OUKA
The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	制約指向に基づく基本配置設計支援システムの研究（第1報 ： 制約指向による基本アルゴリズム）
Author(s)	赤木, 新介; 藤田, 喜久雄
Citation	日本機械学会論文集 C編. 1990, 56(528), p. 2286-2293
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/2901
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

日本機械学会論文集(C編)
56巻528号(1990-8)

論文 No. 89-0995 A

制約指向に基づく基本配置設計支援システムの研究*
(第1報：制約指向による基本アルゴリズム)

赤木新介*1, 藤田喜久雄*2

A Layout Design System based on Constraint-directed Reasoning
(1st Report: The Fundamental Approach)

Shinsuke AKAGI and Kikuo FUJITA

A layout design of a system such as a power plant is a time-consuming and expertise-based task and needs to satisfy the spatial constraints among the elements composed of a design object. In this paper we propose a new general approach with two concepts; the constraint-directed reasoning based on the domain concept to operate the preliminary stage of layout design, and the generate and test procedure to deal with various kinds of layout specifications. From the above concepts, the layout specifications are generalized and classified into the four groups of constraints. The domain means here candidates for layout of a element, and the layout procedure is executed in the process of the generation, test and selection of the candidates considering each group of constraints. Moreover, we propose the concept of layout potential in order to reflect the global layout situation for the optimum of the layout result and the smooth layout operation. The proposed approach is composed of the general procedures and the individual specifications which can be represented with declarative form, and have the generality and the applicability to various kinds of layout design.

Key Words: Design Engineering, Artificial Intelligence, Layout Design, Constraint-directed Reasoning, Object-oriented Programming.

1. 緒言

各種の発電設備や化学プラントなどの大型のプラント設計においては，プラントを構成する各種構成機器の性能を発揮させ，かつ空間的な制約を満たすように，それらの位置関係を定めるいわゆる配置設計，なかでも基本配置設計が高い比率を占めている．このような設計は，設計に要する手間が非常に大きいことに加えて，熟練設計者への依存度が高いため，コンピュータの援用による省力設計への期待が大きい．一方，知識情報処理技術の発達には目覚しいものがあり，これを各種設計に援用して設計専門家に代わる設計支援システムを開発しようとする試みが注目を集めている(1)．配置設計においても，McDermott らによるコンピュータ部品の筐体への組み込みを行うＲ１(2)のほか，プラント設計やＶＬＳＩ設計を対象にしていくつかの試み(3)が行われている．しかし，これらの試みのほとんどは設計者の有する知識を表層的に単純なルールとして表現することに基本を置いているため，個別性が強く，保守・管理が容易ではないなどの点で，なお十分な成果が得られていないように思われる．これを克服するためには，基本配置設計という設計タスクの本質に基づいた汎用的な支援手法の確立が必要である．

本研究では，配置設計の過程を設計対象物を構成する要素間の空間的な制約条件を満足するようにそれらの位置を定める過程として理解した上で，知識情報処理技術の一つである「制約指向プログラミング(4)(5)」に基礎を置いた配置設計に対する方法論を確立し，それに従って，求められる空間的な制約などの設計要求と，それを満足する設計解を得るための設計機構とを明確に分離し，前者の宣言的な記述と後者の一般的で汎用性のある機能により配置設計を支援する手法を開発する．すなわち，基本配置設計におけるタスクを抽出して，各種の制約条件の種類や性質について検討した上で，対象の取り得る値の範囲が有限領域に限定できることに着目して，値域の概念(6)による制約指向を基本として採用し，さらに配置という複雑な問題を扱うために，いわゆる生成検査法を組み合わせることによって，基本配置設計の手法を確立する．これによっ

* 原稿受付 平成元年8月1日.
*1 正員，大阪大学工学部 (〒565 吹田市山田丘2-1).
*2 正員，大阪大学大学院.

て汎用的なシステム構築が可能となる．また，配置設計の過程を一般的に理解して客観的に記述することは設計方法論の立場からも重要な課題である[1]．

なお，本報では，本手法の基礎となる基本配置設計のタスクとそれに対するアルゴリズムなどについて示し，支援システムの構成については第2報で報告する．

2. 配置設計の特質と支援手法

2・1 配置設計の問題点と従来の支援手法　配置設計における問題点は，前述のように設計に要する手間が非常に大きく，また，熟練設計者への依存度が高いことであるが，これに加えて，設計処理の内容が明確に示しにくい点にある．このため，設計結果は単に「図面」として表現されるのみで，処理内容も明らかでなく，得られた結果に客観的な評価を下すことも容易ではない．また，従来のコンピュータの援用についても，設計結果の単なる作図に止どまり，設計自体の処理や評価については専ら設計者に依存している．

配置設計における方法論についても，問題がごく小規模で単純な場合には，数理計画法を適用することも可能である[7]が，現実の問題は複雑で規模も大きいことから，実際に適用することは困難となる．このため，近似解法としてヒューリステックスな解法が有効とされており，知識情報処理技術のひとつであるエキスパートシステムの手法を用いて，熟練設計者の有する経験的な配置知識を「if ── ，then ── 」という形式で表現することにより，実際の問題を扱うこともできるシステムが構築されつつある[2][3]．しかし，このような手法は，その解法が個々の配置問題に大きく依存し，設計者の有する表層的な知識をもとにしているため，設計対象が変わったり，新たな要素が加わったりした場合にそのままでは対応することができず，一般性や拡張性などの点で決して優れたものではない．これは，配置設計の根源にひそむ設計処理の内容が十分把握されていないことに原因があり，優れたシステムを構築するためには，設計者がどのようにして配置を行っているかを本質から理解することが必要である．

2・2 制約指向と配置設計　本研究では，以上のような問題点を解決する手法として，緒言でも述べたように制約指向[4][5]に基づいた手法を提案する．制約指向の考え方は，与えられた問題に対して，具体的な手続きを直接記述して解を求めるのではなく，解に求められる要求すなわち「制約」を記述した上で，問題の状況に応じて制約の記述から具体的な手続きを展開して解を得ようとするものであり，より一般的で適用性に優れた問題解決を目指したものである[5]．前節で述べた配置設計におけるヒューリステックスな解法の問題点は，配置手続きが直接記述されていることに起因しており，制約指向はこれを克服する有効な方法論となり得る．つまり，設計者の有する経験的な配置知識の背後には，配置結果に求められる具体的な要求に対応する制約と，それを配置結果において実現するための抽象的な戦略とが存在し，設計者は，具体的な問題に対して，それらをもとに全体的な配置を見通して具体的な配置知識を生成しつつ解を得ているものと認識すれば，その抽象的な戦略を抽出してシステム化することにより，汎用的な配置手法を構築することができるはずである．また，このような手法を構築することは，制約という観点から汎用的な配置処理のアルゴリズムを記述することであり，配置制約と設計機構とから構成される一般的で拡張性に優れたシステムを構築するための礎となり，加えて，設計処理の内容が制約によって明示的かつ客観的に記述・評価できることが期待できる．一方，制約指向については，これをもとにした設計支援システム[8]も開発されてはいるものの，適用されてきた対象は，Constraints[9]で扱われた代数関係や ThingLab[10]で扱われた単純な幾何学的関係に限られており，複雑な配置設計問題を扱うためには，問題の構成や性質について十分吟味した上で，新たな視点から配置手法を構成する必要がある．次章では，このような点から対象とする基本配置設計の過程について考える．

3. 基本配置設計の過程

3・1 配置設計問題　配置設計についての議論を進めていくにあたり，その過程で扱う対象物を分類し，以下の用語を定義しておく．

(1) 配置要素（component）：配置すべき設計対象物の構成要素．

(2) 配置空間（space）：(1)の要素を配置していく空間の部分や全体．

(3) 配置制約（constraint）：上記の要素や空間間で満たされるべき空間的な位置関係に対する条件．

例えば，プラント設計においては，(1)にはプラントを構成するポンプやタンクなどの各種機器や特定の部屋が，(2)にはプラントを設置する建屋やその特定の床面といった部分などが対応する．(3)には「Vタンクは Fポンプよりも上階に設置する」，「R冷却器は Rポンプの真上に設置する」，「P冷却器は Pに近い方が良い」などといった要素間の配置関係が対応し，4・3節で後述するようにして一般的に分類することができる．以上の用語を用いると，配置設計は「配置制

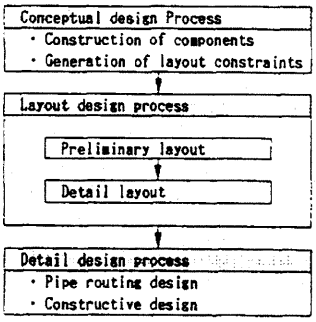

図1　配置設計過程の位置付け

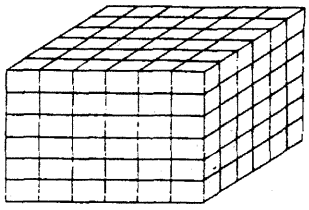

図2　配置空間の単位格子

約を満足するように配置要素を配置空間内に割り当てていく」という問題に帰着する．

3･2　基本配置設計の過程と単位格子の概念　このような問題を扱う過程は図1のような構成になっており，配置設計過程の前には設計対象物の構成を定める過程が，後には配管設計や建設設計などの設計過程が位置する．それらの中で，配置設計そのものの過程を以下の二つの過程に分割して考え，本研究ではその前者を対象とする．

(1) 基本配置設計の過程：各種の空間的な位置関係が満足されることを保証する程度の各要素間のトポロジカルな位置関係を決定する過程．

(2) 詳細配置設計の過程：(1)の結果に基づいて各要素の空間内の位置寸法を厳密に決定する過程．

両者の本質的な違いはその過程で扱われる情報の種類にあり，前者においては非数値的な情報が主に扱われ，後者においてはもっぱら数値的な処理が中心となる．ここで，上記の基本配置設計の過程において要素間のトポロジカルな位置関係を効率的に扱うために，配置空間内において「単位格子（compartment）」の概念を導入する．つまり，個々の配置問題におけるその特質や各種配置要素の標準的なサイズに従って配置空間を一定の大きさの単位格子に分割し，その大きさのもとで各要素の大きさや位置を議論するようにする(図2)．このような取扱いは船舶設計における"フレームスペース(補強材の間隔)"，原子力発電所における"通り芯(建屋の壁の位置)"に対する考慮などに見られる．これにより，基本配置設計は「各配置要素に対してその形状に見合う単位格子の組合せを配置制約に従って割当てていく」というある種の探索問題としてとらえることができる．

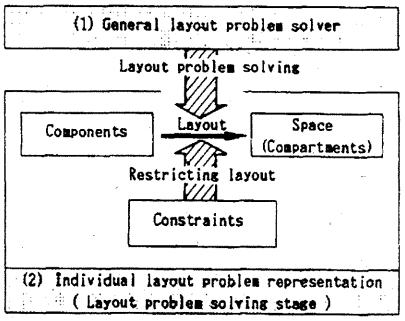

図3　配置設計システムの基本構成

4. 制約指向プログラミングによる基本アプローチ

4･1　配置設計手法の基本構成　前述のように，本研究では基本配置設計に対して制約指向に基づいた手法を開発する．図3は，2･2節で述べた制約指向をもとにした本手法の基本的な構成であり，(1)：汎用的な配置設計機構と，(2)：3･1節で列挙した配置制約をはじめとする問題構成要素の表現とから構成され，前者が後者を動作領域として配置処理を行うようにする．このように設計機能と設計要求とを明確に分離することによって，一度前者を構築すれば，ユーザは複雑なプログラミングから解放され，単に制約を記述するだけで個々の配置問題を解くことができるようになる．また，後者の宣言的な制約の記述は，配置における要求を明確かつ客観的に記述したドキュメントともなる．このような構成において配置機構すなわち制約解消システムを構築するためには，前述のように，配置問題における対象の状態を表現する値の取り得る範囲や，扱おうとする制約の種類や性質を十分検討しておく必要がある．以下では，このような点から配置設計を考える．

4･2　配置設計における状態量　配置設計において，問題の状態は各配置要素の空間内における位置であり，3･2節で述べたように，その位置は単位格子の組合せとして表現される．したがって，有限の単位格子を組み合わせた要素の位置は高々有限個の数に限定される．また，配置制約はそのような有限個の位置の中からただ一つを選択するものではなく，順次その数を限定していくものであり，配置設計の過程は可能な組合せを制約によって次々と絞り込んでいく過程であ

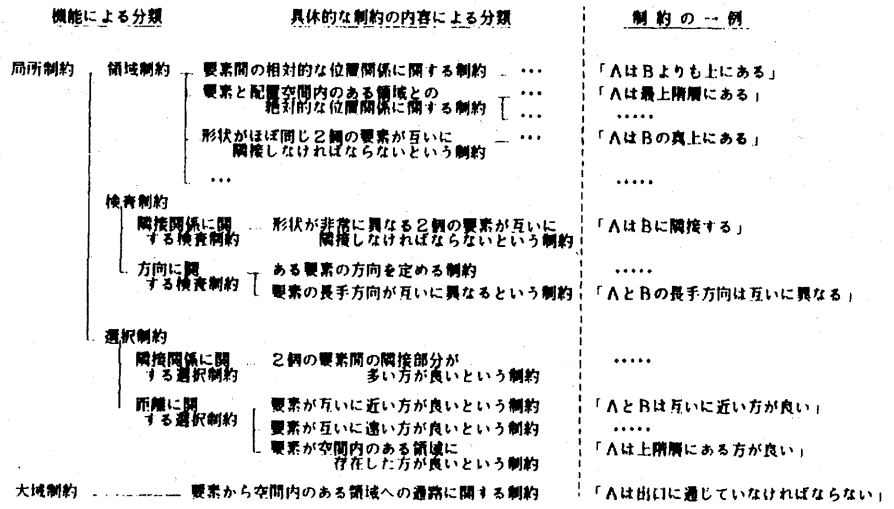

図４　配置制約の分類

る．これらの点で，配置設計における制約問題は従来の制約指向システム[9][10]が扱ったものとは異なり，この場合には，値域の概念に基づいた手法[6]が基本的には有効である．なお，本手法は，各状態量の取り得る範囲が有限であることに着目して，制約に従ってその範囲を順次狭めていくことにより最終的に各状態量の値を確定しようとするものである．

4･3　配置制約の階層的分類　本システムにおけるポイントの一つは，前述のように配置制約の設定にあり，このため，配置を定めている制約を可能な限り一般化し，さらに配置処理に関する取扱いに従って分類することが必要である．そこで，種々の配置制約を洗い出して約20種類の基本的な制約を設定する．図４は，それらの階層的な分類と一例を示したものであり，以下の４種類の制約に大別することができる．

(1) 領域制約 (region constraint)：要素に対して組合せの対象となり得る単位格子を限定する義務的な制約．

(2) 検査制約 (test constraint)：生成された配置候補を検査することにより，その制約が満たされているかどうかが判断できるような義務的な制約．

(3) 選択制約 (priority constraint)：上記の義務的な制約をすべて満足させた上で，さらに配置候補を優先付ける示唆的な制約．

(4) 大域制約 (global constraint)：個々の要素や特定の空間の間で取り扱うことができない，全体の配置状況に係わる義務的な制約．

これらの制約の内容は様々であるが，さらに大きく義務的なものと示唆的なものに分けることができ，前者は設計対象物の物理的な条件や安全性などにより必要不可決な条件に対応し，後者は経済性や操作性の点から希求される条件を反映するものに対応する．また，配置要素の形状や大きさについても，配置における単位格子の組合せに対して義務的に係わるため，広義の制約としてとらえることもできる．

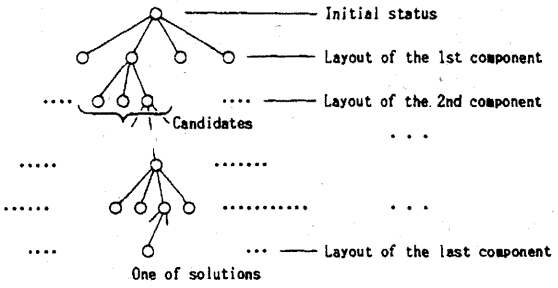

図５　配置設計の探索木

以上のように配置設計で扱われる制約は複雑であり，これに対応するために，上述の値域の概念に基づいた制約指向[6]に，いわゆる生成検査法を組み合わせた手法を用いることにする．次章では，このような本手法の詳細なアルゴリズムについて示す．

5. 配置アルゴリズム

5･1　配置設計の探索木と配置戦略　前述のように，基本配置設計は各配置要素に対して単位格子の組合せを求めていく問題であり，ある種の探索問題として扱うことができる．その探索木は図５のように縦方向に各配置要素，横方向に各要素に対応させて実行可能な配置候補(すなわち配置空間の単位格子の組合せ)を列挙して割当てた構造を持つ．効率的な探索を行い，

より優れた配置を行うためには，与えられた問題の性質に従って探索木を構成する必要がある．効率に関しては，失敗する枝を刈っていくことが重要であり，配置設計の場合，個々の配置要素の大きさが異なっていることや配置制約の限定の程度に強弱があるなどの点で探索に大きな効率化が期待でき，逆に，問題が複雑で大規模であるため，適切な効率化を行わなければ設計解を得ることは現実的には困難となる．そこで，探索過程を次の二つの過程に大別して考えることにする．

(1) 配置順序の決定過程：各配置要素の配置順序を決定する過程であり，配置順序によって潜在的に各要素の配置における候補の数すなわち図5の各節点における分枝の数を減少させて，探索の効率化をはかるとともに，各種制約の違なりに従って順序を決定して優れた配置が得られるようにする．

(2) 配置処理の過程：(1)の順序に従って個々の配置要素に対して配置処理を実行する過程であり，個々の要素に対して可能な枝を生成した上で，配置結果の優劣や探索の効率化などに配慮して，より有効な枝を選択しつつ配置を進めていく．

以下の節では，各処理の詳細を示す．

5・2　配置順序決定アルゴリズム　　各配置要素の配置順序を決定するにあたって，図4に示した各種の配置制約のうち，次の制約に基づく関係に着目する．

(1) 強連接関係：要素間の隣接関係に関する領域制約および検査制約に基づいて生じる関係．

(2) 弱連接関係：距離に関する選択制約に基づいて生じる関係．

ここでいう「連接（adjoining）」とは2要素間あるいは要素と空間内の一部領域との間において，一方の位置が定まることによって他方の位置がその近くに限定されるという意味であり，前者は限定の程度が義務的であるのに対して後者は示唆的である．これらの制約に関して要素や空間間の関係は図6のような無向グラフを形成する．さらに，強連接関係によって関係付けられた要素は互いに連続して配置を行ったほうが効率的に優れた配置が得られると考えられることから，それらの要素をひとつのグループとして単一視すると，図はそのようなグループと弱連接関係からなるグラフと見ることもできる．以上により，図のようなグラフにおけるグループを考慮すると，配置順序の決定は，

(1) グループ間の順序の決定．

(2) グループに属する要素間の順序の決定．

の2つの問題に分割できる．前者の順序は，

・既配置であるグループや要素と弱連接関係によって関係付けられているグループは次に配置すべきグループである．

・グループに属する要素の大きさの和が大きいグループは小さいグループよりも先に配置すべきである．

という二つの観点から次に配置すべきグループを選択し，そのグループを既配置であるとした上で，次のグループを選択する処理をグループが尽きるまで繰り返すことにより決定する．なお，上記の2つの観点は適当にバランスさせる必要があり，その程度は個々の問題に依存する．また，後者の順序についてはグループに属する各要素の大きさやグループを構成する強連接関係の違なりの順序に従って決定する．その上で，以上の二つの処理を組み合わせることにより，すべての要素の配置順序を決定するようにする．

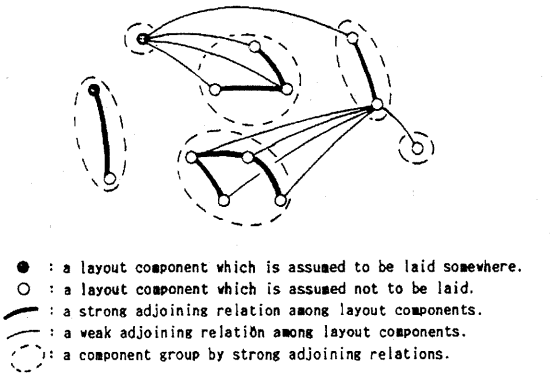

図6　連接性に関するグラフ

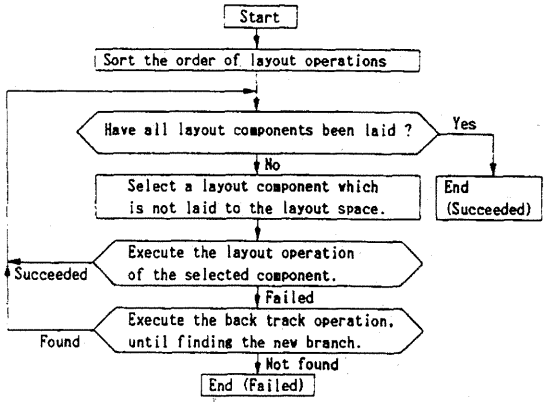

図7　配置全体アルゴリズム

5・3　配置処理アルゴリズム　　図7に，配置処理の全体アルゴリズムを示す．これは図5に示した探索木を縦方向にたどっていくアルゴリズムであり，前節のようにして決定される配置順序に従って個々の要素に対する配置処理を行い，必要に応じてバックトラックを行いつつ配置解を得るものである．以下に，この

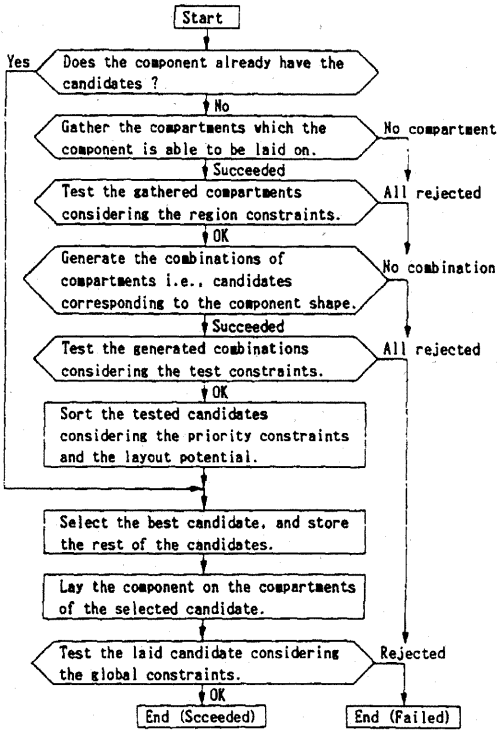

図8　個々の配置要素に対する処理アルゴリズム

過程の個々の要素に対する配置処理について示す．

5・3・1　個別配置処理アルゴリズム　　図8に，ある要素に対する配置処理のアルゴリズムを示す．要素の配置は，その要素の形状と大きさに見合う配置空間の単位格子の組合せを求めて要素と格子を結び付ける処理に対応し，4・3節で示した制約の分類に従って，まず，組合せの対象となる単位格子を集めてそれらを領域制約によって検査し，次に，要素の形状に従ってそれらを組み合わせて配置候補を生成し，さらに，検査制約によって検査して，続いて，得られた候補に対して示唆的な制約や後述の配置ポテンシャルによって優先付けを行い，優れた候補から配置を試みていくようにする．このとき，残りの候補は，他の要素の配置に失敗しバックトラックが行われてきたときのために保持しておく．最後に，選択した候補に従って配置空間に実際に配置した上で，その配置を大域制約によって検査し，許容されれば次の要素の配置を進め，棄却されればバックトラックを行うようにする．

図9は，以上の処理の過程を簡単な例により示したものである．配置空間として2次元の6×6個の単位格子からなる空間を考える．図中(a)は既に要素AとBが▨部に配置されており，要素Cの配置を始めようとしている状況を示している．まず，CはAとBが配

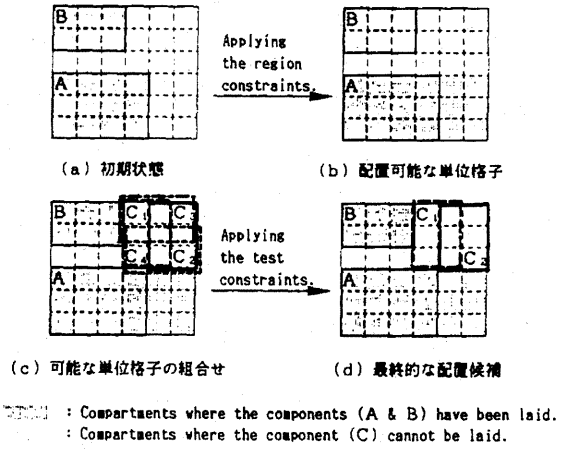

図9　配置処理過程の一例

置されていない部分の単位格子に配置しなければならない．これに対して，Cに関係する領域制約として「CはAよりも上にある」，「CとDは同じ行に存在する」の二つが存在するものとする．前者を適用することにより配置可能な単位格子は図中(b)の空白部となり，続いて後者を適用するが，要素Dが未配置のためこれによって単位格子を絞りこむことはできない．その結果，Cの配置候補は図中(b)の空白部の中でその形状に従って生成することになる．Cの形状が2×3個の単位格子に対応するとすると，この中には計4個の候補(同図(c))が生成可能であるが，「Cは垂直方向に長く配置する」という検査制約によってすべての義務的な制約を満足する候補は同図(d)のC_1とC_2の計2個となる．最後に，得られた候補群に対して選択制約を適用すると，「BとCは互いに近い方が良い」という制約からC_1が優先されてCの配置が行われることになる．残るC_2はその後の配置処理においてバックトラックを生じ，Cの配置を棄却された場合に次に採用される候補として保持される．以上のようにして個々の要素に対する配置処理を実行する．

以上のような処理において，配置候補の優先付けにおける選択制約は極めて局所的なものであり，これを考慮するあまり全体的な配置を行き詰まらせる可能性があり，それを避けて効率的に配置処理を進めていくために，次に示す配置ポテンシャルの概念を導入する．なお，上述のような生成と検査の繰り返しによる手法は，3・2節で示した単位格子の導入によって，各配置要素に対する配置候補の数が有限個に限定されることにより可能となる．

5・3・2　配置ポテンシャル　　ある配置要素における配置候補の優先付けに関して，その要素に関する選

択制約が存在しない場合にはすべての候補に対して代替性が存在し，選択制約が存在したとしても比較的優れている幾つかの候補の選択制約による優劣は必ずしも本質的ではないため若干の代替性が残っている．配置ポテンシャルとは，このような代替性の中からその配置状況に基づいて全体的な配置処理の観点からより有効な候補を選択するためのものであり，以下の点に基づいて選択制約による配置候補の優先付けに若干の変更を加える．

- 選択制約が存在しない場合には，配置空間の隅への配置を優先する．
- 配置結果に無駄な隙間が多く生じて，他の要素が配置できなくなることを避けるために，ある要素に対する配置候補の中で，互いにその配置位置が近いもののうち，その周りに空の単位格子が少ない方の候補を優先させるようにする．
- ある要素を配置しようとしたときに，その要素と弱連接関係によって関係付けられていない要素であり，かつ他の未配置の要素と弱連接関係によって関係付けられている既配置の要素の周辺には，他の未配置の要素が配置される可能性が高いため，できればその要素を配置しないようにする．

これらの観点のいずれが重要であるかは個々の配置問題の性質に従って異なってくるため，それぞれを適切にバランスさせる必要がある．なお，このような処理は，配置結果の最適基準に基づくものではないが，局所的な配置において総合的な観点からより優れていると思われる配置を行うことによって，近似的に準最適な解を得ようとするものでもある．

5･3･3 個々の制約の伝播処理　最後に，個々の制約それぞれの取扱いを概念的に制約とそれに係わる要素や空間と関連させて示す．前述のように，配置制約における各種の処理はその制約に関係する各要素の状態に基づいて行われる．すなわち，図10に示すような関係において，ある要素から関係する制約に注目して，その制約による処理が実行可能であるかどうか（2要素間の制約においては他方の要素が既に配置されているかどうか）を判断して配置処理を行い，さらに，要素の配置をその要素と配置する単位格子に対応するノード間を関係付けることとして取り扱う．このような処理により，制約の記述から配置手続きを展開しながら配置処理を進めることができる．以上のような取扱いはオブジェクト指向プログラミングとの相性が良く[11][12]，第2報では，本手法に基づいてオブジェクト指向環境のもとで実際に配置設計支援システムを構築する．

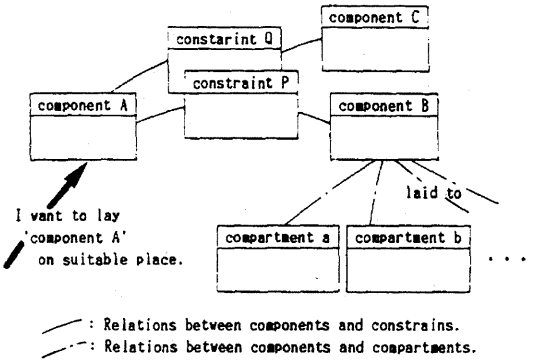

図10　制約伝播処理

6. 原子力発電所の基本配置設計の試行

最後に，本手法を適用した原子力発電所の基本配置設計の試行事例を示す．原子力発電所の基本配置設計は，100 台前後の機器を3次元的に配置する問題であり，その設計においては経済性や安全性，信頼性に関する要求が大きいことから，設計者の経験や勘に頼って設計が行われていたため，合理的な配置を得るためには多大な設計時間を要するなどの困難が伴っていた．これに対して本手法を適用することにより，配置制約に裏付けされた合理的な配置を容易に行うことが可能になる．図11は，ある発電所に対する配置結果である．配置空間は4階層からなり，その各階層は 12×16 個の単位格子に分割することができ，また，あらかじめ配置されていたとした7個の要素を除いて計 73 個の要素の配置を行った．得られた結果は与えたおよそ 200 個の配置制約を反映した十分満足のいくものである．なお，本事例における詳細な問題の構成や配置条件の内容については，第2報で示す．

7. 結言

本研究では，基本配置設計に対してその設計タスクの理解に基づき，設計支援システムの構成方法として制約指向の概念に基礎を置く手法を提案した．配置設計は従来熟練設計者の経験や勘に基づいて行われており，支援システムにおいてもそのような知識を直接記述したものが多く，配置知識は一般化されて整理されているとは言えなかった．これに対して，本手法は，

(1) 配置設計における知識を，制約という概念のもとに一般化して整理し，その制約を配置処理における取扱いによって階層的に分類した．

(2) 制約の分類に従って，制約プログラミングの手法と生成検査法を組み合わせることによって，制

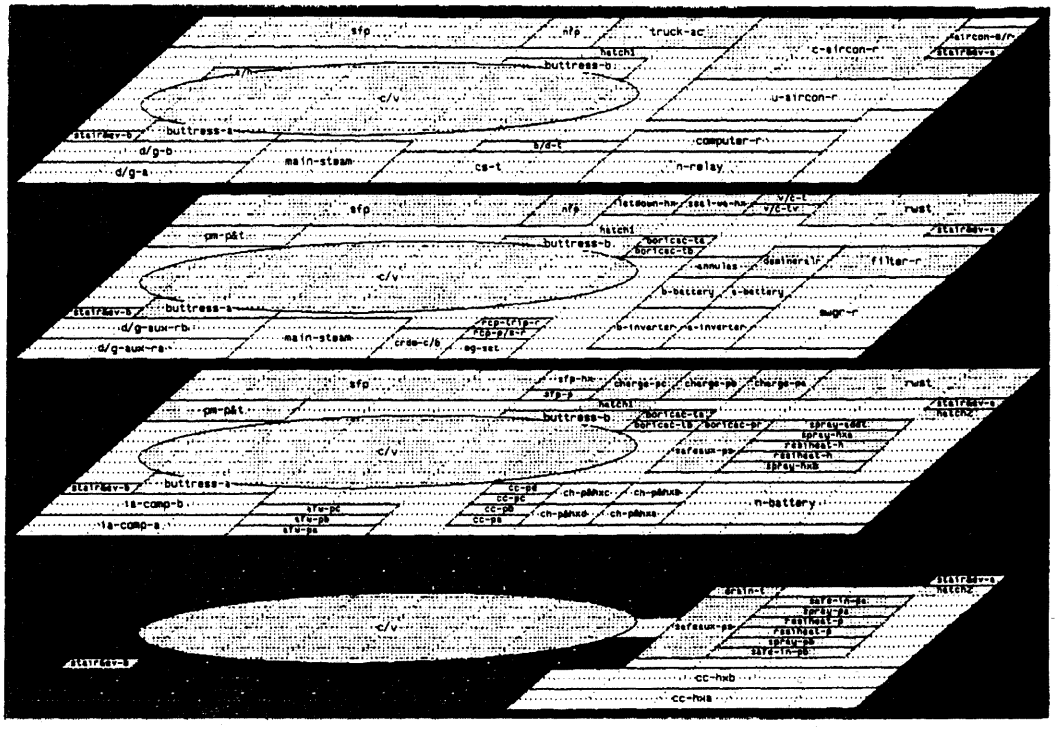

図11　原子力発電所の基本配置設計における配置例

約の宣言的な記述をもとに，配置処理を行う一般的なアルゴリズムを確立した．

(3) 制約として取り扱えないような大域的な配置知識に対して，配置ポテンシャルの概念を導入し，準最適な配置処理の実現を可能にした．

ことにより，配置設計に対する汎用的な支援システムの構築手法を与えるものである．第２報では，このような手法に基づいて設計支援システムを構築する．

本手法の開発にあたり，原子力発電所の基本設計に関して貴重な情報と懇切なご助言を頂いた三菱原子力工業(株)の仲戸川哲人氏，井上具大氏に深謝致します．

文献

(1) 赤木，研究展望，機論，55-516，C (1989)，1848.
(2) McDermott,J., Artificial Intelligence, 19 (1982), 39.
(3) 例，渡辺ほか，情報処理学会論文誌，26-5 (1985)，926.
(4) 例，Leler,W., Constraint Programming Languages – Their Specification and Generation, (1988), Addison-Wesley.
(5) 鈴木，(淵 監修)，知識プログラミング，(1988)，27，共立出版.
(6) 文献(5)の34ページ.
(7) 例，Liggett,R.S., CAD, 13-5 (1981), 277.
(8) 例，Chan,W.J. and Paulson Jr.,B.C., AI EDAM, 1-1 (1987), 59.
(9) Sussman,G.L. and Steele Jr.,G.L., Artificial Intelligence, 14 (1980), 1.
(10) Borning,A.H. ThingLab – A Computer-Oriented Simulation Laboratory, Stanford Univ., (1979).
(11) Abelson,H. and Sussman,M.K., Structure and Interpretation of Computer Programs, (1985), 230, MIT Press.
(12) Winston,P.H. and Horn,B.K.P., LISP (3rd Edition), (1989), 335, Addison-Wesley.