

動的スケジューリング手法による路上待機車両の削減

—生コンクリート搬入車両への適用例—

道路を利用して輸送を行う場合には、渋滞による輸送時間の変動や搬入先における荷卸し場所の混雑等により輸送に要する時間が正確に予測できないため、時間的に余裕を持った出発でこれをカバーしている。この結果輸送目的地周辺の路上で待機車両が発生している。本研究では、待機車両が工程管理上でも社会的にも大きな問題になっている建設現場への生コンクリート搬入車両を例にとりあげ、情報通信技術を活用した動的スケジューリング手法を提案した。さらにこの手法の有効性を検証するため、インターネット上で稼働する定時到着搬入システムを構築して、実証実験を通じてその有効性の検証を行った。

キーワード IT, ITS, ジャストインタイム, 動的スケジューリング, 生コンクリート輸送

西宮良一

NISHIMIYA, Ryoichi

博(工) 株式会社三菱総合研究所監査室長
元(財)運輸政策研究機構運輸政策研究所主任研究員

服部尚道

HATTORI, Hisamichi

工修 東急建設株式会社技術本部土木エンジニアリング部第二課課長代理
現(財)鉄道総合技術研究所構造物技術研究部コンクリート構造副主任研究員出向中

1——はじめに

物流分野においては従来から定時に搬入を行うという強い要請が存在していた。しかしながら、道路を利用して輸送を行う場合には、渋滞による輸送時間の変動や搬入先における荷卸し場の混雑等により輸送に要する時間が正確に予測できない。従来のジャストインタイム搬入システムにおいては、通常は輸送に要する時間は固定値(パラメータ)として扱っており、輸送時間の変動を早めの発注・出荷によりカバーしてきた。このため、余裕を持って出発した商用車は搬入先周辺の路上で時間調整の待機をすることとなり、待機車両による交通流への悪影響、道路交通環境の悪化が発生している。

また、ITS(Intelligent Transport Systems, 高度交通システム)の分野においてはトラック、タクシー等の車両の位置を管理して効率的な配車を支援する運行管理システムが既に実用化しているが、運行管理システムの管理対象としている情報の範囲は、輸送サービスの供給者側としたもの(例:モータープール、製造、出荷、道路走行中車両)が多く、主として配車・車両の運用効率の向上を意図したものである。このため、搬入先(需要地)の情報をリアルタイムに利用して、搬入先周辺での待機を削減するというシステムは我が国ではまだ実用化されていない。

効率的かつ環境にやさしい物流を実現するためには、生産管理システム・出荷管理システムと運行管理システムを包含した定時到着搬入システムを構築する必要がある。本研究においては、ケーススタディーとして建設現場

への生コンクリートの搬入を例にとり、建設現場周辺での路上待機を削減するための出荷制御・運行制御の有効性を検証した。

本研究は以上の検討を通じて、IT(Information and telecommunication Technology, 情報通信技術)を活用することにより輸送の効率化と路上待機車両の削減が可能であることを示すことを目的とした。

2——ジャストインタイム輸送の問題

2.1 従来のジャストインタイム輸送システムの問題点

SCM(Supply Chain Management, サプライチェーンマネージメント)は、小売店等の販売情報をもとに、物流(Supply Chain)と逆の情報の流れ(Demand Chain)を活用して、供給連鎖のプロセスを最適化する手法である。SCMにおける輸配送業務では、輸送に必要なリードタイムを考慮した上で、店頭で製品が売れる分だけ生産して、生産に必要な量の部品・材料を発注することにより、店頭在庫、工場・倉庫の在庫、部品・材料の在庫を最小化することを目標にしている。しかしながら、現実には以下の2点の理由により各流通段階で多めに在庫を持つことにより、品切れを防いでいる。

① 従来のジャストインタイム搬入システムでは輸送に要する時間を固定値として扱っており、一つの情報システムの中で時々刻々と変化する所要時間を計測してこれを反映して出荷を制御するものはまだ実用化されていない。その結果、輸送に要する所要時間は、

通常考えられる最大の遅延を見込んだものと設定されており、通常は搬入先への早着という事態が発生する。輸送時間に変動がある場合には、過去の実績値にもとづく平常時の最大輸送時間に余裕時間を加味した値を用いている。

- ② SCMの手法は主としてメーカーが需要予測を行う店頭へ製品を供給するという考え方に立っているが、供給不足を心配する小売店が売れそうな商品については過剰な発注を行うことがあり、注文殺到による供給不足、納期遅延といった現象が発生しやすい。このような事態は、さらに品薄の噂を呼び、さらに小売店が過剰発注を行うという悪循環となることがしばしばある。これは、流通業界と運輸業界の間には大きな情報ギャップがあり、それぞれ自分の属する世界の中でのみ納入時期(流通業界)、出荷時期(運輸業界)の最適化を目指しているためである

ジャストインタイム搬入システムでは、搬入先でストック可能な小物の商品等に関しては早着のペナルティが小さいが、搬入先においてストックすることが困難な貨物に対してジャストインタイム発注を行うと、結果として「道路上でトラックに乗せたままストックする」という現象が発生してしまうことがある。

SCMにおける過剰発注問題に対しては、小売店が製品の生産・出荷・輸送状況を十分に把握できないための不安感から発生しているという反省から、メーカーと小売店の情報共有を進めることにより生産を調整しようという動きがある。近年これを発展させてメーカーと小売店がそれぞれ需要予測を行い、インターネットを通じてそれらをすり合わせるにより、両者の合意のもとに生産計画を立案するCPFR(Collaborative Planning, Forecasting and Replenishment: 需要予測と在庫補充のための共同事業)という手法が着目されつつある¹⁾。

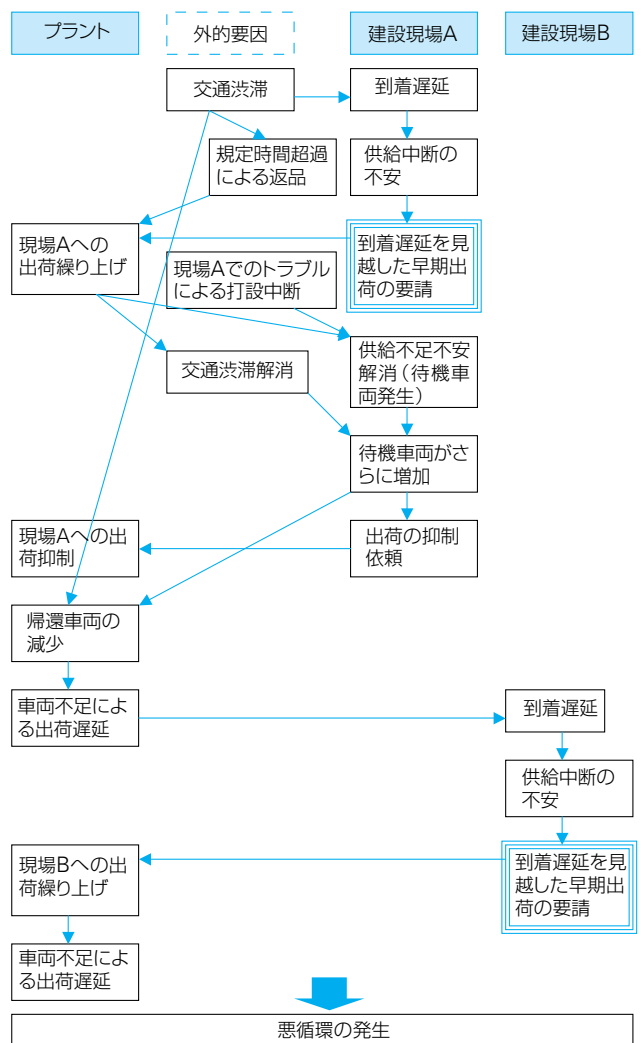
2.2 生コンクリート輸送における例²⁾³⁾⁴⁾

都市内のオフィスビルやマンションの建設現場は敷地が狭隘であり、現場に到着したミキサー車の待機場所が敷地内に存在しない場合が多い。また、周辺の道路が狭く、静穏な住宅地に隣接している場合は、付近の路上での待機も困難である。したがって、渋滞による輸送時間の不確実性や打設工程の進捗速度のバラツキをミキサー車の早発と敷地内や路上での待機により調整する対策、つまり搬入先における在庫をバッファーとした輸送を行う対策に頼ることが困難である。

さらに生コンクリートの場合は、製造後、時間とともに硬化が進むため、製造から荷卸しまでを90分以内に行わなければならないという課題もあり、出荷・配車業

務には熟練した要員が必要である。生コンクリートは、プラントで生産され建設現場へミキサー車で搬入される。プラントを出発したミキサー車は出発時にあらかじめ決められた搬入先1カ所のみ立ち寄り、荷卸し後空車で出荷地に戻るという単純な輸送形態である。プラントから現場までの輸送時間は、郊外では通常は10～20分程度のことが多いが、大都市では市街地にプラントがないため輸送時間が1時間程度まで延伸する場合もある。コンクリートは時間とともに硬化するため、これは品質保持上限界の輸送時間である。都市内のオフィスビルやマンションの建設現場は敷地が狭隘であり、現場に到着したミキサー車の待機場所が存在しない場合が多い。また、周辺の道路が狭く、静穏な住宅地に隣接している場合は、路上での待機も困難である。したがって、渋滞による輸送時間の不確実性を路上待機により調整する対策、搬入先における在庫をバッファーとした輸送を行う対策をとることが困難である。

図一は路上待機発生の原因と因果関係を示したものであり、建設現場でのトラブルによる打設作業の中断、道路交通状況好転などが最初の路上待機発生原因となる⁵⁾。



■図一 ミキサー車路上待機の原因と因果関係

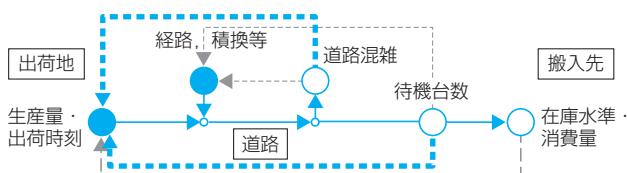
一旦路上待機が発生すると、プラントに戻ってくる空車が減り運搬用車両の不足に伴う出荷遅延が発生するほか、場合によっては出荷後の規定時間を超えたコンクリートの返品なども発生する可能性があり、ますます出荷や到着の遅延につながる。一方、生コンクリート供給不足による打設中断を恐れる建設現場は、このような自体の発生可能性がある場合にはより早期の出荷を要請すると同時に、交通渋滞の解消が重なれば建設現場に荷卸し待ちのミキサー車を抱え込むことになる。このようにして、一旦建設現場とプラントの間の相互不信が広がると、待機車両はますます増加し、配車不足という悪循環に陥りがちである。生コンクリートの場合、一般的には複数のプラントと複数の建設現場の間を車両を特定せずに輸送しており、どこか1箇所の建設現場で待機車両が増加すると供給元の各プラントに戻ってくる輸送車両が不足するため、関係する他の全ての建設現場への供給不足が波及する可能性がある。

3——定時到着輸送実現のための考え方

3.1 生産管理と運行管理の融合⁶⁾⁷⁾

商用車(トラック、バス、タクシーなど業務目的で運行する車両)を対象とした場合は、乗用車と異なりほとんどの車両が企業による計画的な運行支配下にある。また、商用車は、ドライバーや乗客の個々の事情や嗜好によって運行される乗用車と異なり、経済原理にもとづいて運行されているためコスト削減になる方法であれば必ず運行指示に従うとあって良い。このため、交通需要管理(TDM)・交通管理の施策は本来乗用車より徹底するのが容易である。

輸配送問題において従来はほとんど連携がなく実施されていたSCMの一要素である生産管理・出荷管理と交通管理の一要素である運行管理を融合することにより、搬入先周辺の待機状況や道路混雑状況に応じて出荷時期を強力に制御できるようになる。具体的には、出荷管理システムと運行管理システムを統合化し、さらに運行管理システムで収集している情報を出荷管理システムで制御変数としている生産量・出荷時刻へフィードバックすれば良い(図一2)。



■図一2 生産管理と運行管理の融合

さらに輸送中の製品の量や到着時期についても運送会社の貨物(荷物)追跡システムを活用すれば正確に把握可能である⁸⁾。

SCMを本当の意味で実現するためには、メーカー、小売店、輸送業者間の情報共有が必要である。このような生産側と販売側の情報共有の考え方を流通途中の輸送の部分にも適用して、出荷・出発をきめ細かく制御することにより、輸送段階における搬入車両の待機といった社会的にも無駄なコストの発生を抑制することが可能となる⁹⁾。

なお、どのような緻密な制御を行っても交通事故による渋滞や搬入先での工程上のトラブルに起因する荷卸し中断など不測の事態の発生は避けられない。このため、搬入先の近くに最小限の待機場所(構内または付近の路上)をバッファーとして設置することは必要である。生コンクリート搬入の場合を例にとると、通常は敷地内または敷地の前面道路で打設のためにポンプ車とミキサー車(アジテータ)を1台配置する。このスペースは当然のこととして定時到着輸送が実現しても削減することはできない。荷卸し場所に停止中のミキサー車はSCMから見ると一次バッファーとなっている。生コンクリートを安定的に供給するためには、構内または現場周辺の道路上(二次待機場所)でもう1台のミキサー車を待機させる必要がある。この2台目の待機中のミキサー車はSCMから見ると二次バッファーとなっており、従来の生コンクリート搬入では2台目のミキサー車の待機時間が長時間化する、あるいは複数台のミキサー車が路上待機するなどの問題が発生している。

定時到着搬入輸送は、この二次バッファーの時間的・空間的なサイズの削減を目指すものである。輸送所要時間の変動に伴うバッファーや荷卸し場所の混雑等に対応するバッファーは、統計的な制御により最小化することができるので、従来のやり方に比較するとそのサイズをかなり小さくすることができる。

3.2 ITを活用した定時到着搬入制御

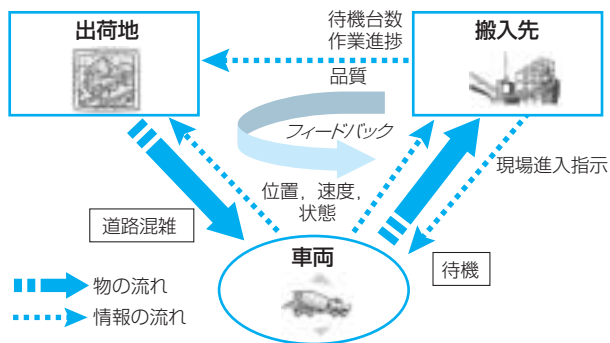
ITを活用して輸送車両の搬入先への定時到着搬入を実現するためには、以下の3つの要素が必要となってくる。

- ① 走行している車両から輸送所要時間データを収集するプローブカーの技術と、収集したデータをもとに将来の輸送時間を予測する技術
- ② 搬入先の混雑状況をリアルタイムで把握し、輸送をコントロールする交通管理技術。
- ③ 生産工程等の計画・作業進捗状況をリアルタイムで把握して、出荷する量をコントロールするSCMの技術。

以上の3種類の情報をもとに、輸送する車両の出発前に出荷・出発時刻の調整を行うことが真の意味での定時到着搬入を実現する鍵である。このようなシステムは、無線パケット通信等の既存の移動体通信網とモバイル機器を活用し、さらに走行中の車両から受け取った位置情報、所要時

間をデジタル地図上で表示することにより可能となる¹⁰⁾。

図一3に示すように、搬入先からの情報と車両からの情報を活用することにより、定時到着搬入を実現する効率的な車両の運行制御が可能となる¹¹⁾。



■図一3 定時到着搬入制御

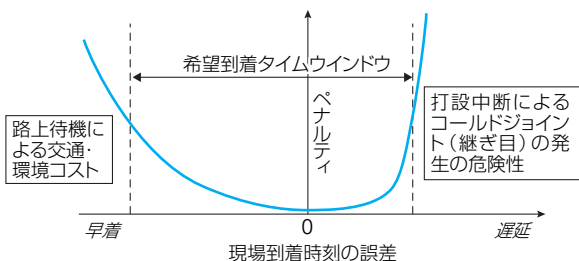
3.3 生コンクリートを対象とした定時到着搬入問題

生コンクリートを対象とした定時到着搬入問題は、一般のSCMにおける輸配送計画と比較すると以下のような特徴を持つ。

(1) 到着タイムウインドウの狭さ

生コンクリート輸送は通常のSCMによる輸配送計画と比較して、到着タイムウインドウが極めて狭い輸送物の輸送制御を対象としている。具体的には、指定到着時間に到着しないと価値を失う輸送物やペナルティが極めて大きい輸送物を対象としており、かつ、早着による待機時間が極めて短く限定される(図一4)。

- ・生コンクリートの到着遅延は、打設中断によるコールドジョイント(継ぎ目)の発生につながるため到着遅延のペナルティが極めて大きい。その対策として現実には余裕を持った到着時刻を指定して、到着後に路上で待機させている。
- ・最も大きな問題は、早着した場合の路上待機により交通阻害やアイドリングによる大気汚染・騒音など社会的な影響が大きいことである。



■図一4 生コンクリート搬入の狭い到着タイムウインドウ

(2) 輸送時間の変動

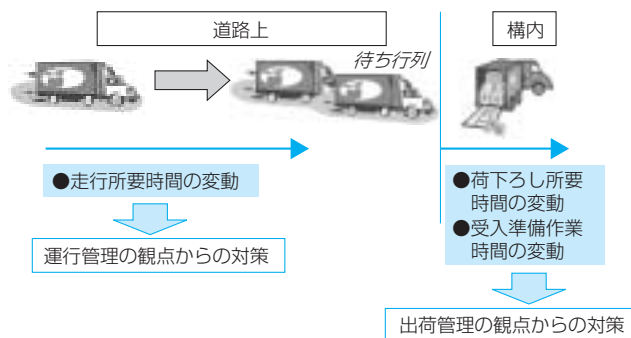
従来のジャストインタイム搬入システムにおいては、システム内で輸送時間を固定値(パラメータ)として扱っているものが多いが、生コンクリート輸送は到着タイムウインドウの狭さから輸送時間の短期的な変動を無視でき

ず、出荷制御へのフィードバックが必要となる。

(3) 配車需要・荷下ろし時間の変動

通常のジャストインタイム搬入システムでは荷下ろし時間は、あらかじめ設定することとしているのが通例であるが、生コンクリート輸送では、搬入先で作業進捗などと連動して荷下ろし時間の変動が大きい。つまり、時間あたりの配車需要自体がリアルタイムで変動する問題を扱っている。したがって、配車需要や荷下ろし時間の変動を出荷制御へのフィードバックが必要となる(図一5)。

このように、到着タイムウインドウが狭く、かつ打設進捗状況によりそのウインドウの時間的な位置自体が変動することが生コンクリート輸送の特徴である。

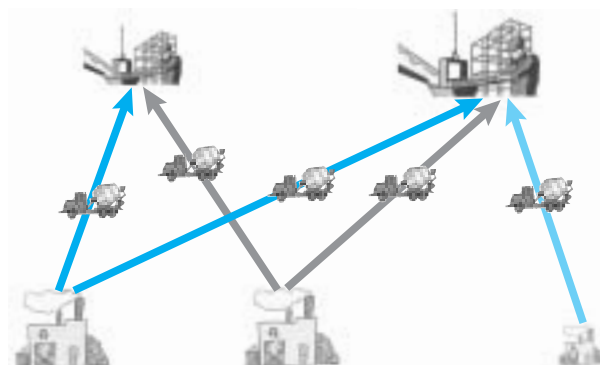


■図一5 所要時間の変動要因と対策の分類

(4) 単純な往復輸送

生コンクリートの輸送においては、ミキサー車は生コンクリートプラントを出発してから、1カ所の建設現場にのみ立ち寄り荷卸しをした後、必ず出発したプラントに空車で戻る。このため、建設現場へのミキサー車の到着を制御するためには、プラント出発時刻を調整さえすればよい。ただし、実際には図一6に示すように建設現場、プラントともに複数の相手と取引をしており、建設現場側から見た場合、複数のプラントからのミキサー車が到着する。したがって、プラント毎にミキサー車の出発時刻を調整する必要がある。

生コンクリート輸送は出荷地と搬入先との単純な往復輸送(ピストン輸送)であり、途中での立ち寄り、詰め合わせ、搬入先変更、帰路での別搬入先へ輸送などが無い。



■図一6 生コンクリートの輸送形態

(5) 荷下ろしの後につく待機車両の削減

生コンクリート輸送においては削減対象とする駐車時間は荷卸し中の駐車時間ではなく、荷卸しの順番を待つ次の車両の待機時間である。これは、搬入先においては、待機車両を切らさないように連続的に配車が必要な問題を扱っているためである。荷卸し時間を短縮する対策は打設工程の迅速化により工事期間の短縮という効果は生むものの、工事期間中の待機台数の削減には寄与しない。

さらに生コンクリート輸送は商用車の運行管理という観点から見ると、従来から研究が行われてきた高速道路の予約制など人流における出発時刻管理の試みと比較すると以下の点が異なる。

(6) 中央統制による出発時刻制御

生コンクリート輸送は、出発制御の対象として商用車を対象としており出発や待機が業務指示として実施しているうえに、さらに搬入先の受け入れ準備ができず路上待機が予測される場合には、製品の生産自体を抑制するという中央統制による絶対的な出発時刻制御を実施する。

(7) 輸送途中の道路の混雑は対象外

高速道路の予約制¹²⁾は本線上の渋滞緩和を目的として交通状況を制御するが、生コンクリート輸送においては搬入先に早着した路上待機が発生することが制御の対象であり、途中の道路の混雑は与件として制御の対象外としている。これは、制御対象とする台数が少なく、道路交通システム全体へ影響が少ないためである。

(8) 輸送の流れ全体を対象とした制御

生コンクリート輸送では個々の車両が目的地へ早く到着することが目標ではなく、各車両が適切な間隔で目的地に到着することが目標である。そのため「総輸送時間最小化」というマクロな最適化問題でなく、時間的な隣り合う到着車両の間隔の制御という輸配送システム全体での最適化を目指している。したがって特定の車両に着目すると輸送時間を長くすることがシステム全体としての最適化になることもあり得る。つまり、個々の車両において輸送時間のアンバランスが発生することは許容される。

4——生コンクリート輸送を対象とした 定時到着輸送システムの構築

4.1 IT活用による情報伝達方法の改善

現状では、建設現場の施工管理員、製造プラント、運転手(生コン車オペレータ)、現場での誘導員との間の連絡は、無線や電話で行われている。現状における情報伝達経路の現状は整理すると以下ようになる。

(1) 出荷状況確認経路

・施工管理員(携帯電話)→プラント(電話)

または

・施工管理員(口頭)→生コン車オペレータ(無線)→プラント

(2) 打設状況確認経路

【通常時】

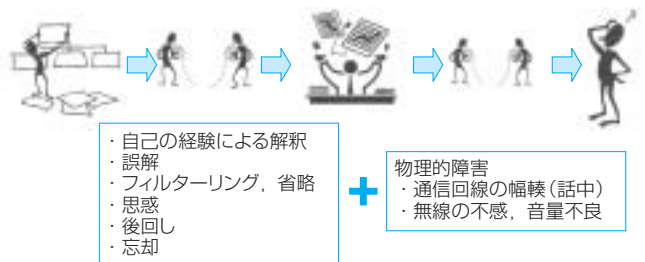
・プラント(無線)→生コン車オペレータ
・プラント(無線)→生コン車オペレータ(口頭)→現場管理員

【緊急時】

・プラント(電話)→現場事務所(電話もしくは無線)→施工管理員
もしくは
・プラント(電話)→施工管理員(携帯電話)

このため、情報の伝達は必ずしも円滑とは言えず、指示が最終的に伝わるまで途中に何人もの人を介しており、状況の把握のためには多段階の人手を介する必要がある。

途中に人を介した多段階のコミュニケーションは一種の「伝言ゲーム」となり、情報の欠落、誤った解釈・詩人の追加、伝達忘れなどが発生しやすい(図一七)。



■図一七 従来の情報伝達方法の問題点

一般的にはSCMを導入しても在庫が減少しないと最大の理由は販売店とメーカー間、あるいは出荷部門と輸送部門間の連絡・情報共有不足、つまり「組織の壁」であるといわれており、いかに自社内でSCMを構築しても社外・社内にボトルネックがあると輸配送を最適化することができない。

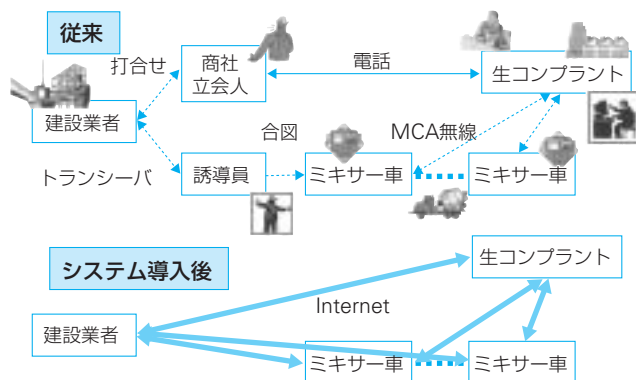
また、ミキサー車と生コンクリートプラントの間で利用されている無線(MCA無線)は不感地帯やチャンネル占有状態などがあるため、必要なときに即時に情報・指示が伝達できないこともある。

このような状況下で製造プラントにおいても各ミキサー車の動態・位置を正確に把握するためには苦勞している。もちろん、ミキサー車を対象とする運行管理システムは既に商品化されており一部のプラントにおいては導入されているが、これはあくまで出荷元とその管理する輸送手段のみをカバーするものであり、建設現場はシステムでカバーされておらず、搬入先である建設現場との間の情報共有は電話によるやりとりで頼っている。

そのため、例えば建設現場では出荷状況やミキサー

車の運行状況が良く把握できず、また、生コンクリートプラントでは建設現場での打設進捗状況が十分に把握できなかった。

ITの活用によりすべての関係者がすべての状況を即座に把握でき、早めに自分の段取りを行い、トラブル発生時における迅速な指示が可能となるばかりでなく、場合によっては販売代理店の現場立会人や車両誘導員の配置を省略することもできるようになる(図-8)。



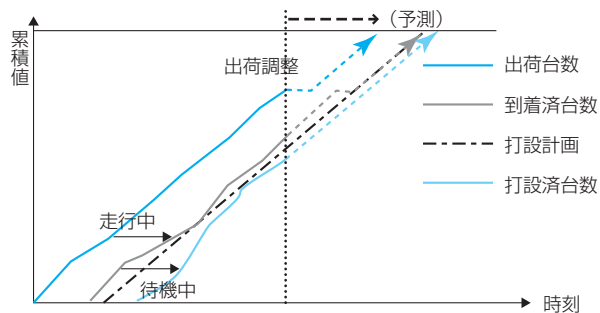
■図-8 IT活用による情報伝達の流れの改善

このような現状に対して、以下に示す流れにしたがってITを活用した情報伝達システムを用いれば、コンクリート打設状況、輸送状況といった情報を取引先とリアルタイムで共有化することが可能となり、出荷後の無駄な搬入待機を削減することが可能となる。

- ・コンクリート打設工程の進捗に合わせた定時到着搬入を行う
- ・輸送時間の実績を反映した出荷時刻調整を行う
- ・ITを活用して生コンクリートの出荷状況、ミキサー車の走行位置・待機状況など輸送状況を関係者全員で共有することにより、施工管理員やプラントが生コンクリートの搬入遅れに対して見込む余裕を可能な限り削減し、結果として待機車両の台数を最小化し、無駄が無い輸送を実現する
- ・建設現場での受け入れ時の品質(スランプ、空気量、温度など)をプラントでの生産へフィードバックし、各項目について許容値の範囲で調整する。

4.2 出荷時刻の動的な決定と配車

本研究においては、生コンクリート輸送に対して「今後の必要量」と「到着時間」をリアルタイムで予測し、その時点で必要となる量・品質を決定し生産・出荷する動的スケジューリング手法を適用した。このシステムにおいては、コンクリート打設計画と輸送所要時間から、出荷タイミングを決定して、生産を指示する。この際に、図-9に示すようプラントからの出荷台数と、現場への到着台数、現場における打設実績とをリアルタイムで比較することに



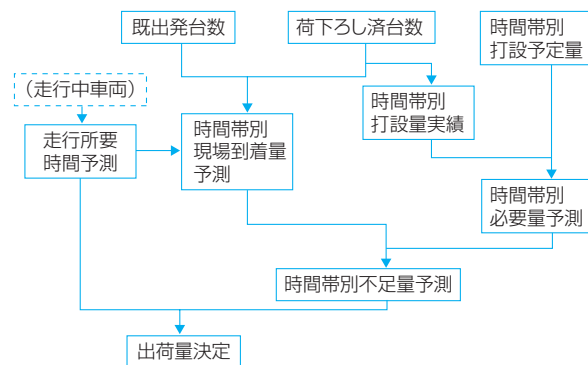
■図-9 累積打設済台数と累積出荷台数・到着台数

より、出荷時期を調整する機能も持たせた。

建設現場では、打設前日までに、建設現場、サーバー、プラント間で何段階かの購入計画と出荷計画のやりとりを行い、生コンクリートの時間当たりの平均打設量と平均供給量の計画と累積打設量と累積供給量の計画を作成する。

打設当日は、建設現場もしくは施工管理員からの需要データとミキサー車からの打設実績データがリアルタイムにサーバーに発信される。サーバー上の生コンクリートの時間当たり平均打設量と平均供給量の実績値と累積打設量と累積供給量の実績値を、建設現場、プラント、施工管理員から常に閲覧できるようにする。

システム運用中は、プラントからの出発台数と、現場への到着台数、現場における打設実績とを比較することにより、将来の時間帯別出荷量を決定する(図-10)。さらに、ミキサー車自体を一種のプロブカー(Probe Car)として利用することにより道路の輸送時間を計測し、このデータを基に将来の輸送時間の予測も行うことも可能である。



■図-10 生産・出荷台数の決定方法

4.3 出荷時刻決定式

生コンクリートプラントからの出荷時刻の決定方法として以下のロジックを設定した。

(1) リードタイムの計算

生コンクリートプラントにおいて出荷を指示してから、建設現場で打設を開始できるまでのリードタイム α 分を設定する。

$$\cdot \text{リードタイム}(\alpha \text{ 分}) = \text{生産時間}(\beta \text{ 分}) + \text{輸送時間}(\gamma \text{ 分})$$

(2) α分後の必要出荷台数S(台)の計算

要出荷台数Sは、以下の式で計算する。

- ・要出荷台数(S台) =
現在の現場における不足台数(D₁台)
+リードタイム中の予測消費台数(D₂台)
+余裕台数(M台)

D₁およびD₂は以下の式で計算する(図一11参照)。

- ・現時点での現場における不足台数(D₁台) =
累積打設開始台数(A_p台) - 累積出荷台数(A_s台)
現場での打設開始の遅れ、設定した標準打設時間と実際の打設時間(実績)の差は、A_pを通じて要出荷台数Sに反映することになる。

「リードタイム中の予測消費台数(D₂)」とは、現時点(t)から、現時点で出荷した生コンクリートが現場に到着する時刻(t+α)までに消費(打設)される台数の予測値であり、次の式で計算される実数の値である。

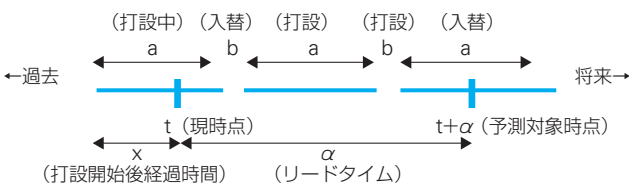
・リードタイム中の予測消費台数(D₂台) =

$$\frac{\alpha}{a+b} + \frac{x}{a} - 1$$

ここで、

- α : リードタイム(分)
- a : 打設時間(分)
- b : 建設現場における車両入替時間(分)
- x : 現在打設中車両の打設開始後の経過時間(分)

である。式中の第1項はリードタイム(α分)中に平均的に何台分の打設が行われるかの予測を示す項である。第2項以降は現時点で打設途中のミキサー車にまだ残っている未打設の生コンクリートの量の予測値を差し引くための補正項である。



■図一11 打設時間とリードタイム(時間軸上の表現)

要出荷台数Sは、現時点での出荷が不要な場合、つまり既に十分な台数が出荷されているばあいにおいては負の値をとり、出荷が必要な場合は正の値をとる。

なお、打設時間(a)自体にも変動はあるが、変動の最も大きな要因は現場での準備不足、ポンプのトラブル等の突発的な要因である。このような突発事象を予測式自体に組み込むことは困難であるため、システム内においてはトラブル発生は予測式の外の事象として扱い、人間による判断で出荷抑止を指令することとした。また、システムへ入力する打設時間、輸送時間(γ)は過去の実績をもとに入力する。生コンクリート輸送の場合は同一の建設現場

へ数日にわたり繰り返し輸送を行うことが多いので、最初の輸送時には人間が予想値を入力するが、システム内にデータが蓄積されれば、別途統計解析・予測プログラムを組み込むことにより予測精度を向上させることが可能である(後述の今回のプロトタイプシステムでは未実装)。

プラントにおける出荷指示から出荷までの生産時間(β)は5分程度であり、プラントにおける配合装置は間欠的であり時間稼働率は低い。このため生産能力は通常は制約条件とならない。

ミキサー車についてはプラント側に十分な台数が待機していることを条件に定式化した。本システムの運用により待機時間を削減することは結果としてプラント側におけるミキサー車の供給(出荷待機)に余裕を持たせることになる。

余裕台数M(台)については、現場での運用経験にしたがって設定することになる。本研究では後述のシミュレーションの結果により余裕台数の設定方法について検討を行った。

(3) 出荷指示

必要出荷台数Sがプラスの値をとった時点でミキサー車1台の出荷を指示する。

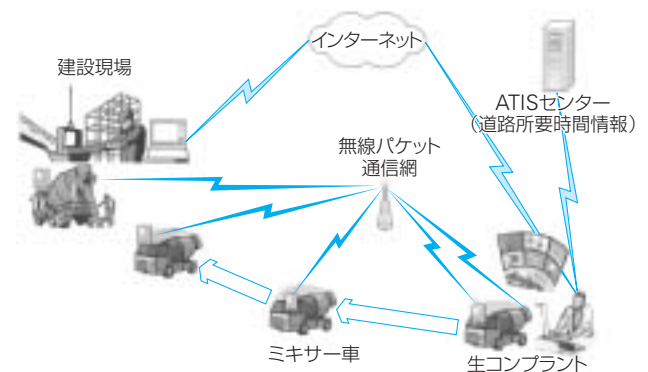
出荷と同時に要出荷台数Sを再計算する。

(4) 要出荷台数の再計算

建設現場において打設中のミキサー車の打設が終了した時点、および次のミキサー車の打設を開始した時点でも要出荷台数Sを再計算する。なお、ミキサー車が建設現場に到着しても、定義式によれば要出荷台数Sには変化が生じないので再計算の必要はない。

4.4 プロトタイプシステムの構築¹³⁾

図一12は、定時到着搬入システムの構成要素を示したものである。生コンクリート等の建設資材等の出荷地であるプラントと搬入先である建設現場の間をミキサー車などの輸送手段により輸送される。これら三者の間はインターネット接続したパソコンや携帯電話によりデータセンターに接続する。



■図一12 生コンクリート搬入システムの構成要素

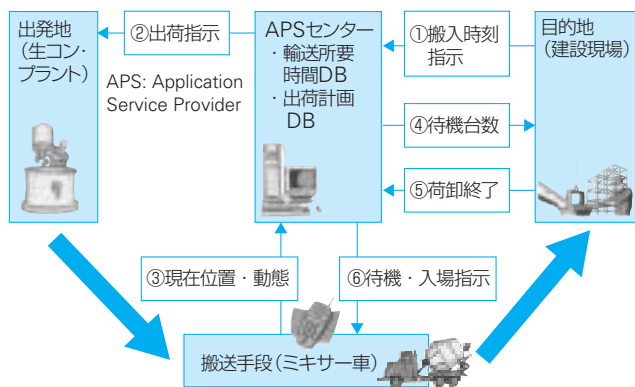
生コンクリート定時到着搬入システムは、図一13に示す形でデータが流れるように設計を行った。

生コンクリートプラント、建設現場が要求する搬入指示時刻(①)およびデータセンターに蓄積された輸送所要時間にもとづいて算出された出荷指示(②)を受けてミキサー車を出発させる。その後、データセンターは建設現場に待機台数(④)を通知する。

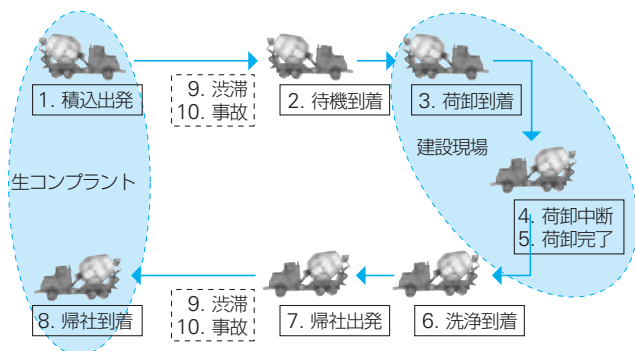
走行中のミキサー車からは、現在位置と走行中、待機中、到着等の動態(③、図一14参照)をデータセンターに送信する。データセンターはこれを受けて出荷地から建設現場までの輸送所要時間を蓄積し、曜日別、天候別等のデータベース化を行うことができ、翌日以降の出荷計画策定に反映させることができる。

また、走行中のミキサー車の位置と動態は、生コンクリートプラントや建設現場からモニターすることができる。

建設現場においては、ミキサー車から荷卸し終了の報告(⑤)をデータセンターに送信し、ミキサー車は、建設現場の誘導員からデータセンターを通じての待機・入場指示(⑥)を受ける。



■図一13 定時到着搬入システム内のデータの流れ



■図一14 ミキサー車の動態

注：数字は動態の事象番号

4.5 実験の概要¹³⁾

生コンクリート輸送における定時到着輸送制御システムの実用性を検証するために、プロトタイプシステムの開発を行い、2002年1月に2日間にわたって実証実験を実施した。実験では、①携帯電話を端末としたインターネット上で稼働するASPタイプの出荷・輸送管理システム、②既

存のASPによる車両位置情報サービス、③無線Webカメラ(現場からの静止画伝送)をアプリケーション統合して、プラントと現場に設置した計2台のノートパソコンからそれぞれ必要な情報へのアクセスができるようにした。2002年1月に東京都町田市においてこのシステムを実際に生コンクリートプラント、建設現場、ミキサー車10台に設置して、延べ2日間にわたりシステムの動作テストを行った。実験では実稼働中の生コンクリートプラント、建設現場、ミキサー車に機器を持ち込んで実データを使用してシステムの動作確認を行った。今回の実験では実際の建設現場においてシステムが正常に動作するかの確認を目的として、通常の電話と無線機(音声)による生コンクリート出荷指示と並行して本システムの操作を行った。そのため、システムの操作は、それぞれの場所および車両に配置した実験補助員のみが行う形をとった。

生コンクリートプラントでは出荷時刻になるとシステム上で車両を指定して出荷指示を入力する。システムからミキサー車へはEメールで指示が伝達される。この指示は携帯電話機の画面に表示され、積み込みが終わって出発した時点で運転手のボタン操作により出発したことが報告される。この状態は、建設現場において逐一モニターすることができる。

運転手に対する行き先の指示も同時に携帯電話の画面に表示される。また、建設現場の構内が狭くミキサー車が待機できない場合には、待機場所が行き先と指定される。現場での受け入れ準備が整うと、現場の施工管理員等が入場指示(待機解除)を入力する。待機場所のミキサー車は、システムからEメールにより入場を指示される。

輸送中やコンクリート打設中に何らかのトラブルが発生した場合は、携帯電話のボタン操作により生コンクリートプラントや建設現場に状態の変化が知らされ、自体に応じて出荷の中断等の必要な処置がとられる。

ミキサー車に搭載したGPS端末(NTT-DoCoMoの「DoCoですCar」とパケット通信を用いて、ミキサー車の位置が常にインターネットの画面上に表示される。これによりプラントと現場の間を往復するミキサー車の位置が把握できる。また、1日のミキサー車の走行軌跡も表示される。実験における走行軌跡を見ると、同一建設現場へ向かうミキサー車の経路や待機場所が現状では運転手の判断に任されているためかなり異なることがわかった。このようなシステムが本格的に稼働すれば、道路混雑に対応した最適輸送経路や、影響が少ない待機場所の選択が個々の運転手の経験によらずに可能となるほか、建設業者にとっては工事用車両が指定経路からはずれないように監視するツールともなる。

輸送所要時間や待機時間のデータについても輸送終

了後サーバーからデータをダウンロードすることにより可能とした。

4.6 実証実験の実施結果¹³⁾

2日間の実験期間に、端末操作に不慣れなため入力遅れ(人的問題)や携帯電話のEメール遅延(機械的問題)等のいくつかの技術的な問題があることが確認され、これらについては今後の改善が必要なが判明した。一方で、関係者へのインタビューによるとこのシステムにより建設現場の前で搬入車両が待機できない場合には、不確実性がある無線による音声連絡よりも、迅速な入場指示ができることが確認された(表一1)。

2日間の実験の結果、生コンクリート定時到着搬入システムに対する関係者を聞くと、当初意図した目的に対してシステムの導入効果が認められる可能性が示された。また、取得したデータから現状ではかなり長時間の待機も発生することが明らかになり、システムを活用して出荷時刻を調整すれば待機時間の削減効果があることもわかった。

■表一1 関係者インタビューによる実験結果の評価

分類	内容
建設現場の意見	・建設現場前に待機スペースがない場合は、待機車両への指示が容易である ・出荷状況が一目でわかるため安心感がある。
生コンクリートプラントの意見	・道路が渋滞した場合に帰着予定が把握できるので、配車がやりやすい。
システム上の課題	・端末の操作忘れ、操作遅れが発生した。 ・DoCoMoのEメールの遅延により指示が伝わらない場合があった。 ・現場の端末はノートパソコンでなく、PDAの方が良い。

5——導入効果の計測

5.1 導入効果計測のためのシミュレーション

2002年1月に実施した2日間の実験においては、最初のテストであったため、生コンクリートプラントにおける出荷へ悪影響を避け、システムのモニタリング機能のみを利用し、出荷タイミングは従来の手作業による方法で実施した。このため、導入効果の検証を目的として実測データを基にしてシステムによる出荷最適化機能を動作させた場合の路上待機台数減少効果をシミュレーションにより検証した。

シミュレーションは、Microsoft Excel上で1分単位の時系列状態変化シートを作成することにより実施した(図一15)。

- ・縦軸を時間軸として、横軸に各変数を設定する。
- ・各セルには当該時刻の変数の値の計算式を入力する。
- ・時間軸に沿って計算式を下方へコピーすることによりシミュレーション結果が各セルへ表示される。

シミュレーションにおいては、生コンクリート輸送時間、個々のミキサー車の打設開始時間・所要時間は実験で

時刻	変数1	変数2	...	変数n
9:00	変数1の9:00の値の計算式	変数2の9:00の値の計算式		変数nの9:00の値の計算式
9:01	変数1の9:01の値の計算式	変数2の9:01の値の計算式		変数nの9:01の値の計算式
9:02	↓			
...				
...				
...				
16:59	↓	↓		↓
17:00	↓	↓		↓

■図一15 Microsoft Excelによるシミュレーションの構造

計測した実績値をそのまま利用し、生コンクリートの出荷時期を4.3で示した出荷時刻決定式で決定した場合の待機台数を実績値と比較した。

なお、ミキサー車の到着遅延によるペナルティについては、遅刻時間に対してコスト関数を設定して評価することも考えられるが、建設現場でのシステムの実運用を考慮すると到着遅延による打設中断があることを前提とするのは受け入れられ難い。ここでは打設中断が発生しないことを前提(制約条件)として、余裕を持たせて出荷を行い、その中でシミュレーションの解を求めるという考え方を採用した。

表一2にシミュレーション実施の設定条件を示す。

シミュレーションにおいては、輸送所要時間の予測値に実績値をそのまま使用して、所要時間の予測が完全に実施できた場合のシステムによる出荷時期調整効果を検証した。

■表一2 シミュレーションの条件

項目	設定
打設量	実績値と同じ
1台目の打設開始時刻	実績値と同じ
打設時間	実績値の最小値を標準打設時間として設定。
輸送所要時間	実績値を用いて内挿により出発時刻基準で1分間毎の輸送所要時間を設定。
輸送所要時間の予測	実績値をそのまま使用【完全な予測ができた場合を想定】
帰還車両の運用	考慮せず(生コンクリートプラントに十分な台数が存在すると仮定)
タイムステップ	1分毎に計算
計算期間	1日(朝から全打設終了まで)

注：実績値としては1日分の計測値を利用。

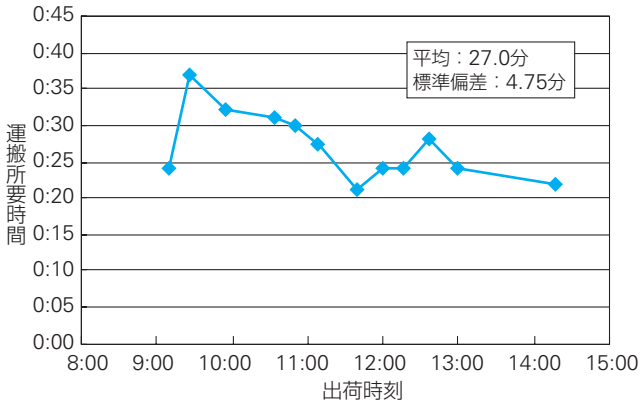
輸送所要時間の実績値は、図一16に示すように21分から37分の間で変動している。

実績の打設時間は、図一17に示すように最小値が12分、最大値が69分である。なお、最後の2台の打設時間が異常に長い原因としては、運転手からの打設完了報告の遅れの可能性があったが、本シミュレーションでは、実測値をそのまま用いることとした。

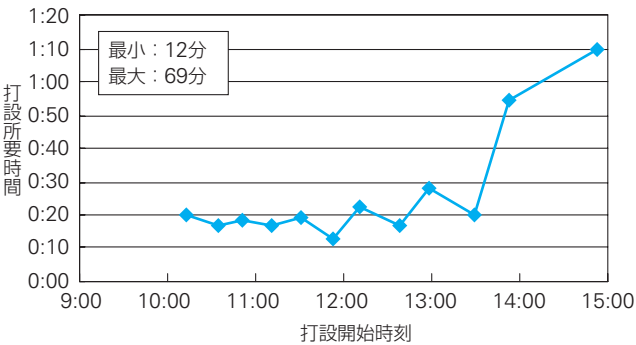
標準打設時間の値が大きくなると要出荷台数の値が小さくなり、その結果プラントからの次の出荷時期が遅くなる。標準打設時間を最小値の12分ではなく16~18分程度に設定したシミュレーションも実施したが、そのように設

定すると現場へのミキサー車の到着遅れにより打設中断が発生する場合がありますので、今回は安全側の値として12分を標準打設時間とした。実際の運用においては、許容される打設中断時間に応じて標準打設時間を長めにとることにより、待機台数をさらに削減することも可能である。

ちなみに、標準打設時間と実際の打設時間に差は実績待機台数に反映するので、時間遅れはあるもののシステム導入により時間帯別累積出荷台数は適正化される。



■図—16 輸送所要時間の実績値



■図—17 打設時間の実績

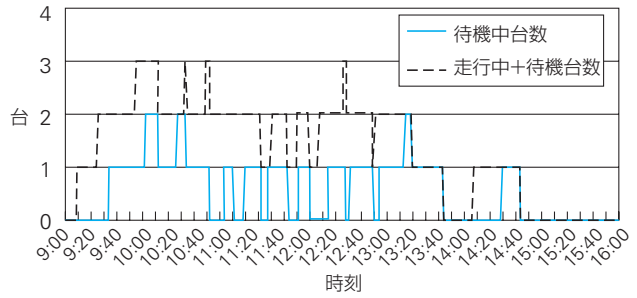
5.2 シミュレーション結果

図—18に実績の待機台数の時系列変化を、図—19にシミュレーションの待機台数の時系列変化を示す。

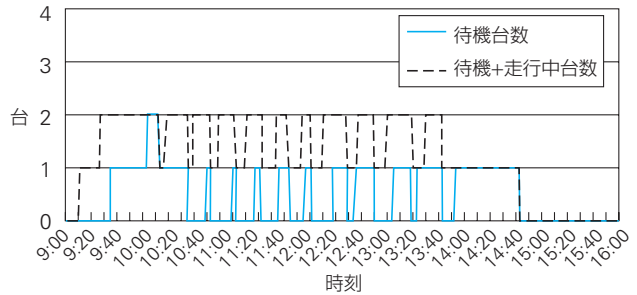
実績においては、最大待機台数は2台であり3回出現している。待機中台数と走行中台数の合計の最大値は3台であり4回出現している。

一方、シミュレーション結果(図—19)においては、最大待機台数は2台であるがこれは1回しか出現していない。実績値とシミュレーション結果比較すると10:40～11:00、12:40の付近でシミュレーション結果の待機台数の方が減少している。これは、実績ではこの時間帯に現場において打設作業の遅延が発生しているのにも関わらずこれがプラントへ通知されず生コンクリートの出荷が停止されなかったのに対して、シミュレーションでは待機台数をモニターしてその結果をもとに出荷を制御したことが効果を発揮したためである。

待機台数と走行中台数の合計の最大値も2台に収まっ



■図—18 待機台数(実績)



■図—19 待機台数(シミュレーション)

■表—3 総待機時間の比較

ケース	総待機時間	比率
実績	239分	100%
シミュレーション	204分	85%

ており、出荷時期調整の効果が確認された。

1日の総待機時間も表—3に示すように15%削減されている。

シミュレーション結果から、輸送時間が完全に予測できたとすると、出荷時期の調整により総待機時間が15%削減可能であることが確認された。

5.3 まとめ

シミュレーションの結果より得られた知見をまとめると以下のとおりである。

- ・平均輸送時間が実測と同じケースでは、輸送時間の予測と待機台数の把握を実施することにより総待機時間が15%減少した。

6—結論

本研究の成果は、以下に述べるとおりである。

- ① 生コンクリート輸送を対象にして、輸送した貨物の搬入先における次工程での処理の進捗状況、搬入先周辺での待機車両の状況を出荷地へフィードバックすることにより、待機車両数を最小限に抑える出発時刻制御を行うシステムを提案した。
- ② 荷主、運転手、荷受人の3者間の情報共有を実現することにより、過剰な量や早期の発注を防ぎ、これにより搬入先周辺での待機車両数を最小限に抑える出荷

時刻制御システムを提案した。

- ③ 定時搬入制御実現のために不可欠な輸送所要時間を、車両の運行実績から取得する運行管理システムを組み合わせた。
 - ④ ①～③の考え方にもとづく定時到着搬入システムを実際に開発し、実証実験を通じてその実用性・有効性を検証した。
 - ⑤ 生コンクリートの出荷時刻の決定を輸送時間と打設中断情報をもとに簡単な在庫管理の式を用いて決定したが、輸送時間の予測および出荷時刻決定のロジックに関しては、今後運用実績が蓄積されれば専門家の手によってさらにファインチューニングを施す余地がある。
 - ⑥ シミュレーションにおいては一般的な交通状況、打設工程の場合を想定して待機車両の削減効果を計測したが、このようなシステムは単なるコスト削減効果より、むしろ道路の閉鎖、災害、プラントや打設現場での深刻なトラブル発生などの異常事態発生時に役立つ可能性がある。大量の情報が集中する突発事象発生時には、従来の人手による整理・指示では対応できないことが予想され、システムの導入により異常時の現場への供給信頼性が向上することが期待できる。
- 以上の成果により本研究では待機車両数を含めた車両動態を出荷計画に反映することにより待機時間を削減できる可能性があることを示した。

しかしながら、本研究を通じて定時到着搬入システムが次の段階へ進むための課題も明らかになった。主なものを列挙すると以下のとおりである。

- ① システムの導入効果については、今後長期間にわたる実地の運用で、データを収集し実証的に分析する必要がある。
- ② 今回開発したプロトタイプシステムを実用化するためには、荷主や荷受人がすでに保有している生産管理、在庫管理、工程管理等とのアプリケーション統合やデータ交換機能を装備する必要があるが、これについて

研究ベースでの開発には限界があり、商品化の段階での作業となるため、いかにシステムを使ってもらうかが普及のための課題である。

- ③ 他のシステムとのデータ交換のインターフェイスについては、当然標準化の作業が不可欠であり、これに取り組む必要がある。

謝辞：本研究は、運輸政策研究所・武蔵工業大学・東急建設(株)の共同研究の成果をもとにしてとりまとめたものである。プロトタイプシステムの開発実証実験にご協力いただいたダックシステム(株)、細野コンクリート(株)の方々に対して、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) (財)日本情報処理開発協会企業間電子商取引推進機構[1999],「欧米におけるサプライチェーン・マネジメント(SCM)の現状と今後の展開」
- 2) “構造物の良否は計画で決まる、コンクリート養生名人養成講座(1)”,「日経コンストラクション」2000年1月26日号, pp. 86-89,
- 3) “生コン発注のノウハウ、コンクリート養生名人養成講座(2)”,「日経コンストラクション」2000年2月11日号, pp. 88-90.
- 4) “ひび割れないコンクリートの作り方(5)作業をイメージできる計画書”,「日経アーキテクチャー」2002年12月23日号, pp. 88-91.
- 5) “インタビュー コンクリートも普通の商品としてもっと真剣にチェックしてほしい ～1800件のクレームを分析してわかった品質不良の原因～”,「日経コンストラクション」, 2000年11月24日号, pp. 40-41.
- 6) 久保田尚[2000], “交通需要マネジメント(TDM)とITS”,「オペレーションズリサーチ」, 2000年7月号, pp. 31-35
- 7) 郭偉宏[2000], “ITSを基盤としたSCMの展望”,「オペレーションズリサーチ」, 2000年7月号, p. 24-30.
- 8) 大沼廣洲[1999], “物流ITS”,「道路交通経済」, '99-7, pp. 31-34.
- 9) 石田宏之[1999], “サプライチェーン時代のトラック輸送産業構造に関する研究”,「豊橋創造大学紀要」第3号, pp31-41.
- 10) 福井良太郎[2002], “物流分野におけるITSの動向”,「情報処理学会、高度交通システム9-11」, pp79-84.
- 11) 西宮良一[2001], “第51回運輸政策コロキウム:交通・運輸分野におけるITの利用動向と1つの開発事例”,「季刊運輸政策研究」, Vol4, No. 3p, p62-66.
- 12) 佐藤拓也、清宮正好、赤羽弘和、桑原雅夫、小酒井宏行[1997], “高速道路の利用予約制に関する基礎的研究”,「土木学会年次学術講演会講演概要集第4部」Vol. 52,1997.
- 13) 西宮良一、玉井真一、服部尚道[2002], “ITを活用した搬入車両の路上待機削減システムの開発”,「土木計画学研究・講演集」, Vol. 25(CD).

(原稿受付 2004年1月29日)

Dynamic Departure Scheduling for Truck-mixers

By Ryoichi NISHIMIYA and Hisamichi HATTORI

In this paper, the authors show a comprehensive dynamic scheduling and vehicle dispatch system, which enables just-on-time arrival of truck-mixers. The system can decide optimal shipping timing from the concrete plants considering two elements: travel time fluctuation caused by road traffic congestion, and delay of planned concrete placing process within construction sites. A prototype system using commercial mobile packet communication service (i-mode) has been developed and tested at the actual sites. Introduction of the system can reduce traffic congestion caused by waiting trucks around the sites, and improve the quality of concrete by the reduction of the waiting time.

Key Words ; Intelligent Transport System, just-on-time carry-in, dynamic scheduling, truck mixers
