製鋼工場から冷延工場までの一貫スケジューリング問題

福村 聰・松川 鎮久・外岡 英治

1. 背景

現在，製造業全般にハード・ソフトを含めた総合的な“生産管理システムの再構築”が重要課題として認識され，推進されている．この背景には従来型産業での需要停滞，供給能力過多の中で，国内外の競争に打ち勝っていくためには，

①価格競争力確保のため，コストダウンをさらに追求する必要があること．

②非価格競争力として，お客様の要求に応えるためリードタイム短縮を図る必要があること．

③これらを具現化するためには，多品種少量生産に耐えられること．

等の要件を満足する生産体制とする必要があり，その解決策として生産管理システムの見通しが鍵をにぎると見られるためである．

特に鉄鋼業においては，鉄鋼消費原単位の低下，安価な労働力を有する NICS (New Industrial Countries) との競争，大口需要家である自動車産業等での新生産システムへの対応等々，環境条件はまことに厳しいものがあり，量から質への転換が重要課題となっている．

私どもの属する千葉製鉄所においても，これらの要求に応えるため，生産管理システムの抜本的見直しが現在進められているが，この中で特に，製鉄所全体の物の流れを一貫して計画・管理するシステム（一貫工程計画システム）の開発が，従来とは異なった考え方のもとに，強力に推進されている．

本論文では，このシステム開発のフィージビリティスタディの中で行なった，製鋼工場から冷延工場までの一貫スケジューリング問題のモデル化およびそのシミュレーション的解法について紹介する．

2. 問題構造

—製鉄所生産形態とそのモデル化—

千葉製鉄所の生産プロセスを概略図示したものが図1である．製鉄所における生産形態は以下のような特徴をもつ．

①受注生産方式を基本とすること

鉄鋼製品に対するオーダーは，物理的・化学的特性で分けると千差万別であり，これらを無駄なく生産していくために，受注生産方式を採っている．

②複雑な生産工程であること

千差万別の特性を出すため，生産工程は複雑多岐にわたり，80以上にものぼる生産設備を選択しながら，なおかつ納期要求に合わせて製品を造る必要がある．

③不連続型生産であること

ふくむら　さとし，まつかわ　しずひさ，
とのおか　えいじ*
川崎製鉄㈱　千葉製鉄所企画部能率室　*システム部
〒260　千葉市川崎町1

© 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．

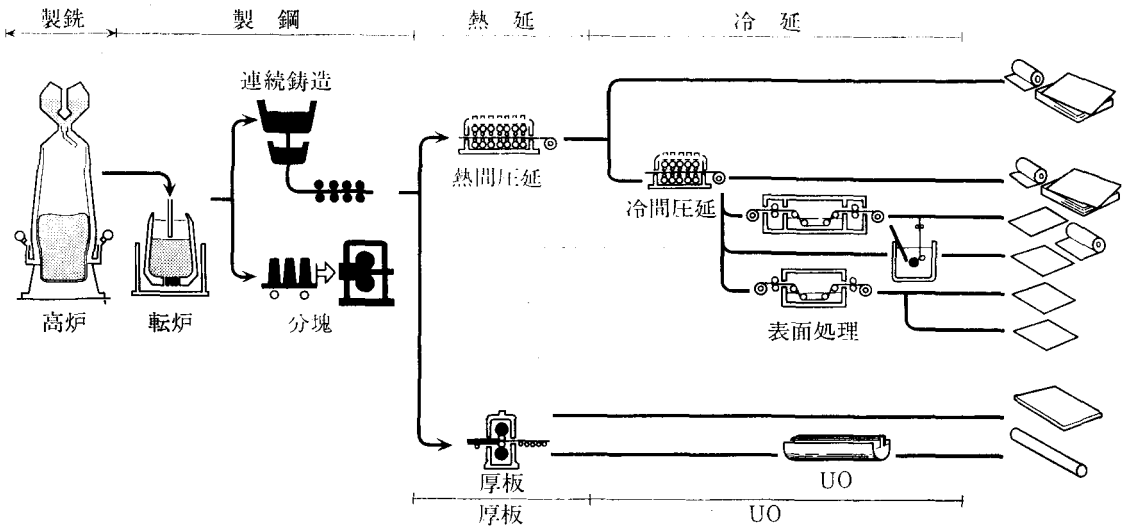


図 1　製鉄所生産プロセス

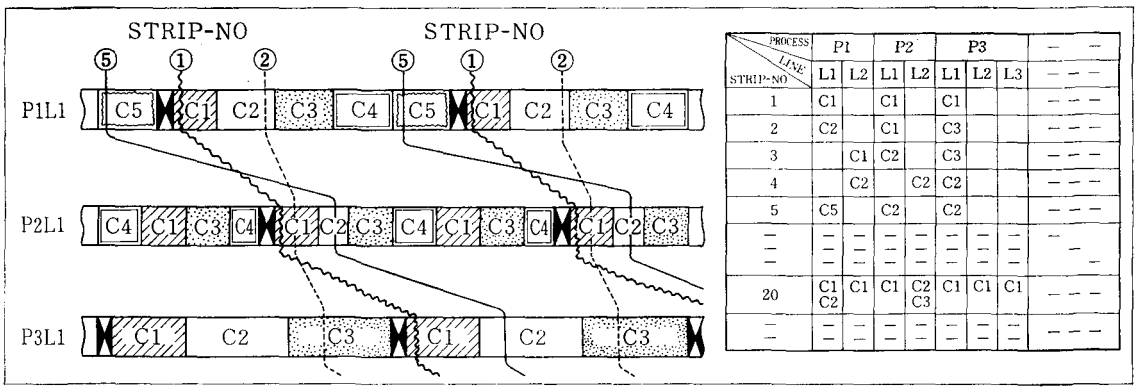
設備側から見ると，連続生産に近いのは高炉のみであり，転炉以降はロット単位の処理となる．このロットのまとめ方は，製品の品質・コスト，設備の能力に大きく影響する．

④エネルギー多消費型生産であること

製鉄所では，製品を造るまでに多くのエネルギーを使用する．特に上流工程では，熱エネルギーが多く使われるが，この節約のために工程間の同期化・直結化が志向されている．

以上のような特徴から，製鉄所の生産形態をモデル化したものが図2である．このモデルをわれわれは“チャンスモデル”とよぶ．生産の各プロセスは，いくつかの設備（ライン）から成っており各設備は品質・コスト上の制約から，処理仕様の範囲でいくつかの処理チャンスを設定している．チャンス間には段取替作業が必要となる．この処理チャンスを時間軸上に配列したものを，PLC（Process-Line-Chance）パターンと言う．

一方，現品（“オーダー”と読みかえてもよい）は通過すべきプロセス・ライン・チャンスの列がある自由度の範囲内で決められており，納期を満足するようにそれらを通過しなければならない．また同一チャンス内でもできるかぎり処理仕様の



PROCESS / LINE / STRIP-NO	P1		P2		P3		
	L1	L2	L1	L2	L1	L2	L3
1	C1		C1		C1		
2	C2		C1		C3		
3		C1	C2		C3		
4		C2		C2	C2		
5	C5		C2		C2		
―	―	―	―	―	―	―	―
20	C1 C2	C1	C1	C2 C3	C1	C1	C1
―	―	―	―	―	―	―	―

図 2　チャンスモデル

© 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　優先順位決定表（◎はSV_0を与えるラインチャンスでスケジューリング時，KEYとなる）

ストリップ	オーダー	ライン / チャンス / 納期	A 1	A 2	A 3	B 1	B 2	C 1	C 2	D 1	D 2	D 3	$\max\left(\frac{v}{V}\right)$
1	1a	XXX	○				◎		○		○		
	1b	XXX	◎				○		○		○		
	1c	XXX	○				◎		○		○		
2	2a	XXX			○			◎		○			
	2b	XXX			○			◎		○			
	2c	XXX			○			○		◎			

似たものをまとめて（ロット化）処理したい．

以上の制約条件・目的関数のもとで，個々の現品の流し方，設備側から見ると処理順を，ある期間単位に決定するのがスケジューリング問題でありジョブショップスケジューリングの一変形と言える．この問題規模としては，オーダー件数（現品数は工程で異なる）として1500件/週，対象となる設備数で85ラインにものぼり，いわゆる最適解は求解不可能である．

ここでは問題を，個々のオーダーを「いつ」「どこで」処理すべきかという割付け問題と，「どのように」まとめるかというロット化問題の2つに分けて考える．

3.　オーダー割付け問題

割付けにさいして，あらかじめ設定すべき事項は，

(1)　週間受注オーダー

受注重量，歩留り，納期等の属性および各工程の処理可能なラインチャンスの連鎖（ストリップとよぶ．）等の仕様を付加する．通常，1オーダーに対し，複数のストリップが付加される．

(2)　PLCパターン

各ラインにおけるチャンスメッシュでの稼動パターン．工場各設備の処理能力，エネルギーバランス，物流，休工，年工等の工事予定，要員配置等により設定する．

(3)　処理能力

各ラインチャンス毎に処理能力（作業トン/時間）を設定する．

(4)　工程，ライン間移送時間

オーダーは，製品となるまでにいくつかのラインで処理される．この場合，ラインとライン間では，ハンドリング，冷却等の所要時間が必要となる．この所要時間を移送時間として設定する．

等がある．

これらを前提として，工程間の同期化，直結化を考慮して割付けすべきである．

3.1　割付けロジック

チャンスモデルを使って，割付けの最適化を行なう場合，目的関数としては，

①納期に関して――未達量の最小化，遅れ日数の最小化

②リードタイムに関して――製造工程日数の最小化

等が考えられ，これらを同時に最適化することを念頭に，ヒューリスティックアルゴリズムを開発した．ここでは紙面の都合上，考え方を簡単に記す．（同期化，直結化の必要な工程間は，工程集約等の事前処理を行なっている）

STEP　1――対象となる全オーダーについて，FCP（Fastest Chance Path）とCCP（Critical Chance Path）を設定し，その間にある各ラインの該当チャンス時間をV_{ol}（oオーダーのlラインに対する，FCPとCCPとの間にある該当チャンスの時間の総和），各オーダーの処理時間をv_{ol}として，優先順位決定表（表1）に，v_{ol}/V_{ol}を記入する．

FCP：PERTの最早結合点時刻の列に相当するもので，オーダーの投入時点を起点として求める．オーダーを投入してから最も早く製造完了となるチャンス列である．

CCP：PERTの最遅結合点時刻の列に相当するもので，納期を起点として求める．納期に

© 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．

間に合う最も遅く製造完了となるチャンスの列である.(図3)

STEP 2——各オーダーについて，$\underset{l}{\mathrm{Max}}(v_{ol}/V_{ol})$を計算し，オーダー得点$SV_o$とする.($SV_o$は，緊急度を表わす)

STEP 3——SV_oの大きい順にN候補を選定し，各候補について，STEP 4で述べるのと同じ方法で，割付けした場合の優先順位決定表の仮変更を行ない，次回の$\underset{o}{\mathrm{Max}}SV'_o=SV'$との差$SV-\alpha\cdot SV'$($\alpha$は重みづけ係数)が最大となる$n$オーダーを最優先オーダーとする.(次回の状況が極力悪くならないように選定する)

STEP 4——最優先オーダーについて，製造工程日数を最小にすることを考慮して，$\underset{l}{\mathrm{Max}}(v_{ol}/V_{ol})$を与えるライン$l$以降の下工程をFCPで，それより上工程をライン$l$の処理時刻を起点にCCPで割付ける.

STEP 5——優先順位決定表の変更を行なって，まだ残オーダーがあれば，STEP 2へもどる.

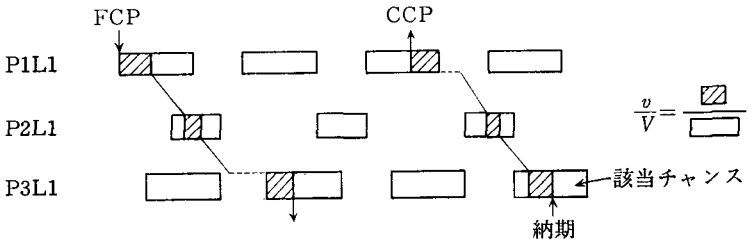


図3 FCPとCCP

3.2 プロトタイプモデルによるシミュレーション

実システムを構築するにさいし，

(a) 割付けロジックの実用性の検証と計算機負荷の程度

(b) 割付け結果の解析項目の充実化と，対話型システムを設計するために，人にわかりやすい解析結果の表現方法の検討等を目的に，プロトタイプモデル SCOPE (Self-C Onsistent Planning Evaluater) を開

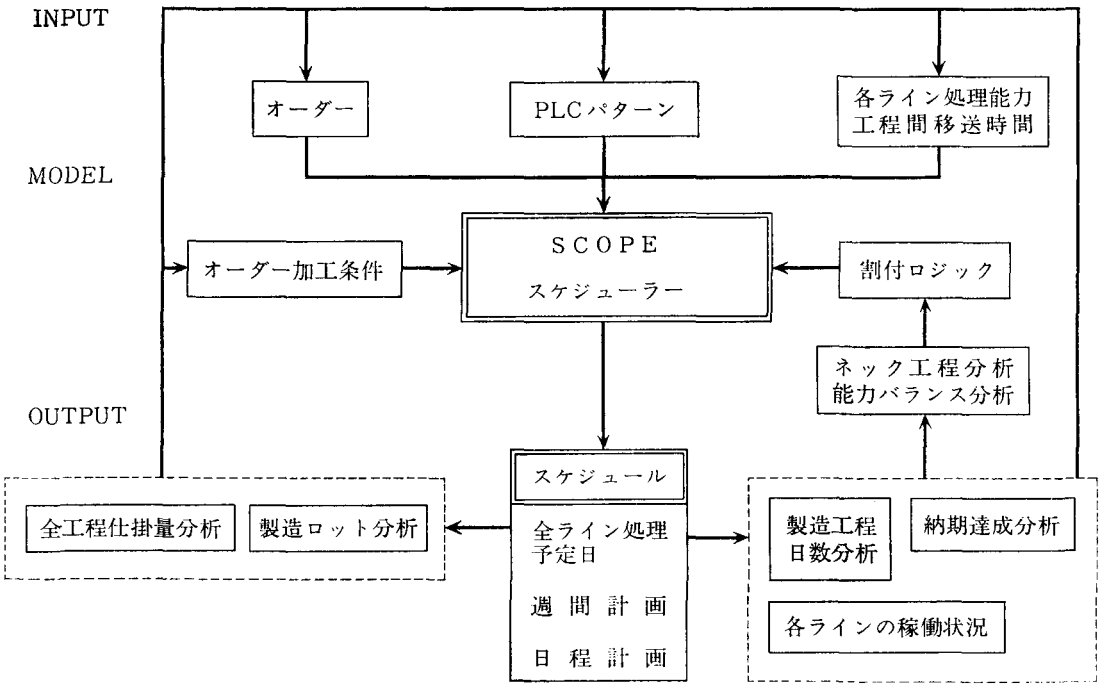


図4 SCOPE処理フロー

© 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.

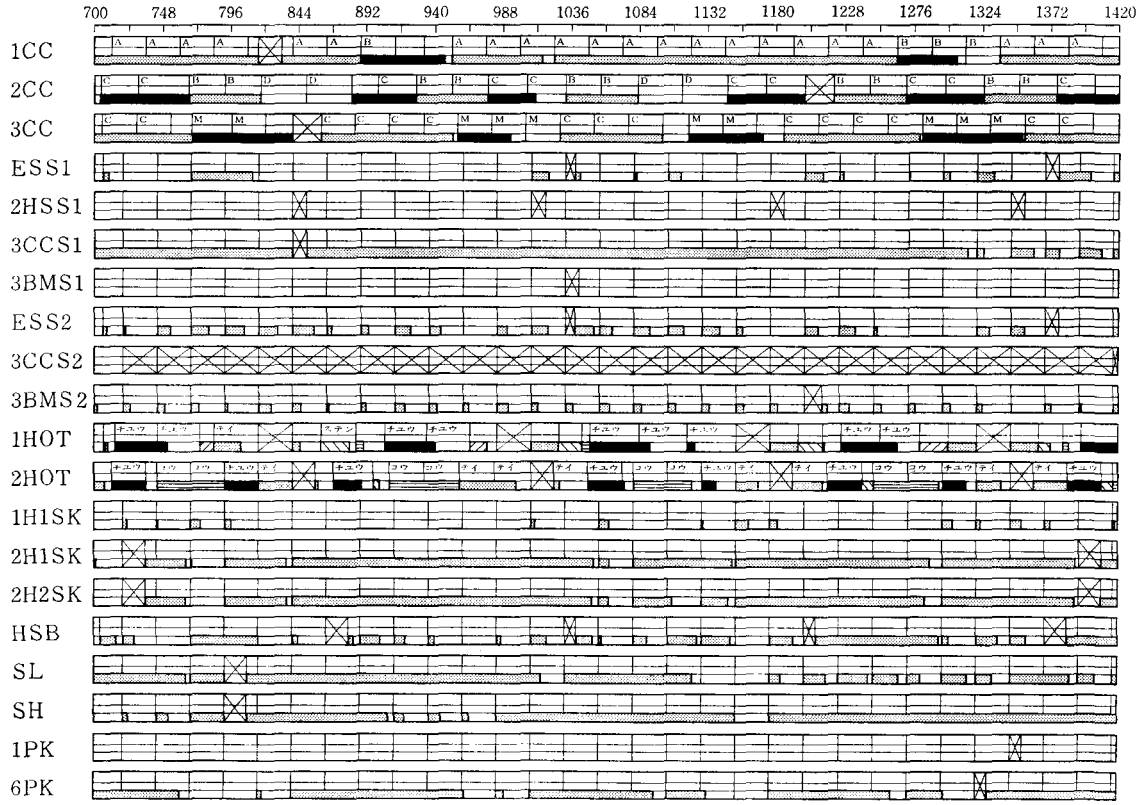


図 5 各ラインの稼動状況

発した．

以下にSCOPEによるシミュレーション結果の一例を紹介する．

(1) SCOPE処理フロー（図4）

図4に示すように，SCOPEに入力される，投入オーダー，PLCパターン，ライン能力，工程間移送時間は，一意的に決定されるものではなく割付け結果の解析情報のフィードバックを何回かくりかえした結果で決定される．

(2) シミュレーション結果

2カ月分の実績オーダーを用いて，シミュレーションを行なった．出力結果としては，

(a) 全オーダーの各ラインの処理予定日

(b) 全ラインの週間計画，日程計画

がある．

また，操業状況，仕掛状況，ハンドリング状況を把握するため，以下の解析を行なっている．

① 各ラインの稼動状況（図5）

② 納期達成分析（図6）

③ ネック工程分析（図7）

④ 製造工程日数分析

⑤ 全工程仕掛量分析

⑥ 製造ロット分析

4. ロット組問題

最後にオーダー割付け問題によって配列されたオーダー群に対し，各設備単位に工程計画組を行なう問題について考えてみる．ここでは例として全体に与える影響の大きい，製鋼プロセスのメイン設備である連続鋳造（以下“CC”とよぶ）の計画組をとりあげる．

CCでは，転炉で製錬された溶鋼（1ヒート＝240～270t）が供給され，連続的にスラブとよばれる羊羹状の鋼片が造られる．この時，同一成分

© 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．

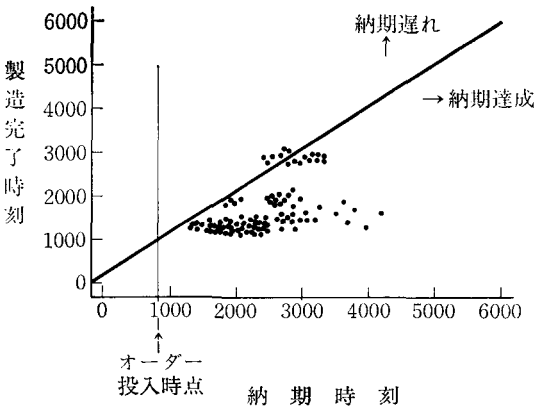


図 6 納期達成状況

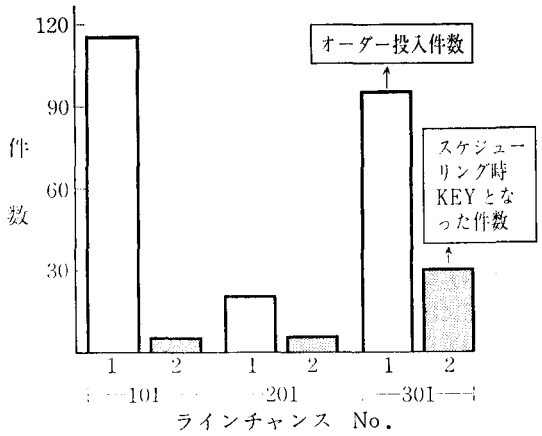


図 7 ネック工程分析

(オーダー投入件数：ネック件数)

で造りうるオーダーをまとめて，数ヒート連続鋳込(連々鋳)したい．そこで問題は，与えられたＣＣの時間枠内で，極力割付け結果をくずさないようにロットまとめすることである．

〔制約条件〕

①各オーダーには成分コードが仕様付加されており，成分コード間には同一鋳込可能なすべての最大組合せ（成分コードグループ）が準備されている．

②計画組は，チャンス単位に行ない，前チャンス鋳込予定で遅れているオーダーは必ず計画組する．(本来はＣＣＰとの見合い)

③手持ちオーダーのみではヒートにまとまらない場合は，予備材を鋳込むことが可能．

〔目的関数〕

①オーダー付スラブを組み込む場合は，その限界利益分の価値がある．(α_1円/t)

②次チャンス予定分のオーダーを組み込む場合は熱延後，コイル在庫費用が余分にかかる．(限界利益－在庫費：α_2円/t)

③予備材を組み込む場合は，スラブでオーダーを待つことになり，在庫費用とともに熱延との同期化ができないための熱量損がかかる．(限界利益－在庫費－熱量損：α_3円/t)

ただし，割付け結果の尊重の程度によりα_2 α_3を低下調整する．

④製鋼コストで計画組に依存するものを，１ヒート当りの費用β円と，連々鋳単位の費用γ円とする．

〔定式化〕

①第 i 成分コードグループ，第 j 成分コードの第 k チャンス（$k=1$：前チャンス，2：当チャンス，3：次チャンス）予定オーダーの組込量をx_{ijk}とする．

②成分コードCの第 k チャンスオーダー予定量をo_{ck}とする．

③第 i グループの予備材組込量をy_iとする．

④第 i グループで計画を組むか否かを，０－１変数の u_i で示し，そのヒート数を整変数の v_i とする．

以上の変数を使えば，次のような混合整数計画問題として表現できる．

(目的) $\alpha_1\sum_{i,j}x_{ij1}+\alpha_1\sum_{i,j}x_{ij2}+\alpha_2\sum_{i,j}{}_{ij3}$
$+\alpha_3\sum_i y_i-\beta\sum_i v_i-\gamma\sum_i u_i\rightarrow$最大化

(条件) $240\cdot v_i\leqq\sum_{j,k}x_{ijk}\leqq 270\cdot v_i$ (任意の i)

$\sum_{(i,j)\in L(c)}x_{ij1}=o_{c1}$($L(c)$は成分コード$C$を表わす($i$, j)の組合せ)

$\sum_{(i,j)\in L(c)}x_{ijk}\leqq o_{ck}$ ($k=2,3$)

$Nu_i-v_i\geqq 0$ (Nは十分大きな数値)

$\sum_{i,j,k}x_{ijk}+\sum_i y_i\leqq S$ (Sは当チャンスの計画総量)

© 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．

新時代のコンピュータ総合誌
ComputerToday
●5月号／好評発売中　定価880円
エキスパートシステム構築ツール
プロダクションシステムOPS5を中心に
OPS5と私　安西祐一郎
OPS5文法入門　鈴木宣夫
OPS5プログラミング入門　実籾富二男
OPS5 vs. COMMON LISP & C　五十嵐敦子
OPSを利用した μKIT-2001故障診断プログラム　武田文也
OPS5の高速化　伊藤秀昭
OPS5 on Prolog　小林重信・小澤和義
POPS2　広瀬紳一
ART　磯貝幸一
お得な年間購読のおすすめ　年間5000円(6冊)
別冊・ComputerToday　好評発売中 1300円
パーソナルコンピュータのための
日本語スクリーンエディタの作り方
あらゆるパソコンに対応する日本語エディタ
"SSE (Simple Screen Editor)" 初の解説書.
数理科学
7月号予告　定価880円
特集＝自己組織
自己組織とはなにか　甘利　俊一
脳——情報的自己組織　津田　一郎
細胞の知覚と行動　小畠陽之助
不均質環境における生物の増殖と拡散　重定南奈子
物性におけるカオティックな基底状態と中間構造　井上　和正
乱れの観察と流体の秩序　種子田定俊
大地震発生前の歪場形式モデルと地震活動　大内　徹
経済システムのごみ箱モデル　西山　賢一
非平衡下の経済法則　澤　富彦
〈連載〉電磁気学を考える⑨　今井　功
数理科学・別冊　好評発売中
形・フラクタル　定価2,000円
ソリトン　定価2,000円
サイエンス社
東京都千代田区神田須田町2－4 安部徳ビル
☎03(256)1091　振替 東京7－2387

x_{ijk}, y_i は非負実数
u_i は0－1変数, v_i は非負整数

このモデルを使うことにより，製造工程期間短縮とロット化の関係，成分系統合の効果等が定量的に把握される．

5. 終りに

品質向上，リードタイム短縮，コストダウンという工場の改善活動は，現在ではまさに全体最適化という観点をなくしてはありえない．ただ“全体最適化”という言葉ほど，言うは易く行なうに難いものはない．今回の例で言えば，単に解法の難しさのみならず，制約条件・目的関数が環境によって変化しうるという構造をもっており，あまりにリジッドなロジックを準備しても使えなくなる状況が発生するであろう．将来システム技術・OR技術の進歩により，このような状況も変化するであろうが，現時点で重要なことは，生産構造・価値評価構造をいかに一般的なモデルとして構成し，システム構成に反映させていくかだろうと考える．今回導入したチャンスモデルの考え方は，現在開発中の一貫工程計画システムの基本概念として大きな効果を発揮している．

© 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．