

技術のモジュール化によるフレキシブルな工程設計 手法の開発に関する研究

A Study on Flexible Process Design through Technology Modularization

五月女 尚平¹, 嶋崎 善章¹, 三品 勉²

要旨

製造業において効率的な生産を実現するためには、先ずは工程設計段階での検討が重要である。一般に、選択可能な技術が多数あり工程が複雑な場合、最適設計は難しい。本研究は工程を必要機能で再構築し、各機能を ISM 法により技術の最適組合せとしてのモジュール化で実現させる新しい工程設計の手法を提案する。機能は個々の技術、および関連ノウハウ等で構成され、各工程で必要な働きをする。モジュール化は、複数の技術間における技術の補完性、代替性を考慮することを可能にし、またモジュール化することにより生産工程全体の構造も容易に把握することができるようになる。植物工場における工程設計を例に提案手法の適用性を確認した。

キーワード: 工程設計、機能、モジュール、ISM 法、補完性、代替性、植物工場

1. はじめに

工程設計とは製品の製造に関わる作業の流れを決定することと各作業を行うための生産設備を選定することを意味する[1]。また、工程設計は機械単位に処理を考える工程設計と機械より細分化された作業単位ごとに処理する作業設計に分類される[2]。本研究は機械単位の工程設計を考える。

工程設計に関する既存研究には加工工程と工作機械を Group Technology(GT)コードにより自動作成するシステム[2]、加工対象の情報を基に設備や加工順序を導くシステム[3]、知識ベース工程設計とジョブショップスケジューリングを統合した工程設計システム[4]、知識ベースに基づく推論機構やフ

¹秋田県立大学 ²福知山公立大学

レームワーク型知識表現を用いたエキスパートシステムによる工程設計方法[5]、[6]がある。これらの研究は複数の工程を対象に工程順序と生産設備の選択を行い、[2]、[3]は1工程1技術で導き、[4]～[6]は1工程において選択可能な技術が複数ある場合で導く。

作業工程に関する既存研究には研削加工の加工手順を決定するための工程設計エキスパートシステム[7]、プリント実装を対象にした作業工程および工程ごとの作業順序を自動作成するシステム[8]、加工時間、加工形状特徴を基に加工手順の工程を導くシステム[9]、[10]がある。これらの研究は単一の工程を対象に作業順序や加工順序を導き、[7]～[10]は1工程1技術で導く。

工程において採用可能な技術の数で見ると多くの研究は単一の技術であり、選択可能な技術が複数ある場合は少ない。また、これらの研究は工程に影響を与える空調や照明等を含め、総合的に工程を支える「機能」について十分に考慮されていない。

本研究では工程、機能、技術について次のとおり定義する。工程とは生産における具体的な作業のことである。機能とは生産を行うための基本的な能力のことである。技術とは工程、機能を実現するための働きやノウハウを総称している[11]。従来の工程設計では複雑な工程を構成する最適機能の組合せの検討は十分に行うことができない。しかし、本来工程は技術の影響を直接受けることから、機能を考慮した生産全体としての設計を行うことが重要である。そこで本研究は、機能を考慮した技術の組合せの観点から、1工程で複数の技術を考慮した工程設計手法を提案する。

提案する手法は、個々の技術を様々な設計目的に対応した評価基準で重みづけをすることで、目的に応じた技術の選択を可能とし、さらに技術間の補完性・代替性も考慮できるようにした。また、機能および補完性・代替性によって複雑に関係し合う技術の組合せと工程の順序を可視化するため、Interpretive Structural Modeling(以下 ISM)法を用いて技術間の関連性を有向グラフで表し、工程の階層を導いた。

2. 研究手法

2.1 ISM 法の概念

ISMはJ.W.Warfieldによって提唱された階層構造化手法の1つである[12]。この手法の特徴は要素間の関係を1と0で一対比較した行列で表現し、要素間の関連が視覚的に認識可能な多階層の有向グラフを作成できることである。

2.2 ISM 法の手順 ([12]、[13]より)

木下[12]、竹内・佐久間[13]を参考に説明する。

はじめに、 n 個の要素からなるシステム $S = \{S_1, S_2, \dots, S_n\}$ を考える。

次に S の要素関係を以下の $n \times n$ 関係行列 D で表現する。

$$D = (d_{ij}) \quad (i, j = 1, 2, \Lambda, n)$$

$$d_{ij} = \begin{cases} 1 & (S_i \text{は} S_j \text{に影響を与えるとき}) \\ 0 & (\text{それ以外の場合}) \end{cases}$$

また、このときの関係は直接的関係のみを示し、要素間の前提、因果、包含、主観などによって決定する。

関係行列Dに単位行列Iを加え、次の条件を満たす可到達行列Mを導く。

$$(D + I)^{k-1} = (D + I)^k = M$$

上記の計算過程では次のブール演算を用いている。

$$\begin{array}{cccc} 0+0=0 & 1+0=1 & 0+1=1 & 1+1=1 \\ 0 \times 0=0 & 1 \times 0=0 & 0 \times 1=0 & 1 \times 1=1 \end{array}$$

導出された可到達行列Mは、

$$M = (m_{ij}) \quad (i, j = 1, 2, \Lambda, n)$$

$$m_{ij} = \begin{cases} 1 & (S_i \text{は} S_j \text{に可到達のとき}) \\ 0 & (\text{それ以外の場合}) \end{cases}$$

のn×n行列で表現される。

さらに、可到達行列Iから可到達集合 $R(S_i)$ と先行集合 $A(S_i)$ を求める。 $R(S_i)$ と $A(S_i)$ は次式のように定義する。

$$R(S_i) = \{S_j \mid m_{ij}, i, j = 1, 2, \Lambda, n\}$$

$$A(S_i) = \{S_j \mid m_{ji}, i, j = 1, 2, \Lambda, n\}$$

つまり、 $R(S_i)$ は要素 S_i から可到達なすべての要素の集合で、 $A(S_i)$ は要素 S_i に可到達なすべての要素の集合である。

各要素の階層構造におけるレベルの決定を行うため、

$$R(S_i) = R(S_i) \cap A(S_i)$$

を満たす要素 S_i を求め、この要素を第1レベルとする。次に、第1レベルの要素を $R(S_i)$ 、 $A(S_i)$ の集合から取り除き、式(1)を満たす要素を再び求め、この要素を第2レベルとする。同様の手順を繰り返し、すべての要素のレベルが決まるまで行うことでシステムSの階層構造図が作成される。

本研究では、ISM法を用いて技術の要素で階層化された機能・工程を特に「技術工程」と呼ぶこととする。

3. 目的に応じた工程設計の方法論

3.1 前提条件

方法を適用する際に以下の条件を前提とする。

1. ある機能・工程において技術には互いに代替関係が存在するものがある。
2. 技術は機能・工程を最低限実現できる性能を持つ。
3. 複数の機能・工程を持ち合わせる技術にはその技術が主に利用される機能・工程に分類する。
4. 技術の性能については理解している。

3.2 手順

初めに、機能・工程数 m のシステムを考える。

Step1 機能・工程数 m のシステムにおいて機能・工程で選択可能な技術を n 個求める。

Step2 n 個の技術に対して、目的に応じた l 個の評価基準を設定し、次式を満たす任意の重み q_k を決定する。

$$\sum_{k=1}^l q_k = 1$$

ただし、重み q_k は重みが高いほどより重視する評価基準とする。

そして、目的に応じた技術の評価値 r_g は

$$r_g = \sum_{k=1}^l p_k S_g^k \quad g = 1, 2, \Lambda, n$$

で求められる。ここで、各技術の評価 S_g^k は k 番目の評価基準における g 番目の技術の評価を意味し、同一の機能・工程における他の技術との相対的な評価である。

Step3 各機能・工程で評価値 r_g が最大値になる技術をその機能・工程で適用する技術として選択

し、それを基に目的に応じた基本となる技術工程をISM法で導くことで階層構造を可視化する。

Step4 さらに n 個の技術に対して補完性、代替性を行列 C で示し、行列 C を基にISM法を行い、補完性、代替性を考慮した技術の関係を導く。そして、基本となる技術工程と補完性、代替性を示した技術の関係を統合した構造図を導く。このとき、 $n \times n$ 行列 C は次のとおり表現される。

$$C = (c_{ij}) \quad (i, j = 1, 2, \Lambda, n)$$

ただし

$$c_{ij} = 1 \quad (\text{補完性がある場合})$$

$$c_{ij} = c_{ji} = 1 \quad (\text{代替性がある場合})$$

$$c_{ij} = 0 \quad (\text{それ以外の場合})$$

ここで、補完性はある技術 i は技術 j の性能の一部を担うことを意味し、代替性はある技術 i を技術 j に変えても性能に差はないことを意味する。また、代替関係は別の機能・工程間で生じる。

Step5 補完性、代替性を考慮して機能・工程における技術の再評価を行う。この時、補完関係の技術は機能・工程を実現するかどうかを判断し、可能ならば機能・工程にその技術を取り入れ、不可能ならば取り入れない。また、代替関係にある技術は互いの機能・工程にその技術を取り入れる。

Step6 Step4 で導いた補完性、代替性の情報を含む構造図と Step5 における技術の再評価値を用いて、Step3 で得られた基本となる技術工程を再検討し、修正する。

4. 植物工場の工程設計における適用例

植物工場とは野菜や苗を中心とした作物を施設内で光、温湿度、培養液等の環境条件を制御して季節、場所に捉われず連続生産するシステム[14]である。工場では、生産に関連する技術が機能・工程をまたいで多岐にわたり、目的に応じてそれらを分類し、お互いの関連性を考慮しながら手作業で工程を設計することには困難が伴う。そこで、提案方法を適用し、工程順序や工程に関わる機能の関連性を明らかにし、工程設計を試みる。

まず、[14]~[17]を参考に、植物工場の機能・工程および技術を表 1 と表 2 にまとめた。

表 1 植物工場の機能・工程

M	機能・工程
1	植物工場形式
2	播種
3	栽培
4	照明装置
5	遮光装置
6	空調装置
7	制御装置
8	収穫
9	包装

ここで、播種、栽培、収穫、包装は植物工場の工程、他の要素は植物工場の機能と位置付けた。

Step1 上記の機能・工程における選択可能な技術を求めると表2になる。

表 2 植物工場の選択可能な技術

機能・工程	n	選択可能な技術
植物工場形式	1	太陽光利用型
	2	完全人工光型
播種	3	自動（センシング）
	4	手作業
栽培	5	NFT式水耕栽培システム
	6	DFT式水耕栽培システム
	7	噴霧耕システム
	8	ロックウール耕システム
照明装置	9	高圧ナトリウムランプ
	10	蛍光灯
	11	LED
遮光装置	12	自動（収納式ブラインド）
	13	なし（建物自体）
空調装置	14	ヒートポンプ式エアコン
	15	コイルファンユニット
	16	クーリングユニット（冷風ユニット）
制御装置	17	コンピュータ
	18	制御盤
収穫	19	自動（栽培バー反転押出）
	20	手作業
包装	21	自動（ロールフィルム）
	22	手作業

Step2 22個の技術に対して評価基準を基に評価する。ここで評価基準は低コスト性、安全性、省スペース性の3つを設定し同じ機能・工程内の複数の技術の間で相対的に評価すると表3が得られた。

表 3 植物工場の技術の重要度評価

	工場形式		播種		栽培				照明装置			遮光装置		空調装置			制御装置		収穫		包装	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
低コスト	0.4	0.6	0.6	0.4	0.4	0.2	0.3	0.1	0.4	0.4	0.2	0.6	0.4	0.5	0.2	0.3	0.4	0.6	0.6	0.4	0.5	0.5
安全性	0.3	0.7	0.5	0.5	0.3	0.2	0.4	0.1	0.3	0.3	0.4	0.3	0.7	0.5	0.2	0.3	0.5	0.5	0.6	0.4	0.6	0.4
省スペース	0.4	0.6	0.3	0.7	0.4	0.3	0.1	0.2	0.2	0.3	0.5	0.5	0.5	0.4	0.1	0.5	0.5	0.5	0.3	0.7	0.3	0.7

評価項目は対象とする工程の目的により異なり、その重要度もまた考慮しなければならない。重要度は評価項目の重みとして扱われる。今回の例では工程設計目的を低コスト、安全性、省スペースの順に重視するとし、評価基準をそれぞれ $q_1 = 0.6$, $q_2 = 0.3$, $q_3 = 0.1$ とした。

したがって各技術における評価を S_g^k とすると技術の評価値 r_g は

$$r_g = \sum_{k=1}^3 q_k S_g^k \quad g = 1, 2, \Lambda, 22$$

で求められ、結果は表4のとおりとまとめられる。

表 4 低コスト重視における技術の評価値

	工場形式		播種		栽培				照明装置			遮光装置		空調装置		制御装置		収穫		包装			
	重み	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
低コスト	0.6	0.4	0.6	0.6	0.4	0.4	0.2	0.3	0.1	0.4	0.4	0.2	0.6	0.4	0.5	0.2	0.3	0.4	0.6	0.6	0.4	0.5	0.5
安全性	0.3	0.3	0.7	0.5	0.5	0.3	0.2	0.4	0.1	0.3	0.3	0.4	0.3	0.7	0.5	0.2	0.3	0.5	0.5	0.6	0.4	0.6	0.4
省スペース	0.1	0.4	0.6	0.3	0.7	0.4	0.3	0.1	0.2	0.2	0.3	0.5	0.5	0.5	0.4	0.1	0.5	0.5	0.5	0.3	0.7	0.3	0.7
r_g	0.37	0.63	0.54	0.46	0.37	0.21	0.31	0.11	0.35	0.36	0.29	0.5	0.5	0.49	0.19	0.32	0.44	0.56	0.57	0.43	0.51	0.49	

Step3 各機能・工程で評価値 r_g が最大になる技術を各機能・工程から選択すると、工程設計の目的に合致する。これをまとめると表5となる。

表 5 低コスト重視における各機能・工程での選択技術

機能・工程	n	選択技術
植物工場形式	2	完全人工光型
播種	3	自動（センシング）
栽培	5	NFT式水耕栽培システム
照明装置	10	蛍光灯
遮光装置	12	自動（収納式ブラインド）
空調装置	14	ヒートポンプ式エアコン
制御装置	18	制御盤
収穫	19	自動（栽培バー反転押出）
包装	21	自動（ロールフィルム）

そして、選択された技術を基に目的に応じた基本となる技術工程をISM法で導く。ここで、選択技術の関係行列は表6になり、技術 i は技術 j に影響を与えるとき行列の要素が1となり、工程の順序を示す。

表 6 低コスト重視における技術の関係行列 D

関係行列	2	3	5	10	12	14	18	19	21
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	1	0	1	0	0	0	0	0	0
5	1	0	0	0	0	0	0	1	0
10	1	1	1	0	0	0	0	0	0
12	1	1	1	0	0	0	0	0	0
14	1	1	1	0	0	0	0	0	0
18	1	1	1	1	1	1	0	1	1
19	1	0	0	0	0	0	0	0	1
21	1	0	0	0	0	0	0	0	0

ISM 法の手順に従って低コスト重視の植物工場の基本となる技術工程を求めると図 1 になる。

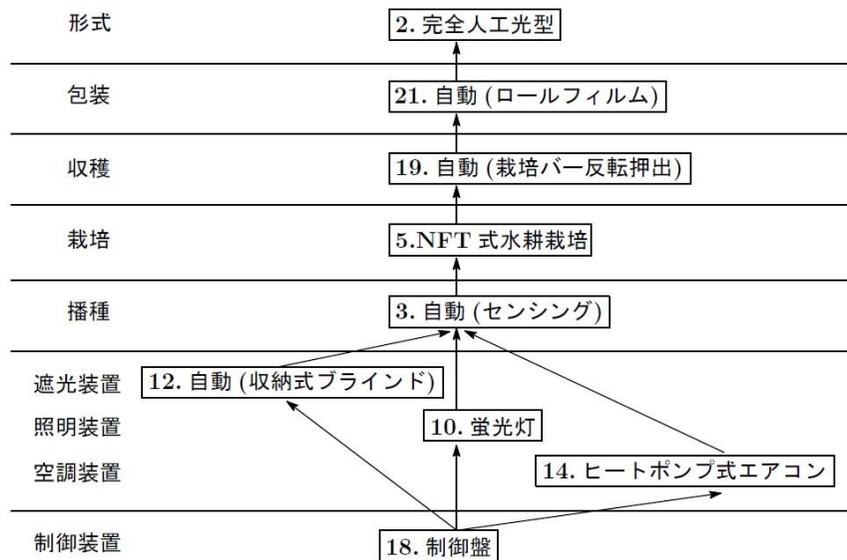


図 1 低コスト重視の植物工場の基本となる技術工程

図 1 の区切り線は階層を表し、矢印の方向に進むに従い上位の層に移ることを表す。

したがって、図 1 より 3.自動(センシング)、5.NFT 式水耕システム、19.自動(栽培バー反転押出)、21.自動(ロールフィルム)の工程に関わる技術は工程の順序そのものとなり、機能に関わる技術(10,12,14,18)よりも上層に位置する。このことから工程に関する技術に対して蛍光灯等の機能に関する技術が支えることが分かる。また、2.完全人工光型は植物工場全体のタイプを示すため、最上層になったと考える。

Step4 植物工場の 22 個の技術に対して補完性、代替性を行列 C で示すと表 7 を得た。

表 7 植物工場の技術の補完性、代替性

C	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
10	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0

さらに関係行列 C に ISM 法を用いて、技術の補完性、代替性の関係を示す階層図を求めると図 2 を得る。

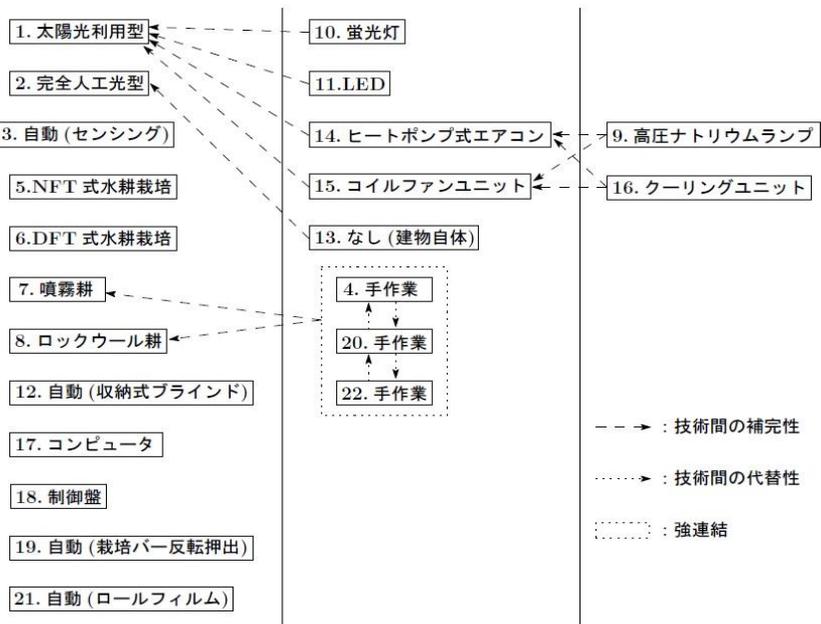


図 2 植物工場の技術の補完性、代替性を示す階層図

図 2 の破線の矢印は補完性の関係を表し、点線の矢印は代替性の関係を表す。

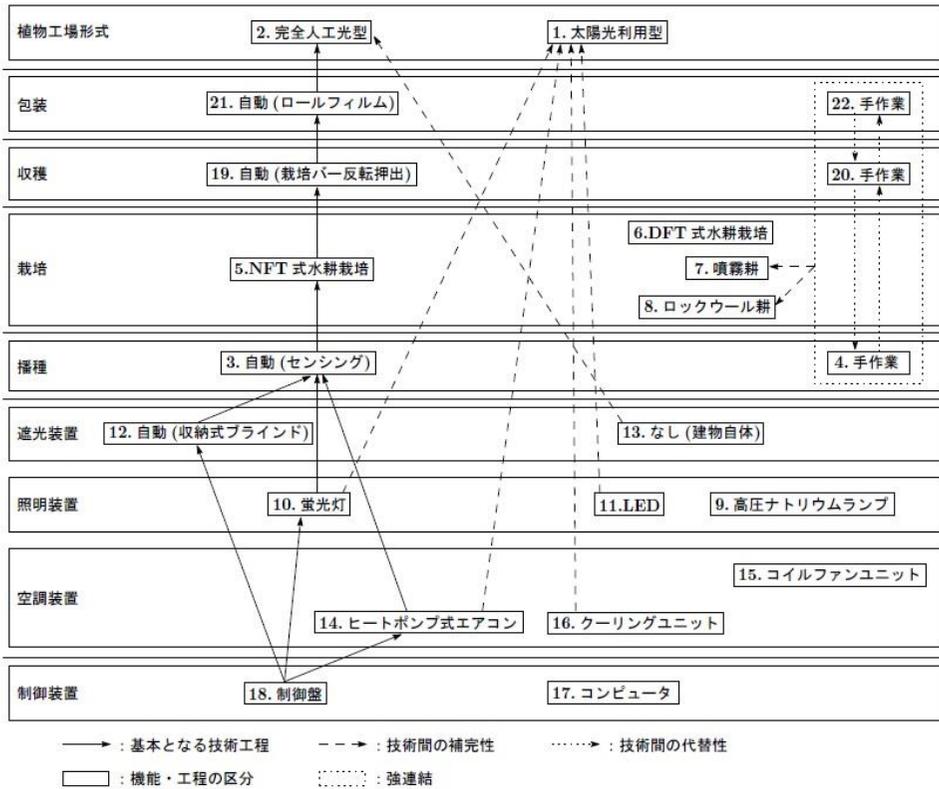


図 3 技術の補完性、代替性の関係と基本となる技術工程を示した構造図

図 3 は図 1 と図 2 をさらに統合させた構造図で、実線の矢印が基本となる技術工程を表す。

Step5 補完性、代替性を考慮して機能・工程における技術の再評価をすると表 8 のようになる。

表 8 低コスト重視における補完性、代替性を考慮した技術の評価値

	工場形式		播種				栽培				照明装置				遮光装置		空調装置				制御装置				収穫				包装			
	重み	1	2	3	4	20	22	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	9,16	17	18	4	19	20	22	4	20	21	22			
低コスト	0.6	0.4	0.6	0.35	0.2	0.2	0.25	0.4	0.2	0.3	0.1	0.4	0.4	0.2	0.6	0.4	0.35	0.15	0.5	0.4	0.6	0.25	0.3	0.2	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25			
安全性	0.3	0.3	0.7	0.25	0.25	0.25	0.25	0.3	0.2	0.4	0.1	0.3	0.3	0.4	0.3	0.7	0.4	0.15	0.45	0.5	0.5	0.2	0.4	0.2	0.2	0.2	0.2	0.4	0.2			
省スペース	0.1	0.4	0.6	0.1	0.3	0.3	0.3	0.4	0.3	0.1	0.2	0.2	0.3	0.5	0.5	0.5	0.35	0.1	0.35	0.5	0.5	0.3	0.1	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3			
r_{ij}^1		0.37	0.63	0.3	0.23	0.23	0.26	0.37	0.21	0.31	0.11	0.35	0.36	0.29	0.5	0.5	0.37	0.15	0.47	0.44	0.56	0.24	0.31	0.21	0.24	0.24	0.24	0.24	0.3	0.24		

ここで、表 8 は補完性、代替性を考慮しているため、機能・工程によっては表 3 で含まれなかった技術が現れているのが分かる（例：表 8 の播種工程における技術 20 と 22）。

また、14.ヒートポンプ式エアコンの補完関係にある 9.高圧ナトリウムランプと 16.クーリングユニット(冷風ユニット) は共に導入することで空調装置の機能を担うことが可能であるため、16.クーリングユニットと 9.高圧ナトリウムランプを切り離さない技術として空調装置で考慮している。一方で、1.太陽光利用型の補完関係にある 10.蛍光灯、14.ヒートポンプ式エアコン等は植物工場の形式という機能・工程における概念の範疇に直接当てはまらないため、植物工場形式にこれらの技術を考慮せず再評価する。そして、22.手作業は 20.手作業、4.手作業において代替関係があるため、それぞれの機能・工程にこの技術を含ませる。

Step6 図3と表8を用いて、図1の基本となる技術工程を再検討し修正すると図4になる。

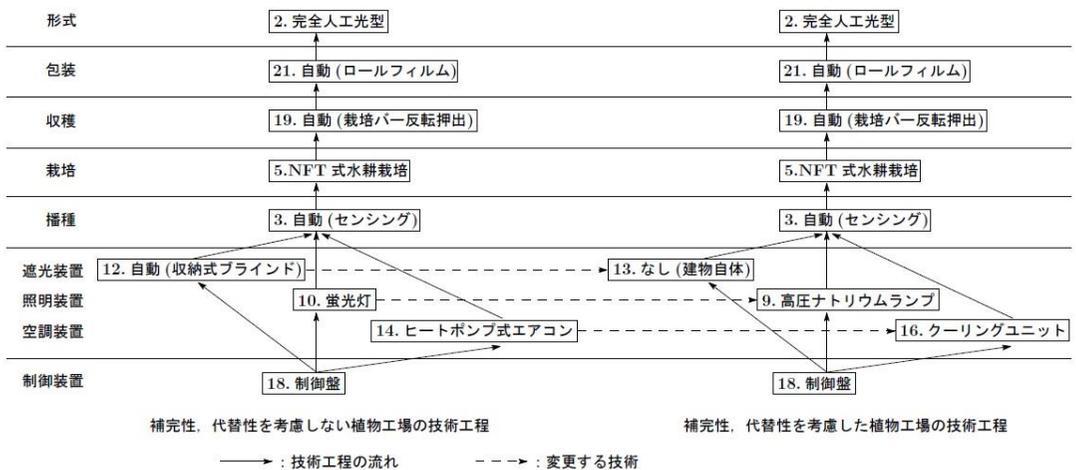


図 4 補完性、代替性を考慮したコスト重視の植物工場の技術工程

再検討により変更された技術は次のとおりである。

- 技術12→技術13：機能・工程の上位にある工場形式が完全人工光型の密閉空間であることから遮光装置を必要とせず、表8における評価も同等であるため。
- 技術10→技術9ならびに技術14→技術16:9.高圧ナトリウムランプと16.クーリングユニット(冷風ユニット) をセットで用いることで14.ヒートポンプ式エアコンと10.蛍光灯の性能を代替できるため。

この手順で低コスト重視の技術工程を導いた。補完性、代替性を考慮しない場合の技術工程の評価値 r_g と比較すると、3.67 から 3.785 に値が 0.115 増加していることから補完性、代替性を考慮することで工程が効率化できることが確認された。

5. おわりに

本研究では機能を考慮した技術の組合せの観点から、目的に応じた技術工程を設計する方法を提案した。提案方法は、1と0の一対比較の行列を用いることで、技術間の補完性、代替性も考慮することを可能とした。さらに提案方法を植物工場の例に適用し、その有効性を確認した。

今後の課題として、補完性や代替性のほかに技術間の負の関係、つまりその技術があることで弊害が出てくる関係を考慮して技術の関係を導くことが挙げられる。また、機能・工程間や技術間の関係を1か0の2値関係ではなく、影響度を考慮して0から1の範囲で導くことが挙げられる。さらに、低コスト、安全性などの評価基準は、より客観的に比較できる指標を使うことで、実用により即した工程設計ができるようになると思う。

《参考文献》

- [1] 人見勝人：生産システム工学第2 版，共立出版（1990）
- [2] 福田好朗：GT による自動工程設計システム，日本経営工学会誌，Vol.37, No.4, pp.211-217（1986）
- [3] 杉村延広，SUYOTO，田中毅：ホロニック生産のための工程設計システムに関する研究(第1報，システムの基本構成と加工フィーチャの認識)，日本機械学会論文集(C編)，Vol.65, No.633, pp.2129-2134（1999）
- [4] 岩田一明，福田好朗：多種極少量生産のための動的工程設計の提案，精密工学会誌，Vol.54, No.12, pp.126-131（1988）
- [5] 雨宮俊幸：造船CIMSのための工程設計システムの構築，日本造船学会論文集，Vol.168, pp.629-638（1990）
- [6] 藤本英雄，山本秀彦：生産設備設計における工程設計エキスパートシステム(フロー型生産ライン部品に対する知識表現)，日本機械学会論文集(C編)，Vol.54, No.508, pp.3149-3154（1988）
- [7] 長坂一徳，北口嘉亮，松原厚，山路伊和夫，垣野義昭，中川平三郎，喜田義宏：グライインディングセンタによる研削加工の工程設計用エキスパートシステムの開発，精密工学会誌，Vol.63, No.7, pp.1007-1011（1997）
- [8] 小林秀明，大成尚，荒井良尚，高橋志乃：プリント板実装における作業手順決定問題，日本経営工学会誌，Vol.43, No.5, pp.315-320（1992）
- [9] 井上和，岸浪建史，田中文基：加工形状特徴の依存性に着目した工程設計に関する研究(第一報) -加工形状特徴の依存性の表現とシステムの基本的な考え方-，精密工学会誌，Vol.73, No.4, pp.487-491（2007）
- [10] 笠原和夫，石森茂，池上敦子：最短経路問題の解法を利用した加工工程設計支援システムの開発(第1 報)，精密工学会誌，Vol.76, No.10, pp.1188-1193（2010）
- [11] 三品 勉：活性あきた MOT試論，秋田魁新報社（2012）
- [12] 木下栄蔵：わかりやすい意思決定論入門-基礎からファジィ理論まで-，近代科学社（1996）
- [13] 竹内俊彦，佐久間章行：問題提示型試験における援用システムに関する研究，日本経営工学会誌，Vol.53, No.3, pp.190-200（2002）
- [14] 高辻正基：図解よくわかる植物工場，日刊工業新聞社（2010）

- [15] 食品工業編集部：植物工場第3次ブームにおける施工事例と新技術，光琳（2010）
- [16] 社団法人日本施設園芸協会・日本養液栽培研究会：養液栽培のすべて植物工場を支える基本技術，誠文堂新光社（2012）
- [17] 池田英男：植物工場ビジネス低コスト型なら個人でもできる，日本経済新聞出版社（2010）