

早稲田大学大学院理工学研究科

# 博士論文概要

## 論文題目

自律分散型生産制御システムの研究

( Study on Distributed Autonomous Production Control System )

申請者

大久保 寛基

Hiroki Okubo

機械工学専攻 経営システム工学専門分野  
生産システムデザイン研究

2005年 10月

製造業では、顧客ニーズの多様化や高度化によって製品ライフサイクルの短命化が進み、また、急増する短納期注文に対応するために個別受注生産化が進められている。そのため、新製品開発や製造技術革新における企業間競争が激しくなり、生産技術の変化が頻繁に起きている。このような市場環境と製造環境の変化は、今後も強まっていくと考えられ、これらの変化に即応できる変種変量生産が求められている。変種変量生産を行う製造現場では、製造負荷やボトルネック工程が頻繁に変化することとなる。さらに、生産対象である Job の生産進捗状況や、製造手段である設備の稼動状況が安定せず、大きく変化する。そこで、製造現場で頻発する変化に対して迅速に対応し、時々刻々と変化する Job の進捗状況や設備の稼動状況に対して、個別に即応できるフレキシブル生産が必要となっている。

フレキシブル生産を実現するためのシステムコンセプトとして、生産状況の変化にリアルタイムに対応でき、製造現場を構成する Job や設備の多様な状況変化に個別対応できる「自律分散型生産システム」が提案され、研究されている。自律分散型生産システムとは、Job や設備など、生産システムの構成要素が、生産実行に必要な情報と意思決定ロジックを持つことで知能を有し、生産進行に必要な計画や意思決定を、関係する構成要素が独立または協調しながら逐次決定し、生産を進める仕組みである。自律分散型生産システムの従来研究は、設備などの各構成要素が保有すべき作業実行機能の開発を目指した研究と、生産進行制御を分散処理で行うための生産制御機構の開発を目指した研究に分けられる。本論文では、自律分散型生産システムの生産制御機構の開発を研究対象領域としている。

自律分散型生産システムの生産制御機構の開発に関する従来研究では、制御方式のコンセプトが提案されているのみであり、これまで具体的な実行機構の開発は行われていない。また、自律分散型生産制御を適用した効果の検証については、従来研究において納期変更や設備構成の変更など生産条件の変更実施能力に関する評価は行われているが、自律分散型生産制御によって生産ラインを運用することによる生産性向上への効果については評価されていない。

本研究では、自律分散型の生産進行制御を具体的に実行する機構として、『コントラクト型生産制御システム』を設計した。この生産制御システムでは、意思決定機能と会話機能を付加した各 Job と各設備が、完成品にするために必要な工程作業について作業実施契約を結び、それを繰り返すことで生産進行を行う制御機構である。この制御機構を実現するために、制御機構に組み込まれる処理ロジックとして、自律した Job が保有する工程計画機能と、自律した設備が保有する作業計画機能の開発を行った。

Job の工程計画機能の開発では、Job 間で生産進捗度の平均化が行えるように、Job の生産進捗スピードを制約条件として考慮しながら、設備に作業実施依頼する工程作業内容を作成する「工程作業の編成ロジック」と、設備群全体の生産性を高めるように、作業負荷の変化に応じて工程作業の実行先設備を決定するルー

ルを切り替える「設備選択ロジック」の開発を行った。一方、設備の作業計画機能の開発では、作業進行過程で逐次決定される Job の工程作業内容や、逐次変化する設備の治工具段取状況を考慮して、精度の高い「作業実行内容と見積作業時間を生成するロジック」を開発した。

さらに、開発した自律分散型生産制御方式の有効性を明らかにするため、自律分散型生産制御と従来方式である中央統制型生産制御を比較し、両方式の特徴の違いによる制御性能の差異を定量的に分析している。最後に、非量産の受注生産を行う工作機械職場の事例データを用いて、自律分散型生産制御の適用効果を試算している。

本論文の第 1 章では、本研究の序論として、研究の背景と目的、自律分散型生産システムに関する従来研究を概観し、本研究の位置づけを示した。特に、研究対象領域としている工作機械職場での作業を定義し、従来研究においてすでに提案されている自律分散型生産進行方式のコンセプトを要約している。

第 2 章では、自律分散型生産進行制御の実行機構を具体的に設計している。従来研究で提案されている制御方式のコンセプトに関して特徴整理を行い、本研究の対象である個別受注生産を行う職場に適する方式として、Job と設備が募集や応募を行いことで作業実施契約を結び、それを繰り返すことによって生産進行を実施する方式を採用した。この方式を具体化した「コントラクト型生産制御システム：CPCS」を提案し、機能設計を行った。さらに、CPCS による生産進行上、生起する状態と事象を列挙して状態遷移図を作成し、事象の発火条件も加えることで、ペトリネットシミュレーションを行った結果、CPCS において、正常な生産進行が実行可能であることを確認した。また、自律した Job と設備が、生産環境の変化に適応し、Job や設備間での競合を避けるように協調しながら、生産進行に必要な意思決定を行うため、「実行機能」「適応機能」「協調機能」「学習機能」のよって構成されるインテリジェンスを設計した。このインテリジェンスは、意思決定に必要な「目標、制約、基準」を設定することを可能にしたメカニズムであり、このインテリジェンスを使用することで設定された「目標・制約・基準」で生産進行を実行することで、生産性向上に寄与できることを確認した。

第 3 章では、自律分散型生産制御を適用すべき生産環境の範囲を示すため、従来方式である中央統制型生産制御と比較しながら、待ち行列理論などの数学的モデルを用いた解析と、シミュレーションによる解析を行った。個別処理と部分処理が可能な自律分散型生産制御の特徴には、「対応時間の短さ」、「統制範囲の狭さ」、「作業実行データの正確さ」がある。全体処理とバッチ処理を行う中央統制型生産制御の特徴は、自律分散型生産制御と逆の特徴を持つ。これらの特徴に基づいて、両方式の制御性能の差異に関して解析した結果、製造負荷の低い場面では、自律分散型生産制御のメリットである「対応時間の短さ」が、デメリットであるシステム全体を統制する「範囲の狭さ」を凌駕することを証明した。また、「統制

範囲の狭さ」によって、生産進行上で発生する誤差が波及しにくいため、リードタイム増加への影響が少なくすむことも示した。また、「作業実行データが正確」である自律分散型生産制御では、計画内容と実際の誤差が少ないため、リードタイムを増やさずに済むことも明らかにした。以上から、自律分散型生産制御は、製造負荷が低く、生産進行上で発生する誤差が大きい場面で有効である。

第4章では、自律したJobが保有する工程設計機能と、自律した設備が保有する作業計画機能の開発結果と、その有効性について示した。工程計画機能の開発では、Job間の生産進捗スピードの平均化が行える「工程作業編成ロジック」と、設備群の生産性を高めるように工程作業の実行先設備を決める「設備選択ロジック」の開発を行った。特に、「設備選択ロジック」の開発では、Jobの工程作業実施先として作業完了時刻が最早の設備を選ぶルールと、設備間の稼働平準化に寄与する設備を選択するルールを、作業負荷と設備間能力差に応じて使い分ける必要性を理論的に証明し、その使用方法を開発した。一方、作業計画機能の開発では、作業進行過程で逐次決定されるJobの工程作業内容や、時々刻々と変化する治工具使用状況に合わせて、精度の高い作業実行データを生成できる計画ロジックを開発している。この機能の開発により、従来の切削作業のみに注目した計画ロジックに対して、段取時間も考慮した精度の高い作業計画の作成を可能とした。

第5章では、工作機械職場の事例データを用いながら、自律分散型生産制御を適用した場合における効果の試算結果を述べている。効果の試算は、自律分散型生産制御の適用によって実現可能となる、以下の3機能ごとにシミュレーション実験をすることによって試算した。

Job間の生産進捗度の平均化を行えるように、工程作業の編成を行う機能  
作業負荷と設備間能力差に応じて、設備選択ルールを切り替える機能  
段取状態をリアルタイムに考慮した作業計画機能

機能の適用によってリードタイムのばらつき削減が可能となり、機能の適用によって平均リードタイムの短縮が可能となり、機能の適用によって各Jobのリードタイムの短縮が可能であることを確認した。以上より、自律分散型生産制御の有効性を現実の職場でも実現可能であることを確認した。

第6章で、本研究のまとめを行い、得られた成果を要約した。

以上を要するに、本研究は、自律分散型生産制御を実現するための具体的な制御機構を開発し、生産効率が向上する生産環境の範囲を明らかにしたものである。従来研究において、体系化されずに提案されていた複数の生産進行方式のコンセプトを整理し、コンセプトとしてではなく、初めて実現できる制御機構として開発できた。さらに、自律分散型生産制御の適用による生産性向上の効果について評価した結果、従来方式である中央統制型生産制御に対して優位となる生産環境の範囲を、製造ショップの負荷や作業計画データの精度という汎用的かつ客観的な定量的指標によって示すことができた。

# 研 究 業 績

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
論文	<p><u>論文</u></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. オンライン生産制御におけるジョブの工程ルート設定のための設備選択ディスパッチングルールの研究、日本機械学会論文集 C 編、Vol.71、No.706、pp2028-2034、2005 年 6 月、大久保寛基、翁嘉華、中村敬一、大成尚</li> <li>2. 工程割付けと作業順序付けを同時に考慮する組立ショップスケジューリングの提案、日本経営工学会論文誌、Vol.54、No. 4、pp245-252、2003 年 10 月、翁嘉華、大久保寛基、大成尚</li> <li>3. Characteristics of distributed autonomous production control, International Journal of Production Research, Vol.38, No.17, pp4205-4215, 2000, H.Okubo, H.Onari</li> </ol>
発表	<p><u>国際学会発表</u></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Tools and Fixtures Planning in consideration of Set-up Operation, 8<sup>th</sup> International Conference on Manufacturing and Management CD-ROM Proc., Dec.2004, Hiroki Okubo, Takeshi Yoshida, Toshimitsu Hamada, Hisashi Onari</li> <li>2. A Study on Worker Operation Abilities in Sewing Work, 8<sup>th</sup> International Conference on Manufacturing and Management, CD-ROM 収録, Dec.2004, J.Weng, M. Jinmyo, H.Okubo, H.Onari</li> <li>3. Conflict Control of Distributed Autonomous Production Control, 17<sup>th</sup> International Conference on Production Research, CD-ROM 収録, 2003, H.Okubo, H.Onari</li> <li>4. A Study on Process Planning for Manual Assembly Cellular Line, APDSI-8(8<sup>th</sup> International Conference Asia-Pacific Region of Decision Sciences Institute) CD-ROM 収録, 2003, J.Weng, H.Okubo, H.Onari, S.Takata</li> <li>5. A Study on Assembly Operation Model for Line Performance Estimation, APDSI-7(7<sup>th</sup> International Conference Asia-Pacific Region of Decision Sciences Institute) CD-ROM 収録, 2002, J.Weng, H.Okubo, H.Onari,</li> <li>6. A State-Transition Analysis on the Contracting Procedure of Contract-based Production Control System, 7<sup>th</sup> International Conference on Manufacturing and Management, CD-ROM 収録, Nov.2002, H.Okubo, N.Kamada, J.Weng, T.Hamada, H.Onari</li> </ol>

## 研 究 業 績

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
発表	<p>7. An Algorithm of Cell Formation for Cell Production System with U-shaped Line, 5<sup>th</sup> International Conference on Engineering Design and Automation, pp491-498, 2001, H.Okubo, H.Onari</p> <p>8. The Influence of Initial Solution on the Performance of Job Shop Scheduling Algorithm Based on Tabu Search, APDSI-6 (6<sup>th</sup> International Conference Asia-Pacific Region of Decision Sciences Institute) CD-ROM 収録, 2001, J.Weng, H.Okubo, H.Onari</p> <p>9. System Architecture of Contract-based Production Control System, 4<sup>th</sup> International Conference on Engineering Design and Automation, pp938-943, 2000, H.Okubo, H.Onari</p> <p>10. Flexible Assembly Planning System: The integration of process planning and operation planning, 6<sup>th</sup> International Conference on Manufacturing and Management Proc., pp897-902, 2000, J.Weng, H.Okubo, H.Onari,</p> <p>11. Production Lead-time Estimation System Based on Neural Network, APDSI-5(5<sup>th</sup> International Conference Asia-Pacific Region of Decision Sciences Institute) CD-ROM 収録, 2000, H.Okubo, H.Onari</p> <p>12. Flexible Assembly Job Shop Scheduling Based on Tabu Search, APDSI-5 (5<sup>th</sup> International Conference Asia-Pacific Region of Decision Sciences Institute), CD-ROM 収録, 2000, J.Weng, H.Okubo, H.Onari,</p> <p>13. Characteristics of Distributed Autonomous Production Control, 15<sup>th</sup> International Conference on Production Research Proc., pp469-472, 1999, H.Okubo, H.Onari</p> <p>14. The Effect of Grouping Work-elements for Assembly Shop Scheduling, 15<sup>th</sup> International Conference on Production Research Proc., pp365-368, 1999, J.Weng, H.Okubo, H.Onari,</p> <p>15. Contract-based on Production Control System for Distributed Autonomous, 5<sup>th</sup> International Conference on Manufacturing and Management 1998 Proc., pp58-63, 1998, H.Okubo, H.Onari</p>

# 研 究 業 績

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
発表	<p><u>学会発表</u></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 自律分散型生産制御における競合制御の研究、日本機械学会第3回生産システム部門講演会講演論文集、pp19-20、2003、大久保寛基、大成尚</li> <li>2. コントラクト型生産制御システムにおける契約進行状態の分析、日本機械学会 2002 年度年次大会講演論文集、pp365-366、2002、大久保寛基、大成尚</li> <li>3. 自律分散型生産制御における要素作業の研究、日本機械学会第2回生産システム部門講演会講演論文集、pp31-32、2002、大久保寛基、大成尚</li> <li>4. コントラクト型生産制御システムの状態遷移、日本機械学会第1回ファクトリーオートメーション部門講演会講演論文集、pp35-36、2001、大久保寛基、大成尚</li> <li>5. Tabu Search を用いたジョブショップスケジューリング、日本機械学会全国大会日本機械学会年次大会講演論文集、pp339-340、2001、翁嘉華、大久保寛基、大成尚</li> <li>6. 自律分散型工程制御の特徴、精密工学会春季大会講演論文集、pp53、1999、大久保寛基、大成尚</li> <li>7. 分散型生産制御と中央統制型生産制御の評価、精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集、pp45、1999、大久保寛基、大成尚</li> <li>8. 設備間能力差がある場合における工程ルートの選択、日本経営工学会秋季大会予稿集、pp205-206、1998、翁嘉華、大久保寛基、大成尚</li> </ol>