§４．ものの運動

（１）　時間と長さ

　時間や長さは何を基準に決めているのだろう？

○時間の定義：できるだけ不変なものを基準にとる　→　原子時計

　　セシウム 133 原子の基底状態の 2 つの超微細準位間の遷移に対応する放射（光）の周期の 91,9263,1770 倍が 1 秒

　　　正確すぎると困ることが出てくる　→　1 日は地球 1 回転それとも 24 時間　？？？

＜知っとこ＞『うるう秒』

　原子時計の登場で時刻が正確に刻まれるようになると地球が自転をする周期がいつも正確に 24 時間ということではないことがわかる。つまり地球が 1 回自転する時間である 1 日と原子時計の刻む 24 時間との間にずれが生じてくる。このずれをそのまま放置すると極端な場合、日の出が午前 6 時や 7 時でなくなったり、お昼が 12 時ではなくなることになる。これは日常生活にとっては非常に困ることである。そのため時間の刻みは原子時計によって決められた 1 秒をもとにし、原子時と呼ぶが、1 日は地球の自転周期をもとにしてきめる。そうしてこの両者に 0.9 秒以上の違いが生じないよう 1 秒分の補正（うるう秒という）を入れて調整することとした。これが協定世界時である。うるう秒がきめられた 1972 年以降 2003 年 7 月までに 22 回うるう秒が実施された。

　物理のトリビア原子時計http:/natsci.kyokyo-u.ac.jp/~okihana/trivia/genshitokei.html

○おすすめページ

　　時計科学館　科学技術振興事業団　チクタク研究所

　　　　http://jvsc.jst.go.jp/live/toki/index.htm

　　正確な日時計を作る　鹿島宇宙技術センター『日時計』

　　　　　http://www2.nict.go.jp/w/w114/stsi/etc/sundial/

考えてみよう　ＨＰでいろんな時計について調べ、自分で作って実験してみよう

時間は絶対的な物理量である：だれが（どんな運動をしていようとも）測っても同じ

　　＜参考＞現代の物理学では時間は相対的であることがわかっている。

　　　　　　測定する人の運動によって時間は異なってくる。

　　　例：静止する π^+ という素粒子は μ^+ と ν という素粒子に 26ns（ナノ秒　10^{-9}）で崩壊する。

　　　　しかし、光速の 0.9 倍の速さで π^+ が走っていると寿命は 57ns に延びる。

＜注＞時刻と時間の違い

　時刻は時間の原点をどこにおくかということで、それは地球のいろんな場所で異なるが、物理学では物事が起きる時間間隔を問題にするので、時刻という概念はあまり重要ではない。適時時間の原点を 0 にする。

　時間はスカラー量である：大きさのみをもつ

　時間の単位　1ps（ピコ秒 10^{-12} 秒）　1ns（ナノ秒 10^{-9} 秒）　1μs（マイクロ秒 10^{-6} 秒）

　　　　　　　1ms（ミリ秒 10^{-3} 秒）1s（秒）

　　　　宇宙の時間的なひろがり　約 150 億年

○位置（長さ）の定義：光が真空中で 1 秒間に伝わる長さの 2,9979,2485 分の 1 が 1m

＜知っとこ＞『メートルの歴史』

　ものの長さを基準のものと比較して測ることは古くから行われていたが共通の基準となる長さは国や時代によってその都度変わっていった。多くは人間のからだの一部を基準に取ることが多かった。

例えば尺（一尺は 30.3cm）は親指の先から中指の先までの長さを基準として決められたもので、フィート（1 ft は 304.8mm）は人の足の踵からつま先までの長さからきている。1789 年フランス革命のあと、地球の子午線の極から赤道までの長さの 1000 万分の 1 を 1 メートルとし長さの基準とすることが決められた。1875 年国際条約で全世界の単位をメートルに統一することが決まった（メートル法）。その際メートル原器が作られた。日本も明治 19 年(1886)にこの条約に加入しメートル副原器を保有している。

これも絶対的な物理量です。

＜参考＞現代の物理学では長さも相対的であることがわかっている。

動いているものは短く見える。

〇長さの単位

1fm（フェムト 10^{-15}m）：陽子の大きさ

1A （オングストローム 10^{-10}m）：原子の大きさ

1nm（ナノ 10^{-9}m）　1μm（マイクロ（ミクロン）10^{-6}m）　1 光年（約 10^{16}m）

宇宙の空間的なひろがり　約 10^{26}m

〇空間の次元

われわれは 3 次元の世界にいる。運動が直線的か（1 次元）平面的か（2 次元）空間的か（3 次元）によって考える位置は各成分をもつ。

＜おすすめ読書＞

二次元の世界～平面の国の不思議な物語～　E.A.アボット著（講談社ブルーバックス）

〇位置の表し方

位置はベクトル量として表すー位置ベクトル

基準点からどの方向に（向き）どれだけはなれているか（大きさ）

変位：物体の位置の変化

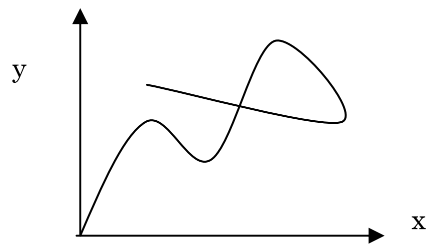
物体がある時刻 t_1 から別の時刻 t_2 の間に位置が x_1 から x_2 に変化した。このときの位置の変化を変位という。変位は長さ（単位の例　m)。時間（単位の例　秒 s）

変位ベクトル　PQ：　点 P（位置ベクトル OP）から点 Q（位置ベクトル OQ）までの変位

運動がベクトルで記述できると言うことは

→x、y、z、それぞれ別々に考えることができる。つまり**運動は各方向の運動に分解できる。**

各時間での位置を x、y 平面（2 次元の場合）のグラフに描くと　　→運動の軌跡を表す



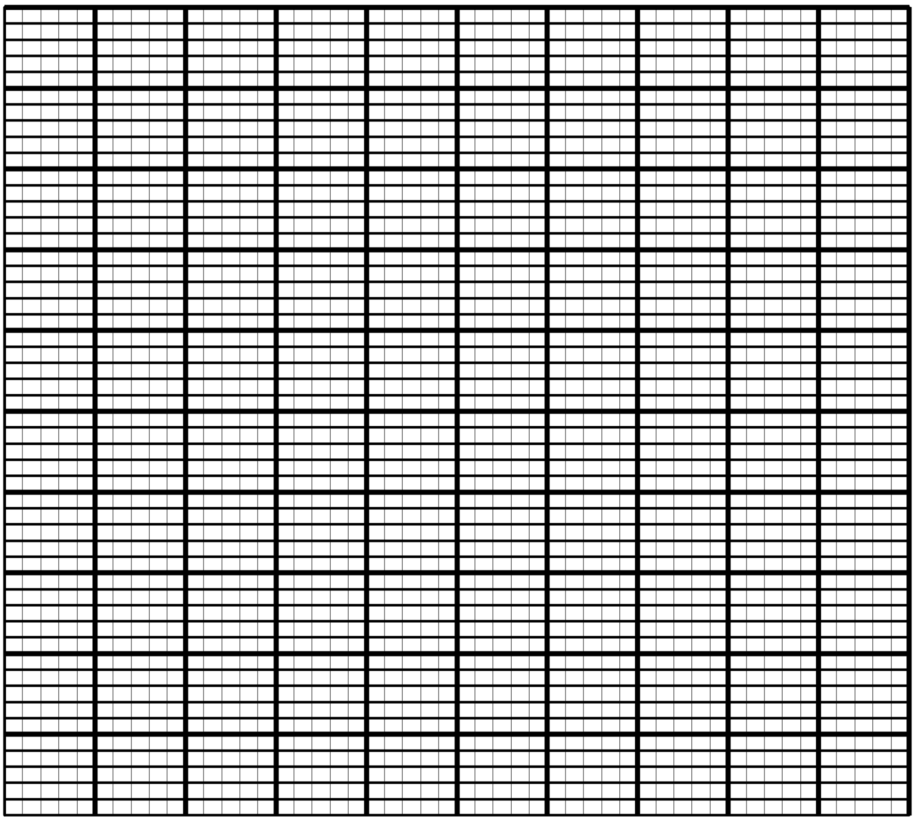
軌跡だけでは運動の様子を正しく把握できない

→　同じ軌跡でも運動によって時間ごとの**位置の変化**の様子が異なる

（２）変位と速度

時刻０のとき、原点にいた物体のその後の時刻と位置が以下のようになっていた。これをグラフにしてみよう。横軸を時刻、縦軸を位置にする。（0 秒からの時間、0mからの変位と考えてもよい）

時刻（秒）	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
位置（m）	0	1	5	11	20	31	45	60	75	85	95	100	100



このグラフは、物体がどんなふうに動いていることを示しているか？

同じ時間に変位が大きいと速く進み、小さいとゆっくり進んでいることがわかる。

＜問題１５＞平均の速さ：ある時間にどれだけ変位したかを表す

t=0s から 20s までの 20 秒間に物体は 20m変位した→この間の平均の速さは 20/20=1.0[m/s]

t=20s から 40s までの 20 秒間に物体は（　　　　）m 変位した

→この間の平均の速さは（　　　　）/（　　　　）=（　　　　　　）[m/s]

上の時刻と位置のグラフでは、ある点Ａ（ある時刻 t_1、ある位置 x_1）から別の点Ｂ（時刻 t_2、位置 x_2）を結ぶ線分の傾きがその時間の**平均の速さ**になる。

傾きが大きいところは速く、小さいところはゆっくり進んでいる。

傾きが０なら止まっていることを表している。

瞬間の速さ（向きまで考えると速度という。速度の大きさが速さ）

ある時刻 t_1 における速さを表すには、t_1 から非常に短い時間の間の平均の速さを求めればよい。

Ａ点での瞬間の速さをグラフから求めるにはＢ点をＡ点にどんどん近づけてその傾きを求める。

→つまり瞬間の速さはその時刻（Ａ点）における接線の傾きを求めること。

変位と時間の関係が　$x=f(t)$　というふうに関数形がわかっていれば

速さは　変位の時間に関する微分して求められる　　$v=dx/dt$

例　　変位が時間に対して　$y=1/2\times gt^2$　と変わるとき（g は定数）

$v=gt$

○速度の次元と単位　　　次元：長さ／時間　　単位の例：m/s

＜問題１６＞いろいろな速さ（速度の大きさ）を求めよう

真空中の光：3.0×10^8m/s

地球の公転速度：（　　　　　　　　　　　　　　　　　）km/s（平均公転半径約 1.5×10^{11}m）

地球の自転速度（赤道上）：（　　　　　　　　　　　　　　　　　）m/s（赤道半径約 6.4×10^6m）

０℃での音の速さ：（　　　　　　　）m/s

新幹線のぞみ：時速 300km　→　（　　　　　　　　　　　）m/s

台風のとき風速 40m の風：時速（　　　　）km の列車が受ける風

考えてみよう１０

次の速度をもつものや運動を調べよう　0.1m/s 1m/s 10m/s 100m/s 1km/s 10km/s

速度もベクトルで表せる。速度ベクトル：大きさと方向をもつ

速度が変らない→**大きさも向きも**変らない運動、一直線上を同じ速さで運動する

速度が全く変らない運動を等速直線運動という。

大きさだけが変らない運動（等速運動）は必ずしも等速直線運動ではない

例：等速円運動（一定の速さで回転するが速度の向きはいつも変る）

○速く動いた、遅く動いた　→　変位とそれに要した時間の関係を知る。

ある変位をそれに要した時間でわったもの：変位の平均変化率（平均の速度）

例：x 方向のみの 1 次元の運動を考える。時刻 t_1 の位置を x_1、時刻 t_2 の位置を x_2 とする。その間の変位は

$\Delta x = x_2 - x_1$

その間の時間は

$\Delta t = t_2 - t_1$

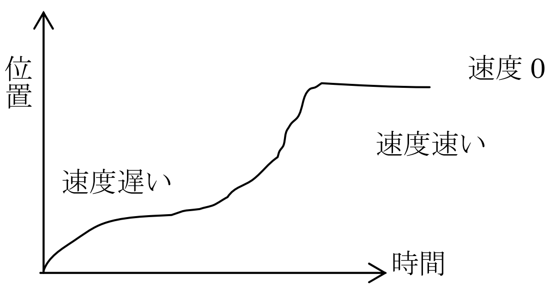
その間の変位の平均変化率（平均の速さ）は

$\Delta x / \Delta t = (x_2 - x_1)/(t_2 - t_1)$

限りなく短い時間に対する変位の変化率：（瞬間の）速度

$\Delta t \to dt$　　$\Delta x \to dx$

$v = dx/dt = \lim \Delta x/\Delta t$　　　微分の概念　位置を微分すると速度

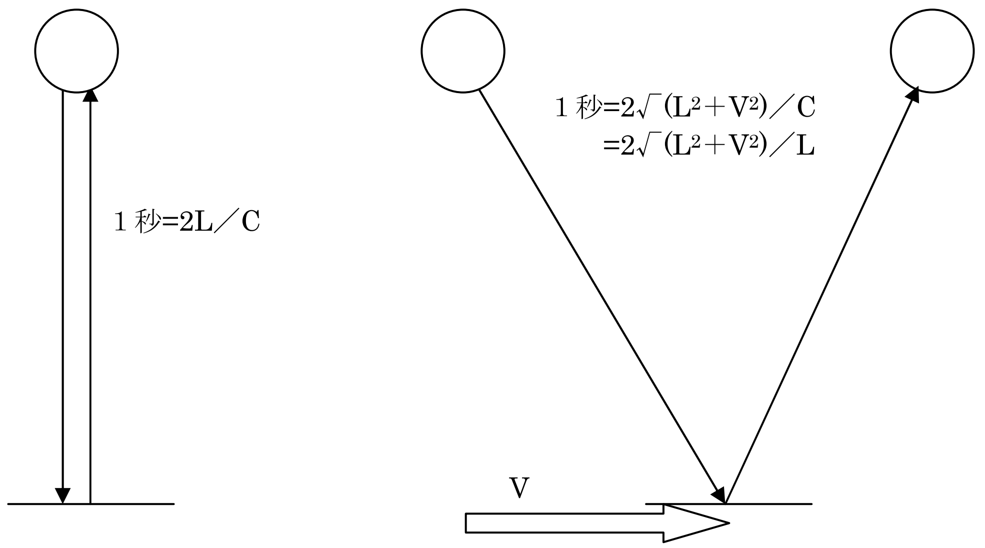


変位－時間の図では各点の微分係数（接線の傾き）が速度に対応する

おまけ：動いている物体はなぜ時間の進むのが遅い？（特殊相対性理論の話）

動いている物体の１秒は　$\sqrt{(L^2+V^2)}/L$　だけ長い。つまりゆっくり進む。

これってどこが相対性理論？？？相対性理論スライド



（３）速度と加速度

速度が変る運動の様子

だんだん速くなる－加速する　だんだん遅くなる－減速する　運動の向きが変る

速度の変化の様子を表す物理量を加速度という

〇速度の変化と時間の関係を知る。

ある速度の変化をそれに要した時間でわったもの：速度の平均変化率（平均の加速度）

例：x 方向のみの１次元の運動を考える。時刻 t_1 での速度を v_1、時刻 t_2 の速度を v_2 とする。その間の速度の変化は

$$\Delta v = v_2 - v_1$$

その間の時間は

$$\Delta t = t_2 - t_1$$

その間の速度の平均変化率（平均の加速度）は

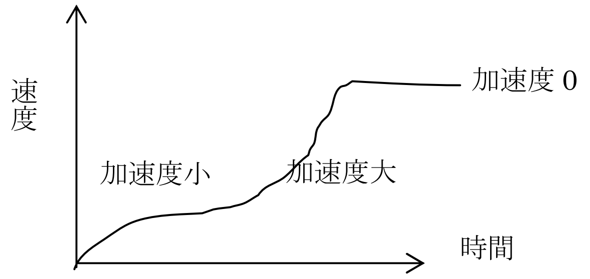
$$\Delta v / \Delta t = (v_2 - v_1)/(t_2 - t_1)$$

限りなく短い時間に対する速度の変化率：加速度

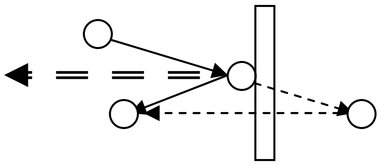
$\Delta t \to dt$　　$\Delta v \to dv$

$a = dv/dt = \lim \Delta v/\Delta t$　　　微分の概念　速度を微分すると加速度

速度－時間の図では各点の微分係数(接線の加速度)が加速度に対応する

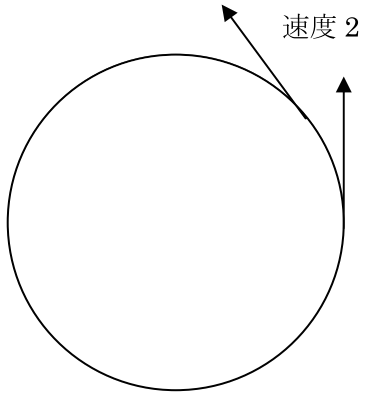


○加速度の次元と単位　　　次元：長さ／時間 ²　　単位の例：m/s²
注：加速度という言葉は中学校の教科書には出てきません。しかし加速したり、減速したり、向きがかわる運動は力が働く時に起きる現象として出てきます。
加速度は速度の変化の方向→　速度がどう変化したかを考えるとその点での加速度の向きはわかる
跳ね返ったときの跳ね返る点での加速度は？

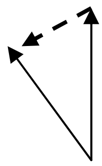


等速直線運動は速度がいつも変らない→加速度が０の運動

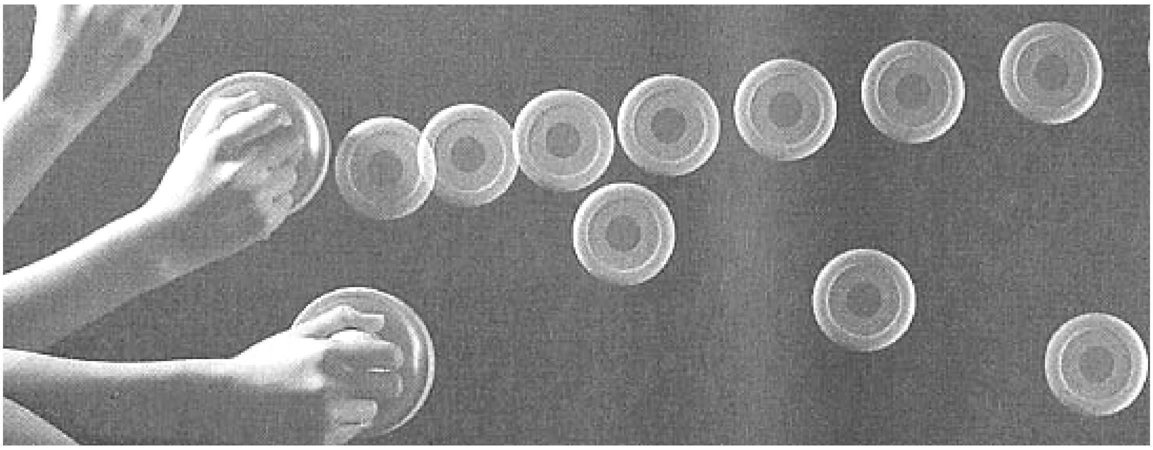
では等速円運動のときは加速度はどうなっているんだろう？
　円運動での速度の向きとそのときの加速度の向きを下の図に描け。

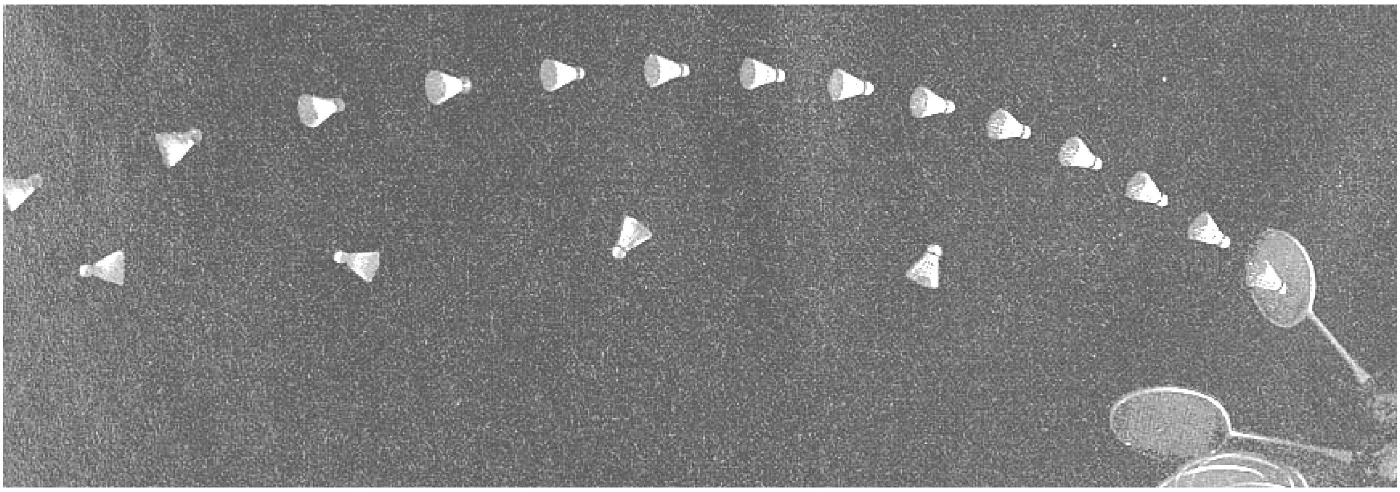


　　点線で描かれたベクトルが
加速度ベクトル



＜問題１７＞
中学校の教科書に出てくるストロボ写真に打ったところの速度と加速度を書き入れてみよう。





いろんな加速度の例

　　地表面で物体が落下するときの加速度（重力加速度）　$9.8 m/s^2$

　　短距離選手の加速度　？（　　　　　　　　）

　　電車の加速度　？（　　　　　　　　　　）

　　エレベータの加速度？（　　　　　　　　）

　　高速道路に入るときの加速度？（　　　　　　　　　　）

考えてみよう１１　身の回りの物体の加速度を実験的に求めよう。

例：電車の加速度

　隠し持った 50 円玉のついた糸を電車の手すりからたらす。駅から駅までの電車の運動を等加速度、等速度、等加速度と考え、糸が傾いている時間が加速度運動の時間、糸が真っ直ぐになっている時間が等速度運動の時間､今度は逆に糸が傾いている時間が等加速度運動の時間､これらを測り、駅から駅までの距離を地図で調べて（駅員さんに聞いて）加速度をだす。

例：エレベータの加速度

　10 階以上あって、なおかつ途中で止まらないエレベータに乗る。体重が重く（軽く）なっている時間が加速度運動の時間、平常の体重が等速度運動、体重が軽く（重く）なっている時間が加速度運動の時間、これらを感覚で読み取る。建物の高さを調べると加速度が出る。

　確認のため、隠し持ったヘルスメータにのって体重が軽く（重く）なった分を調べる。

例：電車の加速度その２（精度が悪いので薦めません）

　隠し持った 50 円玉のついた糸を電車の手すりからたらす。加速度運動をしているときはＦ＝ｍａの力が加速度と逆向きに働き、鉛直下向きにＦ＝ｍｇの重力が働くので糸が傾く。その傾きの角度を出して加速度を求める。

例：車の加速度（精度が悪いので薦めません）

高速道路にのるときの加速度を車の上に人形のついた糸を吊るしてその角度を測り、求める。

方法も含めてきちんと書く。ただし速度メータを読んだりしてはならない。

〇地震と加速度

地震計に加速度をはかる加速度計があるの知ってる？

　防災科学技術研究所　地震の基礎知識　地震計の原理

　http://www.hinet.bosai.go.jp/about_earthquake/part1.htm

１ガル＝$1 cm/s^2$

震度	ガル	解説
０無感	0.8 以下	人体に感じないで、地震計に記録される。
１微震	0.8～2.5	静止している人や、特に注意深い人だけが感じる。
２軽震	2.5～8	大勢の人に感じる程度で、戸や障子がわずかに動くのがわかる。
３弱震	8～25	家屋が揺れ、戸や障子が鳴動し、電灯のようなつり下げ物は相当に揺れて器内の水面の動きがわかる。
４中震	25～80	家屋の動揺が激しく、すわりの悪い花びんなどは倒れ、器内の水はあふれでる。歩いている人にも感じられ、多くの人は戸外にとびだす。
５強震	80～250	壁に割れ目がはいり、墓石・石どうろうが倒れ、煙突・石垣などが破損する。
６烈震	250～400	家屋の倒壊は３０％以下で山くずれ・地割れを生じ、多くの人は立っていることはできない。
７激震	400 以上	家屋の倒壊が３０％以上におよび、山くずれ・地割れ・断層などを生ずる。

震度階級	最大加速度(gal)＊	SI値(kine)＊＊
震度4	40～ 110 程度	4～ 10 程度
震度5弱	110～ 240 程度	11～ 20 程度
震度5強	240～ 520 程度	20～ 40 程度
震度6弱	520～ 830 程度	41～ 70 程度
震度6強	830～1,500 程度	71～ 99 程度
震度7	1,500 程度～	

（４）変位と速度の関係　速度と加速度の関係（微分と積分　　接線の傾きと面積）

変位の時間的微分が速度

平均速度$\langle v \rangle = (x_2 - x_1)/(t_2 - t_1)$

瞬間の速度　$v = dx/dt$

例：自由落下　$x = gt^2/2 \rightarrow v = dx/dt = gt$

変位（ｘ）－時間（ｔ）　曲線での接線のかたむき：速度

逆は？速度の時間的積分が変位

$x = \int dx = \int v dt$

例：自由落下　$v = gt \rightarrow x = \int v dt = \int gt dt = gt^2/2 + C$

（ただし C は始めの位置）

速度（ｖ）－時間（ｔ）　曲線での面積：変位　すすんだ道のり

速度の時間的微分が加速度

平均の加速度$\langle a \rangle = (v_2 - v_1)/(t_2 - t_1)$

瞬間の加速度　$a = dv/dt$

例：自由落下　$v = gt \rightarrow a = dv/dt = g$

速度（ｖ）－時間（ｔ）　曲線での接線のかたむき：加速度

逆は？加速度の時間的積分が速度

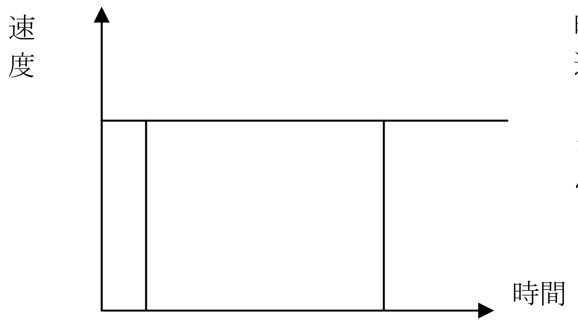
$v = \int dv = \int a dt$

例：自由落下　$a=g$　→　$v=\int a dt = gt + C$

（ただしCは始めの速さ）

加速度（ａ）－時間（ｔ）　曲線での面積：速度

グラフで説明すると等速度運動の時（速度は変らない）



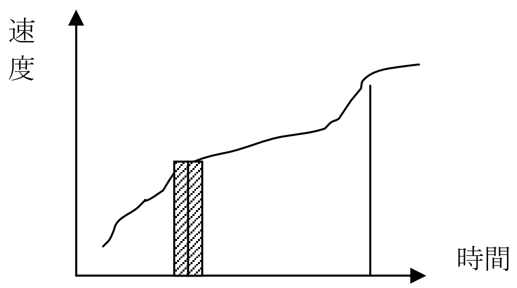
時刻 t_1 から t_2 まで同じ速度 v で進んだ

速度×要した時間 $= v \times (t_2 - t_1)$ ＝進んだ道のり

グラフで言うと t_1 から t_2 までのグラフの面積が進んだ道のりになる

速度が変化するときは短い時間間隔では速度は変らない→小さい長方形の面積

長い時間ではそれを足しあわせる→積分になる



時刻 t_1 で速度 v_1

時刻 t_2 で速度 v_2

時刻 t_1 から Δt までの短い時間は v_1 で進む

道のりは $\Delta t \times v_1$

これをを足しあわせていくと

$\Sigma \Delta t \times v \rightarrow \int v dt$　　グラフでは面積

＜問題１８＞　図を見ながら考えよう

時刻 t_1 から t_2 まで速度を積分すると、その間の（　　　　　　）の変化量になる。それは速度と時間のグラフで言えば、時刻 t_1 のところから t_2 のところまでの（　　　　　　　）になる。正の方向に進むときと負の方向に進むときが混在すれば、単純に積分するとはじめと終わりの位置の差しかでないので、全行程を考えるときは正の部分、負の部分に分けて積分するか、面積の大きさを考えて加算する。

任意の時刻 t に対する速度の関数がわかっているとき、任意の時刻 t に対する位置 x を求めるには不定積分をする。速度、加速度の関係も同様で加速度が分かっていればそれを（　　　　　　）すれば速度がわかる。逆に速度が分かっているとき、それを（　　　　　　　　　）すれば加速度がわかる。

速度が変らない運動を（　　　　　　）運動または（　　　　　　　　　）運動という。その場合加速度はつねに（　　　）である。ただし一定の速さの運動であっても加速度が 0 であるとは限らない。等速円運動の場合速度の向きはつねに円の（　　　　　）方向で加速度は円の（　　　　）を向く方向にある。加速度が変らない運動を（　　　　　　）運動という。