

解説

水車の設計・生産における CAD/CAM†

長 藤 友 建^{††} 山 田 守^{††}

1. ま え が き

水力発電用機器として使用される水車は、すでに100年に近い歴史を有し、革新的開発の要素は少ない。しかし、水のエネルギーは水量と落差との積で決まり、これらは人工的に造るのではなく、自然の地理条件から与えられるものであるから、無限の組み合わせが存在する。したがって、水車は注文生産が主体となり、厳密な意味においては、顧客仕様の水量と落差の組み合わせにもっとも適した機器の開発を常に続けて行かなければならない宿命を負わされている。

一方、昭和48年に端を発した産油国による原油価格の引き上げは、環境面におけるクリーンエネルギーの活用と相まって、水力発電の重要性を再評価することとなり、国家的見地から自給エネルギー率の向上、エネルギー供給源の多様化の面で水力資源の積極的活用がはかられる機運にある。このような状況のもとで、現在のわが国の水車は、その性能、品質および運転保守上の信頼性のいずれにおいても世界の最高水準にあり、容量ベースで、国内水車生産高の60%以上が輸出されている。これらの実績は、国際的受注競争の厳しさと顧客の多様な仕様の波にもまれて、製品の性能・信頼性・価格・納期の面で常に技術革新による改善をはかって水車の近代化に努力した結果に負うところが大きく、それはすなわち広義のCAD/CAMをいかに効果的に活用してきたかに帰すると考えられる。

したがって、一見奇異に感じられる水車とCAD/CAMとの結びつきは古く、昭和40年代の初めには大型計算機による設計・解析面への応用が実用化されている¹⁾。その後、有限要素法を始めとする各種数値解析手法の発達と計算機の大容量・高速化の中で、信頼性および性能向上の面で著しい成果を発揮しつつある^{2), 3)}。さらに、製造面についても、昭和42年に当社

に大型5軸制御NC機が導入され、それ以来、水車の各種部品に対する加工システム、切削方法、切削工具について開発と実用化が行われ⁴⁾、今日では、ほとんどの水車部品で、必要に応じてNC加工が適用されている。また、水車の大容量化にともなって、大型構造物が増大しており、自動板取りと溶接の自動化に注力されている⁵⁾。その他、ミニコンと各種端末装置を活用した試験の自動化、自動製図機による図面作成の自動化、対話型CADシステムによる見積・設計の自動化等、CAD/CAMなしには水車の設計・生産はできなくなってきているといっても過言ではないほど密接な関係にある。

最近の重要なもう一つの動きとして、設計・生産をスルーした技術のシステム化の中に、CAD/CAMを効果的に導入する手法が実用化され始めている。従来の主流であった単体機能の自動化とは異なり、多数の機能を集合体としてとらえた上での統合的自動化であり、複雑で難しい一面があるが、その効果ははかり知れないほど大きい。以下に紹介する実用例は、この面での興味ある内容を含んでいると考えられるので、その概要について述べ参考に供したい^{6), 7)}。

2. 水車の設計・性能開発

2.1 CAD システムの概要

前述のように、水車は注文生産品で、かつ建設当初の投資が大きいと、スケールメリットが高く、単機容量が10万kW以上の大形品が多い。したがって、その都度顧客仕様にもっとも適した性能の開発がきびしく要求される。水車の一般的生産工程を図-1に示すが、水車の特殊性として、性能開発期間があり、その詳細を図-2に示す。開発の手法としては、実機と相似な模型を製作して、試験を実施して性能を検証し、必要な場合には改良を加えて再試験を続け、最終的にすべての仕様を満足する性能を開発する。この設計から実機に適用する最適模型の開発までを一つの性能開発サイクルと考えた場合、複雑な形状を有する模

† CAD/CAM System of Hydraulic Turbines by Tomotatsu NAGAFUJI and Mamoru YAMADA (Heavy Apparatus Engineering Laboratory, TOSHIBA Corp.).

†† 東京芝浦電気(株)重電技術研究所

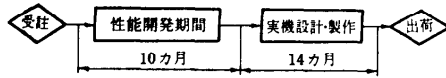


図-1 水車標準生産工程

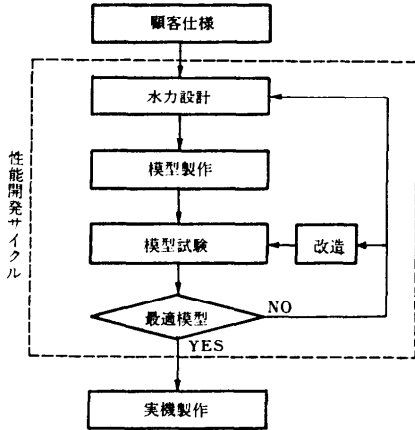


図-2 水力性能開発サイクル

型部品を精密に製作する過程が入り、多大の労力と時間とを必要とする。また、実機の設計・製作がその結果に左右されることとなるから、この性能開発期間が性能は勿論のこと、製品の納期・価格に占める比重はかなり高く、これを確実に短期間で実施する手法の開発が望まれる。

CADOPT (Computer Aided Design of Pumps and Turbines) システムは、この性能開発サイクルを自動化・省力化することにより、最適設計の精度向上と開発期間の短縮をはかることを目標として開発されたものであり、以下にその特徴と実施例のいくつかを紹介したい。

2.2 CADOPT の特徴と実施例

水車の代表機種であるフランス水車の鳥観図を図-3に示すが、一般に水車全体はコンクリートによって埋設され、上池から鉄管を通して圧力水が渦巻状のケーシング①に導かれ、円周上に等配に設けられた複数の可動翼②によって流量を調整された後、ランナ③に入る。ここで、水のエネルギーは回転トルクとして機械エネルギーに変換され、動圧回収用の吸出し管④を通して下池に放流される。ここで、性能上重要な部分は水が通過する内部流路形状であり、特に、エネルギーの変換を行うランナは、複雑な3次元形状の複数枚の羽根で構成され、性能にもっとも重要な影響を与えるとともに、全体が内部流路内にあるため、強度的にも十分な

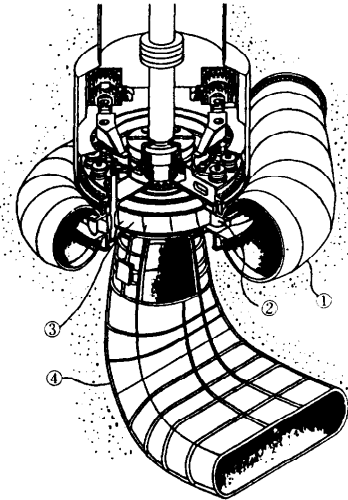


図-3 フランス水車の鳥観図

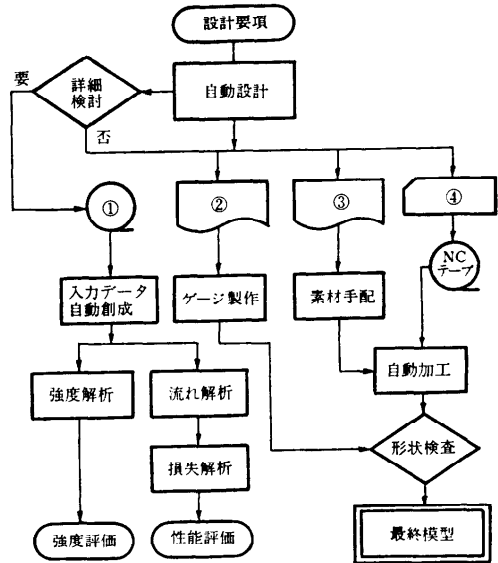


図-4 CADOPT システム

検討を加えておく必要がある。CADOPT は従来自動化がもっとも難しいとされてきたこのランナを主な対象として開発された自動化システムである。

CADOPT システムの概要を 図-4 に、そのハードウェア構成を 図-5 に示す。ソフトウェアの中心は自動設計プログラムであり、設計要項と過去の実績値(実験・解析によって蓄積されたデータベース)を併用して、端末装置より対話型でランナの設計が行われる。この過程では、かなり詳細な性能および強度解析

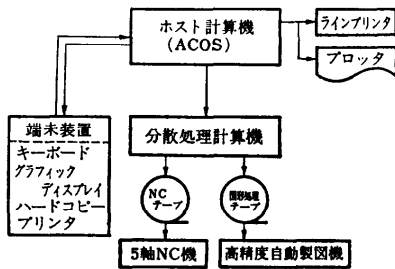
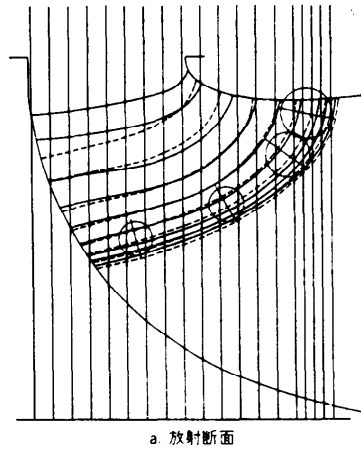
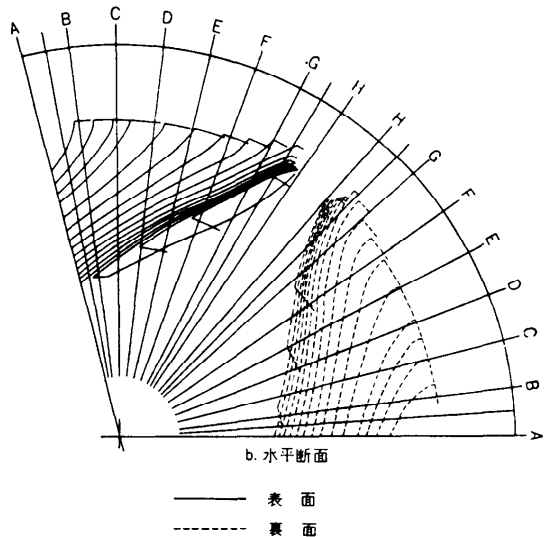


図-5 CADOPT システムのハードウェア構成

が含まれるので、ホスト計算機のプロッタ・ラインプリンタが適時併用される。また、これらの解析と設計との間の入出力を可能な限り自動化するためのソフトウェア(図-4の①)開発が重要であり、水車の機種的重要度に応じて順次整備中である。詳細な検討による評価に問題がある場合には、設計定数を変更して再設計を行い、最適化へのアプローチが繰り返される。本システムの使用実績はすでに数年以上にわたっており、一般には、特別にきびしい仕様がない限り、詳細



a. 放射断面



b. 水平断面

図-7 模型フランシス水車ランナ

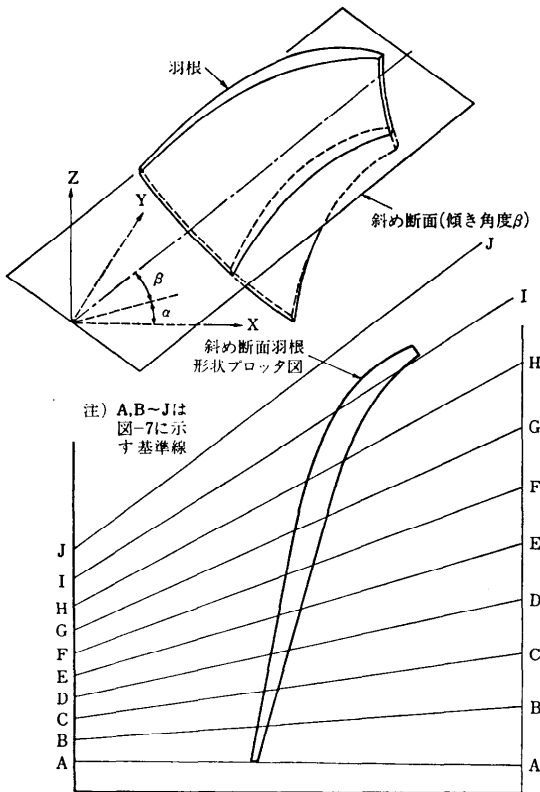


図-6 斜め断面ゲージ図

な解析をせずに安定した性能を短期間で開発できる体制にあり、このシステムを活用して、模型による性能の検証を省略し、机上の検討のみで実機を製作し、顧客の仕様を十分に満足した実例がいくつかある。

つぎに、前述の最適設計により製作すべき模型ランナが決定されると、図-5に示す分散処理計算機を介して、製作に必要な各種図面(図-4の②、③)が高精度自動製図機によって作図される。その際、実機と模型との幾何学的相似性が非常にきびしいので、伸縮の少ない特殊のマイラ紙を使用している。また、併行してNC加工に必要なランナ形状を数値化したデータ群(図-4の④)と加工に必要なソフトウェアとを組み合わせさせたNC加工用テープが作成される。ここで、出力

時間	0.0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
自動化前	①	②	③			
自動化後	①	②	③	[斜線区画]		

①: 設計, ②: 木型, 鑄造, ③: 機削, グラインド加工

図-8 模型ランナ製作期間

される図面類について具体的に示せば、図-4の②はランナの羽根形状をチェックする際に必要な各種ゲージ(水平・垂直・斜めの平面で切断した羽根形状)を製作するのに使用され、斜め断面ゲージ図の一例を図-6に示す。③はランナを鑄造するのに使用され、3次元立体羽根形状を2次元的に表示するため、放射断面・水平断面に分けて図示される。フランス水車ランナの一例を図-7に示すが、これによりランナの素材手配および製作手配がなされる。これら図面化された設計情報とデータ群化された加工情報とにより、模型ランナの設計から製作・検査までが一貫して自動化され、従来の熟練工による手仕上げを主体とした方法と比較して、図-8に示すようにランナの製作期間を半分以下に短縮でき、あわせて省力化・高精度化・低コスト化をはかることができた。

3. 水車ランナの CAM

前述のように、水車ランナは CADOPT システムにより設計され生産に移される。水車ランナの CAM も CADOPT システムに包含されるが、当社では同時5軸制御 NC 加工システムを開発して、機械加工を行っているため、CAM の代表例としてそのシステムについて説明する。

図-9 は同時5軸制御 NC 工作機械の一例の概観図である。図からわかるように、X, Y, Z の直交3軸のほか、A, B の回転2軸を同時に制御して、ワークの位置と工具軸の方向余弦を制御することができる。

3.1 NC 加工システムの概要

図-10 に NC 加工システムの概要を示す。

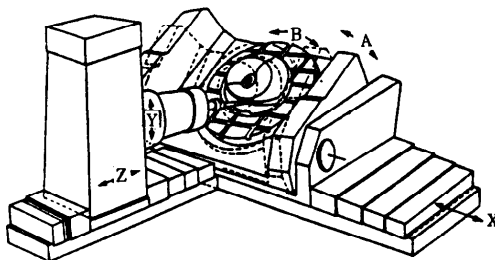


図-9 5軸制御 NC 機

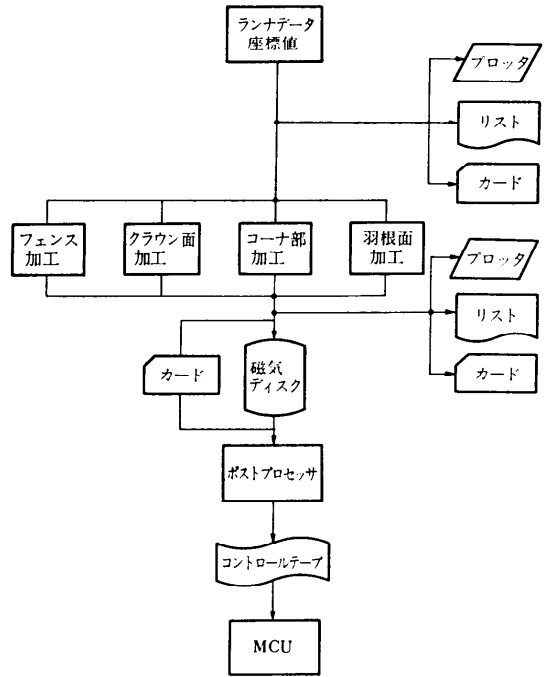


図-10 NC 加工システム

CAD システムより出力されたランナのデータ群より、羽根面・フェンス・クラウン等(図-11, 図-12 参照)の各部分について、部品座標系での工具の位置と工具軸の方向余弦を計算する。後述するように、模型ランナの NC 加工ではワークと工具との干渉を避けることが重要な課題であるが、本システムでは干渉チェックを自動的に行わせている。

計算の結果は、カード、リスト、プロット図に出力されるので、パートプログラマはリストとプロット図から工具とワークとの位置関係を確認し、切削中に起る現象を予知して、あらかじめ対策を立てることもできる。

ポストプロセッサは、工具情報を入力してそれを NC 装置用の工作機械の制御命令に変換して NC テープを出力するシステムであるが、工具情報とポストプロセッサとを接続する媒体としては、磁気ディスク・磁気テープまたはカードを利用することができる。カードによる方法は、パートプログラムのマイナチェンジが容易であり、特に試作的ワークに対しては現在でも採用されている。ポストプロセッサの出力としては、機械座標系での各軸(図-9の X, Y, Z, A, B)のパルスを発生させるほか、加減速の制御、切削経路の直線性の検証、工作機械のリミットチェックなど多く

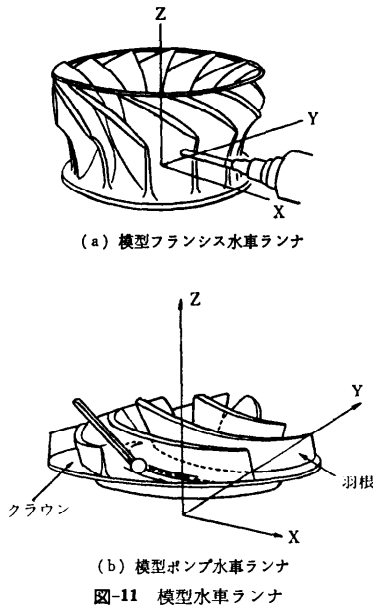


図-11 模型水車ランナ

の処理機能をもっている。

3.2 NC ソフトウェアの特徴と実施例

図-11 に示す模型ランナを例にして、NC ソフトウェアの特徴を説明する。

図-12 は羽根面加工処理のフローチャートである。

羽根面では、CAD システムの出力データが格子状の点群として与えられるが、滑らかな切削面を得るために、パラメータによる双3次式で曲面を創成する。創成面は与えられた点を必ず通る曲面で、通常ボールエンドミルで NC 加工する。

このソフトウェアの特徴は、工具とワークとが干渉を起さないようにして、羽根と羽根との間の狭い空間内を工具を通過させることにある。ワークと工具との干渉は、計算機内で自動的にチェックし、干渉のおそれがある場合は、その部分で工具軸の方向余弦を変化させて干渉を避けている。さらに、パートプログラマは、図-13 に例示するようなプロット図またはグラフィックディスプレイ装置により、目で確認できるシステムとしている。

また、クラウン面は2次式の回転面で構成されており、形状としては簡単であるが、羽根間に工具軸を通す必要があり、羽根面とクラウン面の両方の条件を入力して処理する。

さらに、クラウン面近傍の羽根面は、工具とワークとの接触点の軌跡が、羽根面とクラウン面との両方を

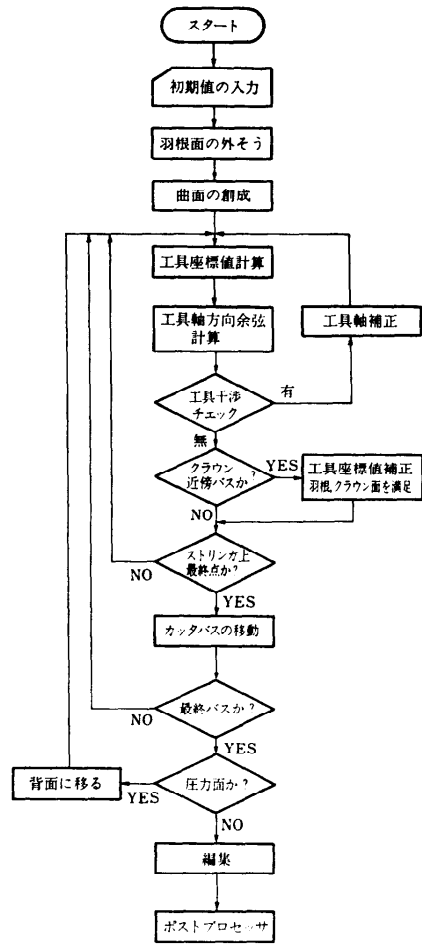
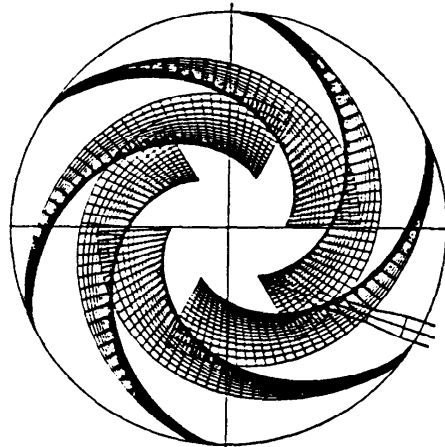


図-12 加工処理フローチャート

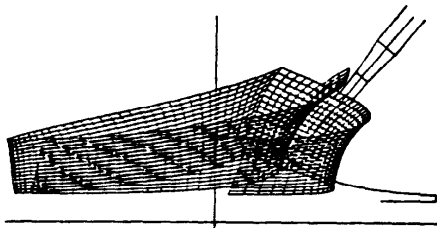
同時に満足する必要があり、羽根面の加工にクラウン面の条件を追加して処理するソフトウェア構成としている。すなわち、羽根面およびクラウン面の両方に接し、半径が工具半径に等しい球の中心の軌跡を求めて、この曲線上を工具中心が移動するシステムとしている。

羽根の端部（フェンス）を加工する場合は、一般に羽根端の座標値を滑らかな3次曲線で補間し、サイドミルで加工するソフトウェアを作成している。

以上は、主にフランシスまたはポンプ水車ランナの NC 加工について説明したが、図-14 に示すようなカプラン水車ランナの全面の NC 加工も実現している⁸⁾。カプランランナでは、工具とワークとの干渉についてはほとんど考慮する必要はないが、図-14④の

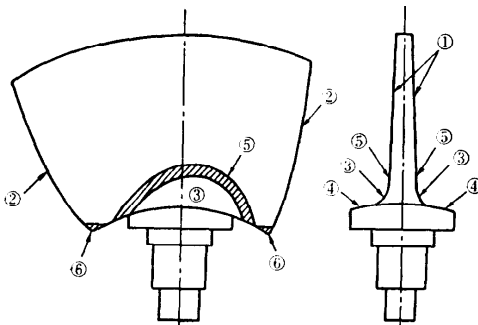


(a) 平面投影図



(b) 垂直投影図

図-13 模型ポンプ水車ランナプロット図



- ① ランナ翼面
- ② フェンス
- ③ ボス付根
- ④ 羽根ボス
- ⑤ 境界部分
- ⑥ ランナボス干渉部

図-14 カプラン水車ランナ

羽根面は自由曲面であり、④のボス部分は関数曲面であってその接続部分の NC 加工は困難であった。当社の NC 加工システムでは、その接続部分に数学的

仮定を与えて、NC 加工に適する特殊な曲面を創成して、NC 加工を実現している

4. あとがき

以上、水車ランナの設計および NC 加工に限定してコンピュータ応用について概説したが、水車という古い技術にコンピュータという新しい技術を導入することにより、新しい時代への適応性を高めつつ発展してきている。5 軸制御 NC 加工については、すでに模型水車については加工可能な部品のほとんどすべてについて、NC システムが完成しており、現在模型から実機へとその適用対象を広げている。

当社の水力技術部門では、水車模型の水力設計から製造および実験までのルーチンが自動化されており、解析結果と実験との検証が迅速かつ経済的に実施し得るシステムとなっている。また、模型実験による検証データの蓄積により CADOPT システムの価値はますます高められてきている。

今後共、設計および製造をスルーした技術のシステム化をはかり、水車の品質・性能および信頼性の向上に努めていきたい。

参考文献

- 1) 伊藤 彰, 岡村長生: 水車の設計計画における電子計算機の運用, 日機誌, Vol. 70, No. 584, pp. 1323-1331 (1967).
- 2) 長藤友建: 軸対称構造物の応力解析, 機械の研究, Vol. 25, No. 6, pp. 789-794 (1973).
- 3) 長藤友建: 流体機械内部流れの解析, 日機講論, No. 760-18, pp. 211-216 (1976).
- 4) 松田五美: NC 加工実例集「大型水車用部品の加工」, エンジニア, 1969. 6, pp. 98-102 (1969).
- 5) 浅田誠造: 大型水車およびポンプ水車の溶接技術の現状と問題点, ターボ機械, Vol. 10, No. 9, pp. 543-549 (1982).
- 6) 長藤友建: 水車・ポンプ水車の水力設計・性能開発におけるコンピュータの応用, 東芝レビュー, Vol. 34, No. 1, pp. 20-23 (1979).
- 7) 松田五美, 野村政司: ポンプ水車模型部品の NC 加工, 東芝レビュー, Vol. 34, No. 1, pp. 24-27 (1979).
- 8) Yamada, M., Matsuoka, H., Tai H., and Matsuda, I.: 5-Axis NC Cutting System of Propeller Type Water Turbine Runner, IFAC 81 PREPRINTS, Vol. XIV, pp. 170-174 (1981).

(昭和 57 年 9 月 16 日受付)