

# 航空貨物の最適積み付けシステム

矢野 夏子, 齊藤 努, 徳永健二郎

貨物専用航空機への貨物の積み付けは、特殊な形状の貨物スペースを考慮しつつ、様々な積載条件下で最も積載効率の良い積載プランを作成し、それに基づき積み付けを行うことになる。本稿では、筆者らが開発した3次元最適詰め込みアルゴリズムを内蔵した航空貨物専用機の最適積み付けシステムについて紹介する。

キーワード：組合せ最適化，局所探索法，3次元箱詰め問題，コンテナ積み付け

## 1. はじめに

一般的に貨物輸送において扱われる貨物は、パレットやコンテナに積み付けるなどしてトラック、航空機、船舶等に搭載される。パレットやコンテナの積載効率が悪いと、無駄な輸送が増え、物流コスト、ひいてはCO<sub>2</sub>排出量の増加を生むことになる。しかし、パレットやコンテナへの積み付けプラン作成作業は、経験に基づいて人手で行われている場合が多く、上積み禁止や、重量バランスなどを考慮しながら積載効率を上げるのは、かなりの熟練者でないと困難な作業である。

航空機に貨物を搭載するときには、ULD (Unit Load Devices) と呼ばれるコンテナまたはパレットに積み付けされ、このULD単位で機内へ運び込まれる。陸上輸送媒体 (トラック) や海上輸送媒体 (コンテナ船) と比較し、搭載スペースの形状が複雑であるなどの理由から、航空貨物輸送における積載効率向上は、非常に多くの制限をクリアした上で達成する必要がある困難な課題といえる。その上、燃料使用量が圧倒的に大きいことから、積載効率向上が強く求められてもいる。

以上のような理由から、航空機用コンテナや貨物に関する様々な制約にも対応可能な上、高い積載効率を実現する積載プランを自動作成できるシステムが求められている。本稿では、航空貨物の積載プラン作成に関する条件を明確にするとともに、新たに開発した最

適化アルゴリズムについて簡単に述べる。そして、日本貨物航空株式会社 (以下 NCA) の貨物専用機の積載プラン作成システム (最適積み付けシステム) として、本アルゴリズムを搭載したシステムが運用され効果を上げている事例について紹介する。

## 2. 背景

### 2.1 NCA 社概要

NCA は貨物専門航空会社で、貨物専用機 (ボーイング 747) を 10 機所有している。北米・欧州・アジアの各就航地への定期便があり、その他、国内外のチャーター便の運航もある。2005 年頃より競争力強化のため、社内システム (空港系、運航系、整備系のシステム) を新規に構築するといった IT 施策に大きな投資をしてきた。筆者らが開発した最適積み付けシステム:i-Caps (Integrated Cargo Automatic Planning System) [1]~[4]は、その1システムであり、最初に稼働したシステムである。

### 2.2 積載プランの重要性

出発便の予定時刻までの限られた時間の中で、貨物を効率よく積み終えなければならない。積み付けの現場で試行錯誤をしている時間的な余裕はなく、事前に作成し十分な検証を行ったプランに従い、正確に積み付けておかなければならない。

また、顧客や営業担当者からの予約問合せに対して

やの なつこ, さいとう つとむ  
㈱構造計画研究所  
〒164-0011 中野区中央 4-5-3  
とくなが けんじろう  
日本貨物航空㈱  
〒282-0021 成田市成田国際空港内

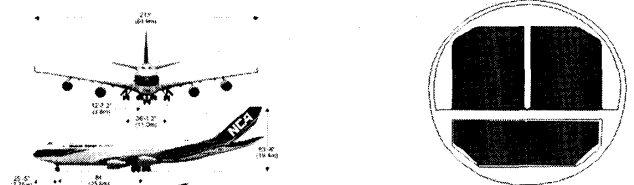


図1 貨物専用機の貨物スペース

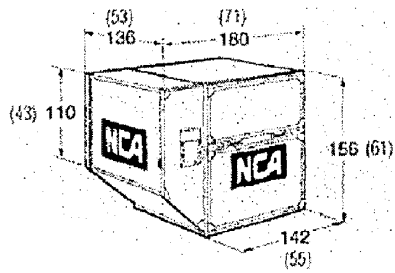


図2 航空貨物用コンテナ形状例（ローワーデッキ用）

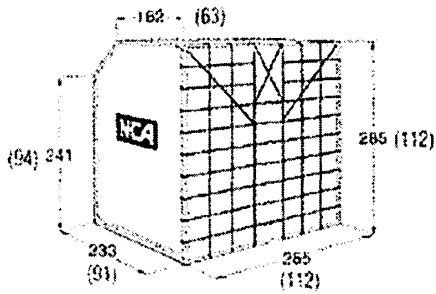


図3 航空貨物用コンテナ形状例（アッパーデッキ用）

は、どの便への積載が可能なのかを、正確に回答しなければならない。それができないと、営業機会損失の発生や、予約不履行による信頼低下が起りかねない。つまり、問合せに対して、迅速かつ正確に回答することは、顧客満足度向上の面からも重要となっている。

### 2.3 本システム導入前

NCAにおいては、本システムを導入する前にも、自動プランニングシステムが導入されていた。しかし、旧システムはスタンドアロンのパソコンに組み込まれており、利用者が限定されていた。そのため、積載プラン作成の作業を、手作業で実施する担当者も多かった。その場合搭載制限を記述しているマニュアルを見ながら、方眼紙等に定規を使う等して、ULDの形状や貨物の形状を描き、プランの作成、検証作業を行っていた。

### 2.4 貨物積載プラン作成を困難にしている要因

#### 2.4.1 コンテナ形状の複雑さ

航空機はその設計の都合上、断面が丸みを帯びており、貨物スペースには流線部分が多い。そのため、航空貨物専用のコンテナは、図2、3のように円弧形状に合わせた複雑な形状をしているものがある。

#### 2.4.2 パレットへの積み付け

コンテナは使用せず、パレット（鉄板）に貨物を直接積み付け、ネットで固縛する場合が多い（図4）。

NCAが貨物を顧客から受託する際、コンテナ単位

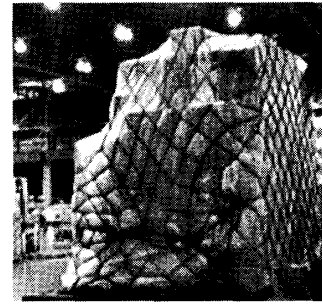


図4 パレットへの積み付け

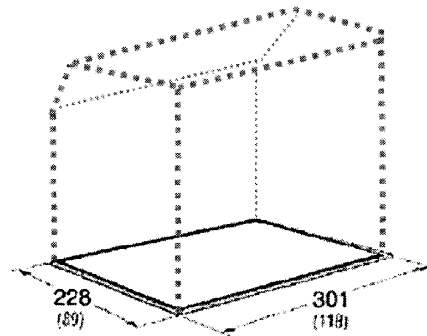


図5 パレットの積載空間形状例

ではなく、貨物単位で受託することも多い。さらに容積・重量積載効率の面で優れていることもあり、パレットによる輸送が増えている。パレットへの積み付けの場合にも、その積載可能空間は、図5のような複雑な形状になる。

コンテナに積載する場合のように、貨物を壁に寄り掛けることもできないため、全体の重心位置などを十分に考慮しなければならない。また、目に見える枠がないため、定義された積載空間を守っているかどうかを目視では検証できない。そのため、事前に積載プランを作成し、詳細に検討しておくことがより重要となっている。

## 3. システム要件

### 3.1 構成

貨物情報、コンテナ・パレット情報を入力条件として、コンテナに積載できる体積を最大化することを目的とした積載プランを作成する。

貨物は直方体とし、そのサイズ（LWH）、数、積載条件を貨物情報として扱う。コンテナ・パレット情報としては、積載可能空間の形状、サイズ、数を扱う。

### 3.2 条件

最適積み付けシステムへ求められる条件としては、主に以下のようなものが挙げられる。

### 3.2.1 複数 ULD への同時積み付け

どのコンテナ・パレットに積載するのかが固定的な条件ではないため、複数の ULD を積載候補として、積み付けプランを作成しなければならない。ULD の形状が異なる複数のものが積載候補となる場合もある。なお、このように候補が複数あっても、全体の効率が悪くならないようにしなければならない。

### 3.2.2 積み付け禁止エリアの考慮

コンテナの一部には、内部には特殊な装置が設置され、貨物積載ができないエリア（3次元空間）が存在する場合がある。これらの空間を避けながら、貨物を積載しなければならない。

### 3.2.3 追加積み付け（追い積み）への対応

空の状態の ULD への積み付けだけでなく、いくつかの貨物がすでに積み付けられているプランに対して、その残りの空間を対象として、最適な積み付けプランを作る必要がある。予約が確定している貨物や、すでに ULD への積み付けが完了している貨物がある場合や、また、比較的軽量の長尺物を ULD 最上部に積載するために、その貨物の領域分を確保するようなことを想定している。

### 3.2.4 パレット積載への対応

パレットを航空機に搭載する場合、特殊なロックをかけて固縛する。このロックはパレットに対して図6のように食い込むように差し込まれる。このため、パレットの最下層に積載する貨物は、パレットの外径よりわずかに内側までしか積載できない。また、スキッドと呼ばれる木材を置くことで、金具を超えてオーバーハング積み付けをする場合もある。

つまり、積載可能空間には、内径、外径というような条件が存在しており、これらを正しく考慮して積載位置を決めなければならない。

### 3.2.5 貨物の積載条件への対応

貨物には様々な積載条件があり、それらをすべて満たさなければならない。詳細については次節で述べる。

(断面図解)

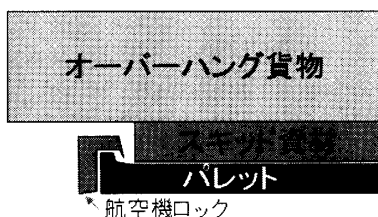


図6 パレットのロックとスキッドの利用

### 3.3 貨物の積載条件

貨物に関する積載条件には、主に以下のような条件がある。

#### 3.3.1 段積み制約

上積み禁止や、同じ貨物どうしなら段積み積載可能などといった条件である。

#### 3.3.2 積載方向の制約

精密機器などは航空機の進行方向に対して設置方向が決まっている場合がある。また、フォークリフトでの作業を考えて、その方向が決められることもある。

#### 3.3.3 優先貨物の指定

優先度を定義し、この便になるべく積みたい貨物を優先して積載し、その結果、積載スペースに余剰があれば、次の便に回しても良い貨物も積載するというような条件である。

### 3.4 アルゴリズムの方針

以上のように、日々の業務での運用を想定すると、複雑な条件が多く要求されていることが分かる。また、業務の都合上、数秒～数十秒以内に計算が終わるように、という計算スピードに対しても高い要求を求められている。かつ、システムに精通していなくとも容易に扱えるようなわかりやすさも求められている。そこで、これらの要求に対応するために、BLD法という詰め込みアルゴリズムを用いたヒューリスティックなアルゴリズムを開発し、それを搭載したシステムを開発することとした。なお、システムとしては、NCAにおいて存在している旧システムと同等もしくはそれ以上の性能を目標とした。

### 3.5 目的関数

目的関数( $f$ )は以下とし、アルゴリズムではこの最大化を目的とする。

$$f = \text{積載体積} + \text{優先貨物の積載数} \times \alpha \\ - (\text{パレット・コンテナ} \text{数}) \times \beta \\ - \text{重心位置の高さ} \times \gamma$$

上式において、 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ は重み付け定数である。積載体積が等しい解がある場合には、優先貨物を多く積んでいる、使用コンテナ数が少ない、重心位置が低い、というような指標を見ることとなる。なお、上式で考慮されていない貨物の積載条件や禁止エリアについては、詰め込みアルゴリズムにて考慮することとする。さらに、局所探索法[5]を適用し、限られた時間の中で精度向上を試行することとした。

## 4. 解法

### 4.1 詰め込みアルゴリズム (BLD 法)

詰め込みのアルゴリズムとして、BL 法 (bottom left algorithm) [6] を 3次元に拡張した BLD (bottom left depth algorithm) 法を適用した。BL 法とは、「積載対象貨物に番号をつけ、その順に従って、なるべく下 (bottom)、同じ高さであればできる限り左 (left) に詰め込む、ということを繰り返して積載する方法」である。

BL 法の手順は以下の通りである (図 7~9)。

- ① 初期状態では、長方形の左下の 1 点が積載候補位置。貨物の左下の点を置く位置の候補を「積載候補点」と呼ぶ
- ② 候補点に貨物 1 を積載する。
- ③ すると、積載候補点は図 8 左のように 2 点になる。優先度は AB の順
- ④ 2 点の候補点の優先順位は「AB」の順であるので、A の位置に貨物 2 を積載する。A に積載できない場合は、B に積載する。
- ⑤ すると、積載候補点は図 8 右のように 3 点になる。優先度は CDB の順。
- ⑥ これをすべての貨物に対して、繰り返す。

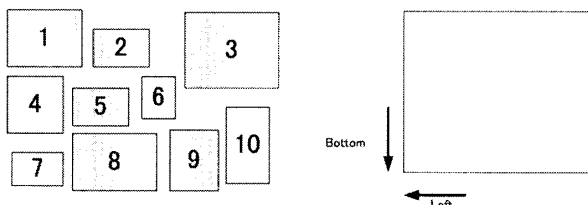


図 7 BL 法

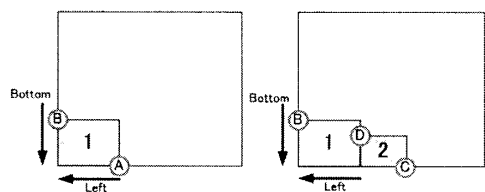


図 8 BL 法 (手順③⑤)

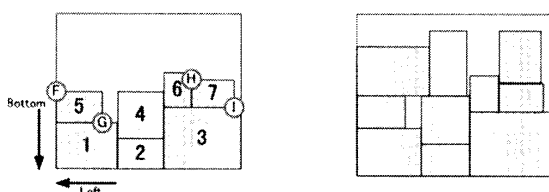


図 9 BL 法 (手順⑥)

これを 3次元に拡張する。つまり、BLD 法は、「積載対象貨物に番号をつけ、その順に従って、なるべく下 (bottom)、同じ高さであればできる限り左 (left)、できる限り手前 (depth) に詰め込む、ということを繰り返して積載する方法」となる。BLD 法の手順は以下の通りである (図 10, 11)。

- ① 初期状態では、コンテナの積載候補点は、左下の 1 点のみ。
- ② その候補点に貨物を積載する。
- ③ すると、候補点は図 10 右のように 3 点になる。優先度は ABC の順
- ④ これをすべての貨物に対して、繰り返す。

### 4.2 制約条件への対応

積載候補点へ貨物を積み付けるときに、以下の制約条件を判別する。

- ① 複雑な形状をした積載可能空間 (積み付け禁止エリアも含む) の制約
- ② 段積み制約
- ③ 積載方向の制約

1つの ULD 中にあるすべての積載候補点で積み付け不可と判定された場合には、別の ULD の積載候補点への積み付けを考える。すべての ULD に対して積み付け不可と判定された貨物は、「ルーズ貨物」となる。

このようにすることで、用意するコンテナ数が十分にあれば、アルゴリズムは必ず現実に実行可能な積載プランを作成できるようになる。

### 4.3 追加積み付けへの対応

また、追加積み付けの場合にも、新規プラン作成時と同様に、あらかじめ積んである貨物を置き、積載候

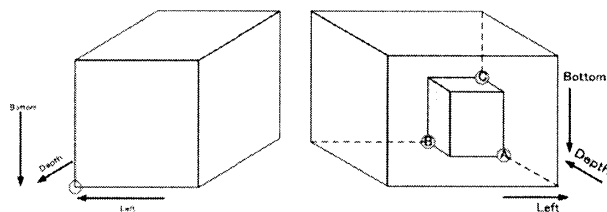


図 10 BLD 法 (手順①~③)

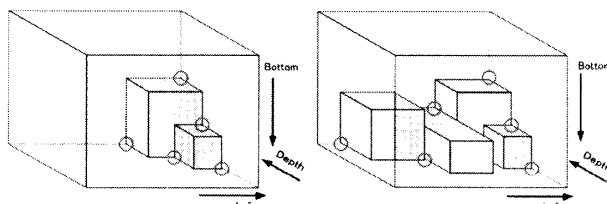


図 11 BLD 法 (手順④)

補点を作成すればよく、複雑な前処理等は何ら設ける必要がない。

#### 4.4 BLD 法の改良

BLD 法では、貨物の並び順が解の良し悪しに大きな影響を与える。そこで、BLD 法の改良として、局所探索法を用いて、より良い並び順を探索することにする。また、貨物の XY 方向の回転についても探索を実施する。

ある貨物の並び順に対し、スワップ近傍操作（2つの貨物の順番を入れ替える）をする。また、貨物の指定した反復回数だけ、貨物の並び順（初期解）を変えてこの操作を繰り返す。

### 5. 結果の検証

最適化アルゴリズムの結果得られた積み付けの様子を図 12 に示す。図示されている積載可能空間の中に、直方体の貨物が効率よく積載されている様子が確認できる。

表 1 は、20 ケースを検証ケースとして設定し、新旧システムの積載率の比較を行った結果である。(A)では新旧システムの自動計算結果を比較している。(B)では、旧システムで、自動計算後にユーザが手動で調整をした結果と、新システムの自動計算結果を比較している。

まず、(A)の場合では 16、(B)の場合では 4 つという全ケースにおいて、新システムは旧システムと比べて、同等もしくはそれ以上の積載率となる結果を得ている。(B)の場合には、旧システムでは人手で調整した結果と比較しても、十分に精度の高い結果となっていることがわかる。以上の結果より、BLD 法を用いたアルゴリズムによって、現実の運用に耐えうる積載プランの作成が可能であることがわかった。

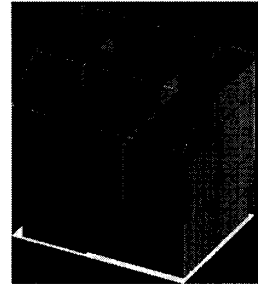


図 12 積み付け結果

表 1 新旧システム結果比較

	旧システムから 新システムへの積載率の 変化別ケース数		
	低下	同等	向上
(A) 自動計算のみ	0	14	2
(B) 旧システム 自動+手動調整	0	3	1

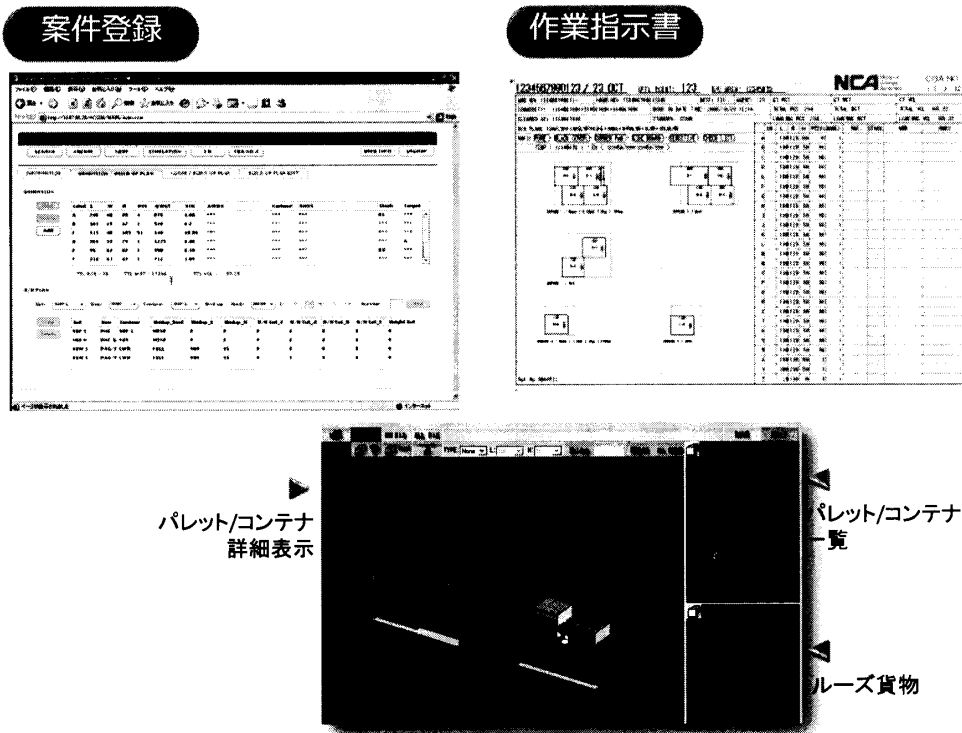


図 13 システム概要

## 6. 全体システム

### 6.1 システム概要

システムの導入形態は Web システムとし、サーバで計算処理およびデータ管理を集中して行う形式としている。NCA のイントラネットにアクセスできる端末であれば、どこでも（どこの国からでも）サービスが利用可能である。実際には図 13 のような一般的な Web ブラウザで操作が可能なシステムとなっている。

また、本システムは以下のサブシステムで構成される。

- ① 案件情報登録
  - ② 積載プラン作成
  - ③ 積載プラン確認
  - ④ 作業指示書作成
- ③、④に関しては以下に解説する。

### 6.2 積載プラン確認機能

作成した積載プランは、3D 表示で確認することができ、実際にどのように積まれるのかイメージしやすくなっている。また、必要であれば、3D 表示されている貨物をマウスで動かすことによって、プランを微調整することも可能である。

### 6.3 作業指示書作成機能

本システムで十分に検証した積載プランを、積み付け作業者に正確に伝えるために、作業指示書を作成する。ULD ごと・レイヤーごとに、貨物の積載位置が図示されている。

## 7. 導入効果

本システムは 2007 年 1 月より運用開始され、主に成田空港を中心とした部署にて利用が開始され、現在では海外拠点からの利用も多い。営業担当者や予約セクションが活用しており、顧客からの予約問合せについて、必要なパレット枚数を正確に把握することができ、迅速な対応が可能となった。現在では、およそ 100 名のユーザがおり、NCA の営業活動を日々サポートしている。具体的な導入効果として、以下のような事項が挙げられる。

### 7.1 積載プラン作成の時間短縮

平均的なケースにおいて、20～30 分程度要していた作業が、5 分程度に短縮することができた。特殊なケースの場合には数時間を要していた場合もあり、効果はかなり大きいといえる。

### 7.2 積み付けプランの 3D 表示による視認性向上

3D 表示されることで視認性が向上し、スキッドを用いたような特殊な場合でも、プランの詳細確認、残容積の視認性向上が可能となった。

### 7.3 データの再利用による効率化

似たようなプランを作成する場合も存在し、その場合には、システムに保存されている過去のプランを再利用することで、効率的に新しいプラン作成をすることも可能となった。

### 7.4 積み付けに関する教育時間の削減

作成時に考慮すべき条件は、システムに組み込まれており、プラン作成者は、システムの指示に従って必要な項目の入力をする程度で、最適な積載プラン作成が可能となる。また、3D 表示や帳票にて、わかりやすく積載プランが表示されており、プラン作成に対する理解がしやすい。実際に、積載プラン作成に関するマニュアル 2 冊は現在ほとんど使用されなくなり、通常半年～1 年かかるとされている教育期間も、1 カ月程度に短縮することができた。

## 8. おわりに

以上のように、航空貨物専用機に対して最適化技術を用いたアルゴリズムを搭載した最適積み付けシステムを構築、導入し、実際の業務において効果をあげることができた。NCA においては、幅広く利用しており、熟練者の方も本システムを評価し、信用して使っていただいている。当然、熟練者の方々の勤と経験にすべての場合においてシステムが勝つことはできないであろう。しかし、担当者の勤と経験をより豊かに蓄積していくために、システムが役に立てれば、筆者らとして嬉しく思う。その結果 CO<sub>2</sub> 削減という環境の問題の解決[7]の一助となれば、さらにその成果は評価されるであろう。

今回航空貨物専用機を対象として開発したが、本システムは汎用的に使えるように開発しており、他の輸送手段にも適用が可能であることを付け加えておく。

**謝辞** 本システム開発にあたり日本貨物航空株式会社、株式会社構造計画研究所の関係者の方々に感謝いたします。

### 参考文献

- [1] 矢野, 齊藤, 小玉: 航空貨物コンテナの最適詰め込みと大都市災害における緊急物資の最適配送計画 第 19 回

- RAMP シンポジウム論文集 (2007), 139-149.
- [2] 月刊エアライン No. 342 エアカーゴ調査隊 第21回航空貨物積載はおまかせ! 新シミュレーションシステム (2007), 110-111.
- [3] N. Yano, T. Saito and T. Morinaga: Packing Optimization for Cargo Containers, SICE Annual Conference (2008), 3479-3482.
- [4] 矢野, 齊藤, 森永: 航空貨物コンテナの最適積み付け～積載率向上による燃料費削減～ (企業事例交流会) 日本オペレーションズ・リサーチ学会春季研究発表会アブストラクト集 (2009), 300-301.
- [5] 柳浦睦憲, 茨木俊秀: 組合せ最適化, 朝倉書店 (2001).
- [6] 今堀慎治, 梅谷俊治: 切出し・詰込み問題とその応用 (2)―長方形詰込み問題―, オペレーションズ・リサーチ, 50 (2005), 335-340.
- [7] 365° Vol. 21 (NTT Group Magazine) 発行: 株式会社 NTT アド (編集: 日本電信電話株式会社) 環境改善時代の到来 (2008), 10-11.