生産ラインへの車両投入順序決定問題に対する解法の研究

佐藤　真悟　（沼田　一道　准教授）

１，はじめに

本研究では自動車工場における車両投入順序決定問題を扱う．自動車工場にはその日に生産するべき車の台数，各車の色，オプションの有無等を指示する指令が届く．この指令は各地の営業所から上がってきた注文を基に，当該工場においてその日に生産する車を示したものである．これらを同時に作ることはできないので，順番に作ることになる．自動車工場は一般に車体工場，塗装工場，艤装工場の三つの工場から成る．これら三つの工場は独立しているが，各工場間をベルトコンベアでつないで生産途中の車両を搬送するので，各工場での車両投入順序は同一のものとなる．一方，各工程における"望ましい車両処理順序"の尺度は異なるので，それぞれの工程における要望を考慮しつつ全体に共通のライン投入順序を決定する必要がある．

２，研究背景と目的

自動車会社ルノーは「ROADEF Challenge 2005」というタイトルで、より良い投入順序を求める問題へのアプローチを募っている．対象としているのは，塗装工場でのコストと艤装工場での作業条件を考慮して投入順序を決定する問題である．本研究ではこの問題を車両投入順序決定問題と呼び，この問題に対する新たなアプローチを検討する．

塗装工場ではペイント溶剤の使用量を少なくしたいという要請がある．ペイント溶剤とは，ノズルを洗浄する際に使用される薬品である．ペイント溶剤は，①車に塗る色が変わる場合，②同じ色が並んでいても，一定数(Batch size limit)を超えて連続して塗装する場合に使用される．塗装工場からの要請は「色の変化数をできるだけ少なくして欲しい」である．次に，艤装工場では組立ラインにかかる負担の偏りをなくしたいという要請がある．これは，手間のかかる組立作業が必要な車（難車）が続くと疲労が蓄積し, 作業効率が下がってしまうためである．この要請は, 比率制限 N/P によって定められる. 比率制限 N/P とは, P 台の車の並びにおいて，難車が N 台までならば許されるということを意味する．艤装工場からの要請は「難車をできるだけ均等に間を空けて投入して欲しい」である．

色の変化数を少なくするだけ，もしくは比率制限に対する違反数を少なくするだけの問題は簡単に解くことができる．しかし，この二つの目的を同時に扱うと，解くのが困難な問題となる．ROADEF Challenge 2005 に向けた研究は数多く行われているが，色を優先する，もしくは制限への違反数を優先するというアプローチが多く，両方の要請を同時に扱うことについては十分な研究が行われていない．よって，本研究では二目的を同時に扱える新しいアプローチを提案する．

３，問題

一日に 400～1000 台の生産を行う規模の工場を想定する. 会社本部は生産すべき車の種類と数，車の識別番号，色，オプションの有無を指示する．Batch size limit は本部の指令にはなく，工場側が決めている．指令を受け，工場ではコストや作業効率を考え，生産ラインに車両を投入する順番を決めていく．本研究では，このコストと作業効率を考えるために，色の変化

数と N/P 違反量という２つの指標を用いる．色の変化数とは，生産ラインにおける車の並びにおいて，色の変化した数と同じ色の並びが Batch size limit を超えた数の合計値である．N/P 違反量とは，各 P 台の並びにおける「N 台を超える難車台数」をすべての P 台の並びについて合計したものである．

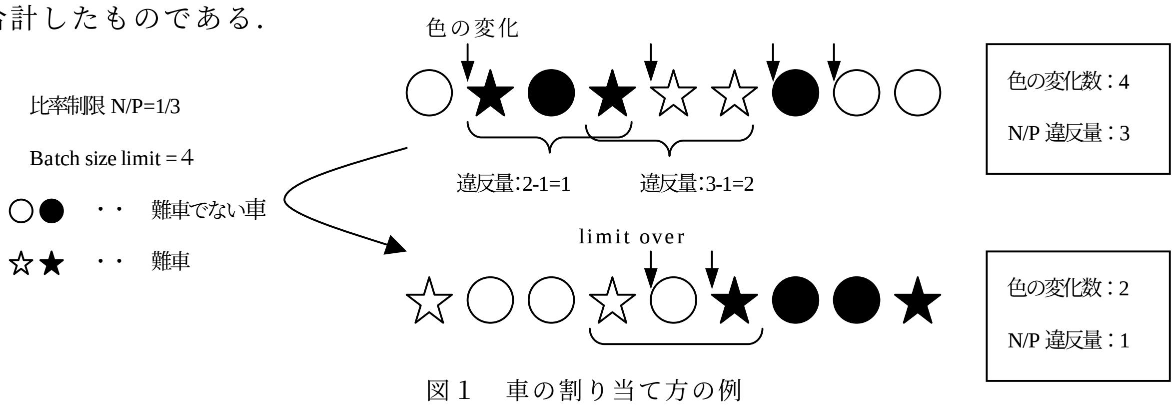

図１　車の割り当て方の例

４，提案するアプローチ

各色について同色の車を一定数以下の並びにまとめたものをブロックと呼ぶ．ブロックの並びで決まる生産台数分の色の並びを固定して，各色の指定台数分の難車を N/P 違反量が最小となるように割り当てる．色ブロックの並べ方を固定して N/P 違反量を計算し，それが最小になるブロックの並べ方および難車の割り当てを求める．さらに，ブロックサイズ g を Batch size limit(G)から 1 まで変化させて，N/P 違反量と，そのときの色の変化数を調べる．g を小さくしていくと，色に関しては妥協し，N/P 違反量を重視するようになる．$g=G$ のとき，色ブロックをどのように並べても色の変化数に関しては最適であるが，N/P 違反量減少に関する自由度は小さい．g を変化させ，２つの指標の兼ね合いを見ながら投入順序を決定する．

５，定式化

生産する車の数を T, 色の種類数を C, Batch size limit を G, 難車の比率制限を N/P ($N<P$), 色 i の車の台数を Q_i ($i=1\ldots C$), 色 i の難車の台数を R_i として車両投入順序決定問題を定式化する．ブロックサイズを g とするとき，色 i のブロック数は $\left\lceil \frac{Q_i}{g} \right\rceil \quad (g=1\ldots G)$，ブロックの総数は

$L(g)=\sum_i \left\lceil \frac{Q_i}{g} \right\rceil$ となる．ここで，全色全ブロックの並び $B_1 \ldots B_{L(g)}$ を考える．また，$1\ldots L(g)$ の数字を並べてできる順列全体の集合を $S_{L(g)}$，その１つの要素($1\ldots L(g)$ の順列)を σ で表す．全色全ブロックを $B_{\sigma(1)}, B_{\sigma(2)}, \ldots, B_{\sigma(L(g))}$ の順に並べたときの個別の車の位置と色の関係を α_{ij}^{σ} で表す．

$$\alpha_{ij}^{\sigma} = \begin{cases} 1 & \text{列の}j\text{番目の色が}i\text{である} \\ 0 & \text{そうでない} \end{cases} \quad (i=1\ldots C;\ j=1\ldots T). \quad \sigma \in S_{L(g)}$$

また，そのときの難車割付に関する決定変数として次の２つを用いる．

$$x_j = \begin{cases} 1 & j\text{番目の車を難車とする} \\ 0 & \text{そうしない} \end{cases} \qquad (j=1\ldots T)$$

y_t ：t から始まる長さ P の並びにおける N/P に対する違反量　　($t=1\ldots T-P+1$)

ブロックの並びを σ としたときの最小 N/P 違反量 $F(\sigma)$ は以下で与えられる．

$$F(\sigma) = \underset{x\quad y}{\text{minimum}} \sum_{t=1}^{T-P+1} y_t \qquad (1)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{j=1}^{T} \alpha_{ij}^{\sigma} x_j = R_i \quad (i = 1 \ldots C) \qquad (2)$$

$$\sum_{k=0}^{P-1} x_{t+k} - N \le y_t \quad (t = 1 \ldots T) \qquad (3)$$

$$x_j \in \{0,1\},\ y_t \in \{0,1,\ldots,P-1\} \qquad (4)$$

(1)式は σ の並びでブロックを並べた場合の最小違反量を示している．制約式(2)は，各色の車において定められた難車の台数を必ず割り振らなければならないことを示し，(3)式は t 番目から始まる P 台の並びでの N/P 違反量を与えるものである．

全体としての目標は，

$$\underset{\sigma \in S_{L(g)}}{\text{minimize}} \quad F(\sigma)$$

であり，σ を $S_{L(g)}$ の中で変化させ，最小の違反量を与えるブロックの並び (σ) を求める．ブロックの並び (σ) が決まると，同時に色の変化数も決まる．以上の計算を，$g=1,2,\ldots,G$ について行い，色変化数と N/P 違反量の変化をみる．

６，解法

提案する解法は，以下の３手続きから成る．

手続き 1：与えられた色ブロック並び（構成数 g）σ に対して，$F(\sigma)$ を発見的解法により計算する．探索の際の近傍としては，難車と難車でない車を入れ替える反転近傍を用いる．可能なすべての同色ペアを反転させ，その中で違反量が最小となるものへ難車割当てを変化させ，これを違反量の改善が起きなくなるまで繰り返す．

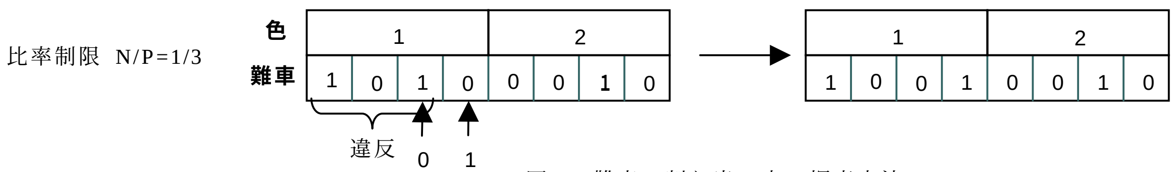

図 2　難車の割り当て方の探索方法

手続き 2：ブロックの並びを，２つの要素の位置を交換する交換近傍を用いて入れ替え，入れ替えるたびに N/P 違反量が最小になるものを求める．ブロックの並びごとの複数の最小 N/P 違反量が求まるので，その中で最小なものを求める．これが，このブロック構成数での最小 N/P 違反量となる．

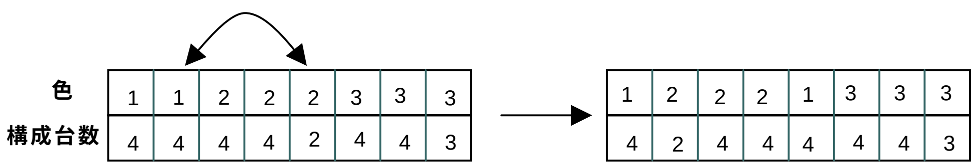

図 3 ブロックの入れ替え方法

手続き 3：ブロックの構成数 g を $1\ldots G$ の範囲で変化させながら，手続き 1，2 を行う．

以上を実行すると，ブロックの構成数によって複数の解が得られる．出てきた解の色の変化数と N/P 違反量の兼ね合いを見て最終的な解を決定する．

７，計算結果と考察

前節で示した解法をBorland社のDelphi6を用いて実装し，実験を行った．データは，生産台数が409台で，各色の台数とそのうちの難車の台数は表１のように与えた．

表1　用いたデータ

	車の台数	難車台数
色 1	37	28
色 2	53	12
色 3	52	43
色 4	63	35
色 5	88	9
色 6	116	59

表2　gによる色の変化数と N/P 違反量

	色の変化数	N/P 違反量
初期	116	265
g=1	46	219
g=2	46	218
g=3	46	217
g=4	45	219
g=5	44	218
g=6	45	217
g=7	44	218
g=8	43	218
g=9	43	218
g=10	43	217

表2はこのデータに対する計算結果である．予備実験を行って様々なデータを試したが，難車の数が少ない場合には，g=Batch size limit としても N/P 違反量が最良になってしまうなど，データによって問題の様相が大きく変わることがわかった．そこで，実験では難車台数が色ごとに偏ったデータを用いた．表2は，g が減少すると色の変化数が増加することを示しているが，N/P 違反量は多少変化するだけでほとんど変わらない．この理由としては，手続き1で用いた反転近傍の大きさが十分でなく，得られる $F(\sigma)$ の精度が低いことが予想される．反転近傍では１つの要素を交換するだけなので，複数の要素を同時に移動させることで求められる解にたどり着けなかったのではないかと考えられる．

８，まとめと今後の課題

本研究では，車を色ごとにブロックとしてまとめること，そのブロックの構成数を変化させることで色の変化数と N/P に対する違反量の両方を同時に考慮する解法を試みた．複数の解を得た後で，どの解が望ましいのか決めるのは難しいが，投入順序を選択肢が増えた中から選ぶことができるので一定の意味のあると思われる．

今回の研究では，最小 N/P 違反量を求める際に反転近傍と交換近傍を用いたが，思った結果が得られなかった．１要素を扱う近傍探索でなく，複数要素を扱える探索で，本アプローチを試す必要がある．また，現実には手間のかかる組立作業は何種類もあるはずなので，それを区別することでより現実に即した問題を扱う必要もあるが，これらは今後の課題である．

参考文献

[1]ROADEF Challenge 2005: http://www.prism.uvsq.fr/~vdc/ROADEF/CHALLENGES/2005/challenge2005_en.html （**最終閲覧日** 2008/9/26）

[2]**自動車工場の概況**http://www1.harenet.ne.jp/~noriaki/link61.html#p|1 (**最終閲覧日** 2008/12/22)

[3] Thierry Benoist:“Soft car sequencing with colors: Lower bounds and optimality proofs”, *European Journal of Operational Research*, Vol.191, pp.957-971 (2008)

[4]**呼格吉勒・平木秀作**(2007):**最終組立ライン上の投入順序決定に関する比較研究,** **http://www.ob.shudo-u.ac.jp/jimuhp/souken/web/magazine/pdf/ec/kei11-2PDF/kei11-2-5fugujiru.pdf** **(最終閲覧日 2009/1/7)**