例題 1

ある最新式火力発電所において，タービン入口の蒸気圧力は $p_1 = 3\,[\mathrm{MPa}]$，温度は $T_1 = 560\,[°\mathrm{C}]$ で，この時の比エネルギーに相当する比エンタルピーは $h_1 = 3.3\,[\mathrm{MJ/kg}]$，出口の蒸気圧力は $p_2 = 5\,[\mathrm{kPa}]$，$T_2 = 30\,[°\mathrm{C}]$ で，比エンタルピーは $h_2 = 0.13\,[\mathrm{MJ/kg}]$，蒸気の質量流量は $\dot{m} = 490\,[\mathrm{kg/s}]$ である．熱効率およびタービン，発電機等の効率を含む全体の効率 η を 45 [%] とするとき，得られる電力 $P\,[\mathrm{W}]$ を求めよ．

[解答]

タービンの有効揚程を $H\,[\mathrm{m}]$，作動流体の流量を $Q\,[\mathrm{m^3/s}]$，密度を $\rho\,[\mathrm{kg/m^3}]$ としたとき，出力 $P\,[\mathrm{W}]$ は，

$$P[\mathrm{W}] = \eta \times \underbrace{\rho Q}_{\dot{m}\,[\mathrm{kg/s}]}\ \underbrace{gH}_{\Delta E\,[\mathrm{J/kg}]} \tag{1}$$

なお，$\Delta E = gH$ は，タービンが単位質量当りの流体に対してする仕事（エネルギー）である．この ΔE は，題意より，

$$\Delta E = h_2 - h_1 \tag{2}$$

式 (2) を式 (1) に代入して，

$$\begin{aligned} P &= \eta\dot{m}(h_2 - h_1) = 0.45 \times 490[\mathrm{kg/s}] \times (3.3 \times 10^6[\mathrm{J/kg}] - 0.13 \times 10^6[\mathrm{J/kg}]) \\ &= 6.99 \times 10^9[\mathrm{W}] = 699[\mathrm{MW}] \end{aligned} \tag{3}$$

例題 2

図 1 に示すようなバーカー水車がある．この水車に付いている 4 本のノズルの内径はすべて同じで $d = 25\,[\mathrm{mm}]$ である．いま水車の各ノズルから水が $Q = 7\,[\mathrm{L/s}]$ で噴出し，水車が $n = 100\,[\mathrm{rpm}]$ で回転しているとき，水車の動力 $L\,[\mathrm{W}]$ を求めよ．ただし，水の密度は $\rho = 1000\,[\mathrm{kg/m^3}]$ としてもよい．

[解答]

角運動量保存則より，ノズルから噴出する速度の周方向成分を v（静止座標系から見た絶対速度）としたとき，一本のノズルによって流体が受けるトルク T' は，

$$\underbrace{\rho Q(r_2 \times v)}_{\text{出口での角運動量}} - \underbrace{0}_{\text{入口での角運動量}} = \underbrace{T'}_{\text{流体が水車から受けるトルク}} \tag{4}$$

水車にはノズルが 4 本付いているので，水車全体が流体に与えるトルク T にすれば，$T = 4T'$ であるので，

$$T = 4\rho Qvr_2 \tag{5}$$

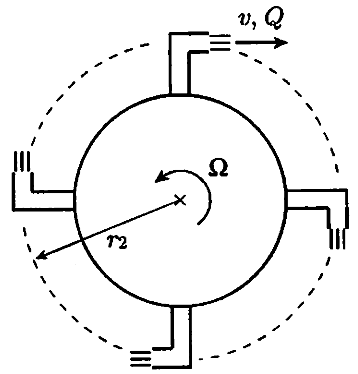

図 1: バーカー水車

ただし，水車からの噴出速度 v（静止座標系から見た絶対速度）は水車の回転速度 $r_2\Omega$ を引くことにより，

$$v = \frac{Q}{(\pi/4)d^2} - r_2\Omega \tag{6}$$

ただし，ノズル断面積は $A = (\pi/4)d^2$ である．したがって，式 (5) のトルク T は，

$$T = 4\rho Q r_2 \left[\frac{Q}{(\pi/4)d^2} - r_2\Omega\right] \tag{7}$$

しかるに，水車の動力 L をトルク T と角速度 Ω で表せば，

$$L = F \times \underbrace{r_2\Omega}_{\text{水車の回転周速度}} = T \underbrace{\Omega}_{=2\pi n} \tag{8}$$

したがって，求めるべき動力 L は，

$$\begin{aligned}
L &= 4\rho Q \underbrace{\Omega}_{=2\pi n} r_2 \left[\frac{Q}{(\pi/4)d^2} - r_2 \underbrace{\Omega}_{=2\pi n}\right] \\
&= 8\pi n \rho Q r_2 \left[\frac{Q}{(\pi/4)d^2} - 2\pi n r_2\right] \\
&= 8\pi \times \frac{100}{60}[\mathrm{rps}] \times 1000[\mathrm{kg/m^3}] \times (7 \times 10^{-3}[\mathrm{m^3/s}]) \times 0.6[\mathrm{m}] \\
&\times \left(\frac{7 \times 10^{-3}[\mathrm{m^3/s}]}{(\pi/4)(25 \times 10^{-3}[\mathrm{m}])^2} - 2\pi \times \frac{100}{60}[\mathrm{rps}] \times 0.6[\mathrm{m}]\right) \\
&= 1.4[\mathrm{kW}]
\end{aligned} \tag{9}$$

例題 3

図 2 に示すような，渦巻きポンプの羽根車の寸法は外形 $D_2 = 235\,[\mathrm{mm}]$，内径 $D_1 = 110\,[\mathrm{mm}]$，羽根幅は入口で $b_1 = 27\,[\mathrm{mm}]$，出口で $b_2 = 10\,[\mathrm{mm}]$，出口羽根角は $\beta_2 = 22.5$o であった．回転数 $n = 3000\,[\mathrm{rpm}]$ のとき，流量は $Q = 3\,[\mathrm{m^3/min}]$ である．羽根入口で流れ（絶対速度 v_1）は半径方向に流入するとし，すべての損失を無視して次の問に答えよ．

(1) 羽根車入口および出口における流れの絶対速度，相対速度，羽根車周速を求め，正確な速度三角形を描け．

(2) 理論揚程（オイラーヘッド）を求めよ．

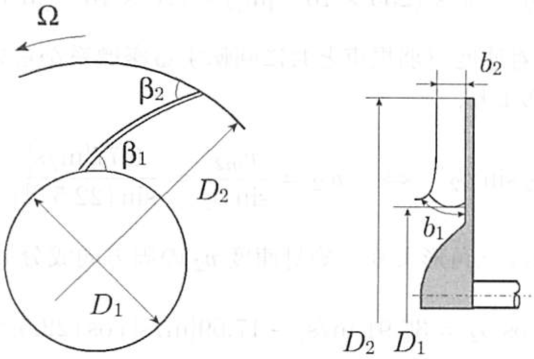

図 2: 渦巻きポンプ

[解答]

(1) まず，羽根車入口において考える．

羽根車入口の周速 u_1 は，羽根車の回転角速度を $\Omega\,[\mathrm{rad/s}]$ としたとき，

$$u_1 = \frac{D_1}{2}\underbrace{\Omega}_{=2\pi n} = \frac{110\times10^{-3}[\mathrm{m}]}{2}\times\left(2\pi\frac{3000}{60}[\mathrm{rps}]\right) = 17.28\,[\mathrm{m/s}] \tag{10}$$

羽根車入口での絶対速度 v_1 は，羽根車入口の断面積が $A=\pi D_1 b_1$ であるので，

$$v_1 = \frac{Q}{\pi D_1 b_1} = \frac{(3/60)[\mathrm{m^3/s}]}{\pi\times(110\times10^{-3}[\mathrm{m}])\times(27\times10^{-3}[\mathrm{m}])} = 5.36\,[\mathrm{m/s}] \tag{11}$$

題意より，羽根車に流入する流れは旋回せず，半径方向に流入するので，入口での速度三角形は直角三角形となる（図 3 参照）．図 3 のに示す，羽根車入口での速度三角形より，相対速度（羽根車と共に回転する座標系から見た，羽根に沿う速度）w_1 は，

$$w_1 = \sqrt{v_1^2+u_1^2} = \sqrt{(5.36[\mathrm{m/s}])^2+(17.28[\mathrm{m/s}])^2} = 18.09\,[\mathrm{m/s}] \tag{12}$$

また，羽根車入口の羽根角 β_1 は，

$$\beta_1 = \tan^{-1}\left(\frac{v_1}{u_1}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{5.36[\mathrm{m/s}]}{17.28[\mathrm{m/s}]}\right) = 17.23\,[^\circ] \tag{13}$$

つぎに，羽根車出口において考える．

羽根車出口の周速 u_2 は，羽根車の回転角速度を $\Omega\,[\mathrm{rad/s}]$ としたとき，

$$u_2 = \frac{D_2}{2}\underbrace{\Omega}_{=2\pi n} = \frac{235\times10^{-3}[\mathrm{m}]}{2}\times\left(2\pi\frac{3000}{60}[\mathrm{rps}]\right) = 36.91\,[\mathrm{m/s}] \tag{14}$$

羽根車出口での絶対速度 v_2 の 半径方向成分v_{m2} は，羽根車出口の断面積が $A = \pi D_2 b_2$ であるので，連続の式（羽根車入口と出口で流量一定）から，

$$v_{m2} = \frac{Q}{\pi D_2 b_2} = \frac{(3/60)[\mathrm{m}^3/\mathrm{s}]}{\pi \times (235 \times 10^{-3}[\mathrm{m}]) \times (10 \times 10^{-3}[\mathrm{m}])} = 6.77\,[\mathrm{m/s}] \tag{15}$$

羽根車出口での相対速度（羽根車と共に回転する座標系から見た，羽根に沿う速度）w_2 は，速度三角形より，

$$v_{m2} = w_2 \sin\beta_2 \quad \Leftrightarrow \quad w_2 = \frac{v_{m2}}{\sin\beta_2} = \frac{6.77[\mathrm{m/s}]}{\sin(22.5[^\circ])} = 17.69\,[\mathrm{m/s}] \tag{16}$$

さらに，出口の速度三角形より，絶対速度 v_2 の周方向成分 v_{u2} は，

$$v_{u2} = u_2 - w_2\cos\beta_2 = 36.91[\mathrm{m/s}] - 17.69[\mathrm{m/s}]\cos(22.5[^\circ]) = 20.57\,[\mathrm{m/s}] \tag{17}$$

したがって，羽根車出口での絶対速度 v_2 は

$$v_2 = \sqrt{v_{m2}^2 + v_{u2}^2} = \sqrt{(6.77[\mathrm{m/s}])^2 + (20.57[\mathrm{m/s}])^2} = 21.66\,[\mathrm{m/s}] \tag{18}$$

(2) 羽根車の周方向成分に関する角運動量保存則より，ポンプ内部の流体全体を検査面にとれば，

$$\rho Q \underbrace{(r_2 \times v_{u2})}_{\text{出口での角運動量}} - \rho Q \underbrace{(r_1 \times v_{u1})}_{\text{入口での角運動量}} = \underbrace{T}_{\text{流体がポンプ全体から受けるトルク}} \tag{19}$$

ただし，v_{u1}，v_{u2} はそれぞれ，羽根車入口・出口における絶対速度 v_1，v_2 の周方向成分である．このポンプの動力 L は，$L = \underbrace{F \times r}_{=T}\Omega = T\underbrace{\Omega}_{=2\pi n} = 2\pi n T$ より，

$$L = 2\pi\rho Q n\,(r_2 v_{u2} - r_1 v_{u1}) \tag{20}$$

しかるに，一般に動力 L は質量流量 $\dot{m}$ と理論揚程（オイラーヘッド）H_{th} を用いて表せば，

$$L = \underbrace{\dot{m}}_{=\rho Q} g H_{th} \tag{21}$$

であるので，式 (20) と式 (21) から，羽根車入口での v_{u1} はゼロである（羽根車入口で流れは半径方向に流入する）ことに注意して，理論揚程 H_{th} は，

$$\begin{aligned} H_{th} &= \frac{\overbrace{2\pi n}^{\Omega}}{g}(r_2 v_{u2} - r_1 v_{u1}) = \frac{u_2 v_{u2} - u_1 v_{u1}}{g} \\ &= \frac{36.91[\mathrm{m/s}] \times 20.57[\mathrm{m/s}] - 17.28[\mathrm{m/s}] \times 0.0[\mathrm{m/s}]}{9.8[\mathrm{m/s^2}]} = 77.47\,[\mathrm{m}] \end{aligned} \tag{22}$$

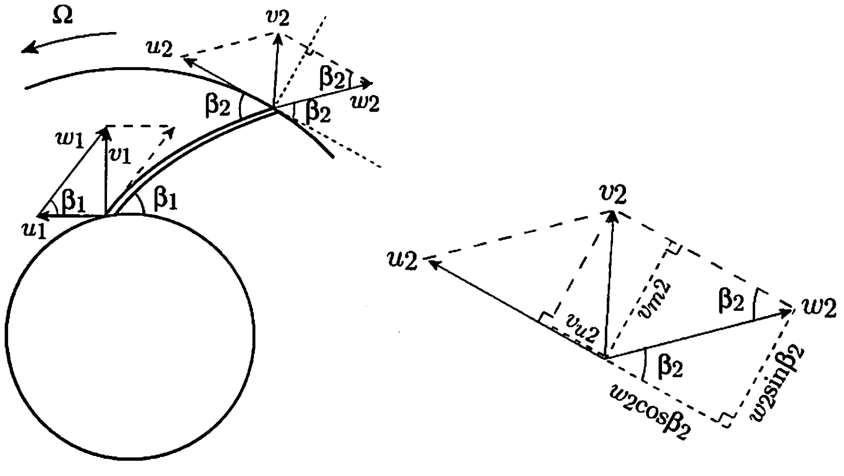

図 3: 渦巻きポンプの速度三角形

例題 4

図 4 に示すような，軸流羽根車が $n = 1200\,[\mathrm{rpm}]$ で回転している．羽根車平均半径 $r = 300\,[\mathrm{mm}]$ の位置で空気（密度 $\rho = 1.2\,[\mathrm{kg/m^3}]$）は軸方向に $v_1 = 33\,[\mathrm{m/s}]$ の絶対速度で流入し，動翼による相対速度の転向角は $\delta = 18°$ である．この軸流羽根車の理論揚程（オイラーヘッド）を求めよ．

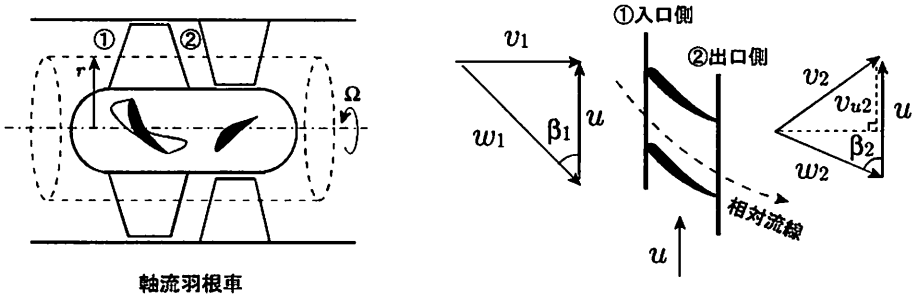

図 4: 軸流羽根車

[解答]

羽根車平均半径 $r = 300\,[\mathrm{mm}]$ の位置において，羽根車の周速 u は

$$
\begin{aligned}
u &= r \underbrace{\Omega}_{=2\pi n} = 2\pi n r \\
&= 2\pi \times \left(\frac{1200}{60}[\mathrm{rps}]\right) \times (300 \times 10^{-3}[\mathrm{m}]) = 37.7\,[\mathrm{m/s}]
\end{aligned}
\tag{23}
$$

題意より，羽根車入口①において，流入する流れは（旋回がなく）軸方向なので，入口での速度三角形は直角三角形となり（図 4 参照），その大きさは，$v_1 = 33\,[\mathrm{m/s}]$ である．羽

根車入口での速度三角形より，流入角 β_1 は

$$\beta_1 = \tan^{-1}\left(\frac{v_1}{u}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{33[\mathrm{m/s}]}{37.7[\mathrm{m/s}]}\right) = 41.2\,[°] \tag{24}$$

題意より，羽根車出口②において，流出角 β_2 は

$$\beta_2 = \beta_1 + \delta = 41.2[°] + 18.0[°] = 59.2\,[°] \tag{25}$$

羽根車の入口と出口で流量は保存される．軸流羽根車の場合，羽根車入口と出口の断面積は変わらないので，羽根車出口での法線方向速度は入口での v_1 に等しい．したがって，羽根車出口での速度三角形より，羽根車出口での絶対速度の周方向成分 v_{u2} は

$$v_{u2} = u - \frac{v_1}{\tan\beta_2} = 37.7[\mathrm{m/s}] - \frac{33[\mathrm{m/s}]}{\tan(59.2[°])} = 18.0\,[\mathrm{m/s}] \tag{26}$$

羽根車出口②での絶対速度 v_2 は，速度三角形より，

$$v_2 = \sqrt{v_1^2 + v_{u2}^2} = \sqrt{(33[\mathrm{m/s}])^2 + (18.0[\mathrm{m/s}])^2} = 37.6\,[\mathrm{m/s}] \tag{27}$$

羽根車の周方向成分（周方向速度 u の向き）に関する角運動量保存則より，軸流羽根車内部の流体全体を検査面にとれば，

$$\rho Q \underbrace{(r \times v_{u2})}_{\text{出口での角運動量}} - \rho Q \underbrace{(r \times v_{u1})}_{\text{入口での角運動量}} = \underbrace{T}_{\text{流体が軸流羽根車全体から受けるトルク}} \tag{28}$$

ただし，v_{u1}，v_{u2} はそれぞれ，羽根車入口・出口における絶対速度 v_1，v_2 の周方向成分である（つまり，$v_{u1} = 0\,[\mathrm{m/s}]$）．この軸流羽根車の動力 L は，$L = \underbrace{F \times r}_{=T}\Omega = T \underbrace{\Omega}_{=2\pi n} = 2\pi n T$ より，

$$L = 2\pi\rho Q n\,(r v_{u2} - r v_{u1}) \tag{29}$$

しかるに，一般に動力 L は質量流量 $\dot{m}$ と理論揚程（オイラーヘッド）H_{th} を用いて表せば，

$$L = \underbrace{\dot{m}}_{=\rho Q} g H_{th} \tag{30}$$

であるので，式 (29) と式 (30) から，羽根車入口での v_{u1} はゼロである（羽根車入口で流れは軸方向に流入する）ことに注意して，理論揚程 H_{th} は，

$$\begin{aligned} H_{th} &= \frac{\overbrace{2\pi n}^{\Omega}}{g}(r v_{u2} - r v_{u1}) = \frac{u v_{u2} - u v_{u1}}{g} = \frac{u(v_{u2} - v_{u1})}{g} \\ &= \frac{37.7[\mathrm{m/s}] \times (18.0[\mathrm{m/s}] - 0.0[\mathrm{m/s}])}{9.8[\mathrm{m/s^2}]} = 69.2\,[\mathrm{m}] \end{aligned} \tag{31}$$

なお，羽根車の周速 u は式 (23) で求められていることに注意せよ．

例題 5

図 5 に示すような，遠心式羽根車がある．内径は $D_1(=2r_1)=0.1\,[\mathrm{m}]$，外形は $D_2(=2r_2)=0.3\,[\mathrm{m}]$ で，流入部と流出部の面積比は 1 : 3，羽根車の出口羽根角は $\beta_2=45°$ である．また，流体は予旋回なく流入する．羽根車入口での流入速度を $v_1=10\,[\mathrm{m/s}]$，羽根車の回転数を $n=2000\,[\mathrm{rpm}]$ として，羽根車入口と出口での速度三角形を描き，羽根車入口の羽根角 β_1 と羽根車出口での半径方向速度 v_r を求めよ．さらに，この羽根車の理論揚程（オイラーヘッド）を求めよ．

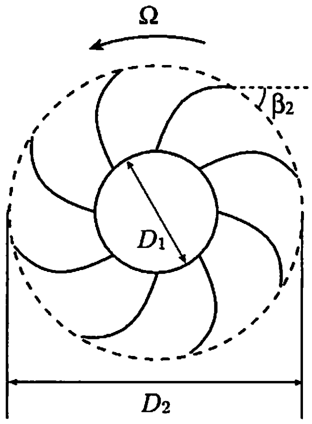

図 5: 遠心式羽根車

[解答]

まず，羽根繰り間入口において考える．

羽根車入口の周速 u_1 は，羽根車の回転角速度を $\Omega\,[\mathrm{rad/s}]$ としたとき，

$$u_1=\underbrace{r_1}_{=D_1/2}\underbrace{\Omega}_{=2\pi n}=\frac{0.1[\mathrm{m}]}{2}\times\left(2\pi\frac{2000}{60}[\mathrm{rps}]\right)=10.5\,[\mathrm{m/s}] \tag{32}$$

題意より，羽根車入口で流体は予旋回なく流入するので，羽根車入口での絶対速度 v_1 は半径方向であることが分かり，速度三角形は直角三角形となる（図 6 参照）．したがって，羽根車入口での相対速度（羽根車と共に回転する座標系から見た，羽根に沿う速度）w_1 は，

$$w_1=\sqrt{v_1^2+u_1^2}=\sqrt{(10.0[\mathrm{m/s}])^2+(10.5[\mathrm{m/s}])^2}=14.5\,[\mathrm{m/s}] \tag{33}$$

また，羽根車入口の羽根角 $\beta_1 1$ は，

$$\beta_1=\tan^{-1}\left(\frac{v_1}{u_1}\right)=\tan-1\left(\frac{10.0[\mathrm{m/s}]}{10.5[\mathrm{m/s}]}\right)=43.6\,[°] \tag{34}$$

次に，羽根車出口において考える．

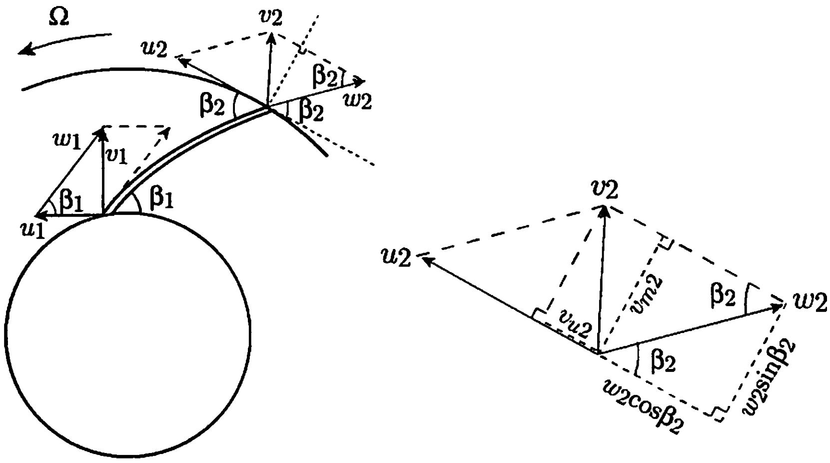

図 6: 遠心式羽根車の速度三角形

羽根車入口と出口での半径方向速度成分を v_{m1}，v_{m2} としたとき，羽根車入口断面と出口断面での連続の式より（羽根車入口と出口の幅をそれぞれ B_1，B_2 とする），

$$(2\pi \underbrace{r_1}_{=D_1/2} B_1)v_{m1} = (2\pi \underbrace{r_2}_{=D_2/2} B_2)v_{m2} \quad \Leftrightarrow \quad v_{m2} = \frac{2\pi(D_1/2)B_1}{2\pi(D_2/2)B_2}v_{m1} = \frac{1}{3} \times 10[\mathrm{m/s}] = 3.3\,[\mathrm{m/s}] \tag{35}$$

ただし，上式を計算する際，羽根車入口での半径方向速度 $v_{m1} = v_1$ と，羽根車入口と出口の断面積比が $1:3$ なる関係を用いた．

羽根車出口の周速 u_2 は，羽根車の回転角速度を $\Omega\,[\mathrm{rad/s}]$ としたとき，

$$u_2 = \underbrace{r_2}_{=D_2/2} \underbrace{\Omega}_{=2\pi n} = \frac{0.3[\mathrm{m/s}]}{2} \times \left(2\pi\frac{2000}{60}\right) = 31.4\,[\mathrm{m/s}] \tag{36}$$

羽根車出口での速度三角形より，

$$v_{m2} = w_2 \sin\beta_2 \quad \Leftrightarrow \quad w_2 = \frac{v_{m2}}{\sin\beta_2} = \frac{3.3[\mathrm{m/s}]}{\sin(45[^\circ])} = 4.7\,[\mathrm{m/s}] \tag{37}$$

羽根車出口における絶対速度 v_2 の周方向成分 v_{u2} は，速度三角形より，

$$v_{u2} = u_2 - w_2\cos\beta_2 = 31.4[\mathrm{m/s}] - 4.7[\mathrm{m/s}] \times \cos(45[^\circ]) = 28.1\,[\mathrm{m/s}] \tag{38}$$

したがって，羽根車出口での絶対速度 v_2 は，

$$v_2 = \sqrt{v_{u2}^2 + v_{m2}^2} = \sqrt{(28.1[\mathrm{m/s}])^2 + (3.3[\mathrm{m/s}])^2} = 28.3\,[\mathrm{m/s}] \tag{39}$$

となる [1]．

[1] 羽根車出口での絶対速度 v_2 は，余弦定理を用いて，

$$v_2^2 = u_2^2 + w_2^2 - 2u_2w_2\cos\beta_2 \tag{40}$$

のようにしても求めることができる．

次に，理論揚程（オイラーヘッド）H_{th} について考える．羽根車の周方向成分に関する角運動量保存則より，ポンプ内部の流体全体を検査面にとれば，

$$\rho Q \underbrace{(r_2 \times v_{u2})}_{\text{出口での角運動量}} - \rho Q \underbrace{(r_1 \times v_{u1})}_{\text{入口での角運動量}} = \underbrace{T}_{\text{流体がポンプ全体から受けるトルク}} \tag{41}$$

ただし，v_{u1}，v_{u2} はそれぞれ，羽根車入口・出口における絶対速度 v_1，v_2 の周方向成分である．このポンプの動力 L は，$L = \underbrace{F \times r}_{=T} \Omega = T \underbrace{\Omega}_{=2\pi n} = 2\pi n T$ より，

$$L = 2\pi \rho Q n \left(r_2 v_{u2} - r_1 v_{u1} \right) \tag{42}$$

しかるに，一般に動力 L は質量流量 $\dot{m}$ と理論揚程（オイラーヘッド）H_{th} を用いて表せば，

$$L = \underbrace{\dot{m}}_{=\rho Q} g H_{th} \tag{43}$$

であるので，式 (42) と式 (43) から，羽根車入口での v_{u1} はゼロである（羽根車入口で流れは予旋回なく（半径方向に）流入する）ことに注意して，理論揚程 H_{th} は，

$$\begin{aligned} H_{th} &= \frac{\overbrace{2\pi n}^{\Omega}}{g} \left(r_2 v_{u2} - r_1 v_{u1} \right) = \frac{u_2 v_{u2} - u_1 v_{u1}}{g} \\ &= \frac{31.4[\mathrm{m/s}] \times 28.1[\mathrm{m/s}] - 10.5[\mathrm{m/s}] \times 0.0[\mathrm{m/s}]}{9.8[\mathrm{m/s^2}]} = 90.0\,[\mathrm{m}] \end{aligned} \tag{44}$$

例題 6

図 7 に示すような，軸流式羽根車がある．羽根車の入口羽根角 $\beta_1 = 45°$，出口羽根角 $\beta_2 = 60°$ である．作動流体は，羽根車入口で予旋回なく流入する．羽根車回転数を $n = 9000/\pi$ [rpm] として，羽根車平均半径 $r = 0.1$ [m] における速度三角形を描け．また，この羽根車の理論揚程（オイラーヘッド）を求めよ．

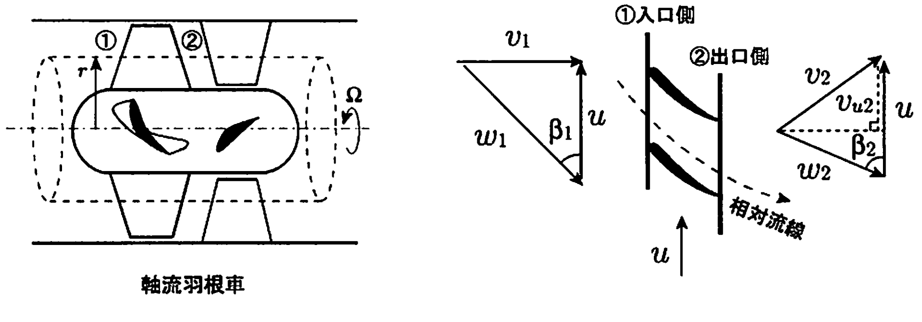

図 7: 軸流式羽根車

[解答]

羽根車平均半径 $r = 0.1\,[\mathrm{m}]$ に位置において，羽根車の周速 u は，

$$u = r\underbrace{\Omega}_{=2\pi n} = 2\pi n r = 2\pi \times \left(\frac{9000}{60\pi}[\mathrm{rps}]\right) \times 0.1[\mathrm{m}] = 30\,[\mathrm{m/s}] \tag{45}$$

題意より，羽根車入口①において，流入する流れは（予旋回がなく）軸方向であり，かつ，入口の羽根角が $\beta_1 = 45°$ であることから，羽根車入口での速度三角形は直角二等辺三角形となる（図７参照）．すなわち，羽根車入口での絶対速度 v_1 は周速度 u_1 と一致し，相対速度 w_1 は

$$w_1 = \sqrt{v_1^2 + u_1^2} = \sqrt{(30.0[\mathrm{m/s}])^2 + (30.0[\mathrm{m/s}])^2} = 42.3\,[\mathrm{m/s}] \tag{46}$$

軸流羽根車の場合，羽根車入口①と出口②で断面積変化がしないので，連続の式から，軸流方向速度（法線方向速度）は入口での絶対速度 v_1 に等しい．したがって，羽根車出口での速度三角形より，羽根車出口での絶対速度の周方向成分 v_{u2} は

$$v_{u2} = u - \frac{v_1}{\tan\beta_2} = 30.0[\mathrm{m/s}] - \frac{30.0[\mathrm{m/s}]}{\tan(60.0[°])} = 12.7\,[\mathrm{m/s}] \tag{47}$$

羽根車出口②での絶対速度 v_2 は，速度三角形より，

$$v_2 = \sqrt{v_1^2 + v_{u2}^2} = \sqrt{(30.0[\mathrm{m/s}])^2 + (12.7[\mathrm{m/s}])^2} = 32.6\,[\mathrm{m/s}] \tag{48}$$

この軸流式羽根車の理論揚程（オイラーヘッド）は，式 (31) と同様にして，

$$\begin{aligned} H_{th} &= \frac{\overbrace{2\pi n}^{\Omega}}{g}(rv_{u2} - rv_{u1}) = \frac{uv_{u2} - uv_{u1}}{g} = \frac{u(v_{u2} - v_{u1})}{g} \\ &= \frac{30.0[\mathrm{m/s}] \times (12.7[\mathrm{m/s}] - 0.0[\mathrm{m/s}])}{9.8[\mathrm{m/s^2}]} = 38.9\,[\mathrm{m}] \end{aligned} \tag{49}$$