

## 《翻 訳》

『飛行機ゲーム』<sup>1) 2)</sup>

Laurence Legg 著

中 村 美 枝 子 訳

## 要約

このゲームの目的は、製造システムのスケジューリングのための工程技術最適化（OPT：Optimized Production Technology）の原則を紹介することにある。「製品」は、2枚の紙を折ったものをホッチキスでとめて作った飛行機である。工程の手順はきわめて簡単であるから、参加者はゲームで要求されていることをすぐに理解できるはずである。しかし、利益を上げようとするで一筋縄ではいかない。参加者は、ゲームが終了するまでに、ドラム（合図）／バッファ（緩衝用在庫）／ロープ（後方への指示）の方式とOPTルールをきちんと関連づけて考えることができるようになる。こうした考え方や関連する項目は、実習後にシステムを討論し分析する段階で明らかにされる。ゲームの説明と実習に要する時間は、約40分である。

## 1. はじめに

もともとこのゲームは、資材管理について、British Aerospace 社のための2日間の研修コースの教材として開発された。飛行機を製品としているのはそのためである。これまでに、12, 3歳の子供たちから大学生、さらには関連分野の専門家たちまで、幅広い年代と能力の人々に利用されてきた。小学生の場合は大抵2回ゲームを実習し、1回目の実習の後に議論されたアイデアを2回目の実習で確かめさせている。中学生以上の参加者には1回の実習で十分であることが多いので、別の形でフォローアップの調査活動や演習を行うことにしている。

グループの大きさは8人から12人の間であればよいが、9人か10人がのぞましい。2つ以上のグループが同時に実習することができるが、グループが3つ以上の場合には、講師が2人以上いた方がよい。ゲーム実習と分析討論をあわせて1時間以内に終わらせることができるが、最低1時間半はかけたい。というのも十分な時間がある方が、より自由な雰囲気の中で討論できるからである。OPTについては多種多様な論文、書籍が出版されているのでそれらを参照してほしい。以下の文献は、ゲームの分析および議論すべき分野の検討に必要な基本情報を与えるものである。

E.M. Goldratt & R.E. Fox (1986) *The Goal*. North River Press

E.M. Goldratt & R.E. Fox (1986) *The Race*. North River Press

G. Jones & M. Roberts (1990) *Optimised Production Technology*. IFS

J. Brown, J. Harken, & J. Shivanan (1988) *Production Management Systems*. Addison-Wesley

E.M. Goldratt (1990) *Theory of Constraints*. North River Press

1 グループがゲームを実習するために必要なものは次の通りである。

■ A 4判の紙：多数

■ ホッチキス：1, ホッチキスの針：多数

■ はさみ：1

■ 30cm 定規：1

■ 鉛筆：1

■ペン：3種類の色を各1本ずつ

■ジョブカード：各1枚ずつ

■マシンカード：各1枚ずつ

それぞれについて、グループが追加購入をした場合に備えて、予備が必要である。

## 2. 導入

導入の所要時間は約10分である。図1は、紙飛行機(P)製造の工程手順のネットワーク図である。予備部品として、翼(P1)と胴体(P2)も製品化される。各製品の上に販売価格を示しておいた。この金額は、製品が完成品用の倉庫に運び込まれたときにのみ受け取ることができる。原料はA4判の紙で、無尽蔵にあるものとし、1枚当りの費用は3000円<sup>3)</sup>とする。この紙を3等分するので、1片当りの費用は1000円である。操業費用は15分間で200000円である。15分間の操業時間内に、できるだけ高い利益を上げることが、このゲームの目標である。

図1の○で囲んだ部分は機械の操作運転作業を表しており、その作業にかかる予測時間が秒単位で記されている(実際にかかる時間はこれよりも短いと思われる)。一つの作業には専用機械1台が必要である。最初の状態では各作業に利用できる機械はそれぞれ1台しかない。そして、その機械を操作できるのは1人だけである。グループのメンバーは全員が(輸送作業の担当も含めて)どの機械も操作できると仮定されている。各作業には最初1台しか機械がないので、2台目の機械を購入しない限り2人が同一の作業を行うことはできない。ただし、輸送作業は何人でもやってよい。

15分間を使って、飛行機と予備部品とを製造するわけだが、機械はこのためだけに使われるのではないことをあらかじめ言うておく。全く別の製品が、同じ機械を使いながら違った経路で製造される可能性があるものとする。こうしたことを付け加えるのは、機械を物理的に配置替えするという解決方法を取らせないためである。いずれにしても、この方法を取った場合には機械を元の位置から移動しなければならない

ので、費用の面で不利になる。

ゲームの前、ゲーム中にグループはオプションとして次のことを決めることができる。

■機械の移動：希望の場所までの移動に1台あたり100000円、あとで元の位置に戻すのにも同額の100000円。

■機械の追加購入：1台500000円。

■工程の改善：1件50000円。このオプションについては、この段階ではあいまいにしておいて、「各種の作業を遂行するより良い方法をどこまでクリエイティブに考えられるかは、グループやメンバーにかかっています」と言うだけにする。

システムに対する外部制約が、市場取引に関連して一つだけあり、予備部品として製造される翼と胴体の数は、どちらも飛行機の数を超えられないとする。

ここではこれ以上の指示や説明はすべきではない。というのもどういう計画を立てるかはグループにまかせられているからである。すべての情報を図1にまとめておいたので、この図を使って導入説明をしてもよい。

## 3. グループ討議

所要時間は10～15分である。グループに計画を立てさせ、作業の分担を決めさせる。図2に示したようなジョブカードをわたしておくと、分担を決めやすい。グループが討議している間に、部屋のあちこちにマシンカードと備品を配置する。配置はランダムにおこなってよいが、連続する作業が隣り合わないように気をつける。完成品を運び込む倉庫として広い場所を用意する。多数(半束ほど)のA4判の紙(原料)を最初の作業(線を引く)の横に置く。準備がすんだらグループ討議に耳を傾け、あとの討論のときにそれを紹介する。すばらしい計画を立てたのに、ゲーム中に実行しきれなかったというグループもあるからである。

さらに、表1に示すような損益要約表を掲示する。ただし、15分の操業時間が終了するまで仕掛品の行は示さない。グループ討議の終了時

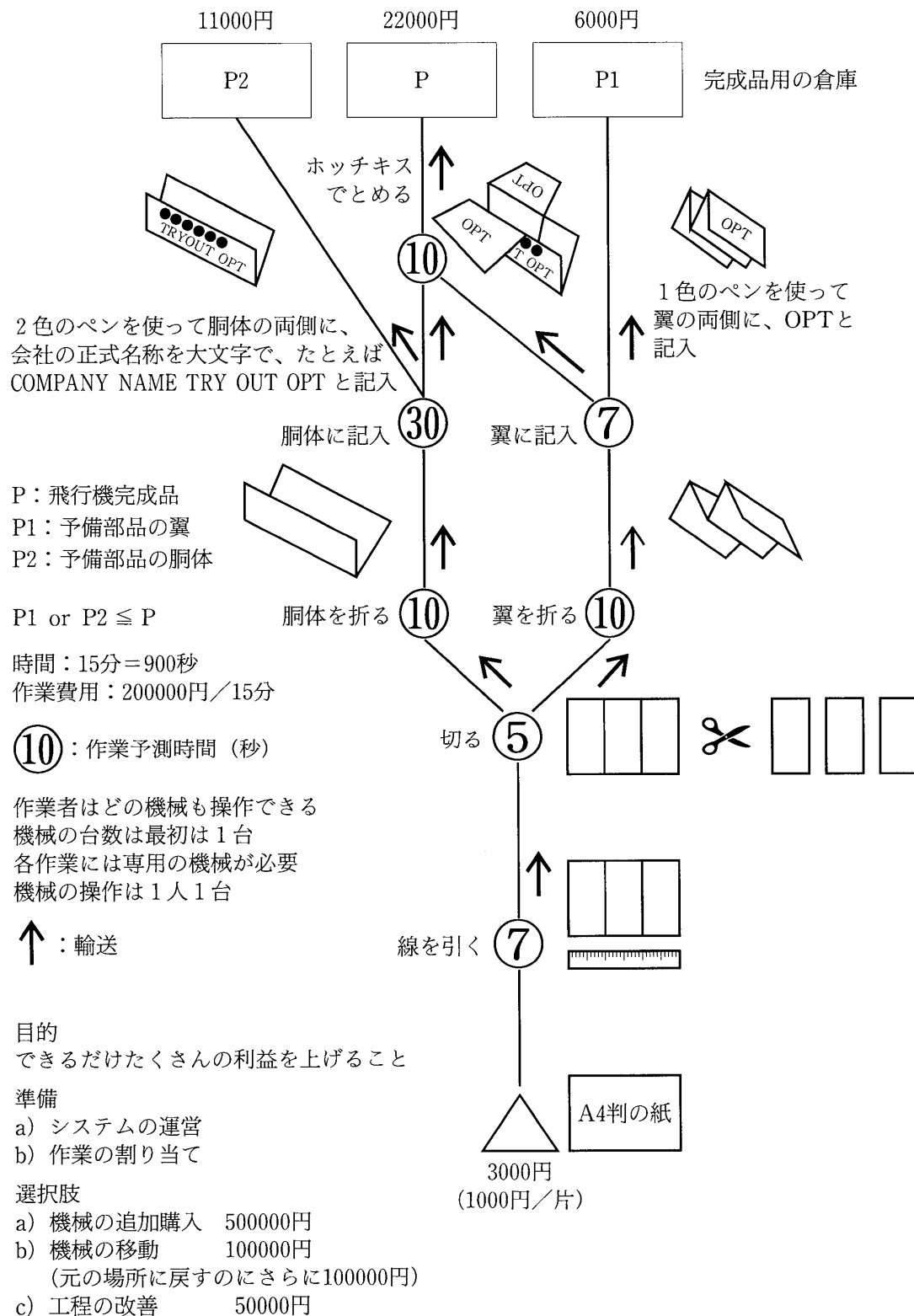


図1 工程手順

に「移動」や「購入」、そして「工程の改善」をするかどうかを確認し、損益要約表に記入する。

#### 4. 作業の実施

所要時間は15分～20分である。15分間の実習を始める前に、2～3分の時間をとる。この間に、各人は担当する作業に慣れる。そして、システムには仕掛品があふれることになる。開始前に、いつでも「移動」「購入」「工程の改善」ができることを、グループにもう一度確認する。また、あなたが地区の製造責任者として実習中の達成度をチェックして回ることも知らせておく。

2～3分たったら完成された飛行機や予備部品の製品を全部どけて15分間の実習を開始する。「残り時間はあとどれくらいですか」と聞か

れた場合にはあいまいに答える。というのは、仕掛品の水準と完成品の割合は、システムに制御されるべきものであって、最後の2～3分でシステムをむりやりからにしようとするべきではないからである。

それぞれの作業場単位で個別に行われることの多い、あらゆる種類の工程の改善に対して目を配る必要がある。よくあるのは、紙を重ねて切るとか折るとかいうものである。こうした改善は、表1の例のように記録しておく必要がある。後から行なう討論では、これらが役に立ったかどうかを問いかけるとよいだろう。実際、この2つの局所的な「能率アップ」は、OPTの中で用いられたとすると、部分的には仕掛品を少なくするが、システム全体の仕掛品の水準は高くしてしまう。したがって、結局は仕掛品の

表1 損益要約表<sup>4)</sup>

単位：円

Pの売上高 (22000円／機)	
P 1 の売上高 (6000円／翼)	
P 2 の売上高 (11000円／体)	
売上収益計	
操業費用	200000
移動費用 (200000円／台)	
追加購入 (500000円／台)	
工程の改善 (50000円／件)	50000 (切る)
仕掛品 (1000円／片)	
支出計	
利益 (損失)	

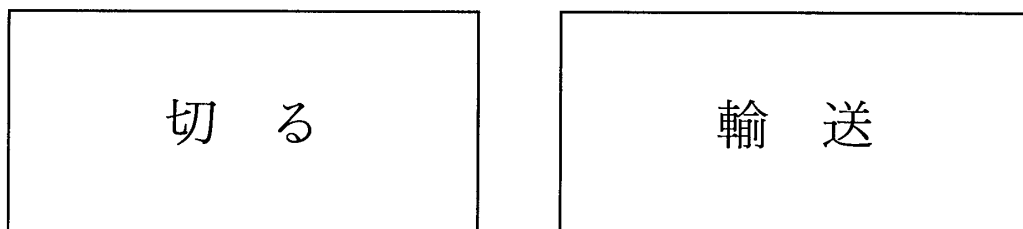


図2 ジョブカードの例 (実物大)

削減と50000円の支出という観点からの費用の正当性の問題になる。もちろん、金銭面の問題のほかにも取り上げるべきことはあるのだが。

ほとんどのグループが実習中のある段階で、胴体書き込む機械を余分に買ったがる。どの機械であれ彼らを買いたいといえれば認めて、損益要約表に記入する。ただし、これは大抵の場合致命的な行動である。これもあとの討論で検討すべきである。

地区の製造責任者としてのあなたの役割は、グループや各人をせきたてて一所懸命に働かせ、機械の稼働率を高くすることである。稼働していない機械や休んでいる作業者に目を光らせ、忙しそうに働いている機械や作業者をほめて回る。こうした行為は恨みをかうこともあるだろう。これも、あとの討論の議題につながる。たとえば、達成度のはかり方、異なる部門の間に生じるあつれき、サブシステムを最適化することがそのまま全体としてのシステムの改善につながるかどうか、などである。

15分の実習が終わったらすべての行動をやめさせて、合図の後で飛行機や予備部品が完成品用の倉庫に運び込まれないように、また1片の紙もなくならないようにする。原料の倉庫からシステム内に運ばれた全部の紙を数える必要がある。つまり、はさみで切ったあとの紙、線の引いてある紙、はさみで切るために運ばれる途中の紙などを全部数え上げるのである。一番簡単なのは、はさみで切ったあとの1片を単位として数えることである。切った後の紙は1片あたり1000円であるから、切る前の紙は3倍すればよい。これを行なう間に、損益要約表に仕掛品の行を加える。

## 5. 実施の分析

損益要約表にすべての金額を記入し、各グループが利益を上げたのか損をしたのかを計算する。このゲームは広範囲にわたる能力レベルのプレイヤーによって何度となく行われているが、利益を上げることができたグループはほとんどない。

## 6. システムの分析

ここではシステムの分析と討論すべき項目とに分けて話を進めるが、実際には両者は密接に結びついている。分析のレベルと討論の範囲は、グループにふさわしいもの、この実習を通じて達成したい目標にふさわしいものにすべきである。

以下の分析はOPTの原則という観点からみたものであり、OPTルールに直接結び付けて考えることができる（表2参照）。

### 6. 1 ボトルネックの確認(ドラム)

ボトルネックとは、工程上最も時間のかかる作業をいう。ここでは、胴体に記入する機械の作業、1片あたり30秒、がそれにあたる。したがって、1片を生産できる割合は30秒につき1個である。これがシステムのドラムビート<sup>5)</sup>である。

### 6. 2 製品の組み合わせ

これは、表3のように、制約条件(ボトルネック)1単位あたりの収益に応じて計算される。翼を作ってもボトルネックの処理量に影響しないことから、製品の組み合わせはPとP1(飛行機と翼)を同数作り、P2(胴体)は作らない、というのが最適である。これを確かめるには、翼を生産する工程で最も時間のかかる作業を考えてみればよい。それは「翼を折る」作業の10秒である。2つの翼がこの工程を通過するわけだが、ドラムビートからすると30秒につき10秒の余裕がある。したがって、飛行機の製造数と予備部品の翼の製造数を同数にすることが可能なのである。

### 6. 3 機械の利用

製品の組み合わせが決まれば、表4のように各機械の工程上の負荷が計算される。A4判の紙ちょうど1枚を全部使い切って製品が作られることに注意してほしい。3片のうち2片を使って飛行機1機が作られ、もう1片を使って予

表2 OPTルール

1. 容量ではなく流量のバランスをとりなさい。
2. ボトルネックでない機械をどこまで使用するかは、生産力によってではなくシステム内の別の制約によって定まる。
3. 機械をやみくもに使用することと効果的に稼働させることは同じではない。
4. ボトルネックでの1時間の損失は、システム全体でも1時間の損失に相当する。
5. ボトルネックでない機械で1時間節約しても、節約にはならない。
6. ボトルネックは処理量と在庫量の両方を左右する。
7. 1回の輸送量は1回の処理量と同じとは限らない。多くの場合、同じにすべきではない。
8. 処理量は固定せず可変にすべきである。
9. すべての制約を同時に考慮してスケジュールを立てるべきである。製品完成までに要する時間はスケジュールを立てた結果出てくるものであり、前もって決めることはできない。

モットー：部分的な最適化の積み重ねが全体の最適化になるわけではない

表3 製品の組み合わせ

製品の組み合わせ	P*のみ	PとP1**	PとP2***	PとP1とP2
販売価格 (円)	22000	28000	33000	39000
原料費用 (円)	2000	3000	3000	4000
貢献金額 (円)	20000	25000	30000	35000
ボトルネックの 所要時間 (秒)	30	30	60	60
ボトルネック1秒 あたりの収益 (円)	667	833	500	583

\*：Pは飛行機、\*\*：P1は予備部品の翼、\*\*\*：P2は予備部品の胴体

表4 機械の稼働率

機械	稼働時間 (秒) / 30秒	稼働率 (%)
線を引く	7	23
切る	5	17
胴体を折る	10	33
翼を折る	20	67
胴体に記入する	30	100
翼に記入する	14	47
ホッチキスでとめる	10	33

備部品の翼1翼が作られる。

システムを動かすのに必要な作業者数を最小にするような作業方式を見つけることもできるだろう。ボトルネックでない資源の利用を増やすと仕掛品は増える(たとえば紙を切る機械のところで工程の改善を行なったとして何の役に立つだろうか)。

#### 6. 4 生産量とシステムの利益

ボトルネックは全部で $900/30=30$ の部品を処理できる。よって飛行機30機と予備部品の翼30が生産される。15分たった時点で仕掛品がゼロだったと仮定すると、システムの利益は $(30 \times 22000) + (30 \times 6000) - 200000 = 640000$ 円である。<sup>6)</sup>

#### 6. 5 材料の流れを同時発生させる(タイムバッファとロープ)

これはタイムバッファを利用し、原料の放出に関して後方への指示を行なうことで達成される。図3は、タイムバッファの位置とタイムバッファがとりこむことのできるおおよその最小レベルを示している。そしてそれが、原料放出の指示にもなる。何枚放出するかは点線で示されている(これが後方への指示である)。翼の工程に進んだ小片は、OPTと記入されたあと飛行機用と予備部品の翼とに等量ずつ流れる点に注意してほしい。

正確な数値を計算できるので、それぞれの機械について、時間、1回の処理量、1回の輸送量

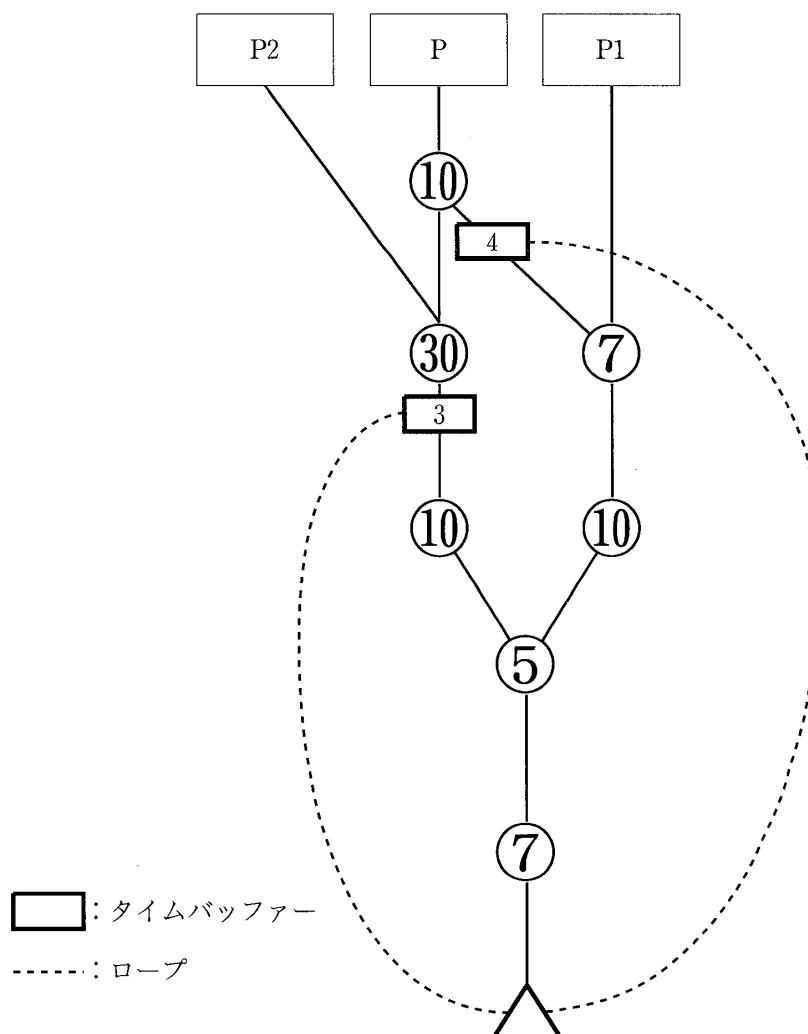


図3 タイムバッファとロープ (後方への指示)

を細かく示したガント・チャートを作ることもできる。これは、フォローアップ演習の一部として行なってもよいだろう。また、典型的なバッチ生産方式と比較してもよい。

## 6. 6 システムのための生産戦略

- 胴体に記入する機械を遊ばせてはいけない。
- ボトルネックから市場までは限定付きの前向きスケジューリングである。
- タイムバッファがボトルネックのスケジュールを支援する。
- タイムバッファがシステムにおける仕掛品のレベルを決定する。
- 原料の放出は、タイムバッファに取り込み可能な最小レベルに連動する。
- タイムバッファから原料放出にさかのぼる後向きスケジューリングである。
- ボトルネックにおける工程の改善を探し出すべきである。

## 7. システムに対する変更

### 7. 1 ボトルネックになっている機械の追加購入

胴体に記入する機械を追加すると操作時間が15秒に短縮される。それでもまだボトルネックであることに変わりはなく、製品の組み合わせも同じである。飛行機の生産高は倍の60機になるが、予備部品の翼の生産高は倍にはならない。なぜなら、工程の改善が行われないうちに翼を折る機械が不足するからである。

1 サイクルを30秒のままで計算すると、胴体2と翼3が製造され、飛行機2機と予備部品の翼1が完成する。そこで、900秒では飛行機60機と翼30になり、最初のシステムに比べて飛行機30機分、 $30 \times 22000 = 660000$ 円、だけ増益となる。機械購入費用が500000円なので、利益は160000円である。<sup>7)</sup>

ここで注意したいのは、タイムバッファに取り込み可能な最小の量と原料の放出量とを変更する必要があること、そしてボトルネックでない機械の利用が増えることである。翼を折る機械が決定的な役割を果たすようになる。また、

購入の損益分岐点が開始から2分半のところにあるので、追加購入のタイミングが重要である。

胴体に記入する機械を2台追加購入した場合、システムにおけるボトルネックを変えることになるのでもう一度最初から分析し直す必要がある。これはフォローアップ演習の一つとして考えればよいだろう。

## 7. 2 工程の改善

工程の改善として最も有効なのは、ボトルネックになる機械の作業時間を短縮することである。たとえば会社や組織の名称に略称を使うという案は認めてよい。時間短縮によってボトルネックはボトルネックでなくなることもある。その場合は、再度分析をし直さなければならない。これもフォローアップ演習の一例となる。

このゲームでは、他の機械に工程の改善を行なったとしても、おそらくシステム内の仕掛品を増やすだけだろう。しかしながら、OPTのもとでは、他の機械に改善を加えて、1回の処理量が小さくなるよう、タイムバッファのサイズを小さくすることも考えられる。これは、従属事象の統計的ゆらぎとして議論できるだろう。

## 8. 討論項目のリスト

- ドラム(合図)/バッファ(緩衝用在庫)・ロープ(後方への指示)のシステム
- 同時発生的な材料の流れ
- OPTルール
- 達成度の測定
- 持続的な改善(たとえば品質改善をどこに集中するか、装備の縮小、保守、工具のデザインなど)
- OPTとジャストインタイム、あるいは資材所要量計画(MRP: Material Requirements Planning)との比較
- 局所の最適化と全体の最適化
- 部門間の衝突
- チームワーク
- 統計的ゆらぎと従属事象



## ■危機管理

## ■仕掛品レベルの重要性

## Laurence Legg 氏の略歴

- 1978年 Loughborough University of Technology in Engineering and Education 卒業  
 1980年 同大学より生産システムデザインの修士号を取得  
 1987年より University of Central Lancashire Senior lecturer  
 1989年より 放送大学大学院 製造業専攻コースの指導を担当  
 Dunchurch Learning Service  
 製造管理学 客員講師  
 GEC management training college  
 製造管理学 客員講師

## 注

- 1) 原著 Laurence Legg (1994) Planes or bust: an OPT scheduling game. In Roger Armstrong, Fred Percival, and Danny Saunders (Eds.) *The Simulation and Gaming Yearbook Volume2: Interactive Learning*. London: Kogan Page. Pp. 209-219 (Chap.24).
- 2) 翻訳の出版を快諾して下さった Laurence Legg 氏と Kogan Page 社に感謝致します。
- 3) 原著には 30 ポンドとあるが、日本で実施する場合には単位が円の方がなじみやすい。また、3 で割り切れるようにすると、あとの計算が簡単にできる。

以上の点を考慮して、30 ポンドを 3000 円に置き換えた。以下同様に、単位を円に置き換えた。

- 4) 表 1 の損益要約表の売上高には、原料の費用が含まれたままになっている。しかし、実習中に表を完成させるには、あらかじめ売上高から原料費を差し引いた値を使った方が、速くて正確な計算を行なうことができる。実際、原著者の Laurence Legg 氏が 1993 年のワークショップ (Annual Conference of "The Society for the Advancement of Games and Simulations in Education and Training" in England) でこのゲームの実習指導を行なった際にも、製品の販売価格から原料費を引いた値を使って計算していた。以下に、実用版の損益要約表を掲げておく。

実用版の損益要約表		単位：円
P の売上収益 (20000 円/機)		
P 1 の売上収益 (5000 円/翼)		
P 2 の売上収益 (10000 円/体)		
売上収益計		
操業費用	200000	
移動費用 (200000 円/台)		
追加購入 (500000 円/台)		
工程の改善 (50000 円/件)	50000 (切る)	
仕掛品 (1000 円/片)		
支出計		
利益 (損失)		

- 5) ドラムビートは、ここでは作業サイクルの速度の意味で使われている。
- 6) 原料費が含まれていないので、これを引くと  $640000 - 30 \times 3000 = 550000$  円。  
移動・購入・工程の改善がない場合には、仕掛品による支出をこれより少なくすれば、黒字になる。
- 7) 原料費を差し引くと、利益は  $160000 - 30 \times 2000 = 100000$  円。