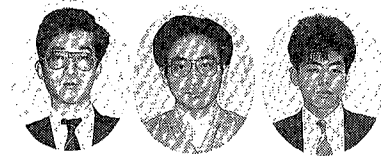


# 新型リボン翼『ログボーン』の開発 への数値解析の適用

## Application of CFD to the Development of a New Helical Ribbon Impeller, "LOGBORN"



技術開発本部 研究開発部  
高 田 一 貴  
Kazutaka Takata  
菊 池 雅 彦  
Masahiko Kikuchi  
(化)技術部 設計第1課  
伊 藤 久 善  
Hisayoshi Ito

The development of a new helical ribbon impeller LOGBORN was supported by Computational Fluid Dynamics studies to analyze effects of its ribbon and frame dimensions, and to examine the difference with conventional ribbon impellers. The results of CFD study showed that the flow pattern of the new impeller largely depends on the ribbon and frame dimensions, and the frame serves not only as a support member but also as a mixing member to effectively shorten the mixing time by changing a flow pattern formed by the ribbon blades and its frame. Computational results also indicates that the flow pattern of the new impeller is quite different from the conventional ribbon, enabling to reduce the mixing time to about a half of the conventional ribbon impeller.

### ま え が き

このたび開発した新型リボン翼『ログボーン』の構造の特長とその諸性能について本誌別報第3頁にて報告した。ここでは数値流体力学(Computational Fluid Dynamics; 以下CFDと略称)をログボーンの開発支援ツールとして利用し、リボン寸法を変化させた種々の条件にて計算を繰り返し流れ場の多くの情報を得ることにより、リボンの最適寸法を決定することを目的とする。

本報告では軸無し・フレーム式の新型リボン翼に関して

- (1) 軸の有無の流動混合に及ぼす影響
- (2) リボン幅、リボンピッチの流動混合に及ぼす影響
- (3) フレームの寸法とその挿入位置の流動混合に及ぼす影響

を主としてCFDにより明らかにした。(2)については混合特性上最適となるリボン寸法を決定することを試み、(3)については一連のCFDの結果より最適寸法と最適取付位置の決定法を示すことにより、これら一連の考察をログボーンを構成する翼寸法決定に反映させた。また新型リボン翼が軸を有する従来型リボン翼に較べて混合性能上優れた特性を有するかどうかを同様の手法により明らかにすることを試みた。

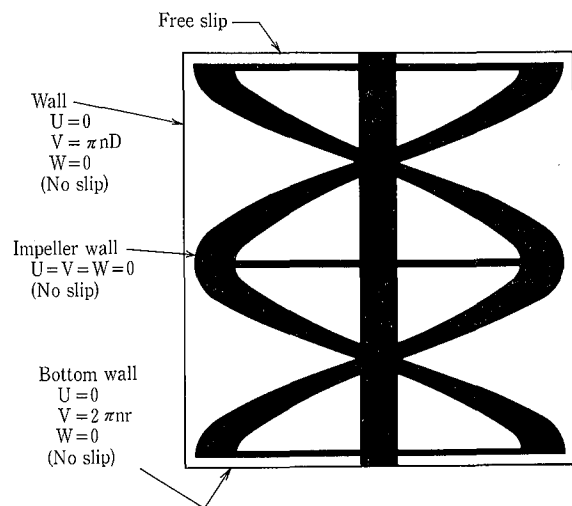
### 1. 数値解析方法

攪拌流動を支配する方程式は回転円筒座標系で表示された3次元の運動量輸送方程式である。解析はまず運動量輸送方程式を解いて槽内の流速分布を求めたあと、流速分布の計算値を物質の輸送方程式に代入して濃度分布を求めた。本解析ではこれら方程式を市販の熱流体解析コードを改造したものを用いて解いた。コンピュータにはEWS(エンジニアリングワークステーション)を使用した。

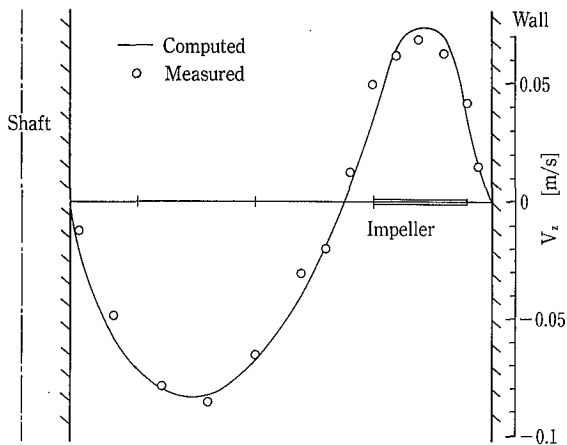
第1図に境界条件を示す。翼面、槽壁面にはすべりなし条件を、液面にはすべりあり条件をそれぞれ与えた。また液面形状を水平とした。攪拌レイノルズ数が10程度であれば液面を近似的に水平とみなしてさしつかえないことを実

験で確認した。攪拌槽の底面も水平とした。実際の翼は半楕円もしくは円錐のボトム内に複雑な形のボトムリボンを有するが、この形状を円筒座標系のメッシュで生成させるのが困難であった。しかし直胴部の流動混合状態はボトムの形状に依存する所が少ないので、ここで目的とする解析には上記の簡略化モデルで対応できると考えた。

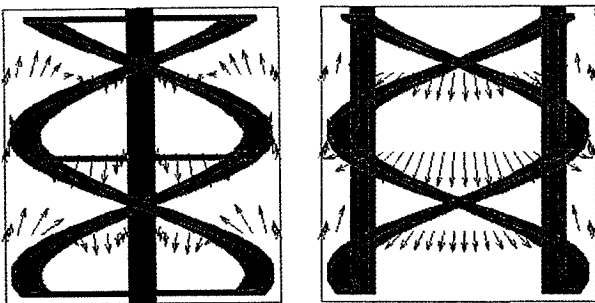
計算格子数は概ね50000~70000個とした。計算時間は圧力の変化率が充分小さくなって定常に達するまでに1ケースにつき70~90時間を要した。攪拌条件は攪拌レイノルズ数を10とし、リボンのピッチ、幅を変化させて行った。翼の回転方向は、壁面で上昇流を生じ槽中心部で下降流を生じる方向とした。



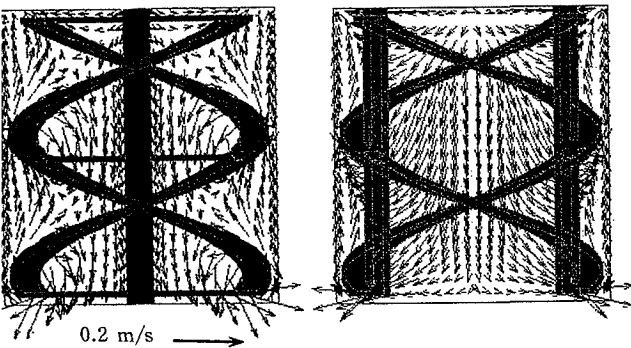
第1図 数値解析の境界条件  
Fig. 1 Boundary conditions used in the simulations



第2図 軸方向流速分布の計算値と実測値との比較  
Fig. 2 Comparison of computed and measured axial velocities



第3図 従来型リボン翼と新型リボン翼の軸方向流速分布の比較  
Fig. 3 Comparison of conventional and new DHR's axial velocities

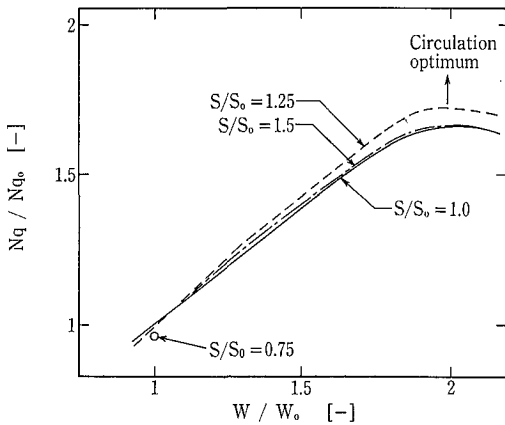


第4図 従来型リボン翼と新型リボン翼の r-z 面内流速分布  
Fig. 4 Comparison of conventional and new DHR's velocity distributions in r-z plane

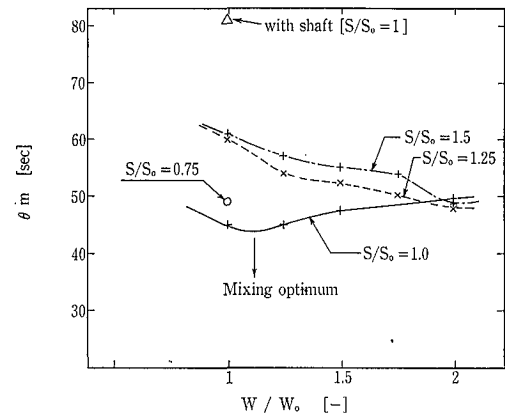
従来型リボン翼の軸方向流速分布について計算値とレーザー流速計による実測値とを比較し第2図に示す。これより上記の解析条件下で計算値は実測値を10%以内の精度で予測できることがわかった。

## 2. 従来型リボン翼と新型リボン翼の流動特性の相違

第3図に軸を有する従来型リボン翼と軸無し・フレーム式の新型リボン翼の軸方向流速分布の計算結果を示す。これより従来型リボン翼では槽中心部の流速が遅く流動性の悪さが予測される。一方新型リボン翼では槽中心部で最大



第5図 循環流量に及ぼすリボンピッチとリボン幅の影響  
Fig. 5 Influence of ribbon pitch and ribbon width on circulation flow rate



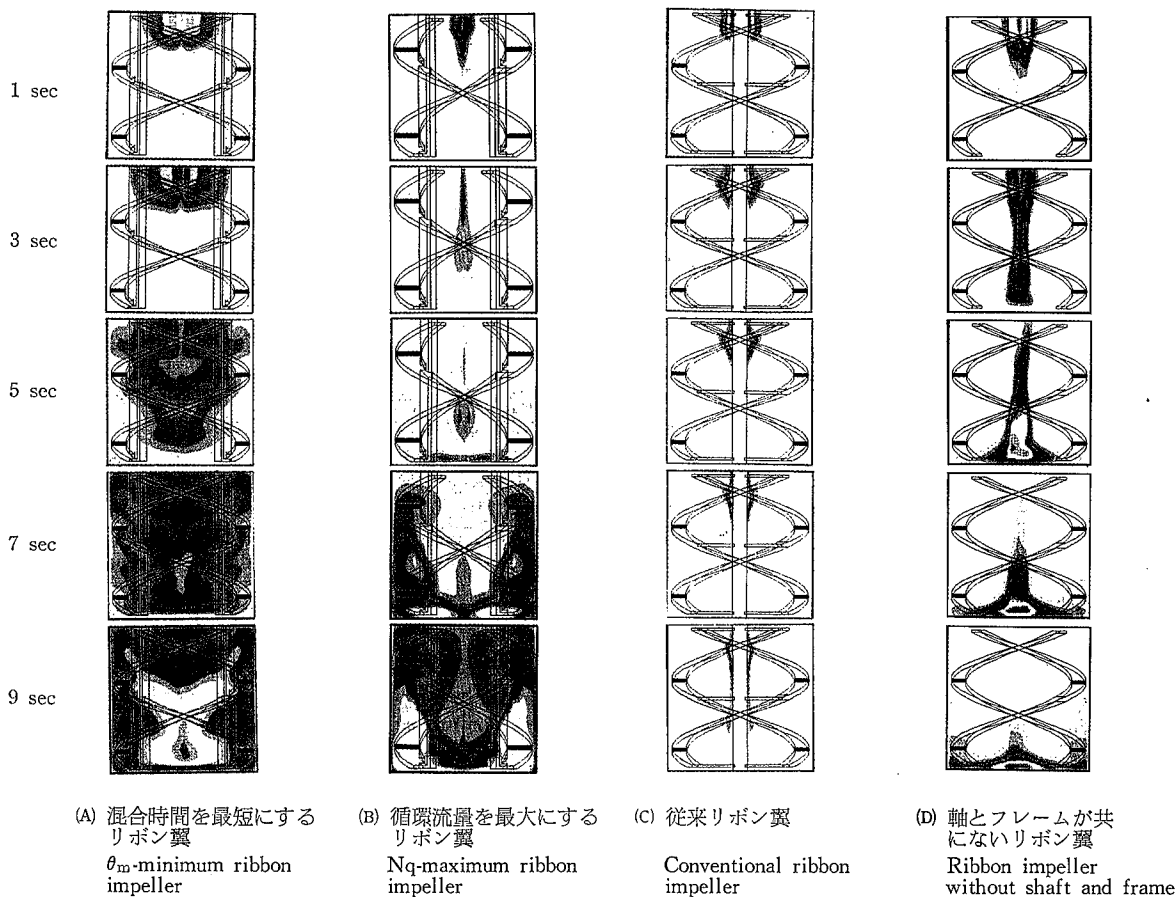
第6図 混合時間に及ぼす翼ピッチとリボン幅の影響  
Fig. 6 Influence of ribbon pitch and ribbon width on mixing time

流速になるため従来型リボン翼に較べて格段に流動性が向上するものと考えられる。第4図に従来型リボン翼と新型リボン翼の r-z 面内の流速分布(フローパターン)の計算結果を示す。従来型リボン翼では軸に沿って流れが下降し壁面で上昇するという循環型のフローパターンを形成するのに対し、新型リボン翼では槽の中央付近で軸方向下降流に加えリボンのかなり内側まで半径方向流が同時に形成されている。次にこれらフローパターンが混合に及ぼす影響を他の翼の結果と合わせて述べる。

## 3. 循環・混合特性に及ぼすリボン幅、リボンピッチの影響

第5図はリボン翼の循環流量をリボン幅に対してプロットした結果である。循環流量は軸方向流速値を軸に垂直な断面内で積分することにより求められる。これより、循環流量はリボン幅の増加と共に増加し、あるリボン幅になると頭打ちになり減少していく。またリボンピッチによっても循環流量が異なる。リボンピッチが標準ピッチの1.25倍の時に循環流量が最も大きくなる。これらの結果から循環流量が最大になる翼構成が決定される。

第5図の各リボン翼の混合時間を計算し、第6図に結果



第7図 トレーサー濃度分布の経時変化による各種リボン翼の混合状況の比較

Fig. 7 Comparison of several ribbon impellers in tracer mixing process shown by concentration contours

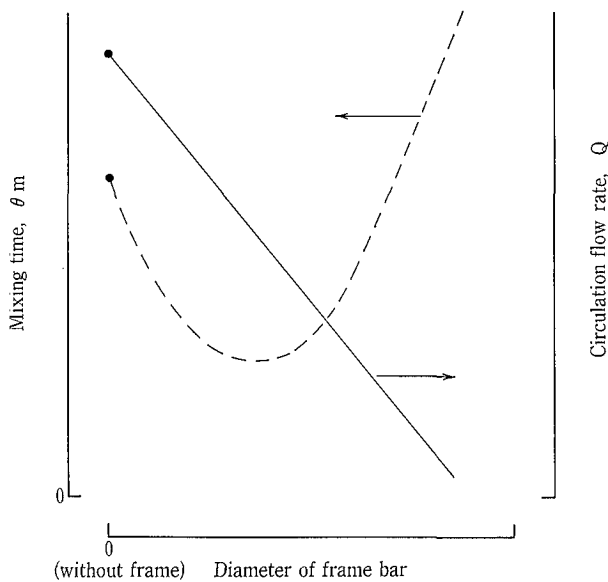
を示す。この計算では槽内19点の濃度の経時変化を検出し、平均濃度の±1%以内に19点の濃度変動が収まった時間をもって混合時間とした。リボン幅により混合時間も変化し、その変化の挙動はリボンピッチにより異なる。リボンピッチ  $s/s_0=1$  の場合、混合時間がリボン幅の増加と共に減少して最小値を示したあと再び増加していく。リボンピッチ  $s/s_0=1.25, 1.5$  ではリボン幅の増加と共に混合時間が単調に減少し、リボン幅  $w/w_0$  が2付近でリボンピッチが1の混合時間とほぼ同一値になる。混合実験の観察によれば、リボンピッチが比較的大きくリボン幅が比較的小さい場合、液面付近での混合が遅れ、リボン幅が大きくなって液面付近での吸い込み力が大きくなるとこの混合遅れが解消された。また、リボンピッチが1の場合はリボン幅が比較的小さくとも液面の混合遅れが生じないだけでなく、むしろ少ない循環回数で混合が終了する傾向が認められた。こうして本図より混合時間を最短にする翼構成が決定される。

興味深いことに、第6図の混合時間が最短になるリボン寸法と第5図の循環流量が最大になるリボン寸法とは異なる。この点をさらに検討するため、第7図(A)~(D)の4種リボン翼について液面から投入したトレーサーの混合シミュレーションを行い比較した。

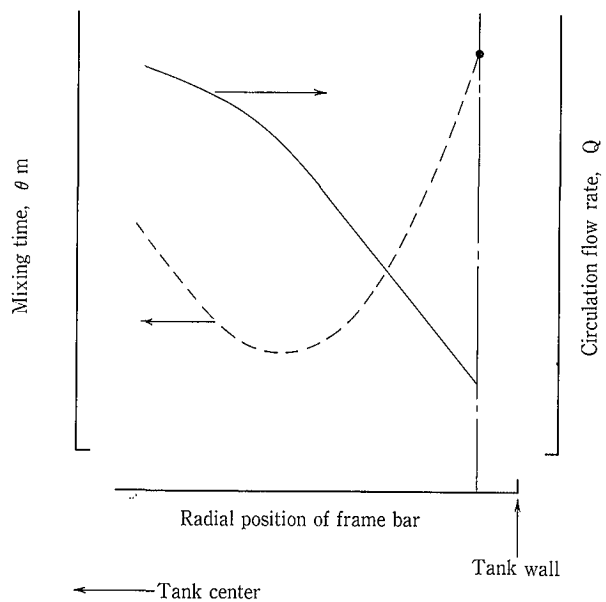
- (A) 混合時間を最短にするリボン翼
- (B) 循環流量を最大にするリボン翼
- (C) 従来型リボン翼
- (D) 軸無し・フレーム無しリボン翼

(B)の循環流量は(A)のその約1.7倍あるが、槽内へのトレーサーの分散する速度は(A)の方が速い。(A)は液面から投入されたトレーサーが槽内で軸方向と半径方向の2方向へ同時に散らばるようなパターンで輸送されるのに対し、(B)では吸い込み力が強い反面半径方向への輸送力が劣るため循環型の色彩が強い輸送パターンになる。混合時間の計算値も(A)の方が速く、実験結果もそのようになった。さらに(A)と(D)を比較した場合、これらの違いはフレームがあるかないかだけの違いであるが、混合状態が著しく異なることが示されている。つまり混合時間を最短にするリボン翼(A)ではリボン寸法とフレームの相互作用により分散混合を促進するフローパターンになる。これまでのリボン系の翼に対してなされていた解釈は循環流量が増加すればそれに反比例して混合時間が短くなるという考え方であった。しかしフレーム構造の新型リボン翼では、フレームを挿入することにより上昇流と下降流との間で流体の入れ替えが促進され混合に適したフローパターンを作ることが出来ると考えられる。次節で流動混合に及ぼすフレーム寸法とその取付位置の影響について言及する。

なお従来型リボン翼(C)の混合過程をみると、トレーサーは軸にまとわりつくように軸方向のみに輸送されている。混合時間を最短にするリボン翼(A)では従来型リボン翼に比べてトレーサーの輸送が著しく促進されている様子が示されている。混合時間の計算値も(A)の方が(C)のその約半分に短縮される。



第8図 循環流量及び混合時間に及ぼすフレーム径の影響  
Influence of frame diameter on circulation flow-rate and mixing time



第9図 循環流量及び混合時間に及ぼすフレーム取付位置の影響  
Influence of frame position on circulation flow-rate and mixing time

#### 4. 循環・混合特性に及ぼすフレーム寸法とその取付位置の影響

第8図に循環流量と混合時間に及ぼすフレーム太さの影響を示す。ここで示した関係は第6図と第7図(A), (D)より予想できる結果である。すなわちフレーム径が大きくなると軸方向への液の送りを阻害するため循環流量は少なくなる。しかし混合時間はフレーム径の増加と共に減少し、あるフレーム径を境として増加する傾向になる。つまり適当な太さのフレームを挿入すれば槽内の上昇流と下降流との間で流体の交換が促進されるため混合時間を短縮させる効果が生じるが、フレームが大きすぎたり小さすぎたりするとむしろ混合時間を長くすることになる。

第9図に循環流量と混合時間に及ぼすフレーム取付位置の影響を示す。フレームを槽中心側に設置すると上下循環流への阻害は比較的小さいが、槽壁側に設置するとリボンによる上方への液の送りを直接遮ることになり循環流量が減少する。フレームの取付位置を槽中心側から槽壁側に変化させると、混合時間はある取付位置を最小値とする関係となる。

このように、新型リボン翼『ログボーン』の最大の特長はフレームの大きさとその取付位置ならびにリボン寸法とのコンビネーションにより、槽内の混合を飛躍的に促進する構成になっている。

#### むすび

新型リボン翼を構成するリボン及びフレームの流動混合に及ぼす影響をCFDを用いて明らかにした。また従来型リボン翼と新型リボン翼の流動混合特性についても同様の手法により明らかにした。その結果を次に示す結論を得た。

- (1) 軸を有する従来型リボン翼と軸無・フレーム式の新型リボン翼のフローパターンは著しく異なり、新型リボン翼の混合時間は従来型リボン翼のその約半分に短縮される。
- (2) 新型リボン翼のフローパターンはリボン寸法とフレーム寸法に大きく依存し、混合時間を最短にするこれら寸法が存在する。
- (3) 新型リボン翼のフレームは機械強度をもたせるための挿入物と考えられていたが、その寸法と配置及びリボン寸法との組み合わせを工夫すればフローパターンを変え混合時間を大いに短縮する効果をもたらす。

#### [使用記号]

d	= 翼径	[m]
Nq	= 無次元循環流量, $Q/nd^3$	[-]
Nq <sub>0</sub>	= 基準リボンの無次元循環流量	[-]
n	= 翼回転数	[1/s]
Q	= 循環流量	[m <sup>3</sup> /s]
s	= リボンピッチ	[m]
s <sub>0</sub>	= 基準リボンピッチ	[m]
r	= 半径方向	[m]
Vz	= 軸方向流速	[m/s]
W	= リボン幅	[m]
W <sub>0</sub>	= 基準リボン幅	[m]
θ <sub>m</sub>	= 混合時間	[sec]

#### [引用文献]

- 1) 菊池雅彦, 高田一貴, 岡本幸道: 神鋼パンテック技報, Vol. 37, No. 3 (1993)