

水車の設計について

工学士 井口在屋

(1)

蒸気力水車、風車、役夫、牛馬等は、すべて、動力の源となるもので、英語では「プライム・ムーバー」と言い、原動力と訳される。昔は、誰もが普通の生活に必要な物資を得て事足りていたもので、それに費やす労力も極めて少なく、原動力もさほど必要とされなかった。だが、近頃、世の中の有様が大きく変わり、自然探求の学問、物理化学の発展は目覚しく、様々な新しい工夫・発明がなされてきた。それに従って、人間社会においては、あらゆる分野に渡って動力も必要とされるようになった。

蒸気機関等は、その必要を満たす手段である。蒸気機関等によって動力を得ることができるのは、まず石炭が燃焼するときの熱による。元来、諸々の機械というものは、自分で力を持ったり、力が増減するものでもない。というのは、もっぱら力を伝達するか、もしくは力を使えるようようにするための手段である。従って、機械制作者、あるいは機械の専門家とは、優れた手段を考え、この手段を上手に使うことができる人のことである。だから、原動力を製作することは、機械専門家にとって最も重要な事である。

最近になって、電気についての学問が日進月歩の勢いであるが故に、機械による作業は早晚一変するとしても、ここで機械の作業を論ずる

ならば、原動力として大変実用的なのは蒸気機関であり、この理論と構造の研究は限りがない。まさに精緻を窮め、その仕組みは複雑この上ないと言えよう。

思うに機械にあって便利なものは水車である。水車はどんな国でも上代には既に存在している。ただ、その用途は非常に狭く、田に水を引くか、又は畑の作物に水をやるぐらいの簡単で限定されたものに過ぎなかった。しかし、近頃、実用的な学問が広まってから、水車を利用することも多く、水車について理論的なことを教える者も出てきつつあり、構造的にも大変改良されてきた。

蒸気機関は陸地、水上、定まった所、動いている所等、用いられない場所はなく、その動力の大きさは意のままに、利用しやすく便利なことこの上ない。従って、学者は依然として気を緩めずに蒸気機関を研究している。

一方、水車は燃料を必要としないことが一大利点となっているが、水のない所で使うことはできず、その力は水量と高さ次第で限界があり、それを越えることはできない。つまり、水力は便利さの点で蒸気力に及ばない。水力は、有用にして大切にしなければならないのに、水力について考える余地が少ないわけで、大河の流れを利用できないのは数万トンの石炭をむだにしているとして惜しまれている。又、水力を論じている本もまた十分なものはない。このことは英国でも全く同様である。

大学者のランキン氏は、蒸気機関の本の中で水車の理論を展開して

いる。それで、タービン水車に至っては、その理論に誤りがあり、そっくり信ずることはできない。又、フェーヤペルン氏が著書の中で書いている所は、まず同氏の経験によっているので適切にして信ずべきものであるとしても、水車の大小長短、強弱、遅速等を定める基準の根拠を明示してはいない。その他、水力をテーマにしている本がいくつかあるが、的確に論じているのものはない。理論に偏り過ぎたり、実験だけで終わっていたりして、大変残念である。

そういうわけで、私は様々な本を参考にし、私見を交えながら、水車の設計をまとめあげており、自分の研究に役立たせている。ここでは、水力の理論を述べ、水力機関の区別をあげ、その後、水車の設計について述べてみよう。

水力の理論について述べるには、先ず、よく学術に用いる一般的な用語を理解する必要がある。たいてい、理論に使う用語は一字一句といえども、皆一定の意味を持ち、決して曖昧であってはならない。席上の談話、あるいは文学上の用語とは大変異なる。ここで、この理論上の用語をあげて、説明してみよう。

高さ。水力学に言うところの、いわゆる高さは、エネルギーの強弱に直結し、熱せられた物体の温度、電気の電位（電氣的な高さ）、銀行預金の利息に喩えられる。熱において温度がなければ、エネルギーもない。電気において電位がなければエネルギーもない。銀行預金に利息がつかなければ、1,000万円を預けているとしても、預金の意味がない。水力学においてもまた同様である。1,000万立方フィートの

水があっても高さがなければ、しらみすら殺すことはできない。今3フィートの高さの所に2ポンドの水があれば、その水のエネルギーは、6フィートポンドである。繰り返して言うと、2ポンドの水を3フィートの高さから落下させる時は、6フィートポンドの仕事を得ると言う。これを一般化して、hフィートの高さにおいて、Q立方フィートの水があると仮定すれば、そのエネルギーは、

$$WQh \text{ フィートポンド} \quad ()$$

は、定まっており変わらない。ここでhの名称を、「総計高さ」と言う。

水のエネルギーは、以上述べたように3つの面があるので、その計算には運動と圧力を高さに変換して用いるのが便利である。総計高さHフィートを置き、これに毎秒の立方フィート量を乗し、又これに毎立方フィートの水の重さ62.425ポンドを乗すれば、そこから得られる数値62.425QHフィートポンドは、毎秒のエネルギーになる。従って、550フィートポンドでこれを除し、

$$\frac{Qh}{8.81}$$

を得る。これが、この水量に内在する馬力となる。これに水力機関のエネルギー率を乗すれば、その機械の馬力が得られる。

水力機関を大別すると、水車と水圧機械の2種類になる。水車は必ず車輪と車軸を持ち、水力を受け回転して動力が生じる機械である。

水圧機械はピストンを備え、水の圧力を受け、往復運転して動力を生み出す機械である。水車には縦回転のものと横回転のものの2つがある。横回転水車は車輪が平らに置かれ、横回転し、車軸は直立しており、タービン水車とも言われる。「タービン」とは、まさしく渦巻きの意にして、水が流れる形からその意味が来ている。縦回転水車は車輪が下にあり、縦回転し、車軸は平らに置かれる。これが、いわゆる通常言うところの水車である。

今先ず、その縦回転水車について述べてみよう。縦回転水車には、上射・下射及び、蔽胸（中射）の三種類がある。上射は水の流れ入る所が水車の頂上付近にあり、重力がその主たる作用となる。下射は、水車に接しながら下部より流れ入り、主に流水のもたらす衝撃で車を回す。蔽胸（中射）は、水を車の中央部に受け、水のもっている重力と衝撃を兼ねて作用する。それで円弧形のプレスト（胸渠）があり、これに密に接し、水の溢れ出るのを防ぐというわけで、蔽胸水車の名がある。

（ 2 ）

あらゆる水力機械の設計をするには、必ずつ次の2点を知らなければならぬ。

第一 毎秒立方フィート水量、これを Q とする。

第二 水の総計高さフィート、これを計算して、 H とする。

大きな池、もしくは河流の水を引いて、数馬力の水力機械を造ろうとすることが多々ある。又、水量が少なめで高さを上下することはで

きることがある。このような場合、相当の水量Q、又は、高さHをす
ぐに計算することが第一要件であり、次の式を適用するのが良い。

$$Q = \frac{550H.P}{uwH} \quad \text{又は} \quad H = \frac{550H.P}{uwQ}$$

H.P.は水車の馬力 w は1立方フィート水の重量62.425ポ
ンド、u は、水車のエネルギー率で、水車の種類、構造の適否等
によって同じではないけれども、その大筋は次のようになる。

下射車、水受が垂直のもの	0.33 ~ 0.4
低蔽胸(ロープレスト)車	} 0.5 ~ 0.7
高蔽胸(ハイプレスト)車	
上射車	
ポンセレット氏下射車	0.52 ~ 0.68
改良鉄造高蔽胸車	0.65 ~ 0.75
タービン水車	0.7 ~ 0.8

縦回転水車は、フェーヤペルン氏の改良された鉄造の高蔽胸車と
同じく、ポンセレット氏の下射車が最も便利である。但し、動きは遅
く、重量は大きくなり、製造費用は甚大なものにつく。それで、エネ
ルギー率は0.75に及ぶのである。

50年前、ファルニーロン氏がタービン水車の構造で初めて世に出
し、フォンデンジョン、ハルボイデン等の諸氏が相次いでこれを改良

した。世間で用いられる水力機械の中でタービン水車は最も数が多いものとなった。とは言え、タービン水車は、その動きが速く、重量が軽く、大きさも小さいので、組み立てる費用も安く、それにもかかわらず、エネルギー率は大変大きくなり、従来の上射車、あるいは下射車とは比べものにならない。

近頃、合衆国においては、いわゆるアメリカ風タービンとして、内部に流れ、かつ下方に流れるものが特に現れた。その構造は日に日に改良され、エネルギー率は0.8に及び、時には0.9以上のエネルギー率を得る場合もあると、昨年十一月、米国機械アカデミー会長サルストン氏が演説で紹介し、アメリカ風タービン水車が見事で、エネルギー率も大きいと評価している。今、上の表にはタービン水車のエネルギー率を仮に0.7 ~ 0.8としておいた。

上射車

上射水車を用いる所には全て、水の高さは8フィート~50フィートで、水量は通常、毎秒三立方フィート~25立方フィートとなる。最小高さで最小水量では、3馬力~5馬力を得られ、又高さが水量と同じく大きいときは、130馬力にも及ぶことになる。けれども、このような場合では、水車2個を用いるのが好都合である。なぜなら、水車の馬力が80以上になるときは重量が大きく、不便だからである。

エネルギーの損失を少なくするためには、水流が最初に水受けに入るときに、衝撃を生じないことが肝要である。従って、水受けの外端は鋭く造らなければならない。又、第一図でOは車の中心、OSは縦半

直径、Bは水流が初めて入る点、BUは車辺に触れる線で、外周の速度で、これをuとする。BWは水受けの外端に触れる線で、水の速度で、これをwとする。流入水の速度はvとする。速度は全て毎秒フィートで計算する。又、ABIはBCの水受けに入る所の水流で、水流の衝撃を防ぐ方向は、次の方法に従う必要がある。BVの水流の速度を2つに分解し、その一部は外周の速度uと等しく、他の一部は水受けの外端BWと方向を同じくする。このBWの方向、及び半径OBに直角なる外周の速度uを所与と定めよう。そうすれば、vの流入速度も又所与であるが故に、その方向を得るためには、UよりBWに平行して一線を描(えが)き、Bを中心とし、vを半径として円弧を描(えが)き、Vなる点において、右の平行線と互いに交わせる。すなわち、そのBVは、求めるところの水流の方向である。又、BUに平行のVより一線を描き、BWを得る。これは水車に対する水の速度である。今UBV角をAとし、UBW角をBとすれば、計算により次の式を得る。

$$\frac{u}{v} = \frac{\sin(B-A)}{\sin B}$$

及び

$$\frac{w}{v} = \frac{\sin A}{\sin B}$$

流入水の速度と車辺速度の比数 $v \div u = k$ は 1.5 ~ 2 になる。Bは水受けの外端に触れる線の方向と車辺に触れる線の間にあるもので、これを流入角度と言う。車の直径が大きく速度が遅いときは20度ぐらいで、車の直径が小さく速度が速いときは40度に及ぶ。Bと

同じく k を定めれば、 A の進入角度は次の式で計算することができる。

$$A = B - \sin^{-1}\left(\frac{1}{k} \sin B\right)$$

上射車の外周速度は遅めなのが良い。車の直径が大きいときは、毎秒10フィートに至ることがあるが、中間車の直径には5フィート前後である。又、最小車の直径としても、その速度は1フィート半以下になってはならない。この車辺速度 u を定めれば、流入速度 v は kn に等しいので、直ちにこれを計算することができる。今 r を半径とし、フィートで計算すれば次の式を得る。

$$H = (1 + f) \frac{v^2}{2g} + r(1 + \cos \theta)$$

この式で、 H は水の総計高さ、 $(1 + f) \frac{v^2}{2g}$ は速度から来る高さ、 $r(1 + \cos \theta)$ は現存の高さである。縦回転水車では、圧力から来る高さが無い。故に総計高さは、速度から来る高さとの和に等しくなる。は車頂と水の初めて流れ入る点とに半径線を描き、その間に仲介する速度である。

水の流入が自由で、ほとぼしり出るのを好まなければ、ぜひ通気抗を備える必要がある。水受けに通気抗を設けるのは、思うにフェーヤベルン氏が造る上射車では、水が流入する水車の頂点に近いので、通気抗を造ることには不便であるけれども、水が流入する点が車頂から

30度以下になると、この方法もまた採用することができよう。即ち、
 の角が30度以上なればよろしい。これが、上ヘッドレース(上渠)
 水面の高低変化が1フィート前後に過ぎないものに適している。その
 高低変化がこれより大きくなるときは、ぜひブレスト(蔽胸)水車を
 用い、 の角度を大きくして60度~90度にする必要がある。そう
 すれば水扉の位置を適応させることにも大変好都合である。f は抵
 抗率で、たいてい高さの1割に当る。従って、半径を得る式は以下の
 ようになる。

$$r = \frac{H - 1.1 \frac{v^2}{2g}}{1 + \cos \theta}$$

もしくは

$$r = \frac{H - k^2 1.1 \frac{u^2}{2g}}{1 + \cos \theta}$$

この式で、車直径を算出するには、車辺の角度 u を知る必要がある。
 けれども、実際の場合では毎分時の車の回転数 n を前提して然る後、
 車直径及び各速度を定めたいことが多い。今これに対応する式を求め
 てみよう。

何故なら、 $u = \frac{2\pi.ru}{60}$

$$(1 + \cos \theta)r = H - 1.1k^2 \left(\frac{\pi.rn}{30} \right)^2 \frac{1}{2g} \quad \text{を得る。}$$

即ち

$$(1 + \cos \theta)r = H - 0.000187(knr)^2$$

この二次方程式を解き、半径を求め、

$$r = \frac{\sqrt{0.000748(kn)^2 + (1 + \cos \theta)^2} - (1 + \cos \theta)}{0.000374(kn)^2} \text{ フィートを得る。}$$

又、半径の商の近似値を求め、

$$r = \frac{H \{1 - 0.000047(kn)^2 H\}}{1 + \cos \theta} \text{ フィートを得る。}$$

よって、車辺の速度は毎秒、

$$u = \frac{\pi \cdot nr}{30} 0.1047nr \text{ フィート}$$

又水の流入速度は毎秒、

$$v = 0.1047knr \text{ フィート}$$

水車側板の深さは浅いほうがよい。なぜなら、水車の直径が数フィートで側板が浅くなれば、水が作用するにあたり、レバーアーム(艇枝)が長くなり好都合であり、水のエネルギーは失われない。しかし、側板が深いとなると、レバーアームが短くなり、エネルギーを失ってしまうのである。おおよそ、側板の深さは、0.9インチから1.75フィートぐらいだが、ほぼ1フィートから1.25フィートの間に収まるようにしなければならない。

今、側板の深さをd フィートとし、車幅をbフィートとすれば、側板と底板(sole plate)とで囲んだ円筒形の容隙の横断面積は b d 平方フィートである。それで、かの外周の速度は、毎秒 u フィートであ

るから、第二図BODの割線面形の面積は、 $\frac{1}{2}ur$ 平方フィートとな

る。又、内周の速度は、 $u\frac{r-d}{r}$ フィートとなるから、EOFの割線

面形の面積は、 $\frac{1}{2}u\frac{r-d}{r}(r-d)$ 即ち、 $\frac{1}{2}u\left(r-2d+\frac{d^2}{r}\right)$

平方フィートだから、BEFDの面積は、

$$\frac{1}{2}ur - \frac{1}{2}u\left(r-2d+\frac{d^2}{r}\right) \text{ 平方フィートである。}$$

$$\text{即ち } ud\left(1-\frac{d}{2r}\right) \text{ 平方フィートである。}$$

これに車の幅 d を乗して、毎秒、水に面する容積を得て、

$$ubd\left(1-\frac{d}{2r}\right) \text{ 平方フィートである。}$$

この容積は、毎秒の水量 Q と等しくしてはならない。その理由は3つある。第一に、各水受けの容積は、水受け2枚の間の容積より小さいからである。第二に、水受けに水を充満させれば、流出することが早く、損失をこうむるからである。第三に、水受けの容積 Q に等しいのであれば、水の流入は自在にならなくなる。その若干の部分は奔出して用いることができない。それゆえ、先ず、一個から小さい充塞率 e で先の容積に乘し、その後、これを Q に適合させるがよい。

$$Q = enbd\left(1-\frac{d}{2r}\right)$$

ランキン氏の書によれば、この乗率 e は $\frac{2}{3}$ である。バイスハッ
グ氏の書によれば、 $\frac{1}{4}$ から $\frac{1}{3}$ であり、水車直径が大きいときは、 $\frac{1}{5}$
になるという。上射水車には、胸渠を取り付けないのが通常である。
従って、充塞率が小さいのが良い。それで、これを定めるには、設計
者の識見によるけれども、思うに、せいぜい $\frac{1}{3}$ までであり、この数
値を大きく逸脱してはいけないのである。車幅を得る式は、次のよう
になる。

$$b = \frac{Q}{\text{end} \left(1 - \frac{d}{2r} \right)}$$

水受けの数を増やせば、各水受けの水量は減少することになる。各
水受けの水量が減少すれば、水が水受けに滞留することが少ない。従
って、だいたい、水受けの数を増やせばエネルギー率もまた上がるこ
とになる。

但し、その水受けの数には限度があり、むやみに多くしてはならな
いけれども、薄い鉄板で造るときは、その数が木製のものよりはやや
多くともかまわない。今、車の外周で測定した水受けの距離と側板の
深さとを等しくすれば、水受けの数を求める式は次のようになる。

$$N = \frac{2\pi \cdot r}{d} = 6 \frac{r}{d} \text{ と近似する。}$$

(3)

縦水車の軸は重量のある大きな銑鉄棒で造り、軸脚でこれを受け、ボルトで車室の基礎に取り付ける。車の重力は必ず車軸で支える。車の力を伝達する方法は3つある。一つは車軸から伝達する。次は直ちに車の周辺から伝達する。最後に車のアームに伝達具を取り付け、車軸と周辺の間から伝達する。

第一の方法を用いれば、車軸は車並に水の重力を受けるのみならず、また、自らちゅう力に抵抗することができない。これは、水力が車辺からアームに達し、アームより車軸に達するからである。車軸には通常、リブ(肋骨)を鑄付け、車軸が回転するごとに、引長力と圧搾力とに抵抗することができるように調整しておく。

第二の方法は、車の周辺にコグドリング(歯輪)を取り付け、これを歯車に組み込み、力を引きだして用いるのである。この方法を用いれば、車軸の強さは、僅かに車の重力で支えるばかりで足りる。その歯車の接点は車中の水の重心を通り、車軸に平行している水平面中になければならない。円弧の重心と円の中心との距離は円弧の長さ、半径と弦の相乗を置いて、これを除することができる商に等しい。即ち、

$$\frac{R \sin A}{A} \quad \text{である。}$$

Aは円の中心で円弧に対する角の二等分である。Rは半径である。

それで、車の外周と底板との中間に円を画(えが)き、水が満ちた水受けを横断する円弧をとり、上の方法に従ってその重心を求めれば車中の水の重心が得られる。車軸が全く水の圧力を受けないようにするには、必ずコグドリングと歯車の二組を備え、車の両側に付ける必要がある。又、一組だけを用いるときは、底板の裏面に接して斜めのストラット(被縮棒、支柱、突っ張り)を数条、取り付け、車の片側の水力をもう一方の側に伝達させ、車の胴体がちゅう拉する不都合を除いたほうが良い。

次の表は車軸の頸の大小を示すもので、高蔽胸、底蔽胸のどちらにも用いることもできる。これは、フェーヤベルン氏が40年間の経験から得たものと言う。

水車軸の頸、大小表(頸の直径 単位はインチ)

車径 車幅	15	18	20	25	30	40	50
5	6	6.5	7	7.5	8	8.75	9.5
10	7	7.5	8	8.5	9	10	11
15	8.5	9	10	11	11.5	12.5	14
20	10	11	12	12.5	13	14.5	16

頸の長さは通常、その直径の1.5倍とする。

トレッドゴールド氏の水車軸の頸を計算する方法は、

$$D = \frac{1}{9}(LW)^{\frac{1}{3}} \quad \text{甲式}$$

Dは頸の直径であり、インチで計算する。Lは頸の長さであり、フットで計算する。Wは頸で支えるべき最大重量であり、ポンドで計算する。又、水を受け止める場合、力を引き出して用いる小歯車によって水の重量を支える時には、W車の重さは半分になる。

頸の直径を計算する別の方法は次のようになる。

$$D = \frac{1}{25}\sqrt{W} \quad \text{乙式}$$

この式で、頸の長さはおおよそ直径に等しい。以上、どちらの式を用いても前表の直径よりはやや小さくなる。

バイスバグ氏の書の中で、軸頸の直径を計算する方法がある。甲式と同形であるが、その分母は9ではなく、7.63である。又、頸の長さは直径の等倍、ないし1.25倍という。

水車の軸の太さを算出するには、そのちゅう力に抗する強さとその重力を支える強さをあわせて考えなければならない。今、ちゅう拉力だけが存在すると仮定して、円形銑鉄軸の直径を定めると次のようになる。

$$D = 0.357\sqrt[3]{Pr} = 6.2 \frac{\sqrt[3]{H.P.}}{m} \quad \text{インチ} \quad \text{丙式}$$

Pは、車周に働く力であり、ポンドで計算する。Rは半径であり、フットで計算する。H.P.は馬力である。Nは毎分の車の回転数で

ある。又、鍊鉄軸を用いるときは次のようになる。

$$D = 0.297\sqrt[3]{Pr} = 5.16\frac{\sqrt[3]{H.P.}}{m} \quad \text{インチ} \quad \text{丁式}$$

木製軸の直径は、銑鉄製軸のものの2倍なので、十分な強さがある。けれども、実地の慣習では、3倍もしくは、4倍に及ぶ。四角軸を用いるときは、角辺 $S = 0.94D$ とならなければならない。また、内空の円筒軸には、その外直径

$$D1 = \sqrt[3]{\frac{d}{(1-m^4)}} \quad \text{戊式}$$

m は外直径で内直径を除することができる商である。その実数は通常、0.6である。だから、外直径 $D1 = 1.05D$ となる。

以上、丙丁戊等の式を用いるには、初めて力を受ける先転車の水車軸に固定するときに限らなければならない。又、一組のアーム、もしくは、一方の側板に先転車を取り付けるときは、他の一組のアームは、 Pr なるモーメント（力と距離を掛けたもの）の一部分だけを車軸に伝える必要がある。だから、軸直径が小さくなる。

アームが二組あるときは、モーメント Pr の半分は一組のアームより車軸に通し、車軸から他の一組によってコグドリングに達する。アームが3組あるときは、 Pr の四分の二は中間の一組から、四分の一は第三の一組から各々の車軸を通して第一組に達し、コグドリングに至る。それゆえ、車軸の大小を計算すると、 $\frac{1}{2}P$ もしくは、 $\frac{3}{4}P$ で P に代え、 $\frac{1}{2}$ H.P.、もしくは、 $\frac{3}{4}$ H.P.でH.P.に代えるべきである。

また、車の両側に各コグドリングを設置し、力を引き出すときは、車軸がちゅう拉力を受けることがない。それゆえ、軸直径を計算するには、ベンディング作用の理論に従い、車の重力だけを論じるだけでよい。

車の重力に相当して、車軸の太さを定めるには、先ず、両頸上の圧力を知る必要がある。第1図の中で、甲乙の車軸の長さを L とし、子丑寅の点において、 $w_1 w_2 w_3$ の荷があるとする。甲子、甲丑、甲寅の距離を $L_1 L_2 L_3$ とし、甲頸の圧力を P 、乙頸の圧力を Q とする。そうすれば、

$$P = \frac{w_1 L_1 + w_2 L_2 + w_3 L_3}{L} \quad \text{己式}$$

$$Q = w_1 + w_2 + w_3 \quad \text{庚式}$$

このように、頸の圧力を定め、そうして子丑寅諸点のベンディングモーメントを求めると次のようになる。

$$\text{子点} \quad M_1 = pL_1 \quad \text{辛式}$$

$$\text{丑点} \quad M_2 = pL_1 + (p - w_1)(L_2 - L_1) \quad \text{壬式}$$

$$\text{寅点} \quad M_3 = pL_1 - (p - w_1)(L_2 - L_1) + \{P - (w_1 + w_2)\}(L_3 - L_2) \quad \text{癸式}$$

すなわち、子丑寅諸点において、上のモーメントに比例する垂線が子日、丑月、寅火を画き、直線で端点、甲日月火乙を連結すれば、中間の任意の点、乾のモーメントは、その垂線、乾坤と同比例になる。だから、最大モーメントが生じるには、必ず子丑寅の力点の位置にある。

重力 w_1 w_2 w_3 は、アームを経て、軸に達し子丑寅の定点にあって、作用を及ぼす。この他に、車軸そのものが重力 w_0 を持ち、甲乙全長に通じ、その作用が平等である。但し、これで車の重力 w に比べると、僅かに一小部分だけであって、頸上圧力は w_0 であるために増加するとしても、これまた、少しばかりである。それゆえ、車軸は常に平らで垂直であると仮定し、重心は甲乙の中央に位置し、両頸上の圧力増加は、各々 w_0 の半分と見なすことができる。従って、子丑寅のベンディングモーメントは車軸の重力があるために増加し、次の式のようになる。

$$\frac{1}{2}W_0 \frac{L_1(L-L_1)}{L} \quad \text{子式}$$

$$\frac{1}{2}W_0 \frac{L_2(L-L_2)}{L} \quad \text{丑式}$$

$$\frac{1}{2}W_0 \frac{L_3(L-L_3)}{L} \quad \text{寅式}$$

これで、前段の M_1 M_2 M_3 に加えれば、ベンディングモーメントは完全になる。すなわち、軸の大小は子丑寅、各点において定めることができる。軸が平直で、直径が一樣であるときは、もとより、最大モーメントを用いるべきである。けれども、ベンディングモーメントは両端に至るにつれて次第に減少していくので、車軸の太さもまた、左右いくにつれ減少するのである。車軸にリブを据え付け、両端に向かい、その高さを逡減するのはこのためである。

前述により、頸上圧力を定め、それで最大ベンディングモーメントを計算し、その後、これを用いて車軸の太さを求めよう。円筒銑鉄で

直径をインチで計算すれば、

$$D = 0.300\sqrt[3]{m} \quad \text{卯}$$

鍊鉄軸であれば、

$$D = 0.250\sqrt[3]{m} \quad \text{辰}$$

以上で充分である。木製であれば、銑鉄製の2.5倍の太さで足りる。

又、方形軸であれば、その方辺 $S = 0.94D$ である。又、内空の円筒軸であれば、戍式を用いる必要がある。第二図のように、リブを装着するときは、その総高さ h は、直径 d の3倍で厚さ、 T は直径の三分の一であるのが普通である。その後で、この裁面のモーメントを計算し、円面の直径 d のモーメントに適合させれば、

$$D1 = 0.576d \quad \text{巳}$$

を得る。だから、 $H = 1.727d$ 及び $T = 0.192$ である。 Pr と m のモーメントを相比较して、一方が大変大きいのであれば、他方は細微として、捨て去らなければならない。即ち、ちゅう拉モーメントが大きければ、丙丁式を用い、ベンディングモーメントが大きければ、卯辰式を用いることができる。けれども、右両モーメントの差が最小であれば、当然、

$$M + \sqrt{m + (pr)}$$

でもって、丙丁式の pr に代用するべきである。

車を軸に取り付ける方法は、製作者の意見に従い、その理論が大きく異なっている。その一法は、銑鉄アームで車をきっちりと据え付け、これでもって、隔回に引長力と圧搾力に抵抗させることができるよう

になる。又、他の方法では、テンションロット（被索棒）、数条で車を据え付けるのであり、改良鉄製水車にはもっぱらこの方法を適用する。第一の方法では、アームは銑鉄鑄物で、銑鉄製の中心枠の凹所にはめ込み、ボルトで据え付ける。或いは、錬鉄板のアームで中心枠にリベットを打つのである。この方法は相似している。

いわゆる、サスペンション（釣掛）原理に従い、水車を造るときは、軽い錬鉄棒で軸から車を釣れば十分である。だから、鉄棒の代わりに鎖を使うのは、道理に合っているだけでなく、実地上、又非常に簡単で、かつて、二、三の水車にこれが装着されたことがある。また、荷車の輪にこの方法を適用する人がいる。だが、鎖は柔軟であるから、多少不便なところがあって、ついには、広く用いられることはなかった。錬鉄の円棒が大変便利である。

旧来のサスペンション構造法で造られた水車では、アーム及び斜めの止め金の端に雌ネジを付け、ネジで中心枠に取り付けるの。このようにすれば、アーム及び止め金を装着するのに大変便利だが、運転中に振動が発生し、そのためにネジが緩み、外れ、危害が水車に及ぶことがあるだろう。これは好ましいことではないので、フェーヤベルン氏はアームの端を四角形に作り、雁鍵（かりかぎ）と栓を使って中心枠の凹所に装着する場合、蒸気機関のピストンを取り付けるようにしたのである。

側板は銑鉄板で数個の扇面形に造り、曲鋸（まがりつば）を鑄付けて、ボルトとで水受け板に据え付ける。扇面の内周には突出する鋸が

あり、底板を受けるのに便利である。アームはその直径が通常2インチから2.5インチである。斜めの止め金は、1.75インチから2インチとする。底板は錬鉄で造り、その厚さは8分の1ぐらいで、リベットで連結する。並びに、通気法に据え付けた車には底板を用いないことが多い。