

鉛直流入ディフューザの蓄熱性能評価_蓄放熱サイクル評価 Ver3.1・解説

文責：相良

2020/12/7 初期バージョン

2021/ 6/11 Ver1.1 修正

2021/12/10 Ver2.11 修正

2024/11/15 Ver3.1 修正

☆ Ver3.1 における Ver2.11 からの修正点

槽内上下に設置される鉛直流入方式のディフューザについて、これまでは「流量」を同一としていたが、今回の Ver.3.0 では、上部ディフューザからの流入となる放冷モードの二次側流量（二次側から蓄熱槽への還水流量）、および、下部ディフューザからの流入となる蓄冷モードの熱源側流量をそれぞれ別々に設計条件として与えることができるようになった。ただし、一定値としてシミュレーションしていることは変わっていないので、安全側としてそれぞれの最大流量を与えるのが良いと考えられる。この修正に伴い、「①蓄熱槽の設計条件」については、「二次側流量（放冷モード）[m³/h]」と「蓄熱側流量（蓄冷モード）[m³/h]」を設定することになる。

また、上下ディフューザについて、これまではその吐出面を同一水深（高さ）に設置するとしていたが、Ver.3.0 では上下ディフューザで別々の設置水深（高さ）を設定できるようにした。この修正に伴い、「②ディフューザの設計条件」については、上下ディフューザそれぞれの「上部吐出面水深[m]」と「下部吐出面高さ[m]」を設定することになる。

さらに、蓄熱性能を予測するためのシミュレーションで使われているモデルパラメータの予測式について、「モデルパラメータ R_0 の近似式とディフューザ吐出面の等価直径および設置水深(高さ)との関係」として、添付解説に追加説明を記載している。

なお、上記の修正に伴って、ツール画面内の説明および添付解説の内容を若干変更している。

☆ Ver2.11 における Ver1.1 からの修正点

最終的に求められる蓄熱性能の指標としての蓄放熱サイクル蓄熱槽効率の値には影響がそれほどありませんが、槽内鉛直温度分布の推移を計算する槽内混合モデルのシミュレーションにおいて、より理論的に整合性がある計算方法に修正し、取水側（槽出口側）のディフューザにおける取水温度（槽出口温度）を求めるための取水域の範囲を決めるモデルをより実際に近いモデルに変更しています。取水域の範囲を決めるモデルの詳細は、p.11～15 の「取水温度の予測について」を参照してください。

☆ Ver1.1 における初期バージョンからの修正点

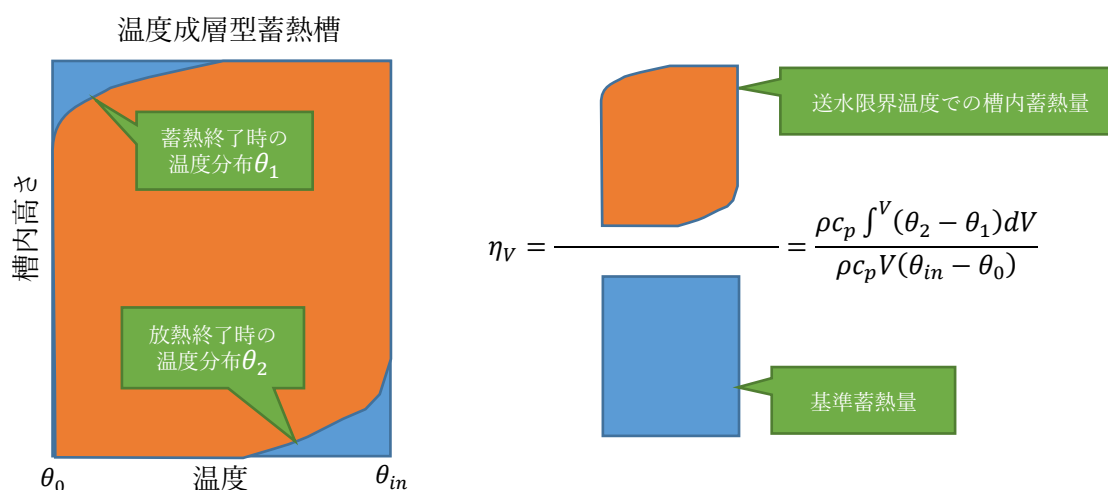
鉛直流入方式のディフューザを用いた場合の蓄熱性能を表すモデルパラメータを求める予測式をより予測精度が高いものに変更しました。詳細は、p.16～18 の「モデルパラメータ R_0 （無次元初期完全混合域深さ[-]）」を参照してください。

温度成層型蓄熱槽で設置される鉛直流入方式のディフューザ（ディストリビュータ、分配器、流入口などと同義。以下、ディフューザ）について、その蓄熱性能への影響を予測し、適切なサイズのディフューザを設計するための目安を提供するエクセルベースの設計ツール「鉛直流入ディフューザの蓄熱性能評価_蓄放熱サイクル評価 Ver3.1.xlsm」の使い方、および、背景となる関連研究成果などを解説する。

なお、ご質問等がございましたら「sagara@arch.eng.osaka-u.ac.jp」までご連絡いただければ幸いです。

1. 蓄熱性能の評価方法について

想定した蓄熱槽規模やディフューザサイズなどの条件から温度成層型蓄熱槽の槽内混合モデルのモデルパラメータを算出し、Excel VBA を用いた槽内混合モデルのシミュレーションにより槽内鉛直温度分布の推移を予測して、蓄熱性能指標としての「蓄熱槽効率」を予測する。ただし、ここでの「蓄熱槽効率」は、冷水槽の冷房時蓄放熱サイクル運転を想定し、一定の流入流量・流入温度で蓄熱と放熱を繰り返した時の蓄熱終了時の温度分布と放熱終了時の温度分布に挟まれた部分が蓄熱もしくは放熱される槽内蓄熱量となることを考慮して、槽内蓄熱量／基準蓄熱量で定義される蓄熱槽効率としている。



槽内温度分布と「定流量・定温度入力での冷水蓄放熱サイクルでの蓄熱槽効率 η_v 」

ここでは、冷房運転を想定して、冷房開始時に蓄熱温度（例えば 7℃）で一様の槽内に、二次側からの還水が槽上部のディフューザを介して一定流量・一定温度（例えば 15℃）で流入があり、温度成層部が槽底付近の取水側の下部ディフューザまで降下して、槽から二次側に送水される水温が当初の蓄熱温度（例えば 7℃）から徐々に上昇して送水限界温度（例えば 8℃。詳細は、計算条件設定の「①蓄熱槽の設計条件」参照）に達したときに、放熱（放冷）を停止して蓄熱（蓄冷）に切り替えることとしている。次に、蓄熱運転を想定して、熱源側から槽下部のディフューザを介して一定流量・一定温度（例えば 7℃）で流入があり、温度成層部が取水側の上部ディフューザ付近にまで上昇して、槽から熱源に送水される水温が徐々に低下して送水限界温度（例えば 12℃）に達したときに、蓄熱（蓄冷）を停止して放熱（放冷）に切り替えることとしている。このように蓄熱と放熱（蓄冷と放冷）を繰り返すことで、「槽内蓄熱量」として蓄熱終了時の温度分布と放熱終了時の温度分布に挟まれた部分が得られる。

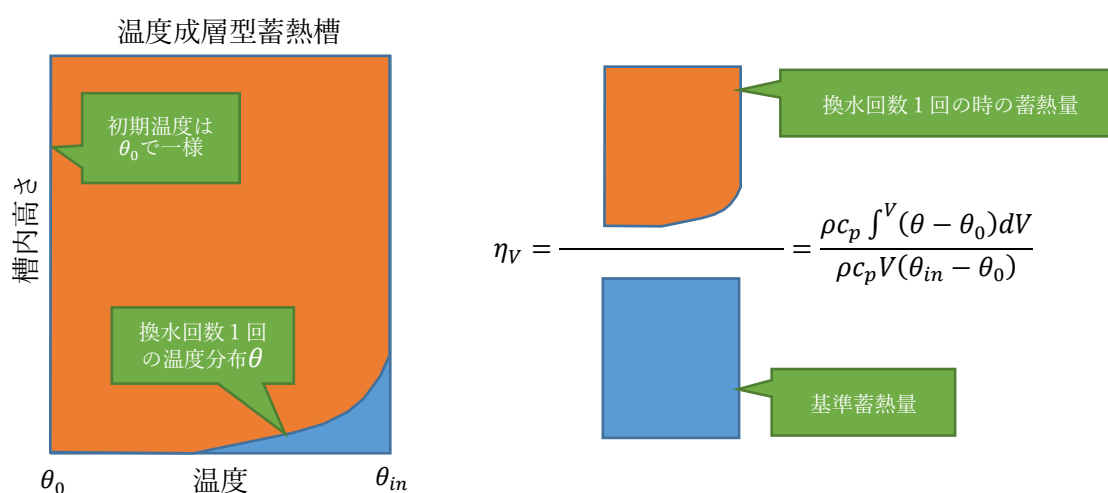
なお、冷水槽の冷房時放熱運転モードを想定している理由は、水温が高くなるほど水の体膨張率が大きくなり、温度成層型蓄熱槽では冷房時蓄熱運転や温水蓄熱の場合の方が蓄熱性能が高くなることから、ここでは、

最も蓄熱性能が低くなり安全側設計となると考えられる冷水槽の冷房時放熱運転モードを想定してシミュレーションを行っている。

【参考】

一方で、別の設計ツールである、円管方式、スロット・せき方式、円盤方式、鉛直流入方式の各種ディフューザに対応した「各種ディフューザの蓄熱性能評価 Ver1.1.xlsm」で予測される「蓄熱槽効率」は、冷水槽の冷房時放熱運転モードを想定し、冷房開始時に蓄熱温度（例えば 7℃）で一様の槽内に、二次側からの還水が槽上部のディフューザを介して一定流量・一定温度（例えば 15℃）で流入があり、槽内がちょうど 1 回換水した時の槽内蓄熱量／基準蓄熱量で定義される蓄熱槽効率である。

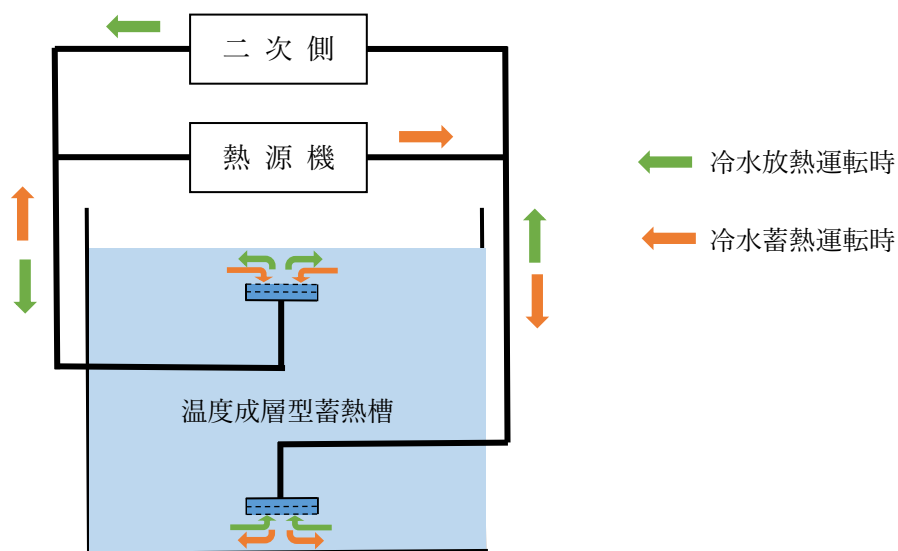
したがって、「蓄放熱サイクルでの蓄熱槽効率」は、「各種ディフューザの蓄熱性能評価 Ver1.1.xlsm」で予測される「槽 1 回換水時の蓄熱槽効率」よりも実際に近い蓄熱槽効率であるといえる。



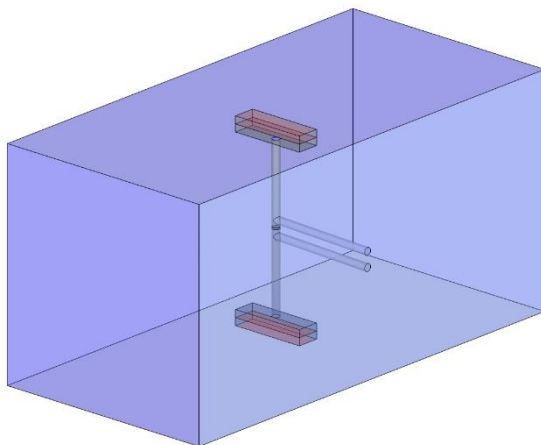
槽内温度分布と「定流量・定温度入力での冷水放熱モード槽 1 回換水時の蓄熱槽効率 η_V 」

2. 蓄熱システムの構成

熱源機（一次側）から蓄熱槽に送水する配管と蓄熱槽から二次側（空調機）に送水する配管は途中で接続され、それらの流量差だけがディフューザから蓄熱槽に流入するものとする。基本的には、冷房時の冷水利用の場合には、蓄熱時（蓄冷時）には熱源機からの冷水は蓄熱槽内下部に設置されたディフューザから槽へ流入して上部に設置されたディフューザから取水され、逆に、放熱時（放冷時）には二次側空調機からの還水は蓄熱槽内上部に設置されたディフューザから槽に流入して下部に設置されたディフューザから取水されるとする。また、温度成層型蓄熱槽であるため、常に、高温水は上部ディフューザから流入し、低温水は下部ディフューザから流入するように構成されているものとする。



蓄熱システム全体のイメージ



蓄熱槽と鉛直流入方式のディフューザのイメージ

3. Excel ツールの使い方と解説

使い方の概要

Excel ツール「鉛直流入ディフューザの蓄熱性能評価_蓄放熱サイクル評価 Ver3.1.xlsm」を立ち上げて、「①蓄熱槽の設計条件」と「②ディフューザの設計条件」を入力した後に、「③計算実行」をクリックすると、入力した蓄熱槽の規模、流量・温度条件、ディフューザのサイズを与条件として、冷水蓄放熱サイクルの槽内温度分布を計算するためのモデルパラメータを算出して「④準備計算」に示し、槽内混合モデルを数値計算することにより数回の蓄放熱サイクルにおける槽内鉛直温度分布の推移を計算して、「⑤蓄放熱サイクルの蓄熱槽効率」に蓄熱性能の目安としての「蓄熱槽効率」を表示する。また、シート「Calc」には、蓄熱槽から熱源側、二次側への送水温度の推移や蓄放熱を繰り返すごとに計算された槽内鉛直温度分布の推移が槽内無次元高さに応じた無次元温度として槽換水回数 0.2 毎に出力される。

さらに、「⑥鉛直流入方式のディフューザ最適設置水深など」には、蓄熱性能がおおよそ最高となるディフューザ最適設置水深（ディフューザ吐出面の水面からの水深および槽底からの高さ）が示される。また、冷房時の蓄熱運転で、鉛直流入方式の上部ディフューザが取水口となったときの空気混入リスクを避けるために、流量を設計条件に固定した場合の吐出面限界設置水深、および、設置水深を設計条件に固定した場合の取水限界流量が示される。

「⑦並列連結槽がある場合の隔壁連通口必要面積」には、蓄熱槽が複数の並列槽で構成される場合に、隣槽との温度成層部の高さを揃えるために必要な隔壁連通口の必要開口面積および設置数に応じた必要連通口直径が示される。なお、並列連結槽がない場合でもダミーの設定値を入力する必要がある。

計算条件の設定（①～⑦の番号はエクセル内での説明番号と対応している）

①蓄熱槽の設計条件

- ・槽水深[m]：温度成層型蓄熱槽の水深（槽形状は直方体）
- ・槽容量[m3]：ディフューザ 1 基（上部と下部のディフューザ 1 組）当たりの槽容量
- ・二次側流量（放冷モード）[m3/h]：上部ディフューザからの流入となる放冷モードの二次側流量（二次側から蓄熱槽への還水流量）（ディフューザ 1 基当たりの流量）
- ・熱源側流量（蓄冷モード）[m3/h]：下部ディフューザからの流入となる蓄冷モードの熱源側流量（ディフューザ 1 基当たりの流量）

これらの流量を一定値としてシミュレーションしていることから、安全側としてそれぞれの最大流量を与えるのが良いと考えられる。

- ・蓄熱温度[°C]：一般には、熱源出口温度
計算結果として近似式で求めた密度が右の欄に表示される。
- ・還り温度[°C]：一般には、二次側からの還り温度（戻り温度、空調機コイル出口温度）
計算結果として近似式で求めた密度が右の欄に表示される。
- ・熱源側送水限界温度[°C]：蓄熱終了間際になると槽内の温度成層部が取水口（冷水蓄熱の場合には、上部ディフューザ）付近にまで温度成層部が到達して熱源への送水温度が低下し始める。これ以上低下すると蓄熱運転が出来ず熱源が停止する、もしくは、それ以上低下すると熱源の運転効率が低下するために熱源を停止する、という限界温度。取水温度が熱源側送水限界温度に達したときに槽内への蓄熱量が最大となる。

- ・二次側送水限界温度[°C]：放熱終了間際になると槽内の温度成層部が取水口（冷水蓄熱の場合には、下部ディフューザ）付近にまで温度成層部が到達して二次側への送水温度が上昇し始める。これ以上上昇すると放熱運転が出来ない、もしくは、それ以上上昇すると冷房負荷を処理できない、という限界温度。取水温度が二次側送水限界温度に達したときに槽内からの放熱量が最大となる。

【並列連結槽がある場合】（並列連結槽がない場合でもそれぞれダミーの数値を入力してください）

- ・連通口流量[m³/h]：並列に連結された隣槽がある場合に、隣槽との蓄熱バランスを保つために隣槽との隔壁に連通口が設けられることがある。この連通口の最低限のサイズを決めるために、隔壁連通口を通過する流量を設計条件として与える。これにより隣槽相互の温度成層部をほぼ同じ高さに保つことが出来る。

一般には、具体的な連通口流量としてどのような数値を設定すればよいのか不明なことが多いと思われるが、先に与えた「流量（ディフューザ1基当たりの流量）」が、隣槽のディフューザの「流量（ディフューザ1基当たりの流量）」と、10%程度の差異に収めることが出来るとすれば、連通口を介してその半分の流量が隣槽と行き来することで、温度成層の高さを揃えることが可能となる。したがって、この場合、先に与えた「流量（ディフューザ1基当たりの流量）」の5%を「連通口流量」として設定すればよい。

- ・許容想定蓄熱バランス[%]：上記の連通口サイズの決定において、隣槽の温度成層部の高さとの許容可能な差異と槽水深のとの比であり、通常、1%程度未満が推奨される。
- ・連通口個数：槽の上部（水面付近）と下部（槽底付近）に複数の連通口を設ける場合に、それぞれの設置個数（上部と下部で同数の場合）を与える。

【補足1】ディフューザ1基（上部と下部のディフューザ1組）当たりの意味について

温度成層型蓄熱槽においては、単一槽の場合でも複数槽並列の場合でも、大きい槽では、一つの槽に複数のディフューザが設置されることが多く、お互いが干渉しないように配置されていれば温度成層型蓄熱槽では水平方向には温度分布がほとんどないことから、ディフューザ1基ごとに独立した温度成層型蓄熱槽とみなせるため、ここでは、ディフューザ1基についてのシミュレーションを行っている。

【補足2】温度範囲の制限について

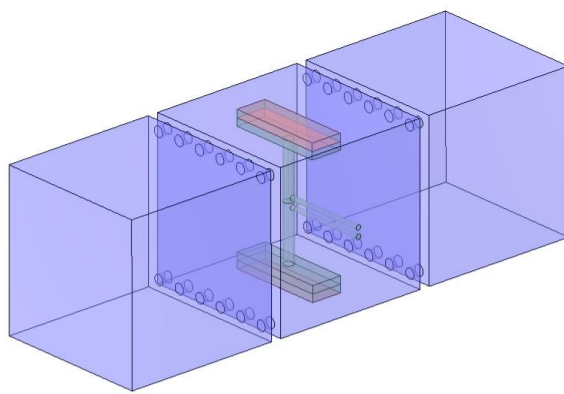
シミュレーションを行うための Excel VBA プログラムでは、水温から水の密度を算出する簡単な近似式を用いており、この近似式が 5～15°Cの温度-密度から求められているため、上記の温度条件については、5～15°Cの温度範囲とする必要がある。

【補足3】蓄熱槽が並列に連結された複数槽から構成されている場合の蓄熱性能について

同一槽に複数のディフューザが設置されている場合にはそれぞれの流量に若干差異があっても蓄熱性能への影響は小さいが、並列複数槽でそれぞれのディフューザの流量に差異がある場合や並列複数槽それぞれの容積が異なる場合に、蓄放熱時に各槽での温度成層部の高さが異なることになり影響が大きい。それは、それらの槽から同時に取水したときに、取水が温度成層部にかかる温度成層部の高さが異なるために合流した後の取水温度が徐々に変化することになり、結果的に蓄熱槽全体としての温度成層が緩やかに形成されている（温度成層型蓄熱槽としては蓄熱性能が低いことを意味する）ことと同じことになるためである。

一般には、種々の理由で、異なる容量の並列複数槽から温度成層型蓄熱槽が構成される場合や配管方法によっては各ディフューザから流入する流量に差異が生じてしまう場合が多いと思われるが、隣り合う槽の隔壁の水面近くと槽底近くに適切なサイズ・個数の連通口を設けることで各槽の蓄熱バランスを担保する（各槽の容量やディフューザ流量が異なっても温度成層部の高さをほぼ同一にそろえる）ことが可能であり（参考文献1、2）、ここでは、設計条件として、連通口流量[m³/h]、許容蓄熱バランス比[%]および連通口個数を設計条件として与える。

場合によっては、下図のように隣槽にディフューザを設置しないで、当該槽に設置したディフューザの流量を隣槽への流量と合わせた「流量（ディフューザ1基当たりの流量）」として設定し、隔壁に適切な連通口を設けることでディフューザ設置台数を少なくできるということもありうる（参考文献1、2）。その場合には、連通口流量として、「流量（ディフューザ1基当たりの流量）」／槽数（すなわち、隣槽にも同じディフューザを設置するとした場合のディフューザ1基当たりの流量）を「連通口流量」として設定することになる。



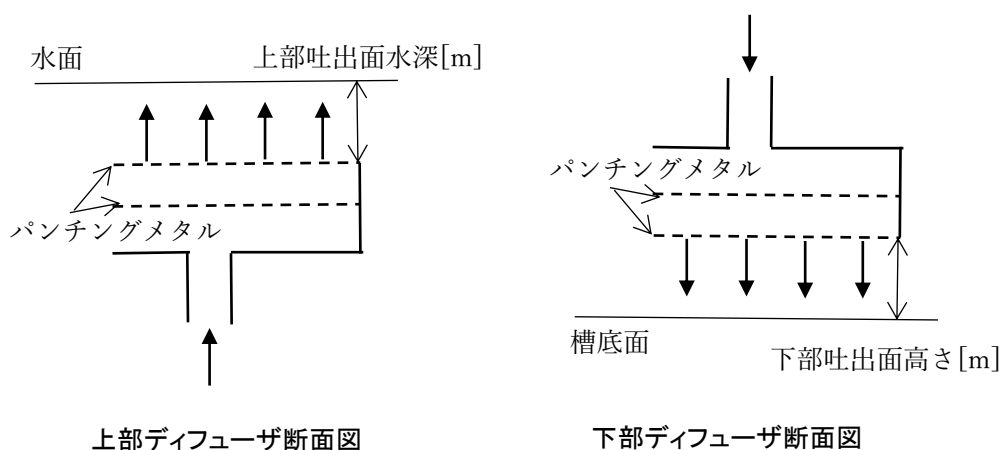
隣槽隔壁の連通口で並列に連結された3槽の中央槽にのみディフューザを設置した場合のイメージ図

②ディフューザの設計条件

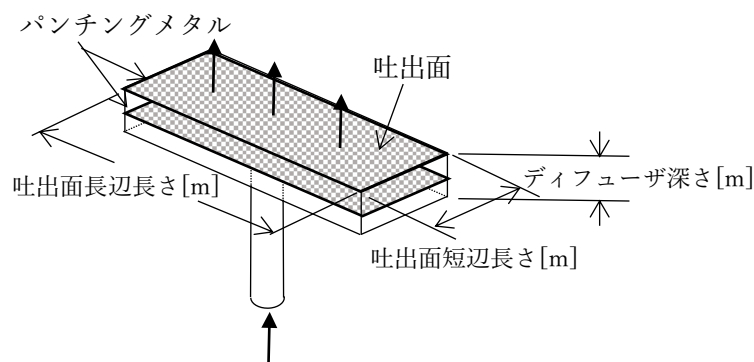
「鉛直流入方式」のディフューザ各部のサイズを入力する。

- ・吐出面短辺長さ[m]：ディフューザ開口部（吐出面）の短辺の長さ
- ・吐出面長辺長さ[m]：ディフューザ開口部（吐出面）の長辺の長さ
- ・ディフューザ深さ[m]：ディフューザボックスの深さ
- ・上部吐出面水深[m]：水面からの上部ディフューザ吐出面の設置水深
- ・下部吐出面高さ[m]：槽底面からの下部ディフューザ吐出面の設置高さ

なお、上下ディフューザの平面上の配置については上下対称にそろえる必要はない。また、それぞれのディフューザのどの部分のサイズなのかについては次ページ図を参照のこと。



鉛直流入方式のディフューザ断面図と各部サイズ(それぞれ、槽への流入時)



鉛直流入方式のディフューザ外観と各部サイズ(上部設置ディフューザ)

ディフューザ吐出面から均等に流入させるために、ディフューザ吐出面にパンチングメタル（開口率 22.7%～40%程度：小さいほど良い）を設置することとしているが、吐出面だけではなくディフューザ中央にも設置し、二重にパンチングメタルを設置することとしている。なお、吐出面のみに設置した場合には、蓄熱性能が若干低下することになる（参考文献 15）。

なお、ディフューザ吐出面から上向きに流入した高温水は、水面に到達するまでの間に浮力のために加速されることから、基本的には「吐出面水深[m]」は水面に近く浅い方が蓄熱性能は良くなることが分かっている（参考文献 7、9）が、逆に、ディフューザの吐出面と水面や槽底面との間隔があまり狭くなりすぎると、鉛直方向から水平方向に向きが変わったときに流速が増加してかえって性能が悪くなることがある。このことから、ディフューザ吐出面の水深および槽底からの高さについては蓄熱性能が最も高くなるポイントが存在することになり、これについては後述する。

また、運転モードが変わって上部ディフューザが取水側になったときに、吐出面（取水面）が水面に近過ぎると空気が混入する可能性があります。これ以上水面に近いと空気が混入する限界水深、もしくは、これ以上多いと空気が混入する限界流量については後述する。

なお、他の流入方式である「円管方式」、「スロット・せき方式」、「円盤方式」のディフューザの設計支援ツールとして「各種ディフューザの蓄熱性能評価 Ver? .xls」を利用することが出来る。ただし、それで予測される「蓄熱槽効率」は、冷水槽の冷房時放熱運転モードを想定し、蓄熱温度（例えば 7℃）で一様の槽内に二次側からの還水が槽上部のディフューザから一定流量・一定温度（例えば 15℃）で流入があり、槽内がちょうど 1 回換水した時の槽内蓄熱量／基準蓄熱量で定義される蓄熱槽効率である。

③計算実行

「③計算実行」をクリックすることで、「①蓄熱槽の設計条件」と「②ディフューザの設計条件」で入力した蓄熱槽の規模、流量・温度条件、ディフューザのサイズを与条件として、冷水蓄放熱サイクルの槽内温度分布を計算するためのモデルパラメータの算出とシミュレーションを行う。

計算には、数分程度の時間が掛かる。

モデルの詳細や計算式などについては、後述解説を参照のこと。

④準備計算

槽内温度分布のシミュレーションで数値計算されるモデル式のパラメータ R_0 と Pe_{tank} 、そして、蓄熱性能評価に用いる無次元パラメータである入口アルキメデス数 Ar_{in} 、ディフューザ吐出面から流入する平均流速 u_{in} [m/s] を、①と②の蓄熱槽とディフューザの設計条件から計算して結果を表示する。

そして、蓄熱槽の規模、流量・温度条件とモデルパラメータ R_0 、 Pe_{tank} によって蓄放熱サイクルのシミュレーションを行い、シート「Calc」に温度分布の推移などの結果を表示する。シート「Calc」には、蓄熱槽から熱源側、二次側への送水温度の推移や蓄放熱を繰り返すごとに計算された槽内鉛直温度分布の推移が槽内無次元高さに応じた無次元温度として槽換水回数 0.2 毎に出力される。

⑤蓄放熱サイクルの蓄熱槽効率

最終的に蓄熱性能の目安として、シミュレーションにより予測された槽内温度分布から算出された「蓄放熱サイクルの蓄熱槽効率」を表示する。

ただし、ここで算出される蓄熱槽効率は、「一定流量・入力温度で蓄放熱を繰り返した時の蓄熱槽効率」であり、熱源機や負荷の状況に応じて流量・温度条件が逐一変化する実際の運転状況のシミュレーション結果としての蓄放熱サイクルでの蓄熱槽効率ではないので、あくまでも蓄熱性能の目安と考えるべきである。

なお、「4. 槽内混合モデルとモデルパラメータ」で解説しているように、ある程度以上 Ar_{in} が大きくなっても蓄熱性能が向上しないことが明らかにされており、ここでも、 Ar_{in} の上限値を設定しているので、設計条件を変化させても結果としての蓄熱槽効率に期待した変化が見られない場合には、設計条件から算出された Ar_{in} の値が上限値となっていないか確認してください。

⑥鉛直流入方式のディフューザ最適設置水深など

「②ディフューザの設計条件」で述べたように、ディフューザ吐出面が水面や槽底にあまり近づき過ぎると、鉛直方向の流入流速が小さくても、水平方向に方向が変わったときに、吐出面周囲からより高速で流入するこ

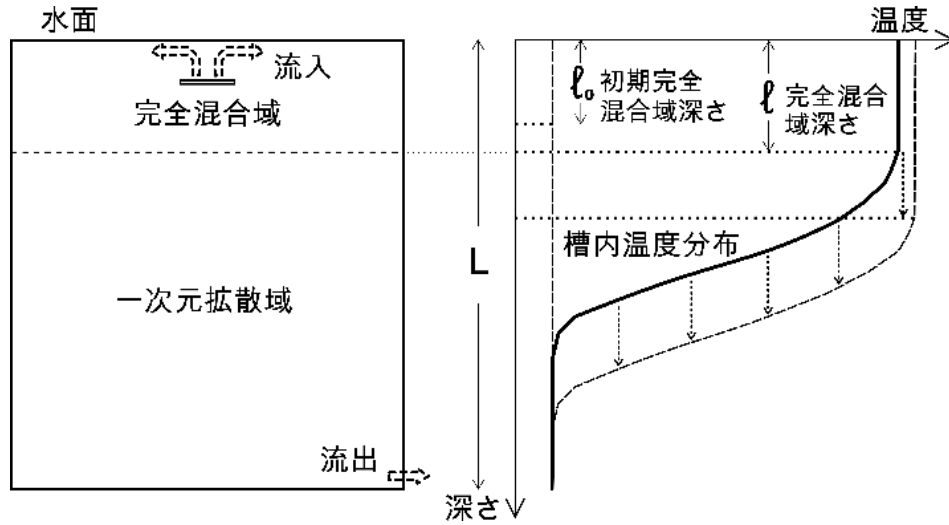
とになり、周辺槽内水との混合が促進されることでかえって蓄熱性能が低下すると考えられる。そのため、ここでは蓄熱性能がおおよそ最高となる最適設置高さを求めている。元に戻って、あらためて、「②ディフューザの設計条件」の「上部吐出面水深[m]」と「下部吐出面高さ[m]」に、ここで示された「ディフューザ最適設置水深」を入力し再計算することでその蓄熱性能を確認することができるが、元の結果の方が「ディフューザ最適設置水深」の場合よりも蓄熱性能が高くなっていたとしても、実際にはこの「ディフューザ最適設置水深」の場合よりも蓄熱性能が高くないと考えた方がよい。

また、鉛直流入方式においては、槽内上部に設置されるディフューザ吐出面が水面に近い場合、このディフューザが取水口となる運転モードになったときに、水面から空気を吸い込むリスクがある。鉛直流入方式の場合には、吐出面が水面に近い方が蓄熱性能は高くなる傾向があるが、取水口となったときの空気混入リスクを避けるために、流量を設計条件に固定した場合の吐出面限界設置水深、および、設置水深を設計条件に固定した場合の取水限界流量を算出している。ただ、一般の設定条件では、上部ディフューザでの空気混入リスクは極めて小さいと考えているが、運転状況によっては槽水位が下がってしまうこともあることから目安としての限界値を示した。

⑦並列連結槽がある場合の隔壁連通口面積

温度成層型蓄熱槽の場合、槽容量を確保するために複数槽を並列に連結して利用することが多い。これらの連結される槽は、水深は同一であっても水平断面積が異なることが多く、また、配管の都合でそれぞれの槽への流入流量が思い通りにはならないことが多いと考えられる。このような状況で適正な蓄熱を行うためには、槽内に形成される温度成層部の高さを揃えることが必要であるが、並列槽の隔壁の水面付近と槽底付近に連通口を設けることによってこれが可能となる。ここでは、温度成層部の高さを揃えるために必要であると想定される連通口流量と、隣槽との温度成層部の許容できる高さの差異と槽水深の比（許容蓄熱バランス比）を条件として、必要な連通口面積を求めることとしている。これにより、水面付近と槽底付近にそれぞれ必要連通口面積以上となるように連通口を設置することで、想定した差異以内に温度成層部の高さを揃えることが出来る。具体的には、上部と下部それぞれに複数の連通口を設けて、上部と下部のそれぞれで合計面積が必要連通口面積以上となるようにすればよい。また、ここでは連通口の個数（上部と下部で同数とする）を与えることにより、連通口必要直径も算出している。なお、可能であればそれぞれ水面と槽底に近いところに設置するのが望ましいが、必ずしも水面、槽底直近でなくても、できるだけ長時間、温度成層部が上部と下部の連通口の間に位置するように配慮すれば大きい問題はない。

4. 槽内混合モデルとモデルパラメータ（参考文献5，6，7）



槽内混合モデルの概要

上図に槽内混合モデルの概要を示す。円管方式、スロット・せき方式、円盤方式の水平流入方式の場合には、上部ディフューザから流入した高温水は水面に沿って流れ、ディフューザ周辺の槽内水と混合して、その後は全体的に下向きに緩やかに下降して出口から流出するとする槽内混合モデルをこれまでに提案してきた（参考文献5など）。鉛直流入方式の場合でも、上部流入口から鉛直上向きに槽内に入力された高温水は、浮力の影響を受けながら上昇して水面に達した後、流れは水平方向となり、その後は水平流入方式と同様な流れになると考えられる。そこで、高温水が上部から入力される場合を想定し、水平流入方式の場合と同様に、流入水が槽内の水と混合する完全混合域と、下向きに高温領域が押し出されて行く一次元拡散域に槽内が分けられるとする。そして、二つの領域の温度は、それぞれ以下の式で与えられるとする。

・ 流入口側の完全混合域の温度

$$VR \frac{d\theta}{dt} = F(\theta_{in} - \theta) \quad (1)$$

・ 流出口側の一次元拡散域の温度

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \kappa \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} - U \frac{\partial \theta}{\partial z} \quad (2)$$

ここで、式(1)の R は次式で与えられるとする。

$$R = \frac{\ell}{L} = R_0 + 0.4t^* = \frac{\ell_0}{L} + 0.4t^* \quad t^* = \frac{Ft}{V} \quad (3)$$

このモデルでは未知数は ℓ_0 であり、水平流入方式の場合には予測式（参考文献6）が得られている。なお、これらの予測式は、入力温度がステップ的に変化し、それ以降は定流量・定温度が保たれている入力条件に対応したものである。

ここでは、距離、時間、温度の無次元変数

$$z^* = \frac{z}{L}, \quad t^* = \frac{Ft}{V}, \quad \theta^* = \frac{\theta - \theta_0}{\theta_{in} - \theta_0} \quad (4)$$

を導入することにより槽内混合モデルの式(1)～(3)は以下のように無次元化される。

・流入口側の完全混合域の無次元温度

$$R \frac{d\theta^*}{dt^*} = 1 - \theta^* \quad (5)$$

$$R = R_0 + 0.4t^* \quad (6)$$

・流出口側の一次元拡散域の無次元温度

$$\frac{\partial \theta^*}{\partial t^*} = \frac{1}{Pe_{tank}} \frac{\partial^2 \theta^*}{\partial z^{*2}} - \frac{\partial \theta^*}{\partial z^*} \quad (7)$$

$$Pe_{tank} = \frac{UL}{\kappa} \quad (8)$$

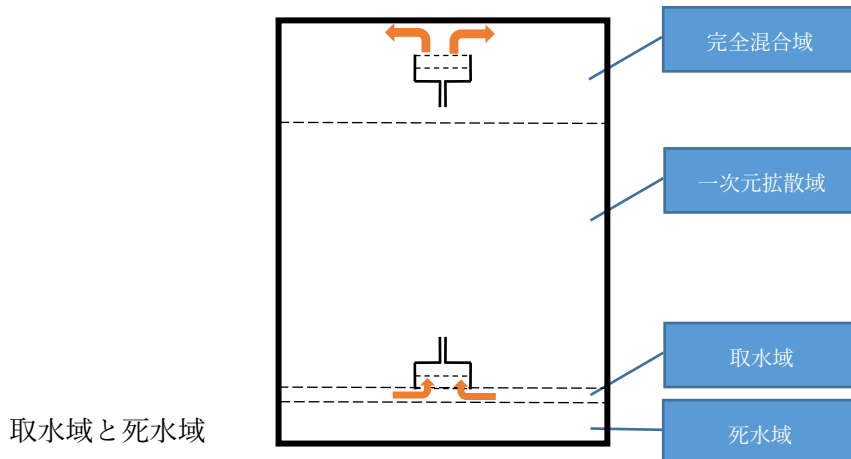
式(5)～(8)から二つの微分方程式は二つのモデルパラメータ (R_0 , Pe_{tank}) が同じ値であれば、同じ初期条件・境界条件の下で同じ解となることが分かる。そして、これらの二つの微分方程式からなる槽内混合モデルの式を何らかの数値計算で解くことにより、槽内鉛直温度分布の推移が予測できる。先に述べたように、無次元化する前のモデルでは未知数は ℓ_0 であるが、無次元化した後には未知数は R_0 となる。「②ディフューザの設計条件」で設定した鉛直流入方式のディフューザについて数多くの CFD や実験により予測式が得られており、ここでも予測式を用いて R_0 が算出されている。なお、この予測式は、槽内一様初期温度の蓄熱槽への入力温度がステップ的に変化し、それ以降は定流量・定温度が保たれている入力条件に対応したものである。具体的には後述の「モデルパラメータ R_0 (無次元初期完全混合域深さ[-])」を参照のこと。

・取水温度の予測について

ここでは、取水温度が「送水限界温度」に達したかどうか蓄熱モードと放熱モードの切り替タイミングを左右することから、下部ディフューザからの取水温度をより高い精度で予測するために、「取水域（遷移域）」および「死水域」を設定し、取水側ディフューザについての「取水口サブモデル」を導入している（参考文献 10）。

取水域（遷移域）および死水域

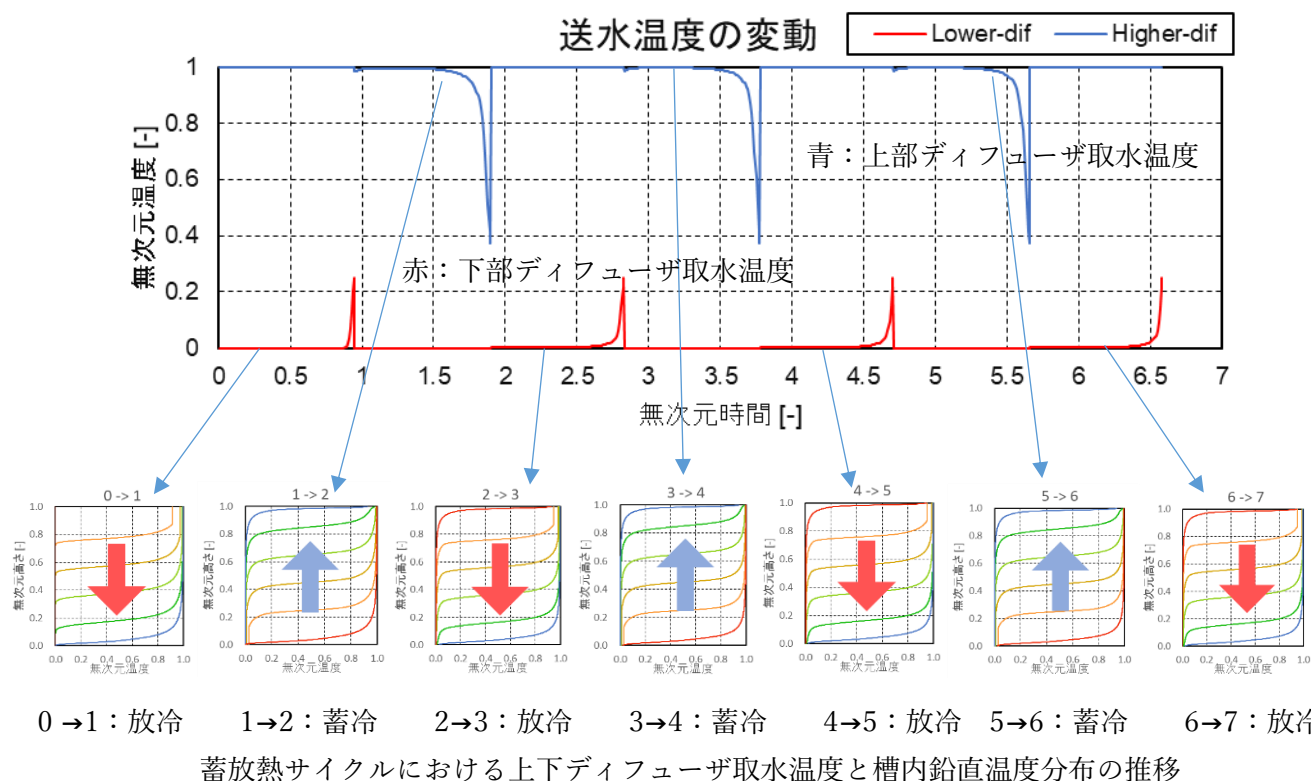
上部ディフューザから流入があり、下部ディフューザから取水する場合、下部ディフューザ下面の深さからある程度下までの領域から取水されると考えられる。その領域をここでは「取水域」（参考文献 10 では「遷移域」）とする。そして、上記で「一次元拡散域」としていた領域を、下図のように「一次元拡散域」、「取水域」、「死水域」に分割することとする。



取水温度の変化

冷水槽の冷房時放熱（放冷）運転モードを想定し、蓄熱温度（例えば7℃）で満蓄状態から二次側に送水し始めてから放熱終了間際までの間はほぼ蓄熱温度で二次側に送水されているが、槽内に形成されている温度成層部の位置が低下して下部ディフューザ付近にまで到達すると、下部ディフューザでの取水温度は徐々に上昇し、二次側の冷房負荷を処理できないぎりぎりの水温（二次側送水限界温度）に近づくことになる。そして、下部ディフューザから取水される水温が送水限界温度に達したときに放熱（放冷）が終了して、蓄熱（蓄冷）運転モードに切り替わるとする。

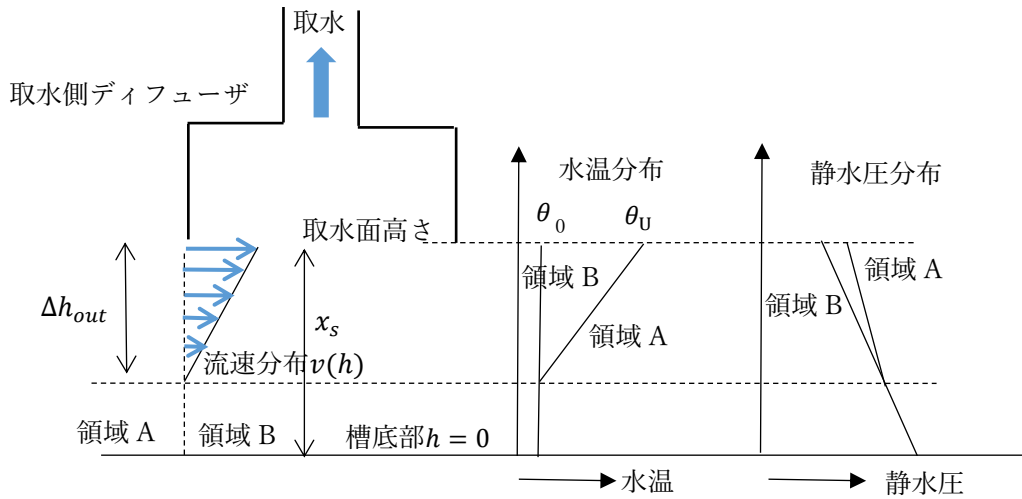
下の図は、無次元時間 0 で無次元温度 0 の一様温度の槽に、上部ディフューザから無次元温度 1 で一定流量の入力がある「冷水放冷モード」から始まり、赤線で示された下部ディフューザでの取水温度が送水限界温度に達した時点で、上下のディフューザの役割が逆転して、「冷水放冷モード」から「冷水蓄冷モード」に切り替わり、今度は、下部ディフューザから無次元温度 0 で一定流量の入力があり、青線で示された上部ディフューザでの取水温度が熱源への送水限界温度に達した時点で、「冷水蓄冷モード」から再び「冷水放冷モード」に切り替わり、それが繰り返されて、4 回目の「冷水放冷モード」が終了するまでの間の上下ディフューザにおける取水温度の変化を示した例である。同様な図が、Excel ツールの「Calc」のシートに計算結果として表示される。



冷水槽の冷房時放熱（放冷）運転モードを想定し、蓄熱温度（例えば7℃）で満蓄状態から二次側に送水し始めて、下部ディフューザから取水される水温が送水限界温度に達したときに放熱（放冷）が終了して、蓄熱（蓄冷）運転モードに切り替わるとする。その場合、取水温度が蓄熱温度（例えば7℃）から変化して上昇し始めるのは、槽内の温度成層部が下部ディフューザ付近にまで降下してきたときであり、その時の状況から取水域を定めることが適切であると考えられる。

ここでは、下図のように、温度成層部が取水側の下部ディフューザ付近まで降りてきて、ディフューザボツ

クスの外側の取水域（領域 A）の鉛直温度分布が、取水域上端での水温 θ_U から線形変化して取水域下端で槽内初期温度に等しくなり、ディフューザボックスの内側の取水域（領域 B）では槽内初期温度 θ_0 で一様温度分布であるとする。そして、下部ディフューザ外周の取水域では、下の図の領域 A と領域 B との間に水温差（密度差）による圧力差が生じることで水平方向に取水流れ $v(h)$ が生じると仮定する。



下部ディフューザ外周の取水域における水平方向取水流れ・水温・静水圧の分布

取水域の温度分布として、下部取水側ディフューザの吸込み面高さの水温 θ_U から線形変化して死水域との境界で θ_0 となると想定した場合、取水域の鉛直温度分布は次式であらわされる。

$$\theta(h) = \theta_0 + (\theta_U - \theta_0) \frac{h - h_L}{h_U - h_L}$$

さらに、水の温度と密度が線形関係であると仮定すると密度分布も同様な下式であらわされる。

$$\rho(h) = \rho_0 - (\rho_0 - \rho_U) \frac{h - h_L}{h_U - h_L}$$

このときこの部分の流速は、下部ディフューザ外周両側の圧力差から、次式で求められるとする。

$$v(h) = C \sqrt{2(P_A - P_B) / \rho_0}$$

$$P_A(h) = P_0 - \left\{ \int_0^{h_L} \rho_0 g dh + \int_{h_L}^h \rho(h) g dh \right\} = P_0 - \left\{ \rho_0 g h_L + \rho_0 g (h - h_L) - \frac{(\rho_0 - \rho_U) g}{h_U - h_L} \cdot \frac{1}{2} (h - h_L)^2 \right\}$$

$$P_B(h) = P_0 - \left\{ \int_0^{h_L} \rho_0 g dh + \int_{h_L}^h \rho_0 g dh \right\} = P_0 - \{ \rho_0 g h_L + \rho_0 g (h - h_L) \}$$

したがって、範囲 A と範囲 B との間の圧力差は以下となる。

$$P_A - P_B = \frac{(\rho_0 - \rho_U) g}{h_U - h_L} \cdot \frac{1}{2} (h - h_L)^2$$

したがって、

$$v(h) = C \sqrt{\frac{2(P_A - P_B)}{\rho_0}} = C \sqrt{\frac{(\rho_0 - \rho_U)g}{\rho_0(h_U - h_L)}} (h - h_L)$$

そして、この取水流れの総流量（取水される流量）が槽への入力流量に等しいという関係が次式であらわされる。

$$F = \int_{h_L}^{h_U} W v(h) dh = \frac{CW}{2} \sqrt{\frac{(\rho_0 - \rho_U)g(h_U - h_L)^3}{\rho_0}}$$

この関係式を、 $\Delta h_{out} = h_U - h_L$ について解くと次式の取水域厚さ（範囲） Δh_{out} が得られる。

$$\Delta h_{out} = \left(\frac{2F}{CW \sqrt{g(\rho_0 - \rho_U)/\rho_0}} \right)^{\frac{2}{3}}$$

$$\Delta h_{out} = h_U - h_L$$

$$W = 2(l_x + l_y)$$

ただし、取水域上端の水温と密度（ θ_U と ρ_U ）は時々刻々変化するために、計算時刻ステップごとに Δh_{out} を算出する必要がある。また、温度成層部が取水側下部ディフューザ付近まで降りてくるまでは、吸込み面高さの水温と死水域の水温はほぼ等しいことから、 Δh_{out} が無限大となるために、ある程度の温度差（密度差）が現れるまでは別途工夫が必要となる。

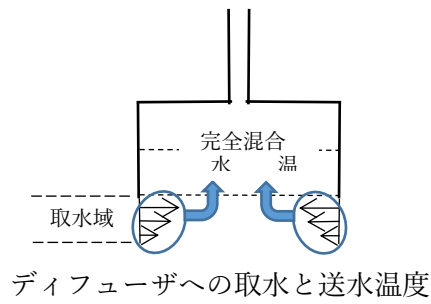
取水域厚さ Δh_{out} に関する補正

なお、槽内混合モデルの数値計算に際して、取水域厚さがメッシュの位置とずれた場合、および取水域厚さが槽底部（水面）を超過（取水域厚さ $\Delta h_{out} > \text{取水面} \cdot \text{吐出面高さ } x_s$ ）した場合には、それぞれ適切な補正をすることとしている。

取水口サブモデル

取水域から下部ディフューザ内部に取り込まれた後、ディフューザ内部から蓄熱槽の外へ送水される間にディフューザ内部である程度混合されることを考慮して、簡単なモデルではあるが、取水口サブモデルを導入する。

下部ディフューザ付近の取水域では、ディフューザ外周からの取水流速 $v(h)$ でそのまま取水口である下部ディフューザ内部に取水されるものとし、ディフューザ内部で完全混合して、その温度（ θ_{out} ）で槽外に送水されるものとする。ただし、鉛直に接続された外部へ配管内部との混合は、配管内部の水量が相対的に少ないとして無視している。



$$\theta_{out}|_{t+\Delta t} = \theta_T + (\theta_{out}|_{t+\Delta t} - \theta_T) \exp\left(-\frac{F\Delta t}{V_d}\right)$$

$$\theta_T = \frac{\int_{h_L}^{h_U} Wv(h)\theta(h)dh}{\int_{h_L}^{h_U} Wv(h)dh}$$

- ・槽内混合モデルにおける水平断面流速 U について
一次元拡散域、取水域、死水域の温度は、いずれも、

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \kappa \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} - U \frac{\partial \theta}{\partial z}$$

を解くことによって得られるが、槽水平断面流速 U が、取水口のディフューザの設置水深（高さ）に応じて、以下のように変化する。

一次元拡散域（ $h \geq h_U$ ）

$$U(h) = F/(V/L)$$

取水域（ $h_L < h \leq h_U$ ）

$$U(h) = \left(F - \int_h^{h_U} Wv(h)dh\right)/(V/L)$$

死水域（ $0 < h < h_L$ ）

$$U(h) = 0$$

モデルパラメータ R_0 （無次元初期完全混合域深さ[-]）を算出する近似式

蓄熱性能を予測するためのシミュレーションで使われているモデルパラメータの予測式（近似式）は、以下のとおりである。

$$R_0^* = 10^b Ar_{in}^{*a}$$

$$a = -0.327$$

$$b = -0.806$$

$$Ar_{in}^* = Ar_{in} \cdot \left(\frac{x_s}{d_{in}}\right)^2, \text{ ただし、} Ar_{in}^* > 1.4 \text{ では } Ar_{in}^* = 1.4$$

$$R_0^* = R_0 \cdot \left(\frac{x_s}{L}\right)^{-0.333} \cdot \left(\frac{D_{tank}}{L}\right)^{-0.5}$$

$$Ar_{in} = \frac{d_{in} g (\rho_0 - \rho_{in}) / \rho_0}{u_{in}^2}$$

$$u_{in} = \frac{F}{S_{in}}, \quad S_{in} = l_x \times l_y = \frac{\pi d_{in}^2}{4}, \quad d_{in} = \sqrt{\frac{4S_{in}}{\pi}}$$

$$R_0 = R_0^* \cdot \left(\frac{x_s}{L}\right)^{0.333} \cdot \left(\frac{D_{tank}}{L}\right)^{0.5}$$

l_x ：ディフューザ吐出面短辺寸法[m]

l_y ：ディフューザ吐出面長辺寸法[m]

d_{in} ：吐出面等価直径[m]（「4 鉛直流入方式」の場合の代表長さ）

x_s ：ディフューザ設置水深（吐出面設置水深）[m]

ある程度以上 Ar_{in} (Ar_{in}^*) が大きくなっても、鉛直上向き吐出面から流入した高温水は浮力の影響により加速されて水面付近に到達するため、蓄熱性能が向上しないことが明らかにされており（参考文献7、9）、ここでは、 $Ar_{in}^* > 1.4$ で $Ar_{in}^* = 1.4$ としている。この限界値（ $Ar_{in}^* = 1.4$ ）は Excel VBA 内で変更することが可能である。

なお、Ver1.1 および Ver2.11 で用いている近似式は、初期バージョンで用いている近似式と比較して、若干安全側で蓄熱性能を低めに評価するようにしている。

初期バージョンでは、

$$R_0^* = 10^b Ar_{in}^{*a}$$

$$a = -0.38809$$

$$b = 0.13516$$

$$Ar_{in}^* = Ar_{in} \cdot \left(\frac{x_s}{d_{in}}\right)^2, \text{ ただし、} Ar_{in}^* > 4 \text{ では } Ar_{in}^* = 4$$

$$R_0^* = R_0 \cdot \frac{L}{d_{in}} \cdot \left(\frac{x_s}{d_{in}}\right)^{-0.8}$$

$$Ar_{in} = \frac{d_{in} g (\rho_0 - \rho_{in}) / \rho_0}{u_{in}^2}$$

としていたが、今回のバージョンアップでより予測精度の高い近似式を使うこととして、上記のように初期バージョンを修正している。

近似式の求め方

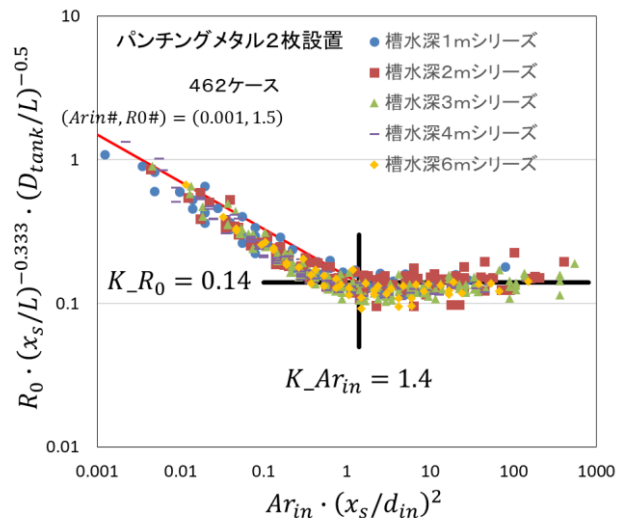
蓄熱性能を表すモデルパラメータである R_0 とディフューザや蓄熱槽の設計条件の関係を見直すことにより、下図のようなプロット図（参考文献14）が得られており、横軸値がそれ以上大きくなっても蓄熱性能が一定となりそれ以上蓄熱性能が向上しない条件

$$Ar_{in}^{\#} = Ar_{in} \cdot \left(\frac{x_s}{d_{in}}\right)^2 = K_{Ar} (= 1.4)$$

および、そのときの蓄熱性能を表す

$$R_0^{\#} = R_0 \cdot \left(\frac{x_s}{L}\right)^{-0.333} \cdot \left(\frac{D_{tank}}{L}\right)^{-0.5} (= 0.14)$$

が得られているとする。



ディフューザのサイズ（吐出面の短辺長さと長辺長さ）を想定して、蓄熱性能（ R_0 ）を推定する場合、横軸値は設計条件から計算できるが、縦軸値はプロット図の近似式に横軸値を代入して算出する必要がある。近似式としては、「上の図」を参照して、安全側で若干性能が低くなるような近似式を作成することとする。性能一定の範囲（横軸値 $\geq K_{Ar}$ ）の近似式2は $y = \text{LOG10}(K_{Ar})$ とするが、性能が低い範囲（横軸値 $< K_{Ar}$ ）の近似式1では、対数座標（ $Ar_{in}^{\#0}, R_0^{\#0}$ ）（「上の図」では、 $Ar_{in}^{\#} = 0.001, R_0^{\#} = 1.5$ ）と（ $\text{LOG10}(K_{Ar}), \text{LOG10}(K_{R0})$ ）を結ぶ直線 $y = ax + b$ とする。

近似式1は、対数座標（ $Ar_{in}^{\#0}, R_0^{\#0}$ ）と（ $\text{LOG10}(K_{Ar}), \text{LOG10}(K_{R0})$ ）を結ぶ直線

$$y = ax + b$$

$$a = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} = \frac{\text{LOG10}(K_{R0}) - \text{LOG10}(R_0^{\#0})}{\text{LOG10}(K_{Ar}) - \text{LOG10}(Ar_{in}^{\#0})}$$

$$b = y_1 - ax_1 = \text{LOG10}(R_0^{\#0}) - a \cdot \text{LOG10}(Ar_{in}^{\#0})$$

となる。

ただし、

$$x = \text{LOG10}(Ar_{in}^{\#})$$

$$y = \text{LOG10}(R_0^{\#})$$

である。

そして、設計条件から、横軸値

$$Ar_{in}^{\#} = Ar_{in} \cdot \left(\frac{x_s}{d_{in}}\right)^2$$

を算出し、横軸値 $Ar_{in}^{\#} < K_{Ar}$ の場合に、近似式 1 の $y = ax + b$ を用いて下のように縦軸値を算出することになる。

縦軸値は、

$$\text{LOG10}(R_0^{\#}) = \text{LOG10}\left\{R_0 \cdot \left(\frac{x_s}{L}\right)^{-0.333} \cdot \left(\frac{D_{tank}}{L}\right)^{-0.5}\right\} = a * \text{LOG10}(Ar_{in}^{\#}) + b$$

となることから、両辺の対数を指数の形に変形して、

$$R_0^{\#} = R_0 \cdot \left(\frac{x_s}{L}\right)^{-0.333} \cdot \left(\frac{D_{tank}}{L}\right)^{-0.5} = 10^{a * \text{LOG10}(Ar_{in}^{\#}) + b}$$

であり、最終的に、無次元パラメータ R_0 が以下のように算出できることになる。

$$R_0 = 10^{a * \text{LOG10}(Ar_{in}^{\#}) + b} \cdot \left(\frac{x_s}{L}\right)^{0.333} \cdot \left(\frac{D_{tank}}{L}\right)^{0.5}$$

横軸値

$$Ar_{in}^{\#} = Ar_{in} \cdot \left(\frac{x_s}{d_{in}}\right)^2$$

を算出し、横軸値 $Ar_{in}^{\#} \geq K_{Ar}$ の場合には、近似式 2 の

$$y = \text{LOG10}(K_{Ar})$$

により、設計条件から算出される $Ar_{in}^{\#} = Ar_{in} \cdot (x_s/d_{in})^2$ の値にかかわらず、 K_{Ar} から以下のように算出される。

$$R_0 = 10^{a * \text{LOG10}(K_{Ar}) + b} \cdot \left(\frac{x_s}{L}\right)^{0.333} \cdot \left(\frac{D_{tank}}{L}\right)^{0.5}$$

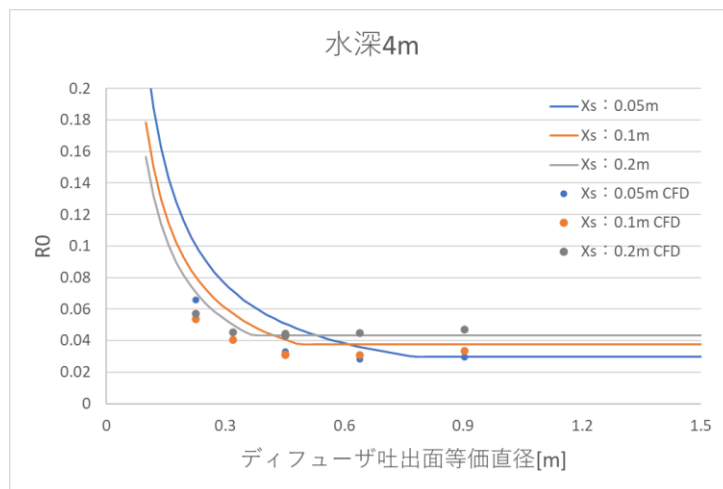
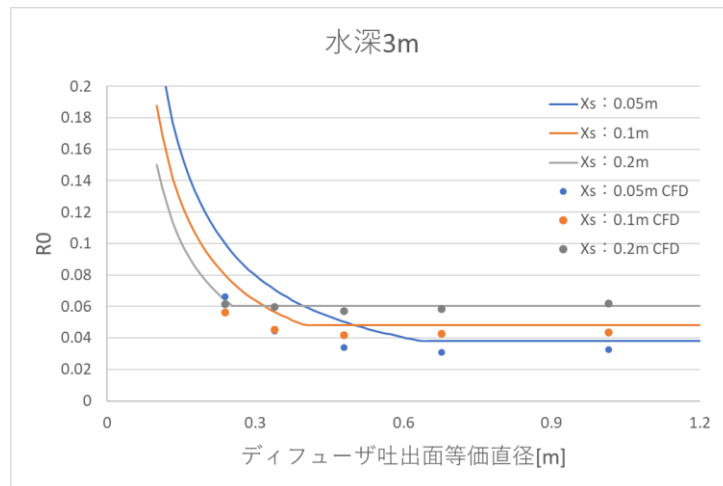
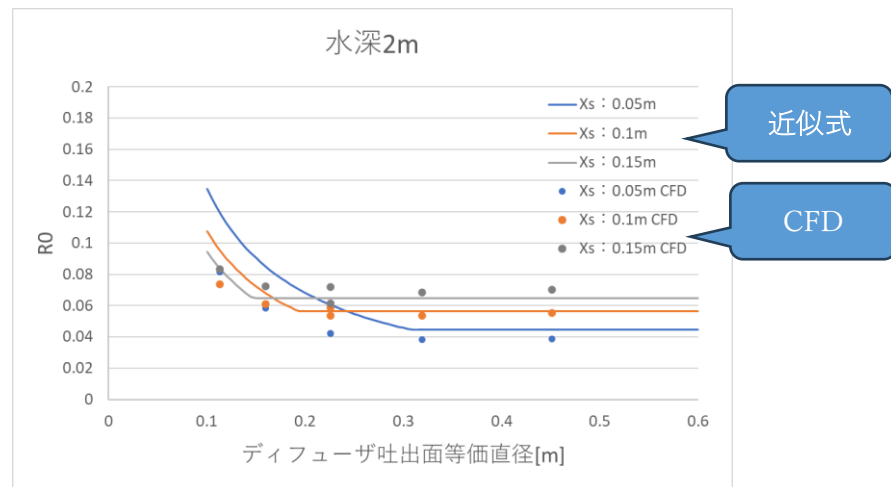
モデルパラメータ Pe_{tank} (槽ペクレ数[-])

槽ペクレ数は、ディフューザ流入方式にかかわらず、①蓄熱槽の設計条件から下記のように直接計算できる。

$$Pe_{tank} = \frac{UL}{\kappa} = \frac{FL^2}{\kappa V}$$

モデルパラメータ R_0 の近似式とディフューザ吐出面の等価直径および設置水深（高さ）との関係

○ディフューザ吐出面等価直径 d_{in} とモデルパラメータ R_0 の関係



近似式は、若干安全側を意識した単純な直線的な式であり、ディフューザが小さい場合の予測精度は悪いが、蓄熱性能がほぼ一定になる条件ではよく一致していることが分かる。

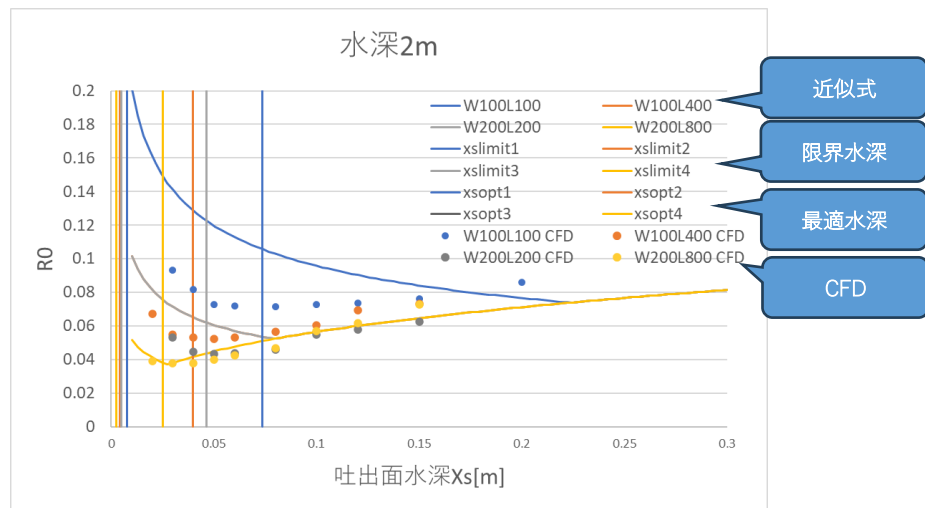
○ディフューザ吐出面設置水深 x_s とモデルパラメータ R_0 の関係

設定条件

槽サイズ：槽水深 2m、槽容量 9m³

流量：1.8m³/h（槽換水時間 5 時間）、槽内初期温度・流入温度：7℃・15℃

ディフューザサイズ：0.1m×0.1m、0.1m×0.4m、0.2m×0.2m、0.2m×0.8m、

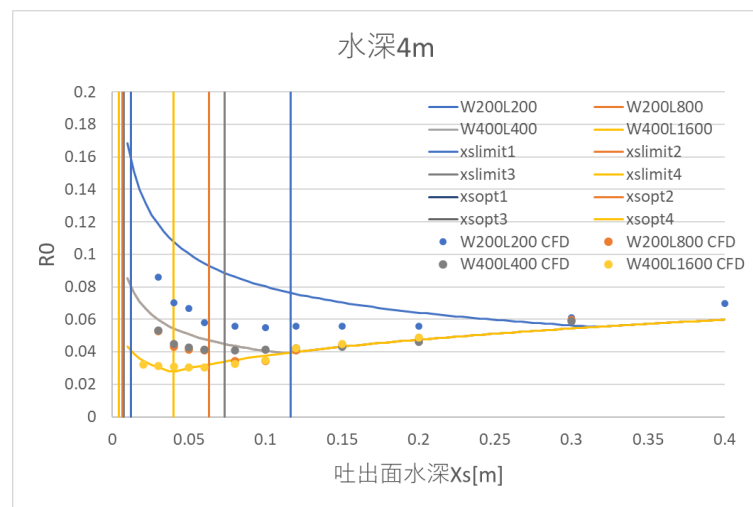


設定条件

槽サイズ：槽水深 4m、槽容量 36m³

流量：7.2m³/h（槽換水時間 5 時間）、槽内初期温度・流入温度：7℃・15℃

ディフューザサイズ：0.2m×0.2m、0.2m×0.8m、0.4m×0.4m、0.4m×1.6m、



ディフューザ吐出面の設置水深を細かく設定した条件でのCFD結果と比較した図であり、設置水深が浅い条件では予測精度は良くないが、安全側の予測となっていることが分かる。なお、「限界水深」と「最適水深」については後述を参照されたい。

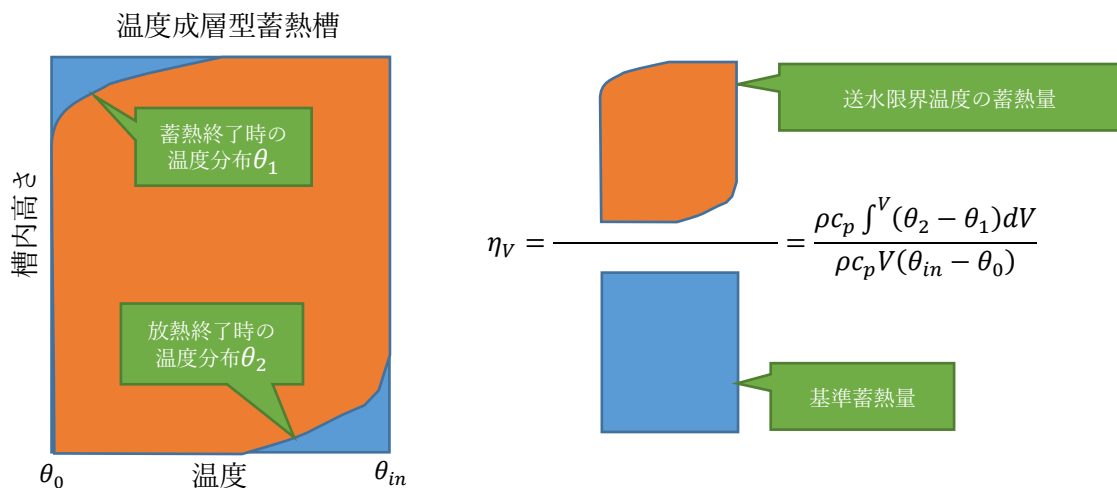
5. 蓄熱性能と蓄熱槽効率

「蓄熱槽効率」は、蓄熱槽の容量効率の指標として使われているが、いくつかの定義があり、ここでは蓄放熱終了時と放熱終了時の槽内温度分布から求められた蓄熱量（放熱量）を用いて、定流量・定温度入力での冷水蓄放熱サイクルにおけるこの蓄熱量を基準蓄熱量で除したものを、ここでの「蓄熱槽効率」としている。

ここでは、想定した蓄熱槽規模や鉛直流入方式ディフューザのサイズなどの条件と蓄熱性能の関係をみるために、蓄熱性能の指標として、「定流量・定温度入力での蓄放熱サイクルの蓄熱槽効率 η_V 」を定義する。

冷房運転を想定して、冷房開始時に蓄熱温度（例えば 7℃）で一様の槽内に、二次側からの還水が槽上部のディフューザを介して一定流量・一定温度（例えば 15℃）で流入があり、温度成層部が取水側の下部ディフューザ付近にまで降下して、槽から二次側に送水される水温が当初の蓄熱温度（例えば 7℃）から徐々に上昇して送水限界温度（例えば 8℃）に達したときに、放熱（放冷）を停止して蓄熱（蓄冷）に切り替える。次に、蓄熱運転を想定して、熱源側から槽下部のディフューザを介して一定流量・一定温度（例えば 7℃）で流入があり、温度成層部が取水側上部ディフューザ付近にまで上昇して、槽から熱源に送水される水温が徐々に低下して送水限界温度（例えば 12℃）に達したときに、蓄熱（蓄冷）を停止して放熱（放冷）に切り替える。このように蓄熱と放熱（蓄冷と放冷）を繰り返すことで、「槽内蓄熱量」として蓄熱終了時の温度分布と放熱終了時の温度分布に挟まれた部分が得られ、この蓄熱量の基準熱量に対する比として次式で求めることができる。

$$\eta_V = \frac{\rho c_p \int^V (\theta_2 - \theta_1) dV}{\rho c_p V (\theta_{in} - \theta_0)}$$



槽内温度分布と「定流量・定温度入力での冷水蓄放熱サイクルでの蓄熱槽効率 η_V 」

6-1. ディフューザ最適吐出面設置水深（ディフューザ吐出面の水面からの水深および槽底からの高さ）

鉛直流入方式のディフューザにおいては、浮力の影響を考えると、上部ディフューザでは吐出面が水面に近い方が、そして、下部ディフューザでは槽底に近い方が蓄熱性能は高くなると考えられるが、水面や槽底との隙間寸法が小さくなりすぎると、ディフューザ吐出面からの鉛直方向の流速は小さくても、ディフューザ周辺部と水面や槽底との間を水平に槽内に流入する流速が大きくなり、ディフューザ周辺での混合が促進されることになるためにかえって蓄熱性能が悪化する。したがって、蓄熱性能が最も高くなるディフューザ吐出面の最適設置水深（高さ）が存在することになり、ディフューザ吐出面周囲を水平に流出する流速 u_h を代表速度、吐出面設置水深（高さ） x_s を代表長さとして定義される下記の水平入口アルキメデス数が、おおよそ2のときに最高の蓄熱性能となることが明らかにされている（参考文献13）。

$$Ar_{in-h} = \frac{x_s g (\rho_0 - \rho_{in}) / \rho_0}{u_h^2}$$

$$u_h = \frac{F}{2(l_x + l_y)x_s}$$

$$Ar_{in-h} = 2$$

より、最適吐出面設置高さ x_{s-opt} が

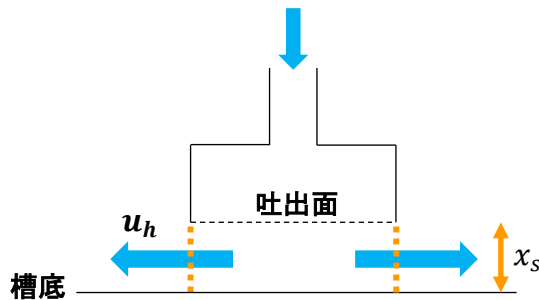
$$x_{s-opt} = \left[\frac{2F^2}{4(l_x + l_y)^2 \cdot g(\rho_0 - \rho_{in}) / \rho_0} \right]^{\frac{1}{3}}$$

l_x ：ディフューザ吐出面短辺寸法[m]

l_y ：ディフューザ吐出面長辺寸法[m]

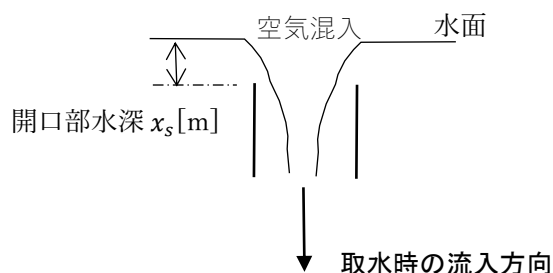
となる。

下の図は、槽内下部に設置されたディフューザでの状況を示している。



槽内下部に設置されたディフューザにおける代表流速 u_h と代表長さ x_s

6-2. 鉛直流入方式の空気混入リスクに関する吐出面限界設置水深と限界取水流量



鉛直流入方式の場合の取水時空気混入リスク

鉛直流入方式のディフューザにおいては、上部に設置されたディフューザが取水口となる運転モードになったときに、ディフューザ吐出面が水面に極端に近い場合、水面から空気を吸い込むリスクがある。鉛直流入方式の場合には、基本的には、吐出面が水面に近い方が蓄熱性能は高くなるが、空気混入リスクは避けなくてはならない。

空気を吸い込むような状況において、ディフューザ吐出面に流入する流量は、吐出面周囲からディフューザ上端を越流して流れ込んで下方へ取水される流量であり、水理学における「開水路のせきの越流」の理論と同じ考え方の理論から求めることが出来る（参考文献 11、12）。

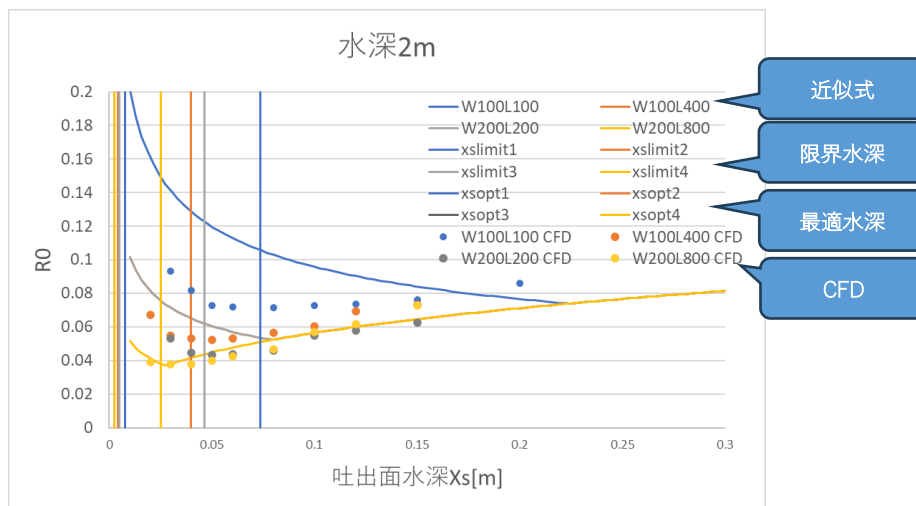
ディフューザ吐出面の周長を越えてくる流量と開口部水深（吐出面設置水深）の関係は次式で与えられる。

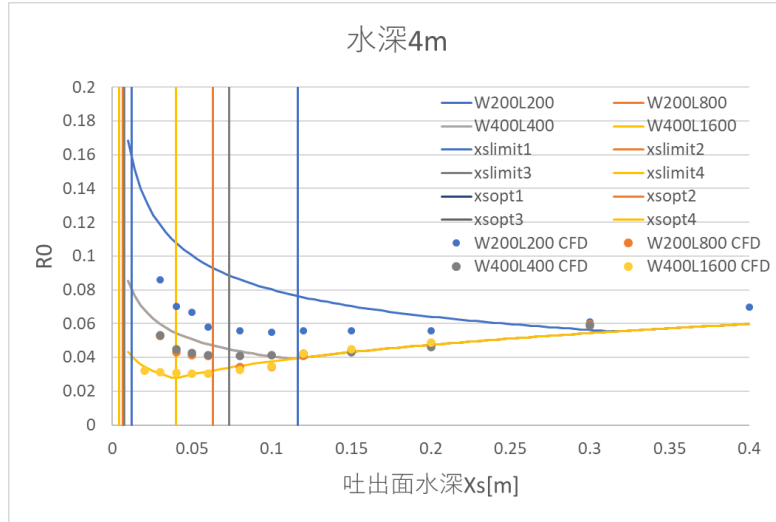
$$F_{limit} = \frac{2}{3}CW\sqrt{2g} \cdot x_{s,limit}^{\frac{3}{2}}$$

$$W = 2(l_x + l_y)$$

ここで、設置水深を規定した場合には、 F_{limit} よりも多い取水流量となったときに空気混入が発生する可能性が高く、逆に、取水流量を規定した場合には、 $x_{s,limit}$ よりも水面からの水深を浅くすると空気混入が発生する可能性が高くなることを示している。

再掲 「ディフューザ吐出面設置水深 x_s とモデルパラメータ R_0 の関係」





先に示した図と同一であるが、ディフューザ最適吐出面設置水深（高さ）（図中「最適水深」）および空気混入リスクに関する吐出面限界設置水深（図中「限界水深」）を、近似式とCFD結果の図に追記した図である。「最適水深」については、近似式とは若干乖離しているが、CFD結果とは大きい差がないことが分かる。「限界水深」については、極めて小さいために実質的には影響が小さいといえる。

7. 並列連結槽がある場合の隔壁連通口必要面積

並列に連結された二つの槽が水面付近と槽底付近の隔壁連通口で接続されていれば、それぞれの槽の温度成層部の高さに差異が生じた場合でも、両槽の鉛直温度分布のずれによる浮力の影響によって、温度成層部の高さが近づくように連通口に流れが生じる。温度成層部の高さの差異が大きいほど連通口を流れる流量が大きくなり、逆に、温度成層部の高さの差異を小さく保とうとすると連通口サイズを大きくする必要がある。

ここでは、連通口内の平均流速 u_c を代表速度として、連通口直径 d_c を代表長さとして定義される下記の連通口に関する無次元数である連通口アルキメデス数を導入する。

$$Ar_c = \frac{d_c g (\rho_0 - \rho_{in}) / \rho_0}{u_c^2}$$

隣り合う槽の温度成層部の高さの差異による静圧差を駆動力として連通口に流れが生じ、両槽の蓄熱バランスを示す蓄熱バランス比 R_H が一定となったときにそれらの関係式として次式が得られる。

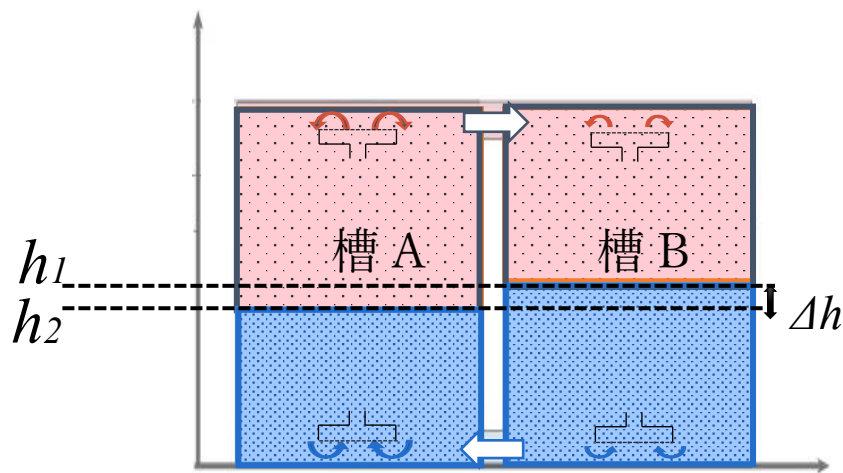
$$d_c = \alpha_c^2 R_H L Ar_c$$

$$R_H = \frac{\Delta h}{L}$$

$$u_c = \frac{4F_c}{N_c \pi d_c^2}$$

そして、これらの式から、蓄熱バランス比 R_H を一定に保つために必要な連通口直径を求める式として下式が得られる（参考文献1、2）。

$$d_c = \frac{\{4F_c / (N_c \pi)\}^{\frac{1}{2}}}{\{\alpha_c^2 R_H L g (\rho_0 - \rho_{in}) / \rho_0\}^{\frac{1}{4}}}$$



隣り合う槽の隔壁に設けられた連通口と温度成層部の高さの差異 Δh

記号一覧

a : 予測式の係数（暫定値であり変更可能）

Ar_c : 連通口アルキメデス数[-]（連通口の流入特性を表す無次元パラメータ）

Ar_{in} : 入口アルキメデス数[-]（ディフューザの流入特性を表す無次元パラメータ）

Ar_{in}^* : 修正入口アルキメデス数[-]（ディフューザ設置水深・高さ x_s などで修正した入口アルキメデス数）

Ar_{in-h} : 水平吹出し入口アルキメデス数[-]

b : 予測式の係数（暫定値であり変更可能）

C : せきの流量係数(=0.63)

c_p : 水の定圧比熱[kJ/(kgK)]

D : 円盤直径[m]

d_c : 連通口直径[m]

d_{in} : ディフューザの代表長さ

円管直径[m]（「1 円管方式」の場合）

開口上下幅[m]（「2 スロット・せき方式」の場合）

開口上下幅[m]（「3 円盤方式」の場合）

吐出面等価直径[m]（「4 鉛直流入方式」の場合）

F : 流量[m³/s]

F_c : 並列槽がある場合の隔壁連通口を通過すべき流量[m³/h]

F_{limit} : 上部ディフューザでの取水限界流量[m³/s]（「4 鉛直流入方式」の場合）

g : 重力加速度[m/s²]

h : 槽底からの高さ[m]

Δh : 隣り合う槽の温度成層部の高さの差異[m]

Δh_{out} : 取水域（遷移域）の厚さ（範囲）[m]

ℓ_0 : 初期完全混合域深さ[m]

l_x : デイフューザ吐出面短辺寸法[m] (「4 鉛直流入方式」の場合)
 l_y : デイフューザ吐出面長辺寸法[m] (「4 鉛直流入方式」の場合)
 L : 槽水深[m]
 N_c : 連通口個数 (水面付近と槽底付近それぞれ N_c 個ずつ設置)
 Pe_{tank} : 槽ペクレ数[-] (モデルパラメータ)
 R_0 : 無次元初期完全混合域深さ[-] (モデルパラメータ)
 R_0^* : 修正無次元初期完全混合域深さ[-] (デイフューザ設置水深・高さ x_s などで修正した R_0)
 R_H : 蓄熱バランス比[-] (=隣り合う槽の温度成層部の高さの差異/槽水深)
 S_{in} : 吐出面面積[m²]
 t : 時間[s]
 Δt : 計算時間間隔[s]
 t^* : 無次元時間 (槽換水回数) [-]
 U : 槽水平断面流速 ($U = F/(V/L)$) [m/s]
 u_c : 連通口流速[m/s] (=連通口 1 個当たりの流量/連通口 1 個の断面積)
 u_h : デイフューザ周辺と槽底の間の水平吹出し速度[m/s]
 u_{in} : 流入流速[m/s]
 $v(h)$: 槽底から高さ h の場所の取水流速[m/s]
 V : 槽容量[m³]
 V_d : デイフューザ内部の容積[m³]
 W : 開口横幅[m] (開口部 (吐出面) の水平方向の幅) (「2 スロット・せき方式」の場合)
 W : 吐出面周長[m] (「4 鉛直流入方式」の場合)
 x_s : デイフューザ設置水深・高さ (吐出面設置水深・高さ) [m]
 $x_{s,limit}$: 上部デイフューザでの吐出面限界設置水深[m] (「4 鉛直流入方式」の場合)
 x_{s-opt} : 下部デイフューザ最適設置高さ (吐出面高さ) [m]
 z : 距離[m]
 α : 連通口の流量係数 (=0.75)
 α_c : 連通口の流量係数 (=0.75)
 β : 体膨張率[1/K]
 θ : 温度 [°C]
 θ_0 : 槽内初期温度 [°C]
 θ_1 : 熱源側への送水温度が限界温度に達して蓄熱が終了したときの槽内鉛直温度分布[°C]
 θ_2 : 二次側への送水温度が限界温度に達した放熱が終了したときの槽内鉛直温度分布[°C]
 θ_{in} : 入力温度 [°C]
 θ_{out} : 送水温度 (取水温度) [°C]
 θ_T : 平均取水温度 (取水側デイフューザに流入する取水の平均温度) [°C]
 $\bar{\theta}^*$: 無次元槽内平均温度 [-]
 κ : 熱拡散率(=0.0005 m²/h) [m²/s]
 $\Delta\rho = \rho_0 - \rho_{in}$: 水の密度差[kg/m³]
 ρ_{in} : 入力温度での水の密度[kg/m³]
 ρ_0 : 槽内初期温度での水の密度[kg/m³]

*：無次元変数

参考文献

- 1) 河江美里・相良和伸・小林知広・山中俊夫・甲谷寿史・桃井良尚・岩田剛：並列連結式温度成層型蓄熱槽の蓄熱バランス制御のための連通口設計法、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集(2016.6)、pp.173-176
- 2) 北野博亮・岩田剛・相良和伸・河江美里・永井久也：並列連結式温度成層型蓄熱槽の連通口簡易設計法に関する研究、空気調和・衛生工学会論文集 (2019.8)、No.269、pp.1-10
- 3) 横井俊幸・岩田剛・相良和伸・北野博亮・永井久也：水平入力型流入口を有する温度成層型蓄熱槽における CFD 解析による検討ー水平円管型流入口とスロット型流入口のパラメータ同定ー、日本建築学会東海支部研究報告書 55 号 (2017.2)、pp.325-328
- 4) 江崎大将・永井久也・岩田剛・北野博亮・相良和伸：円盤型流入口を有する温度成層型蓄熱槽における性能限界に関する研究、日本建築学会東海支部研究報告書 56 号 (2018.2)、pp.385-388
- 5) 相良・前田・浅野・中原：蓄熱槽に関する研究 第 4 報、空気調和・衛生工学会論文集、No.30, pp.9-19, 1986
- 6) 空気調和・衛生工学会：空気調和・衛生工学便覧 2 機器・材料編 第 9 章 蓄熱装置、2010
- 7) 相良・岩田・北野・永井・甲谷・山中・桃井・古賀・一谷・西山：温度成層型蓄熱槽における鉛直流入型ディフューザーの性能評価と設計手法、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集 第 2 巻、pp.101-104、2015
- 8) 相良和伸・岩田剛・山中俊夫・甲谷寿史・桃井良尚：温度成層型蓄熱槽の水平入力型流入口における性能向上限界の理論的検討、日本建築学会大会学術講演梗概集 (2012.9)、pp.1031-1032
- 9) 岩田剛・相良和伸・北野博亮・永井久也：鉛直流入ディフューザを有する温度成層型蓄熱槽における CFD 解析による性能予測手法の検討、空気調和・衛生工学会論文集、No.222、pp.33-40、2015.9
- 10) 山澤・相良・山中・甲谷・桃井・岩田：鉛直流入ディフューザーを持つ温度成層型蓄熱槽の槽内混合モデルによる蓄熱性能予測、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集 第 2 巻、pp.237-240、2017
- 11) 多良・相良・山中・甲谷・桃井：温度成層型蓄熱槽の鉛直流入ディフューザーにおける理論限界流量の CFD による検証、日本建築学会大会学術講演梗概集 (2015.9)、pp.1397-1398
- 12) 多良・相良・山中・甲谷・桃井：温度成層型蓄熱槽の鉛直流入ディフューザにおける空気混入限界の検討、空気調和・衛生工学会論文集、No.244、pp.1-7、2017.7
- 13) 相良・山澤・岩田・山中：温度成層型蓄熱槽における鉛直流入型ディフューザ流入条件の影響、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集 第 2 巻、pp.141-144、2019
- 14) 相良・山澤・岩田・山中：温度成層型蓄熱槽における鉛直流入型ディフューザの蓄熱性能予測法の検討、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集 第 2 巻、pp.81-84、2021
- 15) 相良・山澤・岩田・山中：温度成層型蓄熱槽における鉛直流入型ディフューザの流入性状の評価、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集 第 2 巻、pp.157-160、2018