

都市ごみステーション収集のモデル作成に関する研究

STUDY ON MODELLING PROCEDURE OF STATION-TYPE-COLLECTION
OF MUNICIPAL SOLID WASTE

松藤敏彦*・神山桂一**・田中信寿***

By Toshihiko MATSUTO, Keiichi KOYAMA and Nobutoshi TANAKA

In order to analyze and synthesize the station-type-waste-collection system, the computer model is required. In this paper, the modeling procedures are discussed. By examining the characteristics of the whole model and system parameters, especially with regard to the effect on the computational fitness of the model to the actual system, the model is simplified and revised step by step. Consequently special considerations to the non-uniformity of the traffic conditions in the collection area improve the model's fitness remarkably. In addition the algorithms which enable the model to be adjusted to the change of the system conditions are presented, so that the model can be used in various situations.

Keywords: refuse collection, simulation model, station type collection

1. はじめに

都市ごみの収集輸送は、最終処分に至る一連の処理の最初の段階であるが、全ごみ処理費中の6~7割を占めるといわれるその費用の大きさは、ごみ処理における大きな問題の1つに数えられる。通常、収集輸送作業は車両を用いて行われるが、用地確保難に伴う処理場の遠隔化、交通事情の悪化など、作業の遂行に不利な状況が、特に大都市において一般的になりつつあり、作業の効率向上による費用低減の必要性が高まっている。その解決は、一方で収集機材の改良といったハードウェア面に求められるが、作業の条件が一律でない広い地域の収集作業を多数の収集車によって行うというシステムの複雑さのために、計算機を用いたシステム工学的検討により有効な施策を見出せる可能性が大きい。

Quon¹⁾は各戸収集を対象に、各家庭のごみ容器を収集車まで運びごみを移し替えるのに必要な時間、収集車の移動速度など、収集作業のパラメーターの値または関数形を定め、さらに作業の進行を表現する判断アルゴ

リズムをプログラム化して収集車の1日の動きをシミュレートするモデルを作成した。それを用いて、収集条件を表わすパラメーターと、いくつかの収集効率の従属関係を検討している。同様のモデルによる研究に、種々の施策をコストやサービスの質(時間内に収集できるか否か)で評価したものもある^{2),3)}。ごみ収集輸送システムのシミュレーションモデルの形は、対象となる収集方式が定めればおのずと限られ、その作成方法および結果は同一の方式をとっている他システムに対しても、ある程度の一般性をもつと考えられる。また、そこでの情報は以後の研究のためにも有用なものであり、こうしたところに1)~3)の研究の意義がある。

しかし、日本の多くの都市ではステーション収集という、欧米に例の少ない収集方式をとっており、これに対するQuon¹⁾のようなアプローチはまだなされていない。よって、その検討の価値は大きい。また、現象記述モデルの性格上、その精度が結果の信頼性を左右するが、上記1)~3)の研究ではモデルが実システムをよく表わしているかどうかの確認が不十分のように思われる。モデル化の過程においては実測値に基づいて精度を検討し、それに応じてパラメーターの近似度を上げる工夫が必要であり、その一方でモデルの簡略化をはかるために不必要な複雑さを避けることも考慮すべきである。

* 正会員 工博 北海道大学助手 工学部衛生工学科
(〒060 札幌市北区北13条西8丁目)

** 正会員 工博 北海道大学教授 工学部衛生工学科(同上)

*** 正会員 工博 北海道大学助教授 工学部衛生工学科
(同上)

まると既知となるもので、 d_{hi}^i , $d_{i,r}^i$, w_{st}^i , N_{st} が含まれる、 \textcircled{c} 輸送作業の回数に関係するもので、 N_{hi} , N_{dp} が含まれる、の3者である。

当方は \textcircled{a} 以外のパラメーターは既知であるものとし、 \textcircled{a} のパラメーターの値をどう扱うかについて検討する。 \textcircled{c} の取り扱いについては、5. で議論の対象とする。

(2) モデル作成の対象地域

モデル作成の対象としたのはS市N区(人口約20万人)であり、図-2にその地理的概要を示す。N区では23台の回転板式パッカー車を用いて、週2回可燃ごみを収集している。そのため、全収集地域は月木、火金、水土収集の地域に分けられ、その中でおのおのの収集車の受け持ち区域が決まっている。この小区域のことを以下では収集ブロックとよび、図-2にはそれが示されている。ただし、作業の進行状況に応じて収集班が互いに応援し合うことがあるため、実際の収集区域と収集ブロックとは厳密には一致しない。

N区の南部は市中心部へと続いている。収集ブロックが広いところは人家がまばらであると考えてよい。収集車の公称積載量は4トンで、1台当たりのクルー編成は運転者を含めて3人である。各収集車は1日に2~3回S清掃工場へ収集ごみの搬入を行う。車庫はN清掃事務所敷地内にある。

(3) 作業パラメーター値の実測

前述の3種のパラメーターのうち、対象地域が生まれ

ば \textcircled{b} は各収集ブロックの特性を表わす量として、また \textcircled{c} は実際の収集作業実績から各収集ブロックごとに得ることができる。そこで、残る \textcircled{a} のパラメーター(作業パラメーター)値推定のため、著者らは昭和59年5月、図-2中 $\textcircled{1}$ ~ $\textcircled{4}$ で示す収集ブロックにおいて、収集車の追跡調査を行った⁴⁾。調査では、1日1台の収集車を特定し、後方から追尾して図-1に示す各单位作業時間およびステーションごみ量、輸送距離を測定した。移動時の距離は、ステーション位置を1/1500の地図に記録しておき、地図上で算出した。これを5日間(図-2 $\textcircled{1}$ では2度)行い、収集ステーション数は1日35~55、計217か所であった。なお、対象とした収集ブロックは、密集したアパート街、一戸建て住宅地、住宅が散在している地域、というようにN区内の典型的な住宅状況を反映するよう選んだ。

調査は、主に場所的なばらつきを測定を実施したわけであるが、 v_{hi} を除いて調査ブロック間で著しい違いがみられなかったため、地域によらない偶然要素としてとらえてよいと思われる。表-3は、追跡調査で得た各パラメーターの度数分布⁴⁾から決定した、分布の平均値 μ 、標準偏差 σ である。ただし、 $v_{i,r}$ は距離 $d_{i,r}$ の関数であった、図-3に示すように μ , σ を直線補間する。

3. モデル式の精度に関する検討

(1) 実測値との一致度合

モデルの精度は、作業時間の実測値とモデルによる推

表-2 モデルで使用する主な記号

- d_{hi}^i : 輸送距離
- \bar{d}_{hi}^i : 平均輸送距離
- $d_{i,r}^i$: ステーション間移動距離
- $\bar{d}_{i,r}^i$: 収集ブロック内の平均移動距離
- $D_{i,r}^i$: 収集ブロック内の合計移動距離
- N_{hi}^i : 輸送回数
- N_{st}^i : 収集ブロック内のステーション数
- $N_{i,r}^i$: 収集ブロック内の移動回数
- N_{dp}^i : 収集ごみの清掃工場への搬入回数
- t_{hi}^i : 一回の輸送時間
- t_{st}^i : 一つのステーションでの横込み時間
- $t_{i,r}^i$: 一回のステーション間移動時間
- $t_{st,r}^i$: ステーションあたりの準備時間
- t_{dp}^i : 清掃工場での一回の排出時間
- T_{dpv}^i : 収集車一台の一日の合計作業時間(計算値)
- T_{dpv}^i : 収集車一台の一日の合計作業時間(実測値)
- v_{hi}^i : 収集車の輸送速度
- $v_{i,r}^i$: 収集車の移動速度(移動距離 $d_{i,r}^i$ の関数)
- v_{max}^i : 市内制限速度
- $v_{i,r,1}^i$: 収集ブロック間の輸送速度
- w_{st}^i : ステーションごみ量
- \bar{w}_{st}^i : 収集ブロック内の平均ステーションごみ量
- w_{st}^i : 収集ブロック内の合計ごみ量
- α : 収集ブロックの輸送の遅滞程度を代表する係数
- β : 収集ブロックの移動の遅滞程度を代表する係数
- $\Delta x_{i,r,1}^i$: 収集ブロック間の輸送距離
- τ_{st}^i : 単位重量のごみを横込むのに要する時間

$$\bar{d}_{hi}^i = \frac{N_{hi}^i \sum_j d_{hi}^i}{N_{hi}^i}, \quad \bar{d}_{i,r}^i = \frac{D_{i,r}^i}{N_{i,r}^i}, \quad N_{i,r}^i = N_{st}^i - N_{dp}^i$$

$$\bar{w}_{st}^i = \frac{w_{st}^i}{N_{st}^i}, \quad w_{st}^i = \sum_j w_{st}^i$$

(備考) 添字は図1の宛名に対応する。(ただし輸送に関しては h1: 清掃事務所~収集現場、h2: 収集現場~清掃工場、h3: 清掃工場~清掃事務所) 時間 t : 一つの作業に要する時間 T : 一つの作業に要する時間の一日の合計 上付き記号 $\bar{}$ は、表3の μ に対応する。

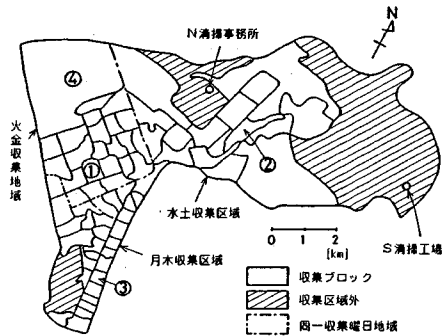


図-2 モデル対象地区概要

表-3 作業パラメーターの分布形

分布形	パラメータ	μ	σ
正規分布	v_{hi} [km/h]	35	4
	$v_{i,r}$ [km/h]	(図3参照)	
	$t_{i,r}$ [min]	0.40	0.12
	t_{st} [min]	3.3	0.5
対数正規分布	τ_{st} [min/kg]	0.0063	0.023

対数正規分布の確率密度関数

$$f(\log x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}(\log \sigma)} e^{-\frac{(\log x - \log \mu)^2}{2(\log \sigma)^2}}$$

定値との一致度合をみることで検討できる。議論を簡単にするため、表-3に示した作業パラメーターの σ をすべてゼロとし、 v_{hi} についても μ のみで代表させることにすると、モデルは表-1(II)のように簡略化できる(σ の影響については4.で検討する)。 μ に対応する値を、表-1中では上つき \wedge をつけて示した。ただし、モデル(II)は平均値で代表させるモデルであるが、互いに独立な確率変数 ϕ, ψ があつてそれぞれ任意の分布に従うとき、その積 $\phi \cdot \psi$ の期待値(算術平均)はおのおのの期待値の積であることを考えると、 τ_{pu} の代表値として対数平均を用いることは適当でない(追跡調査において、 w_{st} と τ_{pu} は独立であることが認められている⁴⁾)。このため、 $\hat{\tau}_{pu}$ は表-3の μ, σ から理論的に算出される算術平均値0.00667を用いる。また、このような処理により、距離 d_{hi}, d_{lr} を平均距離 $\bar{d}_{hi}, \bar{d}_{lr}$ (またはブロック内総移動距離 D_{lr})、ステーションごみ量 w_{st} を収集ブロック内平均ごみ量 \bar{w}_{st} (またはブロック内合計ごみ量 W_{pu})で置き換えることができる(表-1(II), 表-2中の式参照)。他のパラメーターは、追跡調査で得た値を用いる。

モデル(II)を用い、追跡調査①~④について計算した作業時間を表-4に示す。 ϵ の定義は欄外に示したが、 $\epsilon < 0$ とは、計算値よりも実際にはもっと時間がかかっていたことを表す。()および $\langle \rangle$ 内の数値については後述する。参考のため、各収集ブロックのパラメーターを最右欄に示した。なお、 $d_{his} = 9$ kmである。

作業項目別にみると、 T_{pr} 以外は相対誤差 $|\epsilon/T^*|$ が大きく、 T_{day} の $|\epsilon/T^*|$ も大きい収集ブロックがある。 T_{dp} の ϵ が負となっている(②③)のは、数台の収集車がほぼ同時に清掃工場に到着し、トラックスケールでの計量を待たなければならなかったためであるが、その絶対誤差 $|\epsilon|$ は小さく、 T_{day} に及ぼす影響は小さい。③④にみられる T_{pu} の誤差($\epsilon < 0$)は、ごみをある程度積むと収集車の押込板の回転が鈍るが、それでもなお積

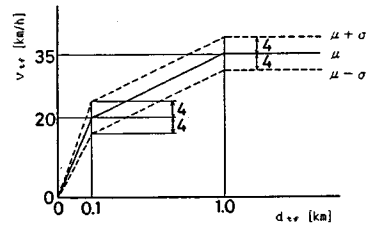


図-3 移動速度

込みを続けたために生じたものである⁴⁾。これは、作業の効率を考えるうえで重要な問題であるが、収集車の構造、ごみの大きさ・剛性により回転鈍化の開始時点が、また回転鈍化後、作業者がどこまで積込みを継続しようとするかにより時間の遅れ度合が異なるため、モデル化は今回見送った。

一方、 $T_{h11}, T_{h12}, T_{h13}$ は $|\epsilon|$ が大きく、これが T_{day} の $|\epsilon|$ を大きくする主要な原因となっている。これらを見ると、収集ブロックによって、また輸送区間によって ϵ/T^* が異なっていることがわかるが、このことは地区による交通状況の違いによって説明できる。たとえば T_{h11} をとると、③は市中心部へ向かう交通量の多い道路を通り、信号待ち等で時間がかかり($\epsilon < 0$)、④は往來の少ない道路を通るためそのような遅れは少なく、両者の ϵ/T^* はかなり異なる。清掃工場寄りの6 kmほどの道は収集区域外で信号もなく、車の流れもスムーズなため、 T_{h13} の ϵ はすべて正である。 T_{h12} は前二者の中間的な値となっている。また、 T_{lr} の ϵ は T_{hi} のそれと相関が認められる。

①~④のうち最も T_{day} の誤差が大きいのは③であり ϵ は-36.5にもなるが、そのうち2/3が輸送、移動によるものである。図-7で後述するように、月木収集地域ではこのように $|\epsilon|$ の大きい収集ブロックが多く、 T_{day} の予測精度を向上させるには、交通状況の地域差

表-4 モデルによる計算値と実測値の比較

調査収集ブロック番号と項目	輸送			積込み T_{pu}	移動 T_{lr}	準備 T_{pr}	排出 T_{dp}	一日の作業時間 T_{day}	W_{pu} N_{st}	d_{st} N_{h11}	d_{h12} N_{h12}	d_{h13} N_{h13}	d_{his} N_{his}	
	T_{h11}	T_{h12}	T_{h13}											
①	T^* [min] 25.0 T [min] 15.8 (20.0) ϵ/T^* [%] -38.8 (-19.9) σ/T^* [%] < 4.3>	94.6 88.5 (100.7) -6.4 (8.5) < 2.0>	27.7 30.9 (29.8) 11.6 (7.7) < 4.5>	47.5 46.4 -2.3 < 5.8>	14.3 13.0 (13.6) -9.4 (-4.8) < 3.7>	13.2 14.0 6.0 < 5.2>	8.4 9.9 17.8 < 9.1>	230.7 219.5 (234.3) -4.9 (1.6) < 1.6>	6960	4.4	4.9	12.9	35	2 4 2 3
②	T^* [min] 6.9 T [min] 3.6 (4.0) ϵ/T^* [%] -47.8 (-41.7) σ/T^* [%] < 7.4>	54.7 53.5 (52.8) -2.2 (-3.8) < 3.6>	29.8 30.9 (29.9) 3.7 (0.5) < 4.5>	50.3 48.1 -4.4 < 5.2>	23.4 20.3 (21.4) -13.1 (-8.7) < 2.8>	21.0 22.0 4.8 < 3.7>	12.1 9.9 -17.9 < 8.1>	198.2 188.3 (197.8) -5.0 (-5.3) < 1.9>	7210	6.6	2.1	7.8	55	1 4 2 3
③	T^* [min] 38.4 T [min] 27.1 (38.3) ϵ/T^* [%] -29.4 (2.4) σ/T^* [%] < 2.5>	113.4 104.2 (129.5) -8.1 (14.2) < 1.8>	30.4 30.9 (30.0) 1.6 (-1.4) < 4.4>	49.4 40.9 -17.2 < 6.1>	17.5 12.9 (18.1) -28.1 (3.3) < 3.8>	15.4 15.2 -1.1 < 4.8>	13.1 9.9 -24.7 < 9.8>	277.6 241.1 (284.1) -13.1 (2.4) < 1.4>	6140	3.7	7.9	15.2	38	2 4 2 3
④	T^* [min] 34.8 T [min] 28.8 (27.5) ϵ/T^* [%] -17.2 (-21.0) σ/T^* [%] < 2.8>	69.1 76.1 (82.8) 10.1 (19.9) < 2.0>	12.9 15.4 (14.9) 19.4 (15.8) < 8.1>	46.0 39.6 -14.0 < 5.0>	37.3 32.6 (32.6) -12.5 (-12.7) < 2.7>	22.8 21.6 -5.4 < 4.1>	5.9 6.6 11.9 < 10.9>	228.8 220.7 (225.6) -3.5 (-1.4) < 1.5>	5940	15.3	5.6	14.8	54	3 3 1 2

カッコなしの数値 : モデル(II)による計算値
()内の数値 : モデル(IIα)による計算値
< >内の数値 : モデル(Iα)による計算値

T^* : 実測値
 T : 計算値
 ϵ : $T - T^*$

$$\mu_{\tau} = \frac{1}{100} \sum_{i=1}^n \tau_i$$

$$\sigma_{\tau} = \sqrt{\frac{1}{100} \sum_{i=1}^n (\tau_i - \mu_{\tau})^2}$$

W_{pu} [kg]
 D_{st} [km]
 $d_{h11}, d_{h12}, d_{h13}$ [km]

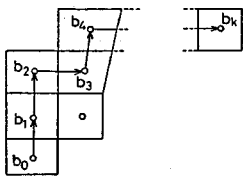


図-4 輸送の集中化

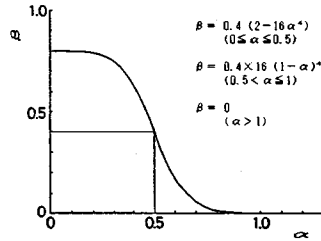


図-5 α と β の関係

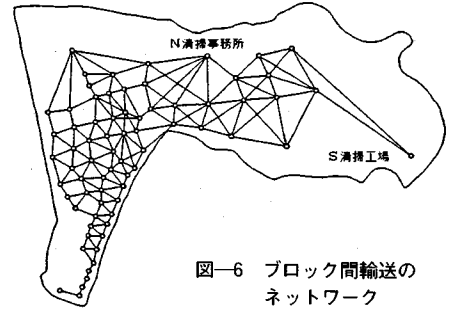


図-6 ブロック間輸送のネットワーク

を考慮することが不可欠と思われる。

(2) 輸送, 移動の遅滞係数 α, β

輸送に要する時間は、経路に沿っての距離を x , 輸送距離を X , 距離 x における速度を $v(x)$ と書くと、 $t_{hi} = \int_0^X \{v(x)\}^{-1} dx$ で表されるが、このような計算を行うのは現実的ではない。そこで、収集ブロック単位で距離と速度を平均化し、図-4のようにブロック番号 b_0 から b_k への輸送を b_1, b_2, \dots, b_{k-1} を経由して行くと考えると

$$t_{hi} = \sum_{i=1}^k \frac{\Delta x_{i-1,i}}{v_{i-1,i}} \dots \dots \dots (1)$$

のように書ける。ここで、 $\Delta x_{i-1,i}$, $v_{i-1,i}$ はそれぞれ収集ブロック b_{i-1} , b_i 間の距離および速度である。輸送に時間がかかるのは、場所により $v_{i-1,i}$ が小さくなるためであるから、収集ブロックごとに輸送の遅滞程度を表わす係数 α を考え

$$v_{i-1,i} = \frac{1}{2} (\alpha_{i-1} + \alpha_i) v_{max} \dots \dots \dots (2)$$

v_{max} : 市内制限速度

α_{i-1}, α_i : 収集ブロック b_{i-1} , b_i における α

と表わすことにする。清掃事務所、清掃工場のある地区も収集ブロックと同様に扱い、 α を与える。

一方、追跡調査での観察によれば、ステーション間の移動に時間がかかるのは、 v_{ij} がその収集ブロックにおいて全体的に低下するのではない。通常、輸送はブロック内あるいはブロックに隣接した主要道路を通り、ブロック内の移動はその一部が輸送経路と重複するにすぎない。しかし、主要道路での交通が滞っていれば、移動中の一時停止や、主要道路を避けて迂回するためのUターンの機会が増加し、その結果時間がかかる⁴⁾。そこで、一時停止、Uターンの多さの程度を表わす係数 β を用いて t_{ij} を

$$t_{ij} = \frac{\tilde{d}_{ij}}{\tilde{v}_{ij}} (1 + \beta) \dots \dots \dots (3)$$

のように表わし、十分なデータは得ていないが、常識的に α 大のとき $\beta \rightarrow 0$, α 小となると β は急激に大きくなると想像できるため、図-5のような関係を仮定する。

ただし、この関係式は他の地域に関しては異なる可能性がある。

モデル(II)中、 t_{hi} , t_{ij} を式(1)~(3)で置換し、輸送、移動の遅滞を考慮したものをモデル(II α)とよぶ。すなわち、モデル(II α)とは、モデル(II)に交通事情を表わすパラメーター α, β を加えたものである。

(3) α 推定手順, およびそれによる精度向上

モデル(II α)を最終的に収集地域全域に適用できるものとするには、図-2の全収集ブロックにおける α を推定することが必要となる。そこで2.(3)で求めた作業パラメーター以外の、計算に必要なパラメーターを以下の手順で与える。ただし、各収集車はおののに割り当てられた収集ブロックのみを収集したとの仮定をおく。

輸送経路については、まず収集ブロックに番号をつけ、隣接する収集ブロックの中心間距離(式(1)の $\Delta x_{i-1,i}$)を、道路網に沿って地図上で測定しておく。これにより図-6に示すようなネットワークが得られる。次に、各収集ブロックごとに、清掃事務所、清掃工場までの経路(経由する収集ブロックの順番)を追跡調査による著者らの経験および清掃事務所での聞き取りに基づいて与えておき、計算においてはこの経路を順次たどっていく。

N_{st} , \tilde{d}_{ij} (D_{ij}) は、清掃事務所で業務管理に用いているステーション位置、収集経路を記入した地図より求めることができる。 \tilde{w}_{st} (W_{pu}) は、昭和59年9月(S市の場合年平均に近い)の各収集車の実績値を用いた。

1日の実作業時間 T_{day}^{*} , および N_{h11} , N_{h12} , N_{h13} , N_{dp} は、同日の収集車のタコグラフ、作業記録から読み取った。ただし、各収集曜日地域において、最も清掃工場から遠いいくつかの収集ブロックの収集車は、担当分のごみ収集を午前中に終了し、午後は作業時間の公平のため他収集車の積み込み作業を手伝っており、午後の作業の輸送距離などが明確にとらえられない。そのため、これらのものについては午前の作業のみをデータとした。式(2)の v_{max} は 40 km/h とする。

以上のデータを用いて、モデル(II α)により全収集ブロックそれぞれの T_{day} を計算し、 T_{day}^{*} と比較する。

最初に α を一律に 0.875 (= 35/40) とし、輸送、移動の地域差を考慮しないときの結果を図-7(a) に示す。図のように、 ϵ は全体的に負側にかなり大きい。特に、清掃工場から遠い月木収集地域の誤差が大きいが、 α をもっと小さくしても地域間の ϵ の差は変わらず、 α を一定とはし得ないことがわかる。

さて、図-7(a) の ϵ を全収集ブロックにわたって小さくするには、収集ブロックの数だけの α を未知パラメーターとする $\sum \epsilon^2$ の最小化問題を解けばよいが、それにより現実的に満足のいく解を得ることはほとんど期待できない。そこで、隣接したブロックでは α が大きく違わないことを原則とし、各ブロックの交通状況に関する情報（特にブロック間の相対的な違いについての経験）をもとに、 α を試行錯誤的に与えた。ただし、 α は簡単のため 0.1 きざみとし、最終的に図-8 のように定めた。このときの計算結果を図-7(b) に示すが、 α を一定とした図-7(a) に比べてかなりの向上がみられる。全収集ブロックの $|\epsilon|$ の平均値は 20.1 から 10.6 に減少した。参考のため、追跡調査地区についてモデル (II α)

で計算した結果を表-4 の () 内に示す (α を変えることで差が生じるのは輸送と移動のみである)。一部で逆に誤差の大きくなったものもみられるが、全体として ϵ は改善されている。

誤差を完全には解消できない理由としては、まず積み込み、排出の遅れをモデル化していないことがある。また、輸送経路に関する著者らの仮定と実際の相違、作業班の相互応援による収集経路の変更などを正確に把握できなかったことも、誤差を大きくする原因である。特に、作業の応援は収集システムに柔軟性を与える手段として頻繁に行われており、記録のうえからその内容を知ることが難しいが、詳細なデータが得られればよりよい適合度が期待できる。なお、 T_{iv} の全体に占める割合が小さいこともあって、図-5 に示した α と β の関係式を変更することの影響はわずかであった。

また、 α を信号の数、道路幅、交通量などに関連づけるか、あるいは実際に何らかの測定を行って推定することも考えられるが、著者らが行ったように地域の交通事情に関する経験に基づいて決めるのが、最も効率のよい現実的な方法と思われる。

4. 作業パラメーターのランダムさの影響

(1) 確率分布に従う作業パラメーターの発生方法

前章では作業パラメーターのランダムさを無視して議論を進めたが、それらがどの程度作業時間に影響を及ぼすのかを検討しておく必要がある。計算機において、確率分布は乱数を用いることで再現できる。これはモンテカルロ法とよばれる手法であるが、基本となる一様乱数はいくつかの検定⁵⁾を行った結果

$$\left. \begin{aligned} u_{i+1} &= 5^{11} u_i \pmod{2^{31}} \\ \theta_{i+1} &= u_{i+1} / 2^{31} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

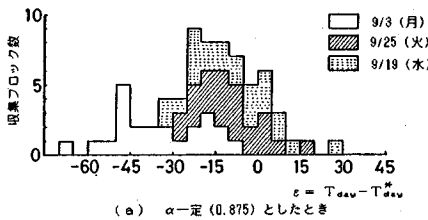
を使用することにした。ここで、 u は整数、 θ は [0, 1] の一様乱数である。中心極限定理を応用することにより正規乱数（発生頻度が正規分布に従う乱数）が得られ、表-3 の μ, σ に応じて各作業パラメーター値を算出する。収集ブロック間の輸送速度 $v_{i-1,i}$ は、表-3 で示した v_{hi} と同じ標準偏差 $\sigma=4$ をもつとした。

(2) 計算結果

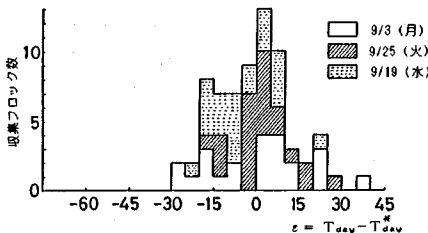
ランダムさの影響度合は、1日分の計算を多数回繰り返し、各時間の分散をみることで評価できる。モデル (I) の t_{hi} を式 (1), (2) で、 t_{iv} を

$$t_{iv} = \frac{d_{iv}^i}{v_{iv}^i} (1 + \beta) \dots\dots\dots (5)$$

で置き換え、輸送と移動の遅滞を考慮したものをモデル (I α) とよび、計算はこれによって行う (表-1 参照)。ここで、各作業パラメーターは j で示されるおのおのの作業回数 (ただし輸送については $N_{hi} \times k$ 回) だけ正



(a) α 一定 (0.875) としたとき



(b) α に地域差を与えたとき

図-7 モデルの誤差

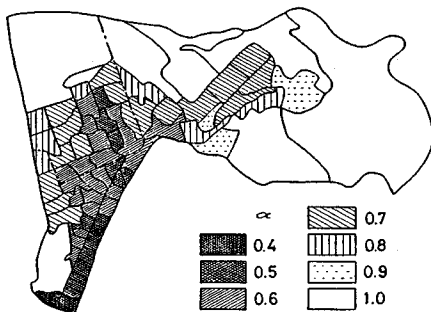


図-8 各収集ブロックの α

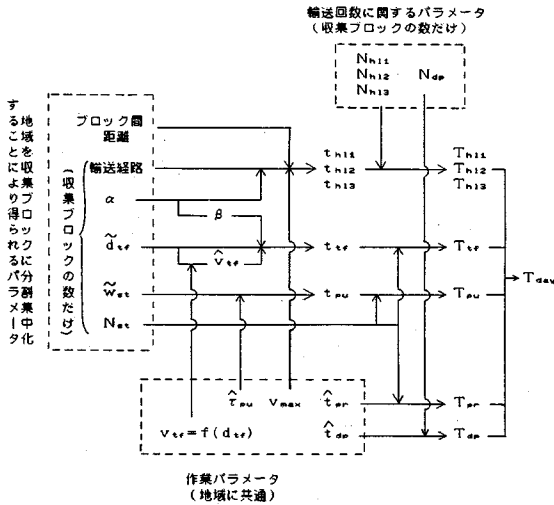


図-9 モデル (IIa) による1台の収集車の1日の作業時間の計算手順

規乱数から発生させ、 w_{st} , d'_{ij} は追跡調査の実測値をそのまま用いる。

表-4中< >内に示すのは、各調査収集ブロックに対し100日分の計算を行い、100回の時間の標準偏差 σ_T を求め、 σ_T/T^* として表わしたものである。なお当然ながら、平均値はモデル (IIa) の計算値と一致した。 ϵ/T^* と σ_T/T^* を比較して明らかのように、ランダムな要素による計算値の変動幅はそれほど大きくない。したがって、作業パラメーターは平均値を用いればよく、モデルは (IIa) で十分と思われる。

モデル (IIa) により1台の収集車の1日の作業時間 T_{day} を計算する手順を、図-9に整理する。

5. 作業手順に関する判断を含むモデルとその計算例

これまでの検討により、収集ブロックが固定され、輸送回数に関するパラメーターが与えられれば、1日の作業時間 T_{day} を推定することができる。しかし、計画段階においては対象地域の地理的条件、収集すべきごみ量の分布、交通条件のもとで、いかにして各収集車の担当区域を決定するか (収集ブロック構成) が第一の問題であり、 T_{day} はその際の重要な指標である。収集作業を進めるときには、収集車内のごみ積み込み状況、時間の経過に応じて、収集を継続するか、処理場へ輸送するか等の判断が伴う。収集ブロックが定められればその判断に従って作業が進められ、結果として輸送回数パラメーターおよび T_{day} が定まる。したがって、作業時のそうした判断をプログラム化すれば、 T_{day} のモデル式を用いて収集輸送作業をシミュレートでき、計画への応用が

可能となる。

ここでは、「試行的なブロック割当てを行って収集作業を実施し、作業者の意見をフィードバックしながら各収集車の作業時間のアンバランスを解消するよう修正していく」という現実の収集ブロック決定法を踏まえ、それを計算機で行う例を示す。このモデルは収集条件のさまざまな変化に対応できるが、計算例として、収集体制の変更の中でも、特別な施設や機材を必要とせず計画面だけの考慮で済む、という意味で比較的实施の容易な収集頻度の変更を取り上げ、検討を行う。もちろん、作業の平均化のため1台の収集車の担当区域を処理場までの距離が異なる複数区域とする、などの複雑な計画も考えられるが、その際には、判断基準を追加・修正すればよい。

(1) 収集作業における判断アルゴリズム

著者らは追跡調査での経験、清掃事務所での聞き取り、および作業記録の詳細な検討により、図-10に示す判断基準を考えた。収集作業の実施において、作業者はその経験をもとに最も効率的な方法を見出していると考えられ、図-10はその平均的な判断を表現したものである。この特徴は、午前と午後で時間に対する判断が異なることであり、要約すると次のようになる。「午前の作業は時間にそれほどとらわれず、収集車が満載となるまで収集を続けるが、午後は作業の公平感のため、終了時

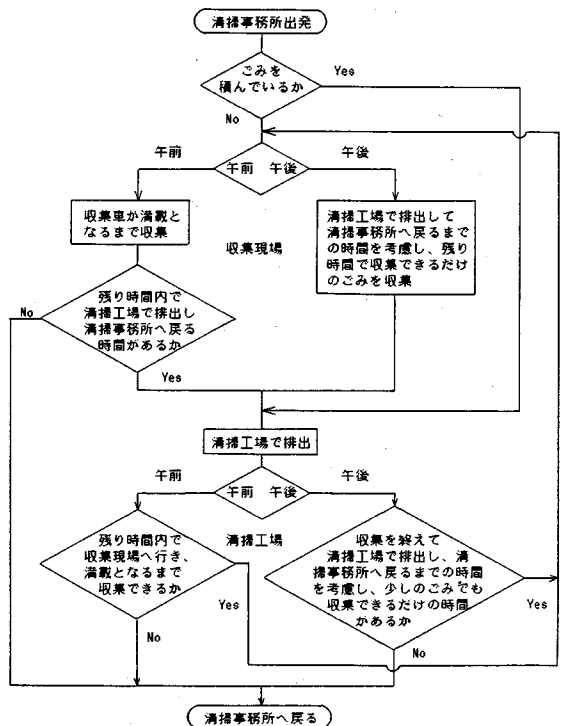


図-10 収集作業における判断アルゴリズム

刻が同じになるよう作業が行われる。また、現場での収集後、午後は必ず清掃工場へ排出するが、午前は時間がなければそのまま昼食のため清掃事務所へ戻る。

収集車が満載となったかどうかを判定する値を可能積載量とよび、 R_{pu} と書く。

(2) 収集ブロックの決定方法

定められた時間内で効率よくごみを収集するにはどのような収集ブロックを構成するのがよいかは、興味ある問題であるが、ここでは次のような計算を行う。

いま、現行の収集ブロックを図-6のように集中化し(単位作業時間 t_{hs} , t_{tr} , t_{pu} , t_{pr} (図-9) が集中心に対応して決まる), 地域の連続性を考慮して隣接するブロック順に番号をつける。そして、1台の収集車の収集が近接したステーション間で実施されるという現状のブロック分割法を踏襲し、1つのブロック内のステーションの収集が終われば次のブロック内のステーションに移ると考える(ブロック順はたとえば図-11のようであり、この条件のもとで、番号のつけ方を変更して計算を行ったが、以下の計算結果はほとんど影響を受けない)。

以上の準備を行ったのち、1台の収集車が最も若い番

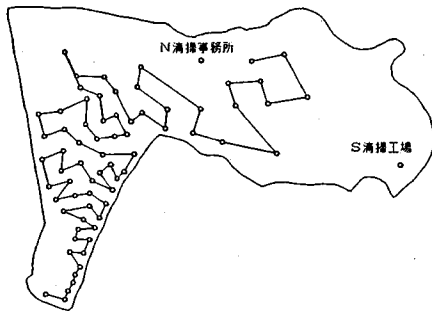


図-11 集中化ブロックの収集順

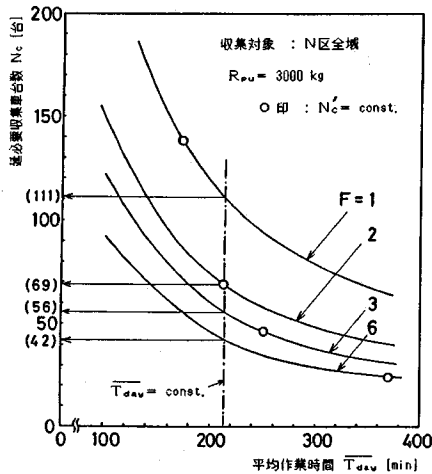


図-12 収集頻度変更時の必要収集車台数と平均作業時間

号の収集ブロック内のステーションから収集を開始し、1日の作業時間に上限を設けて図-10のアルゴリズムに従って収集を行うと、その時間内で収集できるステーション数が算出される。すなわちブロックの再構成ができ、同時にその収集車の作業時間、輸送回数が得られる。この計算を、順次収集車を更新し、対象地域のごみを収集されるまで続けると、収集車の延必要台数 N_c 、およびその平均作業時間 $\overline{T_{day}}$ が求まる。時間の制約を定めても清掃工場への搬入回数が整数値であるため、 T_{day} は1時間、あるいはそれ以上の幅をもってばらつく。そのため、作業時間は平均値で代表させる。

(3) 収集頻度変更に関する検討

収集頻度を変更すると、収集日に収集すべきごみ量も変化する。収集頻度が増すとごみの絶対量も増える⁶⁾、ごみの発生量が曜日によって異なる⁷⁾などの知見もあるが、ここでは簡単のため、頻度を変えてもごみの総量は同じで、毎日均等に発生し、各収集日には前収集日からの日数分だけが排出される、と仮定する。すると、収集頻度が F 回/週 ($F=1, 2, 3, 6$) のときの1週間における最大収集量は $(1+6/F)$ 日分のごみ量となる。3.(3) で用いた昭和59年9月の各収集ブロックのごみ量を、この比に応じて変えて計算を行ったところ、図-12に示す結果を得た。ただし、頻度変更には収集曜日による地域割りの変更も伴うため、N区全域を収集するとして計算しており、追跡調査において収集車が3000kgを超えるあたりから、押込板の回転鈍化が認められたため⁸⁾、 $R_{pu}=3000\text{ kg}$ とした。図の曲線は、1日1台当たりの作業時間を長くするよう計画すれば、所要台数が少なくなることを示している。

収集頻度 F の場合、全地域を $6/F$ 日間で収集することになるので、実際に必要となる収集車は $N'_c = N_c / (6/F)$ 台である。図-12において、現状の $F=2$ で $N'_c=23$ にあたる $\overline{T_{day}}$ をとって比較すると、必要な台数 N'_c は19 ($F=1$), 28 ($F=3$), 42 ($F=6$) となる。また、見方を変えて収集車台数を $N'_c=23$ に固定すると、作業時間は図-12中○印で示された点となる。なお、与えたごみ量に対し図-12で得られた $\overline{T_{day}}$ は、タコグラフから読み取った T_{day}^* とよく一致しており、本計算は妥当であったと思われる。

この例では、1回に収集するごみ量の変化という収集頻度変更の一面のみを取り上げたにすぎないが、頻度を増すにつれて収集ごみの面積密度が低下し、それによる収集効率の低下が収集車台数の増大として示された。

ここに示した応用のほかに、このモデルは渋滞を避けるための収集時間帯の変更や、清掃工場位置の変更、中継基地を設けて輸送時間の短縮をはかる中継輸送の導入、などの問題の検討に用いることができる。

6. ま と め

本論文の主要な結論を、以下にまとめる。

a) 1台の収集車の1日の作業時間を推定するモデル式の精度を主として左右するのは、輸送および移動時間の誤差である。

b) 輸送、移動の遅滞の度合を表わす係数 α 、 β を考慮に入れることで、モデル式の精度は向上した。

c) 作業パラメーターのもつランダムさの影響は小さく、平均値を用いても構わない。最終的に得られたモデル式は、パラメーターを集中化あるいは平均値で代表させたモデル(II α)である。

こうして、モデル式を作成するうえで考慮すべき主要な点を指摘し、その作成手順を示した。さらに

d) 収集作業遂行時に時間、収集車の積載量に関して下される判断をプログラム化し、作業の進行をシミュレートして収集ブロックを自動的に再構成するモデルを作った。また、その計算例を示した。

今回得られたモデルをもとに、さらに検討を進めてシステムの構造を解明し、より簡便なモデルを作成して、かつ応用の可能性を広げることが著者らの次の目標である。

最後に、当講座技官の松尾孝之氏、当時大学院学生であった茂泉博史氏のご協力に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) Quon, J. E. et al. : Simulation and analyses of a refuse collection system, Proc. of ASCE, Vol. 91, No. SA5, pp. 17~36, Oct., 1965.
- 2) Truitt, M. M. et al. : Simulation model of urban refuse collection, Proc. of ASCE, Vol. 95, No. SA2, pp. 289~298, Apr., 1969.
- 3) Quon, J. E. et al. : Simulation model of refuse collection policies, Proc. of ASCE, Vol. 95, No. SA3, pp. 575~592, Jun., 1969.
- 4) 松藤敏彦ほか：都市ごみステーション収集の追跡調査について、都市清掃, Vol. 38, No. 147, pp. 38~46, 1985.
- 5) 宮武 修・脇本和昌：乱数とモンテカルロ法, 森北出版, pp. 12~13, 36~39, 1979.
- 6) 中杉修身ほか：一般廃棄物原単位の推定方法について、第5回全国都市清掃研究発表会講演論文集, pp. 63~66, 1984.
- 7) 松藤敏彦ほか：都市ごみ収集量の変動に関する研究、第40回土木学会年次学術講演会概要集(II), pp. 663~664, 1985.

(1985. 12. 20・受付)