

(論文)

# 仕掛量に基づく設備負荷調整手法の銅板工場への適用

## Method for Machine Load Control Based on Work in Process for Copper Sheet Plant



井本考亮\*1  
Takaaki IMOTO



梅田豊裕\*1(工博)  
Dr. Toyohiro UMEDA



内山修造\*2  
Shuzo UCHIYAMA



水野満信\*2  
Michinobu MIZUNO

This paper describes a two-step method for adjusting the equipment load in a copper sheet plant having batch annealing furnaces. The first step takes a loading approach, in which the delivery date is met without accounting for the equipment capacity. The second step takes a leveling approach, in which the processing time and processing machines are altered to maximize the production volume and minimize the work in process. The leveling priorities are determined based on the work in process and delivery dates of products. This method enables planning for production while minimizing the production lead time. This paper includes the results of a computer experiment conducted to validate the proposed method.

まえがき＝当社の銅板工場における生産プロセスは、工程や設備の数が多いだけでなく、工程ごとに固有の製造条件で処理を行うため、大規模かつ複雑な操業制約を有する。一方、近年のユーザーニーズの多様化や原材料価格の高騰などの環境変化の下で収益・財務基盤を強化するには、以下のような工場方針に 대응することができる生産計画の立案が必要である。

- ・製品在庫や中間仕掛の削減による、フリーキャッシュの創出、原料価格変動の影響抑制
- ・生産効率の向上によるコストダウン
- ・製造工期短縮による納期対応力の向上

しかしながら、素材系のような大規模かつ複雑な生産工程の流れを適切にコントロールし、上記方針に 応えられる生産計画（大日程計画）や生産スケジュール（小日程計画）を作成することは容易ではない。そこで当社では、納期を順守しやすいバックワード負荷山積み・山崩し手法と、在庫や仕掛を考慮し易いフォワード負荷山崩し手法を組合せた、素材系工場に汎用的に適用可能な工場全体の負荷調整方法<sup>1)</sup>を検討してきている。とくに、銅板工場の生産管理における各設備への作業指示作成業務に適用し、効率化を狙っている。

本稿では、従来では考慮できていなかったバッチ焼鈍炉におけるロットまとめ制約を考慮した。また、負荷・仕掛を平準化することによる工場全体のスループットを高める設備負荷調整手法を提案し、あわせて、銅板工場の実データを用いた計算機実験により、提案手法の有効性を検証した。

### 1. 対象問題

設備能力の改善を行うことなく、生産計画の立案を工夫することによって納期を守り、工場のスループットを向上させ、仕掛を低減させることを考える。そのためには、工場への投入を適切な時期に適切な量のみ行う「入力制御」に加え、工場内での設備の材欠と過負荷を防ぎ、工場能力を最大限活用する「出力の最大化」を行う必要がある。

本稿では、工場への投入計画（熟延計画）が与えられる状況において「工場内の各設備に対して、どの製品をどの時間帯に処理するか、前記狙いを実現するように決定する」、つまり、納期を守りつつ生産効率を最大化する問題を取扱う。

#### 1.1 通過工程

素材系の一貫製造工場に適用可能な手法を検討するため、代表的な金属系の製板工程をモデル化する。対象とする生産ラインでは、大きく熟延、冷延、精整の3ラインでの処理を経て製品を生産する（図1）。各ラインは、それぞれ複数の設備から構成されており、繰返しや分岐がある。そのうち最も複雑な冷間ラインは、冷延工程、焼鈍工程、洗浄・研磨工程などで構成される。各工程には使用可能な設備が複数台存在し、製品の種類によって利用可能な設備群が異なる（図2）。さらに、焼鈍工程には、通常の通板設備とバッチ処理設備の2種類がある。

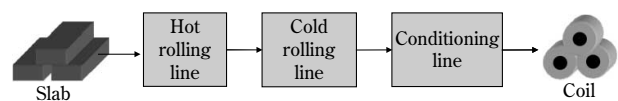


図1 対象生産ラインの概要<sup>6)</sup>  
Fig. 1 Outline of target process<sup>6)</sup>

\*1 技術開発本部 生産システム研究所 \*2 アルミ・銅事業部門 長府製造所 銅板工場

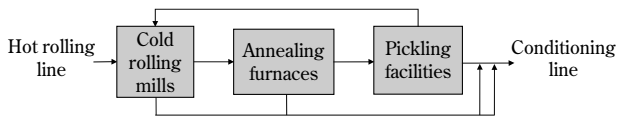


図2 冷間圧延工程の詳細<sup>6)</sup>  
Fig. 2 Detail of cold rolling line<sup>6)</sup>

## 1.2 制約

負荷調整にあたって、製品ごとの処理タイミングや利用設備を決定する際には、現実の操業や業務に存在する各種の条件を以下のような制約として表現する。

- ・製品の制約：生産する製品はそれぞれ、納期と注文数量が与えられる。
- ・工程の制約：通過工程をはじめとする各工程で利用可能な設備群が異なる。
- ・初期状態の制約：負荷調整対象には、工場への投入計画段階の未着手品と、既に生産を開始した仕掛品の2種類の状態が存在する。
- ・負荷時間の制約：製品の種類により、同一工程・設備における処理でも負荷となる処理時間は異なる。
- ・バッチ処理設備の制約：処理条件が同じワークのみ同一時間帯に処理可能とし、設備ごとに同時処理できる個数の上限が異なる。
- ・稼働時間の制約：各設備に対しては日単位で稼働時間の上限が与えられ、それを超えて製品を処理することはできない。
- ・工程間時間の制約：設備間では、冷却や運搬などによる一定の時間を必要とする。この時間は前後の設備の組合せによって決まる。

## 1.3 評価項目

ある日にある設備で処理する製品を決定するにあたって、それぞれの製品の次工程（設備）の仕掛状態を考慮しなければ、次工程への材欠（処理する材料不足による機会損失）や過剰供給による仕掛の滞留が発生する。そして、この影響がさらに次工程へと伝播していくことで工場全体の生産性は低下する。

このように、工場全体の生産性は生産計画立案の巧拙に左右される。また、納期達成率も同じように生産計画に左右されることから、仕掛状態と納期達成率の二つを計画立案手法の評価項目として選択する。

## 2. 負荷調整手法

1章で述べた対象問題を最適化の数理モデルとして表現し、厳密解法<sup>2)</sup>や近似解法<sup>3)</sup>を適用することによって最適な負荷調整結果を導出することは原理的に可能である。しかしながら、現実的に許容される計算時間や、表現可能な制約条件の柔軟性から、ここではルールベースによる負荷調整手法を選択する。

### 2.1 負荷調整の概要

設備負荷の調整では二つのステップで製品側の要求と設備側の制約を調整する。すなわち、納期や製造リードタイムの観点で、個々の製品から見て最良のタイミングで生産した流れを合成する設備負荷山積みを実行し、次に、山積み結果、設備能力を超過した負荷を制

約内で移動させる設備負荷山崩しを実施する。

#### 2.1.1 設備負荷山積み

設備負荷山積みでは、設備能力は考慮せず、納期や製造リードタイムのような製品側の条件を基に、各製品が通過する工程単位の作業の着手タイミングと処理量（時間）を積み上げ、必要となる設備の負荷を計算する<sup>4)</sup>。ここでは、以下の2種類の負荷山積みを行う。

##### 1) バックワード負荷山積み手法

本手法は、投入計画が未確定で見直しの余地がある未着手品に対して有効である。最終工程での作業の負荷山積み時間帯を決定した後、上工程へ遡りながら各工程の負荷山積み時間帯を決定する。各工程の山積み時間帯は、標準的な製造リードタイムを利用して決定する。その際、最終工程での負荷山積みタイミングを納期に同期させることで納期に対して最短で生産する生産計画が得られる。

##### 2) フォワード負荷山積み手法

本手法は、仕掛品や投入計画に見直しの余地の小さい未着手品に対して有効である。作業開始工程での負荷山積み時間帯を決定した後、下工程へ順に各工程の負荷山積み時間帯を決定する。開始工程の負荷山積み時間帯は、仕掛品であれば現在日を、投入日が確定している製品では投入日を基準に決定する。下工程の負荷山積み時間帯の決定は、標準的なリードタイムを用いて決定する。これにより、投入タイミングを起点に最短で生産する生産計画が得られる。

図3では、製品Aの負荷をバックワード負荷山積み手法で山積みし、製品Bの負荷をフォワード負荷山積み手法で山積みした結果を表している。このように、二つの手法を組合せることで理想的な生産計画を立案する。

#### 2.1.2 設備負荷山崩し

負荷山積みを行うことにより、納期を最大限満たして製造リードタイムが最小となる生産計画が得られるが、設備能力の制約を犯している場合がある。そこで負荷山崩しでは、作業の開始時間および作業を行う設備を1.2節で示した制約の範囲で変更することにより、設備負荷の超過を解消する<sup>4)</sup>。このとき、変更の対象となる作業や設備の候補は通常複数あるため、いかに山積み時の理想状態を維持し、山崩しする作業や設備の優先付けを行うかが重要となる。

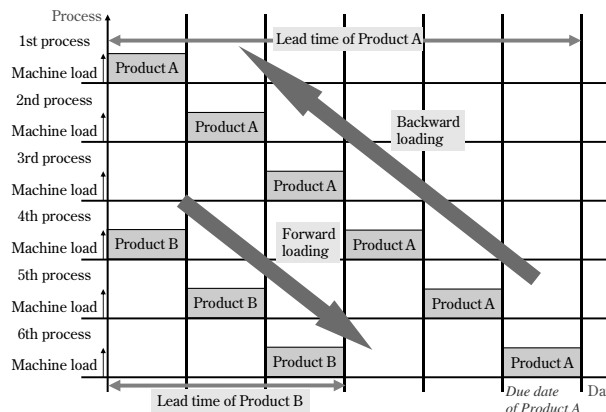


図3 負荷山積み手法の概要<sup>6)</sup>  
Fig. 3 Outline of loading method<sup>6)</sup>

負荷山崩し手法には余力を活用するバックワード負荷山崩し手法を採用することにより、納期を守りつつ過去方向の余力を活用する負荷調整を行う。それでも調整が不可能な場合にはフォワード負荷山崩しを行い、将来方向に負荷山崩しを行うことで最終的に実行可能な負荷計画を得る。なお、バックワード負荷山崩しには従来手法<sup>1)</sup>を活用するため、以下ではフォワード負荷山崩し方法について説明する。

## 2.2 設備負荷調整方法の詳細

設備負荷山積みの結果が設備能力制約に違反している設備・時間帯がある場合には、下工程の仕掛状況、納期までの余裕度から負荷山崩し優先度を決定する。この優先度に従い、作業負荷を「同一時間帯での代替設備」、「同一設備での異なる時間帯」の二つの山崩し先のいずれかに、材欠・納期遅れが発生しないように移動させる。ここで、同一設備での異なる時間帯に負荷を崩した場合には、前後の工程間時間の制約に違反が発生する場合があります。下工程の負荷も連鎖して崩す必要がある。そのため、他工程への影響がない同一時間帯での設備変更を優先する。負荷が能力を超過している設備・時間帯がなくなるまでこの山崩しを繰り返すことにより、設備負荷山積み時に犯していた設備能力制約を満たし、実現可能な生産計画を立案する。その際には、設備能力と納期の関係によっては山崩しの結果、納期遅れとなる製品が発生するが、以下で述べる優先度の決定方法により納期遅れを極小化する。

### 2.2.1 設備負荷山崩し優先度の決定方法

負荷山崩しする作業の優先順位の決定は、設備の効率稼働と製品ごとの納期順守の二つの観点で指標化した優先度を用いる。以下に計算方法を説明する。

#### 1) 各設備の仕掛量を基にした優先度の計算

設備の効率的稼働には、設備ごとの仕掛の偏りを抑制する必要がある。工程分岐がある場合には、どの設備向けの作業を優先するか、下工程設備の仕掛量を用いて指標化する。通常、仕掛量は重量で表現するが、とくに素材系工場の通板設備では同一重量でも板厚や品種などで処理時間が大きく異なるため、仕掛量は時間で表現することとする。加えて、現工程で処理したコイルが次工程の仕掛となるまでには運搬・冷却などの時間が必要となるため、下工程の仕掛量を考慮するには一定の期間で見る必要がある。

例えば、設備αで処理する製品には、次工程が設備βと設備γの2種類存在するとする。ここで、製品A, Eは設備βで処理され、製品b, c, d, f, gは設備γで処理されるとする。図4は工程1(設備α)での処理日9/2が山崩し対象として選択され、ここに積まれている四つの製品(A, b, c, d)から山崩しする製品を決定する状況を示している。その際、設備βでは、処理日9/2は設備能力と同等の仕掛があるが、処理日9/3は前工程から到着する製品がAしかなく、負荷山積み時点で処理日9/3に材欠が発生する計画となっている。設備γは逆に、処理日9/2の仕掛や処理日9/3に前工程から到着する製品の作業負荷は能力を超えている。この場合、設備αの製品Aを山崩しする(処理日を9/3に繰延べると、その余波で設備βでの製品Aの処理日が9/4となり、処理日9/3のスループットが減少する。このため、負荷山崩しの優先度は、製品Aを低く、製品b~dを高くするように決定する。この考え方をモデル化すると以下のようになる。

優先度 = (対象期間内での初期仕掛量[h] + 予想到着仕掛量[h]) / 対象期間内の設備能力総量[h]

ただし、対象期間は、負荷山崩しの対象時間帯から次

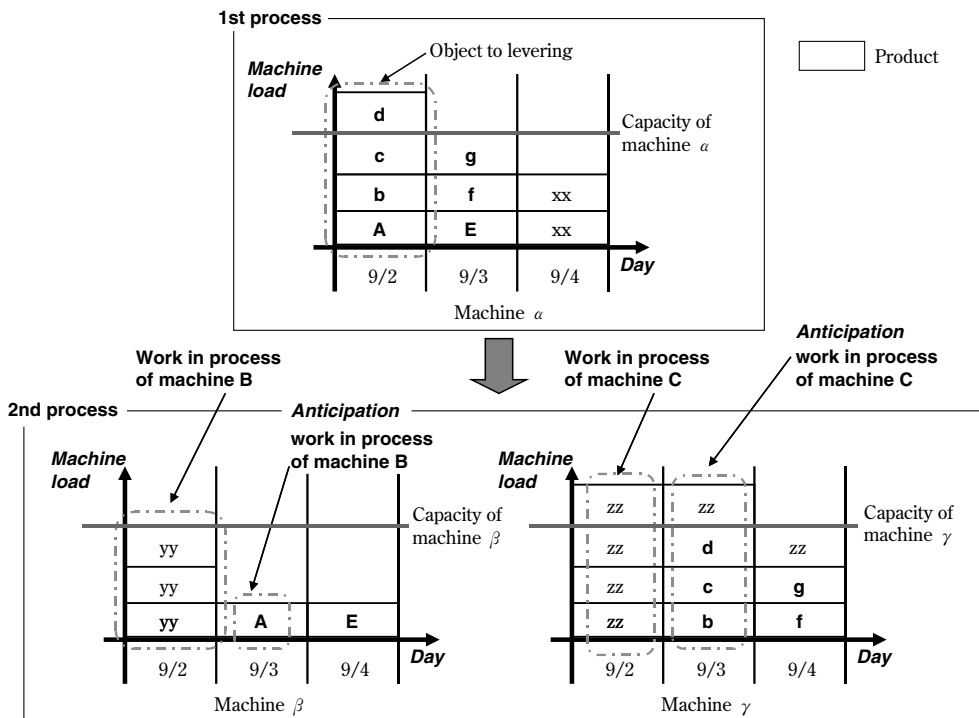


図4 負荷山崩し優先度の決定方法  
Fig. 4 Determination method of leveling priority

工程の処理時間帯までである。

この優先度と、設備ごとに設定した二つの基準値 (MIN・MAX) により、次の3段階に規格化する。

- ・仕掛過剰 (優先度が基準値 MAX 以上)
- ・仕掛過小 (優先度が基準値 MIN 以下)
- ・仕掛適正 (優先度が基準値MINと基準値MAXの間)

通常、仕掛量の管理は外乱や設備トラブルなどを考慮し、固定値でなく一定の範囲内に収めることを目標とする。そこで、上記のように規格化することで、実際の工場運営には影響を与えない細かい違いを吸収させる。また、ネック設備では仕掛を多めに保有する、あるいは、能力に余裕がある設備は仕掛を多く持ちすぎない、といったように設備ごとに基準値を設定することが可能である。

## 2) 製品の納期を基にした優先度の計算

最終工程に設定される納期に対する上流工程での遅れ/進み度合いに応じて優先度を変えるため、以下に定義する製品・工程ごとの納期までの余裕度を用いる。

$$\text{余裕度} = \text{納期} - \text{対象設備の処理予定日} - \text{一残工程の標準製造リードタイムの総和}$$

上記1)、2)の二つの優先度を計算した後は仕掛に基づく優先度で候補を絞り、その中から納期に基づく優先度で山崩しする作業を決定することによって生産性と納期を考慮した負荷調整を行うことが可能となる。

## 2.3 バッチ処理設備での負荷調整

バッチ処理設備では、温度のような処理条件と設備の容量 (同時に処理可能な最大数) から、同時に処理する製品と割り当てる設備=ロットまとめを決定する必要があるが、これらと負荷調整を同時に行うことは決定変数が多くなり、現実的な時間での求解が困難となる。

このような一括では解くことが難しい問題に対しては、決定項目ごとに分割して解く手法が知られている<sup>5)</sup>。そこで、ロットまとめと負荷調整を分割して計算する手法を提案する (図5)。具体的には以下の3ステップをとる。

## 1) マクロな負荷調整による処理希望時間帯の設定

最初に、工場全体の生産の流れを整えるため、バッチ処理設備を通常の通板設備とみなし、粗々の負荷調整を行う。その際、一つの製品の処理時間は、

バッチ処理時間/その設備での最大処理個数と近似してバッチの多重度を反映させる。この結果を処理希望時間帯として、以降の優先度に利用する。

## 2) マクロ計画を乱さない範囲でのロットまとめ

マクロな負荷調整を行うことで得られた各製品・工程の処理希望時間帯が一定の範囲に属する製品同士でロットまとめを行う。ここで、希望時間帯の許容範囲を大きくすればロットは形成されやすい反面、設備前での待ち時間が発生して生産性の低下や納期遅れが発生しやすくなる。逆に、許容範囲を過度に小さくすればロットサイズが小さくなって生産性が下がる。そのためこの許容範囲は、バッチ処理設備に応じて事前にオフラインで検証して決定する。

## 3) ロットまとめを考慮した負荷調整

前ステップで決定したロットまとめ結果を基に、「同一ロットに属する製品は、所定の設備で同一時間帯に処理する」という制約を追加する。そして、ステップ1の設備負荷調整を再度実行することで同一ロットに属するコイルは同時帯にバッチ処理設備に届くように負荷が調整される。

これら3ステップにより、バッチ処理設備でのロットまとめ制約を考慮し、可能な限り納期を順守し、工場全体の生産性を確保する設備負荷調整が可能となる。

## 3. 計算機実験

本章では、提案手法の有効性を確認するために実施した計算例について述べる。

### 3.1 問題例

ここでは銅板工場を例に問題を作成した。1章で述べたように、銅板工場は複雑な生産ラインを有し、生産対象も多品種少量であり、生産計画立案が難しい工場であ

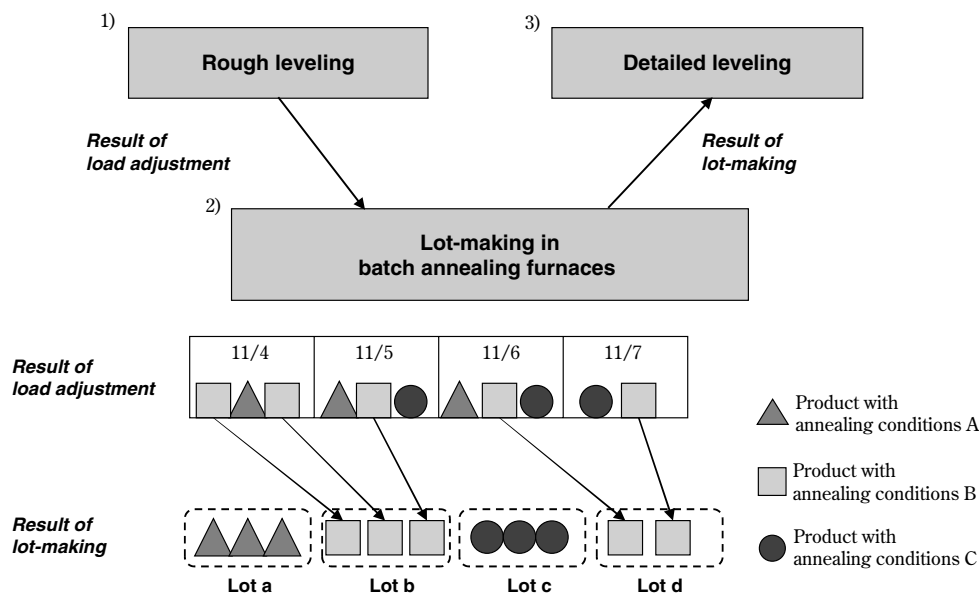


図5 ロットまとめ手法の概要

Fig. 5 Outline of lot-making

る。特徴的なデータを表1に示す。

なお、各製品は、全て1から製造するのではなく、既に仕掛っている製品仕様によって通過工程数が異なるものがある。このため、製品によって通過工程数は異なる。設備負荷計算では、この約6,000の通過工程の処理日、および処理設備を決定する。なお、仕掛に基づく優先度の設定とバッチ処理向けの負荷調整による工場全体の整流化の有効性を確認するため、負荷山崩し時に納期のみを考慮していた従来手法<sup>1)</sup>による結果と比較する。なお、スループットを比較するため、従来手法においてもバッチ処理設備におけるロットまとめは考慮した結果を用意している。

### 3.2 結果と考察

図6は提案手法と従来手法において、1箇月間の工場全体の累積スループット（生産が完了した注文重量）を示した図である。ここで、スループットは対象期間内の生産総量を1.0として規格化している。

この図によれば、10日ごろから従来手法と提案手法のスループットに差が開いてきている。従来手法はスループットの伸びが鈍化しているのに対し、提案手法は一定率で伸びている。各設備の能力に時間的な変動は与えていないため、以下の理由で提案手法の生産性が向上したと考えられる。

提案手法では、分岐工程において仕掛が多い設備への供

給が抑制され、逆に仕掛が少ない設備への供給が優先された結果、処理する製品がない材欠の発生が抑制される。とくに19日目では、スループットに16%の差が生じており、生産計画立案時に作業の優先度を制御することによって工程内の様々な箇所が発生していた機会損失が抑制されたためであると考えられる。

この作業の優先度を制御する手法を用いることにより、計画熟練者と同等の生産性を持ち、かつ10倍の計画期間（20日間）の生産計画を数十分の1の計算時間（数分）で立案することができる。これにより、より将来を見通した設備の休止計画や要員配置の検討を行うことが可能となる。

むすび＝代替設備、工程の分岐・合流、バッチ処理など、素材加工系特有の生産ラインでの設備負荷調整方法について述べた。とくに分岐工程において、負荷を山崩しする作業の決定時に対象工程の下工程の仕掛状況を考慮することによって工場全体の物流整流化を実現する設備負荷計画を立案する手法を提案した。

また、銅板工場のデータを用いたケーススタディを行い、バッチ処理設備を含む製造ラインに適用可能であること、物流整流化機能によりスループットが向上することを確認した。

今後は、まず負荷調整の結果を日々の作業指示につなげるための機能拡張により、作業指示作成業務の効率化による省力化を実現する。その後、工場への素材供給計画へのフィードバックによる余剰仕掛削減によるフリーキャッシュの創出、迅速かつ高精度な納期回答への活用による顧客満足度向上、および設備の稼働・休止計画の事前検討による最小限の設備稼働によるコストダウンなど、生産管理業務全体の高度化に寄与してゆく。

表1 例題のパラメータ<sup>6)</sup>  
Table 1 Parameters of example<sup>6)</sup>

Number of products	Number of processes	Number of type of processes	Number of machines	Number of batch annealing furnaces
1,000	6,000	20	40	10

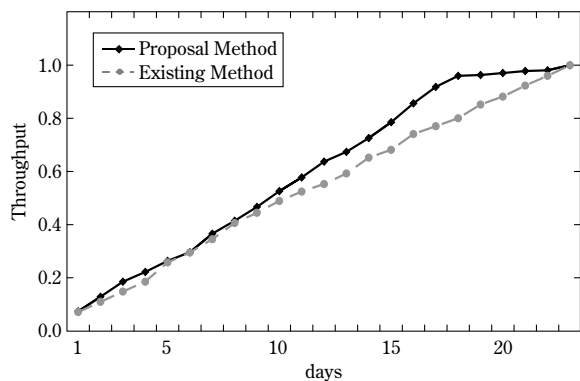


図6 スループットの計算例<sup>6)</sup>  
Fig. 6 Results of throughput<sup>6)</sup>

### 参考文献

- 1) 井本考亮ほか. 第52回システム制御情報学会研究発表講演会, 2008-5-16/17/18, p.91-92.
- 2) 田中俊二. システム/制御/情報. 2010, Vol.54, No.10, p.385-391.
- 3) 榎原一紀ほか. システム制御情報学会論文誌. 2004, Vol.17, No.6, p.257-263.
- 4) 日本経営工学会(編集). 生産管理用語辞典. 第1版, 日本規格協会, 2002, p.440.
- 5) 黒瀬伸二ほか. 日本機械学会論文集(C編). 2010, 76巻, 772号, p.24-29.
- 6) 井本考亮ほか. 第54回自動制御連合講演会, 2011-11-19/20, 計測自動制御学会, 2011, p.229-232.