

KRYNA 科学通信

この通信は KRYNA が提供するオーディオ技術とその背景をご紹介します冊子です。

Written by Dr.Nishimura @ KRYNA INC. TEL 0120-924-422

email dr.nishimura.lab@gmail.com

オーディオの基礎…アンプのお仕事は？

オーディオシステムは、音源（情報）、電気信号、機械振動を通して、人に音の情報を伝える道具で、各部での動作のメカニズムが異なります。音源情報は、LP などの機械的な記録と CD などのような情報記述からなり、これを電気信号に変換することから始まります。（最近ではデジタルアンプなどデジタル信号そのものを駆動力としてスピーカを駆動するシステムもありますが…。）そののち、電気信号を増幅して、スピーカを介して機械振動に変換して、音響情報として放射します。このあたりの基礎を少しお話してまいりましょう。

最初のオーディオシステムは機械式の蓄音機で、音の記録と再生は全て機械振動を用いていました。その後、機械振動と電気信号の相互変換、磁気記録の技術により、レコード、映画など広く一般に普及してゆきました。レコード（音の波形そのもの）や映画のフィルム（磁気記録）などに記録された音響信号は、電気信号に変換され、アンプで増幅されて、スピーカから放射する現在の方式が出来上がりました。

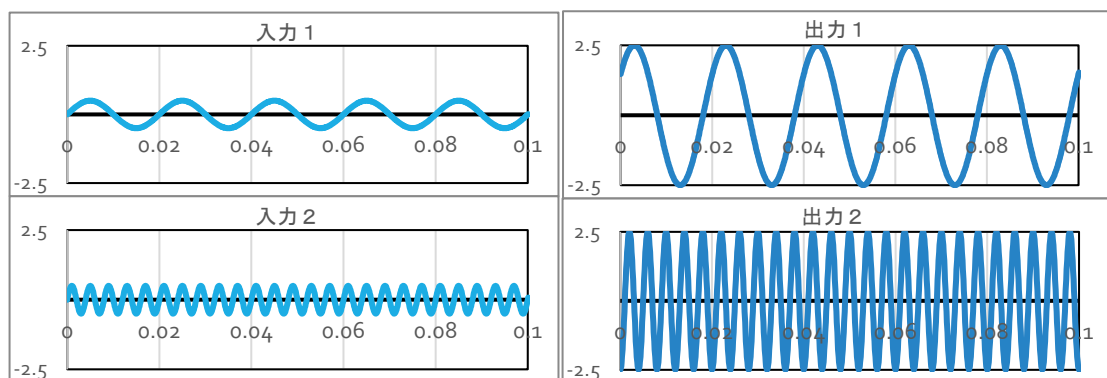
音響情報の記録については、機械式（音による振動波形をそのまま記録）、磁気（マイクなどで電気信号に変換された波形を時間的な磁気の強弱として記録）、PCM・デジタル（電気信号を数値に変換して記録）などと進んでゆき、ダイナミックレンジの確保、雑音の可能な限りの排除、加工の容易さなどの面から、最終的には情報のみを取り出すデジタル信号化の方向で進んできています。トレンドや使い勝手の良さは別として、記録された音響情報は、デジタル配信や CD などの媒体で提供されるデジタル信号と、LP など音響波形をそのまま記録したアナログ信号の双方で提供されています。

次に、提供された音響信号は、デジタル信号の場合、D/A コンバータを通して電気信号に変換され、アナログ信号の場合、レコードプレーヤとカートリッジの組み合わせにより、電気信号に変換されます。こうして得られた電気信号は、アンプを通して増幅され、スピーカへと伝送されます。スピーカが最終的に電気信号を音に変換して私たちの耳に届けてくれます。

今回は、アンプについて見てゆきたいと思います。アンプはエジソンの白熱球（ランプ）に、白熱するフィラメント以外の電極を加え、フィラメントと電極の間に電圧をかけると、電極からフィラメントの方向のみ電流が流れる（電極が正でフィラメントが負の電位）現象が発見され、現在の整流管が作られました。さらに、間に小さな電極を入れると、その電極の電位の大小で、流れる電流の大きさを制御できることもわかり、三極管が作られたわけです。この三極管を使ってアンプができるわけです。ここで、アンプということは、小さな信号を大きくするわけです。例えば、レコードが分かり易いと思いますが、レコードには音楽の信号が時間的に変化する波形として書き込まれています。CD は数値として書き込まれるのと大きく違います。この波形をカートリッジで読み取って電気信号に変換します。カートリッジから取り出せる電気信号は MM カートリッジで 10mV 程度の電圧で、到底スピーカを動かすことが出来るエネルギーに達していません。数 V、数 W のエネルギーにまで大きくするわけです。この役割を果たすのが、アンプです。アンプを構成する素子は、戦前は真空管でしたが、戦後、トランジスタ、IC が開発され、真空管を使わないアンプが主流になってきました。真空管でもトランジスタでもよいのですが、アンプは、音楽信号をそのまま増幅してスピーカに伝える必要があります。（例えば、カートリッジの出力が、10mV、0.1 mA だとしますと、エネルギーは $1\mu\text{W}$ となります。これを 1W にまで増幅するため電圧を 100 倍、電流を 10000 倍に電力増幅するわけですが、）しかし、周波数によってはよりよく増幅されたり、されなかったりといった、周波数特性を持ってしまいます。それを周波数に関係なく同じ増幅ができるように作る必要があります。100Hz だろうと、1000Hz だろうと、10000Hz だろうと同じ増幅をせねばなりません。できるだけ、真空管など増幅素子自身が周波数的にフラットな特性を持つことが望まれますが、そうはいきません。たとえば、バネでぶら下げられた重りはある特定の周期でよく振動します。多かれ少なかれ物体はこのような特性を持ちます。

少し変わった見方をすると、このフラットな周波数特性、実は、定常な入力に対する特性を表しています。単純に言うと、周波数と振幅が一定の入力を与え、ある大きさの出力が得られるとします。振幅を同じにして別の周波数を入力して得られた出力の大きさが同じになれば周波数の変化に対して出力が一定となって、フラットな特性が得られるということになります。例えば下の図のよう

に、同じ
大きさで周
波数の異な
る入力 1 と
入力 2 を入
れて、出力
1 と出力 2
のように同



じ大きさで出力されるならフラットな特性と言えます。この周波数の範囲を広くとれるようにするわけです。すると、このアンプは入力に対して同じ増幅率で出力できるので、音質の変化しない

（周波数によって増幅率が変わらない）アンプと言えることになります。通常、このように、振幅が一定の正弦波信号を入力してアンプの特性を評価しています。入力と出力を一定な関係で増幅させる技術としては、フィードバック制御が最もよく使われる手法で、多くのアンプに使われています。同じような技術は、電力会社から供給される家庭用電源の電圧と周波数を一定にする技術と同じです。目標値（アンプでは一定入力の正弦波）に対して出力（電圧や周波数）が目標と一致するように自動的に調整させるわけです。単純に増幅率が 1 のアンプを考えてみましょう。入力に対して出力が大きくなると出力を小さく、逆に小さくなると大きくなるように、フィードバックによって調整するようにされています。入力が 1 の時、出力が 2 になるようなアンプでも、フィードバックにより出力が 1 になるように調整できるわけです。反対に出力が 0.5 になると、大きく増幅して 1 になるように自動的に制御できます。優れものですね。この制御手法、電力会社の電気だけでなくいろいろなところで使われ、今では必須な技術となっています。

さて、このようにフィードバックで制御されているアンプ、音楽に対して本当に特性がフラットになっているのでしょうか？ 答えのヒントは、周波数特性という言葉にあります。先程も述べたように、振幅が一定（定常）な入力に対し、どんな周波数に対しても増幅率が一定となるように設定されています。それがフラットな特性です。ここで、「振幅が一定の入力」に対する特性であることがポイントです。入力に対して出力の大きさが一定倍率になるようにするわけですが、出力側は入力が変わったことを知りません。ですから、出力が大きくなるとそれを抑制し、小さくなると大きくするように働くわけです。すると、入力が大きくなるとそのままでは出力が大きくなるので小さくしようとし、入力が小さくなると出力が小さくなるので、それを大きくしようという働きをしてしまいます。ちょっと込み入った話になりましたが、一定の信号に対して、フラットな特性を持つからと言って、時々刻々変化する音楽信号に対して周波数に関係なく一定な増幅をしている保証はないのです。制御工学から見ると、音楽信号などに追従して出力を作るには、加速度の変化（家庭用電源の電圧や周波数は一定値なので目標が変化しない分単純です）にまで対応する必要があり、回路の最初に、3 重の積分回路を入れる必要があることになります。通常はこのような回路は入っていないので、理論的に音楽のような非定常な入力に追従できないわけです。しかも、位相特性については気にされていないことが多く、音像定位に影響することが懸念されます。そういった意味では、フィードバックをかけずに、そのまま増幅して出力するアンプの方が変な心配する必要がなくてよいのかもしれないかもしれませんね。ただし、歪が出ない程度の入力範囲で使う必要があります。つまり、フィードバックアンプは定常入力に対してフラットであっても、音楽信号に対してはその特性を得られる保証がないということです。

Tea Break



今年もやってきましたダーズリンファーストフラッシュの季節。今年はどんな紅茶が楽しめるでしょうか？同じダーズリンでも農園によって味わい・香り・コク・キレが大きく違ってきますし、時期によっても違ってきます。好みのダーズリンを選びましょう。私は、キレが良くすっきりしたお茶が好きなので、キャッスルトン、マーガレットホープ、グームなどをよく飲みます。去年は値段の安さから、ネパールのお茶も飲んでみましたが、良かったですね。

ここで質問です。「ガンダムはロボット」「ドラえもんはロボット」「鉄腕アトムはロボット」「全自動運転の自動車はロボット」、間違っているのはどれでしょうか？さて、ロボットを題材にしたアニメで、「僕の妻は感情がない」というアニメが、去年の夏放送されました。料理を作ることに特化した人型のロボットですが、ロボットが対応してくれるとこんなのかな、と思わせてくれる作品でした。独身の男性が、料理専用（と言っても、ソフトを購入してインストールすれば家事一般ができる）の人型ロボットを買って、一緒に暮らす話ですが、気に入ってお嫁さんにするので、AIによる会話との設定だと思いますが、主人公への応答が論理的で面白いですね。そうかと思うと自己主張する。例えば、第8話の「妻にも意地があるみたいです」は、ロボットが意地を張るとこんな感じかなと思わせてくれます。また、ロボットが案内役をするとこんなかなと思うアニメとして、プラネタリアン「ほしのゆめみ」を思い出します。このアニメは、プラネタリアムの案内ロボット（ほしのゆめみ）の話で、人類が地上から退避してプラネタリアムを訪れる人いなくなっても、来場者を待ち続けて30年。一人のごみ屋が戦闘ロボットに追われて入ってきた。ほしのゆめみは来場者だと認識して与えられた業務を始める。外の世界では、人が住めない殺伐とした状況なのに。ここでの、ほしのゆめみの対応が、来場者が多く来て居た頃と変わらない対応をしてゆくところが、ロボットらしくて面白い。このアニメ、第4話の終わりと第5話に戦闘用ロボットが出てくるのですが、このロボットが主砲を撃つときの音がすごい。その気で見てもびっくりするほどの迫力があります。どうも、ロボットに対して、優しさを求めてしまっていますが、本当のところはどうなのでしょう？ロボットの動作・行動は設計者である人間が与えた種々の評価関数を状況に対して評価し、最適な行動をとるのでしょう。ここでいう最適は人の思いであるとは言えず、与えられている評価関数が最大となる行動でしょう。いろいろな方程式を解いて最も評価の高い答えを選択することとなるのでしょうか。この評価基準をロボット自身で書き換えられるようになるとロボットが自由を得るということになっていくのでしょうか？人間の便利のために作られて来たロボットが、人間を支配するという未来はないと断言できない気がしますね。

こんな時、こんな音楽 …

梅雨の時期、しとしとと降り続く雨、外に出るのも億劫な季節。こんな日は、一日、ヨーロッパ旅行に出かけませんか？今日はドイツの南に位置するバイエルン州の首都ミュンヘンを訪ねてみましょう。ミュンヘンと言えばビール。ビールと言えばミュンヘン（でも、世界で最もビール生産量が多いのはチェコだそうです）。オクトーバーフェストで有名ですね。確かに、本場で飲むビールはおいしいです。ホフブロイハウスやマテーズ、大きなビアホールが呼んでいます。なんといってもドイツのビアはワンジョッキ正味 1 リットル。普通なら 1 杯で十分というところが、どんどん飲める。トイレに通う。また飲める。といった具合で気づいてみると 4 杯飲んでフラフラ。ビールのつまみもおいしい。太いソーセージ（ヴァイスビュルスト）にたっぷりのマッシュポテト、塩をふりかけただけのスライスした甘日大根、これがまたビールをそそる。そんなこんなで、酔いつぶれてホテルに戻る。今日は聴きに行けなかったか。明日はいくぞ、と出かけるのがミュンヘンの国立歌劇場。演目は R.ワグナーの楽劇「ワルキューレ」全 3 幕ですが、これが 4 日にわたって上演される「ニーベルングの指輪」第一夜（ちなみに最初の「ラインゴールド」は序夜）。3 幕構成の 3 時間半ほどの歌劇。幕と幕の間に 1 時間ほどの休憩があり夕方 5 時ごろ始まって終わるのは真夜中の 11 時ごろ。幕間の休憩ではコーヒーはもちろん、ケーキやサンドイッチ、ワインやビールが楽しめる優雅な時間です。

さて、肝心のストーリーは、説明すると長くなるので、([ワルキューレ \(楽劇\) - Wikipedia](#)) を参照頂くとして、よく知られているのは第 3 幕の前奏曲とそれに続くワルキューレたちの歌唱で「ワルキューレの騎行」として親しまれています。映画「地獄の黙示録」でヘリコプターの編隊飛行シーンの BGM で使われていましたね。他にもいろいろ使われています。ワルキューレの第 2 幕から全楽劇を通してのヒロイン「ブリュンヒルデ」が登場します。第 3 幕の最後は父「ヴォータン」が、命令を破ったブリュンヒルデへの罰として山の上で眠りに就かせるシーンで、父と娘の別れがつづられる感動的場面です。

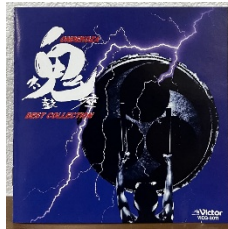
あなたも、ビールかワインを飲みながらワグナーの楽劇ご覧になりませんか？あまりにも多くの演奏があるので、どれを勧めていいか判断が付きませんが、私が初めて見たのは 1977 年のバイエルン国立歌劇場での公演で、W.サヴァリッシュの指揮、ジークリンデがレオニー・リザネック、ジークムントがジェームス・キング、ブリュンヒルデ…誰だったか忘れました。調べたけど分かりません。1989 年には別配役で同じバイエルン国立歌劇場で収録されており、CD や DVD・BD などよく知られています。CD では 1967 年のバイロイトのライブ録音で K.ベーム指揮、リザネック、キングとともにブリュンヒルデを B.ニルソン、ヴォータンをテオ・アダムが歌っています。この CD を良く聞いています。あと、1958 年から 65 年にかけてショルティがウィーンフィルと収録した演奏。これは、ウィーンのゾフィエンザールで DECCA の総力を挙げて収録したもので、当時

最高の録音と言われていました。いずれにしても 3 時間半の演奏、全曲聴くのはさすがにという方は、ハイライト版がありますので、そちらをお勧めします。こういう私も、実は第 1 幕の最初 10 分と最後 10 分、2 幕を飛ばして、3 幕の最初 20 分と最後 20 分程度（約 1 時間）を聴いています。強いて第 2 幕を聴くとすれば、最後の 10 分程度でしょうか。第 2 幕は、神々の長ヴォータンが奥さんの言うなりになるシーンで、何時の時代でもかみさんにはかなわないことを痛感させられます。ということで。

今月の音楽

鬼太鼓座

ベスト・コレクション



今月は「鬼太鼓座」の BEST 盤を。冒頭の数分はとても厳かで静かに進行しますので、中々思い切ってボリュームを上げれない私のリスニング環境では、この作品の凄さに気づくのにかなりの年月を要しました。再生装置のレベルが上がってノイズ感が少なくなればなるほどこの録音の楽しさは増していきます。太鼓の響きや演奏は勿論ですが会場の空気感や掛け声などもとてもよく入っています。視聴中、生活音や部屋の外から聞こえてくる物音や雨音とシンクロして時折ハッとさせられます。



オーディオと物理

第 15 回 運動エネルギーと位置エネルギー

運動エネルギー：質量×速度²/2[kg (m/s)²]

位置エネルギー：質量×加速度×距離[kg (m/s²) m]

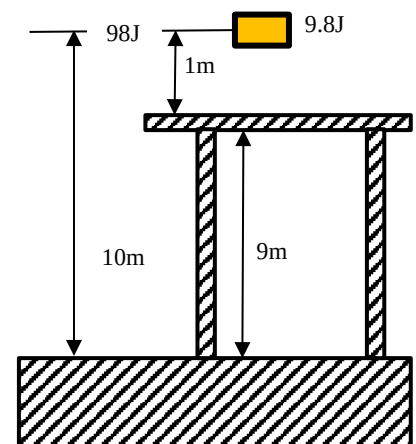
仕事によってエネルギーが費やされる。エネルギーによって仕事が行なわれる。ということですがさてエネルギーとは何でしょうか？アインシュタインが導いた法則では、エネルギーは[物質の質量]と[光速の自乗]の積に等しい ($E=mc^2$) と言っています。物質の質量はエネルギーそのものというのですが、現実の世界、質量が消滅しない世界では異なってきます。この式を見ると、質量が光速で運動するときの運動エネルギーの 2 倍になっています。[質量×速度の自乗]で運動エネルギーと同じですが、光速で運動することと倍半分の差があります。

さて、仕事の定義をもう一度見てみましょう。仕事＝力×距離 ですね。力＝質量×加速度、加速度は速度の変化率（時間微分）、距離は速度の時間での蓄積（時間積分）ですので、運動の場合、運動エネルギー＝力×距離＝ $\int$ 質量×加速度×速度 dt ＝質量×速度²/2 [詳しくは $W=FD=maD=m \int avdt=m \int dv/dt \cdot v dt=mv^2/2$] となります。位置エネルギーの場合は、そのまま 位置エネルギー＝力×距離＝質量×加速度×距離 となります。では、個々の例で詳しく見てみましょう。

例 1：床から 1m の高さにある質量 1kg の物体の持つ位置エネルギー E_p は、

$$E_p = mgh = 1 \times 9.8 \times 1 = 9.8 \text{ J}$$

ここで得られたエネルギーは、床からこの質量を高さ 1m の位置まで持ち上げるのに要する仕事と同じです。今、この床が、地上 9m の高さに設置された床とすると、この床を取り去ったとき地面に対してこの質量は、98J の位置エネルギーを持つことになります。当然、この質量が地上 9m の高さまで持ち上げられた時に 88.2J の仕事はなされています。

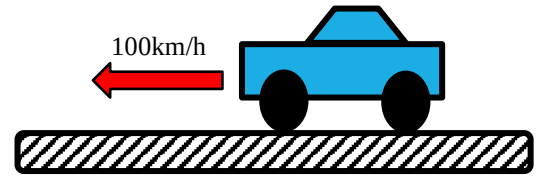


例 2：時速 100km/h で走行する自重 1t の自動車の運動エネルギー E_k は

$$Ek=mv^2/2=1000 \times (100000/3600)^2/2=386000\text{J}=386\text{kJ}$$

となります。ここで、この自動車を静止状態から時速 100km/h にするまでに必要な仕事を求めてみます。

$f=ma$ より、 $v=\int a dt=\int f/m dt=f/m T=100000/3600\text{m/h}$ なので、目標速度 v になるまでの所要時間 T は、力が一定



とすると $T=vm/f$ で求められ、 $dW=ma v$ を 0 から T 秒迄積分することで仕事 W が得られます。ここで、加速するときの力を与えねばならないので、前回 4 月号の例に倣って 1000N の力で加速するとします。すると、 $a=f/m=1000/1000=1\text{ m/s}^2$ 、 $T=vm/f=100000/3600 \cdot 1000/1000=27.8$ 秒。 $dW=ma v$ を 0 から T 秒迄積分すると、 $W=ma^2 T^2/2=1000 \times 1^2 \times 27.8^2/2=386\text{kJ}$ が得られます。もし力が半分なら、加速にかかる時間が 2 倍 55.6 秒になり、加速度が半分 0.5m/s^2 になって、結果は同じ 386kJ となります。どのような加速を行っても、386kJ の運動エネルギーにもっていくに必要な仕事は 386kJ となる事が分かります。これは、あくまでも、走行時の抵抗が無い場合です。

例 3：静止している質量 $m=10\text{kg}$ の物体がある高さから 1 秒間自由落下したときの運動エネルギーは、 g を重力加速度として 1 秒後の速度が $v=gt$ より 9.8m/s となるので、

$$Ek=mv^2/2=10 \times 9.8^2/2=480\text{J}$$

となる。ここで、地球が物体にした仕事を求めると、静止状態から 1 秒間自由落下するときの移動距離 D は、 $D=gt^2/2=4.9\text{m}$ 。 $W=fD=mgD=10 \times 9.8 \times 4.9=480\text{J}$ となり、地球が物体にした仕事があるまま運動エネルギーとなっています。一方、4.9m の高さの位置エネルギーは $Ep=mgh=10 \times 9.8 \times 4.9=480\text{J}$ となり、位置エネルギーが運動エネルギーに変換されたとも言えます。

例 4：バネに蓄えられるエネルギー：バネ定数 k のコイルバネを $L\text{m}$ 縮めた時に蓄えられるエネルギーは、バネを自然な伸び状態から $L\text{m}$ 縮めるに要する仕事として求められる。 $x\text{m}$ 押し縮めた時力 kx が必要であり、微小な距離 dx ほど縮めるのに要する微小仕事は $dW=kx dx$ となるので、これを x に関して 0 から L まで積分すると求められます。すなわち、 $W=\int kx dx=kL^2/2$ が得られます。これより、バネ定数 k のバネが長さ $x\text{m}$ 縮められた時に蓄えられるエネルギー（位置エネルギー）は $W=kx^2/2$ で与えられます。

少し別の観点から見てみましょう。運動の状態を表す量として質量と速度の積($m \times v$ ：運動量)を考えます。例 1 では、落下以前の速度は 0m/h 、また 1m 落下したときの速度は、落下に要した時間を T として $1\text{m}=gT^2/2$ となるので、 $T=0.452$ 秒で、 1m 落下時の速度は $v=gT=9.8 \times 0.452=4.427\text{m/s}$ となる。落下前後の運動量の変化 Δ は質量が 1kg なので、 $\Delta=(4.427-0) \times 1\text{kg}=4.427\text{kgm/s}$ となります。この変化を落下に要した時間 0.452 秒で割ることにより変化前後のエネルギーを知ることが出来ま

す。つまり、 $\Delta \div T = 9.8 \text{ kgm/s}^2$ となり、9.8J のエネルギーを持つことが分かります。今、重力加速度が半分の 4.9 m/s^2 とすると、1m の落下に要する時間は 0.639 秒、1m 落下したときの速度は 3.13 m/s となり、運動量の変化を時間で割ると 4.9J となります。これを応用して、例 2 の自動車が壁にぶつかって、0.01 秒で静止する場合と 1 秒で静止する場合とで、壁にかかる力の大きさを比べてみましょう。壁にぶつかる運動している物体に逆方向の力が加わり、逆方向の加速度が生じて物体の速度は低下し、反発係数を 0 とすると停止します。今、速度 v で運動している質量 m の物体に力 f を加えて静止させるとすると、物体に働く加速度は $a = -f/m$ となり、停止するまでの時間を T とすると、 $0 = v - aT$ 。この時必要な力は、 $f = ma = mv/T$ となります。例 2 では時速 $100 \text{ km/h} = 27.78 \text{ m/s}$ で走っていたので、0.01 秒で止めるために必要な力は $f = mv/T = 1000 \times 27.78 \div 0.01 = 2,778,000 \text{ N} = 2.778 \text{ MN}$ で、1 秒で停止する場合は、 $f = mv/T = 1000 \times 27.78 \div 1 = 27,780 \text{ N} = 27.78 \text{ kN}$ です。このことより、衝撃力は 0.01 秒で静止する場合に対して 1 秒の方は 1/100 に軽減できます。キャッチボールでグローブを後ろに引きながら受けると痛みが軽減できます。また、ターミナル駅（小田急新宿駅、京王新宿駅など）の線路の最後に大きなバネが取り付けられていますが、これも電車が止まらなかった時の衝撃を低減する装置です。さて、加速度が $a = v/T$ で与えられるので、静止するまでの移動距離は $d = aT^2/2$ となるので静止させるに必要なエネルギーは $E = fd = mv/T \times aT^2/2 = mv/T \times vT/2 = mv^2/2$ となり、運動エネルギーそのもので、静止させる時間に関係なく一定です。

☆西村博士の物理ラボ 活動情報はここから

◆西村博士連載ブログ https://kryna.jp/report/nishimura_blog/



◆西村博士の物理ラボ X アカウント https://twitter.com/dr_nishimlab



◆法人向けコンサルティング https://kryna.jp/biz_consulting/

