論説

「運ぶ」を最適化する　～現場での課題解決事例を中心に～

株式会社構造計画研究所
オペレーションズ・リサーチ部　部長　矢野夏子氏

はじめに

現在DXを駆使したサプライチェーン・ロジスティクス全体の高度化により、製造業や物流業にとって、将来にわたって物流の持続可能性を確保するために物流のポテンシャルを最大限に引き出すことが求められている。

物を「運ぶ」ことに注目すると、輸送手段も船舶、航空機、貨物列車、トラックとさまざまであるが、共通することは制限のある空間にどのように運ぶ物を積み付ければ最も効率が良いか、という一つの課題が浮き彫りにされる。いわゆる「積み付け(バンニング)の最適化」である。本稿では、筆者の部門で顧客の現場からの要求で実施した「積み付けの最適化問題」の解決事例を中心に経験知を解説する。

1.「最適化」とは

「最適化」という言葉は、一般的な会話でも「状況を良くする」、「効率化する」といった意味合いで広く用いられる。しかし本稿では、オペレーションズ・リサーチ(OR)の領域で定義される学術・技術用語としての「最適化」として用いたい。 OR とは、複雑に絡み合う業務オペレーションを、科学的・数学的なアプローチによって効率的かつ合理的に再現・検証する技術のことである。企業や社会における重要な意思決定から、日々の現場判断に至るまで、人間の「決める力」を科学的にサポートする役割を果たす。 本稿で焦点を当てる「運ぶ」という業務は、サプライチェーンのあらゆるフェーズに存在し、古くから OR の代表的な最適化問題として研究されてきた。近年では、働き方改革関連法案の施行(いわゆる2024年問題)をはじめとする法改正や労働力不足の影響を受け、従来の業務オペレーションそのものを抜本的に見直さざるを得ない複雑な課題が急増している。こうした背景から、OR 技術を活用した課題解決の重要性はかつてないほど高まっている。 そこで本稿では、OR 技術を用いて挑んできた現場の課題解決事例を紹介するとともに、OR 技術の有効性、そしてそれを現場に定着させるための適用上の工夫について述べる。

2. 事例1： 航空貨物の積み付け最適化

2. 1 航空貨物における「積み付け」の特殊性と4つの課題

物流業界における「積み付け」とは、単に荷物をトラックやコンテナに詰め込む作業ではない。3次元空間に対し、多種多様な形状・重量・容積・危険度などの性質を持つ貨物を、安全かつ最高の効率(積載率)で配置する高度な計画オペレーションである。特に航空貨物の輸送においては、航空機の安全運航に直結する重量・重心バランスの厳格な維持や、使用する ULD(Unit Load Device:航空貨物用コンテナやパレット)の特殊形状(下部や上部が傾斜した特殊断面)への適合が求められる。これらは安全面・効率面双方において極めて複雑な制約条件を伴うため、従来は長年の経験を積んだベテラン作業員の「暗黙知(勘と経験)」に深く依存していた。

数学的に見れば、この「積み付け」は膨大な組み合わせの中から最適な配置を探す「3次元パッキング問題」と呼ばれる NP 困難な超高度最適化問題である。日本貨物航空株式会社(NCA)殿との共同プロジェクトとして開始した当時、同社の現場では以下の4つの切実な課題があった。

① 作業負荷の増大:複雑な制限のもとで手作業でプランを組み立てる負荷が極めて高い。
② 機会損失の発生:顧客(荷主・フォワーダー)からのスペース問合せに対し、積み付け可否や回答を出すまでに20～30分を要し、営業上のレスポンス速度に限界があった。
③ 評価の属人性:作成された積み付けプランが本当に最善なのか、客観的に評価・検証する基準が不十分であった。
④ 人材教育の長期化:熟練者のノウハウが言語化・数値化されておらず、新人や若手への技術継承に長い年月を要していた。

これら「人間の経験に依存した現場」の課題に対し、筆者らはオペレーションズ・リサーチ(OR)の技術を駆使し、ベテランの「暗黙知」を「形式知」へと昇華させるシステム構築に挑んだ。

2．2　アルゴリズムの進化

プロジェクト着手当時（2000年代初頭）、学術界や産業界におけるパッキング問題の研究は、プリント基板のモジュール配置（VLSI 設計）や鉄鋼・紙パルプ等の資材切り出しといった「2次元パッキング問題」が主流であった。実用レベルで航空貨物の複雑な3次元空間と断面形状に対応できる数理アルゴリズムはほとんど存在しなかった。

そこで筆者らは、2次元問題で実績のあった「BL 法（Bottom-Left Method）」に着目し、これを独自に3次元空間へと拡張した「BLD アルゴリズム（Bottom-Left-Depth Method）」を新たに開発・構築した。

【BL 法から BLD 法への数理的拡張】（図参照）

BL 法　：貨物の積載順序に従い、「できる限り下（Bottom）」へ、同じ高さであれば「できる限り左（Left）」へ詰め込むアルゴリズム。詳細な手順は以下の通り。

① 詰め込む対象の直方体に任意に番号を振り、その数値を貨物の積載順序とする。
② 初めは長方形の左下の点のみが積載できる点（積載候補位置：図内の赤丸）とする。
③ 候補点に積載順序1の貨物を積載する。すると、積載候補点は図内のA、Bの2つに更新される（左下となる点を探す）。
④ 2つの積載候補点の内、できる限り下にある候補点Aを選び、積載順序2の貨物を積載する。（もし、貨物が大きくこの位置に積載できなければ、次の候補点Bを選んで積載する）
⑤ 同様に積載候補点の更新、積載候補点の優先度順に積載していき、全ての長方形に対して繰り返していく。

BLD 法：3次元空間（縦・横・高さ）に対し、積載優先度に従って「できる限り下（Bottom）」へ配置し、同じ高さであれば「できる限り左（Left）」へ、さらに水平方向の Left の方向軸で同じ位置であれば「できる限り奥（Depth）」へと規則的に敷き詰めるアルゴリズム。詳細な手順はBL法と同様であるが、複数ある積載候補点の優先度が3次元に拡張されたものとなる。

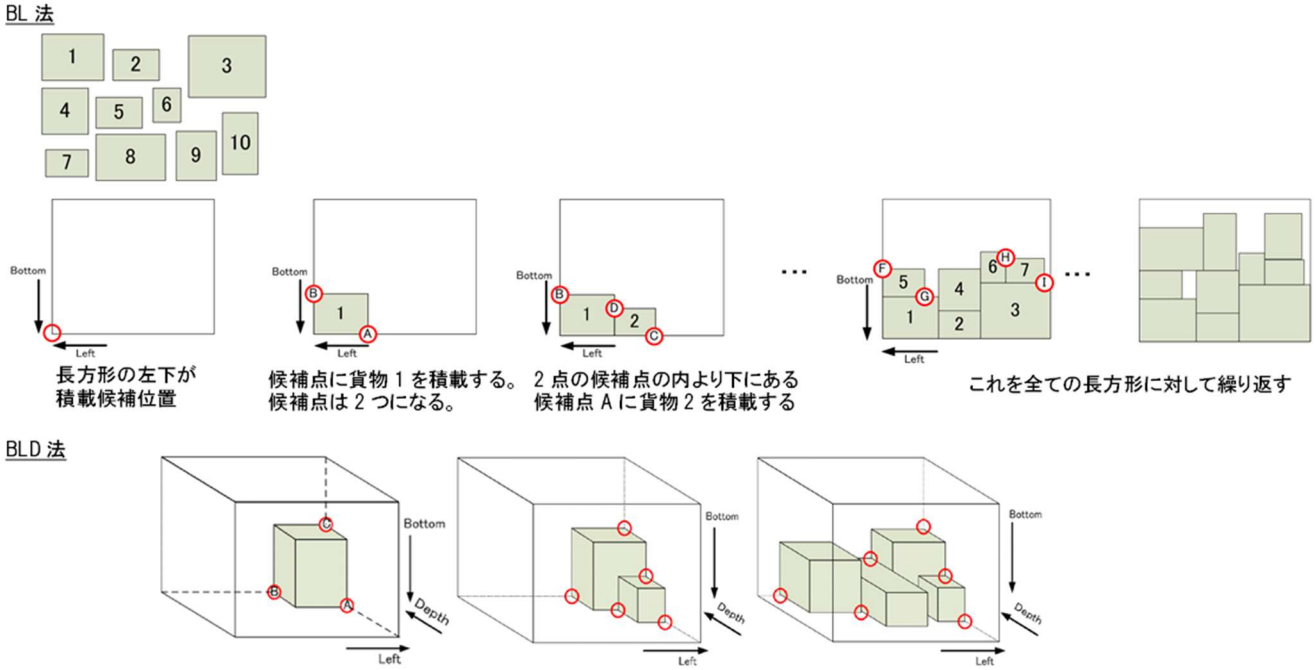


図　BL 法から BLD 法への数理的拡張

この基本ロジックをベースに、ULD 特有の輪郭形状（アッパーデッキ・ロワーデッキの傾斜角）や、貨物ごとの天地無用・段積み制限・重量制限といった制約を数理モデルへと組み込んだ。実は当初は別ロジックをベースにする想定であったが、現場見学や紙の模型（自作）を使ったヒアリングを通じて、問題があることが分かり、方針転換を行ったこともあった。そのような紆余曲折はあったものの、新しく構築したアルゴリズムにより、これまで熟練者が頭の中で数十分かけて描いていた立体的な配置パターンを、コンピュータ上で瞬時に自動計算・生成することが可能となったのである。

2．3　人間とシステムの協調設計　―　「追い積み機能」と「3D可視化」

どれほど優れた最適化アルゴリズムを構築しても、実際の現場オペレーションにおいては「直前に急遽入荷した緊急貨物」や「特定の荷主への配慮」といった、事前にデータ化しきれない土壇場の制約や文脈が発生する。アル

ゴリズムが出した結果を「100点満点の正解」として現場に強制すれば、システムは確実に拒絶され、使われなくなってしまう。そこで本システムの設計においては、「計算機に任せる領域」と「人間（熟練者）が判断・調整する領域」を美しく調和させる、以下3点の人間中心の工夫を凝らした。

① 計算実行までのハードルを下げる「選択式 UI」と「2モード計算」
現場の配車・計画担当者が操作に迷わないよう、複雑なパラメータ入力を廃し、条件選択はシンプルな選択式とした。さらに計算実行時には内部で異なる探索方針の2モードを同時に計算させ、担当者が結果を比較して直感的に選択・判断できるように設計した。

② 熟練者のこだわりを活かす「追い積み機能」
自動生成された積み付け結果に対して、計画担当者がマニュアルで貨物を追加・移動・微調整できる「追い積み機能」を実装した。これにより、システムが弾き出した高効率なベースプランに対し、現場のベテランが自身の暗黙知や直前の変化（追加貨物の割り込み等）を柔軟に反映させることが可能となった。

③ 属人性を排除する「3D グラフィックス可視化」と「定量的評価機能」
従来は平面の帳票や図面でしか確認できなかった積み付けプランを、画面上にリアルな 3D 立体グラフィックスで可視化した。 回転・拡大・断面確認が可能な3D 表示に加え、積載率や重量重心位置の「評価値（スコア）」を即座にチェックできる機能を設けたことで、これまで個人の中に閉じていた「プランの良し悪し」が誰の目にも一目瞭然となった。

2. 4 成果とシステム科学的考察

システム導入後の効果は以下の通り。当初の課題は解決でき、「暗黙知」と「形式知」を相互に変換するようなプロセスを実践できたと言える。

- 回答時間の大幅短縮：顧客からのスペース問合せに対する回答時間が、従来の20～30分からわずか5分程度へ短縮され、営業機会損失の防止とサービス品質の向上に直結した。
- 計画精度の均一化：経験の浅い担当者であっても、熟練者と同等精度の高品質な積み付けプランを短時間で作成可能となった。
- 教育と改善活動の加速：3D で可視化されたプランがデジタルデータとして蓄積され、チーム内でいつでも振り返りや比較検討ができる状態が生まれた。

3. 事例2： 建材メーカの幹線輸送における積み付け最適化

業務改善において直面するのが、「一つの工程の改善（部分最適）が、別の工程に新たな問題を生む」という問題である。筆者らが支援した大手建材メーカにおける幹線輸送の業務においては、この難しさが発生していた。当時は、トラックドライバーの荷役（積み下ろし）作業における負荷軽減や、手作業でのバラ積みによる長時間手待ちの解消を目指し、荷姿を従来の「バラ積み」から「パレット輸送」へと全面的に転換する取り組みが進められていた。現場作業の効率化という点では大きな成果を上げたものの、積載率は低下してしまった。というのも、製品の種類や寸法が多岐にわたる建材分野では、パレット化によって「荷物の外形サイズや高さの組み合わせパターン」が爆発的に増加したのである。その結果、従来の経験則に基づく車両手配が通用しなくなった。そのため、輸送できないことを避けるべく、運送会社へ「念のための過剰手配」が発生し、積載率を低下させていた。

この課題に対し、筆者らは次に示す2段階の最適化アプローチを構築・適用した。

① 第1段階（パレット積み付け最適化）: 多様な寸法の建材製品を、パレット単位へ高密度かつ安全に割り当てる組み合わせ最適化。長尺製品を含む積み合わせは、出荷建屋の位置も考慮しつつ、長尺製品に上積みできる製品も条件化するなどの機能も実現している。

② 第2段階（トラック積み付け最適化）: 出来上がったパレット群を、トラック荷台空間へ効率的に配置する組合せ最適化。

当初は、今の積み付けを精緻に再現しなければ、業務で使ってもらえるものにはならないと考えていたが、対話を続ける中で、「配車」台数の精度を上げることを目的とし、ある程度は現場の調整シロを残すことにした。そこで、プロトタイプ開発と検証を数回行い、目的に見合った精度であると現場から納得してもらうことができ、日々の業務で活用してもらえるようになった。モデル化の方針が途中で変わったことになるが、適切なモデル設定とすることができたと言える。さらに、積み付け計算結果は簡易的ではあるが可視化図を用いて出力していることもあり、トラックの空きスペースが見込める場合の対処（輸送タイミングの調整や他製品との混載等）がしやすくなるという効果もあった。全てを正確に計算していないため、その計算結果は数学的な最適解ではないが、現場にとっても、経営側のKPIとして満足できる解であると言え、最適化アプローチのあるべき姿であったと考えている。

4. 事例3： 日用品・消費財メーカにおける積み付けの標準化

「運ぶ」の最適化は、建材のような大型製品だけでなく、日用品・消費財のロジスティクスにおいても威力を発揮する。日用品メーカの物流拠点では、形状・サイズの異なる段ボール箱やケース製品が毎日大量に出荷される。特に、サイズや重量は多種多様であり、パレットこそ一般的なサイズのものを使っているが、積み付け高さは製品サイズや数量によってまちまちになる。さらに、重量勝ちする製品、容積勝ちする製品が混在している状況であるため、配車計画の作成は極めて難易度の高い業務となる。従来は、熟練の計画担当者が「勘と経験」で判断していたが、製品ラインナップの頻繁な入れ替えや季節変動、さらにはベテラン社員の高齢化・退職に伴い、計画作成の「属人化」が深刻なリスクとなりつつあった。

この課題に対し、トラックの荷台サイズとパレットの寸法・重量・段積み制限を組み込んだ新たな「積み付け最適化モデル」を構築した。単に詰め込むだけの最適化ではなく、パレット荷の高さを再調整することで、積載効率を上げるアルゴリズムとした。

システム化の導入により、複雑な制約を満たす積み付け計画を短時間で自動立案できるようになり、配車業務の工数を5～10%削減することに成功した。さらに重要な成果は、これまでベテランの頭の中にしか存在しなかった「安全かつ高密度に載せる技術（暗黙知）」がシステムとして標準化され、経験の浅い担当者であっても高品質な計画を作成できる「計画業務の平準化」が実現した点にある。

5. プロジェクトにおける工夫

5. 1 「暗黙知」の「形式知」化（コミュニケーションの工夫）

OR 技術や最適化アルゴリズムは、数学的にどれほど優れていても、現場の人間が納得し、使いこなせなければ意味を持たない。最先端の数理モデルを現実のオペレーションに定着させる上で、最も重要なのは「現場の「暗黙知（こだわりや制約）」をいかに正しく抽出し、「形式知」化するか」というプロセスである。そのため、筆者が長年の現場コンサルティングにおいて最も大切にしてきたのが、顧客とのコミュニケーションである。

例えば、トラックやパレットへの3次元積み付けにおいて、数式や仕様書上のパラメータ（数字や記号）だけで議論を進めようせず、可視化ツールを用いたり、時には紙の模型を作るなどして、対話を行うよう工夫している。そうすることで、マニュアルには決して書かれていない現場の生きた「暗黙知」を次々と聞き出すことができる。この粘り強い対話プロセスを通じて抽出された現場の知識は、そのまま数理モデルの「制約条件」や「目的関数」へと形式知化される。SICニュースレターVol.1.5(2019.9)の「寄稿」記事において奥雅春氏が主張された「文理融合型のシステムイノベーション（理系知であるアルゴリズムと、文系知である人間の意味・こだわりとののり付け）」とは、まさにこのような現場の作業者との対話の重ね合わせによって達成されると考えている。

5. 2 「アルゴリズム先行開発・検証」によるアジャイルな信頼構築

現場との合意形成を導くもう一つの実践的工夫が、「アルゴリズム（最適化エンジン）の先行開発と実データによる検証」である。一般的な IT システム開発では、画面デザイン（UI/UX）や基幹システムとのインターフェース設計から着手し、システム全体が完成した最終段階で初めて最適化エンジンの計算結果を現場に見せることが多い。

しかし、このアプローチでは「数ヶ月かけて巨大なシステムを作ったが、出てきた計画が現場の感覚と乖離しており使えない」というミスマッチが起こりやすい。筆者らのアプローチでは、システムの「器（画面やシステム連携）」を作る前に、まずコアとなる最適化アルゴリズムを最小限のプロトタイプとして早期に開発する。そして、顧客から提供いただいた「過去の実際の運行データや出荷データ」を用いて計算する。「もし昨月の配送計画をこの最適化エンジンで解いていたら、トラック手配台数はこう変わり、積み付け姿はこのようになります」という結果を、実データとともに現場の担当者へ提示する。実データに基づく計算結果を早期に目に見える形にすることで、現場から「この便の組み合わせは現場では無理だ」、「この計算結果ならベテランより効率的だ」といった具体的なフィードバックが即座に得られるようになる。フィードバックがもらえれば、それをもとにアルゴリズムの制約条件をアジャイルに修正・洗練させていくことができる。この「事実情報（ファクト）」に基づく高速なプロトタイピングと検証の繰り返しこそが、SICニュースレターVol.8.2（2026.2）の山本政氏の「論説」記事にある「最適化モデルのホワイトボックス化」を具現化し、開発初期段階から現場との深い信頼関係のに有効な手段となるのである。

5. 3 人間中心のモデル化プロセス

上述した事例が示すように、OR 技術によるロジスティクス最適化の本質は、単なる「計算の自動化」ではない。現場のプロフェッショナルが持つ優れたノウハウ（暗黙知）をリスペクトし、「現場の作業者との対話」や「実データによるアルゴリズム検証」を通じて対話を重ね、それを誰もが共有できる仕組み（形式知）へと昇華させる。この「人間中心のモデル化プロセス」こそが、複雑化する社会システムにおいてのキーになると考えている。

6. おわりに

筆者の所属する株式会社構造計画研究所は、「大学・研究機関と実業界をブリッジする」という企業理念のもと、社会の多種多様な課題解決に挑む技術コンサルティング企業である。創業以来、建築構造解析をはじめとする多様な工学知（エンジニアリング）を駆使して社会に貢献し、本年（2026年6月）で創業70周年の節目を迎えた。

当社には「人間は人間がやるべきクリエイティブな業務に時間を割くべきであり、単純で繁雑な作業はコンピュータに委ねる」という創業以来の思想がある。筆者が携わる OR 分野はその一端に過ぎないが、どの業界においても、現場のプロフェッショナルの方々が日々頭と手をフル活用し、きめ細やかに業務を回されている姿には、ヒアリングのたびに頭の下がる思いがする。同時に、誰もが日々の業務に追われ、「業務そのものをより良く改革するための時間」を確保できずに苦しんでいるという共通の課題も浮き彫りになる。 OR 技術は、膨大な選択肢の中から数学的根拠に基づいた最適解を導き出せる点で非常に優れている。しかし、どれほど技術が進歩し、計算機の処理能力が向上しようとも、現実世界の制約や人間の思考プロセスを正しく理解し、「モデル化」できなければ、その技術は何の役にも立たない。

近年、生成 AI の急速な普及により、プロジェクトの進め方は大きく変化した。ソフトウェア開発や試作にかかる時間は大幅に短縮され、お客様とのコミュニケーションの頻度や精度も飛躍的に向上している。しかし、「現実に即して正しくモデル化する」ことの難しさや重要性そのものは、どれほど AI が進化しても変わらない。新しい技術によって生み出された時間を、現場の声を深く聴き、粘り強く本質的なモデル化に注力するために使う。筆者はこれからもこの愚直で人間味あふれるアプローチを大切に、社会の「運ぶ」の課題解決に挑み続けていきたい。

（2026年9月24日原稿受領）

ⓒ一般社団法人システムイノベーションセンター（SIC）
https://sysic.org/