

自律分散手法による厚板圧延の多目的ロット編成

大川 登志男*・北條 成人*

Multi-Objective Lot-Making in Steel Plate Production by Autonomous Decentralized System

Toshio OKAWA and Shigeto HOJO

Synopsis : In most of production planning problems, it is required to manage multiple objective functions. An autonomous decentralized planning algorithm has been developed to apply to multi-objective lot-making problems. The methodology is to improve multi-objective function values through iterative negotiation among the planning modules which represent individual objective functions. The idea of planning 'share' is introduced as the measure to adjust the priority of multiple objective functions. The proposed algorithm has been applied to the plate design problem in steel manufacturing process and its effectiveness has been shown.

Key words : autonomous decentralized system; lot-making; plate design; multi-objective planning.

1. はじめに

大規模設備産業である鉄鋼業において、製造仕様の似たオーダーをまとめて効率的な生産を行うためのロット編成は重要な生産計画問題である。ロット編成では納期や歩留、生産性など様々な評価指標や制約条件を考慮しながら適正な計画を行うことが求められる。またロット編成では個々の生産ロットを適正に組み合わせだけでなく、ロット集合全体としての適正さも求められるため、複数の評価指標間の調整が一層複雑となる。

多目的計画問題に対しこれまで様々なアプローチが提案されているが、広く受け入れられている方法はない。本稿では自律分散手法の適用により、計画担当者が把握しやすい多目的評価指標間のトレードオフ調整方法を検討する。これは個別の評価指標を向上させるような計画モジュールを複数設定し、モジュール相互間交渉の枠組みを介して多目的指標の改善を図る方式である。

以下に計画手法の概要と、厚板圧延ロット編成問題を対象としたモデル化、シミュレーション事例について述べる。

2. 自律分散方式によるロット編成

2.1 主な多目的最適化手法

複数の評価指標を取り扱う多目的最適化問題に対し、パレート最適解集合の中から最も好ましい一つの選好解を求める様々な方法が提案されている¹⁾。その多くは複数の評価指標を何らかの形で単一の評価関数に変形した上で、単一評価指標の最適化問題として解くものである。

例えば加重和最小化法では、評価関数の重み係数を定義し、加重和を新たな単一評価指標として、各評価指標の平均的な最適化を目指した計算を行う。

重み付けミニマックス法では、最も評価の低い指標を底上げするよう、各評価関数に重み係数を乗じた積の最大値を最小化する。逆に ϵ 制約法は評価指標のうち、最も重要な1つを評価関数として残し、残りの評価指標のそれぞれに許容可能な上限を設けて制約条件として扱う。また目標計画法では、適当な距離指標を定義し、理想解からの距離を最小化する解を求める。

いずれの方法も、複数の評価指標を持つ問題を単一の評価関数の最適化問題に帰着する過程で様々なパラメータの設定が必要になる。残念ながらこれらのパラメータを合理的に決定する方法は不明である。このことが評価指標間のトレードオフの妥当性を分かりにくいものとしている。

新たな方法として複数のパレート最適解集合を算出し計画者の選択に委ねる方法論²⁾等も注目されているが、そこから如何にして選好解を取り出すかという問題は依然として残る。

2.2 自律分散型手法

そこで自律分散型手法^{3,4)}に基づいて、各目的関数間のトレードオフを計画担当者が把握・調整しやすい多目的計画法を考える。ここではFig. 1に示すように、異なる評価指標を代表する複数の計画モジュールが相互に交渉を行い、逐次的に計画を更新させていく。すなわち、ランダムに選択された一つのモジュールが共通データベースにあるオーダー情報や計画進捗情報などを参照しながら、自分の目的に沿って計画を改善させるようなスケジュールの提案を行い、他のモジュールとの交渉の結果それが受け入れられ

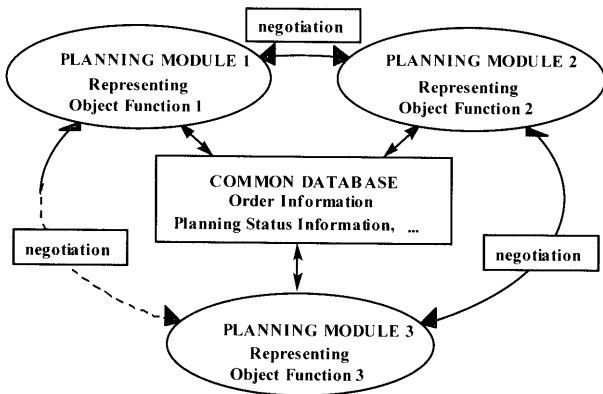


Fig. 1. Outline of autonomous decentralized system.

れば計画の更新が行われる。一回の手続きでは局所的な最適化が行われる。この手続きを繰り返すことによって秩序が形成され、大域的な最適化へと導かれる。

改善案を提案するモジュールの選択確率は単純に等確率で与える方法も考えられる。しかし、重要度の高いモジュール、あるいは目的関数値の悪いモジュールの選択確率を増やすことにより、より良い解が得られやすくなることが期待される。

モジュールによる改善案の提案方法は任意である。ただし本手法が遺伝アルゴリズム、シミュレーテッド・アニーリング法などと同様、与えられた初期解を起点として様々な解を繰り返し探索する最適化手法であることを勘案すると、個々の改善提案における計算負荷が比較的軽いアルゴリズムであることが望ましい。同様に改善の範囲も計画ロットの全体を対象とするのではなく、少数のロットのみを変更するべきである。

各評価指標を代表するモジュール間の交渉では、それぞれのモジュールが各評価指標の改善のみに固執すると、局所最適解に陥ることにより全体としての改善に結びつきにくくなる。交渉毎に主導権をとるモジュールを決めたり、計画作業の進展に伴い一時的な評価指標の悪化許容レベルを変えたりするなど、部分的な評価指標の悪化を許容する交渉方式を採用すべきである。

計画作成の終了判定は繰り返し計算回数の上限值、計算時間とするのが妥当である。一般に探索の前半では計画の改善が得られやすいが、探索の後半では改善が進みにくくなる。事前の試行錯誤を通して適切な計算の打ち切り条件を決めるのが妥当である。

2.3 多目的指標の調整

現実の多目的計画では、環境の変化に伴って各評価指標の重要度は変化する。そこで、各モジュールの計画作成への影響力あるいは交渉力を表す指標として、編成権 (SHARE) の概念を導入する。編成権とは、各モジュールに予め与える計画枠 (ロット数) と定義する。各モジュールには編成権を有するロットを優先的に自己の計画ロジックで編成する権利を与える。

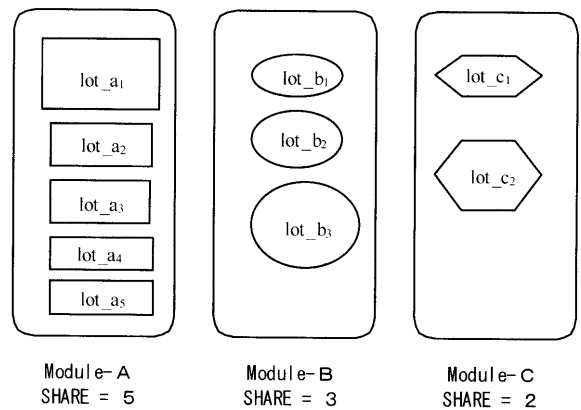


Fig. 2. 'SHARE' of planning modules.

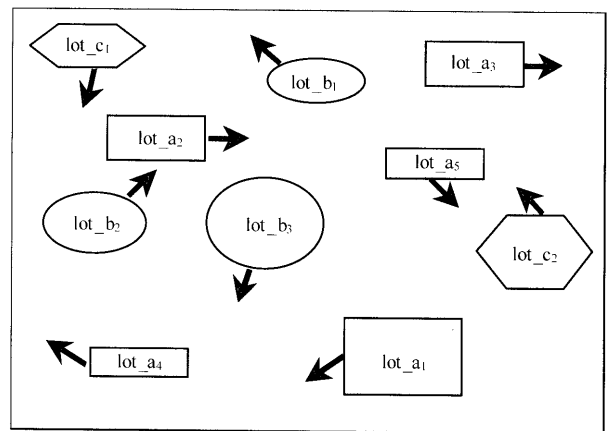


Fig. 3. 'SHARE' in negotiation field.

加重和最小化法など、従来法の一元化された評価関数を介した調整と異なり、編成権による調整は計画枠を通して調整のプロセスに直接介入する方式のため計画担当者にとってその意味と調整の効果の把握が容易である。

効率的な計画の改善を行うため、以下の規則を設ける。

- (1) 大きな編成権を有するモジュールほど交渉主体や交渉相手となる確率が高い。
- (2) 計画モジュールの抱えるロットのうち、当該評価指標が低いほど交渉対象として選択される確率が高い。
- (3) 初期の交渉では一時的な評価指標の悪化を許容することにより局所最適解に陥りにくくする。ただし、悪化の許容幅は交渉の回数を重ねるにしたがって狭まるように設定する。

編成権および交渉の「場」の概念を模式的に Fig. 2, 3 に示す。ここでは評価指標 A, B, C を代表する計画モジュールがそれぞれロット編成権を 5, 3, 2 だけ有している。各ロットの評価指標値が悪いほど図のロット面積は大きく示される。各ロットは「場」の中をランダムに移動し、2つのロットが衝突すると、交渉が発生する。評価指標の悪い、すなわち面積が大きいロットほど交渉発生確率が高い。交渉が成立すると該当するロットの面積が変わる。ロット編成権の大きいモジュールのロットは相対的に交渉発生が起きやすい。

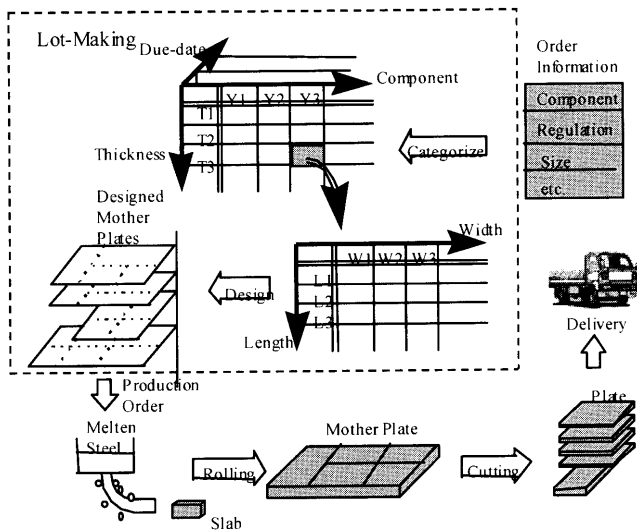


Fig. 4. Planning and production flow of steel plate.

3. 問題の定式化

3.1 厚板圧延ロット編成問題

製鋼工場では精錬した一定量の溶鋼を鋳造・切断して鋼片群を製造する。圧延工場では鋼片を加熱・圧延して大板を製造する。大板の時点で製品厚が決まる。最後に大板を所定の幅・長さで切断して最終製品の小板を得る。

厚板設計はロット集約作業である。最初に需要家からの注文を製品厚，成分，納期などの属性で分類する。製品厚については，実際には公差範囲内の製品厚の小板を同じ大板に組み合わせることにより重量ロスとロット集約ロスとのトレードオフ関係解消を図る3次元の編成問題であるが，本稿では同一の板厚で分類した小板群に注目し，2次元の編成問題として扱う。Fig. 4の下半分は厚板製造フロー，上半分は厚板設計フローである。

納期については在庫削減及びリードタイム短縮の視点から，同じ納期余裕の注文群を可能な限り組み合わせる。ここで納期余裕とは，注文単位に納期から製造工程の標準工期分を遡って算出される製造着手限界日までの余裕日数のことであり，正の数字が大きいほど余裕がある。

属性別に分類された小板群を幅・長さ平面上に展開し，1枚または複数枚の小板を組み合わせ配置し，圧延ロットである大板を設計する。小板および大板の平面形状は矩形である。多様な寸法の小板を組み合わせ大板を編成し，その算定重量に基づいて圧延素材である鋼片を設計する。この問題を厚板圧延ロット編成問題と呼ぶ。

複数の小板を制約条件の下で大板上に最適配置する計画問題は産業応用上極めて重要である。しかしながら実用規模の問題に対して最適解を求めるアルゴリズムが存在しないことが知られている。近年，効率的に実用的な求解が可能な方式として注目されているメタ戦略の適用⁵⁾など，システム技術面での新たな取り組みが進みつつあるが，歩留

生産性，作業性など多目的指標の最適化については依然課題を残している。

3.2 定式化

厚板圧延ロット編成問題の評価関数は多岐にわたる。ここでは歩留を最重要な評価関数とし，副次的な評価関数として，生産性，作業性，納期管理の三つの指標を取りあげる。これら四つの評価関数および制約条件の定式化を行う。

3.2.1 評価関数

各評価関数の挙動比較を行いやすくするため，以下のよう
に [0, 1] 区間で定義される評価関数を考える。

(1) 歩留

歩留は製造コストに直結する最重要な評価関数であり，製造重量に対する製品重量の比で表される。大板に含まれる小板群の製品厚は同一であるから，重量を面積に置き換え，歩留評価関数を以下のように設定する。

$$\text{Maximize} \left[\frac{\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^{m_j} a_{ji}}{\sum_{j=1}^n L_j B_j} \right] \dots\dots\dots (1)$$

- a_{ji} : 大板 j に編成された小板 i の面積
- m_j : 大板 j に編成された小板枚数
- n : 編成された全大板枚数
- $L_j B_j$: 大板 j の面積 (長さ×幅)

(2) 生産性

圧延作業は大板単位に行われるため，設備制約や運用制約の下で大板重量を最大化することが生産性向上に寄与する。歩留と同じく重量を面積に置き換え，次式で生産性評価関数を定義する。

$$\text{Maximize} \left[\frac{\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^{m_j} a_{ji}}{(n \cdot A_{\max})} \right] \dots\dots\dots (2)$$

- A_{\max} : 設備制約で定まる大板面積上限 (=重量上限)

(3) 作業性

需要家の同一仕様小板からなるオーダは複数枚を含む場合がある。同一オーダの複数枚の小板を可能な限り同じ大板に編成し，圧延後出荷まで一括して運搬することにより作業性を向上させ，ハンドリングコストを削減する。作業性評価関数を次式に示す。

$$\text{Maximize} \left[\frac{\sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^{s_j} (d_{jk} \cdot O_{jk})^2}{(n \cdot A_{\max})^2} \right] \dots\dots\dots (3)$$

- d_{jk} : 大板 j に含まれるオーダ k の小板1枚の面積
- s_j : 大板 j に含まれるオーダの数
- O_{jk} : 大板 j に編成された同一オーダ k の小板枚数

(4) 納期管理

納期が迫っている小板は制約に近い形でロット編成時に

組み込む必要が生じる。その結果、編成の組み合わせ自由度が減り、歩留や生産性、作業性などの評価関数を悪化させる可能性がある。そこで設計の自由度を確保するため、納期余裕のより小さい小板を優先的に製造する。納期管理指標を最大化指標として表現するため、未来の基準時刻と各小板の納期との差分を各々の納期緊急度と定義し、次式を評価指標とする。

$$\text{Maximize } \left[\frac{\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^{m_j} a_{ji} \cdot \Delta D_{ji}}{\sum D_N} \right] \dots\dots\dots (4)$$

ΔD_{ji} : 大板 j 内に編成された小板 i の納期緊急度
 $= \max(\text{緊急度基準時間} - D_{ji}, Cd)$

Cd : 緊急度基準値 (非負定数)

$\sum D_N$: 計画対象小板の (納期緊急度 * 面積) 総和

3.2.2 制約条件

以下の制約条件を与える。

(1) 製造設備制約

大板寸法および面積上下限の範囲で大板を編成する。

(2) 加工設備制約

大板内の小板配置は幅方向最大2列まで可能とする。

(3) 緊急オーダー納期制約

予め指定された緊急オーダー材は必ず編成する。

3.3 自律分散型計画システムの構成

本問題解法における自律分散モジュールとして、二次的な三つの評価関数である生産性、作業性、納期管理を設定した。歩留については、どのモジュールも自分の評価関数と同時に考慮するように設計した。

4. アルゴリズム

自律分散型生産計画システムの動作について詳述する。

4.1 初期計画作成 (STEP 1)

各モジュールは以下のように実行可能な初期計画を生成する。

(1) 編成権に応じて各計画モジュールの作成大板枚数を決定する。

(2) 各モジュールは順番に(3)、(4)の処理を行い大板1枚分の初期解を作成する。設定した大板枚数に到達するまで、順次繰り返す。

(3) 各モジュールの評価関数に関連する指標をベースにオーダー群をソートする。例えば、生産性モジュールでは歩留を維持しつつできるだけ面積の大きい大板を作成できるよう、小板データを幅、長さ、オーダー枚数の降順にソートする。最も優先度の高いオーダーを大板の核として選択する。

(4) 核となるオーダーの小板に続けて幅属性の近いオーダー群の小板を長さ方向に順次接続する。大板寸法制約、大

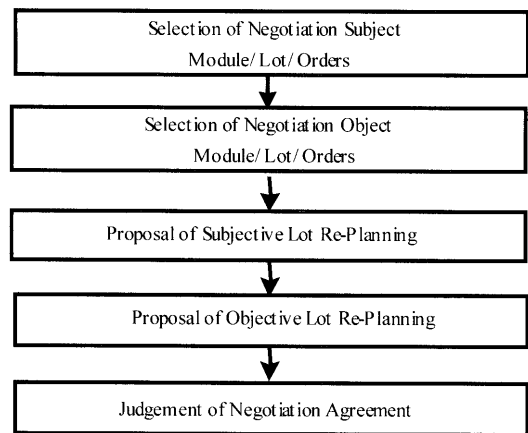


Fig. 5. Negotiation flow.

板重量制約および幅方向の上限列数の範囲内で大板を編成する。

4.2 交渉による計画改善 (STEP 2)

モジュール間の交渉によって、解の改善を図る。モジュール間の交渉は、以下の手順(Fig. 5)による。

(1) 交渉主体モジュール選択

まず、交渉主体モジュールおよび対象大板を選択する。モジュールは、編成権によって決められた大板枚数の比率に比例する確率で選択される。また対象とする大板は、そのモジュールの評価関数値の逆数に比例する確率で選択される。したがって編成権が大きいほど、また評価関数値が悪いほど、当該大板が選択されやすい。

(2) 交渉相手モジュール選択

同様にして、交渉相手モジュールおよび対象の大板を選択する。

(3) 計画改善案提案

交渉主体モジュールは、対象とした大板について小板の一部を組替え、当該評価関数を向上させる計画改善案を作成する。交渉相手の大板に属する小板および未編成の小板群が組替候補の探索対象となる。

(4) 交渉相手への影響評価

交渉主体の大板が交渉相手の大板内の小板を取り込んで計画改善案を作成する場合は、交渉相手の大板に欠損が生じる。大板の組替が必要になるので、交渉相手モジュールは当該評価関数を向上させる計画改善案を作成する。交渉相手の大板から放出された小板および未編成の小板群が組替候補の探索対象となる。

(5) 交渉判定

以下の基準により交渉判定を行い、交渉が成立した場合に解の更新を行う。

- ・ 交渉主体モジュールの評価関数が向上
 - ・ 全体評価関数 (歩留) の悪化が所定値 α 以内
 - ・ 交渉相手モジュールの評価関数悪化が所定値 β 以内
- ただし、 $\alpha, \beta (\geq 0)$ は交渉回数と共に減少させる。

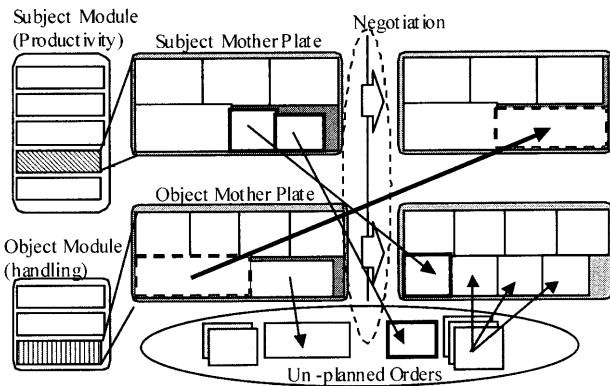


Fig. 6. Example of one negotiation.

(6) 終了判定

所定回数の交渉の経過をもって処理を終了する。

交渉例を Fig. 6 に示す。本例では確率に従い交渉主体モジュールとして生産性モジュールが、交渉相手モジュールには作業性モジュールが選択されている。生産性モジュールには5枚の大板編成権を有しており、改善対象として4枚目の大板が選択されている。同様に、交渉相手モジュールには作業性モジュールが選択され、同モジュールの大板3枚のうち3枚目が選択されている。

続いて交渉主体モジュールによる改善案で大板から2枚の小板が放出され、代わりに交渉相手モジュールの大板から1枚の小板が取り込まれる。交渉相手モジュールは自分の大板から1枚の小板が取り去られたので、組替を行う。交渉主体モジュールの大板から放出された小板のうち1枚と同じオーダを含む未組込の小板3枚を取り込んで大板を組替え、作業性を向上させる改善案を作成している。

5. 数値シミュレーション

以下に実データを用いた計算例を示す。計画対象となるオーダ数は186、小板数は681である。Fig. 7に小板の納期分布を示す。納期余裕の小さい方から39枚の小板を緊急オーダ材と定義し、必ずロット編成対象として組み込むことにした。交渉による解の改善の際も、計画主体大板の緊急オーダ材は未編成小板群に放出することが許容されず、計画相手大板が再編成にて取り込んだ上で、交渉の判定を行っている。

ここでは合計20枚の大板を編成する。その際、各モジュールの編成権を、生産性10枚、作業性6枚、納期管理4枚と設定した。

プログラム言語にはc言語を用いた。Fig. 8は交渉モニタの画面例である。各画面はモジュール間交渉の状態(左上)、モジュール内大板の状態(左下)、各評価関数の推移(右上)、交渉に関与する大板の2次元配置(右下)を表す。

計算時間はCPU900MHzのPC-AT互換機で400回交渉を

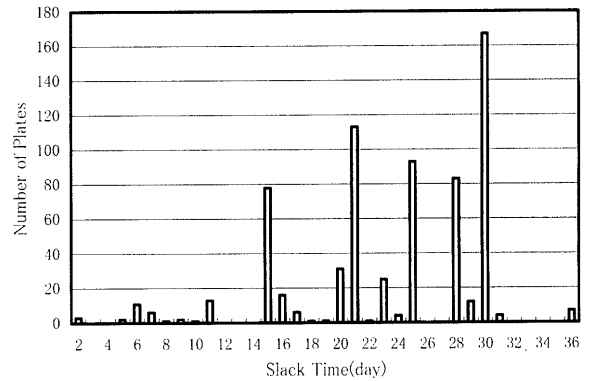


Fig. 7. Due-date histogram for the numerical experiment.

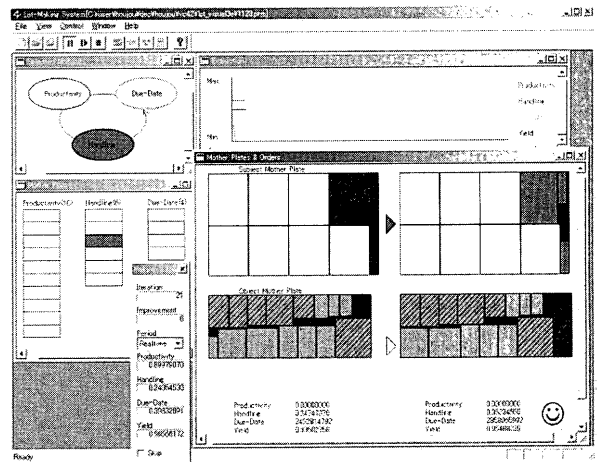


Fig. 8. Example of negotiation monitoring display.

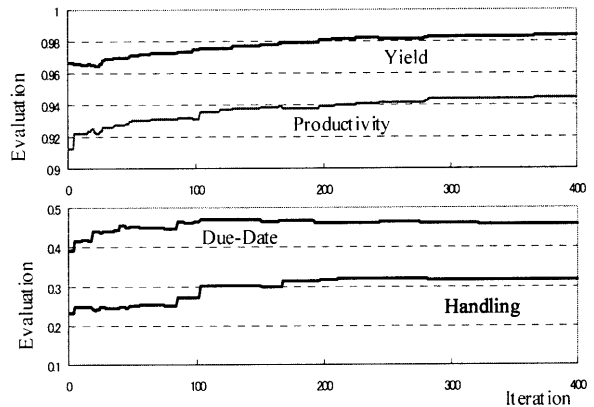


Fig. 9. Improvement by iterative negotiation.

繰り返して約10sである。

Fig. 9に全大板に関する各評価関数平均値の推移を示す。各評価関数が全体として向上している様子が示されている。ただし個別の交渉で交渉相手の評価関数と歩留に対しては多少の悪化を許容しているため、一時的に評価関数が悪化することがあるが全体的な挙動に悪影響は及ぼしていない。

Fig.10に編成権調整によるロット編成結果の変化を示す。Fig. 9の計算で設定した基準状態に対し、生産性モジュールの編成権は一定(10)に保ったまま、作業性モジュールと納期管理モジュールの有する残り10枚のロッ

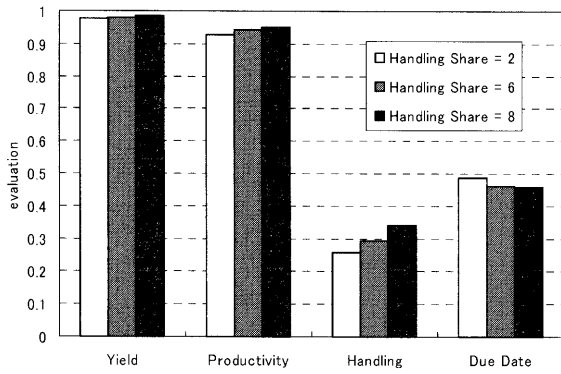


Fig. 10. Influence of 'SHARE' change.

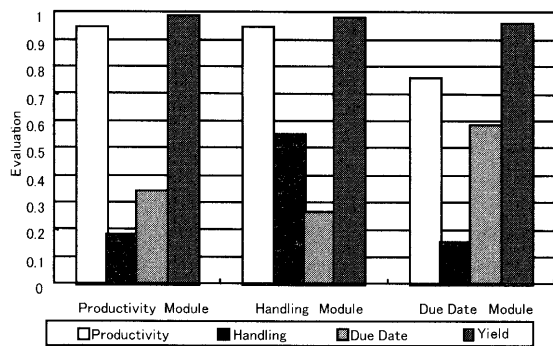


Fig. 11. Objective function values of each module.

ト編成権配分を2:8, 6:4, 8:2に変更してシミュレーションを行った。

作業性モジュールと納期管理モジュールの評価関数がトレードオフ関係で変化し、大きな編成権を得たモジュールの評価関数が相対的に向上している。編成権が多目的計画における調整手段として有効であることを示唆している。

Fig.11はモジュール別に、編成権を有するロットの計算終了時の評価関数平均値を集計したものである。生産性モジュールに含まれる大板群は他と比較して生産性評価関数が高い。作業性、納期管理の評価関数に関しても同様の傾向がある。すなわち、モジュール間の交渉を経た後も、各モジュールに含まれる大板群は当該評価関数が高く、モジュールの主張（個性）が明確に反映された計画となっていることがわかる。

6. 考察

本稿で提示した多目的計画問題への自律分散型手法適用では、編成権という計画担当者にとって明確かつ調整の容易な交渉力尺度を導入した。

各モジュールが独立して処理を行うので、それぞれの評価関数に適した計画アルゴリズムを実装可能である。かつて多くのエキスパートシステムで問題となったように、単一の計画アルゴリズムに集約しようとする硬直的かつ過度に複雑なシステムとなりがちである。本方式により、担当者のノウハウや個別のロジックが無理なく適用可能とな

る。

数値シミュレーション例でも各モジュールには別個のアルゴリズムを組み込んだ。生産性・納期性モジュールは同時交換する小板枚数を2枚に制限する代わりに、可能な組み合わせを全探索している。また作業性モジュールは選択した小板と同一のオーダに含まれる全小板とオーダ内小板枚数が1枚の小板すべてを改善対象とすることで組み合わせ試行回数を制限している。ただし初期解がある程度の解の質を備えており、一部の小板を交換する局所改善によって解の改善が可能であるという前提に基づいている。

計画改善のための交渉では、局所的な探索に基づき逆提案のないシンプルな交渉手続きを採用することにより、計算負荷の小さい処理を実現した。評価指標その際、交渉主体以外の評価関数についてある程度までの悪化を許容する交渉とすることで、局所最適解に陥らぬようにしている。交渉主体と交渉相手は一定の確率で入れ替わるため、その折りに逆提案が処理されると考えられる。

以上のような特徴を備えることにより、重み付き線形法等の従来の多目的計画手法では実現が困難であった多様性を有する解の実現が可能となった。ここで云う多様性とは、各評価指標として表される数値指標だけでなく、その背景にある計画ロジックへの柔軟な対応といった側面も意味する。

今後本方式の応用を拡大していく上で以下の可能性、課題がある。

(1) 既存手法との比較

従来の多目的計画方式が主として評価関数を工夫することで解を選別していたのに対し、提案方式は解生成のプロセスにまで踏み込んだことが特徴であるといえる。

このため従来方式と比較してプログラム設計やメンテナンス負荷が大きくなる可能性がある。その負荷は、メタヒューリスティクスにおいて複数の探索近傍を切り替えてつ解の改善を行う可変近傍探索法と同等程度である。

多目的最適化問題の解のよさ（品質）についてはこれを正しく評価すること自体が難題であり、一概に既存手法と解の品質比較を行うことは難しい。

(2) 評価関数の変更

自律分散システムの利点として、各モジュールが独立したプログラムから構成されている。問題の枠組みが変化して評価関数の追加が必要となる場合も、編成権の再調整を行うだけで大きなシステム変更を必要とせずに対応可能である。例題では計画モジュールが単独の評価関数を代表するように設定したが、トレードオフ関係が比較的弱い複数の評価関数をまとめて一つの計画モジュールとして設計することも可能である。また、例題で取りあげた歩留評価関数のように、複数の計画モジュールが共通の評価関数を改善するような機能を持たせることもできる。

(3) 並列計算処理

計算例ではプログラムを1台のCPUに実装しているが、問題の分割により複数CPUでも実装可能である。よってさらに大規模な問題でも並列処理によって実行可能な計算時間で取り扱える可能性がある。

7. まとめ

生産計画問題は常に多目的問題である。複数の評価指標を計画全体に関わる支配的な評価指標とその他の副次的な評価指標に類別し、各ローカル評価指標を代表する計画モデル間の「交渉」を通じて、トレードオフ関係にある目的関数群の評価を互いに向上させる自律分散アプローチを提案した。

本方式を鉄鋼業における代表的な多目的計画問題である

ロット編成へ適用した。具体例として厚板圧延ロット編成問題における計画モデルを試作した。実データを用いた数値シミュレーションを行い、適用手法が有効に機能することを確認した。

なお、本研究はナショナルプロIMS国際共同研究プログラムのNGMSプロジェクトにより推進されたものである。

文 献

- 1) 西川 禎一, 三宮信夫, 茨木俊秀: 最適化, 岩波書店, 東京, (1982).
- 2) H.Tamaki, M.Mori and M.Araki: *Trans. Soc. Instrum. Control Eng.*, **31** (1995), 1185.
- 3) S.Hasebe, S.Taniguchi, T.Nishi and I.Hashimoto: Proc. AIChE Annual Meeting, AIChE, New York, (1996), 10.
- 4) H.Iima, R.Kudo, N.Sannomiya and Y.Kobayashi: *J. Intelligent Manuf.*, **10** (1999), 161.
- 5) K.Matsuda, Y.Takai, K.Yoshida, M.Nishimura, M.Matsuyama and Y.Sawada: *Trans. Soc. Instrum. Control Eng.*, **31** (1995), 544.