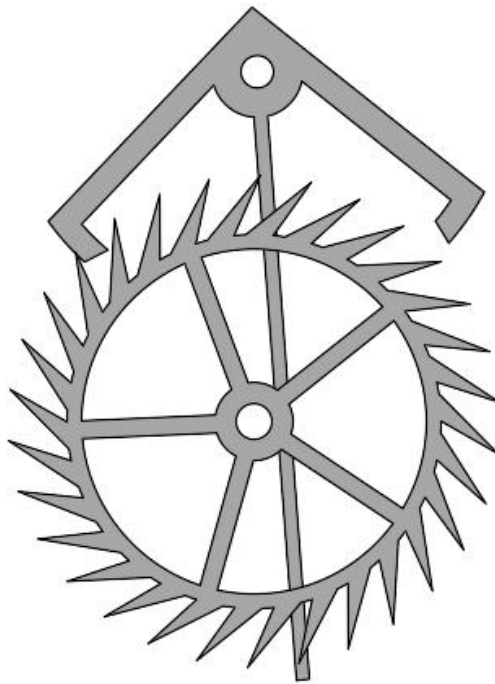


# 脱進機 (escapement)

translated from  
“<http://en.wikipedia.org/wiki/escapement>”  
by S. Yamauchi

2017年6月27日



## アニメーション (Scappamento.gif)

脱進機 (escapement) は機械式時計で用いられており、計時要素にエネルギーを伝える (インパルス作用) とともに、振動を計数する (ロッキング作用) 装置である。インパルス作用は、計時要素 (通常は振り子またはテンブ (balance wheel)) にエネルギーを伝え、振動時の摩擦によるエネルギー損失を補って振動を持続させる作用である。コイルばねまたは重りの力が輪列 (gear train) を介して脱進機に伝わり、脱進機が駆動される。脱進機は、ガンギ車 (escape wheel) の歯をロック状態から外してドライブ状態に変え、引き続いて反対側のアームが歯車の他方の歯をとらえて、歯車を再度ロック状態にする。時計のチクタク音は、脱進機がロックするときに輪列が止まる音である。チクタク音ごとに輪列は加速・減速を繰り返している。脱進機のこのロッキング動作により、計時要素のサイクル数をカウントすることができる。各サイクルごとに、輪列は少し回転して停止する。この周期的な回転により表示盤の針 (timepiece's hands) は一定速度で前進する。時計が順調に動作しているとき、スプリングまたは重りのエネルギーの大部分は、この回転・停止の動作で消費される。

## 目次

1	歴史	3
1.1	液体駆動の脱進機	3
1.2	機械式脱進機	4
2	信頼性	5
3	精度	5
4	機械式脱進機	7
4.1	バージ脱進機	7
4.2	クロス・ビート脱進機	8
4.3	アングル脱進機	8
4.4	デッドビート脱進機	9
4.5	ピン・ホイール脱進機	10
4.6	デテント脱進機	10
4.7	シリンダー脱進機	12
4.8	デュプレックス脱進機	12
4.9	レバー脱進機	13
4.10	グラスホッパー脱進機	14
4.11	重力脱進機	14
4.12	同軸脱進機	16
4.13	コンスタント脱進機	17
5	電気機械式脱進機	18
5.1	ヒップ・クロック	18
5.2	自由振子時計	18

# 1 歴史

技術の歴史における脱進機は、機械式時計を可能とするキーとなる発明であったという点で重要である [1][2]。

13 世紀ヨーロッパにおける脱進機の発展により、時間と計測する方法は、水時計における水の流れるような連続的のプロセスを利用するものから、振り子のスイングのようなより正確な反復振動プロセスを利用するものへと変化した [2]。振動を用いた時間計測法は現代のすべての時計で用いられている。

## 1.1 液体駆動の脱進機

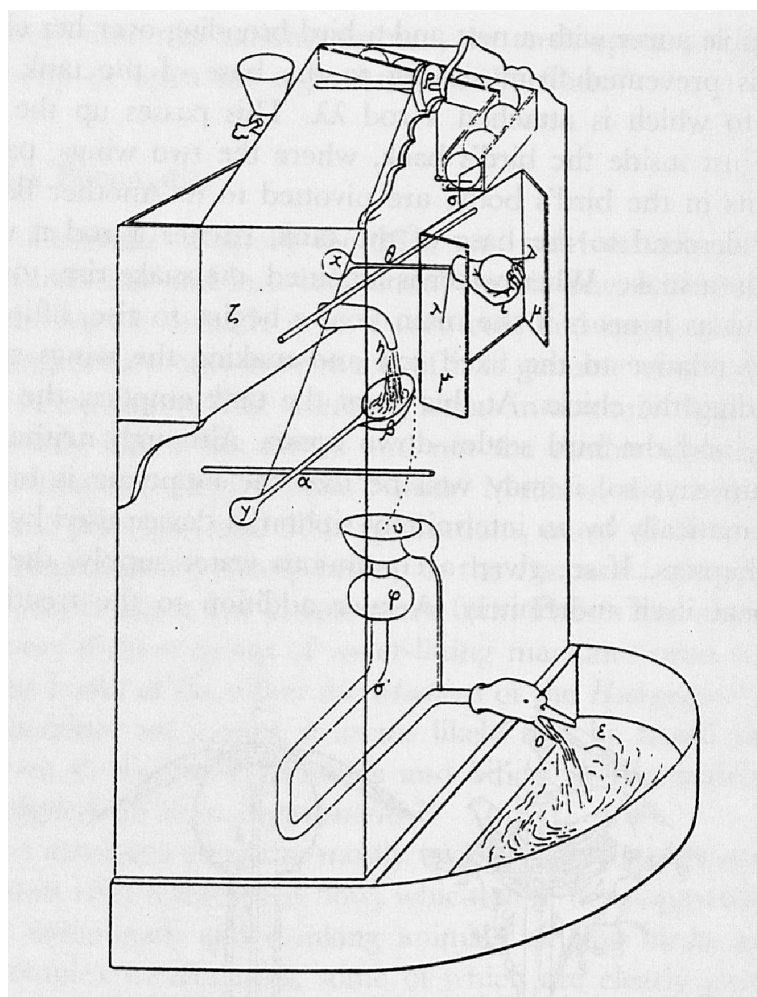


Fig. 1 脱進機メカニズムの最初の例として知られている BC3 世紀ギリシャの洗面台機械 (washstand automaton)[3]

最初の液体駆動脱進機は、ギリシャの技術者 Philo of Byzantium (ビザンチウムのフィロン, BC 3 世紀) が、彼の技術書 Pneumatics (chapter 31) の中で洗面台の一部として記載している [3]。重りで釣り合わせたスプーンにタンクから水を供給し、満杯になると洗面器へ移し変え、その過程で球形の軽石を離す。スプーン

が空になると、釣り合い重りで持ち上げられ、紐を引いて軽石の扉を閉める。とりわけ、Philo が“その構成は時計の構成と類似である”とコメントしていることは、古代の水時計においてこのような脱進機のみカニズムが既に考案されていたことを示している。

中国においては、唐王朝の仏教僧侶 Yi Xing が 723 年（または 725 年）に、水力式の天球儀を駆動する脱進機と時計とを作った [4]。宋王朝（960-1279）時代の測時学者の Zhang Sixun (fl. late 10th century) と Su Song (1020-1101) は、彼らの天文時計塔に脱進装置を用いた [5] が、その後、技術は停滞し後退した [6]。Ahmad Y. Hassan によると、Alfonso(アルフォンソ) X 世の 1277 年につくられたスペインの水銀脱進機は、初期のアラビアにまでさかのぼることができる [7][unreliable source]。この水銀脱進機の知識は、アラビア語およびスペイン語書物の翻訳によりヨーロッパ中に広がっていたようである [7][8]。

しかし、これらは測定時間内にオリフィスを通して流れる流体の流れに依存しているから、いずれも真の意味での機械式脱進機ではなかった。例えば、Su Song の時計では、水がピボットの上の容器内へ流れていた。脱進機の役目は、いっぱいになると容器をひっくり返すことであり、これにより、一定量の水が計量されるごとに時計のガンギ車を進める。しかし、機械式時計の開発は、時計の動作を振動する重りで制御する脱進機の発明に依存している。中国の装置での水の連続的な流れとは違って、ヨーロッパ中世の脱進機は別々の動作を定期的に繰り返し継続することと、それ自身で元の状態に戻る動作ができる点に特徴がある。

どちらの技術も脱進機を用いているが、これらは名称が共通しているだけである。中国のものは間欠的に動作するのに対して、ヨーロッパのものは、別々の動作であるが、連続して動作を繰り返す。どちらも主な動力源として重力を用いているが、動作は非常に異なっている。機械式時計では、落下する重りが連続な平坦な力を輪列に及ぼし、それを脱進機が交互に受け止めて、コントローラで制御されたリズムで力を開放する。ガンギ車を回す力自身が巧妙にガンギ車を止め、そして部分的に逆向きに回し、……。言い換えると、一方向の力が自己逆転的な動き（3 歩前進 1 歩後退の動き）となる。しかし、中国の時計の場合は、加わる力は一定ではなく、バケットに加わる重さが大きくなってリリースを傾けると、ガンギ車を保持していたストッパーを持ち上げる。これによりガンギ車は数 10 度回転し、ストッパーが後方へ倒れている間に次のバケットを水流の下へ持ってくる。中国の時計では、このようにして一方向の力により一方向の動きが生じている [9]。

## 1.2 機械式脱進機

ビラルド・ド・オヌクール (Villard de Honnecourt 13 世紀フランス) は、ある装置のなかで、原始的な形の脱進機を発明している [10]。その装置は、あまり精度は要求されていないが、明らかに時間を計測するためのものと思える。最初の機械式脱進機、バージ脱進機は、ベルを鳴らす装置に用いられた。その装置は、時計に採用されるまでの数世紀間、alarum と呼ばれていた [11]。それは最初の機械式時計（大きな時計塔）の時間測定器として 14 世紀のヨーロッパで登場した。これらの初期の時計塔のうち、どれが機械式でどれが水時計であったかを見分けるのは困難であるため、その起源や最初の使用例は不明である [12]。しかし、時計の建造費が急増するなどの間接的な証拠により、13 世紀末に現代の時計脱進機が発展したことがうかがえる。天文学者の Robertus Anglicus は 1271 年に、時計製作者らは脱進機を発明しようとしているがまだ成功していない、と記述している [13]。一方、1300 年までに機械式脱進機の時計が存在していたことは、ほとんどの資料で一致している [14]。

現に、脱進機の最初の記述、ウォーリンフォードのリチャード (Richard of Wallingford) が聖アルバンス修

道院に建造した時計の手稿『Tractatus Horologii Astronomici』では、パージ方式でなく、strob 脱進機と呼ばれるものの変種であった [15][16]。それは同じ軸の交互に半径方向の歯を有する一对のガンギ車で構成されていた。パージ棒が両輪の間に吊るされており、短い crosspiece がまずある方向に回転し、互い違いの歯が通過すると逆の方向へ回転した。他の例は知られていないが、これが最初の脱進機的设计であったろう [15]。

しかし、パージ方式は初期のすべての時計 (clock および watch) で用いられた標準的な脱進機であり、400 年の間、唯一の脱進機であった。その摩擦とリコイル動作のため性能は制限されていたが、これらのパージ・フォリオット式時計ではバランススプリングのない初期のフォリオット式のテンプであり、自然の振動 (natural "beat") ではなかったため、その脱進機の改良は期待できなかった。

1657 年頃の振り子およびバランススプリングの発明により時計 (watch および clock) の時間計測要素が調和振動子方式に変わり、精度が飛躍的に向上したことにより、脱進機の誤差に焦点が当てられて、間もなく、より正確な脱進機がパージ式に取って代わった。次の 2 世紀間の機械式測時法の黄金世紀では、おそらく 300 にのぼる数の脱進機が発明された。ただし、時の試練を受けて広く使用されたのは 10 種類程度であった。それぞれについて、以下に記述する。

1920 年の水晶振動子とクォーツ時計の発明により、時間計測の技術的研究は電子的方法にシフトし、脱進機設計におおむね終止符が打たれた。

## 2 信頼性

脱進機の信頼性は、その製作者の品質と与えられる保守のレベルとに依存する。製作がまずかたり、保守が不完全であれば、脱進機に問題を生じる。脱進機は振り子やテンプの往復運動を時計の輪列の回転に正確に伝えなければならず、振動を持続するために、振り子やテンプに十分なエネルギーを伝えなければならない。

多くの脱進機では、脱進機のアンロック動作 (unlocking) は滑り動作を含んでいる。例えば、上に示すアニメーションでは、振り子が振れるときアングルのパレットはガンギ車の歯に対して滑る。パレットは研磨した宝石 (例えば人造ルビー) のような硬い材料で作られているが、それでも通常は潤滑することが必要である。潤滑油は蒸発、ほこり、酸化等により長い間には劣化し、定期的な再潤滑が必要である。これを行わないと、計時機能は信頼できなくなるか、または停止してしまい、脱進機部品は急速に摩耗してしまうであろう。現代の時計の優れた信頼性は、一義的に潤滑に用いられる高品質の油に依存している。高級時計の潤滑油の寿命は 5 年以上はあるであろう。

18 世紀の John Harrison のグラスホッパー脱進機のように、いくつかの脱進機では、すべり摩擦を回避している脱進機もある。この脱進機では、輪列の他の部分の潤滑は必要であったが、脱進機自身を潤滑する必要はない。

## 3 精度

機械式時計の精度は、計時装置の精度に依存する。これが振り子であれば、振り子のスイングの周期が精度を決める。もし、振り子の棒が金属でできておれば、棒は熱で膨張収縮して振り子を長くまたは短くし、これによりスイングに要する時間が変化する。高価な振り子時計では、この変形を最小にするために、特殊な合金が用いられる。振り子がスイングする弧の角度により、周期が変化する。高精度の振り子時計は、円運動に伴う誤差を最小にするために、弧の角度を非常に小さくしている。振り子を用いる時計は、かなりの精度を達成することができる。海上では船舶の自然な揺動により振り子の精度は悪くなるが、実験室では、20 世紀にな

るまで、振り子時計が基準の計時装置であった。

脱進機も精度に大きな役割を演じる。振り子の円弧軌道上でインパルスを与える位置により、振り子の周期が本来の周期からどれくらいずれるかが決まる。理想的には、振り子がスイングする最下位置で、左右各方向に均等にインパルスを加えるべきである。このことは、”being in beat” と呼ばれている。これは、振り子が最下位置 (mid-swing) へ近づくときに振子を押しと進み、逆に最下位置から離れるときに振子を押しと遅れるからである。このようにインパルスが均等に加えられておれば、スイング時間を変えずに振り子にエネルギーを与えることができる [18]。

流布している意見に反して、振り子がスイングに要する時間 (周期) は一定ではなく、振幅により変化する (see Pendulum)。振幅が  $4^\circ$  から  $3^\circ$  に変わると、振り子の周期は約 0.013 パーセント減少し、一日に 12 秒進むことになる。これは、振り子の復元力が角度変位  $\theta$  に比例するのではなく、 $\sin \theta$  に比例することに起因している。振り子の周期は小さい角度の近似の範囲内で近似的に線形であるに過ぎない。時間一定であるためには、振り子の軌道はサイクロイド曲線でなければならない。振幅の影響を最小にするには、振り子のスイングはできる限り小さく保たれる必要がある。原則として、インパルスの方法が何であろうとも、振り子、テンプのいずれにおいても、脱進機の動作が振動に及ぼす影響は最小でなければならない。脱進機が与える影響は、その大きさにかかわらず脱進機エラーと呼ばれている。

すべり摩擦のある脱進機はすべて潤滑を要するが、これが低下すると摩擦が増加して、おそらく、計時装置に伝えられる動力が不足となる。計時装置が振り子であれば、摩擦力の増加は  $Q$  係数を減少させ、共鳴バンド幅を広げ、精度を落とす。スプリング駆動の時計の場合は、スプリングにより加えられるインパルス力は、スプリングが解けるにつれてフックの法則にしたがって変化する。重りに働く重力で駆動する時計の場合は、重りが落ちてそれを吊るす鎖が長くなるにつれて、インパルス力は大きくなる。ただし實際上、この影響は大型の公共の時計等で現れるだけである。

腕時計や、さらに小さい時計では、計時装置として振り子を使わない。代わりに、これらではひげゼンマイ (balance spring) が用いられる。金属のテン輪 (タイヤのない自転車のリムを想像されたい) にとりつけた微細なスプリングである。テンプ (balance wheel) は前後に回転する。優秀なスイスの時計は 4 Hz (1 秒に 4 サイクル、または 8 ビート) である。いくつかの時計では、より速い速度を用いている。ひげゼンマイもまた、温度変化の影響を受けてはならない。非常に手の込んだ合金が用いられ、この分野では、時計製造は今なお進歩中である。振り子を用いる場合と同様にテンプを回転させ続けるには、脱進機は各サイクルで小さなキックを与えねばならない。同じ潤滑問題が発生し、脱進機の潤滑が途絶え始めると、時計は精度を失う (典型的には速くなる)。

懐中時計は現代の腕時計の前身である。懐中時計はポケットに入れられるので、通常は鉛直向きになる。重力はテンプの対称性を長い間にわたって損なうので、精度をいくらか悪くする。これを最小にするためにツアビリオン (tourbillon) が発明された。テンプとスプリングを籠の中に収め、籠が回転 (必須ではないが、典型的には 1 分に 1 回程度) 回転して重力の偏りをなす。この巧妙で複雑な時計作品は、時計の価値ある複雑化の例である。もっとも、携帯者がごく自然に動きさえすれば、重力の影響は平均化される傾向になり、懐中時計にとってもより良いであろうが。

商業的に製造されたもので最も正確な機械式時計は、W. H. Shortt が 1921 年に発明した Shortt-Synchronome 自由振り子時計である。それは、1 年に約 1 秒の誤差であった [19][20]。今日、最も正確な機械式時計は、1990 年に考古学者 E.T.Hall により作られた Littlemore Clock であろう。Hall の論文のなかで、これは 100 日で  $3/10^9$  (0.02 秒) の誤差であったと報告している。これらの時計はどちらも電気機械式の時計であり、振り子を計時要素として用いて、重りにエネルギーを供給するのに機械式輪列でなく電氣的動力を用い

ている。

## 4 機械式脱進機

振り子とテンプ (balance spring) が導入されて正確な計時が可能となった 1658 年以降, 300 種類を超える機械式脱進機が考案されたと推測されるが, 広く普及して使われたのは 10 程度のものだけであった [22]。それらについては下記に記述する。20 世紀に電子式の計時法が機械式時計に取って代わり, 脱進機の設計は, ほとんど知られていない好奇心の対象でしかなかった。

### 4.1 バージ脱進機

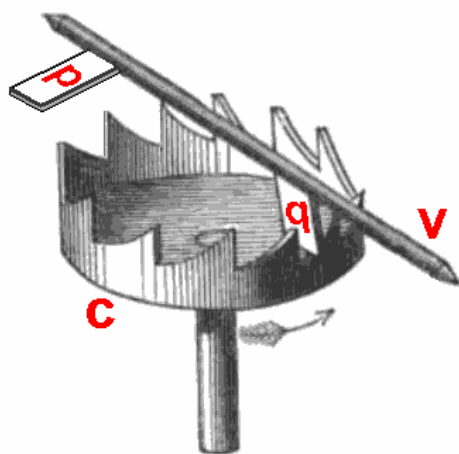


Fig. 2 バージ脱進機 ; (c) 王冠歯車, (v) バージロッド, (p,q) パレット  
図は振り子を用いる場合の向きを示す。フォリオットを用いる場合は, 王冠歯車とロッドは鉛直方向となる。

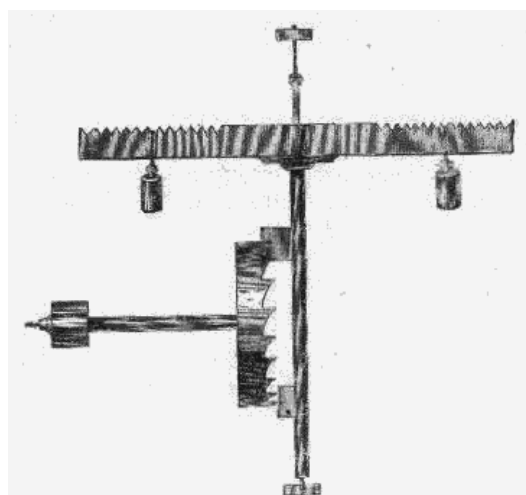


Fig. 3 1379 年パリで建造された De Vick Clock のバージとフォリオット

1275 頃以降のヨーロッパで最初の脱進機は, バージ脱進機 (王冠歯車脱進機としても知られている) であった。それは最初の機械式時計で用いられ, 元々, フォリオット (foliot; 両端に重りを取り付けた水平な棒) で制御されていた。その脱進機は, 横から軸方向へ突き出した尖った歯を持つ王冠のような形のガンギ車 (水平軸) で構成される。王冠歯車の前には, 上部にフォリオットを取り付けた鉛直な軸があり, その軸にはフラグポールの旗のように 2 枚の金属板 (パレット) が取り付けられており, 2 枚のパレットは 90° ずれた向きとなっており, ある時刻には片方だけがガンギ車にかみ合うようになっている。歯車が回ると, 片方の歯が上側のパレット, シャフト, さらにそれに取り付けられているフォリオットを押し去ると, 下側のパレットが歯車の他方側の歯の間に振れて入る。歯が下側のパレットとかみ合い, シャフトを逆方向へ回し, このサイクルが繰り返される。この脱進機の短所は, 歯がパレットにかみ合い王冠歯車の方でパレットを動かす前に, フォリオットの慣性のためにパレットが王冠歯車を短い距離だけ逆方向に押すことである。これはリコイルと呼ばれており, 摩耗と不正確さの原因となる。

バージは 350 年間、時計に用いられる唯一の脱進機であった。ばね仕掛けの時計では、主スプリングの力を均一にするために円錐滑車が必要であった。円錐滑車は振り子時計が 1656 年に発明されてから約 50 年後の、初期の振り子時計で用いられたものである。振り子時計では王冠歯車とバージ軸は水平方向に配置され、振り子がスタッフ（軸に取り付けた杖状のもの）につるされる。しかし、バージは脱進機の中では最も精度が悪いものであり、1650 年に振り子が導入された後は、バージは他の脱進機に置き換えられ始め、1800 年代の終わりまでには放棄されてしまった。このときまでに、薄い時計が求められていたので、ガンギ車は非常に小さく作られ、磨耗の影響が拡大され、この時代に作られた時計を現在動かすと、速く動いて 1 日に数時間進むであろう。

#### 4.2 クロス・ビート脱進機

1584 年 Jost Bürgi は、2 つのフォリオットを用いたバージ脱進機の改良版のクロスビート脱進機を発明した。彼自身の調速テンブ (remontoire) の発明と合わせて、この改良により、彼の時代の機械式時計の精度は 2 桁の大きさに改善され、彼の時計では、1 日に 1 分以内の精度で合うようになった [23]。

#### 4.3 アンクル脱進機

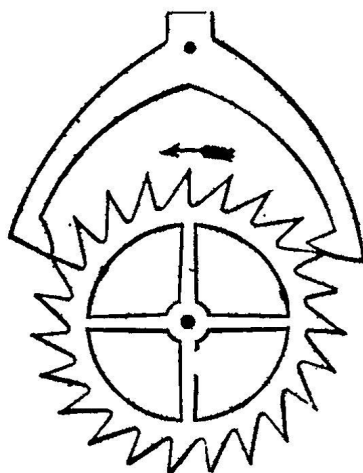


Fig. 4 アンクル脱進機

1660 年ごろ Robert Hooke により発明されたアンクルは急速にバージに取って代わり、17 世紀間を通じて振り子時計に用いられる標準的な脱進機となった。その長所は、広がった振り子の振れ角を  $3-6^\circ$  にまで縮小し、振り子をほぼ等時性に近づけ、エネルギー損失の少ない、より長くてゆっくり動く振り子を使用できるようにしたことである。これが原因で、ほとんどの振り子時計、とりわけグランドファーザークロックは細長い形状となった。

アンクル脱進機は、後方に傾いた尖った歯を持つガンギ車と、その上方にピボットで取り付けられて左右へ振り子のように揺れる錨形の部品（アンクル）とで構成されている。アンクルはそのアームの先に傾斜したパレットが付いており、パレットはガンギ車の歯に交互にかみ合い、動力を受け取る。機械的には、その動作はバージ脱進機と類似の動作を行い、バージの持っていた二つの欠点を引き継いでいる：



- (1) 振り子はガンギ車の歯によってそのサイクル間継続的に押され、自由に振れることがないため、等時性が乱される。
- (2) リコイル脱進機であり、アンクルはサイクルのある間、ガンギ車を逆向きに押す。これがバックラッシュを生じ、時計の歯車に摩擦を増やし、精度低下をもたらす。

これらの問題はデッドビート脱進機で取り除かれるが、精密な時計では、デッドビート脱進機が徐々にアンクルに取って代わった。

#### 4.4 デッドビート脱進機

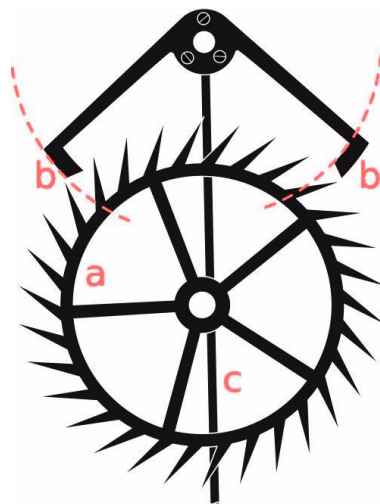


Fig. 5 デッドビート脱進機 [24] : (a) ガンギ車 (b) パレット (c) 振り子クラッチ

Graham 脱進機またはデッドビート脱進機はアンクル脱進機の改良である。デッドビート脱進機はしばしば、1715 年にそれを普及させた George Graham の発明とされているが、1675 年に Richard Towneley の設計に基づいて Thomas Tompion により最初作られたのであり [25][26][27]，Graham は Tompion の後継者であった。アンクル脱進機では、振り子はそのサイクルの一部でガンギ車を逆方向に押し戻す。この”リコイル”は振り子の運動を乱し、精度を落とし、輪列の回転方向を逆向きにし、バックラッシュを引き起こし、システムに大きな荷重をもたらし、摩擦と摩擦を引き起こす。デッドビートの主な利点は、リコイルを除去したことである [11]。

デッドビート脱進機のパレットは、アンクルの回転中心 (ピボット) を中心とした円筒面状の第 2 の ”ロッキング” 面を有している。振り子が揺れる極限まで、ガンギ車の歯はこのロッキング面上に静止しており、振り子に何の力も作用させず、リコイルを防止している。振り子の揺れの最下位置近くで、歯は滑ってロッキング面をはずれて傾斜したインパルス面へ移り、パレットが歯を離れる前に振り子をひと押しする。これは、脱進機のロッキング動作とインパルス動作を分離した最初の脱進機である。デッドビートは最初は精度標準時計として用いられたが、その高精度のため、19 世紀にはアンクルに取って代わった。それは、重力脱進機を主に用いている時計塔を除けば、現代のほとんどすべての振り子時計に使われている [18]。

#### 4.5 ピン・ホイール 脱進機

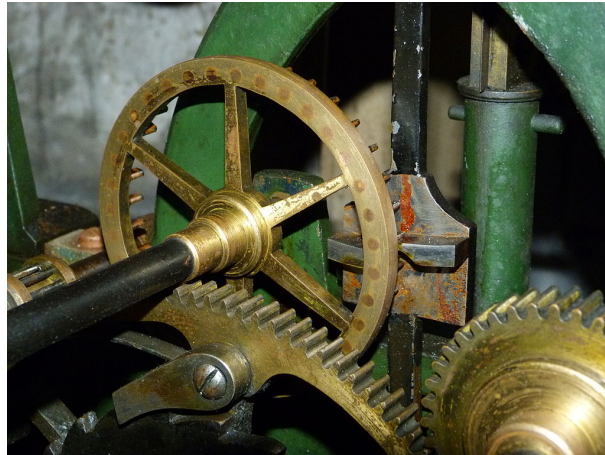


Fig. 6 South Mymms 時計塔の時計のピンホイール脱進機

1741 年頃 Louis Amant により発明されたこの型のデッドビート脱進機は、かなり粗雑に作る事ができる。ガンギ車に歯を使う代わりに円筒形のピンを用い、鉄のようなアングルで停止・開放する。アマント脱進機または（ドイツでは）Mannhardt 脱進機と呼ばれるこの脱進機は、時計塔の時計でかなり頻繁に用いられている。

#### 4.6 デテント 脱進機

アニメーション (chronometeranimation.gif)

デテントまたはクロノメーター脱進機は分離 (detached) 脱進機の一つであり [29]、もっぱらマリクロノメーターで一般的に使用されている。また 18, 19 世紀のいくつかの精密時計でも採用されていた [30]。初期の型のものは、1748 年に Pierre Le Roy により発明された。彼は、ピボットデテント (pivoted detent) 式の脱進機を作ったが、理論的には欠陥があった [29][31][32]。最初の有効なデテント脱進機的设计は、1775 年に John Arnold によりピボットデテントを用いて発明された。この脱進機は 1780 年に Thomas Earnshaw により改良され、(Earnshaw を雇っていた) Wright が 1783 年に特許を取ったが、パテントの図示どおりには動作しなかった。Arnold はまた、スプリングデテント脱進機も設計したが、改良を施したうえで、Earnshaw の版が基本的アイデアとして優先権を与えられ、18 世紀の最後の 10 年の間にいくつかの改良を施された。最終的な形は 1800 年頃現れ、この設計は、1970 年代に機械式クロノメーターが時代遅れとなるまで使用された。

デテント脱進機は分離脱進機の一つであり、サイクルの大部分の期間テンプが自由に振動することができ、振り子の各周期で 1 回 (2 スイングで 1 回) だけ、短時間のインパルスを加えるだけであった。インパルスを加えるガンギ車の動きもパレットとほとんど平行となるため、滑り摩擦がほとんどなく、潤滑を要しなかった。このため、他の要素も加わって、テンプ式計時装置としては、デテントはもっとも精度の高い脱進機であると考えられてきた。

John Arnold はオーバーコイルバランススプリング (1782 年特許) を用いたデテント脱進機を最初に用いた。この技術的な長所により、彼の時計は 1 日に 1 ないし 2 秒以内という正確な最初の懐中時計となった。こ

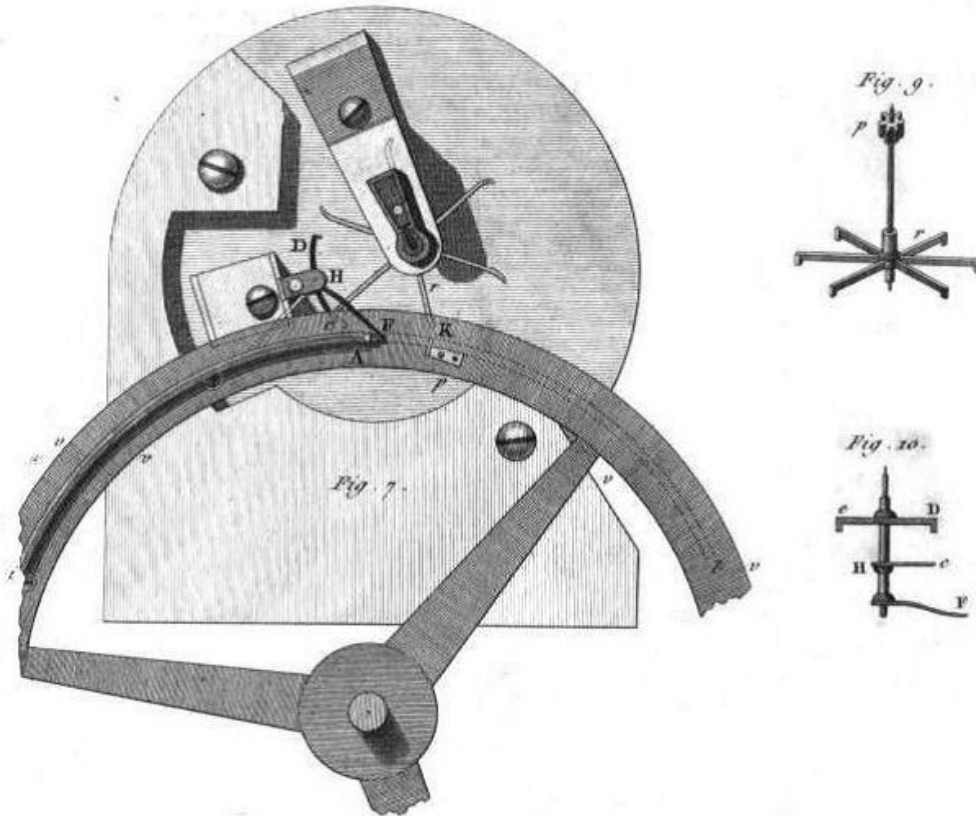


Fig. 7 Pierre Le Roy の最初のデテント脱進機

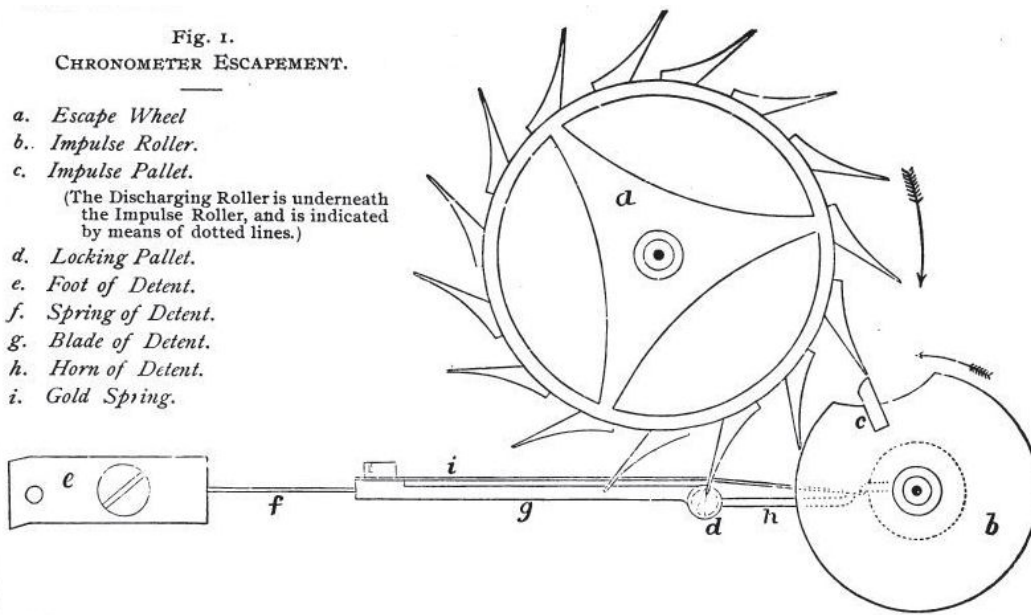


Fig. 8 Thomas Earnshaw のクロノメーター デテント脱進機の図解

れらは 1783 年以降に製作された。

しかし、この脱進機には、懐中時計として使いにくい欠点があった。壊れやすく、高度なメンテナンスを必要とした。また、自己起動性がないため、使用中に衝撃を受けてテンプが停止すると再スタートできず、さらに、量産もしにくいものであった。このため懐中時計では、自己機動性のあるレバー脱進機が標準的な脱進機となった。

#### 4.7 シリンダー脱進機

シリンダー脱進機は時間計測性能の面ではバージ脱進機の改良版であったが、製作がむづかしく、壊れやすく、ガンギ車がテンプに常に接触しているために摩耗に対して定期的に清掃せねばならなかった。それは、フランスおよびスイスの時計製作者の間で一般に使用された。

#### 4.8 デュープレックス脱進機

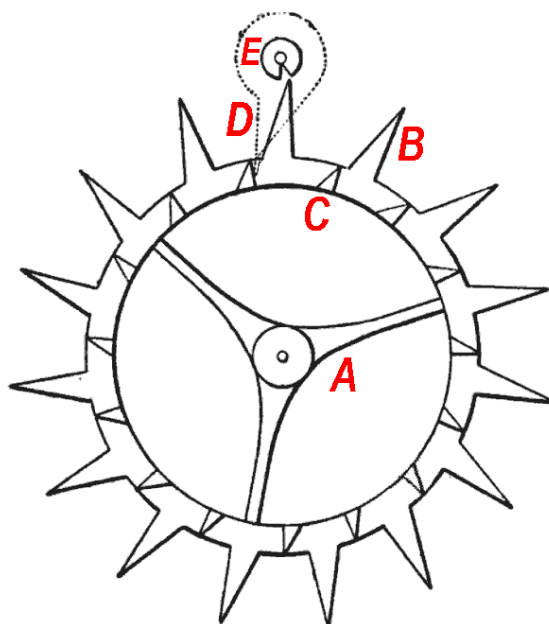


Fig. 9 デュープレックス脱進機；(A) ガンギ車, (B) locking tooth, (C) impulse tooth, (D) パレット, (E) ルビーディスク。パレットとルビーディスクはテンプ軸 (図省略) につながる

アニメーション (603\_dup14.gif)

デュープレックス時計脱進機は 1700 年頃 Robert Hooke により発明され、Jean Baptiste Dutertre と Pierre Le Roy により改良され、Thomas Tyrer により最終の形にされ、Tyrer が 1782 年に特許を取得した [34]。Tyrer の特許 [35] は、2 個のホイールを持つ脱進機 (特定する図なし) を記述しているが、数年以内に他の者が二組の歯を持つ 1 個のホイールを考案して製作している。これはおそらくは特許を回避するためだろうが、1 個のホイールの方が慣性がより小さい、との技術的理由でなされた可能性もある。デュープレックス脱進機は作りにくい、ルビーシリンダーよりはるかに性能が良く、初期のレバー脱進機と同等であり、

注意深く作ればデント脱進機とほとんど同じくらい高精度であった [34][36][37]。デュプレックス脱進機は、1790年から1860年頃まで高品質なイギリスの懐中時計に使用され [38][39][40]、1880-1898の間、アメリカ Waterbury の安価な腕時計 'everyman' に使用された [41][42]。デュプレックス脱進機では、クロノメーター脱進機と同様に、テンプはサイクルの2回のスウィングで1回のインパルスを受ける [38]。ガンギ車は、ホイール端から突き出た長いロッキング歯とチップから軸方向に突き出た短いインパルス歯の二組の歯を持っており、これが'duplex' という名の由来である。ロッキング歯がルビーディスクに接触している状態からサイクルが始まる。テンプが反時計回りに中心位置を通過すると、歯がルビーディスクのノッチに入ってロックが外れる。ガンギ車が回ると、パレットがちょうど位置に来て、インパルス歯がパレットをプッシュする。そして、次のロッキング歯がルビーローラーに当たり、テンプがサイクルを完了し、時計まわりに揺れ戻す間 (CW)、ロッキング歯はそこで止まる。このプロセスが反復される。時計まわりに振れている間、ロッキング歯はルビーローラーのノッチの中へ瞬間的に落ち込むが、ロッキングは解かれない。

デュプレックスはまさつ保持式の脱進機であり、ローラーに歯が接触しているので、テンプは全体として脱進機からフリーではない [38] [43]。クロノメーターと同様に、パレットとインパルス歯はほとんど平行に動くので、滑りまさつはほとんどないので、潤滑油はほとんどいらぬ [44]。しかし、ショックに対する許容性がなく敏感であることから、活動的な人々には不向きである点で、レバー方式に対して劣っている。クロノメーターと同様に、それは自己始動性でなく、調整の影響を受けやすい。もし、テンプが時計回りのときにショックで停止したら、再度始動することができない。

#### 4.9 レバー脱進機

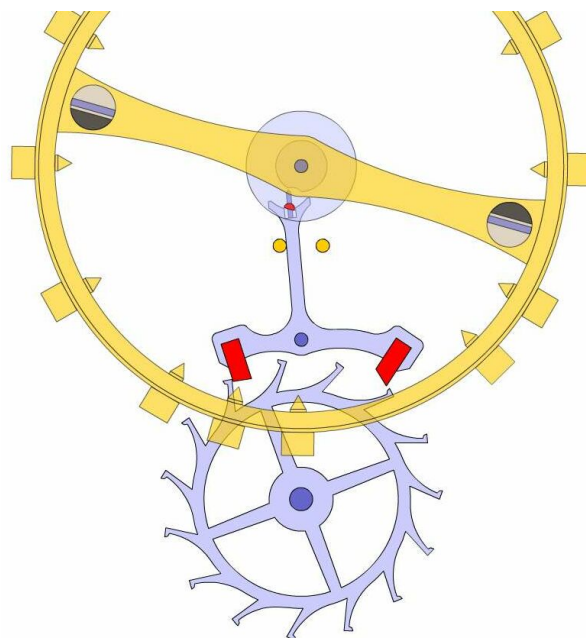


Fig. 10 インラインまたはスイス・レバー脱進機

アニメーション (Paletteankerhemmung.gif)

レバー脱進機は1750年に Thomas Mudge により発明され、19世紀以降の大多数の腕時計で使用されてき



た。その特長は次のようである。

- (1) シリンダーまたはデュブレックス式に比べて、テンプはより分離または独立している；テンプが振れてその中心位置を通る短いインパルス期間だけレバーに接触する。このため、精度が高くなる。
- (2) 自己起動性のある脱進機である；腕時計が振られてテンプが停止しても、自動的に再始動する。

元来の形は、レバーとテンプがレバーのラック歯車を介して常に接触しているラック・レバー脱進機であった。後年、歯車から1個の歯を除く全ての歯が取り除かれ、分離型のレバー脱進機となった。大英帝国の時計製作者は、レバーがテンプに直角となっているイギリス式分離型レバーを用いた。後年、スイスとアメリカの製作者は、レバーがテンプとガンギ車の間に組み込まれたインラインレバーを用いた。後者が現代用いられている形となっている。1867年に、Georges Frederic Roskopf が ロシュコフまたはピンパレット脱進機と呼ばれる、精度は劣るが高価でない方式を発明した。それは20世紀初めに安価な「1ドル腕時計」に用いられ、今も安いアラームクロックや台所タイマーに用いられている。

#### 4.10 グラスホッパー脱進機

(別試料参照)

稀ではあるが面白い機械式脱進機は John Harrison のグラスホッパー脱進機である。この脱進機では、振り子は2つのヒンジアーム(パレット)で駆動される。振り子が動くと、一方のアームの端がガンギ車をつかみ、それを少し後方へ動かす。これが他方のアームをはずし、ガンギ車を通過させる。振り子が再度戻って来るときは、他方のアームがガンギ車をつかみ、少し逆方向へ動かして最初のアームをはずす。等々。グラスホッパー脱進機は他の脱進機より作るのが難しく、あまり使われない。18世紀にハリソンが作ったグラスホッパー脱進機は、現在も動いている。多くの脱進機は、これより磨耗が大きく、より多くのエネルギーを使う。

#### 4.11 重力脱進機

アニメーション (Gravity\_escapement\_2.gif)

重力脱進機は、振り子に直接インパルスを与える際に、小さい重りまたは弱いばねを用いる。最初の形式では、振り子を支えるスプリングのすぐ近くの2本のアームと、それぞれ振り子の両側にピボット固定した2本のアームとで構成されていた。それぞれのアームには傾斜した面のある小さなデッド・ビート・パレットが取り付けられていた。振り子が一方のアームを十分な高さに持ち上げると、そのパレットがガンギ車を開放する。と同時に、ガンギ車の他の歯が動き始め、他方のアームのアンクル面を滑り上がる。その歯はパレットに達して止まる。他方のアームはその間、振り子に接触しており、スタートした位置よりも低い位置へ帰って来る。このアームの降下により、振り子にインパルスを与える。18世紀の半ばから19世紀の半ばにかけて、設計は着実に進歩した。それは結局、時計塔の脱進機として選択された。これらの塔では、屋外に置かれた大きな'hands'により駆動力を得ており、風、雪、氷の重みが加わり、輪列の駆動力は大きく変動するということだが、採用された理由であった。重力脱進機では、輪列から来る駆動力そのものが振り子に作用するのではなく、輪列からの駆動力は、単にインパルスを供給する荷重をリセットするだけであり、脱進機は駆動力の変化の影響を受けない。

ここで示す'二重三脚重力脱進機'は、Bloxam という名の弁護士により最初に考案され、後に Lord Grimthorpe により改良された形のものである。それは全ての精確な'塔型'時計の標準である。

ここで示すアニメーションでは、二つの'重力アーム'が青と赤で色分けされている。二つの三脚ガンギ車

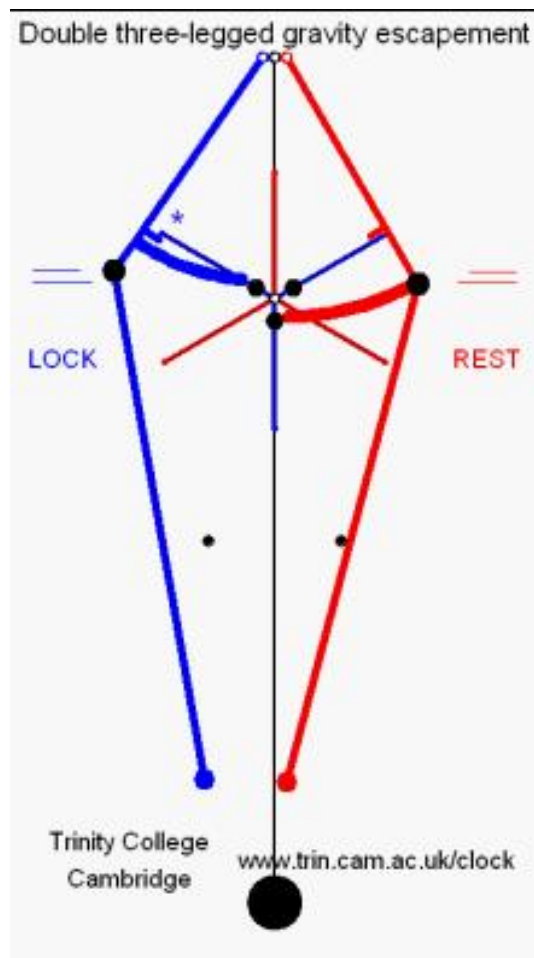


Fig. 11 二重三脚重力脱進機

もまた青と赤で色分けされている。それらは、二つの平行な面内で動作するので、青の車は青のアームのロッキングブロックにだけ、また赤の車は赤のアームのロッキングブロックにだけ作用する。実際の脱進機では、これらの作用は聞きとれる大きなティック音を立てるので、ロッキングブロックの横に \* 印を表示することでこれを示している。3 個の黒いリフティングピンは、脱進機の動作のキーである。それらは荷重のかかった重力アームを、脱進機の横の二重平行線で示す位置まで持ち上げる。ポテンシャルエネルギーのこの増分が、各サイクルで振り子に与えられるエネルギーである。

トリニティ・カレッジ・ケンブリッジ (Trinity College Cambridge) の時計では、50 グラムの質量が 1.5 秒間に 3mm 持ち上げられる (これは 1mW の動力に相当する)。落下物体による駆動動力は約 12 mW であり、脱進機を駆動するのにかなり過剰な動力が使われている。このエネルギーの多くはガンギ車に取り付けられた frictional fly の加速・減速で熱に散逸している。

ロンドンのビッグベンを鳴らしているウェストミンスター (Westminster) の巨大な時計は、二重三脚重力脱進機を用いている。

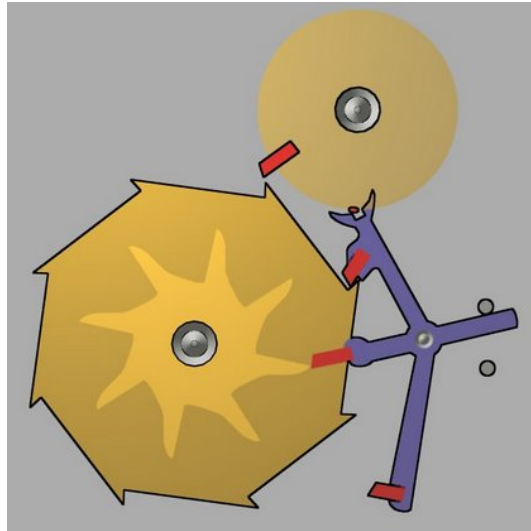


Fig. 12 同軸脱進機

#### 4.12 同軸脱進機

アニメーション (coax.gif)

同軸脱進機 (co-axial escapement) は、英国の時計製作者 George Daniels により 1974 頃 [45] 発明され、1980 年 [46] に特許が取られた。現在、商品市場で採用されている数少ない新しい時計脱進機である。それは分離脱進機 (detached escapement) に分類することができる。

それは、1792 年 Robert Robin により発明された脱進機に遠い起源を持つと見なすことができる。Robin の脱進機は、受動的なレバー・パレットによるロッキングに合わせて一方向の 1 回のインパルスを与える [47]。同軸脱進機のデザインは、もう一つの Robin の変形版である Fasoldt 脱進機に、より良く似ている。Fasoldt 脱進機は、アメリカ人の Charles Fasoldt により発明され、1859 年に特許取得されている [48][49][50]。Robin および Fasoldt の脱進機は共に、一方向インパルスだけを与える。Fasoldt の脱進機では腕の長さ (drop) の異なるレバーがあり、これは直径の異なる 2 つのガンギ車の歯にかみ合う。小さい径のインパルス車はレバー端の単一パレットに作用し、一方、両側に出たレバー・パレットは径の大きいガンギ車をロックする。テンブがローラーピンとレバーフォーク部を介して、レバーに噛み合って駆動される。レバーアングルのパレットが大きい方のガンギ車をロックし、このロックが解除されたときに、レバー端のパレットが小さいほうのガンギ車 (インパルス車) からインパルスを与えられる。戻りの行程ではアングルのパレットがロック・アンロックするだけで、他には何もせず、インパルスはレバー端パレットを介して一方向にだけ与えられる。デューブレックス式と同じく、ロッキング用のガンギ車は面圧力 (したがって摩擦力) を減らすために、より大きいサイズとなっている。

一方、Daniel の脱進機では、大きい径のガンギ車をロック・アンロックするのに受動的なレバーパレットを用いて、2 回のインパルスを達成した。往きの動作時には、ローラーとインパルス・ピンを介して小さいほうのガンギ車でインパルスを与える。帰りの動作時には、大きい方のガンギ車をレバーが再度アンロックすると、ガンギ車はテンブに繋がるインパルス・ローラーに直接インパルスを与える。

主な利点は、両方向のインパルスが中心位置付近で生じるようにして、両方向の摩擦をなくしていることで



ある。このため、同軸脱進機は理論上潤滑なしで有効に動作する。この方式のインパルスは、入り爪に摩擦があるレバー脱進機より理論上優れている。長い間、入り爪の摩擦はテンプの等時性を乱す影響があると認識されてきた [51][52]。

オメガは最終的に 1990 年にこれを採用したが [52]、購買者はもはや、正確さを主な目的として機械式時計を購入しないので、製造者は必要とされる機器の発明にあまり興味を持たない。

高度に工夫された脱進機的设计にもかかわらず、Daniel の同軸方式は、レバーパレットのピボット軸に潤滑を要する。加えて、構造上インパルス・ガンギ車は歯数が少なくなり、輪列に余分の歯車とピニオンが必要となり、その軸受けにも潤滑を要する。それゆえ、レバー方式に対するこの脱進機の利点は未知数である。

#### 4.13 コンスタント脱進機

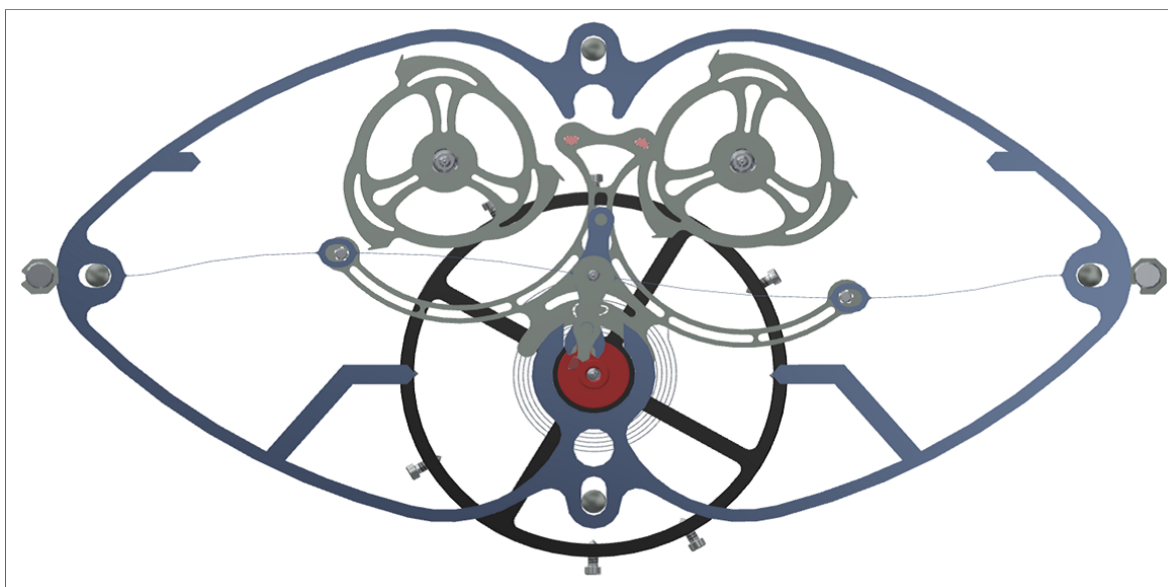


Fig. 13 Girard-Perregaux によるコンスタント脱進機の略図

Nicolas Déhon の代理人として Rolex により最初提出されたパテントの原理によると、コンスタント脱進機は試作プロトタイプとして 2008 年にジラルール・ペルゴ (Girard-Perregaux) により開発され (Nicolas Déhon はそのとき Girard-Perregaux R&D 部門の長であった)、2013 年に腕時計に組み込まれた。この脱進機のキーとなる要素はシリコンのバックル・ブレードであり、それはエネルギーのマイクロアキュムレーターとして動作する。このブレードはその不安定状態のごく近い状態に曲げられており、テンプが与えるほんのわずかのエネルギー (a micro-impulse) で、一方の S-カーブ状態から反転状態 (its-mirror image) へ飛び移り、その過程でテンプをプッシュする。この飛び移り (snap) は常に同一であり、毎回同量のエネルギーを開放し、バレルの変化するエネルギーを補償する。マイクロアキュムレーターの役目は、毎回同量のエネルギーを放出することにより、バレルの減少するエネルギーを補償することである。平均して一定の力が作用する調速テンプ (remontoir) のようなメカニズムとは異なり、これは瞬間的にも継続的にも、真に一定力の脱進機である。

## 5 電気機械式脱進機

19世紀の終わりに、電気機械式脱進機が振り子時計用が開発された。これらでは、振り子のスイングのある短い期間、スイッチまたは光チューブが電磁石を励磁する。いくつかの時計では、振り子を駆動する電気パルスが輪列を動かすブランジャーをも駆動していた。

### 5.1 ヒップ・クロック

ムービー (Hipp Toggle.mp4)

19世紀のなかば、Matthias Hipp は電磁的に駆動される時計用のスイッチを発明した。振り子が振り子棒に取り付けた爪 (pawl) を介してラチェット車を駆動し、ラチェット車が時刻表示の歯車列を駆動する。振り子は毎スイングやある時間間隔で加振されるのではなく、振れがあるレベル以下に減衰したときだけ加速される。カウンタ用爪と同様に、ヒップトグル (Hipp's toggle) と呼ばれる小さなベーンが振り子につけてあり、その上端をピボットでつるされ完全に自由に振れるようになっている。ヒップトグルは、V溝を持つ三角形の磨いたブロックの上を引きずる位置に取り付けられている。振り子のスイングの円弧が十分大きいときは、ベーンは溝を越えて通り越して自由に振れる。振れの円弧が小さくなり、ベーンが溝を越えられないならば、振り子が振れ戻すときに、ベーンがブロックを強く下へ押す。ブロックは、振り子を加振する電磁石の回路の接点を閉じる。振り子は必要なときだけ加振される。

この形の時計は大きなビルで多数の時計を制御するためのマスター時計として広く試用された。多くの電話交換所では、電話呼び出しの設定や課金に際して、毎秒、6秒ごと等と時間を変えてパルスを送る等の時間関係の制御のために、このような時計を用いた。

### 5.2 自由振子時計

アニメーション (AnimationT-Shortt.htm)

20世紀になって、William Hamilton Shortt が自由振子時計を発明し、1921年9月に特許を取り、1日1/100秒の精度で Synchronome Company で製造した。このシステムでは、時間計測用マスター振り子は、温度変化に対してわずかしが長さの変わらないインバーと呼ばれる36%ニッケルの特殊鋼合金で作られており、そのマスター振り子は真空チャンバー内で密封されて、外部の影響からできる限り遮断された状態で振動だけを行う。30秒に1回数分の1秒だけ、マスター振り子用脱進機と機械的接触を行う。もう一つのスレーブ振子がラチェットを回し、ラチェットが30秒弱で1回だけ電磁石を励磁する。この電磁石が、マスター振り子の脱進機に重力レバーをセットし、その数分の1秒後に、マスター振り子の動きにより重力レバーが降下する。このプロセスで、重力レバーはマスター振り子に小さいインパルスを与え、その振子を振らせ続ける。重力レバーは、1対の接点の上に落ち、いくつかの動作をする電気回路をオンにする：

- (1) 重力レバーをマスター振り子の上の最上部まで持ち上げるための第2の電磁石を励磁する。
- (2) 時計ダイヤルをアクティブにするパルスを送る。
- (3) スレーブ振子をマスター振り子と同じステップに同期させるためのパルスを送る。

重力レバーを離すのはスレーブ振り子であるので、この同期は時計の機能にとって極めて重要である。同期機構は、スレーブ振り子の軸に取り付けた小さいスプリングと電磁石の保磁子 (armature) を用いている。電

磁石の保磁子は、スレーブ振り子が少し遅れて動いていたらスプリングをつかみ、スレーブ振り子の1スイングの期間を短くする。スレーブ振り子は、ほぼ毎回同期パルスを出して保磁子がスプリングをつかむように、少し遅く動くように調整されている [54]。この形の時計は天文台用の標準となり (この時計は、ざっと 100 台製造された [55])、地球の自転速度の小さい変動を検出できた最初の時計となった。

## 参考文献

- [1] White, Lynn Jr. (1966). *Medieval Technology and Social Change*. Oxford Press. p. 187.
- [2] Cipolla, Carlo M. (2004). *Clocks and Culture, 1300 to 1700*. W.W. Norton & Co. p. 31. ISBN 0-393-32443-5.
- [3] Lewis, Michael (2000). "Theoretical Hydraulics, Automata, and Water Clocks". In Wikander, Örjan. *Handbook of Ancient Water Technology. Technology and Change in History 2*. Leiden: Brill. pp. 343-369 (356f.). ISBN 90-04-11123-9.
- [4] Needham, Joseph (1986). *Science and Civilization in China: Volume 4, Physics and Physical Technology, Part 2, Mechanical Engineering*. Taipei: Caves Books Ltd, p. 165.
- [5] Needham, Joseph (1986). *Science and Civilization in China: Volume 4, Physics and Physical Technology, Part 2, Mechanical Engineering*. Taipei: Caves Books Ltd, pp. 445 & 448, 469-471.
- [6] Ricardo Duchesne: "Asia First?", *The Journal of the Historical Society*, Vol. 6, No. 1 (March 2006), pp. 69-91.
- [7] Ahmad Y. Hassan, *Transfer Of Islamic Technology To The West, Part II: Transmission Of Islamic Engineering, History of Science and Technology in Islam*.
- [8] Ajram, K. (1992). "Appendix B". *Miracle of Islamic Science*. Knowledge House Publishers. ISBN 0-911119-43-4
- [9] David Landes: *Revolution in Time: Clocks and the Making of the Modern World*, rev. and enlarged edition, Cambridge: Harvard University Press, 2000, ISBN 0-674-00282-2, pp. 18f.
- [10] "A history of mechanical inventions", Abbot Payton Usher(1929),p.193
- [11] Headrick, Michael (2002). "Origin and Evolution of the Anchor Clock 脱進機". *Control Systems magazine*, (Inst. of Electrical and Electronic Engineers) 22 (2). Archived from the original on 2009-10-25. Retrieved 2007-06-06.
- [12] White, Lynn Jr. (1966). *Medieval Technology and Social Change*. Oxford Press. pp. 119-127.
- [13] White, 1966, pp. 126-127.
- [14] Cipolla, Carlo M. (2004). *Clocks and Culture, 1300 to 1700*. W.W. Norton & Co. ISBN 0-393-32443-5., p.31
- [15] North, John David (2005). *God's Clockmaker: Richard of Wallingford and the Invention of Time*. UK: Hambledon & London. pp. 175-183. ISBN 1-85285-451-0.
- [16] Dohrn-van Rossum, Gerhard (1996). *History of the Hour: Clocks and Modern Temporal Orders*. Univ. of Chicago Press. pp. 50-52. ISBN 0-226-15511-0.
- [17] Milham, Willis I. (1945). *Time and Timekeepers*. New York: MacMillan. p. 180. ISBN 0-7808-0008-7.
- [18] Rawlings, Arthur Lionel (1993). *The Science of Clocks and Watches, 3rd Ed.* Upton, UK: The British Horological Institute. ISBN 0-9509621-3-9.

- [19] Jones, Tony (2000). *Splitting the Second: The Story of Atomic Time*. CRC Press. p. 30. ISBN 0-7503-0640-8.
- [20] Kaler, James B. (2002). *Ever-changing Sky: A Guide to the Celestial Sphere*. UK: Cambridge Univ. Press. p. 183. ISBN 0-521-49918-6.
- [21] Hall, E. T. (1996). "The Littlemore Clock". NAWCC Chapter 161 - Horological Science. National Association of Watch and Clock Collectors.
- [22] Milham, 1945, p.180
- [23] Lance Day and Ian McNeil, ed. (1996). online preview: *Biographical dictionary of the history of technology*. Routledge (Routledge Reference). p. 116. ISBN 0-415-06042-7.
- [24] Britten, Frederick J. (1896). *Watch and Clockmaker's Handbook*, 9th Edition. E.F.& N. Spon. p. 108.
- [25] Smith, Alan (2000) *The Towneley Clocks at Greenwich Observatory* Retrieved 16 November 2007
- [26] Flamsteed, John; Forbes, Eric; Murdin, Lesley (1995). *The Correspondence of John Flamsteed, First Astronomer Royal, Vol.1*. CRC Press. ISBN 978-0-7503-0147-3. Letter 229 Flamsteed to Towneley (September 22, 1675), p.374, and Annotation 11 p.375
- [27] Andrewes, W.J.H. *Clocks and Watches: The leap to precision in Macey, Samuel* (1994). *Encyclopedia of Time*. Taylor & Francis. ISBN 0-8153-0615-6. p.126, this cites a letter of December 11, but he may have meant the September 22 letter mentioned above.
- [28] Milham 1945, p.185
- [29] Time restored by Jonathan Betts p.443
- [30] Milham 1945, p.235
- [31] *Encyclopedia of time* Samuel L. Macey p.348
- [32] Britten's *Watch & Clock Makers' Handbook Dictionary & Guide* Fifteenth Edition p.122 [1]
- [33] Milham 1945, p.272
- [34] Nelthropp, Harry Leonard (1873). *A Treatise on Watchwork, Past and Present*. E. & F.N. Spon., p.159-164.
- [35] (No. 1311 - 1782)
- [36] Reid's *Treatise* 2nd Edition p. 240
- [37] British patent no. 1811
- [38] Glasgow, David (1885). *Watch and Clock Making*. London: Cassel & Co., p137-154
- [39] Mundy, Oliver (June 2007). "Watch 脱進機 s". *The Watch Cabinet*. Archived from the original on 2007-10-13. Retrieved 2007-10-18.
- [40] Buser, Roland (June 2007). "Duplex 脱進機". *Glossary, Watch Collector's Paradise*. Retrieved 2007-10-18.
- [41] Milham 1945, p.407
- [42] Stephenson, C. L. (2003). "A History of the Waterbury Watch Co.". *The Waterbury Watch Museum*. Archived from the original on 2009-10-26. Retrieved 2007-10-18.
- [43] Milham 1945, p.238
- [44] Grimthorpe, Edmund Beckett (1911). "Watch". *Encyclopaedia Britannica*, 11th Ed. 28 (The Encyclopaedia Britannica Co.). pp. 362-366. Retrieved 2007-10-18.

- [45] Daniels, George. "About George Daniels". Daniels London. Retrieved 2008-06-12.
- [46] Thompson, Curtis (2001). "Where George Daniels shopped the Co-Axial...". Chuck Maddox home page. Retrieved 2008-06-12. 17 June 2001 Addendum
- [47] Charles Gros 'Echappements' 1914 P.174
- [48] 'English and American watches' George Daniels Published 1967
- [49] Chamberlain 'It's About Time' Pages 428-429, also P.93 which shows a diagrammatic view of the 脱進機. Chamberlain 1978 Reprint ISBN 0 900470 81X
- [50] Gros Echappements 1914 P.184 Fig.213
- [51] Nicolet, J.C. (1999). "Could you explain the mechanism of the coaxial watch?". Questions in Time. Europa star online. Retrieved 2008-06-12.
- [52] Odets, Walt (1999). "The Omega Coaxial: An impressive achievement". The Horologium. Time-Zone.com. Retrieved 2008-06-12.
- [53] <http://www.directorypatent.com/WO/1999ZZSLASHZZ064936.html>
- [54] "Electric clocks - a history through animation". electric-clocks.nl. 2010. Retrieved November 10, 2011. (requires Adobe Shockwave Player to display animated content)
- [55] Marilyn Shea (September 2007). "Synchronome - 中国天文学 - 丙台枳的屯子金中 Chinese Astronomy". hua.umf.maine.edu. Retrieved November 10, 2011.