論文・事例研究

鉄鋼製造プロセスにおける トライ選択問題への多目的計画法の応用

上野信行*，中川義之*，徳山博于**，中山弘隆***，田村坦之****

1. はじめに

鉄鋼生産においては，ユーザーからの注文にもとづき，冶金上の所定の性質をもつ中間素材を製造する製鋼工程は非常に重要なプロセスである．この製鋼工程の生産管理においては，注文の構成や同一製造スペック（化学成分等）をもつオーダー重量等が毎週，あるいは毎日変化するという状況下にもかかわらず，品質・生産性・納期等の多数の要因を考慮した適正な生産計画を立案する必要がある．

すなわち，品質と生産性の観点からは，同一製造スペックをもつ製鋼工程における最小単位（以下，チャージという）集めた同一性質のチャージの集合（以下，トライという）をできるだけ連続して製造（鋳込みという）することが望ましい．

また，ユーザーサービスの観点からは，緊急品を含む短納期オーダーをできるだけ多く，かつタイミング良く鋳込むことが望ましい．

本論文においては，このような製鋼工程における生産計画問題をトライ選択問題と定義する．すなわち，

トライ選択問題とは，「多数のトライ候補群の中から，所定期間の生産計画を立てるにさいし，品質・生産性・納期の各評価指標をより適正にするようなトライ候補を選択する」ことである．

これは，数理計画的にみれば，多目的意思決定問題といえ，従来よりいくつかの解法が提案されている．たとえば，ゴールプログラミング法［1］［5］［9］は，複数個の目標関数を重み付け結合し，単一目標関数問題に変換するものであるが，各目標関数の重み係数の調整が非常に困難である．一方，希求水準あるいは効用関数の考え方にもとづく手法もいくつか提唱されている［10］［11］［12］．とりわけ，DIDASS[2]による希求水準の考え方にもとづく対話型満足化法や満足化トレードオフ法［6］［7］［8］は，意思決定者が希求水準のみを設定するだけで良く，評価が容易でしかも迅速に解を得ることができる．

本論文では，上記のトライ選択問題に満足化トレードオフ法を適用した結果を報告する．まず，①トライ選択問題を複数の非線形目標関数をもつ０－１整数計画問題として定式化し，本問題が基本的には組合せ問題であると認識して，次に，②問題の特徴を利用して変換を行なった上で，内部径路法を活用したMin-Max法と満足化トレードオフ法とを組み合せた実用的解法を提案する．また，③その適用結果を示し，最後に，④本方法の有効性について述べる．

2. トライ選択問題

製鋼工程においては，図1に示すごとく，①まず，転炉というバッチ型プロセスによって冶金上の所定性質をもつ溶鋼を一定量製造し，②次に連続鋳造機によって，溶鋼からスラブという中間素材がつくられ，③最終的に圧延工場にて製品（たとえば，薄板コイル，厚板）がつくられる．

一方，鉄鋼業は，受注生産形態であり，顧客からの注文スペック（サイズ，鋼種，規格，納期等）がオーダー毎に異なっており，これらのオーダーをバッチ型プロセスの容量にマッチするように製造ロット集約する必要が

* 住友金属工業㈱　システムエンジニアリング事業本部 数理解析室
〒541 大阪市中央区北浜４－８－４　住友ビル４号館
**住友金属工業㈱　システムエンジニアリング事業本部 和歌山システム部
*** 甲南大学　理学部　応用数学科
****大阪大学　工学部　精密工学科

© 日本オペレーションズ・リサーチ学会．無断複写・複製・転載を禁ず．

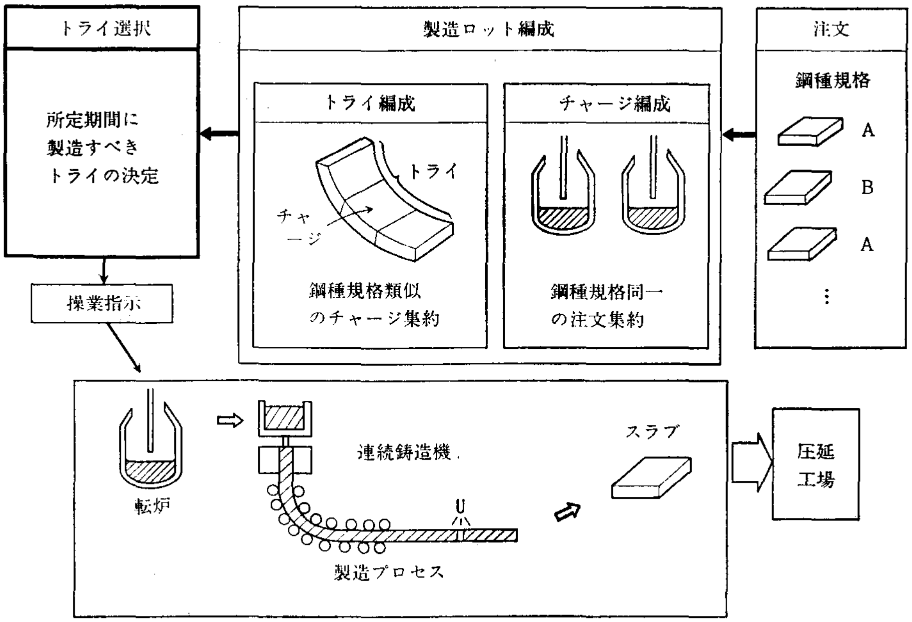

図 1　トライ選択問題

ある．製鋼工程において1バッチに相当する単位がチャージであり，このような鋼種，規格同一の注文集約をチャージ編成と呼んでいる．1チャージにはオーダー分と非オーダー分が混在する場合があり，全体に対するオーダー分の比率を「オーダー率」と定義しており，製造コスト面からは高オーダー率のチャージを鋳込むことが非常に重要である．

鋼種，規格類似のチャージの集約をトライといい，この計画をトライ編成と呼んでいる．品質・生産性の面からは，1トライを構成するチャージ数（以下，連々指数という）が大きいほど良好となる．したがって，製鋼工程の生産管理面において重要な指標はオーダー率，連々指数，納期であるといえる．そこで，トライ選択問題とは，「すでに編成されている多数のトライ候補群の中から所定生産期間に生産するトライを選定するにさいし，オーダー率，連々指数，納期の複数指標をより適正にする決定をすること」と定義できる．

以下，本問題の定式化，解法について述べる．

3.　トライ選択問題の定式化

製造ロット編成においては，同一スペックをもつ受注オーダーがチャージに集約され，次に同一あるいは類似の製造スペックをもつ複数個のチャージがトライにまとめられる．したがって第 i トライは，下記属性をもつことになる．

C_i　＝第 i トライに含まれるチャージ数

$W_i{}^S$＝第 i トライの重量

$W_i{}^O$＝第 i トライ中のオーダー重量

$W_i{}^Y$＝第 i トライ中の非オーダー重量$(=W_i{}^S-W_i{}^O)$

$W_i{}^K$＝第 i トライ中の緊急オーダー重量

a_i　＝第 i トライの鋳込み緊急度

H_i（あるいは，R_i, S_i, T_i, F_i）＝第 i トライ中において特殊スペック $H, (R, S, T, F)$ をもつチャージ数

最後の記号 H_i（あるいは $R_i, \cdots$）は，製鋼工程における品質高級化のための特別作業をすべきチャージの数を表現している．

3.1　目標関数

第 i トライの選択に関して0－1整数変数

$$Z_i\begin{cases}=1 \text{（第}\,i\,\text{トライを選択した場合）}\\ =0 \text{（第}\,i\,\text{トライを選択しない場合）}\end{cases}$$

を導入すると，本問題の目標関数は次のようになる．

①トータルオーダー率　$f_1(Z)$：

(1)　$\sum W_i{}^O\cdot Z_i/\sum W_i{}^S\cdot Z_i\to\mathrm{Max}$

②トータル緊急オーダー採用率　$f_2(Z)$：

(2)　$\sum a_i\cdot W_i{}^K\cdot Z_i/\sum W_i{}^S\cdot Z_i\to\mathrm{Max}$

③トータル連々指数　$f_3(Z)$：

(3)　$\sum C_i\cdot Z_i/\sum Z_i\to\mathrm{Max}$

ここで，

(1)式の意味は，選択されたトライ全体の重量に対するオーダー重量の比率を表わしており，この比率は，材料

© 日本オペレーションズ・リサーチ学会．無断複写・複製・転載を禁ず．

の有効利用度合いを表わすものである．これを高めることは非オーダー（余剰）の減少，コストダウンを意味する．

(2)式の意味は，選択されたトライ全体重量のうち緊急度の高いオーダーの重みつきの採用率を表わしており，この比率を高めることは納期サービス度合いを向上させることを表わす．

(3)式の意味は，選択されたトライ全体のうち，1トライ当りの平均チャージ数を表わしており，この値を高めることは，連続して（段取替えなしで）製造できる度合いが大きくなり，生産性（稼動率）向上，品質向上につながる．

3.2 制約条件

本問題での制約条件を，以下に示す．

①所定期間内の鋳込みチャージ数条件：

(4) $|\sum C_i \cdot Z_i - C| \leqq \varepsilon$

ここで，$C(>0)$ は所定期間内に鋳込むべき目標チャージ数であり，$\varepsilon(\geqq 0)$ はCの許容幅である．

②所定期間内での特殊スペック鋳込みチャージ数条件：

$$
(5)\begin{cases} HH_1 \leqq \sum H_i \cdot Z_i \leqq HH_u \\ RR_1 \leqq \sum R_i \cdot Z_i \leqq RR_u \\ SS_1 \leqq \sum S_i \cdot Z_i \leqq SS_u \\ TT_1 \leqq \sum T_i \cdot Z_i \leqq TT_u \\ FF_1 \leqq \sum F_i \cdot Z_i \leqq FF_u \end{cases}
$$

なお，添字のu，1は所定期間内に鋳込み可能な特殊製造スペックのチャージ数の上・下限を示す．この制約は特殊スペックの製造能力に起因するものである．

なお，ここで本問題の規模としては，対象となるトライ数約150，制約式約15である．

4. 解法の基本的考え方

トライ選択問題は，次の特徴をもつ．

①目標関数が非線形（分数型）である

②0－1整数変数が多数存在する

そこで，本問題を実用的な時間内で効率的に解くために，

①問題の特徴を利用し，非線形の目標関数を線形目標関数へ変換する．

②多目的意思決定法については，満足化トレードオフ法をベースに，Min-Max 問題を作成する．この結果，原問題の0－1変数多目的整数計画問題は混合整数計画問題となり，解法としては内部径路法を基本的骨子とする新解法を開発した．

5. 解　　法

5.1 目標関数の線形化

本問題は分数型の目標関数をもつが，問題の特徴を利用することにより，これらの目標関数は線形関数に変換できる．

(a)トータルオーダー率（$f_1(Z)$）について

1チャージ当りの重量をL（定数）として，第iトライの重量（$W_i{}^S$）は（チャージ数(C_i)）×Lに等しいから，(4)式より，

$|\sum W_i{}^S \cdot Z_i - LC| \leqq L\varepsilon$

$L\varepsilon$ は微小であるから，

(6) $\sum W_i{}^S \cdot Z_i \approx LC$（定数）

となり，(1)式の分母は定数と近似でき，次のように変換される．

(7) $f_1(Z) = \sum W_i{}^O \cdot Z_i \rightarrow \mathrm{Max}$

(b)トータル緊急オーダー採用率（$f_2(Z)$）

(2)も，(6)式が成り立つため，次式のように変換される．

(8) $f_2(Z) = \sum a_i \cdot W_i{}^K \cdot Z_i \rightarrow \mathrm{Max}$

(c)トータル連々指数（$f_3(Z)$）

選択されたトライに含まれるチャージ総数は，指定されているチャージ数の目標値Cにほぼ等しいので，次の式が成り立つ．

(9) $\sum C_i \cdot Z_i \fallingdotseq C$

したがって，(3)式は，次のように変換される．

(10) $f_3(Z) = \sum Z_i \rightarrow \mathrm{Min}$

5.2 満足化トレードオフ法の適用

前節5.1における3つの目標関数式の線形化により本問題は，線形の0－1整数計画問題として定式化される．この多目的0－1整数計画問題を効率的に解くため，満足化トレードオフ法を用いた下記6ステップからなる解法を開発した．

〈ステップ1〉 理想点の設定

各目標関数の理想的な値を，理想点 $f_j{}^*(j=1,2,3)$ として設定する．ここで $f_j{}^*$ は，

$f_1{}^* = \mathrm{Max}\{f_1(z) \mid z \in Z\} + \delta$,

$f_2{}^* = \mathrm{Max}\{f_2(z) \mid z \in Z\} + \delta$,

$f_3{}^* = 0$

として良い．この $f_j{}^*$ の値はそれぞれ全オーダー量総計（$\sum W_i{}^O$），全緊急オーダー重量の加重和 $\sum(a_i W_i{}^k)$，0 となる．なぜなら，$f_1(Z)$ について，制約なしの最大化は，対象とするすべてのトライを採用する場合であって，$Z_i = 1(\forall_i)$ として $f_1{}^* = \sum W_i{}^O$ となる．$f_2(Z)$ について

© 日本オペレーションズ・リサーチ学会. 無断複写・複製・転載を禁ず.

表 1　理想点・希求水準の決定

目標関数	理想点 (f_j^*)	希求水準 $(\hat{f}_j)$	λ_j
f_1	$\sum W_i^O$	$p_1 \cdot C \cdot L$	$\frac{1}{f_1^* - \hat{f}_1}$
f_2	$\sum a_i W_i^k$	$p_2 \cdot \sum a_i W_i^k$	$\frac{1}{f_2^* - \hat{f}_2}$
f_3	0	$p_3 \cdot N$	$\frac{1}{f_3^* - \hat{f}_3}$

ただし，p_1：オーダー率希求水準設定パラメータ
p_2：緊急オーダー採用率希求水準パラメータ
p_3：連々指数希求水準パラメータ

も同様の考え方で求められ，これらは全ステップを通して一定値である．表1に結果を示す．ここでZは制約条件(4),(5)を満足するn次元0—1整数ベクトルの集合で，Nは選択対象となるトライの合計数である．また．$\delta>0$（定数）である．

〈ステップ2〉　希求水準の設定

第kイテレーションでの各目標関数の希求水準$\hat{f}_j^k$ ($j=1, 2, 3$) を意思決定者により設定する．ここで希求水準とは，少なくともこの程度の目標関数値は確保したいという値で，理想点f_j^*との関係を次に示す．

$\hat{f}_j^k < f_j^*$ ($j=1,2$)

$\hat{f}_j^k > f_j^*$ ($j=3$)

なお，ここでは意思決定者による希求水準値設定作業の平易化のために，表1に示すように，パラメータ ($p_1 \sim p_3$)設定方式を採用した．まず，$k=1$ としておく．

〈ステップ3〉　正規化

$\lambda_j = 1/(f_j^* - \hat{f}_j^k)$ ($j=1,2,3$)

として正規化を行なう．

〈ステップ4〉　パレート解導出（Min-Max法）

理想点と希求水準をもとにしたMin-Max問題を設定すると，χを連続変数として，

$\chi \to \text{Min}$　s.t.

(12)　$\lambda_1 \cdot (f_1^* - \sum W_i^O \cdot Z_i) \leqq \chi$

(13)　$\lambda_2 \cdot (f_2^* - \sum a_i \cdot W_i^K \cdot Z_i) \leqq \chi$

(14)　$\lambda_3 \cdot (f_3^* - \sum Z_i) \leqq \chi$

(4)　$|\sum C_i \cdot Z_i - C| \leqq \epsilon$

$$(5)\begin{cases} HH_1 \leqq \sum H_i \cdot Z_i \leqq HH_u \\ RR_1 \leqq \sum R_i \cdot Z_i \leqq RR_u \\ SS_1 \leqq \sum S_i \cdot Z_i \leqq SS_u \\ TT_1 \leqq \sum T_i \cdot Z_i \leqq TT_u \\ FF_1 \leqq \sum F_i \cdot Z_i \leqq FF_u \end{cases}$$

表 2　シミュレーション結果(1)

	オーダー率		緊急オーダー採用率		連々指数	
	希求水準 (%)	結果 (%)	希求水準 ×10⁵	結果 ×10⁵	希求水準 (−)	結果 (−)
1	—	82.5	—	7.9	3.0	3.0
2	—	75.6	8.5	8.9	2.9	2.9
3	85.0	90.9	8.0	8.0	2.9	2.9
4	85.0	87.4	8.1	8.1	2.9	2.9

となる．

本問題は，0—1混合整数問題であり，線形計画法を応用した内部径路法（[3] [4]）によって解くことができる．なお(12)〜(14)は，各目標関数値が理想点から同程度にずれる（正規化）解を求めるようにしたものである．この問題の解を Z^k とする．

〈ステップ5〉　トレードオフ

意思決定者が，$f_j(Z^k)$の値をもとに，①もっと改善したい　②評価値を下げても良い　③希望通りである，の3つの評価項目のクラスに分類する．各クラスの評価項目No.の集合をそれぞれI_i^k, I_r^k, I_a^kとおき，もし$I_i^k = \phi$ならば終了．さもなければ，ステップ6へゆく．

〈ステップ6〉　希求水準の再設定

I_i^k, I_r^k のクラスについては，新しい希求水準 $\hat{f}_j^{k+1}$ を設定し，$j \in I_a^k$ なるjについては，$\hat{f}_j^{k+1} = f_j(Z^k)$ とおき，ステップ3へ戻る．

6. 計算結果

満足化トレードオフ法を実際のトライ選択問題に適用し，その計算結果の一例を表2に示した．表2は，各イテレーションステップにおける3種の希求水準値と評価項目値を示しており，各評価項目値が大きくなるほど望ましいことになる．実際のトライ選択計画においては，各評価項目の重要度の大小関係を決めるのは難しくない．すなわち最初のイテレーションステップでは，重要度の一番高い評価項目（たとえば連々指数）を選び出し，その希求水準を設定する．次にイテレーション結果にもとづいて最初の希求水準を変更し，同時に新しい(次の)評価項目に対する希求水準を付加する．以上の操作を繰り返すことによりイテレーションをつづける．

イテレーションステップ1は，連々指数の希求水準の

© 日本オペレーションズ・リサーチ学会．無断複写・複製・転載を禁ず．

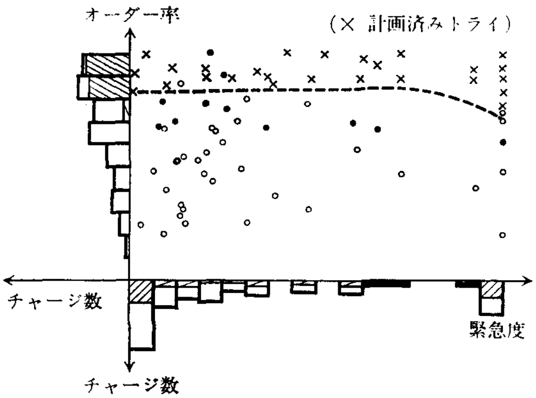

図 2 シミュレーション結果(2) ($k=3$ の場合)
オーダー率・緊急度別トライ選択結果

みを設定した時の結果であり，結果値 3.0 は本問題における上限値である．イテレーションステップ 2 は，緊急オーダー採用率の希求水準を付加しかつ連々指数の希求水準を3.0から2.9にゆるめている．イテレーションステップ 3 では，前ステップにおけるオーダー率が低すぎるとの判断から，オーダー率の希求水準を新たに付加し，緊急オーダー採用率の希求水準を8.5×10^5から8.0×10^5にゆるめた時の結果である．イテレーションステップ 4 では，再度緊急オーダー鋳込み率の希求水準を8.1×10^5にまで上げてみた．この結果，緊急オーダー採用率向上の代替として，オーダー率が低下している．

図 2 は，トライ選択結果を示す散布図であり，横軸は各トライ緊急度，縦軸は各トライのオーダー率を示す．また図中の×印は選択，○印は非選択のトライを示している．また，緊急度，オーダー率によってトライをクラス分けし，各クラスに含まれるチャージ数を棒グラフで図 2 に示す．棒グラフ中の斜線は選択されたトライ（×印に対応）に含まれるチャージを示している．

7. 考察と結言

満足化トレードオフ法を製鋼工程でのトライ選択問題に適用した．本解法の特徴としては，

① 理想点 f^* の設定には，意思決定の解の候補となりうるすべて（もしくは大半）のパレート解を包含するような十分大きな（または小さい）値を設定すれば良い．

② 係数 $\lambda_i (i=1,\cdots,N)$ は，理想点 f^* と希求水準 $\hat{f}$ とから自動的に計算される(表 1)．$\lambda_i\cdot(f_i^*-\hat{f}_i(Z))$ は，正規化された理想点 $f_i^*(Z)$ との差であり，評価項目間の次元差や数値上の桁数差について特別な注意は不要である．

③ 希求水準 $\hat{f}$ が feasible か否かによらず，弱パレート解が得られる．すなわち，もし $\hat{f}$ が feasible であれば，得られるパレート解は各評価項目に対し（正規化された意味で），同等に $\hat{f}$ より望ましい解となる．一方，もし $\hat{f}$ が infeasible の時は，各評価項目について（正規化された意味で），同等に理想点に対し犠牲を払った弱パレート解が得られる．

以上のように，日々の生産状況やポリシーによって各評価項目の重要度の大小関係が変化するトライ選択問題には，満足化トレードオフ法は，希求水準として絶対値を選定するだけで，意思決定者の判断を反映できるという点で，非常に有効性が高い．受注スペック（納期，重量等）は多様で，同一スペックのオーダー量も日／週毎に変化する．したがって「ある時は緊急オーダー鋳込率よりもオーダー率を重視し，またある時はその逆であったりする」という環境下では，本解法は非常に実用的であると思われる．

謝辞　常日頃よりご指導を賜っている(社)システム総合研究所理事長　椹木義一博士に感謝いたします．また本研究にあたって支援いただきました当社の樽井賢治氏，斉藤肇氏をはじめとする諸兄に感謝いたします．

参考文献

[1] Charnes, A. and Cooper, W : Management Models and Industrial Applications of Linear Programming, Vol. 1, Wiley, 1961.

[2] Grauer, M., Lewandowsky, A. and Wierzbicki, A. P. : DIDASS-theory, implementation and experiences (eds. M. Grauer and A. P. Wierzbicki). Interactive Decision Analysis, 1984.

[3] Hillier, F. S. : Efficient Heuristic Procedures for Integer Linear Programming with an Interior. Operations Research, Vol. 17, (1969), 600-636.

[4] Ibaraki, T., Ohasi, T. and Mine, H. : A Heuristic Algorithm for Mixed-Integer Programming Problem. Mathematical Programming Study. Vol. 2, (1974), 115-136.

[5] Ignizio, J.P. : Linear Programming in Single and Multiple Objective Systems. Prentice-Hall. 1982.

© 日本オペレーションズ・リサーチ学会. 無断複写・複製・転載を禁ず.

[6] Nakayama, H. : Proposal of Satisficing Tradeoff Method for Multiobjective Programming. Trans. SICE, Vol. 20, (1974), 29-35 (in Japanese).

[7] Nakayama, H. and Sawaragi, Y. : Satisficing Trade-off Method for Interactive Multiobjective Programming Methods (eds. M. Grauer and A. P. Wierzbicki). Interactive Decision Analysis, Springer (1984), 113-122.

[8] Sawaragi, Y., Nakayama, H. and Tanino, T. : Theory of Multiobjective Optimization. Academic Press, 1985.

[9] Spronk, J. : Interactive Multiple Goal Programming. Martinus Nijhoff Publishing, 1981.

[10] Steuer, R. E. : Multiple Criteria Optimization Theory, Computation and Publication. Wiley, 1986.

[11] Tamura, H. : Multiple Criteria Decision Making-Theory and Applications-Utility Theory 1, 2, Systems and Control, Vol. 30, (1986) (in Japanese).

[12] Zeleny, M. : Multiple Criteria Decision Making. McGraw-Hill, 1982.

お知らせ

今月15日発刊予定の **JORSJ Vol. 33—No. 4** は，編集・印刷の都合で平成3年1月下旬頃の発刊となる予定ですので，よろしくお含みおき下さいますようお願い申し上げます．

APORSの論文誌“APJOR”へのご投稿とご購読のお願い

皆様ご案内のとおり，1985年から太平洋地区のＯＲ学会連合(APORS=Association of Asian-Pacific Operational Research Societies) が IFORS の下部機関として発足し，日本のＯＲ学会がその幹事役を努めることとなり，若山邦紘教授（法政大学）が事務局長に就任されています．

APJOR (Asia-Pacific Journal of Operational Research) は，その Official Journal という性格から，APORS 加盟各国から Board of Editorial Advisers へ参加することが求められており，日本ＯＲ学会からは若山氏のほかに森村英典教授（筑波大学），茨木俊秀教授（京都大学）が参加されています．これからも同誌を一層もり立ててゆくため，**論文の投稿・雑誌の購読**についてご協力をお願いいたします．

1991年購読料：2,000円（5月・11月発行予定）（送料込）

雑誌はシンガポールＯＲ学会から貴殿宛直接送られます．

お申込みは学会事務局へ．（**申込締切12月14日**）

© 日本オペレーションズ・リサーチ学会．無断複写・複製・転載を禁ず．