

海上ロジスティクスにおける 環境問題解決アプローチ ～オペレーションズ・リサーチ手法の活用～



城戸恒介* 相澤りえ子**
小林大介* 指尾健太郎**
川原幹雄*

* (株) MTI
** (株) 構造計画研究所

ロジスティクスにおける 環境問題への取り組み

日本政府は国際社会に対し、温暖化効果ガスを2020年までに1990年比25%削減するということを約束した。これは、日本が地球温暖化対策の主導権を握るためにも大いに評価されるべきことである。日本国内のあらゆる業界において、あまりに高い目標であると受け止められていることは事実であるが、排出権取引も組み入れながら、達成しなければならない目標である。京都議定書では、日本は温室効果ガスの総排出量を2008年から2012年の第1約束期間に基準年から6%削減することが規定されている。さらに、2007年5月に我が国が発表した「美しい星50」においては、「世界全体の排出量を現状から2050年までに半減」という長期目標を世界共通目標として提案している。このことからして、日本政府の計画に、2020年という中間点で25%削減は妥当な数値であろう。

京都議定書締結以来、政府は京都議定書目標達成計画を策定し、エネルギー起源二酸化炭素削減対策・施策の1つとして、国内活動の部門ごとに行動指針を挙げ、その実施を監視し検証していくセクタ別ベンチマークアプローチをとっている(図-1)。つまりPDCA(プラン・ドゥ・チェック・アクション)のサイクルをうまく回しながら各部門の温暖化効果ガスの削減を行っていくことを計画している¹⁾。

部門は、産業部門、民生業務部門、民生家庭部門、運輸部門とエネルギー転換部門に分けられている。

ロジスティクスを含む運輸部門の行動指針の大項目として、以下の3つの施策が挙げられている。

- 荷主と物流事業者の協働による省CO₂化の推進
- モーダルシフト、トラック輸送の効率化等の推進
- グリーン経営認証制度の普及促進

しかし、始めの2つの施策に関しては、利害やコスト

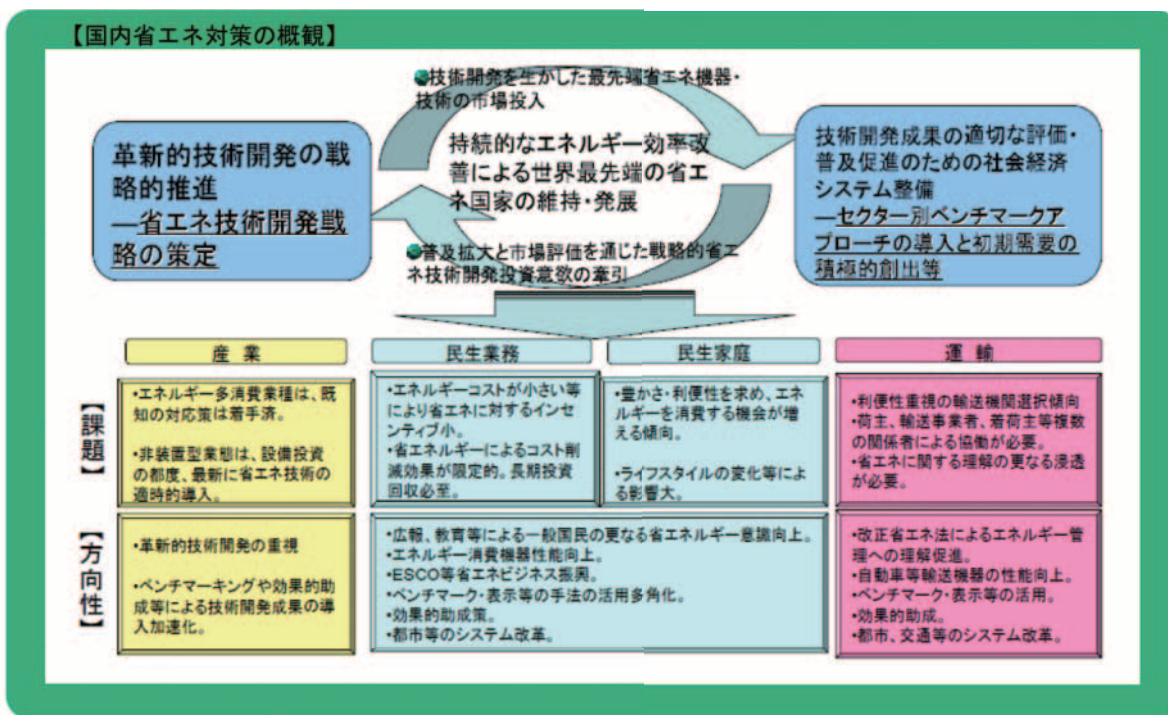
の絡み合う問題があり、むずかしい意思決定をしなければならない場面が多い。たとえば、荷主である製造業は在庫削減のために、ジャストインタイム方式で少量複数回輸送により効率化を図りたいとするのに対し、CO₂削減をするためには大量に数少なく輸送をしなければならず相反することになってしまう。これを解決しようとする、他社間の共同配送(複数製造業企業と複数運送業企業間での共同配送)やミルクラン方式(決められたルートを回りながら集荷する方式)といった新たな配送方式を試みなくてはならなくなり、時には製造業への生産方式の変革を求めなくてはならない場面も出てくる。モーダルシフトに関しても、運行スケジュールに合わせた載せ変え等が起り、明らかに搬送リードタイム(配送時間)は長くなる方向にある。

また、低公害車の導入等ハード面で解決すべき問題もあるが、ハードの運用方式の改善もまた全体システムの効果を最大限に引き出すための施策として必要である。個々の企業では、上記のような課題を前提に環境対策計画を策定し、取り組んでいく必要がある。ここでは、京都議定書の範囲外の国際ロジスティクスの90%を占めていると言われている海運の環境問題への取り組みとして、日本郵船グループの取り組みを紹介する。

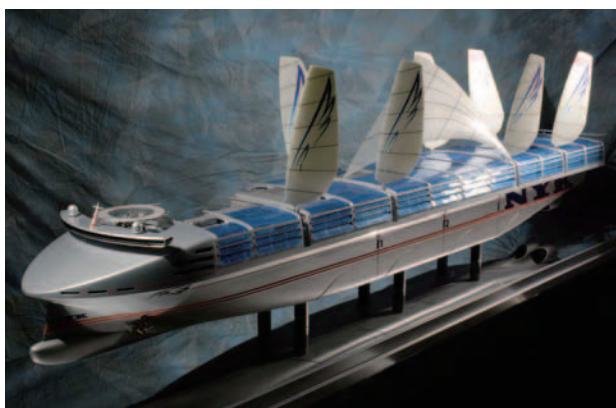
海運業界の環境への取り組み

国際海運は、国境を越えた世界を結ぶビジネスであるため、「京都議定書」にある温室効果ガス国別削減目標数値の対象外となっているが、現在、国際海事機関(IMO)において、外航船舶からのCO₂削減目標を策定しようと検討がなされている。IMO発表によると、2007年の国際海運によるCO₂排出量は8.5億トンと世界全体の約3%を占め、これは、上位のCO₂排出国の一国に相当する水準といわれている。

日本郵船は、2008年4月に、中期経営計画「New



■図-1 引用(経済産業省 温暖化対策施策の概要について(年次報告書)より)



■図-2 NYK スーパーエコシップ 2030

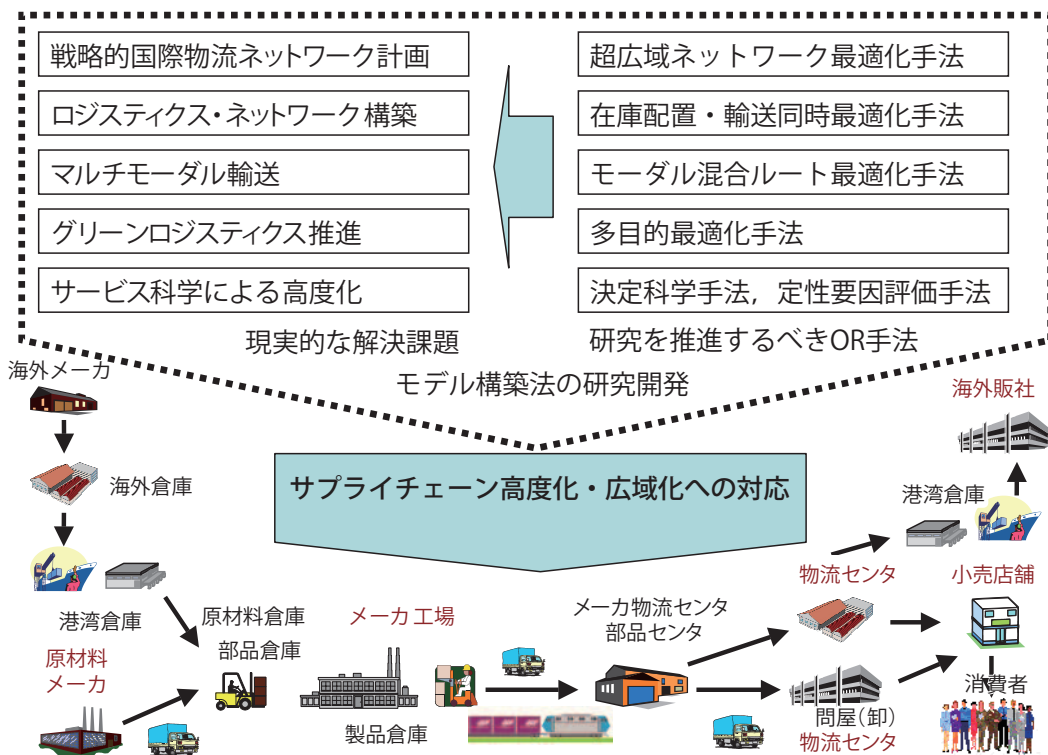


■図-3 太陽光パネルを搭載した自動車運搬船“Auriga Leader”

Horizon 2010」にて、「環境」を経営の最重要課題の1つとし、社長直轄の環境特命プロジェクト“NYK Cool Earth Project”を立ち上げ、日本郵船グループを挙げて、環境問題に取り組み、温室効果ガスの排出の削減に努めている。日本郵船グループは、海上輸送におけるCO₂排出削減を目指し、ハード面では、省エネ船の開発を進め、ソフト面では、減速航海を拡大するなど、燃費節減活動を行っている。省エネ船の開発では、未来のコンセプトシップ「NYK スーパーエコシップ 2030」(図-2)を考案し、2030年時点で、LNGをエネルギー源とする燃料電池による電気推進システムの利用を考えている。このほかにも、今はまだ商用化されていないさまざまな革新的環境技術を取り込んで、1コンテナ当たりのCO₂排出量を現在と比較して69%削減する長期的

な目標を掲げ、それに向けて、継続的に取り組むべき技術開発のロードマップを明確にし、環境技術の開発と向上に取り組んでいる。特に、省エネ船の開発については、2010年時点で、コンテナ船でCO₂排出量を30%、自動車船で50%削減する技術を実現することを個別目標とし、ハードだけでなく、荷役の効率向上や運航の効率向上など、総合的に取り組んでいる。

現在、太陽光エネルギーの利用に関して、2008年12月、新日本石油(株)との共同プロジェクトとして、総発電量40kWの太陽光パネルを甲板上に備えた自動車運搬船“Auriga Leader”(図-3)が竣工し、世界で初めて太陽光エネルギーを船の動力源の一部とする実証実験を行っている。2008年12月より2009年7月までの約半年間の運用実績において、太陽光発電装置はほ



■図-4 ロジスティクスの主要な解決課題と対応するオペレーションズ・リサーチ手法の研究開発テーマ

ば 100% の稼働を達成でき、その発電量は 32,300kWh となった。船では通常 C 重油を燃料として発電機を運転し船内電力をまかなっているが、その燃料を 7 トン削減することができ、そのことにより CO₂ 排出量も 22 トン減らすことができたと発表されている。

ロジスティクスにおける環境問題の 定量的分析手法としての オペレーションズ・リサーチ

これまでは国内外で繰り返される企業活動ではコスト最小および作業効率の向上を目指した仕組み導入に力を入れてきたが、現状はこれらの目標にもう 1 つ環境改善といった目標が加わり、評価値が従来とは違ってきている。

企業は環境問題への取り組みの PDCA サイクルの中で、プラン段階における定量的な事前検討により、効果を打ち出さなければ協働する他企業の賛同が得られないどころか投資もできない。チェック段階においても定量的検証と効果の評価は次のアクションへつなげるために、不可欠である。

このように、評価すべき対象が複数企業と連携するような複雑なシステムや、まったく新しい試みである場合、定量的な評価手法としてオペレーションズ・リサーチ手法が有効である。

文部科学省・科学技術政策研究所 (NISTEP)・科学技

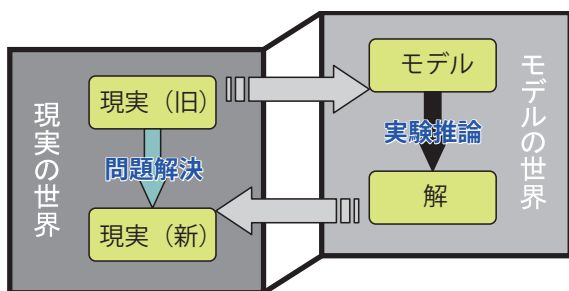
術動向研究センターの高井客員研究官が高度化したロジスティクスに適用できるオペレーションズ・リサーチの技術を昨年発行の科学技術動向²⁾にまとめている(図-4)。

海外メーカーから資材を調達するところからスタートして海外倉庫、海上輸送、受け入れ倉庫、工場、製品倉庫、陸上輸送、物流センターを経て、卸・店舗、消費者へと流れるチェーンにさまざまな課題があり、それぞれの場面でオペレーションズ・リサーチの手法を駆使することで解決できるであろうとしている。

オペレーションズ・リサーチとは、一言でいえば科学的に最適な問題解決を行う手法であり、ここで言う最適とは、たとえば総コストと CO₂ 排出量が最小となる計画や、CO₂ 排出量が規定量以下でコストが最小となる計画を指す。

そして、オペレーションズ・リサーチのアプローチで最も重要なことは、モデル化して問題解決を行い、その解決策を実践に適用することである(図-5)。

モデル化は、システムの目的を定式化できる問題であれば、数式でモデル化することになる。一方、複雑に色々な要因が絡み合ったり、時系列に動的に変化する要素や確率的な要素を組み入れないと求める最適なシステム状態を評価できない場合は、システムの動作そのものをコンピュータ上にモデル化し、そのモデルを使って実験をすることになる。前者は数理計画法であり、後者は



■図-5 モデルによる問題解決

システム・シミュレーション法である。

数理計画法では、システムに内在する要因の考えられる組合せを目的関数と複数の制約条件式を用いてモデルを表現し、計算結果として目的関数の最大値（もしくは最小値）を持つ1つの組合せが出力される。

システム・シミュレーション法では、モデルに与えられた要因の組合せの性能結果として1つの評価値が計算されるので、要因のいくつかの設定を変えて再度計算し、評価値の良い組合せを見つけ出す必要がある。

定式化できるのであれば、最適な解を得ることができる数理計画法でモデル化すればよいが、実際の問題はほとんどが確率的な要素を持ち、さらに動的に変化する要因が存在するので、定式化しにくい。しかし、システム・シミュレーションで最適な解を得ようとする数多くのパラメータスタディが必要となってくる。新しいシステムを検討するにはどのようなパラメータが最適に近いかわかるころから始めなくてはならないので、最適でなくとも、より良い解を求めるのにも多大なコストが必要となる。そこで、一般的に、問題を2段階で解くことが考えられている。第1ステップとして、制約条件を定式化できる程度の条件に絞り、数理計画法にてモデルを作った後、その要因の組合せの最適解を求める。第2ステップとして、第1ステップで決まった要因の組合せに対し、複雑な条件をさらに付け加えたシステム・シミュレーションのモデルを作り、そこでパラメータスタディをしながら最良解を求めていくというのが実践的な解法である。

今後開発されるロジスティクスのシステムによって、上記の数理計画法、システム・シミュレーション法、および2つの組合せ手法による課題解決で解を得ることや、評価案の検証をすることが可能となる。

最適物流拠点配置計画への適用

筆者らは、家電製品製造企業に対しロジスティクス・ネットワークにおける調達、生産、輸送をトータルにコ

スト面、環境面から最適化を行った、さらに、この計画の妥当性の検証のために、計画期間内の需要や調達価格の変動といった要素を加味したシステム・シミュレーション法を用いて計画の改善を行い、より確かな最適ロジスティクス・ネットワークを実現する提案を行った。ここでは、モデル化の考え方について説明する。

家電製品のロジスティクス・ネットワークにおいては、品種ごとに需要の大小や頻度が異なり、期間によってもばらつきがある。また、生産ロットサイズの条件、トラックの大きさと台数の制限がある中で、需要地側に持つ在庫量、工場近くに持つ在庫量や輸送頻度と輸送量を決める必要がある。

この問題のアプローチ方法としては以下の数理計画法とシステム・シミュレーション法の組合せを考えた(図-6)。

第1 Step：ロジスティクス・ネットワークにおける調達、生産、輸送をトータルにコスト面、環境面から最適化する。

第2 Step：最適化案の妥当性の検証のために、計画期間内の需要や調達価格の変動といった要素を加味し、シミュレーション手法により、より確かな最適ロジスティクス・ネットワークを実現する。

第1 Stepの数理計画によるモデル化の対象範囲は以下のとおりとする。

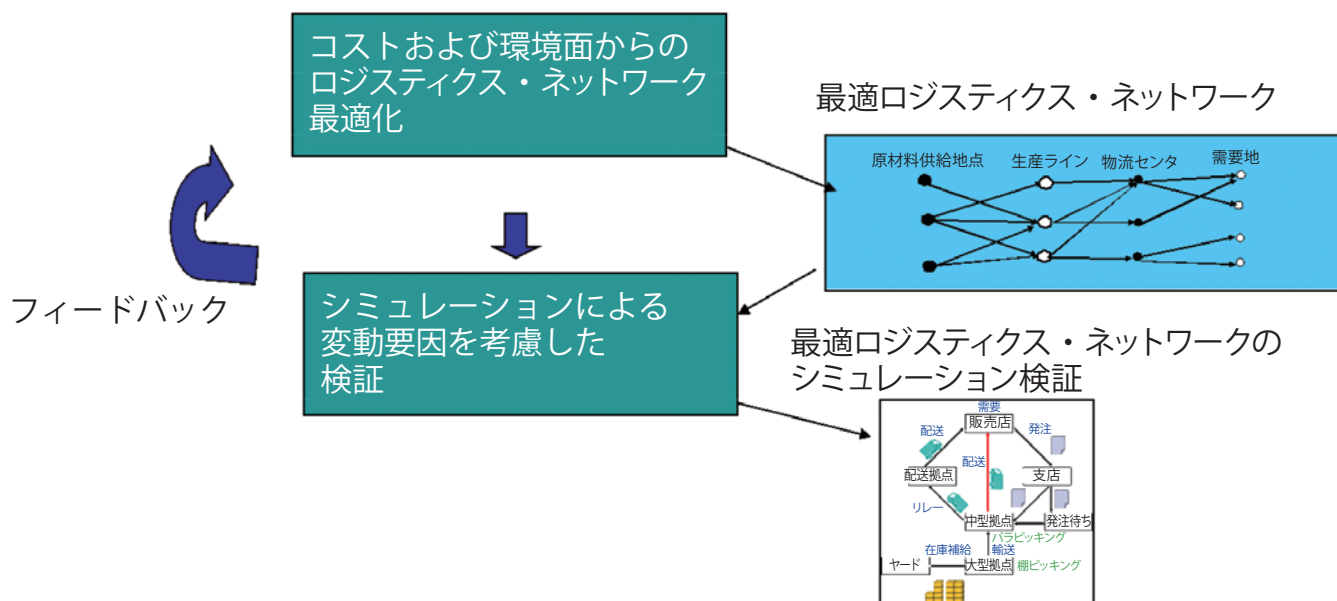
- 各種製品を生産し、需要地へ搬送するための要素としては、原材料供給地点、原料構成、生産ライン、物流センタ、輸送手段がある。
- 条件としては、各要素にかかるコスト（原材料調達費用、生産費用、輸送費用）および供給可能量、需要量がある。
- 輸送手段ごとに、荷物の重量、移動距離よりCO₂排出量が算出される⁴⁾。

このモデル化は以下のようになり、実際の計算時には式に置き換えることになる。

目的関数 最小化：調達費用+生産費用+輸送費用

制約条件

- 需要は必ず満たす
- 生産ラインを使用すると固定コストおよびCO₂が発生
- 生産ラインは、作業時間の上限がある
- 生産ライン能力の上限を超えた場合、超過コスト(残業代)がかかる
- 製品は、ライン別に生産時間の指定が可能
- 輸送コストは輸送手段ごとに決まる
- 輸送手段ごとに、CO₂排出量が、輸送量、距離で決まる
- CO₂排出量は目標値以下とする



■図-6 ロジスティクス・ネットワークの最適化とシミュレーション

次に、第2 Step で求められた最適ネットワークが需要や調達コストの変動といった時間的に変化する動的条件の下でも有効であるかを検証するために、以下のようなシミュレーションを行う。

- シミュレーションで求まる評価値
 - 調達費用
 - 生産費用
 - 輸送費用
 - CO₂ 排出量
 - 供給量
 - 各拠点間の各輸送手段の稼働時間
- 条件(第1 Step の条件に以下の条件を加えた)
 - 最適ネットワークにおける物流
 - 各需要地の品種ごとの需要変動
 - 需要に応じた配送納期
 - 各拠点稼働時間帯の指定
 - 原材料調達コストの変動

このシミュレーションでは、第1 Step で求めた最適解を使うことで、実際に需要に対し配送が可能となり、トラックの台数不足や、予想以上の配送回数が生じないことを検証する。ここで問題が生じると、第1 Step の条件を緩めて再度計算を行うことになる。

省エネ船へのシミュレーション適用

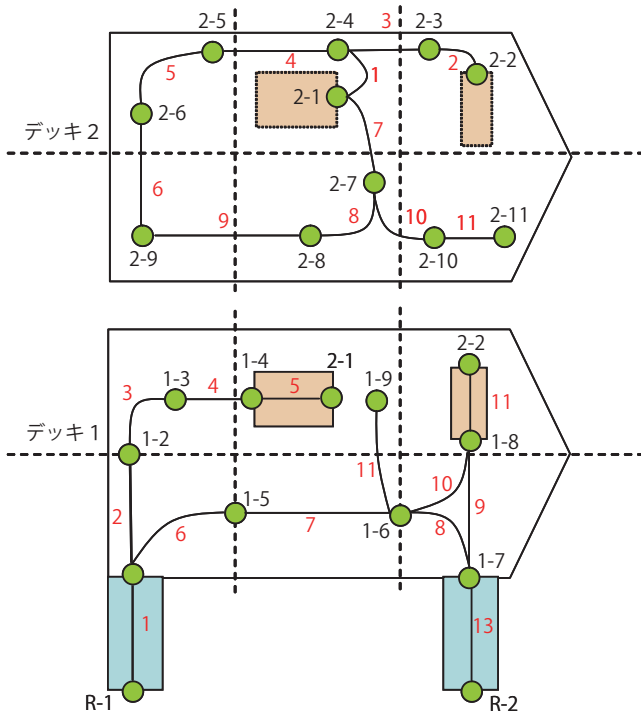
これまで述べたように、省エネ船に対する総合的な取り組みに関して、個々の省エネ効果を定量的に検証するために、システム・シミュレーション法が有効である。今回、シミュレーションを活用した具体的事例とし

て、荷役の効率化のために、コンテナ船と自動車運搬船(図-3)の荷役状況を再現する荷役シミュレータを開発し、荷役時間を短縮する方策について定量的な検証を行った事例を紹介する。

航海中の燃料消費量の節減方法としては、コンテナ船のスピードを10%削減すると、燃料消費量を約30%削減できることから、荷役時間を短縮して航海時間にゆとりを生み出すことで、減速航海によるCO₂排出量の削減が期待できる。

■自動車船への適用事例

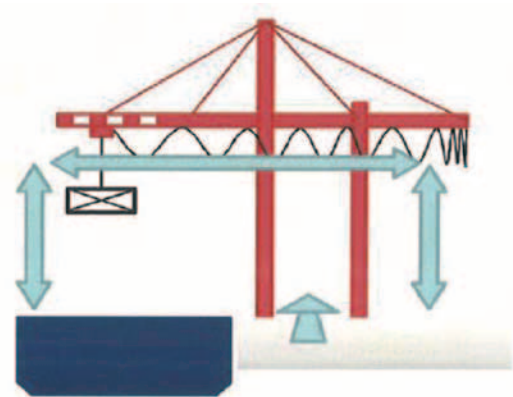
自動車船に対しては、設計フェーズにおいて、荷役効率を事前にシミュレーションによって評価するためのシステム構築を行った³⁾。これにより、効率的な荷役を実現するための船内レイアウトの検討が可能となった。実際の適用事例として、荷役の際に自動車が行く船倉内のスロープ配置を検討し、荷役シミュレータを用いて、荷役時間の短縮効果を定量的に評価した。本シミュレーションでは、船内の自動車が走行する経路と経路間を結ぶ仮想的なポイントを考え、グラフとして表現することでモデルを構築した(図-7)。また、各経路には道幅や制限速度等、実際の自動車搬入のルールを表現するために利用するさまざまな属性値を持たせることによって、現実の荷役ルールを表現するとともに、ドライバー間の干渉や待ちの状況を適切に再現した。また、図-8に示すように、実際の荷役作業に携わる作業者の役割ごとのタイムチャートを作成し、実際の荷役作業と同等の振舞いを表現すべくモデル化を行った。さらに、数理計画法を利用して、搬入計画に対して最短経路を提示する機能



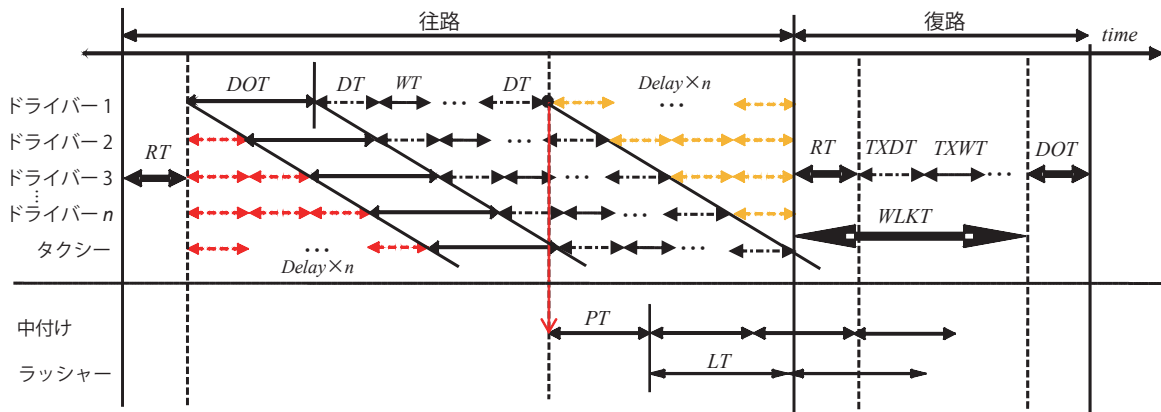
■図-7 自動車船のモデル化イメージ



■図-9 コンテナ船荷役作業の様子



■図-10 ガントリークレーンのモデル化



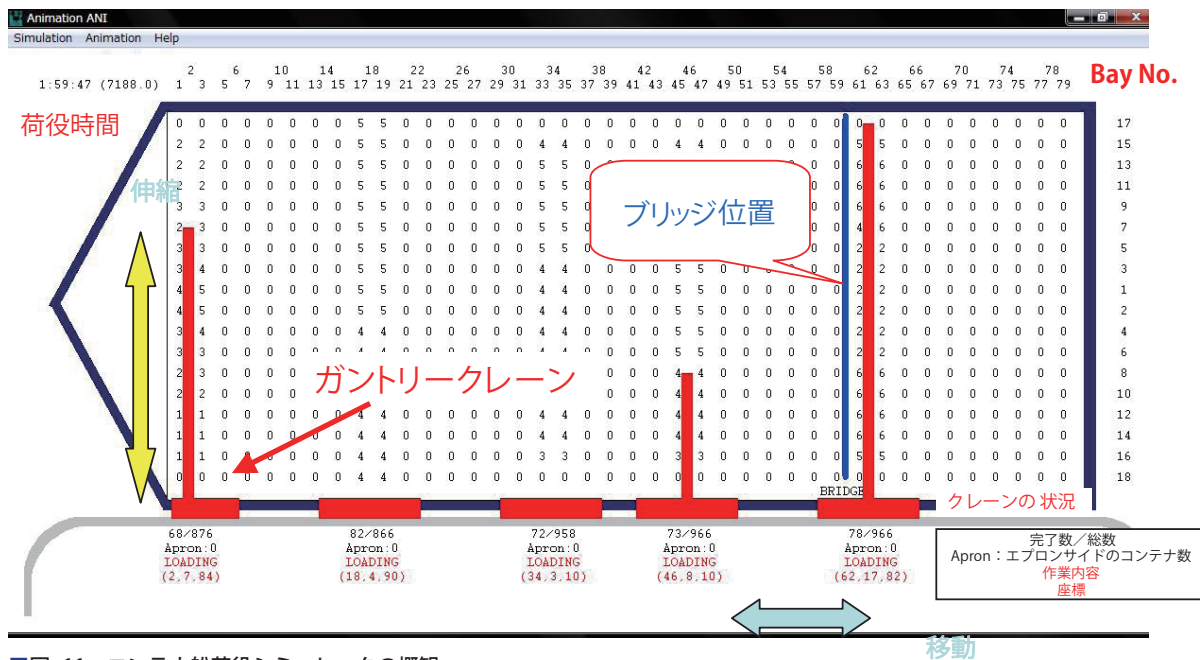
■図-8 作業者のタイムチャート

を実装した。これにより、シミュレーションの実施時における利用者の負担を軽減することが可能となった。

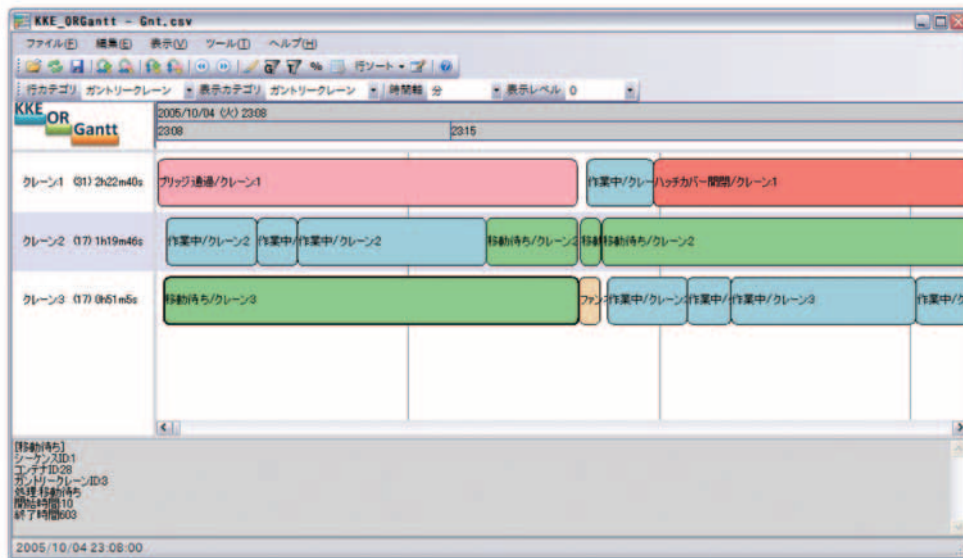
また、本シミュレーションの結果、荷役速度を向上させる上でボトルネックとなっていた作業が明確となった。さらに、シミュレーション実験を通じて得られた知見に基づいて新たな船型の設計を行った結果、従来の船型と比較して十分に荷役時間短縮が可能との結果が得られた。

■ コンテナ船への適用事例

コンテナ船の荷役シミュレータでは、岸壁のガントリークレーンによるコンテナの揚げ積みの状況(図-9)を再現し、荷役時間短縮の方策について検討した。コンテナ船のシミュレーションにおいても、まずガントリークレーンの挙動を詳細に分析し、ガントリークレーンの作業の明確化を図った(図-10)。さらに、ガントリークレーンのオペレータの視点から、荷役作業の効率を低下さ



■ 図-11 コンテナ船荷役シミュレータの概観



■ 図-12 コンテナ船荷役シミュレータの結果(詳細な作業内訳が表示可能)

せる原因を洗い出し、船型や積み付け位置、積み付け計画に起因する効率低下を詳細にシミュレーションモデルに反映させた。また、シミュレーション実行中の荷役状況を、アニメーション表示(図-11)することで、ガントリークレーンの動きを視覚的に把握できるようになった。さらに、ガントチャート(図-12)上に個々のクレーンの作業内容と時間を詳細に表示することで、船型や荷役シーケンスの良し悪し等を定性的・定量的に評価した。

続いて、コンテナ船荷役シミュレータを用い、コンテナ船の船型やガントリークレーンの仕様と荷役シーケ

ス等を考慮した上で、全体の荷役時間やクレーンごとの作業効率やリハンドリング回数等を定量的に評価した。

現在、シミュレーション結果から得られた知見に基づいた対策について検討を進めている段階である。

以上のように、シミュレーション技術を活用することにより、感覚的に有効だと考えられた方策について、その荷役時間の短縮効果を定量的に把握することが可能となった。

おわりに

現在、ロジスティクスにおける環境問題の取り組みは、企業において急速に行われてきている。実現可能な計画策定と、その効果の検証には、定量的分析が必要であり、オペレーションズ・リサーチはこれらの問題を解決するさまざまな手法を提供している。今後、これらの手法を使うことで、コスト、利便性、環境への影響といったトレードオフの関係をうまくバランスさせるための実効ある評価を進めていきたい。

参考文献

- 1) 経済産業省 政策評価：http://www.meti.go.jp/policy/policy_management/19fy-AR2007/ARpdf/AR19fy_2_05policy.pdf
- 2) 高井英造：ロジスティクス高度化へのオペレーションズ・リサーチの役割，科学技術動向，2008年10月号。
- 3) 高橋一明他：超省エネ自動車専用船開発におけるスケジューリング技術の活用，スケジューリング・シンポジウム2008 講演論文集，pp.29-30，スケジューリング学会(2008)。
- 4) 国土交通省：ロジスティクス分野におけるCO₂排出量算定方法共同ガイドライン Ver.2.0 (2006)。

(平成21年12月8日受付)

城戸恒介

kosuke_kido@monohakobi.com

1990年日本郵船(株)入社。船長。日本郵船グループの技術開発を担う(株)MTIプロジェクトマネージャー。省エネ船開発等の荷役関連プロジェクトを統括。

小林大介

daisuke_kobayashi@monohakobi.com

1992年日本郵船(株)入社。一等航海士。(株)MTIにて、省エネ船開発等の荷役関連プロジェクトを担当。

川原幹雄

mikio_kawahara@monohakobi.com

1996年日本郵船(株)入社。(株)MTIにて、省エネ船開発等の荷役関連プロジェクトを担当。

相澤りえ子

aizawa@kke.co.jp

1976年(株)構造計画研究所入社。(株)構造計画研究所は、工学的アプローチを用い企業の抱える問題を解決している総合エンジニアリング企業。数理技術部部長、OR研究室技術担当部長を経て、現在製造BPR営業部技術担当部長、技術士(情報工学)、東京農工大学非常勤講師、(社)日本オペレーションズ・リサーチ学会理事。

指尾健太郎

kentaro-sashio@kke.co.jp

2003年神戸大学工学部情報知能工学科助手。2007年神戸大学大学院工学研究科情報知能学専攻助教。2008年(株)構造計画研究所オペレーションズ・リサーチ研究室技師。博士(工学)。

