

プラントレイアウトCADとそれを用いた設計支援システムの開発

この報告は、プラント設計の上流過程をサポートする計算機支援技術について述べている。まず、設計者の仕様やノウハウを対話的に容易に取り込めるように、一種のオブジェクト指向のCADを開発した。次に、レイアウト結果から運転モデルを自動生成し、最適運転計画を行えるようにした。その結果、データの再入力や数学モデル作成など人間の介入なしで一貫してサポートでき、設計効率が大幅に向上できた。実プラントシステムに適用して、その有効性を確認した。

高橋一重 福田智美 沼上英雄 澤田順夫

(株) 東芝 研究開発センター

A DEVELOPMENT OF COMPUTER AIDED PLANT ENGINEERING SYSTEM AND ITS LAYOUT CAD

Kazushige Takahashi Satomi Fukuda Hideo Numagami Nobuo Sawada

Toshiba R&D CENTER
Kawasaki, 210 JAPAN

This report describes a computer supported plant engineering system for upstream process. An object oriented plant layout CAD has been developed to facilitate to input designer's requirements and know-how of plant design. Plant action model, optimal operation planning etc. are generated automatically. Efficiency of engineering design is extremely increased, because human intervention as reinput of data, construction of mathematical models, and so on are eliminated. This system was applied to upstream process of real plant design, and the validity was confirmed.

1. はじめに

従来の計算機による設計支援ツールは形状を扱うものが多く、機能を扱うものでも中・下流過程を対象とするものが多かった⁽¹⁾。近年、上流過程における設計支援ツールも必要とされており、プラントに関しては各社が上流設計支援ツールの開発に注力している。とくに、コジェネレーション等⁽²⁾⁽³⁾の大規模なシステムにおいては、上流設計の比重が大きく、上・中・下流と一貫して支援するツールが望まれている。

プラント上流過程のgeneric modelとして、P & I D (Piping & Instrument Diagram)がある。プラント構成コンポーネントをパイプで結んだもので、プラント設計の基本にされているものである。このP & I Dにプラント上流設計の情報が、ほとんど盛り込まれていると考えられる。我々は上流過程の設計を支援するために、ここから設計のノウハウを取り出すことをターゲットにすることにした。

その試みとして、P & I D用のグラフィック・エディタを作り、その段階でプラント設計者のノウハウをシステムに取り込むことを考えた。そして、そのエディタは設計者の負担を軽くする目的で、プラント部品の機能的なレイアウトを支援する、オブジェクト指向のものとするようにした。

上流設計においては、プラント設計のMMI / Fとして、設計過程そのものの支援が求められているが、各段階でデータの再入力が必要であったり、仕様変更毎に動作モデルの再構築を必要としたりすることが現状である。

この様なプラント設計の上流過程において、「一貫した支援体系」ができればデータ、モデルやプログラム等の再入力が必要になると考えられる。そのために、このエディタの出力からP & I D情報を取り出し、動作モデルの自動生成を試みた。

本報告では、この研究で開発したプロトタイプにおける、システム全体・オブジェクト指向のプラント・レイアウトCAD、およびプラント・モデル表現の自動生成について記述する。次に、このシステムを熱供給プラントの上流設計に適用した結果を記す。

2. システム概要

2. 1 システムの特徴

プラント設計に用いる部品データベースの個々の部

品に、機能的なモデルやプラン

トの設計に用いる属性を関連づけておく。これらの部品を操作する際に、関連付けられている属性もあわせて操作する。このことにより、設計されたプラントレイアウト結果からプラントの運転の最適化のモデルを生成するための情報を取り出すことが可能となる。

このように、プラント設計の専門家が介在するのは、プラントのレイアウト作成の段階のみであり、それ以外の段階では一貫してシステム側のサポートが行われる。プラント設計の上流過程では試行錯誤が度々行われるのが普通である。この技術により、その試行錯誤が容易に行われ、例えば設計パラメータの調整が簡単にできるようになる。

このシステムの特徴は、以下ような点にまとめることができる。

- 1) 従来の設計支援では、形状設計中心であるのに対して、この技術はより上流の機能的なモデルを含むプラントの設計支援を目的とする。
- 2) プラントのレイアウト設計の段階で一回のCADデータの入力のみですむ。
- 3) 多変量入力多変量出力の系を対象としている。

2. 2 システム構成

オブジェクト指向CADをベースに最適化のための知識処理を行う。図1はこのシステムのシステム構成を表している。プラント設計に用いる「部品データベース」、「知識ベース」を準備しておく。その準備の下に、プラントをレイアウトするビジュアルモデリングツール（一種のオブジェクト指向CAD）をユーザインタフェースとして提供している。

そのレイアウトの結果から、プラントの構成部品とそれらの接続情報からなる設計情報を取り出し、プラントの運転の最適化のための線形計画法(LP)用行列を自動生成する。その結果を用いて「運転計画最適化」をLPで求める。

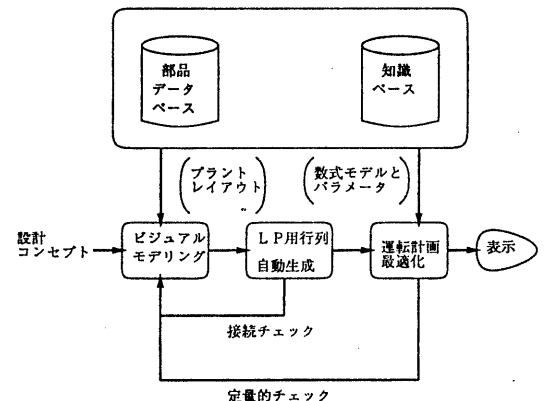


図1 システム構成図

2.3 ビジュアルモデリング

ビジュアルモデリングのキーとなるのはプラントの「部品データベース」である。部品データベースを定義するに先立ち、そのメタ言語である記述子コマンドを定義する。プラント部品の機能的な構成では、入出力の種類と数や、プラントの機能の記述等である。レイアウトされたプラントの構成部品は部品データベースを基にして、それらの属性が変更されたり、構成部品間の入出力端子接続された接続情報の属性が付加され、レイアウトされた結果として管理される。従って、そのレイアウトされた構成部品の属性を調べることで、そのレイアウトされた構成部品やそれらの接続情報からなる設計情報を取り出すことができる。

2.4 数学モデリング

次にプラントレイアウトの設計情報からプラントの運転の最適化のためのモデル作成について述べる。このモデル作成はプラント設計の知識ベースを用いる。熱供給プラントの例で言えば、設計の知識ベースは負荷バランス、プラントの入出力動作モデル等である。図2は「プラントの構成部品の負荷バランスの概念図」である。ある構成部品間を移動する媒体に関して、構成部品Aの出力 O_a と構成部品B入力 I_b と構成部品Cの入力 I_c の和の負荷がバランスしている時、関係式として

$$O_a = I_b + I_c$$

を導く。構成部品間を移動する媒体は一種に留まらず、数種であるのが普通である。熱プラントの場合は、蒸気、電気、ガス、冷水、温水等である。負荷バランス式は媒体毎に組み立てる。

プラント運転の最適化のためのモデル化は、最適化する評価関数を導入して行われる。熱供給プラントの場合エネルギーコスト最小化が良く用いられる。その他には、設備コスト最小化等がある。最適化すべき評価関数、構成部品間の接続関係と入出力動作モデルは、プラント全体の構成部品の入出力を変数として、この変数を用いて記述される。

最適化のためのモデル化は、従属変数を独立変数で表現することである。その代表的な方法は、書換規則群を定義しその規則を繰り返し適用していくものである。それは一種の消去法であり、線形な場合には代数的に解ける。ここでは、数値解析的な手法を考案した。

非線形（例えばタービンの入出力関係）の場合には、

一般的に厳密な最適化は困難である。そのため、部分的に線形化する方法で解かれるのが普通である。

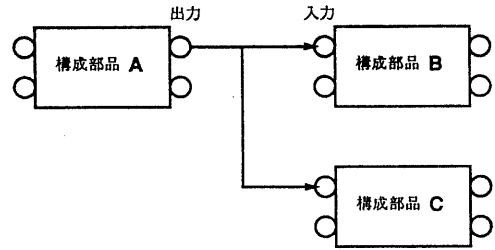


図2 プラント構成部品の負荷バランスの構成図

3. プラントの機能レベル設計のためのCAD

プラントをノードとアークのネットワークでモデリングする。プラントの構成部品はノードと考え、入出力はアークで表現する。ノードはその機能の表現を主とする。ノードとなる部品DBは予め作成しておき、その部品DBをメニュー表示して部品を選択・配置し、それらの部品間をアークで接続することでプラントの設計を行う。

3.1 部品データベースの構築

部品はユーザが定義できるようになっている。まず部品定義のための記述子を定義し、これらの記述子を組み合わせることで部品を定義できるようにすることで、柔軟性や汎用性を持たせている。

記述子及び部品定義ファイルは可変長のテキストファイル形式で、viなどのテキストエディタを用いて作成する。

(1) 記述子定義

記述子は予めシステム定義されているものと、ユーザが固有に定義する2種類がある。

システムで予め定義されている記述子として部品の種別コード、部品名称、配置したときに部品を表すための図形データ、部品間の接続情報などを表すための記述子がある。

ユーザが定義する記述子は入出力端子、性能、定格など部品固有の属性情報を表すための記述子である。記述子の定義形式を次に示す。

＜記述子の定義＞

記述子定義：記述子コード、名称、属性の数、属性1、・・・、属性n

属性の定義：可変指定、タイプ、属性名称

記述子の定義例を次に示す。

＜記述子の定義例＞

```

INP 入力 3 (変更不可 31929' 媒体) (変更可 真数 効率) (変更不可 31929' 色)
OUT 出力 3 (変更不可 31929' 媒体) (変更可 真数 効率) (変更不可 31929' 色)
CST 250 1 (変更可 真数 コスト)
CAP 容量 1 (変更可 真数 容量)
    
```

この例で 'INP' はある部品の入力端子に関する仕様を表している。属性は3つで、最初の属性は電気やガス等の媒体種別を表し、編集時の変更不可でストリングタイプ、次の属性は効率を表し、変更可能で実数タイプであることを示している。

(2) 部品定義

前述した記述子を用いて部品の定義を行う。タービン的一种であるガスタービンを定義した例を図3に示す。

この例では属性情報として、入力端子は一つでガスを媒体とし、アークの描画色はオレンジ、出力端子は排熱と電気を媒体とする二つの端子があり、それぞれ変換効率は0.5277、0.0002326、描画色は黄緑、緑、容量は32250kであることを示している。また配置した時の図形をWID、LIN、COLなどの記述子で表している。

	DEF	1400	1401	タービン	ガスタービン
	INP	0	ガス	Orange	Orange
属性	OUT	0	排熱	0.5277	GreenYellow
情報	OUT	0	電気	0.0002326	Green
	CAP	32250000			
	WID	3			
	LIN	-60.0	-10.0	60.0	-10.0
アイコン	LIN	60.0	-10.0	60.0	10.0
情報	LIN	60.0	10.0	-60.0	10.0
	LIN	-60.0	10.0	-60.0	-10.0
	COL	Black			
	STR	-55.0	5.0	ガスタービン	
	END				

図3 部品の定義例

3.2 編集機能

ビジュアルエディタの基本的な機能として部品選択して配置する機能、構成部品間の接続機能、配置部品(ノード)あるいは接続(アーク)の属性編集や削除機能などがある。

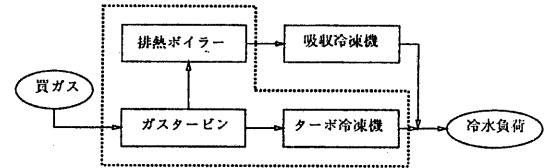
プラント設計は、まずノードとなる構成部品を部品メニューから選択して配置する。次に接続機能により配置された構成部品間の接続を行う。必要であれば属性編集や削除機能により修正を行う。

編集結果は記述子を用いて、可変長のテキストファイルとして出力される。ノードに関するデータは、対応する部品定義の表示のための図形データ部分を割愛したものに、オブジェクトIDと配置の位置情報が付加された形式で出力される。アークに関しては、オブジェクトID、接続情報、配置情報で構成される。接続情報は対応するノードのオブジェクトIDとその端子番号と端子情報からなる。

編集結果の出力例を図4に示す。例えば、ガスタービンと排熱ボイラーを接続するアーク情報はオブジェクトID(OID 9)として、その接続情報はOID 2とOID 3のそれぞれの端子1を接続するものとして

CNN 2 1 3 1

として表される。



破線部分のデータ

(ノード情報)

```

OID 2
DEF 1400 1401 タービン ガスタービン
CEN 380.0000 385.0000
INP 1 ガス 1.0000e+00 Orange
OUT 1 排熱 5.2770e-01 GreenYellow
OUT 1 電気 2.3260e-04 Green
CAP 3.2250e+07
END
OID 3
DEF 1300 1301 ボイラー 排熱ボイラー
CEN 380.0000 295.0000
INP 1 排熱 1.0000e+00 GreenYellow
OUT 1 蒸気 1.0000e+00 GreenYellow
END
OID 4
DEF 1200 1205 冷凍機 ターボ冷凍機
CEN 580.0000 385.0000
INP 1 電気 1.0000e+00 Green
OUT 1 冷水 2.5000e-01 BlueCyan
CAP 2.3750e-06
END
    
```

(アーク情報)

```

OID 9
DEF 9000 9001 接続部品 接続
INP 1 排熱 5.2770e+01 GreenYellow
OUT 1 排熱 1.0000e+00 GreenYellow
CNN 2 1 3 1
LIN 380.0 375.0 380.0 305.0
END
OID 10
DEF 9000 9001 接続部品 接続
INP 1 電気 2.3260e+06 Green
OUT 1 電気 1.0000e+05 Green
CNN 2 2 4 1
LIN 440.0000 385.0000 520.0000 385.0000
END
    
```

図4 編集結果の例

4. プラント・モデル表現の自動生成

4.1 方式

本システムでは、プラント図は部品をノードとした一種のネットワーク構造で記述されている。ノードには複数の（変数に対応する）端子がついており、その種類や個数は部品の属性によって定まっている。（時間を考慮しない静的な）プラント運転計画はすべての端子の変数を（通常はトータルコストが最小となるように）決定することである。本システムでは線形計画問題として定式化することを目標にした。変数はすべて0以上とした。次のような条件を定式化する。

- (1) アークによって接続された出力端子の変数と入力端子の変数とは等しい。
- (2) 一つのノードにおける出力端子の変数はそのノードの入力端子の変数の一次式で表現できる。
- (3) 出力端子の変数の上限は出力容量であり、需要ノードの入力端子の変数の下限は需要量である。

条件(1)は、アークによって部品の出力端子と入力端子が直結していることを示している。つまり、アークに対して変数を割り当てることを意味する。条件(2)は入出力関係性が線形であることを示している。条件(3)は、部品の性能上入出力値は一定量以下であることを表現する。以上の3種類のみで制約条件を構成することができる。

制約条件で用いる変数の数は全端子の数と同じであるので、部品の数が大きくなるに従って変数の数も大きくなる。本システムはパソコンでも実行できるようにするために、冗長な変数を次の節で述べる数値計算的な手段により削除して、変数と制約条件の数を減らすことにした。冗長性を除去した線形計画問題を単体法（あるいは内点法等）で解くことによって最適運転計画の決定をすることができる。

4.2 冗長性の除去

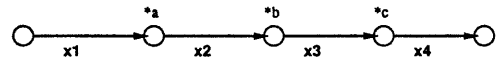
線形計画問題の原データは、最適化関数と制約条件式である。変数を独立変数と従属変数の2種類に分類する。はじめに、図5における右の欄の四角で囲んだ変数を従属変数と呼び、その他はすべて独立変数と呼ぶ。つぎに、アークで結ばれる同じ変数は同一とみなして、どちらも独立変数と呼ばれるときのみ、その同じ変数を独立変数とみなす。こうして、アーク変数と

スラック変数に対して独立か従属かのどちらかが指定される。冗長性の除去の基本的なアイデアは、従属変数を反復代入法で独立変数のみの1次式を得ることである。例えば図6の簡単な直列回路では、 x_1 が独立変数で、 x_2, x_3, x_4 が従属変数である。図にあるように式の反復代入計算を右辺がすべて独立変数の1次式になるまで行う。この計算は行列の反復ベキの計算に帰着できる。ここで得た式を制約条件に代入して、独立変数のみの線形計画問題を作成することができる。

正の相関をもつ線形変換器の出力が従属変数であり、入力がすべて独立変数である場合は、独立変数がすべて非負ならば、従属変数は自動的に非負になる。このような場合は、従属変数が非負であるという制約条件が冗長なので、この条件を削除することにより、線形計画問題のサイズを圧縮できる。

ノードの種類	入力数	出力数	制約条件と従属変数指定
供給	0	1	制約条件なし
需要	1	0	$y =$ 最低需要量
分枝	1	$n(>1)$	$x_0 = x_1 + \dots + x_n$ 従属変数指定なし
合流	$n(>1)$	1	$x_0 = x_1 + \dots + x_n$
線形変換器	$n(>0)$	1	x_0 は x_1, \dots, x_n の線形変換

図5 従属変数の指定法



$$\begin{aligned}
 x_1 &= x_1 \\
 x_2 &= a \cdot x_1 \\
 x_3 &= b \cdot x_2 & x_3 &= b \cdot a \cdot x_1 \\
 x_4 &= c \cdot x_3 & x_4 &= c \cdot b \cdot x_2 & x_4 &= c \cdot b \cdot a \cdot x_1
 \end{aligned}$$

元の関係式 1回代入して得た関係式 2回代入して得た関係式

図6 冗長性の除去例

5. 熱供給プラントへの適用例

このシステムを熱供給プラントに適用した例について述べる。プラント設計には、設計者の長年によるノウハウや経験の蓄積が必要である。我々のシステムで採用したのは、設計者のノウハウを対話的にプラント・レイアウトとして、計算機に取り込む方式である。

本システムを用いる場合、上流設計作業は次のように行われる。はじめに、レイアウトエディタで部品の配置を行う。次に、レイアウトした部品の属性を規格にある範囲内で変更しながら、最適運転の計算を行い設計の妥当性を確認する。こうして、需要を満たす設計でよりコストの低いものを決定する。レイアウトするとき、過去作成した設計で類似した部分をもつものがあれば、そのデータを再利用することにより入力の作業量を軽減することができる。例えば、図7の上図を利用すれば下図を簡単に作成することができる。

熱供給プラントのレイアウトをエディタで4種類設計し、最適運転とそのコストを決定した。1日の最適運転を決定するために、需要データは1日分(1時間区切り)を作成した。レイアウトは数十程度のノードを用いて表すことができた。最適運転の決定は、エンジニアリングワークステーションAS4000を用いて、1分弱で最適運転を決定できた。

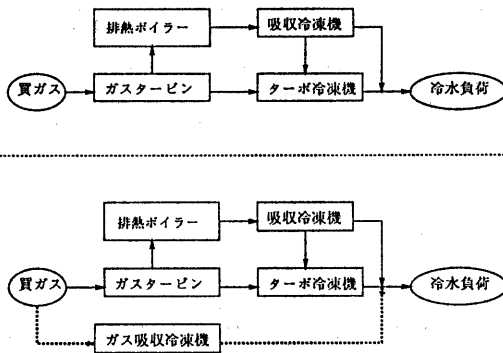


図7 データの再利用例

6. おわりに

通常の上流プラントのP&IDはマルチユニットの有向グラフで形式化できる。プラントのレイアウト・エディタのそのレイアウトを取り出す部分は、汎用的なモジュールである。かなり広い対象に対してこのシステムは適用することができると思われる。

最適化のためのモデリングはユーザ要求により変化する。例えば、エネルギーコスト、設備償却を含めた運転コスト等、最適化する対象は幾つかある。その場合、制約条件式と最適化関数が一次式であれば、線形計画問題の自動生成が可能である。

今回作成したシステムを熱供給プラント設計に用いた。このシステムは設計の大幅な合理化ができることが解った。

上流設計支援のアプローチとして、設計者の知的活動の支援を行う観点が重要と思われる。需要と供給及び部品データベースを与えて、プラントの最適なシステムを自動合成するのは、現状ではかなり困難な問題である。そこで、設計者のノウハウを容易に計算機に表現でき、データの再入力等設計者を煩わすことを極力少なくするアプローチを採った。

参考文献

- 1) 馬場、中島：“仮設展開手法を用いた設計エキスパートシステム油圧回路設計への応用例”第36回情報処理学会全国大会論文集、pp.1565-1566(1988)
- 2) 伊東、横山：コージェネレーションの最適計画 産業図書
- 3) 岡本：“コージェネレーションシステム”計測と制御 Vol.31, No.5, pp.590-593, 1992