

佐藤隆臣*
Takaomi Sato
川口嵩平*
Shuhei Kawaguchi
菊地健斗*
Kentō Kikuchi

環境配慮型生産改善フレームワーク

Production Improvement Framework for Reducing Environmental Load while Maintaining Productivity

要旨

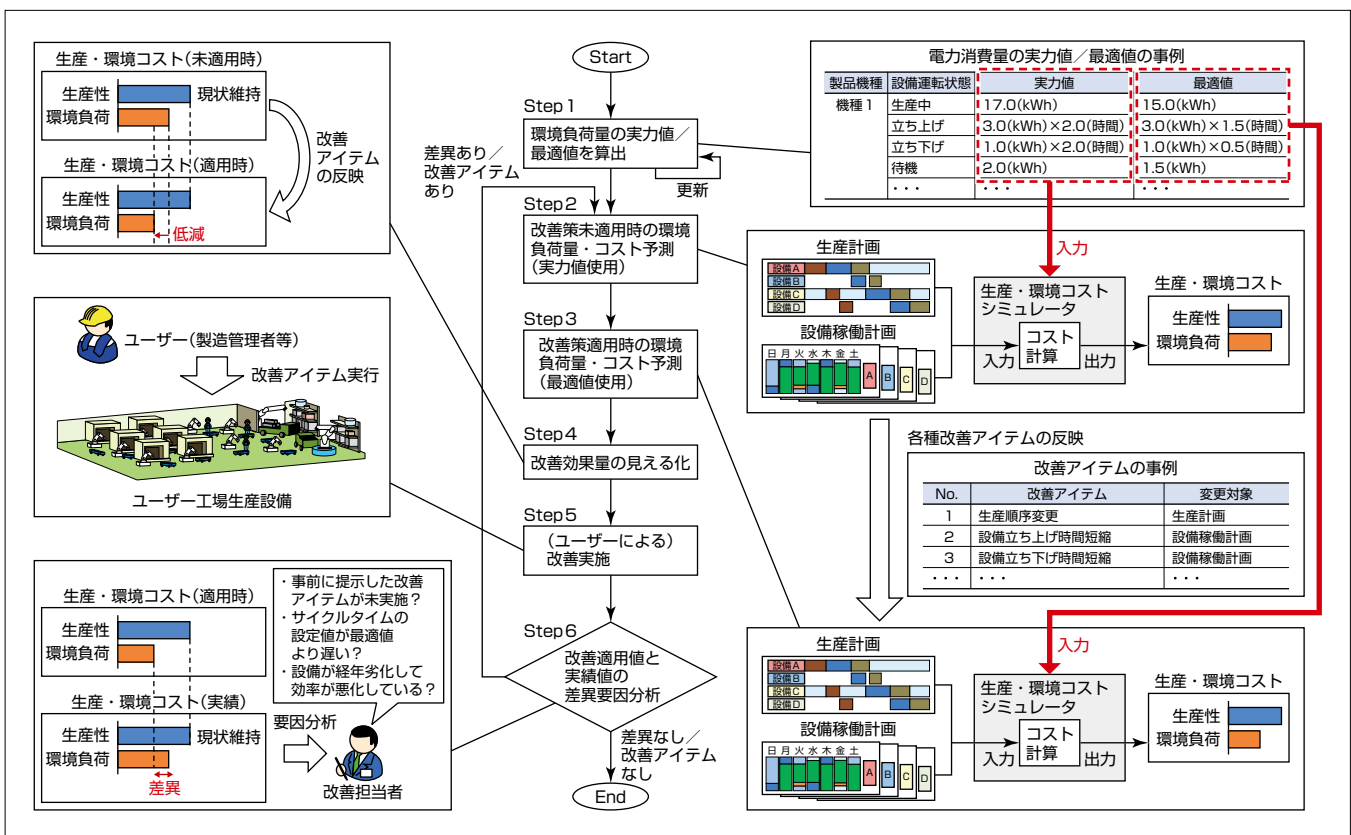
持続可能な開発目標SDGs(Sustainable Development Goals)の目標であるカーボンニュートラルの実現に向けた取組みを各国が推進している。特にエネルギー使用量や環境負荷排出量の多い製造業では無視できない状況で、現状の生産性を落とさずに環境負荷を低減することが課題になっている。

三菱電機グループでは、生産性と環境負荷を等価に扱い最適化する生産管理構想“Environment and Energy Just In Time⁽¹⁾”を提唱し、この課題の解決を目指している。この構想の一環として検討している、シミュレーション技術を用いた、生産性と環境負荷との最適なバランスの決定を支援するフレームワークを提案する。このフレームワークでは、工場の生産設備における過去の電力、水、ガス等の

資源の消費量と、有害物質の排出量の実績データから算出した実力値と最適値を用いて、今後予定されている生産での、改善策の適用有無による環境負荷排出量とコストの差異をシミュレーションすることで予測する。これらの差異を改善効果量として提示して、ユーザー中心に改善を実行してもらう。この改善サイクルの繰り返しで、最適な生産運用を実現する。

当社モータ製造工場の鉄心プレス設備で、このフレームワークを用いた改善に取り組んだ結果、生産性を維持しつつ、環境負荷量とコストを削減できた。さらに、2周目以降の改善で16%(42万円/年)の削減可能性を示した。

今後、このフレームワークを用いたソリューションの提供に向けて、当社工場での実証を重ねる計画である。



Environment and Energy Just In Time構想に基づく環境配慮型生産改善フレームワーク

まず、生産設備の過去の環境負荷量の実績データから実力値と最適値を算出する(Step 1)。次に、今後予定されている生産での改善未適用時(Step 2)と適用時(Step 3)の環境負荷排出量とコストをシミュレーションで予測する。二つの予測値の差異を改善効果量として提示(Step 4)し、ユーザー判断の下、改善実行してもらう(Step 5)。最後に、適用時の環境負荷量/コストと実際の生産実績の差異要因を分析し、次回以降の改善アイテムを抽出する(Step 6)。

1. ま え が き

2015年の国連サミットで採択された持続可能な開発目標SDGsの一目標であるカーボンニュートラル(CN)の実現に向けた取組みを各国が推進している⁽²⁾。代表的なものとして、中国の工業グリーン発展に関する第14次5カ年規画が挙げられる。

特にエネルギー使用量や環境負荷排出の多い製造業では、CNの実現は無視できない状況で、現状の生産性を落とすことなく環境負荷を低減することが課題になっている。

そこで、当社グループでは、生産性と環境負荷を等価に扱い最適化する生産管理構想“Environment and Energy Just In Time”を提唱し、この構想を用いた課題解決を目指している。

本稿では、シミュレーション技術を用いて、生産性と環境負荷との最適なバランスの決定を継続的に支援する、環境配慮型生産改善フレームワークを提案するとともに、当社工場での実証実験結果と今後の展望について述べる。

2. Environment and Energy Just In Time 構想

Environment and Energy Just In Time構想は、原材料、労働力といった生産財と、電力や水といった環境負荷に関連する資源を必要な場所に、必要な量を、必要なときに投入し、生産性、環境負荷のバランスを取って全体最適化する構想である。従来の工場では、一般的に省エネルギーや環境負荷対策を生産と切り離して個別に対応し、生産に関係のない範囲での改善に終始していたため、今後厳しくなる環境法規制に対応する場合、生産に関係する範囲での改善も必要になることから、設備停止等で生産性の悪化を招くおそれがある(図1)。一方、Environment and Energy Just In Time構想では、環境負荷対策と生産を等価に扱い、環境負荷対策が生産(数量、時間等)に与える影響を定量化することで、環境法規制の制約下で、最大の生産性を上げる運用の実現を可能にする(生産性の悪化を最小限にとどめる)。等価に扱うとは、工場の生産、環境負荷を費用換算し、統一指標で評価することを意味する。

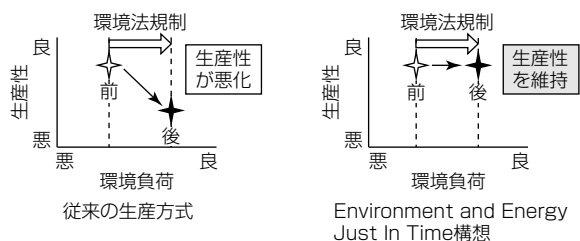


図1. Environment and Energy Just In Time構想に基づく生産管理イメージ

3. 環境配慮型生産改善フレームワーク

環境配慮型生産改善フレームワークでは、日々の生産に着手する前に、ユーザー(製造現場管理者等)に、環境法規制に対応しつつ、生産財や、環境負荷に関連する資源の消費や処理に応じたコストを最小化する生産運用計画と改善効果量を提示することで、ユーザーの改善実行を支援する。

このフレームワークの運用の効率化のため、過去の生産実績データから実力値と最適値を算出する機能と、それらの値をパラメータとして生産財や環境負荷に関連するコストを算出するシミュレーション機能を開発した。

3.1 実力値と最適値の算出

生産に伴い消費する電力、水、ガス等の資源量と、排出する温室効果ガス(CO₂)等の有害物質の実力値と最適値の算出方法について述べる。今回は対象を電力消費量とする。

3.1.1 実力値の算出方法

電力消費量は、製品機種及び設備の運転状態(立ち上げ、生産中、立ち下げ、段取り替え等)に依存することから、実力値算出の準備として、電力消費量データに生産数量実績データを組み合わせて、データ集計を行う。製品機種及び設備の運転状態別に集計した電力消費量データから、図2に示すように、外れ値を除外した中央値を実力値とする。言い換えれば、“ユーザーが通常運用した”場合の設備の電力消費量のことである。なお、過去の経験から、データの分布が正規分布であることは稀有(けう)であることから、外れ値抽出方法として、四分位法(箱ひげ図)を用いた。

3.1.2 最適値の算出方法

実力値算出と同様の方法で、集計したデータの分布から、外れ値を除外した後の最小値を、最適値とした(図2)。“ユーザーがうまく運用すればここまでできる”場合の設備の電力消費量のことである。ここで、外れ値を除外する理由は、通常の生産とは別に試作品等でサイクルタイム(秒/個)を著しく落として生産したり、顧客からの特急オーダーで本来の設備スペックのサイクルタイムを超過して生産した

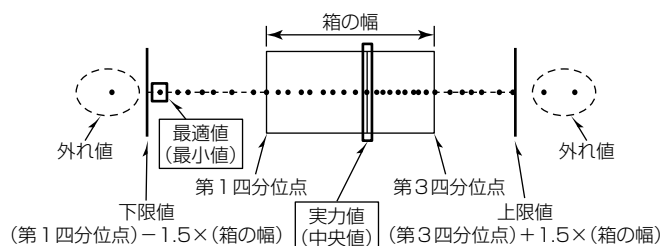


図2. 四分位法(箱ひげ図)による実力値と最適値の算出方法

りすることがあるためである。

3.2 生産・環境コストシミュレータ

図3に生産・環境コストシミュレータの全体図を示す。このシミュレータは、以前から存在する生産財の使用量とコストを算出する生産コストシミュレータに、環境負荷量とそれに伴い発生するコストを算出する環境コストシミュレータを追加実装したものである⁽³⁾。

3.2.1 入出力データ

このシミュレータは、表1に示す生産システムパラメータ、環境負荷量／コストパラメータ、生産運用計画データの3種類のデータを入力して、各種生産財と環境負荷に関する量とコストを出力する。生産システムパラメータと環境負荷量／コストパラメータは、対象とする工場の設備の製造能力や構成等の静的な設計データである。一方、生産運用計画データは、シミュレーション実行時に都度変化する動的なデータである。これらの詳細な設定データを持つことで、実際の設備の挙動を再現することが可能になる。3.1節で算出した実力値と最適値は、この生産システムパラメータ、環境負荷量／コストパラメータとして用いる。

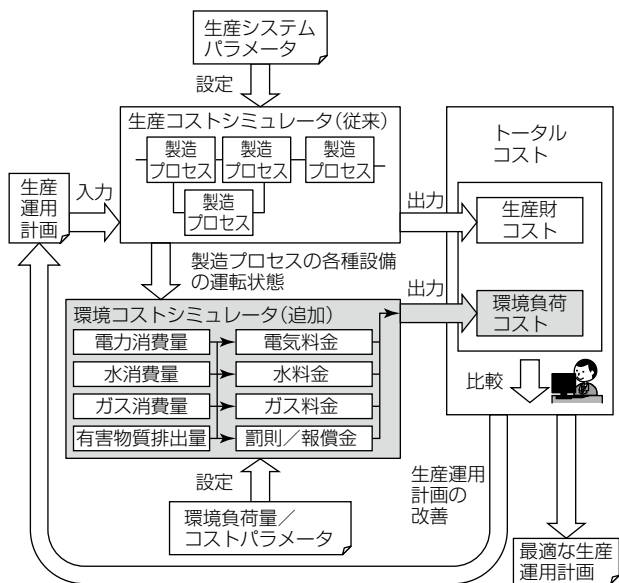


図3. 生産・環境コストシミュレータ

表1. 生産・環境コストシミュレータ入力データ

生産システムパラメータ	環境負荷量／コストパラメータ	生産運用計画データ
<ul style="list-style-type: none"> 生産設備構成(製造プロセスのつながり) 製造能力(サイクルタイム, リードタイム等) 製品機種 (製品1個当たりの)材料使用量 労働力(作業員人数) 段取り替え時間 作業シフト(時間) 稼働日カレンダー 生産財の単価 	<ul style="list-style-type: none"> 各種生産設備の運転状態ごとの環境負荷量 電気・水・ガス等の料金表 環境法規制に伴う罰金／報償金 	<ul style="list-style-type: none"> 生産計画 設備稼働計画

3.2.2 使用方法

各種改善アイテムに応じて、生産システムパラメータ、環境負荷量／コストパラメータ、生産運用計画データを変更し、それに応じたコストを算出することで、改善アイテムの効果を確認する。改善担当者やユーザーが、改善効果が最大になるように、各種データの変更を繰り返して使用することを想定している。

ただし、効果が最大になるデータを探索する作業は工数がかかるため、現在、生産計画の一部を対象に自動化を進めている。

3.3 フレームワーク実施手順

今回提案する環境配慮型生産改善フレームワークでは、次に示すStep1～6の手順を繰り返し実行することを想定している。

(1) Step1：実力値と最適値を算出

生産設備の過去の電力、水、ガス等の資源の消費量と、温室効果ガス等の有害物質の排出量の実績データの分布から、実力値と最適値を算出する。

(2) Step2：改善策未適用時の環境負荷量・コスト予測

改善担当者が、通常運用した場合、すなわち改善策未適用時の生産財及び環境負荷に関する量とコストを算出する(以下“未適用値”という。)ため、実力値を入力して、シミュレーションを実行する。

(3) Step3：改善策適用時の環境負荷量・コスト予測

改善担当者が、設備立ち上げ／立ち下げ時間の短縮や、段取り替えの組合せの変更等の様々な改善アイテムを、生産運用計画やパラメータに反映し、生産財及び環境負荷に関する量とコストをシミュレーション(最適値使用)によって算出する(以下“適用値”という。)

(4) Step4：改善効果量の見える化

各種改善アイテムを適用して、Step2の改善未適用値から、Step3の適用値に近付けることを目的に、未適用値と適用値の差分を、改善効果量として出力し可視化する。

(5) Step5：(ユーザーによる)改善実施

改善効果量をユーザーに提示し、了承を得た上で、ユーザー中心に改善実行してもらう。

(6) Step6：改善適用値と実績の差異分析

改善担当者が、生産時に実績値を収集し、改善適用値との差異要因を分析し、次回以降の改善アイテムを抽出する。

4. 実証実験

当社モータ製造工場の鉄心プレス設備で、環境配慮型生産改善フレームワークを用いて、“現状の生産性を落とすこ

となく、環境負荷を低減することが可能であるか”という仮説を実証するための実験を行った。

4.1 実験条件

(1) 対象生産設備

工場の中で、環境負荷に関する資源消費量(今回の場合、電力消費)の多いモータ鉄心プレス設備を含む3生産ライン

(2) 対象期間

2022年1月31日～2月11日(約2週間)

(3) 実力値/最適値算出に用いたデータの対象期間

2020年4月1日～2021年3月31日(1年間)

(4) 対象とする生産財と環境負荷資源

①生産財：労働力(労務費)

②環境負荷資源：電力(電力料金)、CO₂(排出量取引費用)

なお、CO₂排出量は電力消費量から換算し、CO₂に関するコストは中国の一部の省で用いられているCO₂排出量取引費用を用いた(取引レート：約1,000円/t-CO₂)。

(5) 改善アイテム

製品品質や納期等生産性を悪化させないことを制約とした場合、今回実施可能な改善アイテムは次の三つであった。

①改善アイテム1：生産順序変更

②改善アイテム2：(生産開始前の)設備立ち上げ時間の短縮

③改善アイテム3：(生産終了後の)設備立ち下げ時間の短縮

4.2 実験結果・考察

フレームワークのStep1実施によって、製品機種Aを生産する際の設備の運転状態別(立ち上げ、立ち下げ、段取り替え、生産中)の電力消費量の実力値と最適値を算出した例を表2に示す。表2に示した結果も含む全製品機種の設備運転状態別の実力値と最適値を用いて、フレームワークを1周(Step1～6)させた際の、生産財及び環境負荷に関する改善未適用値、適用値、実績値の3種類のコスト(年間換算)を表3に示す。今回の実験では、主に改善アイテム3実施による効果で、生産性を落とさずに(今回のケースでは2.3%向上)、環境負荷量とコストを1.5%低減できた。なお、過去の評価で、今回の実験とは別の期間のデータを用いて、シミュレーションで算出した未適用値と、改善未実施の場合の実績値の差異が十分に小さいこと、つまり、今回提示する改善効果量を見誤るほどの差異がないことを確認している。

一方で、環境負荷コストに関する(改善)適用値と実績値の間には、14%の差異があったことから、ユーザーへのヒアリングやデータの確認で要因分析した。結果、表4に示す問題点が明らかになった。それに加えて、これらの問

表2. 電力消費量の実力値と最適値の算出例

製品機種	設備運転状態	実力値	最適値
機種A	立ち上げ	5.1(kWh)(3時間)	1.0(kWh)(1時間)
	立ち下げ	3.2(kWh)(2時間)	1.0(kWh)(1時間)
	生産中	2.3×10^{-3} (kWh/個)	2.0×10^{-3} (kWh/個)
機種A→機種B	段取り替え	2.0(kWh)(2時間)	1.0(kWh)(1時間)

表3. 改善1周目の生産財と環境負荷コスト

	生産財	環境負荷	
	労務費(万円/年)	電力(万円/年)	CO ₂ (万円/年)
未適用値	555	322	18
適用値	453	272	15
実績値	542	318	17

表4. 2周目以降の改善アイテムと効果

問題点	改善アイテム	電力(万円/年)	CO ₂ (万円/年)
生産中のサイクルタイム設定値が設備スペックに比べて低い	サイクルタイム設定値を設備スペックの最小値で運用する	25.2	1.4
設備故障(コントローラ基板)を懸念して、生産終了後に設備立ち下げ未実施	制御盤内熱環境の向上(熱交換器の増設/更新) 問題箇所の分離(制御盤内の電源回路の分割)	8.0	0.4
生産中の1回当たりの材料交換作業時間が長い	作業標準化(熟練者の取組みを初級者に教育) 作業環境の向上(ヘッドライト等の照明の有効活用) (材料挿入専用の)治具の改良	1.8	0.1

題を解決するために、2周目以降の改善アイテムを抽出し効果量を算出したところ、1周目と合わせて42万円/年の環境負荷コストを削減可能であることが分かった(表4)。

今回の実証実験によって、生産性を落とさずに、環境負荷量とコストを低減することが可能であることを示したが、一方で、環境法規制を考慮した生産改善の実施までには至らなかった。

5. むすび

本稿では、生産性と環境負荷との最適なバランスの決定を支援する環境配慮型生産改善フレームワークを提案した。

実証実験の結果、フレームワークを用いた1周目の改善によって、生産性を落とすことなく、環境負荷を1.5%低減することが可能であることを示した。それに加えて、2周目以降の改善で42万円分/年の環境負荷量とコストを削減可能であることを示した。

今後は、このフレームワークを用いたソリューション提供を目指して、当社工場での実証実験を重ねる。

参考文献

- (1) 三菱電機(株)：三菱電機の経営戦略、2021年度 経営戦略説明会【2021年6月3日】、20(2021)
- (2) 経済産業省 資源エネルギー庁：エネルギーに関する年次報告(エネルギー白書2021)、29～52(2021)
- (3) 生産性と環境負荷の最適バランス決定を支援するシミュレータ、三菱電機技報、95, No.1, 34(2021)