

燃油費削減を目指した航空機貨物の搭載位置最適化システム

米沢 隆, 山本 優, 大内山 浩

Aircraft Cargo Load Position Optimization System for Fuel Consumption Reduction

Takashi Yonezawa, Masaru Yamamoto and Hiroshi Ouchiyaama

燃油費の高騰が航空会社の経営上の重大な課題となり、また同時多発テロ以降、安全運航に対する要求がますます高まる中、安全上の搭載制約を満たし、かつ航空機のバランスを最適化し燃油費を削減することを目指した航空機貨物の搭載位置最適化システムが求められている。この最適化問題に対して、オブジェクト指向プログラミング技術とIBMの持つ最適化技術の1つであるVehicle Routing Planner (VRP)を適用し、搭載位置最適化システムを構築した。本論文では、最適化の制約条件を明確にするとともに、その最適化の実現手法について述べる。この搭載位置最適化システムの開発により、安全運航と燃油費削減に貢献することができた。

The skyrocketing price of aviation fuel has become a major issue for airline companies, and strict safety operations have been required since 9-11. In order to address these issues, the system is required to optimize the cargo loading position of aircraft according to safety conditions and adjust the CG (Center of Gravity) backwards to reduce fuel consumption. The author constructed this system using object oriented programming technology and Vehicle Routing Planner (VRP), which is an IBM optimization solution for logistics. In this article, we describe the optimization requirement and technology that is used in the system. We shall build the system and contribute to safe operation and the reduction of fuel consumption.

Key Words & Phrases : 最適化, Unit Load Devices (ULD), 搭載計画, Vehicle Routing Planner (VRP)
Optimization, Unit Load Devices (ULD), Load Planning, Vehicle Routing Planner (VRP)

1. はじめに

依然として航空機の燃油の価格は高水準を維持しており、航空会社の経営を圧迫し続けている。例えば全日本空輸株式会社（以下、ANA）様における燃油費および燃料税は表1のように年々急増し、2008年度には3,034億円にもなっている。

表1. ANA 様における燃油費の推移 [2]

年度	2005	2006	2007	2008
燃油費および燃料税 (億円)	1,798	2,361	2,661	3,034

このため、各航空会社は燃油費の削減のためさまざまな施策 [3] を実施しているが、その中の1つに航空機の重心バランスを改善することにより航空機の燃費を改善し、燃油費の削減を行うというものがある [4]。

ANA Environmental Report 2003 [5] によると、

「No.21 Controlling the position of center of gravity:

In general, the fuel saving of about 0.05% can expected

提出日:2010年3月18日 再提出日:2010年3月31日

once the center of gravity moves backward by 1%」とあり、重心位置 (CG: Center of Gravity) を後ろ倒しにすることによって1%MAC (後述) あたり0.05%の燃料を削減できると記述されている。単純計算では、%MACが2%改善すると3億円の削減効果となる。

また、従来からもそうであったが、特に同時多発テロ以降、航空機の安全運航に対して高い注意が払われており、貨物の搭載における危険物の隔離制約 (例えば酸化性物質と引火性液体など) の厳格な順守が求められている。しかしながら現状では人手でのチェックに頼らざるを得ないため、すべての安全性の要件を含んだ搭載計画立案システムの構築が必要とされた。以下にその開発目標を示す。

- 搭載計画計算の効率化とオペレーション・ミスを防止するために、搭載計画立案業務をシステム化する
- 燃油費の低減を実現するために、重心位置を自動最適化するシステムを構築する

本論文では、特に航空機貨物の搭載位置の最適化を実現する上での最適化の制約条件を明確にするとともに、その最適化の実現手法を中心に述べる。

2. 航空機貨物の搭載制約

航空機に貨物を搭載する際には、図1のようなULD (Unit Load Devices) と呼ばれる IATA [6] によって規格化されたコンテナまたはパレットに積まれる。

このULDを図2のように航空機の床下にある貨物室に搭載する [7]。(ほかに貨物を直接貨物室に搭載するバルク搭載もあるが本論文では割愛する。)

このULDは、貨物室の床面に設置されたさまざまなロックと呼ばれる器具によって固定されるが、このロックの設置場所によって図3のようにコンテナ(実線)とパレット(破線)の搭載される位置が定まり、これを搭載ポジションと呼ぶ。

これらの貨物の搭載に関して、航空機が安全に飛行するための種々の制約条件が存在し、また、搭載や取り卸しの作業性のためにも多くの条件が存在している。これらの制約条件を満たしつつ重心が好ましい位置となるように、与えられたULDの搭載位置を決定することが搭載計画立案の主な目的となる。図4に実際の搭載計画の例を挙げる。

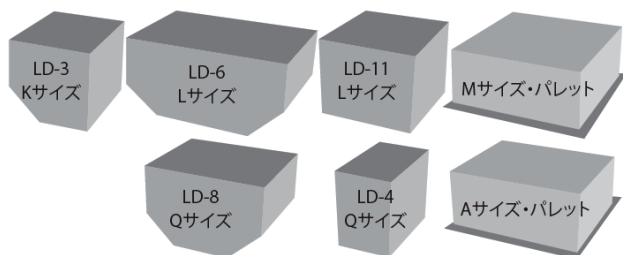


図1. ULDの種類とサイズ



図2. 航空機へのULDの搭載状況

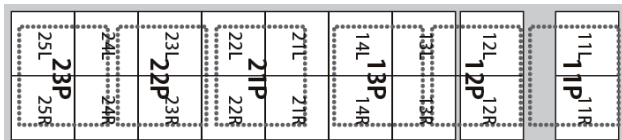


図3. コンテナ・ポジションとパレット・ポジション

2.1 安全上の搭載要件

ULDの搭載位置を決定するには、次のような安全上、法規上、必ず守らなければならない制約条件がある。特に、各種の重量制約、重心制約と、危険物が搭載されたULDの隔離制約が重要である。

2.1.1 搭載位置制約

先に述べたように航空機の貨物室にはULDを搭載するが、ULDはさまざまな形状とサイズがあり、これらを組み合わせる。また、これらのULDを搭載するポジションもロックの配置により、搭載可能なULDの種類とサイズが定まっており、主にK/Lサイズのコンテナを搭載するポジションとM/Aサイズのパレットを搭載するポジションがある。これ以外のサイズのULDに関してもロックの設置状況によって搭載できる場所が限定されている [9] [10]。

2.1.2 重量制約

航空機の運航において、重量の制約は非常に重要な要素で、航空機全体の制限重量のみならず、貨物室単位での制限重量や、搭載ポジションとULDの組み合わせによって重量制限が決まるなど細かな制約が設定されている。

2.1.3 重心制約

航空機が安全に、また燃費よく飛行するためには重心位置が規定された範囲に収まっている必要がある。この重心位置は、航空機の主翼*1の前端を0%、後端を100%とする百分率で表現することが一般的であり、これを%MACと呼ぶ [8]。また、航空機の性質より、この規定の範囲内では後方に重心があるほど燃費がよくなることが知られている [4]。

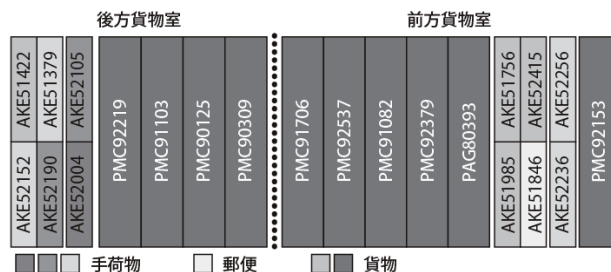


図4. 搭載計画の例

*1 実際には、航空機の主翼は後退角がついているため、それらを補正した平均的な翼を想定しこれをMAC (Mean Aerodynamic Chord) と呼ぶ。

ポジションを使用するかによって、さまざまな組み合わせの搭載を行うことができる。これらの組み合わせを“搭載パターン”と呼び、前方と後方の貨物室のそれぞれがマスターに登録されている。図6にB777-200の前方貨物室の搭載パターンの例を示す。

B777-300ERという機種では、前方で37パターン、後方で33パターンが登録されており、組み合わせは最大1,200パターン以上になる。搭載パターン選択サービスは、これらの組み合わせのうち、与えられた荷物とその種類に基づいて絞り込みを行い、その組み合わせを返す機能である。

当初、ULDのコンテナとパレットの区分とその個数により単純に搭載パターンが選択可能と考えられていたが、LD-4と呼ばれるULDにおいてはその例外となることが分かった。一部の機種では図7のように、このLD-4がコンテナ・ポジションに加え、パレット・ポジションにも2個並列で搭載可能なために、LD-4のコンテナ・ポジションとパレット・ポジションへの割り当て数を決定しなければ与えられたすべてのULDが搭載可能かどうか判断できない。一部の例外的なケースとはいえ、今後の新機種のことも考えるとマスターで自由に記述できる必要があり、汎用的なアプローチが求められる。

4.1 搭載パターン選択機能のモデル化

与えられたすべてのULDをある搭載パターンで搭載可能かどうかを判断するために、個別にロジックを実装する方法も可能ではある。しかし、マスター上、搭載ポジションと搭載可能なULDの組み合わせが任意に指定できるようにするためには汎用的に判断できる必要がある。そのため、個別のロジックで判断するのではなく、マスターとして定義された割り当て可能なULDタイプの情報のみに基づいて可能な組み合わせを探索するモデル化が必要となる。

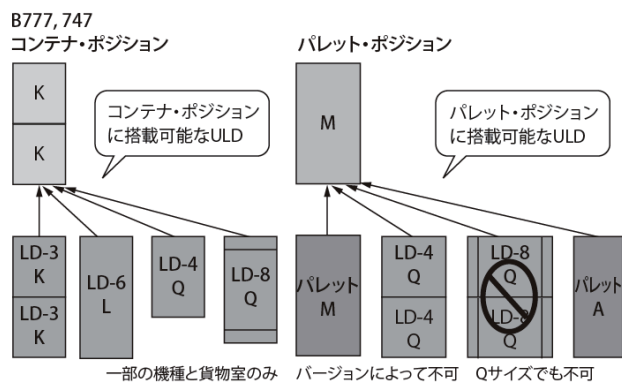


図7. 搭載ポジションと搭載可能なULDの種類

そこで搭載ポジションごとに搭載可能なULDのタイプを設定し、搭載パターンには、各ポジションで搭載可能なULDタイプを設定することによって、図8のような、割り当て問題としてモデル化を行った。

まず、搭載パターン上のポジションを搭載タイプとして分類し、その個数を定義する。一方で搭載すべきULDも種類ごとに分類し、その個数を定義する。これによって、搭載すべきULDの種類ごとの個数を搭載パターン上の搭載可能なポジションの種類ごとに割り当て個数を決定して、すべてのULDが搭載可能かどうかを判断するという機能を実現することになる。

さらにここでは、搭載可能なULDタイプだけでなく、手荷物を搭載するのにふさわしいドア・サイドであるか否かによる分類も行う必要がある。

4.2 分枝限定法による実装

このように一般的な割り当て問題としてモデル化が行えたため、IBM ILOG CPLEXなどの線形計画問題のソルバーなどを用いて解を求めることが可能であるが、問題規模的に過剰であり、軽量の解法が求められる。

そこで、基本的にすべての組み合わせを列挙し、その割り当て可能かどうかの判断を行うこととした。しかしながら最大で44個程度とはいえ、すべての組み合わせを単純に列挙したのでは計算時間がかかってしまうために、不要な探索を効率よく取り除く分枝限定法を実装する必要がある。

これは、各搭載ポジションに荷物の割り当て数を仮決定した時点で、残りの荷物と残りのポジションで、割り当てが可能であるかの簡易チェックを行って、搭載できる可能性がないことを確認されたならば、その探索の枝を取り除き、効率よく全探索を実施する手法である。

荷物種別→		BC区分	BAG	BAG	CGO	CGO	CGO	CGO	CGO		
ポジション↓		ULD	AKE	ALF	AKE	ALF	DQP	PMC	PAP		
BC区分	搭載タイプ	容量	個数	2	4	2	4	3	6	6	
BC区分	搭載タイプ	容量	個数	2	2	14	1	3	2	2	サイズ合計
BAG	KL	4	4	2	2	2	0				16
CGO	KLQ	4	4			6	0	1			15
CGO	KL	4	4			6	1				16
CGO	MA	6	3					2	2	0	18
CGO	A	6	2							2	12
*	*	*	1	0	0	0	0	0	0	0	0
個数合計			2	2	14	1	3	2	2		

図8. ULDと搭載パターンの割り当てモデル

絶対制約条件

- 重心位置の許容範囲
- 貨物室ごとの制限重量
- ポジションごとの制限重量
- グループ・ロック搭載
- 搭載可能 ULD 種別
- 危険物隔離距離制約
- 危険物制限重量

考慮制約条件

- 重心位置の後ろ倒し
- 手荷物のドア・サイド搭載
- 手荷物の同一貨物室搭載
- 郵便の同一貨物室搭載

最大の機種である B777-300ER では、44 個の ULD を搭載可能で、RFI の時点でお客様より提示された 2 ~ 20 秒の計算時間で、搭載方法のすべての組み合わせを短時間ですべて探索することは困難であり、効率的な探索方法が必要となる。

5.1 搭載位置最適化のモデル化

先に述べた、種々の制約を満たした中、重心位置も含めて考慮制約が最も好ましい搭載位置を決定する必要がある。この課題に対して、次の 3 つの処理に分割して最適化する方法を採用した。

- ① ULD のドアからの搭載順の決定
- ② 搭載順に従った搭載ポジションの決定
- ③ 搭載ポジションに従った搭載状況の評価

これにより、図 10 のように、航空機の貨物室のどのドアより、どのような順番で、ULD を搭載するかを決定することによって搭載ポジションが決定される。その搭載ポジションによって搭載状況の評価が決定されるため、最適化の決定変数は、各貨物室への ULD の割り当てとその順番を決定する問題として表現される。その中でさまざまな制約条件に基づいて目的関数が計算される最適化問題としてモデル化される。

5.1.1 ULDのドアからの搭載順の決定

航空機の貨物室は前後に分かれており、いずれに搭載するかを決定する必要がある。さらにドアは貨物室の端に必ずしもないために、ドアから右奥方向、あるいは左奥に搭載されるのかでその搭載位置が決まるものとして、便宜的に 4 列の ULD の列を想定して、ULD をどの列に、どういった順番で割り当てるかを決定変数として最適化するものとする。

5.1.2 搭載順に従った搭載ポジションの決定

ULD を搭載するドア、方向と順序が決定されたものとして、ULD の搭載ポジションはこの順序から従属的に決定されるように搭載位置の決定方式を定義する。これによって ULD を搭載するドア、方向と順序のみが決定変数となって最適化の探索の対象とすること

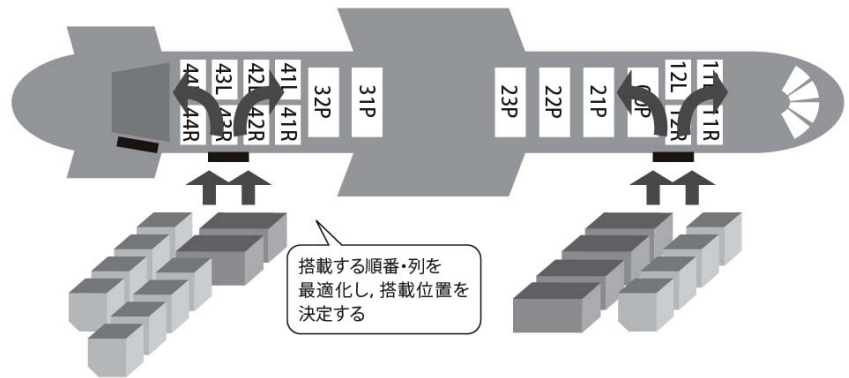


図 10. ULD の搭載位置と順序を最適化するモデル

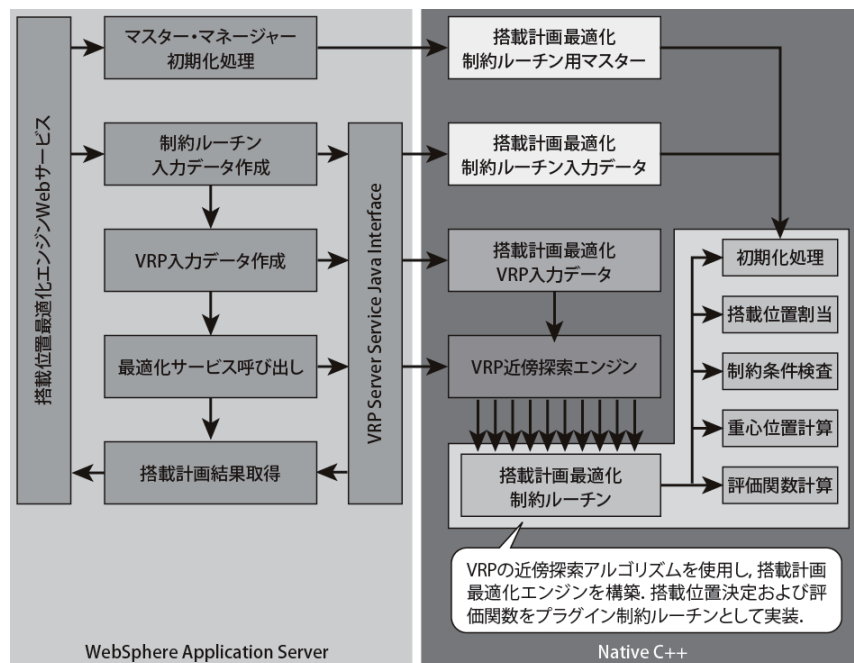


図 11. サービス処理から VRP の最適化処理の流れ

が可能となる。

搭載ポジションの決定方法としては、原則は投入された順番で奥詰めとするが、ULDの種類によって搭載可能なポジションが異なるため、その制約を優先して搭載するポジションを一意に決定する。

さらに、グループ・ロック制約と呼ばれる複数個（通常は3個）の搭載ポジションのグループに対して All or Nothing で搭載する制約があるが、これに対しても一意に搭載ポジションが決定するように、決定方式を設計する。

表 3. 搭載計画最適化モデルと VRP のモデル

搭載位置最適化	VRP 配車最適化
航空機	車両
貨物室	運行
貨物/郵便/手荷物種別	地点
貨物/郵便/手荷物搭載順制約	ミルクラン訪問順制約, 地点間移動時間
ULD	荷物
ULD 搭載個数	積載量

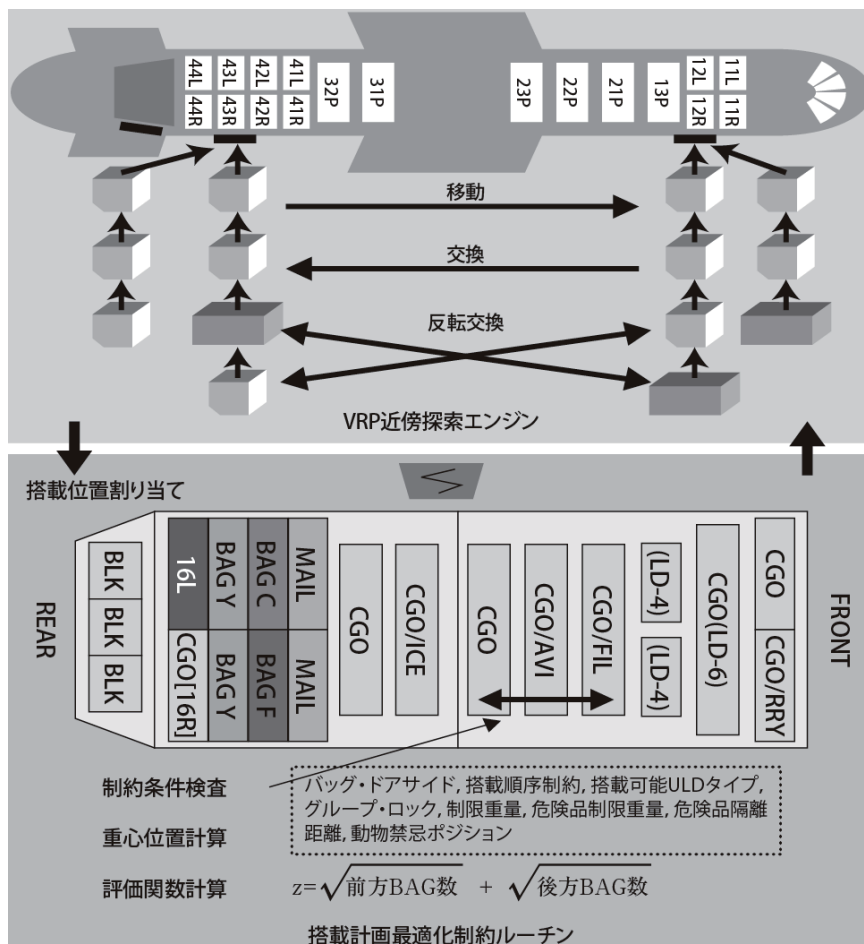


図 12. VRP の最適化エンジンと制約ルーチン

5.1.3 搭載ポジションに従った搭載状況の評価

搭載ポジションが決定されたものとして、その搭載状態に対する評価を行う。この時点で ULD の種類による搭載可能なポジションが異なる制約は満たされていることになるが、そのほかの絶対制約条件や考慮制約が満たされているかを評価して、目的関数値を計算する。

これらの目的関数値は、単純に制約を満たしているかどうかを数値化したものでは効率良く最適化されない場合もあり工夫が必要である。例えば、手荷物を搭載した ULD が複数の貨物室に分かれてしまうことを防ぐために、極力片方の貨物室にまとめて搭載した方が目的関数値が減少する以下のような関数 z を採用した。

$$z = \sqrt{\text{前方手荷物個数}} + \sqrt{\text{後方手荷物個数}}$$

5.2 VRPを用いた最適化の実現方法

このモデルに基づき、搭載位置の最適化を実現するに当たり、筆者らが開発を行っている Vehicle Routing Planner (VRP) [1] を採用した。元来 VRP は車両が荷物を複数の配送先に配る際に、その荷物の車両

への割り当てと訪問順を最適化する製品であるが、今回はこの VRP の最適化エンジンを用いて搭載位置最適化を実現した。このため、VRP の最適化のモデルと搭載位置最適化のモデルを表 3 のように対応付けた。

これらのモデルの対応付けにより、5.1 の①の処理を VRP の最適化エンジンで実現することができることになる。さらに VRP の以下の機能を用いてパフォーマンスの改善を図った。

• ミルクラン集荷機能

貨物/郵便/手荷物の搭載順番を半固定することにより、逆順の搭載順番の探索を抑止し、パフォーマンスを向上する

• 積載量制約

ULD タイプごとに換算容量を定義して、その換算容量で搭載可能かの簡易検査が可能として、パフォーマンスを向上する

②, ③の処理は、図 11 のように VRP のプラグイン制約ルーチンとし

て実装し、その中で搭載ポジションの決定とその搭載状況の評価を行った。

VRPの近傍探索に基づく最適化処理では、荷物と車両の運行の割り当てとその順番を最適化するが、具体的にはまず初期割り当てを簡易な方法で行い、その後、複数の荷物の列の間で移動や交換、反転交換といったさまざまな近傍操作を実施し改善可能な操作を高速に探索する。

この近傍操作を適用する都度、その状況の評価として目的関数値の計算を行うが、その際に図12のようにプラグイン制約ルーチンが呼び出される。この制約ルーチンの中で搭載ポジションの決定と搭載状況の評価を行う。

最適化探索の中で、これらの処理は百万回単位で実行されるため高いパフォーマンスが求められ、プログラミングには最新の注意が必要である。そのため、ほぼすべての計算を $O(n)$ で処理可能なように実装し、問題規模の増加に対して計算時間が極端に増加しないように配慮した。

6. 結果

本システムは、2008年4月に中部国際空港でサービスインされ、2008年5月から成田・羽田・関空など

ANA様のすべての日本発の国際線に展開された。その後、海外空港からの日本着便にも展開され、現在もトラブルなく無事に稼働している。

パフォーマンスに関してサービスイン後の実データを図13に示す。この稼働システム環境を表4に示す。搭載位置最適化機能の平均計算時間が0.55秒で、95%以上の最適化計算が2秒未満で完了しており、すべての最適化計算が6秒以下で完了している。RFI時点で提示された2~20秒という要件に対して高いレベルで達成することができた。

燃費の向上に関しては、本システム適用前と直接同じ条件で比較することができないために削減率のデータは存在しないが、プロジェクト開始時点の検証テストでは約2%MACの重心位置の改善が見込まれており、相当量の燃料の節約が実現できているのではないかと期待される。

7. おわりに

以上のように、最適化技術を用いてANA様の搭載計画システムを構築し、成功裏にサービスインすることができた。その後も順調に稼働することができ、お客様の成功に貢献できたものとする。今後は最適化領域へのオブジェクト指向プログラミングの適用をさらに推し進め、お客様の価値創造に貢献していきたいと考える。

謝辞

本プロジェクトの機会を与えていただいた全日本空輸株式会社様、プロジェクトに参加されたすべての方々に感謝いたします。

表 4. 稼働システム環境

CPU	Xeon 5160 3.0GHz, 2CPU, 4Core
メモリー	2GB
OS	Windows 2003 Server
アプリケーション・サーバー	WebSphere Application Server V6.1

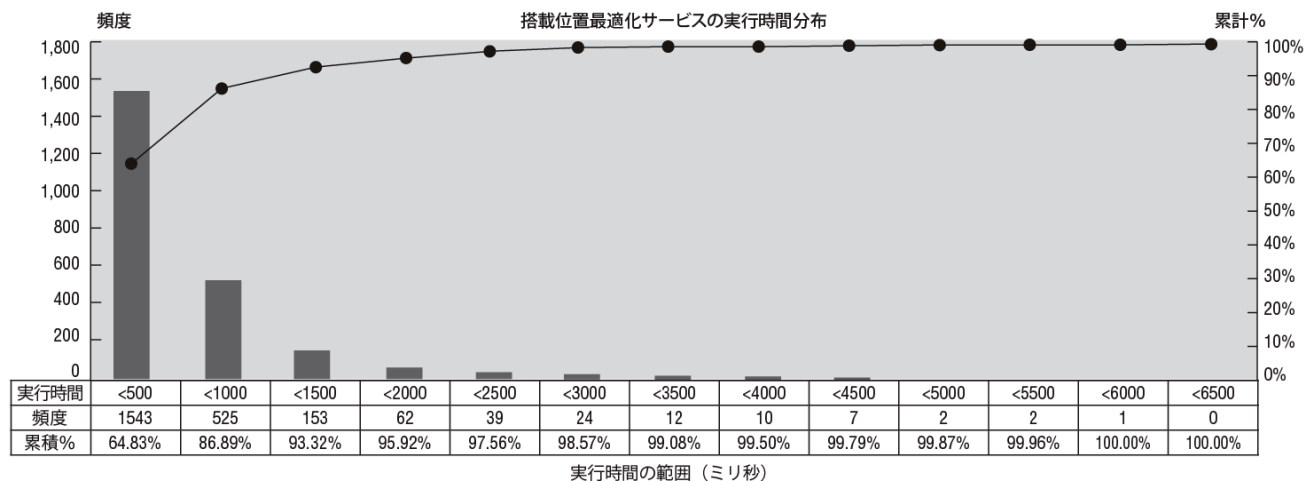


図 13. 搭載位置最適化計算時間のヒストグラム

参考文献

- [1] IBM Vehicle Routing Planner (VRP),
http://www.ibm.com/jp/software/gis/new_vrp.html
- [2] 全日本空輸株式会社 アニュアルレポート,
http://www.ana.co.jp/ir/kessan_info/annual/
- [3] 全日本空輸株式会社 アニュアルレポート 燃節プロジェクト,
http://www.ana.co.jp/ir/kessan_info/annual/pdf/09/09_08.pdf
- [4] Fuel Conservation, BOEING,
http://www.jetbrief.com/library/fuel_conservation.pdf
- [5] ANA : Environmental Report 2003,
http://www.ana.co.jp/eng/aboutana/corporate/csr/report/pdf_backnumber/2003.pdf
- [6] International Air Transport Association, <http://www.iata.org/>
- [7] 航空機のグランドハンドリング, 日本航空技術協会, ISBN: 4-930858-27-5
- [8] 航空機の重量・重心ハンドブック, 鳳文書林出版販売株式会社, ISBN:4-89279-264-0
- [9] ULD : CONTAINER | ANA CARGO,
<http://www.ana.co.jp/cargo/ja/int/service/uld/container.html>
- [10] ULD : PALLET | ANA CARGO,
<http://www.ana.co.jp/cargo/ja/int/service/uld/pallet.html>
- [11] 危険物の分類と品目について | ANA CARGO,
http://www.ana.co.jp/cargo/ja/int/service/regulations/dg_goods.html
- [12] DRY ICE 搭載重量制限 | ANA CARGO,
<http://www.ana.co.jp/cargo/ja/int/service/regulations/dryice.html>
- [13] "Design Patterns: Elements of Reusable Object-Oriented Software", Erich Gamma, Richard Helm, Ralph Johnson, John M. Vlissides, ISBN:0-201-63361-2
- [14] 関心の分離, <http://ja.wikipedia.org/wiki/関心の分離>



日本アイ・ビー・エム株式会社
グローバル・ビジネス・サービス事業
コンサルティング・サービス
ビジネス・アナリティクス & オプティマイゼーション
コンサルティング IT スペシャリスト

米沢 隆 Takashi Yonezawa

【プロフィール】

1989年日本IBM入社。1999年より配送最適化ソフトウェアVRPの製品開発およびサービスに従事し、さまざまなビジネス最適化プロジェクトを担当。2010年オペレーションズ・リサーチ学会研究普及理事に就任。コンサルティング IT スペシャリスト。



日本アイ・ビー・エム株式会社
グローバル・ビジネス・サービス事業
コンサルティング・サービス
ビジネス・アナリティクス & オプティマイゼーション
シニア IT スペシャリスト

山本 優 Masaru Yamamoto

【プロフィール】

IBM製品保証部門に入社後、開発製造部門に異動しソフトウェア開発エンジニアとして金融営業店システム製品の開発などに従事。サービス部門に異動後は最適化などのプロジェクトなどに参画し現在に至る。シニア IT スペシャリスト。



日本アイ・ビー・エム株式会社
グローバル・ビジネス・サービス事業
コンサルティング・サービス
ビジネス・アナリティクス & オプティマイゼーション
IT スペシャリスト

大内山 浩 Hiroshi Ouchiya

【プロフィール】

2006年日本IBM入社。大和ソフトウェア開発研究所において最適化製品「IBM Vehicle Routing Planner シリーズ」の開発・保守、サービス業務に従事。2008年よりサービス部門へ異動。2009年にILOG JRulesを用いたアセット開発を担当。情報処理学会会員。IT スペシャリスト。