

原著論文

ベイジアンネットワークを用いた機会制約付きライン設計最適化条件の感度分析

A Sensitivity Analysis of Optimization Conditions with Chance Constraints for Assembly Line Design using Bayesian Network

片岡隆之*
Takayuki Kataoka*

*近畿大学

*Kindai University

*Email:kataoka@hiro.kindai.ac.jp

森川克己**, 高橋勝彦**
Katsumi Morikawa**, Katsuhiko Takahashi**

広島大学

**Hiroshima University

**Email:{mkatsumi, takahasi}@hiroshima-u.ac.jp

Key words: Sensitivity analysis, Optimization conditions, Assembly line design, Bayesian network

要旨: 組立ラインは、自動車産業や家電産業などで利用される伝統的な生産システム構成要素の一つであり、多くの論文が組立ラインに関連した研究分野に貢献してきている。しかしながら、近年のグローバル環境下で組立ラインにおける需要は激しく変化しており、従来の一意的あるいは確率的な数理モデルだけでは、現実世界の製造ラインに十分な対応が取れなくなりつつある。特に近年、生産制約条件に対する柔軟性が不確実な需要に対して有力な対策法として広く認められているため、その特性を考慮したモデルを導入するための努力が必要とされているが、当該分野は事例を中心とした関連論文が散見される程度である。そこで本論文では、先行研究の生産モデルにおいて、機会制約を含む各種制約条件を変動させた感度分析結果にベイジアンネットワークを適用した新たな分析法を提案し、その有効性について検討する。

Abstract: The assembly line is one of the most popular traditional production systems used by the automotive or electronic industry, and it has also been widely documented by a large amount of literature. Especially the flexibility of production constraints should be focused to overcome uncertain demand. However, the traditional deterministic model or the simple probabilistic model has not been able to response to the production lines in the real world since the recent demand is very changeable under uncertain environment. Several studies have recently addressed the examples of those problems. Therefore a new sensitivity analysis of optimization conditions with chance constraints for assembly line design using Bayesian network is proposed and the effectiveness is discussed in this paper.

1. はじめに

組立ラインは、自動車産業や家電産業などで利用される伝統的な生産システム構成要素の一つである。しかしながら、一般的に多くの作業と制約が存在するため、組立ライン設計とバランスング問題に対して同時に最適解を求めるのは非常に困難である。その理由のほとんどは、組み合わせ問題の性質上、多くの作業と制約が存在するという産業独自の問題が発生するためであるといわれている[1]。

そのような中、多くの論文が組立ラインに関連した研究分野に貢献してきている。例えば、組立ラインバランスング分野においては、これまで多くの論文が多岐に渡る数理モデルを提案し、その有効性を示しているが、近年では、Becker ら[2] のサーベイ論文により、それらの問

題群と解法が体系的に整理されている。また、混合品種ラインを中心とした製品投入順序問題分野においても、これまで多くの論文が様々な条件に適した数理モデルを提案し、その有効性を示しているが、近年では、Boysen ら[3] によるサーベイ論文により、過去のモデル群の分類と特徴が明示されている。これらの結果は、追加研究も含めてアップデートされ、諸条件を入力すれば、利用すべき数理モデルが検索できるようにウェブ上で公開されている。

一方、近年のグローバル環境下で組立ラインにおける需要は激しく変化しており、従来の一意的あるいは確率的な数理モデルだけでは、現実世界の製造ラインに十分な対応が取れなくなりつつあるのも事実である。特に近年、生産制約条件に対する柔軟性が、不確実な需要に対して有力な対策法として広く認められているため、各種制約の特性を考慮したモデルを導入するた

めの努力が必要とされている。しかしながら、当該分野は事例を中心とした関連論文が散見される程度である。例えば、Francasら[4]は、設備投資への展望から労働と機械の柔軟性の相互作用についての洞察を提示するための計画モデルを分析し、機械と労働のキャパシティー、柔軟なネットワーク構造、労働柔軟性（例えば人事異動や派遣労働者）への戦略的な投資の依存関係を調べている。また、Corominasら[5]の事例研究では、スペインにあるバイクの小型エンジン組立工場をモデルとして、必要な非正規労働者数を最小限に抑え、サイクルタイムの決定と労働者スタッフのチームを決定するプロセスをバイナリ線形プログラムとしてモデル化し最適解を求めている。これらの各モデルは生産制約条件を画一的なものとして扱っており、その特性を考慮したモデルまで至っていない。言い換えれば、従来モデルが対象とする画一的な目的関数である非正規労働者数や総生産時間を最小化する分析のみでは不十分であり、各パラメータの感度分析や要因間の関係を明らかにする必要がある。

そこで本論文では、Corominasら[5]の先行研究の生産モデルにおいて、機会制約を含む各種生産制約条件を変動させた感度分析結果にベイジアンネットワークを適用した新たな分析法を提案し、その有効性について検討する。

2. モデル構築

2.1 制約条件

本研究では、先行研究[5]に基づく以下の制約条件を考慮する。

- ・非正規労働者には割り当てることのできない作業が存在し、その割合は5%程度とする[6].
- ・非正規労働者は正規労働者よりもひとつの作業を行うのにより多くの時間(作業係数を掛けた値)を必要とする。
- ・非正規労働者は少なくとも一人の正規労働者の隣のステーションで作業しなければならない。
- ・各作業に割り当て可能なステーションの範囲が決まっている。
- ・各ステーションに作業者を複数人割り当ててはならない。
- ・きれいな手で行わなければならない作業(Clean作業)と油などを扱う汚れの伴う作業(Dirty作業)を同じステーションで行ってはならない(Clean同士、Dirty同士は同ステーションで可)。

- ・先行関係を満たしながら作業を割り当てる。
- ・各ステーションの総作業時間はサイクルタイムを超えてはならない(非正規労働者が割り当てられているステーションは、サイクルタイムを作業係数で割った値を超えてはならない)。

2.2 実験モデル

本研究では、実験モデルとして、図1に示す以下の先行研究モデル[5]を適用する。

記号:

i 作業番号

j ステーション番号

パラメータ:

W 正規労働者数

T 分割できない組立作業の集合($i=1, \dots, T$)

\hat{T} 非正規労働者が行うことのできない作業集合

d_i 正規労働者が作業*i*を行うのにかかる作業時間($i=1, \dots, T$)

β 非正規労働者によって行われる時にステーションで作業*i*の時間を決定するために掛けられる係数(>0) ($\forall i \in T \setminus \hat{T}$)

P 直接的な先行関係のある作業(i, k)ペア集合

I 同じステーションに割り当てられない作業(i, k)のペア集合(Clean / Dirty)

C サイクルタイムの上限

n ステーション数の下限

N ステーション数の上限($j=1, \dots, N$)

m 1つのステーションに割り当て可能な作業数の上限

E_i 作業*i*が割り当てられるかもしれない最早ステーション($i=1, \dots, T$)

L_i 作業*i*が割り当てられるかもしれない最遅ステーション($i=1, \dots, T$)

\tilde{T}_j ステーション*j*で行われる作業集合($j=1, \dots, N$)

決定変数:

x_{ij} 作業*i*がステーション*j*に割り当てられていれば1, そうでなければ0

y_j ステーション*j*に非正規労働者が割り当てられていれば1, そうでなければ0

v_j ステーション*j*が空き(割当作業がなく、かつ作業者も割り当てられていない)ならば1, そうでなければ0

目的関数:

$$\text{Minimize } \sum_{j=1}^N y_j \quad (1)$$

制約条件:

$$\sum_{j \in E_i}^{L_i} x_{ij} = 1, \quad \forall i \in T \tag{2}$$

$$\sum_{i \in \hat{T}_j} d_i \cdot x_{ij} \leq C - \frac{\beta - 1}{\beta} \cdot C \cdot y_j, \tag{3}$$

$$j = 1, \dots, n$$

$$\sum_{i \in \hat{T}_j} d_i \cdot x_{ij} \leq C \cdot (1 - v_j) - \frac{\beta - 1}{\beta} \cdot C \cdot y_j, \tag{3'}$$

$$j = 1, \dots, n$$

$$\sum_{i \in (\hat{T} \cap \hat{T}_j)} x_{ij} \leq m \cdot (1 - y_j), \quad j = 1, \dots, N \tag{4}$$

$$y_j + v_j \leq 1, \quad j = n + 1, \dots, N \tag{5}$$

$$v_j \leq v_{j+1}, \quad j = n + 1, \dots, N - 1 \tag{6}$$

$$\sum_{j \in E_i}^{L_i} j \cdot x_{ij} \leq \sum_{j \in E_k}^{L_k} j \cdot x_{kj}, \quad \forall (i, k) \in P \tag{7}$$

$$x_{ij} + x_{kj} \leq 1, \tag{8}$$

$$\forall (i, k) \in I; \quad \forall j \in [E_i, L_i] \cap [E_k, L_k]$$

$$y_1 + y_2 \leq 1, \tag{9}$$

$$y_j + y_{j+1} + y_{j+2} \leq 2, \quad j = 2, \dots, N - 3 \tag{9'}$$

$$y_{N-1} + y_N \leq 1, \tag{9''}$$

$$W + \sum_{j=1}^N y_j + \sum_{n+1}^N v_j = N, \tag{10}$$

$$x_{ij} \in \{0,1\}, \quad \forall i, \forall j \in [E_i, L_i] \tag{11}$$

$$y_j \in \{0,1\}, \quad j = 1, \dots, N \tag{12}$$

$$v_j \in \{0,1\}, \quad j = n + 1, \dots, N \tag{13}$$

式(1)は、非正規労働者の人数を最小化する目的関数である。制約条件(2)～(13)を満たしながら、各ステーションに割り当てられている非正規労働者の人数の合計が最小となるように計算される。

制約式(2)は、各要素作業が E_i から L_i のステーションの範囲の中で、同一のステーションに複数割り当てられることを防いでいる。

制約式(3)と(3')は、非正規労働者数が 0 人の場合には、正規労働者が割り当てられているステーションの総作業時間がサイクルタイムを超えることを防ぎ、非正規労働者 1 人以上の場合は、非正規労働者が割り当てられているステーションの総作業時間が、サイクルタイムを作業係数 β で割った値を超えることを防いでいる。

制約式(4)は、正規労働者が割り当てられているステーションには、割り当てることのできる作業数に限りがあることを示している。

制約式(5)は、まだ作業者が割り当てられていない空のステーションに非正規労働者を割り当てることはできないことを示している。

制約式(6)は、現在作業者が割り当てられているステーションの次のステーションには、作業者は割り当てられていないことを示している(小さいステーションから順番に作業者を割り当てるため)。

制約式(7)は、各要素作業は先行関係を満たすことを示している(作業 i を割り当てていないと作業 k は割り当てることはできない)。

制約式(8)は、Clean 作業と Dirty 作業を同じステーションに割り当てることはできないことを示している。

制約式(9)と(9')と(9'')は、各非正規労働者に対し、少なくとも一人以上の正規労働者を隣接するステーションに割り当てなければならないことを示している。

制約式(10)は、正規労働者と非正規労働者の数を合わせた数と誰も割り振られていないステーションの数を足した値が、モデル内のステーションの潜在的な数(ステーションの合計数)と等しくなることを示している。

制約式(11)と(12)と(13)は、各決定変数がバイナリ制約であることを示している。

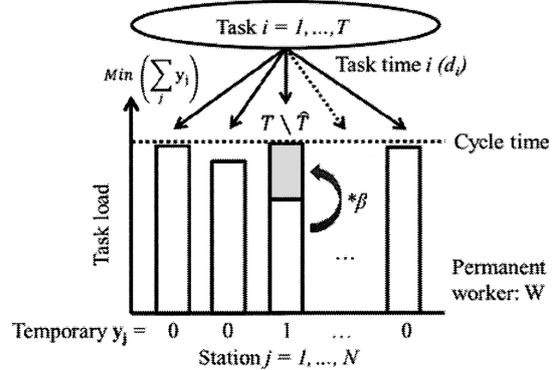


図 1. 実験適用モデル

3. 数値実験

3.1 パラメータ変更

本研究では、実験モデルとして、2.2 に示す先行研究モデル[5]をそのまま適用するが、パラメータの変化による解の変化から、パラメータと解の関係を検証することを研究目的としている。しかしながら、先行モデル[5]では、パラメータの値は一定となっており、解の変化を見ることができない。そこで、図 2 に示す以下のようなパラメータの値を増やし、解の変化を確認できる設定に変更する。

<先行研究[5]と同様のパラメータ>

- ・W(正規労働者数): 12
- ・n(ステーションの下限値): 12

<先行研究[5]と異なるパラメータ>

- ・作業番号 85 の分割

作業番号 85 は作業時間が他の作業番号と比べて最も長く、サイクルタイムに機会制約式を導入する際に、1つのステーションに許されたサイクルタイムの時間を超えるケースが多いため、作業番号 85 と 86 に分割し、それ以降の作業番号を一つずつずらした。また、作業を分割したため、先行作業集合及び先行作業時間も変更した。

- ・作業係数 β : 2.0→1.0, 1.5, 2.0

自動車メーカーにおけるヒアリング結果より非正規労働者の作業時間が 2 倍を超えると想定しにくいと、2 倍を上限値に設定し、そこから非正規労働者が正規労働者と同じ効率で働けると仮定した 1.0 倍を設定し、教育訓練途上の 1.5 倍を加えた 3 つを設定した。

- ・m(各ステーションの作業数上限): 30

先行研究[5]では詳細データの明示がなかったため、バッファを加えて設定した。

- ・N(ステーションの上限値): 36

正規労働者の左右に非正規労働者が 1 人ずつ配置された場合の最大人数で設定した。

・ \hat{T} (非正規労働者に割り当てることのできない作業): 1, 2, 4, 26, 39, 49

ABC 分析に基づいて、作業時間の大きい作業番号から総作業時間の 5%, 10%, 15% となるまで \hat{T} を累積した数、及び作業時間の小さい作業番号から総作業時間が 5%, 10%, 15% になるまで累積した数を合わせて 6 つを設定した。

- ・サイクルタイム(ステーション作業時間の上限)

先行研究[5]では一定となっていたサイクルタイムに機会制約理論を適用するため、危険率と変動係数(CV)を設定した。先行研究[5]の固定サイクルタイムに対し、許容可能な危険率に対する有意水準を求め、CV との組み合わせによって新たなサイクルタイムが求められる。リスクを考慮した新たなサイクルタイムは式(14)で求められ、全てのステーションがその制約を受ける。

リスクを考慮した新たなサイクルタイム

$$= \text{先行研究[5]の固定サイクルタイム} \times (1 - \text{危険率の有意水準} \times \text{CV}) \quad (14)$$

・危険率(作業が遅れる確率をどこまで許容できるか): 30%, 10%, 5%, 1%, 0.1%

非正規労働者が作業を行うことから、作業時間には大きな遅れが想定されるため、リスクコントロールとして機会制約式を導入し、あらかじめサイクルタイムに余裕を持たせることで、リスクを回避する。ここでは安全率の想定に基づき 30%, 10%, 5%, 1%, 0.1% に設定した。

- ・CV(作業時間の変動係数): 0.085, 0.10, 0.15

作業番号 85 を分割したことに伴い、次に 1 番大きくなった作業番号 60 よりも、0.1% の危険率に設定されたサイクルタイムが小さくならないように設定した場合、CV が 0.15 まではサイクルタイムのほうが大きいと 0.16 を超えるとサイクルタイムが作業番号 60 を下回ってしまうため、上限を 0.15 に設定した。また次のパラメータを 0.10 に設定したが、その次の値を 0.05 に設定した場合、危険率 30% のサイクルタイムが 206.066 となり、固定サイクルタイム[5]である 217.37 の近傍となるため、ここでは 0.085 に設定した。

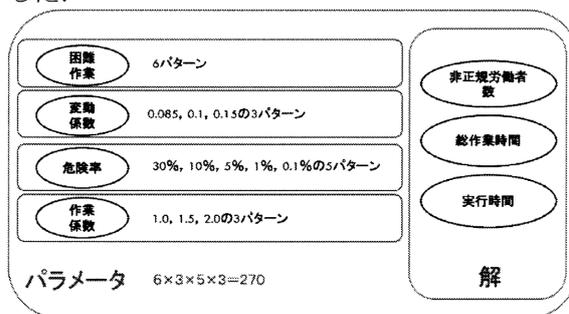


図 2. 実験適用パラメータと解

3.2 クロス集計による分析

3.1 の設定に基づく全シミュレーション結果をデータベースとして入力し(図 3), クロス集計した結果を以下に示す。

図 4 は作業係数をパラメータとする非正規労働者数の発生確率を示している。結果として、作業係数の増加とともに非正規労働者数の発生確率分布も増加傾向にある。

図 5 は危険率をパラメータとする非正規労働者数の発生確率を示している。結果として、危険率の減少(CT の減少)とともに非正規労働者数の発生確率分布も増加傾向にある。

図 6 は変動係数をパラメータとする非正規労働者数の発生確率を示している。結果として、変動係数(CV)の増減に伴う非正規労働者数の大きな発生確率分布変動は見られない。

図 7 は各係数と非正規労働者数の発生確率を示している。結果として、非正規労働者数は、「作業時間の振れ幅(変動係数)」よりも、「非正規労働者の能力(作業係数)」と「サイ

クルタイムへのリスク（危険率）」をどこまで許容できるかに大きな影響を受ける。なお、非正規労働者に割り当てることのできない作業（困難作業）には全く影響をうけない。

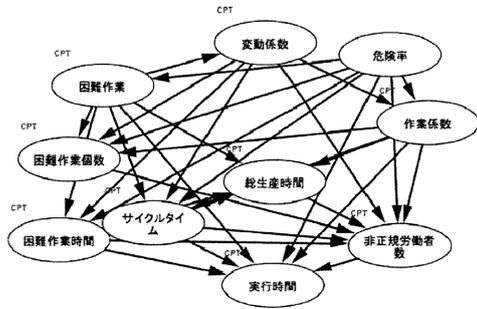


図 3. 推論前のネットワーク図

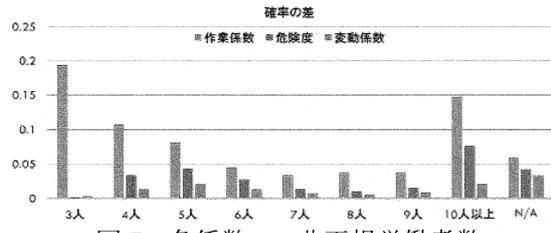


図 7. 各係数 v.s. 非正規労働者数

さらに総生産時間に関し、図 8 は作業係数をパラメータとする総生産時間の発生確率を示している。結果として、作業係数 $\beta:1$ のとき、正規労働者と同じ作業時間となるため、他のパラメータにかかわらず総生産時間は変動しない。

図 9 は危険率をパラメータとする総生産時間の発生確率を示している。結果として、危険率の増減に伴う総生産時間の大きな発生確率分布変動は見られない。

図 10 は変動係数をパラメータとする総生産時間の発生確率を示している。結果として、変動係数 (CV) の増減に伴う総生産時間の大きな発生確率分布変動は見られない。

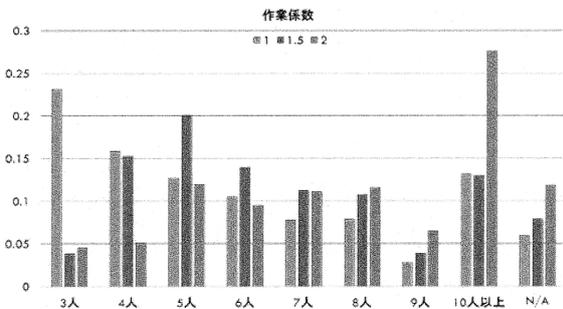


図 4. 作業係数 v.s. 非正規労働者数

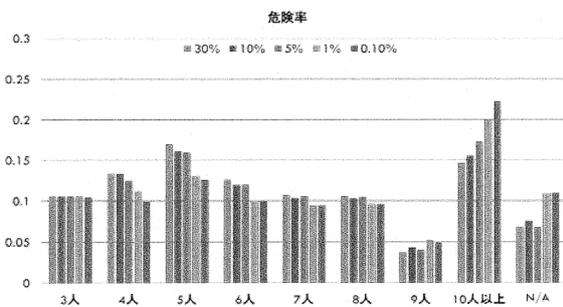


図 5. 危険率 v.s. 非正規労働者数

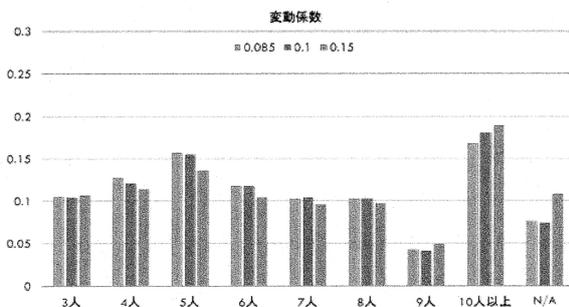


図 6. 変動係数 v.s. 非正規労働者数

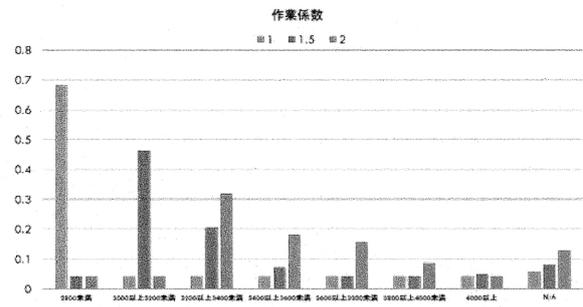


図 8. 作業係数 v.s. 総生産時間

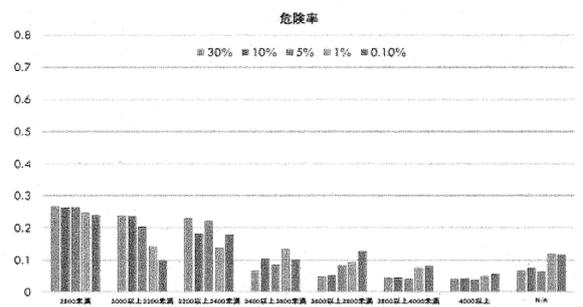


図 9. 危険率 v.s. 総生産時間

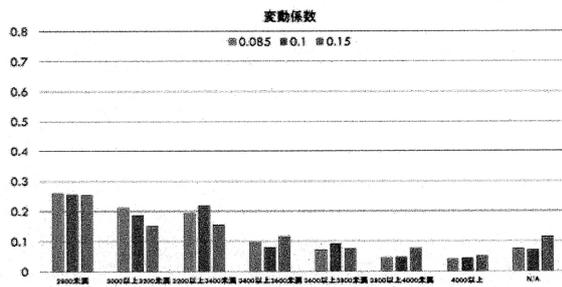


図 10. 変動係数 v.s. 総生産時間

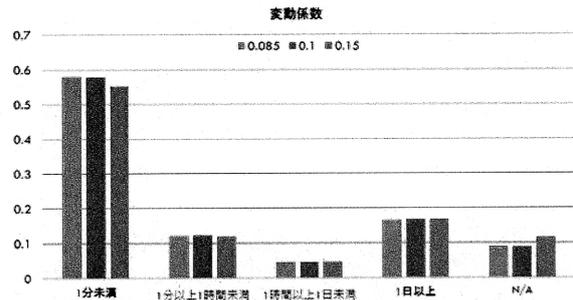


図 13. 変動係数 v.s. 実行時間

最後に実行（計算）時間に関し、図 11 は作業係数をパラメータとする実行時間の発生確率を示している。結果として、作業係数の増加とともに実行時間の発生確率分布もわずかながら増加傾向にある。

図 12 は危険率をパラメータとする実行時間の発生確率を示している。結果として、危険率の増減に伴う実行時間の大きな発生確率分布変動は見られない。

図 13 は変動係数をパラメータとする実行時間の発生確率を示している。結果として、変動係数（CV）の増減に伴う実行時間の大きな発生確率分布変動は見られない。

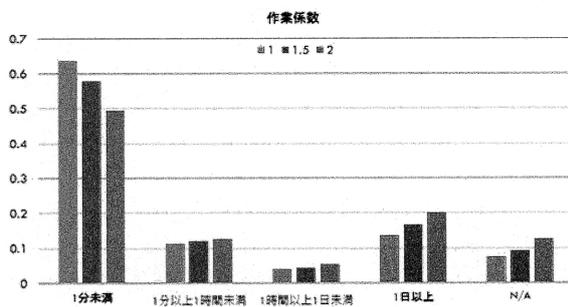


図 11. 作業係数 v.s. 実行時間

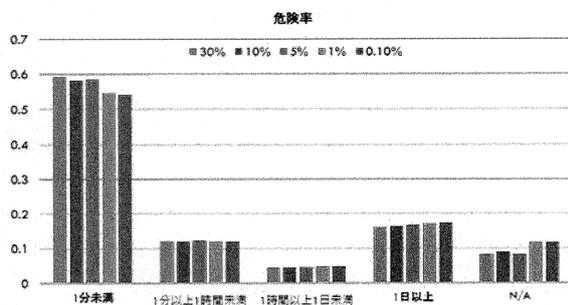


図 12. 危険率 v.s. 実行時間

3.3 ベイジアンネットワークによる分析

3.1 の設定に基づく全シミュレーション結果をデータベースとして入力し、ベイジアンネットワーク構築支援ソフト BayoLink により自動構築した上で推論した結果を図 14 及びベイジアンネットワークの分析画面例を図 15 に示す。

図 15 のベイジアンネットワークの分析画面例は、各パラメータや解を表すノードの近傍全てに発生確率分布が示されており、この発生確率分布のある範囲をねらいをもって操作者が 0 または 1 に設定することにより、全てのノードの発生確率分布が条件付確率分布に瞬時に変更され、その変動幅をタイムリーに確認することが出来る。

なお BayoLink はベイジアンネットワーク構築に際して、以下の各アプローチを利用している。

①アルゴリズム：Greedy Search - 欲張り法

Greedy Search アルゴリズムは、親がない状態から始め評価値が最も大きく改善する親を 1 つずつ追加していく方法で、ほかの方法に比べメモリの容量が少なく済む。

②評価基準：AIC - 赤池の情報量

あるモデルを仮定したときの、観測データの起こりやすさ(ML)に複雑さに対するペナルティ一項を加え過適合を回避する。

③学習の打ち切り条件に追加する項目：閾値 4

クロス集計表の平均値が閾値以下になったら探索を終了する。条件付き確率表(CPT)の元となるクロス集計表(CTT)の平均値がモデル構築途中で閾値以下になった場合に、モデル構築を終了させる。

④欠損値処理：ペアワイズ法

欠損値の多くが、1 因子もしくは 2 因子の関連によって発生している事実に基づき、コスト対効果の高いテストケースを作成する。

⑤正規化：ML

学習データから CTT を作成し、各セルの値を各列のサンプル数で割る。

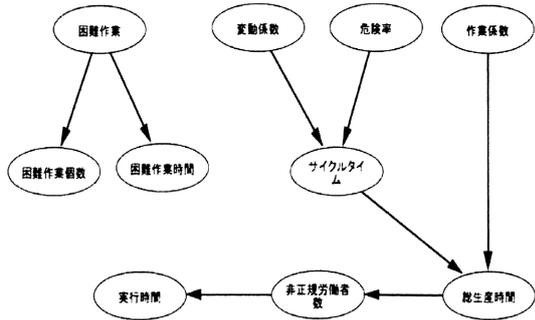


図 14. ベイジアンネットワークの推論結果

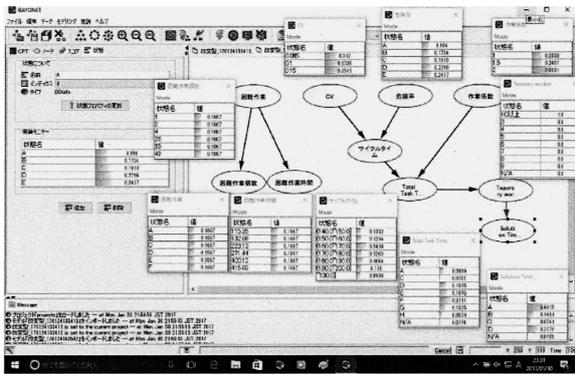


図 15. ベイジアンネットワークの分析画面例

(考察 1)

非正規労働者が行うことのできない作業集合は、非正規労働者数に影響しない。このことから、非正規労働者に割り当てられない作業数と作業時間が増えたとしても、総作業時間や非正規労働者数が増えることはない。よって、非正規労働者には、割り当てる作業の種類を絞る、いくつかの作業を継続して割り当てることにより、作業の効率を上げることに専念させることで、正規労働者と同じ作業効率で働ける可能性がある。

(考察 2)

実行不可能解を考慮しない場合の変動係数は、総作業時間に影響を与えない。これは、変動係数と組み合わせてサイクルタイムとして与えられている危険率にはない特性である。また、変動係数で差がみられるのは、変動係数が大きいときであることから、変動係数が大きいとき総作業時間に影響を与えやすく、解を求めにくいと考えられる。

(考察 3)

実行不可能解を考慮したモデルの推論結果は、変動係数は大きく、危険率は小さく、作業係数

は大きいパターンの確率が上昇していることから、サイクルタイムが小さく、正規労働者と非正規労働者の能力に差があれば差があるほど、解は求めにくいことが分かる。特に、作業係数の値の変化は大きく、変動係数の変化は小さいことから、作業係数の変化が大きく関係しており、変動係数の変化の影響は小さいと考えられる。このことから、正規労働者と非正規労働者の作業効率の差が大きいほど解は求めにくくなるのがわかる。また、考察 1 のとおり、危険率を低く設定しなければならないラインであれば、非正規労働者を早く雇い教育訓練の機会を増やし、非正規労働者に割り当てる作業を絞ることで作業効率の差を減らし、解を求めやすくすることができる可能性がある。

(考察 4)

実行不可能解を考慮しないデータで検証すると、考察 2 と同様に、サイクルタイムが小さく、作業係数が大きいパターンの確率が高くなった。しかしながら、実行不可能解を考慮したデータで検証したところ、サイクルタイムは平均的で変化は小さくなり作業係数のみが大きく偏りを示した。

総作業時間の値にも変化があり、実行不可能解を考慮したデータでは、3600~3800 の区間への大きな偏りを示したものの、実行不可能解を考慮しないデータでは、3200~3400 の区間が一番大きく、また偏りも小さくなった。

非正規労働者が 10 人以上必要であるパターンで、危険率と変動係数に偏りが出なかった実行不可能解を考慮したデータは、実行不可能解がデータとして含まれているため、推論に傾向が出にくいことを示しており、作業係数が変動係数や危険率に比べて強い影響を与えると考えられる。

以上の考察をまとめれば、作業係数が非正規労働者数、総生産時間、実行時間の全てに大きく影響しているのに対し、困難作業時間や困難作業個数には影響を与えないことが分かった。この結果から、作業係数は非正規労働者の能力が高くなるほど小さくなるため、非正規労働者を繁忙期より早く雇い教育訓練の機会を増やし、非正規労働者に割り当てる作業を絞ることができれば、限定的に正規労働者と非正規労働者の能力の差をなくすことができ、ひいてはサイクルタイムに負荷をかけることなく 1 製品当たりの生産速度を上げ、必要な非正規労働者数を減らすことができると考えられる。

また、全シミュレーション結果において、実行不能解が散見された大きな原因は、作業係数が高いケースであることが判明したため、制約条件を変更することにより、さらに結果を求めやすくすることができるかと推測される。

会平成 29 年度第 20 回全国大会予稿集, pp.71-74, (2017)

4. 結論と今後の課題

本研究では、先行研究に感度分析を考慮したベイジアンネットワークに基づく新たな分析法を提案し、その有効性を示すことができた。

今後、非正規労働者に割り当てる作業を限定し、一部作業の習熟度を高める特性を考慮することにより、作業係数を正規労働者に近づけて最適な雇用を生み出す条件を検討してみたい。

謝辞

本研究の遂行に際し、データ解析作業をしてくれた岡部耕平君に感謝する。本研究の一部はJSPS 科研費 17K01279 および高橋産業経済研究財団の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] Wee, T.S., Magazine, M.J. : “Assembly line balancing as generalized bin packing”, *Operations Research Letters*, 1, pp.56–58, (1982)
- [2] Becker, C., Scholl, A. : A survey on problems and methods in generalized assembly line balancing, *European Journal of Operational Research*, 168, pp.694-715, (2006)
- [3] Boysen, N., Fliedner, M., Scholl, A.: Sequencing mixed-model assembly lines: Survey, classification and model critique, *European Journal of Operational Research*, 192, pp.349-373, (2009)
- [4] Francas, D., Lohndorf, N., Minner, S. : “Machine and labor flexibility in manufacturing networks”, *International Journal of Production Economics*, 131, pp.165–174, (2011)
- [5] Corominas, A., Pastor, R., Plans, J. : “Balancing assembly line with skilled and unskilled workers”, *International Journal of Management Science*, 36, pp.1126-1132, (2008)
- [6] 片岡隆之, 森川克己, 高橋勝彦: “固定作業と作業スキルを考慮した臨時要員数最小化問題”, 日本ロジスティクスシステム学会平成 28 年度第 19 回全国大会予稿集, pp.73-76, (2016)
- [7] 片岡隆之, 森川克己, 高橋勝彦: “ベイジアンネットワークを用いたライン設計最適化条件の感度分析”, 日本ロジスティクスシステム学