JAEA-Technology
2018-013
DOI:10.11484/jaea-technology-2018-013

# ロボット試験用水槽の温度挙動評価法の開発

Development of Temperature Evaluation Method for Robot Test Pool

荒川 了紀　野﨑 信久
Ryoki ARAKAWA and Nobuhisa NOSAKI

福島研究開発部門
福島研究開発拠点
楢葉遠隔技術開発センター
モックアップ試験施設部

Demonstration Test Department
Naraha Center for Remote Control Technology Development
Fukushima Research Institute
Sector of Fukushima Research and Development

February 2019
Japan Atomic Energy Agency
日本原子力研究開発機構

JAEA-Technology

本レポートは国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ（https://www.jaea.go.jp）
より発信されています。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 研究連携成果展開部 研究成果管理課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方 2 番地4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency.
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Institutional Repository Section,
Intellectual Resources Management and R&D Collaboration Department,
Japan Atomic Energy Agency.
2-4 Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2019

JAEA-Technology 2018-013

# ロボット試験用水槽の温度挙動評価法の開発

日本原子力研究開発機構 福島研究開発部門　福島研究開発拠点
楢葉遠隔技術開発センター　モックアップ試験施設部

荒川　了紀、野﨑　信久

（2018 年 12 月 4 日受理）

楢葉遠隔技術開発センターは、東京電力ホールディングス福島第一原子力発電所（1Ｆ）の事故後の廃炉作業に向けて必要となる各種試験設備を設置し、外部利用を受け入れている。試験設備のうち、水中ロボットの試験用水槽は、室温から 60℃まで昇温させた温度条件下で試験が可能な設備となっている。この試験用水槽の温度上昇挙動を把握するため、室温から 60℃（最高設定温度）まで昇温させる試験を行い、データを取得した。

そこで、得られた昇温時のデータを基に温度挙動を評価する伝熱モデルを構築し、水槽の温度挙動評価法として確立した。本報告は、構築した伝熱モデルについてまとめるとともに、昇温時及び降温時の温度評価法についてまとめたものである。なお、本開発において作成した温度評価コードの使用マニュアルも策定した。

楢葉遠隔技術開発センター：〒979-0513　福島県双葉郡楢葉町大字山田岡字仲丸 1-22

JAEA-Technology 2018-013

# Development of Temperature Evaluation Method for Robot Test Pool

Ryoki ARAKAWA and Nobuhisa NOSAKI

Demonstration Test Department
Naraha Center for Remote Control Technology Development
Fukushima Research Institute
Sector of Fukushima Research and Development
Japan Atomic Energy Agency
Naraha-machi, Futaba-gun, Fukushima-ken
（Received December 4, 2018）

The Naraha Center for Remote Control Technology Development has various test facilities for the decommissioning work after the accident of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station, Tokyo Electric Power Company Holdings, and is now promoting external use.

In the test facilities, the robot test pool for the underwater robot can be used in different temperature conditions from room temperature to 60℃ maximum setting temperature. In order to clarify the temperature behavior in heating condition, a heating test from room temperature to 60 ℃ was performed. The data was obtained this way.

Based on the obtained temperature data, a heat transfer model for evaluating the temperature behavior was investigated, and the temperature evaluation method for the robot test pool was developed. This report summarizes the developed heat transfer model, as well as the temperature evaluation method during heating and cooling conditions. Moreover, user's manual for the temperature evaluation code was also created.

Keywords: Temperature Behavior, Heating Condition, Cooling Condition, Temperature Analysis, Under Water Robot, Robot Test Pool, Naraha R&D Center, JAEA

目次

1．はじめに ..... 1
2．解析 ..... 2
2.1　解析モデル ..... 2
2.1.1　上部からの放熱 ..... 2
2.1.2　側部からの放熱 ..... 3
2.1.3　底部からの放熱 ..... 4
2.1.4　水槽への入熱 ..... 5
2.2　解析条件 ..... 6
2.3　解析方法 ..... 7
2.3.1　断熱状態での昇温挙動 ..... 7
2.3.2　放熱を考慮した昇温挙動 ..... 7
2.3.3　放熱を考慮した降温挙動 ..... 7
3．結果及び考察 ..... 21
3.1　断熱状態での昇温挙動 ..... 21
3.2　放熱を考慮した昇温挙動 ..... 21
3.3　放熱を考慮した降温挙動 ..... 22
4．まとめ ..... 31
謝辞 ..... 32
参考文献 ..... 32
添付 1「ロボット試験用水槽の昇温挙動解析コード(Ver.1)の使用マニュアル」 ..... 33
添付 2「ロボット試験用水槽の降温挙動解析コード(Ver.1)の使用マニュアル」 ..... 43

Contents

1. Introduction ---------- 1
2. Analysis ---------- 2
2.1 Analytical Model ---------- 2
2.1.1 Heat Dissipation from Top ---------- 2
2.1.2 Heat Dissipation from Side ---------- 3
2.1.3 Heat Dissipation from Bottom ---------- 4
2.1.4 Heat Input to Robot Test Pool ---------- 5
2.2 Analytical Condition ---------- 6
2.3 Analytical Method ---------- 7
2.3.1 Heating Behavior in Adiabatic Condition ---------- 7
2.3.2 Heating Behavior in Heat Dissipation Condition ---------- 7
2.3.3 Cooling Behavior in Heat Dissipation Condition ---------- 8
3 . Results and Discussions ---------- 21
3.1 Heating Behavior in Adiabatic Condition ---------- 21
3.2 Heating Behavior in Heat Dissipation Condition ---------- 21
3.3 Cooling Behavior in Heat Dissipation Condition ---------- 22
4 . Summary ---------- 31
Acknowledgements ---------- 32
References ---------- 32
Appendix 1 User's manual of Temperature Evaluation Code for Robot Test Pool in Heating Condition (Ver.1) ---------- 33
Appendix 2 User's manual of Temperature Evaluation Code for Robot Test Pool in Cooling Condition (Ver.1) ---------- 43

# 1. はじめに

楢葉遠隔技術開発センターは、試験棟と研究管理棟から構成され、東京電力ホールディングス福島第一原子力発電所（以下、「1F」）の事故後の廃炉作業に向けて必要となる各種試験設備が設置され、様々な利用者からの利用を進めている。これら試験設備の一つとして、水中用ロボットの試験用水槽が設置されており、試験温度が室温から 60℃まで昇温させた条件での試験が可能となっている。図１にロボット試験用水槽の写真を示す。

この試験用水槽の昇降温の制御、一定温度の制御を的確かつ合理的に行うために、設備の挙動を十分把握しておく必要がある。このため、試験用水槽を昇温させた場合の水槽内の温度分布及び温度上昇挙動を調べることを目的に、室温から 60℃（最高設定温度）まで昇温させる昇温試験を実施し、昇温挙動のデータを取得している[1-1]。

試験用水槽の運用においては、水槽内の昇温特性、一定温度の制御特性、降温特性について、十分把握することが重要であるが、特に夏場、冬場などの季節による雰囲気条件などの違いにより、これらの挙動は異なるため、全ての条件において大規模な実証試験を行ってデータを蓄積することは困難である。このため、合理的かつ精度の良い評価法の開発が必須である。そこで、ロボット試験用水槽の保温構造等を考慮し、水槽からの放熱形態をモデル化した温度挙動評価法を検討する。

図１　ロボット試験用水槽
（内径 4.5m 水深 5m のプール内で試験が可能である。）

# 2. 解析

## 2.1 解析モデル

ロボット試験用水槽は、直径（内径）4.5m、水深 5m のステンレス鋼製の容器で、側部の厚さが 4mm、底部の厚さが 10mm である。側部には、ステンレス鋼容器の外側に断熱材（厚さ 50mm）が取り付けられ、その外側にステンレス鋼製のカバー板（厚さ 1mm）が取り付けられている。また、下部はフランジ構造でコンクリートの床面にボルト固定されている。上部の水面は、昇温試験時には断熱材（厚さ 50mm）が設置され、保温効果が確保される構造である。水槽の断熱構造を図 2-1 に示す。放熱モードとして、水槽上部からの放熱 $Q_1$（W）、側部からの放熱 $Q_2$（W）及び底部からの放熱 $Q_3$（W）の 3 種類を考慮する。

### 2.1.1 上部からの放熱

上部からの放熱モードとして、上部保温材（ウレタン）から空気への放熱 $Q_{1①}$（W）、水面より空気への放熱 $Q_{1②}$（W）及び蒸発による放熱 $Q_{1③}$（W）の 3 通りの熱流を考慮する。

(1) 上部保温材（ウレタン）から空気への放熱

図 2-1 で示したように、タンク上部の水面には保温用としてウレタンが設置されているため、伝熱モードとして、図 2-2(1)に示す熱伝達及び熱伝導の伝熱モードを考慮する。

水からウレタンへの熱伝達による熱流速 $q_{wu}$（W/m$^2$）、ウレタン中の熱伝導による熱流速 $q_u$（W/m$^2$）、ウレタンから空気への熱伝達による熱流速 $q_{uA}$（W/m$^2$）は、下式により計算する。

$$q_{wu} = \alpha_{wu} \times (T_w - T_{u1}) \tag{2-1}$$

$$q_u = (\lambda_u / d_u) \times (T_{u1} - T_{u2}) \tag{2-2}$$

$$q_{uA} = \alpha_{uA} \times (T_{u2} - T_A) \tag{2-3}$$

ここで、上部からの放熱による熱流速 $q1_{①}$は、$q1_{①}=q_{wu}=q_u=q_{uA}$ の条件で解くと、

$$q1_{①} = (T_w - T_A)/(1/\alpha_{wu} + d_u/\lambda_u + 1/\alpha_{uA}) \tag{2-4}$$

となる。

ここで、$\alpha_{wu}$ は水からウレタンへの熱伝達率（W/(m$^2$･K)）、

$\alpha_{uA}$ はウレタンから空気への熱伝達率（W/(m$^2$･K)）、

$T_{u1}$ はウレタンの水側表面温度（℃）、

$T_{u2}$ はウレタンの空気側表面温度（℃）、

$T_A$ は空気の温度（℃）、

$T_W$ は水の温度（℃）、

$\lambda_u$ はウレタンの熱伝導率（W/(m･K)）、

$d_u$ はウレタンの厚さ（m）

である。

したがって、ウレタンからの伝熱による単位時間あたりの放熱 $Q_{1①}$は、

$$Q_{1①} = q1_{①} \times A_{top} \tag{2-5}$$

で計算できる。ここで、$A_{top}$ はウレタンの面積（m$^2$）である。

(2) 水より空気への放熱

空気と直接接する水から空気への熱伝達による熱流速 $q_{wA}$（W/m²）は、下式により計算する。

$$q_{wA} = \alpha_{wA} \times （T_w - T_A） \tag{2-6}$$

ここで、$\alpha_{wA}$ は水から空気への熱伝達率（W/(m²･K)）である。したがって、水面からの伝熱による単位時間あたりの放熱 Q1②は、

$$Q_{1②} = q_{wA} \times A_w \tag{2-7}$$

ここで、$A_w$ は水面が空気と接触する面積（m²）で、

$$A_w = \pi \times \left({}^{4.5}/_{2}\right)^2 - A_{top} \tag{2-8}$$

である。

(3) 上部水面からの蒸発による放熱

水面から空気への単位時間あたりの蒸発による放熱量$Q_{1③}$は下式により計算できる。

$$Q_{1③} = q1_{③} \times A_w \tag{2-9}$$

ここで、q1③は上面からの蒸発による熱流速（W/m²）で、下式により求められる[2-1]。

$$q1_{③} = (0.114v + 0.134) \times (P_w - P_A) \times 0.2788r(T_w) \tag{2-10}$$

なお、v は水面上の風速（m/s）

$P_w$ は水温と等しい飽和空気の水蒸気圧（kPa）、

$P_A$ は空気の水蒸気分圧（kPa）、

$r(T_w)$は水温に等しい温度の飽和蒸気の蒸発潜熱（kJ/kg）

である。

飽和空気の水蒸気圧（kPa）は、August 他の下記近似式[2-2]により求める。

$$P_w(T_w) = 0.61078 \times 10^{(7.5\times T_w)/(T_w+237.3)} \tag{2-11}$$

さらに、空気の水蒸気分圧は、相対湿度 $h_{um}$（%）により、下式で求める。

$$P_A(T_A) = h_{um}\ /100 \times P_w(T_A) \tag{2-12}$$

したがって、上部からの単位時間あたりの放熱量 Q1 は

$$Q_1 = Q_{1①} + Q_{1②} + Q_{1③} \tag{2-13}$$

で計算できる。

2.1.2　側部からの放熱

タンク側面は図 2-1 に示したように、ステンレス製容器の外側に発泡プラスチック系断熱材（ポリスチレンフォーム）が取り付けられ、その外側にステンレス製のカバー板が取り付けられた 3 層構造となっている。そこで、伝熱モードとして、図 2-2(2)に示す熱伝達及び熱伝導のモードを考慮する。

水からステンレス鋼製容器への熱伝達による熱流速を $q_{ws}$（W/m²）ステンレス製容器内の熱伝導による熱流速を $q_{sus}$（W/m²）、断熱材内の熱伝導による熱流速を $q_{pol}$（W/m²）、ステンレス製カバ

一板内の熱伝導による熱流速を $q_{cov}$（W/m²）、ステンレス製カバー板から空気への熱伝達による熱流速を $q_{cA}$（W/m²）とすると、これらは次式で示される。

$$q_{ws} = \alpha_{ws} \times (T_w - T_{sw}) \quad (2\text{-}14)$$

$$q_{sus} = (\lambda_{sus}/d_{sus}) \times (T_{sw} - T_{spol}) \quad (2\text{-}15)$$

$$q_{pol} = (\lambda_{pol}/d_{pol}) \times (T_{spol} - T_{pols}) \quad (2\text{-}16)$$

$$q_{cov} = (\lambda_{cov}/d_{cov}) \times (T_{pols} - T_{covA}) \quad (2\text{-}17)$$

$$q_{cA} = \alpha_{cA} \times (T_{covA} - T_A) \quad (2\text{-}18)$$

ここで、$\alpha_{ws}$ は水からステンレス製容器への熱伝達率（W/(m²･K)）、

$\alpha_{cA}$ はステンレス製カバー板から空気への熱伝達率（W/(m²･K)）、

$T_{sw}$ はステンレス製容器の水側表面度（℃）、

$T_{spol}$ はステンレス製容器の断熱材側表面度（℃）、

$T_{pols}$ は断熱材のステンレス製カバー板側表面温度（℃）、

$T_{covA}$ はステンレス製カバー板の空気側表面温度（℃）、

$\lambda_{sus}$ はステンレス製容器の熱伝導率（W/(m･K)）、

$\lambda_{pol}$ は側部断熱材の熱伝導率（W/(m･K)）、

$\lambda_{cov}$ はステンレス製カバー板の熱伝導率（W/(m･K)）、

$d_{sus}$ はステンレス製容器の側部厚さ（m）、

$d_{pol}$ は側部断熱材の厚さ（m）、

$d_{cov}$ はステンレス製カバー板の厚さ（m）

である。

側部からの放熱による熱流速 $q_{side}$（W/m²）は、$q_{side}=q_{ws}=q_{sus}=q_{pol}=q_{cov}=q_{cA}$ の条件で解くと、

$$q_{side} = (T_w - T_A)/\left(1/\alpha_{ws} + d_{sus}/\lambda_{sus} + d_{pol}/\lambda_{pol} + d_{cov}/\lambda_{cov} + 1/\alpha_{cA}\right) \quad (2\text{-}19)$$

となる。

したがって、側部からの単位時間あたりの放熱量 $Q_2$（W）は、

$$Q_2 = q_{side} \times A_{side} \quad (2\text{-}20)$$

ここで、$A_{side}$ は側面の面積（m²）である。

### 2.1.3 底部からの放熱

タンク底部は図 2-1 に示したように、ステンレス製容器が基礎のコンクリート上に設置された構造となっている。そこで、伝熱モードとして、図 2-2(3)に示す熱伝達及び熱伝導のモードを考慮する。なお、コンクリート下面は一定の温度境界とする。

水からステンレス鋼製容器への熱伝達による熱流速を $q_w$（W/m²）、下部ステンレス製容器内の熱伝導による熱流速を $q_{sus}$（W/m²）、コンクリート内の熱伝導による熱流速を $q_{con}$（W/m²）とすると、これらは次式で示される。

$$q_{ws} = \alpha_{ws} \times (T_w - T_{sw}) \quad (2\text{-}21)$$

$$q_{sus} = (\lambda_{sus}/d_{bsus}) \times (T_{sw} - T_{scon}) \quad (2\text{-}22)$$

$$q_{con} = (\lambda_{con}/d_{con}) \times (T_{scon} - T_{bcon}) \quad (2\text{-}23)$$

ここで、$T_{scon}$ はステンレス製容器下面のコンクリート側表面温度（℃）、

$T_{bcon}$ はコンクリートの下面温度（℃）、

$\lambda_{con}$ はコンクリートの熱伝導率（W/(m･K)）、

$d_{bsus}$ はステンレス製容器の底部厚さ（m）、

$d_{con}$ はコンクリートの厚さ（m）

である。

下部からの放熱による熱流速 $q_{bot}$（W/m$^2$）は、$q_{bot}=q_{ws}=q_{sus}=q_{con}$ の条件で解くと、

$$q_{bot} = (T_w - T_{bcon})/(1/\alpha_{ws} + d_{bsus}/\lambda_{sus} + d_{con}/\lambda_{con}) \quad (2\text{-}24)$$

となる。

したがって、下部からの単位時間あたりの放熱量 $Q_3$（W）は、

$$Q_3 = q_{bot} \times A_{bot} \quad (2\text{-}25)$$

で計算できる。ここで、$A_{bot}$ は下面の面積（m$^2$）である。

以上より、放熱量の計算結果から、dt 時間当たりの放熱量 $Q_{out}$（J）は、

$$Q_{out} = (Q_1 + Q_2 + Q_3) \times dt \quad (2\text{-}26)$$

で計算できる。

### 2.1.4　水槽への入熱

水槽内への入熱は、図 2-3 に示すように高温水が入り口配管を通して流入し出口配管から流出することにより、容器内温度が昇温される構造となっている。

ここで、$T_{in}$（℃）の高温水が水温 $T_w$（℃）のタンク内に毎秒 $V_{in}$（m$^3$/s）流入するとき、dt 時間当たりの入熱量 $Q_{in}$（J）は、下式により計算できる。

$$Q_{in} = C_w(T_w) \times \Delta T \times V_{in} \times \rho(T_w) \times dt \quad (2\text{-}27)$$

ここで、$C_w(T_w)$は水の比熱（ただし、水温 $T_w$ の関数）（J/(kg･K)）、

⊿T は温度差（℃）（$=T_{in}-T_w$）、

$\rho(T_w)$は水の密度（ただし、水温 $T_w$ の関数）（kg/m$^3$）

である。

一方、水槽の加熱開始から t 秒後の水温を $T_w$ とする。この時の dt 時間あたりの水槽への入熱量 $Q_{in}$（J）と水槽からの放熱量 $Q_{out}$（J）の差が水槽温度を $dT_w$ だけ変化させるものとすると、

$$Q_{in} - Q_{out} = V_w \times \rho(T_w) \times C_w(T_w) \times dT_w \quad (2\text{-}28)$$

ここで、$V_w$ は容器内の水の体積（m$^3$）である。

したがって、式(2-26)、(2-27) 及び (2-28)より、下式が導かれる。

$$dT_w/dt = C_w(T_w) \times (T_{in} - T_w) \times V_{in} \times \rho(T_w) - (Q_1 + Q_2 + Q_3) / (V_w \times \rho(T_w) \times C_w(T_w)) \quad (2\text{-}29)$$

## 2.2　解析条件

水槽の温度挙動は、(2-29）式を解くことにより計算できる。ここでは、比較的解析精度が良いとされる Runge-Kutta 法[2-3]により、数値計算にて解析する。Runge-Kutta 法では、

$$dy/dt = \mathrm{f(t,y)}\ ,\qquad \mathrm{y}(t_0) = y_0 \tag{2-30}$$

の形で与えられる微分方程式を数値計算にて近似的に解くことができる。小さなステップ幅 h に対して、$y_{n+1}$、$t_{n+1}$ を下式で与えると、$y_{n+1}$ は $y(t_{n+1})$の近似として計算できる。これを繰り返し計算することにより、初期値 $y_0$ から任意の時刻 $t_n$ における近似値 $y_n$ が求められる。ここで、

$$y_{n+1} = y_n + h/6 \times (k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4)$$
$$t_{n+1} = t_n + h \tag{2-31}$$

なお、

$$k_1 = f(t_n, y_n)$$
$$k_2 = f(t_n + h/2\ ,\ y_n + h/2\, k_1)$$
$$k_3 = f(t_n + h/2\ ,\ y_n + h/2\, k_2)$$
$$k_4 = f(t_n + h,\ y_n + hk_3) \tag{2-32}$$

である。

以上の数式により、水槽の昇温時及び降温時の温度挙動が計算できる。すなわち、水槽の昇温時の解析では、(2-26)式～(2-29)式を解くことにより計算する。また、降温時の解析では、高温の初期状態からの温度変化を(2-28)式で計算される入熱量 $Q_{in}$=0 として計算する。

水槽の温度挙動解析で用いるパラメータの一覧表を表 2-1 に示す。なお、パラメータの値は以下のように設定する。

(1) 水の比熱

水の比熱 $C_w(T_w)$は、今回の水温の対象範囲（温度 0℃～80℃）でほとんど変化しないため、水の物性値表[2-4]より温度 50℃の値（$C_w$=4.18）を用いる。

(2) 水の密度

水の密度 $\rho(T_w)$は、水の物性値表[2-4]から 2 次曲線近似し、下式を用いる。解析で用いた密度の温度依存性について、データとともに図 2-4 に示す。

$$\rho(T_w) = -0.0036{T_w}^2 - 0.0701T_w + 1000.5 \tag{2-33}$$

(3) 飽和蒸気の蒸発潜熱

また、飽和蒸気の蒸発潜熱 $r(T_w)$ （kJ/kg）は、水の物性値表[2-4]より水温の関数として下式で近似する。

$$\mathrm{r}(T_w) = -2.437T_w + 2502.6 \tag{2-34}$$

解析で用いた蒸発潜熱の温度依存性について、データとともに図 2-5 に示す。

(4) 入熱温度

入熱温度（図 2-3 のおける $T_{in}$ の温度）は実測条件を考慮して、試験開始から 400 分（約 6.7 時間）までは 65℃、それ以降は 75℃とし、1800 分（30 時間）まで解析する。なお、試験時の室温は 24.7℃、初期の水温 $T_{w(0)}$は 20.8℃である。

(5)　熱伝導率

解析では、参考文献を基に熱伝導率を一定値として設定した。設定した熱伝導率は、ステンレス製容器の熱伝導率（$\lambda_{sus}$=16.3W/(m･K)[2-7]）、上部断熱材（ウレタン）の熱伝導率（$\lambda_u$=0.03W/(m･K)[2-6]）、側部断熱材（ポリスチレン）の熱伝導率（$\lambda_{pol}$=16.3W/(m･K)[2-6]）、コンクリートの熱伝導率（$\lambda_{con}$=16.3W/(m･K) [2-8]）である。これら解析に用いたパラメータを表 2-2 及び表 2-3 にまとめて示す。

## 2.3　解析方法

2.2 で示した解析モデルを組み合わせて、まずは単純な放熱の無い断熱状態での解析を行う。次に、放熱を考慮した昇温解析を行い、最後に、高温状態から放熱させる降温解析を行う。これら 3 種類の解析方法を以下に示す。

### 2.3.1　断熱状態での昇温挙動

タンク内に 65（℃）の高温水が水温 $T_w$（℃）の中に毎秒 $V_{in}$（$m^3/s$）流入するとき、dt 時間当たりの入熱量 $Q_{in}$ は、（2-27）式より計算できる。

$$Q_{in} = C_w(T_w) \times (65 - T_w) \times V_{in} \times \rho(T_w) \times dt \qquad (2\text{-}35)$$

これによる温度上昇を dTw（℃）とすると、(2-28)式より

$$Q_{in} = V_w \times \rho（T_w） \times C_w(T_w) \times dT_w \qquad (2\text{-}36)$$

(2-35)式と(2-36)式を等しくおくと、

$$dT_w/dt = \left(\frac{V_{in}}{V_w}\right)(65 - T_w) \qquad (2\text{-}37)$$

$$\int \frac{1}{65 - T_w} dT_w = \int \left(\frac{V_{in}}{V_w}\right) dt \qquad (2\text{-}38)$$

これは解析的に解けて、水温 Tw は下記で計算できる。

$$T_w = 65 - (65 - T_{w(0)})e^{-\left(\frac{V_{in}}{V_w}\right)t} \qquad (2\text{-}39)$$

一方、(2-37)の微分方程式を Runge-Kutta 法により数値解析的に解くこともできる。Runge-Kutta 法による解析フローを図 2-6 に示す。

### 2.3.2　放熱を考慮した昇温挙動

上部、側部及び底部からの放熱を考慮した昇温挙動は、式(2-27)から式(2-29)により解析できる。Runge-Kutta 法による解析フローを図 2-7 に示す。まず、水温により変化する水の密度 $\rho(T_w)$などのパラメータを計算する。その後、時間を増分させながら Runge-Kutta 法により Tw を計算する。試験開始から 400 分（24000s）までは $T_w$=65℃、それ以降は $T_w$=75℃の条件で繰り返し計算を行い、30 時間に達したときに計算を終了し、結果を出力するようにした。

### 2.3.3　放熱を考慮した降温挙動

所定の温度に達した後の降温時の挙動解析では、(2-28)式の入熱量を Qin=0 の条件下で、上部、

側部及び底部からの放熱を考慮して解析する。Runge-Kutta 法による解析フローを図 2-8 に示す。所定の温度を初期値として入力後、密度などの温度依存データを計算する。その後、2.3.2 と同様に 30 分の増分幅で逐次計算を繰り返して数値解を求める。

表 2-1　水槽の温度挙動解析に関するパラメーター一覧表　　(1/2)

| 項目 | 記号（単位） |
|---|---|
| 時間 | T（s） |
| 流入水の温度 | $T_{in}$（℃） |
| 水温 | $T_w$（℃） |
| 初期の水温 | $T_{w(0)}$（℃） |
| 空気の温度 | $T_A$（℃） |
| 水の流入量 | $V_{in}$（$m^3/s$） |
| 容器内の水の体積 | $V_w$（$m^3$） |
| 微小時間 | dt（s） |
| 入熱量 | $Q_{in}$（J） |
| 放熱量 | $Q_{out}$（J） |
| 水の比熱(水温 $T_w$ の関数) | $C_w(T_w)$（J/(kg･K)） |
| 温度差 (=$T_{in}$-$T_w$) | ⊿T（℃） |
| 水の密度(水温 $T_w$ の関数) | $\rho(T_w)$（$kg/m^3$） |
| 上部からの放熱量 | $Q_1$（W） |
| 上面ウレタンからの伝熱による放熱量 | $Q_{1①}$（W） |
| 上面水面からの伝熱による放熱量 | $Q_{1②}$（W） |
| 上部水面からの蒸発による放熱量 | $Q_{1③}$（W） |
| 側部からの放熱量 | $Q_2$（W） |
| 下部からの放熱量 | $Q_3$（W） |
| 上部ウレタンからの放熱による熱流速 | $q1_{①}$（$W/m^2$） |
| 上部水面からの蒸発による熱流速 | $q1_{③}$（$W/m^2$） |
| 側部からの放熱による熱流速 | $q_{side}$（$W/m^2$） |
| 下部からの放熱による熱流速 | $q_{bot}$（$W/m^2$） |
| 水からウレタンへの熱伝達による熱流速 | $q_{wu}$（$W/m^2$） |
| ウレタン中の熱伝導による熱流速 | $q_u$（$W/m^2$） |
| ウレタンから空気への熱伝達による熱流速 | $q_{uA}$（$W/m^2$） |
| 水から空気への熱伝達による熱流速 | $q_{wA}$（$W/m^2$） |
| 水からステンレス鋼製容器への熱伝達による熱流速 | $q_{ws}$（$W/m^2$） |
| ステンレス製容器内の熱伝導による熱流速 | $q_{sus}$（$W/m^2$） |
| 断熱材内の熱伝導による熱流速 | $q_{pol}$（$W/m^2$） |
| ステンレス製カバー板内の熱伝導による熱流速 | $q_{cov}$（$W/m^2$） |
| ステンレス製カバー板から空気への熱伝達による熱流速 | $q_{cA}$（$W/m^2$） |
| コンクリート内の熱伝導による熱流速 | $q_{con}$（$W/m^2$） |
| 水からウレタンへの熱伝達率 | $\alpha_{wu}$（$W/(m^2 \cdot K)$） |
| ウレタンから空気への熱伝達率 | $\alpha_{uA}$（$W/(m^2 \cdot K)$） |

表 2-1　水槽の温度挙動解析に関するパラメーター一覧表　　(2/2)

| | |
|---|---|
| 水から空気への熱伝達率 | $\alpha_{wA}$（W/(m$^2$・K)） |
| 水からステンレス製容器への熱伝達率 | $\alpha_{ws}$（W/(m$^2$・K)） |
| ステンレス製カバー板から空気への熱伝達率 | $\alpha_{cA}$（W/(m$^2$・K)） |
| ウレタンの水側表面温度 | $T_{u1}$（℃） |
| ウレタンの空気側表面温度 | $T_{u2}$（℃） |
| ステンレス製容器の水側表面度 | $T_{sw}$（℃） |
| ステンレス製容器の断熱材側表面度 | $T_{spol}$（℃） |
| 断熱材のステンレス製カバー板側表面温度 | $T_{pols}$（℃） |
| ステンレス製カバー板の空気側表面温度 | $T_{covA}$（℃） |
| ステンレス製容器下面のコンクリート側表面度 | $T_{scon}$（℃） |
| コンクリートの下面温度 | $T_{bcon}$（℃） |
| ウレタンの熱伝導率 | $\lambda_u$（W/(m・K)） |
| ステンレス製容器の熱伝導率 | $\lambda_{sus}$（W/(m・K)） |
| 側部断熱材の熱伝導率 | $\lambda_{pol}$（W/(m・K)） |
| ステンレス製カバー板の熱伝導率 | $\lambda_{cov}$（W/(m・K)） |
| コンクリートの熱伝導率 | $\lambda_{con}$（W/(m・K)） |
| ウレタンの厚さ | $d_u$（m） |
| ステンレス製容器の側部厚さ | $d_{sus}$（m） |
| 側部断熱材の厚さ | $d_{pol}$（m） |
| ステンレス製カバー板の厚さ | $d_{cov}$（m） |
| ステンレス製容器の底部厚さ | $d_{bsus}$（m） |
| コンクリートの厚さ | $d_{con}$（m） |
| ウレタンの面積 | $A_{top}$（m$^2$） |
| 水面が空気と接する面積 | $A_w$（m$^2$） |
| 側面の面積 | $A_{side}$（m$^2$） |
| 下面の面積 | $A_{bot}$（m$^2$） |
| 水面上の風速 | v（m/s） |
| 水温と等しい飽和空気の水蒸気圧 | $P_w$（kPa） |
| 空気の水蒸気分圧 | $P_A$（kPa） |
| 水温に等しい温度の飽和蒸気の蒸発潜熱 | $r(T_w)$（kJ/kg） |
| 相対湿度 | $h_{um}$（%） |
| Runge-Kutta 法の時間ステップ幅 | h |
| Runge-Kutta 法の係数 | k1 |
| Runge-Kutta 法の係数 | k2 |
| Runge-Kutta 法の係数 | k3 |
| Runge-Kutta 法の係数 | k4 |

表 2-2　水槽の昇温時の温度挙動解析条件

| パラメータ、記号 | 設定値（単位） |
|---|---|
| 流入水の温度、$T_{in}$ | 65（℃）／75（℃）*1 |
| 初期の水温、$T_{w(0)}$ | 20.8（℃） |
| 空気の温度、$T_A$ | 24.7（℃） |
| 水の流入量、$V_{in}$ | $3.33\times10^{-3}$（$m^3/s$）(=$12m^3/h$)、最大 |
| 容器内の水の体積、$V_w$ | $\pi\times(4.5/2)^2\times5$（$m^3$） |
| 水の比熱(水温 $T_w$ の関数)、$C_w(T_w)$ | 4180（J/(kg･K)）*2 |
| 水からウレタンへの熱伝達率、$\alpha_{wu}$ | 500（W/($m^2$･K)）*3 |
| ウレタンから空気への熱伝達率、$\alpha_{uA}$ | 9（W/($m^2$･K)）*4 |
| 水から空気への熱伝達率、$\alpha_{wA}$ | 9（W/($m^2$･K)）*4 |
| 水からステンレス製容器への熱伝達率、$\alpha_{ws}$ | 500（W/($m^2$･K)）*3 |
| ステンレス製カバー板から空気への熱伝達率、$\alpha_{cA}$ | 9（W/($m^2$･K)）*4 |
| コンクリートの下面温度、$T_{bcon}$ | 20.8（℃）*5 |
| ウレタンの熱伝導率、$\lambda_u$ | 0.03（W/(m･K)） |
| ステンレス製容器の熱伝導率、$\lambda_{sus}$ | 16.3（W/(m･K)） |
| 側部断熱材（ポリスチレン）の熱伝導率、$\lambda_{pol}$ | 0.042（W/(m･K)） |
| ステンレス製カバー板の熱伝導率、$\lambda_{cov}$ | 16.3（W/(m･K)） |
| コンクリートの熱伝導率、$\lambda_{con}$ | 1.6（W/(m･K)） |
| ウレタンの厚さ、$d_u$ | $5\times10^{-2}$（m） |
| ステンレス製容器の側部厚さ、$d_{sus}$ | $4\times10^{-3}$（m） |
| 側部断熱材の厚さ、$d_{pol}$ | $5\times10^{-2}$（m） |
| ステンレス製カバー板の厚さ、$d_{cov}$ | $1\times10^{-3}$（m） |
| ステンレス製容器の底部厚さ、$d_{bsus}$ | $1\times10^{-2}$（m） |
| コンクリートの厚さ、$d_{con}$ | $5\times10^{-2}$（m） |
| ウレタンの面積、$A_{top}$ | $\pi\times(4.5/2)^2 - A_w$（$m^2$） |
| 水面が空気と接する面積、$A_w$ | 0.3（$m^2$） |
| 側面の面積、$A_{side}$ | $\pi\times4.5\times5$（$m^2$） |
| 下面の面積、$A_{bot}$ | $\pi\times(4.7/2)^2\times5$（$m^2$） |
| 水面上の風速、v | 0.5（m/s）*4 |
| 相対湿度、$h_{um}$ | 50（%） |
| Runge-Kutta 法の時間ステップ幅、h | 1800（s） |

*1：実験より、試験開始から 400 分（24000s）まで 65℃、それ以降は 75℃。

*2：水の比熱は温度によりほとんど変化しないため、一定値（50℃の値）(2-4)。

*3：水の自然対流の熱伝達率を参考に設定(2-5)。

*4：屋内での値(2-5)。

*5：コンクリートの下面境界温度として、初期水温（一定値）を設定。

表 2-3　水槽の降温時の温度挙動解析条件

| パラメータ、記号 | 設定値（単位） |
|---|---|
| 流入水の温度、$T_{in}$ | ― |
| 初期の水温、$T_{w(0)}$ | 60.0（℃） |
| 空気の温度、$T_A$ | 24.7（℃） |
| 水の流入量、$V_{in}$ | $3.33\times10^{-3}$（$m^3/s$）(=$12m^3/h$)、最大 |
| 容器内の水の体積、$V_w$ | $\pi\times(4.5/2)^2\times5$（$m^3$） |
| 水の比熱(水温 $T_w$ の関数)、$C_w(T_w)$ | 4180（J/(kg･K)）*1 |
| 水からウレタンへの熱伝達率、$\alpha_{wu}$ | 500（W/($m^2$･K)）*2 |
| ウレタンから空気への熱伝達率、$\alpha_{uA}$ | 9（W/($m^2$･K)）*3 |
| 水から空気への熱伝達率、$\alpha_{wA}$ | 9（W/($m^2$･K)）*3 |
| 水からステンレス製容器への熱伝達率、$\alpha_{ws}$ | 500（W/($m^2$･K)）*2 |
| ステンレス製カバー板から空気への熱伝達率、$\alpha_{cA}$ | 9（W/($m^2$･K)）*3 |
| コンクリートの下面温度、$T_{bcon}$ | 20.8（℃）*4 |
| ウレタンの熱伝導率、$\lambda_u$ | 0.03（W/(m･K)） |
| ステンレス製容器の熱伝導率、$\lambda_{sus}$ | 16.3（W/(m･K)） |
| 側部断熱材（ポリスチレン）の熱伝導率、$\lambda_{pol}$ | 0.042（W/(m･K)） |
| ステンレス製カバー板の熱伝導率、$\lambda_{cov}$ | 16.3（W/(m･K)） |
| コンクリートの熱伝導率、$\lambda_{con}$ | 1.6（W/(m･K)） |
| ウレタンの厚さ、$d_u$ | $5\times10^{-2}$（m） |
| ステンレス製容器の側部厚さ、$d_{sus}$ | $4\times10^{-3}$（m） |
| 側部断熱材の厚さ、$d_{pol}$ | $5\times10^{-2}$（m） |
| ステンレス製カバー板の厚さ、$d_{cov}$ | $1\times10^{-3}$（m） |
| ステンレス製容器の底部厚さ、$d_{bsus}$ | $1\times10^{-2}$（m） |
| コンクリートの厚さ、$d_{con}$ | $5\times10^{-2}$（m） |
| ウレタンの面積、$A_{top}$ | $\pi\times(4.5/2)^2$ － $A_w$（$m^2$） |
| 水面が空気と接する面積、$A_w$ | 0.3（$m^2$）～$\pi\times(4.5/2)^2$（$m^2$）*5 |
| 側面の面積、$A_{side}$ | $\pi\times4.5\times5$（$m^2$） |
| 下面の面積、$A_{bot}$ | $\pi\times(4.7/2)^2\times5$（$m^3$） |
| 水面上の風速、v | 0.5（m/s）*3 |
| 相対湿度、$h_{um}$ | 50（%） |
| Runge-Kutta 法の時間ステップ幅、h | 1800（s） |

*1：水の比熱は温度によりほとんど変化しないため、一定値（50℃の値）(2-4)。

*2：水の自然対流の熱伝達率を参考に設定(2-5)。

*3：屋内での値(2-5)。

*4：コンクリートの下面境界温度として、初期水温（一定値）を設定。

*5：水面上に保温材（ウレタン）を置く面積をパラメータに降温挙動を計算。

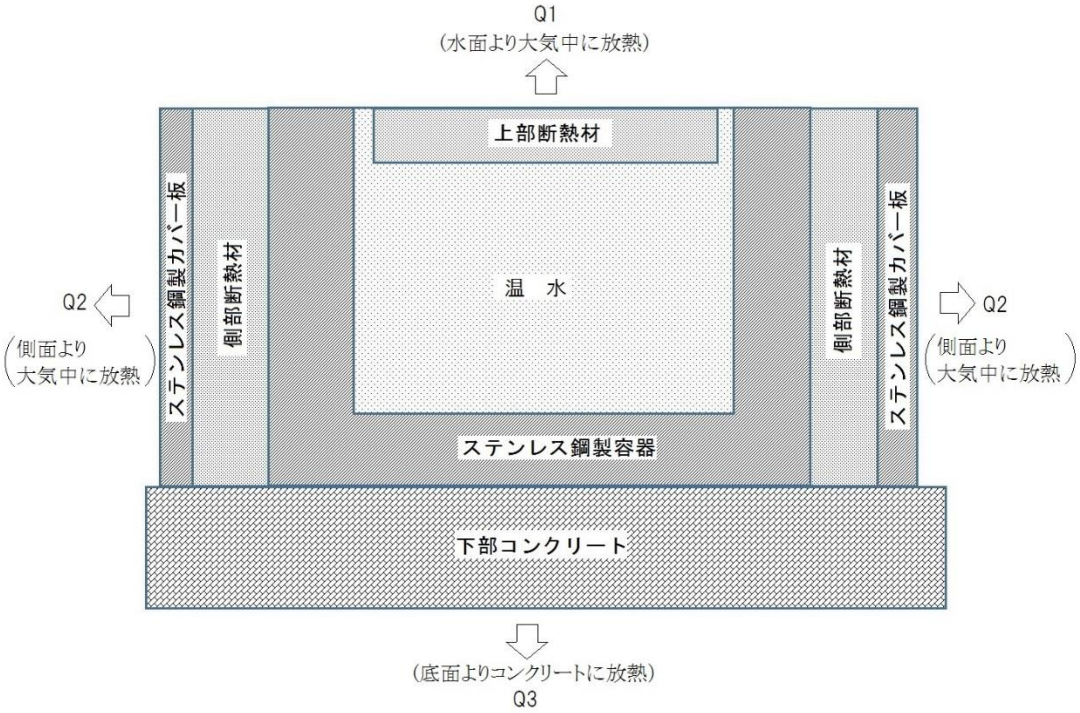
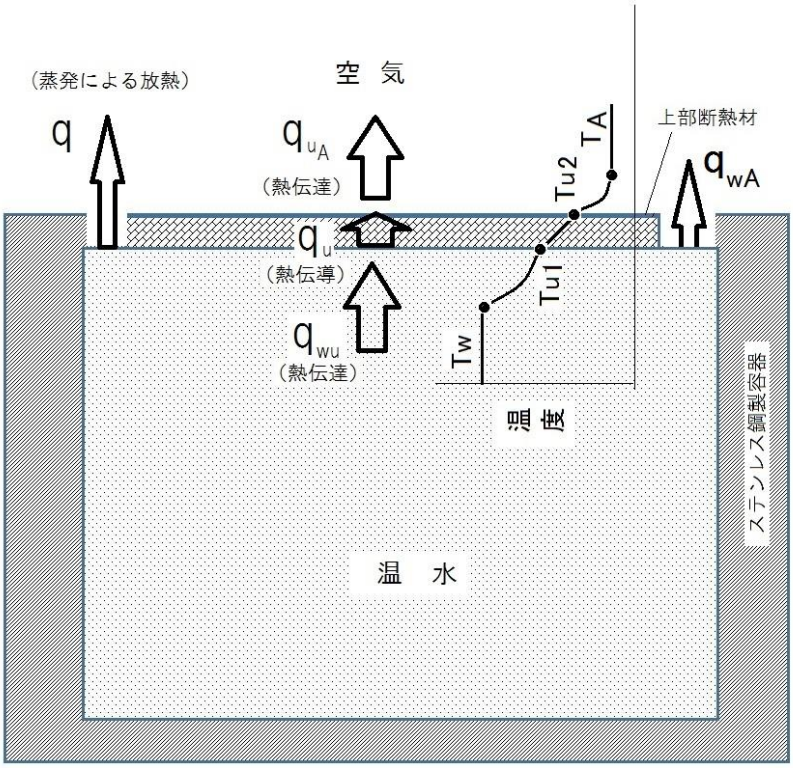
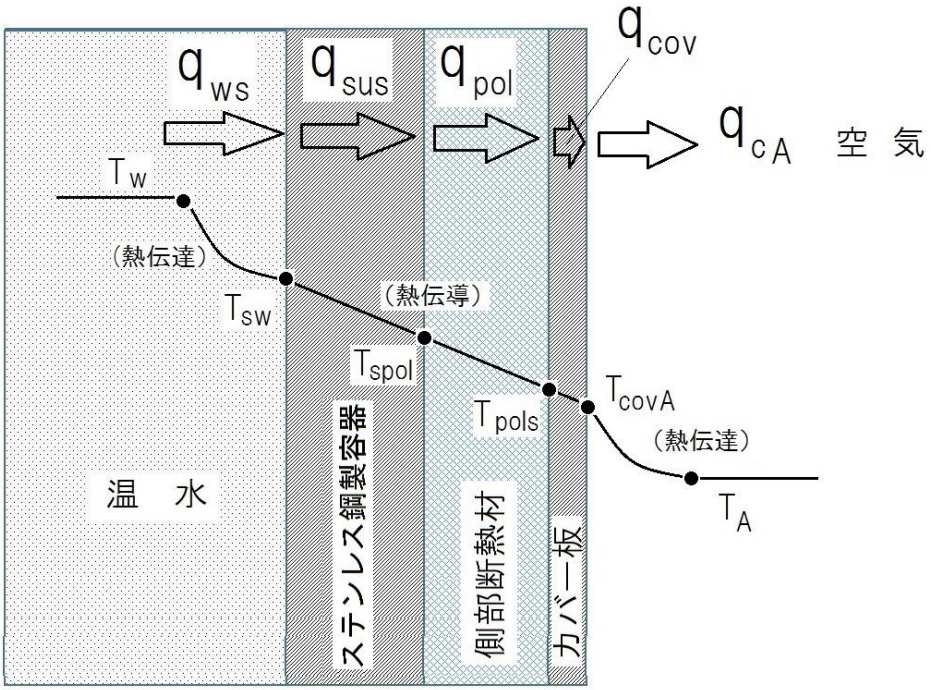



図 2-1　水槽の断熱構造と放熱箇所

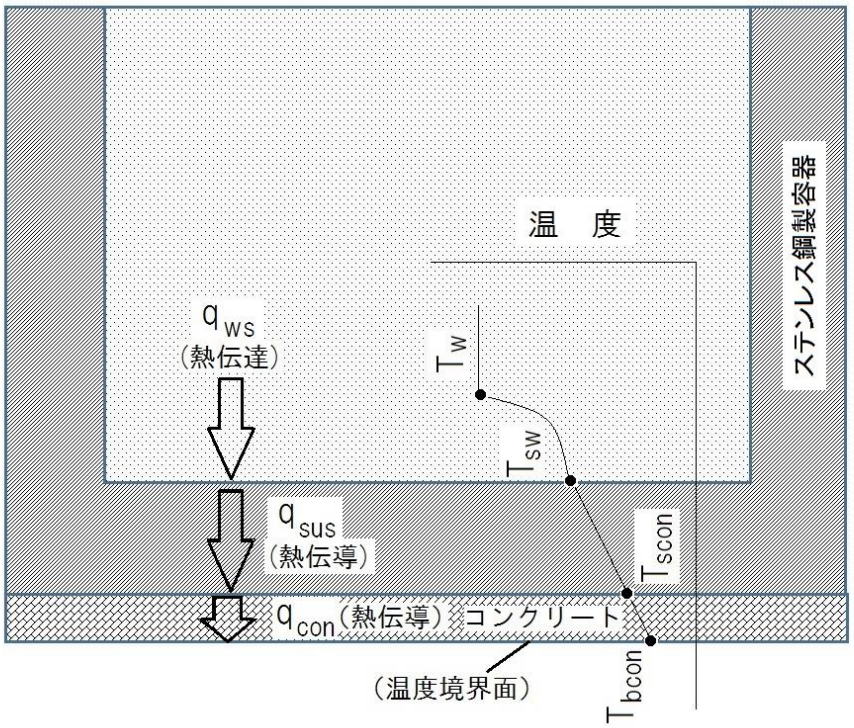



(1)　水槽上面からの放熱モデル

図 2-2　水槽の温度挙動解析モデル（1/2）




(2) 水槽側面からの放熱モデル




(3) 水槽底面からの放熱モデル

図 2-2 水槽の温度挙動解析モデル（2/2）

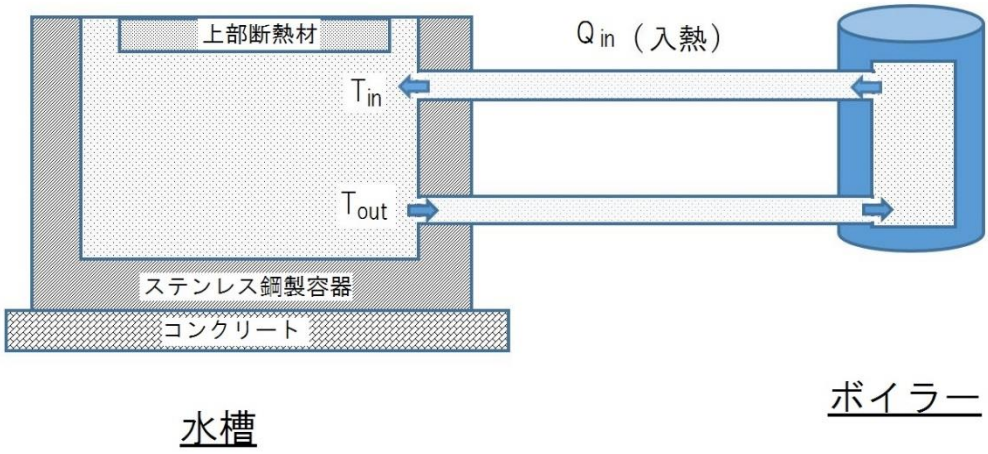



図 2-3　水槽への入熱

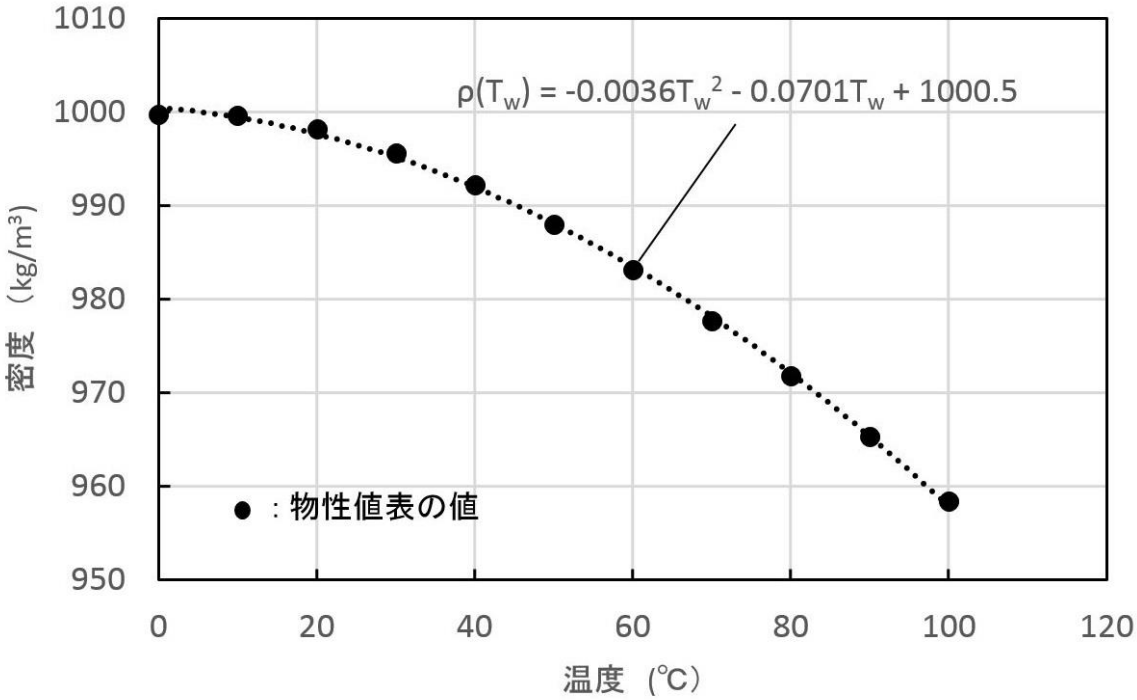



図 2-4　水の密度の温度依存性

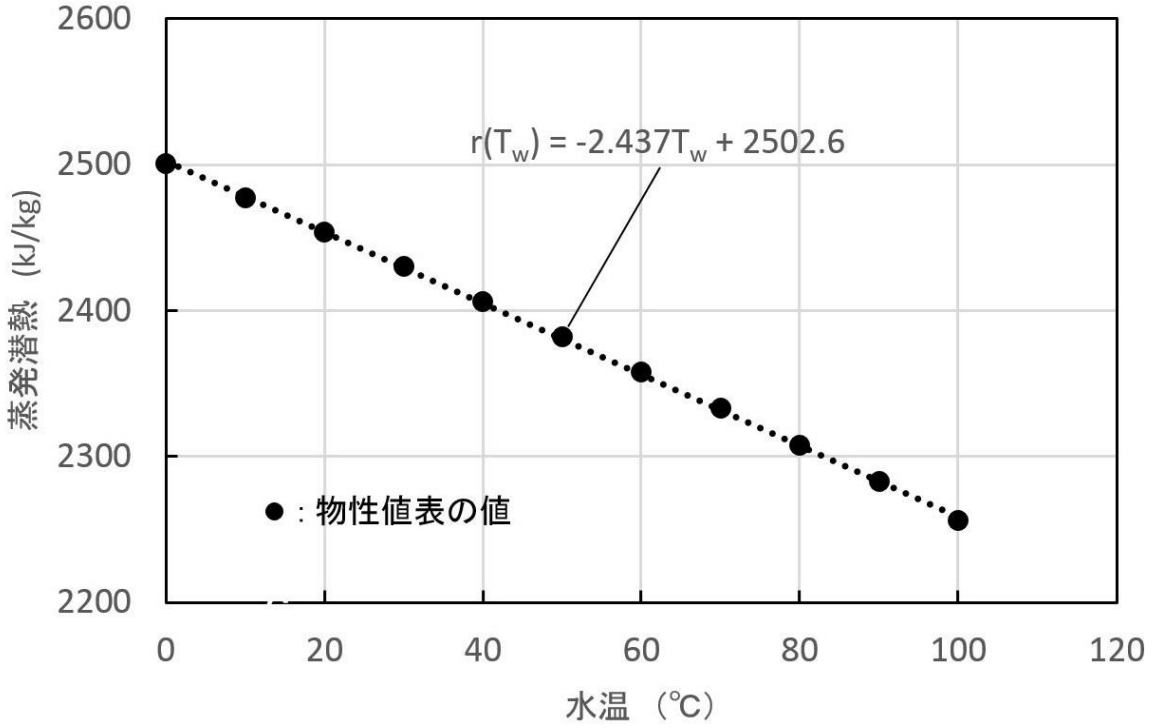



図 2-5　水の蒸発潜熱の温度依存性

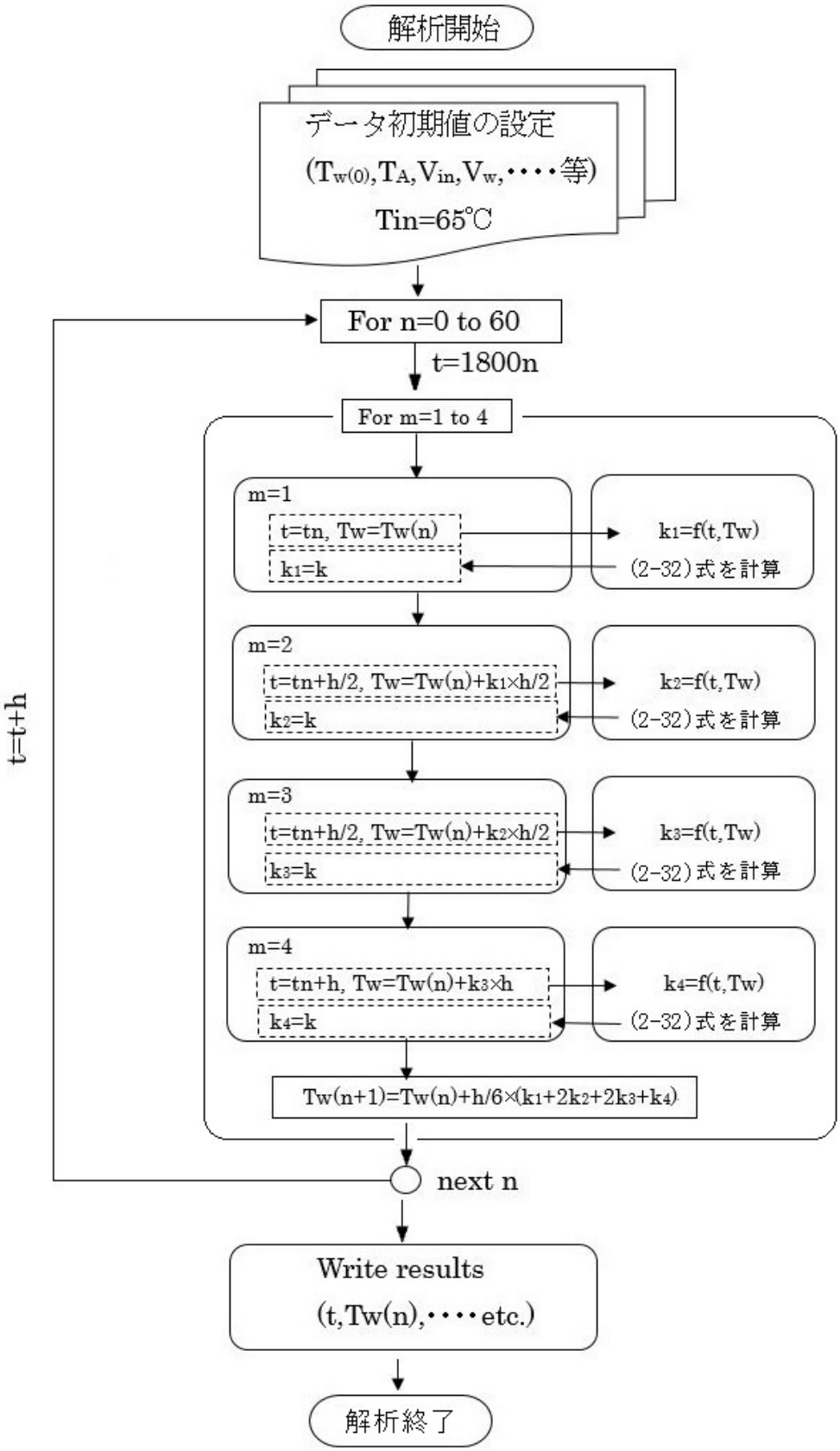



図 2-6　断熱状態での昇温挙動の解析フロー

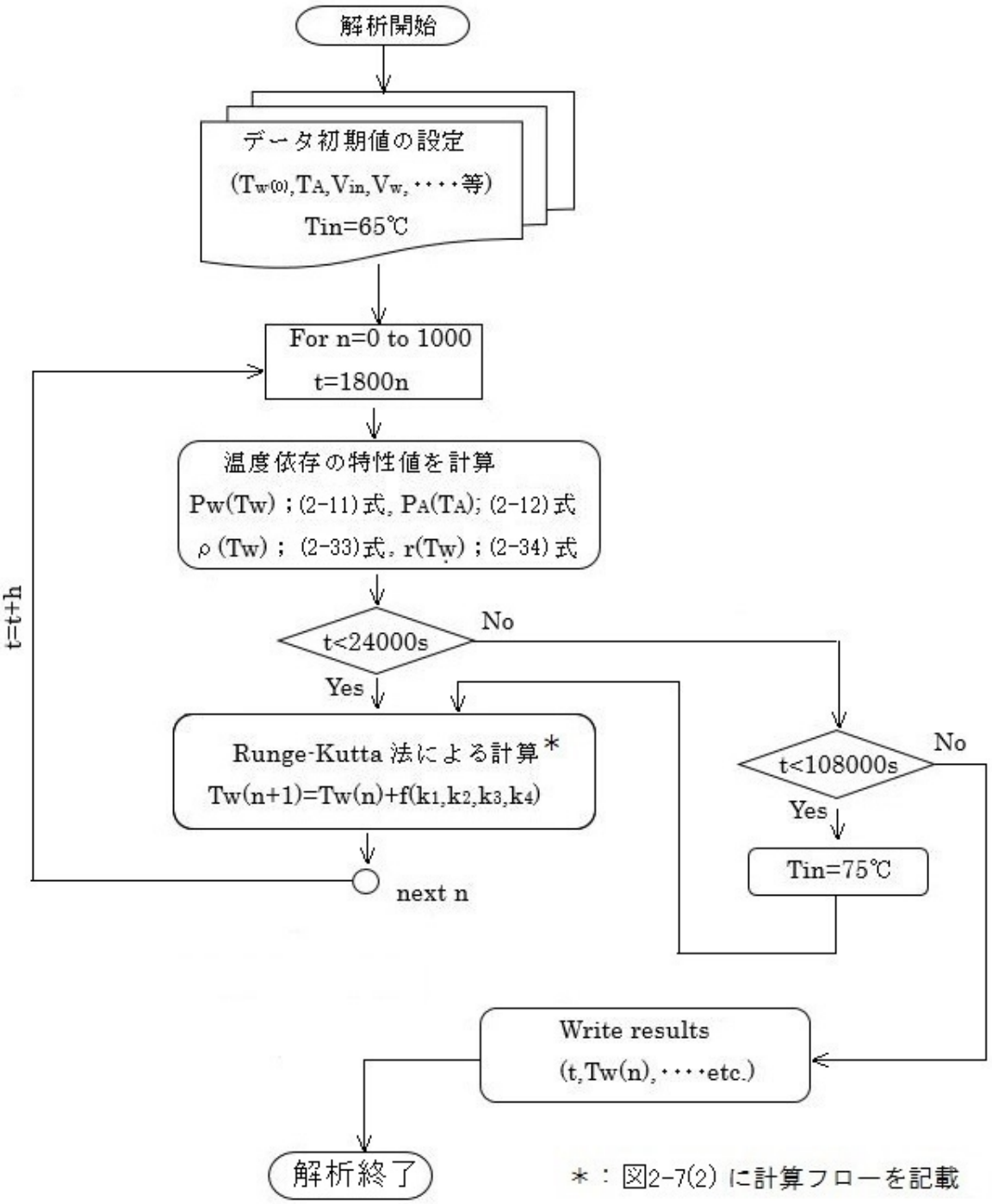



図 2-7(1)　水槽の昇温挙動の解析フロー

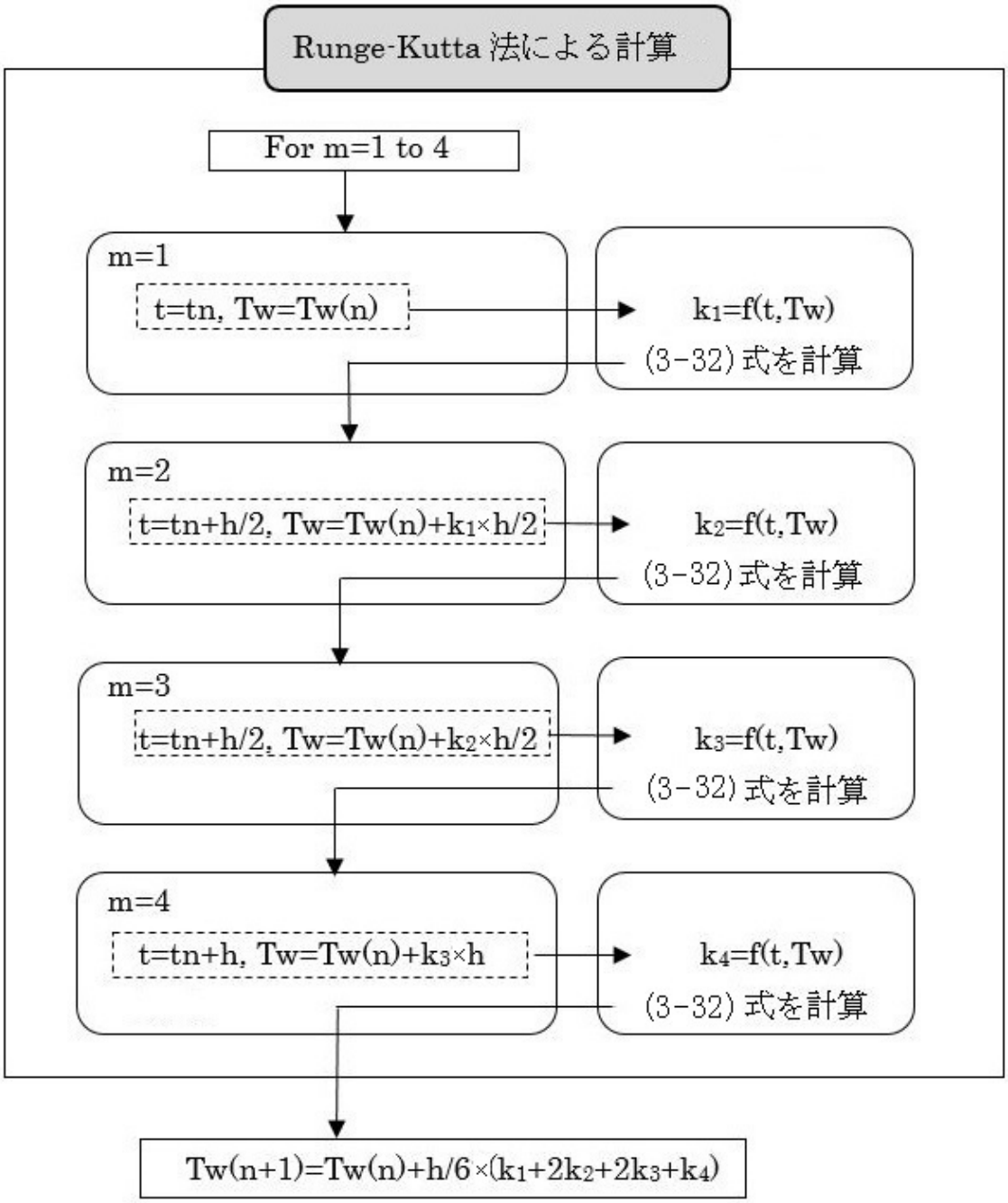



図 2-7(2)　Runge-Kutta 法による解析フロー

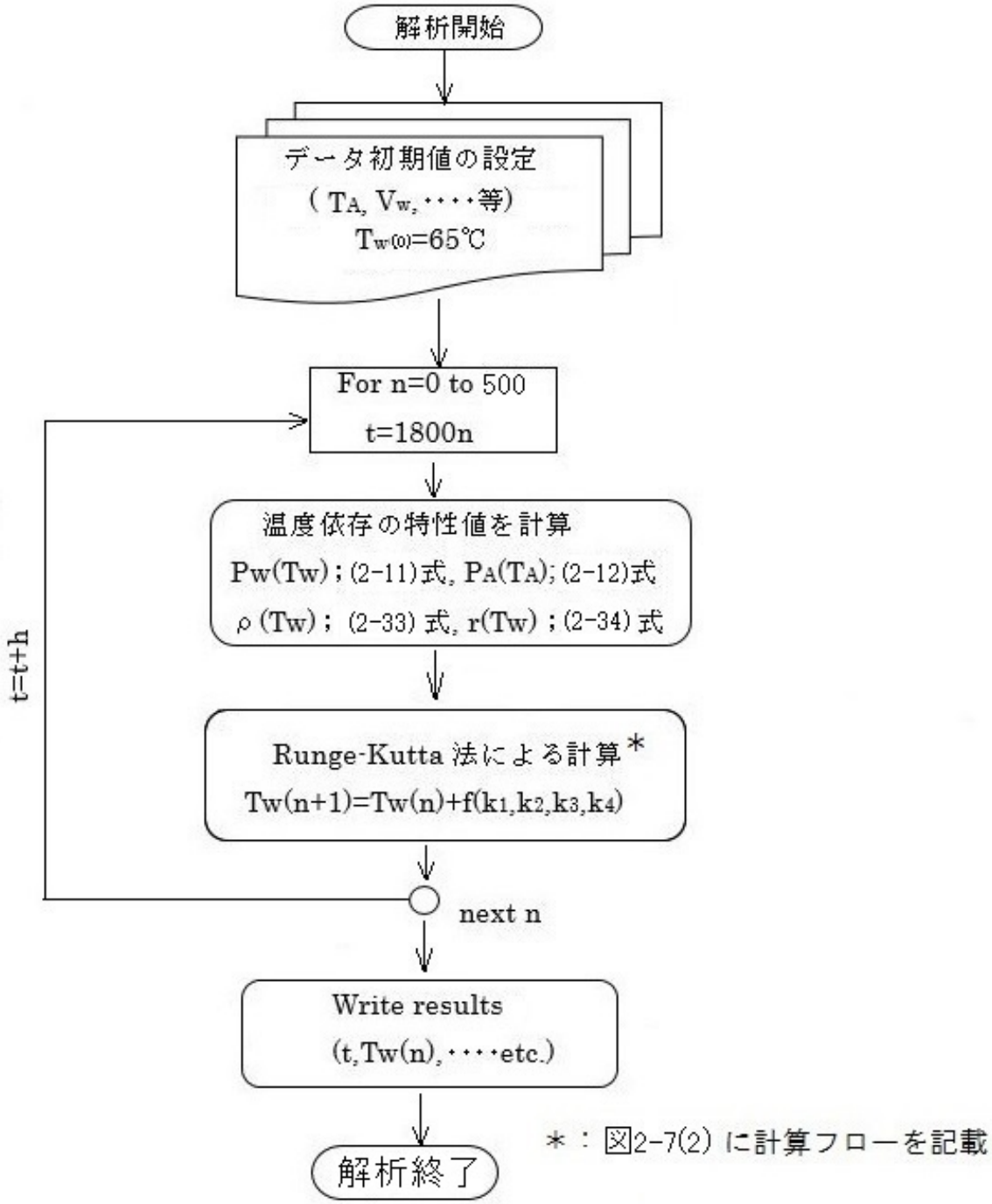



図 2-8　水槽の降温挙動の解析フロー

# 3．結果及び考察

## 3.1　断熱状態での昇温挙動

初期水温 $T_{w(0)}$が 20.8℃の水槽に、65℃の温水を最大流量（12m³/h）で流入させたときの温度挙動について、式(2-39)の解析解を 30 分の時間ステップ幅にて流入開始後から 30 時間まで求めた。また、式(2-37)の微分方程式を Runge-Kutta 法により数値解析的に 30 分の時間ステップ幅にて同様に 30 時間後まで求めた。得られた結果を表 3-1 にまとめて示す。同表から、数値解と Runge-Kutta 法による解析解は非常に良く一致していることがわかる。すなわち、時間ステップ幅 h=1800（s）(=30 分）は計算誤差をほとんど生じていないことがわかる。そこで、以降の水槽の昇温挙動解析及び降温挙動解析においては、時間ステップ幅を h=1800（s）として解析する。なお、比較のため最も簡単な Euler 法（Euler 前進法）による解析解も表 3-1 に示す。Euler 法では式(2-37)の形で与えられる微分方程式は、下記近似式により逐次計算される(3-1)。

$$y_{n+1} = y_n + hf(t_n, y_n) \tag{3-1}$$

Euler 法では最大 0.5℃程度の計算誤差を生じている。計算が少し複雑となるが、精度が高いとされる Runge-Kutta 法の方が優れていることがわかる。

図 3-1 に断熱状態での水槽の温度解析結果と実測値との比較を示す。実測では初期流入温度が 65℃で、試験開始から 400 分後流入温度を 75℃に変更しているが、解析では 65℃一定温度の条件で解析している。図より、断熱解析の予測結果は実測値より高い温度予測となるため、言うまでもないが試験用水槽からの放熱を適切に取り込んだモデルにより解析する必要があることがわかる。

## 3.2　放熱を考慮した昇温挙動

水槽の上部、側部及び底部からの放熱を考慮した場合の水槽の昇温挙動を図 3-2 に示す。解析は、最大流量（12m³/h）の温水により加熱した場合で、試験開始後 400 分までは流入温度が 65℃、400 分以降は 75℃としている。流入温度 65℃の温水により、試験開始から 400 分後（約 6.7 時間後）に約 43℃に達し、流入温度 75℃の温水に変えると温度上昇率が少し増大しているのがわかる。目標とする 60℃の温度には、昇温開始 13 時間後に到達している。なお、これは実測結果の到達時間約 24 時間後と比べると半分程度の時間となっている。本解析は、あくまでも最大の流量を仮定した場合の予測結果であるため、大きな違いを生じたものと考えられる。

表 3-2 に温度、入熱量、放熱量についての解析結果を示す。また、同表のうち、入熱量と放熱量の時間変化を図 3-3 に示す。入熱量は昇温とともに(2-27)式中の⊿T（$=T_{in}-T_w$）の減少に伴い減少し、流入温度を 65℃から 75℃に変更した際一旦増加した後減少している。一方、放熱量の方は、水温の上昇に伴って増加している。ここで、各々の面（上面、側面及び底面）からの放熱量の比較を図 3-4 に示す。断熱材を施行している上面及び側面からの放熱量は施行していない底面に比べると 1/10 程度に抑えられていることがわかる。

ロボット試験用水槽には流量計が設置されていないため、昇温試験では流量が計測されていない。このため、解析評価においては、流量の予測が重要となる。図 3-5 は流入流量が最大のケース（12m³/h）、最大流量の 75%ケース（9m³/h）、最大流量の 50%ケース（6m³/h）及び最大流量の 25%ケース（3m³/h）の 4 ケースについて、昇温挙動の解析結果を比較したものである。当然ながら、

流量が減少すると入熱量が減少するため、60℃の温度に達する時間も増大する。図 3-6 に流量を変化させた場合の入熱量の比較を示す。同図にはボイラの加熱能力も点線で示す。ボイラの加熱能力は約 230kW であるため、解析では昇温開始後の入熱量が過大評価されていることがわかる（図中、点線のボイラ能力を上回る部分）。ボイラの加熱能力に相当する流量は、最大流量の 40%程度と見積もられるため、40%流量で加熱した場合の水槽の温度挙動の解析を行い、実測値と比較した。比較結果を図 3-7 に示す。同図より、○印で示した解析結果は実測値を結んだ曲線と良く一致していることがわかる。

### 3.3　放熱を考慮した降温挙動

水槽内の温水が 60℃に保たれた温度を初期値として、30 分の増分幅で逐次計算を繰り返し 240 時間（10 日間）後までの降温解析を行った。解析では、水槽上部に断熱材を設置したまま放熱する場合（表 2-3 で $A_w$=0.3m$^2$）と断熱材を取り除いた状態で放熱する場合（表 2-3 で $A_w$=$A_{top}$）の 2 ケースを調べた。図 3-8 は両ケースを比較したものである。たとえば、水温が 40℃に低下するのに、上部断熱材がある場合には 115 時間程度かかるのに対して、上部断熱材を取り除いた場合には約 50 時間で半分以下の冷却時間に短縮されている。

各部からの放熱量の時間変化を図 3-9(1)（断熱材を設置したまま放熱する場合）及び図 3-9(2)（断熱材を取り除いた状態で放熱する場合）に示す。両図から、断熱材が有る場合は、底面からの熱移動により冷やされるのに対して、上部の断熱材が無い場合には上部からの熱伝達と蒸発潜熱による放熱が支配的となる。このため、上面からの熱放出を加速させるよう扇風機で上面をさらに冷やすなどにより、冷却時間の短縮が可能と考えられる。

以上の検討においては、解析が簡便に行えるよう Excel-VBA プログラム上に解析プログラムを作成した。本検討により開発したロボット試験用水槽の温度挙動計算コードの使用マニュアルを添付 1 及び 2 に示す。ここで開発した計算プログラムは、今後の水槽の昇降温操作等に活用していく。

添付 1「ロボット試験用水槽の昇温挙動解析コード(Ver.1)の使用マニュアル」
添付 2「ロボット試験用水槽の降温挙動解析コード(Ver.1)の使用マニュアル」

表 3-1　断熱状態でのロボット試験用水槽の昇温解析結果（1/2）

【解析条件】初期水温、$T_{w(0)}$　；20.8 ℃、
流入温水の温度/流量；65℃/12 $m^3$/h

| 時間 t | | 解析解 | 数値解（Runge-Kutta） | | | | | 数値解（Euler法） | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 秒(s) | 時間(h) | Tw(℃) | k1 | k2 | k3 | k4 | Tw(℃) | dTw/dt | Tw(℃) |
| 0 | 0.0 | 20.8 | − | − | − | − | 20.8 | − | 20.8 |
| 1800 | 0.5 | 24.0 | 1.835E-03 | 1.766E-03 | 1.769E-03 | 1.703E-03 | 24.0 | 1.835E-03 | 24.1 |
| 3600 | 1.0 | 26.9 | 1.703E-03 | 1.639E-03 | 1.641E-03 | 1.580E-03 | 26.9 | 1.698E-03 | 27.2 |
| 5400 | 1.5 | 29.7 | 1.580E-03 | 1.521E-03 | 1.523E-03 | 1.466E-03 | 29.7 | 1.571E-03 | 30.0 |
| 7200 | 2.0 | 32.2 | 1.466E-03 | 1.412E-03 | 1.414E-03 | 1.361E-03 | 32.2 | 1.453E-03 | 32.6 |
| 9000 | 2.5 | 34.6 | 1.361E-03 | 1.310E-03 | 1.312E-03 | 1.263E-03 | 34.6 | 1.345E-03 | 35.0 |
| 10800 | 3.0 | 36.8 | 1.263E-03 | 1.216E-03 | 1.217E-03 | 1.172E-03 | 36.8 | 1.244E-03 | 37.3 |
| 12600 | 3.5 | 38.8 | 1.172E-03 | 1.128E-03 | 1.130E-03 | 1.087E-03 | 38.8 | 1.151E-03 | 39.3 |
| 14400 | 4.0 | 40.7 | 1.087E-03 | 1.047E-03 | 1.048E-03 | 1.009E-03 | 40.7 | 1.065E-03 | 41.3 |
| 16200 | 4.5 | 42.4 | 1.009E-03 | 9.715E-04 | 9.729E-04 | 9.365E-04 | 42.4 | 9.857E-04 | 43.0 |
| 18000 | 5.0 | 44.1 | 9.365E-04 | 9.016E-04 | 9.029E-04 | 8.691E-04 | 44.1 | 9.121E-04 | 44.7 |
| 19800 | 5.5 | 45.6 | 8.691E-04 | 8.366E-04 | 8.379E-04 | 8.065E-04 | 45.6 | 8.439E-04 | 46.2 |
| 21600 | 6.0 | 47.0 | 8.065E-04 | 7.764E-04 | 7.775E-04 | 7.484E-04 | 47.0 | 7.809E-04 | 47.6 |
| 23400 | 6.5 | 48.3 | 7.485E-04 | 7.205E-04 | 7.216E-04 | 6.946E-04 | 48.3 | 7.225E-04 | 48.9 |
| 25200 | 7.0 | 49.5 | 6.946E-04 | 6.686E-04 | 6.696E-04 | 6.446E-04 | 49.5 | 6.686E-04 | 50.1 |
| 27000 | 7.5 | 50.6 | 6.446E-04 | 6.205E-04 | 6.214E-04 | 5.982E-04 | 50.6 | 6.186E-04 | 51.2 |
| 28800 | 8.0 | 51.6 | 5.982E-04 | 5.758E-04 | 5.767E-04 | 5.551E-04 | 51.6 | 5.724E-04 | 52.2 |
| 30600 | 8.5 | 52.6 | 5.551E-04 | 5.344E-04 | 5.352E-04 | 5.151E-04 | 52.6 | 5.296E-04 | 53.2 |
| 32400 | 9.0 | 53.5 | 5.151E-04 | 4.959E-04 | 4.966E-04 | 4.780E-04 | 53.5 | 4.900E-04 | 54.1 |
| 34200 | 9.5 | 54.3 | 4.781E-04 | 4.602E-04 | 4.609E-04 | 4.436E-04 | 54.3 | 4.534E-04 | 54.9 |
| 36000 | 10.0 | 55.1 | 4.436E-04 | 4.271E-04 | 4.277E-04 | 4.117E-04 | 55.1 | 4.196E-04 | 55.6 |
| 37800 | 10.5 | 55.8 | 4.117E-04 | 3.963E-04 | 3.969E-04 | 3.820E-04 | 55.8 | 3.882E-04 | 56.3 |
| 39600 | 11.0 | 56.5 | 3.821E-04 | 3.678E-04 | 3.683E-04 | 3.545E-04 | 56.5 | 3.592E-04 | 57.0 |
| 41400 | 11.5 | 57.1 | 3.546E-04 | 3.413E-04 | 3.418E-04 | 3.290E-04 | 57.1 | 3.324E-04 | 57.6 |
| 43200 | 12.0 | 57.6 | 3.290E-04 | 3.167E-04 | 3.172E-04 | 3.053E-04 | 57.6 | 3.075E-04 | 58.1 |
| 45000 | 12.5 | 58.2 | 3.053E-04 | 2.939E-04 | 2.944E-04 | 2.833E-04 | 58.2 | 2.846E-04 | 58.7 |
| 46800 | 13.0 | 58.7 | 2.834E-04 | 2.728E-04 | 2.732E-04 | 2.630E-04 | 58.7 | 2.633E-04 | 59.1 |
| 48600 | 13.5 | 59.1 | 2.630E-04 | 2.531E-04 | 2.535E-04 | 2.440E-04 | 59.1 | 2.436E-04 | 59.6 |
| 50400 | 14.0 | 59.5 | 2.440E-04 | 2.349E-04 | 2.353E-04 | 2.265E-04 | 59.5 | 2.254E-04 | 60.0 |
| 52200 | 14.5 | 59.9 | 2.265E-04 | 2.180E-04 | 2.183E-04 | 2.101E-04 | 59.9 | 2.086E-04 | 60.4 |
| 54000 | 15.0 | 60.3 | 2.102E-04 | 2.023E-04 | 2.026E-04 | 1.950E-04 | 60.3 | 1.930E-04 | 60.7 |
| 55800 | 15.5 | 60.6 | 1.950E-04 | 1.877E-04 | 1.880E-04 | 1.810E-04 | 60.6 | 1.786E-04 | 61.0 |
| 57600 | 16.0 | 61.0 | 1.810E-04 | 1.742E-04 | 1.745E-04 | 1.679E-04 | 61.0 | 1.652E-04 | 61.3 |
| 59400 | 16.5 | 61.2 | 1.680E-04 | 1.617E-04 | 1.619E-04 | 1.559E-04 | 61.2 | 1.529E-04 | 61.6 |
| 61200 | 17.0 | 61.5 | 1.559E-04 | 1.500E-04 | 1.503E-04 | 1.446E-04 | 61.5 | 1.415E-04 | 61.8 |
| 63000 | 17.5 | 61.8 | 1.446E-04 | 1.392E-04 | 1.394E-04 | 1.342E-04 | 61.8 | 1.309E-04 | 62.1 |
| 64800 | 18.0 | 62.0 | 1.342E-04 | 1.292E-04 | 1.294E-04 | 1.246E-04 | 62.0 | 1.211E-04 | 62.3 |
| 66600 | 18.5 | 62.2 | 1.246E-04 | 1.199E-04 | 1.201E-04 | 1.156E-04 | 62.2 | 1.121E-04 | 62.5 |
| 68400 | 19.0 | 62.4 | 1.156E-04 | 1.113E-04 | 1.114E-04 | 1.073E-04 | 62.4 | 1.037E-04 | 62.7 |
| 70200 | 19.5 | 62.6 | 1.073E-04 | 1.033E-04 | 1.034E-04 | 9.955E-05 | 62.6 | 9.594E-05 | 62.9 |
| 72000 | 20.0 | 62.8 | 9.955E-05 | 9.583E-05 | 9.597E-05 | 9.238E-05 | 62.8 | 8.877E-05 | 63.0 |
| 73800 | 20.5 | 62.9 | 9.239E-05 | 8.893E-05 | 8.906E-05 | 8.573E-05 | 62.9 | 8.214E-05 | 63.2 |
| 75600 | 21.0 | 63.1 | 8.573E-05 | 8.253E-05 | 8.265E-05 | 7.956E-05 | 63.1 | 7.600E-05 | 63.3 |
| 77400 | 21.5 | 63.2 | 7.956E-05 | 7.659E-05 | 7.670E-05 | 7.383E-05 | 63.2 | 7.032E-05 | 63.4 |
| 79200 | 22.0 | 63.3 | 7.383E-05 | 7.108E-05 | 7.118E-05 | 6.852E-05 | 63.3 | 6.507E-05 | 63.5 |
| 81000 | 22.5 | 63.5 | 6.852E-05 | 6.596E-05 | 6.605E-05 | 6.358E-05 | 63.5 | 6.021E-05 | 63.7 |
| 82800 | 23.0 | 63.6 | 6.359E-05 | 6.121E-05 | 6.130E-05 | 5.901E-05 | 63.6 | 5.571E-05 | 63.8 |
| 84600 | 23.5 | 63.7 | 5.901E-05 | 5.680E-05 | 5.689E-05 | 5.476E-05 | 63.7 | 5.155E-05 | 63.9 |
| 86400 | 24.0 | 63.8 | 5.476E-05 | 5.271E-05 | 5.279E-05 | 5.082E-05 | 63.8 | 4.770E-05 | 63.9 |
| 88200 | 24.5 | 63.9 | 5.082E-05 | 4.892E-05 | 4.899E-05 | 4.716E-05 | 63.9 | 4.413E-05 | 64.0 |
| 90000 | 25.0 | 63.9 | 4.716E-05 | 4.540E-05 | 4.546E-05 | 4.376E-05 | 63.9 | 4.083E-05 | 64.1 |

表 3-1　断熱状態でのロボット試験用水槽の昇温解析結果（2/2）

【解析条件】初期水温、$T_{w(0)}$　　；20.8 ℃、
流入温水の温度/流量；65℃/12 $m^3$/h

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 91800 | 25.5 | 64.0 | 4.376E-05 | 4.213E-05 | 4.219E-05 | 4.061E-05 | 64.0 | 3.778E-05 | 64.2 |
| 93600 | 26.0 | 64.1 | 4.061E-05 | 3.910E-05 | 3.915E-05 | 3.769E-05 | 64.1 | 3.496E-05 | 64.2 |
| 95400 | 26.5 | 64.2 | 3.769E-05 | 3.628E-05 | 3.633E-05 | 3.497E-05 | 64.2 | 3.235E-05 | 64.3 |
| 97200 | 27.0 | 64.2 | 3.498E-05 | 3.367E-05 | 3.372E-05 | 3.246E-05 | 64.2 | 2.993E-05 | 64.3 |
| 99000 | 27.5 | 64.3 | 3.246E-05 | 3.124E-05 | 3.129E-05 | 3.012E-05 | 64.3 | 2.769E-05 | 64.4 |
| 100800 | 28.0 | 64.3 | 3.012E-05 | 2.900E-05 | 2.904E-05 | 2.795E-05 | 64.3 | 2.563E-05 | 64.4 |
| 102600 | 28.5 | 64.4 | 2.795E-05 | 2.691E-05 | 2.695E-05 | 2.594E-05 | 64.4 | 2.371E-05 | 64.5 |
| 104400 | 29.0 | 64.4 | 2.594E-05 | 2.497E-05 | 2.501E-05 | 2.407E-05 | 64.4 | 2.194E-05 | 64.5 |
| 106200 | 29.5 | 64.5 | 2.407E-05 | 2.317E-05 | 2.321E-05 | 2.234E-05 | 64.5 | 2.030E-05 | 64.5 |
| 108000 | 30.0 | 64.5 | 2.234E-05 | 2.150E-05 | 2.154E-05 | 2.073E-05 | 64.5 | 1.878E-05 | 64.6 |

表 3-2　ロボット試験用水槽の昇温解析結果（1/2）

【解析条件】初期水温、$T_{w(0)}$　；20.8 ℃、
流入温水の温度　；65℃（t＜24000(s)）、75℃（24000(s)≦t）
流　　量　；12 $m^3$/h

| 時　間　t | | 水温 | 入熱量 | 上部放熱量 | 側部放熱量 | 底部放熱量 | 全放熱量 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 秒（s） | 時間(h) | Tw(℃) | Qin(kW) | Qout1(kW) | Qout2(kW) | Qout3(kW) | Qoutall(kW) |
| 0 | 0.0 | 20.8 | 6.14E+02 | -9.57E-03 | -2.11E-01 | 0.00E+00 | -2.21E-01 |
| 1800 | 0.5 | 23.9 | 5.70E+02 | 4.63E-02 | -4.16E-02 | 1.60E+00 | 1.61E+00 |
| 3600 | 1.0 | 26.8 | 5.30E+02 | 1.01E-01 | 1.16E-01 | 3.09E+00 | 3.31E+00 |
| 5400 | 1.5 | 29.5 | 4.92E+02 | 1.55E-01 | 2.61E-01 | 4.47E+00 | 4.88E+00 |
| 7200 | 2.0 | 32.0 | 4.57E+02 | 2.07E-01 | 3.96E-01 | 5.74E+00 | 6.35E+00 |
| 9000 | 2.5 | 34.3 | 4.25E+02 | 2.59E-01 | 5.21E-01 | 6.92E+00 | 7.70E+00 |
| 10800 | 3.0 | 36.4 | 3.95E+02 | 3.09E-01 | 6.37E-01 | 8.02E+00 | 8.96E+00 |
| 12600 | 3.5 | 38.4 | 3.68E+02 | 3.58E-01 | 7.44E-01 | 9.03E+00 | 1.01E+01 |
| 14400 | 4.0 | 40.3 | 3.42E+02 | 4.05E-01 | 8.43E-01 | 9.97E+00 | 1.12E+01 |
| 16200 | 4.5 | 41.9 | 3.18E+02 | 4.51E-01 | 9.35E-01 | 1.08E+01 | 1.22E+01 |
| 18000 | 5.0 | 43.5 | 2.97E+02 | 4.95E-01 | 1.02E+00 | 1.16E+01 | 1.32E+01 |
| 19800 | 5.5 | 45.0 | 2.76E+02 | 5.38E-01 | 1.10E+00 | 1.24E+01 | 1.40E+01 |
| 21600 | 6.0 | 46.3 | 2.58E+02 | 5.79E-01 | 1.17E+00 | 1.31E+01 | 1.48E+01 |
| 23400 | 6.5 | 47.6 | 2.40E+02 | 6.18E-01 | 1.24E+00 | 1.37E+01 | 1.56E+01 |
| 25200 | 7.0 | 48.7 | 3.62E+02 | 6.56E-01 | 1.30E+00 | 1.43E+01 | 1.63E+01 |
| 27000 | 7.5 | 50.5 | 3.37E+02 | 7.16E-01 | 1.40E+00 | 1.52E+01 | 1.73E+01 |
| 28800 | 8.0 | 52.1 | 3.14E+02 | 7.74E-01 | 1.49E+00 | 1.61E+01 | 1.83E+01 |
| 30600 | 8.5 | 53.7 | 2.93E+02 | 8.31E-01 | 1.57E+00 | 1.68E+01 | 1.92E+01 |
| 32400 | 9.0 | 55.1 | 2.74E+02 | 8.86E-01 | 1.65E+00 | 1.76E+01 | 2.01E+01 |
| 34200 | 9.5 | 56.4 | 2.55E+02 | 9.38E-01 | 1.72E+00 | 1.82E+01 | 2.09E+01 |
| 36000 | 10.0 | 57.6 | 2.39E+02 | 9.89E-01 | 1.78E+00 | 1.89E+01 | 2.16E+01 |

表 3-2　ロボット試験用水槽の昇温解析結果（2/2）

【解析条件】初期水温、$T_{w(0)}$　；20.8 ℃、
流入温水の温度　；65℃（t＜24000(s)）、75℃（24000(s)≦t）
流　　量　；12 $m^3$/h

| 時　間　t | | 水温 | 入熱量 | 上部放熱量 | 側部放熱量 | 底部放熱量 | 全放熱量 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 秒（s） | 時間（h） | Tw(℃) | Qin(kW) | Qout1(kW) | Qout2(kW) | Qout3(kW) | Qoutall(kW) |
| 37800 | 10.5 | 58.7 | 2.23E+02 | 1.04E+00 | 1.84E+00 | 1.94E+01 | 2.23E+01 |
| 39600 | 11.0 | 59.8 | 2.09E+02 | 1.08E+00 | 1.90E+00 | 2.00E+01 | 2.29E+01 |
| 41400 | 11.5 | 60.7 | 1.96E+02 | 1.13E+00 | 1.95E+00 | 2.05E+01 | 2.35E+01 |
| 43200 | 12.0 | 61.6 | 1.83E+02 | 1.17E+00 | 2.00E+00 | 2.09E+01 | 2.41E+01 |
| 45000 | 12.5 | 62.4 | 1.72E+02 | 1.21E+00 | 2.05E+00 | 2.13E+01 | 2.46E+01 |
| 46800 | 13.0 | 63.2 | 1.61E+02 | 1.25E+00 | 2.09E+00 | 2.17E+01 | 2.51E+01 |
| 48600 | 13.5 | 63.9 | 1.52E+02 | 1.28E+00 | 2.13E+00 | 2.21E+01 | 2.55E+01 |
| 50400 | 14.0 | 64.6 | 1.43E+02 | 1.32E+00 | 2.16E+00 | 2.24E+01 | 2.59E+01 |
| 52200 | 14.5 | 65.2 | 1.34E+02 | 1.35E+00 | 2.19E+00 | 2.27E+01 | 2.63E+01 |
| 54000 | 15.0 | 65.7 | 1.27E+02 | 1.38E+00 | 2.22E+00 | 2.30E+01 | 2.66E+01 |
| 55800 | 15.5 | 66.2 | 1.20E+02 | 1.40E+00 | 2.25E+00 | 2.33E+01 | 2.69E+01 |
| 57600 | 16.0 | 66.7 | 1.13E+02 | 1.43E+00 | 2.28E+00 | 2.35E+01 | 2.72E+01 |
| 59400 | 16.5 | 67.2 | 1.07E+02 | 1.46E+00 | 2.30E+00 | 2.38E+01 | 2.75E+01 |
| 61200 | 17.0 | 67.6 | 1.01E+02 | 1.48E+00 | 2.32E+00 | 2.40E+01 | 2.78E+01 |
| 63000 | 17.5 | 68.0 | 9.60E+01 | 1.50E+00 | 2.35E+00 | 2.42E+01 | 2.80E+01 |
| 64800 | 18.0 | 68.3 | 9.12E+01 | 1.52E+00 | 2.36E+00 | 2.43E+01 | 2.82E+01 |
| 66600 | 18.5 | 68.6 | 8.67E+01 | 1.54E+00 | 2.38E+00 | 2.45E+01 | 2.84E+01 |
| 68400 | 19.0 | 68.9 | 8.26E+01 | 1.56E+00 | 2.40E+00 | 2.47E+01 | 2.86E+01 |
| 70200 | 19.5 | 69.2 | 7.87E+01 | 1.57E+00 | 2.41E+00 | 2.48E+01 | 2.88E+01 |
| 72000 | 20.0 | 69.5 | 7.52E+01 | 1.59E+00 | 2.43E+00 | 2.49E+01 | 2.90E+01 |
| 73800 | 20.5 | 69.7 | 7.19E+01 | 1.60E+00 | 2.44E+00 | 2.51E+01 | 2.91E+01 |
| 75600 | 21.0 | 69.9 | 6.89E+01 | 1.62E+00 | 2.45E+00 | 2.52E+01 | 2.92E+01 |
| 77400 | 21.5 | 70.2 | 6.61E+01 | 1.63E+00 | 2.46E+00 | 2.53E+01 | 2.94E+01 |
| 79200 | 22.0 | 70.3 | 6.35E+01 | 1.64E+00 | 2.47E+00 | 2.54E+01 | 2.95E+01 |
| 81000 | 22.5 | 70.5 | 6.10E+01 | 1.65E+00 | 2.48E+00 | 2.55E+01 | 2.96E+01 |
| 82800 | 23.0 | 70.7 | 5.88E+01 | 1.66E+00 | 2.49E+00 | 2.56E+01 | 2.97E+01 |
| 84600 | 23.5 | 70.8 | 5.67E+01 | 1.67E+00 | 2.50E+00 | 2.56E+01 | 2.98E+01 |
| 86400 | 24.0 | 71.0 | 5.48E+01 | 1.68E+00 | 2.51E+00 | 2.57E+01 | 2.99E+01 |
| 88200 | 24.5 | 71.1 | 5.31E+01 | 1.69E+00 | 2.52E+00 | 2.58E+01 | 3.00E+01 |
| 90000 | 25.0 | 71.2 | 5.14E+01 | 1.70E+00 | 2.52E+00 | 2.58E+01 | 3.01E+01 |
| 91800 | 25.5 | 71.3 | 4.99E+01 | 1.70E+00 | 2.53E+00 | 2.59E+01 | 3.01E+01 |
| 93600 | 26.0 | 71.4 | 4.85E+01 | 1.71E+00 | 2.53E+00 | 2.59E+01 | 3.02E+01 |
| 95400 | 26.5 | 71.5 | 4.72E+01 | 1.72E+00 | 2.54E+00 | 2.60E+01 | 3.02E+01 |
| 97200 | 27.0 | 71.6 | 4.60E+01 | 1.72E+00 | 2.54E+00 | 2.60E+01 | 3.03E+01 |
| 99000 | 27.5 | 71.7 | 4.49E+01 | 1.73E+00 | 2.55E+00 | 2.61E+01 | 3.04E+01 |
| 100800 | 28.0 | 71.8 | 4.39E+01 | 1.73E+00 | 2.55E+00 | 2.61E+01 | 3.04E+01 |
| 102600 | 28.5 | 71.8 | 4.29E+01 | 1.74E+00 | 2.56E+00 | 2.62E+01 | 3.04E+01 |
| 104400 | 29.0 | 71.9 | 4.20E+01 | 1.74E+00 | 2.56E+00 | 2.62E+01 | 3.05E+01 |
| 106200 | 29.5 | 72.0 | 4.12E+01 | 1.74E+00 | 2.56E+00 | 2.62E+01 | 3.05E+01 |
| 108000 | 30.0 | 72.0 | 4.04E+01 | 1.75E+00 | 2.57E+00 | 2.62E+01 | 3.06E+01 |

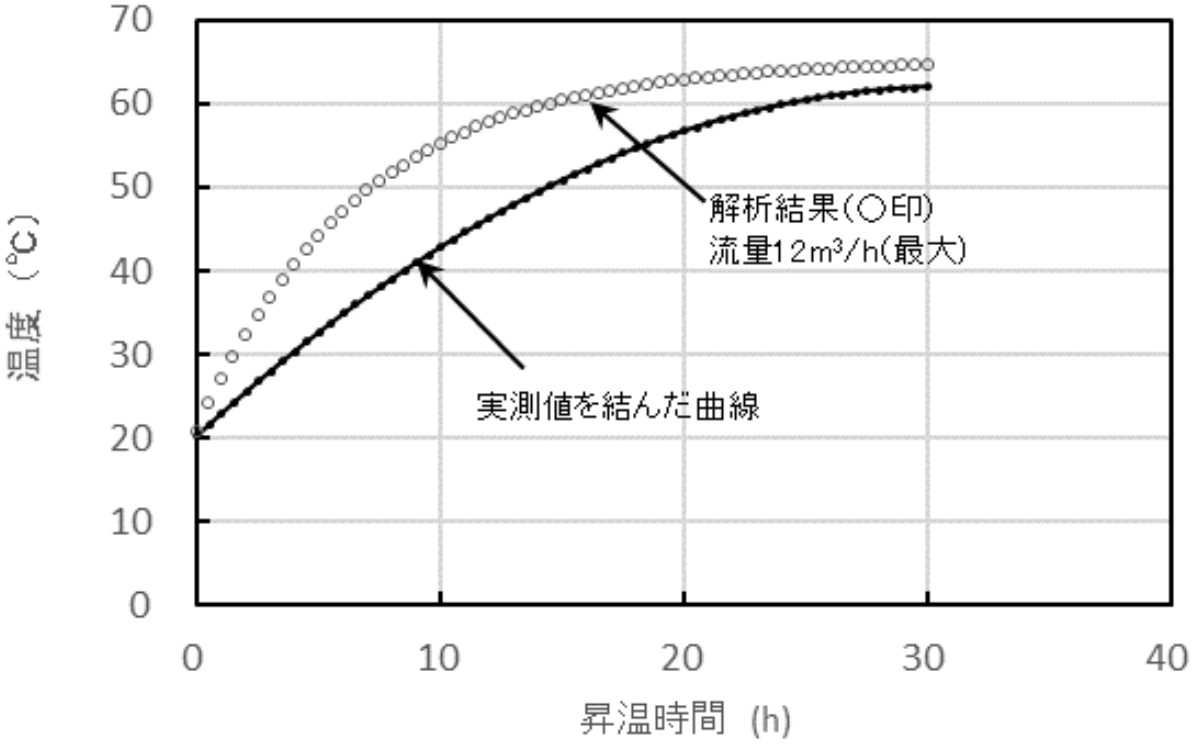



図 3-1　断熱状態での水槽の温度解析結果と実測値との比較
（流入温度は 65℃一定の条件）

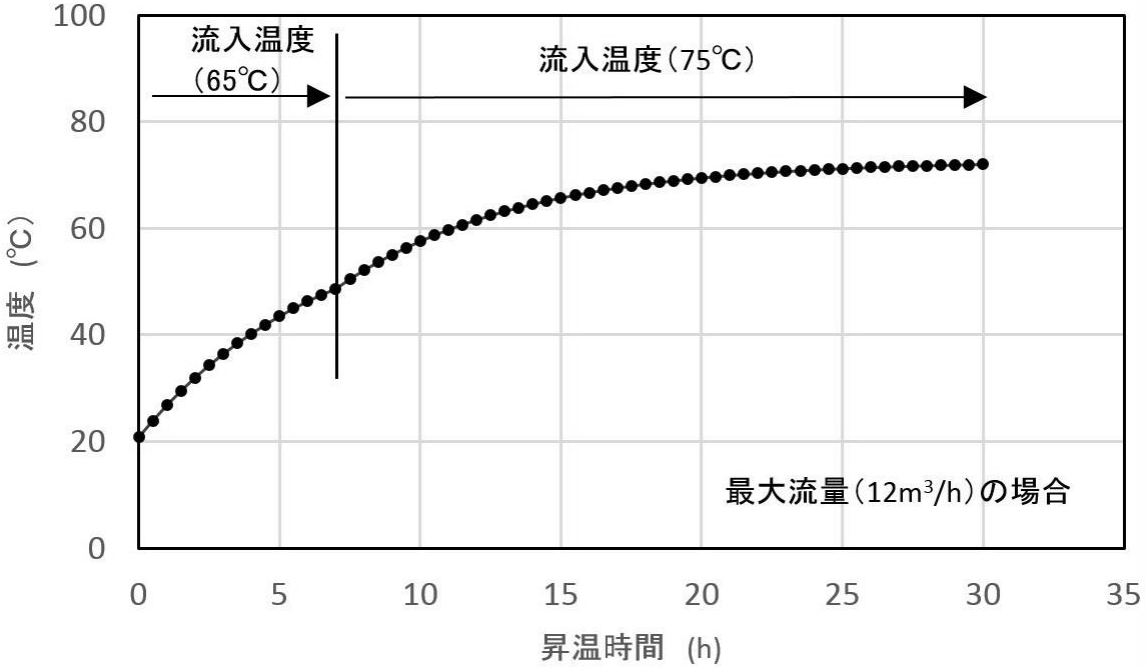



図 3-2　昇温時の水槽の温度挙動解析結果

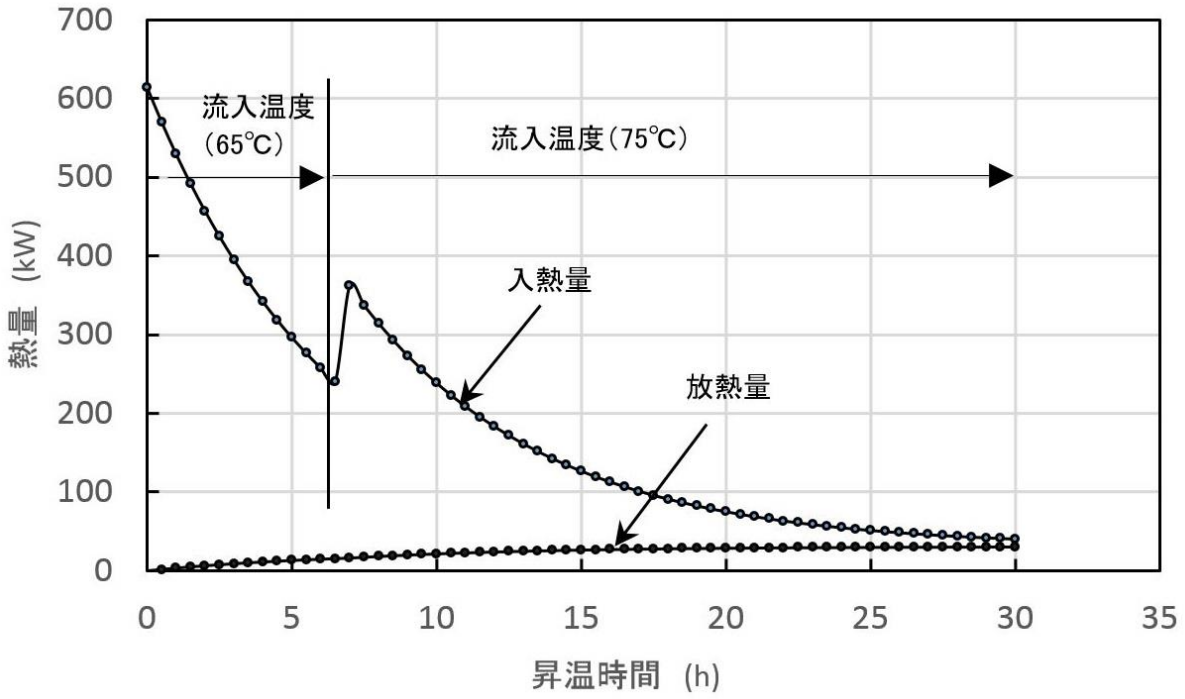



図 3-3　昇温時の水槽の入熱量と放熱量の変化

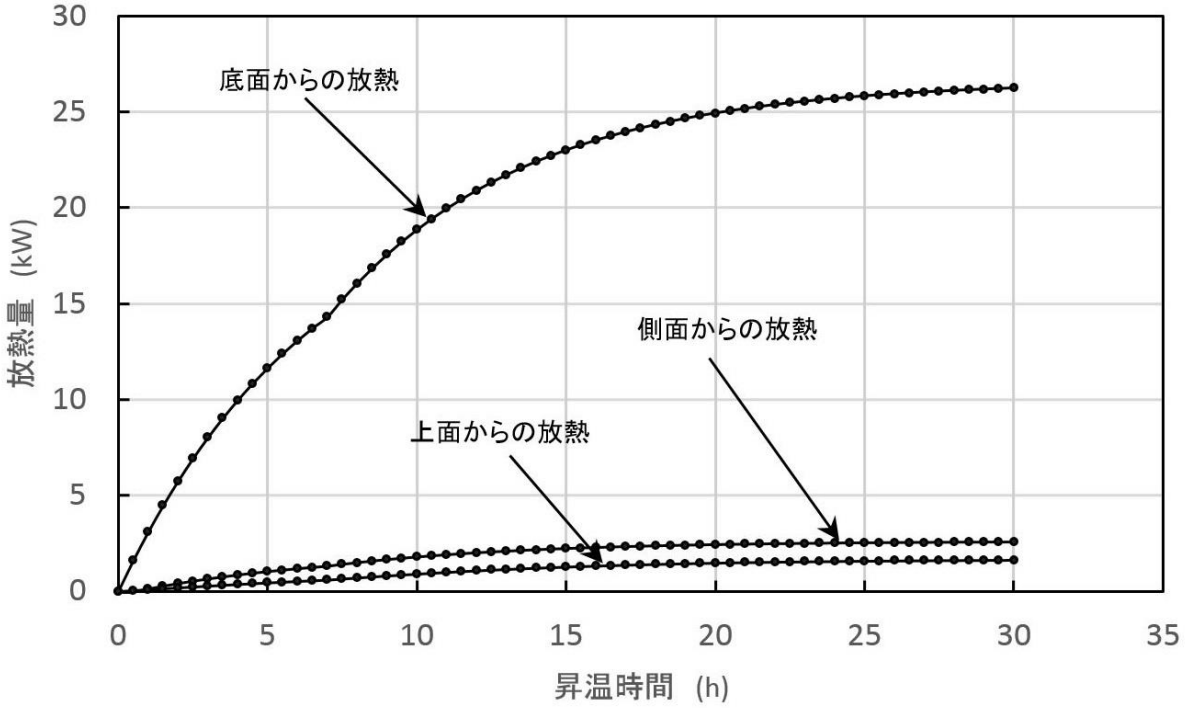



図 3-4　各面からの放熱量の比較

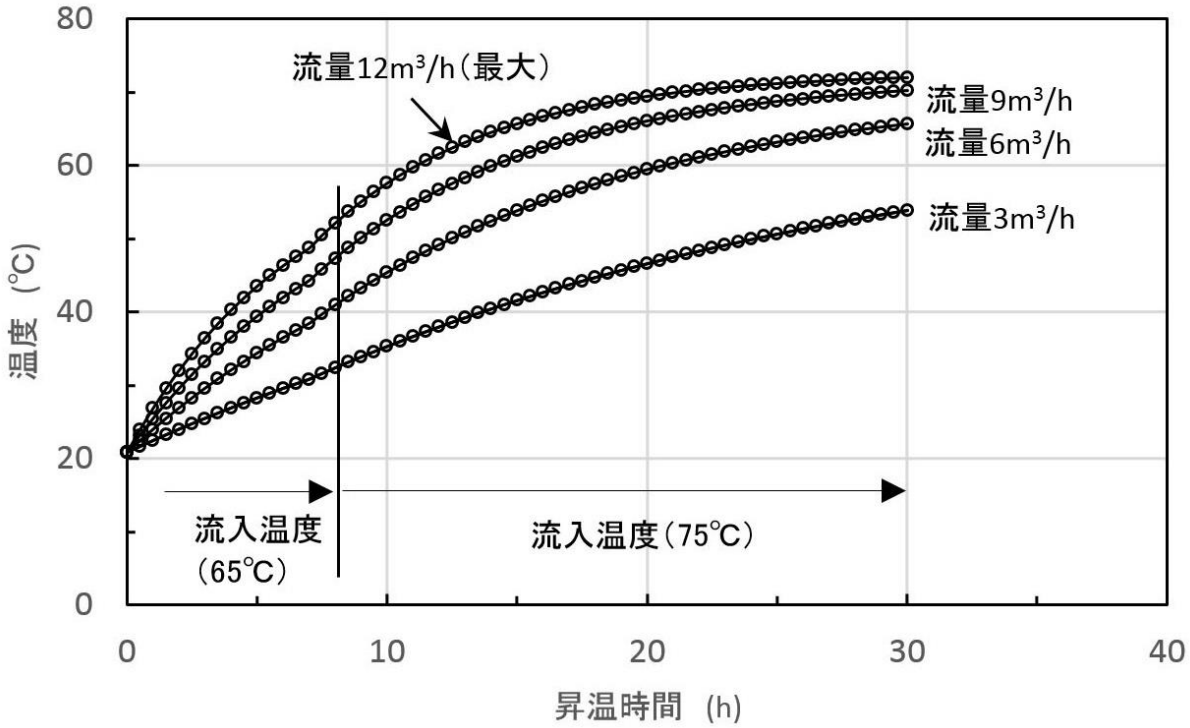



図 3-5　流量を変化させた場合の水槽の温度挙動比較

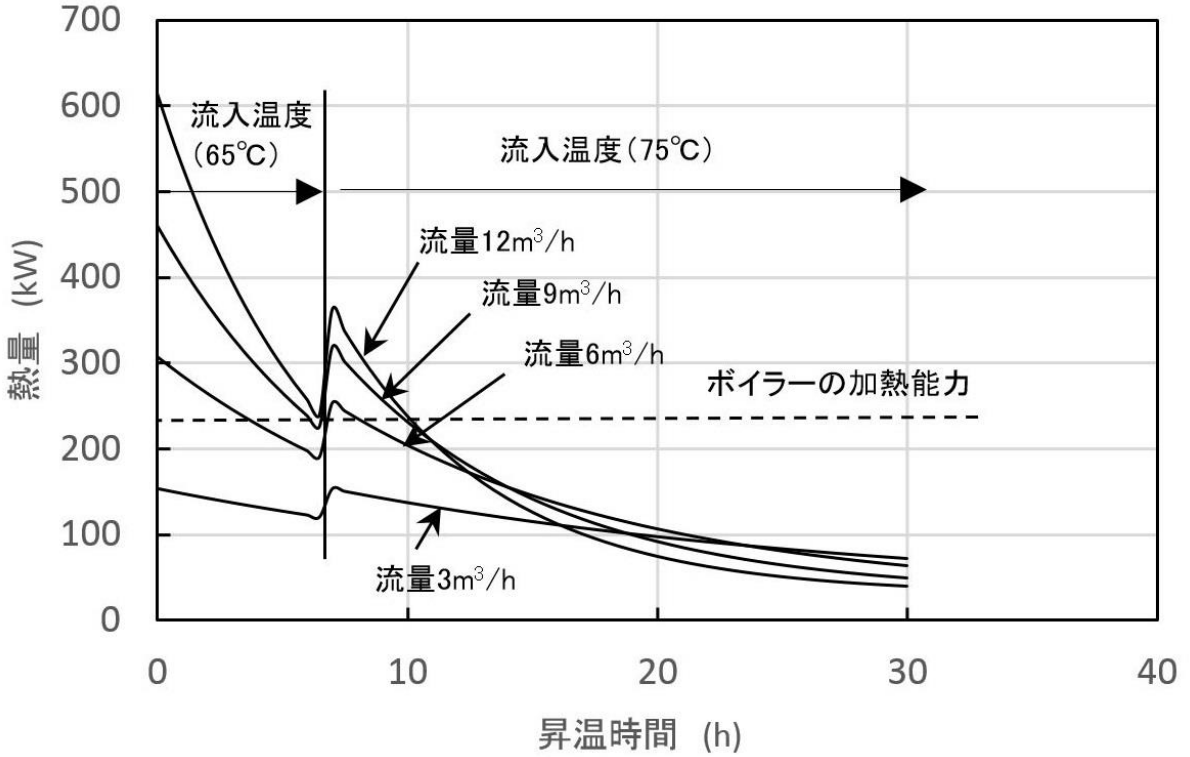



図 3-6　流量を変化させた場合の入熱量の比較

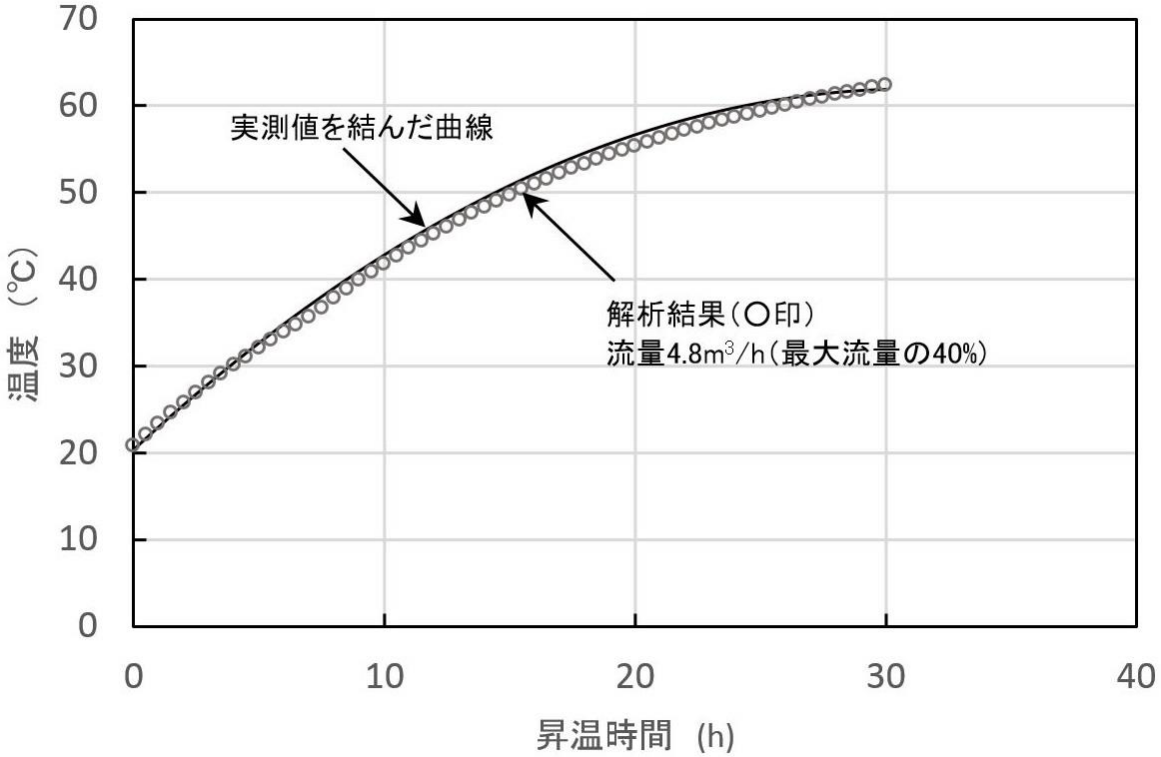



図 3-7　流量を変化させた場合の水槽の温度挙動比較

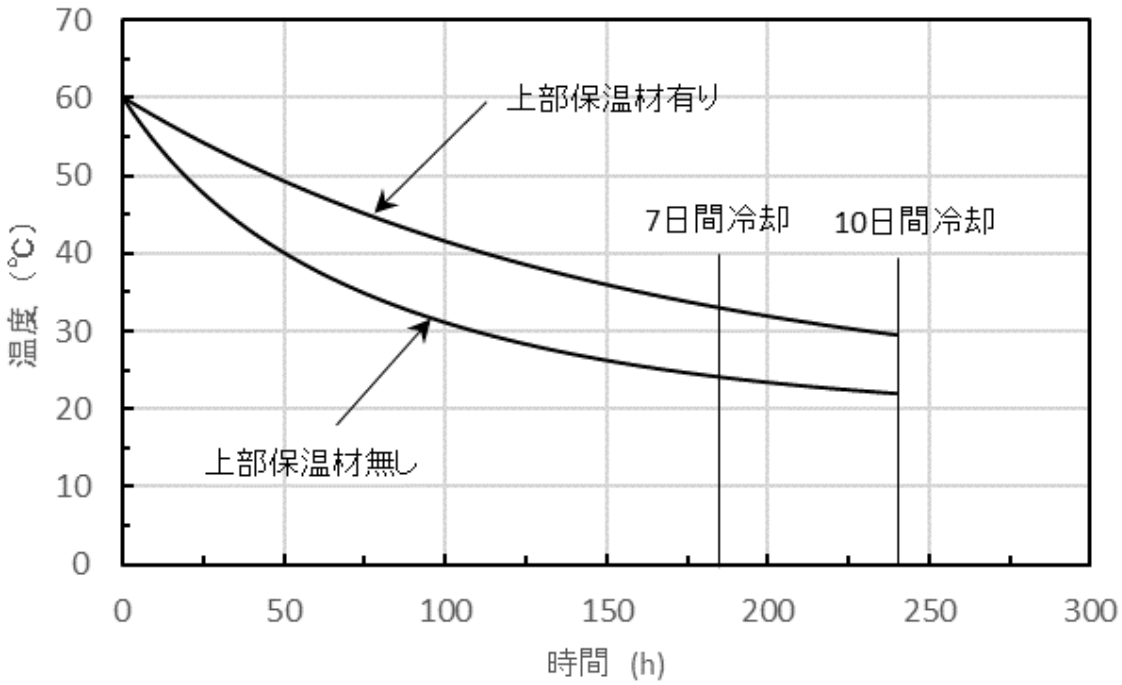



図 3-8　上部断熱材の有無による水槽の降温挙動の比較

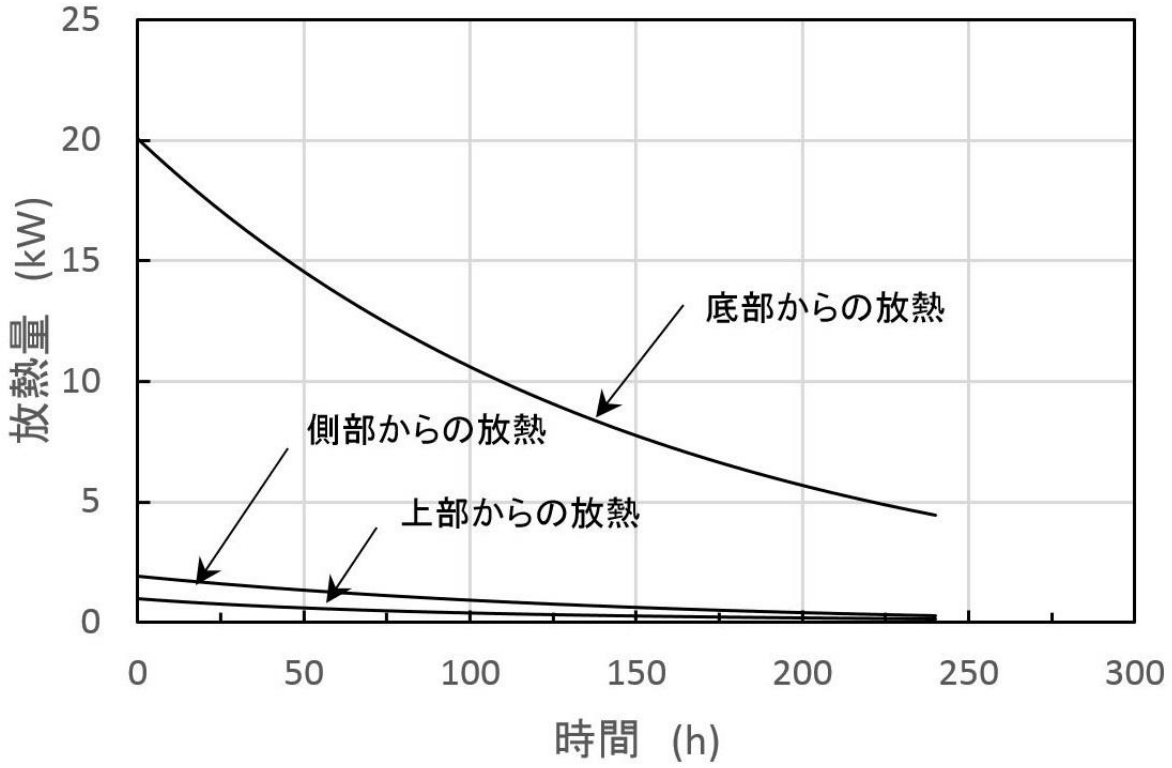



図 3-9(1)　上部断熱材が有る場合の各部からの放熱量比較

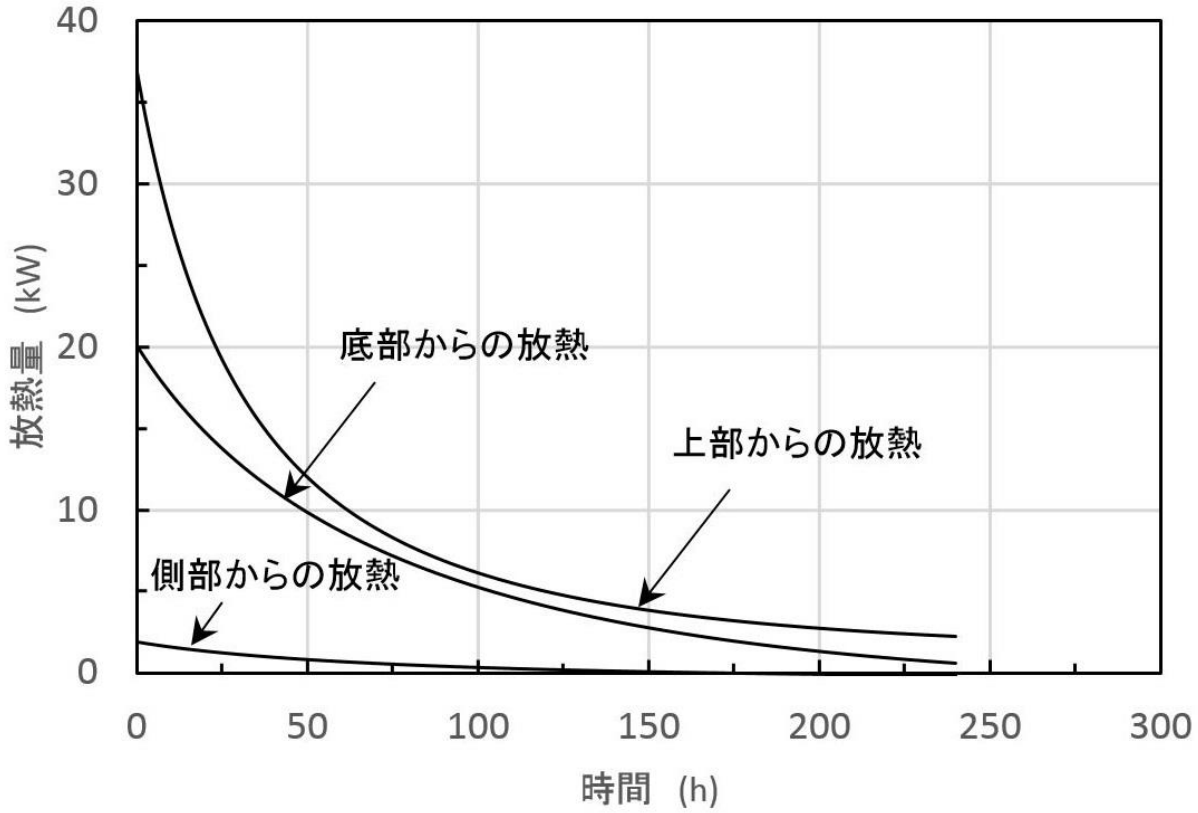



図 3-9(2)　上部断熱材が無い場合の各部からの放熱量比較

## 4. まとめ

楢葉遠隔技術開発センターには水中用ロボットの試験用水槽が設置されており、試験温度が室温から 60℃まで昇温させた条件での試験が可能である。この試験用水槽の昇降温の制御、一定温度の制御を的確かつ合理的に行うために、試験用水槽を室温から 60℃（最高設定温度）まで昇温させる昇温試験を実施し、昇温挙動のデータが取得されている。しかしながら、夏場、冬場などの季節による雰囲気条件などの違いによりこれら挙動は異なるため、全ての条件において大規模な実証試験を行ってデータを蓄積することは困難である。そこで、ロボット試験用水槽の保温構造等を考慮し、水槽からの放熱形態をモデル化した温度挙動評価法を検討し、水槽の昇温評価用コード及び降温評価用コードを開発した。さらに、開発したコードを用いて実測データとの比較検討を行った。比較検討の結果、本検討により得られた結果は以下のとおりである。

(1) 断熱状態での昇温挙動を調べた結果、断熱解析の予測値は実測値よりかなり高い予測となる。すなわち、試験用水槽からの放熱を適切に取り込んだモデルによる下記解析が必要である。

(2) 放熱を考慮した昇温挙動を調べた結果、

- 断熱材を施行している上面及び側面からの放熱量は、施行していない底面に比べると 1/10 程度に抑えられている。すなわち、断熱材による断熱効果が良好である。
- ボイラの加熱能力から見積もられる流量（最大流量の 40%程度）で加熱した場合の水槽の温度挙動は、実測値と非常に良く一致する。

(3) 放熱を考慮した降温挙動を調べた結果、

- 水槽を冷却するのに上部断熱材を撤去するのが効果的である。たとえば、水温が 40℃に低下するのに、上部断熱材が有りの場合に比べて無い場合には半分以下の冷却時間に短縮できる。
- 断熱材が有る場合の熱は底面からの熱移動が支配的であるのに対して、上部の断熱材が無い場合には上部からの熱伝達と蒸発潜熱による放熱が支配的である。このため、上面からの熱放出を加速させるよう扇風機で上面をさらに冷やすなどにより、冷却時間のさらなる短縮が可能と考えられる。

より合理的なロボット試験用水槽の温度制御のため、ここで開発したコードを用いた予測をしながら温度制御することが考えられる。熱電対の実測データ、流量計のデータを基にここで開発したコードを用いた予測を併用することにより、より精度良く合理的なロボット試験用水槽の温度制御が可能となるものと考える。

今後、ここで開発したコードを用いた解析検討により、ロボット試験用水槽の合理的な加熱方式や冷却方式など実験では得られない新たな知見が得られるものと考える。また、水槽の温度制御の観点から、温水の水槽への流入量のデータが有用であるため、今後、流量計の設置を検討する。

謝辞

水中用ロボット試験用水槽の温度挙動評価手法の開発においては、楢葉遠隔技術開発センター長石原正博 博士にご指導を頂いた。ここに感謝の意を表する。

参考文献

1-1) 荒川了紀, 野﨑信久, “ロボット試験用水槽の昇温試験”, JAEA-Technology 2018-009(2018) 28p.

2-1) 空気調和・衛生工学会, “空気調和・衛生工学便覧第 14 版 4 給排水衛生設備編” (2010) p.488.

2-2) 岩佐章夫ほか, “気温上昇に伴う不純ヘリウムカードルガス圧の想定外の上昇”, 第 91 回 2015 年度春季低温工学・超伝導学会 (2015) p.33.

2-3) 小西克章, “ルンゲクッタ法による常微分方程式の数値解法”, https://www.sit.ac.jp/user/konishi/JPN/L_Support/SupportPDF/ Runge-Kutta Method.pdf（参照：2018 年 5 月 28 日）.

2-4) 日本機械学会, “伝熱工学資料（改訂第 5 版）”, 日本機械学会(2009)p.291.

2-5) 構造計画研究所, “対流伝熱の特徴”, https://sbdsupportweb.custhelp.com/app/answers/（参照：2018 年 5 月 28 日）.

2-6) 日本機械学会, “伝熱工学資料（改訂第 5 版）”, 日本機械学会(2009) pp.287-290.

2-7) ステンレス協会, “ステンレスの導電率、透磁率、熱膨張率など（第 1 表 ステンレスの物理的性質）の物理的性質について”, http://www.jssa.gr.jp/contents/faq-article/q6/（参照：2018 年 5 月 28 日）.

2-8) 平成 28 年省エネルギー基準解説書編集委員会, “平成 28 年省エネルギー基準に準拠した算定・判断の方法及び解説”, 連合印刷センター（2017）.

3-1) Qiita, “オイラー法/ホイン法/ルンゲクッタ法をつかった常微分方程式の数値解析超入門”, https://qiita.com/Dr_ASA/items/d44560cf1367290aee6d（参照：2018 年 5 月 28 日）.

# 添付 1「ロボット試験用水槽の昇温挙動解析コード(Ver.1)の使用マニュアル」

## １．解析コードの概要

本解析コードはロボット試験用水槽の昇温挙動を解析するもので、利便性を考慮して Excel-VBA 上に作成している。利用に当たっては、Excel のワークシート（Input）の表中の数値を設定することにより、温度挙動が簡便に解析できる。

### (1)　解析モデル

添付図 1-1 に解析モデルの概要を示す。水槽の上面、側面、底面からの放熱を考慮する。

・入熱；添付図 1-2 に示すように、ボイラで加熱された温度 $T_{in}$（℃）で $V_{in}$ の体積の高温水が水槽に流入し、$T_{out}$ で同量の水が水槽から流出する。

・放熱；上面からの放熱として、蒸発による放熱と空気への熱伝達による放熱の二つのモードを考慮する。（添付図 1-3）
側面からは、空気への熱伝達による放熱モード（添付図 1-4）、
底面からは一定温度のコンクリートへの放熱モード（添付図 1-5）を考慮する。

### (2)　解析方法

・微分方程式は、Runge-Kutta 法により増分 h（s）で逐次解析を行うことにより解く。

・温度の関数として、水の密度（ρ）、蒸発潜熱（r）の温度依存性（0℃～100℃）が考慮できる。

$$\rho(T_w) = -0.0036{T_w}^2 - 0.0701T_w + 1000.5$$
$$r(T_w) = -2.437T_w + 2502.6$$

（$t_w$：水温　（0℃<$t_w$<100℃））

## ２．入力データ

・解析に用いる入力データの一覧を添付表 1-1 に示す。

## ３．使用方法

本コードの利用方法は以下の手順である。

(1)【昇温解析コード】のエクセルファイルをマクロ実行可能な状態で開く。

(2)「Input」シートの設定値欄に設定値を入力する。なお、流入水の温度が一定の解析を行いたい場合には、流入水の温度 2 も流入水の温度 1 と同じ値を入力する。（添付図 1-6 参照）

(3)「Alt」＋「F8」キーを入力すると VBA の実行画面（添付図 1-7 参照）が表示されるので、実行ボタンを押す。

(4)　実行完了とともに、「Output」シートとともに VBA エディターが表示される（添付図 1-8 参照）ので、エディターを閉じる。

(5)「Output」シートの結果ファイル（添付図 1-9）を適時用意したエクセルシートにコピーして結果を検討する。なお、「Output」シートファイルはそのまま残しておく。（次の解析結果により逐次上書きされる。）

４．解析例

添付表 1-1 に示すサンプルデータによる解析結果を添付表 1-2(1)及び(2)に示す。　サンプル解析は、最大流量（12m$^3$/h）の温水（65℃、400 分後 75℃）で昇温した場合である。
主要なインプットパラメータのリストが「Output」シートの左側に出力される。（添付表 1-2(1)参照）また、右側に時間、温度、入熱／放熱熱量などが出力される。（添付表 1-2(2)参照）

添付表 1-1　昇温解析コードへの入力データ一覧表　　（1/2）

| パラメータ、記号 | 設定値 |
|---|---|
| 初期の水温、$T_{w(0)}$（℃） | 20.8 |
| 流入水の温度 1、$T_{in1}$（℃） | 65.0 |
| 流入水の温度 2、$T_{in2}$（℃） | 75.0 |
| 流水の温度の切り替え時間（s） | 2400.0 |
| 空気の温度、$T_A$（℃） | 24.7 |
| 水の流入量、$V_{in}$（m$^3$/h） | 12.0 |
| 容器内の水の体積、$V_w$（m$^3$）(=π×(4.5/2)$^2$×5) | 79.52 |
| 水の比熱(水温 $T_w$ の関数)、$C_w(T_w)$（J/(kg･K)） | 4180.0 |
| 水からウレタンへの熱伝達率、$\alpha_{wu}$（W/(m$^2$･K)） | 500.0 |
| ウレタンから空気への熱伝達率、$\alpha_{uA}$（W/(m$^2$･K)） | 9.0 |
| 水から空気への熱伝達率、$\alpha_{wA}$（W/(m$^2$･K)） | 9.0 |
| 水からステンレス製容器への熱伝達率、$\alpha_{ws}$（W/(m$^2$･K)） | 500.0 |
| ステンレス製カバー板から空気への熱伝達率、$\alpha_{cA}$（W/(m$^2$･K)） | 9.0 |
| コンクリートの下面温度、$T_{bcon}$（℃） | 20.8 |
| ウレタンの熱伝導率、$\lambda_u$（W/(m･K)） | 0.03 |
| ステンレス製容器の熱伝導率、$\lambda_{sus}$（W/(m･K)） | 16.3 |
| 側部断熱材（ポリスチレン）の熱伝導率、$\lambda_{pol}$（W/(m･K)） | 0.042 |
| ステンレス製カバー板の熱伝導率、$\lambda_{cov}$（W/(m･K)） | 16.3 |
| コンクリートの熱伝導率、$\lambda_{con}$（W/(m･K)） | 1.6 |
| ウレタンの厚さ、$d_u$（m） | $5.0\times10^{-2}$ |
| ステンレス製容器の側部厚さ、$d_{sus}$（m） | $4.0\times10^{-3}$ |
| 側部断熱材の厚さ、$d_{pol}$（m） | $5.0\times10^{-2}$ |
| ステンレス製カバー板の厚さ、$d_{cov}$（m） | $1.0\times10^{-3}$ |
| ステンレス製容器の底部厚さ、$d_{bsus}$（m） | $1.0\times10^{-2}$ |
| コンクリートの厚さ、$d_{con}$（m） | $5.0\times10^{-2}$ |

添付表 1-1　昇温解析コードへの入力データ一覧表　　(2/2)

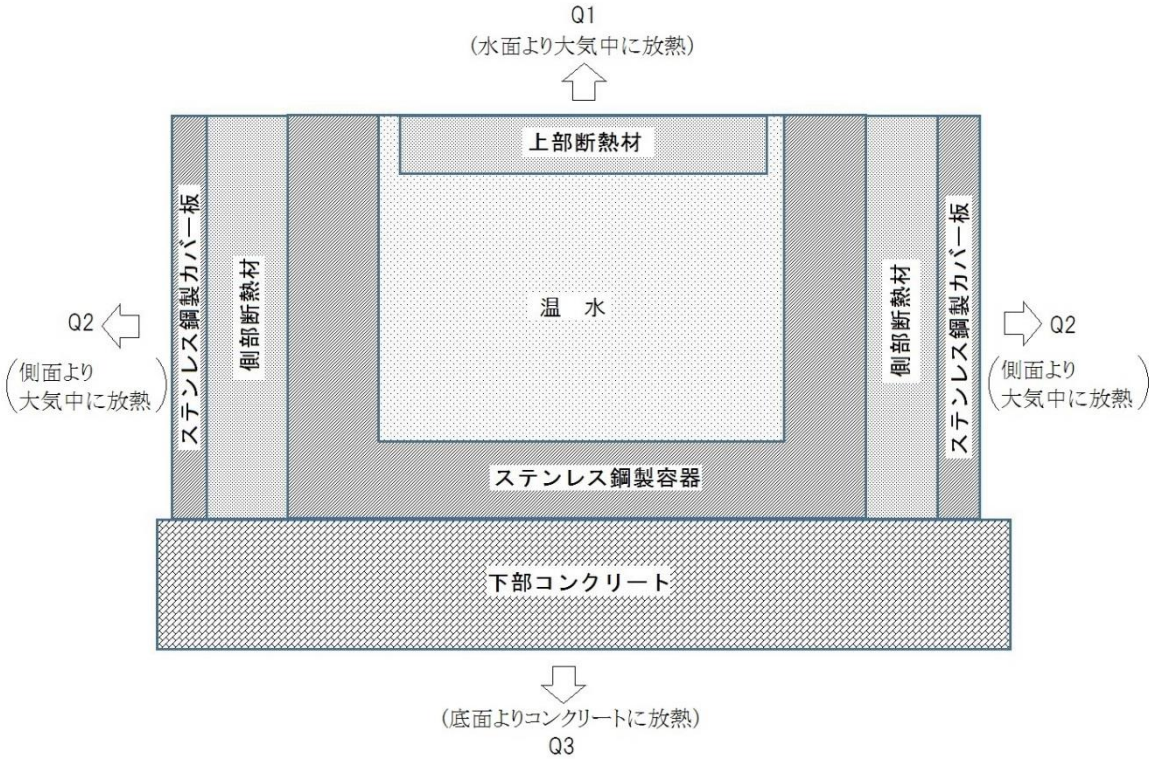
| | |
|---|---|
| ウレタンの面積、$A_{top}$（$m^2$）(=π×(4.5/2)$^2$－Aw) | 15.6 |
| 水面が空気と接する面積、$A_w$（$m^2$） | 0.3 |
| 側面の面積、$A_{side}$（$m^2$）(=π×4.5×5) | 70.69 |
| 下面の面積、$A_{bot}$（$m^2$）(=π×(4.7/2)$^2$) | 17.35 |
| 水面上の風速、v（m/s） | 0.5 |
| 相対湿度、$h_{um}$（%） | 50.0 |
| Runge-Kutta 法の時間ステップ幅、h（s） | 1800.0 |

添付表 1-2(1) サンプルデータによる解析結果（入力条件の出力）

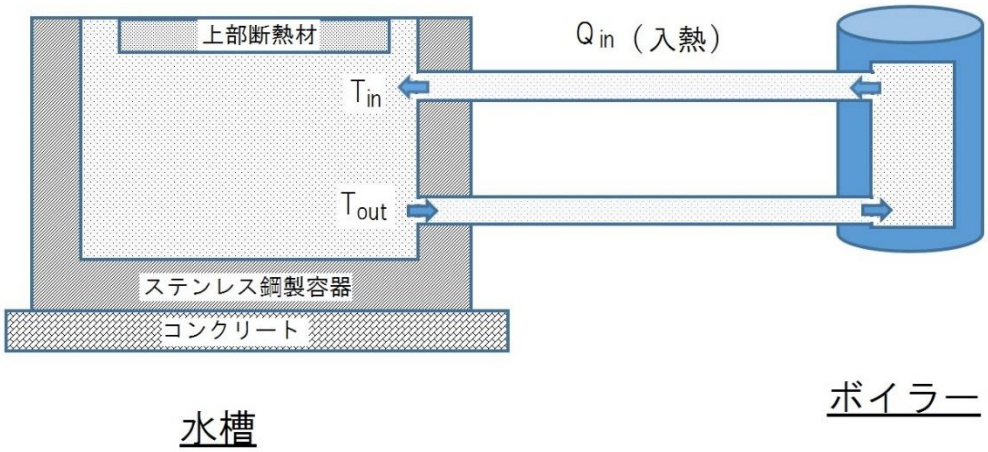
| --- Main Input Parameter --- | |
|---|---|
| TA= | 24.7 |
| hum= | 50 |
| Tw= | 20.8 |
| Tin1= | 65 |
| Tin2= | 75 |
| Vin= | 0.003333 |
| h= | 1800 |
| changetime= | 24000 |
| Vw= | 79.52155 |
| Cw= | 4180 |
| Atop= | 15.60431 |
| V= | 0.5 |
| Aw= | 0.3 |
| aws= | 500 |
| acA= | 9 |
| Aside= | 70.68582 |
| d2ram2= | 1.190783 |
| dbsus= | 0.01 |
| ramsus= | 16.3 |
| dcon= | 0.05 |
| ramcon= | 1.6 |
| Tbcon= | 20.8 |
| Abot= | 17.34944 |

添付表 1-2(2) サンプルデータによる解析結果（計算結果の出力）

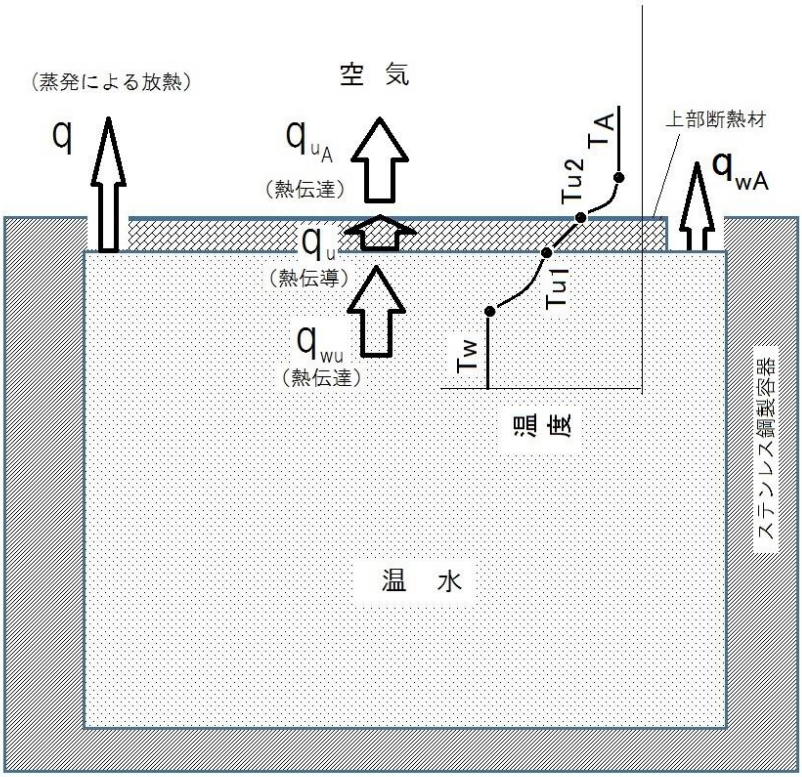
| Time(h) | Time(s) | k1 | k2 | k3 | k4 | Tw(℃) | Qin(kW) | Qout1(kW) | Qout2(kW) | Qout3(kW) | Qoutall(kW) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0.0 | 0 | 1.853E-03 | 1.783E-03 | 1.716E-03 | 1.587E-03 | 20.80 | 614.30 | -0.01 | -0.21 | 0.00 | -0.22 |
| 0.5 | 1800 | 1.717E-03 | 1.652E-03 | 1.590E-03 | 1.470E-03 | 23.93 | 570.36 | 0.05 | -0.04 | 1.60 | 1.61 |
| 1.0 | 3600 | 1.590E-03 | 1.530E-03 | 1.472E-03 | 1.361E-03 | 26.83 | 529.69 | 0.10 | 0.12 | 3.09 | 3.31 |
| 1.5 | 5400 | 1.473E-03 | 1.417E-03 | 1.363E-03 | 1.261E-03 | 29.52 | 492.04 | 0.15 | 0.26 | 4.47 | 4.88 |
| 2.0 | 7200 | 1.364E-03 | 1.312E-03 | 1.263E-03 | 1.168E-03 | 32.01 | 457.20 | 0.21 | 0.40 | 5.74 | 6.35 |
| 2.5 | 9000 | 1.263E-03 | 1.215E-03 | 1.170E-03 | 1.081E-03 | 34.31 | 424.96 | 0.26 | 0.52 | 6.92 | 7.70 |
| 3.0 | 10800 | 1.170E-03 | 1.126E-03 | 1.083E-03 | 1.001E-03 | 36.45 | 395.13 | 0.31 | 0.64 | 8.02 | 8.96 |
| 3.5 | 12600 | 1.083E-03 | 1.042E-03 | 1.003E-03 | 9.274E-04 | 38.42 | 367.53 | 0.36 | 0.74 | 9.03 | 10.13 |
| 4.0 | 14400 | 1.003E-03 | 9.654E-04 | 9.290E-04 | 8.589E-04 | 40.25 | 341.99 | 0.40 | 0.84 | 9.97 | 11.21 |
| 4.5 | 16200 | 9.292E-04 | 8.941E-04 | 8.604E-04 | 7.954E-04 | 41.95 | 318.37 | 0.45 | 0.94 | 10.84 | 12.22 |
| 5.0 | 18000 | 8.605E-04 | 8.280E-04 | 7.968E-04 | 7.366E-04 | 43.52 | 296.50 | 0.50 | 1.02 | 11.64 | 13.15 |
| 5.5 | 19800 | 7.969E-04 | 7.668E-04 | 7.379E-04 | 6.822E-04 | 44.97 | 276.28 | 0.54 | 1.10 | 12.38 | 14.02 |
| 6.0 | 21600 | 7.380E-04 | 7.101E-04 | 6.833E-04 | 6.317E-04 | 46.32 | 257.56 | 0.58 | 1.17 | 13.07 | 14.83 |
| 6.5 | 23400 | 6.834E-04 | 6.576E-04 | 6.328E-04 | 5.850E-04 | 47.57 | 240.24 | 0.62 | 1.24 | 13.71 | 15.57 |
| 7.0 | 25200 | 1.052E-03 | 1.012E-03 | 9.741E-04 | 9.006E-04 | 48.72 | 361.96 | 0.66 | 1.30 | 14.30 | 16.26 |
| 7.5 | 27000 | 9.743E-04 | 9.375E-04 | 9.021E-04 | 8.340E-04 | 50.50 | 337.21 | 0.72 | 1.40 | 15.22 | 17.33 |
| 8.0 | 28800 | 9.022E-04 | 8.681E-04 | 8.354E-04 | 7.723E-04 | 52.14 | 314.33 | 0.77 | 1.49 | 16.06 | 18.32 |
| 8.5 | 30600 | 8.354E-04 | 8.039E-04 | 7.736E-04 | 7.152E-04 | 53.67 | 293.16 | 0.83 | 1.57 | 16.84 | 19.24 |
| 9.0 | 32400 | 7.736E-04 | 7.444E-04 | 7.163E-04 | 6.622E-04 | 55.08 | 273.58 | 0.89 | 1.65 | 17.56 | 20.10 |
| 9.5 | 34200 | 7.164E-04 | 6.893E-04 | 6.633E-04 | 6.132E-04 | 56.39 | 255.46 | 0.94 | 1.72 | 18.23 | 20.89 |
| 10.0 | 36000 | 6.633E-04 | 6.383E-04 | 6.142E-04 | 5.678E-04 | 57.60 | 238.71 | 0.99 | 1.78 | 18.85 | 21.63 |
| 10.5 | 37800 | 6.142E-04 | 5.910E-04 | 5.687E-04 | 5.258E-04 | 58.72 | 223.21 | 1.04 | 1.84 | 19.43 | 22.31 |
| 11.0 | 39600 | 5.688E-04 | 5.473E-04 | 5.266E-04 | 4.868E-04 | 59.76 | 208.87 | 1.08 | 1.90 | 19.96 | 22.94 |
| 11.5 | 41400 | 5.266E-04 | 5.067E-04 | 4.876E-04 | 4.508E-04 | 60.72 | 195.60 | 1.13 | 1.95 | 20.45 | 23.53 |
| 12.0 | 43200 | 4.876E-04 | 4.692E-04 | 4.515E-04 | 4.174E-04 | 61.61 | 183.33 | 1.17 | 2.00 | 20.91 | 24.08 |
| 12.5 | 45000 | 4.515E-04 | 4.345E-04 | 4.181E-04 | 3.865E-04 | 62.43 | 171.98 | 1.21 | 2.05 | 21.33 | 24.58 |
| 13.0 | 46800 | 4.181E-04 | 4.023E-04 | 3.871E-04 | 3.578E-04 | 63.19 | 161.47 | 1.25 | 2.09 | 21.72 | 25.05 |
| 13.5 | 48600 | 3.871E-04 | 3.725E-04 | 3.584E-04 | 3.313E-04 | 63.90 | 151.75 | 1.28 | 2.13 | 22.08 | 25.49 |
| 14.0 | 50400 | 3.584E-04 | 3.449E-04 | 3.318E-04 | 3.068E-04 | 64.56 | 142.76 | 1.32 | 2.16 | 22.42 | 25.89 |
| 14.5 | 52200 | 3.318E-04 | 3.193E-04 | 3.073E-04 | 2.840E-04 | 65.16 | 134.44 | 1.35 | 2.19 | 22.73 | 26.27 |
| 15.0 | 54000 | 3.072E-04 | 2.956E-04 | 2.845E-04 | 2.630E-04 | 65.72 | 126.74 | 1.38 | 2.22 | 23.01 | 26.62 |
| 15.5 | 55800 | 2.845E-04 | 2.737E-04 | 2.634E-04 | 2.435E-04 | 66.24 | 119.61 | 1.40 | 2.25 | 23.28 | 26.94 |
| 16.0 | 57600 | 2.634E-04 | 2.534E-04 | 2.439E-04 | 2.254E-04 | 66.72 | 113.02 | 1.43 | 2.28 | 23.53 | 27.24 |
| 16.5 | 59400 | 2.439E-04 | 2.347E-04 | 2.258E-04 | 2.087E-04 | 67.17 | 106.91 | 1.46 | 2.30 | 23.76 | 27.51 |
| 17.0 | 61200 | 2.258E-04 | 2.173E-04 | 2.090E-04 | 1.933E-04 | 67.58 | 101.27 | 1.48 | 2.32 | 23.97 | 27.77 |
| 17.5 | 63000 | 2.090E-04 | 2.011E-04 | 1.935E-04 | 1.789E-04 | 67.96 | 96.04 | 1.50 | 2.35 | 24.16 | 28.01 |
| 18.0 | 64800 | 1.935E-04 | 1.862E-04 | 1.792E-04 | 1.657E-04 | 68.31 | 91.20 | 1.52 | 2.36 | 24.34 | 28.23 |
| 18.5 | 66600 | 1.792E-04 | 1.724E-04 | 1.659E-04 | 1.534E-04 | 68.64 | 86.73 | 1.54 | 2.38 | 24.51 | 28.43 |
| 19.0 | 68400 | 1.659E-04 | 1.596E-04 | 1.536E-04 | 1.420E-04 | 68.94 | 82.58 | 1.56 | 2.40 | 24.67 | 28.62 |
| 19.5 | 70200 | 1.536E-04 | 1.478E-04 | 1.422E-04 | 1.315E-04 | 69.22 | 78.75 | 1.57 | 2.41 | 24.81 | 28.80 |
| 20.0 | 72000 | 1.422E-04 | 1.368E-04 | 1.317E-04 | 1.217E-04 | 69.48 | 75.20 | 1.59 | 2.43 | 24.94 | 28.96 |
| 20.5 | 73800 | 1.317E-04 | 1.267E-04 | 1.219E-04 | 1.127E-04 | 69.72 | 71.91 | 1.60 | 2.44 | 25.07 | 29.11 |
| 21.0 | 75600 | 1.219E-04 | 1.173E-04 | 1.129E-04 | 1.043E-04 | 69.95 | 68.87 | 1.62 | 2.45 | 25.18 | 29.25 |
| 21.5 | 77400 | 1.129E-04 | 1.086E-04 | 1.045E-04 | 9.659E-05 | 70.15 | 66.06 | 1.63 | 2.46 | 25.28 | 29.38 |
| 22.0 | 79200 | 1.045E-04 | 1.005E-04 | 9.674E-05 | 8.943E-05 | 70.34 | 63.45 | 1.64 | 2.47 | 25.38 | 29.50 |
| 22.5 | 81000 | 9.673E-05 | 9.308E-05 | 8.956E-05 | 8.279E-05 | 70.52 | 61.04 | 1.65 | 2.48 | 25.47 | 29.61 |
| 23.0 | 82800 | 8.955E-05 | 8.617E-05 | 8.292E-05 | 7.665E-05 | 70.68 | 58.81 | 1.66 | 2.49 | 25.56 | 29.71 |
| 23.5 | 84600 | 8.291E-05 | 7.978E-05 | 7.677E-05 | 7.097E-05 | 70.83 | 56.74 | 1.67 | 2.50 | 25.63 | 29.81 |
| 24.0 | 86400 | 7.676E-05 | 7.386E-05 | 7.107E-05 | 6.570E-05 | 70.97 | 54.83 | 1.68 | 2.51 | 25.71 | 29.89 |
| 24.5 | 88200 | 7.106E-05 | 6.838E-05 | 6.580E-05 | 6.083E-05 | 71.10 | 53.06 | 1.69 | 2.52 | 25.77 | 29.98 |
| 25.0 | 90000 | 6.579E-05 | 6.331E-05 | 6.092E-05 | 5.631E-05 | 71.22 | 51.42 | 1.70 | 2.52 | 25.83 | 30.05 |
| 25.5 | 91800 | 6.091E-05 | 5.861E-05 | 5.640E-05 | 5.214E-05 | 71.33 | 49.91 | 1.70 | 2.53 | 25.89 | 30.12 |
| 26.0 | 93600 | 5.639E-05 | 5.426E-05 | 5.221E-05 | 4.827E-05 | 71.44 | 48.50 | 1.71 | 2.53 | 25.94 | 30.19 |
| 26.5 | 95400 | 5.221E-05 | 5.024E-05 | 4.834E-05 | 4.469E-05 | 71.53 | 47.20 | 1.72 | 2.54 | 25.99 | 30.25 |
| 27.0 | 97200 | 4.833E-05 | 4.651E-05 | 4.475E-05 | 4.137E-05 | 71.62 | 46.00 | 1.72 | 2.54 | 26.04 | 30.30 |
| 27.5 | 99000 | 4.475E-05 | 4.306E-05 | 4.143E-05 | 3.830E-05 | 71.70 | 44.88 | 1.73 | 2.55 | 26.08 | 30.35 |
| 28.0 | 100800 | 4.143E-05 | 3.986E-05 | 3.836E-05 | 3.546E-05 | 71.78 | 43.85 | 1.73 | 2.55 | 26.12 | 30.40 |
| 28.5 | 102600 | 3.835E-05 | 3.690E-05 | 3.551E-05 | 3.283E-05 | 71.85 | 42.90 | 1.74 | 2.56 | 26.15 | 30.45 |
| 29.0 | 104400 | 3.551E-05 | 3.417E-05 | 3.288E-05 | 3.039E-05 | 71.91 | 42.02 | 1.74 | 2.56 | 26.19 | 30.49 |
| 29.5 | 106200 | 3.287E-05 | 3.163E-05 | 3.044E-05 | 2.814E-05 | 71.97 | 41.20 | 1.74 | 2.56 | 26.22 | 30.52 |
| 30.0 | 108000 | 3.043E-05 | 2.928E-05 | 2.818E-05 | 2.605E-05 | 72.03 | 40.44 | 1.75 | 2.57 | 26.25 | 30.56 |



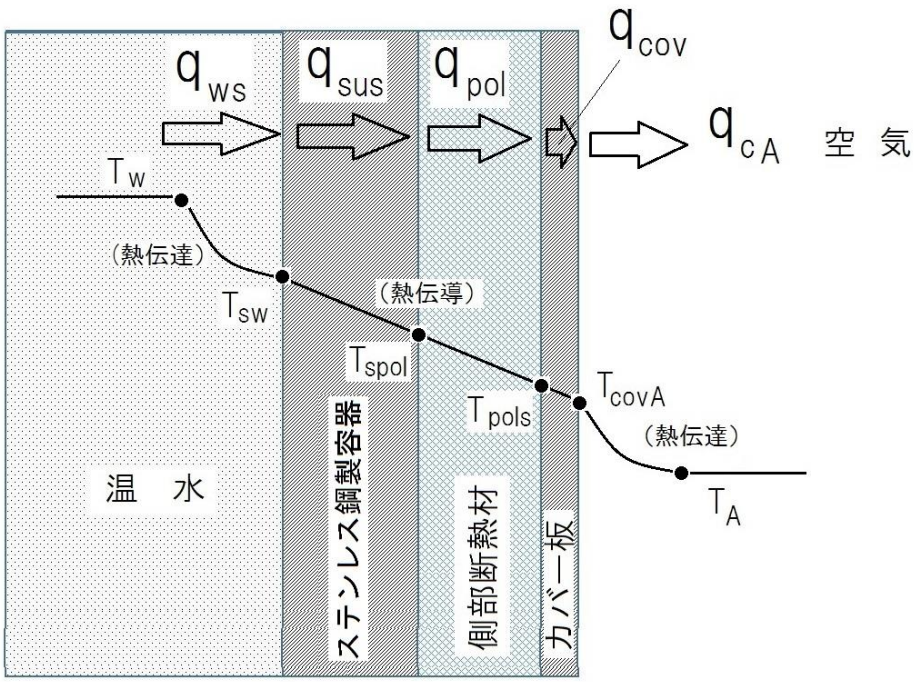

添付図 1-1　解析モデルの概要



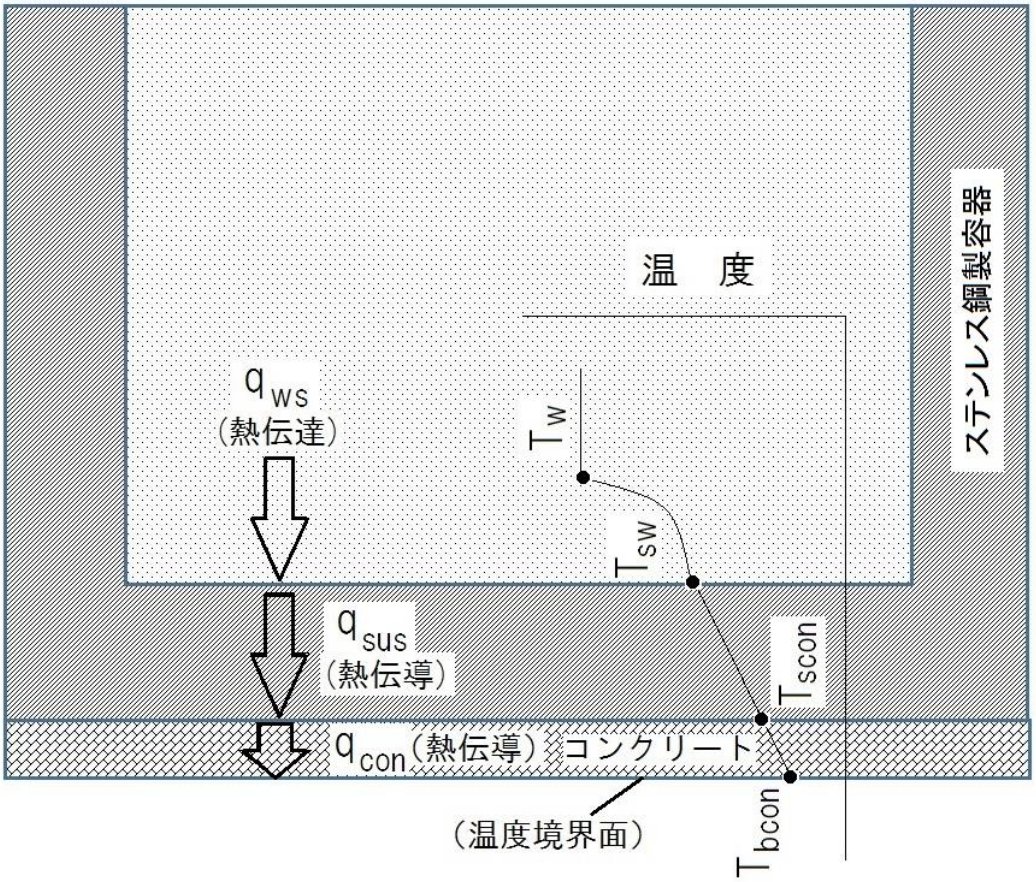

添付図 1-2　水槽への入熱




添付図 1-3　上面からの放熱モード




添付図 1-4　側面からの放熱モード



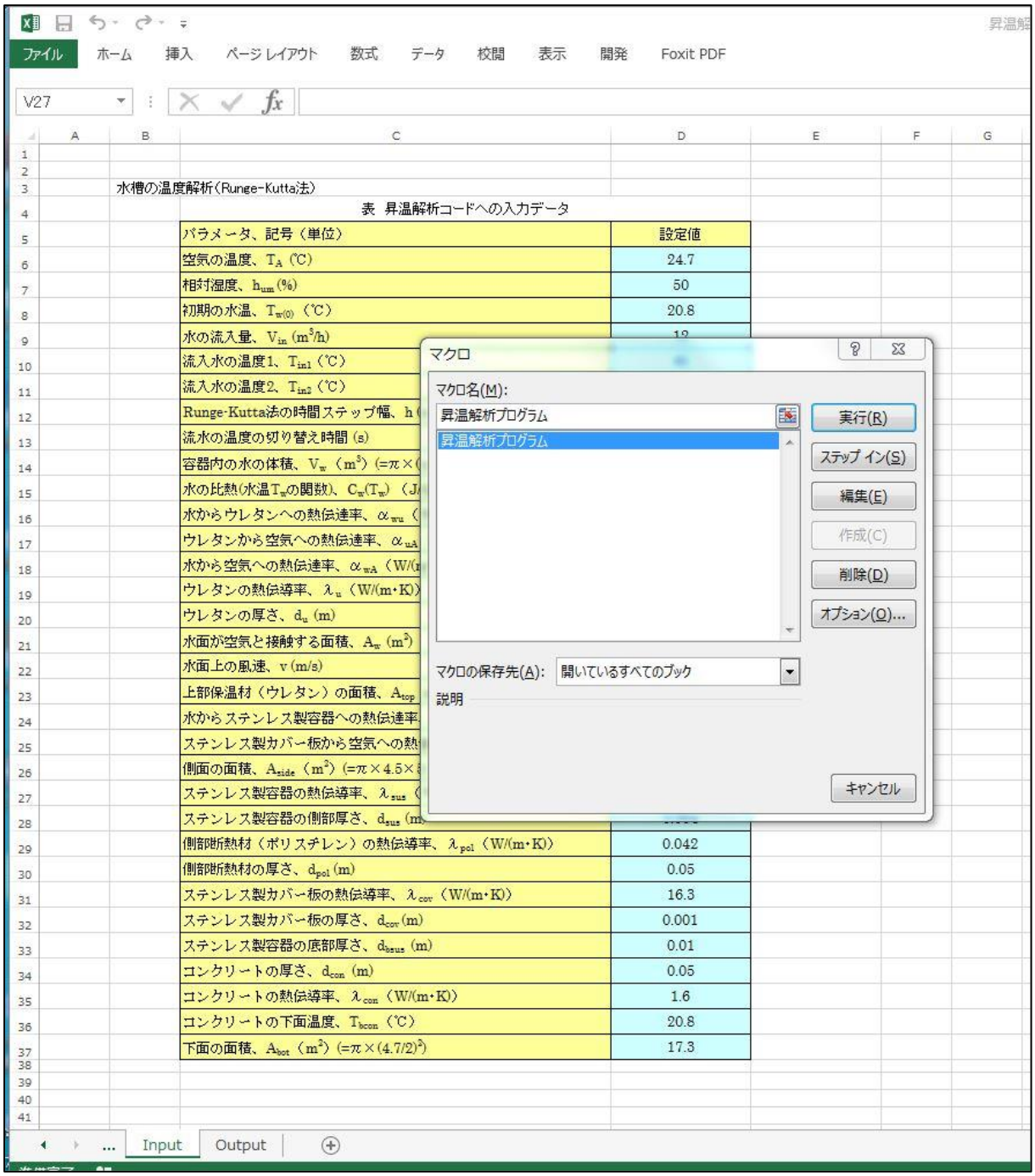

添付図 1-5　底面からの放熱モード

水槽の温度解析（Runge-Kutta法）

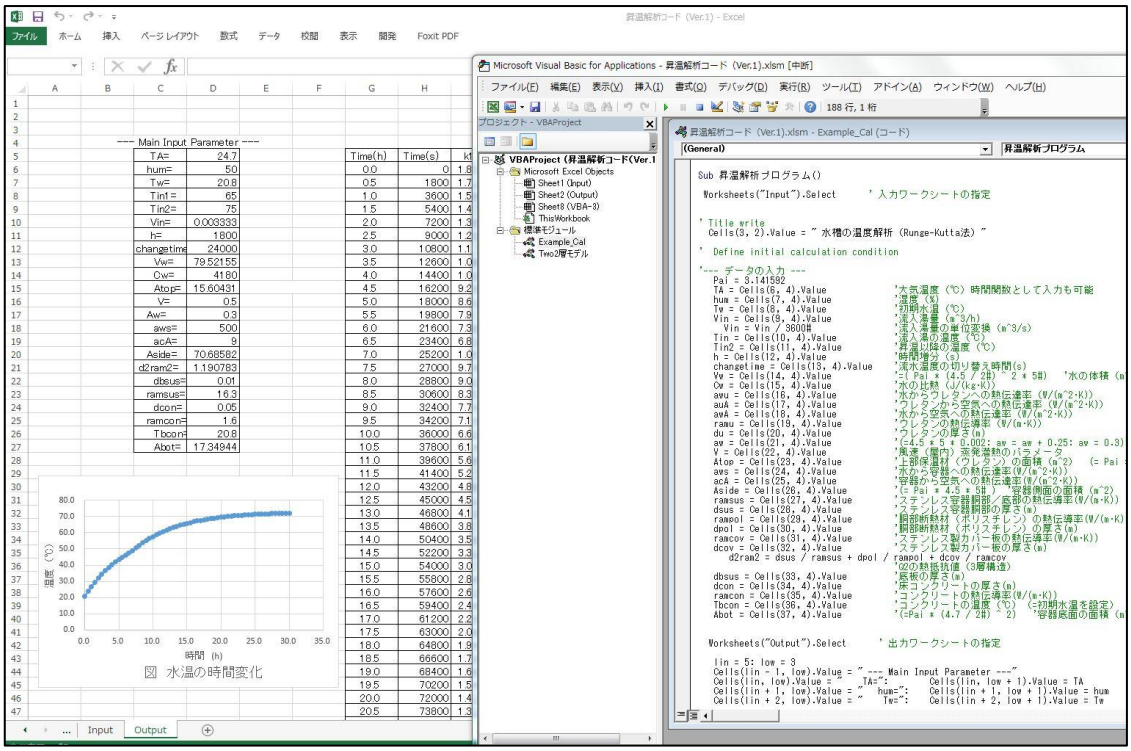
表 昇温解析コードへの入力データ

| パラメータ、記号（単位） | 設定値 |
|---|---|
| 空気の温度、$T_A$ (℃) | 24.7 |
| 相対湿度、$h_{um}$ (%) | 50 |
| 初期の水温、$T_{w(0)}$ (℃) | 20.8 |
| 水の流入量、$V_{in}$ ($m^3$/h) | 12 |
| 流入水の温度1、$T_{in1}$ (℃) | 65 |
| 流入水の温度2、$T_{in2}$ (℃) | 75 |
| Runge-Kutta法の時間ステップ幅、h (s) | 1800 |
| 流水の温度の切り替え時間 (s) | 24000 |
| 容器内の水の体積、$V_w$ ($m^3$) (=π×(4.5/2)$^2$×5) | 79.5 |
| 水の比熱(水温$T_w$の関数)、$C_w(T_w)$ (J/(kg･K)) | 4180 |
| 水からウレタンへの熱伝達率、$\alpha_{wu}$ (W/($m^2$･K)) | 500 |
| ウレタンから空気への熱伝達率、$\alpha_{uA}$ (W/($m^2$･K)) | 9 |
| 水から空気への熱伝達率、$\alpha_{wA}$ (W/($m^2$･K)) | 9 |
| ウレタンの熱伝導率、$\lambda_u$ (W/(m･K)) | 0.03 |
| ウレタンの厚さ、$d_u$ (m) | 0.05 |
| 水面が空気と接触する面積、$A_w$ ($m^2$) | 0.3 |
| 水面上の風速、v (m/s) | 0.5 |
| 上部保温材（ウレタン）の面積、$A_{top}$ ($m^2$) (=π×(4.5/2)$^2$- Aw) | 15.6 |
| 水からステンレス製容器への熱伝達率、$\alpha_{ws}$ (W/($m^2$･K)) | 500 |
| ステンレス製カバー板から空気への熱伝達率、$\alpha_{cA}$ (W/($m^2$･K)) | 9 |
| 側面の面積、$A_{side}$ ($m^2$) (=π×4.5×5) | 70.7 |
| ステンレス製容器の熱伝導率、$\lambda_{sus}$ (W/(m･K)) | 16.3 |
| ステンレス製容器の側部厚さ、$d_{sus}$ (m) | 0.004 |
| 側部断熱材（ポリスチレン）の熱伝導率、$\lambda_{pol}$ (W/(m･K)) | 0.042 |
| 側部断熱材の厚さ、$d_{pol}$ (m) | 0.05 |
| ステンレス製カバー板の熱伝導率、$\lambda_{cov}$ (W/(m･K)) | 16.3 |
| ステンレス製カバー板の厚さ、$d_{cov}$ (m) | 0.001 |
| ステンレス製容器の底部厚さ、$d_{bsus}$ (m) | 0.01 |
| コンクリートの厚さ、$d_{con}$ (m) | 0.05 |
| コンクリートの熱伝導率、$\lambda_{con}$ (W/(m･K)) | 1.6 |
| コンクリートの下面温度、$T_{bcon}$ (℃) | 20.8 |
| 下面の面積、$A_{bot}$ ($m^2$) (=π×(4.7/2)$^2$) | 17.3 |

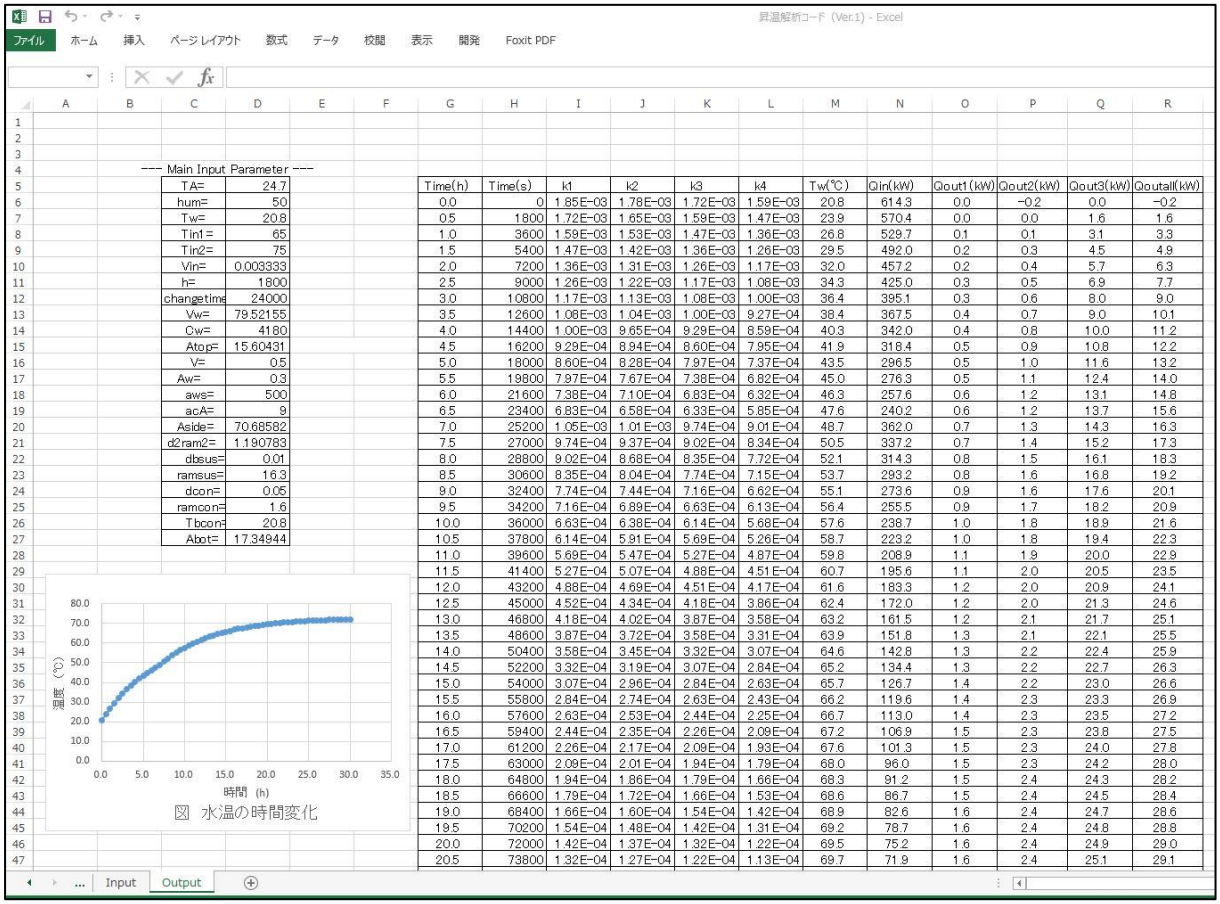
添付図 1-6 「Input」シート上の入力データ画面




添付図 1-7　「Alt」＋「F8」キー入力後の VBA 実行画面




添付図 1-8　VBA 実行終了時の画面（VBA エディターが表示される）




添付図 1-9　「Output」シートに結果と図を出力

# 添付 2「ロボット試験用水槽の降温挙動解析コード(Ver.1)の使用マニュアル」

## １．解析コードの概要

本解析コードはロボット試験用水槽の降温挙動を解析する目的で、利便性を考慮して Excel-VBA 上に作成している。利用に当たっては、Excel のワークシート（Input）の表中の数値を設定することにより、温度挙動が簡便に解析できる。

### (1)　解析モデル

添付図 2-1 に解析モデルの概要を示す。水槽の上面、側面、底面からの放熱を考慮する。

・上面からの放熱

蒸発による放熱と空気への熱伝達による放熱の二つのモードを考慮する。（添付図 2-2）

・側面からの放熱

空気への熱伝達による放熱モードを考慮する。（添付図 2-3）

・底面からの放熱

一定温度のコンクリートへの放熱モードを考慮する。（添付図 2-4）

### (2)　解析方法

・微分方程式は、Runge-Kutta 法により増分 h（s）で逐次解析を行うことにより解く。

・温度の関数として、水の密度（ρ）、蒸発潜熱（r）の温度依存性（0℃～100℃）が考慮できる。

$$\rho(T_w) = -0.0036{T_w}^2 - 0.0701T_w + 1000.5$$
$$\mathrm{r}(T_w) = -2.437T_w + 2502.6$$

（$t_w$：水温　（0℃<$t_w$<100℃））

## ２．入力データ

・解析に用いる入力データの一覧を添付表 2-1 に示す。

## ３．使用方法

本コードの利用方法は以下の手順である。

(1)【降温解析コード】のエクセルファイルをマクロ実行可能な状態で開く。

(2)「Input」シートの設定値欄に設定値を入力する。（添付図 2-5 参照）

(3)「Alt」＋「F8」キーを入力すると VBA の実行画面（添付図 2-6 参照）が表示されるので、実行ボタンを押す。

(4)　実行完了とともに、「Output」シートとともに VBA エディターが表示される（添付図 2-7 参照）ので、エディターを閉じる。

(5)「Output」シートの結果ファイル（添付図 2-8）を適時用意したエクセルシートにコピーして結果を検討する。なお、「Output」シートファイルはそのまま残しておく。（次の解析結果により逐次上書きされる。）

## ４．解析例

添付表 2-1 に示すサンプルデータによる解析結果を添付表 2-2(1)及び(2)に示す。サンプル解析は、60℃の温水をそのまま（上部の断熱材を設置したまま）放熱した場合である。
主要なインプットパラメータのリストが「Output」シートの左側に出力される。（添付表 2-2(1)参照）また、右側に時間、温度、放熱熱量などが出力される。（添付表 2-2(2)参照）

添付表 2-1　降温挙動解析コードへの入力データ一覧表

| パラメータ、記号 | 設定値 |
|---|---|
| 初期の水温、$T_{w(0)}$（℃） | 60.0 |
| 空気の温度、$T_A$（℃） | 24.7 |
| 容器内の水の体積、$V_w$ （$m^3$）(=π×(4.5/2)$^2$×5) | 79.52 |
| 水の比熱(水温 $T_w$ の関数)、$C_w(T_w)$（J/(kg･K)） | 4180.0 |
| 水からウレタンへの熱伝達率、$\alpha_{wu}$（W/($m^2$･K)） | 500.0 |
| ウレタンから空気への熱伝達率、$\alpha_{uA}$（W/($m^2$･K)） | 9.0 |
| 水から空気への熱伝達率、$\alpha_{wA}$（W/($m^2$･K)） | 9.0 |
| 水からステンレス製容器への熱伝達率、$\alpha_{ws}$（W/($m^2$･K)） | 500.0 |
| ステンレス製カバー板から空気への熱伝達率、$\alpha_{cA}$（W/($m^2$･K)） | 9.0 |
| コンクリートの下面温度、$T_{bcon}$（℃） | 20.8 |
| ウレタンの熱伝導率、$\lambda_u$（W/(m･K)） | 0.03 |
| ステンレス製容器の熱伝導率、$\lambda_{sus}$（W/(m･K)） | 16.3 |
| 側部断熱材（ポリスチレン）の熱伝導率、$\lambda_{pol}$（W/(m･K)） | 0.042 |
| ステンレス製カバー板の熱伝導率、$\lambda_{cov}$（W/(m･K)） | 16.3 |
| コンクリートの熱伝導率、$\lambda_{con}$ W/(m･K)） | 1.6 |
| ウレタンの厚さ、$d_u$（m） | $5.0\times10^{-2}$ |
| ステンレス製容器の側部厚さ、$d_{sus}$（m） | $4.0\times10^{-3}$ |
| 側部断熱材の厚さ、$d_{pol}$（m） | $5.0\times10^{-2}$ |
| ステンレス製カバー板の厚さ、$d_{cov}$（m） | $1.0\times10^{-3}$ |
| ステンレス製容器の底部厚さ、$d_{bsus}$（m） | $1.0\times10^{-2}$ |
| コンクリートの厚さ、$d_{con}$（m） | $5.0\times10^{-2}$ |
| 上部保温材（ウレタン）の面積、$A_{top}$（$m^2$）(=π×(4.5/2)$^2$－Aw) | 15.9 |
| 水面が空気と接する面積、$A_w$（$m^2$） | 0.3 |
| 側面の面積、$A_{side}$（$m^2$）(=π×4.5×5) | 70.69 |
| 下面の面積、$A_{bot}$（$m^2$）(=π×(4.7/2)$^2$) | 17.35 |
| 水面上の風速、v（m/s） | 0.5 |
| 相対湿度、$h_{um}$（%） | 50.0 |
| Runge-Kutta 法の時間ステップ幅、h（s） | 1800.0 |

添付表 2-2(1) サンプルデータによる解析結果（入力条件の出力）

| --- Main Input Parameter --- | |
|---|---|
| TA= | 24.7 |
| hum= | 50 |
| Tw= | 60 |
| h= | 1800 |
| Vw= | 79.5 |
| Cw= | 4180 |
| Atop= | 15.6 |
| V= | 0.5 |
| Aw= | 0.3 |
| aws= | 500 |
| acA= | 9 |
| Aside= | 70.7 |
| d2ram2= | 1.2 |
| dbsus= | 0.01 |
| ramsus= | 16.3 |
| dcon= | 0.05 |
| ramcon= | 1.6 |
| Tbcon= | 20.8 |
| Abot= | 17.3 |

添付表 2-2(2) サンプルデータによる解析結果（計算結果の出力）　(1/3)

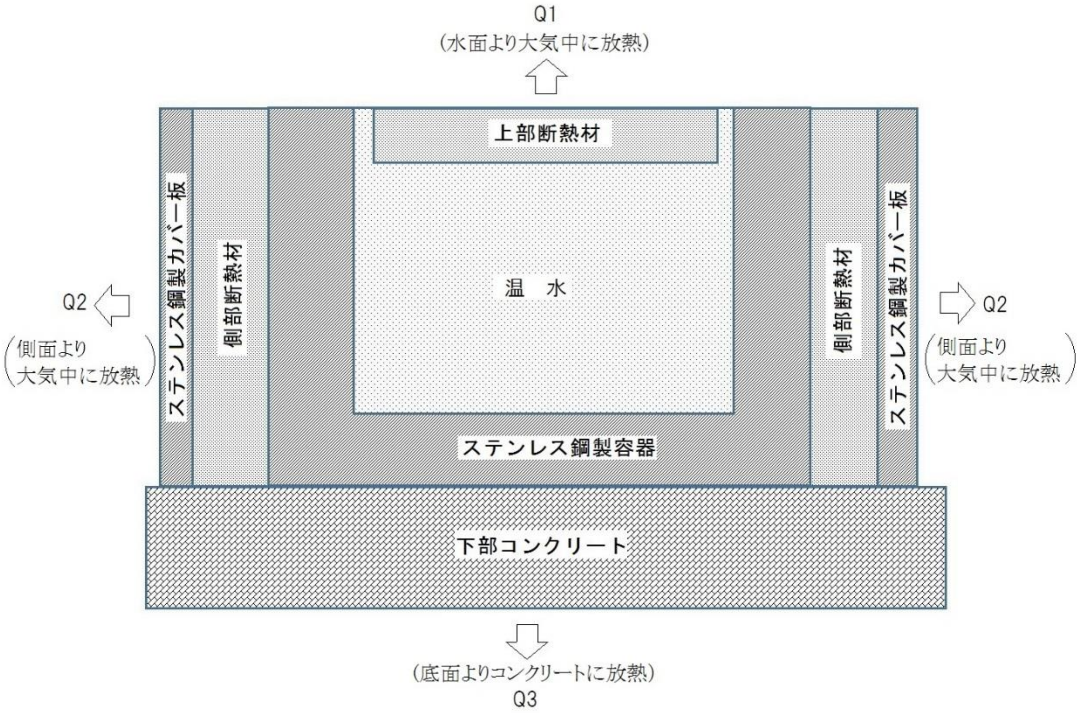
| Time(h) | Time(s) | k1 | k2 | k3 | k4 | Tw(℃) | Qout1(kW) | Qout2(kW) | Qout3(kW) | Qoutall(kW) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0.0 | 0 | -7.06E-05 | -7.06E-05 | -7.06E-05 | -7.06E-05 | 60.0 | 1.09 | 1.91 | 20.08 | 23.09 |
| 0.5 | 1800 | -7.04E-05 | -7.04E-05 | -7.04E-05 | -7.04E-05 | 59.9 | 1.09 | 1.91 | 20.02 | 23.01 |
| 1.0 | 3600 | -7.02E-05 | -7.02E-05 | -7.02E-05 | -7.02E-05 | 59.7 | 1.08 | 1.90 | 19.95 | 22.94 |
| 1.5 | 5400 | -6.99E-05 | -6.99E-05 | -6.99E-05 | -6.99E-05 | 59.6 | 1.08 | 1.89 | 19.89 | 22.86 |
| 2.0 | 7200 | -6.97E-05 | -6.97E-05 | -6.97E-05 | -6.97E-05 | 59.5 | 1.07 | 1.89 | 19.82 | 22.78 |
| 2.5 | 9000 | -6.94E-05 | -6.94E-05 | -6.94E-05 | -6.94E-05 | 59.4 | 1.07 | 1.88 | 19.76 | 22.71 |
| 3.0 | 10800 | -6.92E-05 | -6.92E-05 | -6.92E-05 | -6.92E-05 | 59.2 | 1.06 | 1.87 | 19.70 | 22.63 |
| 3.5 | 12600 | -6.90E-05 | -6.90E-05 | -6.90E-05 | -6.90E-05 | 59.1 | 1.05 | 1.87 | 19.63 | 22.55 |
| 4.0 | 14400 | -6.87E-05 | -6.87E-05 | -6.87E-05 | -6.87E-05 | 59.0 | 1.05 | 1.86 | 19.57 | 22.48 |
| 4.5 | 16200 | -6.85E-05 | -6.85E-05 | -6.85E-05 | -6.85E-05 | 58.9 | 1.04 | 1.85 | 19.51 | 22.40 |
| 5.0 | 18000 | -6.83E-05 | -6.83E-05 | -6.83E-05 | -6.83E-05 | 58.7 | 1.04 | 1.85 | 19.44 | 22.33 |
| 5.5 | 19800 | -6.80E-05 | -6.80E-05 | -6.80E-05 | -6.80E-05 | 58.6 | 1.03 | 1.84 | 19.38 | 22.25 |
| 6.0 | 21600 | -6.78E-05 | -6.78E-05 | -6.78E-05 | -6.78E-05 | 58.5 | 1.03 | 1.83 | 19.32 | 22.18 |
| 6.5 | 23400 | -6.76E-05 | -6.76E-05 | -6.76E-05 | -6.76E-05 | 58.4 | 1.02 | 1.83 | 19.25 | 22.10 |
| 7.0 | 25200 | -6.73E-05 | -6.73E-05 | -6.73E-05 | -6.73E-05 | 58.3 | 1.02 | 1.82 | 19.19 | 22.03 |
| 7.5 | 27000 | -6.71E-05 | -6.71E-05 | -6.71E-05 | -6.71E-05 | 58.1 | 1.01 | 1.81 | 19.13 | 21.95 |
| 8.0 | 28800 | -6.69E-05 | -6.69E-05 | -6.69E-05 | -6.69E-05 | 58.0 | 1.01 | 1.81 | 19.07 | 21.88 |
| 8.5 | 30600 | -6.66E-05 | -6.66E-05 | -6.66E-05 | -6.66E-05 | 57.9 | 1.00 | 1.80 | 19.01 | 21.81 |
| 9.0 | 32400 | -6.64E-05 | -6.64E-05 | -6.64E-05 | -6.64E-05 | 57.8 | 1.00 | 1.79 | 18.94 | 21.73 |
| 9.5 | 34200 | -6.62E-05 | -6.62E-05 | -6.62E-05 | -6.62E-05 | 57.7 | 0.99 | 1.79 | 18.88 | 21.66 |
| 10.0 | 36000 | -6.60E-05 | -6.60E-05 | -6.60E-05 | -6.60E-05 | 57.5 | 0.99 | 1.78 | 18.82 | 21.59 |
| 10.5 | 37800 | -6.57E-05 | -6.57E-05 | -6.57E-05 | -6.57E-05 | 57.4 | 0.98 | 1.77 | 18.76 | 21.52 |
| 11.0 | 39600 | -6.55E-05 | -6.55E-05 | -6.55E-05 | -6.55E-05 | 57.3 | 0.98 | 1.77 | 18.70 | 21.44 |
| 11.5 | 41400 | -6.53E-05 | -6.53E-05 | -6.53E-05 | -6.53E-05 | 57.2 | 0.97 | 1.76 | 18.64 | 21.37 |
| 12.0 | 43200 | -6.51E-05 | -6.51E-05 | -6.51E-05 | -6.51E-05 | 57.1 | 0.97 | 1.75 | 18.58 | 21.30 |
| 12.5 | 45000 | -6.49E-05 | -6.48E-05 | -6.48E-05 | -6.48E-05 | 56.9 | 0.96 | 1.75 | 18.52 | 21.23 |
| 13.0 | 46800 | -6.46E-05 | -6.46E-05 | -6.46E-05 | -6.46E-05 | 56.8 | 0.96 | 1.74 | 18.46 | 21.16 |
| 13.5 | 48600 | -6.44E-05 | -6.44E-05 | -6.44E-05 | -6.44E-05 | 56.7 | 0.95 | 1.74 | 18.40 | 21.09 |
| 14.0 | 50400 | -6.42E-05 | -6.42E-05 | -6.42E-05 | -6.42E-05 | 56.6 | 0.95 | 1.73 | 18.34 | 21.02 |
| 14.5 | 52200 | -6.40E-05 | -6.40E-05 | -6.40E-05 | -6.40E-05 | 56.5 | 0.94 | 1.72 | 18.28 | 20.95 |
| 15.0 | 54000 | -6.38E-05 | -6.38E-05 | -6.38E-05 | -6.37E-05 | 56.4 | 0.94 | 1.72 | 18.22 | 20.88 |
| 15.5 | 55800 | -6.35E-05 | -6.35E-05 | -6.35E-05 | -6.35E-05 | 56.3 | 0.93 | 1.71 | 18.16 | 20.81 |
| 16.0 | 57600 | -6.33E-05 | -6.33E-05 | -6.33E-05 | -6.33E-05 | 56.1 | 0.93 | 1.70 | 18.11 | 20.74 |
| 16.5 | 59400 | -6.31E-05 | -6.31E-05 | -6.31E-05 | -6.31E-05 | 56.0 | 0.92 | 1.70 | 18.05 | 20.67 |
| 17.0 | 61200 | -6.29E-05 | -6.29E-05 | -6.29E-05 | -6.29E-05 | 55.9 | 0.92 | 1.69 | 17.99 | 20.60 |
| 17.5 | 63000 | -6.27E-05 | -6.27E-05 | -6.27E-05 | -6.27E-05 | 55.8 | 0.91 | 1.69 | 17.93 | 20.53 |

添付表 2-2(2) サンプルデータによる解析結果（計算結果の出力）　(2/3)

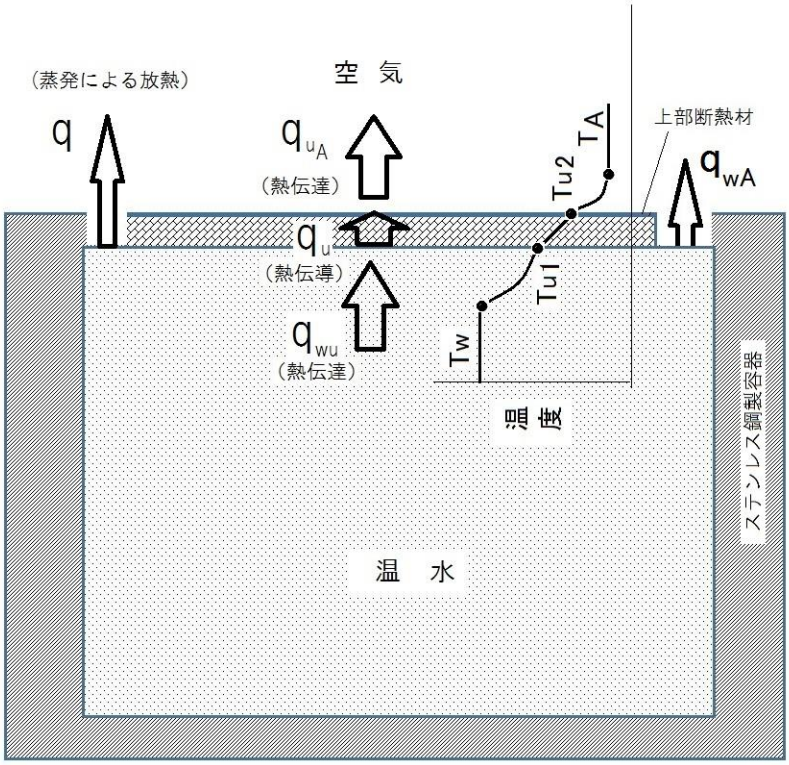
| | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 18.0 | 64800 | -6.25E-05 | -6.25E-05 | -6.25E-05 | -6.25E-05 | 55.7 | 0.91 | 1.68 | 17.87 | 20.46 |
| 18.5 | 66600 | -6.23E-05 | -6.23E-05 | -6.23E-05 | -6.23E-05 | 55.6 | 0.91 | 1.67 | 17.82 | 20.39 |
| 19.0 | 68400 | -6.20E-05 | -6.20E-05 | -6.20E-05 | -6.20E-05 | 55.5 | 0.90 | 1.67 | 17.76 | 20.33 |
| 19.5 | 70200 | -6.18E-05 | -6.18E-05 | -6.18E-05 | -6.18E-05 | 55.3 | 0.90 | 1.66 | 17.70 | 20.26 |
| 20.0 | 72000 | -6.16E-05 | -6.16E-05 | -6.16E-05 | -6.16E-05 | 55.2 | 0.89 | 1.66 | 17.64 | 20.19 |
| 20.5 | 73800 | -6.14E-05 | -6.14E-05 | -6.14E-05 | -6.14E-05 | 55.1 | 0.89 | 1.65 | 17.59 | 20.12 |
| 21.0 | 75600 | -6.12E-05 | -6.12E-05 | -6.12E-05 | -6.12E-05 | 55.0 | 0.88 | 1.64 | 17.53 | 20.06 |
| 21.5 | 77400 | -6.10E-05 | -6.10E-05 | -6.10E-05 | -6.10E-05 | 54.9 | 0.88 | 1.64 | 17.47 | 19.99 |
| 22.0 | 79200 | -6.08E-05 | -6.08E-05 | -6.08E-05 | -6.08E-05 | 54.8 | 0.87 | 1.63 | 17.42 | 19.92 |
| 22.5 | 81000 | -6.06E-05 | -6.06E-05 | -6.06E-05 | -6.06E-05 | 54.7 | 0.87 | 1.63 | 17.36 | 19.86 |
| 23.0 | 82800 | -6.04E-05 | -6.04E-05 | -6.04E-05 | -6.04E-05 | 54.6 | 0.87 | 1.62 | 17.31 | 19.79 |
| 23.5 | 84600 | -6.02E-05 | -6.02E-05 | -6.02E-05 | -6.02E-05 | 54.5 | 0.86 | 1.61 | 17.25 | 19.73 |
| 24.0 | 86400 | -6.00E-05 | -6.00E-05 | -6.00E-05 | -6.00E-05 | 54.4 | 0.86 | 1.61 | 17.19 | 19.66 |
| 24.5 | 88200 | -5.98E-05 | -5.98E-05 | -5.98E-05 | -5.98E-05 | 54.3 | 0.85 | 1.60 | 17.14 | 19.59 |
| 25.0 | 90000 | -5.96E-05 | -5.96E-05 | -5.96E-05 | -5.96E-05 | 54.1 | 0.85 | 1.60 | 17.08 | 19.53 |
| 25.5 | 91800 | -5.94E-05 | -5.94E-05 | -5.94E-05 | -5.94E-05 | 54.0 | 0.85 | 1.59 | 17.03 | 19.46 |
| 26.0 | 93600 | -5.92E-05 | -5.92E-05 | -5.92E-05 | -5.92E-05 | 53.9 | 0.84 | 1.58 | 16.97 | 19.40 |
| 26.5 | 95400 | -5.90E-05 | -5.90E-05 | -5.90E-05 | -5.90E-05 | 53.8 | 0.84 | 1.58 | 16.92 | 19.34 |
| 27.0 | 97200 | -5.88E-05 | -5.88E-05 | -5.88E-05 | -5.88E-05 | 53.7 | 0.83 | 1.57 | 16.87 | 19.27 |
| 27.5 | 99000 | -5.86E-05 | -5.86E-05 | -5.86E-05 | -5.86E-05 | 53.6 | 0.83 | 1.57 | 16.81 | 19.21 |
| 28.0 | 100800 | -5.84E-05 | -5.84E-05 | -5.84E-05 | -5.84E-05 | 53.5 | 0.82 | 1.56 | 16.76 | 19.14 |
| 28.5 | 102600 | -5.82E-05 | -5.82E-05 | -5.82E-05 | -5.82E-05 | 53.4 | 0.82 | 1.56 | 16.70 | 19.08 |
| 29.0 | 104400 | -5.80E-05 | -5.80E-05 | -5.80E-05 | -5.80E-05 | 53.3 | 0.82 | 1.55 | 16.65 | 19.02 |
| 29.5 | 106200 | -5.78E-05 | -5.78E-05 | -5.78E-05 | -5.78E-05 | 53.2 | 0.81 | 1.54 | 16.60 | 18.95 |
| 30.0 | 108000 | -5.76E-05 | -5.76E-05 | -5.76E-05 | -5.76E-05 | 53.1 | 0.81 | 1.54 | 16.54 | 18.89 |
| 30.5 | 109800 | -5.74E-05 | -5.74E-05 | -5.74E-05 | -5.74E-05 | 53.0 | 0.81 | 1.53 | 16.49 | 18.83 |
| 31.0 | 111600 | -5.72E-05 | -5.72E-05 | -5.72E-05 | -5.72E-05 | 52.9 | 0.80 | 1.53 | 16.44 | 18.77 |
| 31.5 | 113400 | -5.70E-05 | -5.70E-05 | -5.70E-05 | -5.70E-05 | 52.8 | 0.80 | 1.52 | 16.38 | 18.70 |
| 32.0 | 115200 | -5.68E-05 | -5.68E-05 | -5.68E-05 | -5.68E-05 | 52.7 | 0.79 | 1.52 | 16.33 | 18.64 |

添付表 2-2(2) サンプルデータによる解析結果（計算結果の出力）　(3/3)

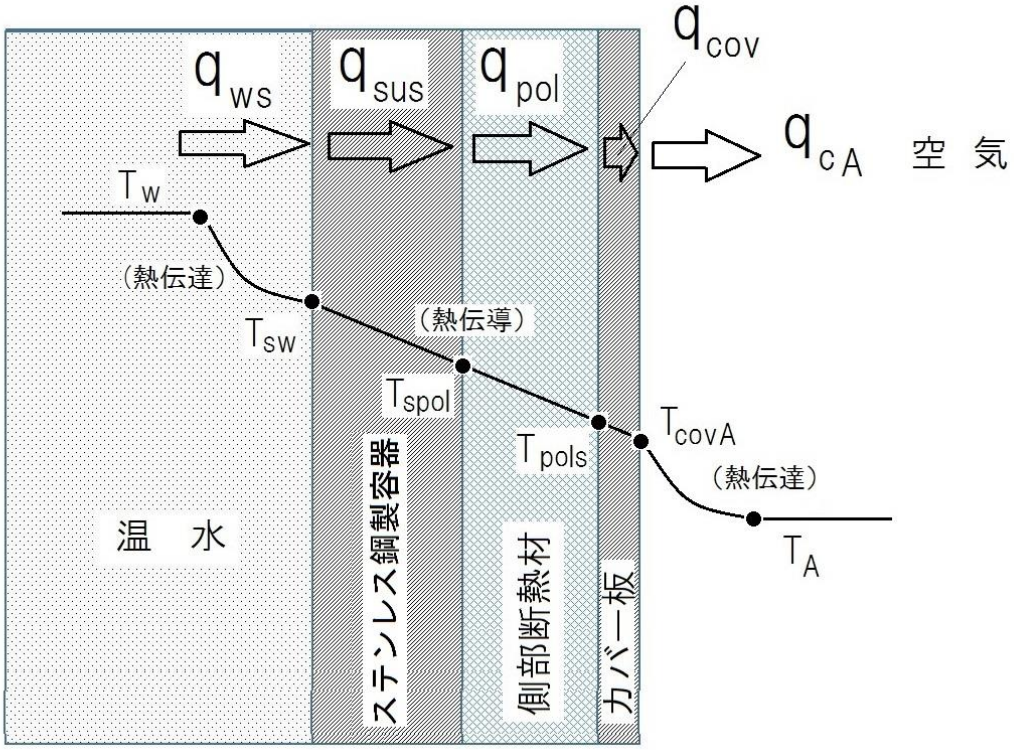
| | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 225.0 | 810000 | -1.61E-05 | -1.61E-05 | -1.61E-05 | -1.61E-05 | 30.3 | 0.17 | 0.30 | 4.86 | 5.34 |
| 225.5 | 811800 | -1.61E-05 | -1.61E-05 | -1.61E-05 | -1.61E-05 | 30.3 | 0.17 | 0.30 | 4.85 | 5.32 |
| 226.0 | 813600 | -1.60E-05 | -1.60E-05 | -1.60E-05 | -1.60E-05 | 30.2 | 0.17 | 0.30 | 4.83 | 5.30 |
| 226.5 | 815400 | -1.60E-05 | -1.60E-05 | -1.60E-05 | -1.60E-05 | 30.2 | 0.17 | 0.30 | 4.82 | 5.28 |
| 227.0 | 817200 | -1.59E-05 | -1.59E-05 | -1.59E-05 | -1.59E-05 | 30.2 | 0.17 | 0.30 | 4.80 | 5.27 |
| 227.5 | 819000 | -1.59E-05 | -1.59E-05 | -1.59E-05 | -1.59E-05 | 30.1 | 0.17 | 0.30 | 4.79 | 5.25 |
| 228.0 | 820800 | -1.58E-05 | -1.58E-05 | -1.58E-05 | -1.58E-05 | 30.1 | 0.17 | 0.29 | 4.77 | 5.23 |
| 228.5 | 822600 | -1.58E-05 | -1.58E-05 | -1.58E-05 | -1.58E-05 | 30.1 | 0.17 | 0.29 | 4.76 | 5.22 |
| 229.0 | 824400 | -1.57E-05 | -1.57E-05 | -1.57E-05 | -1.57E-05 | 30.1 | 0.17 | 0.29 | 4.74 | 5.20 |
| 229.5 | 826200 | -1.57E-05 | -1.57E-05 | -1.57E-05 | -1.57E-05 | 30.0 | 0.17 | 0.29 | 4.73 | 5.18 |
| 230.0 | 828000 | -1.56E-05 | -1.56E-05 | -1.56E-05 | -1.56E-05 | 30.0 | 0.16 | 0.29 | 4.72 | 5.17 |
| 230.5 | 829800 | -1.56E-05 | -1.56E-05 | -1.56E-05 | -1.56E-05 | 30.0 | 0.16 | 0.29 | 4.70 | 5.15 |
| 231.0 | 831600 | -1.55E-05 | -1.55E-05 | -1.55E-05 | -1.55E-05 | 29.9 | 0.16 | 0.28 | 4.69 | 5.13 |
| 231.5 | 833400 | -1.55E-05 | -1.55E-05 | -1.55E-05 | -1.55E-05 | 29.9 | 0.16 | 0.28 | 4.67 | 5.12 |
| 232.0 | 835200 | -1.54E-05 | -1.54E-05 | -1.54E-05 | -1.54E-05 | 29.9 | 0.16 | 0.28 | 4.66 | 5.10 |
| 232.5 | 837000 | -1.54E-05 | -1.54E-05 | -1.54E-05 | -1.54E-05 | 29.9 | 0.16 | 0.28 | 4.64 | 5.09 |
| 233.0 | 838800 | -1.53E-05 | -1.53E-05 | -1.53E-05 | -1.53E-05 | 29.8 | 0.16 | 0.28 | 4.63 | 5.07 |
| 233.5 | 840600 | -1.53E-05 | -1.53E-05 | -1.53E-05 | -1.53E-05 | 29.8 | 0.16 | 0.28 | 4.62 | 5.05 |
| 234.0 | 842400 | -1.52E-05 | -1.52E-05 | -1.52E-05 | -1.52E-05 | 29.8 | 0.16 | 0.28 | 4.60 | 5.04 |
| 234.5 | 844200 | -1.52E-05 | -1.52E-05 | -1.52E-05 | -1.52E-05 | 29.8 | 0.16 | 0.27 | 4.59 | 5.02 |
| 235.0 | 846000 | -1.51E-05 | -1.51E-05 | -1.51E-05 | -1.51E-05 | 29.7 | 0.16 | 0.27 | 4.57 | 5.00 |
| 235.5 | 847800 | -1.51E-05 | -1.51E-05 | -1.51E-05 | -1.51E-05 | 29.7 | 0.16 | 0.27 | 4.56 | 4.99 |
| 236.0 | 849600 | -1.50E-05 | -1.50E-05 | -1.50E-05 | -1.50E-05 | 29.7 | 0.16 | 0.27 | 4.55 | 4.97 |
| 236.5 | 851400 | -1.50E-05 | -1.50E-05 | -1.50E-05 | -1.50E-05 | 29.6 | 0.16 | 0.27 | 4.53 | 4.96 |
| 237.0 | 853200 | -1.49E-05 | -1.49E-05 | -1.49E-05 | -1.49E-05 | 29.6 | 0.16 | 0.27 | 4.52 | 4.94 |
| 237.5 | 855000 | -1.49E-05 | -1.49E-05 | -1.49E-05 | -1.49E-05 | 29.6 | 0.16 | 0.27 | 4.50 | 4.93 |
| 238.0 | 856800 | -1.48E-05 | -1.48E-05 | -1.48E-05 | -1.48E-05 | 29.6 | 0.16 | 0.26 | 4.49 | 4.91 |
| 238.5 | 858600 | -1.48E-05 | -1.48E-05 | -1.48E-05 | -1.48E-05 | 29.5 | 0.16 | 0.26 | 4.48 | 4.89 |
| 239.0 | 860400 | -1.47E-05 | -1.47E-05 | -1.47E-05 | -1.47E-05 | 29.5 | 0.15 | 0.26 | 4.46 | 4.88 |
| 239.5 | 862200 | -1.47E-05 | -1.47E-05 | -1.47E-05 | -1.47E-05 | 29.5 | 0.15 | 0.26 | 4.45 | 4.86 |
| 240.0 | 864000 | -1.47E-05 | -1.47E-05 | -1.47E-05 | -1.47E-05 | 29.5 | 0.15 | 0.26 | 4.44 | 4.85 |



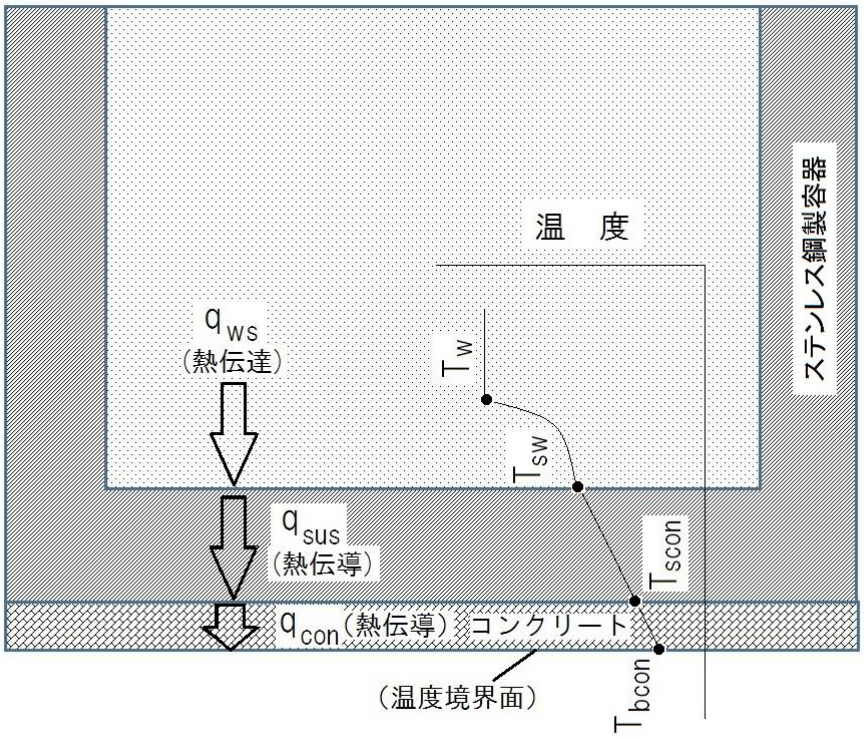

添付図 2-1　解析モデルの概要




添付図 2-2　上面からの放熱モード




添付図 2-3　側面からの放熱モード



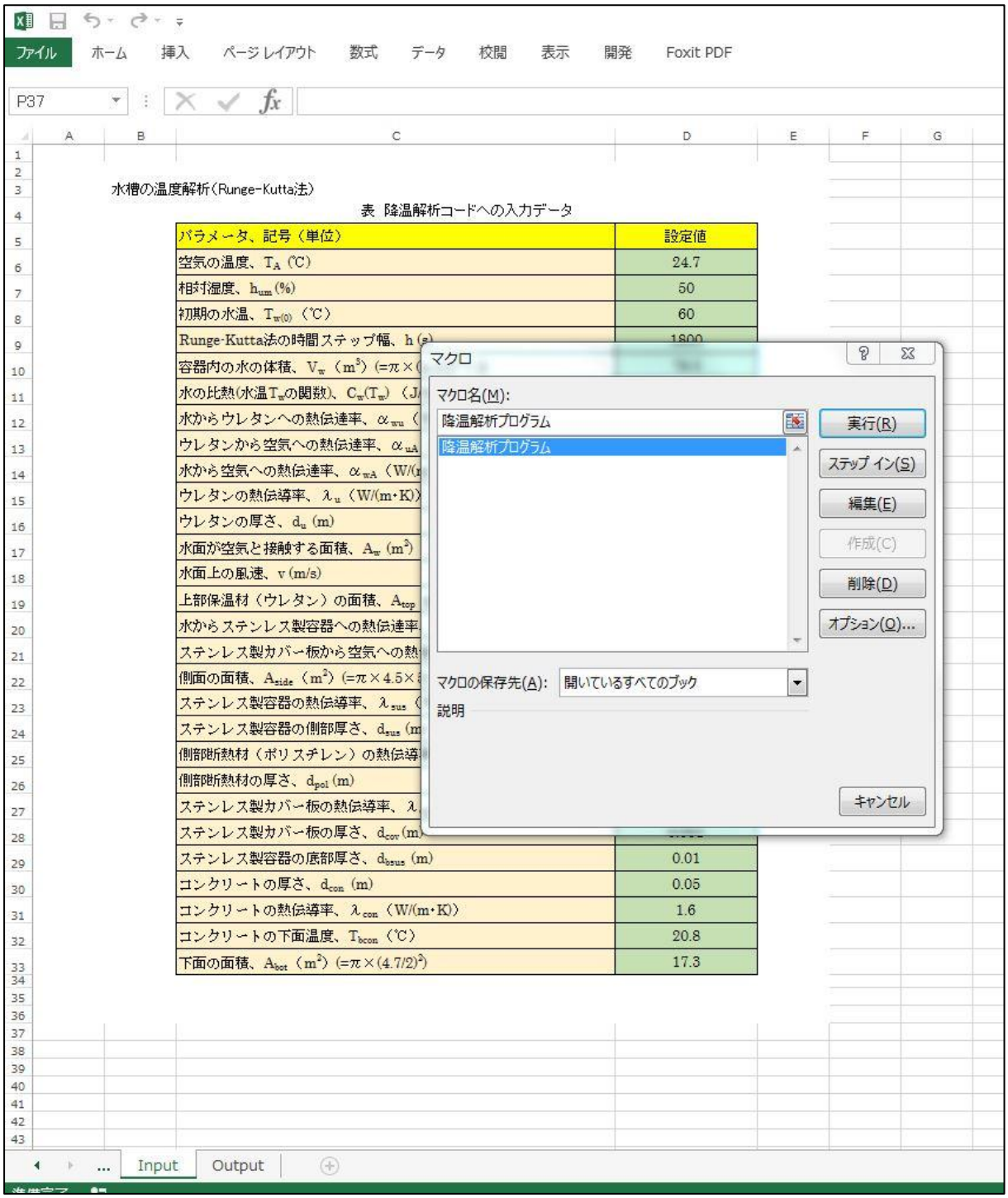

添付図 2-4　底面からの放熱モード

水槽の温度解析（Runge-Kutta法）

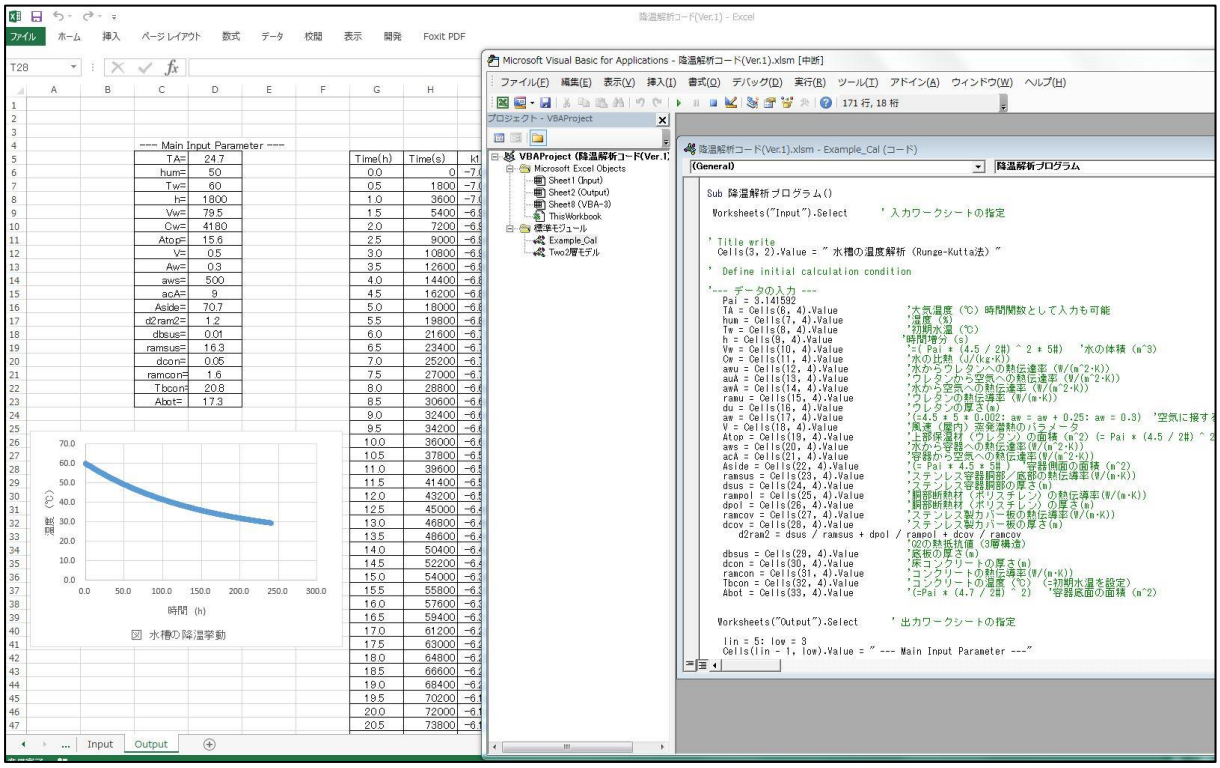
表 降温解析コードへの入力データ

| パラメータ、記号（単位） | 設定値 |
|---|---|
| 空気の温度、$T_A$ (℃) | 24.7 |
| 相対湿度、$h_{um}$ (%) | 50 |
| 初期の水温、$T_{w(0)}$ (℃) | 60 |
| Runge-Kutta法の時間ステップ幅、h (s) | 1800 |
| 容器内の水の体積、$V_w$ ($m^3$) ($=\pi\times(4.5/2)^2\times5$) | 79.5 |
| 水の比熱(水温$T_w$の関数)、$C_w(T_w)$ (J/(kg･K)) | 4180 |
| 水からウレタンへの熱伝達率、$\alpha_{wu}$ (W/($m^2$･K)) | 500 |
| ウレタンから空気への熱伝達率、$\alpha_{uA}$ (W/($m^2$･K)) | 9 |
| 水から空気への熱伝達率、$\alpha_{wA}$ (W/($m^2$･K)) | 9 |
| ウレタンの熱伝導率、$\lambda_u$ (W/(m･K)) | 0.03 |
| ウレタンの厚さ、$d_u$ (m) | 0.05 |
| 水面が空気と接触する面積、$A_w$ ($m^2$) | 0.3 |
| 水面上の風速、v (m/s) | 0.5 |
| 上部保温材（ウレタン）の面積、$A_{top}$ ($m^2$) ($=\pi\times(4.5/2)^2$-Aw) | 15.6 |
| 水からステンレス製容器への熱伝達率、$\alpha_{ws}$ (W/($m^2$･K)) | 500 |
| ステンレス製カバー板から空気への熱伝達率、$\alpha_{cA}$ (W/($m^2$･K)) | 9 |
| 側面の面積、$A_{side}$ ($m^2$) ($=\pi\times4.5\times5$) | 70.7 |
| ステンレス製容器の熱伝導率、$\lambda_{sus}$ (W/(m･K)) | 16.3 |
| ステンレス製容器の側部厚さ、$d_{sus}$ (m) | 0.004 |
| 側部断熱材（ポリスチレン）の熱伝導率、$\lambda_{pol}$ (W/(m･K)) | 0.042 |
| 側部断熱材の厚さ、$d_{pol}$ (m) | 0.05 |
| ステンレス製カバー板の熱伝導率、$\lambda_{cov}$ (W/(m･K)) | 16.3 |
| ステンレス製カバー板の厚さ、$d_{cov}$ (m) | 0.001 |
| ステンレス製容器の底部厚さ、$d_{bsus}$ (m) | 0.01 |
| コンクリートの厚さ、$d_{con}$ (m) | 0.05 |
| コンクリートの熱伝導率、$\lambda_{con}$ (W/(m･K)) | 1.6 |
| コンクリートの下面温度、$T_{bcon}$ (℃) | 20.8 |
| 下面の面積、$A_{bot}$ ($m^2$) ($=\pi\times(4.7/2)^2$) | 17.3 |

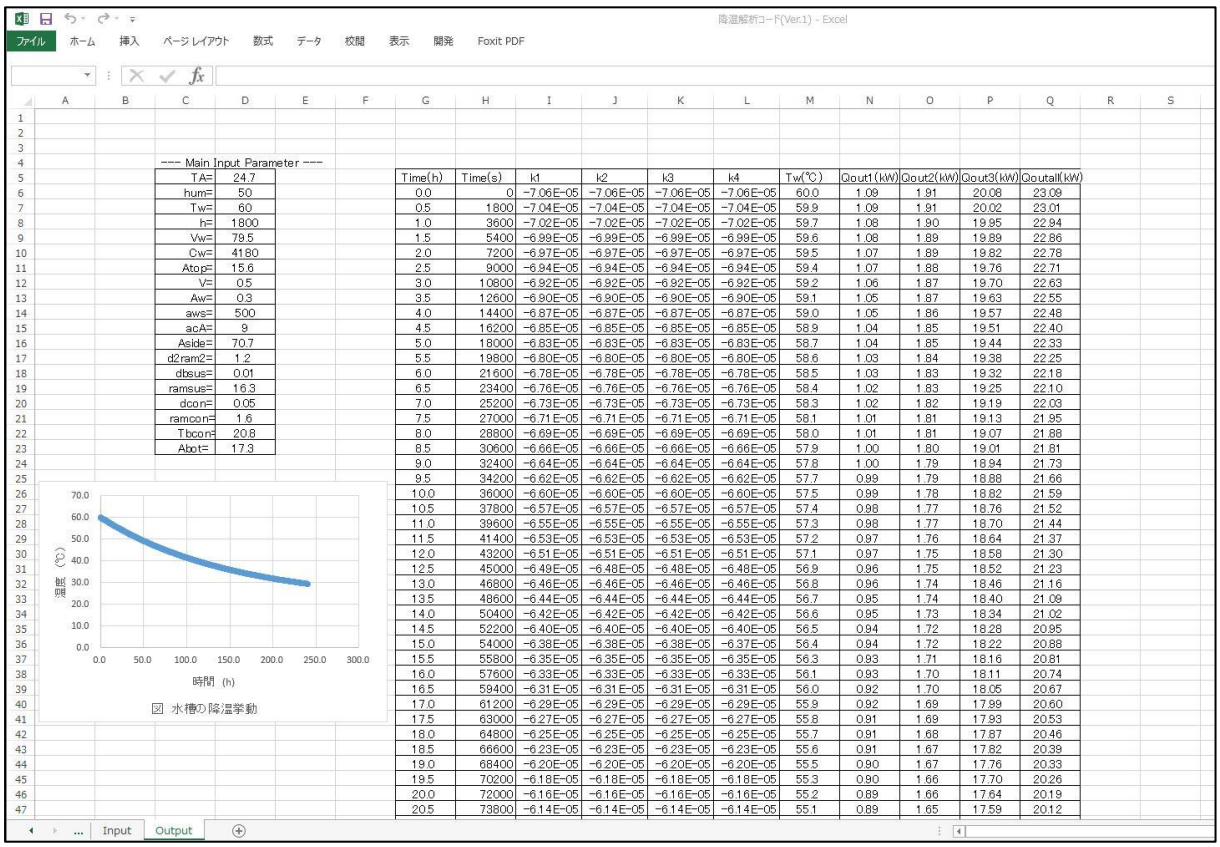
添付図 2-5 「Input」シート上の入力データ画面




添付図 2-6　「Alt」＋「F8」キー入力後の VBA 実行画面




添付図 2-7　VBA 実行終了時の画面（VBA エディターが表示される）




添付図 2-8　「Output」シートに結果と図を出力

This is a blank page.

# 国際単位系（SI）

表１．SI 基本単位

| 基本量 | SI 基本単位 | |
|---|---|---|
| | 名称 | 記号 |
| 長さ | メートル | m |
| 質量 | キログラム | kg |
| 時間 | 秒 | s |
| 電流 | アンペア | A |
| 熱力学温度 | ケルビン | K |
| 物質量 | モル | mol |
| 光度 | カンデラ | cd |

表２．基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

| 組立量 | SI 組立単位 | |
|---|---|---|
| | 名称 | 記号 |
| 面積 | 平方メートル | $m^2$ |
| 体積 | 立方メートル | $m^3$ |
| 速さ，速度 | メートル毎秒 | m/s |
| 加速度 | メートル毎秒毎秒 | $m/s^2$ |
| 波数 | 毎メートル | $m^{-1}$ |
| 密度，質量密度 | キログラム毎立方メートル | $kg/m^3$ |
| 面積密度 | キログラム毎平方メートル | $kg/m^2$ |
| 比体積 | 立方メートル毎キログラム | $m^3/kg$ |
| 電流密度 | アンペア毎平方メートル | $A/m^2$ |
| 磁界の強さ | アンペア毎メートル | A/m |
| 量濃度[a]，濃度 | モル毎立方メートル | $mol/m^3$ |
| 質量濃度 | キログラム毎立方メートル | $kg/m^3$ |
| 輝度 | カンデラ毎平方メートル | $cd/m^2$ |
| 屈折率[b] | （数字の）　1 | 1 |
| 比透磁率[b] | （数字の）　1 | 1 |

(a) 量濃度（amount concentration）は臨床化学の分野では物質濃度（substance concentration）ともよばれる。
(b) これらは無次元量あるいは次元１をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の１は通常は表記しない。

表３．固有の名称と記号で表されるSI組立単位

| 組立量 | SI 組立単位 | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 名称 | 記号 | 他のSI単位による表し方 | SI基本単位による表し方 |
| 平面角 | ラジアン[b] | rad | 1 [b] | m/m |
| 立体角 | ステラジアン[b] | sr[c] | 1 [b] | $m^2/m^2$ |
| 周波数 | ヘルツ[d] | Hz | | $s^{-1}$ |
| 力 | ニュートン | N | | $m\ kg\ s^{-2}$ |
| 圧力，応力 | パスカル | Pa | $N/m^2$ | $m^{-1}\ kg\ s^{-2}$ |
| エネルギー，仕事，熱量 | ジュール | J | N m | $m^2\ kg\ s^{-2}$ |
| 仕事率，工率，放射束 | ワット | W | J/s | $m^2\ kg\ s^{-3}$ |
| 電荷，電気量 | クーロン | C | | s A |
| 電位差（電圧），起電力 | ボルト | V | W/A | $m^2\ kg\ s^{-3}\ A^{-1}$ |
| 静電容量 | ファラド | F | C/V | $m^{-2}\ kg^{-1}\ s^4\ A^2$ |
| 電気抵抗 | オーム | Ω | V/A | $m^2\ kg\ s^{-3}\ A^{-2}$ |
| コンダクタンス | ジーメンス | S | A/V | $m^{-2}\ kg^{-1}\ s^3\ A^2$ |
| 磁束 | ウエーバ | Wb | Vs | $m^2\ kg\ s^{-2}\ A^{-1}$ |
| 磁束密度 | テスラ | T | $Wb/m^2$ | $kg\ s^{-2}\ A^{-1}$ |
| インダクタンス | ヘンリー | H | Wb/A | $m^2\ kg\ s^{-2}\ A^{-2}$ |
| セルシウス温度 | セルシウス度[e] | ℃ | | K |
| 光束 | ルーメン | lm | cd sr[c] | cd |
| 照度 | ルクス | lx | $lm/m^2$ | $m^{-2}\ cd$ |
| 放射性核種の放射能[f] | ベクレル[d] | Bq | | $s^{-1}$ |
| 吸収線量，比エネルギー分与，カーマ | グレイ | Gy | J/kg | $m^2\ s^{-2}$ |
| 線量当量，周辺線量当量，方向性線量当量，個人線量当量 | シーベルト[g] | Sv | J/kg | $m^2\ s^{-2}$ |
| 酸素活性 | カタール | kat | | $s^{-1}\ mol$ |

(a)SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。
(b)ラジアンとステラジアンは数字の１に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の１は明示されない。
(c)測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
(d)ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
(e)セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。
(f)放射性核種の放射能（activity referred to a radionuclide）は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
(g)単位シーベルト（PV,2002,70,205）についてはCIPM勧告2（CI-2002）を参照。

表４．単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

| 組立量 | SI 組立単位 | | |
|---|---|---|---|
| | 名称 | 記号 | SI 基本単位による表し方 |
| 粘度 | パスカル秒 | Pa s | $m^{-1}\ kg\ s^{-1}$ |
| 力のモーメント | ニュートンメートル | N m | $m^2\ kg\ s^{-2}$ |
| 表面張力 | ニュートン毎メートル | N/m | $kg\ s^{-2}$ |
| 角速度 | ラジアン毎秒 | rad/s | $m\ m^{-1}\ s^{-1}=s^{-1}$ |
| 角加速度 | ラジアン毎秒毎秒 | $rad/s^2$ | $m\ m^{-1}\ s^{-2}=s^{-2}$ |
| 熱流密度，放射照度 | ワット毎平方メートル | $W/m^2$ | $kg\ s^{-3}$ |
| 熱容量，エントロピー | ジュール毎ケルビン | J/K | $m^2\ kg\ s^{-2}\ K^{-1}$ |
| 比熱容量，比エントロピー | ジュール毎キログラム毎ケルビン | J/(kg K) | $m^2\ s^{-2}\ K^{-1}$ |
| 比エネルギー | ジュール毎キログラム | J/kg | $m^2\ s^{-2}$ |
| 熱伝導率 | ワット毎メートル毎ケルビン | W/(m K) | $m\ kg\ s^{-3}\ K^{-1}$ |
| 体積エネルギー | ジュール毎立方メートル | $J/m^3$ | $m^{-1}\ kg\ s^{-2}$ |
| 電界の強さ | ボルト毎メートル | V/m | $m\ kg\ s^{-3}\ A^{-1}$ |
| 電荷密度 | クーロン毎立方メートル | $C/m^3$ | $m^{-3}\ s\ A$ |
| 表面電荷 | クーロン毎平方メートル | $C/m^2$ | $m^{-2}\ s\ A$ |
| 電束密度，電気変位 | クーロン毎平方メートル | $C/m^2$ | $m^{-2}\ s\ A$ |
| 誘電率 | ファラド毎メートル | F/m | $m^{-3}\ kg^{-1}\ s^4\ A^2$ |
| 透磁率 | ヘンリー毎メートル | H/m | $m\ kg\ s^{-2}\ A^{-2}$ |
| モルエネルギー | ジュール毎モル | J/mol | $m^2\ kg\ s^{-2}\ mol^{-1}$ |
| モルエントロピー，モル熱容量 | ジュール毎モル毎ケルビン | J/(mol K) | $m^2\ kg\ s^{-2}\ K^{-1}\ mol^{-1}$ |
| 照射線量（X線及びγ線） | クーロン毎キログラム | C/kg | $kg^{-1}\ s\ A$ |
| 吸収線量率 | グレイ毎秒 | Gy/s | $m^2\ s^{-3}$ |
| 放射強度 | ワット毎ステラジアン | W/sr | $m^4\ m^{-2}\ kg\ s^{-3}=m^2\ kg\ s^{-3}$ |
| 放射輝度 | ワット毎平方メートル毎ステラジアン | $W/(m^2\ sr)$ | $m^2\ m^{-2}\ kg\ s^{-3}=kg\ s^{-3}$ |
| 酵素活性濃度 | カタール毎立方メートル | $kat/m^3$ | $m^{-3}\ s^{-1}\ mol$ |

表５．SI 接頭語

| 乗数 | 名称 | 記号 | 乗数 | 名称 | 記号 |
|---|---|---|---|---|---|
| $10^{24}$ | ヨタ | Y | $10^{-1}$ | デシ | d |
| $10^{21}$ | ゼタ | Z | $10^{-2}$ | センチ | c |
| $10^{18}$ | エクサ | E | $10^{-3}$ | ミリ | m |
| $10^{15}$ | ペタ | P | $10^{-6}$ | マイクロ | μ |
| $10^{12}$ | テラ | T | $10^{-9}$ | ナノ | n |
| $10^{9}$ | ギガ | G | $10^{-12}$ | ピコ | p |
| $10^{6}$ | メガ | M | $10^{-15}$ | フェムト | f |
| $10^{3}$ | キロ | k | $10^{-18}$ | アト | a |
| $10^{2}$ | ヘクト | h | $10^{-21}$ | ゼプト | z |
| $10^{1}$ | デカ | da | $10^{-24}$ | ヨクト | y |

表６．SIに属さないが、SIと併用される単位

| 名称 | 記号 | SI 単位による値 |
|---|---|---|
| 分 | min | 1 min=60 s |
| 時 | h | 1 h =60 min=3600 s |
| 日 | d | 1 d=24 h=86 400 s |
| 度 | ° | 1°=(π/180) rad |
| 分 | ’ | 1’=(1/60)°=(π/10 800) rad |
| 秒 | ” | 1”=(1/60)’=(π/648 000) rad |
| ヘクタール | ha | 1 ha=1 $hm^2=10^4m^2$ |
| リットル | L，l | 1 L=1 l=1 $dm^3=10^3cm^3=10^{-3}m^3$ |
| トン | t | 1 t=$10^3$ kg |

表７．SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

| 名称 | 記号 | SI 単位で表される数値 |
|---|---|---|
| 電子ボルト | eV | 1 eV=1.602 176 53(14)×$10^{-19}$J |
| ダルトン | Da | 1 Da=1.660 538 86(28)×$10^{-27}$kg |
| 統一原子質量単位 | u | 1 u=1 Da |
| 天文単位 | ua | 1 ua=1.495 978 706 91(6)×$10^{11}$m |

表８．SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

| 名称 | 記号 | SI 単位で表される数値 |
|---|---|---|
| バール | bar | 1 bar=0.1MPa=100 kPa=$10^5$Pa |
| 水銀柱ミリメートル | mmHg | 1 mmHg≈133.322Pa |
| オングストローム | Å | 1 Å=0.1nm=100pm=$10^{-10}$m |
| 海里 | M | 1 M=1852m |
| バーン | b | 1 b=100$fm^2$=$(10^{-12}cm)^2$=$10^{-28}m^2$ |
| ノット | kn | 1 kn=(1852/3600)m/s |
| ネーパ | Np | SI単位との数値的な関係は、対数量の定義に依存。 |
| ベル | B | |
| デシベル | dB | |

表９．固有の名称をもつCGS組立単位

| 名称 | 記号 | SI 単位で表される数値 |
|---|---|---|
| エルグ | erg | 1 erg=$10^{-7}$ J |
| ダイン | dyn | 1 dyn=$10^{-5}$N |
| ポアズ | P | 1 P=1 dyn s $cm^{-2}$=0.1Pa s |
| ストークス | St | 1 St =$1cm^2\ s^{-1}$=$10^{-4}m^2\ s^{-1}$ |
| スチルブ | sb | 1 sb =1cd $cm^{-2}$=$10^4$cd $m^{-2}$ |
| フォト | ph | 1 ph=1cd sr $cm^{-2}$ =$10^4$lx |
| ガル | Gal | 1 Gal =1cm $s^{-2}$=$10^{-2}ms^{-2}$ |
| マクスウエル | Mx | 1 Mx = 1G $cm^2$=$10^{-8}$Wb |
| ガウス | G | 1 G =1Mx $cm^{-2}$ =$10^{-4}$T |
| エルステッド[a] | Oe | 1 Oe ≙ $(10^3/4\pi)$A $m^{-1}$ |

(a) ３元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「 ≙ 」は対応関係を示すものである。

表10．SIに属さないその他の単位の例

| 名称 | 記号 | SI 単位で表される数値 |
|---|---|---|
| キュリー | Ci | 1 Ci=3.7×$10^{10}$Bq |
| レントゲン | R | 1 R = 2.58×$10^{-4}$C/kg |
| ラド | rad | 1 rad=1cGy=$10^{-2}$Gy |
| レム | rem | 1 rem=1 cSv=$10^{-2}$Sv |
| ガンマ | γ | 1 γ=1 nT=$10^{-9}$T |
| フェルミ | | 1 フェルミ=1 fm=$10^{-15}$m |
| メートル系カラット | | 1 メートル系カラット= 0.2 g = 2×$10^{-4}$kg |
| トル | Torr | 1 Torr = (101 325/760) Pa |
| 標準大気圧 | atm | 1 atm = 101 325 Pa |
| カロリー | cal | 1 cal=4.1858J（「15℃」カロリー），4.1868J（「IT」カロリー），4.184J（「熱化学」カロリー） |
| ミクロン | μ | 1 μ =1μm=$10^{-6}$m |

（第8版，2006年）