

建設資材の管理・配送計画のシステム化に関する研究

STUDY ON A SYSTEMS APPROACH TO MANAGEMENT AND DELIVERY PLANNING PROCESS OF CONSTRUCTION EQUIPMENTS

吉川 和 広*・山本 幸 司**・見波 潔***

By Kazuhiro YOSHIKAWA, Koshi YAMAMOTO and Kiyoshi MINAMI

1. 緒 言

建設工事は属地生産という特性をもつため、各工事現場が必要とする時期に必要な種類・数量・品質の建設機械や仮設資材を確実に搬入することが工事遂行上の必須条件となる。したがって、多種類の建設機械や仮設資材を多量に使用する現状では、これらの購入・管理・運用方法に関する検討が不十分であれば、工事施工における所期の管理目標を十分に達成し得なくなり、場合によっては上述した必須条件すら満足できなくなる。

そこで多くの施工組織体では主として以下のような業務を行う資材センター（別称、機材センター、工作所など）を設置し、この問題に対処している。

- ① 各工事現場が必要とする機械・資材の数量を予測し、不足分を新規購入すべきかどうか判断する。
- ② 各工事現場から機械・資材の搬入要請があれば、その種類・数量・品質を確認し、必要に応じてリース制度を利用し、指定された日時当該現場へ配送する。
- ③ 機械・資材の使用負担として各工事現場から供用日数に応じた使用料を徴収する。
- ④ 工事現場から返送された機械・資材を点検・修理し、保管する。また、以後の使用に耐えないと判断される機械・資材は廃棄処分とする。

このような資材センターの業務は工事遂行上重要な位置を占めるにもかかわらず、各担当者が経験に基づいて主観的・恣意的に意志決定することが多く、資材センター本来の機能を十分に遂行し得ていないのが現状である。

そこで本研究では、上述した資材センターの諸業務の中でも建設工事の管理目標に及ぼす影響が特に大きいと

考えられる購入・管理・運用業務と配送業務を取り上げ、合理的な購入・管理・運用計画（以下、単に管理計画とよぶ）および配送計画の策定方法を提案する。ここでいう合理的な管理・配送計画とは、各工事現場で必要とする種類・数量・品質の機械・資材を必要な時期に確実に配送することを制約条件と考え、購入・管理・運用に要する費用および配送費用を低廉化することを目的とするものであり、計画モデルの策定にあたっては、代替案を体系的に比較評価し得るシステムズ・アナリシスのようなアプローチを試みることにする¹⁾。

なお、資材センターで取り扱う機械・資材は一般に単品管理品目と数量管理品目とに大別できるが、

- ① 単品管理品目は購入価格が高いために重点的な管理・運用が必要であるが、取扱い数量が少ないため従来の方法でも十分に対処できること、
 - ② 数量管理品目、特に仮設資材は購入価格が比較的低廉であるが、取扱い数量が多く使用頻度も高いため運用方法・配送方法に関する代替案の数が多くなり、従来の方法では合目的度の高い計画立案が困難なこと、
- などを考慮し、本研究では仮設資材を研究対象として取り上げ、その管理・配送計画のシステム化を試みる。

以下、2. では資材管理・配送計画の概要を述べ、3.、4. では合理的な計画策定を目的とした資材管理計画モデルおよび配送計画モデルを提案するとともに、いくつかの適用事例に対して実証的な考察を行うことにする。

2. 資材管理・配送計画の概要^{2)~4)}

(1) 資材管理・配送計画の計画対象

仮設資材を運用上の特徴から分類すると、

- ① 耐用年数が比較的長く、材質的にも多数回の転用が可能であるため、各工事現場へ賃貸する仮設資材
- ② 数回以下の使用でスクラップ同様になり転用が困

* 正会員 工博 京都大学教授 工学部土木工学科

** 正会員 工博 名古屋工業大学講師 土木工学科

*** 正会員 工修 建設省土木研究所施工研究室研究員

難となるため、各工事現場に売却する仮設資材の2種類に大別できるが、本研究では前者に属する仮設資材を取り上げ、以下これを単に資材とよぶことにする。いま資材の一般的な運用手順をモデル的に表わしたのが図-1である。このように資材はサイクリックに使用されるため、その管理計画においては、④各種資材をどれだけ保有し、⑤それをいかに効率的に運用するか、を合理的に決定する必要がある。

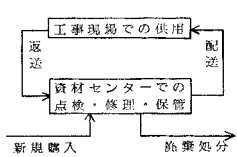


図-1 資材運用のモデル図

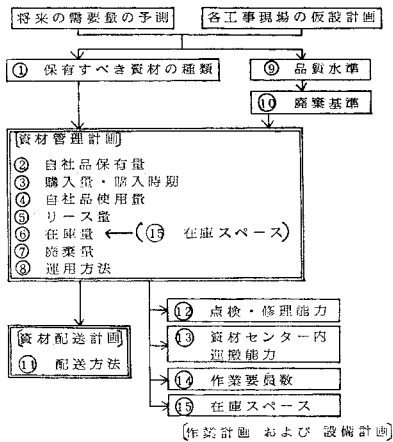


図-2 資材管理のプロセス

次に資材センターの業務内容を分析した結果、図-2に示すような資材管理プロセスが提案できた。このうち本研究では、個々の工事施工と密接に関係するためにシステマティックな取扱いを必要とする②~⑧の各要素を合理的に決定する問題を特に資材管理計画とよぶことにする。また、⑪配送方法を決定する問題を資材配送計画とよび、資材管理計画の下位計画として位置付けることとする。

(2) 資材管理計画の概要

施工組織体では工事受注後直ちに施工計画の作成業務に入り、その成果の一つである仮設資材計画によって明らかとなる必要資材の種類・数量・品質および供用時期に関する内容は直ちに資材センターに報告される。通常この段階で得る情報の精度は1週間~1か月を単位とするおおまかなものであるが、資材センターではこれをもとにして資材の種類ごとに自社の使用状況、在庫状況、返送予定などを調査したうえで、各工事現場に対して自社品(新規購入品を含む)、リース品のいずれを供給すべきかを判断しなければならない。さらに各工事現場から搬入希望日の1~2週間前に送付される物品請求

書に基づいて当該工事現場に供給する自社品、リース品の配送時期、数量を正式に決定する必要がある。

各工事現場の資材需要に対して自社品、リース品のいずれを供給するかの判断は資材管理の中核をなすものであり、これは(1)で述べたように、④保有数量、⑤運用方法を決定する問題と考えることができる。いうまでもなく両者は互いに密接な関係にあるが、本研究では、

③ 保有数量の決定は、資材の耐用年数が5年程度もしくはそれ以上であることを考慮して長期的展望に立つべき計画問題であること、

⑥ 運用方法の決定は、各工事の資材使用計画が明らかになった段階で初めて検討が可能となる比較的短期間を対象とする計画問題であること、

を考慮して資材管理計画を長期計画と短期計画とに分け、前者では資材の長期需要予測をもとに望ましい保有数量を求める問題を扱い、後者では各工事の資材使用計画をもとに運用方法(新規購入量、自社品使用量、リース量の決定)を求める問題を扱うことにした。

ここで従来の資材管理方式を振り返ってみると、担当者がそれぞれの経験・勘を頼りに意志決定を行うため、

- (i) 運用方法に関する意志決定が場当たりので、時として資材調達業務の確実性を損なう恐れがあること、
- (ii) 運用方法の代替案数が多いため、望ましい代替案を限られた時間内に選択することが困難なこと、
- (iii) 資材管理の良否は調達業務の確実性のみならず資材管理費用の損益計算によっても評価されるにもかか

表-1 資材管理費用の内訳

(a) 取支形態1の場合

取支別 主体	支 出	取 入
A ₁ : 現 場	自社品使用料, リース料 輸送費, 廃棄処分補償費 (自社品, リース品)	
B ₁ : 資 材 センター	在庫管理費, 新規購入費 修理費	自社品使用料 廃棄処分補償費 (自社品)
C: 支 店	在庫管理費, 新規購入費 修理費, リース料, 輸送費 廃棄処分補償費 (リース品)	

(b) 取支形態2の場合

取支別 主体	支 出	取 入
A ₂ : 現 場	自社品使用料, 輸送費 廃棄処分補償費 (自社品, リース品)	
B ₂ : 資 材 センター	在庫管理費, 新規購入費 修理費, リース料と自社品 使用料の差額	上表と同じ
C: 支 店	上表と同じ	

ならず、これに対する考察が不十分であること、などの問題点を指摘することができる。そこで次章では工事施工に必要な資材の確実な供給を制約条件とし、資材管理費用の低廉化という客観的な評価基準のもとで望ましい代替案を選択し得る計画モデルを提案する。

なお本研究では評価主体として、主体 A；個々の現場レベル、主体 B；資材センターレベル、主体 C；資材センターと現場を包含する支店レベル、を考え、さらにリース料の負担形態として、取支形態 1；全額を現場が負担する形態、取支形態 2；リース料と自社品使用料の差額を資材センターが負担する形態、を考えていくこととし、資材管理に関連する費用として表-1 に示す各項目を取り上げた。なお表では保有数量に関係しない固定経費を除外している。さて上述した3つの評価主体のうち主体 A の場合には各工事現場が独立に資材計画を検討することになるため本研究の対象とはなり得ない。そこで以下では主体 B および C の立場から経済性の評価を行うことにする。

(3) 資材配送計画の概要

各工事現場からの資材搬入要請は資材管理計画に基づいて自社品もしくはリース品で賄われるが、資材センターが配送業務の対象とするのは自社品である。しかも現実には配送業務を運送業者に委託することが多く、従来は配送すべき資材の数量・配送日時・配送先を指示する程度で、個々のトラックへの積載数量や配送ルートを具体的に検討することはほとんどなかった。しかしこれでは積載効率の低いトラックを数多く配車する可能性が大であり、配送費用の増大を招く一因となっていた。

そこで本研究では、各現場への自社品の確実な配送を制約条件とし、配送ルートの統合および複数種類の資材の混載を積極的に導入することによって配送費用の低廉化を図る資材配送計画の策定方法を提案する。このような資材配送計画は各工事現場の自社品使用量を対象に配送業務の合理化を検討するものであるため、資材管理計画のアウトプット情報を資材配送計画へのインプット情報として利用することができることから、2つの計画は有機的に結合することになる。

3. 資材管理計画モデル

資材センターでは多種類の資材を取り扱うが、ここでは単一種類の資材を対象とする資材管理計画モデルを提案することとし、モデル化に際しては、

- ㊦ 長期計画の計画対象期間は対象資材の耐用年数程度とし、これをいくつかの期に分割する。
- ㊧ 短期計画の計画対象期間は長期計画の第 1 期と対

応し、これをさらにいくつかの期に分割する。

㊨ したがって以下においては長期計画はその第 2 期以降を対象とする。

を前提として 図-3 に示すように計画対象期間および期を設定する。

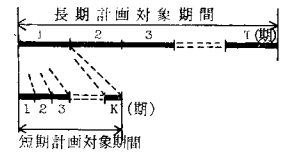


図-3 資材管理計画モデルの対象期間の分割

(1) 長期計画モデルの定式化

この計画モデルは資材センターの管轄内で発生する資材の需要に対して自社品およびリース品を供給するという条件下で、資材管理費用の低廉化を評価基準として望ましい自社品保有数量を決定するものであるが、モデル化にあたっては以下のような前提条件を考えた。

① 自社品使用量、在庫量、リース量と自社品保有量、需要量との間には次に示す関係があるものとする。

$$\left. \begin{aligned} \text{自社品使用量} &= \min\{\rho H, D\} \\ \text{在庫量} &= \max\{H - \rho H, H - D\} \\ \text{リース量} &= \max\{D - \rho H, 0\} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

ただし、 H ：自社品保有量、 D ：需要量、 ρ ：自社品稼働率の上限値

これは、リース品は自社品が不足する場合に補助的に利用されること、および自社品については現場での供用後資材センターでの点検・修理期間が必要であるため稼働率には上限が存在することを考慮したものである。

- ② 各期の需要量は確率分布形で与えるものとする。
- ③ 各期末には当該期の使用量に比例する減耗が生じるものとするが、資材の売却は行わないものとする。
- ④ 各期の修理費は当該期の使用量に比例するものとする。
- ⑤ 新規購入は各期首に行われ、購入費用は償却費と

表-2 長期計画モデルの記号説明

記号	内容
H_t (決定変数)	第 t 期の自社品保有量
I_t (補助変数)	第 t 期の在庫量の期待値
S_t (補助変数)	第 t 期の自社品使用量の期待値
R_t (補助変数)	第 t 期のリース量の期待値
X_t (補助変数)	第 t 期の新規購入量
ρ (定数)	自社品稼働率の上限値
p (定数)	廃棄処分減耗率
C_t^I (定数)	第 t 期の在庫 1 単位当りの在庫管理費
C_{tk}^S (定数)	第 k 期の新規購入分に対する第 t 期での 1 単位当り損料
C_t^U (定数)	第 t 期の自社品使用 1 単位当りの使用料
C_t^M (定数)	第 t 期の自社品使用 1 単位当りの修理費
C_t^R (定数)	第 t 期の 1 単位当りのリース料
C_t^B (定数)	第 t 期の自社品 1 単位当りの廃棄処分補償費
$C_t^{B'}$ (定数)	第 t 期のリース品 1 単位当りの廃棄処分補償費
$\varphi_t(D)dD$ (定数)	第 t 期の需要量が D と $D+dD$ の間である確率
$z_{B_1}^{(1)}, z_{B_2}^{(1)}, z_C^{(1)}$	短期計画モデルの目的関数値
H_1^E	第 1 期末の自社品保有量

して以後の各期に振り分けるものとする。

⑥ 資材管理費用の期待値の最小化を評価基準とする。

以下ではこのような前提条件のもとでの長期計画モデルを示す。なお、各記号の説明は表-2に示す。

<主体 B, 収支形態 1 の場合 (B₁ と記す)>

(目的関数)

$$Z_{B_1} = \left(z_{B_1}^{(1)} + \sum_{t=2}^T C_{t1}^S X_1 \right) + \sum_{t=2}^T \left[C_t^I I_t + \sum_{k=2}^t C_{tk}^S X_k + C_t^M S_t - C_t^U S_t - C_t^B (p \cdot S_t) \right] \rightarrow \min \dots \dots \dots (2)$$

(制約条件)

$$H_t \geq H_{t-1} - pS_{t-1} \quad (t=3, 4, \dots, T) \dots \dots \dots (3)$$

$$H_2 \geq H_1^E \dots \dots \dots (4)$$

$$H_t \geq 0 \quad (t=2, 3, \dots, T) \dots \dots \dots (5)$$

ただし、

$$I_t = \int_0^{\rho H_t} (H_t - D) \varphi_t(D) dD + \int_{\rho H_t}^{\infty} (1 - \rho) H_t \varphi_t(D) dD \quad (t=2, 3, \dots, T) \dots \dots \dots (6)$$

$$S_t = \int_0^{\rho H_t} D \varphi_t(D) dD + \int_{\rho H_t}^{\infty} \rho H_t \varphi_t(D) dD \quad (t=2, 3, \dots, T) \dots \dots \dots (7)$$

$$H_t = I_t + S_t \quad (t=2, 3, \dots, T) \dots \dots \dots (8)$$

$$X_t = H_t - (H_{t-1} - pS_{t-1}) \quad (t=3, 4, \dots, T) \dots \dots \dots (9)$$

$$X_2 = H_2 - H_1^E \dots \dots \dots (10)$$

$$\int_0^{\infty} \varphi_t(D) dD = 1 \quad (t=2, 3, \dots, T) \dots \dots \dots (11)$$

この定式化において、 $z_{B_1}^{(1)}$, X_1 , H_1^E は後述する短期計画モデルの目的関数および変数である。式 (2) は計画対象期間内の資材管理費用の期待値を表わしており、右辺の各項は表-1に示した経費の内訳と対応している。式 (3), (4) は、各期の自社品保有量はその直前の保有量から減耗分を差し引いた量よりも多いことを表わしており、その際に前提条件 ③ を考慮している。この制約条件は式 (9), (10) で表わされる新規購入量 X_t の非負条件を与えていることに等しい。また、式 (6), (7) は在庫量、自社品使用量の期待値を表わしており、前提条件 ① に従って需要量 D が ρH よりも大きい場合と小さい場合に分けて計算を行っている。

<主体 B, 収支形態 2 の場合 (B₂ と記す)>

(制約条件)

B₁ の場合と同じ。

(目的関数)

$$Z_{B_2} = \left(z_{B_2}^{(1)} + \sum_{t=2}^T C_{t1}^S X_1 \right) + \sum_{t=2}^T \left[C_t^I I_t + \sum_{k=2}^t C_{tk}^S X_k + C_t^M S_t + (C_t^R - C_t^U) R_t - C_t^U S_t - C_t^B (p S_t) \right] \rightarrow \min \dots \dots \dots (12)$$

ただし、

$$R_t = \int_{\rho H_t}^{\infty} (D - \rho H_t) \varphi_t(D) dD \quad (t=2, 3, \dots, T) \dots \dots \dots (13)$$

$$S_t + R_t = \int_0^{\infty} D \varphi_t(D) dD = \mu_t \quad (t=2, 3, \dots, T) \dots \dots \dots (14)$$

<主体 C の場合 (C と記す)>

(制約条件)

B₁ の場合と同じ。

(目的関数)

$$Z_C = \left(z_C^{(1)} + \sum_{t=2}^T C_{t1}^S X_1 \right) + \sum_{t=2}^T \left[C_t^I I_t + \sum_{k=2}^t C_{tk}^S X_k + C_t^M S_t + C_t^R R_t + C_t^{B'} (p R_t) \right] \rightarrow \min \dots \dots \dots (15)$$

これらのうち C では評価基準に輸送費を含めるべきであるが、長期計画は各現場への輸送費を個々に算出し得るレベルではないことを考慮して輸送費を目的関数から除外した。

(2) 長期計画モデルの解法

上述したモデルは目的関数式や制約条件式 (4) からわかるように、第 2 期以降に関する長期計画と第 1 期のみを対象とする短期計画というレベルの異なる 2 つの問題を含んでいるため、両者の最適解を同時に得ることは實際上、非常に困難と思われる。そこで、本研究では最初に長期計画について優先的に最適化を図り、その得られた解の範囲内で短期計画の最適化を図ることを考えた。すなわち、長期計画問題では制約条件式 (4) を考慮からはずして第 2 期以降の最適解 $H_t^* (t=2, 3, \dots, T)$ を求め、式 (4) は後述する短期計画モデルの制約条件として扱うことにした。

ここではまず H_t^* を求める方法について述べる。

本モデルの性質から目的関数は H_t に関して極値をもつことが予想されるため、

$$\partial Z / \partial H_t = 0 \dots \dots \dots (16)$$

となる H_t を求める。一例として式 (2) より式 (16) を導くと

$$\int_0^{\rho H_t} \varphi_t(D) dD$$

$$= \frac{1}{\rho} \left\{ \frac{C_t^U + \rho C_t^B - C_t^M - p \sum_{j=t+1}^T C_{jt+1}^S - \left(\sum_{j=t}^T C_{jt}^S - \sum_{j=t+1}^T C_{jt+1}^S \right)}{C_t^I + C_t^U + \rho C_t^B - C_t^M - p \sum_{j=t+1}^T C_{jt+1}^S} - (1-\rho) \right\} \dots\dots\dots (17)$$

となり、これを満足する H_t は解析的にあるいは取束計算等の方法により求めることができる。しかし、上述した解法では制約条件式 (3) を直接考慮していないため、式 (17) の解 \tilde{H}_t が式 (3) を満足すれば \tilde{H}_t は最適解 H_t^* となるものの、満足しない場合も当然考えられる。たとえば \tilde{H}_{t-1} と \tilde{H}_t が式 (3) を満足しない場合を想定すると、第 $t-1$ 期に \tilde{H}_{t-1} を越えて新規購入することはあり得ないため、このような場合には \tilde{H}_{t-1} の決定を保留し、

$$\tilde{H}_{t-2} - p\tilde{S}_{t-2} \leq H_{t-1} \leq \tilde{H}_{t-1} \dots\dots\dots (18)$$

の範囲内でいくつかの H_{t-1} を想定し、

$$H_t = H_{t-1} - pS_{t-1} \dots\dots\dots (19)$$

という関係から得られる H_t と H_{t-1} に対して最も合目的度の高い値を新たに \tilde{H}_{t-1} 、 \tilde{H}_t とおく方法を考えることにする。このような方法を第 2 期から順次段階的に繰り返していけば満足解を効率よく探索することができる。

(3) 長期計画モデルの適用例

以下では角パイプを対象品目として長期計画モデルの適用を試みる。本節では角パイプの耐用年数を 5 年としこれを半年単位で 10 期に分割した。適用事例のインプットデータを表-3 に示すが、ここでは便宜上角パイプ 100 m を 1 単位と考えた。次に本モデルでは需要量を確率的に取り扱うことを考慮しているが、現段階ではその確率密度関数 $\varphi_t(D)$ を決定するための情報に乏しいため、ここでは予測誤差の分布形としてしばしば用いられる正規分布を仮定し、次式を用いることにした。

表-3 適用事例のインプットデータ

ρ	0.9
p	0.05
C_t^I	0 (円/単位)
C_{ik}^S	5640 (円/単位)
C_t^U	9600 (円/単位)
C_t^M	1500 (円/単位)
C_t^R	12000 (円/単位)
C_t^B	50000 (円/単位)
$C_t^{B'}$	60000 (円/単位)
T	10 (期)

(1 単位は 100 m)

表-4 適用事例のインプットデータ

	μ_t	σ_t
$t=2$	2561.6	249.8
$t=3$	2730.8	258.0
$t=4$	2900.0	267.9
$t=5$	3069.2	279.3
$t=6$	3238.4	292.0
$t=7$	3407.6	305.9
$t=8$	3576.8	320.8
$t=9$	3746.0	336.6
$t=10$	3915.2	353.2

(単位: 100 m)

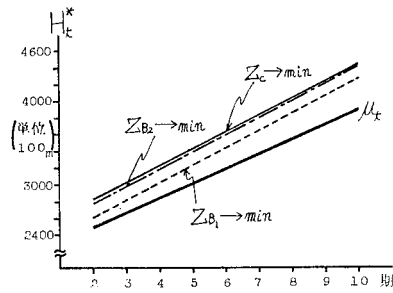


図-4 長期計画モデルの適用結果

$$\varphi_t(D) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_t} \exp\left\{-\frac{(D-\mu_t)^2}{2\sigma_t^2}\right\} \quad (t=2, 3, \dots, T) \dots\dots\dots (20)$$

なお本研究では第 t 期の平均 μ_t および標準偏差 σ_t の算定方法として、まず過去数年間の角パイプ使用実績をもとに時系列需要予測を行い^{5),6)}、予測値 A_t と信頼度 95% の信頼限界の幅 d_t を求め、これを用いて次式により μ_t 、 σ_t を定めることにした。

$$\mu_t = A_t, \sigma_t = \frac{1}{2}d_t \quad (t=2, 3, \dots, T) \dots\dots\dots (21)$$

ここで式 (21) の第 2 式は、正規分布が

$$Pr\{\mu_t - 2\sigma_t \leq D \leq \mu_t + 2\sigma_t\} \approx 0.95 \dots\dots\dots (22)$$

という性質をもつことを考慮して定めたものである。適用事例として用いた μ_t 、 σ_t の値は表-4 に示す。

以上のインプットデータを長期計画モデルに適用した結果を示したのが図-4 である。これより、 B_1 、 B_2 、 C のいずれの立場に立っても H_t^* は μ_t より大きいという結果が得られたが、三者間には多少の差がみられる。すなわち、 B_1 は施工組織体内部での資材管理部門の独立性が強い場合にその採算性を重視する立場であることから他の 2 ケースに比べて自社品保有量が少なくなっており、この結果リース量が多少増加しても自社品の効率的な運用を図ることになる。一方、 C は資材管理部門と現場を包含した支店レベルにおいて最も経済的な資材管理を行おうとする立場であることから、 B_1 に比べて自社品保有量は多くなっている。なお、 B_2 は C にきわめて近い立場であることが図-4 から判断できる。

(4) 短期計画モデルの定式化

ここでは資材需要量が現場ごとに十分な精度で予測できる期間を対象として、新規購入量、リース量、在庫量を求め、資材の運用方法を明らかにする計画モデルを提案する。その際、長期計画との整合性を保つために長期計画モデルのアウトプットのうち第 2 期の自社品保有量 H_2^* を制約条件の中で考慮することとし、評価基準に関しては長期計画と同様に B_1 、 B_2 、 C を主体として資材管理費用の最小化を考えることにする。

本モデルの作成にあたっては長期計画モデルの前提条件 ③～⑥ に加えて以下に示す前提条件を考えた。

① 各工事の施工計画が作成された段階で資材センターに報告される資材の必要時期は1週間～1か月単位で示されるのが一般的であるため、計画単位もこの程度を考慮することにする。

② 各現場の資材需要量に対して自社品およびリース品を必要時期に必要な数量だけ供給するものとする。

③ 自社品は各期首に資材センターから各現場へ配送され、供用終了期の期末に資材センターへ返送されるものとする。

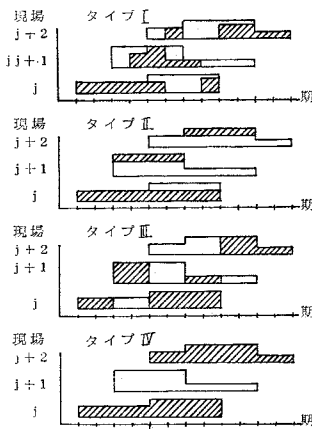
④ 資材センターへ返送された資材は1期間の点検・修理期間を経て、次々期には出庫可能な状態になるものとする。

ところで資材の使用形態に関しては、同一現場内での自社品とリース品の混合使用の可否、および同一現場内での自社品とリース品の工期途中での切替使用の可否により、図-5 に示す4タイプに分類できる。このうち現場で固定する使用方法の場合には中途切替が技術的に困難であるため、ここではタイプ II, IV のみを取り上げ、その定式化を示す。なお各記号の意味内容は表-5 に示したとおりである。

a) タイプ II (混合使用可, 中途切替不可) の定式化
現場の資材需要量が計画期によって変化する場合には図-6 に示すように当該現場をいくつかの仮想現場に分割し、各現場の需要量が計画期によらず一定となるようにすれば定式化が容易になる。この結果、主体 B₁ に対しては次のように定式化できる。

(目的関数)

$$z_{B_1}^{(1)} = \sum_{k=1}^K \left[\left\{ \bar{C}_k^I I_k + \sum_{j=1}^k \bar{C}_{ki}^S P_i \right. \right.$$



斜線は自社品使用、それ以外はリース品使用を示す。

図-5 資材使用形態の模式図

表-5 短期計画モデルの記号説明

記号	内 容
P_k (決定変数)	第 k 期の新規購入量
x_j (決定変数)	現場 j での自社品使用量 (タイプ II)
δ_j (決定変数)	現場 j で自社品を使用するとき 1, そうでないとき 0 (タイプ IV)
I_k (補助変数)	第 k 期の在庫量
H_k^E (補助変数)	最終期 (第 K 期) の自社品保有量
T_{kj} (定 数)	第 k 期に現場 j で資材を必要とするとき 1, そうでないとき 0 (タイプ II)
E_{kj} (定 数)	第 k 期に現場 j で資材の供用が終了するとき 1, そうでないとき 0 (タイプ II)
m_j (定 数)	現場 j の資材需要量 (タイプ II)
m_{kj} (定 数)	第 k 期の現場 j での資材需要量 (タイプ IV)
I_0 (定 数)	初期在庫量
B_k (定 数)	計画対象期間前に配送された資材のうち第 k 期に返送される量
B_0 (定 数)	計画対象期間前に配送された資材のうち計画対象期間中には返送されない量
$\bar{S}_k, \underline{S}_k$ (定 数)	第 k 期の在庫量の上下限值
M (定 数)	新規購入費用の上限値
H_k^* (定 数)	長期計画モデルにおける第 2 期の適正保有量
α (定 数)	供用 1 回当りの廃棄処分減耗率
$C_j T, C_j T'$ (定 数)	資材センターおよびリース会社から現場 j への 1 単位当り輸送費

なお、 $\bar{C}_k^I, \bar{C}_{ki}^S, \bar{C}_k^M, \bar{C}_k^U, \bar{C}_k^R, \bar{C}_k^B, \bar{C}_k^{B'}$ は長期計画モデルと同じ意味内容

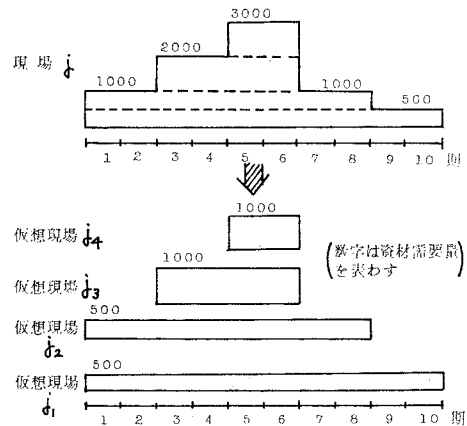


図-6 タイプ II における資材需要量の分割

$$+ \bar{C}_t^M \sum_{j=1}^N E_{k-1,j} x_j \} - \left\{ \bar{C}_t^U \sum_{j=1}^N T_{k,j} x_j + \bar{C}_t^B \alpha \sum_{j=1}^N E_{k-1,j} \right\} \rightarrow \min \dots \dots \dots (23)$$

ただし,

$$I_k = I_0 + (1-\alpha) \sum_{i=1}^{k-2} B_i + \sum_{i=1}^k P_i - \alpha \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^N E_{i,j} x_j + B_{k-1} + \sum_{j=1}^N E_{k-1,j} x_j - \sum_{j=1}^N T_{k,j} x_j \dots \dots \dots (24)$$

(制約条件)

① 各期の自社品使用量は自社品供給可能量以下であること

$$\sum_{j=1}^N T_{k,j} x_j \leq I_0 + (1-\alpha) \sum_{i=1}^{k-2} B_i + \sum_{i=1}^k P_i$$

$$-\alpha \sum_{i=1}^{k-2} \sum_{j=1}^N E_{ij} x_j - \sum_{j=1}^N E_{k-1,j} x_j \quad (k=1, 2, \dots, K) \dots\dots\dots (25)$$

② 各期の在庫量が一定範囲内にあること

$$\underline{S}_k \leq I_k \leq \bar{S}_k \quad (k=1, 2, \dots, K) \dots\dots\dots (26)$$

③ 新規購入費用の総額が上限値以下であること

$$\sum_{k=1}^K C_k^P P_k \leq M \dots\dots\dots (27)$$

④ 最終期(第 K 期)の自社品保有量は長期計画モデルの第 2 期の保有量以下であること

$$H_1^E \leq H_2^* \dots\dots\dots (28)$$

ただし,

$$H_1^E = I_0 + B_0 + (1-\alpha) \sum_{k=1}^K B_k + \sum_{k=1}^K P_k - \alpha \sum_{k=1}^{K-1} \sum_{j=1}^N E_{kj} x_j \dots\dots\dots (29)$$

⑤ 新規購入量, 各現場の自社品使用量が一定範囲内にあること

$$\left. \begin{aligned} P_k &\geq 0 & (k=1, 2, \dots, K) \\ 0 &\leq x_j \leq m_j & (j=1, 2, \dots, N) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (30)$$

次に同じ制約条件のもとで主体 B₂, C に対する目的関数式を示す.

$$z_{B_2}^{(1)} = \sum_{k=1}^K \left[\left\{ \bar{C}_k^I I_k + \sum_{i=1}^k \bar{C}_{ki}^S P_i + \bar{C}_k^M \sum_{j=1}^N E_{k-1,j} x_j + (\bar{C}_k^R - \bar{C}_k^U) \sum_{j=1}^N T_{kj} (m_j - x_j) \right\} - \left\{ \bar{C}_k^U \sum_{j=1}^N T_{kj} x_j + \bar{C}_k^B \alpha \sum_{j=1}^N E_{k-1,j} x_j \right\} \right] \rightarrow \min \dots\dots\dots (31)$$

$$z_C^{(1)} = \sum_{k=1}^K \left[\left\{ \bar{C}_k^I I_k + \sum_{i=1}^k \bar{C}_{ki}^S P_i + \bar{C}_k^M \sum_{j=1}^N E_{k-1,j} x_j + \bar{C}_k^R \sum_{j=1}^N T_{kj} (m_j - x_j) \right\} + \bar{C}_k^{B'} \alpha \sum_{j=1}^N E_{k-1,j} (m_j - x_j) \right] + \sum_{j=1}^N C_j^T x_j + \sum_{j=1}^N C_j^{T'} (m_j - x_j) \rightarrow \min \dots\dots\dots (32)$$

なお, 式 (32) における輸送費は各現場ごとに標準的な容量のトラックで配送, 返送する費用を考えるものとする.

b) タイプ IV (混合使用不可, 中途切替不可) の定式化

(目的関数)

$$z_{B_2}^{(1)} = \sum_{k=1}^K \left[\left\{ \bar{C}_k^I I_k + \sum_{i=1}^k \bar{C}_{ki}^S P_i + \bar{C}_k^M \sum_{j=1}^N \delta_j f(m_{k-1,j} - m_{kj}) \right\} - \left\{ \bar{C}_k^U \sum_{j=1}^N \delta_j m_{kj} \right\} \right]$$

$$+ \bar{C}_k^B \alpha \sum_{j=1}^N \delta_j f(m_{k-1,j} - m_{kj}) \Big] \rightarrow \min \dots\dots\dots (33)$$

$$z_{B_2}^{(1)} = \sum_{k=1}^K \left[\left\{ \bar{C}_k^I I_k + \sum_{i=1}^k \bar{C}_{ki}^S P_i + \bar{C}_k^M \sum_{j=1}^N \delta_j f(m_{k-1,j} - m_{kj}) + (\bar{C}_k^R - \bar{C}_k^U) \sum_{j=1}^N (1 - \delta_j) m_{kj} \right\} - \left\{ \bar{C}_k^U \sum_{j=1}^N \delta_j m_{kj} + \bar{C}_k^B \alpha \sum_{j=1}^N \delta_j f(m_{k-1,j} - m_{kj}) \right\} \right] \rightarrow \min \dots\dots\dots (34)$$

$$z_C^{(1)} = \sum_{k=1}^K \left[\left\{ \bar{C}_k^I I_k + \sum_{i=1}^k \bar{C}_{ki}^S P_i + \bar{C}_k^M \sum_{j=1}^N \delta_j f(m_{k-1,j} - m_{kj}) + \bar{C}_k^R \sum_{j=1}^N (1 - \delta_j) m_{kj} + \bar{C}_k^{B'} \alpha \sum_{j=1}^N (1 - \delta_j) f(m_{k-1,j} - m_{kj}) \right\} + \sum_{j=1}^N C_j^T \delta_j (\max_k m_{kj}) + \sum_{j=1}^N C_j^{T'} (1 - \delta_j) (\max_k m_{kj}) \right] \rightarrow \min \dots\dots\dots (35)$$

ただし,

$$I_k = I_0 + (1-\alpha) \sum_{i=1}^{k-2} B_i + \sum_{i=1}^k P_i - \alpha \sum_{i=1}^{k-2} \sum_{j=1}^N \delta_j f(m_{ij} - m_{i+1,j}) + B_{k-1} + \sum_{j=1}^N \delta_j f(m_{k-1,j} - m_{kj}) - \sum_{j=1}^N \delta_j m_{kj} \dots\dots\dots (36)$$

$$f(x) = x \quad (x \geq 0) \text{ or } 0 \quad (x < 0) \dots\dots\dots (37)$$

(制約条件)

$$\textcircled{1} \sum_{j=1}^N \delta_j m_{kj} \leq I_0 + (1-\alpha) \sum_{i=1}^{k-2} B_i + \sum_{i=1}^k P_i - \alpha \sum_{i=1}^{k-2} \sum_{j=1}^N \delta_j f(m_{ij} - m_{i+1,j}) - \sum_{j=1}^N \delta_j f(m_{k-1,j} - m_{kj}) \quad (k=1, 2, \dots, K) \dots\dots\dots (38)$$

$$\textcircled{2} \underline{S}_k \leq I_k \leq \bar{S}_k \quad (k=1, 2, \dots, K) \dots\dots\dots (39)$$

$$\textcircled{3} \sum_{k=1}^K C_k^P P_k \leq M \dots\dots\dots (40)$$

$$\textcircled{4} H_1^E \leq H_2^* \dots\dots\dots (41)$$

ただし,

$$H_1^E = I_0 + B_0 + (1-\alpha) \sum_{k=1}^K B_k + \sum_{k=1}^K P_k - \alpha \sum_{k=1}^{K-1} \sum_{j=1}^N \delta_j f(m_{ij} - m_{i+1,j}) \dots\dots\dots (42)$$

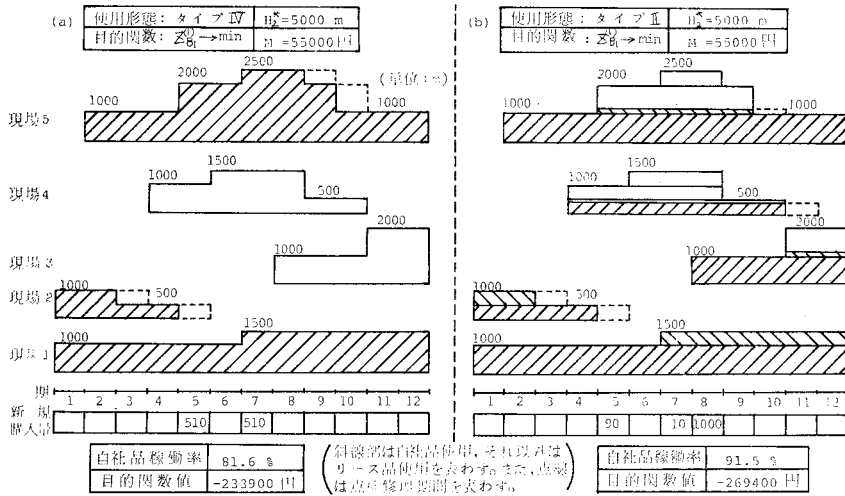


図-7 短期計画モデルの適用結果

$$\left. \begin{aligned} & P_k \geq 0 \quad (k=1, 2, \dots, K) \\ & \delta_j = 0 \text{ or } 1 \quad (j=1, 2, \dots, N) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (43)$$

(5) 短期計画モデルの解法

タイプⅡの短期計画モデルは P_k, x_j という $K+N$ 個の整数型変数をもつ線形整数計画問題となる。この種の問題は変数の数が多くなると実用的な計算時間内で最適解を求めることが困難となるため、ここでは整数条件を外し、線形計画問題として近似解を求めることにする。

一方、タイプⅣの短期計画モデルは N 個の 0-1 型変数と K 個の整数型変数をもつ線形整数計画問題となる。これもタイプⅡと同様の理由により、 P_k の整数条件を外すことによって得られる 0-1 混合整数計画問題を相補計画問題として解くことにする。なお、相補計画問題の解法等については参考文献 7), 8) に譲る。

表-6 適用事例のインプットデータ

(a)	(b)	$C_j T$ (円/m)	$C_j T'$ (円/m)
$\bar{C}_k I$	0 (円/m)		
$\bar{C}_{ki} S$	4.7 (円/m)	$j=1$	14.0, 22.0
$\bar{C}_k M$	15.0 (円/m)	$j=2$	18.0, 22.0
$\bar{C}_k U$	8.0 (円/m)	$j=3$	22.0, 14.0
$\bar{C}_k B$	500.0 (円/m)	$j=4$	28.0, 34.0
$\bar{C}_k R$	10.0 (円/m)	$j=5$	34.0, 14.0
$\bar{C}_k B'$	600.0 (円/m)		
$C_k P$	500.0 (円/m)		
I_0	3000 (m)		
α	0.02		
\bar{S}_k	3000 (m)		
\underline{S}_k	0 (m)		
M	550000 (円)		
H_2^*	5000 (m)		

(6) 短期計画モデルの適用例

(3) と同様に角パイプを対象品目として本モデルの適用を試みる。ここでは計画対象期間を半年、計画単位を半月とした。また、簡単のため工事現場は 5 か所とし、各現場の需要量として 図-7 の山積図を考えた。表-6 には各定数の想定値を示した。事例計算結果の概要は以下のとおりである。

① $Z_B^{(1)} \rightarrow \min$ を目的関数とする計算結果を示した 図-7 によれば、使用形態をタイプⅣとする場合には現場 1, 2, 5 で自社品を使用し、現場 3, 4 ではリース品を使用するとともに、第 5, 7 期に合計 1020m を購入するのが望ましいという結果が得られ、このときの目的関数値は -233 900 円であった。また、自作品稼働率 r を

$$r = \frac{\sum_{k=1}^K (\text{第 } k \text{ 期の自社品使用量})}{\sum_{k=1}^K (\text{第 } k \text{ 期の自社品保有量})} \dots\dots\dots (44)$$

で定義すると、この場合は 81.6% となる。一方、使用形態をタイプⅡとする場合には現場 3, 4, 5 において自社品とリース品を混合使用するとともに、第 5, 7, 9 期に合計 1100m を購入するのが望ましいという結果が得られ、目的関数値は -269 400 円、自作品稼働率は 91.5% となった。これらの値はいずれもタイプⅣの場合と比べて大幅に改善されている。この結果、資材を経済的・効率的に運用するためには同一現場内での自社品とリース品の混合使用が有効であることが明らかとなった。

② 表-7 は 3 つの異なる目的関数のもとで得られた最適解についてそれぞれ評価主体別の資材管理費用および自作品稼働率を計算したもので、設定した目的関数によって解の異なることがみとめられる (それぞれの目的

表-7 資材管理費用および自社品稼働率の比較

タイプⅣ				
資材管理費用 目的関数	$z_{B_1}^{(1)}$	$z_{B_2}^{(1)}$	$z_C^{(1)}$	自 社 品 稼 働 率
$z_{B_1}^{(1)} \rightarrow \min$	-233 900円	-204 900円	440 000 円	81.6%
$z_{B_2}^{(1)} \rightarrow \min$	-233 900	-204 900	440 000	81.6
$z_C^{(1)} \rightarrow \min$	-223 500	-189 500	412 500	79.5

タイプⅡ				
資材管理費用 目的関数	$z_{B_1}^{(1)}$	$z_{B_2}^{(1)}$	$z_C^{(1)}$	自 社 品 稼 働 率
$z_{B_1}^{(1)} \rightarrow \min$	-268 500円	-244 600円	375 000 円	91.5%
$z_{B_2}^{(1)} \rightarrow \min$	-265 500	-245 500	354 300	89.9
$z_C^{(1)} \rightarrow \min$	-254 200	-237 900	335 600	88.6

関数は支出をプラス側にとっているため、収入の項目が含まれている z_{B_1} 、 z_{B_2} は負の値、収入の項目がない z_C は正の値が得られている。このうち 自社品稼働率についてみると B_1 で評価する場合が最も高くなっており、長期計画と同様自社品を最も効率的に運用する立場であることがわかる。これに比べて B_2 では自社品稼働率が若干低い、これはリース料と自社品使用料との差額を資材センターが負担することからリース量を減らすことが基本方針となるためである。

4. 資材配送計画モデル⁹⁾

この計画モデルは資材センターから各工事現場への自社品配送業務において複数資材の混載および配送ルートの統合（以下では積合せとよぶ）の積極的な導入によって配送費用を低廉化することを目的とし、車種別配車台数および各トラックの資材積載量、配送ルートを決するものである。この計画問題は混載・積合せという性質の異なる2つの問題を含み、それぞれの代替案数が非常に多いため、これら2つの問題を同時に扱い、かつ最適性を保証するような計画アルゴリズムを提案することは困難である。そこで本研究では、まず混載は認めるが個々の工事現場へ独立にトラックの配車を検討する第1プロセスと、その結果をもとに複数工事現場への積合せを検討する第2プロセスという2段階の計画プロセスからなるモデルを提案する。

(1) 第1プロセスの資材配送計画モデルとその解法

モデル作成上の前提条件として、

- ① 搬入日が同一の複数現場を対象とし、個々の現場への複数種類の資材配送量は既知とする。
- ② 各車種の配車可能台数に制限があるものとする。
- ③ 各トラックはあらかじめ設定された資材センターと各工事現場間の最短経路を走行するものとする。
- ④ 工事現場の立地条件に応じて進入可能なトラック

車種の制限（大型車通行規制等）を考慮する。

を設定すると、第1プロセスの資材配送計画モデルは各工事現場への車種別配車台数と個々のトラックの資材積載量を変数とする0-1型整数計画問題として定式化できる。しかし、その解法に関して本研究では、

(i) 第1プロセスでの最適解に対して第2プロセスで積合せを考慮しても、必ずしも配送計画全体の最適解となる保証のないこと、

(ii) 0-1変数を含む整数計画問題は変数の数が多くなると実用的な計算時間内に最適解を得にくいこと、を考慮し、実行可能な近似解を効率よく求めるヒューリスティックな方法を考えていくことにした。すなわち、まず各現場への車種別・資材別配車台数を実数変数とする線形計画問題を解き、以下に示す手順によって第1プロセスの配送計画を求めることにする。

手順1 LPの最適解の整数部分の配車を決定する。

手順2 手順1の配車決定だけでは配送量が不足する現場に対しては混載を認め、まだ配車決定されていない大型車を割り当てる。

手順3 個々の現場に配車決定されたトラック2台分の資材を1台のトラックに混載することによって配送費用を減らすことができるかどうかを検討する。

(2) 第2プロセスの資材配送計画モデルとその解法

第1プロセスで求まる配送計画において満載状態となったトラックは最適な配送計画もしくはそれに近い計画代替案の一部を構成するものと考えられるためその配車を決定し、満載状態でないトラックのみを第2プロセスの対象として積合せによる配送費用の低減化を考えていくことにする。本研究ではその解法として Clark と Wright のセービング法^{10),11)}を援用したが、その際に上述の前提条件①～④以外に次の2点を考慮している。

- ① 各トラックの走行距離、走行時間に上限を設定し、適用事例ではそれぞれ 200 km, 8時間とした。
- ② トラックが工事現場に立寄るごとに荷下しのための留置時間を要し、適用事例ではこれを 30分とした。

(3) 適用事例およびその考察

ここでは混載・積合せが配送費用の低減化に及ぼす効果を調べるために、大阪府高槻市に位置し近畿一円をその管轄区域とする資材センターから 19 工事現場への資材配送問題を想定し、対象品目としてトラックへの積載数量が重量で制限される角パイプ、および容積で制限される鋼製型枠を取り上げた。各工事現場への資材配送量、資材センターからの距離および進入可能なトラックの最大車種を示したのが表-8である。トラックの車種に関しては、2・4・6・8トン車の4車種を考え、配車可能台

表—8 適用事例のインプットデータ

	現場所在地	資材センターからの距離	鋼製型枠配送量	角パイプ配送量	進入可能な最大型トラック
1	板宿	56 km	350 枠	445 m	6 トン車
2	篠山	71	144	1 527	8
3	宝塚	30	17	9 761	8
4	西宮	33	18	120	6
5	尼崎	31	636	1 150	8
6	豊中	22	343	960	8
7	十三	24	367	1 625	4
8	梅田	24	44	4 981	4
9	守口	14	291	2 776	8
10	東能勢	24	150	574	8
11	亀岡	27	63	175	8
12	天津	32	240	1 340	8
13	宇治	23	570	3 472	8
14	生駒	24	78	9 860	8
15	堺	37	154	720	8
16	羽曳野	41	20	215	8
17	天野	47	471	3 270	8
18	岸和田	53	170	7 153	8
19	和歌山	89	54	1 520	8

数をそれぞれ 20 台、20 台、25 台、25 台と仮定した。

さて、混載・積合せの採否によって、ケース A；混載・積合せとも認めない場合、ケース B；積合せのみ認める場合、ケース C；混載のみ認める場合、ケース D；混載・積合せとも認める場合、の 4 ケースを考え、それぞれの適用結果をまとめたのが表—9 である。ケース A と C、ケース B と D をそれぞれ比較することにより、混載を認めた配送計画では積載率および大型車の配車比率が向上し、総走行距離およびトラック配車台数が減少することが明らかとなった。これらはいずれも配送費用の低減化に結びつくものであり、事実ケース C、D の配送費用はケース A、B よりもかなり少なくなっている。一方、積合せに関してもケース A と B、ケース C と D を比較することにより同様の特徴を認めることができる。以上のことから、混載・積合せは配送費用の低減化という目的に対して有効に機能することが明らかとなった。

5. 結 言

本研究は建設用仮設資材の管理・配送業務に対し、合理的な資材管理・配送計画を作成するためのシステムズ・アプローチを試みたものである。すなわち、資材管理計画に関しては 0-1 型混合整数計画問題等の最適化手法を組み込んだ計画モデル、資材配送計画に関しては線形計画問題およびセービング法等を組み込んだヒューリスティックな計画モデルを提案したもので、この結果、客観的かつシステムティックな計画代替案の立案ならびに評価検討が可能となった。また、事例計算を通してこれらの計画モデルが十分有効に機能することも明らかとなった。しかしながら、今後本研究をさらに発展させる

表—9 資材配送計画モデルの適用結果

		ケース A	ケース B	ケース C	ケース D
トラック台数	8 トン車	18 台	21 台	25 台	25 台
	6 トン車	21	19	15	15
	4 トン車	18	14	9	11
	2 トン車	16	4	14	3
	合計	73	58	63	54
配送費用	771 680 円	684 330 円	694 420 円	639 590 円	
積載率	86.2%	95.6%	91.4%	98.5%	
総走行距離	2 465 km	2 129 km	2 152 km	1 936 km	
平均走行距離	33.8 km	36.7 km	34.2 km	35.9 km	

ためには次のような課題を考えていく必要がある。

① 本研究で提案した資材管理計画は単一品目を対象としたものであるが、今後は複数種類の資材を同時に扱える計画モデルに拡張すること。

② 資材管理計画で考慮した計画要素とそれ以外の管理要素（品質、廃棄基準、点検修理能力等）との関連、および資材管理計画と資材配送計画との整合性についてさらに詳細に検討すること。

最後に本研究を遂行するにあたり有益なご助言をいただいた京都大学工学部 春名 攻助教授、ならびに心よく資料を提供して下さった関係各位に謝意を表します。また、本研究は水野温夫氏（現在、中央復建コンサルタント勤務）ならびに瀬戸 馨氏（現在、建設省勤務）の労に負うところが大きく、心から感謝する次第である。

参 考 文 献

- 1) 山本幸司：土木工事における施工計画のシステム化に関する研究，京都大学学位論文，pp. 131～174，1978。
- 2) 飯吉精一：建設産業の機材管理，技報堂，1968。
- 3) 倉林良雄・本間郁雄・南川利雄：資材管理，森北出版，1977。
- 4) 川崎健次・春名 攻・田坂隆一郎：工作所における仮設機材管理，第 6 回業務研究発表会論文集，pp. 3～24，建設コンサルタンツ協会，1973。
- 5) 吉田信夫：土木技術者への計画と管理のための予測手法，山海堂，1974。
- 6) 鈴木久子・大石展緒・荻津好文：実例による需要予測の技法，日刊工業新聞社，1972。
- 7) 茨木俊秀：相補的プログラミング，経営科学，第 16 巻，第 1 号，pp. 33～51，1972。
- 8) Gottle, R.W. and G.B. Dantig: Complementary Pivot Theory of Mathematical Programming, J. of Linear Algebra and Its Applications, Vol. 1, pp. 103～125, 1968.
- 9) 吉川和広・山本幸司・瀬戸 馨：混載・積合せを考慮した仮設材配送計画の合理化，第 33 回年次学術講演会講演概要集第 4 部，土木学会，1978。
- 10) Clark, G. and J.W. Wright: Scheduling of Vehicles from a Central Depot to a Number of Delivery Points, Operations Research Quarterly, Vol. 18, No. 3, 1967.
- 11) 阿保栄司：物流ソフトウェアの実例，日刊工業新聞社，pp. 113～144，1977。

(1980.10.3・受付)