

# 加工時間変動に対して頑健な ジョブショップ・スケジュールの新しいタイプ

松浦 春樹

## 要 旨

古典的ジョブショップ・モデルにおいて、総所要時間が短くかつ加工時間変動に対して頑健なスケジュールを生成する方法論の基礎として、ノンディレイ・スケジュールの部分集合であるスケジュールの新たなタイプを提案した。新たなタイプは、フローショップにおける順列スケジュールを、ジョブショップへ拡張したものとなっている。セミアクティブ、アクティブ、ノンディレイ、および提案の各スケジュールのタイプ間を、加工時間が変動したときに個々のスケジュールがどのように推移するかについて、スケジュールを総列挙することによって調べた。これによって、新たに提案したタイプのスケジュールが、他のタイプのスケジュールと比較して、実験の範囲内において評価尺度に対してより効果的、かつ加工時間の変動に対してより頑健であることを示した。新たなタイプは、変動する環境下で頑健かつ有効なスケジュールを提供する基礎となる。

キーワード：スケジュールのタイプ、ノンディレイ・スケジュール、加工時間の変動、スケジュールの頑健性、順列スケジュール、FCFS

## 1. はじめに

本研究の目的は、一定のスケジュール性能をもち、かつ生産環境の変動に対して頑健なスケジュールを生成するための方法論を提供することにある。古典

的ジョブショップ・モデルにおいて、総所要時間が十分に短く、かつ加工時間変動に対して頑健なスケジュールの新しいタイプを提案する。このタイプは、ノンディレイ・タイプよりも小さなスケジュール集合をなす。

スケジューリングとは、広い意味で、生産計画の立案行為一般を意味するのに対して、狭い意味では、所与の機械群に対して、その機械群を利用するジョブ群を、与えられた評価尺度を満たすように順序付けする行為のことである。本研究では、狭い意味でのスケジューリングを取り扱う。広い意味でも、狭い意味でも、スケジューリングの巧みさは、オペレーションレベルでの企業競争力の要因となっている。スケジューリングが拙劣であれば、生産現場は混乱し、納期遅れが頻発し、企業の競争力の低下を招き、最終的には利害関係者全体にマイナス影響を及ぼす。

このように重要なスケジューリング問題であるが、静的な環境を扱うものと動的な環境を前提とするものがある。静的な環境を前提とする問題でさえも、理論的には、後述する計算の複雑性の観点から、実務的には、考慮すべき要因が多いために、状況に最も適合した方策を数学的に厳密に導くことは難しいとされている。

生産システムを取り巻く環境には、計画内外の変動がつきものである。あるスケジューリング問題が前提とする環境も、現実の生産の場では時々刻々変化すると考えるのが正しい。これらの変動には、加工時間の変動、加工経路の変更、納期の変更、新たなオペレーションあるいはジョブの追加などがある。その原因は、見積もり誤差、機械や作業者の状況、加工方法の変更、手直しの発生、仕様変更、社内外からのジョブ優先度の変更などである。このような環境を前提とするのが動的なスケジューリング問題である。

本研究は、加工時間が変動する動的な環境下でのスケジューリング問題を対象とする。ここで、「加工時間の変動」とは、実行時に現実に必要な加工時間が、スケジュール作成時に使った加工時間と、見積もり誤差や機械故障が原因となって、食い違うことを想定している。ランダムショップにおいて、スケジュールの統計的性質が加工時間の変動に対してばらつかないスケジュールのタイプを求め、計画外の変動に対して柔軟なスケジュールの生成手段を提供するための基礎を提供する。

本論文の構成は、以下のとおりである。スケジューリング問題と本研究の位置づけを明示した上で、有望な新しいスケジュールのタイプを提案する。このタイプのスケジュールが、評価尺度が良好なスケジュールを効率良く拾い出しており、かつ加工時間の変動に対して頑健であることを、実験的に示している。

## 2. スケジューリング問題と本研究の位置づけ

スケジューリング問題を初めて系統的に取り扱おうとしたのは、ガントとされる[9]。ガントは、機械ごとのジョブの進行状況をひと目で把握できる図を、科学的管理法などによる米国の生産革新の時代、1910年代に開発した。これはガントチャート（図1(b)、(c)）として、今日も実務に様々な形で活用されている。スケジューリング問題の理論的研究の口火を切ったのは、1954年のJohnson論文[5]である。1967年には、Conwayら[3]によってそれまでの成果がまとめられた。Johnson以後、膨大な量の論文が書かれて今日に至っている。しかしながら、これらの理論的論文による現実のスケジューリング問題に対する貢献は薄いとされている。理論的には、1970年代に生まれた計算の複雑性の理論によって、非常に簡単な場合ですら、厳密解を実際上有効な時間内に求めることができないことが明らかになった。

スケジューリング問題の理論的研究は、主として静的問題に対して、ある評価尺度の下での最適解を厳密あるいは近似的に求める方法論、すなわちアルゴリズムを提供しようとするアプローチと、静的および動的問題に対して所与の条件の下でヒューリスティクスの性能をシミュレーションで検証しようとするアプローチの2つに大別できる。また、理論的基礎的研究に加えて、人工知能などのコンピュータ科学の成果に基づいて、スケジューリングシステムを構築しようとする応用的研究も、盛んに行われている。

スケジューリング問題は、機械とジョブの性格から、フローショップ問題とジョブショップ問題に大別される。フローショップとは、個々のジョブの機械利用順序が、ジョブ群で同一であるような、機械とジョブの職場（ショップ）を言う。また、ランダムショップとは、機械利用順序がジョブごとに相異なるような機械とジョブの職場を言う。ランダムショップのスケジューリング問題

は、最適解を求めようとするときとりわけ困難度が高い。

先に述べたように、生産システムを取り巻く環境は時々刻々変化する。したがって、変動前にある評価尺度の下で最適あるいはこれに準ずるスケジュールも変動後に保証はなくなる。このような状況に対する考え方には、2とおりがあある。第一は、変動が起きるたびに再スケジュールを行うとの立場である。この立場の背景には、現在も進行中のコンピュータのハードウェアおよびソフトウェアの急速な進歩がある。第二は、変動に対して頑健なスケジュールあるいはスケジュールリング方式を用意しようとする立場である。

第二の立場からその利点を述べれば、とくに人が介在する生産システムの、現場に与える混乱がより少ないことにある。頻繁に起きる大きなスケジュール変更は、前提である変更を可能にする柔軟性に富む機械設備への高額投資の必要性、結果としての仕掛在庫の増大、準備段取り作業の新規発生による効率の低下、作業担当者の見通し・心算を破壊することによる計画への不信感、システムに使われているとの疎外感などを生む。第二の立場では、このような弊害を避けることができる。第二の立場からのスケジュールリング研究[6]、[7]は、従来少なかったが、柔軟性の研究[10]が盛んになると連動したものか、近年になって急速に立ち上がってきた。この分野を詳細にまとめたサーベイ論文としてAytugら[1]がある。本研究は、第二の立場を背景とする。

生産現場の環境が常に変動することを考えると「最適な」単一のスケジュールを生成する能力を見るよりも、頑健性を重視する必要がある。頑健性はアルゴリズムの生み出すスケジュールの統計的性質がばらつかないことにかかなりの程度還元できる。この意味で、生み出すスケジュールのタイプの統計的性質を巨視的に研究する必要がある。換言すれば、詳細に規定された環境での最適スケジュールではなく、変動する環境の中での良好なスケジュールは統計的に頑健な性格をもつ必要がある。たとえば、本研究で対象とするように、加工時間が当初の計画時よりも大きく変動しても、当初スケジュールを維持できる可能性がより高い。

### 3. スケジュールのタイプ

Baker[2]はスケジュールのタイプとして、セミアクティブ (Semi-active)、アクティブ (Active)、ノンディレイ (Nondelay) の3つのタイプを定義している。これらのタイプのスケジュール例をガントチャートにて図1(b)(c)に示す。

図1(a)に示すとおり、この例題では、職場はM1からM3までの3種類の機械からなる。スケジュールの対象となるのはJ1からJ3までの3つのジョブである。いずれのジョブも3つのオペレーションからなっており、各オペレーションの完了に必要な加工時間は加工時間表に与えられたとおりである。各オペレーションに必要な機械は、加工経路表に示されたとおりである。

セミアクティブ・スケジュールは、時間原点を左端とするガントチャート上で、割り当てられている任意のオペレーションにつき、他のオペレーションを右から左に飛び越すような移動 (Global Left-shift) を禁止するが、他のオペレーションを飛び越さない限り全てのオペレーションを左に詰める (Local Left-shift) ような実行可能なスケジュールである。図1(b)は、セミアクティ

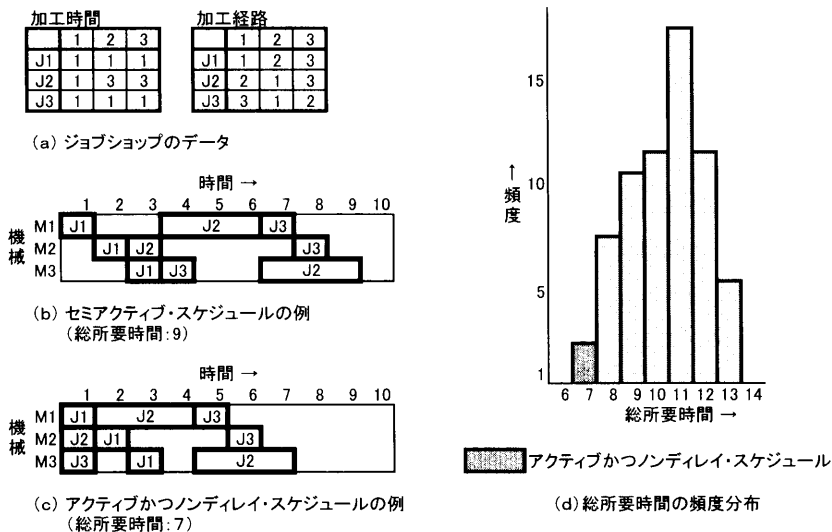


図1 ガントチャートによるスケジュール例と総所要時間の分布

ブ・スケジュールの例である。図1(b)において、たとえば、J2の第1オペレーションは、M2に割り当てられたJ1の第2オペレーションを飛び越して右に移動可能なのである。

アクティブ・スケジュールは、ガントチャート上で左へのオペレーション飛び越しの余地を残さないスケジュールである(図1(c))。ノンディレイ・スケジュールは、加工可能なオペレーションがある場合、必ず加工に着手し、機械を空けない実行可能なスケジュールである。

アクティブタイプのスケジュール集合もノンディレイタイプのスケジュール集合も、セミアクティブタイプのスケジュールの部分集合をなす。アクティブタイプのスケジュール集合は、意味のない遊休時間を含まない全てのスケジュールの集まりであり、必ず最適スケジュールを含む。ノンディレイタイプのスケジュールの集合は、必ずしも最適スケジュールを含まない。

アクティブタイプのスケジュール集合は、必ず最適スケジュールを含む集合であるが、総数があまりにも大きく、総列挙によりこの中から最適スケジュールを探すことは実際問題として不可能である。ジョブ数を $n$ 、機械台数を $m$ とするときランダムショップの総列挙数は、最大 $(n!)^m$ となる。古典的ジョブショップ問題では、機械1台につき $n!$ のジョブの順列組み合わせが発生するからである。実際には、加工順序の制約が入るため実行可能なスケジュール総数は、これより少なくなる。これに対して、ノンディレイタイプのスケジュール集合は、必ずしも最適スケジュールを含まないが、より小さな集合で、この中には実際問題として良いスケジュールが含まれる。ノンディレイタイプのスケジュール集合を探索の対象にすることが実務的には合理的な選択肢の一つとされている(図1(d))。

図2に、スケジュールのタイプと最適解の集合関係を示す。

ランダムショップの現実に意味をもつスケジュールのタイプは、以上のようにアクティブもしくはノンディレイのスケジュールであるとして、セミアクティブタイプのスケジュール集合については、多くの場合実際の意味がないとされ、従来はほとんど取り扱いの対象とされてこなかった。本研究では、加工時間の変動に対するスケジュールの頑健性を調べるために、セミアクティブタイプのスケジュールも本格的に取り扱っている。

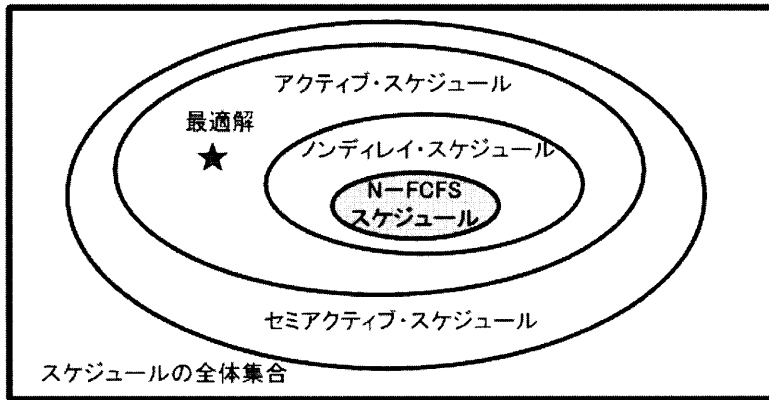


図2 スケジュールのタイプと最適解の集合関係

### 3. N-FCFSスケジュールの提案とその意義

スケジュールを決める際の候補の集合として定評のあるノンディレイタイプのスケジュール集合であるが、集合要素数がまだまだ大きい点に限界がある。たとえば、著者が行った4機械5ジョブでのスケジュール総列挙実験によれば、セミアクティブ・スケジュール数が約10万、アクティブ・スケジュール数が約1000、ノンディレイ・スケジュールが約200であった。前述のとおり、機械台数 $m$ 、ジョブ数 $n$ のときの可能な順列組み合わせ数が $(n!)^m$ であることを考慮に入れると、機械台数あるいはジョブ数が増えるに従って、総スケジュール数は指数関数的に増えることから、ノンディレイタイプのスケジュール集合よりも、より小さい集合を与えるスケジュールのタイプが必要とされる。

一方、フローショップのスケジュールのタイプとして、順列スケジュールがある。順列スケジュールは、第1機械のスケジュールを第2機械以降でもそのまま踏襲するスケジュールの集合である。フローショップでは、これを探索の対象にすることが合理的な選択肢とされている(たとえば[4]参照)。2機械問題では、あらゆる評価尺度の最適スケジュールを含み、3機械問題では、総所要時間の意味での最適スケジュールを含むことが証明されている(たとえば[2]参照)。

フローショップはランダムショップの特殊な場合であるので、フローショップの順列スケジュールに相当するスケジュールはランダムショップで何かと考える。順列スケジュールをランダムショップに投影すると、各ジョブの第1オペレーションだけにつきノンディレイ総列挙スケジュールを生成し、第2オペレーション以降は、ディスパッチング・ルールの一つであるFCFS (First Come First Service) 限定のスケジュールを生成することに相当する。この方法で生成されるスケジュールをノンディレイ-FCFSスケジュール (以下N-FCFSスケジュール) と呼ぶことにする。N-FCFSタイプのスケジュール集合は、ノンディレイタイプのスケジュール集合の部分集合である。FCFSで生成されるスケジュールは、ノンディレイだからである。

N-FCFSスケジュールでの総列挙数は、各ジョブが第1オペレーションだけからなるとしたジョブショップでの総列挙数とほぼ同等になる。第1オペレーションだけの順序付けが決まると、各機械への同時到着 (ジョブのオペレーション加工同時終了) の例外を除けば、残りの順序付けが一意に決まるからである。

## 4. 数値実験モデル

### 4-1 ジョブショップの条件

古典的ジョブショップ・モデルを実験対象とした。古典的ジョブショップ・モデルでは、全てのジョブが職場を構成する全ての機械オペレーションを一回ずつ必要とする。したがって、ジョブが必要なオペレーション数は機械台数に等しい。職場の型は、ランダムショップである。

前述のように、機械台数、ジョブ数が増えるとスケジュール総数は、指数関数的に増える。したがって、実験が意味をもつ最小の機械台数、ジョブ数とした。すなわち、機械台数 $m$ を3、ジョブ数 $n$ を4とした。ジョブの加工時間は平均1の指数分布乱数から発生させた数値を切り上げた整数値に従うものとした。

古典的ジョブショップ問題において、セミアクティブ・スケジュールの全体集合は、与えられたジョブの加工経路条件により一意に決まり、ジョブの加工時間に関係しない[8]。ジョブの加工時間によって、セミアクティブ・スケジュー



ルの部分集合であるアクティブ・スケジュール集合、その部分集合であるノンディレイ・スケジュール集合、ノンディレイ・スケジュールの部分集合であるN-FCFSスケジュール集合の要素が変わる。ジョブショップの条件と、スケジュール集合、評価尺度の関係概念を図3に示す。

#### 4-2 数値実験の目的

数値実験は、2段階の解析からなっている。これら解析の意図は、以下のとおりである。解析Iでは、ノンディレイ・スケジュールあるいは新提案のN-FCFSスケジュールの集合が、総所要時間の意味で、最適値あるいはその周辺のスケジュールを小さく集めたとても良い集合であることを実験的に示す。解析IIでは、加工時間が変動する前のノンディレイ・スケジュールあるいは新提案のN-FCFSスケジュールは、加工時間が変動した後もノンディレイ・スケジュールあるいは新提案のN-FCFSスケジュールである可能性が高いことを示す。解析IおよびIIの結果より、ノンディレイ・スケジュールあるいは新提案のN-FCFSスケジュールは、総所要時間の意味で良好かつ加工時間変動に強いスケジュールであることを示そうとしている。

#### 4-3 解析I：総列挙によるノンディレイおよびN-FCFSの優位性

セミアクティブ・スケジュールを総列挙することによって、ノンディレイ・スケジュールおよびN-FCFSスケジュールの優位性を確認する数値実験を行った。筆者の知る限り、従来の研究による、ノンディレイ・スケジュールの有効性の指摘は、アクティブ・スケジュールからのサンプリング結果に基づいており、本研究のようにセミアクティブ・スケジュールを総列挙するものではない。加えて、本研究では、N-FCFSスケジュールを提案し、有効性を検証している。

総列挙に際しては、アクティブ、ノンディレイのタイプのスケジュールについては、Baker[2]によるアルゴリズムを使用した。セミアクティブ・スケジュールについては、著者の調査の範囲において、重複なく総列挙するアルゴリズムは提案されていない。この理由は、従来の研究では、セミアクティブ・スケジュールを総列挙することに意義を認めなかったことにあると考えられる。本研究では、加工時間の変動によるタイプ間の移動を問題にするので、セミアクティブ・

スケジュールを総列挙することに意義がある。したがって、十代田[11]による順列総列挙アルゴリズムで可能性のある加工順序を発生させ、実行可能なものをセミアクティブ・スケジュールとした。

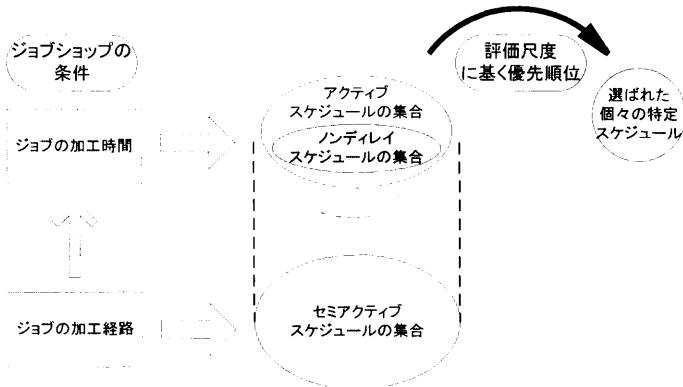


図3 ジョブショップの条件、スケジュールのタイプ、特定スケジュールの関係

優位性を示す評価尺度としては、古典的ジョブショップ問題で最も一般的な総所要時間（着手から全てのジョブが完了するまでの時間）とした。

#### 4-4 解析Ⅱ：加工時間変動によるスケジュールのタイプの安定性

ノンディレイとN-FCFSタイプのスケジュールの加工時間変動に対する頑健性を調べることを目的として、加工時間が変わった場合に、個々のスケジュールが、セミアクティブ、アクティブ、ノンディレイ、N-FCFSのスケジュール・タイプ間を移動する割合を実験的に調べた。この実験の目的はノンディレイ、N-FCFSのスケジュールが一般的に、加工時間の変動に頑健であることを示すことにある。

ジョブの加工順序はそのままにして、加工時間だけを再設定した。指数乱数より発生させた最初の加工時間を変動前とし、次に同様に発生させた加工時間を変動後の加工時間とした。変動前の加工時間に基づいて、セミアクティブ、アクティブ、ノンディレイ、N-FCFSのタイプ別に列挙できる全てのスケジュールを発生させた。変動後の加工時間についても同様に全てのスケジュールを発

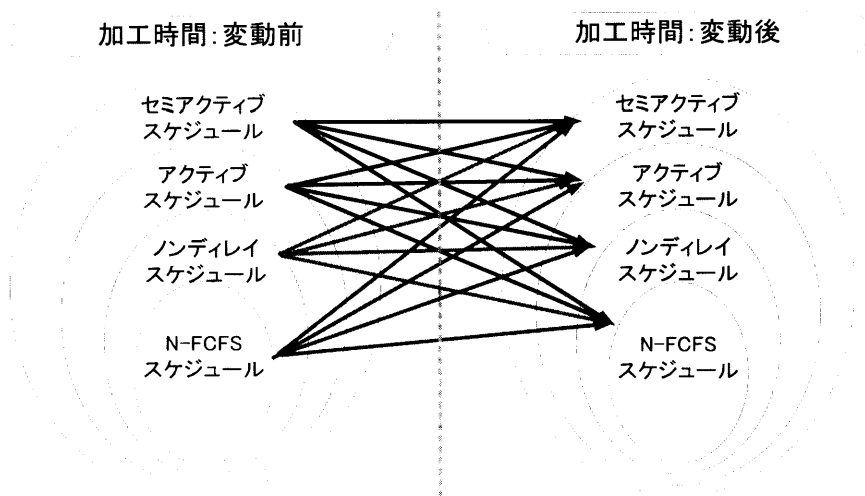


図4 加工時間変動後の集合内特定スケジュールのスケジュール・タイプ間推移

生させた。その上で、変動前の各タイプのスケジュールが変動後にはどのタイプに移っているかを実験的に調べた。図4にこの考え方を示す。

実験回数は、計算時間上の制約から、ジョブの加工順序制約について2とおり、加工時間は変動もジョブの加工順序制約一つにつき2とおりと最小規模の実験とした。

## 5. 実験結果

### 5-1 解析I：総列挙によるノンディレイおよびN-FCFSの優位性

表1に例題についての各タイプのスケジュール総数と総所要時間の解析結果を示す。総所要時間分布については、最小値、最大値、平均と標準偏差をまとめている。表1より、ノンディレイおよびN-FCFSタイプのスケジュール集合とも、総所要時間の大きなスケジュールを除外した総所要時間最小スケジュールを選ぶのに適した集合となっており、しかも、この例ではノンディレイおよびN-FCFSタイプのスケジュール集合に総所要時間最小のスケジュールが含まれていることがわかる。この事実はノンディレイ、とくにN-FCFSタイプのス

表1 タイプごとのスケジュール総数と総所要時間分布

(a)	加工時間Aによる	セミアクティブ	アクティブ	ノンディレイ	N-FCFS
	スケジュール総数	1860	49	8	3
	総所要時間の最小値	9	9	9	9
	総所要時間の最大値	25	19	10	9
	総所要時間の平均	18.38	12.90	9.50	9.00
	総所要時間の標準偏差	3.08	2.89	0.50	0.00

(b)	加工時間Bによる	セミアクティブ	アクティブ	ノンディレイ	N-FCFS
	スケジュール総数	1860	34	18	5
	総所要時間の最小値	6	6	6	6
	総所要時間の最大値	15	11	7	6
	総所要時間の平均	10.88	7.38	9.36	6.00
	総所要時間の標準偏差	1.85	1.63	0.48	0.00

加工時間A

	1	2	3
J1	4	3	2
J2	2	1	1
J3	4	1	1
J4	2	1	3

加工時間B

	1	2	3
J1	1	1	2
J2	1	1	1
J3	2	1	2
J4	1	1	1

共通加工経路

	1	2	3
J1	1	2	3
J2	2	1	3
J3	3	1	2
J4	2	3	1

スケジュール集合は、スケジュールを選ぶ際に非常に効率の良い集合であることを示す。機械台数およびジョブ数がもう少し大きい場合について、追加実験を行っているが、以上の結果は変わらない。また、表(a)も(b)も同一加工経路で加工時間だけが異なる場合であるために、先に述べたようにセミアクティブ・スケジュール集合は共通であり、したがってセミアクティブ・スケジュール総数は同一になっている。

### 5-2 解析Ⅱ：加工時間変動によるスケジュールのタイプの安定性

表1(a)を変動前、表1(b)を変動後とするときの、変更前のスケジュール・タイプからの推移数を表2(a)に、これの%表示を表2(b)に示す。表3は、ジョブの加工順序制約について2とおり、加工時間は変動もジョブの加工順序制約一つにつき2とおり、計4とおりによる実験による推移数(%)の平均値であ

表2 加工時間変動後のスケジュール・タイプ間推移 ((a)実数、(b)%表示)

(a)	加工時間変動前	加工時間変動後			
	スケジュールクラス	セミアクティブ	アクティブ	ノンディレイ	N-FCFS
	セミアクティブ	1860	34	18	5
	アクティブ	49	11	4	2
	ノンディレイ	8	5	4	2
	N-FCFS	3	2	2	2

(b)	加工時間変動前	加工時間変動後			
	スケジュールクラス	セミアクティブ	アクティブ	ノンディレイ	N-FCFS
	セミアクティブ	100.0	1.8	1.0	0.3
	アクティブ	100.0	22.4	8.2	4.1
	ノンディレイ	100.0	62.5	50.0	25.0
	N-FCFS	100.0	66.7	66.7	66.7

表3 加工時間変動後のスケジュール・タイプ間推移 (4 実験による平均、%表示)

	加工時間変動前	加工時間変動後			
	スケジュールクラス	セミアクティブ	アクティブ	ノンディレイ	N-FCFS
	セミアクティブ	100.0	2.8	1.2	0.3
	アクティブ	100.0	34.1	20.5	8.4
	ノンディレイ	100.0	50.1	36.9	16.5
	N-FCFS	100.0	66.0	58.8	49.2

る。

表2と表3では、縦軸が変動前のタイプ、横軸が変動後のスケジュール・タイプを表す。たとえば、表2(b)では、変動前にN-FCFSタイプのスケジュール集合内であったスケジュールが、変動後にN-FCFS集合内に残る割合が66.7%であったことを示す。変動前と変動後のセミアクティブ・スケジュール集合は同一であるので、変動前の各タイプのスケジュール集合から変動後のセミアクティブタイプ・スケジュール集合への推移は、100%となる(表2(b)、表3)。

表2および表3より、ノンディレイとN-FCFSからノンディレイもしくはN-FCFSタイプのスケジュール集合への推移割合は相対的に高いことがわかる。

これは、実験Ⅰによる、ノンディレイもしくはN-FCFSタイプのスケジュール集合が良いスケジュールの候補の小さな集合として有効である事実と併せると、総体的にノンディレイとN-FCFSタイプのスケジュールが総所要時間の意味で良好かつ加工時間変動に対する頑健性を有することを示すものである。

## 6. おわりに

本研究では、環境変化に対して頑健性の高いスケジュール生成方法を、できるだけ特定の評価尺度に依存しない形で検討することを考えた。対象は、古典的なランダムタイプのジョブショップとした。環境変化として、加工時間の変動を取り上げた。加工時間が変動する後先に、セミアクティブ、アクティブ、ノンディレイ、新たに提案するN-FCFS（ノンディレイ-FCFS）タイプの各スケジュール集合から個々のスケジュールがどのように各集合間を移動するかを総列挙法により実験的に調べた。その結果、ノンディレイおよび新たに提案したN-FCFSタイプのスケジュール集合が、加工時間の変動に対して安定度の高い集合であることが明らかになった。両集合は、たとえば総所要時間の小さいスケジュールをコンパクトにまとめた集合であることも総列挙法により確認した。これらの結果の意味するところは、ノンディレイおよび新たに提案したN-FCFS内のスケジュールは、総所要時間の意味で良好かつ加工時間変動に対して頑健である可能性が高いことである。

本研究により得られた成果を要約すれば、以下のとおりである。

(1) 評価尺度として総所要時間を例にとり、セミアクティブ、アクティブ、ノンディレイの各スケジュール・タイプについて、タイプのスケジュールを総列挙することによってノンディレイ集合が、評価尺度が良好かつより小さな集合であることを明確に示した。

(2) ノンディレイ集合よりも小さな、フローショップ・スケジューリングにおける順列スケジュールに相当するN-FCFS（ノンディレイ-FCFS）タイプのスケジュールを提案し、総所要時間の意味で良好な評価尺度のスケジュール集合であることを総列挙により実験的に示した。

(3) 個々のスケジュールについて、環境変化に対する頑健性を評価するので

はなく、スケジュールのタイプ全体について環境変化に対する頑健性を評価することを試みた。尺度として、スケジュールの環境条件に変化が起きたときに変化前のスケジュールのあるタイプ内のスケジュールが、変化後にどのスケジュールのタイプに遷移するかを考えた。具体的には、加工時間が変動するときに、スケジュールのタイプ間の推移を総列挙によって実験的に調べた。

(4) その結果、ノンディレイ・スケジュールが加工時間の変動後も、ノンディレイ・スケジュール集合にとどまる割合がより高いことを示した。N-FCFSスケジュールについても同様な結果を得た。これは、計画時に予定された加工時間が実行時の加工時間と食い違う場合に、ノンディレイあるいはN-FCFSスケジュールであれば、評価尺度の変動が小さい頑健性の高いスケジュールが得られる可能性が高いことを示す。

今後の課題として、実験規模を大きくすることによる結果の信頼性の向上と、ジョブショップの規模が大きくなった場合に、本研究により得られた知見がどの程度維持できるかの検証が必要である。また、頑健性が高く、評価尺度の良好な部分を拾い出せ、ノンディレイタイプのスケジュール集合の部分集合である、本研究で新たに提案したN-FCFSタイプのスケジュール集合について、効率の良い列挙方法あるいはヒューリスティクスの開発が待たれる。

## 参考文献

- [1] Aytug, H., Lawley, M. A., McKay, K., Mohan, S. and Uzsoy, R.: "Executing production schedules in the face of uncertainties: A review and some future directions". *European Journal of Operational Research*, Vol.161, No.1, pp.86-110 (2005)
- [2] Baker, K. R.: *Introduction to Sequencing and Scheduling*, John Wiley & Sons (1974)
- [3] Conway, R. W., Maxwell, W. L., and Miller, L. W.: *Theory of Scheduling*, Addison-Wesley (1967)
- [4] Framinan J. M., Gupta J. N. D. and Leisten R.: "A review and classification of heuristics for permutation flow-shop scheduling with makespan objective", *Journal of Operational Research Society*, Vol.55, No.12, pp.1243-1255 (2004)
- [5] Johnson, S. M.: "Optimal two- and three-stage production schedules with setup times included", *Naval Research Logistic Quarterly*, Vol.1, No.1, pp.61-68 (1954)
- [6] Matsuura, H., Tsubone, T. and Kanezashi, M.: "Sequencing, dispatching and switching in a dynamic manufacturing environment", *International Journal of Production Research*, Vol.31, No.7, pp.1671-1688 (1993)

- [7] Matsuura, H. and Kanezashi, M. : “Makespan comparison between resequencing and switching in a dynamic manufacturing environment”, *International Journal of Production Economics*, Vol. 44, Nos. 1-2, pp.137-149 (1996)
- [8] Morton, T. E. and Pentico D. W.: *Heuristic Scheduling Systems*, John Wiley & Sons (1993)
- [9] 木瀬洋 : “スケジューリング小史”、応用技術株式会社技術レポート、Vol.12、pp.1-2 (2001)
- [10] 松浦春樹 : “生産システムの緩衝と柔軟性について”、神奈川大学経営学部『国際経営論集』、No.35、pp.1-12 (2008)
- [11] 十代田三知男編著 : 「BASICによるシステム解析技法」、共立出版 (1988)