

水車及びポンプ水車に関する最近の技術進歩

Current Technology in Hydraulic Turbines and Pump Turbines

大容量化、高落差化する水車及びポンプ水車にあっては、電力系統に対する使命はもちろん、社会的使命はますます重要となってきた。また、これらを背景に顧客の機能の多様化及び高品質に対する要求も強い。

キャビテーション、効率、振動、流体力、過渡特性などは電子計算機による解析技術の向上と、豊富な実測結果により改善が図られ、予測可能となった。また、機械強度についても電子計算機による詳細応力の解析と破壊力学の適用により、その安全性が十分に検討できるようになった。

本稿は水力性能及び機械強度の両面から、最近の技術上の進歩について概説した。

妹尾克己* Katsumi Senoo

鈴木睦男* Mutsuo Suzuki

1 緒言

有限といわれている石油エネルギー資源の見地から、水力エネルギーの見直しが内外で行なわれている。特に近年では中小水力の見直しに注目されているが、我が国では古くから大容量機、高落差機開発への努力が払われてきた¹⁾。昭和56年に、我が国で完成あるいは製作中の単機最大出力100MW以上の水車は51台(うち輸出用49台)、同じくポンプ水車は65台(同、34台)である²⁾。この中には、世界最大クラスの、グリII発電所納め単機最大出力730MWフランシス形水車³⁾、及びヘルムス発電所納め単機最大出力414MWフランシス形ポンプ水車がある。

このように、我が国は水車及びポンプ水車の技術で世界のトップレベルをいくまでになった。この間には、多くの困難を乗り越え、種々の技術上の諸問題を解決して、はじめて成し遂げられたものである。本稿では、これら技術上の成果について紹介する。

2 大容量化及び高落差化

フランシス形水車及びポンプ水車は、構造及び保守が簡単で大容量化に適している。図1に最近のフランシス形水車の、また図2にフランシス形ポンプ水車のそれぞれ単機出力の推移状況を示す⁴⁾。一方、輸送制限を緩和するための小形化、総合建設費の低減を図るための高密度化に対処するために、大容量化とともに、高落差化、高速化がなされてきた。図3に、フランシス形水車の比速度対有効落差の実績をプロットし高速化の状況³⁾を、また図4に、フランシス形ポンプ水車の高揚程化の状況を示す。

これら、大容量化及び高落差化は、計算技術あるいは模型試験技術の発展などによる性能、性能予測精度の向上並びに、複雑な構造物の強度解析、材料品質、製作技術及び検査技術の向上による高品質、高信頼性の確保に負うところが大きい。これらはいずれも電子計算機の進歩に負うところが大きい。必要に応じて、いわゆるコンポーネントテストによる信頼性の確認が行なわれている^{5), 6)}。

3 水力性能における技術進歩

水車内の流れは複雑な3次元流れであり、理論的にその流れ解析を行なうことは困難である。しかし、理想化し仮定を

設けることによって、実用に供することができる精度の解析を行なえるようになった。これらと豊富な実験結果とを突き合わせるによって、更に精度の良い性能予測を行なうことができる。

3.1 ランナ内流れ解析

ランナ内流れをポテンシャル流れと仮定し、ランナ子午面内流れと翼面流れとを組み合わせ、準3次元的に解析する方法^{7), 8)}により、翼面の速度分布及び圧力分布を求める。これにより、翼の前縁あるいは後縁での圧力降下、キャビテーション特性の解明などが可能である。

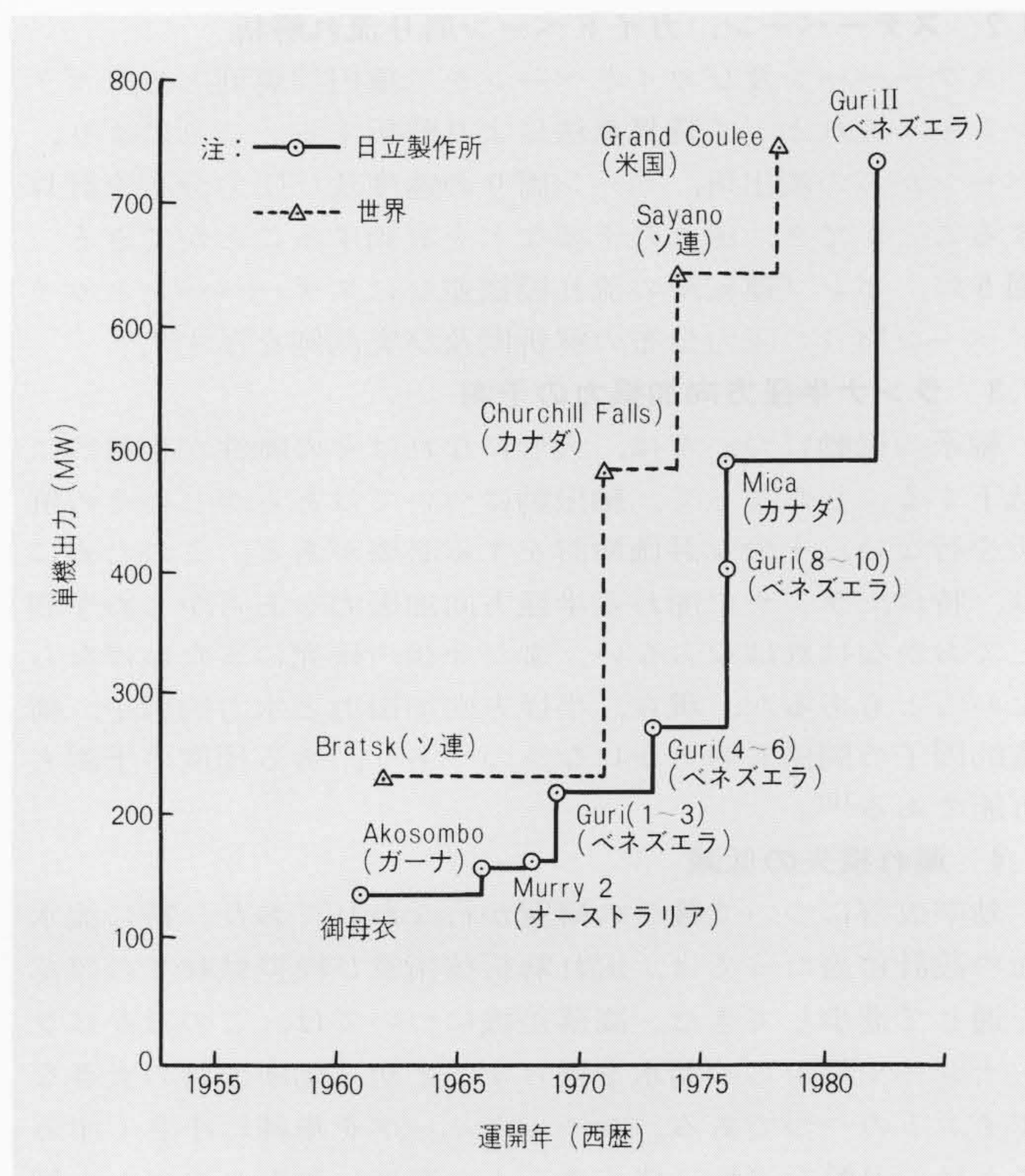


図1 フランシス形水車単機出力の推移 1975年(昭和50年)以降、単機出力は加速的に大きくなっていることが分かる。

* 日立製作所日立工場

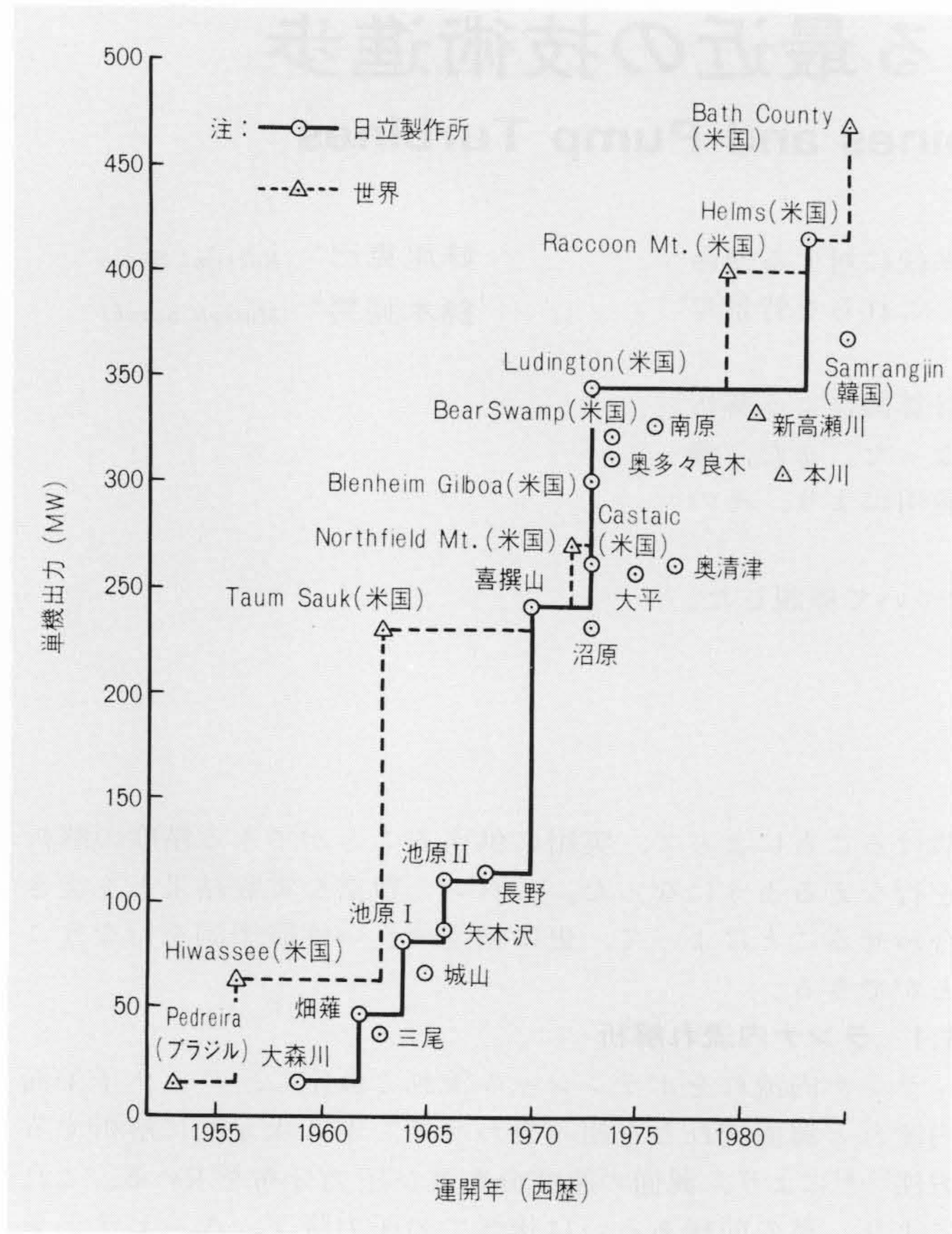


図2 フランシス形ポンプ水車単機出力の推移 日立製作所は1970年(昭和45年)以降、大出力機の記録を更新している。

3.2 ステーベン、ガイドベーン周り流れ解析

ステーベン及びガイドベーンを二重円筒翼列とし、ポテンシャル流れとして特異点法により解析する。これにより、ベーンからの流出角、ベーン周りの速度及び圧力分布を計算することができ、流れの干渉などを評価することができる。図5に、ポンプ運転時の流れ模様並びにステーベンとガイドベーン周りの圧力分布の解析例及び実測例を示す⁹⁾。

3.3 ランナ半径方向加振力の予測

軸系の振動については、大形になればその剛性が相対的に低下する。したがって、軸振動についてはあらかじめその解析を行ない、十分な評価検討をする必要がある。このためには、特に、ランナに加わる半径方向加振力をあらかじめ予測しておかなければならない。また今後の研究にまたねばならないこともあるが、現在、半径方向加振力と水力的因子、構造的因子の関係も明らかになりつつあり、ある程度の予測も可能である¹⁰⁾。

3.4 漏れ損失の低減

効率改善について種々の研究が行なわれており、特に流水面の設計に当たっては、流れ解析技術及び模型試験での確認を通じて進歩してきた。高落差機については、このほかにランナシール部からの漏水を減らすことが、効率改善の大きなポイントの一つである。シールギャップを単純に小さくすることは、過酷な運転に伴うランナの変形、軸振れなどから制限があり、いわゆる多段シールの採用が一般的である。図6に、ポンプ運転時のシール段数対漏れ損失の計算、及び実測値の一例を示す⁹⁾。これによれば、多段シールの採用によって、一段シールの場合よりも1.0～1.5%の漏れ損失の改善が図れることが分かる。電子計算機による漏れ損失の理論解析は、

シールギャップ及びシール段数決定に用いられている。

3.5 過渡特性の予測

最近では立地条件及び経済的見地から、比較的長くて細い、いわゆるLV値の大きな水路をもった発電所が多い。更に、サージタンクを省略したり、1本のペンストックに複数台の主機が接続されているといった、過渡特性上極めて厳しい条件となってきた。水力発電所のトータルシステムを考えた過渡特性は、水路条件、水車・発電機の慣性モーメント、水車の完全特性及びガイドベーン閉鎖モードに大きく依存しており、これら多岐にわたる諸現象を一度に解析するプログラムが開発されており¹¹⁾、現在ではこのような複雑な水路条件での過渡特性も、予測することができるようになっている。すなわち、1本のペンストックに複数台のポンプ水車が接続されている場合の、1台目がトリップしたときの他号機の挙動、及びこれらが順次遅れトリップしたときの過渡特性も計算可能である⁹⁾。

4 構造・強度及び信頼性における技術進歩

機器の構造及び強度上の信頼性が確保されて、水車、ポンプ水車の運転性能が発揮される。すなわち、全寿命を考慮した運転条件もしくは設計条件に対して、水車又はポンプ水車の十分な構造検討と強度設計を行なう必要がある。構造設計については、強度と保守の両面についての調和が重要であり、また強度設計については、応力解析の高精度化と広範な材料データの蓄積とによる信頼度の高い評価技術が要求されることになる。更に、最近では、強度評価、品質管理の面に破壊

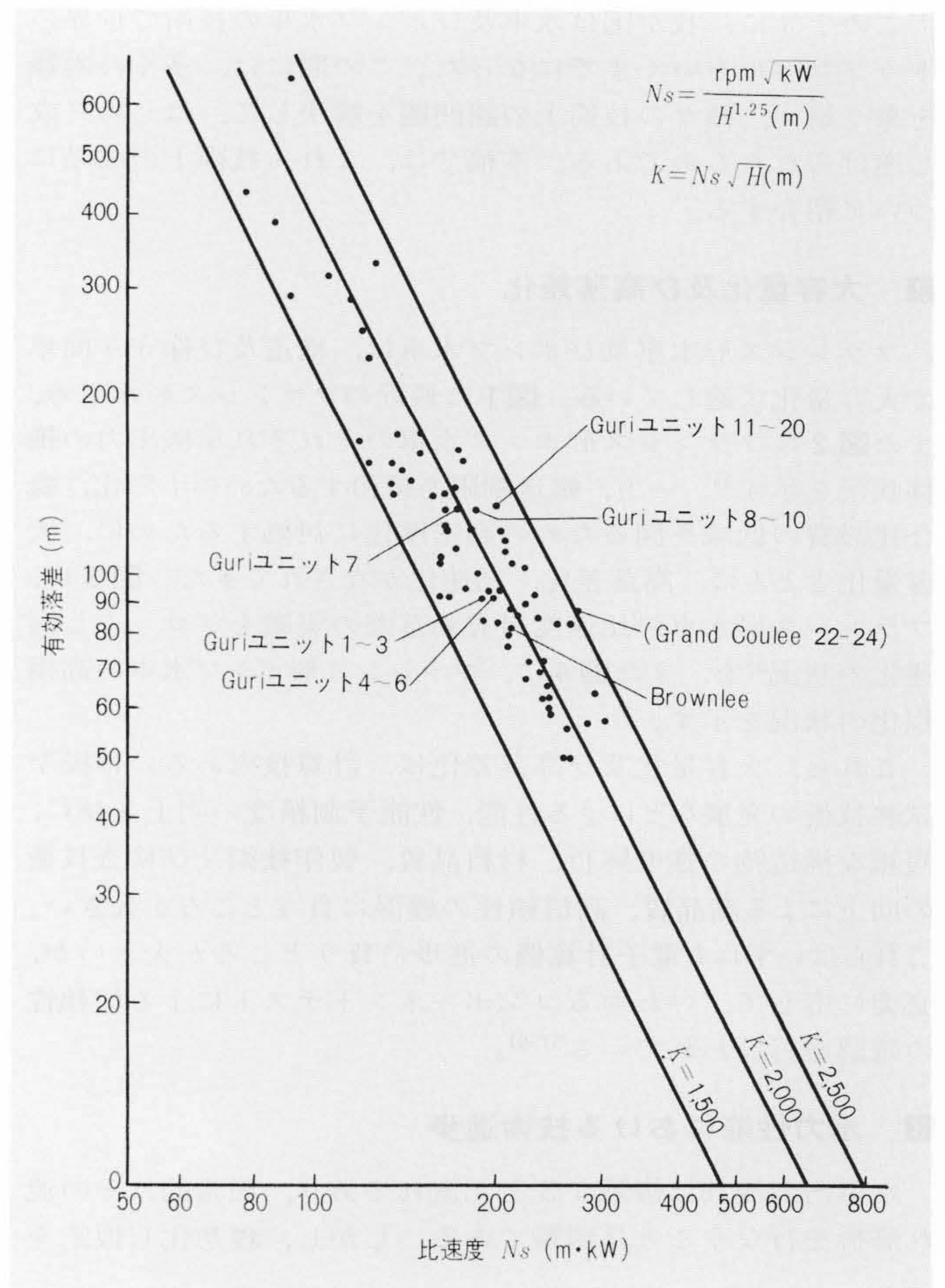


図3 フランシス形水車の比速度 グリ(GURI)水車のユニット1から20にかけての高速度化の状況がよく分かる。

力学的手法の導入も進められており、信頼性の向上に役立っている。

4.1 構造・強度解析

電子計算機を利用した対話形式の有限要素法による解析技術の急速な進歩によって、水車部品の構造及び応力解析の能

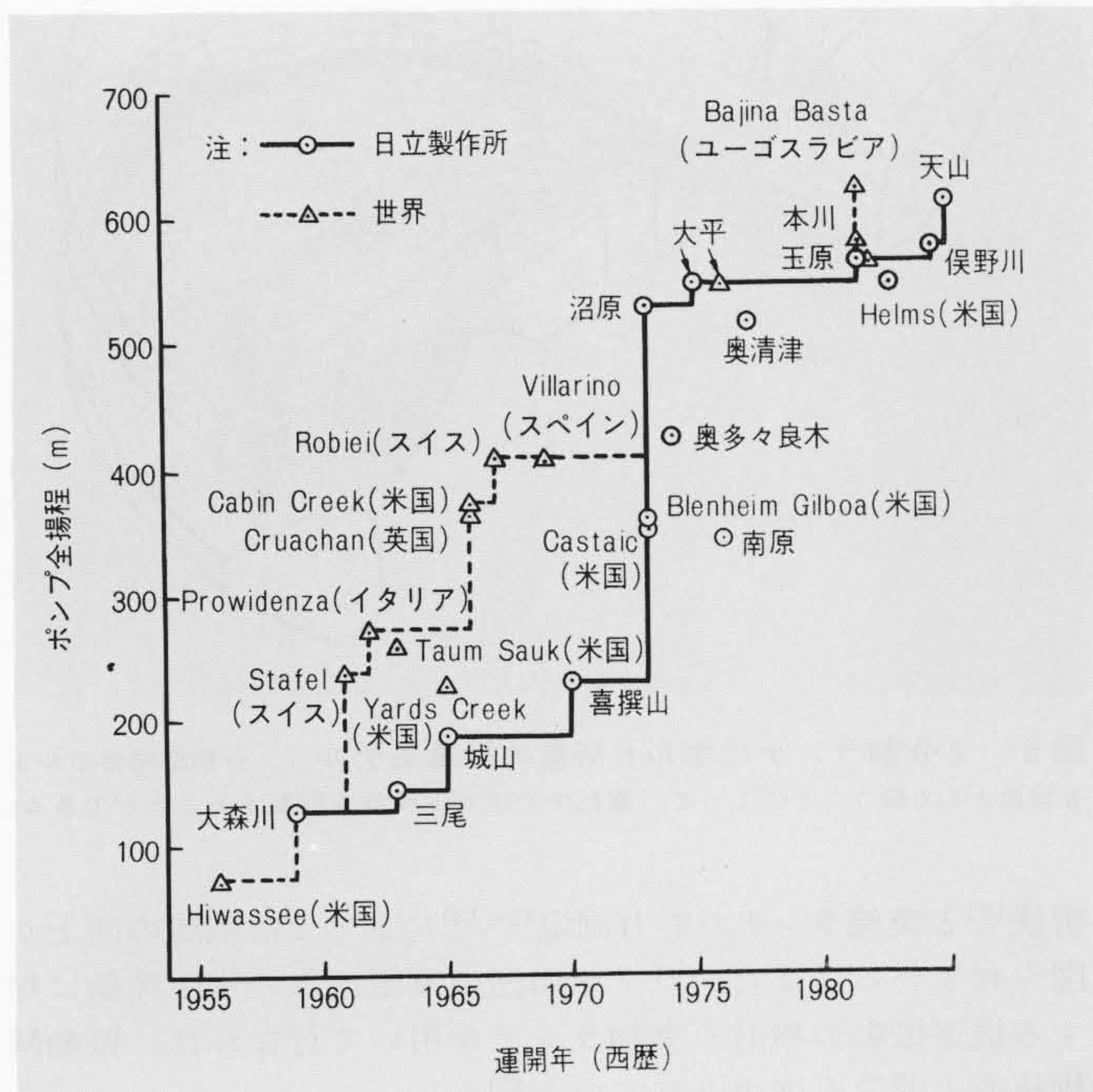


図4 フランシス形ポンプ水車単段機の全揚程の推移
水車が高落差機の前をのけた。

沼原ポンプ

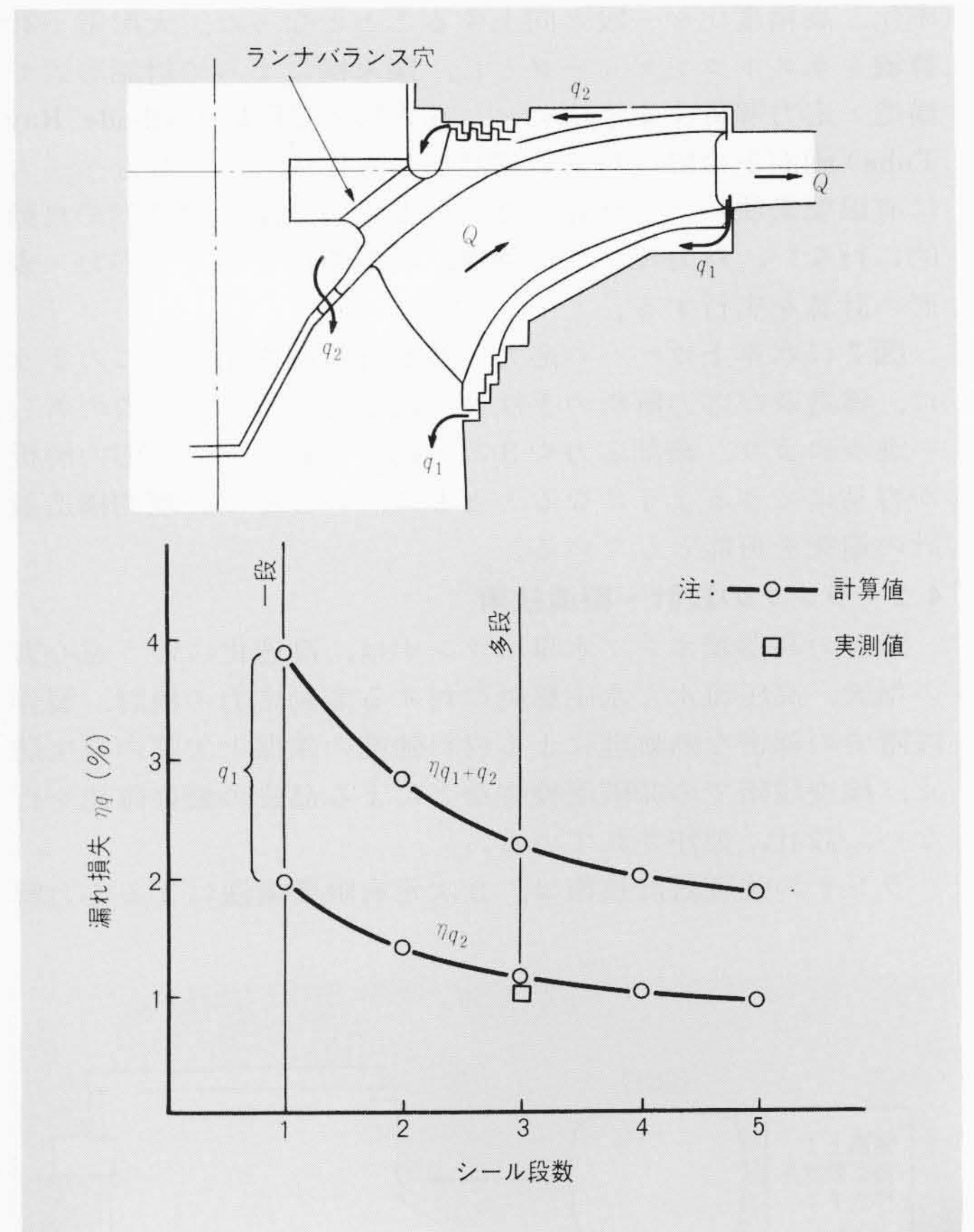


図6 ランナシールの漏れ損失 一段シールより多段にすれば、漏れ損失は1.0～1.5%改善できることが分かる。

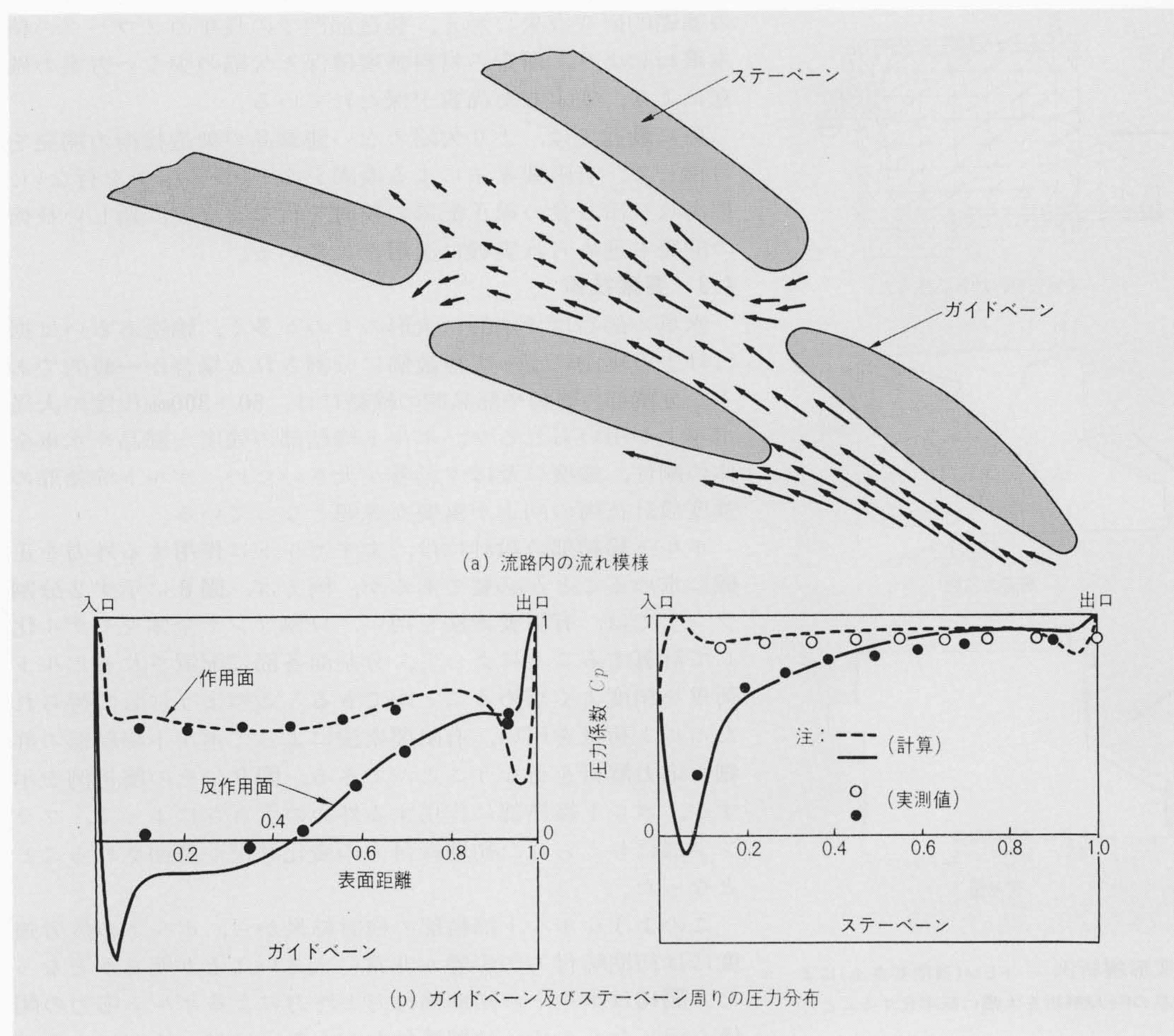


図5 ガイドベーン及びステーベーン周りの流れ解析(ポンプ運転) 計算結果と実測値は、非常によく一致していることが分かる。

率化、高精度化が一段と向上することとなった。大形電子計算機をホストコンピュータとし、端末機によって対話形式で構造・応力解析する手法では、端末機のCRT(Cathode Ray Tube)画面上に解析対象の部品形状を作成し、これをベースに有限要素法による計算のため、要素の分割を対話形で自動的に行ない、外力及び支持条件、境界条件を与えて応力・変形の計算を実行する。

図7に水車上カバーの応力・変形解析例を示す。このように、構造及び応力解析の手法は、電子計算機利用技術の著しい進歩により、細部応力や3次元的に複雑な部品の応力解析が容易にできるようになるとともに、いっそう合理的構造設計の追究を可能としている。

4.2 ランナの設計・製造技術

最近の高落差ポンプ水車用ランナは、高速化に伴う遠心力の増大、高圧流水と水圧脈動に対する変動応力の検討、製作段階での綿密な熱処理による材料強度の確保と欠陥の発生防止、検査段階での非破壊検査などによる品質の最終確認を行ない、設計、製作されている。

ランナの強度設計技術は、3次元有限要素法による応力解

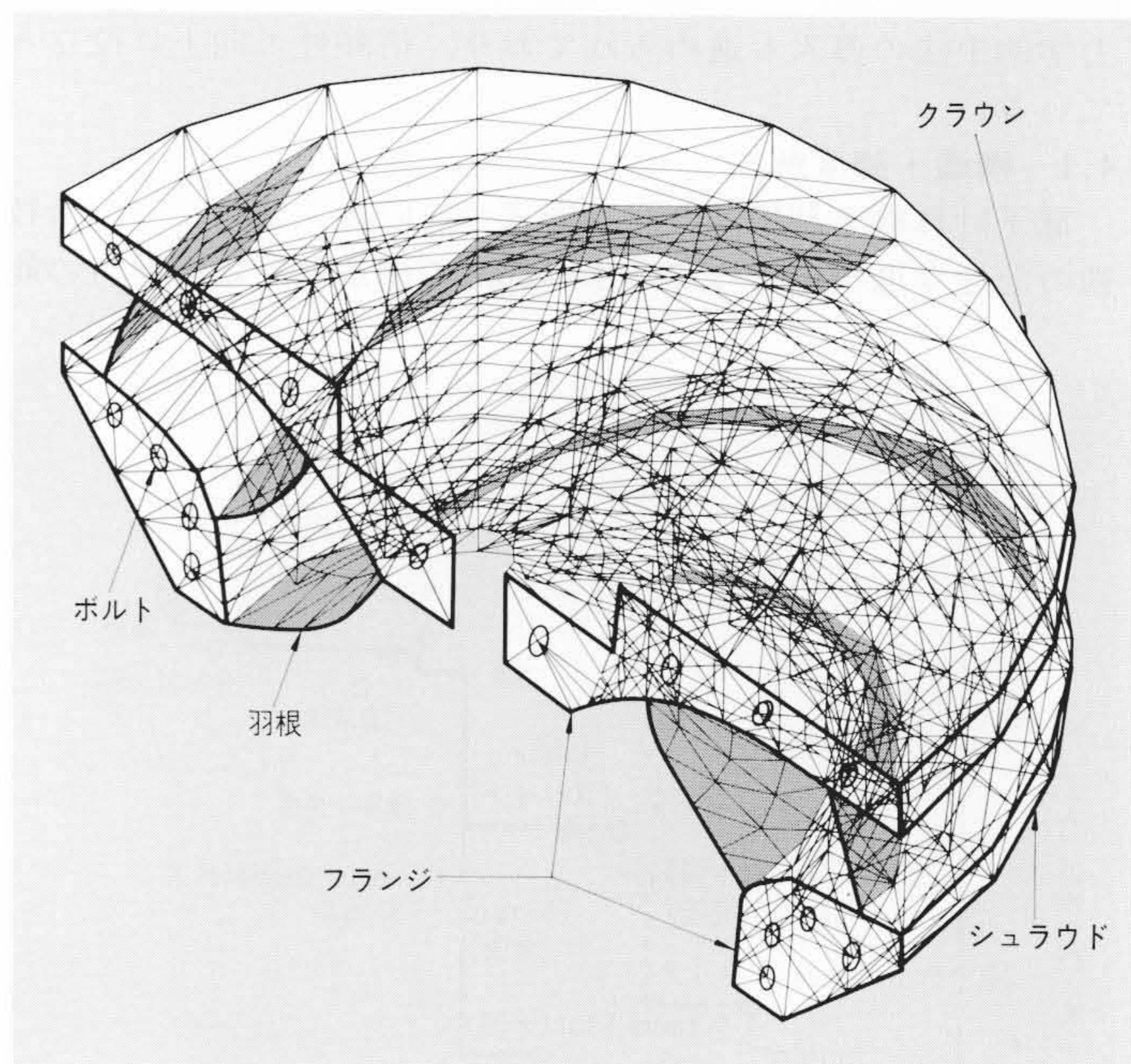


図8 2分割ランナのボルト荷重の計算モデル 分割部結合ボルトをばねとして扱うことによって、運転中のボルト荷重を計算することができる。

析法¹²⁾と実機ランナの応力測定^{13), 14)}によって信頼度の向上が図られている。また、ランナ周囲の高圧流水の水圧脈動に対する構造振動の検討も実物ランナを用いて行なわれ、振動解析技術の開発も進められている¹⁵⁾。

ランナ用材料としては、高強度で耐キャビテーション特性に優れ、溶接性も良い5Ni13Crステンレス鋼¹⁶⁾が用いられている。5Ni13Cr鋼製ランナの製造については、研究所での基礎的研究成果に加え、製造部門での長年のノウハウの積み重ねにより、所定の材料強度確保と欠陥の少ない方案の確立により、安定した品質が保たれている。

更に最近では、より欠陥のない鋼品の製造技術の開発を目指して、有限要素法による凝固シミュレーションを行ない、押湯及び冷し金の適正配置の検討を行なうなど、新しい技術の開発も進められ実機に適用されている。

4.3 要素技術

水車の部品は寸法的に大形のものが多く、輸送あるいは据付け上の理由によって複数個に分割される場合が一般的である。分割部の締結や部品間の締結には、80～300mm程度の大径ボルトが用いられるが、ボルト締結部の強度が部品や水車全体の剛性、強度に及ぼす影響が大きいため、ボルト締結部の強度設計技術の向上が重要な課題となっている。

ボルト締結部の設計には、まずボルトに作用する外力を正確に求めることが必要であるが、例えば、図8に示す2分割ランナでは、有限要素法を用い、分割ランナ全体をモデル化して計算することによって、分割面各部に配置されるボルト荷重を精度よく求めることができる。このようにして得られたボルト荷重を用い、有限要素法によってボルト締結部の詳細な応力解析を行なうことができる。図9にその解析例を示すが、ボルト締結部に作用する外力の大きさによって、フランジ部に与えられた初期締付力の変化状況が解明されることとなった。

このようなボルト締結部の検討結果から、ボルトの疲労強度には初期締付力の影響が非常に大きいことが明らかとなった。図10はボルトの初期締付力と外力によるボルト応力の関係を示したもので、初期締付力が大きいほど、外力によるボ

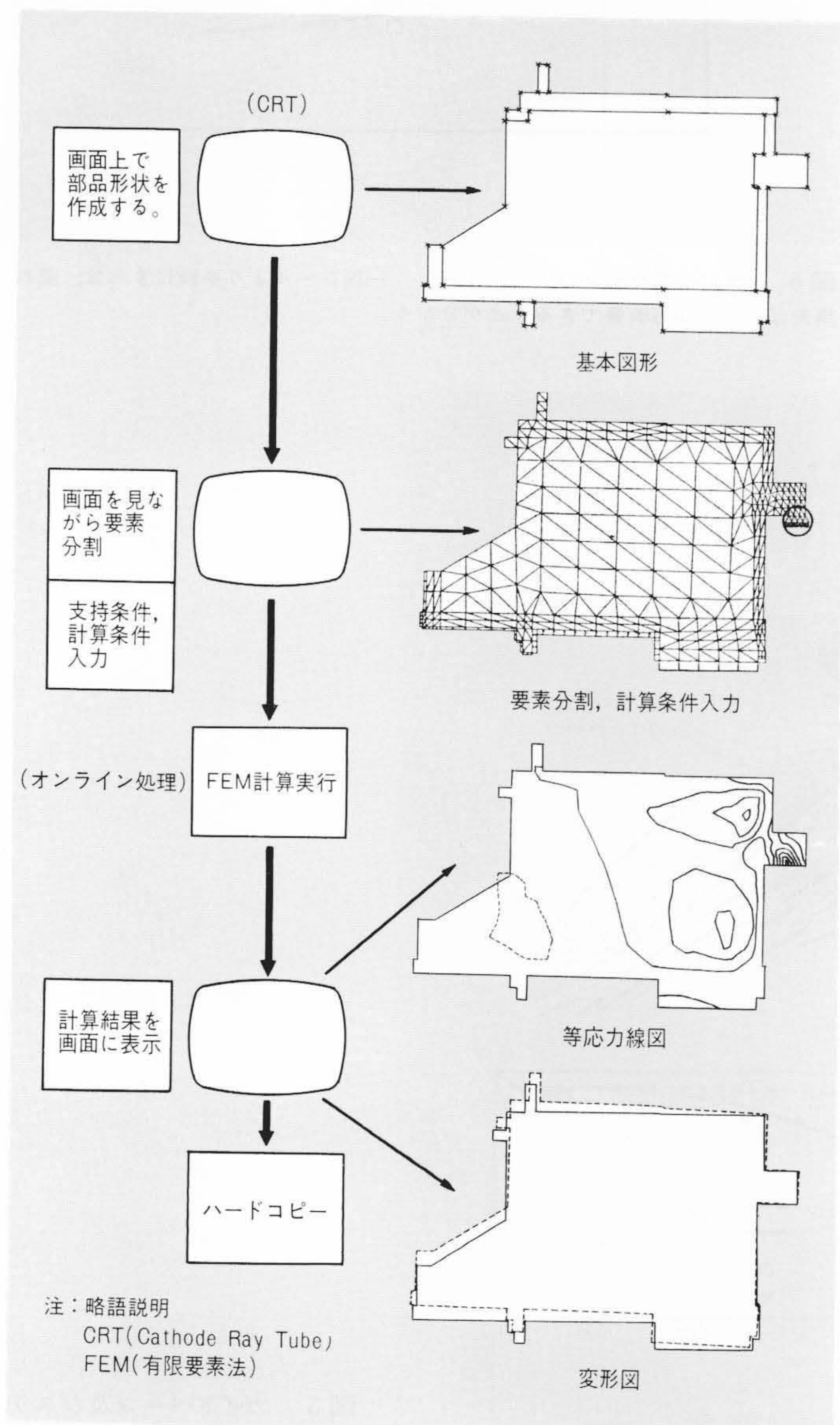


図7 上カバーの対話形応力・変形解析例 FEM(有限要素法)による対話形応力解析システムは、水車部品のFEM解析を大幅に能率化することとなった。

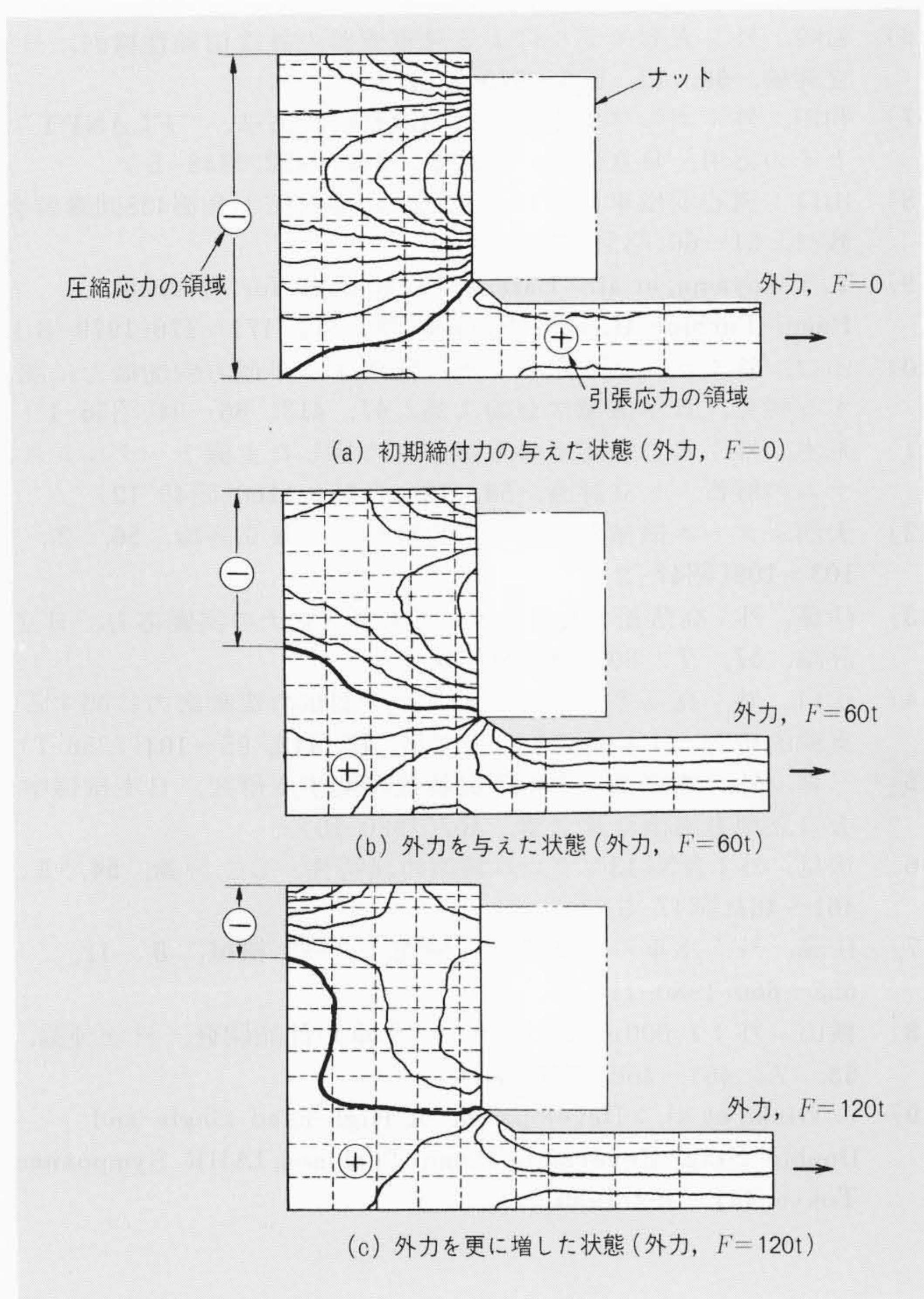


図9 有限要素法によるボルト締結部の応力解析例 ボルト中心から離れた位置に外力が作用すると、ボルト及びフランジ部の応力状態が複雑に変化する。

ルト応力は小さくなるため、疲労強度を上げるにはできるだけ初期締付力を高く与えることが望ましい。

4.4 破壊力学の適用

近年、欠陥の合理的な強度評価の手法として破壊力学が用いられるようになってきた¹⁷⁾。例えば高張力鋼ケーシングなどの耐圧品については、溶接継手の耐圧試験温度での破壊靱性値 K_{Ic} と想定欠陥に対する応力拡大係数 K_I の関係を、 $K_I < K_{Ic}$ とすることによって耐圧試験時の事故防止を図ることができる。一方、軟鋼の溶接構造物では、あらゆるモードでの応力と変動応力を応力解析あるいは実測により求め、疲れき裂進展限界の応力拡大係数変動幅 ΔK_{th} に対し、使用応力による応力拡大係数変動幅 ΔK を、 $\Delta K < \Delta K_{th}$ のように設計し、疲労破壊の防止を図ることができる。図11にステーパー付根溶接部に適用した例を示す。そのほか、老朽化した水車の寿命判定や、品質管理面にも破壊力学の適用が進められている。

5 二段ポンプ水車の技術進歩

原子力発電の比重が増すにつれて、電力系統の円滑で効率的な運営のために、機動力があり、多機能をもった揚水発電所の建設が必要となってくる。揚水発電所は比較的設計条件が自由に選べる利点をもっており、ますます高落差化、大容量化への道をたどるものと思われる。しかし、超高揚程地点になると従来の単段ポンプ水車では、効率の低下、ランナ強度の限界、深い吸込高さを必要とすることなどの問題を含んでおり、低コストで信頼性の高い機械を提供するには、なお

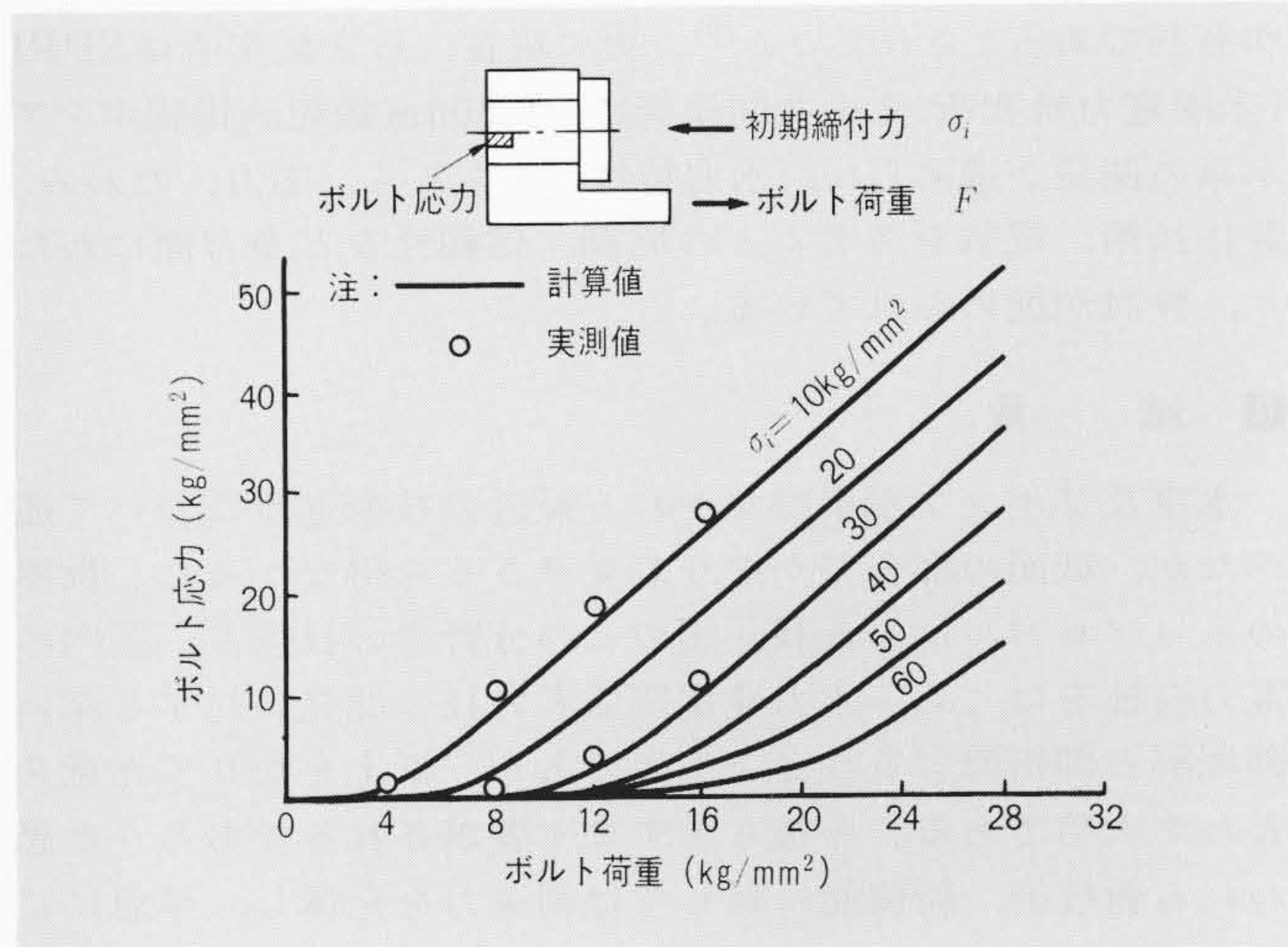


図10 初期締付力とボルト応力の関係 ボルトに対する初期締付力が高いほど、締付後の外力によってボルトに発生する応力が小さく、疲労強度に対して有利となる。

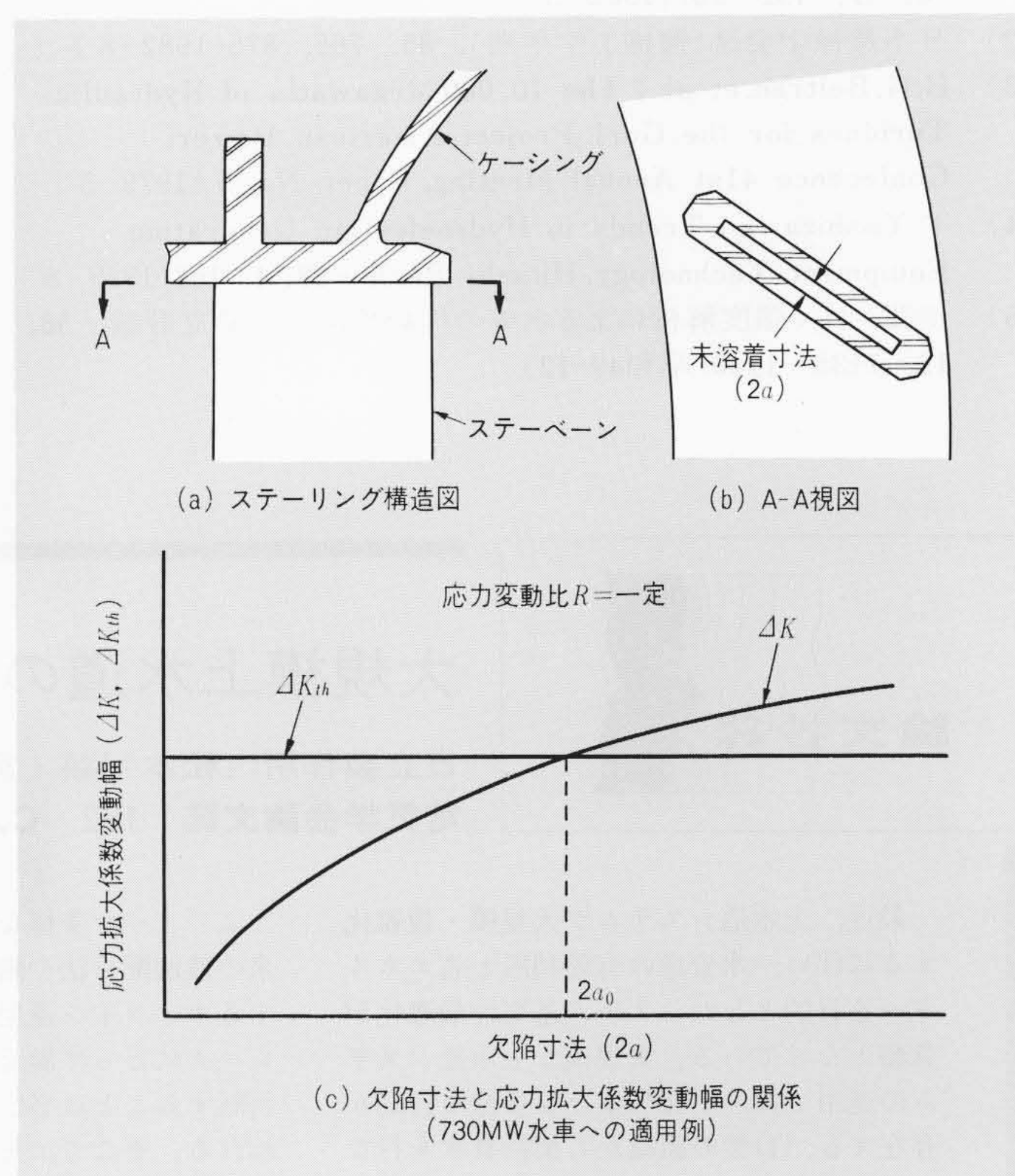


図11 ステーパー付根溶接部に未溶着部を残した設計例 応力解析技術と非破壊検査による欠陥測定技術の進歩により、破壊力学を適用することによって、合理的な品質を提供することが可能である。

これからの研究にまたねばならない。これに代わって現在開発が進んでいるのは多段ポンプ水車である。ヨーロッパでは早くから、多段ポンプ水車の製作が進められてきているが、出力的には見るべきものはない。

日立製作所では800～1,000m級の二段ポンプ水車の開発を完了し、十分実用に供しできることを確認している。この二段ポンプ水車の特徴は、上段、下段とも可動案内羽根をもっており、水車部分負荷時での効率低下及び水圧脈動増加を大幅に改善している¹⁸⁾。現状技術では1,000m級あるいは700～800m級以上の落差をもつポンプ水車では、吸込深さに制限がある場合には、上下段可動案内羽根付二段ポンプ水車のほう

が有利であるとされている¹⁹⁾。更に現在、日立製作所はEPRI(米国電力研究所)との共同研究で、1,500m級超高揚程ポンプ水車の開発が進められ、水力特性はもちろん、応力、たわみ、製作技術、電気システムとの協調、信頼性など多方面にわたり、検討が進められている。

6 結 言

水車及びポンプ水車にかかわる最近の技術進歩について述べたが、紙面の都合でかなり割愛せざるを得なかった。世界のトップレベルにある我が国のこの分野での技術も、国内の電力会社をはじめ、水力発電関係者の技術開発に対する深い御理解と御指導に負うところ大であり、紙上をかりて謝意を表わす次第である。今後ますます要求されるであろうと思われる新技術、新機能に対しては創造力を発揮し、早急にこれを達成することが必要であり、本稿が関係各位にいささかでも役立つことができれば幸いである。

参考文献

- 1) 岡田, 外: 大容量フランス水車の技術動向, ターボ機械, 10, 3, 131~137(1982-3)
- 2) 日本機械学会誌(機械工学年鑑), 85, 765, 875(1982-8)
- 3) H.G.Beltran, et al.: The 10,000 Megawatts of Hydraulic Turbines for the Guri Project, American Power Conference 41st Annual Meeting, Paper No. 5(1979-5)
- 4) T.Yoshizawa: Trends in Hydroelectric Generating Equipment Technology, Hitachi Review 28, 4, 167(1979-8)
- 5) 伊藤, 外: 強度解析による水車の信頼性向上, 日立評論, 56, 12, 1135~1140(昭和49-12)
- 6) 岩崎, 外: 大形モデルによる発電機器の強度信頼性検討, 日立評論, 59, 12, 965~970(昭52-12)
- 7) 和田, 外: ポンプ水車ランナ内流れ解析方法, "FLANPT"とその応用, 日立評論, 55, 5, 447~452(昭48-5)
- 8) 山口: 遠心羽根車における流れ, 日本機械学会第438回講習会教材, 51~60(昭51-7)
- 9) T.Yokoyama, et al.: Latest Technology for Hydraulic Pump-Turbine, Hitachi Review 28, 4, 171~176(1979-8)
- 10) 山口, 外: ポンプ水車ランナに作用する半径方向加振力に関する研究, 日本機械学会論文集, 47, 413, 86~94(昭56-1)
- 11) 荒木, 外: 水力発電所の水路系を考慮した主機トータルシステムの解析, 日立評論, 56, 12, 1155~1160(昭49-12)
- 12) 大西: ターボ機械羽根車の応力解析法, 日立評論, 56, 2, 103~108(昭47-2)
- 13) 伊藤, 外: 高落差・大容量ポンプ水車ランナの実働応力, 日立評論, 57, 7, 603~608(昭50-7)
- 14) 山口, 外: 高落差ポンプ水車ランナ羽根の変動応力に関する実験的研究, 日本機械学会論文集, 47, 413, 95~104(昭56-1)
- 15) 三森, 外: 水車ランナの振動特性に関する研究, 日本機械学会日立地方講演会論文集, 407(1980-10)
- 16) 伏見, 外: 含Ni 13%クロム鋳鋼の諸特性, 日立評論, 54, 5, 461~464(昭47-5)
- 17) 伊藤, 外: 水車の強度設計と検査, ターボ機械, 8, 11, 652~660(1980-11)
- 18) 横山, 外: 1,000m級二段ポンプ水車の性能開発, 日立評論, 63, 7, 461~466(昭56-7)
- 19) A.Oishi, et al.: Development of High-head single-and Double-Stage Reversible Pump-Turbines, IAHR Symposium Tokyo, 441~452(1980)

論文抄録

大規模上水道のための時空間階層形運用計画手法

日立製作所 松本邦顕・宮岡伸一郎

電気学会論文誌 102-C, 5, 109~116(昭57-5)

最近、上水道システムが大規模・複雑化するに伴い、水資源の有効利用と省エネルギーを目的としたシステム運用の最適化が急務となっている。大規模な上水道システムの運用では、下記のような多様な目的が存在する。(1)他の組織から契約買水を行なう場合が多く、この契約を遵守すること。(2)水質の良い水源から多く取水し、また送水ポンプの運転の効率化を図るとともに、自然流下系を十分に活用する経済的な運用を行なうこと。(3)浄水場の処理水量の変更頻度を減少させ、運転を容易にし、かつ機器の疲労を防ぐために運転を定常化させること。(4)需要変動を吸収し、同時に安全性の観点から配水池間で貯水量の不均衡が発生しないように、貯水施設の有効かつ安全な運用を行なうこと。(5)需要節点の圧力を可能な限り許容(1.5~4気圧)内に保ち、顧客へのサービス圧を確保すること。(6)管路網内の圧力を不要に高くして、漏水量を増大させないようにすること。

このような多様な目的をもつ水系で、従来の最適配分法や階層的配分法を日々使用するオンライン運用に適用した場合、オペレータにとって満足な解であるかどうかを判断することは必ずしも容易ではないと思われる。そこで、モデルによる求解過程の中で積極的にオペレータが介入し、システムが要求する多様な目的を満足しているかどうかをチェックできるマンマシン性を重視したモデル構造をねらった。運用計画モデルを各施設の運用目的に応じて時間的、空間的に階層化し、各階層間でオペレータのチェックを可能にした。このようにモデルを分割することによって、各モデルに必要なメモリの低減化と計算の高速化も併せて可能にした。

モデルは、取水場・貯水池運用計画(上位レベル)、浄水場運用計画(中位レベル)及び配水池運用計画(下位レベル)の空間的把握の階層化と、各レベルを日単位、昼・夜単位及び時間単位の時間的把握の階層化

に分け、これらを複合した時空間階層形とした。なお、浄水場運用計画モデルでは、浄水場の運用計画と浄水場間の水配分を決定するため、各浄水場に連なる配水池群を一まとめにしてゾーンとし、ゾーン間ネットワーク問題としてとらえた。

取水場・貯水池運用計画は、貯水池の運用計画を短期運用計画(週単位日間)に合うように計画すると同時に、複数河川からの翌日取水量を計画する。浄水場運用計画は、昼・夜のゾーン間ネットワークでの配分計画を立案する。配分法として、昼間及び夜間の計算用ネットワークを作成し、それぞれのネットワークに対し最小費用流を求め、浄水場運転計画やゾーン間送水計画を立案する。配水池運用計画は、ゾーン内配水池の時間単位の水位計画や配水池間の送水計画を立案する。

この運用計画手法を270万都市の上水道総合制御へ適用し、その有効性を確認した。