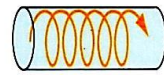


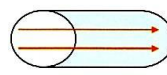
# 血流、乱流（1）

## — 流体力学の基礎 —

<https://l-hospitalier.github.io>



パルシングフラッシュ法



通常のフラッシュ法

【 図4 パルシングフラッシュ法 と 通常のフラッシュ法 】

2018. 6

【パスカルの原理】「静止流体の圧力はどこでも同一」。油圧機器の動作原理。

圧力の単位は mmHg や Pa（パスカル、SI 単位系<sup>\*1</sup>）。静止流体には圧力勾配がなく（圧力勾配があれば流体は流動）圧力は無方向性で、連続した流体のどこでどの方向で測定しても同一。【層流】壁に接触している流体

の速度はゼロ（no slip condition）。血液が管内で移動を始めると壁に近い流体は粘性により遅く、中心部は減速されにくいので速くなり、助走区間（entrance region）を過ぎると管内の血液速度分布は放物線（2次曲線）となり（速度勾配の1次微分が一定=最小）、研究者の名前に因みハーゲン・ポアズイユ流（Hagen-Poiseuille flow）と呼ぶ（流動抵抗最小、右上図）。中心静脈（CV）での血流はこの状況で、ベルヌーイの定理により流速の早い中心部は静圧が低く CV カテは流れの中心に保持される。CV カテの感染は内壁に付着する血液中の脂肪や蛋白が作るバイオレイヤーへの感染。CV ではレイノルズ数が小さく定常層流で速度分布（velocity profile）は放物線。管壁のずり応力は小さく流速による血栓除去効果は小さい。CV 感染防止は CV カテのフラッシュ時に速度分布が平坦（壁での速度勾配が急）で壁の血栓除去作用が強いパルシング・フラッシュ（数回に分けて加圧）と陽圧ロックを厳守。【ベルヌーイの定理】

流動流体で流線に直角の面の方向で測るのが静圧（側圧、static pressure）、流線と同軸で（上流に向けて）測定するのが総圧（全圧、total pressure）。総圧は静圧 P+動圧 (1/2) ρv<sup>2</sup> で与えられる。ρ は流体密度、v は流速。ある程度の直径を持つ管路におけるエネルギーの総和は「圧力エネルギー P<sub>1</sub>」+「速度エネルギー ρv<sub>1</sub><sup>2</sup>」+「位置エネルギー ρgz<sub>1</sub>」=一定。これが渦なし定常流で成立するベルヌーイの定理（1738）。オイラーにより運動方程式から誘導、定式化された（1752）。流速が早くなると静圧は減少するが流速がもとに戻ると静圧は元の値に回復する（運動エネルギーの保存則）。但し渦ができる場合は渦の中での粘性による運動エネルギーの熱への変換が起き、静圧は元の値に回復しない。これが形状効果による（回復できない）圧力損失（熱エネルギーまで含めればエネルギーは保存）。直孔型（end-hole）カテーテルを血管の上流に向けて測ると総圧を測定（この場合は測定孔の直前で血流がせき止められ（淀み点）静止流体での圧測定となる）、側孔型カテでは流速は維持され静（側）圧を測定<sup>\*2</sup>。動圧は血流速 0.5m/s で 2 mmHg 程度<sup>\*3</sup>。潜水艦は 5 m/s (18km/h) で潜航すると v が 10 倍で艦首の淀み点の動圧 (1/2) ρv<sup>2</sup> は 100 倍。艦尾にも淀み点ができ艦尾の総圧がどこまで回復するかで抵抗（=圧力差×断面積）が決まる。航空機では密度 ρ は水の 1.3/1000 だが速度 v の 2 乗は音速 340 m/s で 680<sup>2</sup>≒46 万倍（密度が 1/1000 で 460 倍）。

【ベルヌーイの定理】

流動流体で流線に直角の面の方向で測るのが静圧（側圧、static pressure）、流線と同軸で（上流に向けて）測定するのが総圧（全圧、total pressure）。総圧は静圧 P+動圧

（全圧、total pressure）。総圧は静圧 P+動圧

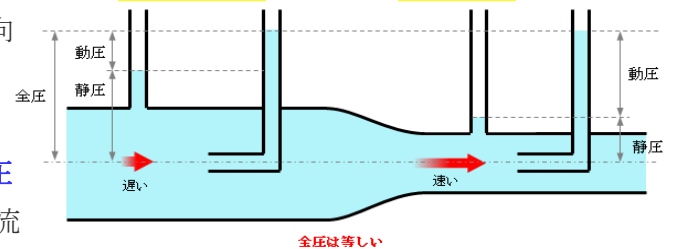
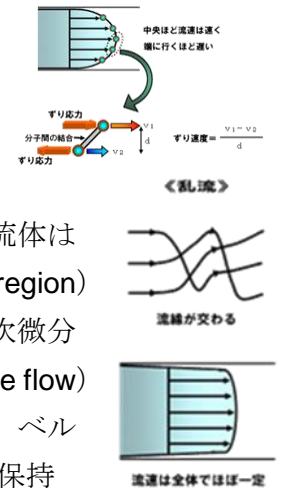
(1/2) ρv<sup>2</sup> で与えられる。ρ は流体密度、v は流速。ある程度の直径を持つ管路におけるエネルギーの総和は「圧力エネルギー P<sub>1</sub>」+「速度エネルギー ρv<sub>1</sub><sup>2</sup>」+「位置エネルギー ρgz<sub>1</sub>」=一定。これが渦なし定常流で成立するベルヌーイの定理（1738）。オイラーにより運動方程式から誘導、定式化された（1752）。流速が早くなると静圧は減少するが流速がもとに戻ると静圧は元の値に回復する（運動エネルギーの保存則）。但し渦ができる場合は渦の中での粘性による運動エネルギーの熱への変換が起き、静圧は元の値に回復しない。これが形状効果による（回復できない）圧力損失（熱エネルギーまで含めればエネルギーは保存）。直孔型（end-hole）カテーテルを血管の上流に向けて測ると総圧を測定（この場合は測定孔の直前で血流がせき止められ（淀み点）静止流体での圧測定となる）、側孔型カテでは流速は維持され静（側）圧を測定<sup>\*2</sup>。動圧は血流速 0.5m/s で 2 mmHg 程度<sup>\*3</sup>。潜水艦は 5 m/s (18km/h) で潜航すると v が 10 倍で艦首の淀み点の動圧 (1/2) ρv<sup>2</sup> は 100 倍。艦尾にも淀み点ができ艦尾の総圧がどこまで回復するかで抵抗（=圧力差×断面積）が決まる。航空機では密度 ρ は水の 1.3/1000 だが速度 v の 2 乗は音速 340 m/s で 680<sup>2</sup>≒46 万倍（密度が 1/1000 で 460 倍）。

（全圧、total pressure）。総圧は静圧 P+動圧 (1/2) ρv<sup>2</sup> で与えられる。ρ は流体密度、v は流速。ある程度の直径を持つ管路におけるエネルギーの総和は「圧力エネルギー P<sub>1</sub>」+「速度エネルギー ρv<sub>1</sub><sup>2</sup>」+「位置エネルギー ρgz<sub>1</sub>」=一定。これが渦なし定常流で成立するベルヌーイの定理（1738）。オイラーにより運動方程式から誘導、定式化された（1752）。流速が早くなると静圧は減少するが流速がもとに戻ると静圧は元の値に回復する（運動エネルギーの保存則）。但し渦ができる場合は渦の中での粘性による運動エネルギーの熱への変換が起き、静圧は元の値に回復しない。これが形状効果による（回復できない）圧力損失（熱エネルギーまで含めればエネルギーは保存）。直孔型（end-hole）カテーテルを血管の上流に向けて測ると総圧を測定（この場合は測定孔の直前で血流がせき止められ（淀み点）静止流体での圧測定となる）、側孔型カテでは流速は維持され静（側）圧を測定<sup>\*2</sup>。動圧は血流速 0.5m/s で 2 mmHg 程度<sup>\*3</sup>。潜水艦は 5 m/s (18km/h) で潜航すると v が 10 倍で艦首の淀み点の動圧 (1/2) ρv<sup>2</sup> は 100 倍。艦尾にも淀み点ができ艦尾の総圧がどこまで回復するかで抵抗（=圧力差×断面積）が決まる。航空機では密度 ρ は水の 1.3/1000 だが速度 v の 2 乗は音速 340 m/s で 680<sup>2</sup>≒46 万倍（密度が 1/1000 で 460 倍）。

（全圧、total pressure）。総圧は静圧 P+動圧 (1/2) ρv<sup>2</sup> で与えられる。ρ は流体密度、v は流速。ある程度の直径を持つ管路におけるエネルギーの総和は「圧力エネルギー P<sub>1</sub>」+「速度エネルギー ρv<sub>1</sub><sup>2</sup>」+「位置エネルギー ρgz<sub>1</sub>」=一定。これが渦なし定常流で成立するベルヌーイの定理（1738）。オイラーにより運動方程式から誘導、定式化された（1752）。流速が早くなると静圧は減少するが流速がもとに戻ると静圧は元の値に回復する（運動エネルギーの保存則）。但し渦ができる場合は渦の中での粘性による運動エネルギーの熱への変換が起き、静圧は元の値に回復しない。これが形状効果による（回復できない）圧力損失（熱エネルギーまで含めればエネルギーは保存）。直孔型（end-hole）カテーテルを血管の上流に向けて測ると総圧を測定（この場合は測定孔の直前で血流がせき止められ（淀み点）静止流体での圧測定となる）、側孔型カテでは流速は維持され静（側）圧を測定<sup>\*2</sup>。動圧は血流速 0.5m/s で 2 mmHg 程度<sup>\*3</sup>。潜水艦は 5 m/s (18km/h) で潜航すると v が 10 倍で艦首の淀み点の動圧 (1/2) ρv<sup>2</sup> は 100 倍。艦尾にも淀み点ができ艦尾の総圧がどこまで回復するかで抵抗（=圧力差×断面積）が決まる。航空機では密度 ρ は水の 1.3/1000 だが速度 v の 2 乗は音速 340 m/s で 680<sup>2</sup>≒46 万倍（密度が 1/1000 で 460 倍）。

（全圧、total pressure）。総圧は静圧 P+動圧 (1/2) ρv<sup>2</sup> で与えられる。ρ は流体密度、v は流速。ある程度の直径を持つ管路におけるエネルギーの総和は「圧力エネルギー P<sub>1</sub>」+「速度エネルギー ρv<sub>1</sub><sup>2</sup>」+「位置エネルギー ρgz<sub>1</sub>」=一定。これが渦なし定常流で成立するベルヌーイの定理（1738）。オイラーにより運動方程式から誘導、定式化された（1752）。流速が早くなると静圧は減少するが流速がもとに戻ると静圧は元の値に回復する（運動エネルギーの保存則）。但し渦ができる場合は渦の中での粘性による運動エネルギーの熱への変換が起き、静圧は元の値に回復しない。これが形状効果による（回復できない）圧力損失（熱エネルギーまで含めればエネルギーは保存）。直孔型（end-hole）カテーテルを血管の上流に向けて測ると総圧を測定（この場合は測定孔の直前で血流がせき止められ（淀み点）静止流体での圧測定となる）、側孔型カテでは流速は維持され静（側）圧を測定<sup>\*2</sup>。動圧は血流速 0.5m/s で 2 mmHg 程度<sup>\*3</sup>。潜水艦は 5 m/s (18km/h) で潜航すると v が 10 倍で艦首の淀み点の動圧 (1/2) ρv<sup>2</sup> は 100 倍。艦尾にも淀み点ができ艦尾の総圧がどこまで回復するかで抵抗（=圧力差×断面積）が決まる。航空機では密度 ρ は水の 1.3/1000 だが速度 v の 2 乗は音速 340 m/s で 680<sup>2</sup>≒46 万倍（密度が 1/1000 で 460 倍）。

最上図、Re が小さいのでパルシング・フラッシュでは旋回流や乱流やカルマン渦は発生しない。流体力学的に誤り。助走区間で速度勾配平坦化による洗浄作用。<sup>\*1</sup>SI 国際単位系 (Le Système International d'Unités) <sup>\*2</sup> ↑ 図はピトー管。総圧と静圧の差（動圧）から ρv<sup>2</sup>÷2 で対気速度を計測。<sup>\*3</sup>ベルヌーイ式で次元を整理して：[kg/m<sup>3</sup> × m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>]=[kg/m<sup>2</sup>] ×[m/s<sup>2</sup>]=[kg · m/s<sup>2</sup>]/m<sup>2</sup>=N/m<sup>2</sup>=Pa（圧力）。流速を 0.5 m/s、密度を 1 kg/(0.1m)<sup>3</sup> とすると動圧は 1 [kg / (0.1m)<sup>3</sup>] × 0.25 [m<sup>2</sup> s<sup>2</sup>] = 250 Pa = 1.87 mmHg (133.3 Pa=1 mmHg) ∴ 流速 0.5m/s の大動脈内の動圧は 1.87 mmHg 程度。



$$p_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 + \rho g z_1 = p_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 + \rho g z_2 = \text{const.}$$

