

## 修士論文の和文要旨

研究科・専攻	大学院 情報理工学研究科	知能機械工専攻 博士前期課程
氏名	鈴木 修太郎	学籍番号 1332039
論文題目	スケジュールの最適化に用いる評価関数に関する研究	
要旨	<p>多品種少量生産を実現するための生産システムとして、FMS(Flexible Manufacturing System)がある。FMSでは、同一の工程を複数のワークセル（以後セルと呼称）で実行できるようにすることで、多様な製品の生産の実現に加え、特急品の生産や機械の故障などにも柔軟に対応することができる。効率よく生産するためには工程ごとに適切なセルを用いる必要があるが、工程を担当するセルが変わると工程処理時間が変化する。そのため、少品種大量生産のように稼働率を上げてもリードタイムが一概に短くなるということが言えず、多品種少量生産に適した工程スケジュールの評価方法を用いる必要がある。</p> <p>工程スケジューリングに木空間探索を用いることで工程スケジュールの評価方法の値をもっとも良くする最適解を得ることができる。しかし、スケジューリングの規模が大きくなると最適解を見つけることが難しくなる。従って、部分解の評価を行い、解となる可能性が低い選択肢を切り捨てること有効である。この部分解の評価は、工程スケジュールの評価方法に適合している必要があるが、これまで本研究室のスケジューラでは部分解の評価にヒューリスティックな知識に基づいた評価方法しか用いられていなかった。</p> <p>そこで本研究では、FMSを用いた多品種少量生産の「工程スケジュールの評価方法」（以後評価指標と呼称）と、それに適合した「木空間探索中に部分解の評価に用いる評価方法」（以後枝刈り関数と呼称）について考察した。</p> <p>本研究では、評価指標として「リードタイムの総和」と「リードタイムの2乗の総和」を提案し、評価指標に適合した枝刈り関数と、評価指標を近似的に良くする枝刈り関数を提案した。少品種大量生産では「稼働率」もリードタイムと同じく工程スケジュールの評価方法として使われてきた。本研究では、稼働率を見直した結果、リードタイムの短縮と稼働率の上昇、低下に関連性がないことを示し、稼働率を評価指標として用いないこととした。</p> <p>実験では提案した枝刈り関数とこれまで使われてきたヒューリスティックな枝刈り関数を用いて生産オーダーの納期の条件を変えて工程スケジューリングを行った。その結果、生産オーダーの納期の条件によっては提案した枝刈り関数を用いることで既存のヒューリスティックな知識に基づく枝刈り関数を用いるよりも良い解を得ることができた。加えて、生産オーダーの納期の条件によって良い解を得ることができる枝刈り関数が変わることが分かった。</p>	

平成26年度 修士論文

スケジュールの最適化に用いる評価関数  
に関する研究

学籍番号 1332039  
氏名 鈴木 修太郎  
所属 情報理工学研究科 知能機械工学専攻  
研究室 情報基盤センター 高田研究室  
指導教員 高田 昌之  
提出日 平成27年2月27日

# 目次

第1章	序論	1
1.1	研究背景	1
1.2	目的	2
1.3	アプローチ	2
第2章	生産システムとスケジューリング	3
2.1	生産システム・FMS	3
2.2	スケジューリング問題の分類	4
2.2.1	単一機械スケジューリング問題	4
2.2.2	並列機械スケジューリング問題	4
2.2.3	フローショップスケジューリング問題	5
2.2.4	ワークショップスケジューリング問題	5
2.3	スケジューリング手法の分類	5
2.3.1	ディスパッチングルールによる手法	5
2.3.2	木探索による推論とヒューリスティックによる手法	5
2.3.3	メタヒューリスティックによる手法	6
2.4	フォワードスケジューリングとバックワードスケジューリング	7
2.4.1	フォワードスケジューリング	7
2.4.2	バックワードスケジューリング	7
2.5	スケジュールの表現方法	8
第3章	本研究で行う工程スケジューリングについて	9
3.1	評価指標	9
3.1.1	評価指標の候補	11
3.1.2	評価指標の選定	12
3.2	枝刈り関数	15
3.2.1	枝刈り関数2	16
第4章	実験	18
4.1	実験環境と実験条件	18

4.1.1	実験環境	18
4.1.2	生産システムの入力データの条件	18
4.1.3	生産オーダーの入力データの条件	19
4.1.4	予備実験	19
4.2	実験 1	21
4.2.1	実験 1 で用いた入力データ	21
4.2.2	実験 1 の結果	21
4.2.3	ワークのリードタイムの平均値と標準偏差	23
4.2.4	工程処理時間の総和、工程待ち時間の総和、納期待ち時間の総和の平均値	26
4.2.5	ワークの工程処理時間の平均値	30
4.2.6	実験 2	32
4.2.7	実験 2 で用いた入力データ	32
4.3	実験 2 の結果	33
4.3.1	リードタイムの平均値と標準偏差	35
4.3.2	工程処理時間の総和、工程待ち時間の総和、納期待ち時間の総和の平均値平均値	37
4.3.3	ワークの工程処理時間の平均値	40
<b>第 5 章</b>	<b>考察</b>	<b>44</b>
5.1	枝刈り関数の精度	44
5.2	セルの工程処理時間について	46
<b>第 6 章</b>	<b>結論</b>	<b>47</b>
6.1	研究成果	47
6.2	今後の展望	47
	謝辞	48
	参考文献	49
<b>補足 A</b>	<b>実験結果</b>	<b>50</b>
A.1	実験 1	50
A.1.1	ワークごとのリードタイムの平均値と標準偏差	50
A.1.2	ワークの工程処理時間の平均値と標準偏差	60
A.2	実験 2	70
A.2.1	ワークごとのリードタイムの平均値と標準偏差	70
A.2.2	ワークごとの工程処理時間の平均値	80

# 第1章

## 序論

### 1.1 研究背景

多品種少量生産を実現するための生産システムとして、FMS(Flexible Manufacturing System)がある。FMSでは、同一の工程を複数のワークセル(以後セルと呼称)で実行できるようにすることで、多様な製品の生産の実現に加え、特急品の生産や機械の故障などにも柔軟に対応することができる。しかし、セルごとに工程処理時間が変わることで、二つの問題が発生する。一つ目が効率よく生産するためには工程ごとに適切なセルを用いる必要があるので、工程スケジュールが複雑化すること。もう一つが少品種大量生産や工程処理時間が同じセルを用いた時とは違い、少品種大量生産の工程スケジュールの評価方法を準用することが適切であるとは限らないことである。

工程スケジュールが複雑化することに対しては、計算機を用いた工程スケジューリングが有効である。この工程スケジューリングに木空間探索を用いることで最適解を得ることができる可能性が高くなる。しかし、木空間探索はスケジューリングの規模が大きくなると解を見つけることは難しくなる。そのため、探索途中で部分解の評価を行い、解となる可能性が低い選択枝を切り捨てることの方が有効である。この時、選択枝の切り捨ては、得たい解の良し悪しを基準にして行われる。この得たい解の良し悪しは、前述した多品種少量生産に適した工程スケジュールの評価方法に基づいて判断する必要がある。

しかし、これまで本研究室のスケジューラでは部分解の評価にヒューリスティックな知識に基づいた評価方法しか用いられていなかった。従って、経験則適に良いとされる解を得ているだけであり、解との間に厳密性はなかった。だが、部分解の評価に厳密性がなければ正しく選択枝の切り捨てを行うことができず、最悪本来であれば切り捨てるべき選択枝を探索してしまい、悪い解が出てくる可能性がある。

そこで本研究では、どのような工程スケジュールの評価方法がセルごとに工程処理時間が異なるFMSにおける多品種少量生産の工程スケジュールの評価方法として適しているかを考察すると共に、それに適合した工程スケジュールの部分解の評価方法を

提案する。

## 1.2 目的

同じ工程でもそれを処理するセルによって工程処理時間が異なるようなFMSにおいて、工程スケジュールに適した評価指標とその評価指標に基づいた枝刈り関数を提案する。

## 1.3 アプローチ

本研究では、木空間探索を用いて工程スケジューリングを行う。木空間探索では、探索中に部分解を評価することで、選択枝の切り捨て、すなわち枝刈りを行う。本研究では、この枝刈りに用いる評価方法を枝刈り関数と呼ぶ。これに対し、完成した工程スケジュールの評価方法を評価指標と呼ぶ。

木空間探索中に部分解を評価する際には、工程スケジュールは未完成状態である。従って、完成した工程スケジュールの評価の評価方法である評価指標をそのまま枝刈りに適用することはできない。そこで、本研究では評価指標を元にした評価指標と相関の強い枝刈り関数を用いる。これにより、部分解の評価が適切に行われ、求める評価指標の良い工程スケジュールを作成できると考えられる。

## 第2章

# 生産システムとスケジューリング

本章では本研究がモデルとする生産システムFMSについての概要とスケジューリング問題の分類と問題解決の手法など、本研究に関わる予備知識について述べる。なお、以後工程において処理されるものを“ワーク”と呼ぶ。

### 2.1 生産システム・FMS

FMSとは、多品種少量生産に適した生産システム“Flexible Manufacturing System”の頭文字をとった呼称である<sup>[1],[2]</sup>。FMSのシステムの内容は多様化しており、代表的な例として次のようなものを備えていることが多い。

- 一つ、もしくは複数のNC工作機械を用いたワークセル
- 加工ワークの自動着脱装置
- 工程間の自動搬送装置
- 加工ワークを貯蔵するストッカまたは自動倉庫
- これらを総合的に管理・制御するコンピュータシステムおよび運用ソフトウェア

FMSの明確な定義はなく、一般に上記のようなものなどから構成される生産性と柔軟性を兼ね備えた生産システムがFMSと呼ばれる。Fig. 2-1にFMSの模式図を示す。FMSには次のようなことが期待されている。

- 加工ワーク、工程、生産数量などの多様化に対処すること
- 複数のワークの同時並行処理によってリードタイムを短縮すること

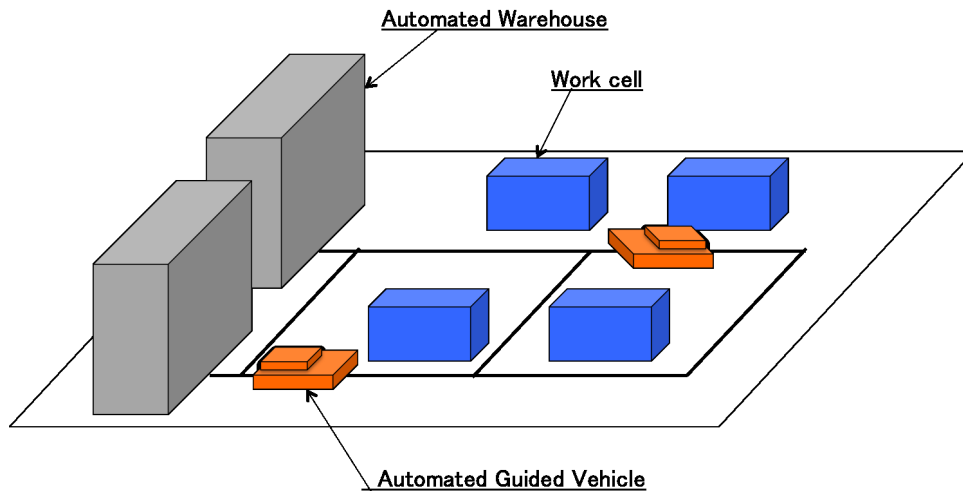


Fig. 2- 1: FMS の模式図

- 夜間や休日の無人運動を行うことによって、高い労働生産性を得ること
- 生産状態の変動に対する柔軟な対応ができること

## 2.2 スケジューリング問題の分類

スケジューリング問題とは、与えられた要素群を条件に合わせて最適となるように順序を決定する「組み合わせ最適化問題」である。特に生産設備の構成によって次のような生産システムのスケジューリング問題があげられる<sup>[1],[2],[3]</sup>。

### 2.2.1 単一機械スケジューリング問題

一つの生産工程で完成するワークを対象としたスケジューリング問題である。このスケジューリング問題では、ワークの生産順序はその投入順序と決まる。従って、ワークの投入順序を決定する問題である。射出成形工程や化学製品の製造工程などがモデルとなっている。

### 2.2.2 並列機械スケジューリング問題

複数ある同種類の生産設備を用いて加工されるワークを対象としたスケジューリング問題である。ワークはこれらの生産設備のいずれかを用いて処理されるが、処理可能な生産設備が一部に限られてもよい。加工するワークをどの生産設備で処理するか、それぞれの生産設備での生産順序をどのようにするのかを決定する。複数台のNC工作機械を用いてサイズの異なる部品を加工するような場合がモデルになっている。



### 2.2.3 フローショップスケジューリング問題

各ワークが同じ工程で完成する生産設備を対象としたスケジューリング問題である。各生産設備での加工時間を考慮して、加工対象物の投入順序を決定する。ライン生産方式を採用している工場などがモデルになっており、このような生産設備をフローショップと呼ぶ。

### 2.2.4 ワークショップスケジューリング問題

ジョブショップスケジューリング問題とも呼ばれる。各ワークが異なる生産工程を経て完成する生産設備を対象としたスケジューリング問題である。工作機械メーカーの機械加工工場のような生産形態を採用しているような工場がモデルであり、このような生産設備をワークショップと呼ぶ。

## 2.3 スケジューリング手法の分類

生産スケジューリングの手法に関しては、これまでに多くの研究が行われてきており、その手法も数多く提案されてきている。その中でも実用的に用いられており、広く知られているディスパッチングルールによる手法と、組み合わせ問題の解法として近年良く用いられるようになったメタヒューリスティックによる手法について述べる。

### 2.3.1 ディスパッチングルールによる手法

ディスパッチングルールによる手法は、ワークショップ内の生産設備でワークの加工が終わった時に、次に加工するワークを特定の規則に基づいてその機械で加工を待つワークの中から選択しながらスケジュールを作成していく方法である<sup>[1],[2]</sup>。大規模なワークショップスケジューリング問題のように複雑で他に有力な解法のない問題に適用することができる。代表的なディスパッチングルールを Tab. 2-1 に示す。

どのルールが優れているとは必ずしも断言することはできない発見的解法である。ディスパッチングルールを解析的解法で溶けない複雑な問題に適応することは最適解を求めるのではなく、実時間性を重視していると言える。

### 2.3.2 木探索による推論とヒューリスティックによる手法

木空間探索による推論は、ある初期状態から問題の状態空間内での任意の状態候補の生成・選択、状態の遷移という手段を連続的に行うことによってスケジュールを

Tab. 2-1: 代表的なディスパッチングルール

名称	ルール	内容
SPT	Shortest Processing Time	作業時間最小ワーク優先
LPT	Longest Processing Time	作業時間最大ワーク優先
LWKR	Least Work Remaining	残り加工時間の最小ワーク優先
MWKR	Most Work Remaining	残り加工時間の最大ワーク優先
SLACK	Slack	(納期-現在時刻-残り作業時間の合計) 最小ワーク優先
EDD	Earliest Due Date	納期の早いワーク優先
FCFS	First Come First Served	先着ワーク優先
LCFS	Last Come First Served	後着ワーク優先
RANDOM	Random	ランダムにワークを選択

作る<sup>[1],[2]</sup>。解までの道筋は木構造によって表現することができる。この木構造で表される解空間の中の枝を系統的に一つ一つ調べることで最適解を見つける方法であるため、この方法は解空間が存在するならば理論的には必ず最適解を見つけることができる。しかし、実際には問題の規模が大きくなると調べるべき枝の数が爆発的に増加し、現実的な時間内では全ての枝を調べることは不可能である。従って、実用的には最適解を逃す可能性はあるが解の候補として可能性の低い選択枝を捨てる「枝刈り」を行いながら探索を進め、解空間を小さくすることで近似解を求める。候補になる可能性があるかの判断は経験的知識、発展的知識（ヒューリスティックな知識）を用いる。この方法での探索時間はディスパッチングルールを用いる方法と比べると非常に長くなるが、試行錯誤を繰り返しながら解を探すことから、最適解（または近似解）を求めることができる可能性は高い。

### 2.3.3 メタヒューリスティックによる手法

#### 遺伝的アルゴリズム（GA）

遺伝的アルゴリズムとは、生物の進化の過程を真似ることで最適化を図る手法である<sup>[1],[2],[4]</sup>。はじめに異なった遺伝子を持ついくつかの初期集団を用意し、これらの中で選択、交差、突然変異の三つのプロセスを繰り返すことにより優秀な遺伝子を持つ個体を選び出す。これを用いたスケジューリングは、スケジューリングを遺伝子として遺伝を行い、より優れたスケジューリングを探索することになる。

### シミュレーテッド・アニーリング (SA)

シミュレーテッド・アニーリングは焼きなまし法とも呼ばれ、組み合わせ最適化問題に有効な汎用的手法である<sup>[1],[2],[4]</sup>。金属を一旦高温に熱してから徐々に温度を下げて焼きなまし（アニーリング）を行うことに類似した操作を計算機のシミュレーション上で行い最適化を図る。つまり、十分にゆっくり温度を下げて金属の内部エネルギーを安定状態にしていくことで局所的な安定状態で留まらず、エネルギーの最小状態とできるように、エネルギーを最小にしたい関数、温度をその関数に対する仮想的なパラメータとして最適解を求めていく。評価値を悪化させる方向への解の移行を認めるため、局所最適解に陥っている状態を抜け出すために有効な方法である。

## 2.4 フォワードスケジューリングとバックワードスケジューリング

スケジューリング問題において、時間の流れに対しどの方向に向かってスケジューリングを行うかによって“フォワードスケジューリング”か“バックワードスケジューリング”かに分けられる。フォワードスケジューリングとバックワードスケジューリングは、どちらもスケジュールの開始から納期までに十分な時間が無ければ作成した工程スケジュールを実行することができない、もしくは解を得ることができない点がある。従って、どちらを用いる際にも着手時刻から納期までに十分な期間を確保する必要がある。

### 2.4.1 フォワードスケジューリング

フォワードスケジューリングとは、現実の時間の流れに沿って行うスケジューリング手法である。生産オーダーの中で最初に着手する工程から各セルへと割り振っているため、最後に配置されるのは、生産オーダーの中で最後に着手する工程である。

### 2.4.2 バックワードスケジューリング

バックワードスケジューリングとは、現実の時間の流れとは逆方向に向かって行うスケジューリング手法である。生産オーダーの中で最後に着手する工程から各セルへと割り振っているため、最後に配置されるのは、生産オーダーの中で最初に着手する工程である。

## 2.5 スケジュールの表現方法

スケジュールの結果を表現する方法の一つとして、ガントチャートがある<sup>[2]</sup>。ガントチャートはプロジェクト管理や生産管理などで使われる作業計画およびスケジュールを横型棒グラフで示した工程管理図のことである。ガントチャートは縦軸に作業を行うセル、もしくはワークを置き、横軸に時間を取り、縦軸に配置した要素の所要時間をそれに比例した長さの横棒で示す。Fig. 2- 2 に例を示す。

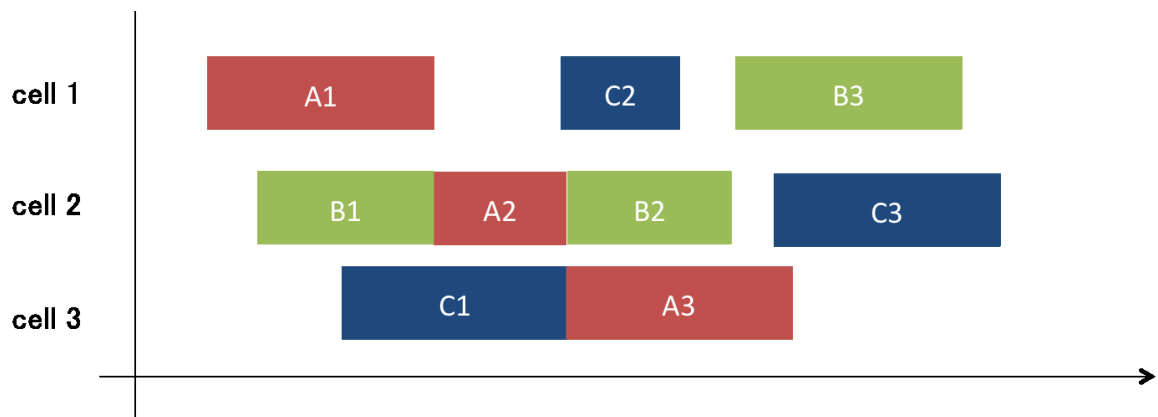


Fig. 2- 2: ガントチャートの模式図

## 第3章

# 本研究で行う工程スケジューリングについて

本章では、本研究の工程スケジューリングの評価方法と木探索で用いる枝刈り関数について述べる。

### 3.1 評価指標

本研究で用いる記号を以下のように定義する。なお、ワークは生産オーダーに含まれるものの中で納期が早いものから順にワーク 1、各ワークごとに着手する時刻が早い工程から工程 1 とする。

$i$  : ワークの番号 ( $i = 1, 2, \dots, N_1$ )

$j$  : 工程の番号 ( $j = 1, 2, \dots, N_2$ )

$k$  : セルの番号 ( $k = 1, 2, \dots, N_3$ )

$D_i$  : ワーク  $i$  の納期

$d_{i,j}$  : ワーク  $i$  の工程  $j$  の納期

$s_{i,j}$  : ワーク  $i$  の工程  $j$  の着手時刻

$e_{i,j}$  : ワーク  $i$  の工程  $j$  の終了時刻

$w_{i,j}$  : ワーク  $i$  の工程  $j$  の待ち時間

$l_{i,j}$  : ワーク  $i$  の工程  $j$  のリードタイム

$L_i$  : ワーク  $i$  のリードタイム

$p_{i,j}$  : ワーク  $i$  の工程  $j$  の工程処理時間

$S_k$  : セル  $k$  の最初の工程の開始時刻

$E_k$  : セル  $k$  の最後の工程の終了時刻

$m_k$  : セル  $k$  のメイクスパン

ワーク  $i$  の工程  $j$  の納期  $d_{i,j}$  は、次工程の開始時刻のことである。また、ワーク  $i$  の工程  $N_1$  の納期  $d_{i,N_1}$  とワーク  $i$  の納期  $D_i$  は一致する。ワーク  $i$  の工程  $j$  のリードタイム  $l_{i,j}$  は、ワーク  $i$  の工程  $j$  の着手時刻  $s_{i,j}$  からワーク  $i$  の工程  $j$  の納期  $d_{i,j}$  までの時間である。ワーク  $i$  のリードタイム  $L_i$  は、ワーク  $i$  の工程 1 の着手時刻  $s_{i,1}$  からワーク  $i$  の納期  $D_i$  までの時間である。また、ワーク  $i$  のリードタイム  $L_i$  は、ワーク  $i$  の工程のリードタイム  $l_{i,j}$  の総和に等しい。ワーク  $i$  の工程  $j$  の待ち時間は、ワーク  $i$  の工程  $j$  の終了時刻  $e_{i,j}$  からワーク  $i$  の工程  $j$  の納期  $d_{i,j}$  までの時間である。

本研究におけるワーク  $i$  の工程  $j$  のリードタイム  $l_{i,j}$ 、ワーク  $i$  のリードタイム  $L_i$ 、ワーク  $i$  の工程  $j$  の待ち時間  $w_{i,j}$ 、セル  $k$  のメイクスパン  $m_k$  の定義式を 3.1 式、3.2 式、3.3 式、3.4 式に示す。

$$l_{i,j} = d_{i,j} - s_{i,j} \quad (3.1)$$

$$L_i = D_i - s_{i,1} = \sum_{j=1}^{N_1} l_{i,j} \quad (3.2)$$

$$w_{i,j} = d_{i,j} - e_{i,j} \quad (3.3)$$

$$m_k = E_k - S_k \quad (3.4)$$

一般にリードタイムはワークの最初の工程の着手時刻から最後の工程の終了時刻、すなわち製品がロールアウトした時刻までを指すが、本研究ではロールアウトした時刻から納期までの待ち時間も考慮することにしたため、このように定義した。また、ワークのリードタイムは次の三つの値の合計である。

工程処理時間 各セルにおける工程を処理するために必要な時間

工程待ち時間 工程が完了してから次工程が始まるまでの時間

納期待ち時間 製品がロールアウトしてから納期までの時間

これら三つの要素の増加がリードタイムの増加に繋がっている。従って、リードタイムの短縮にはこれらの要素を小さくすることが求められる。しかし、これらはトレードオフの関係にあることが多い。例えば工程待ち時間を短くしようとすることで、納

待ち時間が長くなってしまう場合がある。これらの要素を後述する評価指標の候補にこれらも候補として加えることも考えたが、このトレードオフの関係を考慮し、これらの要素をリードタイムとしてまとめることにした。

### 3.1.1 評価指標の候補

本研究ではFMSを用いた多品種少量生産の工程スケジュールの評価指標として、次のものを候補に考えた。

#### 評価指標 1: リードタイムの総和

評価指標 1 の定義式を 3.5 式に示す。評価指標 1 は各ワークのリードタイムの総和である。

$$(\text{評価指標 1}) = \sum_{i=1}^{N_1} L_i \quad (3.5)$$

#### 評価指標 2: リードタイムの二乗の総和

評価指標 2 の定義式を 3.6 式に示す。評価指標 2 は各ワークのリードタイムの総和である。

$$(\text{評価指標 2}) = \sum_{i=1}^{N_1} L_i^2 \quad (3.6)$$

#### 評価指標 3: 稼働率

評価指標 3 の定義式を 3.7 式に示す。評価指標 3 は工程スケジュールの期間内の稼働率である。本研究における稼働率は、工程スケジュールの期間内の各セルの稼働時間の総和を最大のメイクスパンにセルの数を掛けたもので割ったものとした。なお、各セルの稼働時間の総和は、各セルで行われた工程の工程処理時間に等しい。

$$(\text{評価指標 3}) = \frac{\sum_{i=1}^{N_1} \sum_{j=1}^{N_2} p_{i,j}}{(\max m_k) * N_3} * 100[\%] \quad (3.7)$$

一般に工程スケジュールの前後には別な工程スケジュールが存在しており、それらを考慮したため稼働率の算出にメイクスパンを用いた。

### 3.1.2 評価指標の選定

評価指標1から評価指標3のうち、本研究では評価指標として評価指標1と評価指標2を用いる。評価指標3を用いない理由は、稼働率を良くすることでリードタイムが良くなるとは限らないからである。

一般に少品種大量生産では稼働率を上昇させることでリードタイムは短くなる。しかし、セルごとに各工程の工程処理時間が変わる本研究のモデルでは、リードタイムの減少に伴って稼働率が上昇する、もしくは低下するかは予想ができない。Fig. 3-1からFig. 3-18にリードタイムが減少した際の計算時間、稼働率とセルの稼働時間の総和、メイクスパンの変化の実例を示す。なお、ガントチャートを用いて表示されている工程スケジュールの作成に使用した生産システム、生産オーダー、枝刈り関数は共通である。

この結果より、セルごとに工程処理時間が変化する多品種少量生産の工程スケジュールにおいて稼働率とリードタイムの間に相関性がないことが分かる。

リードタイムの短縮は製品を早く作れるようになるだけでなく、借入金の減少、キャッシュ・フローの改善まで繋がる。その上で稼働率を上昇させることもできると考えられる。そのため、リードタイムの減少を優先することにし、本研究では稼働率を評価指標として用いないことにした。

セルの稼働時間の総和：不変 メイクスパン：不変

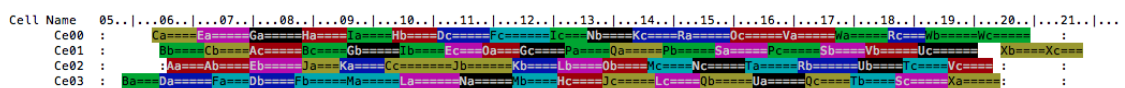


Fig. 3- 1: 計算時間:14.4 秒 リードタイムの総和：1027 稼働率:93.29[%] セルの稼働時間の総和:459 メイクスパン:123

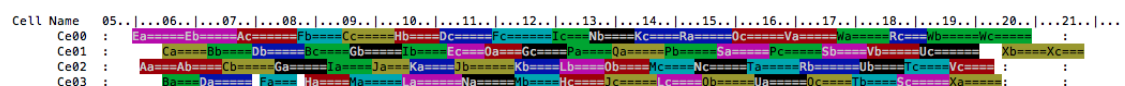


Fig. 3- 2: 計算時間:848.2 秒 リードタイムの総和：1005 稼働率:93.29[%] セルの稼働時間の総和:459 メイクスパン:123



セルの稼働時間の総和：不変 メイクスパン：減少

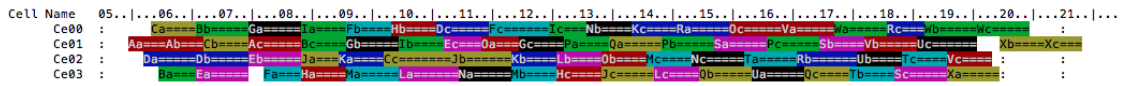


Fig. 3- 3: 計算時間:12.6秒 リードタイムの総和：1028 稼働率:90.35[%] セルの稼働時間の総和:459 メイクスパン:127

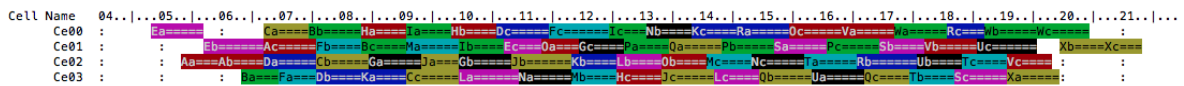


Fig. 3- 4: 計算時間:426.7秒 リードタイムの総和：1014 稼働率:91.80[%] セルの稼働時間の総和:459 メイクスパン:125

セルの稼働時間の総和：不変 メイクスパン：増加

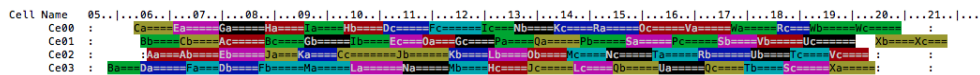


Fig. 3- 5: 計算時間:14.4秒 リードタイムの総和：1027 稼働率:93.29[%] セルの稼働時間の総和:459 メイクスパン:123

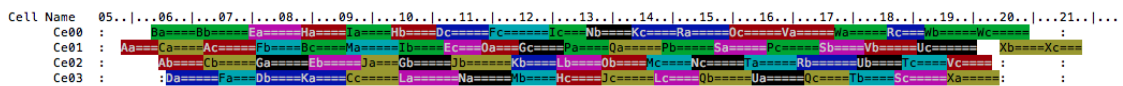


Fig. 3- 6: 計算時間:426.6秒 リードタイムの総和：1015 稼働率:89.65[%] セルの稼働時間の総和:459 メイクスパン:128

セルの稼働時間の総和：減少 メイクスパン：不変

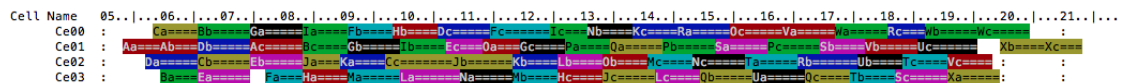


Fig. 3- 7: 計算時間:12.6秒 リードタイムの総和：1029 稼働率:89.84[%] セルの稼働時間の総和:460 メイクスパン:128

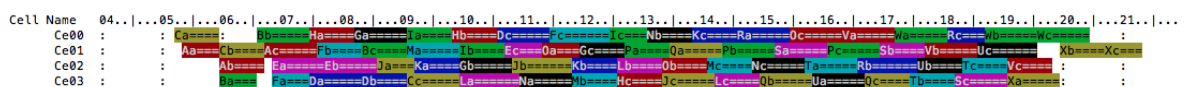


Fig. 3- 8: 計算時間:401.8秒 リードタイムの総和：1016 稼働率:89.26[%] セルの稼働時間の総和:457 メイクスパン:128

セルの稼働時間の総和：減少 メイクスパン：減少

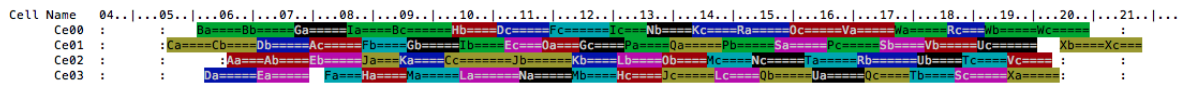


Fig. 3- 9: 計算時間:3.5秒 リードタイムの総和：1036 稼働率:89.04[%] セルの稼働時間の総和:463 メイクスパン:130

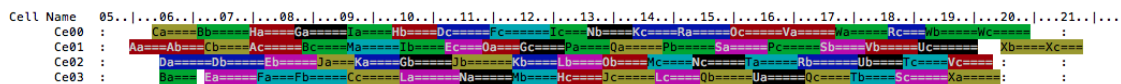


Fig. 3- 10: 計算時間:399.1秒 リードタイムの総和：1017 稼働率:90.16[%] セルの稼働時間の総和:458 メイクスパン:127

セルの稼働時間の総和：減少 メイクスパン：増加

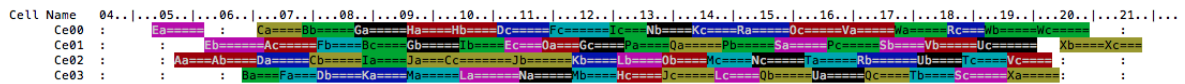


Fig. 3- 11: 計算時間:41.1秒 リードタイムの総和：1021 稼働率:92.20[%] セルの稼働時間の総和:461 メイクスパン:125

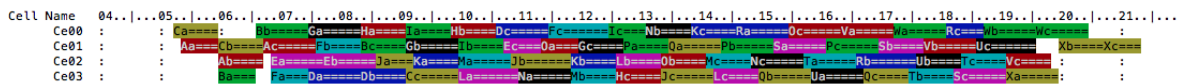


Fig. 3- 12: 計算時間:542.5秒 リードタイムの総和：1008 稼働率:89.26[%] セルの稼働時間の総和:457 メイクスパン:128

セルの稼働時間の総和：増加 メイクスパン：不変

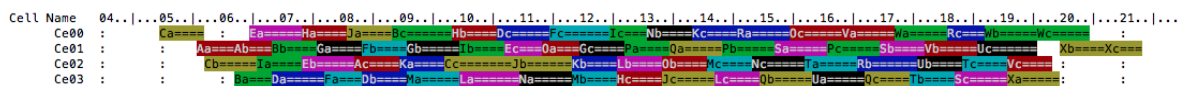


Fig. 3- 13: 計算時間:0.3秒 リードタイムの総和：1047 稼働率:91.07[%] セルの稼働時間の総和:459 メイクスパン:126

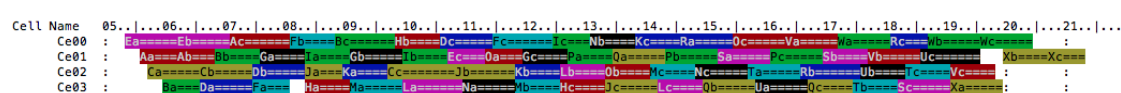


Fig. 3- 14: 計算時間:8.7秒 リードタイムの総和：1032 稼働率:91.67[%] セルの稼働時間の総和:462 メイクスパン:126

セルの稼働時間の総和：増加 メイクスパン：減少

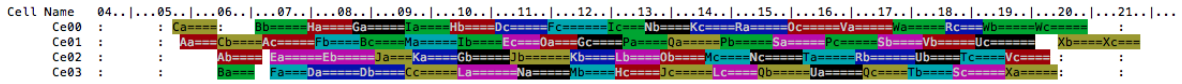


Fig. 3- 15: 計算時間:401.8秒 リードタイムの総和：1016 稼働率:89.26[%] セルの稼働時間の総和:457 メイクスパン:128

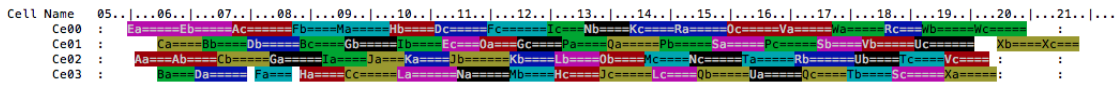


Fig. 3- 16: 計算時間:580.1秒 リードタイムの総和：1006 稼働率:93.29[%] セルの稼働時間の総和:459 メイクスパン:123

セルの稼働時間の総和：増加 メイクスパン：増加

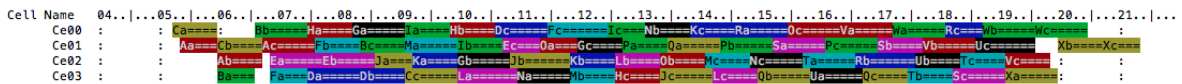


Fig. 3- 17: 計算時間:401.8秒 リードタイムの総和：1016 稼働率:89.26[%] セルの稼働時間の総和:457 メイクスパン:128

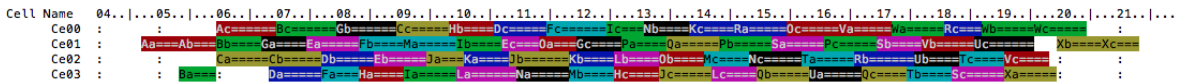


Fig. 3- 18: 計算時間:959.9秒 リードタイムの総和：1004 稼働率:86.84[%] セルの稼働時間の総和:462 メイクスパン:133

また、あるワークのリードタイムが長くなることで他のワークのリードタイムが短くなり、リードタイムの総和が小さくなることもある。しかし、FMSにおいて製品を製造する際には、ワーク同士に発生するリードタイムの偏りが大きくなる、すなわちあるワークだけリードタイムが長くなることは望まれない。本研究ではFMSにおける工程スケジュールの評価に用いる評価指標を考えているため、この評価指標を採用することにした。

### 3.2 枝刈り関数

以下では今回実験で用いる枝刈り関数について述べる。

枝刈り関数 1 の定義式を 3.8 式に示す。枝刈り関数 1 は、生産オーダーに含まれる各ワークのリードタイムの総和である。

$$(\text{枝刈り関数 1}) = \sum_{i=1}^{N_1} L_i \quad (3.8)$$

枝刈り関数 1 は、各工程のリードタイムを短くする効果がある。ワークのリードタイムは、各工程のリードタイムの総和に等しい。従って、各工程のリードタイムの総和はリードタイムの総和に等しい。そのため、枝刈り関数 1 は評価指標 1 と相関が強い枝刈り関数である。しかし、特定の工程へのしわ寄せを小さくすることは考慮されていないため、結果として特定のワークのリードタイムにしわ寄せが生まれ、リードタイムの 2 乗の総和が長くなってしまう可能性がある。そのため、評価指標 2 との相関はあまりないもの弱いと考えられる。

### 3.2.1 枝刈り関数 2

枝刈り関数 2 の定義式を 3.9 式に示す。枝刈り関数 2 は、生産オーダーに含まれる各ワークのリードタイムの 2 乗の総和である。

$$(\text{枝刈り関数 2}) = \sum_{i=1}^{N_1} L_i^2 \quad (3.9)$$

枝刈り関数 2 は、各ワークのリードタイムの 2 乗を小さくする効果がある。そのため、評価指標 2 と相関が強い枝刈り関数である。しかし、特定のワークのリードタイムへのしわ寄せをなくすことでリードタイムの総和が長くなる可能性が考えられるため、評価指標 1 との相関は小さいと考えられる。

枝刈り関数 3 の定義式を 3.10 式に示す。枝刈り関数 3 は、生産オーダーに含まれる各ワークの納期から各工程の着手時刻までの総和である。

$$(\text{枝刈り関数 3}) = \sum_{i=1}^{N_1} \sum_{j=1}^{N_2} (D_i - s_{i,j}) \quad (3.10)$$

枝刈り関数 3 は、各工程の処理時間と、各工程が終了してから納期までの時間を小さくする効果がある。枝刈り関数は各ワークの工程 1 を割り振った時にワークのリードタイムが算出される。しかし、それ以外の工程を割り振った時の値も評価関数に加えられるため、スケジュールが完成した時の枝刈り関数の値はリードタイムの総和とは等しくならない。そのため、リードタイムを短くする働きを期待できるが、評価指標 1 との相関は弱いと考えられる。

枝刈り関数4の定義式を3.11式に示す。枝刈り関数4は、生産オーダーに含まれる各工程のリードタイムの2乗の総和である。

$$(\text{枝刈り関数4}) = \sum_{i=1}^{N_1} \sum_{j=1}^{N_2} (l_{i,j})^2 \quad (3.11)$$

枝刈り関数4は、各工程の工程処理時間と待ち時間を短くしつつ、特定の工程へのしわ寄せを減らす効果がある。しかし、スケジュールが完成した時の枝刈り関数の値は評価指標1、評価指標2と等しくならない。また、特定の工程へのしわ寄せを減らすことでリードタイムの総和が増えてしまう可能性がある。従って、評価指標1、評価指標2の値を小さくする効果はあるものの、相関は弱いと考えられる。

枝刈り関数5の定義式を3.12式に示す。枝刈り関数5は、生産オーダーに含まれる各工程のリードタイムの2乗から各工程の待ち時間の2乗を引いた値の総和である。

$$(\text{枝刈り関数5}) = \sum_{i=1}^{N_1} \sum_{j=1}^{N_2} \{(l_{i,j})^2 - (w_{i,j})^2\} \quad (3.12)$$

枝刈り関数5はこれまで研究室で用いられてきたヒューリスティックな知識に基づく枝刈り関数である。枝刈り関数4と同様の効果に加え、各工程の待ち時間を短くする効果がある。特に、工程のリードタイムが変化しない場合は、待ち時間が発生しても工程処理時間が短いセルを選ぶ効果がある。

# 第4章

## 実験

本章では、実験環境と実験内容、実験結果について述べる。

### 4.1 実験環境と実験条件

#### 4.1.1 実験環境

本研究では、RedHat Enterprise Linux 6において実験を行った。実験環境を Tab 4-1 に示す。

Tab. 4-1: 実験環境

機種	HP ProLiant DL980 G7
OS	RedHat Enterprise Linux 6
CPU	Intel Xeon E7-4870 2.40GHz x 80 cores (= 10 cores x 8 sockets)
メモリ	1TB (PC3L-10600R-9, ECC)
PCIe SSD	2TB (= HP 2410GB MLC G2 PCIe ioDrive2 Duo x 8), Read:3.0GB/s Write:2.5GB/s (1MB)
最大消費電力	2.21kW
ピーク性能	768 GFlops (=80 コア x 2.4 GHz x 4 GFlops/コア)

#### 4.1.2 生産システムの入力データの条件

生産システムのデータには、四つのセルの情報が含まれている。各セルは生産オーダーに含まれる全ての工程を行うことができる。工程処理時間はセルごとに平均7単位時間、標準偏差1の正規分布に従って設定されている。そのため、同じ工程でもセルによって工程処理時間が異なる場合がある。

### 4.1.3 生産オーダーの入力データの条件

生産オーダーのデータには、複数のワークが含まれている。各ワークには、そのワークの納期、ワークの製造に必要な工程が設定されている。従って、スケジューリングに必要な製品の情報は全てスケジューリング前に揃っているものとする。生産オーダーに含まれる工程は全て異なるものである。すなわち、同じワークは存在しない。各製品の製造に必要な工程数は3工程で共通である。

ワークの納期と納期の間は、平均7単位時間のポアソン到着で設定した。また、伸縮率を変化させることで、生産オーダーに含まれるワークの納期の間隔を伸び縮みさせることができる。実験では伸縮率を60%から150%まで10%刻みで変化させた。

### 4.1.4 予備実験

本実験の探索に使う計算時間を求めるために予備実験を行った。入力データの条件と計算時間を以下に示す。

生産システム 8

生産オーダー 1

生産オーダーに含まれるワークの数 16

伸縮率 60% 150%の間で10%刻み

計算時間 CPU タイムで21600秒

使用した枝刈り関数 枝刈り関数1

この実験では、21600秒の時点でもっとも枝刈り関数の値が良い解の値を基準値とした。この結果をFig. 4-1とFig. 4-2にまとめた。

Fig. 4-1は時間経過と共に枝刈り関数の値が基準値へと近づいている様子を伸縮率ごとに示している。Fig. 4-1の縦軸は基準値に対する探索途中で見つかった解の枝刈り関数の値の倍率、横軸は経過時間を対数メモリで表している。グラフの60から150はそれぞれ伸縮率に対応している。

Fig. 4-2は時間経過と共に基準値に達した工程スケジュールの個数の割合を累積度数分布によって示している。Fig. 4-2の縦軸は基準値に達した工程スケジュールの個数の割合、横軸は計算時間である。

この予備実験の結果より、600秒を経過した時点で50%の工程スケジュールが基準値に達していることが分かった。その後基準値に達している工程スケジュールの割合

は、1200 秒経過した時点で 56%、1800 秒経過した時点で 60%、2700 秒経過した時点で 64%、3600 秒経過した時点で 70%に達していた。

この結果から、計算時間を 1800 秒とした。

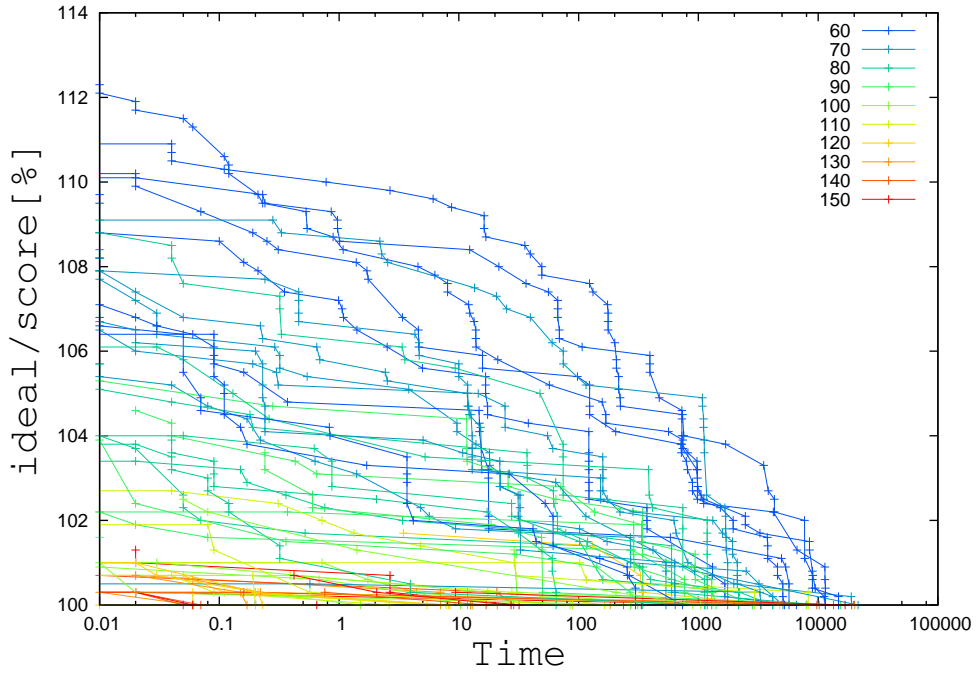


Fig. 4- 1: 伸縮率ごとの計算時間による枝刈り関数の値の変化

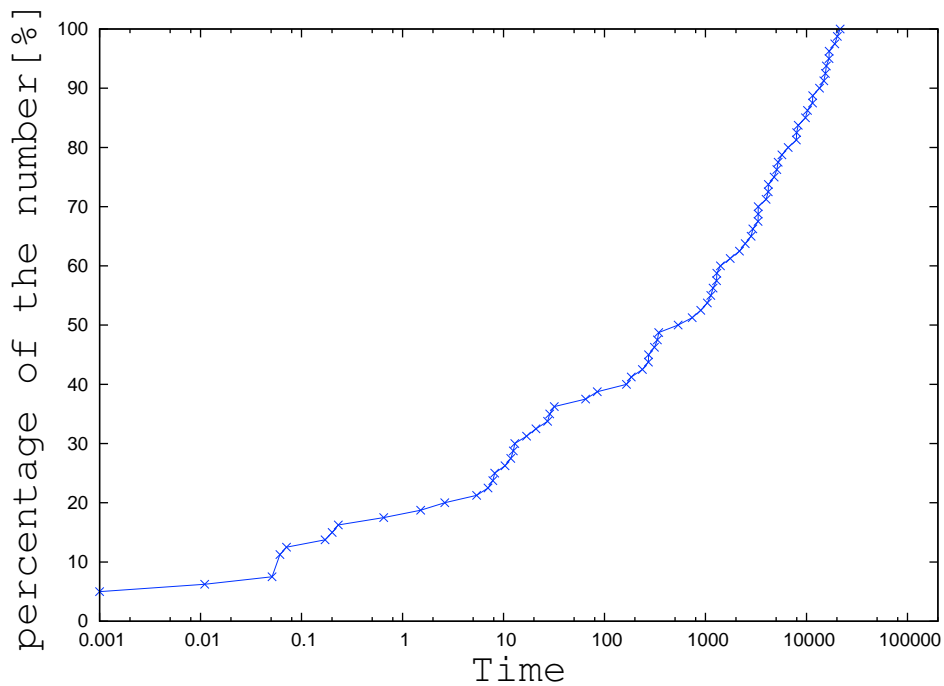


Fig. 4- 2: 基準値に達した工程スケジュールの割合の累積度数分布



## 4.2 実験1

実験1では、各枝刈り関数を用いて工程スケジューリングを行い、結果を評価指標1、評価指標2を用いて評価した。

### 4.2.1 実験1で用いた入力データ

実験1で用いた入力データの個数と計算時間を以下に示す。

計算時間 CPU タイムで1800秒

生産システム 10

生産オーダー 30

伸縮率 60% 150%の間で10%刻み

### 4.2.2 実験1の結果

以下に実験1の結果として、各枝刈り関数ごとに評価指標1と評価指標2の値の平均値をTab. 4-2とTab. 4-3、Fig. 4-3とFig. 4-4にまとめた。

1から5のグラフはそれぞれ枝刈り関数1から枝刈り関数5に対応している。

実験結果より、評価指標1の値は伸縮率が60%と70%の時に枝刈り関数5がもっとも良く、伸縮率が80%から150%の時は枝刈り関数4がもっとも良いことが分かる。また、評価指標2の値は、伸縮率が60%の時は枝刈り関数5がもっとも良く、伸縮率が70%から150%の時は枝刈り関数2がもっとも良い。

Tab. 4-2: 評価指標1の平均値

伸縮率	枝刈り関数1		枝刈り関数2		枝刈り関数3		枝刈り関数4		枝刈り関数5	
	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差
60	724.3	136.2	722.3	136.1	750.9	143.6	718.0	138.2	715.0	134.0
70	616.4	91.0	613.6	90.7	632.9	99.5	609.4	91.3	609.3	89.4
80	547.4	54.8	545.8	54.8	558.2	61.4	542.8	54.2	543.4	53.4
90	511.9	38.8	510.4	38.6	519.3	43.9	508.3	37.7	509.0	37.7
100	491.9	30.0	490.5	29.8	497.4	34.1	488.8	28.8	489.5	29.0
110	479.6	24.9	478.5	24.7	483.6	27.5	477.4	23.8	478.0	24.2
120	469.9	21.1	469.0	20.8	472.9	23.4	468.0	20.2	468.5	20.5
130	463.7	18.4	462.9	18.2	465.8	19.5	462.1	18.0	462.6	18.2
140	458.7	16.8	458.1	16.6	460.6	17.8	457.6	16.6	457.8	16.6
150	455.7	16.1	455.2	16.0	457.1	16.7	454.6	15.8	454.9	15.8

Tab. 4-3: 評価指標2の平均値

伸縮率	枝刈り関数1		枝刈り関数2		枝刈り関数3		枝刈り関数4		枝刈り関数5	
	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差
60	24091.2	9319.5	23863.2	9247.4	26173.4	10257.3	23605.0	9376.2	23449.5	9050.3
70	16999.0	5338.5	16800.8	5287.8	18096.4	6134.4	16583.6	5305.4	16599.9	5203.1
80	13093.4	2846.9	12991.2	2817.5	13719.2	3327.7	12845.6	2771.5	12890.7	2745.7
90	11300.1	1893.2	11212.9	1858.0	11686.5	2217.2	11120.5	1809.3	11161.8	1821.6
100	10346.1	1397.0	10272.8	1372.3	10625.8	1634.2	10202.9	1319.1	10240.1	1335.2
110	9785.4	1117.1	9731.4	1095.6	9974.1	1248.0	9682.1	1055.7	9714.5	1075.8
120	9352.9	913.6	9311.8	896.9	9492.8	1028.6	9269.5	868.5	9292.4	884.3
130	9086.1	782.2	9128.2	804.9	9180.8	837.4	9019.5	757.4	9040.1	769.4
140	8875.3	706.2	8849.1	694.8	8958.2	751.8	8830.4	691.3	8839.5	695.7
150	8754.5	665.0	8728.3	657.6	8810.2	693.9	8707.9	648.0	8720.2	652.4

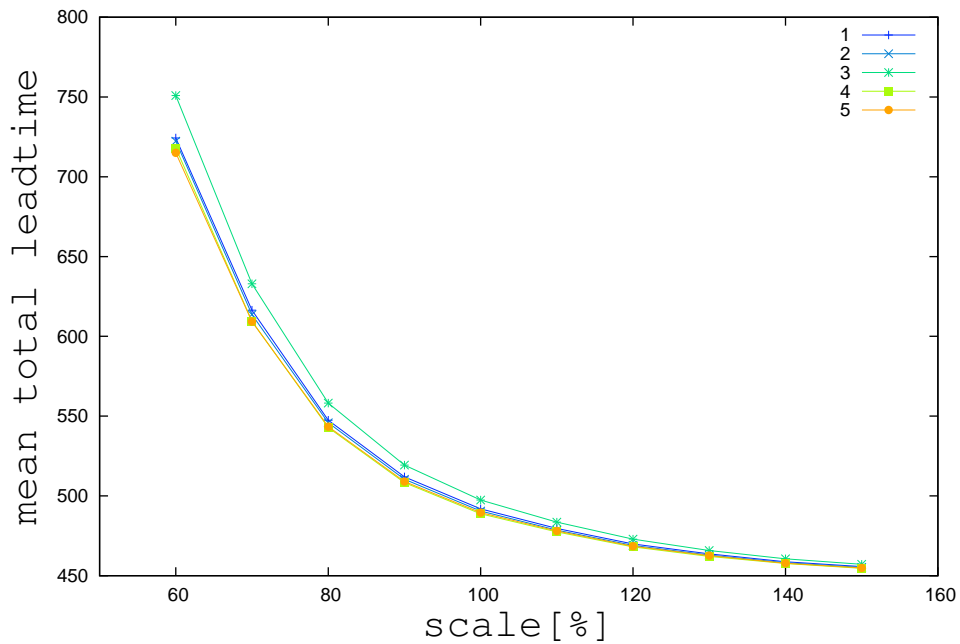


Fig. 4-3: 評価指標1の平均値

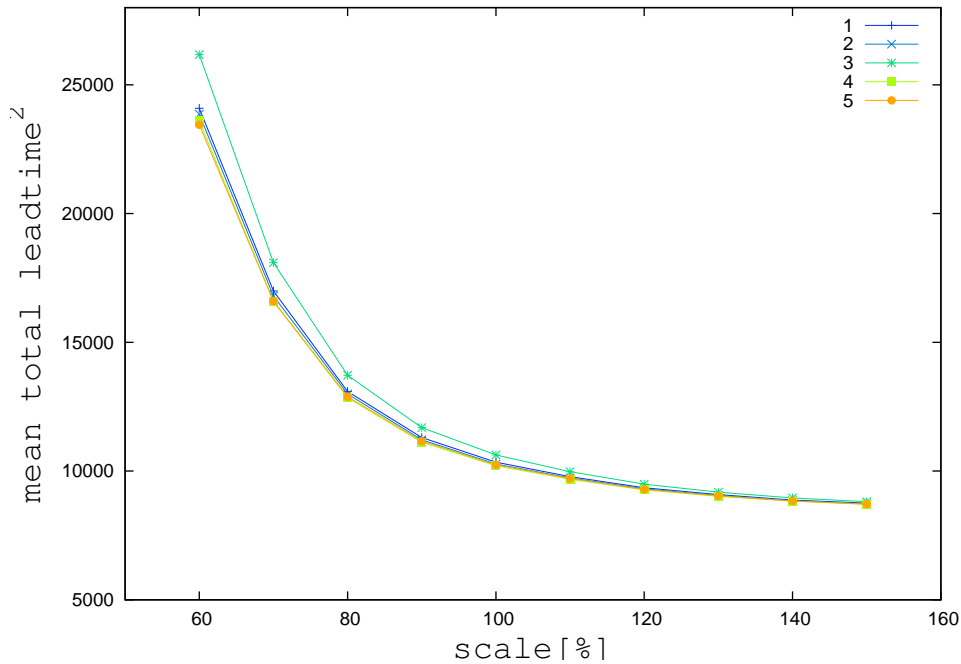


Fig. 4-4: 評価指標2の平均値

### 4.2.3 ワークのリードタイムの平均値と標準偏差

各工程スケジュールにおいて他のワークよりもリードタイムが長くなっているワークがあるかを確認するために各工程スケジュールのワークのリードタイムの平均値と標準偏差を算出し、その値の割合を累積度数分布のグラフにまとめた。そのうち、伸縮率が60%と100%のものを Fig. 4-5、Fig. 4-6、Fig. 4-7、Fig. 4-8 に示す。ここに示した結果も含めて、全ての結果は、A.1.1 に載せた。

いずれのグラフも縦軸は、個数の割合 [%]、Fig. 4-5 と Fig. 4-7 の横軸は各工程スケジュールのワークのリードタイムの平均値、Fig. 4-6 と Fig. 4-8 の横軸は各工程スケジュールのワークの標準偏差である。

1 から 5 のグラフはそれぞれ枝刈り関数 1 から枝刈り関数 5 に対応している。

Fig. 4-5 と Fig. 4-7 では、上にある枝刈り関数の方が短いリードタイムが多い。Fig. 4-5 と Fig. 4-7 より、枝刈り関数 4 と枝刈り関数 5 は枝刈り関数 2 よりも早い段階で上にあることが分かる。すなわち、枝刈り関数 4 と枝刈り関数 5 の方が短いリードタイムが多い。

また、Fig. 4-6 と Fig. 4-8 では、上にある枝刈り関数の方が値が小さい標準偏差が多い。Fig. 4-6 と Fig. 4-8 より、枝刈り関数 2 と枝刈り関数 4 は伸縮率が 110% になるまで枝刈り関数 5 よりもほぼ常に上にあることが分かる。

以上より、枝刈り関数 2 の標準偏差が枝刈り関数 5 よりも大きいにも関わらず評価指

標2の値が良い理由は、枝刈り関数5で作成された工程スケジュールのワークのリードタイムが総じて枝刈り関数2で作成された工程スケジュールのワークのリードタイムよりも短いため、リードタイムが長いワークがあっても枝刈り関数2よりも評価指標2の値が小さくなったと考えられる。

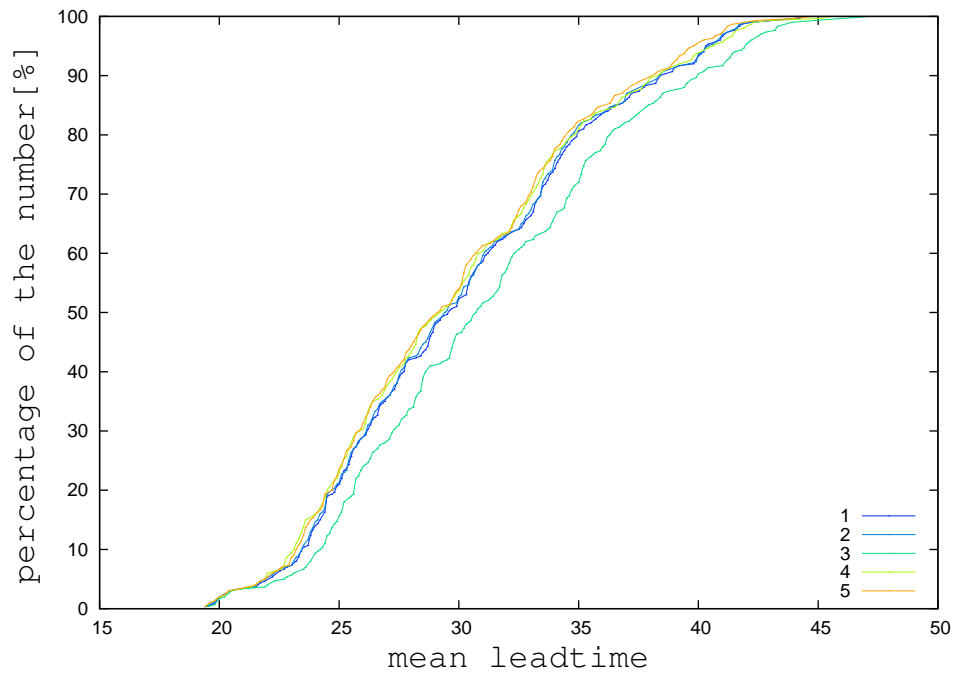


Fig. 4-5: 評価指標1の平均値の累積度数分布 伸縮率60%

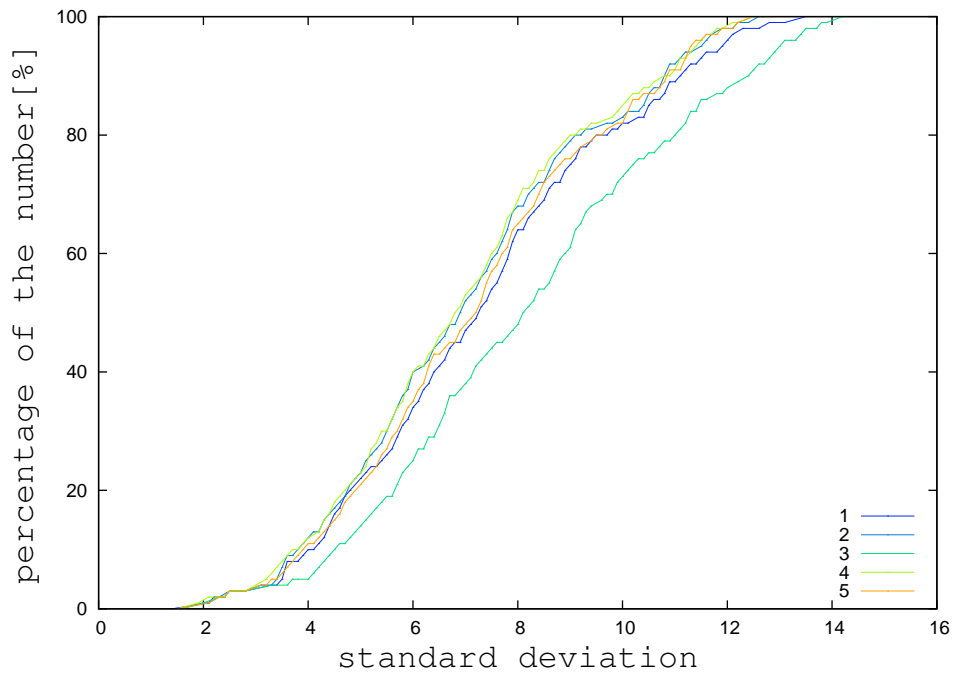


Fig. 4- 6: 評価指標1の平均値の標準偏差の累積度数分布 伸縮率60%

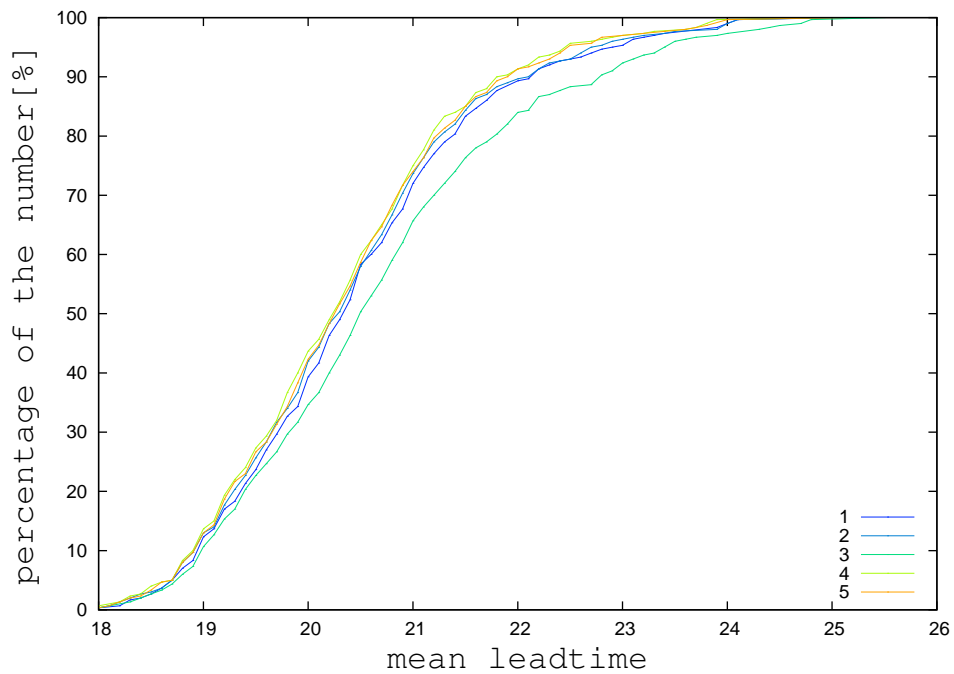


Fig. 4- 7: 評価指標1の平均値の累積度数分布 伸縮率100%

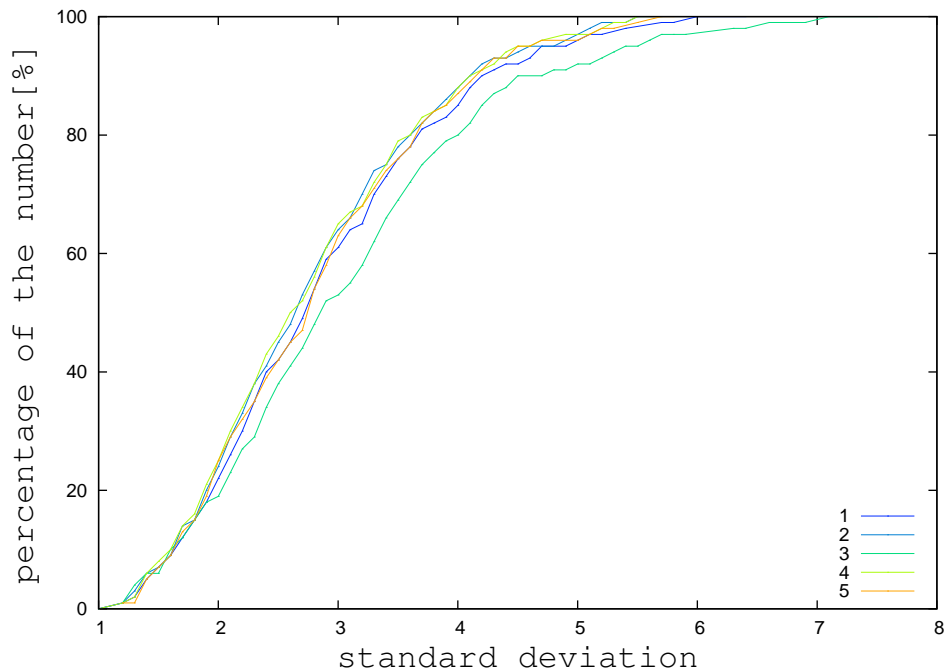


Fig. 4- 8: 評価指標1の平均値の標準偏差の累積度数分布 伸縮率100%

#### 4.2.4 工程処理時間の総和、工程待ち時間の総和、納期待ち時間の総和の平均値

各工程スケジュールにおいてリードタイムの増加の原因になっている要素を調べるために、伸縮率ごとに各工程スケジュールの工程処理時間の総和、工程待ち時間の総和、納期待ち時間の総和の平均値を求めた。この結果を Fig. 4- 9、Fig. 4- 10、Fig. 4- 11 にまとめた。Fig. 4- 9、Fig. 4- 10、Fig. 4- 11 の縦軸はそれぞれ各工程スケジュールの工程処理時間の総和の平均値、各工程スケジュールの工程待ち時間の総和の平均値、各工程スケジュールの納期待ち時間の総和の平均値である。横軸は伸縮率で共通である。

1 から 5 のグラフはそれぞれ枝刈り関数 1 から枝刈り関数 5 に対応している。

Fig. 4- 9 より、工程スケジュール中の工程処理時間の総和の平均値は伸縮率が大きくなるに連れて徐々に小さくなっている。これはどの枝刈り関数にも共通している。これは伸縮率が大きくなることで並行して処理する工程の数が減り、使われているセルが少なくなることで工程処理時間が短いセルを選びやすくなったからだと考えられる。そのうえで伸縮率が大きくなっても工程処理時間が大きく減らないのは、各セルの工程処理時間を平均値 7、標準偏差 1 で設定したため、セルを変えても工程処理時間が大きく減らないからだと考えられる。

工程待ち時間、納期待ち時間はどちらも伸縮率を大きくすることで値が減少してい

る。これは伸縮率が大きくなることでワークの納期同士の間が離れ、並行して作業する製品の数が少なくなったため、空いているセルの数が増えて納期待ち時間、工程待ち時間が発生しなくなったからだと考えられる。

枝刈り関数5は枝刈り関数4よりも工程処理時間の総和の平均値、納期待ち時間の総和の平均値が悪いが、工程待ち時間の総和の平均値が良くなっている。リードタイムは工程処理時間、工程待ち時間、納期待ち時間を合わせたものである。枝刈り関数5のリードタイムの平均値が枝刈り関数4よりも良いのは、この工程待ち時間が短縮されている分で工程処理時間と納期待ち時間が延てしまった分を補っているからだと考えられる。

また、枝刈り関数3は、納期待ち時間の総和の平均値が小さい反面、他の待ち時間が極端に増加している。これは枝刈り関数3が納期待ち時間の影響を工程3だけでなく、工程1、工程2でも考慮しなければならないため、重複して計算している納期待ち時間の値を小さくする傾向にあるからだと考えられる。

以上の結果より、工程処理時間はモデルの問題から短くすることが困難であり、また短くしてもリードタイムの大幅な減少に繋がるとは考え難い。そのため、リードタイムを短くするためには枝刈り関数には工程処理時間よりも工程待ち時間と納期待ち時間を減少させることが有用ではないかと考えられる。

Tab. 4-4: 工程処理時間の平均値

伸縮率	枝刈り関数1		枝刈り関数2		枝刈り関数3		枝刈り関数4		枝刈り関数5	
	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差
60	458.7	9.9	458.4	9.7	457.8	9.2	454.2	9.6	455.1	9.7
70	457.1	9.8	456.5	9.9	456.8	9.5	453.5	9.6	453.7	9.6
80	454.2	9.5	453.5	9.5	454.4	9.5	451.9	9.2	451.9	9.2
90	452.4	9.7	451.7	9.6	452.4	9.5	450.6	9.4	450.4	9.4
100	450.1	9.7	449.7	9.7	450.5	9.8	448.8	9.9	448.7	9.8
110	448.6	10.0	448.2	9.8	449.0	10.0	447.6	9.7	447.4	9.8
120	446.8	9.8	446.5	9.7	447.3	10.0	446.2	9.6	445.8	9.7
130	445.8	9.9	445.5	9.8	446.3	9.8	445.1	9.6	444.9	9.8
140	444.6	9.6	444.4	9.5	445.1	9.6	444.1	9.4	443.8	9.5
150	443.6	9.6	443.4	9.6	444.1	9.5	443.0	9.3	442.9	9.4

Tab. 4-5: 工程待ち時間の平均値

伸縮率	枝刈り関数 1		枝刈り関数 2		枝刈り関数 3		枝刈り関数 4		枝刈り関数 5	
	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差
60	152.8	85.2	149.5	83.3	201.1	96.0	160.6	89.0	146.9	82.1
70	88.0	50.4	84.8	49.2	119.0	66.4	91.7	55.5	85.8	50.8
80	50.5	28.6	48.9	28.0	70.3	41.0	52.2	30.8	49.8	28.5
90	31.6	20.3	30.5	19.8	45.0	29.7	32.3	21.5	31.1	20.2
100	22.2	16.3	20.7	15.9	31.4	23.5	21.6	16.0	21.3	16.1
110	16.5	13.9	15.9	13.8	23.1	17.8	16.3	13.2	16.5	13.5
120	12.1	11.1	11.8	11.0	17.0	14.3	11.9	10.9	12.2	11.0
130	9.5	9.3	9.1	9.1	12.7	10.9	9.2	9.1	9.6	9.2
140	7.9	8.4	7.7	8.2	10.5	9.7	7.7	8.2	7.9	8.3
150	7.0	7.8	6.8	7.7	8.8	8.9	6.7	7.7	6.8	7.6

Tab. 4-6: 納期待ち時間の平均値

伸縮率	枝刈り関数 1		枝刈り関数 2		枝刈り関数 3		枝刈り関数 4		枝刈り関数 5	
	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差
60	112.8	50.7	114.4	52.0	92.0	46.2	103.2	48.4	113.0	52.3
70	71.3	40.0	72.3	40.7	57.1	31.0	64.2	34.4	69.8	38.6
80	42.7	26.1	43.5	26.6	33.5	18.7	38.6	22.4	41.7	25.0
90	27.9	18.2	28.2	18.4	21.9	12.6	25.4	15.4	27.5	17.3
100	19.5	13.0	20.1	13.4	15.5	8.9	18.4	11.6	19.6	12.6
110	14.4	10.0	14.4	9.8	11.5	7.0	13.4	8.7	14.1	9.4
120	10.9	8.3	10.8	8.1	8.7	5.8	9.9	7.1	10.5	7.6
130	8.3	6.9	8.3	6.6	6.8	5.1	7.7	5.9	8.2	6.2
140	6.2	5.4	6.0	5.3	4.9	4.0	5.8	4.9	6.1	5.4
150	5.2	4.5	5.0	4.5	4.3	3.7	4.9	4.4	5.2	4.6

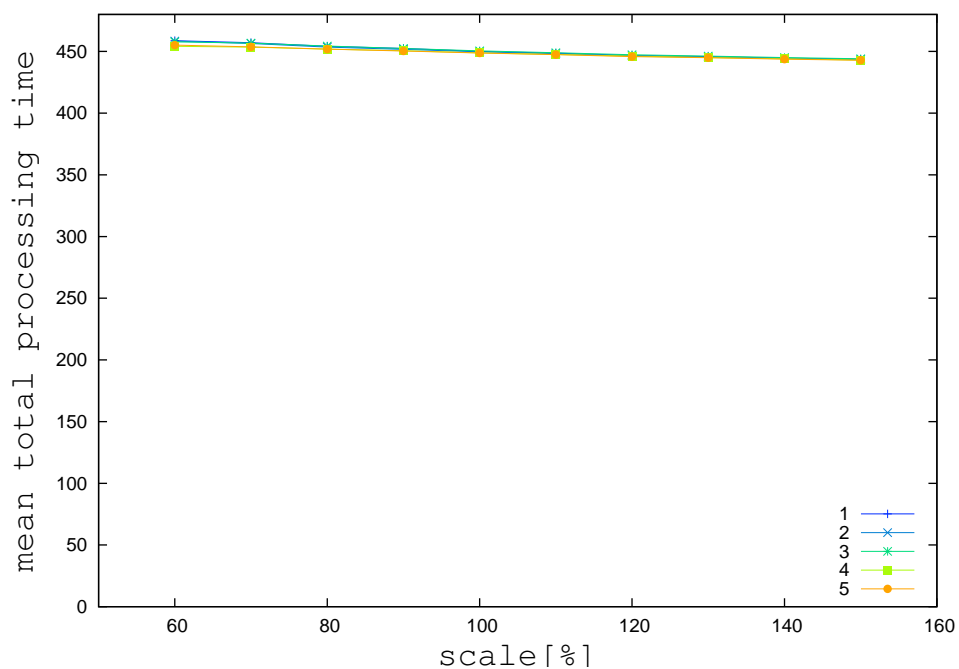


Fig. 4-9: 工程処理時間の平均値



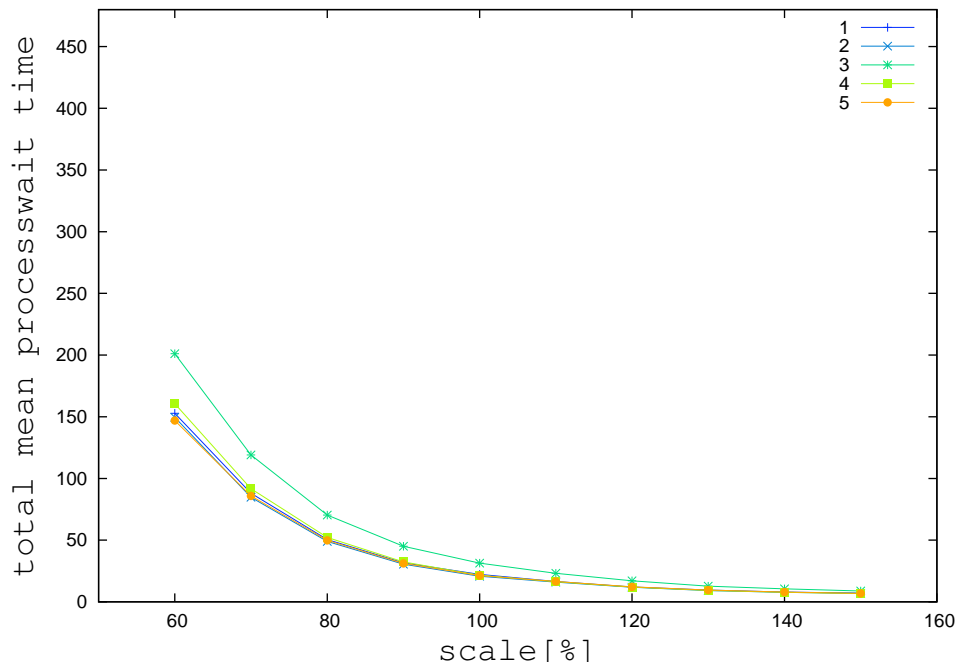


Fig. 4- 10: 工程待ち時間の平均値

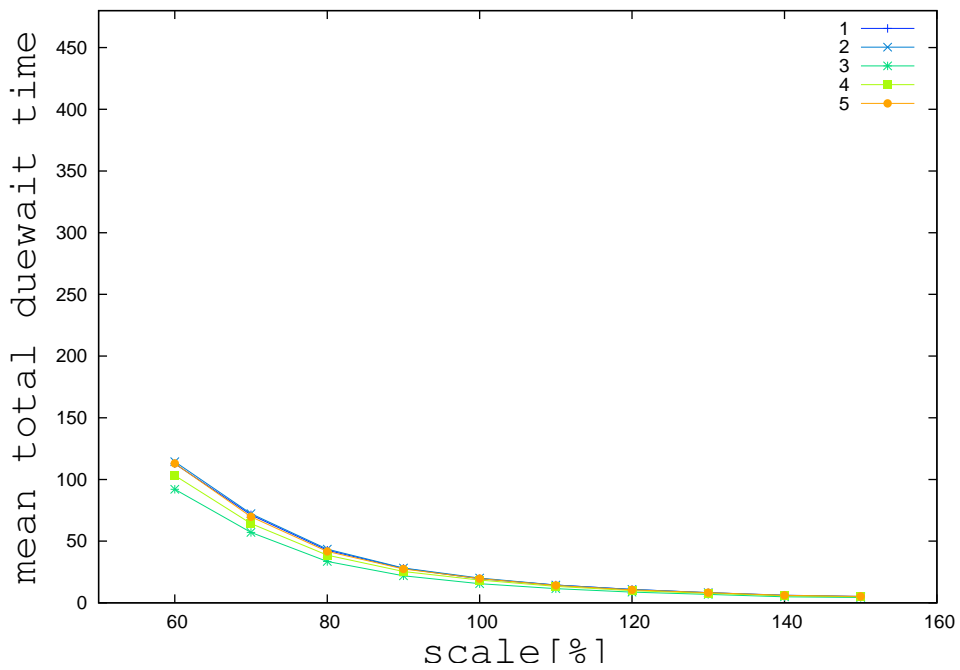


Fig. 4- 11: 納期待ち時間の平均値

### 4.2.5 ワークの工程処理時間の平均値

4.2.4 では、「工程処理時間が大きく減らないのは、各セルの工程処理時間を平均値7、標準偏差1で設定したため、セルを変えても工程処理時間が大きく減らないからだと考えられる。」と述べた。この確認を行うために、ワークの工程処理時間の平均値と標準偏差の割合を求め、累積度数分布のグラフにまとめた。この結果のうち、伸縮率が60%のものと100%のものを示す。ここに示した結果も含めて、全ての結果は、A.1.2に載せた。

1から5のグラフはそれぞれ枝刈り関数1から枝刈り関数5に対応している。

この結果より、伸縮率が60%の時の方が工程処理時間の平均値が長いものが多いことが分かる。しかし、伸縮率が60%、100%の時も、工程処理時間の平均値の長さ自体はあまり変化がないことが分かる。標準偏差も同様に伸縮率が変化すると値が大きいものが増えているが、標準偏差の値自体はあまり変化していない。

以上の結果より、セルごとの工程処理時間の差異が小さかったため、工程処理時間がほぼ揃っているのは確かだと言える。

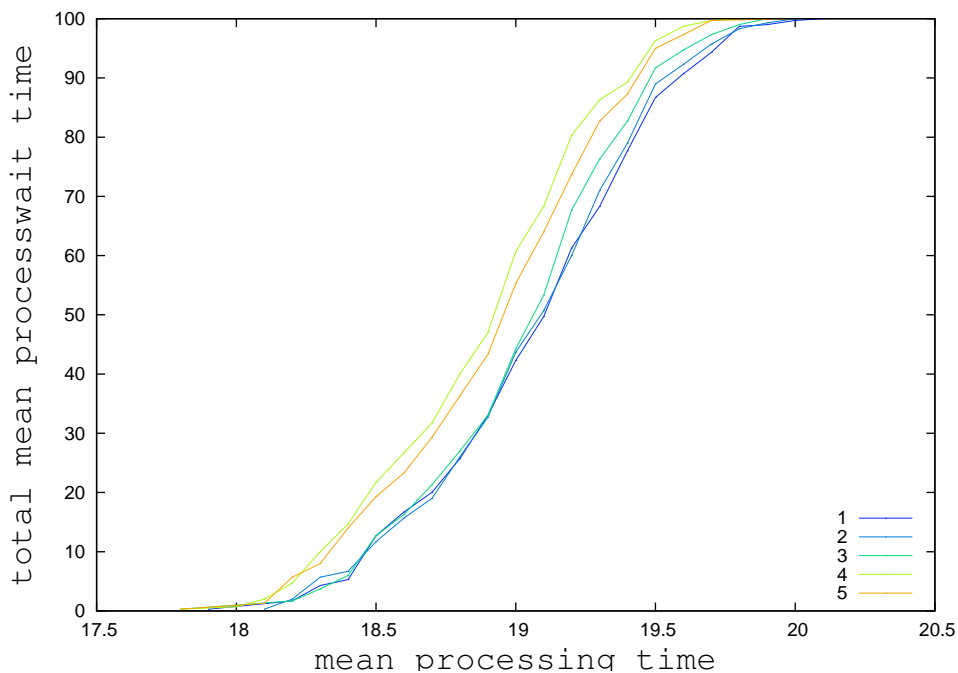


Fig. 4- 12: 工程処理時間の平均値の累積度数分布 伸縮率 60%

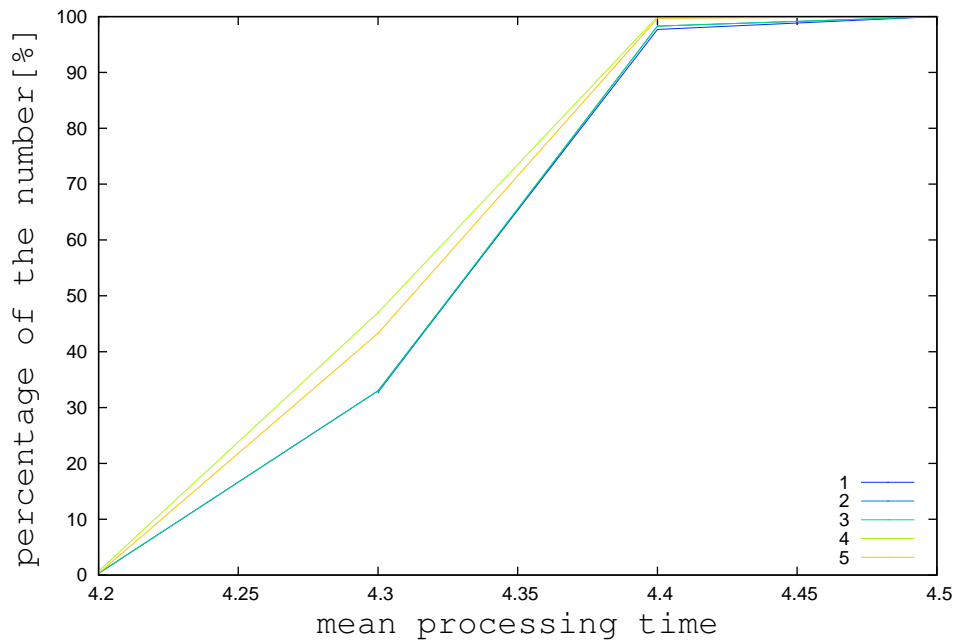


Fig. 4- 13: 工程処理時間の標準偏差の累積度数分布 伸縮率 60%

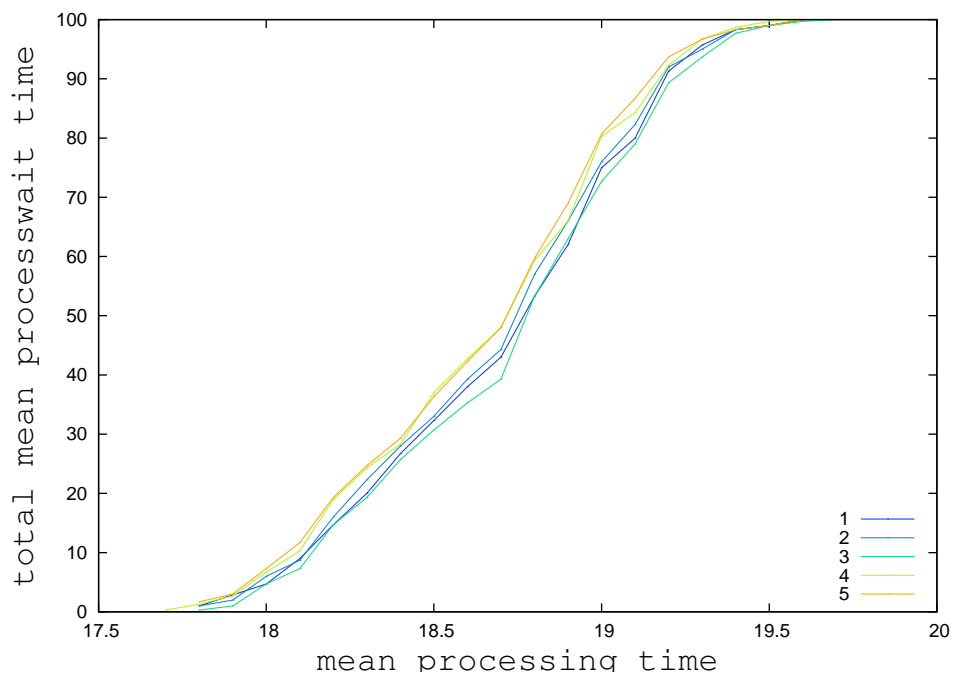


Fig. 4- 14: 工程処理時間の平均値の累積度数分布 伸縮率 100%

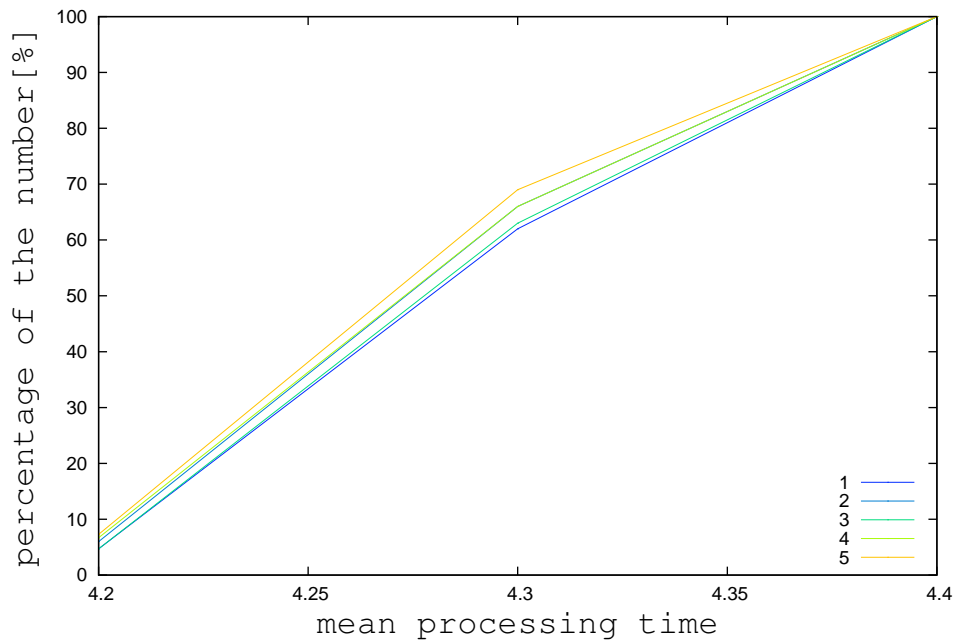


Fig. 4- 15: 工程処理時間の標準偏差の累積度数分布 伸縮率 100%

#### 4.2.6 実験2

実験2では、4.2.4より得られた「本研究のモデルにおいてリードタイムを減らすためには工程待ち時間と納期待ち時間を減少させるべき」という予想を確認するために、新たな枝刈り関数を作成し、実験1と同様のデータを用いて実験を行った。新たに作成した枝刈り関数6を4.1式に示す。

$$(\text{枝刈り関数6}) = \sum_{i=1}^{N_1} \sum_{j=1}^{N_2} \{(l_{i,j})^2 + (w_{i,j})^2\} \quad (4.1)$$

枝刈り関数5と枝刈り関数6は工程のリードタイムが同じ場合の選ぶセルが異なる。枝刈り関数5は工程のリードタイムが同じ場合、工程待ち時間が発生しても工程処理時間の短いセルを選ぶ。対して枝刈り関数6は工程のリードタイムが同じ場合、工程処理時間が長くても納期待ち時間が短いセルを選ぶ。

#### 4.2.7 実験2で用いた入力データ

実験2で用いた入力データの個数と計算時間を以下に示す。

生産システム 10

生産オーダー 30

伸縮率 60% 150%の間で10%刻み

計算時間 CPU タイムで1800秒

### 4.3 実験2の結果

以下に実験2の結果として、評価指標1と評価指標2の値の平均を Fig. 4-7 と Fig. 4-8、Fig. 4-16 と Fig. 4-16 にまとめた。なお、Fig. 4-16 と Fig. 4-16 には参考のために枝刈り関数4と枝刈り関数5の結果も載せた。

4から6のグラフはそれぞれ枝刈り関数4から枝刈り関数6に対応している。

実験結果より、評価指標1、評価指標2のいずれも伸縮率が60%、100%以外の時は枝刈り関数6がもっとも値が良いことが分かる。

Tab. 4-7: 評価指標1の平均値

伸縮率	枝刈り関数6	
	平均値	標準偏差
60	719.5	139.2
70	609.1	92.2
80	542.8	54.2
90	508.1	37.8
100	489.0	28.7
110	477.3	23.8
120	467.8	20.2
130	461.8	17.9
140	457.4	16.6
150	454.5	15.8

Tab. 4-8: 評価指標2の平均値

伸縮率	枝刈り関数6	
	平均値	標準偏差
60	23710.0	9472.2
70	16574.6	5370.0
80	12845.5	2774.8
90	11111.8	1817.6
100	10206.7	1312.8
110	9679.9	1051.8
120	9263.4	864.5
130	9005.5	750.4
140	8822.5	692.5
150	8703.0	650.0

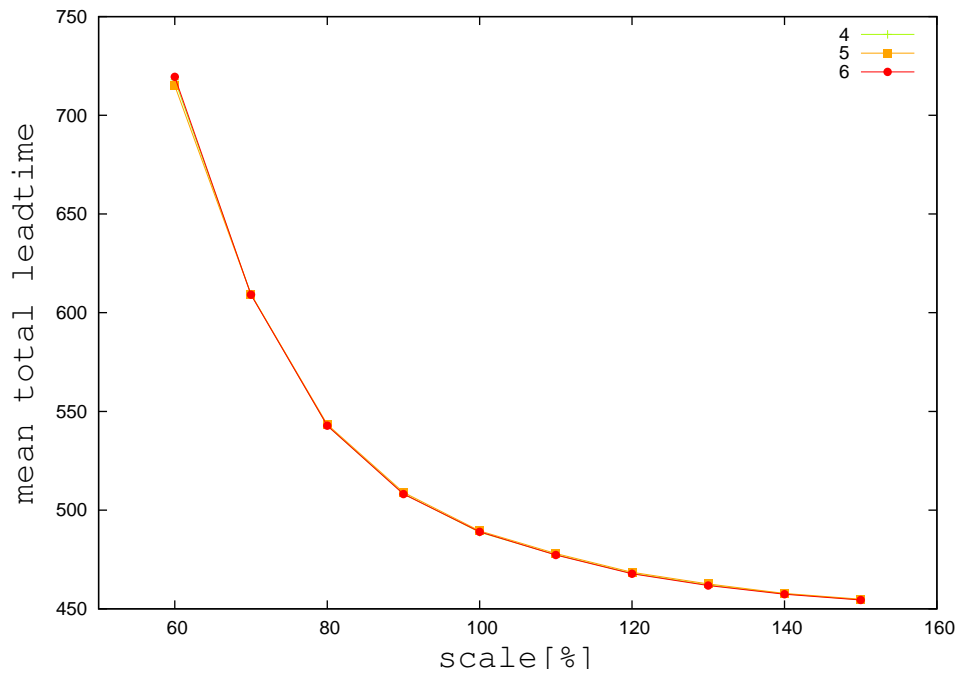


Fig. 4- 16: 評価指標1の平均値

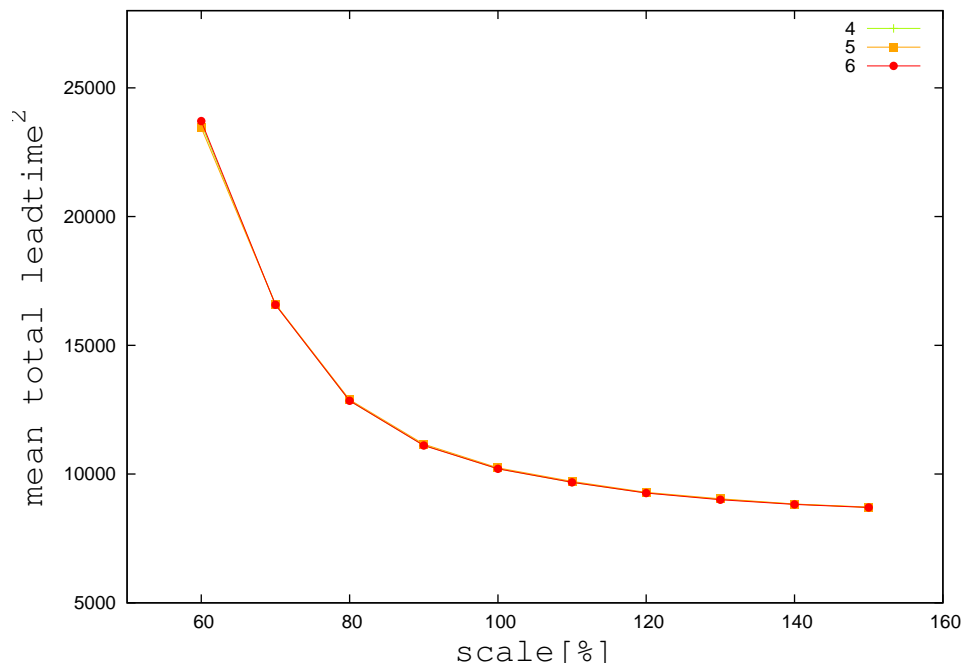


Fig. 4- 17: 評価指標2の平均値

### 4.3.1 リードタイムの平均値と標準偏差

各工程スケジュールにおいて特定のオーダーのリードタイムにしわよせが発生しているかを見るために各工程スケジュールのワークのリードタイムの平均値と標準偏差を伸縮率ごとに算出し、その割合の度数分布を求めた。このうち、伸縮率60%と100%のものをFig. 4- 18、Fig. 4- 19Fig. 4- 18、Fig. 4- 21に示す。これらを含めた全ての結果はA.2.1にまとめた。

いずれのグラフも縦軸は、個数の割合 [%]、Fig. 4- 18とFig. 4- 20の横軸は各工程スケジュールのワークのリードタイムの平均値、Fig. 4- 19とFig. 4- 21の横軸は各工程スケジュールのワークの標準偏差である。

4から6のグラフはそれぞれ枝刈り関数4から枝刈り関数6に対応している。

Fig. 4- 18とFig. 4- 20では、上にある枝刈り関数の方が短いリードタイムが多い。Fig. 4- 18とFig. 4- 20より、伸縮率60%の時は枝刈り関数5が上にあり、伸縮率100%の時は枝刈り関数4が上にあることが分かる。枝刈り関数6はリードタイムの平均値が大きくなった後上に

また、Fig. 4- 19とFig. 4- 21では、上にある枝刈り関数の方が値が小さい標準偏差が多い。Fig. 4- 19とFig. 4- 21より、枝刈り関数4と枝刈り関数6は伸縮率によらず、枝刈り関数5よりも標準偏差が小さいことが分かる。

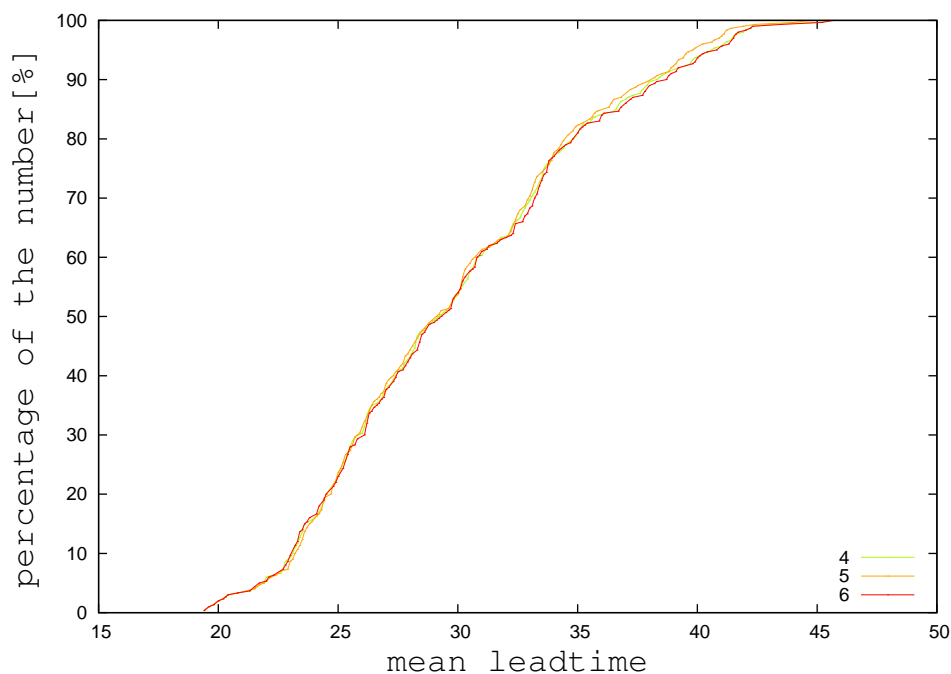


Fig. 4- 18: リードタイムの平均値の累積度数分布 伸縮率 60%

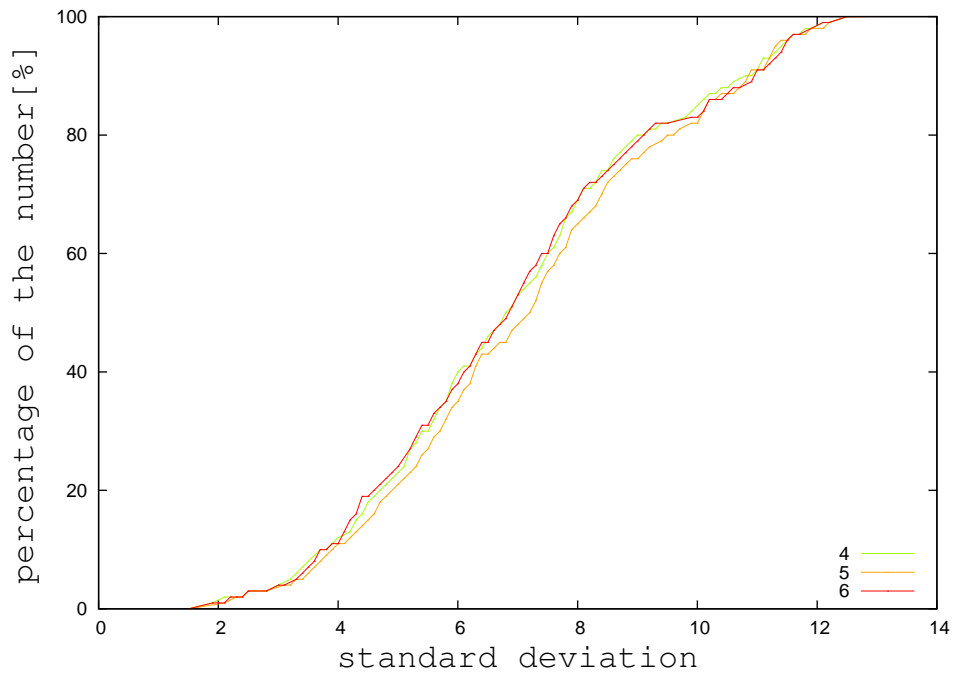


Fig. 4- 19: リードタイムの平均値の標準偏差の累積度数分布 伸縮率 60%

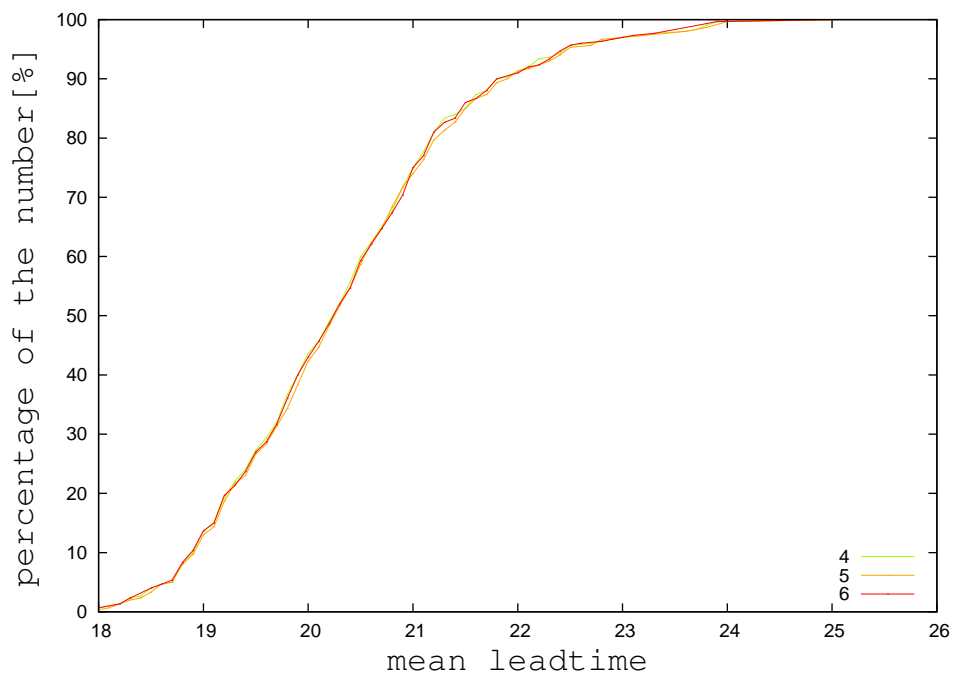


Fig. 4- 20: リードタイムの平均値の累積度数分布 伸縮率 100%



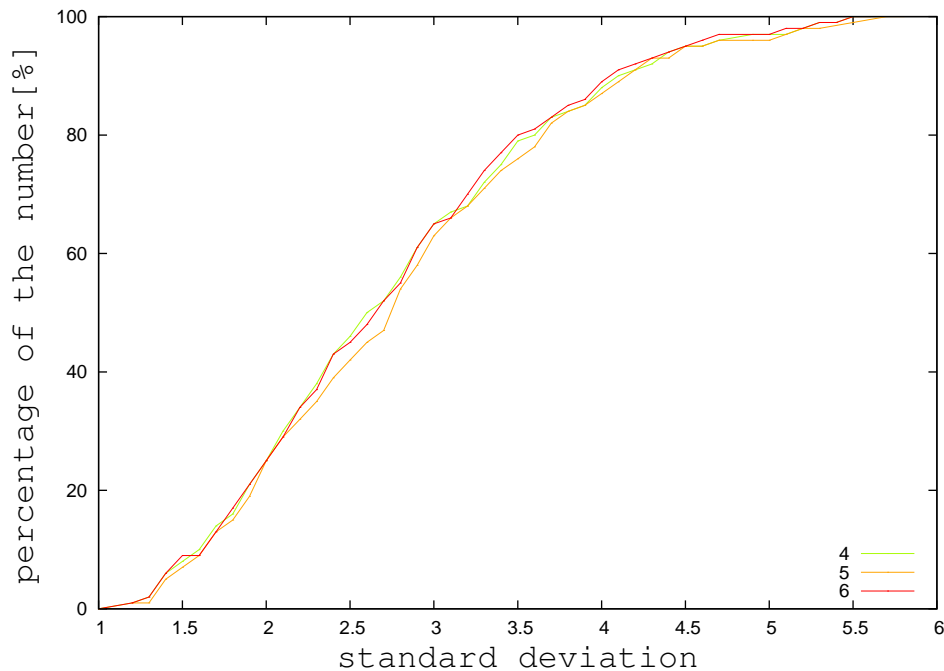


Fig. 4- 21: リードタイムの平均値の標準偏差の度数分布 伸縮率 100%

#### 4.3.2 工程処理時間の総和、工程待ち時間の総和、納期待ち時間の総和の平均値平均値

4.2.4 同様に、各工程スケジュールにおいてリードタイムの増加の原因になっている要素を調べるために、伸縮率ごとに各工程スケジュールの工程処理時間の総和、工程待ち時間の総和、納期待ち時間の総和の平均値を求めた。この結果を Tab. 4-9、Tab. 4-10、Tab. 4-11 と Fig. 4- 22、Fig. 4- 23、Fig. 4- 24 にまとめた。Fig. 4- 22、Fig. 4- 23、Fig. 4- 24 の縦軸はそれぞれ各工程スケジュールの工程処理時間の平均値、各工程スケジュールの工程待ち時間の平均値、各工程スケジュールの納期待ち時間の平均値である。なお、Fig. 4- 22、Fig. 4- 23、Fig. 4- 24 には比較のために枝刈り関数 4 と枝刈り関数 5 の結果も載せた。

4 から 6 のグラフはそれぞれ枝刈り関数 4 から枝刈り関数 6 に対応している。

Fig. 4- 22 より、工程処理時間の総和の平均値に対しては枝刈り関数 6 も他の枝刈り関数同様の傾向が見られる。

また、枝刈り関数 6 は待ち時間を減らすことを期待して作成したが、納期待ち時間の総和の平均値が短い分、工程待ち時間の総和の平均値が長くなっている。このことから、納期待ち時間と工程待ち時間のうち、納期待ち時間の方が長くなりやすく、枝刈り関数 6 の待ち時間を短くする働きがはそれを防ぐ方に働いたのではないかと考えられる。

Tab. 4-9: 工程処理時間の平均値

伸縮率	枝刈り関数6	
	平均値	標準偏差
60	454.7	9.5
70	453.8	9.7
80	452.4	9.1
90	451.1	9.5
100	449.5	9.6
110	448.2	9.7
120	446.6	9.6
130	445.5	9.7
140	444.5	9.4
150	443.4	9.5

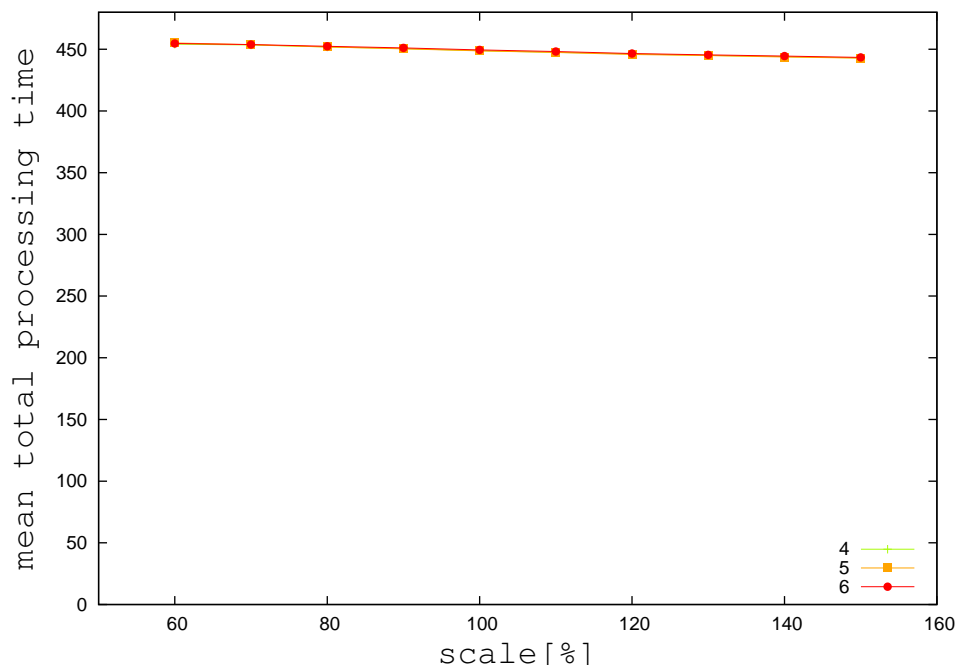


Fig. 4-22: 工程処理時間の平均値

Tab. 4-10: 工程待ち時間の平均値

枝刈り関数 6		
伸縮率	平均値	標準偏差
60	162.8	89.9
70	92.9	56.9
80	52.7	31.5
90	32.5	21.9
100	22.1	16.3
110	16.2	13.1
120	11.7	10.7
130	8.8	8.8
140	7.5	8.2
150	6.5	7.7

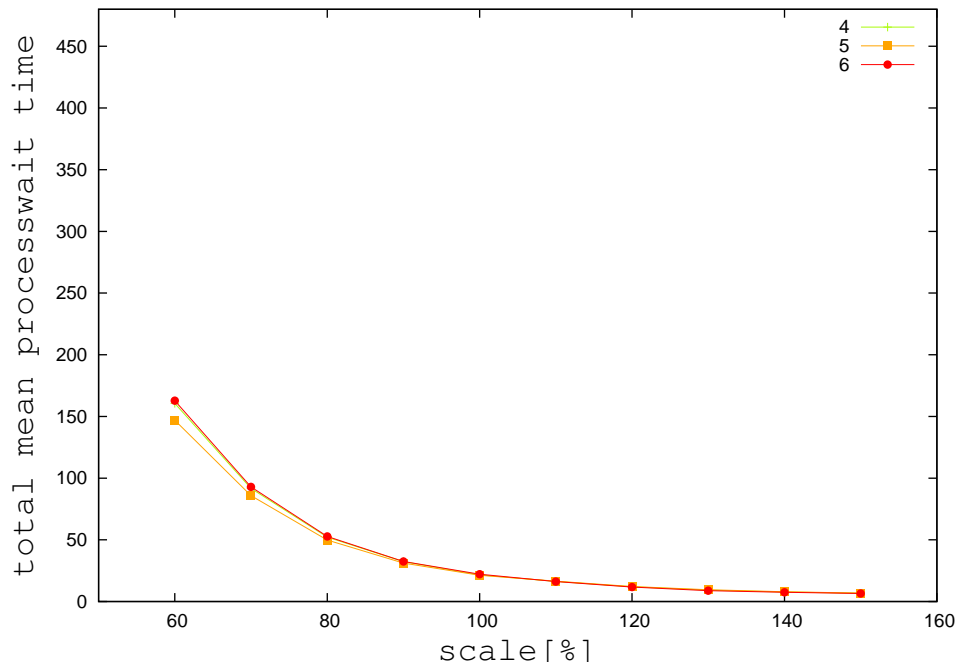


Fig. 4-23: 工程待ち時間の平均値

Tab. 4-11: 納期待ち時間の平均値

枝刈り関数 6		
伸縮率	平均値	標準偏差
60	102.0	48.1
70	62.5	34.0
80	37.6	21.8
90	24.5	14.6
100	17.4	10.8
110	12.8	8.3
120	9.5	6.8
130	7.5	5.9
140	5.5	4.8
150	4.6	4.2

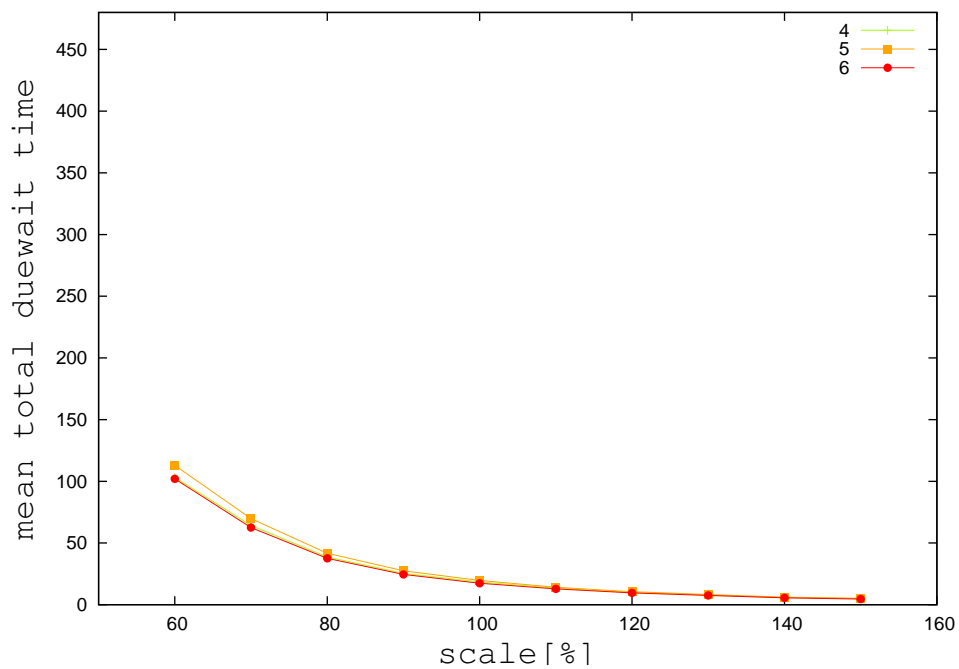


Fig. 4-24: 納期待ち時間の平均値

### 4.3.3 ワークの工程処理時間の平均値

A.1.2 同様に伸縮率、枝刈り関数に因らず工程処理時間の平均値がほぼ同じ値になるかの確認を行うために、ワークの工程処理時間の平均値と標準偏差の割合を求め、累積度数分布のグラフにまとめた。この結果のうち、伸縮率が60%のものと100%のものを示す。ここに示した結果も含めて、全ての結果は、A.2.2 に載せた。

4から6のグラフはそれぞれ枝刈り関数4から枝刈り関数6に対応している。

この結果より、伸縮率が60%の時の方が工程処理時間の平均値が長いものが多くなっていることが分かる。しかし、伸縮率が60%、100%の時も、工程処理時間の平均値の長さ自体はあまり変化がないことが分かる。標準偏差も同様に伸縮率が変化すると値が大きくなるものが増えているが、標準偏差の値自体はあまり変化していない。

以上の結果より、セルごとの工程処理時間の差異が小さかったため、工程処理時間がほぼ揃っているのは確かだと言える。

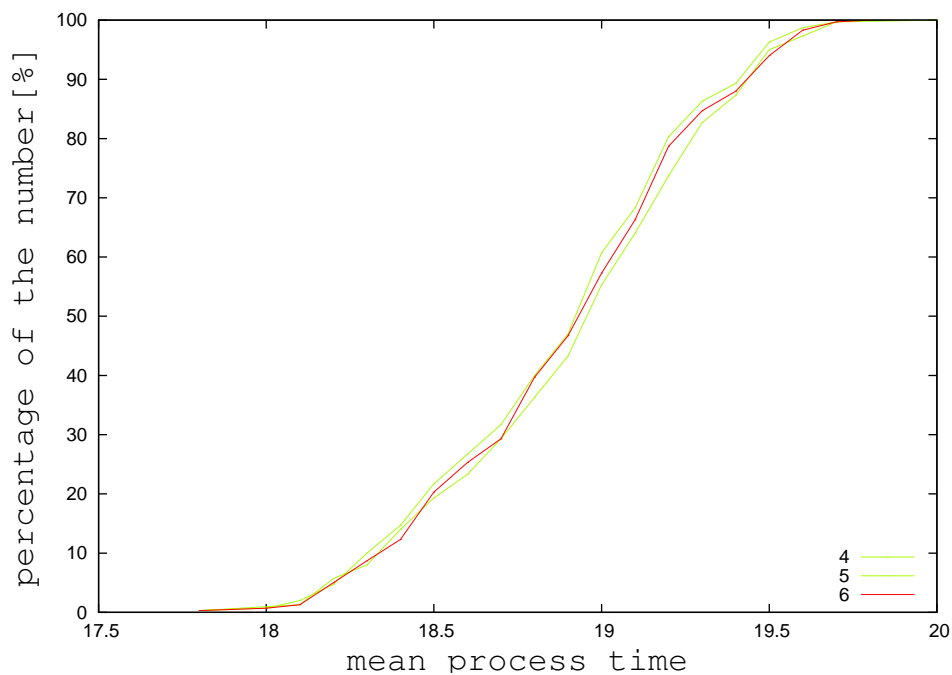


Fig. 4- 25: 工程処理時間の平均値の累積度数分布 伸縮率 60%

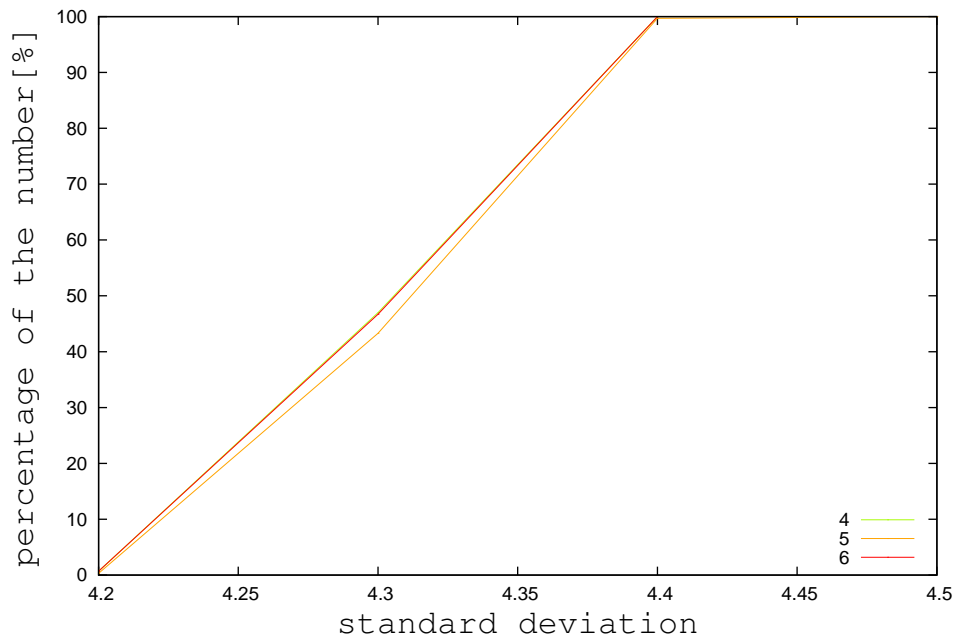


Fig. 4- 26: 工程処理時間の標準偏差の累積度数分布 伸縮率 60%

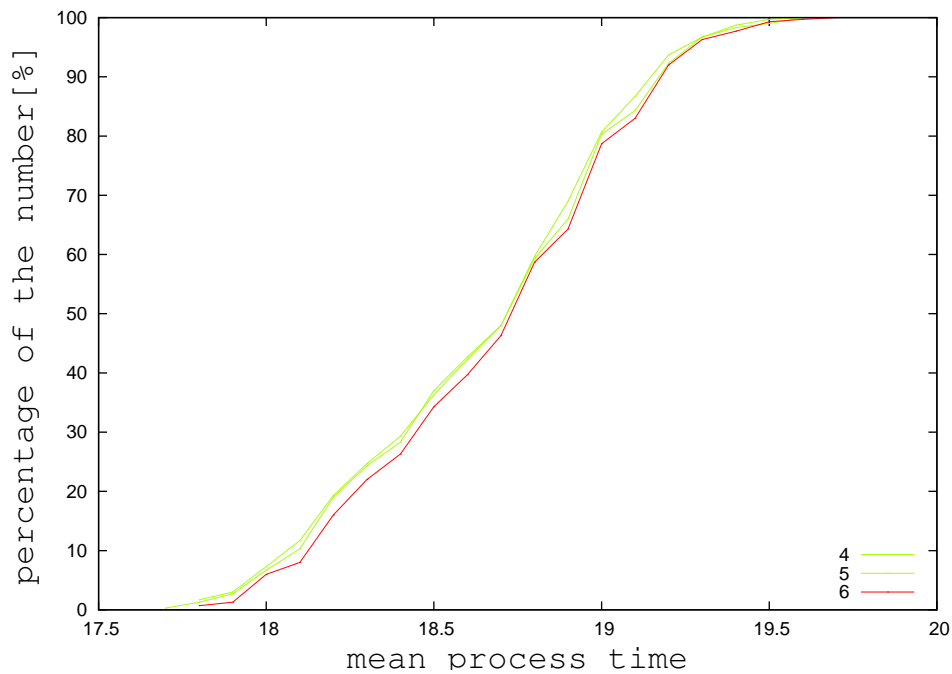


Fig. 4- 27: 工程処理時間の平均値の累積度数分布 伸縮率 100%

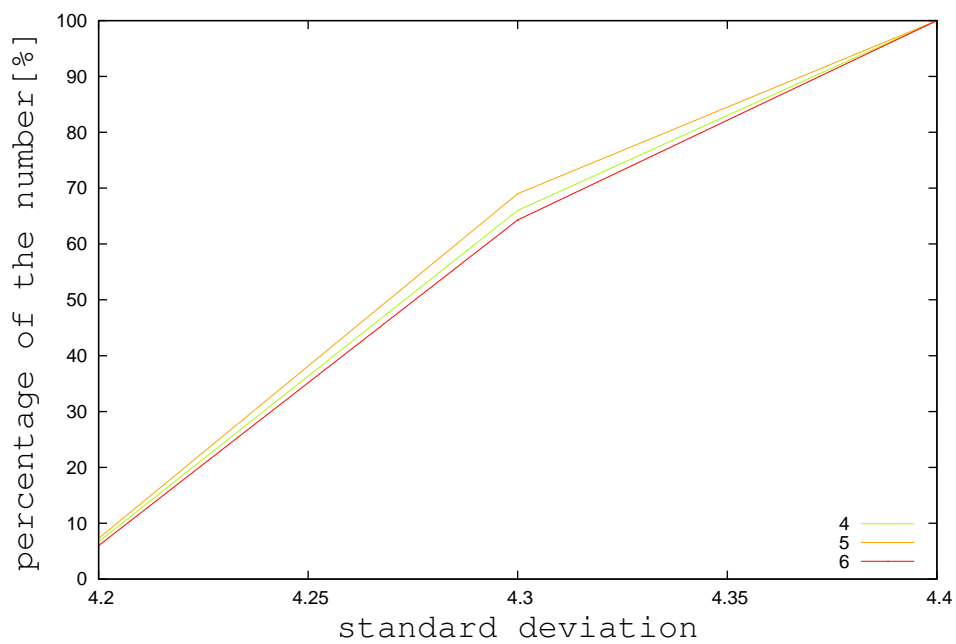


Fig. 4- 28: 工程処理時間の標準偏差の累積度数分布 伸縮率 100%

## 第5章

### 考察

#### 5.1 枝刈り関数の精度

木空間探索では、より枝刈り関数の値が良い解が見つかった時、解が更新され、新しい解となる。従って、探索が終わるまでにいくつかの解を得ることになる。探索終了時点で最終的に得ていた解を「最終解」、探索中に得た解の中でもっとも評価指標の値が良かった解を「出力最適解」とした時、評価指標1では枝刈り関数1、評価指標2では枝刈り関数2が最終解と出力最適解が全て一致していた。これに対して、他の枝刈り関数は最終解と出力最適解が一致していない工程スケジュールがあった。

Fig. 5- 1、Fig. 5- 2 に最終解と出力最適解が一致していた工程スケジュールの割合をまとめた。Fig. 5- 1、Fig. 5- 2 は共に縦軸が最終解と出力最適解が一致している工程スケジュールの割合、横軸は伸縮率である。グラフの1から6は枝刈り関数1から枝刈り関数6に対応している。

この結果から分かるように、評価指標と枝刈り関数の値が一致していない枝刈り関数は、最終解と出力最適解が一致していない工程スケジュールがある。しかし、枝刈り関数1と枝刈り関数2は最終解と出力最適解の値が全て一致している。この理由は、枝刈り関数1と枝刈り関数2が評価指標1、評価指標2と値が一致しているのに対し、この二つ以外は枝刈り関数の値が評価指標1と評価指標2と一致していないためだと考えられる。評価指標の値と一致していないため、枝刈り関数の値がもっとも良いものが、評価指標をもっとも良くするとは限らない。従って、枝刈り関数1と枝刈り関数2以外は探索途中で得た途中解、もしくは切り捨てた選択枝の中に使用したセルと生産オーダーから求められる解の中で評価指標の値がもっとも良くなる解があった可能性がある。



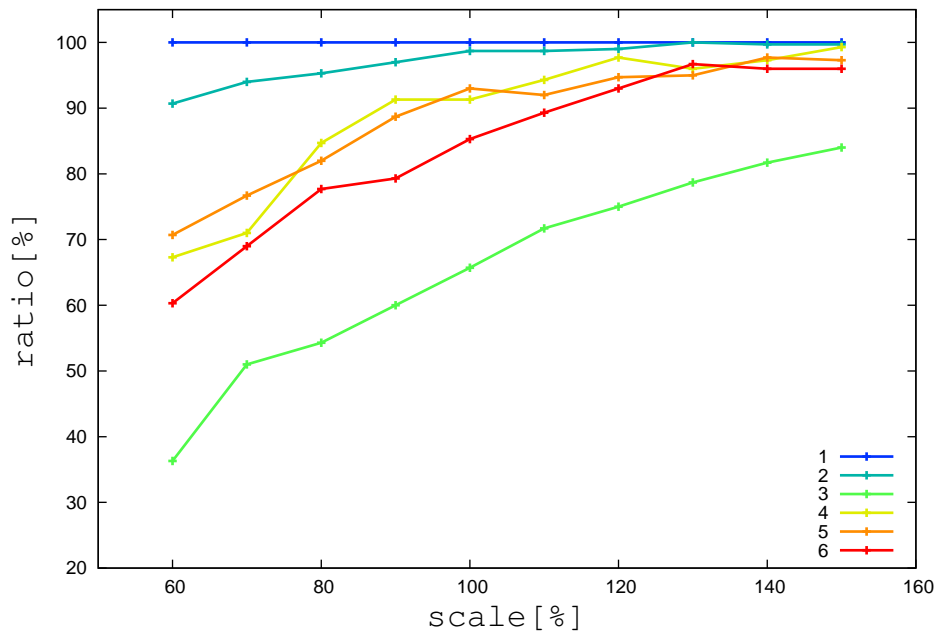


Fig. 5-1: 評価指標1 最終解と最適解が一致している工程スケジュールの割合

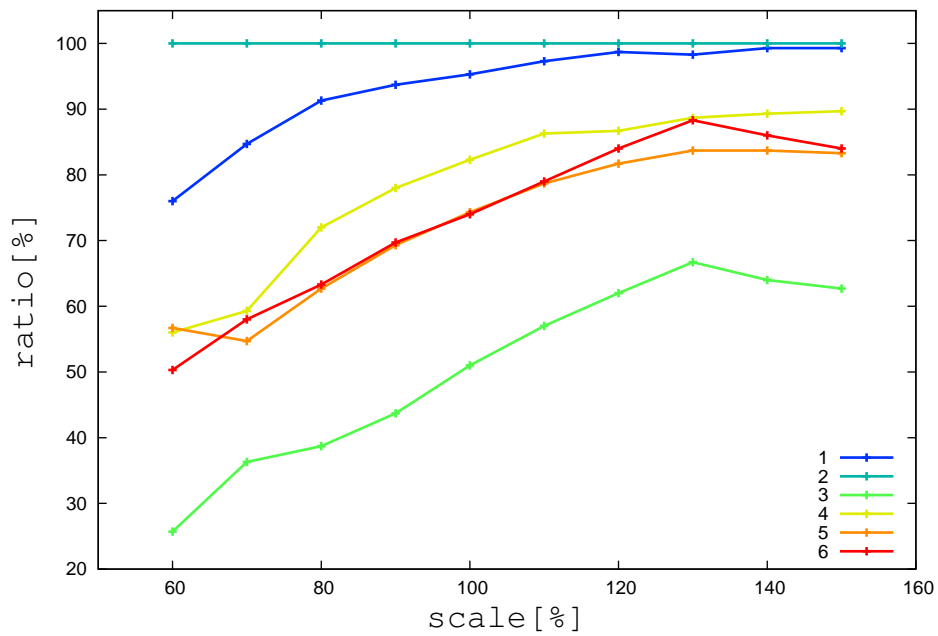


Fig. 5-2: 評価指標2 最終解と最適解が一致している工程スケジュールの割合

## 5.2 セルの工程処理時間について

実験では、セルの工程処理時間を平均7単位時間、標準偏差1で設定した。従って、セルを変えても工程処理時間の変化はあまり大きくならなかった。また、特定のワークのリードタイムだけが長くなるということも伸縮率が小さくなり、納期と納期が近くなり、並行して処理しなければならないオーダーが増えた時だけだった。従って、今回のモデルではセルの工程処理時間はあまりリードタイムに影響を与えていなかったと言える。

工程処理時間に大きな差があった場合、特定のワークのリードタイムを長くすることで全体のリードタイムを短くすることがより起りやすくなると考えられる。そのため、評価指標<sup>2</sup>と枝刈り関数<sup>2</sup>の効果がより発揮されたのではないかと考えられる。

## 第6章

### 結論

#### 6.1 研究成果

本研究では、工程処理時間が異なるセルを用いた多品種少量生産の工程スケジュールに適した評価指標を設定し、それに適合した木空間探索を用いた工程スケジュールの作成に用いる枝刈りの作成を目的に研究を行った。

- 工程処理時間が異なるセルを用いた多品種少量生産の工程スケジュールにおいて、稼働率の変化とリードタイムの短縮に関連性がない実例を示した。
- 「ワークのリードタイムの総和」と「ワークのリードタイムの2乗の総和」を提案した。この評価指標に基づいた枝刈り関数を作成し、工程スケジューリングを行った。
- 工程スケジューリングの結果、良好な解を得ることができた。

#### 6.2 今後の展望

セルの工程処理時間の条件を変化させることで評価指標、枝刈り関数が効果を発揮する条件について考察すると良いと考えられる。

# 謝辞

3年間のご指導いただいた高田昌之教授に心より感謝致します。また、相談、ご助力いただいた同研究室の井本さん、勝山さん、中澤君に厚く御礼申し上げます。

## 参考文献

- [1] 堤 廉, “複数の仕掛品を搬送可能な AGV のスケジューリングに関する研究”, 平成 15 年度電気通信大学修士論文, 2005, p16-18
- [2] 川合 一宏, “工程スケジュールのリファインメントに関する研究”, 平成 17 年度電気通信大学修士論文, 2006, p3-6
- [3] 黒田 充, 松村 健児, “生産スケジューリング”, 朝倉書店, 2002, p10-13
- [4] 黒田 充, 松村 健児, “生産スケジューリング”, 朝倉書店, 2002, p23-24

## 補足 A

### 実験結果

#### A.1 実験 1

##### A.1.1 ワークのごとのリードタイムの平均値と標準偏差

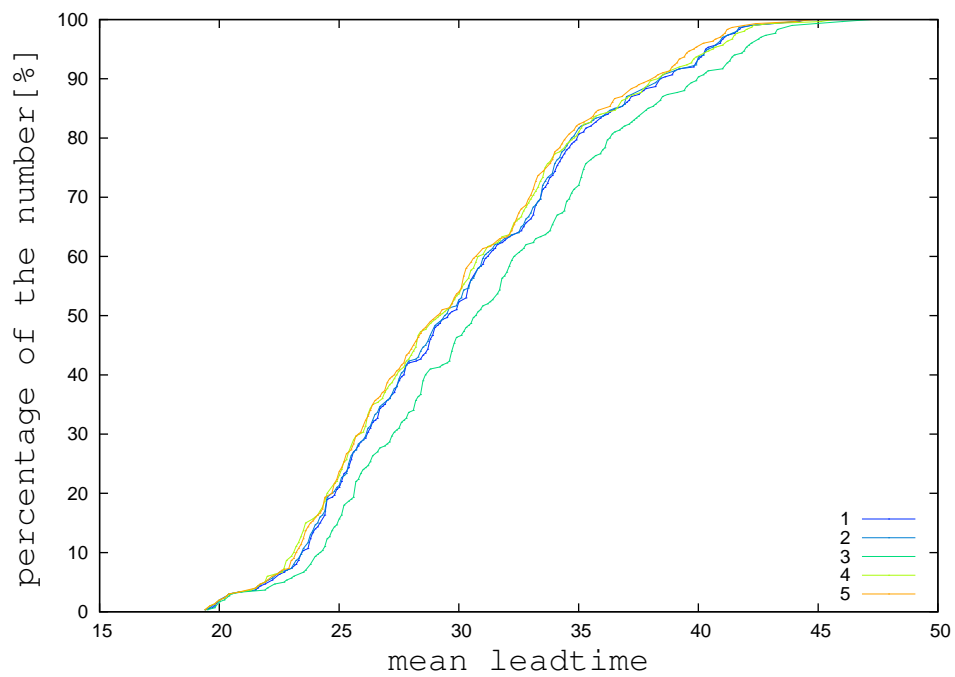


Fig. A- 1: 評価指標 1 の平均値の累積度数分布 伸縮率 60%

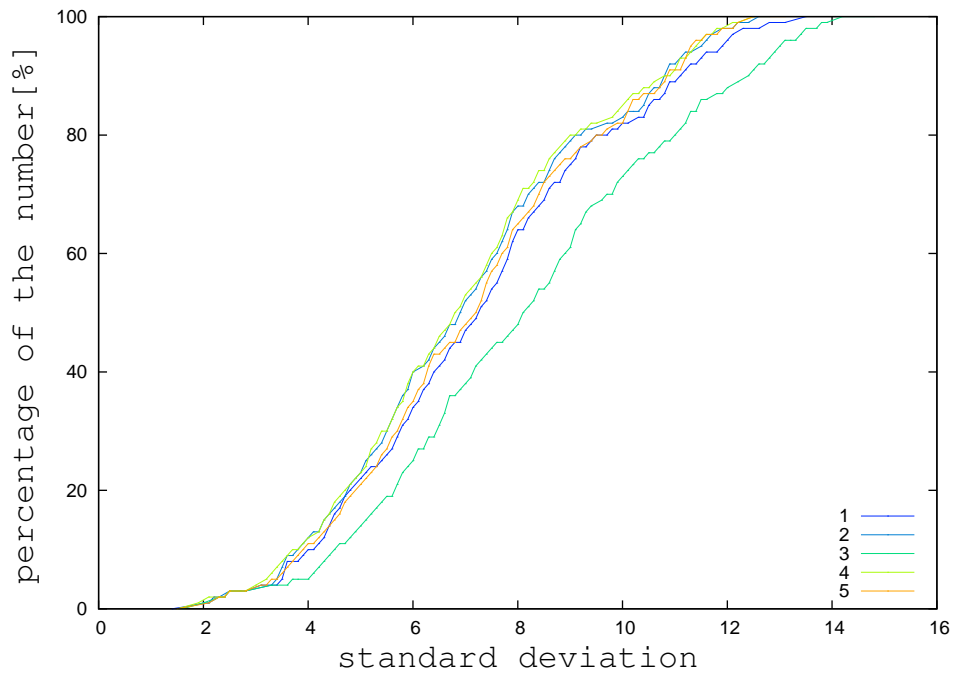


Fig. A-2: 評価指標1の平均値の標準偏差の度数分布 伸縮率60%

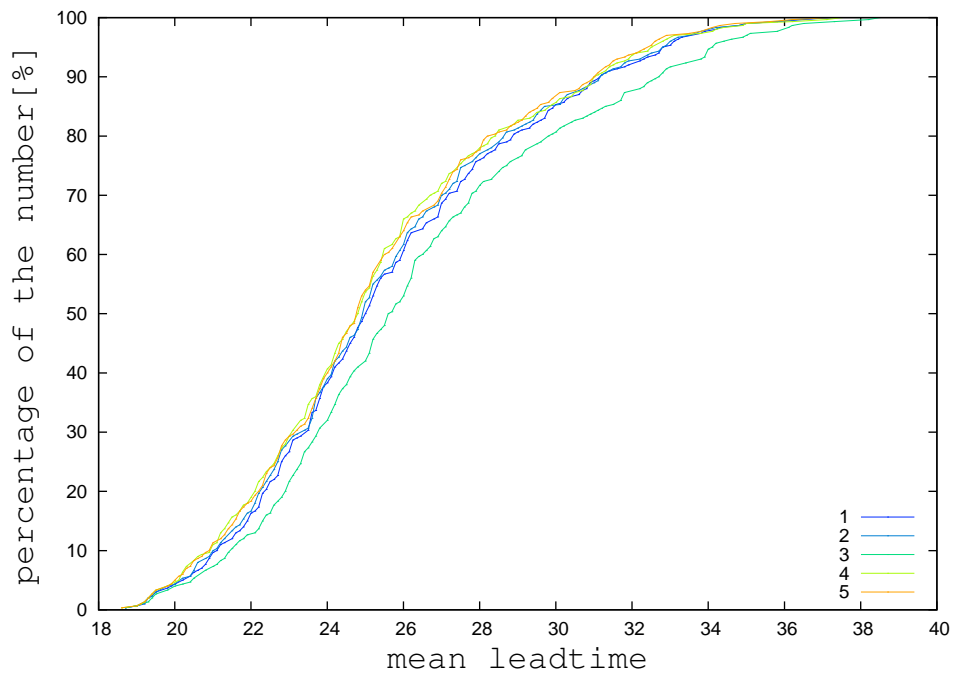


Fig. A-3: 評価指標1の平均値の累積度数分布 伸縮率70%

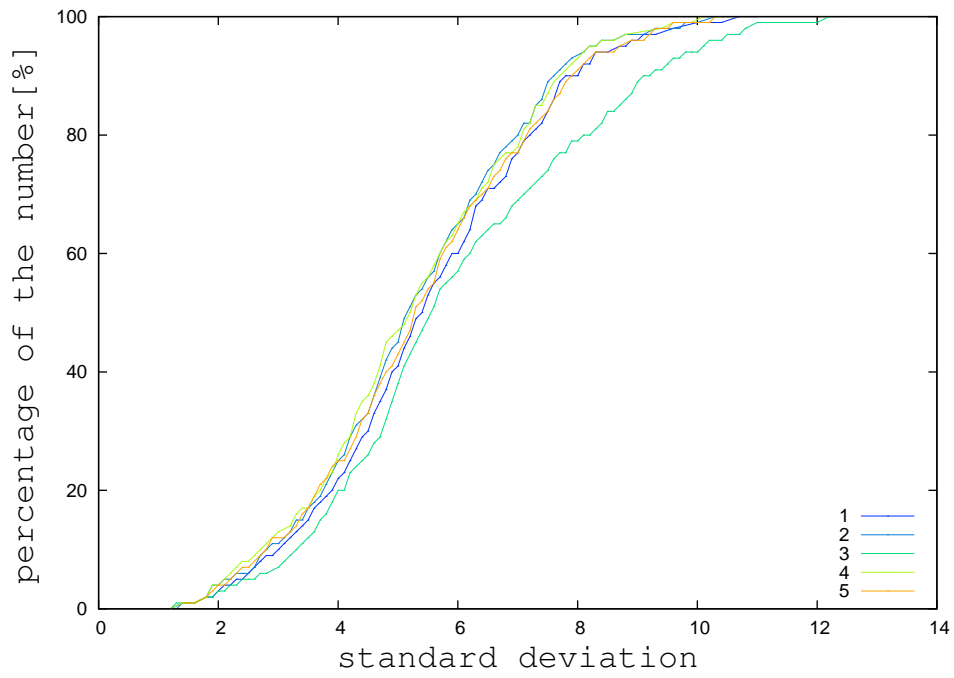


Fig. A - 4: 評価指標1の平均値の標準偏差の度数分布 伸縮率70%

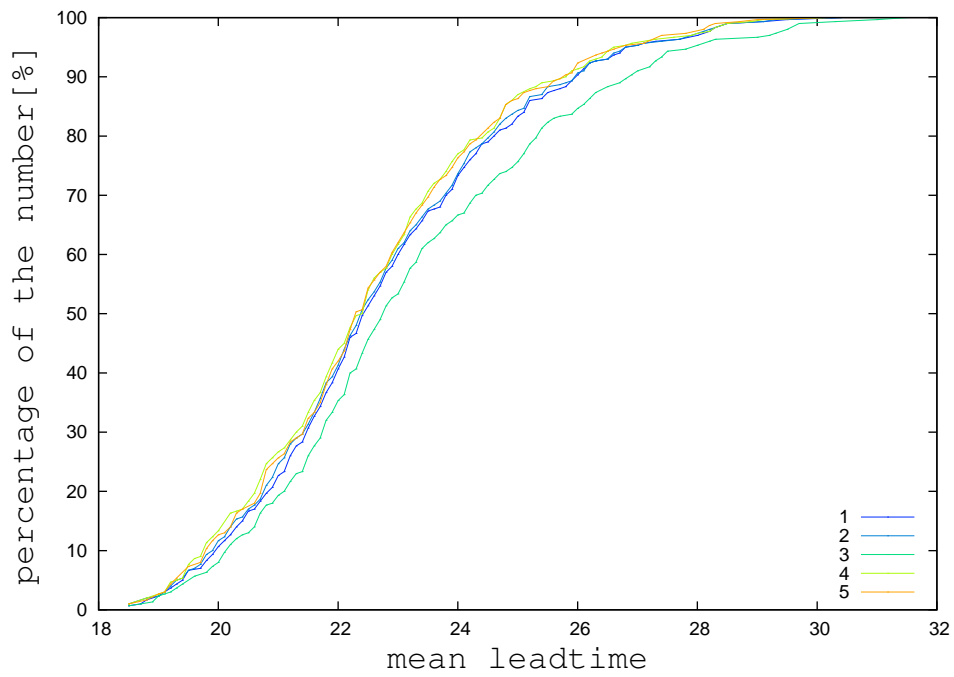


Fig. A - 5: 評価指標1の平均値の累積度数分布 伸縮率80%



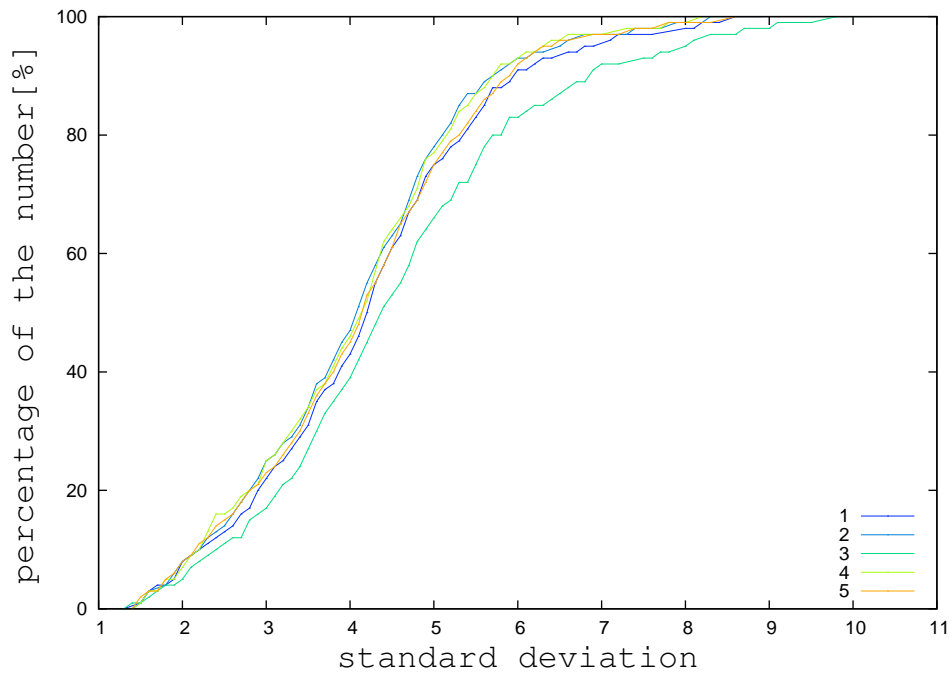


Fig. A-6: 評価指標1の平均値の標準偏差の度数分布 伸縮率80%

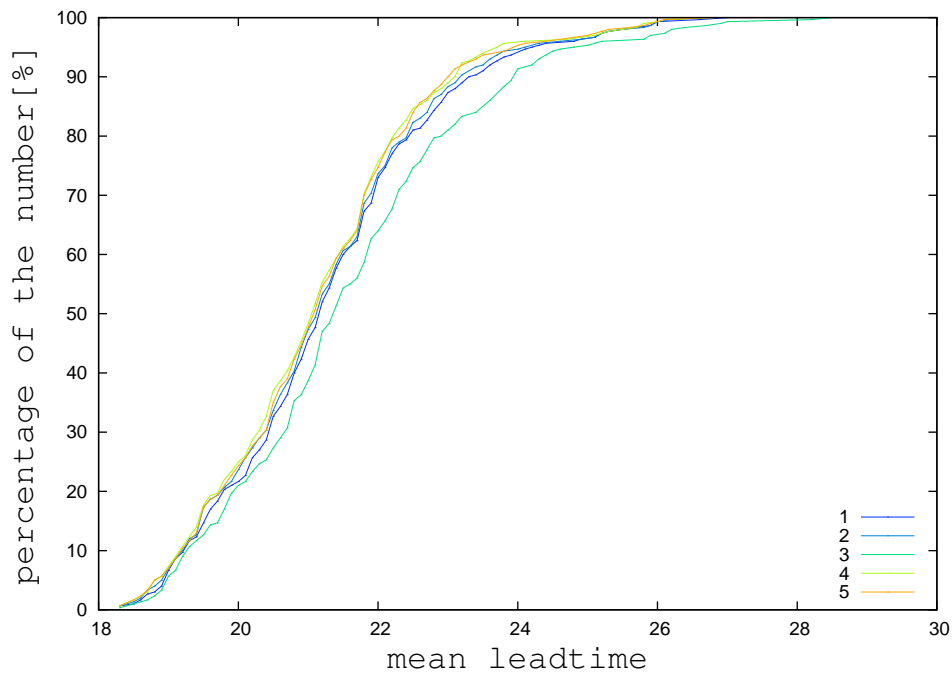


Fig. A-7: 評価指標1の平均値の累積度数分布 伸縮率90%

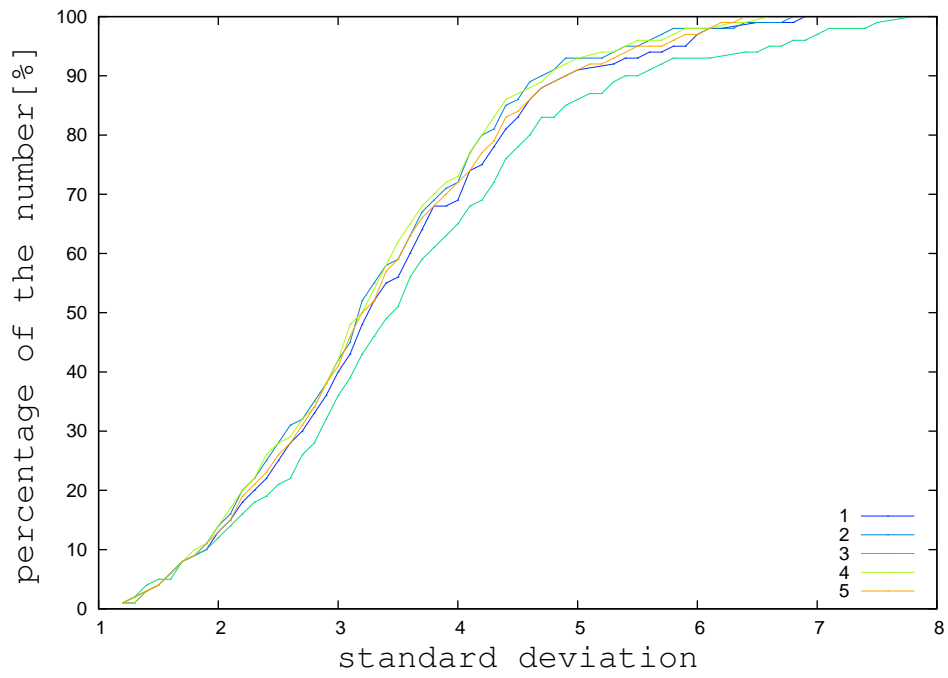


Fig. A - 8: 評価指標 1 の平均値の標準偏差の度数分布 伸縮率 90%

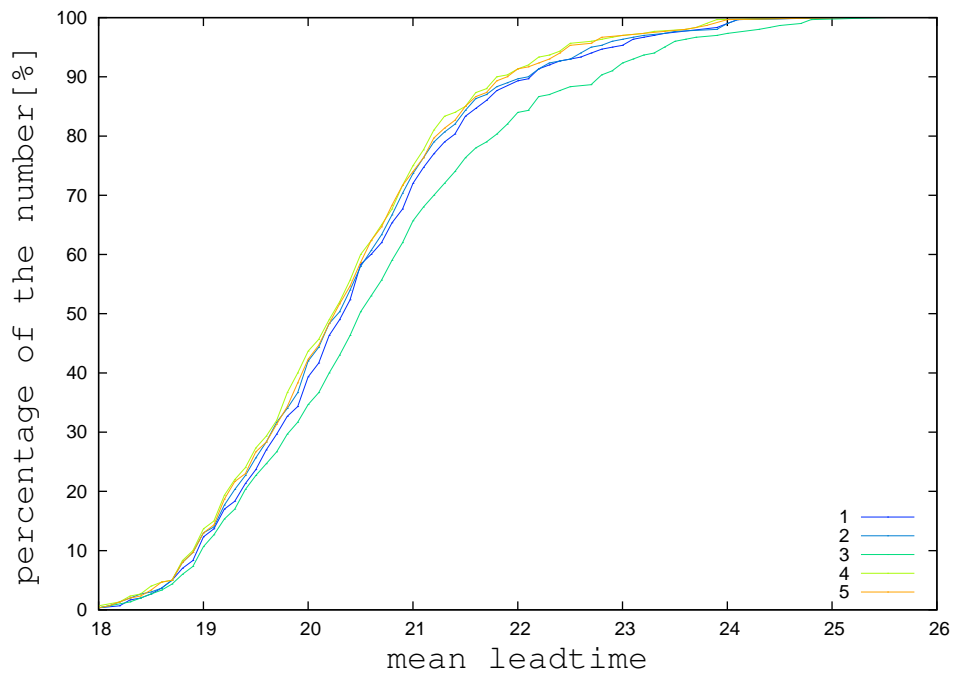


Fig. A - 9: 評価指標 1 の平均値の累積度数分布 伸縮率 100%

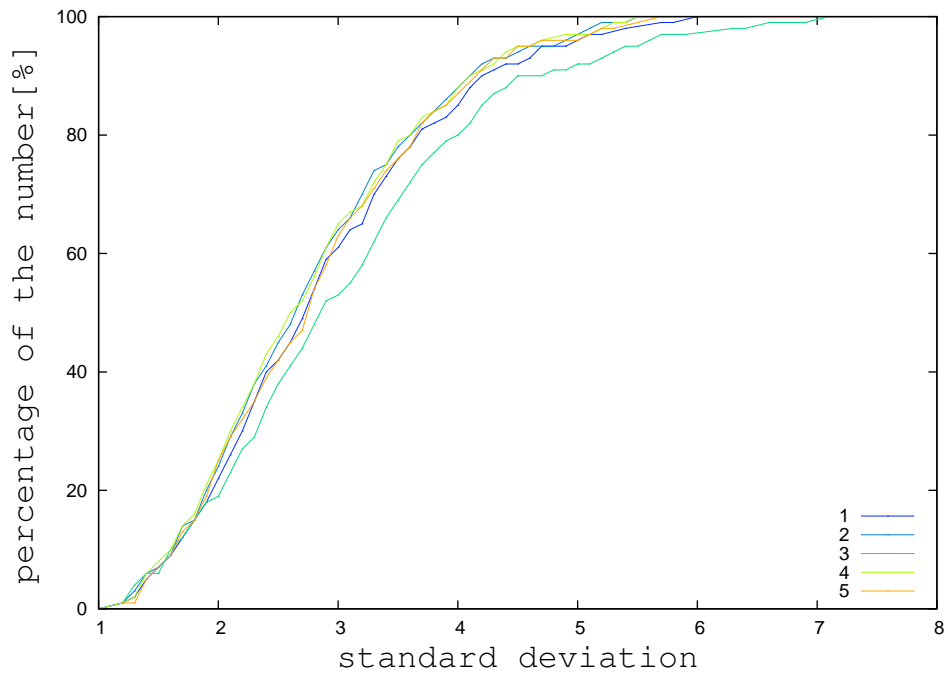


Fig. A- 10: 評価指標1の平均値の標準偏差の度数分布 伸縮率100%

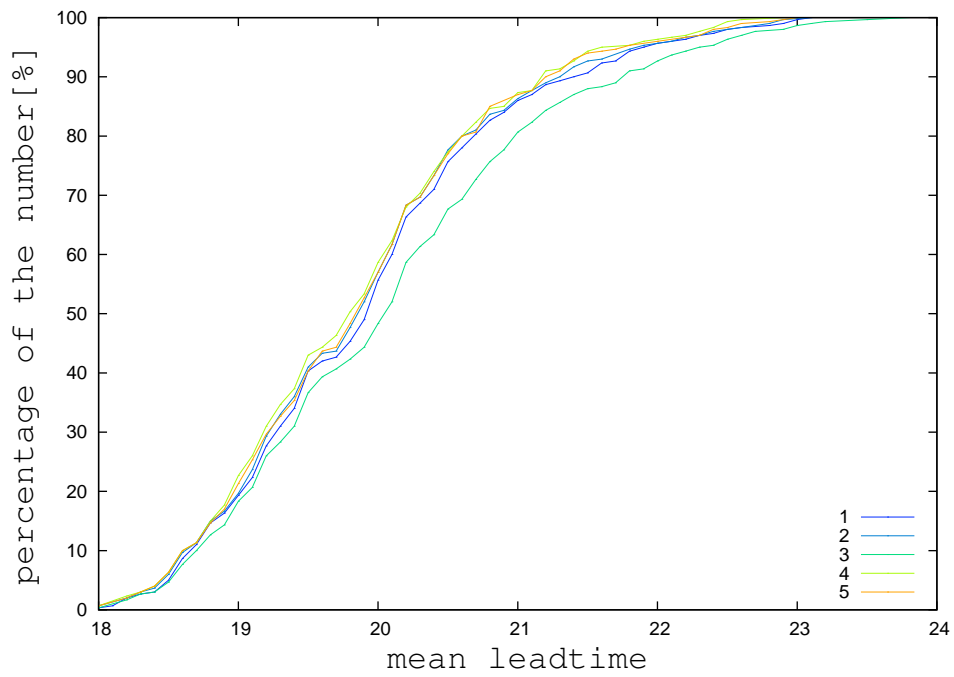


Fig. A- 11: 評価指標1の平均値の累積度数分布 伸縮率110%

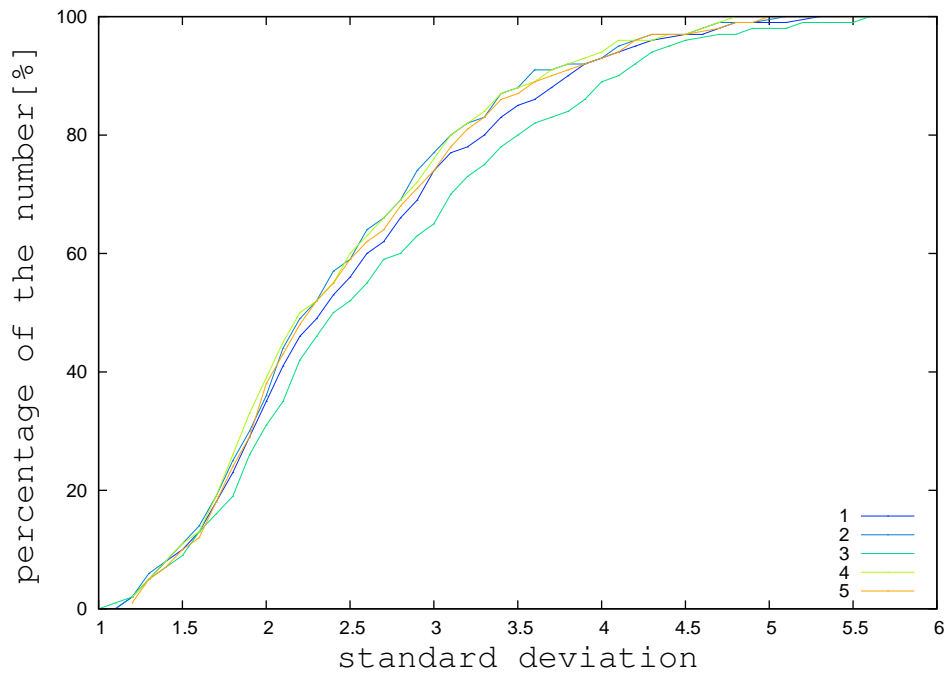


Fig. A- 12: 評価指標1の平均値の標準偏差の度数分布 伸縮率110%

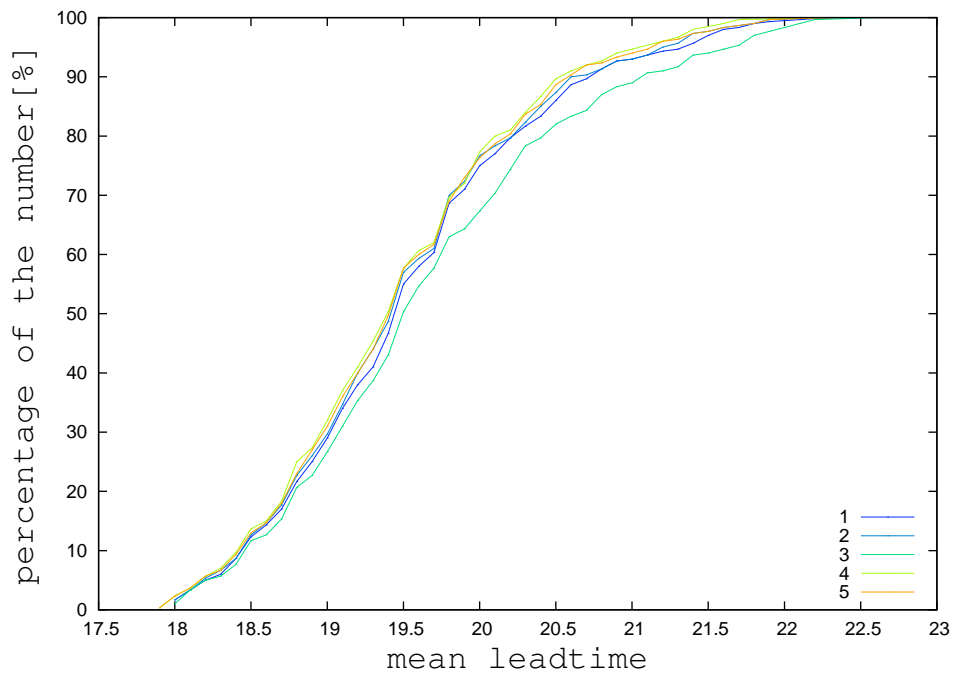


Fig. A- 13: 評価指標1の平均値の累積度数分布 伸縮率120%

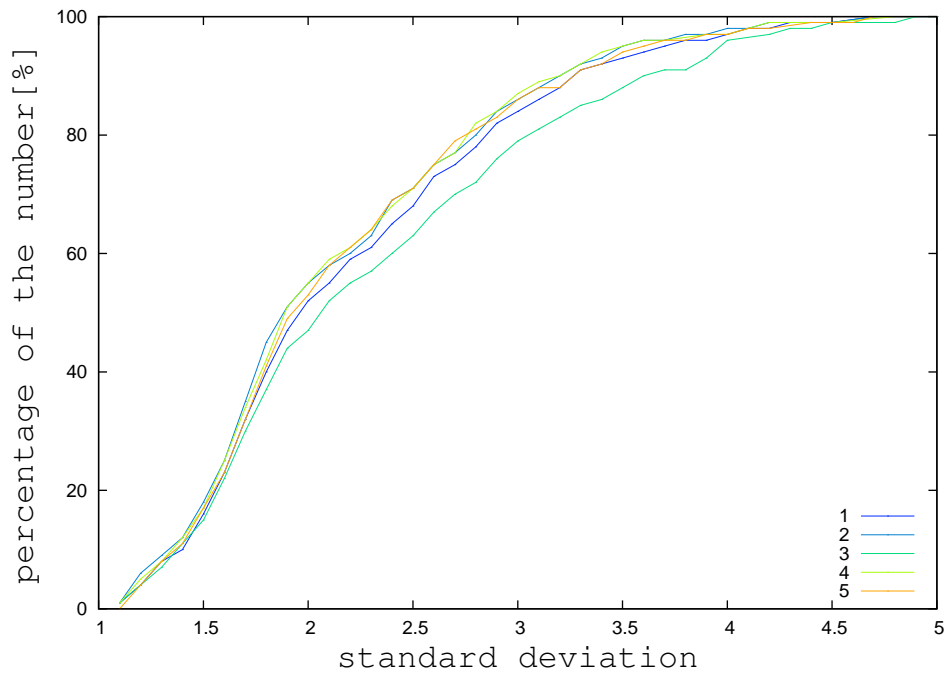


Fig. A- 14: 評価指標1の平均値の標準偏差の度数分布 伸縮率 120%

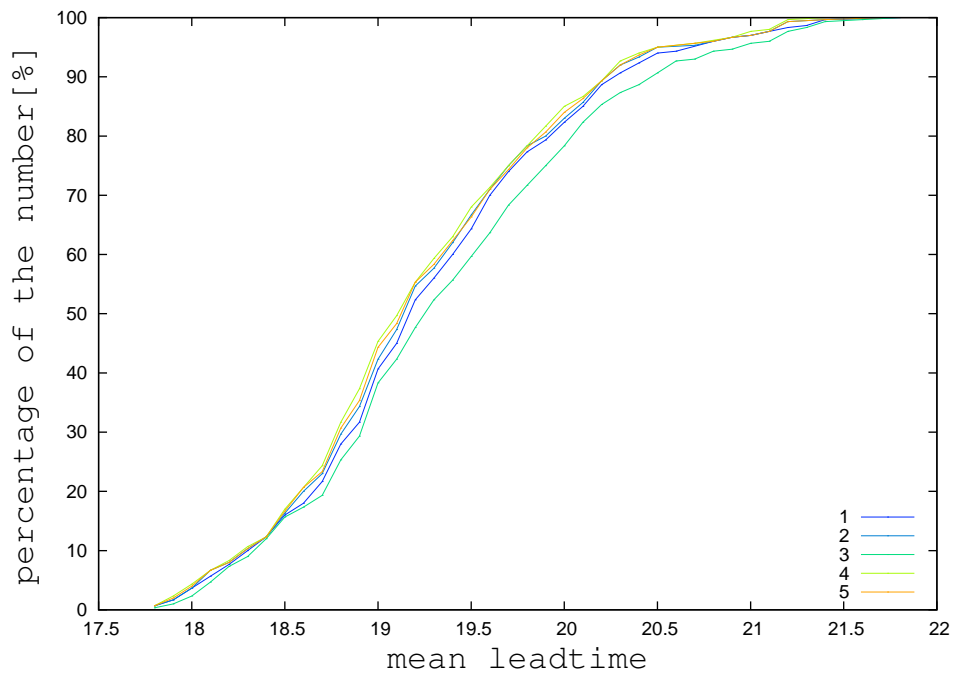


Fig. A- 15: 評価指標1の平均値の累積度数分布 伸縮率 130%

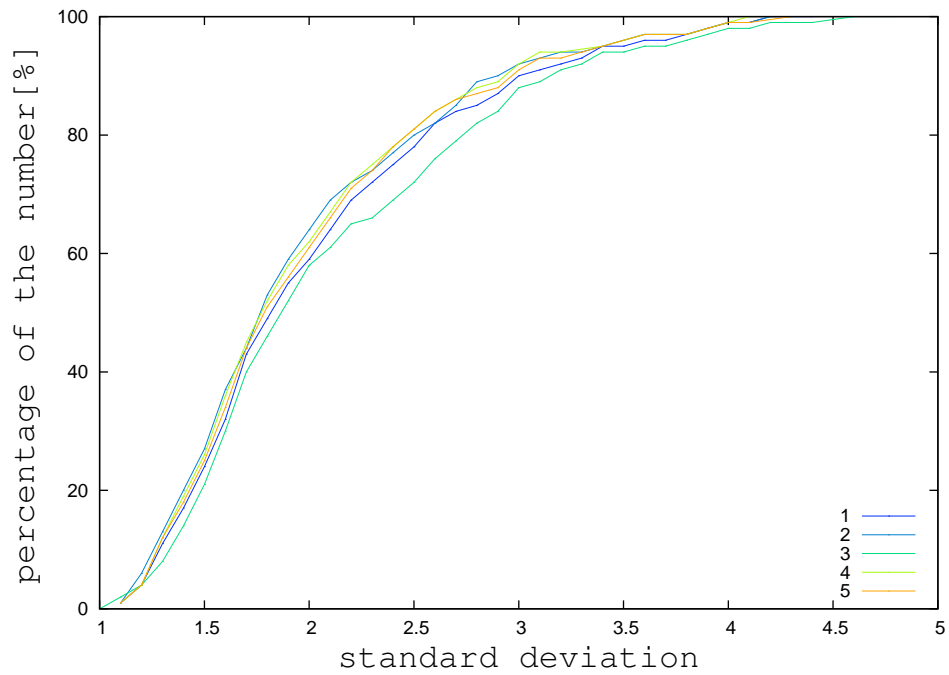


Fig. A-16: 評価指標1の平均値の標準偏差の度数分布 伸縮率130%

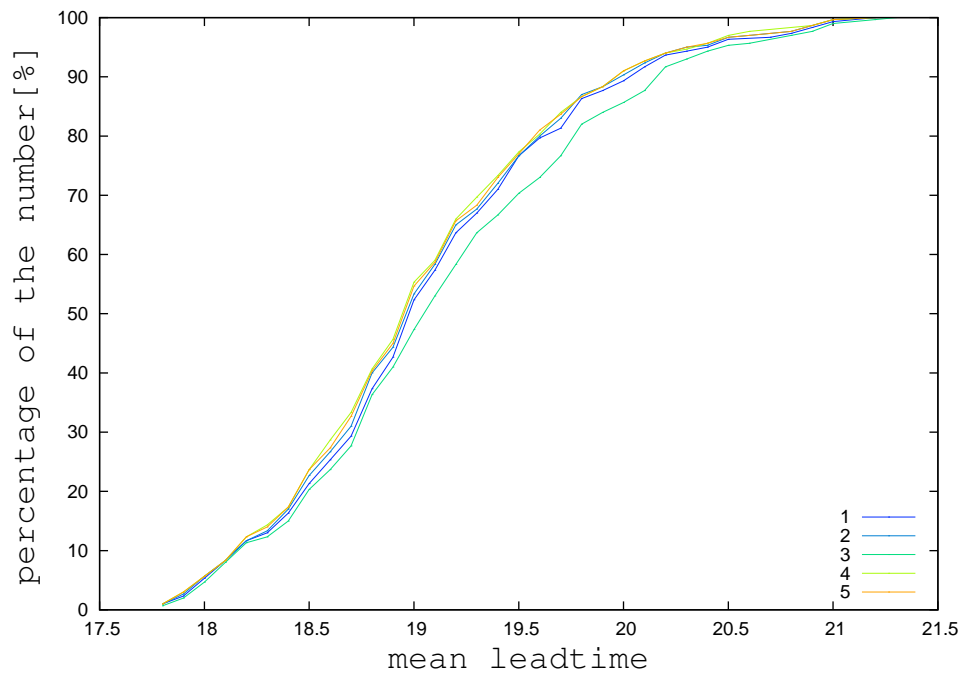


Fig. A-17: 評価指標1の平均値の累積度数分布 伸縮率140%

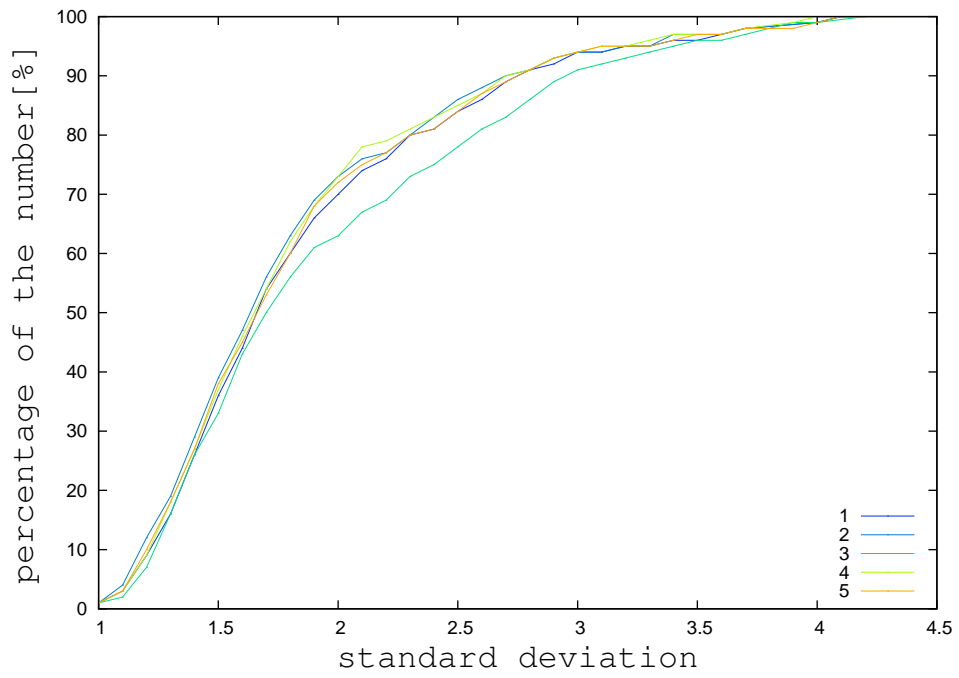


Fig. A-18: 評価指標1の平均値の標準偏差の度数分布 伸縮率140%

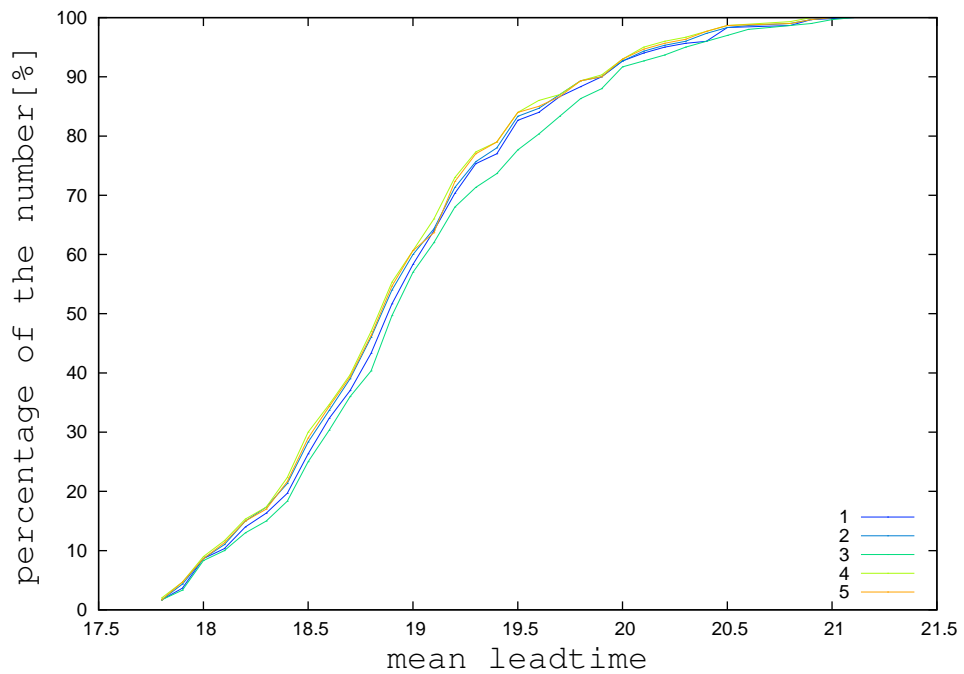


Fig. A-19: 評価指標1の平均値の累積度数分布 伸縮率150%

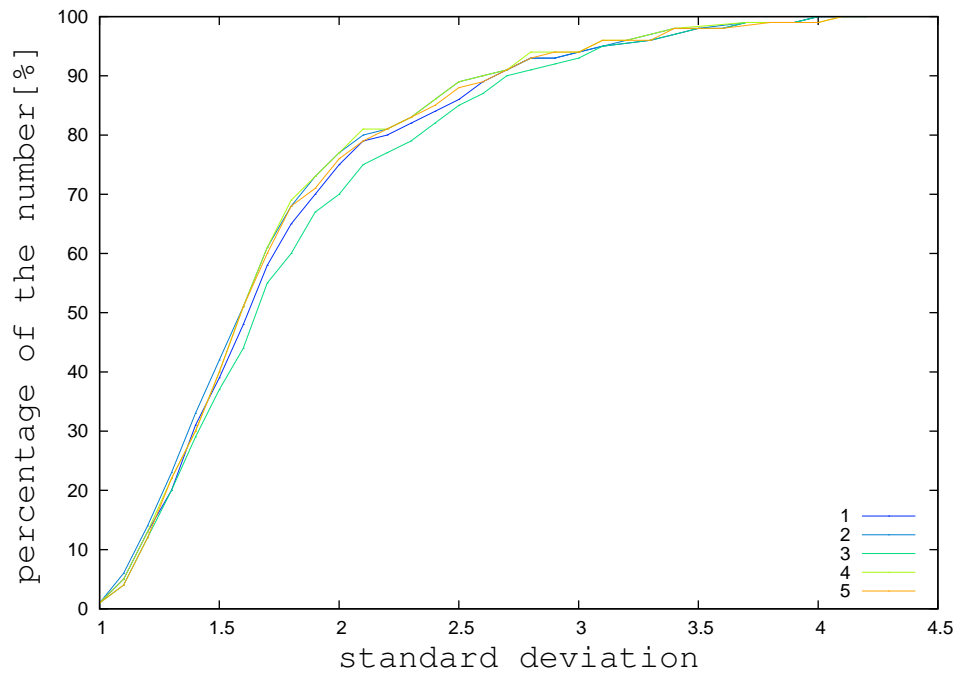


Fig. A-20: 評価指標1の平均値の標準偏差の度数分布 伸縮率150%

### A.1.2 ワークの工程処理時間の平均値と標準偏差

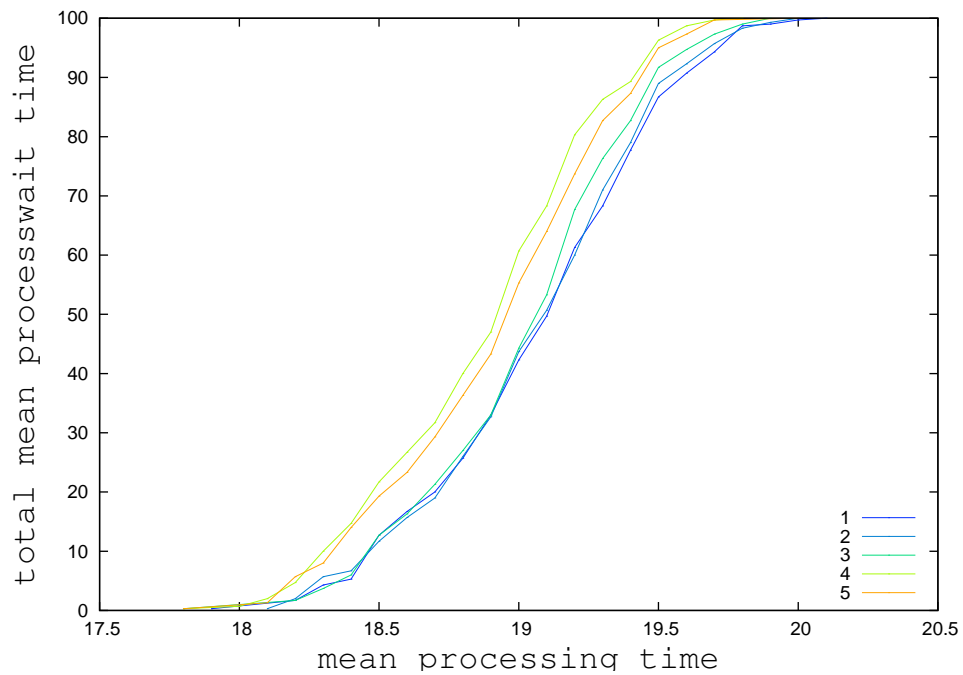


Fig. A-21: 工程処理時間の平均値の度数分布 伸縮率60%



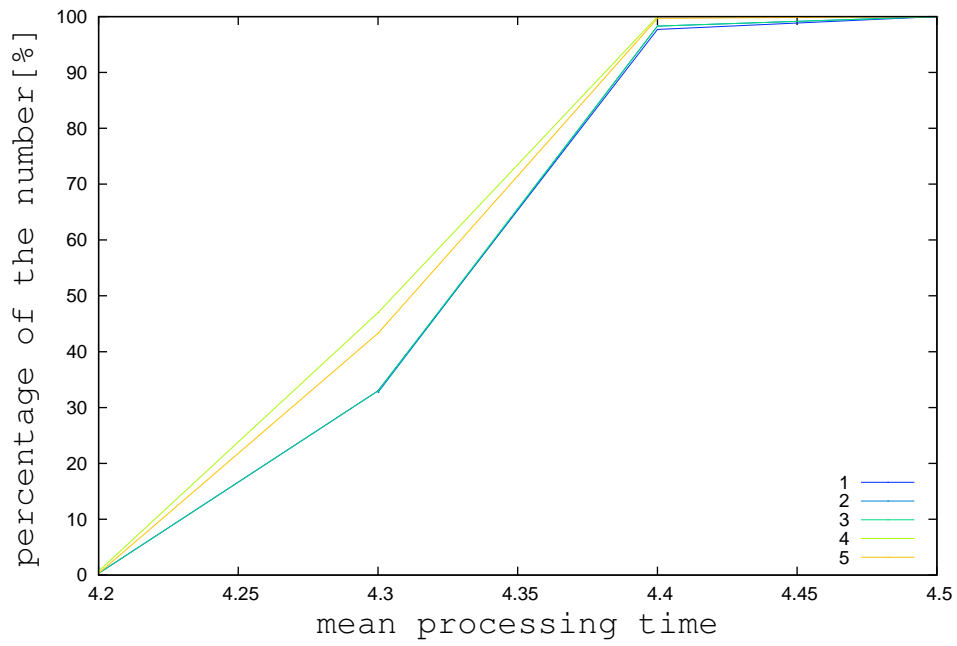


Fig. A - 22: 工程処理時間の標準偏差の度数分布 伸縮率 60%

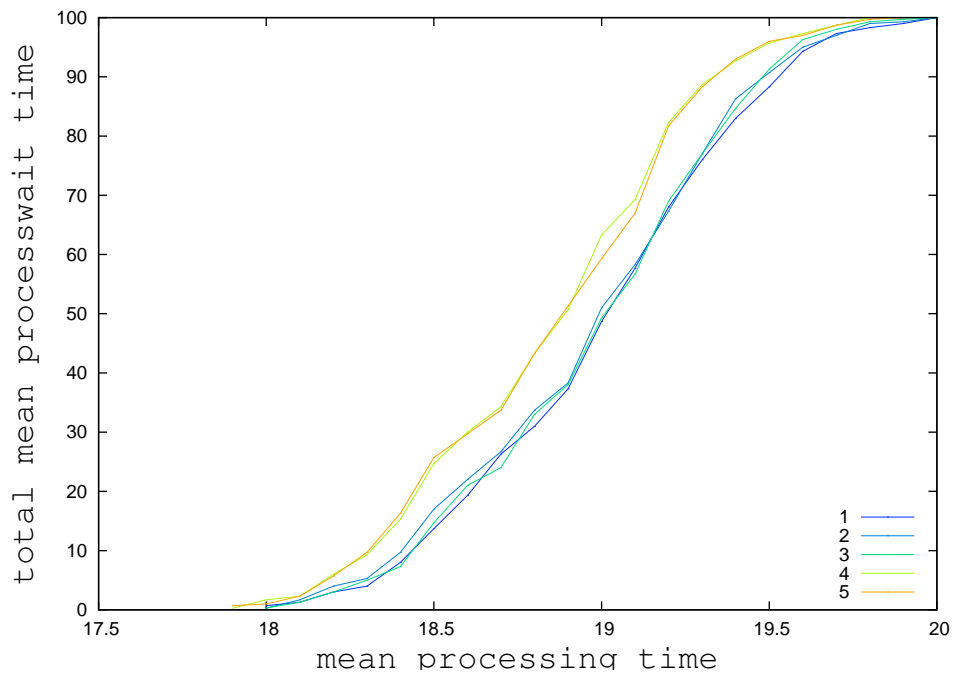


Fig. A - 23: 工程処理時間の平均値の度数分布 伸縮率 70%

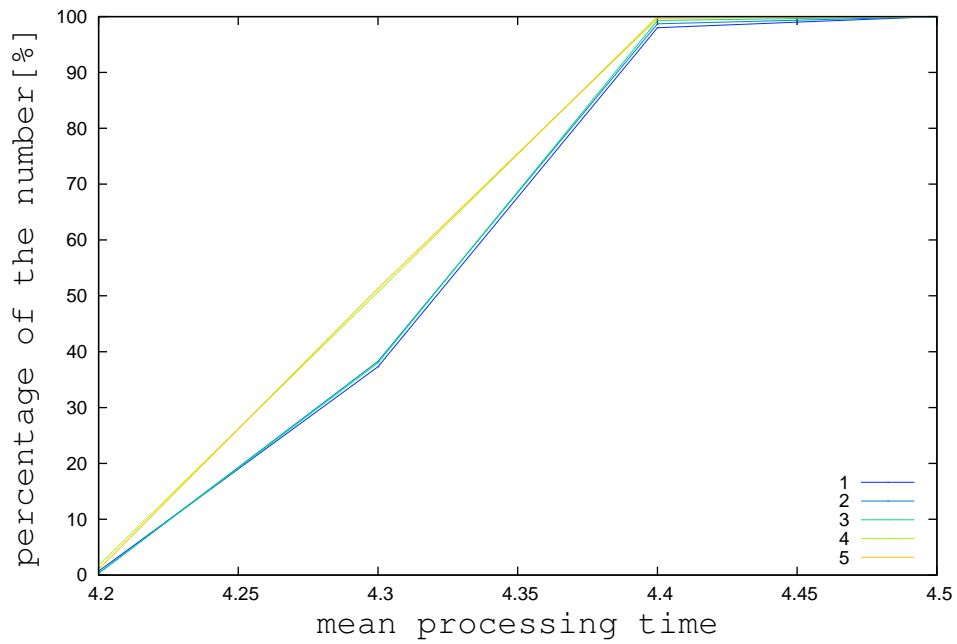


Fig. A - 24: 工程処理時間の標準偏差の度数分布 伸縮率 70%

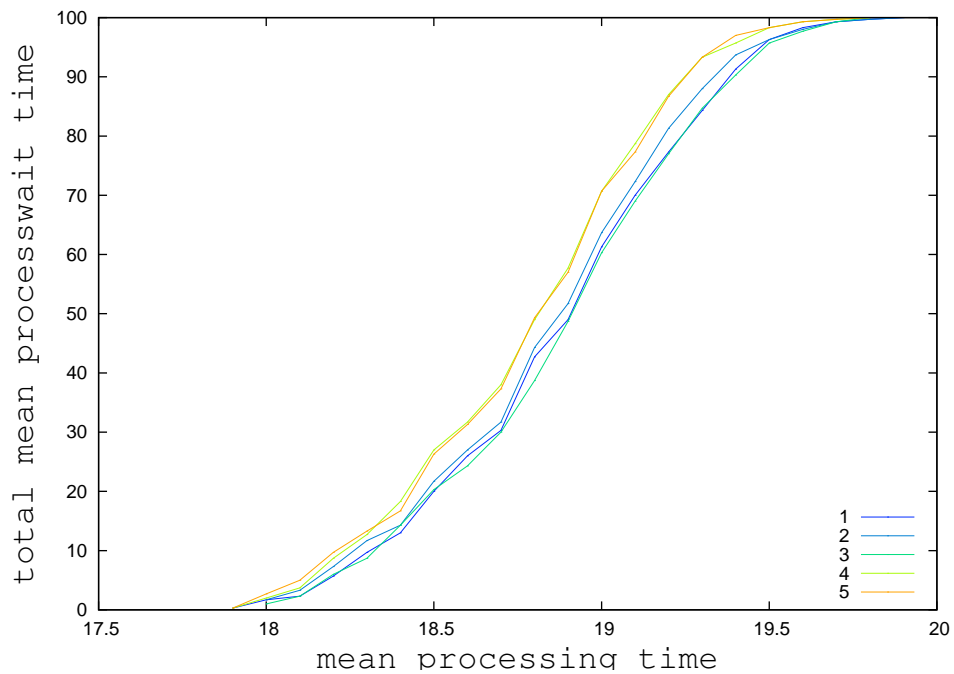


Fig. A - 25: 工程処理時間の平均値の度数分布 伸縮率 80%

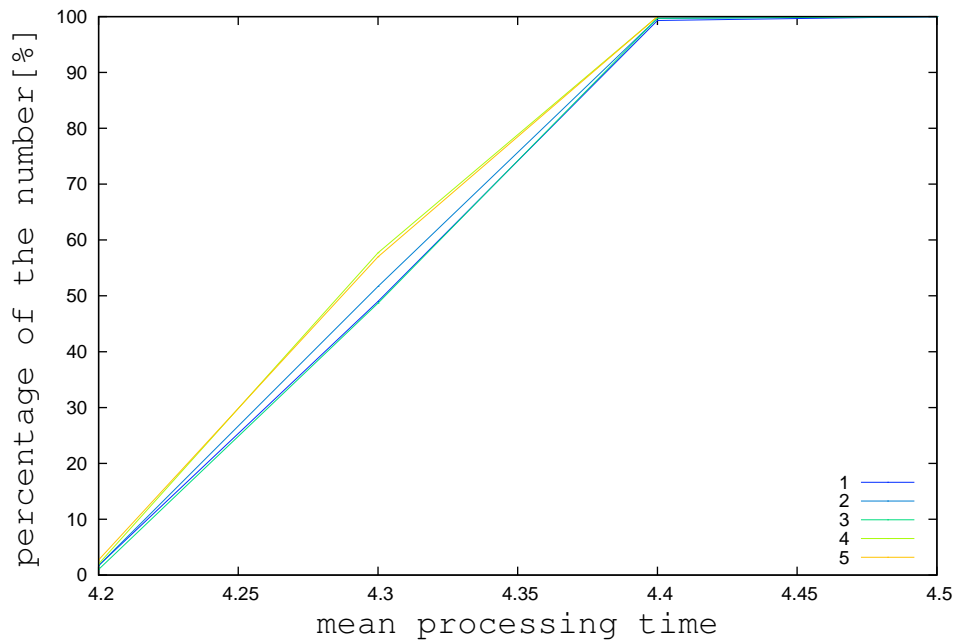


Fig. A - 26: 工程処理時間の標準偏差の度数分布 伸縮率 80%

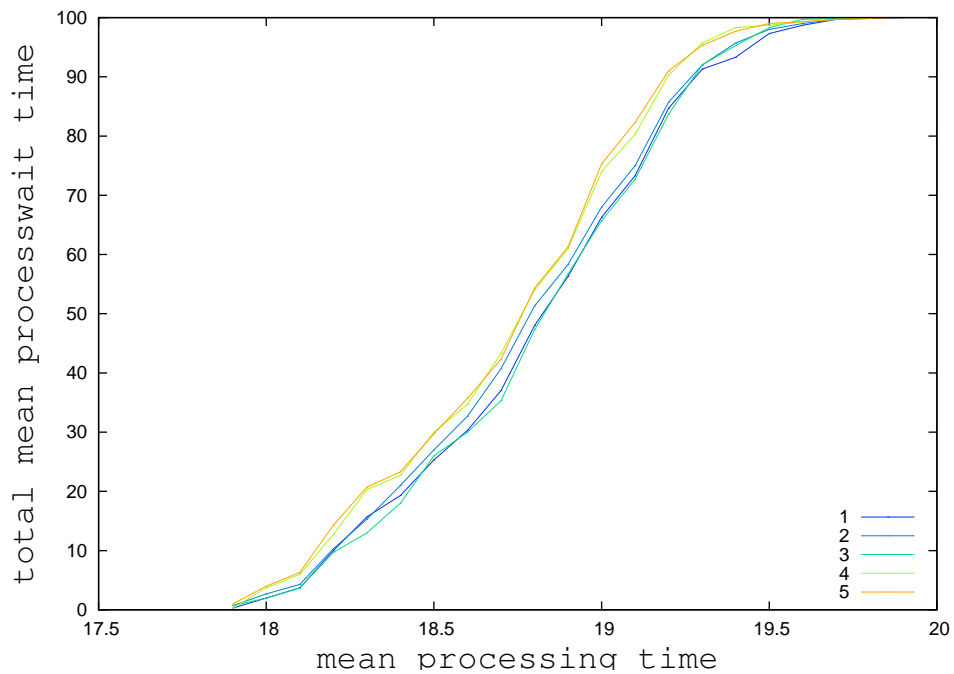


Fig. A - 27: 工程処理時間の平均値の度数分布 伸縮率 90%

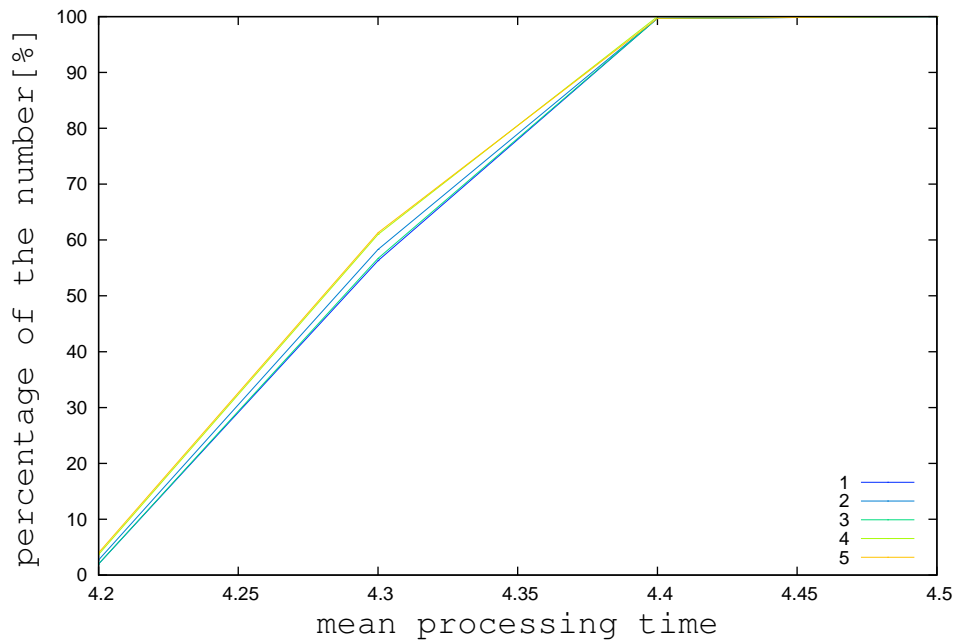


Fig. A-28: 工程処理時間の標準偏差の度数分布 伸縮率 90%

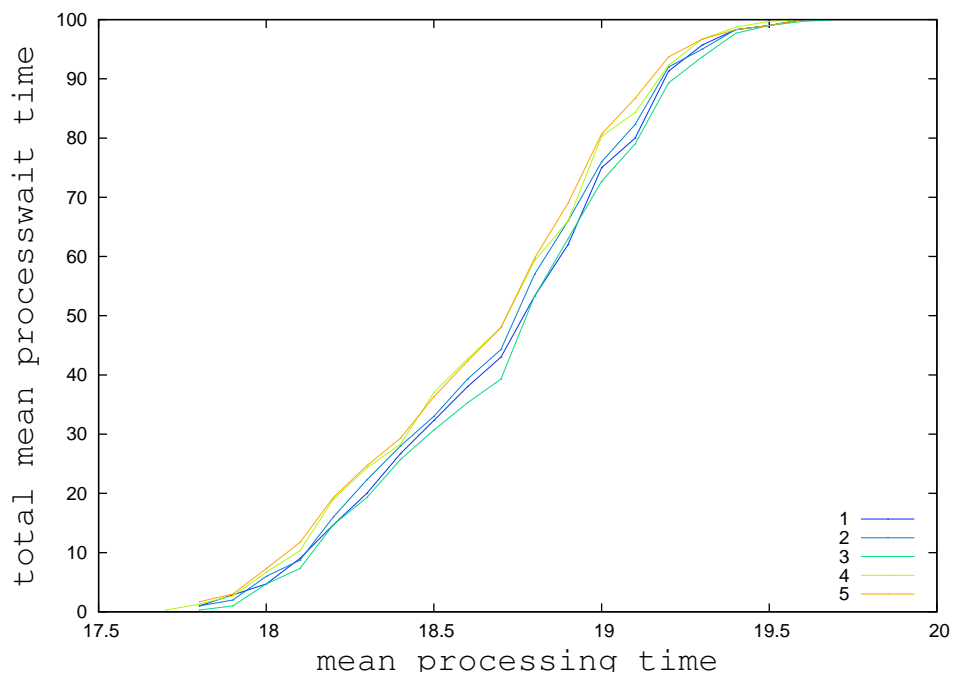


Fig. A-29: 工程処理時間の平均値の度数分布 伸縮率 100%

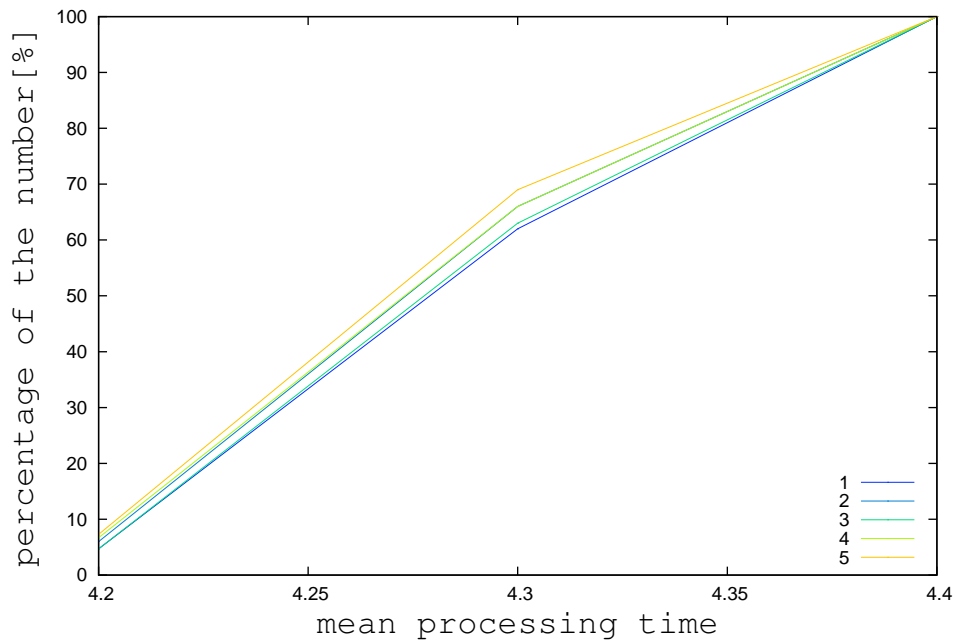


Fig. A-30: 工程処理時間の標準偏差の度数分布 伸縮率 100%

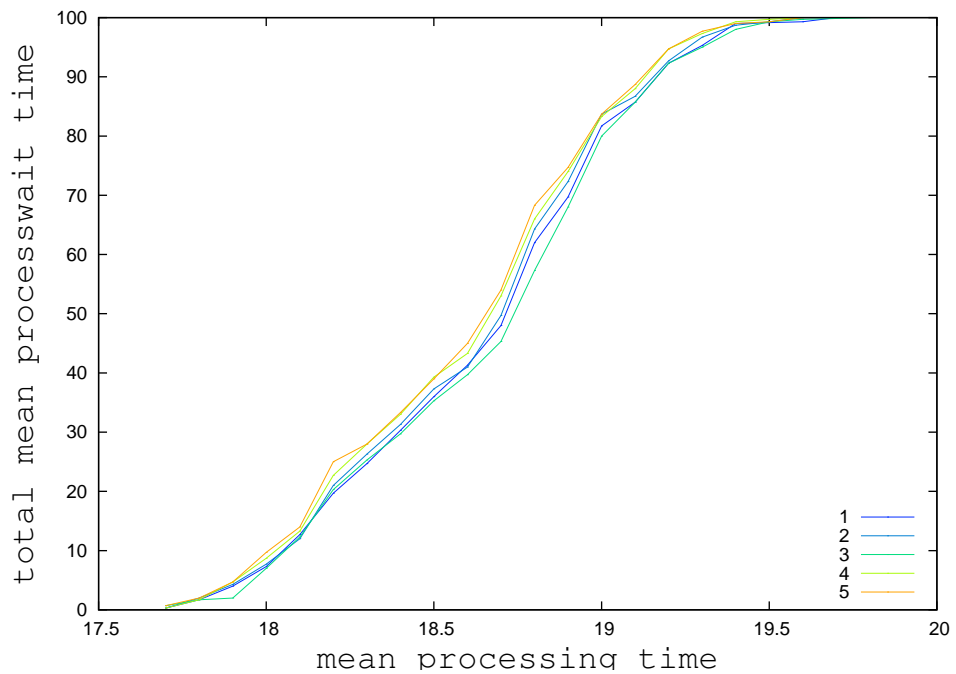


Fig. A-31: 工程処理時間の平均値の度数分布 伸縮率 110%

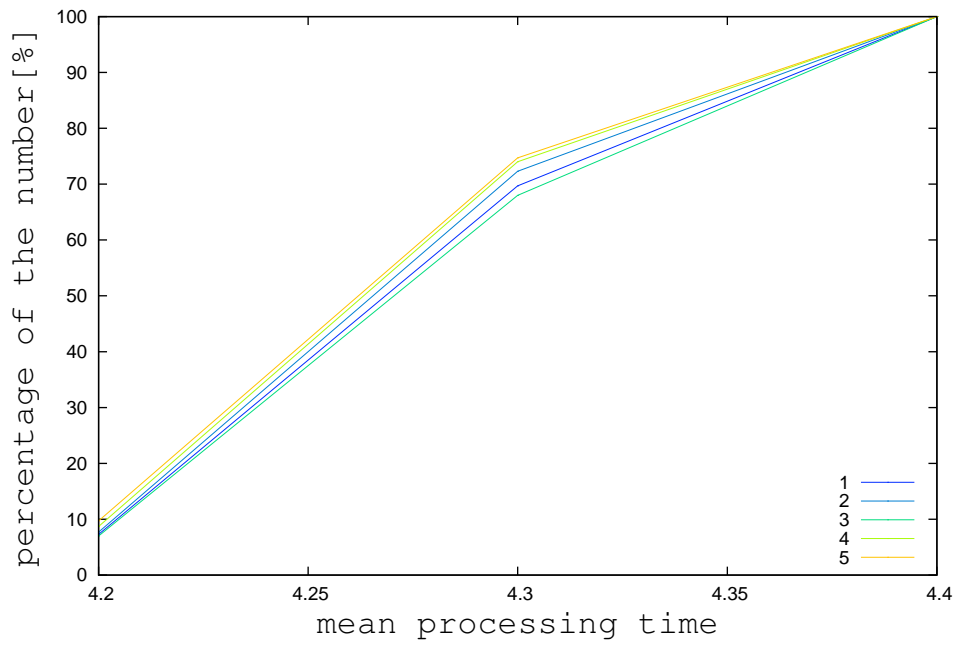


Fig. A-32: 工程処理時間の標準偏差の度数分布 伸縮率 110%

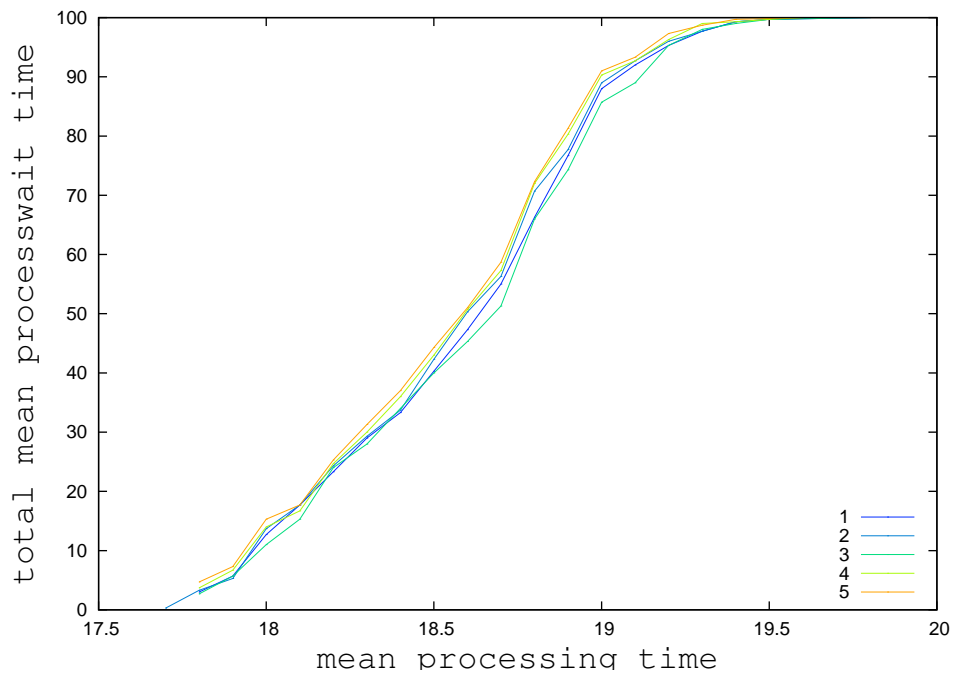


Fig. A-33: 工程処理時間の平均値の度数分布 伸縮率 120%

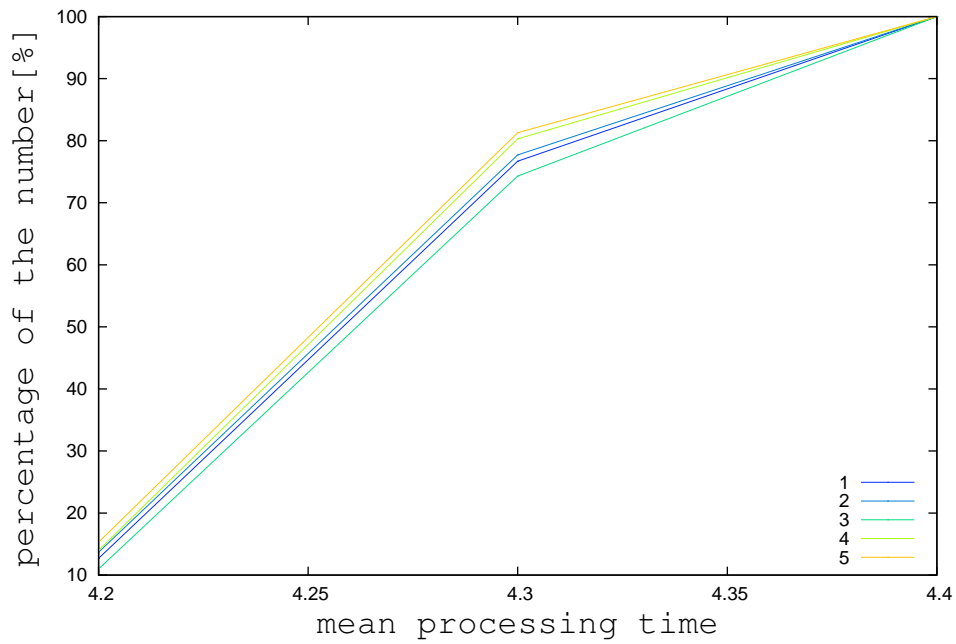


Fig. A-34: 工程処理時間の標準偏差の度数分布 伸縮率 120%

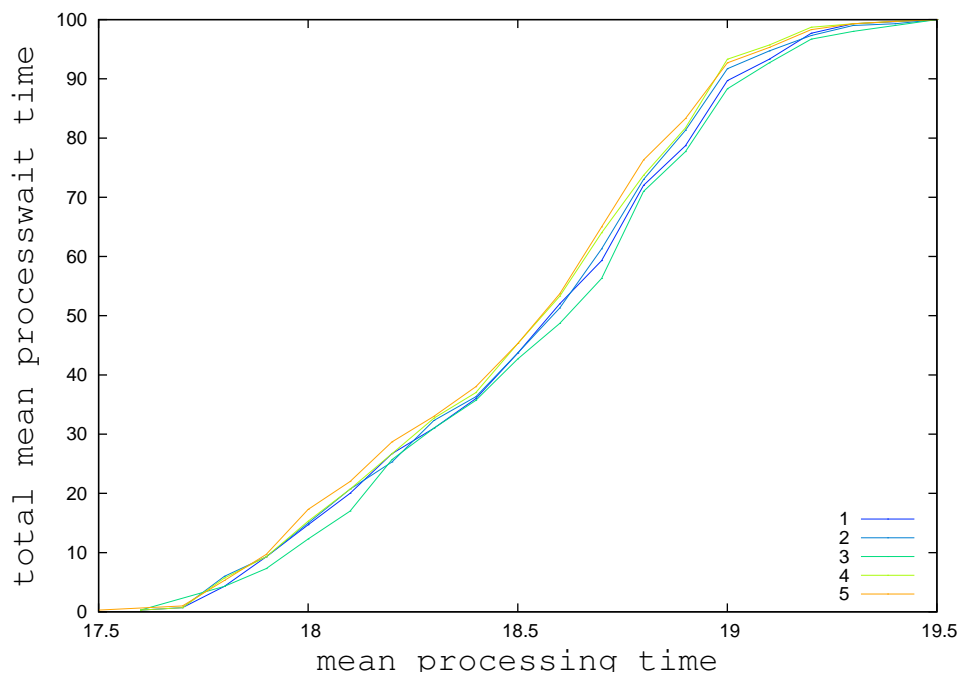


Fig. A-35: 工程処理時間の平均値の度数分布 伸縮率 130%

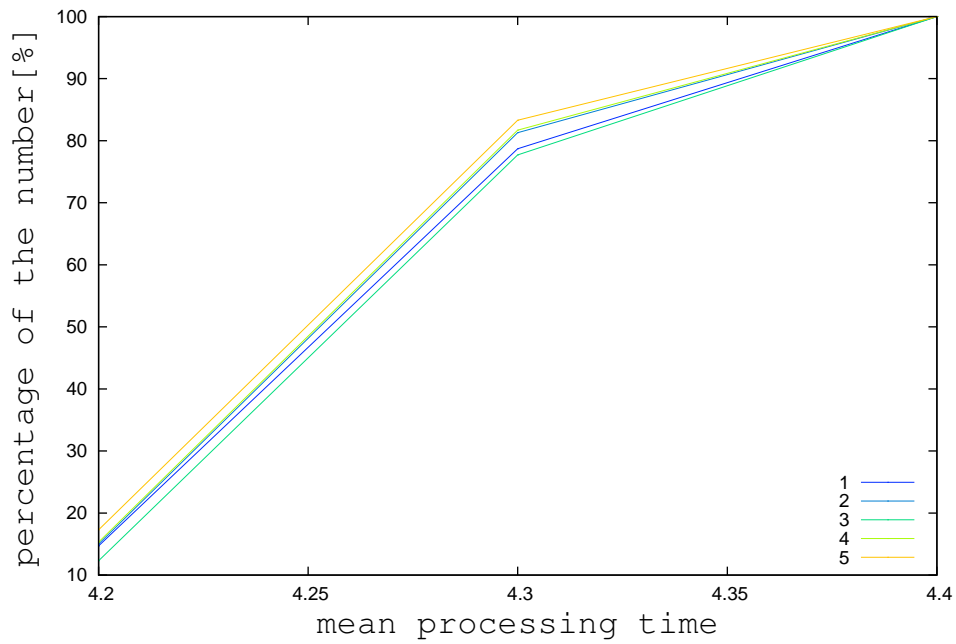


Fig. A- 36: 工程処理時間の標準偏差の度数分布 伸縮率 130%

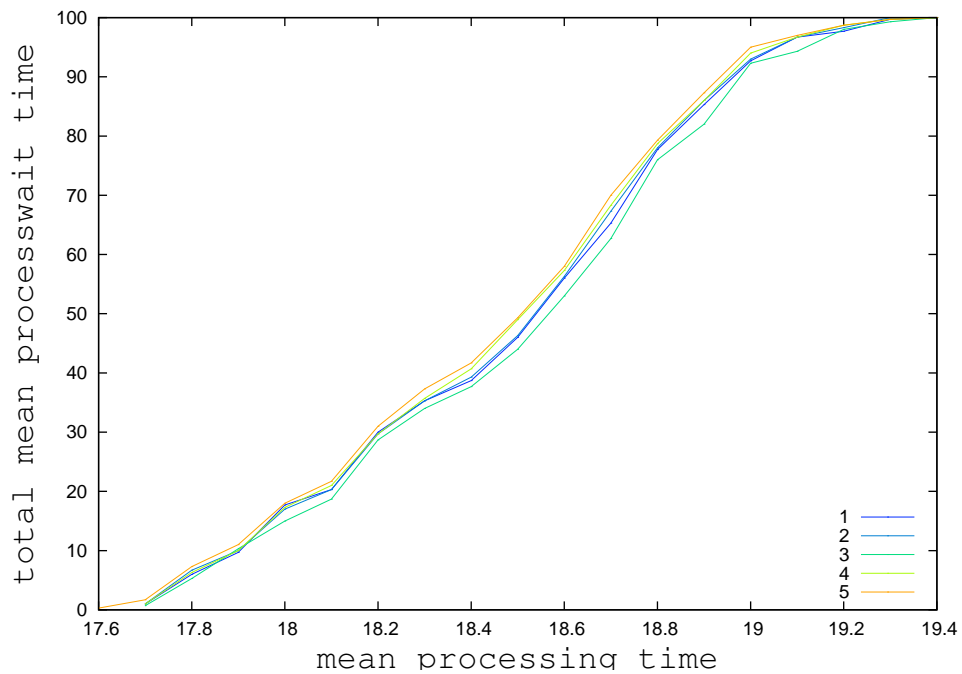


Fig. A- 37: 工程処理時間の平均値の度数分布 伸縮率 140%



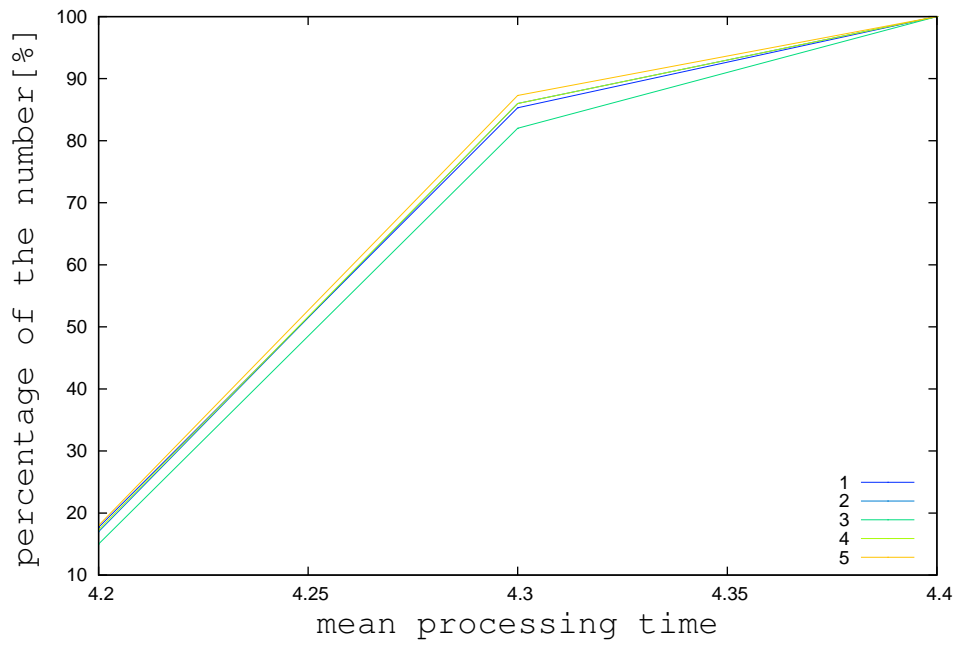


Fig. A-38: 工程処理時間の標準偏差の度数分布 伸縮率 140%

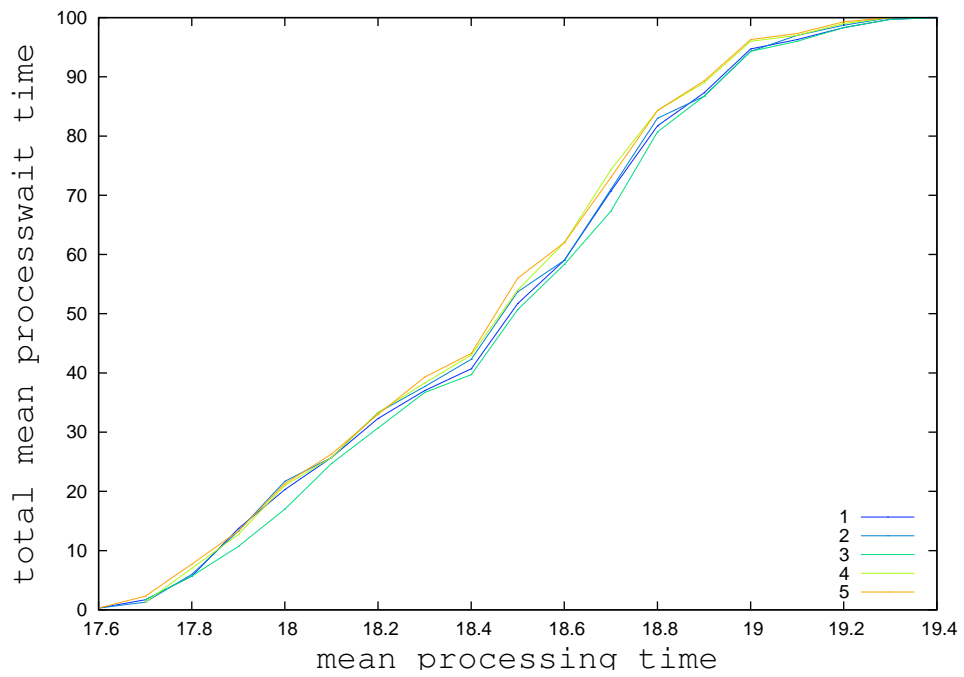


Fig. A-39: 工程処理時間の平均値の度数分布 伸縮率 150%

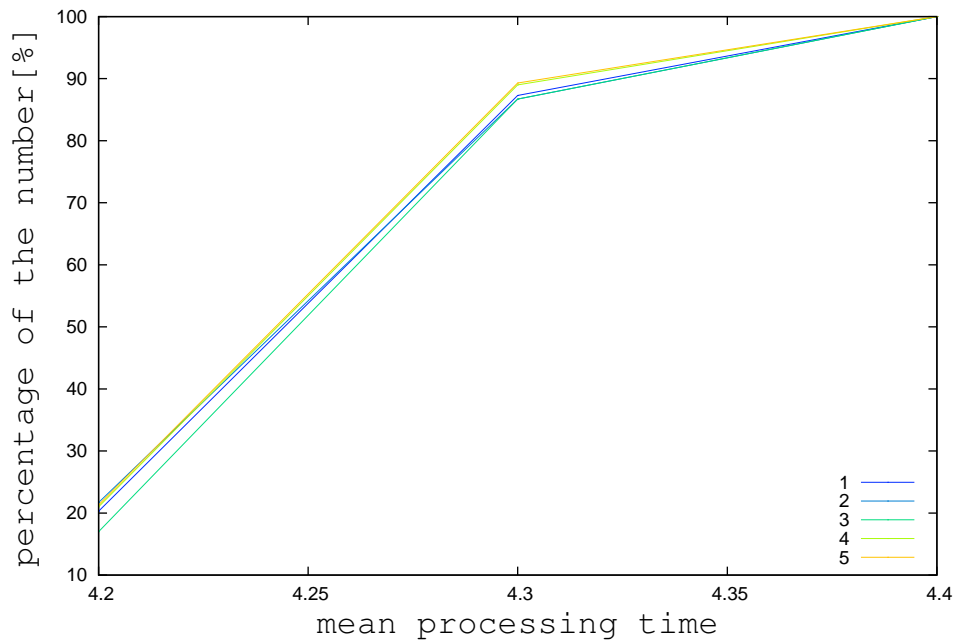


Fig. A- 40: 工程処理時間の標準偏差の度数分布 伸縮率 150%

## A.2 実験 2

### A.2.1 ワークごとのリードタイムの平均値と標準偏差

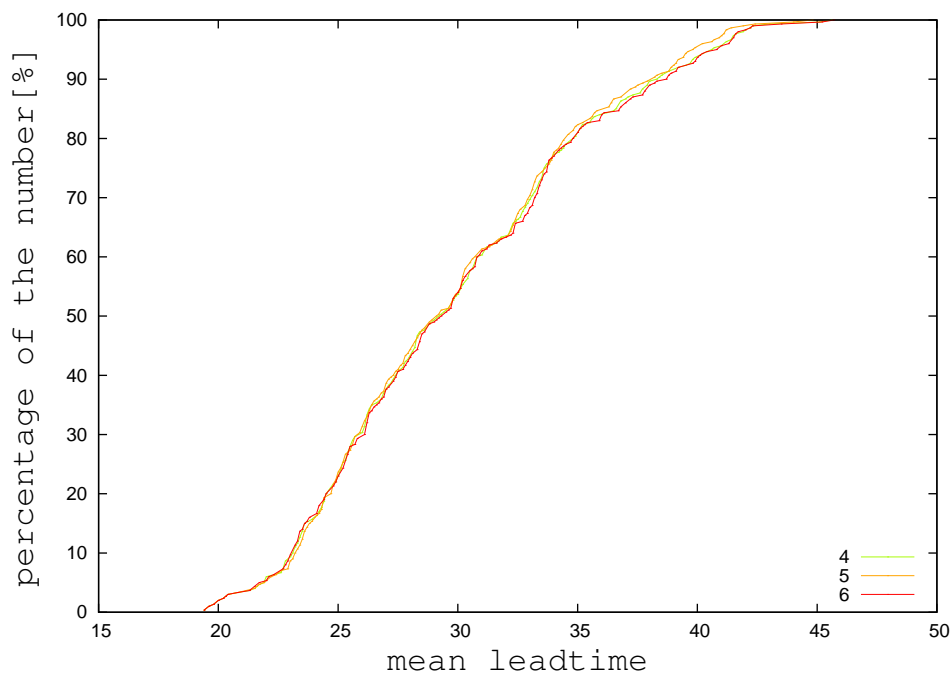


Fig. A- 41: リードタイムの平均値の度数分布 伸縮率 60%

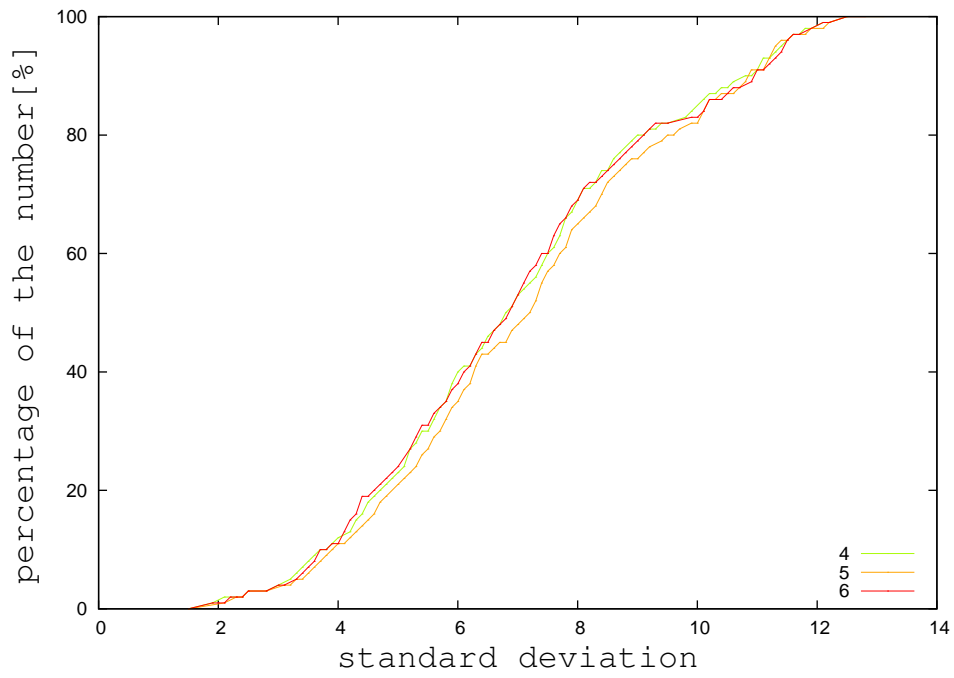


Fig. A - 42: リードタイムの平均値の標準偏差の度数分布 伸縮率 60%

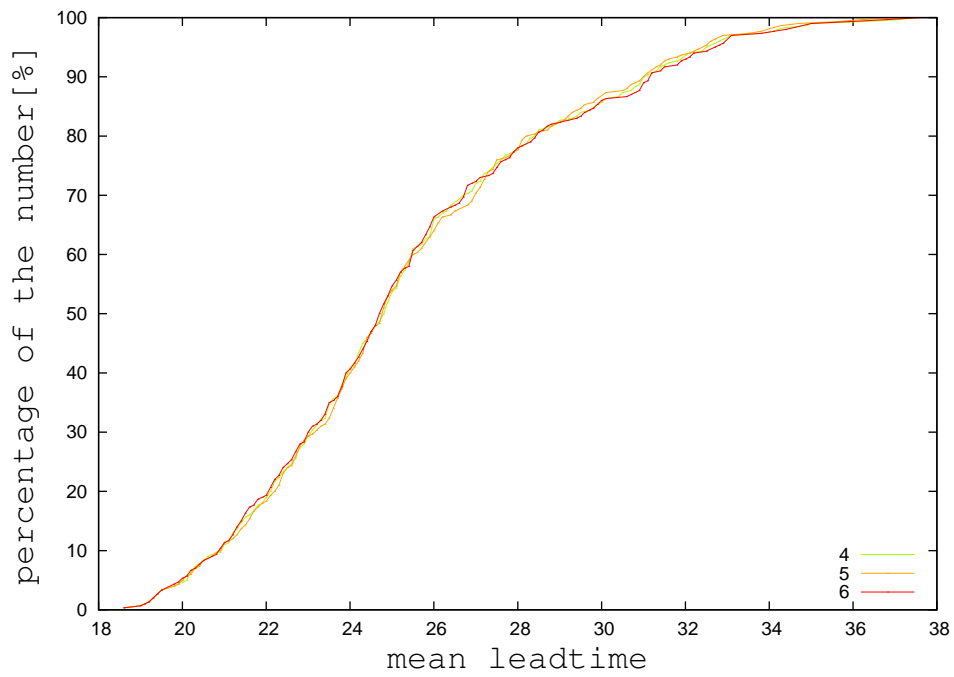


Fig. A - 43: リードタイムの平均値の度数分布 伸縮率 70%

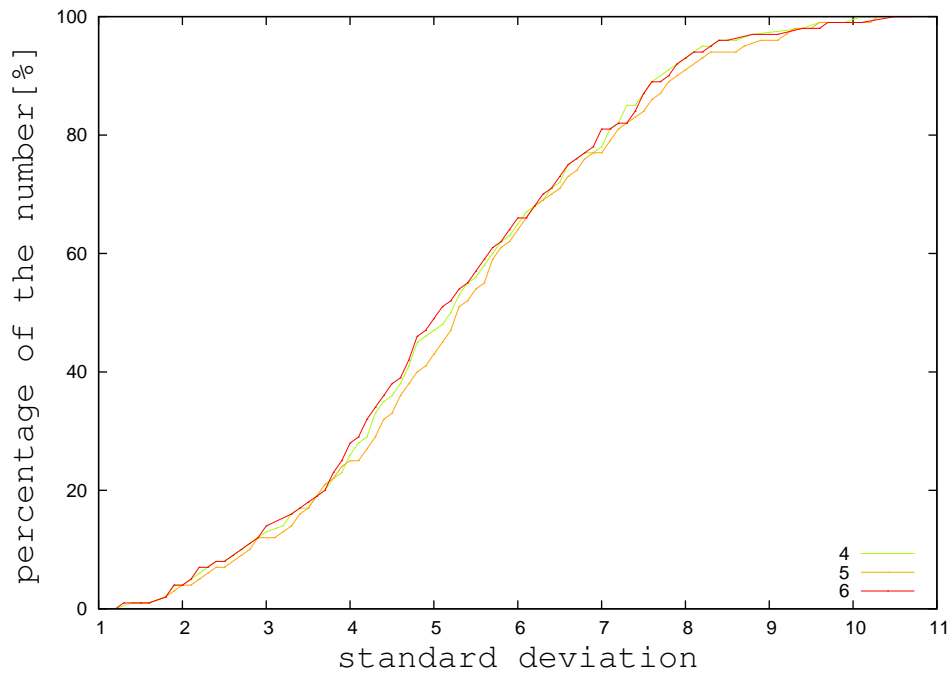


Fig. A - 44: リードタイムの平均値の標準偏差の度数分布 伸縮率 70%

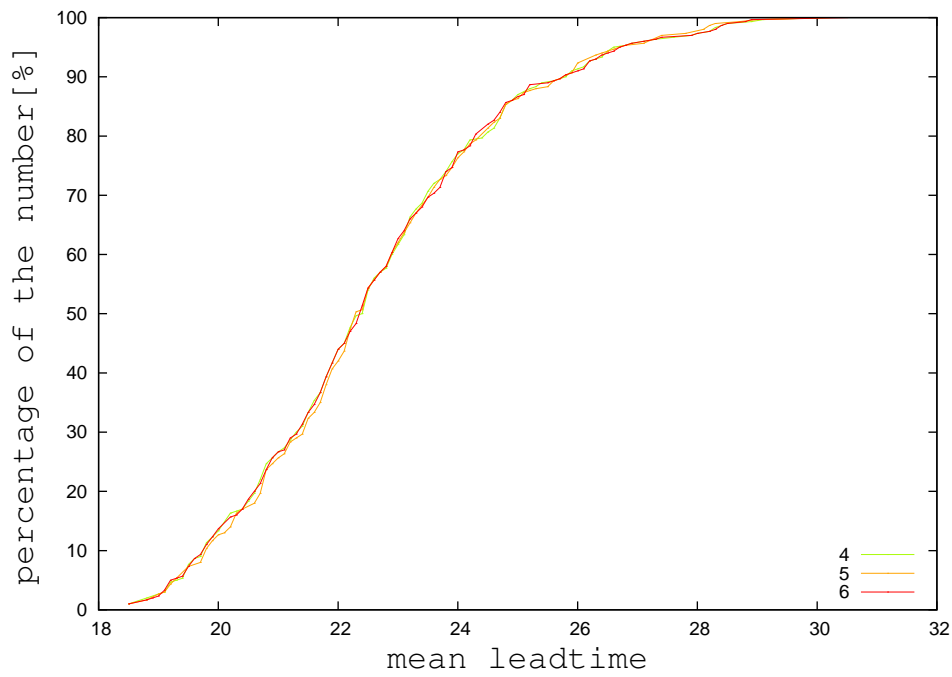


Fig. A - 45: リードタイムの平均値の度数分布 伸縮率 80%

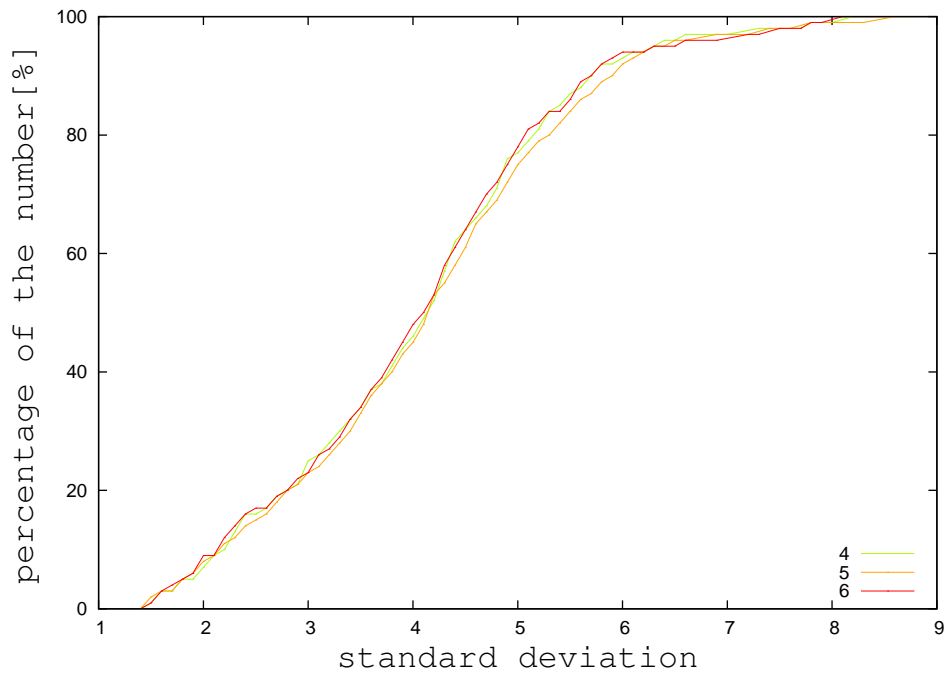


Fig. A - 46: リードタイムの平均値の標準偏差の度数分布 伸縮率 80%

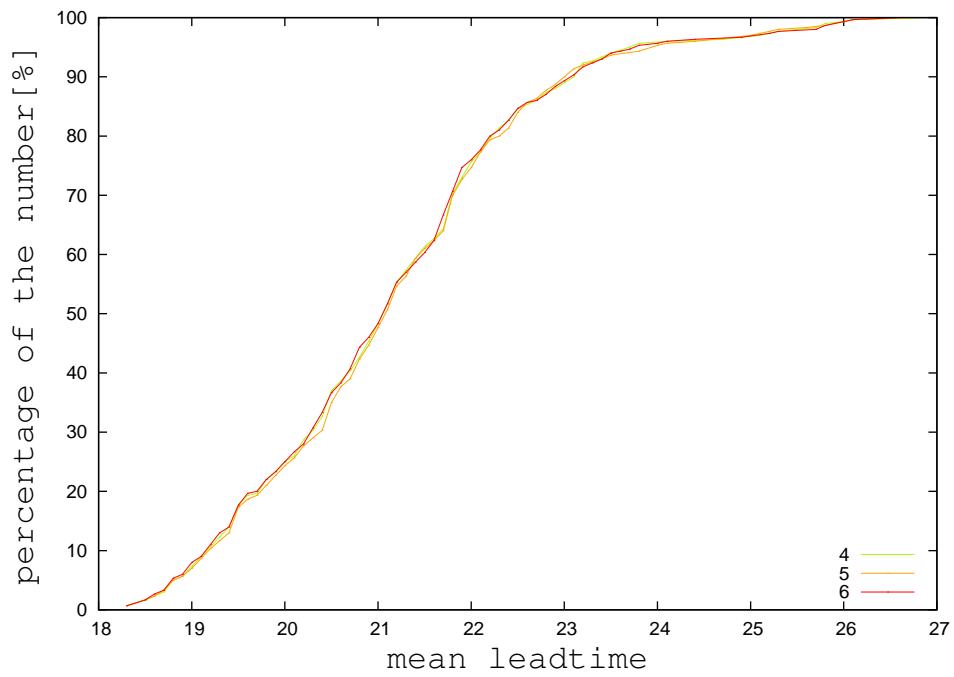


Fig. A - 47: リードタイムの平均値の度数分布 伸縮率 90%

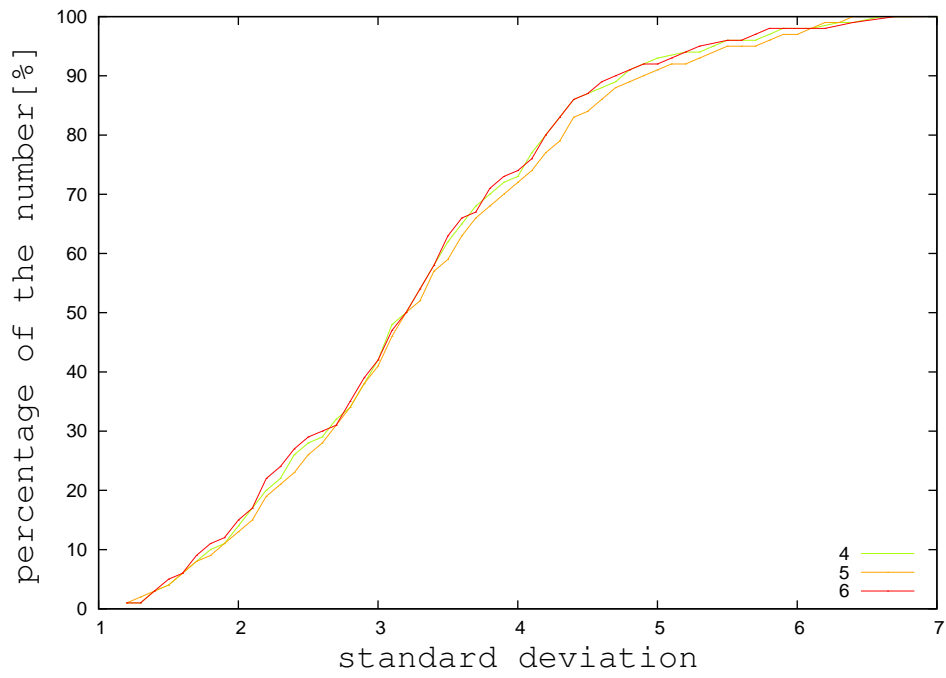


Fig. A - 48: リードタイムの平均値の標準偏差の度数分布 伸縮率 90%

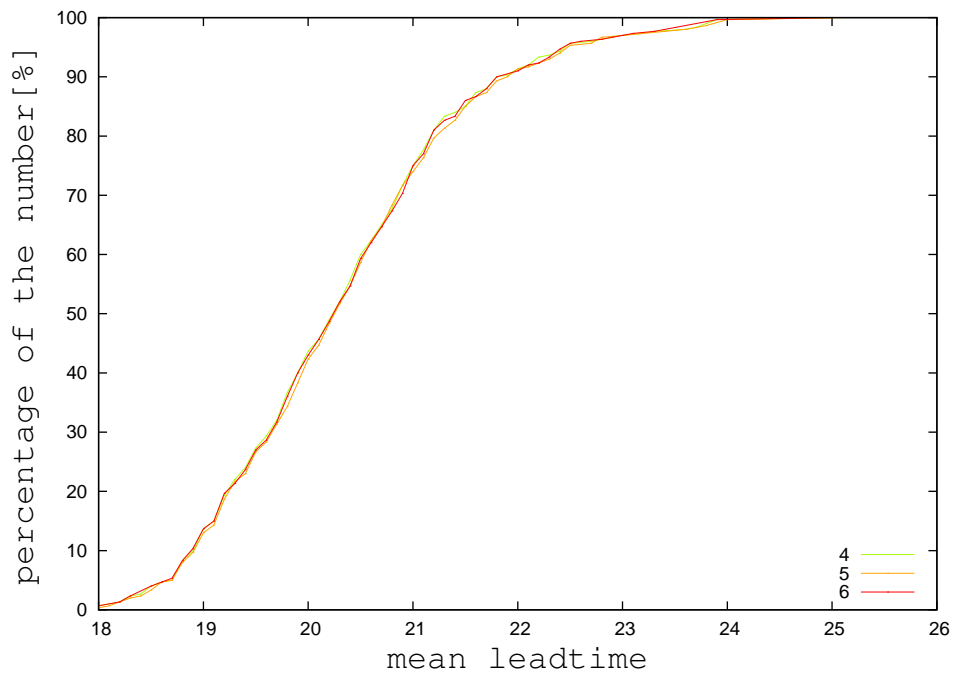


Fig. A - 49: リードタイムの平均値の度数分布 伸縮率 100%

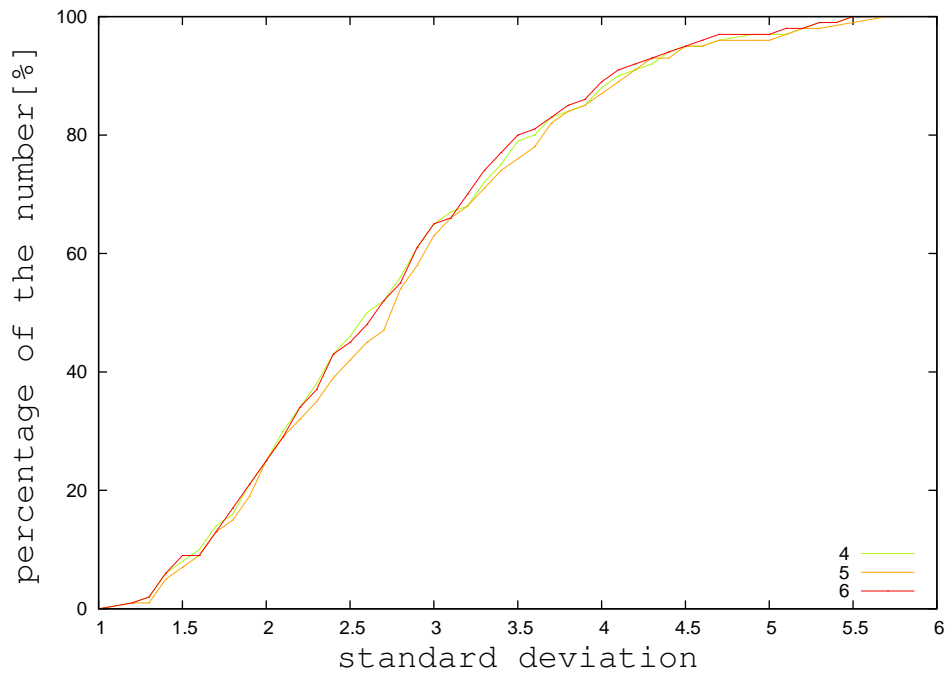


Fig. A- 50: リードタイムの平均値の標準偏差の度数分布 伸縮率 100%

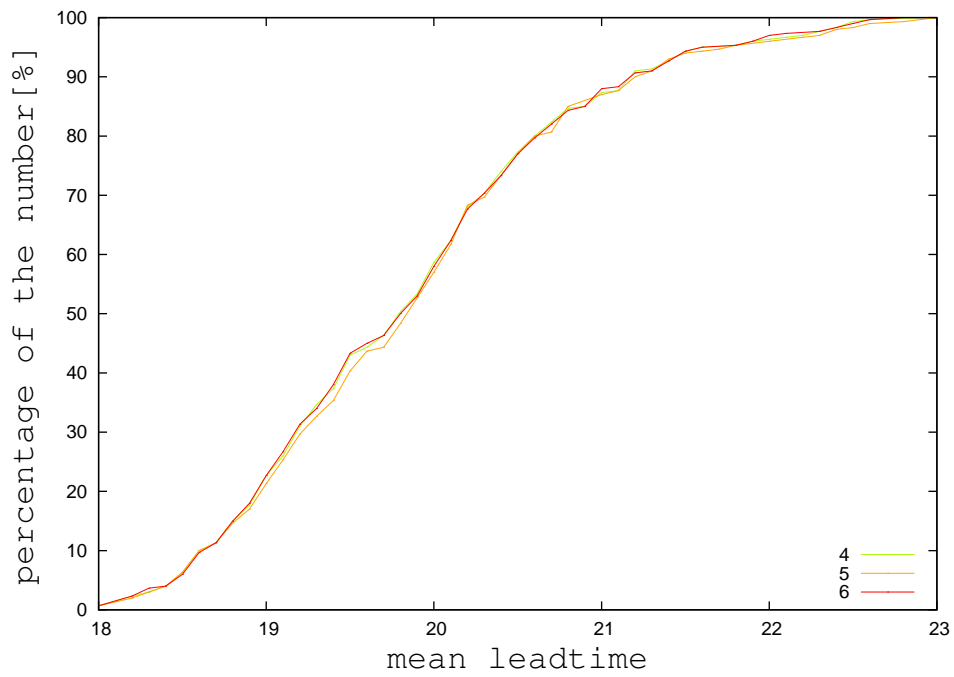


Fig. A- 51: リードタイムの平均値の度数分布 伸縮率 110%

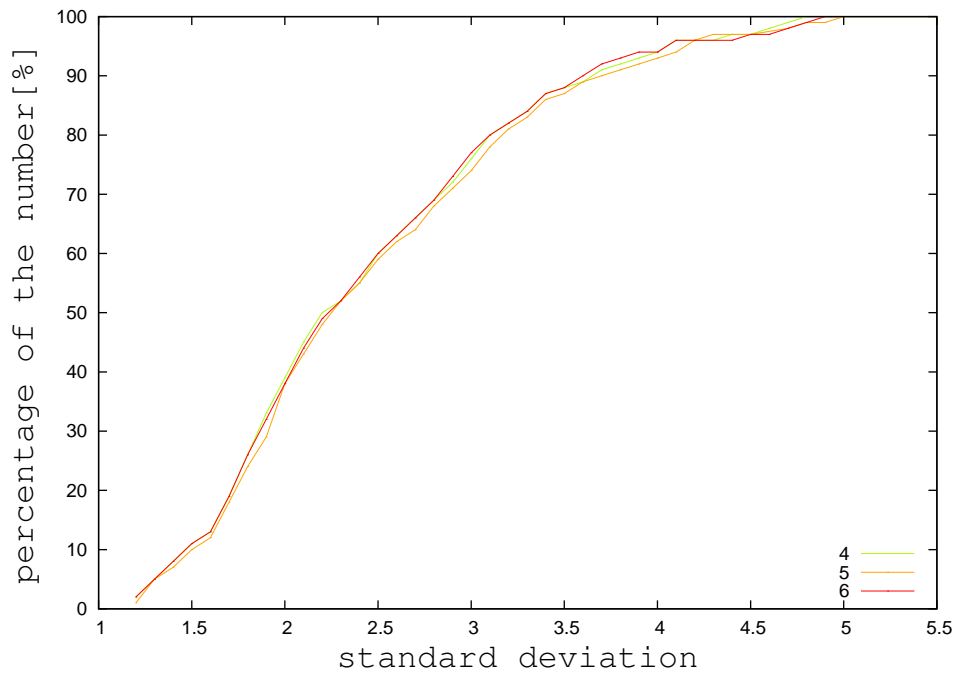


Fig. A- 52: リードタイムの平均値の標準偏差の度数分布 伸縮率 110%

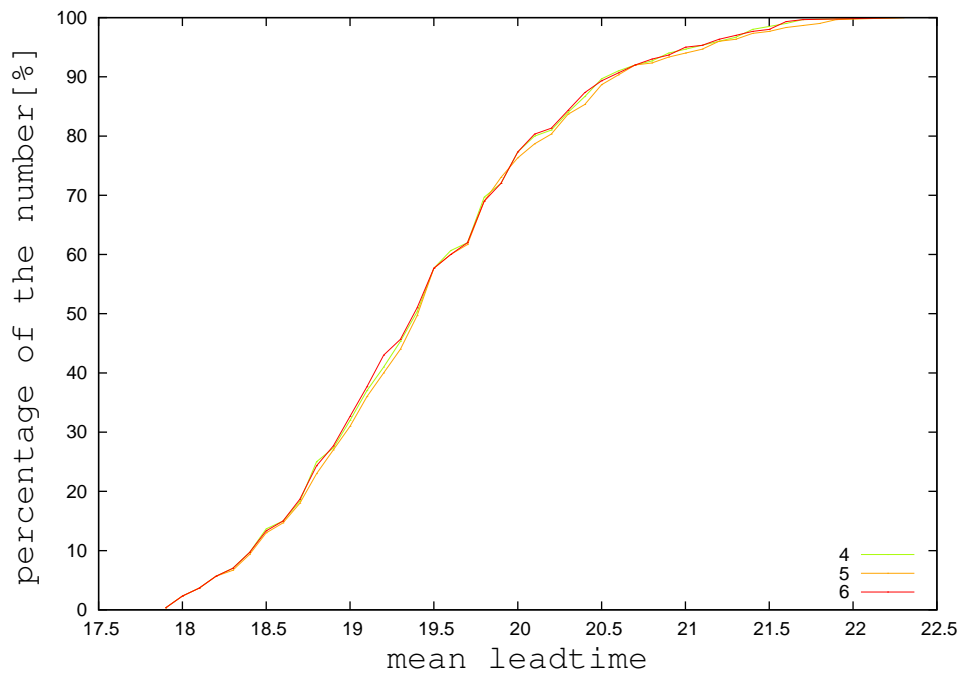


Fig. A- 53: リードタイムの平均値の度数分布 伸縮率 120%



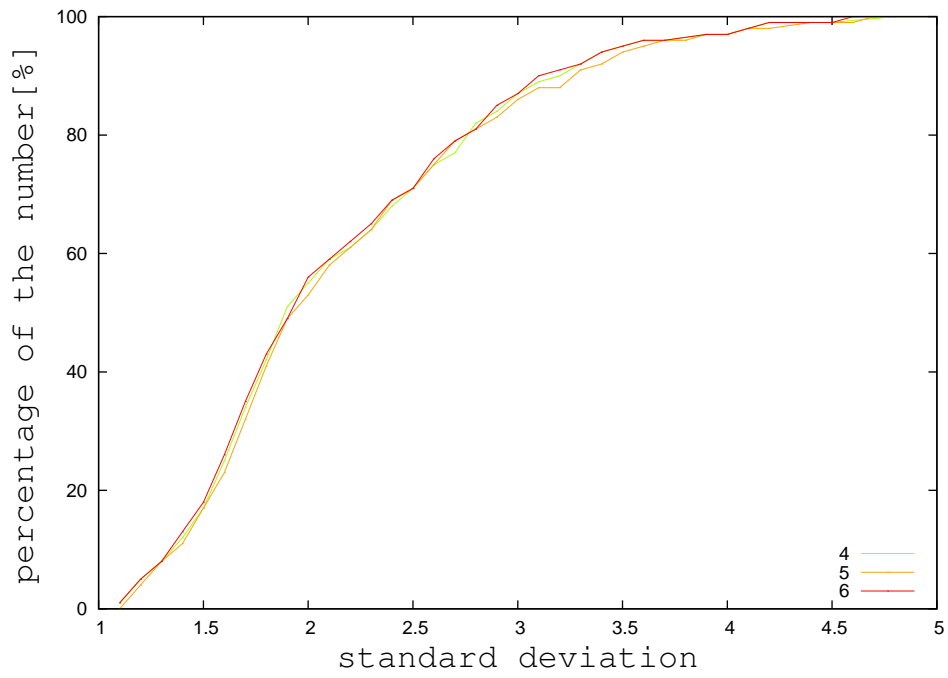


Fig. A- 54: リードタイムの平均値の標準偏差の度数分布 伸縮率 120%

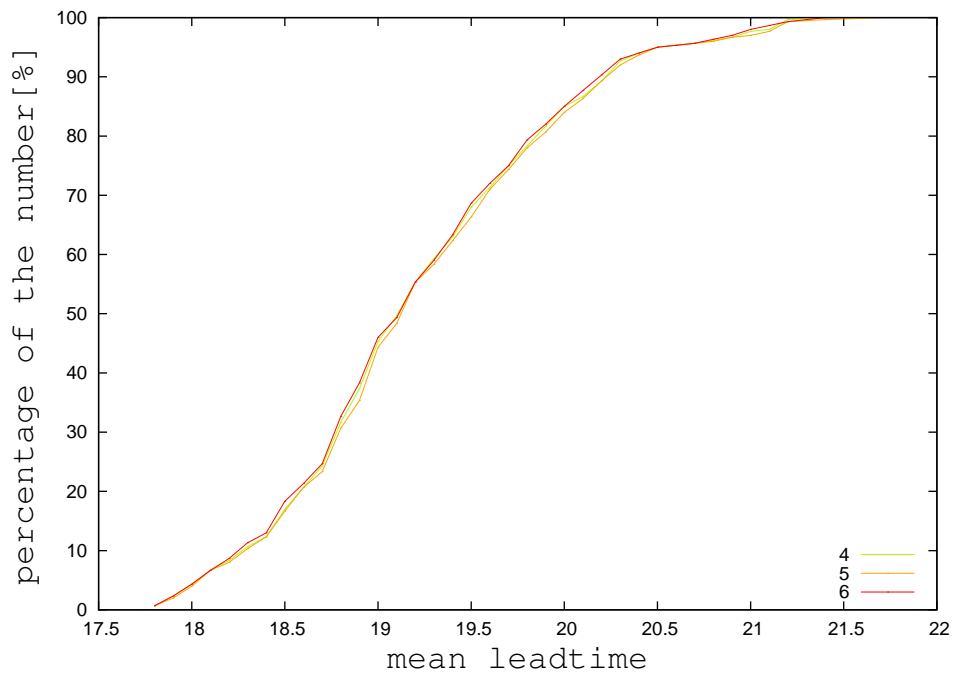


Fig. A- 55: リードタイムの平均値の度数分布 伸縮率 130%

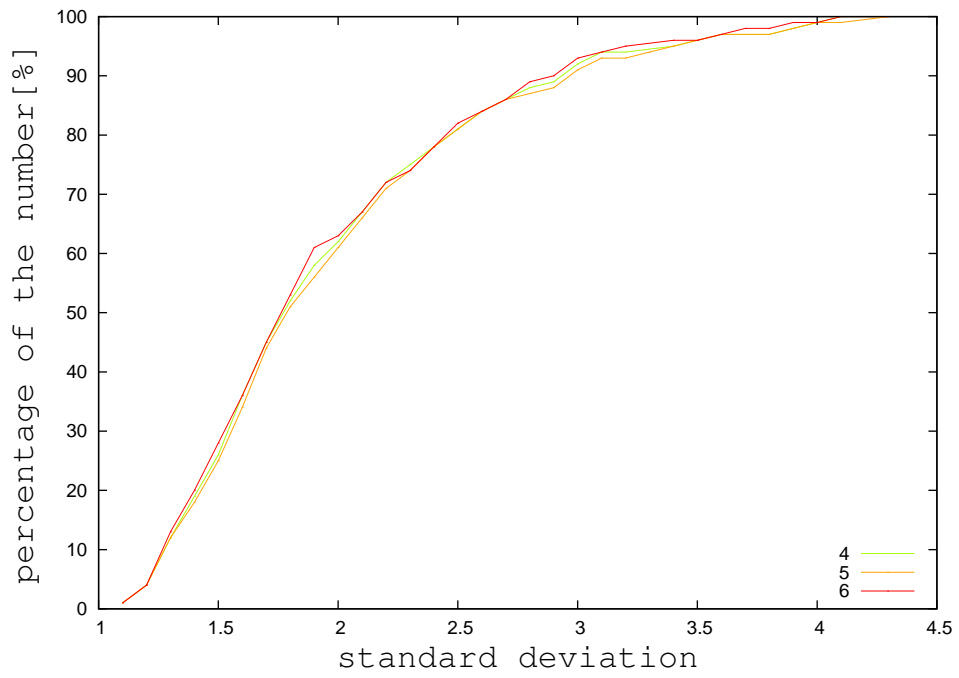


Fig. A - 56: リードタイムの平均値標準偏差の度数分布 伸縮率 130%

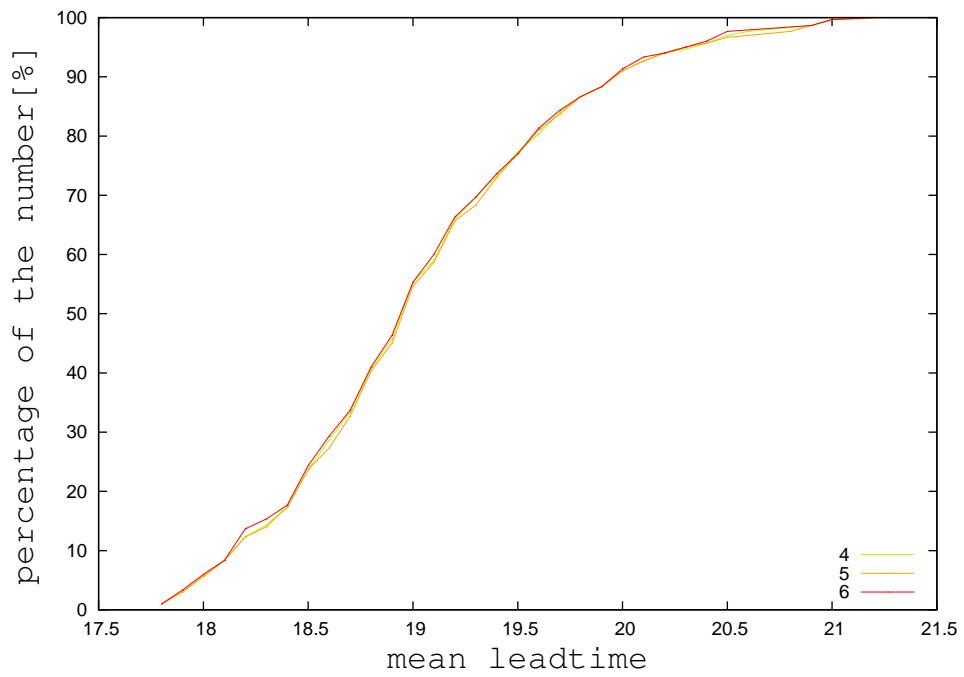


Fig. A - 57: リードタイムの平均値の度数分布 伸縮率 140%

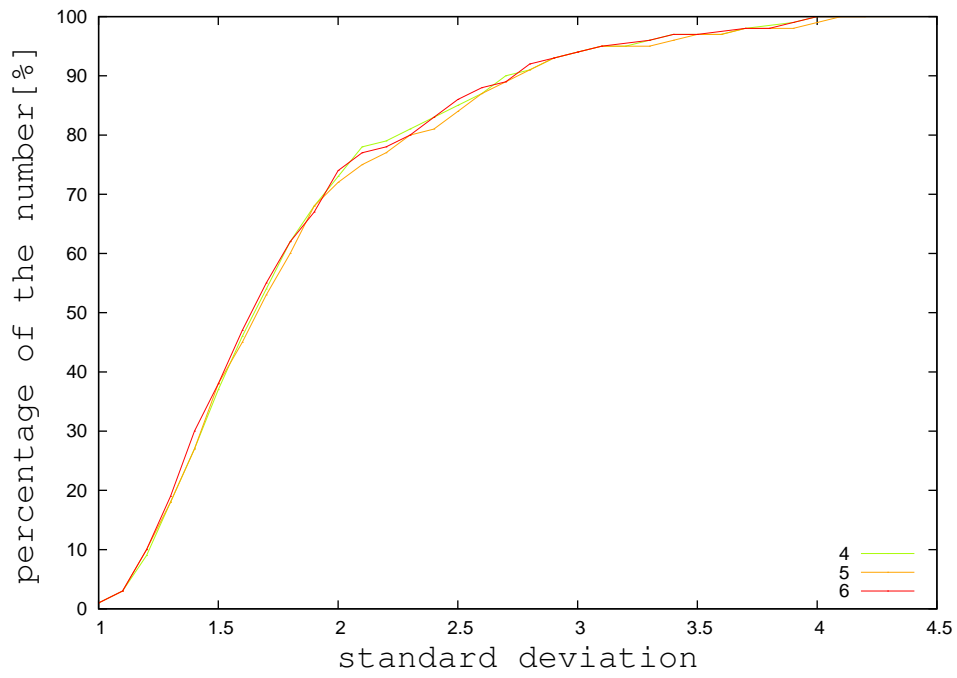


Fig. A - 58: リードタイムの平均値標準偏差の度数分布 伸縮率 140%

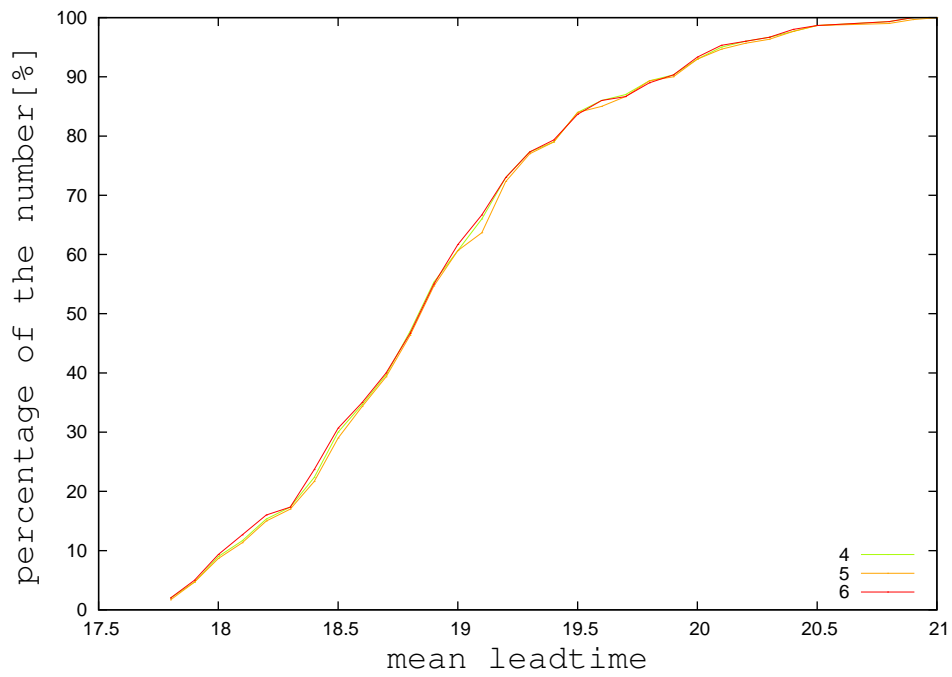


Fig. A - 59: リードタイムの平均値の度数分布 伸縮率 150%

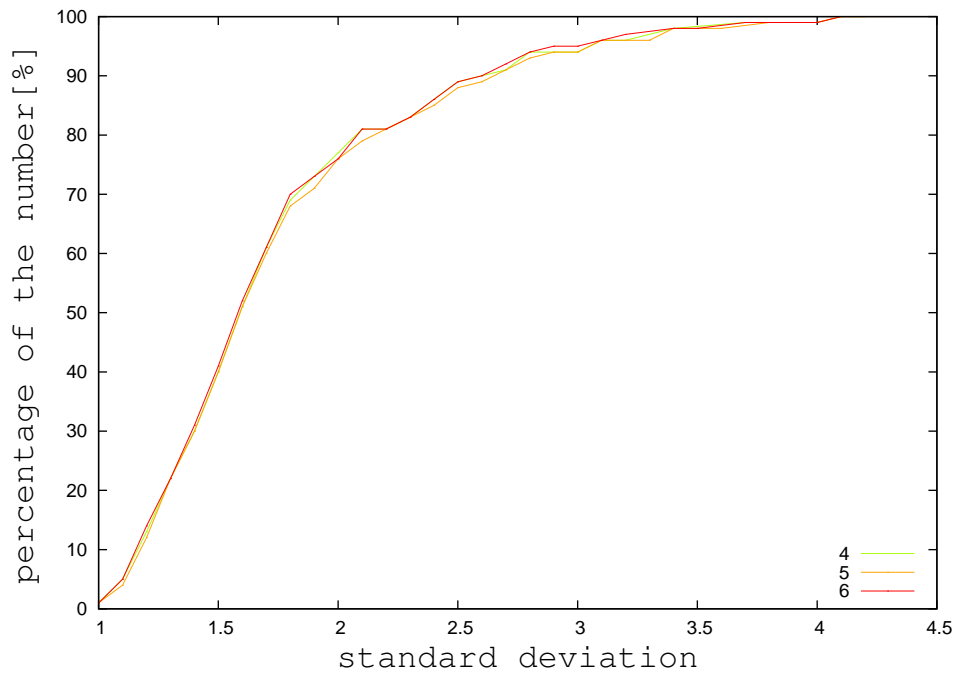


Fig. A - 60: リードタイムの平均値標準偏差の度数分布 伸縮率 150%

### A.2.2 ワークごとの工程処理時間の平均値

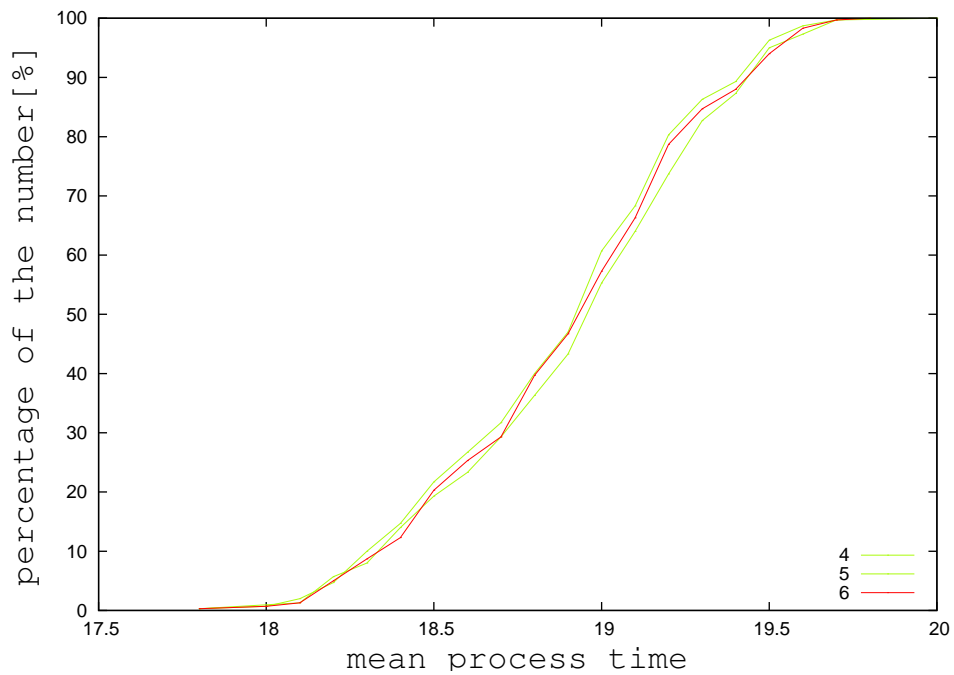


Fig. A - 61: 工程処理時間の平均値の度数分布 伸縮率 60%

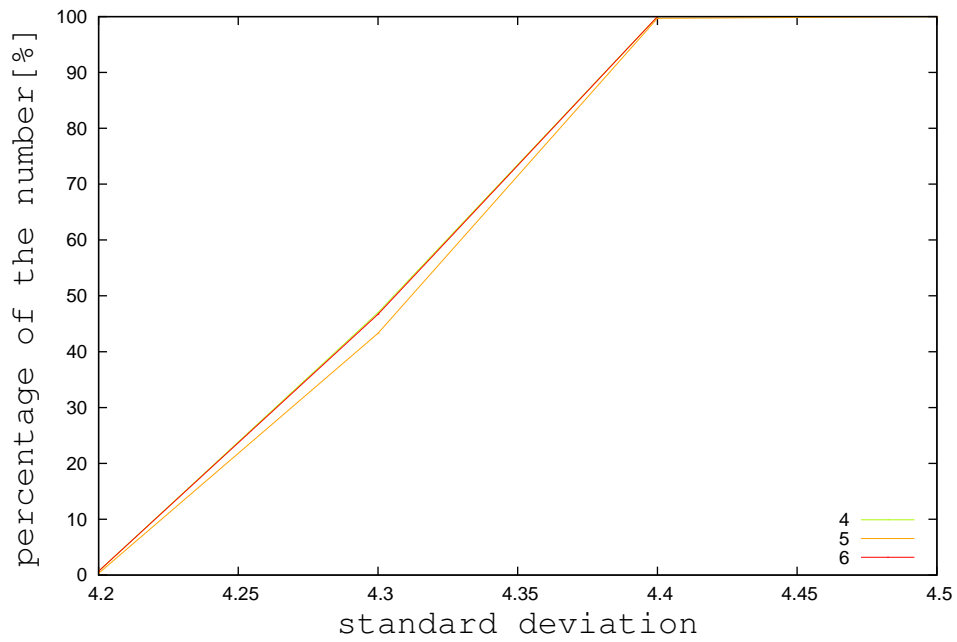


Fig. A - 62: 工程処理時間の標準偏差の度数分布 伸縮率 60%

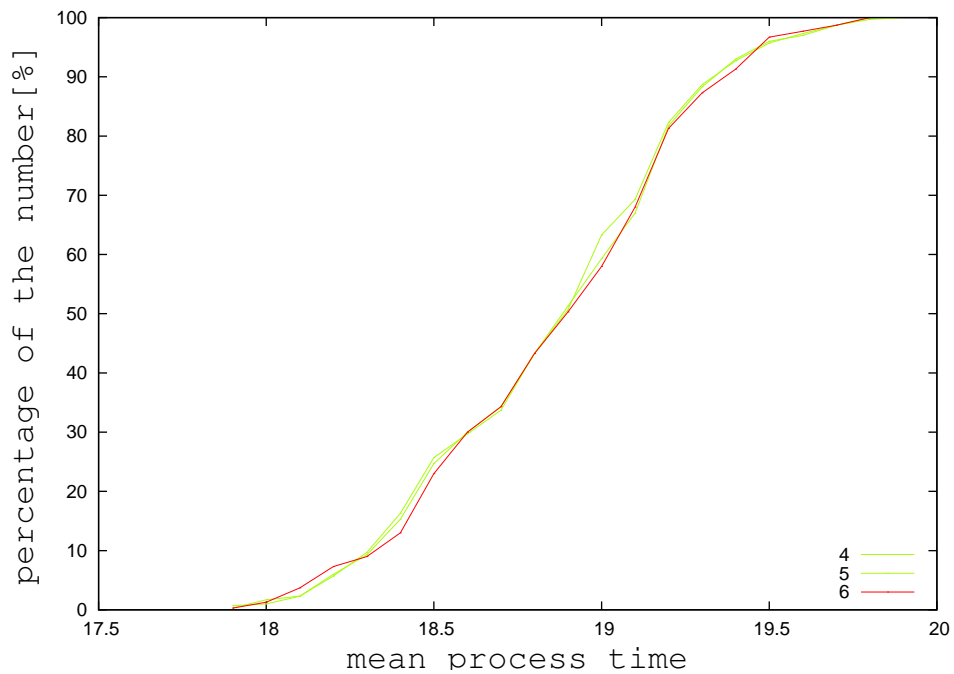


Fig. A - 63: 工程処理時間の平均値の度数分布 伸縮率 70%

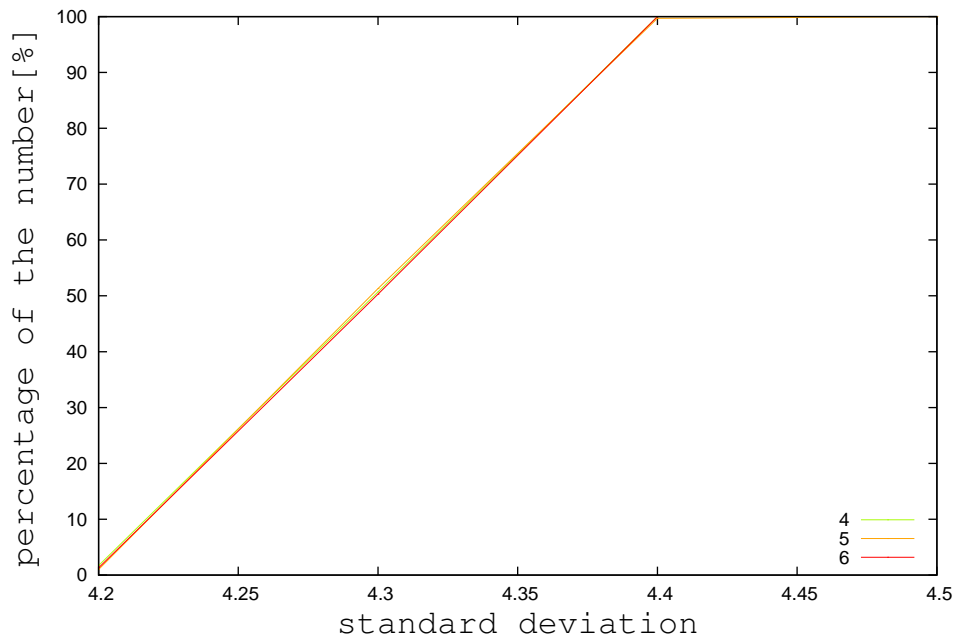


Fig. A-64: 工程処理時間の標準偏差の度数分布 伸縮率 70%

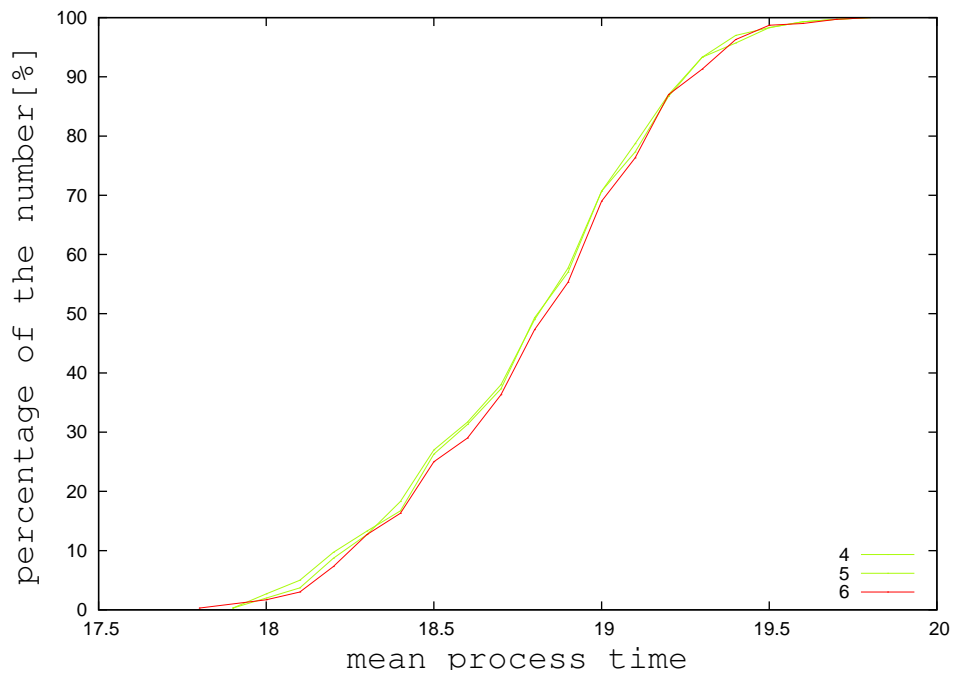


Fig. A-65: 工程処理時間の平均値の度数分布 伸縮率 80%

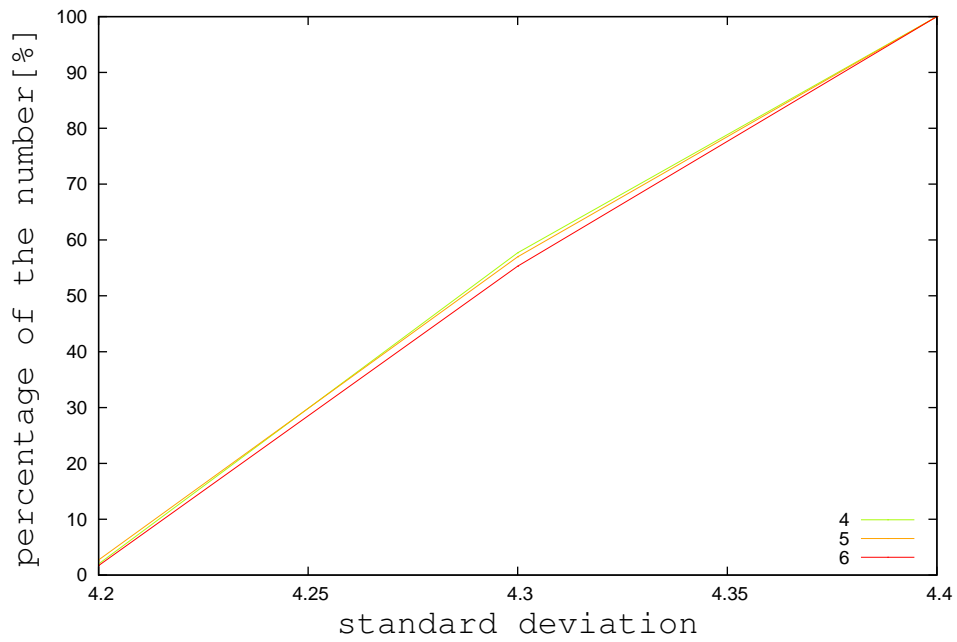


Fig. A - 66: 工程処理時間の標準偏差の度数分布 伸縮率 80%

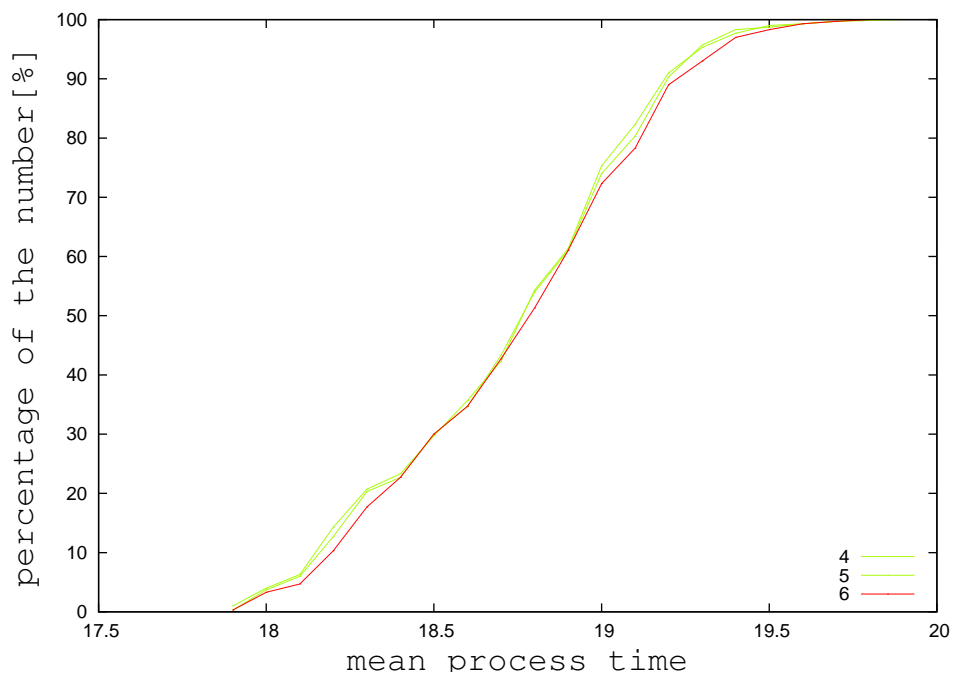


Fig. A - 67: 工程処理時間の平均値の度数分布 伸縮率 90%

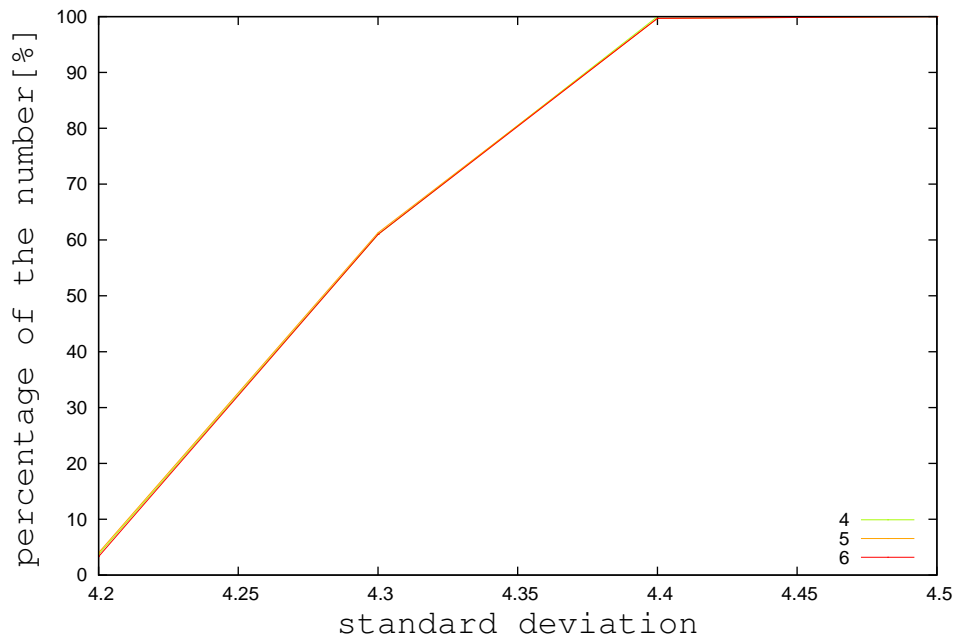


Fig. A-68: 工程処理時間の標準偏差の度数分布 伸縮率 90%

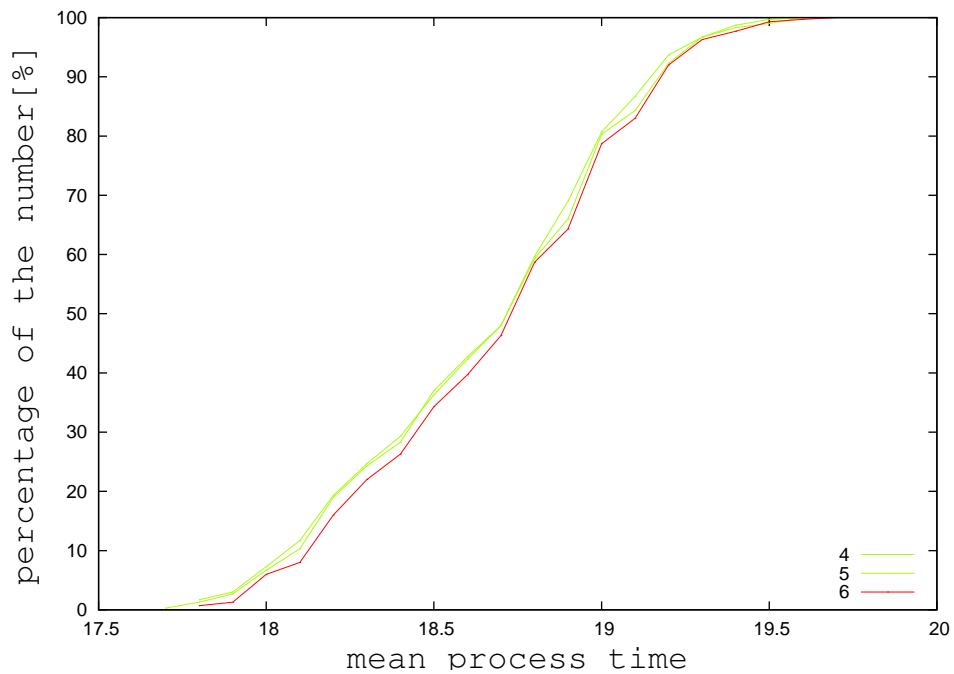


Fig. A-69: 工程処理時間の平均値の度数分布 伸縮率 100%



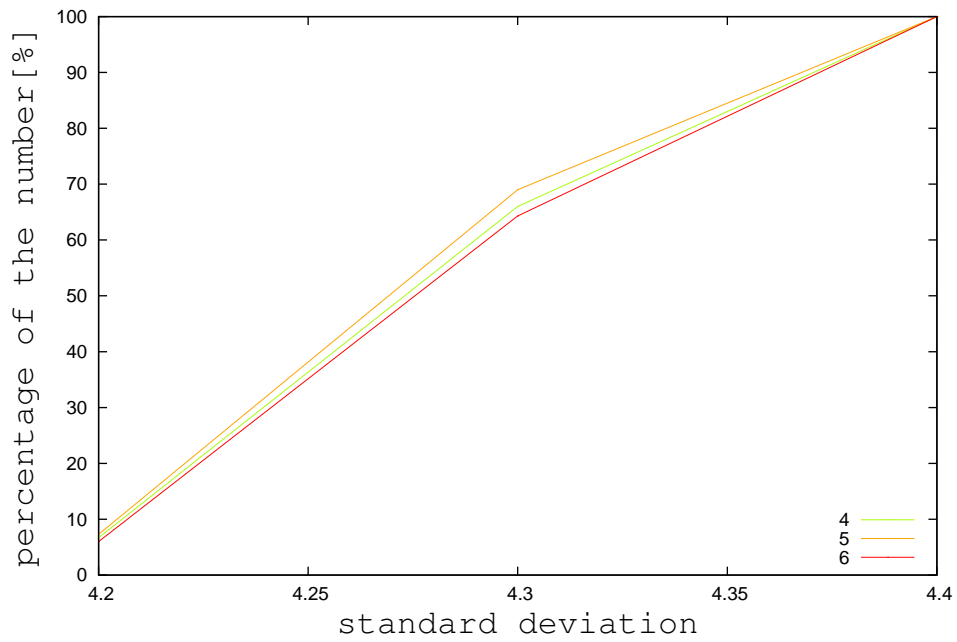


Fig. A - 70: 工程処理時間の標準偏差の度数分布 伸縮率 100%

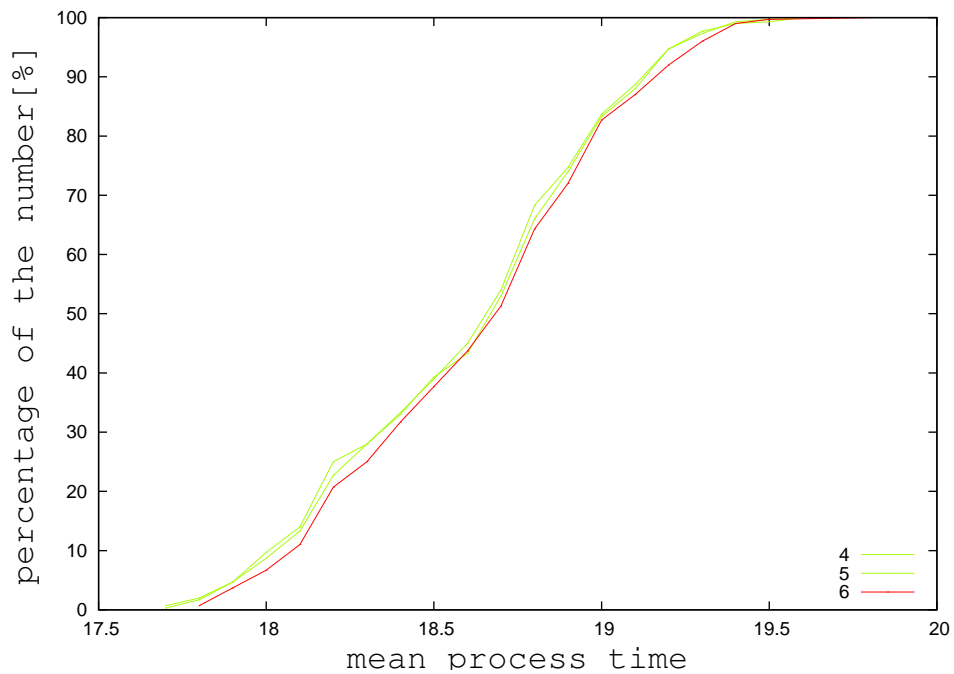


Fig. A - 71: 工程処理時間の平均値の度数分布 伸縮率 110%

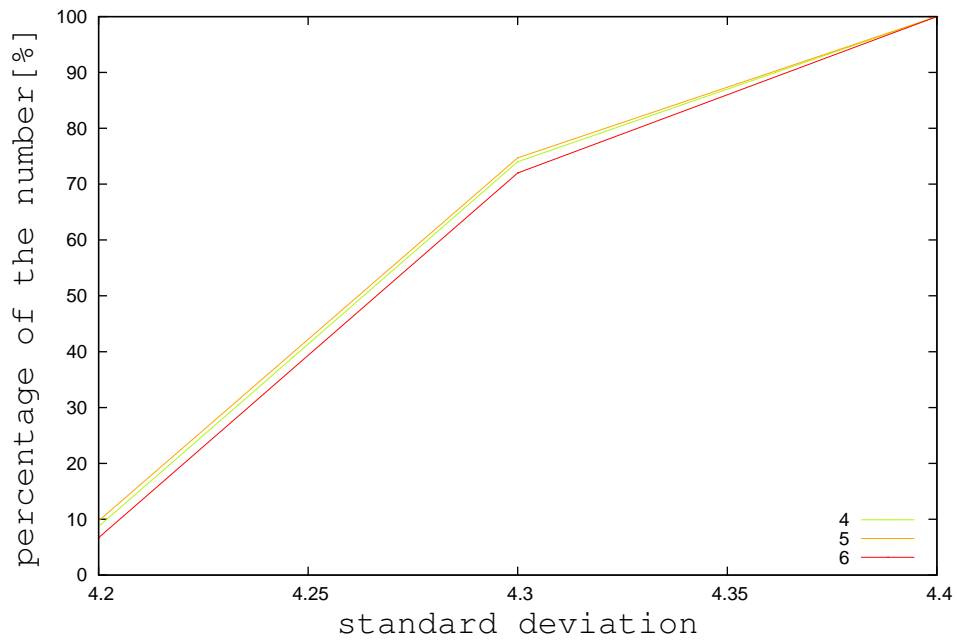


Fig. A-72: 工程処理時間の標準偏差の度数分布 伸縮率 110%

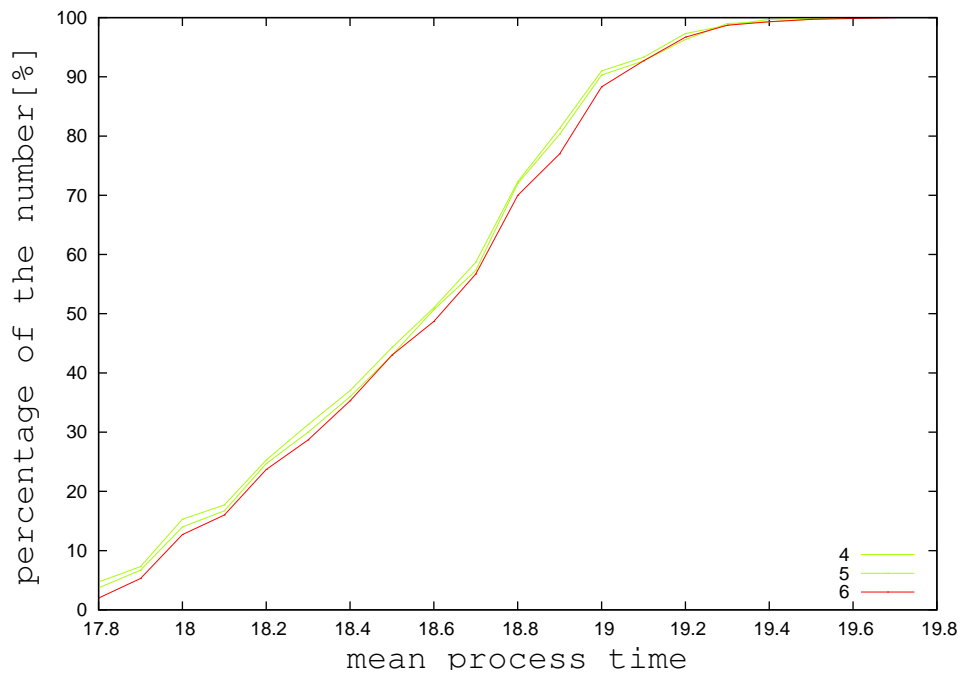


Fig. A-73: 工程処理時間の平均値の度数分布 伸縮率 120%

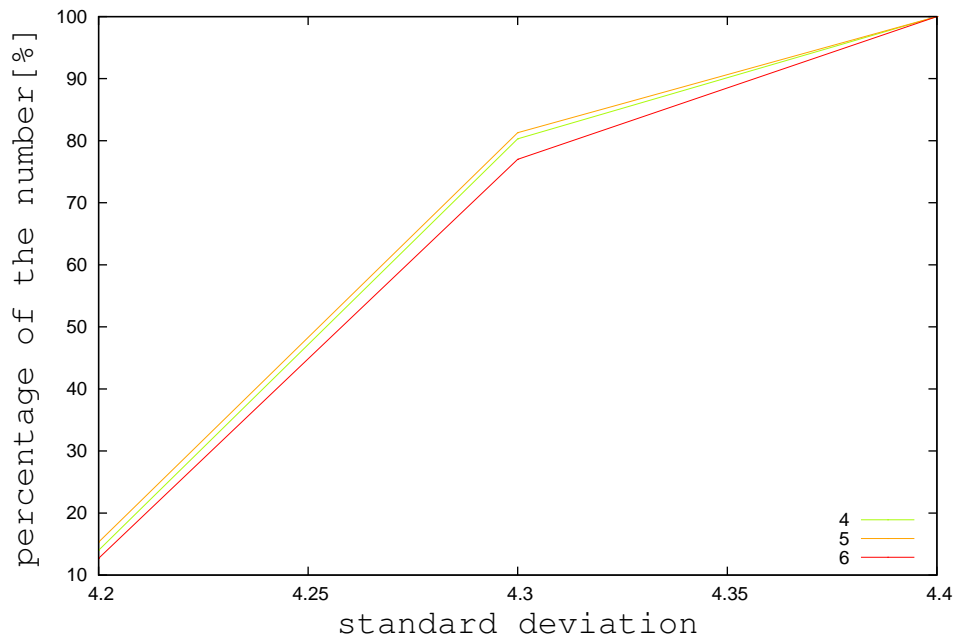


Fig. A-74: 工程処理時間の標準偏差の度数分布 伸縮率 120%

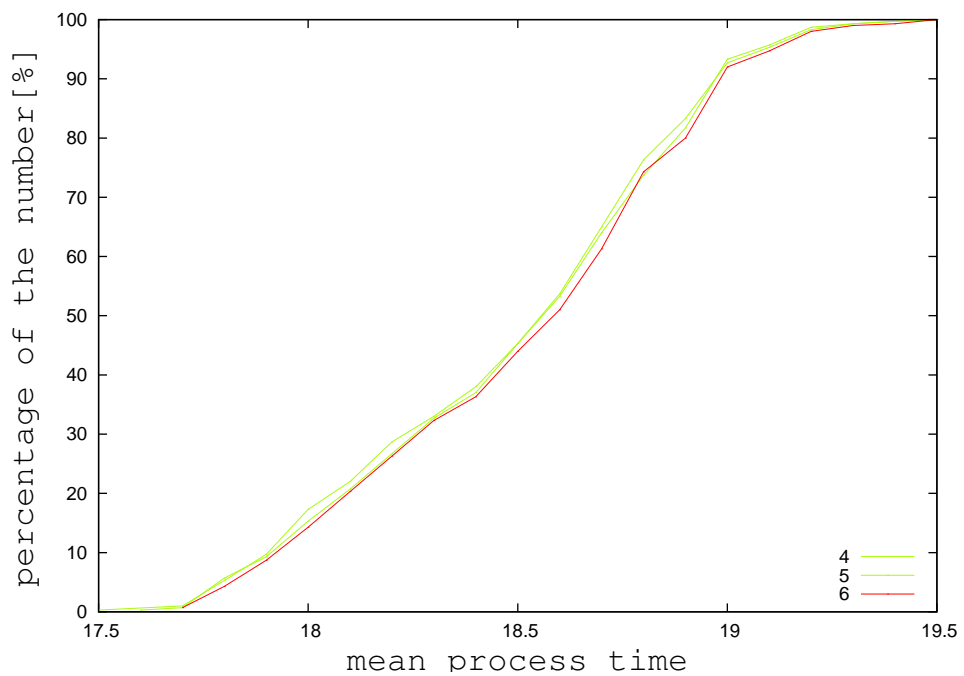


Fig. A-75: 工程処理時間の平均値の度数分布 伸縮率 130%

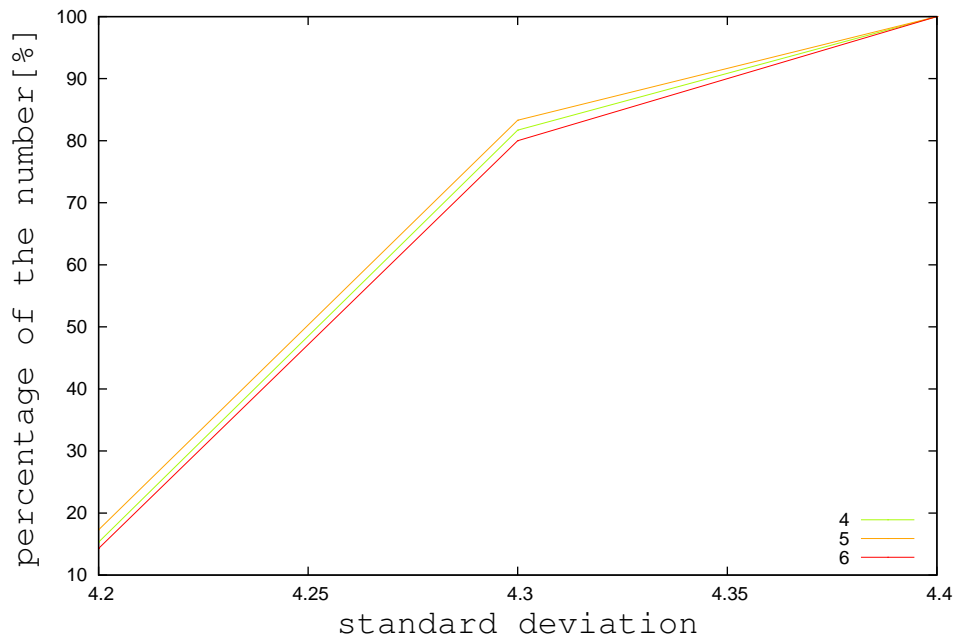


Fig. A-76: 工程処理時間の標準偏差の度数分布 伸縮率 130%

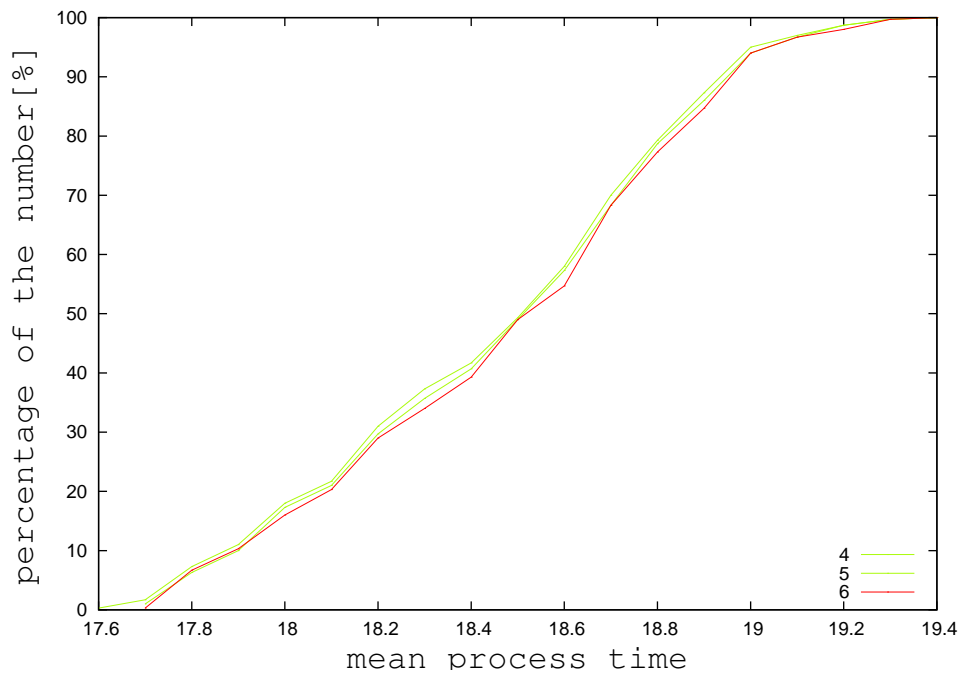


Fig. A-77: 工程処理時間の平均値の度数分布 伸縮率 140%

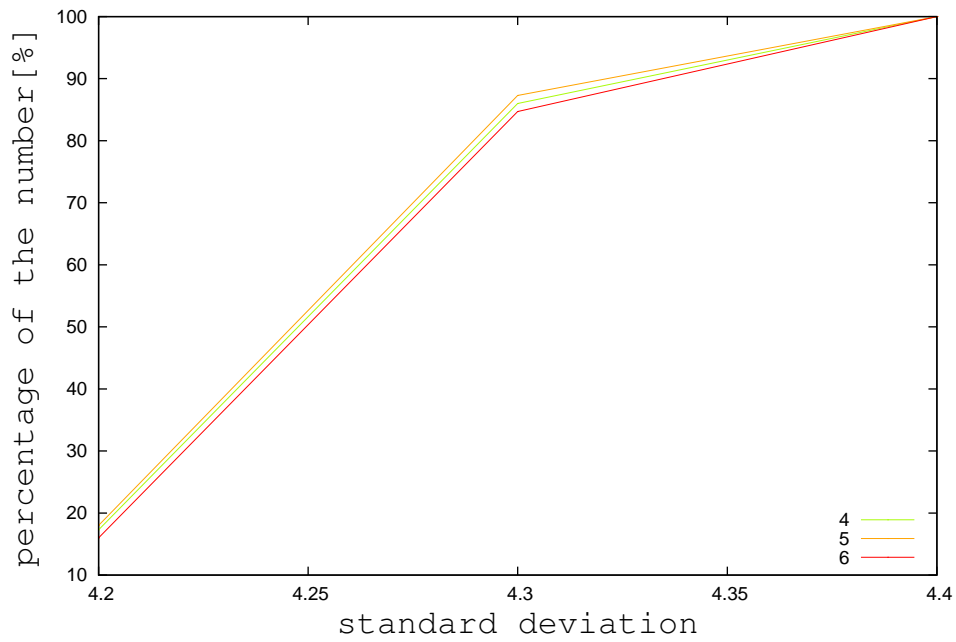


Fig. A-78: 工程処理時間の標準偏差の度数分布 伸縮率 140%

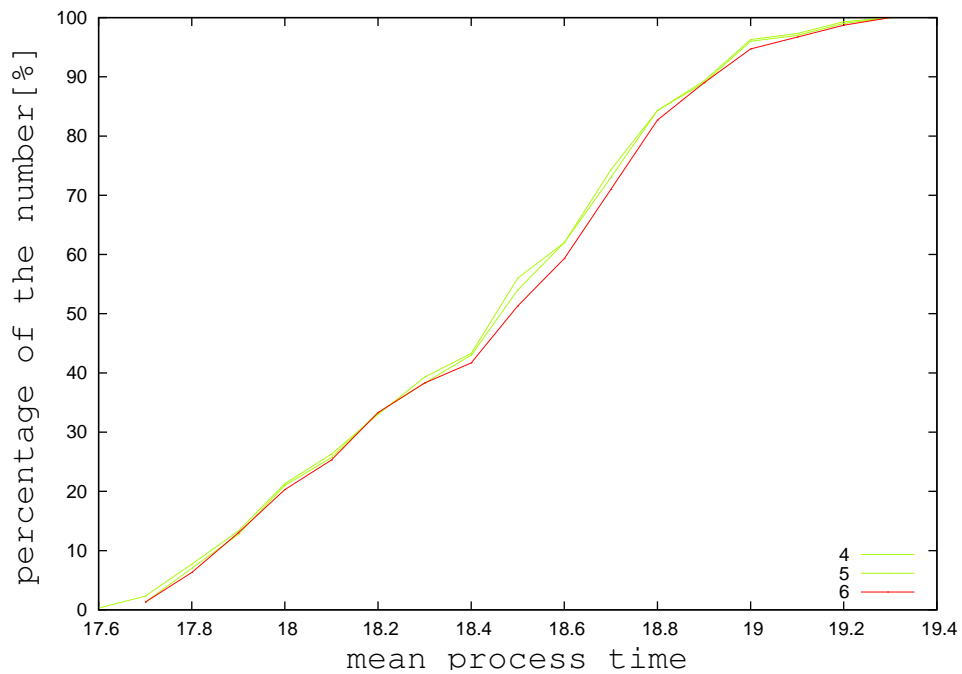


Fig. A-79: 工程処理時間の平均値の度数分布 伸縮率 150%

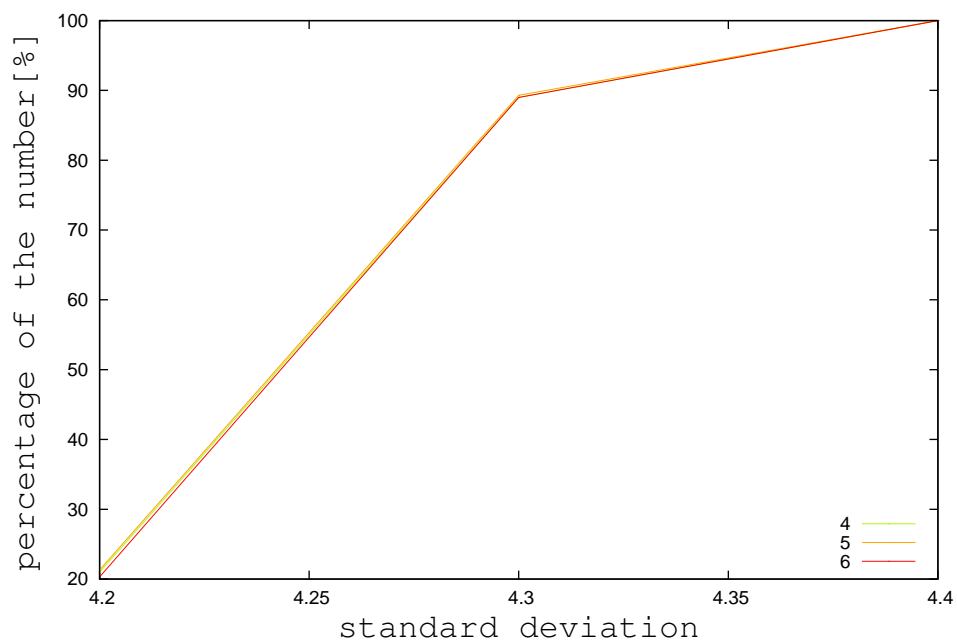


Fig. A- 80: 工程処理時間の標準偏差の度数分布 伸縮率 150%