

# 製鉄所における炉前施設の規模決定に関する研究

## A STUDY ON THE DETERMINATION OF THE PLAN OF PORT FACILITIES IN THE IRON AND STEEL INDUSTRY

長尾 義三\*・柏村 正樹\*\*

By Yoshimi Nagao and Masaki Kashimura

### 1. 緒 言

土木施設計画の問題をとりあつかう場合に、種々の施設を一つの場所に建設し、全体として一つの有機的な機能をもったシステムとして活動するように、各施設の規模と配置を決定しなければならないという問題にぶつかることが多い。銑鋼一貫工場の炉前施設計画もその一つである。銑鋼一貫工場の炉前施設とは鉄鋼生産に必要な原料が工場内に搬入され、高炉における製銑に供されるまでに通過する諸施設の総称であり、岸壁・荷役機械・原料ヤード（原料ヤード内にはベルトコンベヤー・ジブローダー・スタッカー等の諸施設がある）などを含んでいる。それらの諸施設は相互に無関係ではなく、各施設の規模決定あるいは配置決定にあたっては、各施設相互の関係を解析することが必要である。企業としての製鉄所の炉前施設計画を考えると、その目的とするところは利潤を最大にするような施設の規模・配置を決定することにあるが、そのためにも原材料が移動するときの現象を解析することが必要である。このような点を考慮して、この研究では炉前施設を原材料が通過していくときの現象を解析して、それによって各施設の規模の決定法はいかにあるべきかについて考える<sup>1)</sup>。そして最後に炉前施設を全体として考察して、企業として経費最小にするような施設計画の策定についての1試案をだす。ここに述べる方法は基本的には、他業種の生産工場の施設計画にも適用できるであろう。また工場ばかりでなく一つの場所に数多くの施設を建設しなければならないような一般の土木施設の計画にも参考になる点があると思う。

### 2. 確率統計的方法による貯銑場の規模決定法

製鉄所の原料ヤードは港の専用岸壁に到着した原料がつぎの工程に移動する前に、一時的に貯蔵される場所である。ヤード規模決定にあたり考慮しなければならない点を列挙するとつぎのとおりである<sup>2),3)</sup>。

(1) 原材料供給地を海外に依存していることその他

の理由により、製鉄所への原料の到着はほとんど船舶によるが、原料輸送船の船型・到着分布などがヤード規模にいかにか影響するか。

(2) ヤードに一時的に貯蔵された原料は高炉に出ていくが、その Output についての解析もまた必要である。

(3) 岸壁に到着した原料がヤード内に運びこまれるに要する時間は、岸壁に設置される荷役能力が大であるほど短く、集中的である。したがって、荷役機械とヤードの相互関係を調べなければならない。

(4) またヤードのうち貯銑場について考察するにあたっては、鉄銑石の銘柄・品質についても考慮することが望ましい<sup>4)</sup>。

ここではヤードの一つとして貯銑場をとりあげ、その規模決定について考察するが、ここで述べる規模決定法は貯炭場等他のヤードにも適用できるであろう。

貯銑場はヤードの主要なものであり、製鉄所の炉前部において占める面積はきわめて大きい。また鉄銑石輸送船の配船計画、銑鉄生産計画とも関連しており、貯銑場規模決定は製鉄工場の経営の面からも重要な意味をもつ。貯銑場は、鉄銑石が荷役機械により陸揚げされる岸壁と製銑工程を行なう高炉の中間に位置する<sup>5)</sup>。この位置の関係から貯銑場はつぎのような2つの機能を有する。

(1) 鉄銑石輸送船によって運ばれてきた鉄銑石を高炉における製銑に供するまで、一時的に貯蔵しておく。

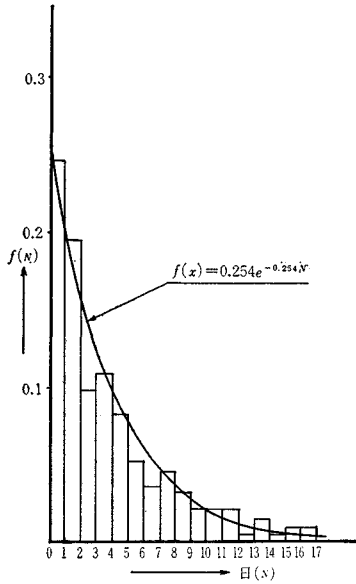
(2) 高炉における製銑に必要な鉄銑石を常に確保しておく。

したがってこの2つの機能を満たすに必要なして十分なだけの規模をもてばよいことになる。輸送船の到着については、鉄銑石需要に応じて定期的あるいは希望日時に船が到着するように、製鉄所で努力がはらわれている。しかし現状では鉄銑石輸送船の製鉄所への到着はポアソン分布にしたがうとみてさしつかえない。単位時間あたりの輸送船の到着隻数は製鉄所の生産規模・平均積載量などによって異なるが、いま単位期間あたりの平均到着隻数を  $m$  とすれば、単位期間あたりの鉄銑石輸送船の到着隻数  $x$  の確率密度分布は次式にしたがう。

\* 正会員 工博 京都大学教授 工学部交通土木工学教室

\*\* 正会員 工修 運輸省航空局

図-2.1 鉄鉱石輸送船の到着時間間隔頻度分布



$$P(x) = \frac{m^x e^{-m}}{x!} \dots\dots\dots(2.1)$$

(1)の機能を満たすためには、ランダムに近い状態で到着する鉄鉱石を収容するに足るだけの規模を必要とする。それに対して(2)の機能は銑鉄生産計画に支障をきたさないだけの鉄鉱石量を常に確保しておくという意味から、常時保有量に対する規模として必要最小規模の意味をもつ。一定期間における高炉の鉄鉱石使用量は、高炉の生産能力がきまっているとき、平均値を中心としたばらつきを有する正規分布をなすと考えてよい<sup>8)</sup>。したがって一定期間の平均使用鉄鉱石を  $n$  とすれば一定期間の使用鉄鉱石量  $y$  の確率密度関数はつぎのようになる。

$$P(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(y-m)^2}{2\sigma^2}} \dots\dots\dots(2.2)$$

貯鉱場の規模決定にあたっては、企業的立場からみれば鉄鉱石の不足損失も含めて貯鉱に関するすべての費用の和が最小になるような規模が最適規模であるといえることができる。この場合に一定期間における鉄鉱石の到着量、高炉での使用鉄鉱石量あるいは一定の公称能力をもつ荷役機械の時間あたりの荷役量などは不確定要素を含んだ確率量としてとらえることができる。したがって貯鉱に関する費用の和は期待値として表現するのが適当である。いまある一定期間をとり、その期間はじめの初期貯鉱量を  $k$ 、その期間内の到着鉄鉱石量を  $x$ 、高炉での使用鉄鉱石量を  $y$  とすれば、その期間の期末貯鉱量  $z$  は、

$$z = k + x - y \dots\dots\dots(2.3)$$

であらわされる。また  $z$ 、 $x$  および  $y$  の確率密度関数をそれぞれ  $f(z)$ 、 $f(x)$  および  $f(y)$  とする。そこで貯鉱に関する総費用の期待値を  $E(c)$  とすれば、 $E(c)$  はつぎのような2種の期待値の和と考えることができる。

$$E(c) = \int_{-\infty}^0 R_1 f(z) dz + \int_0^{\infty} R_2 z f(z) dz \dots\dots(2.4)$$

ここに、

$R_1$  : 貯鉄鉱石量が不足して、そのため通常の鉄鉱石購入経路とは異なった経路から鉄鉱石を求めなければならないために生ずる損失費用

$R_2$  : その期間中単位鉄鉱石量を貯鉄しておくに要する維持管理費用

貯鉱場の規模決定は基本的には式(2.4)の  $E(c)$  が最小となるような初期貯鉄量  $k$  の値をきめることによつてなされる。しかしそのためには、係数  $R_1$  および  $R_2$  の正確な値を求めることが必要であるが、実際に  $R_1$ 、 $R_2$  の値を知ることはきわめて困難なことであるといわねばならない。そこで以下に述べるような確率統計的方法による規模決定法を提案する<sup>7),8)</sup>。

一般の製鉄所においては、高炉における銑鉄生産が簡単に操業を中止することができない性質のものであるという理由から鉄鉱石の不足確率を少なくとも1%以下におさえるのが望ましいであろう。そこで不足確率を1%以下におさえるためにはいかなる量の鉄鉱石を常時保有していなければならないかを求めることにする。

ある一定期間における使用鉄鉱石量と到着鉄鉱石量との相関関係の有無を、期間として月を単位にとり調べてみると、両者の間にはほとんど相関関係がない。そこで、両者の間の相関関係がゼロであると仮定するとつぎのようなことがいえる。 $x$ がある値以上すなわち、 $k+x$ が  $k+m$ 以上である確率は  $\int_m^{\infty} f(x) dx$ 、 $y$ がある値  $n$ 以下である確率は  $\int_0^n f(y) dy$  であるから、 $z$ が  $k+m-n$ 以上になる確率は両者の同時確率として、ある決まった  $m, n$  に対して

$$\int_{k+m-n}^{\infty} f(z) dz = \int_m^{\infty} f(x) dx \int_0^n f(y) dy \dots\dots(2.5)$$

同様に、 $z$ が  $k+m-n$ 以下になる確率は、

$$\int_{-\infty}^{k+m-n} f(z) dz = \int_0^m f(x) dx \int_n^{\infty} f(y) dy \dots\dots(2.6)$$

とあらわされる。この関係式を利用することによつて、 $z = k + x - y$  の値が負すなわち、鉄鉱石が不足する確率を  $k$  の値の変化に対応して求めることができる。すでに述べたようには  $f(x)$  はポアソン分布に従う船の到着によるその期間の到着鉄鉱石量であり、 $f(y)$  は正規分布と考えてよい。計算例として、公称能力1000トン/日の高炉1基に対して、上式を利用することにより、初期貯鉄量  $k$  の値をいかにとればよいかについて求めると表-2.1のようになる。

この表において、 $k=0, 4$ 万t,  $8$ 万t,  $12$ 万tに対する不足確率は点線の左側の確率を合計することにより、おのおの58.8%, 27.3%, 0.99%, 0.00%となる。したがってこの場合、不足確率を1%以下にするために

表-2.1 初期貯鉱量  $k$  の値に対する不足確率の算定表

$x$ (万 t)		0~2	2~4	4~6	6~8	8~10	10~12	12~14	14~16	16~18	18~20	20~22	22~24	24~26
$k+x$	$k=0$	0~2	2~4	4~6	6~8	8~10	10~12	12~14	14~16	16~18	18~20	20~22	22~24	24~26
	$k=4$ 万 t	4~6	6~8	8~10	10~12	12~14	14~16	16~18	18~20	20~22	22~24	24~26	26~28	28~30
	$k=8$ 万 t	8~10	10~12	12~14	14~16	16~18	18~20	20~22	22~24	24~26	26~28	28~30	30~32	32~34
	$k=12$ 万 t	12~14	14~16	16~18	18~20	20~22	22~24	24~26	26~28	28~30	30~32	32~34	34~36	36~38
$y$ (万 t)	$\int f(y)dy$	$\int f(x)dx$	778	1 778	1 444	1 889	1 722	1 000	778	444	111	56	3	—
0~5	2	—	—	—	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—
5~6.7	111	9	20	16	21	19	11	9	5	1	1	—	—	—
6.7~7.1	1 158	90	206	167	219	199	116	90	51	13	6	—	—	—
7.1~7.5	3 729	290	663	538	704	642	373	290	166	41	21	1	—	—
7.5~7.9	3 729	290	663	538	704	642	373	290	166	41	21	1	—	—
7.9~8.3	1 158	90	206	167	219	199	116	90	51	13	6	—	—	—
8.3~10.0	111	9	20	16	21	19	11	9	5	1	1	—	—	—
10.0~12.0	2	—	—	—	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—

(注) 表中の  $x, y$  および  $k$  の単位は万 t であり,  $\int f(x)dx, \int f(y)dy$  およびその積としての  $\int f(x)dx \int f(y)dy$  は表中の数値を  $10^{-4}$  倍した確率である。

は初期貯鉱量を 8 万 t 以上とればよいことになる。高炉の基数が 2 基以上になり、銑鉄生産量が増加して、使用鉄鉱石量がさらに多くなった場合にもこの方法によって最小限必要貯鉱量を求めることができる<sup>9)</sup>。

### 3. 荷役機械能力のヤード規模におよぼす影響について

— シミュレーションの手法による —

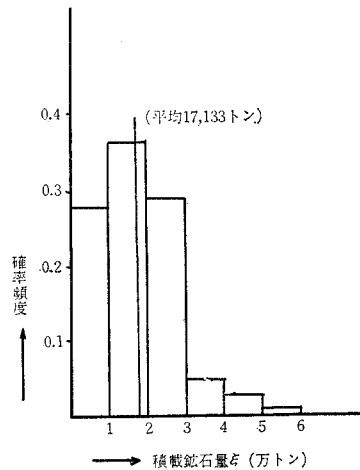
すでに述べたように、岸壁に設置される荷役機械の能力の大小はヤードの規模に影響をおよぼすと考えられる。すなわち、荷役機械の能力が大であるほど、1 船単位で運ばれてくる原料は短時間にヤード内に運びこまれる。ヤードへの原料の搬入が集中的になれば、それだけヤードの規模は大きくしなければならないから、ヤードの規模決定にあたっては荷役機械能力の影響を無視することはできない。前節では確率統計的方法による規模決定法を提案したがその目的は原料の不足確率を所定の値以下におさえるための常時保有量を求めることにあった。そこで本節では、

(1) 岸壁上の荷役機械の能力の大小がヤードの規模にいかにか影響するか。

(2) 船舶のランダムに近い到着によって運びこまれる原料を収容するためには、ヤード規模はどれだけであればよいか。

の 2 点を知るために、原料が到着し、荷役機械によって陸揚げされたヤードに貯蔵され、高炉にでていくまでの状態のシミュレーションを行なう。そこで前節と同様に貯鉱場を例にとれば、鉄鉱石輸送船の単位時間あたりの到着隻数分布はポアソン分布にしたがう。換言すれば鉄鉱石の到着時間間隔の頻度分布は指数分布にしたがう。また一定期間の高炉における使用鉄鉱石量の分布は正規分布であるとみてよい。いまある製鉄所の K 工場に到着した鉄鉱石輸送船の到着時間間隔の頻度分布は 図-3.1 のようである。また鉄鉱石輸送船の積載量は数千 t

図-3.1 1 船あたり平均積載鉄石量分布

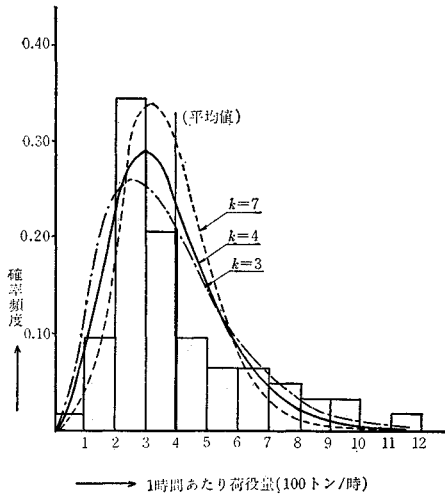


から 6 万 t まで広く分布しており非対称分布となる<sup>10)</sup>。また普通、荷役機械の能力は公称能力 t/hr であらわされるが、実際の荷役作業においては気象条件のちがひ、船型が多様であることなどの理由により、公称能力どおりの荷役がなされることは皆無であるといつてよい。荷役途中において機械が故障することや、荷役機械操作員の途中の休息、交替などの理由により、荷役作業が断絶することもある。したがって荷役機械の能力をみるためにはその公称能力によらずに、実際の荷役量で判断しなければならない。

K 工場の到着した鉄鉱石輸送船の荷役作業における時間あたり荷役トン数の分布を、使用した荷役機械台数が公称能力 300 t/hr の荷役機械 3 台の場合について調べてみると 図-3.2 のようになる。

この場合の荷役トン数は荷役途中における荷役機械の休止時間を含めた、1 船の荷役開始から終了までの時間をもとにして算定した、各到着船の 1 時間あたり荷役トン数である。この場合荷役は公称能力 300 t/hr の機械 3 台、すなわち 900 t/hr の公称能力の荷役機械を使用

図-3.2 1時間あたり荷役量分布に対する  
アーラン分布相  $k$  の推定  
(公称能力 300 t/hr 3基の場合)



したものであるが、その平均は約 400 t/hr である。このことは実際の荷役作業においては、公称能力の 4/9 程度の荷役しかなされていないことを意味する。いまこの分布形を検討してみると正規分母でも指数分布でもない。このような形の分布は指数分布と単位分布の中間的性質をもつアーラン分布に最も近い。アーラン分布は一般につきのよう式なであらわされる。

$$g(x) = \frac{(k\mu)^k x^{k-1}}{(k-1)!} e^{-k\mu x} \dots\dots\dots(3.1)$$

ここで  $k$  はアーラン分布の相 (phase) であり、 $1/\mu$  はこの分布の平均値である。

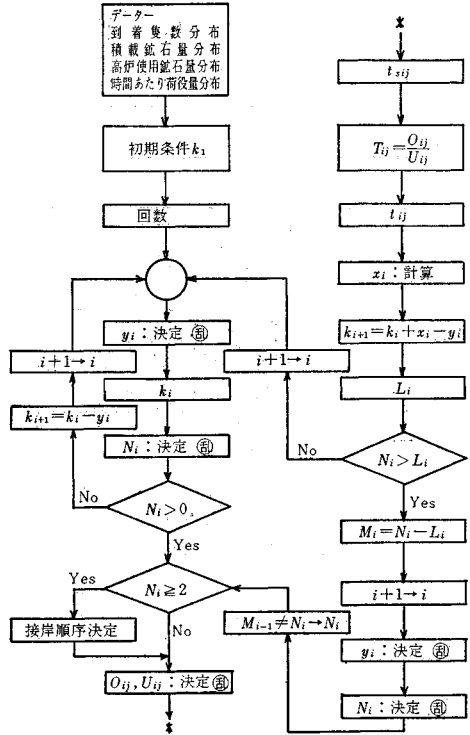
そこで、以上述べたような原料輸送船の到着状態、荷役機械の単位時間あたりの荷役量の分布、高炉における使用原料の量の分布が調べられたわけであるから、これを用いて図-3.3 に示すようなシミュレーションを行なう。

前節の式 (2.3) に示すように期末貯鉱量  $z$  は  $x$  および  $y$  の関数として表わされたが、式 (2.3) は 1つの期間において成立する式であった。そこで多数期間が連続する場合を考え、期間番号を  $i$  とすれば式 (2.3) はつぎのように変形される。

$$k_{i+1} \equiv z_i = k_i + x_i - y_i \dots\dots\dots(3.2)$$

これは第  $i$  期間の期末貯鉱量は第  $i+1$  期間の初期貯鉱量に等しいことを意味している。図-3.3 のシミュレーションは到着隻数分布、積載鉱

図-3.3 シミュレーションのダイアグラム



ダイアグラムの記号をつぎのように定める。

- 乱: 乱数発生
- $i$ : 日数
- $k_i$ : 第  $i$  日の初期貯鉱量
- $y_i$ : 第  $i$  日の高炉使用鉱石量
- $N_i$ : 第  $i$  日の到着隻数
- $j$ : 第  $i$  日の到着船番号
- $S_{ij}$ : 第  $i$  日の  $j$  番目の到着船
- $O_{ij}$ :  $S_{ij}$  の積載鉱石量
- $U_{ij}$ :  $S_{ij}$  に対する単位時間あたり荷役量
- $t_{sij}$ :  $S_{ij}$  の荷役開始時刻
- $T_{ij}$ :  $S_{ij}$  の所要荷役時間
- $t_{eij}$ :  $S_{ij}$  の荷役終了時刻
- $x_i$ : 第  $i$  日の陸揚鉱石量
- $L_i$ : 第  $i$  日中に荷役を終了する隻数
- $M_i$ : 第  $i$  日のおわりにまだ荷役が完了せず港内にいる隻数

図-3.4 シミュレーションによる  $x_i - y_i$  の年間推移

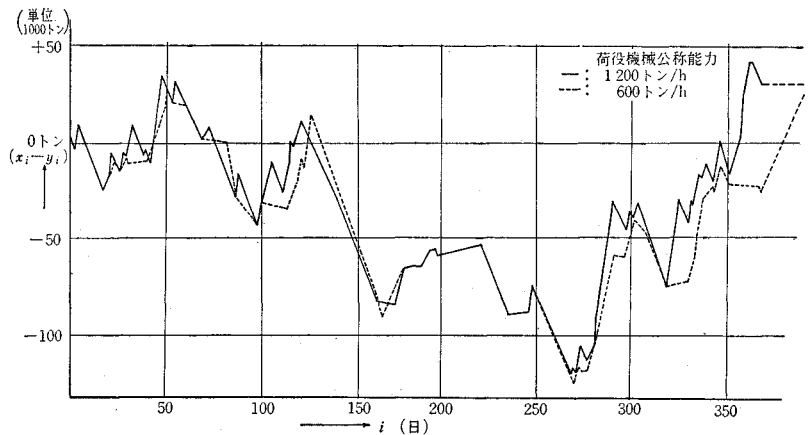
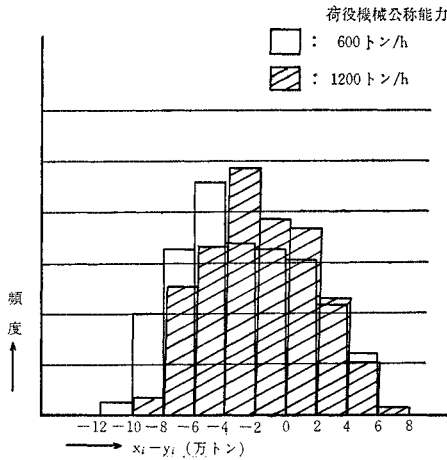


図-3.5  $x_i - y_i$  の頻度分布



石量分布, 高炉使用鉄石量分布および時間あたり荷役量分布をデータとして与え, 乱数を発生させることによって, 式(3.2)を用い, 連続する各期間(ここでは期間として日を単位にとる)の  $k_i$  の値を求めようとするものである。つぎにこのシミュレーションの実際の計算例を示すが, これは荷役機械能力として公称能力 300 t/hr および 900 t/hr の 2通りの場合をとりあげ, 他の条件を全く同一にして, 1年間の貯鉄量の推移をみたものである。毎日の  $x_i - y_i$  の変化の様子は 図-3.4 のようになり, これを分布形にとってみると 図-3.5 になる<sup>11)</sup>。

この結果, 結論としてつぎのようなことがいえる。

(1) 岸壁上の役荷機械の能力の大小はヤード規模に影響をおよぼす(荷役機械能力が 300 t/hr と 900 t/hr の場合では貯鉄量が最大 20,000 t の差がでてくる。また最大貯鉄量においても両者の間には差がある)。

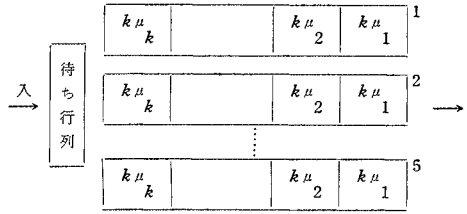
(2) 最大貯鉄量を収容しうるヤードの規模もこのシミュレーションによって求めることができる(この場合は最大値と最小値の差 16 万 t が必要規模になる)。

4. パース数・荷役機械能力の原料輸送船の待ち時間におよぼす影響

$$\begin{aligned} & \{\delta_{N,0}[(1-\delta_{N,N_{\max}})\lambda + k\mu(\sum_{n=1}^N S_n)] + (1-\delta_{ns})\delta_{ns}[(1-\delta_{N,N_{\max}})\lambda + k\mu S]\} P(N,n; S_n, \dots, S_1) \\ & = \{\delta_{N,0}(1-\delta_{n,0})(1-\delta_{S_{n,1}})\lambda \cdot P(N,n-1; S_n, S_{n-1}, \dots, S_1) + (1-\delta_{N,0})\delta_{n,s}\lambda P(N-1,n; S_n, \dots, S_1) \\ & + \sum_{s=2}^n \{[\delta_{n,s} + (1-\delta_{N,0})\delta_{n,s}](1-\delta_{S,1})(1-\delta_{S_{s-1},0})k\mu(S_s+1)P(N,n; S_n, \dots, S_1)\} \\ & + \{(1-\delta_{n,0})\delta_{N,0}(1-\delta_{ns})k\mu(S_1+1) \cdot P(N,n+1; S_1+1, \dots, S_n) \\ & + (1-\delta_{N,0})\delta_{ns}(1-\delta_{N,N_{\max}}) \cdot k\mu(S_1+1)P(N,n+1; S_1+1, \dots, S_n) \dots \dots \dots (4.2) \end{aligned}$$

ここに,  $\delta_{\alpha\beta} = \begin{cases} 1 & (\alpha = \beta \text{ のとき}) \\ 0 & (\alpha \neq \beta \text{ のとき}) \end{cases}$   
 $N$ : 系全体にある船の隻数  
 $n$ : サービスを受けている船の隻数  
 $S_n, \dots, S_1$ : おのおの phase  $n, \dots, 1$  でサービスを受けていると考えられる船の隻数

図-4.1 アーランサービス窓口の基本的な考え方



製鉄所への原料輸送船の到着を主要原料である鉄鉱石について調べた結果, 単位時間の到着隻数はポアソン分布にしたがうと仮定してよかった。また単位時間あたりの荷役量の分布は前節で検討したようにアーラン分布にしたがうとみることが出来る。アーラン分布への適合性をみることもおよび相 (phase)  $k$  の値を決定することを目的として,  $\chi$  自乗検定を行なったが, その結果は 図-3.2 のとおりであり, 単位時間あたりの荷役量の分布は  $k=4$  のアーラン分布にしたがうとここでは仮定する。したがって製鉄所専用港の岸壁パース数  $S$ , 荷役機械能力  $\mu$  が到着船の待ち時間におよぼす影響についての解析はポアソン到着, アーラン サービスの待ち合せ理論をもちいて行なうことができる。  $S=1$  のときはすでに知られているように平均待ち時間  $W_q$  は,

$$W_q = \frac{\rho}{2(1-\rho)} \cdot \frac{1}{\mu} \left(1 + \frac{1}{k}\right) \dots \dots \dots (4.1)$$

ここに,  $\rho = \lambda/\mu$

$\lambda$ : 1日あたりの平均到着数

$\mu$ : 1日あたりの平均サービス隻数

により求めることができる。  $S \geq 2$  のとき  $W_q$  の一般解はまだ求められていない。したがってここでは  $S \geq 2$  の場合の平衡条件式をつくり, それぞれの状態確率を未知数とする連立方程式を解くことにより状態確率を求め, それにより平均待ち時間を求めることにする。アーラン分布にしたがうサービスをするチャンネルは 図-4.1 のように,  $k\mu$  のサービス速度をもつ  $k$  個の指数サービスをする仮想窓口が直列に配列されたものからなりたっているとみることが出来ることを利用すれば, その状態方程式の一般式はつぎのようになる。

$P(N,n; S_n, \dots, S_1)$ :  $N, n; S_n, \dots, S_1$  である状態確率  
 この状態方程式を状態確率を未知数とする連立方程式として解くことにより,  $a$  隻の待ちのある確率  $P_a$  が求まると, つぎの式により  $W_q$  を求めることができる<sup>12)</sup>。

$$L_q = \sum_{a=0}^{\infty} a P_a \dots \dots \dots (4.3)$$



$$W_q = L_q / \lambda \dots\dots\dots(4.4)$$

ここに  $L_q$  は平均待ち行列である。式 (4.3), (4.4) をつかって  $S, \mu$  の値を変えたときの待ち損失を求めることが可能である。

1000 t/day の公称能力の高炉 1 基に対する鉄鉱石岸壁について考え、バース数  $S=1, 2$  の 2 通りの場合についてここでは  $W_q$  を算出してみた。 $k=4$  であり、 $S=2, k=4$  の場合の未知数である状態方程式の数は 35 個となる。この 35 元 1 次連立方程式を表-4.1 に示す。ここに表-4.1 のたて方の一例として第 1 式のたて方を示すことにする。時刻  $t$  から  $t+\Delta t$  時間後に 1 隻の待ち船もなく、サービスを受けている船もない状態  $P_{t+\Delta t}(0,0; 0,0,0,0)$  は時刻  $t$  において待ち船もサービス中の船もない状態確率  $P_t(0,0; 0,0,0,0)$  と  $\Delta t$  の間に到着がなく、サービス終了もない確率  $(1-\lambda\Delta t)(1-4\mu\Delta t)$  の積と相 1 の仮想チャネルで 1 隻がサービスを受けており、待ち船がない確率  $P_t(0,1; 0,0,0,1)$  と、到着がなく、サービス中の 1 隻がサービスを終了する確率  $(1-\lambda\Delta t)4\mu\Delta t$  の種との和としてあらわされるから、

$$\begin{aligned} P_{t+\Delta t}(0,0; 0,0,0,0) &= P_t(0,0; 0,0,0,0)(1-\lambda\Delta t)(1-4\mu\Delta t) \\ &\quad + P_t(0,1; 0,0,0,1)(1-\lambda\Delta t)4\mu\Delta t \dots(4.5) \end{aligned}$$

無限時間後に定常状態に達したときには、 $\rho = \lambda/2\mu$  を代入して

$$-2\rho P(0,0; 0,0,0,0) + 4P(1,1; 0,0,0,1) = 1 \dots\dots\dots(4.6)$$

第 2 式以下もすべて同様の考え方で式がたてられており、最後の 35 式はすべての状態確率の和が 1 に等しいという式である。

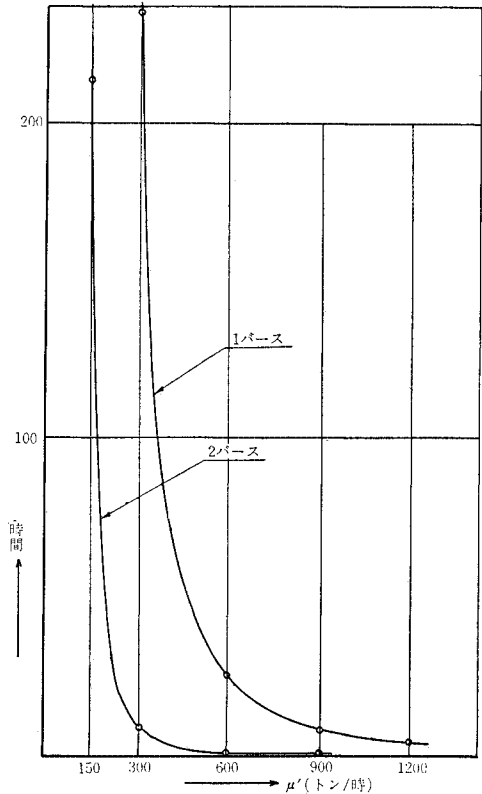
$S=1, 2$  に対して、荷役機械公称能力  $\mu'$  の値を表-4.2 のようにとり、それぞれの場合の待ち時間を計算した結果を表-4.2 の右側に示す。すでに述べたように荷役機械の実能力は公称能力の 4/9 程度しかないから、計算に際しては  $\mu = 4/9 \mu'$  を使って計算を行なっている。これを図示すると図-4.2 のようになる。

この図から明らかなように、待ち時間の減少を目的とするならば、バース数の増加、荷役機械能力の増強は非常に有効である。しかし 1. で述べたようにそれら施設規模の決定は他の施設との関連のもとにきめられなければならない。次節においてはいままでの結果をもちい

表-4.2 平均待ち時間

S	$\mu'$ (t/hr)	$W_q$ (hr)
1	300	288.451
1	600	25.722
1	900	9.474
1	1200	4.899
2	150	224.634
2	300	9.398
2	600	0.654
2	900	0.133

図-4.2 1 隻平均待ち時間



て、炉前施設全体の規模決定について考察することにする。

### 5. 炉前施設の規模決定に関する考察

製鉄所の原材料需要量は製鉄所における高炉能力および高炉数によってほぼ一定になると考えてよい。そこでこのようにして決まってくる原料の需要量を高炉に供給するために要する費用を最小にするような炉前施設の規模をいかにして決定すべきかという問題について考察することが重要になる<sup>13)</sup>。この場合同一高炉数に対して原料輸送船の一船あたり積載量が大きくなれば、年間の輸送船隻数は減少し、年間の輸送費用は減少する。したがって年間全費用の算出にはいままでの解析の結果のほかに原料輸送船の積載量と海上輸送の関係をも加えなければならない。また単位時間あたりの待ち損失は船型が大であるほど大である。積載量と船型は無関係ではないから、待ち損失に関しても  $S, \mu$  のほかに積載量が影響をおよぼす。ここではこのような意味から船型、積載量を代表するものとして平均積載量  $\xi$  の影響を考慮することにする。炉前施設を全体として考える場合、原料が輸送船につみこまれてから、製鉄所に到着し、高炉に入るまでのすべての費用を考えなければならない。ここではつぎの 6 種類の費用を考える。それらは原料輸送船の平均積載量  $\xi$ 、岸壁のバース数  $S$ 、荷役機械能力  $\mu$  の関数と

なる。

- $C_1$ : 原料の海上輸送における年間経費 (円)
- $C_2$ : 原料輸送船の年間の待ち損失 (円)
- $C_3$ : 原料輸送船の荷役中の損失 (円)
- $C_4$ : 岸壁の年間資本回収額および補修費・維持費の合計 (円)
- $C_5$ : 荷役機械の年間資本回収額および補修費, 維持費の合計 (円)
- $C_6$ : ヤードの年間資本回収額および補修費, 維持費の合計 (円)

炉前施設全体の1年間の総費用  $C_T$  (円) はこの合計として,

$$C_T = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5 + C_6 \dots \dots \dots (5.1)$$

として表わすことができる。

鉄鋼一貫工場の規模の最も簡単な場合として, ここでは公称能力 1000 t/日 の高炉を 1 基保有する製鉄所における  $C_T$  の値を試算してみることにするが, 高炉数が多い場合でも, 使用原料量が増加するだけであり, 基本的にはここで述べる考え方を適用できるであろう。

$C_1$  に関してはすでに述べたように, 1 船あたりの原料積載量が増加すれば年間の原料輸送船隻数は減少し,  $C_1$  は  $\xi$  によって変化することになる。原料入地と製鉄所との距離が 3000 マイルであると仮定し,  $C_1$  の平均積載量  $\xi$  に対する変化を調べると 図-5.1 のようになる。これは原料積載量と船型には比例的な関係があるとみなし, 船型によって船舶資本費, 航海費, 燃料費がいかに変化するかを考慮したものである。

$C_2$  に関しては 4. において考察したバース数, 荷役機械能力の原料輸送船の待ち時間におよぼす影響の結果を利用することができる。

いま, 原料輸送船の 1 日あたりの待ち損失を 表-5.1

表-5.1 鉱石輸送船の1日待ち損失

船型 (t)	1日あたり待ち損失 (万円)
10000	44.2
17133 (現状)	69.3
20000	77.9
30000	104.8
40000	130.8

のように考えると, バース数  $S$ , 荷役機械能力  $\mu$ , 平均積載量  $\xi$  に対する原料輸送船の年間の待ち損失は 図-5.2 のようになる。

$C_3$  に関しては, 年間の荷役量は, 鉄鋼生産量が一定である以上, 荷役機械の能力のみに依存し, 船型, バース数には比較的無関係である。

$C_4, C_5$  および  $C_6$  はおのおの施設の規模および数の影響を受ける費用であり, 各施設の建設費がきまれば年間の資本回収額は,

$$C = (P - L) \frac{i(1-i)^n}{(1+i)^n - 1} \dots \dots \dots (5.2)$$

- ここに,  $P$ : 初期の設備投資の額
- $L$ : 設備の  $n$  年後の残存価格
- $i$ : 利率
- $n$ : 耐用年数

$C$ : 年間資本回収額

により求めることができる<sup>14), 15)</sup>。右辺の  $i(1+i)^n / (1+i)^n - 1$  は資本回収係数いわゆる *c.r.f* である。そのようにして求めた資本回収額に補修費, 維持費を加えて  $C_4, C_5$  および  $C_6$  を算出できる。ただここで注意すべきはそれら 3 つの施設の規模は独立にきめられるのではなく, 前節までで解析してきたように相互に関係しあっているということである。 $C_4, C_5$  および  $C_6$  の算出に使用した利率  $i$ , 耐用年数  $n$ , *c.r.f* および残存価格  $L$  を表-5.2 に示す。公称能力が 1000 t/日 高炉 1 基の場合の  $C_T$  の  $S, \mu, \xi$  に対する変化の様子を 図-5.3 および 図-5.4 に示す。この図からつぎのように結論することができる<sup>16)</sup>。

① 原料輸送船の積荷量は大きいほど炉前施設の総費用は小さくなる。このことは 1 回の輸送において船型が大きくなるほど 1 t あたりの輸送費が小さくなるという一般の常識に一致し, また輸送船の大型化のすう勢もこれによって首肯できる。しかし  $\xi$  が大になるほど総費用の減少の割合は小さい。たとえば  $\xi$  が 1 万 t から 2 万 t になるほうが, 3 万 t から 4 万 t になるより減少額が多い。とはいえ, 現在  $\xi$  が 17000 t であるということを考えてまだまだ 1 船あたり積載量増加の効果は大であるといえる。

② 岸壁に設置される荷役機械は 1 バースの場合 600 t/hr, また 2 バースの場合各バースごとに 300 t/hr 前後のとき総費用は最小となる。しかし実際の荷役作業は公称能力の 4/9 の能力でしか稼働しておらず 今後荷役

図-5.1  $\xi$  と年間輸送費用の関係

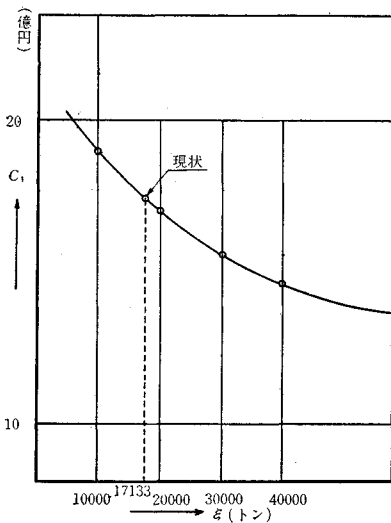




図-5.2

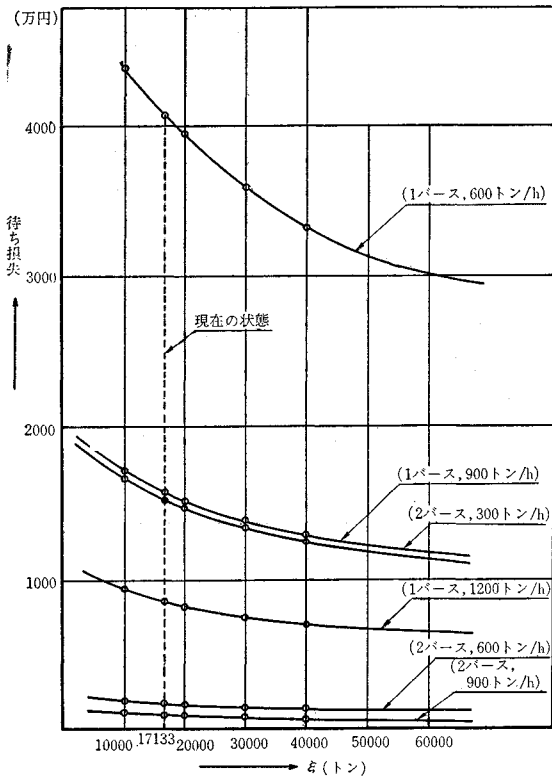


図-5.3 1バース 1000 t/日 高炉1基の場合の年間総費用 C

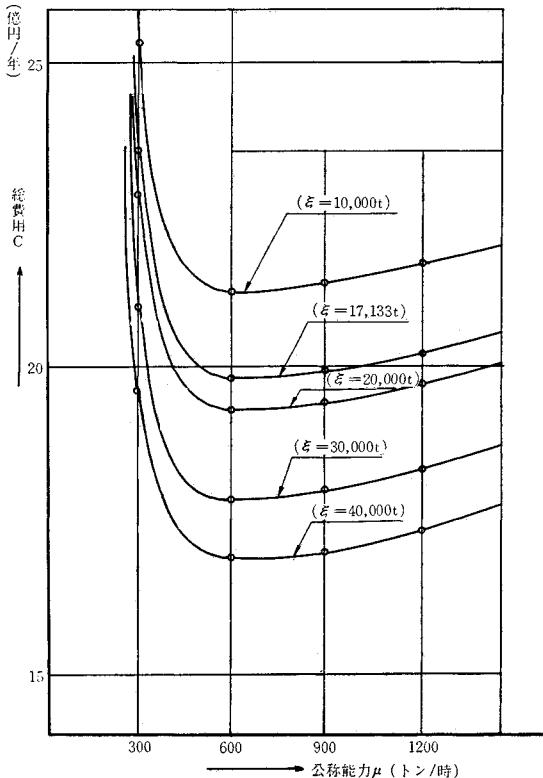
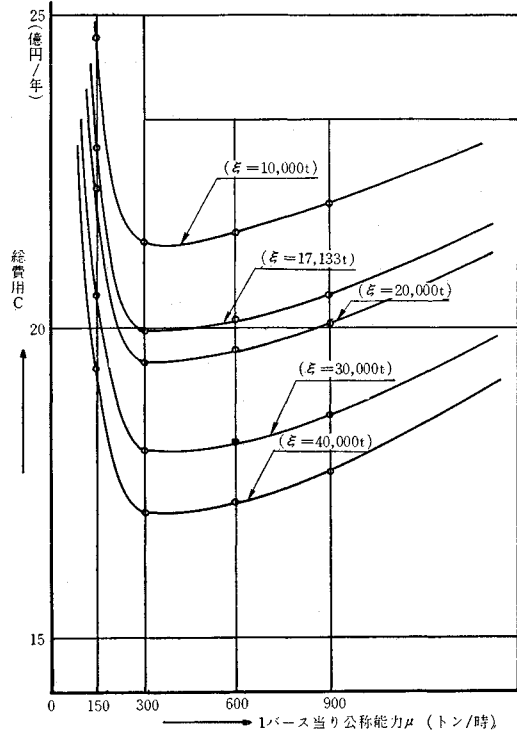


表-5.2 炉前施設の i, n, c.r.f および L

	<i>i</i>	<i>n</i> (年)	<i>c.r.f</i>	残存価格
岸壁	0.10	30	0.10168	0
荷役機	0.10	10	0.16275	0.10 P
ヤブローダー (スタッカー ベルトコンベヤー)	0.10	10	0.16275	0.10 P

図-5.4 2バース 1000 t/日 高炉1基の場合の年間総費用 C



能率上昇の対策を考えることもまた重要である。

③ 本節例では岸壁のバース数を1とするか2とするかという問題については、上述のモデルの計算結果だけから判断すれば、1バースにした方が総費用が若干小さくなっている。しかしこの決定については工場敷地の立地条件の問題、船型、規模により専用バースをつくる問題など別の要因が入っていることであり、それらをあわせて慎重に検討することにより決定しなければならない。

### 7. 結 言

本研究の目的は、設備投資の最も大規模なものである工場建設を計画する場合に、建設する立場にあるものが従来よりさらに広い視野から工場建設計画に参画するためには、いかなる考え方にたてばよいかを追求する点にあった。そこでその具体例として鉄鋼一貫工場の炉前施設をとりあげ、その規模決定にあたり必要な解析を行ない、企業の立場からの規模決定法について考察した。炉

前施設は銑鋼一貫工場全体の中で考えていくのがより望ましいが、製鉄所において炉前施設は他の施設と比較的明確に分離されており、炉前施設部分だけをとりだして考えてもさしつかえないと考えたからである。

貯鉱場の規模決定および岸壁・荷役機械計画においては確率統計的方法、待ち合せ理論およびシミュレーションの手法を導入した。これらの手法による解析は不十分であるが、各施設間相互の関係を定量的に明らかにすることができ、個々の施設の種類と規模とその配置は炉前施設全体、船舶の大きさ、運航計画を含めて総合的に判断することによって、より合目的な計画ができることを示した<sup>16)</sup>。

#### 参 考 文 献

- 1) 横山 保編：設備問題への経営科学的接近，p. 3～15，培風館，昭 39.1.
- 2) F. Toussaint 著，里村春高・渡辺公平訳：鉄鋼はいかにしてつくられるか，丸善書店，昭 35.12.
- 3) ユーエス・スチール社編，日本鉄鋼協会訳：鉄鋼製造法，中，丸善書店，昭 38.2.
- 4) 岡本正三・田中良三著：製鉄製鋼法，養賢堂，昭 36.12.
- 5) 江口辰五郎：製鉄工業港計画論，p. 10～12，p. 64～84，昭 36.8.
- 6) 神戸製鋼所：高炉作業月報，昭 38～40.
- 7) 松田武彦・春日井博：生産在庫管理とその実際，p. 316～339，培風館，昭 39.4.
- 8) 横山 保・福場 庸：在庫管理，p. 53～71，共立出版，昭 39.7.
- 9) 吉川和広・柏村正樹：製鉄所における貯鉱場の規模決定に関する研究，昭和 40 年度土木学会関西支部年次学術講演会講演概要，昭 40.11，IV-10.
- 10) 神戸製鋼所：KS 岸壁の鉄鉱石荷役について，昭 38.6.
- 11) 岡崎順広・中島裕之：S工場の石炭陸揚能力および貯炭場能力決定のためのシミュレーションについて，経営科学，Vol. 6，3 p. 194～205.
- 12) 森村英典・大森義次：待ち行列の理論と実際，日本科学技術連盟，昭 40.7.
- 13) The British Iron and Steel Research Association：Operational Research Studies of Port Operation，ICHCA，Research in Cargo Handling.
- 14) D.A. Smith：The Economics of Supply，ICHCA，1963.
- 15) 村川武雄：設備投資の経済計算とその理論，p. 11～15，日本科学技術連盟，昭 40.7.
- 16) 長尾義三・柏村正樹：製鉄所における炉前施設の規模決定に関する研究，第 21 回土木学会年次学術講演会講演概要，昭 41.5，IV-145.
- 17) 工藤和男・高野聖三・奥山青英・埴頭の貨物取扱い能力についての研究，港湾技術研究所報告，昭 40. 11，第 4 巻第 8 号  
(1966.10.8・受付)