

# 設計作業の内部循環に起因する手戻りの削減に関する研究\*

(要求・定義・確認モデルによる設計プロセス最適化のための一アプローチ)

## Reduction of the reworks related to the internal iteration in the design process (A methodology to optimize the design engineering process using RDC model)

中沢俊彦<sup>\*1</sup> , 清水剛<sup>\*2</sup>

(Toshihiko Nakazawa) (Takeshi Shimizu)

DSM (Design Structure Matrix) is the methodology to visualize the interdependencies between the works in the engineering process. This expression provides the way to find out an optimal sequence of the engineering process. In order to find out the optimal work order for the product design, this paper propose to resolve the design process using RDC (Requirement - Definition - Confirmation) model. With the set of design definitions resolved by RDC model and their interdependencies indicated on the DSM, the optimal design sequence can be computed by minimizing the rework risks and seeking for the integration of the loop groups. This is one of the approaches to find out the optimal engineering process.

.....

**Key Words** : design structure matrix, rdc model, definition, the engineering process, iteration  
the repetitive dependency, rework risk

### 1. はじめに

製品設計は目標機能を実現するために、形状や材質、使用部品やそれらの配置といった製品を成立させるための個々の設計項目を相互にバランスを取りながら定義していく作業である。これらの定義は相互に依存関係を持っており、例えば、電気製品の筐体の大きさの決定という定義とその内部に納まる部品形状の決定という定義の間には、部品が納まるように筐体の大きさを決定しなければならないという筐体の定義から部品形状の定義への依存関係が、与えられた条件の優先度によっては、定められた筐体に納まるように部品形状を決定しなければならないという逆方向の設計作業の依存関係が存在する。

このような設計作業間の依存関係はデザイン・ストラクチャー・マトリックス(以下DSM)<sup>1)-3)</sup>と呼ばれる方法により整理し明らかにすることができる。

一例として、A, B, C, D, E, Fという順序

で進む設計作業の依存関係をDSMに整理した例を表1に示す。

Table 1: DSM (As Is)

	<	≡	∪	∩	∩	∩
A	x					
B		x				
C			x			
D				x		
E					x	
F						x

このDSMでは、縦軸の一行目に並べられた作業が横軸の一行目の作業に依存している場合、その交差セル上に印を示すことによりその依存関係を表している。この表には、作業Aは作業Bの結果に、作業Bは作業Aと作業Dの結果に、作業Cは作業Bと作業Fの結果に、作業Dは作業Cの結果に、作業Eは作業Fの結果に、作業Fは作業Eの結果にそれぞれ依存していることが示されている。

ここで、このDSM上の各設計作業A, B, C, D, E, Fは作業の実施順に並んでいるのであるか

\* 原稿受付: 2003 年 9 月 25 日

\*1 正会員, 日本アイ・ピー・エム(株) PLM コンサルティング  
(〒103-8510 中央区日本橋箱崎町 19-21)

\*2 非会員

ら，左上から右下へと斜めに横切っている×印線の右上側に示された依存関係は，設計プロセス上，上流の作業が下流の作業結果に依存していることを示している<sup>4)</sup>．例えば，作業Bが実施されたとき，作業Bがその結果に依存している作業Dは未だ実施されていない．従って，この場合，作業Bは作業Dの結果を仮定して実施しなければならないことになる．作業がDへ進むと，Dの実際の作業結果が得られるので，Dの結果を仮定して実施した作業Bに対して，実際のDの結果を受けてその妥当性を検証する必要性が生じる．この反復は，Bの実施時点で立てたDの結果に対する仮定を実際のDの結果が逸脱した場合において，Bに手戻りを発生させる．このようなことから，この反復依存関係は手戻りの発生リスクと考えることができる．

この反復により作業Bに手戻りが発生すると，作業Bに依存している作業AやCに対しても手戻りが発生する可能性がある．このように，反復による手戻りリスクはDSMの斜め線右上で発生し，斜め線左下の依存関係の中に伝播していくのである<sup>5)</sup>．

表1のDSMにおいて斜め線右上の反復依存関係は4つ存在するが，これらの反復依存関係の内，AのBへの依存，BのDへの依存，EのFへの依存は，それぞれA→B→A，B→D→C→B，E→F→E（矢印は依存の方向を示す）という循環する依存関係の一部を成すものであり，CからFへの反復依存関係のみが循環しない直線的な依存関係である．このように，DSM上に現れる反復依存関係には循環するものと直線的なものとの二つのタイプがあり，この内，直線的なものは作業手順を変えることによって，DSMの斜め線左下に移動させる（すなわち反復依存関係を解消させる）ことができる．表2にその手順の一例を示す．

Table 2: DSM (Rearranged)

	◁	⊖	⊓	⊥	⊃	▷
A	x					
B		x				
E			x			
F				x		
C					x	
D						x

この表では，表1において斜め線右上に存在したCからFへの依存関係を示す印が斜め線左下へ移動し，反復依存が解消されていることがわかる．

## 2. 理想的な設計手順の導出

DSMの作成に当たっては，一般的には，WBS (Work Breakdown Structure)<sup>6)</sup>によって分解された企画や設計，検証を含む製品開発プロセス内の作業を対象とするか，または製品の構成部品を対象としたマトリックスを作成し，設計作業手順の最適化が試みられてきた<sup>7)~9)</sup>．これらは，いずれも製品開発上の比較的大きな管理作業単位を対象とした作業順序の再配置が研究対象となっている．

本研究は，さらに細かな設計作業に注目し，DSMを用いた最適設計作業手順の導出を目指すこととした．

この実施にあたり，製品開発プロセス分析手法であるRDCモデル<sup>10)</sup>の定義間関係図の応用と，さらに手戻りリスク数と循環サイズという最適設計手順を探索する2つの指標を導入し，これらを最小化することにより，外部よりの影響を排除した理想的な設計手順の導出を行った．

### 2.1 手戻りリスク数の計測

表1のDSMには微視的に見ると，斜め線右上の依存関係を起点とするB→A→B，D→B→A（及びD→B→C→D），F→C→D→B→A，F→E→F→C→D→B→A（ここでの矢印は手戻りリスクを発生させる依存方向とは逆方向の情報の流れを示す．また，情報の向かい先=被反復依存作業=手戻りリスクが発生する作業には下線を附す．但し，起点となる作業はカウントしない）の反復依存関係の連鎖が存在し，A～Fの作業に計16回の手戻りリスクを発生させる．（手戻りリスクはDSMの斜め線右上にある依存関係が出発点となり，依存関係の連鎖に沿って伝わる変更リスクである．例えば，表1のAからBへの反復依存関係においては，作業がBに進みBが確定するとAに手戻りリスクが発生する，この手戻りリスクにより実際にAに変更が生ずると，再度，Aに依存しているBに手戻りリスクが発生する．従って，この反復依存関係はA，Bそれぞれに手戻りリスクを発生させることになる．このとき，AB間の無限循環は考えず，それぞれ1回ずつ計2回の手戻りリスクが発生したとカウントすることとした．この手戻りリスクは作業Bの実施時点で発生するので，B以降の作業がA，Bに依存していても影響を受けない．）

作業手順をA，B，E，F，C，Dとした表2に示される作業間の依存関係は表1と全く同じであるが，この表に存在する手戻りリスクの生ずる作業の合計数（手戻りリスク数）は，B→A→B，F→E

F, D B A (及び D B C D) の 8 回である。

先に記したように各作業に発生する手戻りリスクが 100% 変更を発生させるわけではないので、実際の変更のリスクは手戻りリスクの起点となる作業から遠くなればなるほど減少するものと考えられる。従って、手戻りリスクの厳密な定量化には、このリスクの減少度を考慮する必要があるが、この係数は今後の研究テーマとし、本稿では、後述の循環内に存在する手戻りリスクを含め全ての手戻りリスクを同列に扱い、単純にその数を指標とすることとした。

## 2. 2 循環のグループ化

前章で述べたように表 1, 表 2 には A B A, B D C B, E F E という循環する依存関係が 3 つ存在するが、これらの依存関係は図 1 に示すように、2 つの循環グループに分類することができる。

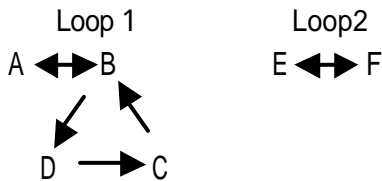


Fig 1: Loop Group

ここで、A B A や E F E のように循環の始点を含め 3 作業目で一巡するような循環を 3 階層の循環、B D C B のように 4 作業で一巡する循環を 4 階層の循環と呼ぶことにする。

本研究では、この循環グループを DSM 上にも反映することとし、例えば、表 2 の DSM の 3 階層と 4 階層の循環を図 1 と同様に共通の番号を与えてグループ化し、表 3 のように表現することとした。

Table 3: DSM (Loop Group)

	1	2	3	4	5	6
A	x	1				
B	1	x				1
E			x	2		
F			2	x		
C		1			x	
D					1	x

この表現によって、グループ化された循環依存関係がプロセスの中にどのように分散しているかを知

ることができる。

図 1 と表 3 では 3 階層と 4 階層の循環を調べグループ化した。ここで 3 階層の循環は A B A, E F E の 2 つのみであり、階層の取り方によって循環グループに組み込まれる依存関係数も増減することに留意する必要がある。例えば、図 1 の Loop1 において、A と C の直接的関係は A と B や B と C の関係に比べると相対的に薄いと考えられ、どこまでの範囲を一つのグループと見なすか、つまり何回層までの循環を調べてグループ化するかは、グループ化の目的次第であろう。

## 2. 3 DSM 上での循環の集約

最も好ましい設計手順は DSM 上で斜め線右上に依存関係が存在しない、つまり反復依存関係の無い設計手順である。しかしながら、前節で示した循環が存在すると、どのような作業順序をもってしても、斜め線右上に依存関係が存在してしまう。そこで、それら右上にある依存関係を極力斜め線近傍に集約させ、循環する作業同士が近づくような作業順序を見出すことが次なる目標となる。循環する作業同士が DSM 上で近ければ、たとえ手戻りが発生してもそれは依存元作業の実施直後のことであり影響の及ぶ範囲が限定的と考えられるからである。

本研究では、斜め線右上の依存関係がどの程度斜め線から離れているか（循環サイズと呼ぶこととした）を測定し循環の集約度の指標とすることとした。例えば、表 3 の A から B への依存関係は、斜め線までの距離が 1 セル分であるので循環サイズ 1、B から D への依存関係は同様の測定により循環サイズ 4 とする。従って、表 3 における斜め線右上の依存関係の循環サイズ合計（総循環サイズ）は、E から F の 1 を加え 6 となる。総循環サイズが小さければ循環する作業の集約度が高いと判断することとした。

## 2. 4 総循環サイズと手戻りリスク数の関係

直感的には総循環サイズが小さくなればなるほど手戻りリスク数も減少すると感ずるが、実際にはそうならない依存関係の配置が存在する。例えば、表 4 の DSM の総循環サイズは 4、手戻りリスク数は D A B, D C D A B の 6 である。

ここで、総循環サイズを改善する作業手順を探索し表 5 を得た、ここでは総循環サイズが 3 と表 4 に比べ改善したものの、逆に手戻りリスク数は A B, D A B, C D A B, (及び C D C) の 7 へと増加してしまっている。

Table 4: Distance vs Risk (case 1)

	A	B	C	D
A	x			
B		x		
C			x	
D				x

Table 5: Distance vs Risk (case 2)

	B	A	D	C
B	x			
A		x		
D			x	
C				x

このことは、設計手順最適化の際、循環サイズまたは手戻りリスクの一方の指標のみを改善するのでは不完全な結果を招くことを示している。

## 2.5 RDCモデル

本研究では、DSM上に記載する設計作業の抽出にRDCモデルを使用することとした。RDCモデルを利用する理由は以下の2点である。

### 2.5.1 作業粒度について

まず、設計作業の循環を的確に捉えるためには、DSMに記載する作業の粒度についても注意を払わなくてはならないということがある。作業の粒度が荒すぎると、詳細作業間の依存関係が隠されてしまい、DSMから何らかの意味を読み取るのが困難になってしまう。例えば、表1の6つの作業を作業ABCと作業DEFの2つのみ分けてしまうと、表6に示すようにA, B, C, D, E, F個々の作業間の依存関係を内包した単なる3階層循環を有する一組の作業グループとなってしまう。

Table 6: Rough decomposition model

	ABC	DEF
ABC	x	1
DEF	1	x

このことを、電気製品の設計を、筐体と内部の機能部品の設計作業という2つの作業のみに分けることを例に考えてみる。この場合のDSMは表6と同様に循環依存関係が一組現れるだけのものになって

しまうことは容易に想像できる。筐体の、RDCモデルによって分解しうる、抜き角（金型）、肉厚（耐熱性）、補強リブ（強度）（カッコ内は適合項目）といった定義要素がそれらの依存関係を含めて全てこの一組の循環依存関係の中に内包され隠されてしまうのである。この、極端な例から理解できるように、DSMの有用性はそこに記載する作業の粒度に大きく影響されるのである。

RDCモデルでは、設計プロセスを適合項目という目的によって個々の定義要素に分解する。このように分解された定義要素は個別の目的を有する設計作業の微小単位であり、また、その個別の目的は、DSM上で容易に理解可能な名称を与える助けになる（定義要素以上に細かく分解すると、線や点といった作図上の構成要素になってしまい、ユニークで判別可能な名称を与えるのが困難になってしまう）。この特徴によって、DSM上で無理なく依存関係の関連付け作業を行えることが期待できるのである。

### 2.5.2 定義要素の適用

また、本研究ではRDCモデルにおける定義要素のみ、すなわち設計作業のみを対象としてDSMを作成した（RDCモデルではこのような定義要素のみによって構成されるDSMを定義間関係図と呼んでいる）。RDCモデルにおいて要求要素や確認要素として記述される製品企画や検証といった設計プロセスへの外部からの影響を考慮せず、定義要素のみを対象とすることにより、DSMに記載する作業要素を大幅に減らすことが期待できる上、外部要素を排除したことによって、純粋に設計作業間の依存関係のみによって成立する理想の手順を検討することができる。

## 2.6 コンフリクト

RDCモデルでは、定義間の相反するような依存関係（あちらを立てればこちらが立たずといった関係）はコンフリクトとして定義間関係図に表記することとしている。

本研究では、コンフリクトは3階層の循環依存関係の中でも、特に強い依存関係を持つものと捉え、そのような依存関係を定義間関係図の中で強調して太字で表現することでその位置を確認できるようにした。

## 3. 実施例

本稿では実際のケースとして、複写機の光学スキャナー部（図2にその概略図を示す）の設計手順

をRDCモデルによって分解し、理想的な設計手順の導出を試みた。

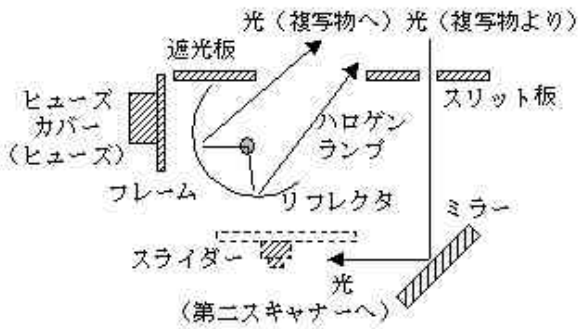


Fig 2 : Scanner of the copying machine

RDCモデルにより、本設計事例は、耐久性、組み付け性、周辺部品、金型、規格標準、機能、外観、安全性、リサイクル性、サービス性、コストという11の適合項目に対し、要求要素65、定義要素67、確認要素61の計193作業に分解された。表7は分解された定義要素(カッコ内は適合項目)を設計者が実際に行っている設計順序に従って配列し、依存関係を表記した定義間関係図である。ここでは3階層の循環のみを調べ、この直接的な依存関係による循環グループを番号で示している。さらにその中でコンフリクトは太字で表している。この表における総循環サイズは1930、手戻りリスク数は860となった(測定はプログラムにより実施した)。

次に、表7の斜め線の右上に位置する依存関係を斜め線の左下に移動するか、又は、斜め線に最も近くなるように定義要素の順序変更を行った。これは斜め線より右上の印を、単純に左下へ移動するか斜め線に近付けるように行と列を入れ替える操作を繰り返すことによって実施した(この操作を機械的に繰り返すプログラムによって実行した)。この入れ替え作業において、手戻りリスク数と循環サイズの双方が小さくなることを最適手順の検索条件とし、検索を実行した。図3にこの検索過程における循環サイズと手戻りリスクをプロットした散布図を示す。

この検索の結果、手戻りリスク数と総循環サイズ双方が小さくなる極値(図3参照)を最適手順として得られたのが表8である。この作業手順における循環サイズは512に減少したが、手戻りリスク数は722と微減に留まった。

#### 4. 考察

設計手順が最適化された表8において、ミラー、ハロゲンランプ、リフレクタといった光学スキャナー部を構成する主要部品ごとに適合項目と定義要素の並び方を観察すると、完全では無いものの、機能

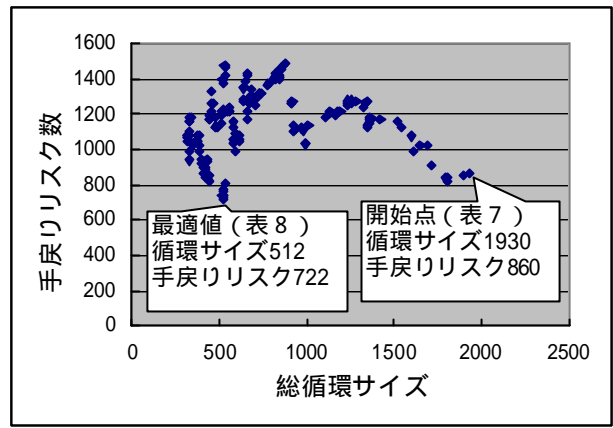


Fig 3 : Optimization path

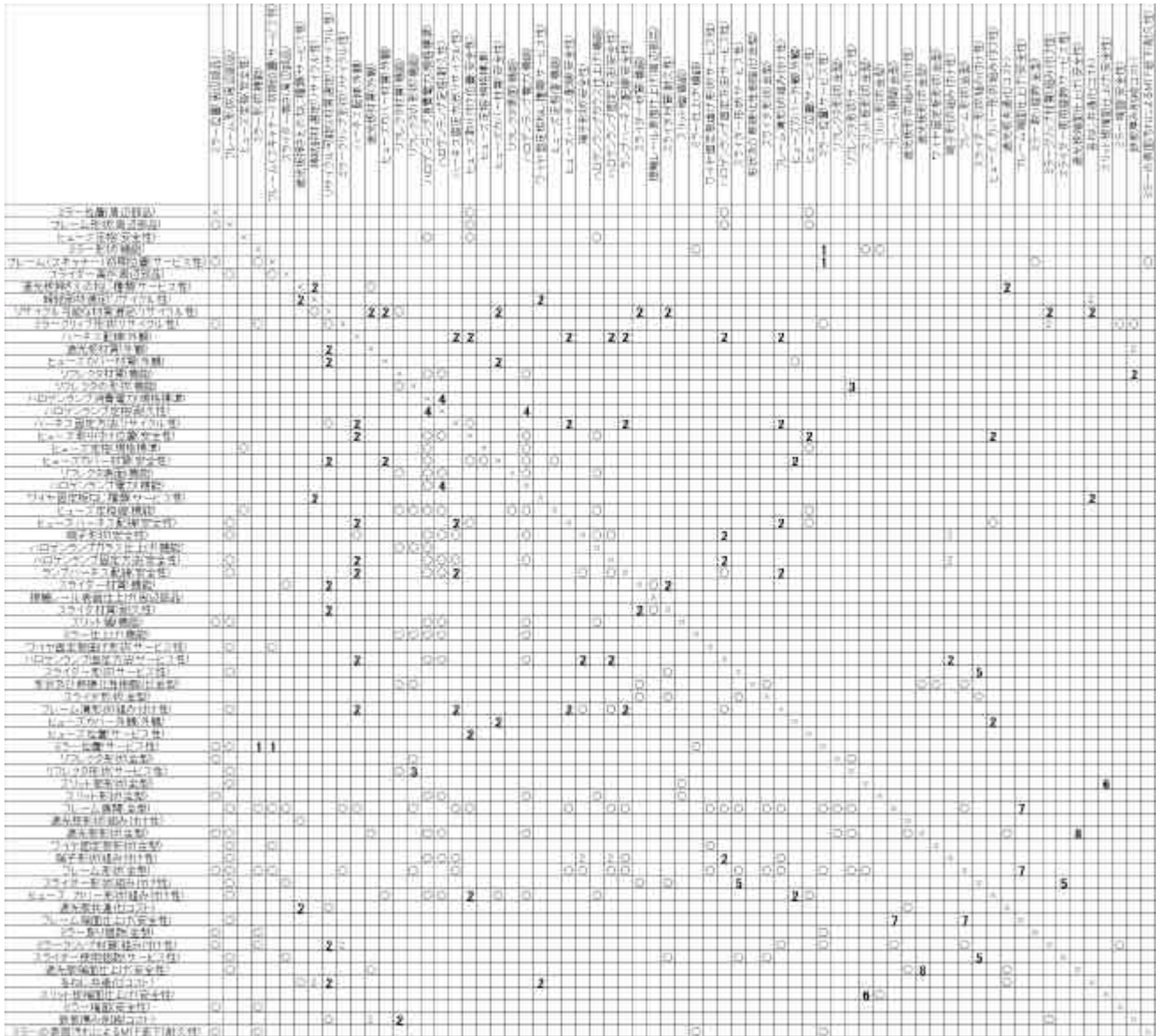
や規格といった適合項目が金型、サービス性、安全性といったレイアウトや形状、材質などに関連する適合項目よりも上流に位置付けられる傾向を見出すことができる。さらに、端子やミラークリップといった付属部品に関する定義要素はこれら主要部品のさらに下流に位置している。この手順は、PahlとBeitzにより示された、役割の明確化(仕様や規格への準拠) 概念設計(設計解原理の探索と機能構造の構築) 実態設計(レイアウト) 詳細設計(詳細部分の決定)と進む設計手順<sup>11)</sup>とも類似性が高いものと言うことができよう。

ハロゲンランプ、リフレクタ、ミラー、ヒューズなど同一の機能部品に対する定義要素はまとめて配置されており、ヒューズとヒューズカバーの様に空間的に隣り合う部品についても同じまとまりを構成している。これは、これらの定義要素群が設計プロセス上の同時期に規定されることが望ましいことを示すものであると理解することができる。

表7において表全体にわたって分散していたコンフリクトを含む循環は、表8ではグループごとに斜め線近傍に集約される傾向を示している。この集約は、上記と同様に、循環グループによって関連付けられた定義要素群も同時期に実施すべき作業グループであることを示しているものと考えられるが、循環グループ2は明らかに二箇所に分かれて集約しており、上流にはランプ等の電気部品とその関連部品、下流には遮光板、スライダ、固定板などの機械部品が配置される結果となった。実際のスキャナーの設計においても、この2つの設計作業グループは個別に検討作業が行われていることが、本分析を実施した設計者によって確認されており、この集約結果の妥当性を裏付けるものとなっている。



Table 7 : Definition relation diagram for scanner (As Is)



### 5. あとがき

本稿では、RDCモデルによる設計プロセスの分析とDSMによる手順最適化によって、理想的な設計手順が導かれる可能性を示した。本研究では定義要素間の依存関係や手戻りリスクは全て同じ強さと仮定して処理しているが、より厳密性を増すためには、依存関係やリスクに強弱をつける必要があり、これは今後の研究の課題である。

また、本研究では設計プロセスへの外部からのインプットである要求要素と確認要素を考慮しないことにより、理想的な設計手順を導いてきた。しかしながら、実際の製品開発では、予定外の要求要素や確認要素が設計手順をかく乱し、手戻りを発生させる外部インプットに起因した循環も存在するのであるから、より実践的な意味では、RDCモデルの要求、定義、確認3要素全てを考慮した最適化の研究

へと発展させることが必要となろう。

### 6. 参考文献

- 1) Steward, D.: The Design Structure System, A Method for Managing the Design of Complex Systems, IEEE Transaction on Engineering Management vol.28 (1981), 71-74
- 2) Smith, R.P., Eppinger, S.D.: Identifying Controlling Features of Engineering Design Iteration, MIT Sloan School of Management, Working Paper No.3348 (1995), 5-8
- 3) Browning, T.R.: Use of Dependency Structure Matrices for Product Development Cycle Time Reduction, The Fifth ISPE International Conference on Concurrent Engineering (1998), 1-8

Table 8 : Definition relation diagram for scanner(Optimized)

4 ) Osborne,S.M.: Product Development Cycle Time Characterization Through Modeling of Process Iteration , S.M. Thesis, MIT Sloan School of Management (1993), 18-22

5 ) Yassine,A., Joglekar,N., Braha,D., Eppinger,S., Whitney,D.: Information Hiding in Product Development The Design Churn Effect, MIT Sloan School of Management, Working Paper No.4333-02 (2002),7-10

6 ) Heldman,K. ( P M I 東京 ( 日本 ) 支部監訳 ): Project Management Professional, 翔泳社 ( 2003 ), 205-217

7 ) Rogers,J.L.: Reducing Design Cycle Time and Cost Through Process Resequencing, International Conference on Engineering Design ICED97 (1997), 1

8 ) Carrascosa,M., Eppinger,S.D., Whitney,D.E.: Using the Design Structure Matrix to Estimate Product Development Time, 1998 ASME Design Engineering Technical Conferences, DETC98/DAC-6013 (1998), 1-2

9 ) Yassine,A.A., Whitney,D.E., Zambito,T.: Assessment of Rework Probabilities for Simulating Product Development Processes Using the Design Structure Matrix (DSM), ASME 2001 International Design Engineering technical Conferences, DETC2001/DTM-21693 (2001), 6-8

10 ) 中沢俊彦: 要求・確認・定義モデルによる製品開発プロセスの分析, 設計工学, Vol138 No.12 (2003) 631-640

11 ) Pahl, G., Beitz, W., ( 設計工学研究グループ 訳 ): 工学設計 体系的アプローチ, 培風館 (1995), 43-50