

省エネルギー・環境システムにおける OR —エネルギー・上下水道管理システムの運用改善—

村井 雅彦, 山田 利広, 坂本 義行, 長岩 明弘

近年, エネルギー・環境問題がますます重要性を増してきており, これに対する解決策が求められている。東芝では, これまで最適化や予測の技術により, 省エネルギーや環境問題の改善を目指したシステムを開発し, 実プラントに適用してきた。その中から本稿では, 工場向け省エネ最適運用システム, 上水道送水系の運転計画システム, および, 下水道の雨水流入量予測システムについて紹介する。

キーワード: エネルギープラント運転計画, 上水道送水計画, 下水道雨水流入量予測

1. はじめに

近年, エネルギー・環境問題がますます重要性を増してきており, これに対する解決策が求められている。東芝では, これまで最適化や予測の技術により, 省エネルギーや環境問題の改善を目指したシステムを開発し, 実プラントに適用してきた。その中から本稿では, 工場向け省エネ最適運用システム[1], 上水道の送水計画システム[2]~[5], および, 下水道の雨水流入量予測システム[12]~[15]について紹介する。

半導体工場や薬品工場などのクリーンルームが設置された工場では, ボイラやコージェネレーションシステム (CGS), 冷凍機といった多くの熱源機器が稼働しており, 大量のエネルギーを消費している。また, 製紙工場や化学工場などでも, 製品製造に使用する電力と蒸気を供給するために, 複数のボイラ, 蒸気タービンおよび発電機 (BTG) から成る大規模な自家発電設備が稼働している。最適運用システムは, これらエネルギー供給設備の運用に最適化手法を適用したものであり, 時々刻々と変化する工場のエネルギー需要にあわせて, 電気やガスなどの購入エネルギーを最小化するように各機器の出力を計算し, 制御するシステムである。本稿では, システムの概要と半導体工場に

適用した例について紹介する。

一方, 上水道は都市生活におけるライフラインとして定着しており, 現在ではその維持管理と効率よい運用が求められている。本稿では, 上水道施設の効率よい運用を実現するため, 遺伝的アルゴリズム (GA) の適用を検討した結果を紹介する。

また, 雨天時の下水道において, 下水管に流入してきた雨水を雨水ポンプで排出し, 浸水を防除することは下水道の重要な役割である (図1)。このため, 近年頻発する都市型水害への新たな対策も推進されている[6]。また都市域に多く採用されている汚水と雨水を同一の下水管で流す合流式下水道では, 雨水吐き口から未処理下水が河川, 海域等の公共水域に排水されることによる水質汚濁の問題が懸念されており, その対策が進められている[7]。このように雨天時の下水道では, 浸水の防除と汚濁物質の制御が求められており, 予測のようにフィードフォワード的な手段を用いるなどの計測・制御の重要性が指摘されている[8]。例えば雨水流入量の予測ができると, 雨量が施設に流入してくる適切なタイミングでポンプを稼働させるこ

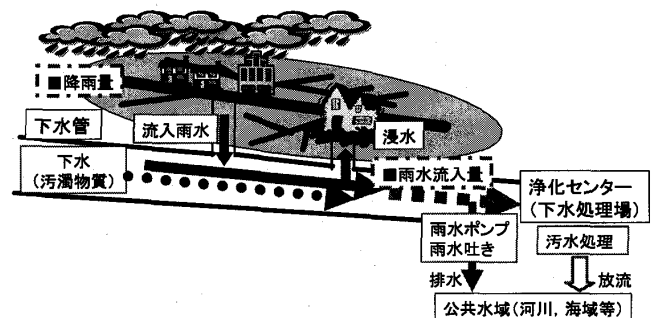


図1 雨天時の下水道の役割

むらい まさひこ, さかもと よしゆき, ながい わあきひろ

㈱東芝 電力・社会システム技術開発センター
〒183-8511 府中市東芝町1

やまだ としひろ

㈱東芝 電力システム社 新技術応用事業推進統括部
〒105-8001 港区芝浦1-1-1

とによって浸水防除したり、反対に必要以上の排水を抑えたり、あるいは適切に消毒することによって水質汚濁を軽減することも可能となってくる。これに対して本稿では、東芝で開発してきた雨量レーダ情報を用いた降雨移動予測や下水道施設への流入量予測[9]、雨水ポンプの予測制御や消毒塩素注入制御[10]などで用いられている雨水流入量予測システムについて紹介する。

2. 工場向け省エネ最適運用システム

2.1 システムの概要

製品製造工場においては、操業に必要なエネルギー（電力、蒸気、冷水、温水等）を賄うため、ボイラやCGS、各種冷凍機などの多くのエネルギー供給機器が設置されている。エネルギー需要は、季節や昼夜により変化するため、需要変動の要因を理解している運転員の経験により運用されていることが多い。しかしながら、人による運転には自ずと限界がある。

最適運用システムは、気象予報や生産計画に基づき、一日の需要変化を予測し、予測された需要値に対して、各機器の最適な運転状態（起動・停止や負荷配分）を計算し、制御することで、購入エネルギーの最小化を実現するものである。

最適運用システム概念図を図2に示す。

2.2 半導体工場への適用例

ここでは最適運用システムを半導体工場へ適用した例を示す。

図3は適用対象である半導体工場のエネルギー供給プラントの概略構成図である。半導体工場ではクリーンルームの空調設備において、電力、蒸気、冷水、温水といった複数のエネルギーを必要とする。電力需要は、電力会社からの購入電力とCGSの発電電力で賄っている。蒸気は、CGSからの発生蒸気と4台のボ

イラにより供給されている。冷水は、5台の蒸気吸収式冷凍機と、7台のターボ冷凍機および4台のダブルバンドル冷凍機で生成され冷水槽を介して供給される。ダブルバンドル冷凍機は、冷水製造時の廃熱の一部を温水として回収することができ、温水需要はこれで賄っている。

このように複数のエネルギーを仕様の異なる複数の機器で供給するため、各機器の起動停止タイミングと負荷配分を最適化することにより、省エネ化を図ることができる。

図4は需要予測の一例である。予測モデルにはニューラルネットを用いた。予測誤差としては平均3%程度であり最適化に十分使用できる。ただ、気象予報値もズレがあるため、実温度と需要の実績値を使って予測値の誤差を自動的に補正し、精度を高めている。

また、最適化モデルを以下に示す。対象プラントに、冷温水槽があり、冷熱および温熱の蓄熱/放熱運転が可能であり、このため、目的関数は、購入電力と購入燃料の一日合計の最小化となる。制約条件は、各エネルギーバランスと、機器の特性関数から構成される。

$$\begin{aligned} \text{Minimize } & \sum_t [W_P(t) \times C_W(t) \\ & + \{F_C(t) + F_B(t)\} \times C_F] \quad (1) \\ \text{Subject to: } & \end{aligned}$$

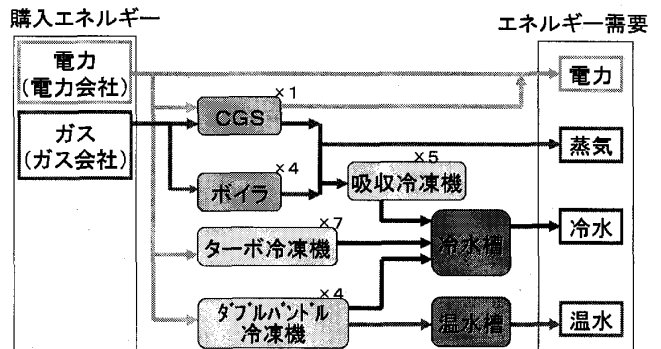


図3 対象プラントの概略構成図

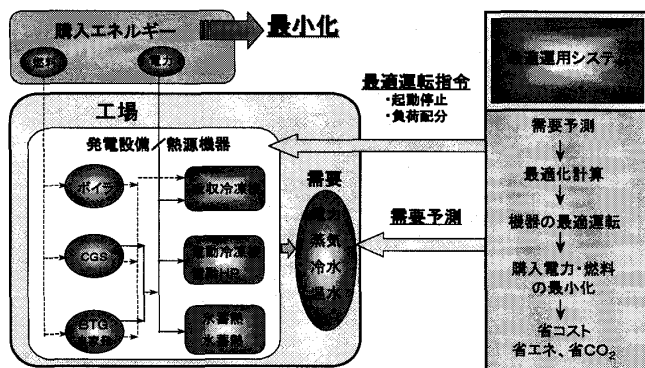


図2 最適運用システム概念図

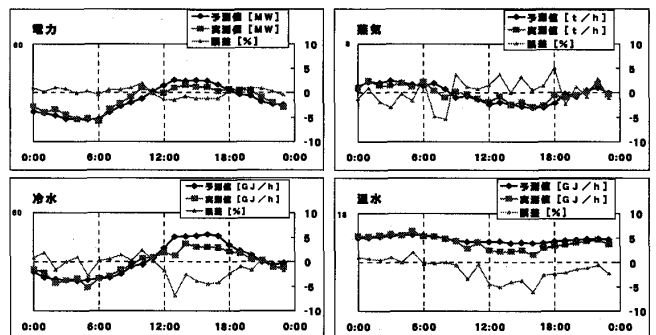


図4 需要予測の一例

(電力バランス)

$$W_D(t) + W_R(t) + W_{DB}(t) + W_{AX}(t) = W_P(t) + W_C(t) \quad (2a)$$

$$W_{P \min} \leq W_P(t) \leq W_{P \max}(t) \quad (2b)$$

(蒸気バランス)

$$S_D(t) + S_{AR}(t) = S_C(t) + S_B(t) \quad (3)$$

(CGS およびボイラの燃料消費特性)

$$F_C(t) = f_C(W_C(t), T_A(t), S_C(t), T_{FW}(t)) \quad (4a)$$

$$F_B(t) = f_B(S_B(t), T_{FW}(t)) \quad (4b)$$

(蒸気吸収式冷凍機の蒸気消費特性)

$$S_{AR}(t) = f_{AR}(Q_{AR}(t), T_{RI}, T_{CI}) \quad (5)$$

(ターボ冷凍機, ダブルバンドル冷凍機の電力消費特性)

$$W_R(t) = f_R(Q_R(t), T_{RI}, T_{CI}) \quad (6a)$$

$$W_{DB}(t) = f_{DB}(Q_R(t), Q_{DB}(t), T_{RI}, T_{HI}, T_{CI}) \quad (6b)$$

(冷温水槽の動特性と冷熱, 温熱バランス)

$$Q_{CWT}(t) = Q_{CWT}(t-1) + Q_{AR}(t) + Q_{DB}(t) + Q_R(t) - Q_{CD}(t) \quad (7a)$$

$$Q_{CWT \min} \leq Q_{CWT}(t) \leq Q_{CWT \max} \quad (7b)$$

$$Q_{HWT}(t) = Q_{HWT}(t-1) + Q_{DB}(t) - Q_{HD}(t) \quad (7c)$$

$$Q_{HWT \min} \leq Q_{HWT}(t) \leq Q_{HWT \max} \quad (7d)$$

(記号)

- W : 電力 [MW], F : 燃料流量 [Nm³/h],
- C : 単価 [円/MW] または [円/Nm³]
- S : 蒸気流量 [t/h]
- Q : 熱量 [MJ/h] または [MJ]
- T : 温度 [°C], f : 特性関数, t : 時間 [h]

(添字)

- P : 受電, W : 電力, C : CGS,
- B : ボイラ, F : 燃料,
- D : 需要, AX : 補機
- AR : 蒸気吸収式冷凍機, R : ターボ冷凍機,
- DB : ダブルバンドル冷凍機,
- CWT : 冷水槽, HWT : 温水槽,
- CD : 冷水需要, HD : 温水需要
- RI : 冷水入口, HI : 温水入口,
- CI : 冷却水入口
- FW : 給水, A : 大気
- \min : 下限値, \max : 上限値

図5は最適運転の検証試験を行ったときの結果である。冷水槽や温水槽を活用した夜間蓄熱運転を積極的に行っている。また、需要予測により蒸気吸収式冷凍機が最小限の台数となりガス使用量を削減している。

一日の積算効果は、省コストで4.5%、省エネ、省

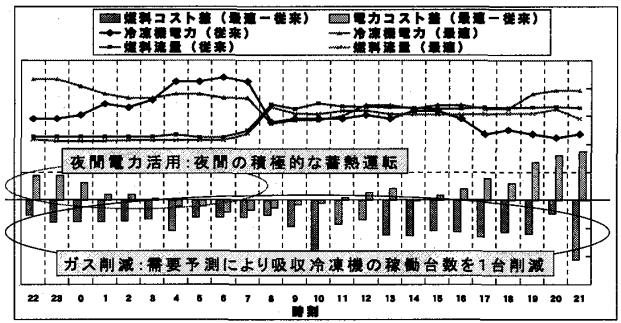


図5 検証試験結果

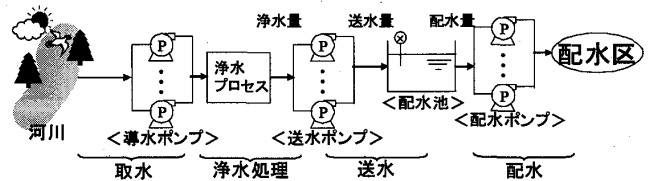


図6 送水系プラント

CO₂ で3%であった。効果は季節により変動するが、通年では3~5%の効果が実際に得られた。

3. 上水道における送水計画システム

3.1 上水道における送水計画問題

図6に示すように、一般に上水道プロセスは取水、浄水処理、送水、配水からなるが、ここでは浄水プロセスから配水池への送水プロセスの運用計画の最適化を考える。

上水道の浄水は、需要量に対して不足することなく浄水を需要家へ配水しなければならない。一方で、浄水場での浄水処理を安定化させるため浄水処理量(浄水場から配水池までの送水量とほぼ同じ)はできるだけ一定であることが求められる。やむを得ず浄水処理量(=送水量)を変更する場合には、ポンプや配管への影響を考慮して急激な流量の変化を避けるべきである。さらに、運用の効率性の観点からポンプ動力費(電力料金)をできるだけ低くするため、夜間電力を活用した送水計画も望まれる。

これらを実現するには、配水量の変化に合わせて配水池水位を変動させ、浄水場から配水池への送水量をできるだけ一定とするように送水計画を最適化する必要がある。

そこで、本稿が扱う送水計画問題は以下に示す①~③の項目を満足するような送水量を決定する問題と定義する。

- ① 浄水場から配水池への送水量はできるだけ一定

とする (1日を通じてポンプ運転変更台数を最小化)

- ② 電力単価の安い夜間電力を考慮する (昼間時間帯のポンプ運転台数を最小化)
- ③ ある時間帯においては配水池の目標水位を設定し, できるだけ目標水位に近くなるような送水を行う

ただし, 次のような制約を満足することを前提とする.

- ・ 配水池水位の上下限値を逸脱しない (配水池水位の物理的もしくは運用上の制約)
- ・ 浄水需要に不足することなく浄水を供給する (配水需要と供給の収支)
- ・ 急激な送水量変更を避けるため, 1度に変更できるポンプ台数はある設定された台数以下とする

3.2 送水計画問題の定式化

送水計画は以下のように0-1整数計画問題となる.

(1) 目的関数

$$\text{minimize } f = J_p + J_s + J_{h\text{-err}} \quad (8)$$

ここで, 式(8)の各項を以下のように定義する. ただし, $x_k \in \{0, 1, \dots, n\}$, n は送水ポンプ運転台数, $k = 0, 1, \dots, \text{TIME}$, TIME は計画最終時刻分ステップ数とする.

- ・ 各時間帯における送水ポンプ運転台数[台]

重みを夜間と昼間など時間帯ごとに変えることにより, 送水ポンプの運転台数が調整され, 結果として, 消費電力料金が低減化される

$$J_p = w_1 \times \sum_{k=1}^{\text{TIME}} x_k \quad (9)$$

- ・ 送水ポンプ運転変更台数[台]

$$J_s = w_2 \times \left(\sum_{k=1}^{\text{TIME}} |x_{k-1} - x_k| \right) \quad (10)$$

- ・ 計画開始時刻での初期水位と計画最終時刻での計画水位との偏差 [m]

$$J_{h\text{-err}} = w_6 \times |h_{\text{TIME}} - h_0| \quad (11)$$

ただし, h_0 は計画開始時間での初期水位, h_{TIME} は時刻 TIME における水位とする.

(2) 制約条件

時刻 k における制約条件を以下に示す.

- ・ 浄水需要 (Q_k とする) と計画送水量 (Q_{sk} とする) との収支

配水池の水位変化を同時に考慮して,

$$Q_k = Q_{sk} - a \times (h_k - h_{k-1}) \quad (12)$$

となる. ただし, a は配水池の底面積 [m^2]を表す.

- ・ 各時刻における各配水池の上下限水位

時間	22	23	0	1	2	3	4	5	...	21
ステップ	0	N	0	2	0	2	0	0	...	0

図7 実際のコーディング方法

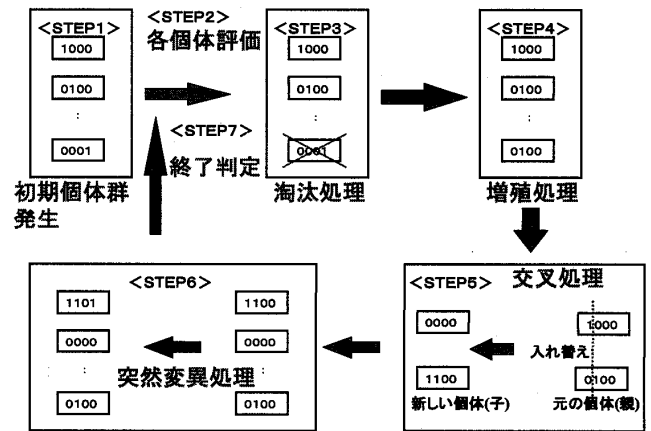


図8 GAフロー

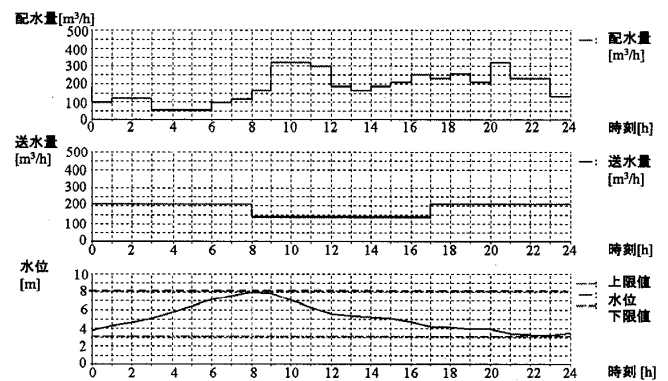


図9 GAによる送水計画例

$$\underline{h}_k \leq h_k \leq \bar{h}_k \quad (13)$$

$\underline{h}_k, \bar{h}_k$ はそれぞれ時刻 k での配水池の上下限水位 [m]を表す.

- ・ 1度に変更できるポンプ運転台数に対する制約

$$|x_{k-1} - x_k| \leq R \quad (14)$$

R は1度に変更できるポンプ運転台数とする.

3.3 GAのコーディングとアルゴリズム

GAの適応度は以下に示すように式(8)で示した目的関数の逆数とする.

$$\text{maximize } \text{適応度} = 1/\text{目的関数} \quad (15)$$

1個体での遺伝子列のコーディング方法は図7に示すように, 各時刻におけるポンプ運転台数 (ステップ)を整数値で表したものとする. ただし, N はポンプの最大台数とする.

GAのアルゴリズムは, 図8に示すように, 一般的なシンプルGAを適用した.

3.4 シミュレーション

対象プラントは図6に示す送水系を想定し、6台の送水ポンプによる1日の送水計画を計算した。

図9にシミュレーション結果を示す。図9より、電力単価の安い夜間に多く送水し、電力単価の高い昼間は送水量を少なくしていることが分かる。また、朝8時から9時の需要が大きくなるのに対応し、配水池の水位を運用上限ぎりぎりまで上げ、需要に対する浄水の送水が適切に運用計画されていることがわかる。

4. 雨水流入量予測システム

4.1 RRL法を用いた流入量予測システム

都市域の雨水流出現象の把握は、下水道施設の計画などでも必要とされている。このため種々の解析手法が示されており、そのひとつであるRRL (Road Research Laboratory) 法は、建設省土木研究所が改良を加えるなど国内でも多く用いられてきた手法である[11]。

このRRL法は、住宅地や道路、公園といった土地の利用形態に対応する雨水の流出割合(流出係数)を考慮した下水管に流入する降雨量(有効降雨)の算出、管路長などに基づいた流入雨水の流出地点までの到達時間の算出、それらの掛け合わせによる流入量の算出などの手順を経て雨水流入量を計算する。

このRRL法を実際のオンラインのポンプ運転に適用した流入量予測システムの開発では[12][13]、要因である降雨量と結果である雨水流入量の非線形性、すなわち雨の降り始めでは地面への浸透などで流出する割合は小さく、降雨の積算量が多くなると流出割合は大きくなる現象を考慮した(10)式に示す流出係数モデルを開発した。

$$\text{流出係数モデル } C(R) = \frac{b}{1 + a \cdot e^{(R_0 - R)/d}} + c \quad (10)$$

R : 降雨の積算量 [mm]

R_0, a, b, c, d : パラメータ

実際のポンプ場のデータで流出係数モデルのパラメ

ータを調整し、複数の降雨日データを用いて当該ポンプ場のポンプ運転で求められる10分先の流入量予測の誤差評価を行った結果を表1に示す。表1において平均的誤差は流入総量で4%、ピーク流量で3% (誤差絶対値平均1.1 m³/s)、ピーク流入時間で4分の誤差になった。ここでピーク流量の誤差は、対象のポンプ場におけるポンプ吐出量平均5.5 m³/sの0.2台分に相当する。これは、流量誤差をポンプ1台程度に抑えるというポンプ運転員が期待する目標レベルを達成する結果である[13]。

4.2 システム同定手法を用いた流入量予測システム

RRL法は雨水流出と下水道の土木構造を考慮したモデルのひとつであるが、降雨量と雨水流入量のみに着目すると、予測モデルにブラックボックスモデルが適用できる。これに対して前出の降雨量と雨水流入量の非線形性を考慮して、(17)式に示すHammerstein形と呼ばれる非線形のARX (Auto Regressive eXogenous) モデルを適用したシステム同定手法による流入量予測システムを開発した[14]。

$$Q(t) = a_1 \cdot Q(t-1) + a_2 \cdot Q(t-2) + \dots + b_1 \cdot r(t-1) + b_2 \cdot r(t-2) + b_3 \cdot r(t-3) + \dots + c_1 \cdot r^2(t-1) + c_2 \cdot r^2(t-2) + c_3 \cdot r^2(t-3) + \dots + d_1 \cdot r^3(t-1) + d_2 \cdot r^3(t-2) + d_3 \cdot r^3(t-3) + \dots + w(t)$$

$Q(t)$: 流量 [m³/s], $r(t)$: 降雨強度 [mm/h],

$w(t)$: 白色雑音

$a_1, a_2, b_1, b_2, b_3, c_1, c_2, c_3, d_1, d_2, d_3$: パラメータ

(17)

予測精度検証の結果、非線形モデルの予測結果は従来の線形のARXモデルよりも精度が良く、RRL法とほぼ同程度の精度であることを確認している。

またこの予測システムは、広い流域に対しても流域を分割してモデルを同定する工夫を取り入れるなどして、実システムに適用されている[15]。図10に対象とするポンプ場のポンプ運転に必要な1時間先流入量予測の結果の例を示す。ここでは[A:晴天時]も

表1 流入量予測結果

降雨日 (月/日)	流入総量 [m ³]			ピーク流量 [m ³ /s]			ピーク流入時間 [分]		
	実績	予測	誤差 [%]	実績	予測	誤差 [%]	実績	予測	誤差
7/3	174000	179000	3%	33.1	36.4	10%	46	49	3
7/5	71800	69900	-3%	18.1	16.7	-8%	57	65	8
7/6	246000	239000	-3%	34.4	32.1	-7%	145	145	0
7/17	147000	145000	-1%	34.4	33.2	-3%	113	115	2
8/2	65100	60000	-8%	9.9	9.6	-3%	79	85	6
8/30	351000	336000	-4%	65.7	63.6	-3%	89	102	13
9/3	88400	85100	-4%	17.5	16.4	-6%	72	80	8
10/1	76500	62700	-18%	10.1	9.4	-7%	112	110	-2
絶対値平均	-	-	4%	-	-	3%	-	-	4

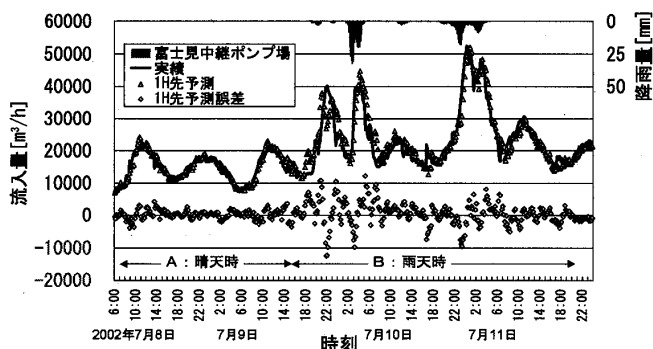


図10 流入量予測結果の例

[B:雨天時]も良好な予測結果が得られ、予測誤差は最大でも10,000 m³/h程度であり、雨天時に運転される12,000 m³/hや24,000 m³/hの大容量ポンプの運転に対して有用な支援ができる精度であることを確認している。

5. おわりに

本稿では、省エネルギー・環境分野への最適化技術および予測技術の応用例を紹介した。

工場向け省エネ最適運用システムでは、事例として半導体工場への適用例を示したが、この他、飲料系工場や製紙工場へも適用し、いずれも最適化手法が効果的であることを確認している。

また、上水道プラント送水計画のGA適用方法の検討事例では、その後の改良により、より複雑な送配水システムをもつ広域水運用プロセスに対しても適切な送水計画が得られている[5]。

さらに、下水道の雨水流入量予測システムでは、2つの異なる予測モデルの実用化の事例を示した。

今後も最適化、予測などの技術により、省エネルギー、環境問題の改善に貢献するシステム開発を推進していきたい。

参考文献

[1] 山田利広・上都礼智・塚原英明:「エネルギー供給機器向け省エネ最適運用システム TOPEMS™」, 東芝レビュー, 62-8 (2007), 45-48.

[2] 難波, 黒川, 高橋, 小林:「浄水場における送水計画システムの開発」, 平成9年電気学会全国大会, 1029, 4-406/407, 1997.

[3] 坂本, 黒川, 他:「GAによる送水計画の近似的最適化手法」, 電気学会D部門論文誌, Vol.120-D, pp.987-999, 2000年8/9月号.

[4] 坂本, 黒川, 他:「遺伝的アルゴリズムによる運用コスト低減を考慮した送水計画システム」, (株)日本水道協会, 第52回全国水道研究発表会, 2001年5月.

[5] 松代武士・横川勝也・阿部法光:「上水道施設を支える水処理装置と計測制御技術」, 東芝レビュー, 61-5 (2006), 25-28.

[6] 国土交通省都市・地域整備局下水道部:下水道総合浸水対策計画策定マニュアル(案), 2006.

[7] 国土交通省都市・地域整備局下水道部, 財団法人下水道新技術推進機構:合流式下水道の改善対策に関する調査報告書, 2002.

[8] 花木啓祐:合流式下水道における計測・制御技術の挑戦, 学会誌「EICA」, 第10巻, 第2号, p.1, 2005.

[9] 仲田雅司郎, 初鹿行雄, 長岩明弘:都市型水害の防止に貢献する雨水排水システム制御技術, 東芝レビュー, Vol.53, No.5, pp.13-16, 1998.

[10] 永森泰彦, 片山恭介:雨水対策を支援するシステム技術, 東芝レビュー, Vol.61, No.5, pp.29-32, 2006.

[11] 土木学会:水理公式集, pp.442-448, 1985.

[12] 東野朝男, 原裕淳, 高嶋英和, 小林圭一郎:雨水流出モデル応用ポンプ運転システム, 第33回下水道研究発表会講演集, pp.225-227, 1996.

[13] 山田富美夫, 長岩明弘, 高嶋英和, 萩倫幸:降雨流出解析法による下水道雨水ポンプ制御支援システムの実用化技術, 電気学会論文誌D, Vol.119-D, No.2, pp.168-174, 1999.

[14] 山中理, 長岩明弘, 松原慎一郎, 仲田雅司郎, 山田富美夫:Hammerstein型非線形モデルを用いたシステム同定手法による下水道雨水流入量予測, 電気学会論文誌D, Vol.120-D, No.4, pp.566-573, 2000.

[15] 五十嵐圭一, 梅田賢治, 長岩明弘:埼玉県荒川右岸流域下水道における降雨情報システムを活用した豪雨時の不明水対策について, 第40回下水道研究発表会講演集, pp.343-345, 2003.