

相互補完国際物流システム

平木 秀作

1. はじめに

相互補完システムは、ASEAN 諸国に構築された、多国間で構成品・部品を分担して生産し、相互に供給しあう生産システムである。参加国の経済発展に寄与するとともに、それぞれの国ごとでは市場規模が小さいが、それらをまとめることにより量産効果を高めることができる。本稿では、ASEAN 諸国に相互補完システムが構築された背景を述べ、JIT 生産方式による相互補完システムの生産・物流計画について概説する。以下、節2で、相互補完システムの背景にある貿易自由化の流れと構築された相互補完システムの事例を示し、節3で相互補完生産システムの生産・物流計画立案に関するいくつかの研究を紹介する。相互補完システムを多段階生産・在庫・輸送システムと把握し、JIT 生産方式による生産・輸送指示に関する研究、JIT 生産方式の数理計画モデルに関する研究を紹介する。節4で国際分業ネットワークとしてのグローバルな相互補完国際物流システムについてふれる。

2. 相互補完システムの背景

2.1 BBCスキームの活用

ASEAN 6カ国（当時）は、1988年10月の経済閣僚会議で「自動車部品相互補完協定（Brand to Brand Complementation on the Automotive Industry: BBC）」（以下、BBCスキーム）の覚書に調印し、域内製部品の輸出入にかかる関税を半分に優遇するとともに域内製自動車部品を各国の国産化率に加算できることにした。この協定の適用を受ければ、自動車及び自動車部品製造企業は、国ごとに同じような工場を作る二重投資を避けられるので、生産を集中することにより量産効果をあげることができる。特に、投資額が大きく付加価値が高いエンジン部品などは1カ

国で集中生産し、多国間で相互補完する効果大きい。日本の自動車及び自動車部品製造企業各社は、このBBCスキームの適用を受けて、タイ、マレーシア、インドネシア、フィリピンの4カ国に自動車部品の相互補完生産システム（Global Complementary Production Systems: GCPS）を構築した。トヨタ自動車は、アジア・太平洋諸国において、(1)各国の自動車産業の発展に貢献しその国独自で自己完結する自動車産業の育成を目指す、(2)ASEAN 諸国の自動車部品相互補完協定を活用して1カ国では実現不可能な生産規模をASEAN 諸国及び日本やアジア・太平洋諸国へ輸出することにより確保する、(3)そのために、日本が各国からの輸出市場となりアジア製部品・完成車を輸入する、という3つの基本戦略に基づく「アジア・太平洋コンプリメンテーション」構想を打ち立てた[1]。この基本戦略は1989年から実施に移され、1993年6月フィリピンでの変速機の生産規模を4倍以上に引き上げて需要が急拡大しているタイに出荷することによって完成した。図1にトヨタ自動車がASEAN 4カ国に構築した相互補完生産システムを示す。

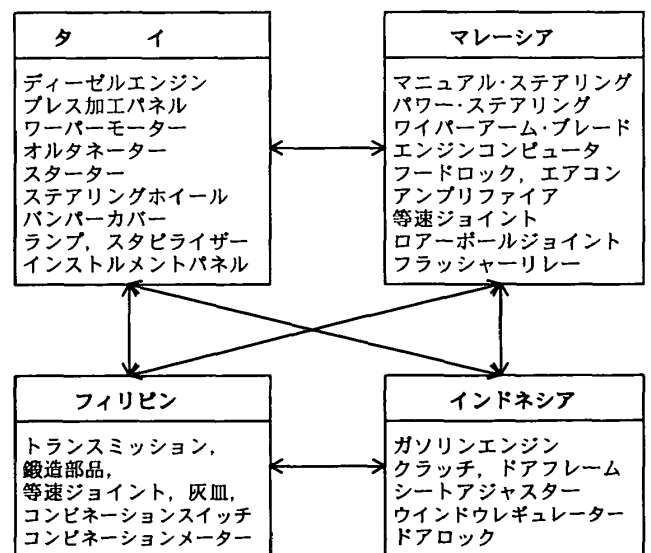


図1 トヨタのASEAN 4カ国での相互補完生産（出所：FOURIN 編[2], p. 27 (1999) をもとに作成）

ひらき しゅうさく

広島大学 経済学部

〒739-8525 東広島市鏡山 1-2-1

大手自動車部品メーカーであるデンソーも、ASEAN 4カ国に、図2に示すような部品相互補完システムを構築している。

2.2 貿易自由化の流れ

1988年にBBCスキームが結ばれて以来、タイ、マレーシア、フィリピン、インドネシアのASEAN 4カ国は、規制緩和を進めながら、国内自動車産業の育成を図ってきた。各国政府は、投資規制などを緩和し、海外からの投資を促進しているほか、現地部品企業に対して海外企業との技術提携や合弁事業を奨励している。また、各国は、競争力のある分野で独自産業を育成し、特定部品の集約拠点となることを目指している。

1992年1月のASEAN首脳会議でASEAN自由貿易地域(ASEAN Free Trade Area: AFTA)の創設に合意し、1993年から共通効果特惠関税制度(Common Effective Preferential Tariff: CEPT)を開始してASEAN域内の関税引き下げを図っている。CEPTは、ASEAN製品に対して最大5%の輸入関税率を適用する特惠関税制度で、各国は1993年からCEPT適用品目を毎年増やしてきた。CEPT適用一時的除外品目の大半を占める自動車部品については、当初、輸入関税率を2000年1月から最大で20%とし2002年末までに段階的に最大関税率を5%まで引き下げる計画であった。

1995年12月のASEAN首脳会議でBBCスキームに代わるものとしてASEAN産業協力スキーム(ASEAN Industrial Cooperation Scheme: AICO)が打ち出され1996年11月に発効した。AICOはCEPT完全実施までの移行措置であり、ASEAN資本30%等の条件を満たせば、2国間で0~5%の優遇関税率を適用する制度である。

1997年の金融危機後、経済回復と成長を加速させ

るためASEAN諸国は、一層、自由化を進めてきた。

1998年10月には、域内外からの投資を促進するためASEAN投資地域(ASEAN Investment Area: AIA)を創設することが合意され、2010年までに加盟国間の投資自由化を図ることとしている。

2.3 AICOスキームの活用

AICOスキームはBBCスキームからAFTAへの移行措置であり、ASEAN 7カ国で現地資本比率30%以上の企業が、域内で生産分業する場合、0~5%の特惠関税が適用される仕組みである。対象企業は所在国政府からAICO製品の認定を取得する。AICOスキームの目的は、域内における部品、完成品の生産分業の促進、域内投資の拡大、地場中小企業の育成にある。AICO製品の認定を受けると、税制上の様々な恩典を受けることができるが、両国間の利害関係が絡むため、自動車部品関連の認可件数は、1998年11月までに10件にとどまっていた。1998年に各国の自動車生産規模がピーク時の30%にまで落ち込んだため、生産規模の拡大、生産の効率化、海外投資の促進などを図る目的で、1998年12月のASEAN首脳会議において、資格条件の緩和や認可のスピードアップを図ったため、AICOの累計認可件数は、2000年4月までに32件に急増した。マレーシアが自動車部品の関税率引き下げを見送り、CEPTの完全実施が2年間延期されて2005年1月になったことから、それまでのつなぎとして、AICOを利用して節税を図る自動車・部品メーカーが増加している。特に、日系自動車メーカーはAICOを利用して自動車部品の相互補完体制を強化・拡大している。トヨタ自動車の1999年のAICOによる節税効果は、年換算で1000万US\$以上になる。図3にトヨタ自動車のAICO取得状況を示す。

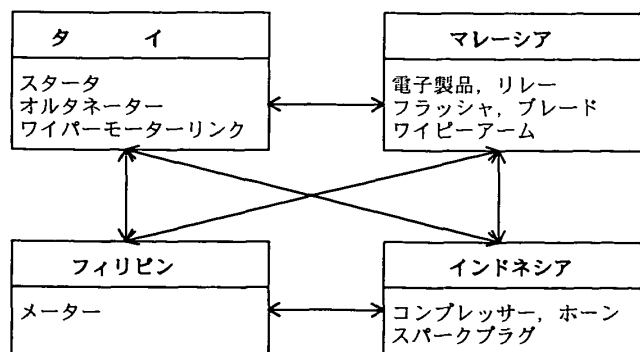


図2 デンソーのASEAN 4カ国での相互補完生産(出所: FOURIN 編[2], p. 53 (1999) をもとに作成)

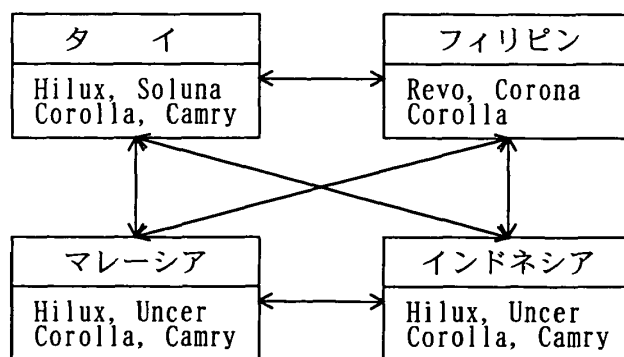


図3 トヨタのAICO取得状況(出所: FOURIN 編[3], p. 10 (2000))

3. 相互補完システムの生産・物流計画

3.1 相互補完システムの生産・物流計画モデル

アジア地域における自動車部品の相互補完システムについて、小野[4]は、現地国の国産化政策に対応する国産化部品の選択方法に関する研究をしている。多国間で構成部品・部品を相互補完するにあたっては、どの国でどの構成部品・部品を生産し、それらをどのように他国に供給するか計画する必要があるが、この問題に対して、笠松・太田・人見[5]は、複数の海外生産拠点をもつ多国籍企業を対象に生産・輸送計画の立案方法を提案している。彼らの提案した生産・輸送計画モデルでは、各生産拠点に製品及び構成部品の両方またはいずれかを生産する工場を設け、併せて製品を一時保管する倉庫を配置して、これらの工場及び保管倉庫における生産・輸送に関する諸制約条件を線形等式、不等式体系に定式化したうえで、(1)多国籍企業全体の利益、(2)サービス率（各国の製品の需要量を満たす割合）、(3)子会社の利益、(4)工場の稼働率、(5)部品調達率、(6)部品及び製品調達による輸出入収支、の6つの評価基準を考慮して、これらの評価基準に優先順位を設けて、各評価基準を目標値に近づける線形多目標計画モデルを構築している。Katayama, Kawatsu and Hirakawa[6]は、トヨタ自動車の「アジア・太平洋コンプリメンテーション」を念頭において、タイ、インドネシア、マレーシア、フィリピン、日本の5カ国間で、エンジン及びエンジン部品、トランスミッション、ステアリング、プレス部品及びボディ部品、電装品の相互補完を行う場合の、工場配置及び物流計画を立案するモデルを現地調達率の制約を考慮して3つの整数計画問題モデルに定式化して解析している。また、Katayama, Hiramatsu and Hiraki[7]は、文献[6]で提案したモデルに他のASEAN諸国や中国を加え、各国の技術水準を考慮した改良モデルを提案している。

3.2 相互補完システムの生産・輸送指示モデル

引張り型生産指示方式の定量的解析は、トヨタ生産方式が注目されて間もなく、村松[8]、Kimura and Terada[9]により数式モデルの定式化が試みられた。彼らは、解析の主目的を、生産指示量、期末在庫量の挙動を明らかにすることにおいていた。引張り型指示方式のひとつであるかんばん方式について、宮崎・西山[10]は在庫費用と引き取り費用との和が最小となるかんばん枚数を試行錯誤で求めるアルゴリズムを提案している。Hiraki et al.[11~13]は現地組立生産シ

テム（Knockdown Production Systems）を多段階生産・在庫・輸送システムと把握して、JIT生産方式の概念に基づく引張り型生産・輸送指示方式を適用した場合の生産・輸送指示量、期末在庫量の挙動に関する基礎的解析を試み、輸送リードタイムが輸送済み部品の期末在庫量変動にのみ影響を及ぼすことを明らかにするとともに、現地組立加工工程の生産の信頼性を維持するには輸送リードタイムを考慮して輸送済み部品の緩衝在庫を用意し、輸送リードタイムが著しく長い場合、緊急発注による航空輸送で不足量を調達する体制を整える必要があることを指摘した。

相互補完生産システムは、多国間で構成部品・部品を分担して生産し、相互に補完しあって製品を生産して市場に供給するシステムであり、多国間での双方向の物流機能を有するネットワーク型サプライチェーンプロセスを構成している。しかし、ある1つの参加国の立場に立って、単純往復輸送により、他国で生産される構成部品・部品を調達する場合、基本的には、現地組立生産システムと同様に解析できる。Hiraki, Ishii and Katayama[14]は、輸送間隔を考慮して生産・輸送指示を行うときの生産・輸送指示モデルを構築し、生産・輸送指示量、期末在庫量の挙動を明らかにしている。また、Hiraki[15]は、製品中心生産・輸送指示モデルと構成部品中心生産・輸送指示モデルを構築してその比較を試みている。

3.3 相互補完システムの数理計画モデル

かんばんを利用したJIT生産システムを、最初に厳密な数理計画モデルに定式化したのは、Bitran and Chang[16]である。彼らは、単一品目を生産する多段階工程の工程間にかんばんで管理される加工済み在庫をおき、かんばん枚数を最小化する数理計画モデルを次のように構築している。(1)モデルは $(N+1)$ 工程からなり、 $n \in \{1, 2, \dots, N\}$ は工程を表す。なお、各工程では単一品種を生産しているものとして、記号 n で、同時に生産品目を表す。(2)最終工程、すなわち工程0は最終組立工程 P^0 のみからなる。他の工程 $n \in \{1, 2, \dots, N\}$ は生産工程 P^n とその直後の在庫点 I^n からなる。(3)モデルの期間は $t \in \{0, 1, \dots, T\}$ で表される。計画期間は1期より始まり T 期で終了する。記号を次のように定義する。

$\lceil Z \rceil$: Z 以上の最小整数

$\lfloor Z \rfloor$: Z 以下の最大整数

a^n : コンテナ容量。コンテナ内に収容できる部品 n の数で表す。

β_t^n : P^n の t 期における生産能力. 部品 n の満杯のコンテナ数で表す.

$s(n)$: 工程 n の直後工程 ($n=1, \dots, N$).

$P(n)$: 工程 n の直前工程の集合.

$e^{n,s(n)}$: 部品 $s(n)$ を 1 単位生産するのに必要な部品 n の所要量.

V_t^n : 0 期末に I^n にある部品 n の在庫数. 満杯のコンテナ数で表す. 満杯であるから, 各々のコンテナにはかんばんが 1 枚貼付されている.

W_t^n : 0 期末に I^n にある部品 n の満杯でないコンテナの中に残された在庫の端数. コンテナは満杯でないので, かんばんを外されている.

X_t^n : 工程 0 における部品 0 (すなわち, 最終製品) の t 期における生産所要量. 満杯のコンテナ数で表す.

Q^n : $\max \{0, \lceil (e^{n,s(n)} \alpha^{s(n)} / \alpha^n) Q^{s(n)} - V_t^n - (W_t^n / \alpha^n) \rceil$ 計画期間全体を通して工程 n に課せられた生産割当量もしくは実需要. 部品 n の満杯のコンテナ数で表す. なお, Q^0 は $\sum_{n=1}^N X_t^n$ で定義する.

X_t^n : 期間 t に P^n で実際に生産開始となる部品 n のかんばん枚数.

Y_t^n : 期間 t に I^n で外される部品 n のかんばん枚数.

U_t^n : t 期末に P^n で生産オーダーとなって残っている部品 n のかんばん枚数. つまり, 期間 t では実際の生産開始にはならなかった部品 n のかんばん枚数.

V_t^n : t 期末に I^n で在庫されている部品 n の満杯のコンテナ数, すなわちかんばん枚数.

W_t^n : t 期末に I^n で満杯でないコンテナの中に残される部品 n の在庫端数.

U_t^n : 計画期間の初めに, 管理者が生産オーダーとして P^n に投入する部品 n のかんばん枚数.

Bitran and Chang は, かんばん方式を式(2)~(8)の制約のもとで式(1)を最小化する問題に定式化した.

$$\min z = \sum_{n=1}^N C^n \{U^n + V^n + 1 - (1/\alpha^n)\} \quad (1)$$

s. t.

$$U_{t-1}^n + Y_{t-1}^n - X_t^n - U_t^n = 0 \quad (n=1, 2, \dots, N; t=1, 2, \dots, T) \quad (2)$$

$$V_{t-1}^n + X_{t-1}^n - Y_t^n - V_t^n = 0 \quad (n=1, 2, \dots, N; t=1, 2, \dots, T) \quad (3)$$

$$X_t^n = \min \begin{cases} U_{t-1}^n + Y_{t-1}^n \\ \beta_t^n \\ \lfloor (\alpha^k V_{t-1}^k + W_{t-1}^k + \alpha^k X_t^k) / (e^{k,n} \alpha^n) \rfloor \\ \text{(all } k \in P(n)) \\ Q^n - \sum_{i=1}^t X_i^n \\ \text{(} n=1, \dots, N; t=1, \dots, T) \end{cases} \quad (4)$$

$$\alpha^k V_{t-1}^k + W_{t-1}^k + \alpha^k X_t^k \geq e^{k,0} \alpha^0 X_t^0 \quad (\text{all } k \in P(0); t=1, \dots, T) \quad (5)$$

$$\begin{cases} Y_t^n = \lceil (e^{n,s(n)} \alpha^{s(n)} X_t^{s(n)} - W_{t-1}^n) / \alpha^n \rceil \\ \text{(} n=1, \dots, N; t=1, \dots, T) \\ Y_0^n = 0 \text{ (} n=1, \dots, N) \end{cases} \quad (6)$$

$$W_{t-1}^n + \alpha^n Y_t^n - e^{n,s(n)} \alpha^{s(n)} X_t^{s(n)} - W_t^n = 0 \quad (n=1, \dots, N; t=1, \dots, T) \quad (7)$$

$$U_t^n \geq 0 \text{ (非負整数 } (n=1, \dots, N)) \quad (8)$$

式(1)~(8)の問題は非線形計画問題であり, 直接, 解を得ることは困難である. Bitran and Chang は, この問題に追加の条件を付与して, 混合整数計画問題に変換しさらに線形計画問題へ近似する方法を示している. Watanabe and Hiraki[17]は, Bitran and Chang のモデルをもとに, ロット生産工程を含む多段工程にかんばん方式を導入して整数計画問題に定式化している.

Hiraki et al.[18]は, Bitran and Chang のモデルをもとに, 相互補完システムを最終組立工程, 輸送工程, 構成部品組立工程からなる 3 段階生産・在庫・輸送システムと把握し, 2 国間での構成部品の生産・在庫・輸送計画を立案するための数式モデルを整数計画問題に定式化した. また, Hiraki, Ishii and Katayama[19]は, 文献[18]で構築したモデルを基礎に, ある 1 つの参加国の立場に立って, 引張り型指示方式により他の参加国から構成部品を調達する生産・在庫・輸送計画モデルを整数計画問題に定式化している.

4. 相互補完国際物流システム

4.1 相互補完システムの輸送方法

相互補完システムを双方向ネットワークシステムと把握するとき, 複数の生産拠点を巡回する輸送方法には, 様々な方法が考えられる. Su and Hiraki[20]は, 代表的な輸送方法として, (1)単純往復輸送法, (2)単純循環輸送法, (3)巡回配送法, (4)巡回集荷法, (5)積み替え輸送法, の 5 つの方法に分類している. ASEAN 5 カ国 (シンガポールを物流拠点とする) で, 単純往復輸送法と積み替え輸送法を採用するときの輸送方法は, 7 種類・35 通りが考えられる. どの方法を採用するかは, 評価基準により異なるが, 所要輸送機器数を評価基準としたときの計算方法が[21]に示されている.

4.2 相互補完国際物流システム

経済活動のグローバル化と情報通信技術の進歩に伴い, わが国自動車産業が ASEAN 諸国に構築した構成部品・部品の相互補完システムは, 製品市場を域外に

求め、その形態を変えつつある。ASEAN 域内での構成部品・部品の地域間物流から、日本、北米、欧州、アジア・オセアニアの4極間での国際分業ネットワーク化が進んでいる。需要のあるところで生産するという「生産の現地化」と、オープンドアポリシーに基づく構成部品・部品の「世界最適調達」により、物流ネットワークが拡大し、物流コストが増大している。国際物流では必然的にリードタイムが長くなり、それに伴う在庫の増加を招くので、相互補完国際物流システムに電子かんばんを利用した JIT 生産方式を導入して、トータルリードタイムの短縮と在庫の削減を図る物流業務の合理化が進められている。

5. あとがき

本稿では、相互補完国際物流システムをテーマに、(1) ASEAN 諸国に構築された、多国間で構成部品・部品を分担して生産し、相互に供給しあう生産システムである、相互補完システム出現の背景にふれ、(2) ASEAN 諸国に構築された相互補完システムを対象に、JIT 生産方式に基づく引張り型指示方式、かんばん方式を適用した場合の生産・輸送指示モデル、数理計画モデルに関するいくつかの研究を紹介した。

自動車産業は、今、世界的規模で再編が進んでいる。また、日・米・欧の世界3大市場にアジア・オセアニア市場が加わり、4大市場間の生産・物流ネットワークが構築されている。電子かんばんを利用した、JIT 生産方式の理念に基づくグローバルな相互補完システムを構築する必要がある。

謝辞 本研究をすすめるにあたり、平成12年度・13年度の2年間、日本OR学会創立40周年記念事業「統合オペレーション」特別研究プロジェクト、特設G7「国際協力による相互補完システムと管理技術の移転」として助成を受けました。また、特設G7のメンバーから、貴重なご意見・ご指摘をいただきました。ここに記して、深甚の謝意を表します。

参考文献

- [1] FOURIN 編集, 「トヨタグループの'90年代世界戦略の展望」, FOURIN (1990).
- [2] FOURIN 編集, 「1999 アジア自動車産業」, FOURIN (1999).
- [3] FOURIN 編集, 「2000 アセアン・台湾自動車部品産業」, FOURIN (2000).
- [4] 小野桂之介, 「海外生産における経営意思決定」, 東洋経済新報社 (1984).
- [5] 笠松宏行, 太田雅晴, 人見勝人, “多国籍企業の生産・輸送計画に関する研究”, 日本経営工学会誌, Vol. 40, No. 4, pp. 225-236 (1989).
- [6] Katayama, H., Kawatsu, W. and Hirakawa, Y., “On Design of International Parts Supply Network System for Car Industries”, Proceedings of International Symposium on Logistics, pp. 191-200 (1993).
- [7] Katayama, H., Hiramatsu, H. and Hiraki, S., “Dynamic characteristics of an ASEAN-China global logistics system: a case investigation of car industry”, Proceedings of the 5th International Conference on Computer Integrated Manufacturing, pp. 147-159 (2000).
- [8] 村松林太郎, 「新版生産管理の基礎」, 国元書房 (1979).
- [9] Kimura, O. and Terada, H., “Design and Analysis of Pull Systems, a Method of Multi-stage Production Control”, *Int. J. Production Res.*, Vol. 19, No. 3, pp. 241-253 (1981).
- [10] 宮崎茂次, 西山徳幸, “トヨタ生産システムにおけるかんばん方式の最適運用法”, 日本経営工学会誌, Vol. 38, No. 2, pp. 126-131 (1987).
- [11] Hiraki, S., Ishii, K., Takahashi, K. and Muramatsu, R., “The effects of transportation lead time and safety stock in international co-operative knockdown production systems”, *Production Planning and Control*, Vol. 1, No. 4, pp. 209-221 (1990).
- [12] Hiraki, S., Ishii, K., Takahashi, K. and Muramatsu, R., “Trade Off Analysis of Buffer Stock Versus Emergency Delivery in the Knock-down Production Systems”, *Engineering Costs and Production Economics*, Vol. 20, No. 2, pp. 129-138 (1990).
- [13] 平木秀作, 村松林太郎, “現地組立生産システムの部品調達方式に関する研究”, 日本経営工学会誌, Vol. 42, No. 1, pp. 30-36 (1991).
- [14] Hiraki, S., Ishii, K. and Katayama, H., “The Effects of Transportation Interval in Global Complementary Production Systems”, *Computer Integrated Manufacturing* (Eds. by Winsor, J., Sivakumar, A. I. & Gay, R.), World Science, Vol. 1, pp. 201-208 (1995).
- [15] Hiraki, S., “Comparative analysis of ordering models for an international co-operative global complementary production system”, *Int. J. of Production Economics*, Vol. 44, Nos. 1-2, pp. 105-117 (1996).
- [16] Bitran, G.R. and Chang, L., “A Mathematical Programming Approach to a Deterministic KANBAN

- System”, *Management Sci.*, Vol. 33, No. 4, pp. 427-441 (1987).
- [17] Watababe, N. and Hiraki, S., “A mathematical programming model for a pull type ordering system including lot production processes”, *Int. J. of Operations & Production Management*, Vol. 15, No. 9, pp. 44-58 (1995).
- [18] Hiraki, S., Watababe, N., Ishihara, Y. and Su, Y., “Modeling an International Cooperative Global Complementary Production System”, *Computers & Industrial Engineering*, pp. 205-208, Vol. 27, Nos. 1-4 (1994).
- [19] Hiraki, S., Ishii, K. and Katayama, H., “Mathematical Programming Approach to the International Cooperative Global Complementary Production Systems”, *Proceedings of the Pacific Conference on Manufacturing*, Vol. II, pp. 417-422, (1996).
- [20] Su, Y. and Hiraki, S., “A Study on Transportation Methods of Automobile Components in the ICGCPS”, *Computer Integrated Manufacturing* (Eds. by Singh, S. C. Lew & Gay, R.), Gintic, Vol. 1, pp. 123-134 (2000).
- [21] 平木秀作, “相互補完システムの輸送計画”, 日本生産管理学会第13回全国大会講演論文集, pp. 223-226 (2001).