遷移させる処理系: クラス数 71, 行数 約 12800 行
- 遷移系列比較システム: クラス数 9, 行数 約 1000 行

本章では、コンテナ配送経路比較システムを用いてどの様にコンテナ輸送経路が比較されるかを説明する。

### 3.1 想定する物流システムの例

本システムで対象とする物流システムの例を図 1 に示す。これは、外航船で日本まで輸送され神戸港で積み下ろされたコンテナが、国内で複数の輸送手段によって神戸港から目的地である久留米まで運ばれることを想定した物流システムである。輸送経路は以下に示す 4 パターンを想定

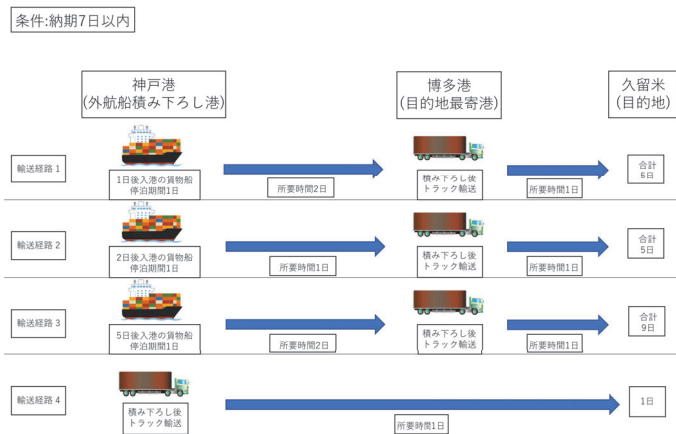


図1 想定する物流システムの例

する。また、コンテナは7日以内に納品する事が求められているとする。

### 輸送経路 1

輸送経路 1 では、1 日後に神戸港に入港し、1 日停泊する内航船で博多港まで輸送される。神戸港出航から博多港入港まで 2 日かかる。この内航船を SHIP01 とする。博多港からはトラックで目的地である久留米まで 1 日かけて輸送される。このトラックを TRACK01 とする。

### 輸送経路 2

輸送経路 2 では、2 日後に神戸港に入港し、1 日停泊する内航船で博多港まで輸送される。神戸港出航から博多港入港まで 1 日かかる。この内航船を SHIP02 とする。博多港からはトラックで目的地である久留米まで 1 日かけて輸送される。このトラックを TRACK01 とする。

### 輸送経路 3

輸送経路 3 では、5 日後に神戸港に入港し、1 日停泊する内航船で福岡港まで輸送される。神戸港出航から博多港入港まで 2 日かかる。この内航船を SHIP03 とする。博多港からはトラックで目的地である久留米まで 1 日かけて輸送される。このトラックを TRACK01 とする。

### 輸送経路 4

輸送経路 4 では、神戸港での積み下ろし後、トラックで直接目的地である久留米まで 1 日かけて輸送される。このトラックを TRACK02 とする。

輸送経路 1~3 は、実在する神戸、博多間の内航船ルートに、博多から想定される目的地 (久留米) までのトラック輸送を加えたものである。輸送経路 4 は、神戸から直接久留米まで直接トラック輸送した場合を想定したものである。これにより、内航船とトラックが競合する区間の物流システムに対し、本稿で提案する比較システムでそれぞれのコストや  $CO_2$  排出量を比較できることを示す。

## 3.2 プロセス式が持つ輸送手段の情報

これら 4 通りの輸送経路で使用する輸送手段はそれぞれ

$CO_2$  排出量、時間、コストが異なる。HTSAC プロセス式の遷移系列にこれらの情報を反映させて輸送経路を比較する。そのため、各輸送手段を表す ambient に自身の情報を記述した info ambient を持たせる。info ambient について、例 3.1 を用いて説明する。

### 例 3.1 (info ambient の例)

```
1 infoTRACK01
2 [ in co | from[<HKT>] | dest[<KRM>]
3 | distance[<50>] | cost[<30000>]
4 | ghGas[<233> ] ]
```

目的地やコスト等の情報は、dest や cost と言った ambient 内に、output action の形で値を入れて表現する。それぞれの情報の詳細を表 1 に示す。

表 1 info ambient の持つ情報の詳細

情報名	詳細
from	輸送手段の出発地
dest	輸送手段の目的地
distance	出発地から目的地までの距離 (Km)
cost	輸送手段の輸送コスト (円)
ghGas	距離 1km, 貨物 1t ごとの輸送手段 $CO_2$ 排出量 (g)

info ambient にコンテナを表す co ambient へ移動する動作を持たせる事で、co が各輸送手段の利用時に info を収集する。また、目的地での積み下ろしが行われた時点で co が持つ info を確認する事で、使用した輸送手段の組み合わせとその情報を得ることができる。 $CO_2$  排出量は、距離 1km, 貨物 1t ごとの排出量に、輸送距離と貨物の重量をかけ合わせる事で求められる。3.3~3.4 節で示すが、実際の排出量を求めるために、co には貨物重量の情報を記述した weight ambient 持たせる。さらに、コンテナが目的地で積み下ろされた時点の経過時間を本システム上で確認するために、co には十分に長い待機時間を持つ wait capability を持たせる。

なお、内航船によるコンテナの輸送コストは本研究に協力して頂いた商社の輸送履歴を参考とした。トラックによるコンテナの輸送コストは、文献 [12] で公開されている料金表を参照した。トンキロごとの  $CO_2$  排出量は、トラックは文献 [14] を、内航船は文献 [8] を参照した。

## 3.3 生成されるプロセス式の例

図 1 に示した 4 通りの物流システムを表現したプロセス式を以下に示す。これはプロセス式生成機能により、コンテナの送り状と、コンテナ船やトラックの運航計画を示した物流書類から生成されたものである。

```

1 HKT[]|KRM[]
2 |KB[co[in{7}toHKT.out arrive.in{1}toKRM
3   .out arrive
4     |in{1}toKRM.out arrive
5     |wait{1000}|weight[<20>]]]
6 |toHKT#SHIP01[wait{1}.in KB.wait{1}.out KB
7   .wait{2}.in HKT.be arrive#SHIP01
8   |infoSHIP01[in co|from[<KB>]|dest[<HKT>]
9     |distance[<530>]|cost[<12000>]
10    |ghGas[<60>]]]
11 |toHKT#SHIP02[wait{2}.in KB.wait{1}.out KB
12   .wait{1}.in HKT.be arrive#SHIP02
13   |infoSHIP02[in co|from[<KB>]|dest[<HKT>]
14     |distance[<530>]|cost[<12000>]
15     |ghGas[<40>]]]
16 |toHKT#SHIP03[wait{5}.in KB.wait{1}.out KB
17   .wait{2}.in HKT.be arrive#SHIP03
18   |infoSHIP03[in co|from[<KB>]
19     |dest[<HKT>]|distance[<530>]
20     |cost[<12000>]|ghGas[<60>]]]
21 |toKRM#TRUCK01[noLoad[cbe(co)load]
22   |in HKT.open load
23   .out HKT.wait{1}.in KRM
24   .be arrive#TRUCK01
25   |infoTRUCK01 in co|from[<HKT>]|dest[<KRM>]
26   |distance[<50>]|cost[<30000>]
27   |ghGas[<233>]]]
28
29 |toKRM#TRUCK02[noLoad[cbe(co)load]|in KB
30   .open load.out KB.wait{1}.in KRM
31   .be arrive#TRUCK02
32   |infoTRUCK02[in co|from[<KB>]|dest[<KRM>]
33   |distance[<600>]|cost[<140000>]
34   |ghGas[<233>]]]
  
```

2行目は神戸港にコンテナが存在する事を表している。2行目の in{7} toHKTにより、コンテナは7日以内に博多港に向かう船のどれかに積み込まれることを、3行目の in{1} toKRMにより1日以内に久留米まで直接向かう輸送手段(この場合はトラック)に積み込まれることを表している。これらの capabilityにより、このプロセス式は博多港を経て久留米に輸送される輸送経路と、直接久留米まで輸送される経路からなる全ての経路を表す実行系列を持つ。

3行目の out arrive capability は、目的地に到着後でないと輸送手段からコンテナが積み下ろされないという同期的性質を表している。このように記述する事で、輸送手段を表す ambient 名が arrive#輸送手段名に変更されるまで、co ambient は輸送手段を表す ambient から外に出ることはできない。

### 3.4 輸送終了後のコンテナ情報

全ての輸送経路での遷移が終了した後、使用した輸送経路の情報を得るため、各遷移系列毎に終了時点での co ambient の状態を確認する。co ambient の状態の例として輸送経路1の場合を示す。各輸送経路の co ambient の状態は3.5節で示す。

```

1 co[wait{995}|weight[<20>]
2   |infoSHIP01[from[<KB>] | dest[<HKT>]
3     |distance[<530>]|cost[<12000>]
4     | ghGas[<60>]]
5   |infoTRACK01[ from[<HKT>] | dest[<KRM>]
6     | distance[<50>]|cost[<30000>]
7     | ghGas[<233>] ]
8 ]
  
```

1行目の wait capability と2,5行目の info ambient の名前によって、輸送経路1は輸送手段として SHIP01 と TRACK01 を用いて合計5日で輸送された事が分かる。またコストが42,000円だったこと、そして distance, ghGas, weight ambient 内の output action 内の数値を積和することで、CO<sub>2</sub> を869Kg発生させことが分かる。

### 3.5 コンテナ配送経路比較システムの動作結果

3.4節で示した様に、一つの実行系列終了時に現れる co ambient の情報を調べることで、その実行系列が表す輸送経路で、コストやCO<sub>2</sub>排出量がどのくらいであったかがわかる。以下に3.3節に示したプロセス式の全ての遷移で得られる4通りの輸送経路ごとの情報を示す。

- 輸送経路1: 合計5日, コスト42000円, CO<sub>2</sub>排出量869Kg
- 輸送経路2: 合計5日, コスト42000円, CO<sub>2</sub>排出量657Kg
- 輸送経路3: 合計9日, コスト42000円, CO<sub>2</sub>排出量869Kg
- 輸送経路4: 合計1日, コスト140000円, CO<sub>2</sub>排出量2796Kg

到着希望期日が7日以内だった場合、各輸送経路で輸送が行われた後のプロセス式の状態から、使用可能な輸送経路は1, 2, 4であると分かる。最速の輸送手段はTRACK02を用いる輸送経路4であるが、コストとCO<sub>2</sub>排出量が最も多い。一方輸送経路1, 2は5日必要だが、コストが低く、CO<sub>2</sub>排出量も少ない。また輸送経路1より2の方がCO<sub>2</sub>排出量が少ないと分かる。そのため輸送期間の短い輸送経路4と、コストが低く、CO<sub>2</sub>排出量も少ない輸送経路2のどちらを使用するか比較すればよい。

なお、経路1は途中門司港によって2日掛けて博多港に到着する実際の経路を元としている。この例でのコンテナ輸送には関係ないため、そのための capability を式には含めなかったが、一度ターミナルに寄港するには通常航行時に比べ余計にCO<sub>2</sub>を排出するため[13]、経路2よりトンキロあたりのCO<sub>2</sub>排出量を多く見積もっている。

### 3.6 複数のコンテナを想定する動作実験

複数のコンテナを想定する動作実験として、輸送計画を調査するコンテナが 1000 個存在する場合を想定した実験を行った。本実験を行った環境は以下の通りである。

プロセッサ Intel(R) Core(TM) i7-9700 CPU @ 3.00GHz

メモリ 64.0 GB

OS Windows 10 Education 20H2

以上の環境で動作実験を行った結果、1000 回の処理に約 690 秒を要した。

## 4. 結論

本稿では、トラック輸送と内航船輸送が競合しているようなコンテナ物流システムを対象とし、Ambient Calculus を拡張したプロセス代数である HTSAC を用いて物流システムをモデル化し、それらの輸送経路を比較できるシステムを提案した。HTSAC は、物流システムを持つ物理的、時間的、非決定性を陽に表現できるよう設計したプロセス代数である。HTSAC によりこのような物流システムをモデル化して遷移させ、複数のコンテナ輸送経路を比較できるシステムを実装したことにより、コスト、時間、CO<sub>2</sub> 排出量を考慮に入れた輸送経路の比較が可能となり、荷主に内航船輸送を選択するための情報を提示できる仕組みを構築できるようになった。

CO<sub>2</sub> 削減の観点から、国交省や経産省などの省庁をはじめ、多くの運送業社や製造業社が、IoT 技術を用いた流通の合理化やモーダルシフトに取り組んでいる。特にコンテナ輸送の世界最大企業であるマースクが IBM と協力して開発、運営しているトレードレンズ [11] は、コンテナ物流に関連する多数の企業が参加し、企業の枠を超えてコンテナ管理を一元化しようとするものである。このようにコンテナ輸送の合理化やモーダルシフトに関する研究は注目を集めている分野である。しかしこれらは、コンテナ輸送に関する情報を電子化し、これまで人手で行われていたコンテナ管理を合理化するものであり、本研究のような物流システム全体をモデル化し、実際に行われたトラック輸送と、他の可能な輸送経路を比較するものではなく、CO<sub>2</sub> 排出量や輸送コストの観点からより良い輸送経路を提示できるものでもない。

今後 SBIR 課題 [6] のプロジェクトにおいて、本稿で提案したコンテナ配送経路比較システムを用いて、フォワーダーや荷主に経路比較情報を提示し、より良い経路を選択してもらえるようなサービスを構築する予定である。しかし現状では、各コンテナごとに取りうる経路およびその経路を選んだ際のコストなどを列挙することが出来るだけである。実際には各船の積載可能コンテナ数や冷凍、冷蔵コンテナが搭載できるかなどの要因で、その経路が選択可能かどうか異なってくる。そのため、よりきめ細かい経路情報を用いてモデルを生成し、比較できるよう改良してい

く必要がある。

**謝辞** 本研究は、JST SBIR フェーズ I(JPMJST2166) の支援を受けたものである。

## 参考文献

- [1] Cardelli, L. and Gordon, A. D.: Mobile Ambients, *Theoretical Computer Science*, Vol. 240, pp. 177–213 (2000).
- [2] 樋口昌宏, 加藤暢: 物流システム記述のための多重 Ambient Calculus, 情報処理学会論文誌:プログラミング, Vol. 5, No. 2, pp. 79–87 (2012).
- [3] 森本大輔, 加藤暢, 樋口昌宏: Ambient Calculus を用いた物流検査システム, 情報処理学会論文誌, Vol. 48, No. SIG 10(PRO33), pp. 151–164 (2007).
- [4] 加藤暢, 高岡久裕, 樋口昌宏, 大山博史: 多重 Ambient Calculus を用いた動的な海上物流計画に対するモデル検査, 情報処理学会論文誌: 数理モデル化と応用, Vol. 11, No. 3, pp. 84–99 (2018).
- [5] Toru, K. and Yoichi, H.: The Synchronized Ambient Calculus, *Manuscript for presentation at IPSJ-SIGPRO* (2021).
- [6] 加藤暢, 大山博史: (SBIR 採択課題) 内航フィーダー輸送へのモーダルシフトを目的としたフィジカルインターネットサービス実現のためのフィジビリティスタディ, <https://www.jst.go.jp/start/project/sbir-one.html> (2021).
- [7] 加藤暢, 樋口昌宏, 植田直人: 物流システムに対する Ambient Logic モデル検査システム, 情報処理学会論文誌: 数理モデル化と応用, Vol. 3, No. 1, pp. 73–86 (2010).
- [8] 国土交通省: 物流をめぐる状況について:第 4 8 回基本政策部会第 1 回物流部会合同会議配布資料, <https://www.mlit.go.jp/common/001089686.pdf> (2015).
- [9] 国土交通省: 国際コンテナ戦略港湾政策について, [https://www.mof.go.jp/about\\_mof/councils/customs\\_foreign\\_exchange/sub-of-customs/proceedings\\_customs/material/20211008/kana20211008siryo4.pdf](https://www.mof.go.jp/about_mof/councils/customs_foreign_exchange/sub-of-customs/proceedings_customs/material/20211008/kana20211008siryo4.pdf) (2020).
- [10] 国土交通省: 運輸部門における二酸化炭素排出量, [https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/environment/sosei\\_environment\\_tk\\_000007.html](https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/environment/sosei_environment_tk_000007.html) (2021).
- [11] 国際港湾教会: 貿易電子化プラットフォームトレードレンズの概要と最近の動向, [https://www.kokusaikouwan.jp/wp/wp-content/uploads/2019/11/Hirata\\_20191029.pdf](https://www.kokusaikouwan.jp/wp/wp-content/uploads/2019/11/Hirata_20191029.pdf) (2019).
- [12] 有限会社新栄商事: 20 フィートコンテナ距離制運賃, <https://shinei-shoji.jp/distribution-service/container-fare-table/>.
- [13] 酒井浩, 渡邊豊: コンテナターミナルにおける CO<sub>2</sub> 排出量の評価と削減に関する基礎的研究, 運輸政策研究, Vol. 9, No. 1, pp. 015–021 (2006).
- [14] 経済産業省: 2018 年度温室効果ガス排出量分析, <http://www.env.go.jp/earth/ondanka/ghg-mrv/emissions/results-h30.html> (2018).
- [15] 藤坂吉秀, 稲森啓太, 樋口昌宏, 加藤暢: 物流記述のための混合型時間アンビエント計算, 情報処理学会論文誌プログラミング (PRO), Vol. 10, No. 4, pp. 12–27 (2017).