

京都大学工学部 正会員 島 昭治郎  
○ 福井大学工学部 〃 荒井 克彦

1. まえにまゝ掘削機と運搬機のような組み合わせ機械の作業能力推定、および組み合わせ台数の決定においては、機械の待ち時間の推定が大変な問題となる。従来、いくつかの待ち時間推定法が提案されてきたが、実際の施工計画業務において待ち時間の推定が正当に行なわれている場合は少ないようである。その理由の1つとして次のことが挙げられる。組み合わせ機械における待ち合わせ問題は、積込時間や到着時間間隔の分布が待ち行列理論で解析解が与えられているようなものではない。これらの時間分布は待ち時間の推定に大きな影響を与えるため、異なる時間分布にフックの解析解を適用することには疑問が残る。一方、電子計算機によるシミュレーションを行なえば、実際に近い待ち時間推定が可能であるが、現実の業務上の時間的制約や手輕さの問題から採用しにくいという難点がある。したがって、現時点で待ち時間の推定を実際の業務にとり入れるには、実際に近い作業時間分布を扱うことができ、しかも計算で簡単に行なえる方法である必要がある。ここでは、このような1つの試みを報告する。

2. 待ち時間推定の簡便法：著者は、統計的非線形制約理論に基づく待ち合わせ問題の近似解法を提案した<sup>1)</sup>。その概論のみを述べると、到着時間間隔、サービス時間（たとえば積込時間）の分布が与えらるものであろうと、それぞれの平均値と分散が与えられる、待ち時間、出発時間間隔の平均値・分散が図1で近似的に与えられるとするものである。到着時間間隔・サービス時間の平均値・分散をそれぞれ  $m_a, \sigma_a^2, m_s, \sigma_s^2$  とし、 $m_w = m_s - m_a$ ,  $\sigma_w^2 = \sigma_a^2 + \sigma_s^2$  とすると、たとえば待ち時間の平均値  $W_d$  が図1で与えられる。到着時間間隔、サービス時間がアーラン分布に従うとした場合、位相3〜30の範囲で、この方法により妥当な近似解が得られることが確かめられている<sup>1)</sup>。

3. 組み合わせ機械における待ち時間の推定：組み合わせ機械の待ち合わせにおいては、積込みを受ける運搬機と掘削機の数が決まっているから、サービスを受ける客が無制限の場合と異なり、特殊な問題が生じる。以下では、ショベルとダンプトラックの組み合わせを例にとり、待ち時間の推定方法を述べる。1) 記号の定義： $C_d$ ：積込時間や待ち時間を含めた、ダンプのサイクルタイム、 $N_d$ ：ダンプ台数、 $C_s$ ：ショベルの1回の積込時間（1すくい時間）、 $N_s$ ：1台のダンプに対するショベルの積込回数、 $W_d$ ：ダンプ待ち時間の平均値。2) 準備： $C_d, N_d, C_s, N_s$  はデータとして与えられるとする。1台のダンプに対する積込時間： $m_s$ 、ダンプの到着時間間隔： $m_a$  は次式で与えられる。

$$m_s = C_s \times N_s \quad \cdots (1)$$

$$m_a = (C_d + m_s + W_d) / N_d \quad \cdots (2)$$

式(2)にダンプの平均待ち時間  $W_d$  が含まれるから、 $m_a$  を直接求めることができない。後述するように何回かの試算が必要である。2.7) 述べた到着時間間隔、積込時間の分散  $\sigma_a^2, \sigma_s^2$  は厳密には実際に近いと与える必要があるが、施工計画作成時点では実際に得られることから、近似的に次のように  $\sigma_a^2, \sigma_s^2$  を求める。著者の実験では、到着時間間隔、積込時間ともほぼアーラン分布に従うことがわかっており、各時間分布のアーラン分布位相  $k_a, k_s$  は次のような数値をとる。

$$k_a = m_a^2 / \sigma_a^2 \approx 8 \sim 20 \quad \cdots (3)$$

$$k_s = m_s^2 / \sigma_s^2 \approx 12 \quad \cdots (4)$$

そこで、次式で  $\sigma_a^2, \sigma_s^2$  を求めればよい。

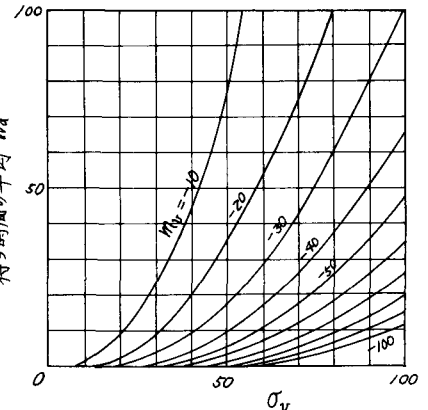


図 1

$$\sigma_a^2 = m_a^2 / l \quad \dots (5) \quad \sigma_s^2 = m_s^2 / 12 \quad \dots (6)$$

式(5)における $l$ の値は次のよう $\times$ 与える。a)ダンプの到着が $\chi^2$ 分布に不規則な場合： $l=2\sim3$ 、b)やや不規則な場合： $l=3\sim5$ 、c)かなり規則的な場合： $l=6\sim8$ 。以上のようにして求めた $m_a$ 、 $m_s$ 、 $\sigma_a^2$ 、 $\sigma_s^2$ を用いて、図-1のダンプの平均待ち時間 $W_d$ が求まる。

3) ダンプ待ち時間 $W_d$ 決定のトライアル計算：

i) 式(1)より $m_s$ を、式(6)より $\sigma_s^2$ を求める。ii)  $W_d$ の値を適当に仮定する(ex.  $W_d=0$ )。iii) 式(2)より $m_a$ を、式(5)より $\sigma_a^2$ を求める。iv)  $m_v = m_s - m_a$ 、 $\sigma_v^2 = \sigma_a^2 + \sigma_s^2$ を計算する。v)  $m_v$ 、 $\sigma_v^2$ から図-1を用いて $W_d$ を求める。vi) v)で求めた $W_d$ とii)で仮定した $W_d$ が一致するまでii)~v)を繰り返す。

4. 組み合わせ機械の時間当り作業能力の推定：待ち $t_s$ によるショベルの遊休率 $P_0$ は次式で与えられる。

$$P_0 = 1 - m_s / m_a \quad \dots (7)$$

$P_0$ を用いて、組み合わせ機械としての時間当り作業能力 $<Q>$ が次式で与えられる。

$$<Q> = (1 - P_0) \cdot t_s \cdot \theta / m_s \quad \dots (8)$$

ここで、 $t_s$ ：小移動などを除いたショベルの稼働時間率、 $\theta$ ：ダンプ1台の積載容量とする。

5. 数値計算例：1.5 $m^3$ パワーショベルと18Tダンプの組み合わせを例とする。

1) 基本データ：積込時間+待ち時間を含まないダンプのサイクルタイム $C_d = 300$ 秒、ダンプ台数 $N_d = 3$ 台、1台のダンプ積載量 $\theta = 9m^3$ (地山量)、ショベルの1すくい時間 $C_s = 20$ 秒、1台のダンプに対するショベルの積込回数 $N_s = 9m^3 / 1.5m^3 = 6$ 回。2) 計算手順：3.3)の手順i)~v)に従う。i)  $m_s = 20$ 秒/回 $\times 6$ 回

$= 120$ 秒、 $\sigma_s^2 = 120^2 / 12 = 1,200$ 。ii)  $W_d = 100$ 秒と仮定。iii)  $m_a = (300 + 120 + 100) / 3 = 173$ 秒、 $l = 5$ とて $\sigma_a^2 = 173^2 / 5 = 5,981$

iv)  $m_v = 120 - 173 = -53$ 、 $\sigma_v^2 = 1,200 + 5,981 = 7,181$ 、 $\sigma_v = 85$ 。v) 図-1より $W_d = 40$ 秒。vi)  $W_d = 40$ とてii)~v)を繰り返すと

$W_d = 50$ 、 $W_d = 50$ として繰り返すと $W_d = 43$ 、 $W_d = 43$ として繰り返すと $W_d = 44$ 、よってダンプの平均待ち時間 $W_d$ の値を44秒とする。3) 時間当り作業能力：式(2)より $m_a = (300 + 120 + 44) / 3$ 台 $= 154$ 秒、式(7)より待ち $t_s$ によるショベルの遊休率 $P_0 = 1 - 120 / 154 = 0.22$ 、ショベル稼働時間率 $t_s = 0.9$ とすると式(8)より、ショベル・ダンプの時間当り掘削運搬能力 $<Q> = (1 - 0.22) \cdot 0.9 \cdot 9m^3 / \frac{120}{60 \times 60} = 190m^3/hr$ となる。

4) 組み合わせ台数の検討：ダンプ台数を変えて同様の計算を行なった結果を図-2に示す。また、ショベル、ダンプの時間当り単価をそれぞれ

7,000円/hr・台、5,000円/hr・台として作業数量当り単価を計算した結果を図-3に示す。図-2、3中 $K$ は、到着時間間隔、積込時間の分布が $\chi^2$ 分布に指数分布に近づいたGriffisの方法<sup>2)</sup>による結果を示した。ダンプ台数が少ないうちは待ち時間が小エロサ、2つの方法に大きな差はなかつた、ダンプ台数が増えるにつれてある程度の差が出てくる。Griffisの方法は待ち時間をやや過大に推定することになるため、時間当り作業能力を過小に推定する結果をもたらす。なお、図-2、3中 $K$ は、待ち時間をまったく考慮せず、作業能力のバランスのみを求めた結果も示すが、待ち時間を考慮する場合と比べてかなりの差が出るこがわかる。

6. おとがまし：ここで述べた方法により、せめて簡単に実際に近い待ち時間を考慮した作業能力を推定することができる。待ち時間を考慮しない場合と比べてかなりの差がでることから、今後、施工計画作成において参考にする必要があらと考えられる。なお、この方法のダンプがショベルごと $\chi^2$ 待ち行列をつくる場合(実際の作業ではほとんどこの場合がある)を対象としている。図-1などの計算図表の作成は京都大学・名古屋大学大型計算センターを利用した。

参考文献：1) 畠・荒井：土木機械の適合性に関する基礎的考察，土木学会論文報告集，No. 194，pp. 127~140 (1971)

2) F. H. Griffis：Optimizing Haul Fleet Size Using Queueing Theory，J. Const. Div. Proc. of ASCE，Vol. 94，pp. 75~88 (1968)

