

自動車船の運航業務に数理最適化を適用するための実践的なアプローチ

坂本 淳子, 大野 修平, 永橋 幸大, 鈴木 保乃加, 梅谷 俊治

商船三井が運航する自動車船は世界最大級の隻数を誇り、多様な輸送サービスを提供している。自動車船の運航業務は、各航路に自動車船を割り当てる配船計画、各航路における寄港順を決定する運航計画、それに従い自動車船に貨物を配置する貨物積付計画など、多くの計画系の業務で支えられている。顧客要望を満たし安全に輸送するには、これら運航業務を適切に行うことが必要不可欠である。そこで、商船三井システムズは、自動車船の運航業務に数理最適化を適用する取り組みを行った。本稿では、数理最適化を業務に適用するための実践的なアプローチおよび自動車船の運航業務における問題設定と定式化についてその一部を解説する。

キーワード：自動車船、配船計画、運航計画、貨物積付計画、数理最適化、モデリング

1. 緒言

自動車船とは、自動車や建設機械などの自走可能な貨物を専門に輸送するために設計された船であり、1965年に商船三井が日本初の自動車専用船「追浜丸」を就航させた [1]。当初は 1,200 台積みで開始した自動車輸送サービスだが、現在では小型車に換算して 6,800 台もの自動車を一度に輸送可能となっている。さらに、2018 年に竣工した FLEXIE シリーズ (図 1) は、デッキが 14 層あり、そのうち 6 層が高さの調整可能なリフトアップデッキとして、自動車・トラック・建設機器・トレーラーなど多様化する貨物に対応している [2]。さらに、ランプウェイ (船と岸壁とを橋渡しする貨物用の出入り口) を通行可能な最大重量は 150 トンのため、ほぼすべての自走可能な貨物に対応している。商船三井はパナマ運河を通航できる最大船型であるパナマックスを中心に船隊を構成しているため、世界中のあらゆる港への寄港が可能である。なぜなら、パナマ運河の通航には、喫水 (水面から船体最下部までの距離) と喫水上の高さ (水面から船体最上部までの距離) に加え、開門のサイズ以下という制限があり、この制限を満たした最大船型であるパナマックスは、スエズ運河はもとより世界中の海を制約なく航行できるサイズを意味するためである。

商船三井は世界約 140 ケ国に営業拠点ならびに代理

さかもと じゅんこ, おおの しゅうへい, ながはし こうた, すずき ほのか

商船三井システムズ株式会社 ICT 戦略推進部

〒 105-8688 東京都港区虎ノ門 2-1-1

うめたに しゅんじ

大阪大学大学院情報科学研究科

〒 565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1



図 1 2018 年 3 月に竣工した次世代型自動車船「FLEXIE シリーズ」1 番船 “BELUGA ACE”

店ネットワークを有しており、世界最大級の自動車船 (約 100 隻) の運航を世界各地から支えている [3]。輸送ルートは多岐にわたり、太平洋 (アジア・オセアニア、極東～北中南米)、インド洋 (極東～欧州・アフリカ)、大西洋 (欧州～北中南米) において自動車輸送サービスを展開している。2019 年の世界の自動車海上輸送台数は約 1,250 万台 (商船三井調べ) に対し、同年の商船三井の年間自動車海上輸送台数 (中古車・近海航路含む) は約 380 万台であり、海上輸送を支えていることがわかる。

近年、自動車メーカーをはじめとする荷主の輸送・物流パターンは多様化する傾向にあり、顧客の要望を満たし安全に輸送するためには当社船隊の効率的な運航が必要不可欠である。自動車船の運航業務には、各航路に自動車船を割り当てる配船計画作成業務、割り当てられた各船舶と顧客からの要望をもとに運航スケジュールを決定する運航計画作成業務、決められた運航スケジュールに従い各デッキ・ホール (区画) に貨物を割り当てる貨物積付計画作成業務など、多くの計画系の業務がある。これらの計画業務は担当者がもつ熟練し

たスキルにより支えられているが、船舶の大型化や輸送サービスの多様化に伴い難易度が上がり、計画に要する時間は担当者の熟練度が低いほど長くなる傾向にある。

そこで、商船三井システムズは社内コンサルタントとして、商船三井における自動車船の運航業務に対する数理最適化の適用に取り組んだ [4]。本稿では、われわれが取り組みを通じて得た経験にもとづき、数理最適化を業務に適用するための実践的なアプローチについて解説するとともに、自動車船の運航業務における問題設定と定式化についてその一部を紹介する。自動車船に限らずドライバルク船や油送船においても、複数の港で複数種類の貨物を複数のホールドに積むケースがあるため、本研究の成果はほかの船種への応用可能性がある。

2. 実践的なアプローチ

本節では、商船三井システムズが行ったアプローチについて解説する。数理最適化を用いて実務の課題を解決し、最終的に役に立つシステムを開発するまでの工程は、従来のシステム開発の工程とは全く異なるものである。通常システム開発では、全体の仕様を決めてからプログラミングを行うウォーターフォール型の開発が一般的であり、要件定義、設計、製造、テストという流れで進み、前工程に戻ることはない。これに対して、数理最適化を用いたシステム開発では、明確な仕様を事前に決めることができない。これは、実務の課題をどの程度解決できるかを、事前に知ることが困難なためである。そのため、開発工程は必然的に探索的にならざるを得ず、試行錯誤を何度も重ねる必要がある。このような状況では、後戻りが不可避免的に発生することから、あらかじめ確定した要件定義を前提とし、開発を段階的に詳細化していくウォーターフォール型の開発は実態にそぐわず、非ウォーターフォール型の開発が適している。非ウォーターフォール型開発の代表的手法であるアジャイル型開発は、多数の機能を有する大規模システムの開発には適していると考えられるものの、数理最適化を用いたシステム開発のような探索的な開発には適さない。そこで、われわれは社内の研究開発で用いていたステージゲート方式 (図 2) を採用した。ステージゲート方式はステージ 0 から 4 までの五つの段階に分かれており、各段階で目指す目標

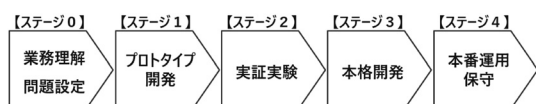


図 2 ステージゲート方式

を達成すれば次の段階へ進むという方法である。各段階は必ずしも明確に区分されるものではなく、相対的に区分されることもある。

2.1 ステージ 0：業務理解と問題設定

ステージ 0 の目標は、現状業務を理解し、最終的な目標を設定し、数理最適化で解決すべき問題を特定し、関係者間で合意することである。

現状業務を理解する作業は、通常システム開発でも要件定義工程で行われる作業である。通常システム開発では、計画担当者へのヒアリングや現行業務処理を記載したドキュメントから業務の流れを理解する。ところが、数理最適化を用いたシステム開発では同じ方法が使えない。これは、貨物積付計画や配船計画のような、組合せパターンが複数ある中から諸事情を考慮して計画を作成する業務は、担当者が経験を通じて獲得した経験知 (暗黙知) にもとづいて行われているからである。暗黙知は言葉で説明できない知識であり、実務はできるのに説明できない、わかっているのになかなか言えない知識である。そのため、業務処理を記載したドキュメントがない場合も多い。業務処理を記述できるということはフローチャート記号 (処理や条件分岐や繰り返しなど) で記述できることにほかならないが、数理最適化の定式化をフローチャート記号で記述することは困難であるため、ドキュメントがないのは当然ともいえる。そのような中で業務を理解するためには、計画担当者へのヒアリングのみならず実際に計画を作成する現場に同席し、行動を観察すると良い。計画担当者が計画を作成するところを観察し注目している箇所を確認したり、複数の計画担当者が計画について互いに意見を述べあう場に同席し必要な情報や暗黙の了解を確認することが有効である。

現状業務を理解することで解きたい、あるいは解けそうな問題が見えてくるが、すぐに問題を設定するのではなく、先に目標を明確にし関係者間で合意することが重要である。これは、目標と現状とのギャップこそが解くべき問題であり、関係者全体が共通認識をもち目標に向けて問題解決に取り組む必要があるからである。目標というと費用の最小化や売上の最大化などが想起されるが、仮に数理最適化により現状よりも費用を削減できる計画が得られたとしても、計画どおりに実行できなければ絵に描いた餅である。そのため、費用の最小化や売上の最大化を目標とする場合には、数理最適化を用いることにより想定される費用削減の期待値に対し、外的阻害要因による費用削減の縮小を織込んだうえで目標を設定するのが良い。このような、

運用における目標設定は、投資対効果を説明しやすいため取り組み開始のハードルが低いですが、現状よりも優れた計画案を作成する必要があるため目標達成のハードルが高い。これに対し、計画における目標設定としては、計画担当者の計画作成業務を自動化、または支援することがある。この場合には、現状の計画作成に要する時間から目標とする削減効果を算出することになる。計画の目標は運用の目標と比べると金額インパクトが小さく投資対効果を説明しづらいため取り組み開始のハードルが高いが、現状と同程度の計画案を作成すれば十分であることから目標達成のハードルは低い。取り組み開始のハードルを下げるための工夫として、現状では不可能であったことが可能になることに着目する方法がある。たとえば、現状では当月と来月の計画は作成できるが半年間や1年間の計画は作成困難である状況や、現状では作成した計画のよし悪しを数値的根拠から説明することが困難である状況、現状では少数の計画担当者に仕事が集中することで営業上の機会を損失している状況などが考えられる。これらの状況を改善し、意思決定の質を向上させることや機会損失を減らすことを効果として説明できれば、取り組み開始のハードルを下げるができる。

関係者間で合意した目標と現状のギャップに対し、数理最適化を適用する範囲を検討し、問題設定を行う。ギャップが大きく一度に解決することが難しい場合は、段階的に解くことを想定し最初に取り掛かる問題を設定する。

2.2 ステージ1：プロトタイプ開発

ステージ1の目標は、問題が解けそうかを確認することである。数理最適化を用いて問題解決をするには、モデリング、アルゴリズムによる求解、結果の分析・検証、という一連の手続きを、妥当な計画案が得られるまで繰り返し行う必要がある [5]。モデリングに際しては、最初からすべての制約条件を含めた問題を解くのではなく、本質的な問題を抽出して解くのが良い。本質的な問題とは、最も重要な根幹をなす部分のことである。本質的な問題を抽出することにより問題が単純化されるが、単純化したからといって問題が易くなるわけではなく、むしろ問題の難しい部分が浮き彫りになるため、最初にここに取り組むことで、解けるかどうかの見極めになる。

本質的な問題が解けたら、少しずつ制約条件を追加し、入力データの項目を増やし、現実問題に近づけていく。少しずつ追加することで、計画担当者が重要と考える制約条件が明らかになり、また、必ず満たすべき

ものとそうでないものも明らかにできる。そして、現実問題に対して妥当な結果が得られることを確認する。妥当性の評価方法は事前に決める必要があるが、たとえば、同じ入力データをもとに計画担当者が作成した計画と比較し、その内容や所要時間が同等以上となることは、一つの評価方法になりうる。

2.3 ステージ2：実証実験

ステージ2の目標は、数理最適化を用いて作成した計画案が実務に役立ちそうかを確認することである。そのため、実務と同じデータから複数セットの入力データを作成し、計算結果を確認する必要がある。可能ならば計画担当者が同じ入力データから作成した計画案と計算結果を比較することが望ましい。さらに追加したい要件が出てくればモデリングを改良する。また、それにより実行可能解が得られなくなるような場合は、いずれの要件を優先するか決定する。どちらも可能な限り満たしたい要件の場合は、制約条件ではなく目的関数に組み込むことや、一方の制約条件を緩和することを検討する。また、要件によっては、モデリングに含めない方が良い場合もある。計画担当者と同じ計画案を作成しようとすると、モデルが複雑になり、それに伴い入力データの項目も増えることになる。最終的な目標を達成するために、数理最適化を適用する範囲を見誤ることのないよう、常に点検するのが良い。

このように、繰り返し計画担当者に計画案を提示してフィードバックをもらうことが重要であるため、計画担当者が直感的に理解しやすい形で計画案を提示する必要がある。そこで、計算結果の可視化方法についても検討する。表計算ソフト（たとえばExcel）や可視化ソフト（たとえばTableau）など計画担当者を使い慣れた既存のソフトウェアを用いて可視化を実現するのが良い。これは、可視化方法は次ステージの本格開発におけるユーザーインターフェースの基礎であり、ユーザーインターフェースに既存ソフトウェアを用いることができれば、本格開発の費用を大幅に削減できるためである。可視化方法の検討は、現状の業務で用いられている方法に固執するのではなく、自由な発想で検討するのが良い。現状の業務で用いられている方法は、専門の計画担当者にはかわからない暗黙知を前提としていることがあり、ほかの業務担当者では理解が困難な場合がある。現在の計画担当者だけが、次フェーズで本格開発されたシステムの利用者とは限らないため、ほかの業務担当者にも理解がしやすい可視化を視野に入れて検討するのが良い。

実務に役立つことを確認するために、2.1節で合意

した最終的な目標の達成度を検証する。さらに、実務に役立てるにあたり、必要な入力データの取得方式や最適化計算の実行頻度、利用者の人数なども検討し、次フェーズで本格開発するシステムに含める範囲と含めない範囲を明確にする。これらは、通常のシステム開発における要件定義で決めるべき項目の一部となる。

2.4 ステージ 3：本格開発

ステージ 3 の目標は役に立つシステムを開発することである。ここからは通常のシステム開発の手順に戻り、要件定義工程で決めるべき残りの項目を決定する。数理最適化を用いたシステムに特有の項目について、いくつか述べる。

一つ目は、複数の計画案候補を提示する機能要件である。多目的な最適化問題の場合、通常、目的関数は複数の違反量の重み付き総和となる。重みを調整することで全く異なる計画案となる場合は、重みにバリエーションをもたせ、それぞれの最適化問題を解き、得られた複数の計画案を利用者に提示する方が良い。たとえば、貨物積付計画において、積港が同じ貨物をできるだけ同じホールドに配置する要件と、揚港が同じ貨物をできるだけ同じホールドに配置する要件は、互いに衝突するため、目的関数にそれぞれの違反量の重み付き和が追加されている。業務において積港の纏まりを優先したい場合や揚港の纏まりを優先したい場合、決めかねる場合があるため、それぞれの重みを調整して得られた計画案が提示されれば、利用者は相互に比較して最適な計画案を選択できる。

二つ目は、許容できる計算時間に関する性能要件である。通常のシステム開発では前提条件が明確なため応答時間の設定が可能であるが、数理最適化を用いたシステムで応答時間を設定することは困難である。アルゴリズムがどんなに優れていても、入力データが少し変わるだけで途端に計算に時間を要することがある。特に、当月と来月に加えて再来月の計画もなどと計画期間が延びると問題の難易度が格段に上がることが起こり得る。そのため、性能要件として定義せず、許容求解時間を計算パラメータとして人が設定することを検討する。たとえば、実務において、ある計算時間で満足する計画案が得られない場合に、もう少し時間をかけて良い計画案が得られるのなら試したいという場合はある。計画担当者がステージ 2 の実証実験を通じて、最適化問題の特性をある程度理解できている場合には、このような対話型のシステムが役に立つ。

要件定義が完了したら、設計、製造、テストという流れで開発を進める。これ以降は、通常のシステム開

発の手順に従う。

2.5 ステージ 4：本番運用保守

ステージ 4 は本稼働後の運用保守の段階となるため、こちらも通常のシステム運用保守の手順に従う。数理最適化を用いたシステムに特有の項目について述べると、テストでは確認ができなかった、実行可能解が存在しない入力データへの対処がある。複雑な最適化問題では、多くの制約条件が互いにトレードオフの関係をもつため、実行可能解が求められない原因を特定することは容易ではない。速やかに原因を調査し問題を特定し、対処法を検討する必要がある。

原因究明の手順としては、優先度の低い考慮制約から一つずつ取り除き実行可能解が得られるかを確認する。考慮制約をすべて取り除き絶対制約のみを課した問題でも、実行可能解が見つからない場合には、さらに整数変数を連続変数に緩和した問題を解く。連続緩和問題が解けない場合は、明らかに入力データに無理があることが確認できる。その場合には、計画担当者に需要が過大もしくは供給が過少でないか確認を取る。本番運用中にこのようなことが起きないように、すべての制約条件を考慮した計画案を求める最適化問題を解く前に、絶対制約を満たす解を求める処理を加えると良い。この前処理により、入力データの不備が原因で実行可能解が存在しないときに、その原因をすぐにユーザーに通知することができ、実用上かなり有用である。その他の予防策としては、解なし時の運用フローを確立しておくことや、設計やテスト時に実行不可の可能性を入念に検討することなどがある。

3. 自動車船の運航業務

本節では、自動車船の運航業務の概要および各計画業務について解説する。商船三井が約 100 隻の自動車船で提供する輸送サービスは代表的な航路だけで約 30 航路ある。たとえば、太平洋（アジア・オセアニア、極東～北中南米）の代表的な航路は表 1 に示すとおり 14 航路ある。この表からわかるとおり、各航路は輸送元地域と輸送先地域とおおよその頻度だけが決められており、コンテナ船のように船名、寄港する港名、入港予定時刻、出航予定時刻など具体的な運航スケジュールは決まっていない。そのため、将来の荷量を見据えて各航路に自動車船を割り当てる配船計画、割り当てられた各船舶と顧客からの要望をもとに運航スケジュールを決定する運航計画、決められた運航スケジュールに従い各デッキ・ホールドに貨物を割り当てる貨物積付計画という各段階を経て、自動車の海上輸送サービ

顧客	商船三井
船積み予定貨物の詳細（寸法/台数/荷姿等）、希望積港・揚港、船積みタイミング等の情報を提示の上、海上運賃見積を依頼。港（ヤード）までの貨物搬入や通関の手配可否を確認。手配が難しい場合は海貨業者へ相談	3ヶ月半前 ～2ヶ月前 海上輸送サービス可否を確認の上、海上運賃、暫定のスケジュールを案内
海上運賃及び船積みスケジュールが要望を満たす場合、スペース確認を依頼	1ヶ月半前 ～1ヶ月前 本船のスペースを確認
船積みが確定したタイミングで、正式に Booking を依頼	1ヶ月前 ～2週間前 Booking 内容をもとに、本船のスペースを確保し、Booking No. および最新のスケジュール・本船名を案内
船積みに必要な書類（Shipping Instruction）を準備、通関の手配。本船スケジュールに変更がないことを確認の上、積載する貨物をヤードへ搬入	1ヶ月前 ～前日 本船が船積港へ到着。船積み完了
Freight Invoice に基づき、入金を手配、船積み書類（B/L）を発行依頼	船積み後 Freight Invoice を送付。入金を確認次第、船積み書類（B/L）を発行
裏書を行ったB/Lを荷揚港代理店へ差し入れ、貨物の引き取りを実施	本船荷揚港到着 荷揚完了以降 荷揚港へ本船が到着前に Notify Party へ Arrival Notice を送付。B/Lの提出があれば、入金状況を確認の上、荷渡しを実施

図3 商談から輸送までの一般的な流れ

表1 太平洋（アジア・オセアニア、極東～北中南米）の代表的な航路

Route	Frequency
極東～東南豪	4-5/month (weekly)
極東～北西豪	2-3/year
極東～ニュージーランド (NZ)	2/month
極東～パプアニューギニア	1/month
東南アジア～豪州・NZ	4/month (2 for NZ)
イントラアジア	4-5/month (weekly)
東南アジア～日本	2/month
インド西岸～アジア	1/month
インド東岸～アジア	1/month
中国～シンガポール	1-2/month
極東～カナダ・米西海岸	4-6/month
極東～メキシコ・米東海岸	4-6/month
極東～南米東海岸	7-8/year
極東～カリブ海	2/month

スは実現されている。

自動車船の運航業務のうち、最初に検討されるのは配船計画である。配船担当者は各航路の船積み需要と自社船隊の供給バランスを考慮して、各船舶を各航路へ割り当てる中期的な配船計画を作成し、必要に応じて外部からフリー船を貸借することで各月の荷量の多寡を調整する。また、配船担当者は、各航路の営業担当者が顧客から受けた要望を吸い上げ、顧客が希望する荷量や船積みタイミングを最大限満たすように、短期的な配船計画を都度修正する。

次に検討されるのは運航計画である。各航路の営業担当者は顧客からの要望を受け、それらを最大限満たすように自動車船の運航スケジュールを検討する。自動車船の運航スケジュールが確定するまでの流れについて図3に沿って解説する。顧客から希望する荷量や積港や揚港などの要望が届くのは、およそ船積み当日の2～3ヶ月前であり、これを受け、営業担当者は対象航路の輸送サービス可否を確認のうえ、暫定スケジュー

ルを顧客へ回答する。スケジュールが顧客の要望を満たす場合は、顧客から1ヶ月半前～1ヶ月前に船舶のスペース確認依頼がある。この時点では、空き状況の確認のみであり船積みは確定していない。顧客が正式に船積みを確認するのは1ヶ月前～2週間前で、顧客からの正式依頼を受け、営業担当者は船舶のスペースを確保し、ブッキング番号および最新のスケジュールと船舶名を顧客に回答する。つまり、船積み当日の2週間前までは、ブッキング情報（荷量と積港と揚港と船舶）が確定しない状況が続き、この間に営業担当者は顧客からのさまざまな要望をできるだけ満たすように、かつ、各航路の寄港回数や稼働日数を効率化し運航費を抑えられるように、船舶の運航スケジュールを調整し最終確定させる。

最後に検討されるのは貨物積付計画である。貨物積付計画担当者は営業担当者が決定した運航スケジュールとブッキング情報をもとに、貨物の積み揚げの順序や航海中の船体バランスなどを考慮し、船舶上のどのデッキ・ホールドにどの貨物を積み付けるかの貨物積付計画を作成する。その後、各デッキ・ホールドに割り当てられた貨物について、デッキ・ホールド内での積み揚げ順、車両サイズ、車両間隔を考慮し、車両の向きや積み付け位置といったより詳細な貨物積付計画を作成する。このように、船積み当日を迎えるまでに、配船担当者・営業担当者・貨物積付計画担当者が適宜情報を連携しながら繰り返し計画が見直されていく。

4. 問題設定と定式化

本節では、自動車船の運航業務において数理最適化の手法を活用できる箇所について解説するとともに、定式化の一部を紹介する。

4.1 配船計画

自動車船の配船計画の問題設定を考える。各船舶の運航スケジュールは先に述べたとおり、船積み当日に

近づくにつれて詳細が確定していくため、たとえば今日から2週間先~1ヶ月先に極東で船積みし北米東岸に向かう貨物については、今日から2週間先~1ヶ月先にいずれかの地域から極東へ戻る予定の船舶を割り当てることになる。今日時点ですべての船舶はいずれかの地域に寄港中か、いずれかの地域間を大洋航海中の状態であるため、今日から2週間先~1ヶ月先に極東に戻る船舶のバリエーションは限定される。そのため、当月の各船舶の配船計画は、顧客要望を踏まえて人手で計画を立てる方が望ましい結果が得られやすい。一方、数ヶ月先までの貨物需要や船舶の定期検査予定を考慮して配船計画を立てる作業は、計算により自動化できれば配船担当者の支援になる。将来の貨物需要は不確実なため、配船担当者はさまざまな想定において配船計画を立てる必要がある。当月と同程度の貨物需要が続く想定や、貨物需要が当月よりも縮小あるいは拡大する想定における配船計画を自動立案できれば、配船担当者はその計画をもとに定期検査予定の調整やフリー船の貸借検討などさまざまな意思決定に役立てることができる。

配船計画問題については文献 [6] に定式化の具体的な手順が示されており、整数計画問題に定式化することが有効であることが述べられている。これを用いて、各自動車船がすべての航海の需要を満たし、かつ輸送コストが最小となる航海パターンの組合せを求める問題を記載する。

自動車船の集合を V 、航海の集合を D 、実行可能な航海の組合せ（以降、航海パターンと呼ぶ）の集合を P と表す。自動車船 k が担当可能な航海パターンの集合を P_k と表す。 c_j を航海パターン j の輸送コストとし、 a_{ij} を航海パターン j が航海 i を含むならば1、そうでなければ0をもつ定数とする。変数は x_j と y_i であり、ともに0-1変数である。変数 x_j は航海パターン j が選ばれるならば1、それ以外のときに0をとる。変数 y_i は航海 i がどの航海パターンでも処理できないときに1、それ以外のときに0をとる。これらを用いると以下の整数計画問題に定式化することができる。

$$\begin{aligned}
 & \text{最小化} && \sum_{j \in P} c_j x_j + \sum_{i \in D} F_i y_i \\
 & \text{制約条件} && \sum_{j \in P} a_{ij} x_j + y_i = 1, \quad \forall i \in D, \\
 & && \sum_{j \in P_k} x_j \leq 1, \quad \forall k \in V, \\
 & && x_j \in \{0, 1\}, \quad j \in P, \\
 & && y_i \in \{0, 1\}, \quad i \in D.
 \end{aligned}$$

変数 y_i を導入すると、この問題は常に実行可能になる。ここで、係数 F_i は航海 i が処理できないペナルティとみなせる。すべての航海を処理する解を得るには、この F_i を十分大きな値に設定すると良い。

この定式化は、一つの航海を担当する自動車船が1隻である場合には有効だが、実際の配船計画では数ヶ月先までの輸送元地域から輸送先地域への貨物需要を満たす必要があるため、一つの航海における需要量が1隻の自動車船のキャパシティを超えることも想定される。そこで、われわれは、一つの航海を複数の自動車船で担当するよう定式化を見直し、汎用的な整数計画ソルバー (Gurobi Optimizer ver. 9.0.1) を用いて質の高い近似解を得られることを確認した。

4.2 運航計画

自動車船の運航計画の問題設定を考える。顧客からの要望は先に述べたとおり、船積み当日の1ヶ月前~1ヶ月前のスペース確認の段階ではまだ確定していないが、営業担当者としては正式依頼に備えて船舶のスペースを調整しておく必要がある。表1の極東~カナダ・米西海岸や極東~メキシコ・米東海岸のようなサービス頻度の高い航路を担当する営業担当者は、たとえば今日から1ヶ月先~1ヶ月前先に船積み希望する貨物について、複数の顧客からスペースの確認依頼が届くため、それらの貨物を複数の船舶のスペースにうまく割り当てて運航スケジュールを検討する。特に、これらの航路は同じ極東地域から北米地域への輸送サービスのため、営業担当者は両サービスをあわせて最適な運航スケジュールを検討する。極東地域には約10ヶ所の積港があり、北米の東海岸地域および西海岸地域にはそれぞれ約10ヶ所の揚港があり、この間を自動車船が数隻ずつ就航している。1ヶ月先~1ヶ月前先に船積み希望する各ブッキングは、荷量と積港と揚港のほかに希望する船積みタイミングやメインデッキへの積載希望有無などをもつ。また、各自動車船は積載可能日や燃費などの情報を持ち、各港は寄港費の情報をもつ。

運航計画では、各ブッキングの各自動車船のホールドへの割り当てと、各自動車船の運航スケジュールを同時に求める。各ブッキングの各自動車船のホールドへの割り当てでは、車両の高さがホールドの高さを超えない、指定された車両はメインデッキに配置する、配置する車両の合計面積がホールドの面積を超えないなどの制約条件を満たす必要がある。また、各自動車船の運航スケジュールでは、積港における車両の船積み希望タイミングを満たす必要がある、かつ同じ日に

同じ港には1隻の自動車船しか寄港できない。このほかにも、各港への寄港回数を抑えて寄港費や燃料費を減らす、寄港先で滞船する日数を抑えて滞船費を減らす、同一ブッキングの車両は少数のホールドにまとめて割り当てる、などの要望がある。営業担当者はこれらすべてを考慮して運航計画を作成するため、計算により自動化できれば業務支援になる。また、積港や揚港、荷量の変更依頼もたびたび発生するため、その都度人手で複数船の運航スケジュールを見直すよりも、計算によりスケジュールの見直し案を提示することができれば、仮に見直し案をそのまま受け入れることが難しいとしても、検討材料の一つとして営業担当者の役に立つ。

運航計画問題の定式化については、先に配船計画の定式化および貨物積付計画の定式化を実現していたことから、これらをうまく組み合わせて整数計画問題に定式化することができた。

4.3 貨物積付計画

自動車船の貨物積付計画の問題設定を考える。貨物積付計画担当者は先に述べたとおり、最終確定した運航スケジュールとブッキング情報から、貨物の積み揚げの順序や航海中の船体バランスなどを考慮し、船舶上のどのデッキ・ホールドにどの貨物を積み付けるかの貨物積付計画を作成する。ブッキング情報は、車種ごとに高さ・幅・長さ・重さが異なり、それぞれに積港と揚港と台数が与えられている。自動車船の内部は自走式立体駐車場のような構造をしており、各車両は図4のように自動車船の出入り口（ランプと呼ぶ）から入り、ホールドとスロープを経由し、指定された位置まで自走して積み付けられる。輸送効率を上げるために図5のようにスロープにも各車両は積み付けられ、船内のほぼすべてのスペースを使い切る[7]。さらに、所定の位置に積み付けられラッシングベルトで固縛された車両は、安全のために揚地に着くまでは動かさないことが望ましい。そのため、積港における貨物の搬入および揚港における貨物の搬出の際に、各車両の配置場所からランプまでの通路を確保できるように、自動車船内における各車両の配置を求める必要がある。また、各デッキには高さ・面積・重さの制限があるため、それらを満たさなければならず、航海中の船体バランス（下層デッキと上層デッキの重量バランス）も考慮する必要がある。複数港積み複数港揚げ複数車種というブッキング情報をもとに貨物積付計画を手で作成するためには高いスキルが必要になり、すべての制約条件を満たしていることを人手で確認するのは非



図4 積付計画に従って、実際に車両を積み込む様子



図5 自動車船内のスロープに積み付けられた車両

常に難しく時間がかかる。そのため、人手で作成した計画がすべての制約条件を満たしているかを系統的にチェックできたり、各デッキ・ホールドへの大まかな貨物積付計画を計算により自動立案できれば、貨物積付計画担当者の支援になる。また、制約条件の中に、積港が同じ貨物をできるだけ同じホールドに配置する制約と、揚港が同じ貨物をできるだけ同じホールドに配置する制約のように、相反する制約が含まれる場合は、それぞれを優先した貨物積付計画案を2案提示することで、貨物積付計画担当者は安全性や荷役の効率性などの観点から計画案を確認し、状況に応じた判断に役立てることができる。

貨物積付計画問題については文献[8]に先行研究があり、ローカルサーチを基本としたヒューリスティックアルゴリズムを独自に開発することで近似解を得る方法が述べられている。これに対し、われわれは貨物積付計画問題を整数計画問題に定式化し、汎用的な整数計画ソルバー(Gurobi Optimizer ver. 9.0.1)を利用して短時間で質の高い近似解が得られることを確認した。ただし、多種多様な車両から構成される100種類程度のブッキングを各デッキ・ホールドに割り当てるケースでは、計算時間の上限(600秒)までにすべ

でのブッキングを満たす解が得られなかった。これについては、線形計画問題に対する2段階単体法に倣い、制約条件に対する違反度を最小化して初期実行可能解を求めた後に元の最適化問題を解く2段階法を開発し、整数計画ソルバーを用いて解が得られることを確認した。2段階法により、100種類程度のブッキングの貨物積付計画も計算可能となり、かつ、得られた計画が業務に利用できる水準であることを確認した。

5. 結言

本稿では、自動車船の運航業務における数理最適化の適用事例として、配船計画問題、運航計画問題、貨物積付計画問題について紹介した。また、われわれが取り組みを通じて得た経験にもとづき、数理最適化を用いて実務の課題を解決し、最終的に役に立つシステムを開発するまでの実践的なアプローチについて解説した。海運業務には本稿で紹介した運航業務以外にもさまざまな業務が存在する。多くの業務はシステム化されているが、システム化されたのはルールベースの業務処理であり、フローチャートで記述するのが困難な業務は依然としてシステムの外側に残され、熟練者のスキルに委ねられてきた。しかしながら、今後の超少子化・労働力不足へ対応するためには、人に依存するレガシーな企業文化からの脱却が急務であり、そこそが真のデジタルトランスフォーメーションと考える。そしてデジタルによる業務改革を実現するための強力なツールの一つが数理最適化でありオペレーシ

ンズ・リサーチである。実際の業務に役立てるまでには時間と情熱が必要になるが、今後も数理最適化の適用範囲をより一層広げつつ、さらなる高度化に向けた取り組みを継続していきたい。

謝辞 本取り組みに関わった商船三井自動車船部の方々に、この場を借りて御礼申し上げます。

参考文献

- [1] 商船三井, 「自動車船輸送のバイオニアとして」, <https://www.mol.co.jp/services/carcarrier/index.html> (2021年4月10日閲覧)
- [2] 商船三井, 「次世代型自動車船「FLEXIE シリーズ」1番船「BELUGA ACE」竣工—6層リフトブルデッキを備えた最新鋭の新デザイン自動車船—」, <https://www.mol.co.jp/pr/2018/18020.html> (2021年4月10日閲覧)
- [3] 商船三井サービスサイト, 「MOL AUTO CARRIER EXPRESS」, https://www.mol-service.com/ja/service/auto_carrier_express (2021年4月10日閲覧)
- [4] 商船三井, 「AIの基盤技術による自動車運搬船の配船と貨物積み付け計画の策定に成功～「数理最適化」を活用して計画の立案や検証を大幅に効率化～」, <https://www.mol.co.jp/pr/2019/19072.html> (2021年4月10日閲覧)
- [5] 梅谷俊治, “組合せ最適化による問題解決の実践的なアプローチ,” オペレーションズ・リサーチ: 経営の科学, **66**, pp. 362–365, 2021.
- [6] 小林和博, “船舶スケジューリング数理モデル作成の具体的手順,” オペレーションズ・リサーチ: 経営の科学, **57**, pp. 205–210, 2012.
- [7] 商船三井, 「MOL ACE/Next-generation Car Carrier FLEXIE Series (Digest)」, <https://www.youtube.com/watch?v=6Q6Evo0xfJU> (2021年4月10日閲覧)
- [8] 齊藤努, “自動車船積付支援システムの自動席割について,” オペレーションズ・リサーチ: 経営の科学, **48**, pp. 216–217, 2003.