輸送問題による最適資源配分計画の改善方法

京都大学工学部　正員　吉川和広
京都大学工学部　正員 ○山本幸司

1 はじめに　施工分野では数多くの輸送（配分・割当）現象が見受けられ，工事施工を経済的に遂行するためには，このような輸送現象に対しても工事条件や工程ネットワークを十分に考慮に入れた合理的な輸送計画を策定する必要がある。これに対する最も身近な手法としては *Hitchcock-Koopmans* の輸送問題（以下ではＴＰと略す）があり，事実，運土計画に関しては我国でも10年程前から各方面で適用化が進み，かなりの実績をあげている。しかしながら，施工分野におけるすべての輸送現象を直接この古典的なＴＰでモデル化することは不可能である。本研究はその一例として，リース会社を含む機材センターから各工事現場へのブルドーザの搬送問題をとりあげ，その最適搬送計画の策定方法を提案し，実証的考察を加えたものである。

2 搬送計画の定式化　各現場から搬入依頼のあった機材を一定期間ごとに搬出する機材センターS_i ($i=1\sim m_1$)に対し，今期，現場D_j ($j=1\sim n$) から 30 ton 級ブルの搬入依頼があった。D_jからの搬入要請台数b_jは各現場が次式によって算出したものとする。

$$b_j=\frac{w_j}{g_j}=\frac{W_j}{t_j\times g_j}\quad\text{-------------}\ ①$$

ここに，W_j：現場D_jの土工量(m^3)，t_j：現場D_jの土工工期(日)，w_j：現場D_jの作業能力(m^3/日)，g_j：現場D_jでのブルの作業能力(m^3/台・日)

さらに，$\bar{C}_{ij}$：機材センターS_iから現場D_jへ搬送するブルの輸送費(円/台)，$\tilde{C}_{ij}$：S_iから搬入したブルのD_jでの機械経費(円/台)，C_i：S_iにあるブルの機械損料(円/台・日)

とすれば，S_iからD_jへ搬送し，さらにD_jでt_j日間供用するときの費用C_{ij}は

$$C_{ij}=\bar{C}_{ij}+\tilde{C}_{ij}=\bar{C}_{ij}+C_i\times t_j\quad\text{--------}\ ②$$

で表わされる。以上のことから，いま，機材センターS_iおよびリース会社L_i ($i=m_1+1\sim m$)から現場D_jへの搬送台数をx_{ij}とすれば，総機械費用Zを最小化する問題は以下のように定式化することができる。

$$Z=\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}C_{ij}x_{ij}\rightarrow min\quad\text{------------}\ ③$$

$$\sum_{j\in J}x_{ij}=a_i\quad(i\in I_2=\{1\sim m_1'\})\quad\text{---------}\ ④$$

$$\sum_{j\in J}x_{ij}\leq a_i\quad(i\in I_3=\{m_1'+1\sim m_1\})\quad\text{--------}\ ⑤$$

$$\sum_{j\in J}x_{ij}\geq a_i\quad(i\in I_1=\{m_1+1\sim m\})\quad\text{--------}\ ⑥$$

$$\sum_{i\in I}x_{ij}=b_j\quad(j\in J_2=\{1\sim n_1\})\quad\text{--------}\ ⑦$$

$$\sum_{i\in I}x_{ij}\geq b_j\quad(j\in J_1=\{n_1+1\sim n\})\quad\text{-------}\ ⑧$$

$$x_{ij}\geq 0\quad i\in I=\{1\sim m\},\ j\in J=\{1\sim n\}\quad\text{----}\ ⑨$$

ここに，式④は今期手持台数a_iをすべて搬出したいS_iに関する制約式であり，式⑤は搬出台数が高々a_i台のS_iに関する制約式である。また式⑥はL_iからのリース台数に関する制約式で通常は$a_i=0$と考えられる。同様に式⑦，⑧はD_jにおける制約式で，特に式⑦は搬入台数をb_jに限定したい現場に関するものである。

3 搬送計画の解析方法　古典的ＴＰではモデル化しえないような施工レベルの諸条件を考慮した機材搬送計画が式③～式⑨として定式化できた。これは *Klingman, Russell, Brigden* らによって開発された混合制約型ＴＰ（ＭＴＰ）とよばれるものである。このモデルはスラック行 $m+1$，スラック列 $n+1$ を導入することにより最終的に，

$$Z'=\sum_{i=1}^{m+1}\sum_{j=1}^{n+1}C_{ij}x_{ij}\quad\text{----------------}\ ⑩$$

$$\sum_{j\in J'}x_{ij}=a_i\quad(i\in I)\quad\text{------------}\ ⑪$$

$$\sum_{j\in J'}x_{ij}=N-\sum_{i\in I}a_i=a_{m+1}\quad\text{-----------}\ ⑫$$

$$\sum_{i\in I'}x_{ij}=b_j\quad(j\in J)\quad\text{-------------}\ ⑬$$

$$\sum_{i\in I'}x_{ij}=N-\sum_{j\in J}b_j=b_{n+1}\quad\text{------------}\ ⑭$$

$$x_{ij}\geq 0\ ,\ i\in I'=\{1\sim m+1\},\ j\in J'=\{1\sim n+1\}\ ⑮$$

$$
\left.
\begin{aligned}
&C_{i,n+1}=\begin{cases}\infty & (i\in I_1\cup I_2,\ かつ J_1=\emptyset)\\ \min\limits_{j\in J_1} C_{ij} & (i\in I_1\cup I_2)\\ 0 & (i\in I_3)\end{cases}\\
&C_{m+1,j}=\begin{cases}\infty & (I_1=\emptyset)\\ \min\limits_{i\in I_1} C_{ij}\end{cases}\\
&C_{m+1,n+1}=0
\end{aligned}
\right\}\text{------⑯}
$$

と変形することができる。これは$(m+1)\times(n+1)$の古典的TPの形をしているため容易に最適解x'_{ij}を求めることができ，MTPの最適解x^o_{ij}は次式によって得られる。

$$
\left.
\begin{aligned}
&x^o_{ij}=x'_{ij}+x'_{i,n+1} && (i\in I_1\cup I_2,\ j\in\{j: C_{ij}=\min_{j\in J_1} C_{ij}\})\\
&x^o_{ij}=x'_{ij}+x'_{m+1,j} && (i\in\{i: C_{ij}=\min_{i\in I_1} C_{ij}\})\\
&x^o_{ij}=x'_{ij} && (\text{for all other } (i,j)\in I\times J)
\end{aligned}
\right\}\text{--⑰}
$$

4 簡単な適用事例とその考察　ここでは2機材センター（そのうちの1つは機械損料の異なる2種類のブルを保有），1リース会社，4現場という事例を考える。まず30 ton 級ブルのC_iとa_iを示したのが**表−1**である。また各現場のW_j，t_j，g_j，b_jを示したのが**表−2**であり，$\bar{C}_{ij}$および$\tilde{C}_{ij}$を示したのが**表−3**である。このようなブルドーザ搬送計画を**2**，**3**の考察に従って古典的TPに変換し，その最適解を求めた結果が**表−4**である。この場合（case 1）にはリースする必要はなく総経費Zは701万円である。次に，a_1，a_2およびC_{33}の値を少し変更した4つのcaseの計算結果を示したのが**表−5**〜**表−8**である。これらの結果より次のような情報が得られる。

(i) a_1のうちの1台が故障で搬送不可能となった場合（case 2），case 1でS_1から搬入を受けていたD_1，D_2ではなく，D_3で1台リースさせた方が経済的に有利である。

(ii) 搬送業務直前にa_2がもう1台搬送可能となっても（case 3），そのブルはそのまま遊休させた方が経済的に有利である。

(iii) しかしcase 2においてa_2がもう1台搬出可能となった場合（case 4），D_3はリースをやめてS_1'から搬入した方が経済的に有利である。

(iv) 現場D_3とリース会社L_1が隣接し，C_{33}が0とみなせる場合（case 5），S_1'のブルを遊休させL_1から2台リースした方が望ましい。

(v) case 5について感度分析を行なうと，L_1からD_3への輸送費C_{33}（当初5万円）が4万円以下になればS_1'のブルを遊休させてリースした方が経済的に有利である。

5 おわりに　本研究は，複数機材センターから複数現場へのhomogenousな機材搬送に関する最適搬送計画作成のための一アプローチを示したものであるが，このモデルは複数工区への下請業者の割付問題に対しても適用可能である。その計算結果および本モデルの問題点は講演時に発表する予定である。

表−1

	c_i	a_i
S_1	10	=4
S_1'	13	≤2
S_2	12	≤6
L_1	15	≥0

表−2

	W_j	t_j	q_j	b_j
D_1	6000	4	500	≥ 3
D_2	6600	6	550	≥ 2
D_3	1800	2	450	= 2
D_4	15000	5	600	≥ 5

表−3　$\bar{C}_{ij}$および$\tilde{C}_{ij}$ ($\bar{C}/\tilde{C}$)

	D_1	D_2	D_3	D_4
S_1	8/40	9/60	8/20	10/50
S_1'	8/52	9/78	8/26	10/65
S_2	12/48	8/72	11/24	8/60
L_1	10/60	10/90	5/30	9/75

表−4　case 1 Z=701

	D_1	D_2	D_3	D_4	
S_1	3	1			= 4
S_1'			2		≤ 2
S_2		1		5	≤ 6
L_1			0		≥ 0
	≥ 3	≥ 2	= 2	≥ 5	

表−5　case 2 Z=714

	D_1	D_2	D_3	D_4	
S_1	2	1			= 3
S_1'	1		1		≤ 2
S_2		1		5	≤ 6
L_1			1		≥ 0
	≥ 3	≥ 2	= 2	≥ 5	

表−6　csae 3 Z=701

	D_1	D_2	D_3	D_4	
S_1	3	1			= 4
S_1'			2		≤ 3
S_2		1		5	≤ 6
L_1			0		≥ 0
	≥ 3	≥ 2	= 2	≥ 5	

表−7　case 4 Z=713

	D_1	D_2	D_3	D_4	
S_1	2	1			= 3
S_1'	1		2		≤ 3
S_2		1		5	≤ 6
L_1			0		≥ 0
	≥ 3	≥ 2	= 2	≥ 5	

表−8　case 5 Z=693

	D_1	D_2	D_3	D_4	
S_1	3	1			= 4
S_1'					≤ 2
S_2		1		5	≤ 6
L_1			2		≥ 0
	≥ 3	≥ 2	= 2	≥ 5	