電位の簡単な入門2007

第１回/全５回

――静電気的ポテンシャルエネルギーのお話し１――

A LIFE COM. バイオ研究室
富岡和人

1. まえがき

本書――本 PDF 文書の全５回および Option においては「本書」は「電位の簡単な入門 2007」を意味する．――は回路理論での電位の簡単な入門レベルを想定して記述している．このような想定から，本書の内容は理論計算に基づいた説明になっている．本書の全５回および Option は著者が構築している心臓血管系の回路モデル理論[1) 2) 3) 4) 5)]の参考文献として作成している．その心臓血管系の回路モデル理論では,電気回路論を応用してヒトの心臓血管系を「心臓血管系の回路モデル」(the circuit model of the cardiovascular system) で表現して，その回路モデルを解析する．そのような理論で扱う範囲には，その解析で得た結果の応用方法を研究することも含んでいる．そして，研究の対象には心臓血管系が含まれる．心臓血管系の研究分野では医学および生物学でも顕著な研究活動があることは周知である．著者は，心臓血管系の研究を工学分野で扱っている．２００７年現在の著者の構築している心臓血管系の回路モデル理論には，直接には医学を導入していない．著者の理論構築の技術は，物理学および数学を基礎としている．２００９年現在まではほとんど医学を使用しないで理論を構築している．上述の説明から明らかなように著者の心臓血管系の回路モデル理論では，一部の電気回路論および電子回路論が基礎的な知識に含まれる．このような基礎的な知識に含まれる電気の回路の電位を著者の心臓血管系の回路モデル理論では，心臓および血管内に作用する内圧に対応関係を与えている．その内圧を，血圧および大気圧で記述した．このために，著者の心臓血管系の回路モデル理論では，回路網 (network) あるいは質点系として心臓血管系を解析する際にはたびたび電位を使用する．内圧の高い位置から内圧の低い位置に血液が流れることは，著者の回路モデル分野ではとても重要な事柄である．その事柄を説明する際に内圧差を使用することがある．そのような心臓血管系の回路モデルの内圧差には電位差に対応関係を与えている．著者の研究成果のひとつに，著者が独自に与えている「血流量の定義」[2) 3)]を主張している．血流量を観測する際には，心臓および血管内の物質の移動を研究することがある．このような物質の移動では，「物質の２重性」を２０１７年現在の理論物理学で扱うことができる．このような現象では，電磁場および重力場での「時空の変化」を記述できる．このような記述では，「流量」としての記述ではなく粒子および波としての性質での記述である．このような物質の２重性の記述でも，著者の経験では電位を使用する．本書の内容は，このように電位および電位差を扱う著者の心臓血管系の回路モデル理論で扱う電気の回路論について説明をしている．

上述のような参考文献として，本書の電位の説明は電気の回路の電圧について説明するために作成した．本書は，電磁気学の一部としての説明をしてはいない．電気の回路論――電気・電子工学分野の回路論である．――の電圧の説明として本書を作成している．日本の理工系大学の １ 年生の電気回路論と比較すると，回路の電圧の説明としては詳しいものであると著者は考える．ただし，日本の理工系大学の １ 年生程度の数学と物理学の学習は終了していることを，本書の想定の目安としている．

２００７年現在，本書の全体における本文となる全５回に Option を加えた６つの PDF 文書で本書を構成する．各回の副題は以下のようになっている．本書は全体としては工学の回路論として構成している．ただし，第１回～第４回[6), 7), 8)]までは物理学の電磁気学的な説明であり，第５回[9)]は工学の回路論的な説明である．Option[10)]の内容は電位および電位差についての２００７年現在の著者の意見としての内容になる．

第１回：静電気的ポテンシャルエネルギーのお話し１

第２回：静電気的ポテンシャルエネルギーのお話し２

第３回：電位の定義のお話し

第４回：電位差のお話し

第５回：電気の回路で使用する電圧のお話し

Option：本書の電位の定義および他書の電位の定義の解釈についての著者の意見

第１回では保存力およびポテンシャルエネルギーの説明をする．第１回のポテンシャルエネルギー[11)]の定義は著者が独自に採用したものである．著者の見識では，２００７年現在までの日本国内で使用されている一般的な物理学理論でのポテンシャルエネルギーの定義とは異なる．さらに，著者の見識では，ポテンシャルエネルギーの変化量およびその保存力のなす仕事量との関係も２００７年現在までの日本国内の一般的な物理学理論での導入方法とは異なる．第１回では運動エネルギーおよび仕事量-エネルギー原理の説明をする．運動エネルギーは，ニュートンの運動方程式を使用して導出している．ニュートンの運動方程式では，質点に作用している合力を慣性質量および加速度で記述する．著者が学生時代に物理学の専門書で読んだものには，ニュートンの運動方程式で質点に作用する力を記述することを説明していた．この説明では，不適切であるものと著者は考えている．質点に作用する合力は，質点に作用する力の総和である．合力は，力とは意味が異なる．この意味で，３章での運動エネルギーは和書の専門書とは異なるものと著者には記憶がある．仕事量-エネルギー原理を使用して力学的エネルギー保存の法則を導出する．ポテンシャルエネルギー，運動エネルギー，仕事量-エネルギー原理および力学的エネルギー保存の法則は，本書の中でたびたび使用する．保存力およびポテンシャルエネルギーは，第２回で静電気的ポテンシャルエネルギーを記述する際に使用する．その静電気的ポテンシャルエネルギーは，クーロンの法則を使用して計算する．クーロンの法則を説明する際に，電気量の保存についても簡単に触れた．第２回では静電場内での力学的エネルギー保存の法則および系のエネルギー保存則を使用して運動エネルギーの変化量，静電気的ポテンシャルエネルギーの変化量および外力の関係を説明する．静電気的ポテンシャルエネルギーは，第３回で電位[12)]を定義するのに使用する．第３回の電位の定義は，仕事量で定義するものとは異なる．仕事量を使用して電位を記述する方法は，電位を知る技術として説明をしてある．また，電位の重ね合わせの原理の導出および説明をする．ポテンシャルエネルギーは系で扱うものであり，静電気的ポテンシャルエネルギーで系のエネルギー保存則を使用した考察を第３回では論じる．第３回で定義した電位で第４回の電位差を定義する．電位の重ね合わせの原理を使用して，電位差の変化について触れている．そのような電位差の変化は電気回路内で生じる電位差の変化を説明するのに応用できるものと，著者は考えた．電位差と静電気的ポテンシャルエネルギーの変化量との関係を説明した．この関係の説明では，電位と静電気的ポテンシャルエネルギーとの関係も説明した．これらの関係は，電位および電位差を使用して質点系および回路の静電気的ポテンシャルエネルギーについて考える際に使用できる．質点の移動情報と静電場ベクトルから静電気的ポテンシャルエネルギーおよびその変化量を知ることができる技術についての説明をした．そして，そのような静電気的ポテンシャルエネルギーの考察と比較して，質点の移動情報と静電場ベクトルから電位および電位差を知る技術についての説明をした．そのような静電気的ポテンシャルエネルギーと電位差を知ることができる技術では，電位の高低から質点が移動する方向を説明できる．このような質点の移動と電位との関係は電気の回路内で質点が移動することを理解する際に使用できる．静電場から静電気的ポテンシャルエネルギーを計算する式を使用して，静電場ベクトルの方向と質点の移動方向との関係についての等電位面と呼ばれる特別な面の説明をする．さらに，静電気的ポテンシャルエネルギーおよび電位差を使用して，電位から静電場を計算する方法について説明をする．その説明では，静電場ベクトルの大きさと電位との関係を説明する．静電気的ポテンシャルエネルギーについて考えてきたので，次に静電場内での質点の運動エネルギーと電位差との関係を考察する．この考察では，静電場内での力学的エネルギー保存の法則を使用する．第４回では導体での電位差についても説明をする．そして，導体系の「一意性」および

「重ね合わせの原理」を説明する．この重ね合わせの原理を使用して，静電気的ポテンシャルエネルギーを孤立導体および導体系に於いて計算する．また，導体の説明ではガウスの法則を使用して静電場を記述する．その静電場を使用して電位差を計算する．さらに，静電容量を導入する．この静電容量を使用してコンデンサの静電容量および静電気的ポテンシャルエネルギーを計算する．第４回までは，主に静電場での説明である．第５回からは，動的な電場の説明をする．動的な電場は，電磁波に関係する．第５回では電気の回路で使用する電圧について説明する．著者の見識では，第５回で使用した微分法論は２００７年現在までの日本国内で使用されている一般的なものとは異なる．この微分法論の導入も著者の独自の判断で行った．そして，この微分法論を使用した量の定義を第５回では説明していることも本書の特徴となる．第５回で，電圧，起電力，電流，電力，電気抵抗，インダクタンス，キルヒホッフの第１法則およびキルヒホッフの第２法則についての説明をする．このようなものを説明するのに，その微分法論を応用している．起電力（electromotive force）の定義を与えている．著者が学生時代に読んだ和書の専門書では，回路図で起電力が電圧源に表示されていた．そのような専門書では，起電力を定義するどころか説明すら無かった．第５回では著者が独自に起電力の定義を与えて，その物理学での現象を説明している．電流の定義では，著者が独自に正味の電気量を定義している．著者が定義した正味の電気量は，クーロンの法則の電気量とは異なるものとして定義している．その正味の電気量を使用して，国際単位系である SI での電気量の単位の値の算出をしている．国際単位系の簡単な説明にも触れた．キルヒホッフの第 1 法則については第２回で説明をする電気量の保存を使用して説明する．キルヒホッフの第２法則については第 1 回の付録で説明をする系のエネルギー保存則で考察をする．オームの法則に従う電気抵抗では，熱力学系について簡単に触れる．電気抵抗の両端に生じる電圧および定常電流が比例関係になることは，オームの法則ではないものと扱う．このような比例関係は，オームの法則に従う電気抵抗の一部の説明である．この意味で，第５回のオームの法則の説明は著者が学生時代に和書の専門書で読んだものとは異なる記憶がある．また，ガウスの法則，無磁荷の式，マクスウェルが修正したアンペールの法則およびファラデーの法則を使用する．ただし，本書では，「無磁荷」の表示で磁荷が発見されていないものとして扱う．これらの式を真空中のマクスウェルの方程式系（Maxwell's equations）として説明する．第５回では，マクスウェルの方程式系を動電場および磁場の説明で主に使用する．場の力では，静電場，動電場および磁場の力を記述するためにローレンツ力の式を説明する．本書の回路論で回路図を与えるために，回路図で使用する回路素子 (circuit element) の記号についての説明をした．ここで説明した回路素子の記号を使用して直列 RCL 回路を与える．この直列 RCL 回路を使用して簡単な回路解析を行う．その回路を使用して，キルヒホッフの第２法則を系のエネルギー保存則を使用して考察している．ここでの回路解析ではインピーダンスおよび電流の最大値を算出する．本書の本文はここまでとしている．この第５回の後には Option を加えて，電位の定義についての著者の意見を論じる．ここでは，電位を仕事量で定義しなかった理由を説明する．

第１回は２章で保存力を説明している．２章の最初の方に与えた静電場の定義は，著者の学生の頃に日本国内で一般的に使用されていた静電場ベクトルの定義である．２章の最後の方に与えた静電場ベクトルの定義は著者が独自に与えたものであり，前者のものよりも優れているものと２００９年現在の著者は考えている．本書の説明では，２章の最初に説明した静電場の定義でも十分なものと２００９年現在の著者は考えている．２０１７年現在に付け加えた２章の最後の方での静電場の説明は，動的な電磁場および重力場に関係がある初等的な説明である．この説明は，特殊相対性理論の応用をする場合がある著者の経験で付け加えている．３章ではポテンシャルエネルギーを説明している．著者の見識では，３章のポテンシャルエネルギーの定義は２００７年現在までの日本国内の多くの物理学書でも記述していないものと考える．また，ポテンシャルエネルギーの変化量およびその保存力のなす仕事量の関係式についても同様と著者は考える．これらの箇所は本書の中でたびたび使用するものである．ニュートンの運動方程式を使用して，運動エネルギーを導出している．運動エネルギーおよびポテンシャルエネルギーを使用して，力学的エネルギー保存の法則でポテンシャルエネルギーの変化量について説明している．第３回の電位の定義のために，ポテンシャルエネルギーの説明を

する．ポテンシャルエネルギーの説明に保存力の知識を使用するために２章で保存力を説明した．４章では，特殊相対性理論で使用する運動方程式でのエネルギーの保存則について説明している．エネルギーの保存則は，３章で説明した力学的エネルギー保存の法則を使用して，質点系の場合に触れている．運動方程式については，著者が学生の時に読んだ物理学書の説明が不適切であったものを正している．慣性質量および加速度の積で記述するニュートンの運動方程式は，その質点に作用している合力を記述する．大学生の時の著者が読んだ物理学書には，合力ではなく力を記述するものと指導していた記憶がある．

付録ⅰではポテンシャルエネルギーで使用する記号および１９９０年代の日本国内の一般的な指導について簡単に触れている．ここでは，著者には見識張っているように見える和書の専門書の意見とは，異なる著者の見識との比較を簡単に行っている．ポテンシャルエネルギーを質点が持つものと扱うことは，不適切であることを説明してある．

付録ⅱでは内部エネルギー，系のエネルギー保存則および熱力学の第１法則――熱力学の第１法則もエネルギーの保存則である．――を説明した．内部エネルギーは系のエネルギー保存則および熱力学の第１法則を導入する際に使用する．系のエネルギー保存則は，本書の第４回のコンデンサの静電気的ポテンシャルエネルギーについての考察および第５回でのキルヒホッフの電圧平衡の法則を説明する際に使用する．熱力学の第１法則は，本書の本文では回路素子の熱に関連する知識である．

付録ⅲでは特殊相対性理論および量子論でのエネルギーについての説明をした．３章で説明したポテンシャルエネルギーおよび運動エネルギーは，古典理論のニュートン力学の枠の中での説明をしている．付録ⅲでは，そのような古典理論での説明とは異なるエネルギーについて説明した．特殊相対性理論を基礎としてエネルギーについて説明している．付録ⅱの質点系のエネルギー保存則を使用している．光子の量子エネルギーについても説明している．本書では，特殊相対性理論および量子エネルギーについても使用する箇所がある．文献２４～文献２８で著者の独自の研究課題である正円で構築している心のモデルについても，エネルギー，電磁気力および重力の観点から簡単に触れている．この心についての研究は，智慧および知能に関係する．

付録ⅳでは，ローレンツ変換およびガリレイ変換について説明している．ニュートン力学では，絶対時間および絶対空間を使用してガリレイ変換を導出している．特殊相対性理論では，ローレンツ変換を導出して絶対時間および絶対空間を否定している．このことでは，電磁気学の慣性座標系にローレンツ変換を使用するので付録ⅳを２０１７年３月現在に追加した．ローレンツ変換を使用すると，絶対空間および絶対時間を否定できる．真空中の光の粒子を使用して，慣性の法則を観測できる．光の粒子の運動エネルギーの変化で，光の粒子に作用する合力が変化する．このことでは，慣性の法則を説明できる．この慣性の法則をローレンツ変換で使用して，絶対空間および絶対時間を否定できる．このことは，ニュートン力学では説明できない速度の相対性および加速度の相対性を説明するのに重要であるので２０１８年９月に追加した．

付録ⅴでは、２重性について説明した．２重性は，量子論での議論である．この議論では，物質が粒子および波の２つの性質で記述できる．血液の流れは血流量で記述できる．その血流の血液の構成成分の現象を理論物理学で記述する際に，２０１７年３月現在では２重性を考えることができる．血液が流れる際に，エネルギー量が変化する．そのエネルギー量の変化には，エネルギーの量子化で離散的に変化する場合を説明できる．質点の軌跡は，血流で移動する物質の変化を知るのに基礎となる．このような血流でのエネルギー量の変化は，心臓血管系および脳神経系には重要な変化であるものと２０１７年現在の著者は考えている．心臓血管系が脳神経系に変化を与えることには，「心」への作用を仮定できる．このような作用では，心と体の相互作用を仮定できるものと２０１７年３月現在の著者は考える．エネルギー量は生体システムの外部からの力が作用することで変化が可能であるものと仮定できる．このことでは，心および生体システムとの相互関係に考えることができる．２０１７年３月現在の我々が生体システムを説明するのに，主には電磁力および重力を使用する．電磁気学は，生体システムを説明する際にも基礎となる．

付録ⅵでは，電位の定義について簡単な説明を与えた．２０１７年８月現在の著者が電位の定義で付録ｉに関連することを説明してある．本書は，電位の定義について論じている文献である．著者の心臓血管系の回路モデルは，電気回路論を基礎として著者が独自に構築したモデル理論である．そのモデル理論を理解する参考文献として本書を作成している．著者が知る日本の大学２年生までの基礎物理学および微分積分学では，著者が構築した心臓血管系の回路モデル理論を理解することは難しい．このことには，その日本の教育課程の内容が不適切であることを著者は根拠にする．本書は，そのような不適切であるものと著者が考えている一部に著者が独自に定義した量を使用して体系を成すものである．電位は，特に心臓血管系の回路モデルでも重要である．このために，電位の定義および電位差の定義について説明しながら他の量についても著者が定義したものを説明している——ポテンシャルエネルギー，電流および起電力など，具体的には上述で既に簡単に触れた．——．付録ⅵでも３章でのポテンシャルエネルギーはとても重要である．

付録ⅶでは，ニュートン力学の慣性座標系および加速度での相対性の説明をした．ニュートン力学の慣性座標系では，電磁場を説明できない．このために，アインシュタインの特殊相対性理論の慣性座標系で電磁場を説明する．その特殊相対性理論の慣性座標系では，ニュートンの万有引力の法則を導出できない．このことでは，重力が説明できなくなる．重力を説明するために，アインシュタインの一般相対性理論を使用する．このことで，ニュートンの万有引力の法則よりも厳密な重力理論を得る．一般相対性理論では，加速度で重力を説明する．この加速度は，ニュートン力学の加速度とは異なる．ニュートン力学の慣性座標系の加速度は，絶対加速度である．ニュートン力学では絶対空間を使用して慣性座標系を観測する．そのような慣性座標系の等速度は，絶対速度を使用して説明する．この説明は，絶対時間も使用している．特殊相対性理論で，ニュートン力学では説明できない速度の相対性を説明できる．一般相対性理論で，ニュートン力学では説明できない加速度の相対性を説明できる．このような相対性を説明できないニュートン力学の慣性座標系および加速度について説明した．宇宙に進出する際には速度および加速度を使用する．この速度および加速度を考えるのにローレンツ変換を使用するので付録ⅶを２０１８年９月現在に追加した．

文献１～文献５は，著者が独自に構築している「心臓血管系の回路モデル理論」についての無償の PDF 文書である．文献１は，約１０年間での著者の研究の主要な部分をまとめた論文である．文献１では著者が独自に定義した「コンプライアンス」（compliance）および「流れの抵抗」を心臓血管系の回路モデルの回路素子として使用している．２００７年現在では，これらの素子を著者の独自の素子として著者は扱っている．文献１では，コンプライアンスはコンデンサに対応関係を与えた．同様に，流れの抵抗はオームの法則に従う電気抵抗に対応関係を与えた．上述のように，本書の第４回ではコンデンサの説明をしており，第５回ではオームの法則に従う電気抵抗の説明をしている．文献２は，心臓血管系の回路モデルで使用する血流量の定義についての論文である．文献２で血流量の定義を与えている．文献１で簡単に与えた血流量を修正して，文献２では著者の独自の血流量として定義した．その血流量では血管内の直交断面積が時間に対して変化する場合でも数式での記述ができる．そのような血流量の定義を与えるのに電流の定義を使用した．その電流の定義は著者が独自に本書の第５回で与えたものである．著者が大学生のころに学んだ電流の定義とは異なる部分があり，著者が独自に修正を与えたものである．そして，そのように定義した血流量を使用して心臓血管系の回路モデル理論で使用する「インダクタンス」を著者が独自に定義した．２００８年現在，そのインダクタンスを著者の独自のインダクタンスとして，著者は扱っている．文献２では心臓血管系の回路モデルのインクダタンスを電気回路論のインダクタンスに対応関係を与えた．電気回路論のインダクタンスについての説明は，上述のように本書の第５回で与えた．文献２では血液を質点系および熱力学系として扱っている箇所がある．質点系では系のエネルギー保存則を使用した．熱力学系では熱力学の第１法則を使用した．系のエネルギー保存則および熱力学の第１法則について付録ⅱで説明したことは上述のとおりである．著者が構築している心臓血管系の回路モデル理論の特徴としては，次のような観点もある．著者のモデル理論では，電位を心臓および血管内に作用している内圧に対応させる関係を与えている．他者の心臓血管系の回路モデル理論では，電圧を血圧に対応させているものがある．この血圧を電圧に対応させる他者の理論

では，分母が零になる場合が考察可能であり，著者が採用していない理由のひとつである．さらに，そのような心臓血管系の回路モデルでは血圧で血液が心臓血管系内を循環しているように説明をしているものと著者には判断できる．著者の知る限りでは，心臓および血管内で作用している内圧で主に心臓血管系内での血液は循環しているものと説明できる．このように心臓および血管内の血液を循環させている圧力が異なる解釈になることも，著者が電圧を血圧に対応させる関係を採用しない理由のひとつである．ここで使用している「内圧」は「血圧」と異なるものである．このことは，文献３で説明をしている．さらに，著者の心臓血管系の回路モデルでの心室および心房に当たる部分に著者が独自に定義したプレッシャホロワを接続して内圧制御内圧源を定義している．この内圧制御内圧源では，心室および心房に存在する血液を心室および心房に作用する内圧で循環させることを説明する．その循環させる内圧の制御に，神経系が関係する．そのような神経系との心臓血管系との接続には，内圧制御内圧源で説明する．著者が読んだ他者の回路モデル理論での心臓血管系の血液の循環は，心室および心房内に血液を入れるだけで循環するものと説明をしていることを著者には記憶が有る．心室および心房内に血液が有るだけで，心臓が血液を循環させることは著者が知る上でも生理学および生物学の説明とは一致しない．神経系で心臓の内圧の制御を行うことでは，そのような神経回路モデルを仮定する．その神経回路モデルを内圧制御内圧源に接続して，内圧の制御をして心臓血管系内の血液を循環させることを仮定できる微分方程式系の導出が可能である．そのような著者の心臓血管系の回路モデルで数値解析をしたヒトの左心室の内圧および容積は，測定値と小数点以下 1 桁で完全に一致することを文献１で示した．さらに，文献２の回路モデルでは，インダクタンスを導入して，文献１のモデルよりも実際のヒトの心臓血管系に一致したものと扱う箇所を追加できた．このように，一致するものと扱える箇所も著者の心臓血管系の回路モデル理論と他者の理論との異なる観点での特徴的な箇所であるものと著者は考える．上述のように著者の独自の理論としての特徴を，２００９年現在の著者の心臓血管系の回路モデル理論に著者は考える．文献３～文献５は，著者が初心者向けに作成した心臓血管系の回路モデルの参考文献である．これら３つの文献では，文献１および文献２で使用した初等的かつ基礎的な部分での説明をする．

文献６～文献１０は本書の第２回～Option までの無償の PDF 文書である．本書は不定期に改訂をして発行することがある．このような本書のシステムのために，各 PDF 文書の内容が一致しない箇所も発生することも考えられる．各 PDF 文書の最後のほうに作成日，発行日および改訂発行日を表示している．これらの情報を参考に，本書の内容の一致しない部分には対応をとれることも著者は考えている．文献１１および文献１２を主な参考文献として，本書の全体を作成している．文献１３を本書の仕事量および仕事量-エネルギー原理の説明を作成するために参考にした．さらに，文献１４も物理学の術語および仕事量-エネルギー原理について参考にして第１回の文書を作成している．文献１５は付録ⅱの温度について参考にした文献である．文献１５は SI についての文献である．SI については，本書の第５回――文献９のこと．――で説明をしてある．文献１６はアインシュタインの特殊相対性理論に関係する論文について英訳でまとめた本である．アインシュタインの特殊相対性理論は付録ⅲで使用している．本書の Option――文献１０のこと．――でもアインシュタインの特殊相対性理論の運動方程式について扱っている．文献１７は，付録ⅲで使用した物理定数を発表している CODATA の PDF 文書である．CODATA については文献１８で説明した．文献１８はアインシュタインの特殊相対性理論での速度の変換について説明した PDF 文書である．文献１８に速度の定義および速度の変換についての説明を与えた．速度ベクトルは本書の第１回の３章でも使用している．本書の Option――文献１０のこと．――で，簡単に速度について説明をしてある．文献１８および Option での速度の定義は，特殊相対性理論の慣性座標系上での定義である．この慣性座標系では，絶対時間および絶対空間は使用していない．ニュートン力学の慣性座標系は絶対時間および絶対空間を使用している．これの相違については，付録ⅳおよびⅶで説明してある．著者が学生時代に読んだ和書の専門書では，ニュートン力学の慣性座標系での速度の説明であった記憶が有る．そのような速度の説明では，点で速度を説明――速度の定義とも扱えるものを特に指す．――したものがある．速度および加速度は，ニュートン力学でも特殊相対性理論でも質点で定義すべきものであることを２００７年現在の著者は考える．このような箇所は，著者

の速度および加速度の説明で特徴となる．文献１９ではアインシュタインの特殊相対性理論でのエネルギーの変換および相対論的質量の変換の導出並びに説明をした文献である．アインシュタインの特殊相対性理論でのエネルギーおよび相対論的質量は付録ⅲで説明をした．文献２０では付録ⅲの量子論について参考にした．付録ⅲの量子論はほとんど文献１２および文献２０の指導を基礎にして作成した．量子論については，本書の第２回の付録で扱うボーア理論で使用する．文献２１は，付録ⅲで説明をする光量子のアインシュタイン先生の論文について掲載している文献である．

文献２２～文献２８は，著者が独自に構築している波の理論である．著者の専攻である心臓血管系の回路モデルでは，心臓の内圧および容積の特性を表現するのに波を使用する．そのような波を記述する方法には，フーリエ級数――文献２２および文献２３の付録で説明をしてある．――を採用して文献１の基礎理論を構築した．このことでは，正弦波として正弦関数を応用する．正弦波を理論物理学で使用していても，著者は正弦波の定義を学んだ記憶がない．このこともあり，著者が独自に正弦波の定義を与えることを試みた．文献２では，血流量の定義を著者が独自に与えている．血流量を考えることは便宜的な方法であるものと２０１７年現在の著者は考えている．厳密には，血流を構成している物質の運動を正確に記述できることで生体内の現象をより真実に近いものとして説明できるようになるものと考えている．そのような質点の記述をするには，絶対空間および絶対時間を使用しないで記述することになる．さらに，２重性を考慮することで生体内の質点の性質および波の性質を記述できるようになる．このようなことでは，速度および加速度の定義が絶対時間および絶対空間で与えられるものでは使用できない．絶対時間および絶対空間を否定できる物理学の理論は，アインシュタインの特殊相対性理論で与えられた．特殊相対性理論は電磁力を扱う理論である．特殊相対性理論では，重力を説明する万有引力の法則を導出できない．このことでは，アインシュタイン先生の重力理論として一般相対性理論を扱う．ニュートン力学の万有引力の法則は，アインシュタイン先生の重力理論での近似の法則として指導されている２０１７年３月現在であるものと著者は認識している．その一般相対性理論では，特殊相対性理論の慣性座標系を応用して加速度座標系を定義する．その慣性座標系では，重力が扱えないことで生体内の物質の運動を記述することができない問題がある．ニュートン力学の計算は，特殊相対性理論の慣性座標系上で近似できる場合がある．このことを応用して．絶対時間および絶対空間を使用しないで電磁場および重力場を主な場とした物質の現象を記述できる理論を著者が独自に構築することを試みている２０１７年３月現在である．このような座標系を使用した基礎の理論物理学の体系は，著者が独自に構築している波の理論とは同じものではない．著者が独自に構築している波の理論で使用する著者の基礎物理学の体系である．波を応用することで，エネルギーの量子化を記述できる．エネルギーの量子化では，振動数を使用する．振動数では周期を記述できる．周期は時間である．時間およびエネルギーを関係付けることができる．時間およびエネルギーでは時空を扱うことになる．時空で我々は肉体を持つ．肉体では，脳および心臓を中枢として扱うことを学生時代に読んだ記憶がある．脳に我々の心を関係付けることは，医学，心理学および工学で指導されている．このことは，新しくはない．そのような説明では，心は肉体が死亡することで心も消滅するものと考えることは容易である．このような考えは，脳神経系で心が認識できることの説明に因る．脳神経系が死ぬことで，心が存在することも説明できなくなる．脳神経系は，心臓血管系および他の臓器と結びついている．心臓血管系の特性が脳神経系と結びつくことで，心との関係を考えることは上述のように可能である．そのような心の説明では，我々が生まれる前の我々の心についても説明できていない．著者は，心臓血管系の回路モデルを簡単なモデルとして構築した．心臓血管系では，液体が循環する．その液体で，栄養素および老廃物の運搬をしているものと生理学および生物学で学んだ記憶がある．脳神経系では，脳神経系内の液体のイオンが移動することで，脳神経内の電気が生じることを医学および生物学で学んだ．このような脳神経系内の電気の情報処理は，液体を使用している．心臓血管系で液体を使用した情報処理の回路モデルを構築して，電気・電子回路の計算技術を応用した文献１および文献２の基礎理論がある．特に文献１の基礎理論で使用した回路要素を応用して，著者が独自に神経膜のモデルを構築して発表している．このことでは，液体を使用した情報処理で心臓血管系および神経膜の回路モデルを構築している．これらのモデルでは，心までは説明できて

いない．著者は独自に「心のモデル」を言葉のモデルとして構築し始めてみた．その心のモデルでは，理論物理学での考察から心は「無始無終」で存在することを仮定している．この意味では，我々が現在持っている肉体より先に我々の心が存在している．肉体が死んだ後も我々の心は存在することを仮定していることになる．このように我々の心を考えることでは，知能および智慧は我々の肉体が死んだ後も我々の心に考えることができる．脳神経系がなくても知力を持つ我々の心を仮定できる．この意味では，ニューロンのネットワークで我々の知力を考えるものではなく心で智力を持つものと仮定できる．そのような智力は，どのように与えられるものかは研究対象である．

心に智力を考えることは，仏法の教えにも有る．仏法は約三千年前に西天の印度——月氏ともいう場合がある．月の国である．——で説かれ，その約1115年後に中国に渡り約１４６５年前に東北の日本——日の国である．——の大王に仏教の経典が献上されているものと２０１７年現在の著者は教えられた記憶が有る．釈尊が印度で説法していらっしゃる時間は，約５０年間であると教えられる．その５０年間では，約４２年間は真実が顕されず——仏法で方便と呼ばれるものである．——後半の約８年間で真言である真実の教えになる仏の智慧の御言葉が説き顕されたものと，仏語を信解することが有る．このような認識では，仏法は後半の約８年間で説かれた法印の真実の教えになる．その真実の教えの体系では真実の教えよりも方便の教えは劣るものとしてひとつの仏法である一仏乗になる，ものと信心を説く．像法時代までの一仏乗の御本尊を月輪に譬え，末法の一仏乗の御本尊を日輪に譬える．西に沈む月輪の光明は東から昇る日輪の光明である，ことを譬えで顕す．西に沈む月輪の光明は，西から東に向かう．東から昇る日輪の光明は，東から西に向かう．月輪に譬えられる像法時代までの仏法は，西天から極東の日本に渡される．極東から昇る日輪に譬えられる末法の仏法が，西へ向かうことは球体の地球での極東では自明とも思えるものである．末法の一仏乗の御本尊は，無始無終で存在する真実の一仏乗の御本尊であるものと教えられる記憶が著者には有る．末法の一仏乗の御本尊から皆成仏道（かいじょうぶつどう）の仏界を住処とする御本仏が顕されるものと教えられる．末法の一仏乗の御本尊から仏日が顕れるものと譬えられ，仏界から九界が生じるものと教えられる．ひとつの仏法の教えでは我々の心は無始無終で存在する，ことを説いているものと著者には記憶が有る．このことでは，著者が独自に理論物理学から導出する「無始無終で存在する心」に一致する．このような歴史には諸説がある．説法の時間を５０年間とすることでは，一代聖教（しょうぎょう）５０年間と説かれている仏語と信解されている経文の指導が有る．四十余年間は未だ真実を顕していないこと，を説く仏語であるものと信解されている経文が有る．仏の「八十入滅」は仏語であるものと信解されている経文の指導が有る．８０歳で御入滅していらっしゃるものと信解すると，説法の時間を５０年間とすることでは３０歳で成道していらっしゃるものと信解できる．小乗は１２年間および権大乗は３０年間でそれぞれ説法していらっしゃる説では，「四十余年」は約４２年間として計算できる．５０年間の一代聖教で真実を顕していない４２年間を差し引くことで８年間を算出できる．その８年間で実大乗の真実の教えである「仏法」を説いていらっしゃるものと説明できる．仏弟子として主張することでは，仏語に従うものと考える．仏語では，方便を除いて嘘はなしと指導するものを著者には記憶が有る．仏法の歴史の諸説には以上のように仏語の指導が有る．

上述のように著者の心のモデルには，無始無終で存在する心に知力を仮定している．無始無終で存在する心は，上述の仏法で約三千年前に説かれていることを教えられる．一仏乗である仏法では，大御本尊がひとつである．その大御本尊から一切が生じるものと信解することを２０１７年８月現在の著者には記憶が有る．仏界は，その大御本尊と一体である．無始無終で存在する大御本尊から生じる仏界の義があるが，大御本尊も仏界も無始無終で存在する．普通の仏は，菩薩道を行じることで成仏する．成仏することは，正体である実仏（じつぶつ）になることを意味する．実仏は，一体（いったい）で三身（さんじん）であるものと教えられる．三身とは，報身（ほうしん）如来・法身（ほっしん）如来・応身（おうじん）如来であるものと著者には記憶が有る．報身如来の主の徳，法身如来の親の徳および応身如来の師の徳を実仏は示すものと教えられる．実仏に成仏することは，醒寤（せいご）のこと——寤（さと）ることである．——であると著者には記憶が有る．九界でのことは，夢のことであるものと教えられる記憶が有る．九界は，菩薩界・縁覚界・声聞界・天界・人界・修羅界・畜生界・餓鬼界・地獄界のことである．仏法では，聖人（しょうにん）と呼ぶ場

合は仏界から声聞界までを指すことがある．天界から地獄界は六道と呼ぶ．六道から離脱できずに六道を輪廻することを六道輪廻と呼ぶ．悪道とは，修羅界から地獄界までである．四悪趣とは，修羅界から地獄界までを指す．三悪道――三趣とも呼ぶ．――とは，畜生界から地獄界までを指す．菩薩界から地獄界までは，仏界ではない．仏界の教えが欠ける九界は悪を持つものと教えられる．仏界は，菩薩界よりも天地雲泥の差で勝れているものと記憶が有る．縁覚界および声聞界は二乗と呼ぶことがある．菩薩界は，二乗よりも天地雲泥の差で勝れているものと教えられる．二乗の聖人は天界の最高神を眷属に持つ，ことを教えられる．天界および人界は善を示すが，天界の方が人界よりも強く善を示す．諸天善神は，妙覚を顕すものと教えられる．妙覚にも性善・性悪が備わることを信解する――十界互具に備わるものを考える．――．権教には，善悪は等覚までであることを教えられた記憶が有る．一仏乗の大本尊に帰依しない神は，悪神になる．独り妙の名を得る大御本尊の大慈大悲では，大薬師が能く毒を変じて薬とするように悪人が成仏することを聖人等の御指導に思い出す．煩悩を絶たずに五欲を離れないで成仏できる，ことを教えられる．仏界から地獄界も生じる．地獄界が仏界に成ることもある．仏も我々も異なることなく正体は仏であるものと信解することは，仏界の教えになるものと著者には記憶が有る．この意味で，我々は仏と平等であり異なるものでは無いことを教えられる．この平等であることでは，仏日が顕す我々の正体は蓮が水面に浮き生長して華を咲かせ果実が成るが如く仏に等しく仏界を保つ仏法であるものと説明できる．このときに，著者は十界互具を思い出す．地獄界から仏界までは十の界を説明している十界である．その十界のそれぞれの界に仏界から地獄界までのそれぞれの界を顕すことを十界互具と教えられる．十界は，仏界に九界を加えて十の界である．十界のそれぞれの界に十の界を顕すことができるので十掛ける十で百の界を導くことになるのが十界互具である．我々が成仏するために仏の護念する所の菩薩道を行ずる際には，我々に主の徳，師の徳および親の徳を顕す仏が慈悲で教化してくださることを教えられる．我々が菩薩の法を教化されるには，その教えを説いてくださる仏が無始無終で存在することを仏法では教えられる．無始無終の仏は，無始から我々が菩薩道を行じて成仏したときでも教主である御本仏として上首でいらっしゃることになる．この上首は一切の仏の上首になる御本仏である．一切の仏の説法は，その無始無終の御本仏の説法であるものと教えられる．我々が仏に醒寤したときにも各仏との関係には眷属関係を考えるものと記憶に有る．この眷属関係には，師弟関係を考えることができる．釈尊の眷属の諸仏には，十方の釈尊の分身諸仏が説かれている．久遠に成仏していらっしゃる釈尊の教化を受けてきたお弟子さん等が成道して諸仏に成っていらっしゃる仏典を著者は思い出す．釈尊の説法および分身諸仏の説法は，無始無終の本仏の説法であることになる．御本仏が師で，釈尊が弟子である．釈尊が師の場合では，分身諸仏が弟子である．その分身諸仏の師は，御本仏でもある．末法の仏法で，御本仏の義で釈尊と顕すことも２０１７年８月現在の著者には記憶が有る．その無始無終の御本仏の説法で，一仏乗の無始無終に存在する我々は智慧を与えられている．著者の理論物理学から導出する無始無終で存在する我々には，体が死んでも心は存在することを仮定している．心が存在することで，死んだ後に新たな体を持つことを工学モデルで仮定した．このことは，相・性・体を国土に観察できることに基づく．心が無始無終で存在していることで来歴を我々は保っている．心が保つ法を決定できること，を来歴に仮定する．その仮定で，現在の現象は過去の現象と関係を持つことを説明できる．その著者の心のモデルでは，法は相・性・体で説明できるものと仮定している．来歴を保つ我々の心は，過去からの知恵を来歴に説明できる．来歴が決定していく際に，我々は知恵に触れている．このことでは，心に来歴での知恵の知力を考える．その知力が法を決定すること，を仮定できる．

九界が夢であることでは，真実は仏界になることで醒寤した我々の正体である仏が保つものと信解する．真実である仏界から九界が生じている．仏語は，仏界の言葉である．仏界の言葉に，善悪を聞くことができる．真実の教えで，善悪の差別を聞く．このことで，十界を聞く．皆成仏道で，十界互具を聞く．真言である真実の教えである仏界から生じる夢である九界は，嘘であるものと信解する．その嘘は，方便であるものと信解する．五戒と呼ばれるものが有る．一に不殺生戒，二に不偷盗戒，三に不邪淫戒，四に不妄語戒および五に不酤酒戒――あるいは不飲酒戒である．――である．方便である嘘は，不妄語戒を破る罪ではないものと著者には記憶が有る．九法界である九界の教えは，嘘である．

その四十余年の真実を顕していない仏の嘘の教えは，不妄語戒を保つ方便になる．そのような四十余年の教えは，権教と呼ばれる．権教は，仏が真実の教えを説くまでの臨時の権の教えである．四十余年に説いた権教に内容が等しいものは，四十余年の後に真実の教えを説く中で別に説いた教えも方便の教えである．仏の方便は説法の対象に成る衆生に合う方便であるもの，と教えられた記憶が著者には有る．四十余年の前後で生じてくる衆生——２０１７年８月現在は末法である．末法は一万年であると教えられる．——も相違することでは，仏が方便をそれぞれの衆生に合わせて説いてくださることになる．このために，四十余年の間に真実を顕さないことでは，真実を顕し始めた四十余年目からの無上道の仏法とは別に方便を説くことを否定するものでは無いものと信解できるようである．九界の教えは嘘であり夢中の善悪である，ことを説いているものを著者には記憶が有る．仏界の教えは真実であり生滅を離れた心である，ものと信解する．生滅を離れた心は，無始無終の心である．無始無終の心であることは，著者の言葉の心のモデルに等しい．九界の夢中の善悪は，妄想として教えられる．生死の夢中の善悪は，妄想の嘘である泯びる無常の教えである．生死の夢中の無常は，生滅を離れていないことを根拠にできる．生滅を離れた心は，常住の心である．肉体が死んでも，常住で無始無終の心である．理論物理学で導出する無始無終の心から時空を生じさせることを仮定している．無始無終の心に保つ智力で時空を生じさせることを仮定できる心のモデルを著者が独自に構築している．

文献２２および文献２３では，正弦波を定義している．一般の波をフーリエ級数で記述する．フーリエ級数で正弦波を使用する．文献２２では，波の速さを著者が独自に定義している．正弦波の波長および振動数も著者が独自に定義している．文献２３では，独立変数となる弧度の加減の計算での正弦関数および余弦関数の値の説明をしている．この説明では，単位円での三角形の回転を使用する．さらに，負の弧度の説明をする．そして，正弦波の定義を与えている．

文献２４では，著者が独自に「時間」を定義している．著者が定義した時間で著者が定義した正弦波を記述することを考察している．さらに，著者が定義した時間での心についての考察をしている．この考察で，「心は無始無終で存在する」ことを理論物理学から導出している．「心には時間および距離が無い」ことを導出している．このことは，心には時間，空間およびエネルギーが無い領域であることを仮定する．心のモデルを言葉のモデルで構築し始めている．

文献２５では，時空が生じたときには体積およびエネルギーを持っていることを仮定した議論を理論物理学として考察している．この考察では，「距離，時間およびエネルギーを持つ領域」および「距離，時間およびエネルギーを持たない領域」を仮定している．距離，時間およびエネルギーが無い領域から時空が生じていることを考察している．工学としては，「言葉で記述した心のモデル」で考察をしている．この考察では，「主の徳」，「師の徳」および「親の徳」についての考察をしている．心のモデルで，「心および時空が一体である」ことを仮定して時間について議論している．その議論では，時空での現象は心が先にあることで生じているので心を支配している本に法ることで各心に上下関係を仮定できる．このような上下関係に主の徳，師の徳および親の徳を考察している．

文献２６では，相で解釈する理論物理学の正円の時間について考察している．正円で正弦波を文献２２および文献２３で定義した．そのような正円では，五行，五大，五根，五色，五常——仁・義・礼・智・信のことである．——および五輪などを扱うことができる．これらは，古来からも精神および生物に関係のある「法」である．心で認識をする際に，法に従うことを仮定できる．法に心が支配されるのに識を生じさせる智慧を用いるものと仮定できる．このことでは，心が支配されるのに智慧を用いることを認めている．そのように智慧を用いている存在に，主の徳，師の徳および親の徳を仮定できる考察をしている．このように徳を示す法を仮定して，その法が物理学の法則とは異なるものと考察している．さらに，正円を用いて正弦波を定義した．このことで，正弦波の弧度を計算するのに正円を使用する．その正円で計算する弧度について考察をしている．

文献２７では，著者が独自に構築している波の理論および特殊相対性理論を使用して２重性を導出した．著者が独自に定義した時間について考察して，ニュートン力学の絶対時間および絶対空間を否定できる議論について考察した．質点が備える振動数を導出することで，質点は，波として記述できることを説明している．質点が備える振動数では，質

点が持つ全エネルギーは振動数で記述できる．エネルギーは質点の性質である．振動数は波の性質である．その振動数の波は波長を記述できる．波長は，運動量で記述できることを導出している．運動量は，質点の性質である．波長は，波の性質である．この２重性を導出するのに，著者が独自に定義した時間の理論を使用した．この時間の定義では，時空を解釈する際に時間および空間は理論上分離させ理論物理学の各理論で時空として一体に議論する．このような時空の議論では，時間は正弦波で説明しているのでエネルギーには特殊相対性理論で関係付けている．

文献２８では，文献２７で導出した２重性をニュートン力学に近似できる質点の等速度の速さで議論している．その議論では，ニュートン力学の慣性座標系上の慣性質量で，特殊相対性理論の慣性座標系上の２重性を近似で記述できる場合を導出している．ニュートン力学の慣性座標系は，電磁気学の慣性座標系とは異なる．電磁気学の慣性座標系には，２０１７年現在ではアインシュタインの特殊相対性理論での慣性座標系を使用している．ニュートン力学での加速度座標系は，アインシュタインの一般相対性理論での加速度座標系とは異なる．電磁力を記述するのに，特殊相対性理論の慣性座標系を使用する．重力を記述するのに一般相対性理論の加速度座標系を使用する．特殊相対性理論の慣性座標系および一般相対性理論の加速度座標系を使用して基礎物理学の体系を与えた著者の独自の基礎物理学について説明している．このことでは，絶対時間および絶対空間を使用しないで考えていくことができる．

文献２９は，細胞膜（membrane）のモデルを発表した報告書である．文献１で使用した回路要素を応用して神経細胞膜の回路モデルを構築してみたものである．著者が学生時代に読んだ生物学書では，膜のイオンに対する選択透過性が説明されていた．細胞膜の各孔の断面積および膜の厚さを使用して電気回路論での抵抗率に当たるものを考察している．ただし，一部の式には誤って記述されている個所がある．抵抗率は，文献９である本書の第５回で説明している．

文献３０は，著者が昔の理論物理学を参考にするのに使用しているものである．２０１７年現在の著者の理論物理学の見識では，古い指導が多く説明してある文献である．著者は採用していない理論物理学の指導として扱っている．第１回では，付録ｉおよび付録ⅵで数学の記号について参考にしたものである．

文献３１は，２０１７年８月２８日現在の改訂発行で採用したプランク定数の値を表示してある CODATA の PDF 文書である．２００８年８月１３日現在の改訂発行では，文献１７の CODATA の PDF 文書を使用した．後に，プランク定数の値が変更してあるので文献３１の PDF 文書に表示してあるプランク定数の値を使用している．

文献３２は，一般相対性理論の加速度で重力の説明をしている．その説明の際に，ニュートン力学の慣性力についても触れているファイルである．慣性力は，ニュートン力学の加速度座標系で仮定する．その加速度座標系では，加速度の相対性を説明できない．アインシュタインの一般相対性理論の加速度座標系では，加速度の相対性を説明できる．この加速度座標系の相違について簡単に説明をしている．一般相対性理論では，慣性質量および重力質量の等価性を導出している．この等価性の問題は，ニュートン力学からの課題であったがアインシュタイン先生が解決したものと教えられている．一般相対性理論では，等価原理を導入する．その等価原理を応用して，加速度の相対性を導入できる．特殊相対性理論では，速度の相対性を導入できたが加速度の相対性は導出できていなかった．この特殊相対性理論の速度の相対性では，慣性座標系のみを扱った．一般相対性理論では，加速度座標系を扱うことができるようになった．その加速度座標系で，重力を扱うことができる．この重力で，重力質量について考えることができる．特殊相対性理論で電磁力を扱い，一般相対性理論で重力を扱う．その加速度座標系で説明する等価原理の導入では，特殊相対性理論で導入した光速不変の原理がどのように保たれているかを考えることになる．この加速度座標系の計算についての説明をしている．このような加速度座標系を説明した著者の動機のひとつに，大学 1 年生の基礎物理学の体系の研究にある．文献３２で示した計算方法では，特殊相対性理論を大学１年生の基礎物理学に導入することで一般相対性理論の初等的な部分も大学 1 年生の基礎物理学に導入できるものと著者は考える．このことに加えて，文献２８の“理論物理学での波の関数７”で導出した条件では特殊相対性理論の慣性座標系上でニュートン力学の慣性座標系に近似できることを示している．このことでは，著者が独自に文献２７の特殊相対性理論で導出した２重性をニュートン力学に近似する計算に導入

できるものと２０１７年現在の著者は考えた．このような導入で，基礎物理学の説明の最初から一般相対性理論の加速度座標系で説明できる速度の定義および加速度の定義を与える．そのように一般相対性理論の加速度座標系で説明を始める基礎物理学の体系の基礎を得るものと著者は考える．このような基礎物理学の体系では，１年間で基礎物理学の学習を一般相対性理論の初等的な個所――文献３２の内容は含むものとする．――にまで拡大させる．２年生以降の学習で宇宙に進出するための科学を学ぶ際には，１年生までに一般相対性理論の重力理論を要求される場合も著者は考える．宇宙進出は，我々の活動範囲を拡大させる．この活動範囲の拡大には，資源を地球の外から得ることをひとつの目的にすることを考える．宇宙の活動には，月および火星などの住居の開発の計画を拝見することもある．宇宙では，地球との重力の相違が我々の体に影響を与える．このことでは，重力の操作はひとつの課題になる．このような重力の問題では，ニュートン力学の万有引力の法則で十分な場合と一般相対性理論の重力理論が要求される場合に分けることが仮定できる．そのようなことでは，絶対時間および絶対空間を使用しない慣性座標系の近似の計算事項は基礎的なものと言える．地球の周りの重力場は太陽とのものが強く生じている．重力が作用することは，質量で説明する．質量では，エネルギーを説明できる．重力のみの自由落下運動では，質量に無関係に等しい加速度運動をする．電磁波でもある真空中の光の運動エネルギーが，重力場内の質点系のポテンシャルエネルギーに変換される．重力および電磁力で，時空の我々の目に見える物質の運動を説明できる部分が多くある．太陽のエネルギーの説明で，文字から生じる――文字は法の説明に記述できる．――力の生滅は日輪の光明の因果からの過去・現在・未来に考えられる．日輪の光で文字を読むことで，名を念じて法を得る．この法の徳――妙なる法から生じる徳である．――を智力の作用する因果に現す．文字を読んで，眼目を得る．日輪の光で正しい眼目に不動に定まることでは，不滅を考える．不滅では，無始無終に存在する心を仮定する．無始無終の心に時空での文字を関係させることでは，智慧で善悪の区別をする．智慧は，心および時空に考える．時空では，文字に智慧を収めて心に開くことを仮定する．心に作用する智慧の力の作用で，相の報いが異なることを仮定できる．２０１８年現在の理論物理学で説明する時空の相は，エネルギーの分布で決定する．莫大なエネルギー量が太陽から与えられる．その莫大なエネルギー量を基礎とした現象の説明は，我々の観測に考える．そして，その考えが理論物理学に表される．観測および記述には，光を使用する．智慧に日輪の光との関係を観ることができる．智慧の報いが，時空の相に生じているものと考える．宇宙に仮定できる莫大なエネルギーの観測に，光および時間との関係の研究に役立つ情報を得ることを２０１８年現在の著者は期待する．このような研究は，心および時空との関係の研究にもなる．無始無終で我々の心が存在することが仮定できることでは，宇宙が生じる前に我々の心が存在することになる．その生じた宇宙が消滅した後にも，我々の心は存在することにもなる．

目次

2. 保存力（conservative force） 11)，12)，16)，18)，19)

電位（electric potential）を定義するためには，ポテンシャルエネルギー（potential energy）を使用する方法がある．本書ではポテンシャルエネルギーを論じるために，本章――２章――で保存力を説明する．３章ではポテンシャルエネルギーを説明する．３章で説明するポテンシャルエネルギーを使って次回――第２回――で静電気的ポテンシャルエネルギー（electrostatic potential energy）を説明する．第４回および第５回で，電位差および電圧について説明する．電圧は，回路のエネルギーで生じる回路の内の粒子および波の性質を示す．電気のエネルギーを持った粒子の様相（particle aspects）およびエネルギーの変化で生じる波の様相（wave aspects）を電圧で考えることができる．このような説明は，ドブロイ波（de Broglie wave）とは異なるものである．波には，理論物理学の正弦波で説明する数学の技術を導入できる．著者が独自に与えた正弦波の定義については，文献２２および文献２３で論じている．ドブロイ波については，文献２４，文献２７および文献２８で論じている．文献２７および文献２８では，２重性を著者が独自に導出して考察を与えているものでありドブロイ波を直接に説明しているものではない．２重性については，付録ｖで説明してある．付録ⅵで，電位の定義について説明してある．

本書の第１回では（2.1）で静電場（electrostatic field）を定義する．（2.1）の左辺の静電場に，電気量（charge）（2.3）の点電荷（point charge）を置いたときに点電荷（2.3）に作用する静電気力（electrostatic force）を（2.2）とする．その静電場を（2.1）のように定義する．（2.1）では，分母の電気量（2.3）を持つ点電荷の存在する位置の静電場ベクトルを意味する．本書では国際単位系（the International System of Units〔SI〕）での電気量の単位（unit）を第５回で説明している．第１回では単位を明示するために表示をするにとどめる．ただし，点電荷は第２回で説明をする．

$$\mathbf{E} \equiv \frac{\mathbf{F}}{q}\ \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{C}}, (q \neq 0) \cdots (2.1)$$

$\mathbf{F}\ \mathrm{N} \cdots (2.2)$ 静電気力

$q\ \mathrm{C} \cdots (2.3)$

（2.1）の左辺の静電場に在る電気量（2.3）の点電荷に作用する静電気力（2.2）は，（2.1）を使用して（2.4）で記述できる．この（2.4）の<u>左辺は保存力</u>であるものとする．

$$\mathbf{F} = q \times \mathbf{E} \cdots (2.4)$$

静電気力（2.4）が保存力であることは仕事量（work）を計算することで分かる．（2.5）は静電気力（2.2）が作用している質点の変位のベクトル（vector）である．仕事（2.6）は，静電気力（2.4）および変位のベクトル（2.5）を使って記述している．位置ａから位置ｂへ質点が移動したときに，その質点に静電気力（2.2）が作用している場合の，その静電気力（2.2）のなす仕事は，（2.6）の左辺で記述できる．仕事（2.6）の左辺の静電気力（2.2）が（2.4）で記述できるならば仕事（2.6）の右辺が記述できる．本書の Option――文献１０のこと．――の２章で簡単に仕事量の説明をしてある．ただし，本書の Option の仕事量の説明は，その Option で使用する部分についての説明である．

$\mathbf{ds}\ \mathrm{m} \cdots (2.5)$

$$\int_a^b \mathbf{F} \cdot \mathbf{ds} = q \times \int_a^b \mathbf{E} \cdot \mathbf{ds}\ \ \mathrm{J} \cdots (2.6)$$

保存力を説明するために図 2.1 を使用する．図 2.1 では，path1 と path2 の 2 つの経路を与えている．図 2.1 の path1 と path2 は異なる経路であり，かつ位置ａと位置ｂをこれらの経路に含むことを前提とする．path1 と path2 のその他については定めることなく自由である．以下の（2.7）～（2.12）を使用して，図 2.1 の位置ａから位置ｂへ質点（material point）が移動した後に，その質点が位置ａへ戻る場合を考える．この場合で，path1 および path2 の経路で移動したときの仕事を計算する．

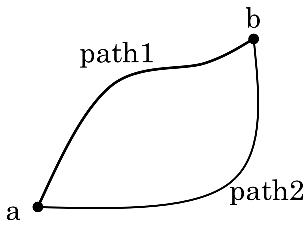


図 2.1　保存力の説明

図 2.1 の位置 a から位置 b へ path 1 の経路で質点が移動した場合の仕事を（2.7）で記述できる．その質点が位置 b から位置 a へ path2 の経路で移動した場合の仕事を（2.8）で記述できる．このときに，任意の path1 および path2 の経路に対して（2.9）が成立するならば，（2.7）および（2.8）の右辺に記述した力は保存力である．

$$W_{path1\_ab} = \int_a^b \mathbf{F} \cdot d\mathbf{s} \cdots (2.7)$$

$$W_{path2\_ba} = \int_b^a \mathbf{F} \cdot d\mathbf{s} \cdots (2.8)$$

$$W_{path1\_ab} + W_{path2\_ba} = 0 \cdots (2.9)$$

図 2.1 の位置 a から位置 b へ path2 の経路で質点が移動した場合の仕事を（2.10）で記述できる．その質点が位置 b から位置 a へ path 1 の経路で移動した場合の仕事を（2.11）で記述できる．このときに，任意の path1 および path2 の経路に対して（2.12）が成立するならば，（2.10）および（2.11）の右辺に記述した力は保存力である．

$$W_{path2\_ab} = \int_a^b \mathbf{F} \cdot d\mathbf{s} \cdots (2.10)$$

$$W_{path1\_ba} = \int_b^a \mathbf{F} \cdot d\mathbf{s} \cdots (2.11)$$

$$W_{path2\_ab} + W_{path1\_ba} = 0 \cdots (2.12)$$

保存力であるならば，（2.13）および（2.14）が成立する．この場合は（2.13）および（2.14）では，経路によらないで始点と終点の位置のみでその保存力のなす仕事量は決定することを示している．

$$W_{path1\_ab} = W_{path2\_ab} \cdots (2.13)$$

$$W_{path2\_ba} = W_{path1\_ba} \cdots (2.14)$$

静電気力（2.4）を使用して（2.4）の右辺が保存力になる場合を次回――第２回――に説明する．ただし，次回で使用する静電気力では，（2.4）よりも具体的に定まった「クーロンの法則（Coulomb's law）」とよばれるものを説明する．

電磁気学（electromagnetism）では電場（electric field）および磁場（magnetic field）と呼ばれる「場」を扱う．電場および磁場を使用して電位，電位差，電圧および電流などを定義する．電気回路論でも，そのような電場および磁場を応用して回路論を構築する．静電場では静電気力が電気量をもった物体に作用することを考える．このことから，静電気力を使用して静電場を定義できる．そのように力に観点を置いた静電場ベクトルの定義は（2.1）よりも次に示すほうが優れているものと２００９年現在の著者は考えている．

（2.15）の左辺は静電気力である．静電気力は，第２回で説明をするクーロン力である．（2.15）の左辺に記述した一般の静電場ベクトルとしての解釈では，電気量（2.3）の点電荷に作用するクーロン力の合力として記述する．静電場内に電気量（2.3）の点電荷が存在する場合に，その点電荷に静電気力（2.15）が作用する場のベクトル（2.16）を静電場ベクトルとして定義する．（2.15）で電気量を持った点電荷に作用するそれぞれのクーロン力の合力に対してひとつの静電場ベクトル（2.16）を考える．ひとつの点電荷にひとつのクーロン力のみが作用している場合には，そのひとつのクーロン力の静電場を仮定できる．

$\mathbf{F} = q \times \mathbf{E} \cdots (2.15)$ 静電場ベクトルの定義

$\mathbf{E} \cdots (2.16)$ 静電場ベクトル

（2.15）のような静電場ベクトルの定義は，専門書で著者は読んだ経験がない．本書では，多くの専門書で使用してきたものと考えられる（2.1）の静電場ベクトルの定義を採用した．このことは，本書の入門レベルでの使用状況では（2.1）の定義でも十分であるものと２００７年現在の著者が判断したためである．厳密性では，静電場ベクトルの定義（2.15）のほうが静電場ベクトルの定義（2.1）よりも優れているものと２００９年現在の著者は考えている．

静電場は，時点に対して不変的な電場である．電場が時点に対して動的に変化することもある．（2.17）のように，電場を記述する独立変数に位置 x および時点 t を使用する．このように電場を記述することは，最初には数学的手段として使用されたものと著者は学んだ．電磁波（electromagnetic wave）が実在するものと観測されることで，電磁場（electromagnetic field）が実在するものと認識される．電磁場の認識で，場――電磁場では，電場および磁場である．――が実在するものとして扱われる．電場の独立変数である時点の極限値として静的な電場を仮定できる．そのような静的な電場を静電場と呼ぶことができる．動的な電場の独立変数であるひとつの時点の極限値の近傍での不変的な電場の値（2.17）は，静電場として書き直すことができる．この不変的な電場，各位置では異なる値を持つことを仮定できる．このような仮定では，無限の実数の桁を扱うことよりも有限の実数の桁で静的な電場として扱う．このことは，ゆっくり移動している点電荷で説明できる動的な電磁場でも静電場であるものと扱うことを許す．（2.17）の右辺の微分係数を計算することでは，動的な電場の傾きを意味する．この意味では，動的な電場および磁場で説明する電磁波を仮定できる．

$$\lim_{\Delta t \to 0} \mathbf{E}(x, t + \Delta t) = \mathbf{E}(x, t) \cdots (2.17)$$

第３回，第４回，第５回および Option で動的に変化する電場および磁場について説明している．電磁場では，電磁力（electromagnetic force）を仮定する．電磁力はローレンツ力（the Lorentz force）で記述できる．ローレンツ力は，本書の第３回，第５回および Option で説明している．電磁場では，点電荷に電磁力が作用する電磁相互作用（electromagnetic interaction）を生じるものと考える．電磁場を説明する電磁気学で使用している慣性座標系（inertial coordinate-system）は，ニュートン力学（Newtonian mechanics）で使用している慣性座標系とは異なる．電磁場で使用する慣性座標系には，アインシュタイン先生が１９０５年に発表した特殊相対性理論（the special theory of relativity）で使用する慣性座標系を採用されているのが２０１７年現在である．ニュートン力学では，絶対時間および絶対空間を使用している．絶対時間および絶対空間で導出した慣性座標系の変換は，ガリレイ変換である．このガリレイ変換では，電磁気学の慣性座標系の計算に一致しない．アインシュタインの特殊相対性理論では，その計算は時間および空間の位置が互いに相対的な変化をするローレンツ変換に一致する．一方，ニュートン力学では，ニュートンの万有引力の法則（Newton's law of universal gravitation）を導出できる．万有引力の法則で，重力（gravitational force）を説明している．アインシュタインの特殊相対性理論では，万有引力の法則が導出できない．ガリレイ変換が絶対時間および絶対空間で扱われるので，万有引力の法則も不正確であるものと考えることができる．ガリレイ変換を使用しないで，重力を説明できる相対性理論を仮定できる．アインシュタイン先生が１９１６年に発表した一般相対性理論（the general theory of relativity）で，さらに厳密な重力理論を与えている．重力場（gravitational field）で，重力が質量を持った物質（matter）に作用するものと説明している．重力場に存在する質量のある粒子間に重力が作用する重力相互作用（gravitational interaction）を生じるものと考える．万有引力の法則のポテンシャルエネルギーには，質点系に静的なエネルギー分布を仮定できる――ポテンシャルエネルギーは３章で説明する．――．静的な重力場では，質量を持った各質点の静的なエネルギー分布から生じた重力場であるものと説明できる．万有引力の法則に近似できる重力の場には，静的な重力場であるものと理論上扱えることがある．重力波が観測できることでは，動的な重力場を実在するものとして扱うことができる．電磁場および重力場を実在するものと考えることでは，それらの場にエネルギーを仮定している．ローレンツ変換は特殊相対性理論の慣性座標系で導出している．慣性座標系は，等速直線運動をする．特殊相対性理論では，電磁場を慣性座標系に仮定して計算をする．重力場に存在する慣性座標系――重力場内で観測すると等速直線運動している座標系のことをここでは万有引力の法則でのニュートン力学のように呼ぶ．――あるいは静止した座標系は，加速度座標系に等しいことを仮定する．この仮定では，重力場内での時間の進みは加速度の相対性での光の粒子の速度の速さに対して変化する．等速円運動では，等速で円運動しているので速さは変化していない．一般相対性理論では，慣性座標系を使用して加速度座標系を定義することで重力場での相対性を論じている．エネルギーの議論では，慣性質量（inertial mass）が重力質量（gravitational mass）に等しいことを仮定することでエネルギーの保存則を記述する．このようなエネルギーの記述は，特殊相対性理論から導出できたものを基礎としている．特殊相対性理論でのエネルギーの議論では，３章のポテンシャルエネルギーおよび運動エネルギーを基礎とする．特殊相対性理論でのエネルギーの議論については，付録ⅲで説明している．質点系では，付録ⅱの質点系のエネルギーの保存則を使用する．加速度座標系および加速度については，付録ⅳおよびⅶで説明している．

3. ポテンシャルエネルギー（potential energy）[10), 11), 12), 16), 18), 19)]

ポテンシャルエネルギーは保存力に対して定義しているエネルギーである．本書では，このポテンシャルエネルギーは質点系内の各質点が相対的配置（configuration）に在るために各質点との間に保存力が相互作用（interaction）し，その質点系に蓄えているエネルギーであるものと，ポテンシャルエネルギーの意味を定義する．このポテンシャルエネルギーの意味は，理論物理学（theoretical physics）での定義である．質点系では，２つ以上の質点が相対的に配置されている．質点系は，そのように配置された各質点の全体である．著者の経験での日本の大学課程に採用している一般の基礎物理学では，この相対的配置は空間内の２つの相対的な位置（3.1）および位置（3.2）を使用して記述できる．本章では，ポテンシャルエネルギーを記号（3.3）で表すことにする．

$$(x_a, y_a, z_a) \cdots (3.1)$$

$$(x_b, y_b, z_b) \cdots (3.2)$$

$$U \cdots (3.3)$$

或る質点 m^p と異なるｎ－１個の各質点を含めたｎ個の異なる質点で構成する質点系Ｓをここで仮定する．本書では２つの異なる質点が互いに相対的配置に在るために，その２つの質点で構成する質点系に蓄えているポテンシャルエネルギーを扱うことになる．そのようなポテンシャルエネルギーでは，２つの異なる質点でのｎ－１個の相対的配置に対してはｎ－１個のポテンシャルエネルギー（3.3）を考えることになる． このｎ－１個の相対的配置は質点 m^p を含めた配置である．質点 m^p が無いならば，質点 m^p を含めたｎ－１個の相対的配置を考えることができない．このことから，質点 m^p の影響を記述したｎ－１個のポテンシャルエネルギー（3.3）を記述できない．そのようなｎ－１個の相対的配置に対して考えたｎ－１個のポテンシャルエネルギー（3.3）の総和に等しいポテンシャルエネルギーを質点 m^p が持つものと扱うこともある．上述のポテンシャルエネルギーの意味の定義では，ポテンシャルエネルギーは質点系に蓄えているものと考えている．質点 m^p が異なるｎ－１個の各質点との相対的配置に在るために，質点 m^p とそれらの質点で考えたｎ－１個のポテンシャルエネルギーの総和に等しいポテンシャルエネルギーが質点系Ｓに蓄えているものと考える．質点系Ｓで

は異なる質点がｎ個であるので，質点 m^p との相対的配置の個数は―― $N=\sum_{i=1}^{n-1} i$ となる．―― N 個考えることができる．

このことから，質点系Ｓ内の質点 m^p で構成する質点系には N 個のポテンシャルエネルギーを考える．質点系Ｓに蓄えているポテンシャルエネルギーの総和は，そのような N 個の相対的配置に対して考える N 個のポテンシャルエネルギーの総和――第２回で計算している．――であるものと考える．ただし，この説明では質点系Ｓの外部から質点系Ｓを構成する各質点に力が作用することは無いものとする．質点系Ｓをひとつの質点として扱う場合は，その質点の持つポテンシャルエネルギーは質点系Ｓに蓄えているポテンシャルエネルギーの総和として扱う場合がある．その場合については付録ⅲで扱った．

上述のように本書のポテンシャルエネルギーの意味を定義した．ポテンシャルエネルギーの値の定義ではポテンシャルエネルギーの変化量の値を使用する．ポテンシャルエネルギーの値の変化は，その保存力が作用している質点 m^p が存在する質点系での各質点の相対的配置の変化から生じることがある．相対的配置の変化が生じなくても，相対的配置に在る各質点のもつ物理量の変化からポテンシャルエネルギーの変化が生じることはある．次に，質点 m^p を使用してポテンシャルエネルギーの変化量 ΔU_{ab} の値を（3.4）で定義する．（3.4）の左辺はひとつの同じ質点 m^p が２つのそれぞれの位置に在る時に，質点系Ｓに蓄えられるそれぞれのポテンシャルエネルギーでのその変化量を記述している．（3.4）の右辺は，（3.4）の左辺のポテンシャルエネルギーを定義した保存力のなす仕事量に負号を付けたものである．この仕事量は左辺の２つの位置におけるひとつの位置を始点および残りの位置を終点として計算する仕事量である．(3.4)の右辺は，（3.4）の左辺のポテンシャルエネルギーの変化量を定義できる保存力のなす仕事量で記述する．質点が移動する始点および終点の位置は，一般には座標系上の位置である．（3.4）の左辺のポテンシャルエネルギーが変化しない場合では，その質点には保存力が作用していないものとして（3.4）の右辺の仕事量を仮定できる．

$\Delta U_{ab} \equiv -W_{ab} \cdots (3.4)$ 質点 m^p との相対的配置でのポテンシャルエネルギーの変化量 ΔU_{ab} の定義

（3.4）では，質点 m^p に作用する保存力の合力のなす仕事量を右辺で記述できる．その（3.4）の左辺では，その質点 m^p との相対的配置に在る質点系に蓄えられているポテンシャルエネルギーの変化量を記述している．質点を使って（3.4）の右辺の仕事量を記述するので，その質点の持つポテンシャルエネルギーの変化量 ΔU_{ab} の値を（3.4）で記述しているものと考えることもある．本書の電圧についての説明では，ポテンシャルエネルギーの変化量を使用して他のエネルギーの変化量を考えることで質点系のエネルギーの保存を説明する．質点系のエネルギー保存則については，付録ⅱで扱った．ポテンシャルエネルギーを蓄えている質点系を使う一部の計算では，質点 m^p と他の各質点との相対的配置の情報は解析する量として扱う必要はない．そのような質点系のエネルギー保存の説明では，質点 m^p との相対的配置に在るポテンシャルエネルギーの変化量で他のエネルギーの変化量を解析する場合がある．その場合の一部の解析方法では，（3.4）の左辺に記述しているポテンシャルエネルギーを質点 m^p の持つポテンシャルエネルギーとして扱う．この扱いで，議論に「相対的配置の情報」を直接には使うことなく質点 m^p との相対的配置でのポテンシャルエネルギーを導入できる．質点系に蓄えられているポテンシャルエネルギーには，慣性座標系上で相対的配置を与える２つの位置のうちのひとつの位置の座標が定数になり他方の位置の座標が変数になる場合を仮定できる．この場合での変数となる位置が変化することで，その質点系のポテンシャルエネルギーが変化することがある．この意味では，そのポテンシャルエネルギーは変数となる位置の座標の質点が持つポテンシャルエネルギーのように扱うことが便宜上可能である．この考え方は，電気回路あるいは電子回路で使うことができる．本書は，電気の回路論として論じるので，「質点の持つポテンシャルエネルギー」と表現することが有る．

本書で（3.4）はたびたび使用する重要な関係である．質点 m^p の相対的配置に蓄えるポテンシャルエネルギーの変化量 ΔU_{ab} と，その保存力のなす仕事量 W_{ab} との関係を（3.4）で定義した．数値でのポテンシャルエネルギーの変化量の等価性を（3.4）で与えた．ポテンシャルエネルギーの変化量の値は $-W_{ab}$ の値に等しいものと（3.4）で定義している．質

点 m^p の始点となる位置（3.1）および終点となる位置（3.2）がそれぞれ変化しなくても質点 m^p に作用する保存力のベクトルが異なることで，$-W_{ab}$ の値は異なる．物理学で扱う各現象での保存力は，ニュートン力学の万有引力や電磁気学のクーロン力のように異なる法則で説明する．クーロン力は本書の第２回のクーロンの法則で説明をする．

（3.4）の左辺を（3.5）で記述する．（3.5）の右辺の第１項は，質点系内での位置 b に仮定した質点 m^p との相対的配置でのポテンシャルエネルギーである．（3.5）の右辺の第２項は，質点系内での位置 a に仮定した質点 m^p との相対的配置でのポテンシャルエネルギーである．このことでは，（3.5）は質点 m^p との相対的配置でのポテンシャルエネルギーの変化量である．（3.5）では質点 m^p は最初に位置 a に在り，最後に位置 b に在ることを仮定している．

$\Delta U_{ab} = U(x_b, y_b, z_b) - U(x_a, y_a, z_a) \cdots (3.5)$ 質点 m^p との相対的配置でのポテンシャルエネルギーの変化量

また，（3.4）の右辺の仕事を（3.6）で記述する．仕事（3.6）の積分区間の位置ベクトルを（3.7）および（3.8）で記述する．（3.6）の右辺の保存力は（3.9）で記述する．この場合には，（3.5）と（3.6）を使用してポテンシャルエネルギーの変化量（3.4）を（3.10）で記述できる．（3.10）ではポテンシャルエネルギーの変化量と，その保存力のなす仕事に負号を付けたものは等しいことを示す．（3.10）の左辺の第１項は（3.8）の位置での質点 m^p のポテンシャルエネルギーである．（3.10）の左辺の第２項は（3.7）の位置での質点 m^p のポテンシャルエネルギーである．（3.10）の右辺の仕事は質点 m^p が（3.7）から（3.8）に移動した場合の，その質点 m^p に作用している保存力のなす仕事である．一般的には，（3.10）を応用してポテンシャルエネルギーの値を計算することができる．このポテンシャルエネルギーの計算方法については付録ｉで説明した．

$$W_{ab} = \int_{\mathbf{a}}^{\mathbf{b}} \mathbf{F}(\mathbf{s}) \cdot \mathrm{d}\mathbf{s} \cdots (3.6)$$

$$\mathbf{a} = (x_a, y_a, z_a) \cdots (3.7)$$

$$\mathbf{b} = (x_b, y_b, z_b) \cdots (3.8)$$

$$\mathbf{F}(\mathbf{s}) = \mathbf{F}(x, y, z) \cdots (3.9)$$

$$U(x_b, y_b, z_b) - U(x_a, y_a, z_a) = -\int_{\mathbf{a}}^{\mathbf{b}} \mathbf{F}(\mathbf{s}) \cdot \mathrm{d}\mathbf{s}, (\Delta U_{ab} = -W_{ab}) \cdots (3.10)$$

（3.10）から（3.11）を導出できる．２００７年現在の古典物理学でのニュートン力学では，一般には（3.10）と（3.11）は数学的に等価である．（3.11）ではポテンシャルエネルギーから保存力を計算できることは明らかである．（3.10）と（3.11）の１９９０年代の日本の一般的な物理学指導については付録のｉで説明している．

$\mathbf{F}(\mathbf{s}) = -\dfrac{\partial U}{\partial x}\mathbf{i} - \dfrac{\partial U}{\partial y}\mathbf{j} - \dfrac{\partial U}{\partial z}\mathbf{k} \cdots (3.11)$ 保存力

（3.12）および（3.13）を使用して仕事（3.6）を計算する．この場合は，仕事（3.6）は（3.14）に記述できる．（3.14）の右辺の内積を計算すると（3.15）のように記述できる．

$\mathbf{F}(\mathbf{s}) = f_x \cdot \mathbf{i} + f_y \cdot \mathbf{j} + f_z \cdot \mathbf{k} \cdots (3.12)$ 保存力

$$\mathrm{d}\mathbf{s} = \mathrm{d}x \cdot \mathbf{i} + \mathrm{d}y \cdot \mathbf{j} + \mathrm{d}z \cdot \mathbf{k} \cdots (3.13)$$

$$W = \int_{\mathbf{a}}^{\mathbf{b}} \mathbf{F}(\mathbf{s}) \cdot \mathrm{d}\mathbf{s} = \int_{\mathbf{a}}^{\mathbf{b}} (f_x \cdot \mathbf{i} + f_y \cdot \mathbf{j} + f_z \cdot \mathbf{k}) \cdot (\mathrm{d}x \cdot \mathbf{i} + \mathrm{d}y \cdot \mathbf{j} + \mathrm{d}z \cdot \mathbf{k}) \cdots (3.14)$$

$$W = \int_{x_a}^{x_b} f_x \cdot \mathrm{d}x + \int_{y_a}^{y_b} f_y \cdot \mathrm{d}y + \int_{z_a}^{z_b} f_z \cdot \mathrm{d}z \cdots (3.15)$$

（3.16）のように力の各成分を記述すると，（3.15）は（3.17）に記述できる．（3.16）はニュートンの運動の第２法則（Newton's second law of motion）であり，慣性質量と加速度で質点 m^p に作用している合力（resultant force）を右辺に記述している．（3.17）の速度の各成分を位置の変数で記述しているものと仮定する．この場合で，（3.17）の合力の各

成分に（3.18）のように合成関数の微分法を使用する．ただし，（3.12）は保存力である．また，質点 m^p には保存力（3.12）のみが作用しているものとする．

$$f_x = m\frac{\mathrm{d}v_x}{\mathrm{d}t},\ f_y = m\frac{\mathrm{d}v_y}{\mathrm{d}t},\ f_z = m\frac{\mathrm{d}v_z}{\mathrm{d}t}\cdots(3.16)$$ ニュートンの運動の第２法則

$$W = \int_{x_a}^{x_b} m\frac{\mathrm{d}v_x}{\mathrm{d}t}\cdot\mathrm{d}x + \int_{y_a}^{y_b} m\frac{\mathrm{d}v_y}{\mathrm{d}t}\cdot\mathrm{d}y + \int_{z_a}^{z_b} m\frac{\mathrm{d}v_z}{\mathrm{d}t}\cdot\mathrm{d}z\cdots(3.17)$$

$$W = \int_{x_a}^{x_b} m\frac{\mathrm{d}v_x}{\mathrm{d}x}\cdot\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}\cdot\mathrm{d}x + \int_{y_a}^{y_b} m\frac{\mathrm{d}v_y}{\mathrm{d}y}\cdot\frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t}\cdot\mathrm{d}y + \int_{z_a}^{z_b} m\frac{\mathrm{d}v_z}{\mathrm{d}z}\cdot\frac{\mathrm{d}z}{\mathrm{d}t}\cdot\mathrm{d}z\cdots(3.18)$$

質点 m^p の速度の各成分を（3.19）のように記述すると，仕事（3.18）は（3.20）に記述できる．ただし，仕事（3.20）の積分区間は，位置情報から速度情報に換わっている．著者の採用している速度の定義の説明は，文献１８に与えた．

$$v_x = \frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}, v_y = \frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t}, v_z = \frac{\mathrm{d}z}{\mathrm{d}t}\cdots(3.19)$$ 速度の各成分

$$W = \int_{v_{xa}}^{v_{xb}} m\cdot v_x\cdot\mathrm{d}v_x + \int_{v_{ya}}^{v_{yb}} m\cdot v_y\cdot\mathrm{d}v_y + \int_{v_{za}}^{v_{zb}} m\cdot v_z\cdot\mathrm{d}v_z\cdots(3.20)$$

仕事（3.20）を積分すると（3.21）に記述できる．仕事（3.21）を計算すると（3.22）になる．仕事（3.22）の右辺は（3.23）に記述できる．（3.24）および（3.25）を使用すると仕事（3.23）を（3.26）に記述できる．

$$W = \left[\frac{1}{2}\times m\times v_x^2\right]_{v_{xa}}^{v_{xb}} + \left[\frac{1}{2}\times m\times v_y^2\right]_{v_{ya}}^{v_{yb}} + \left[\frac{1}{2}\times m\times v_z^2\right]_{v_{za}}^{v_{zb}}\cdots(3.21)$$

$$W = \frac{1}{2}\times m\times(v_{xb}^2 - v_{xa}^2) + \frac{1}{2}\times m\times(v_{yb}^2 - v_{ya}^2) + \frac{1}{2}\times m\times(v_{zb}^2 - v_{za}^2)\cdots(3.22)$$

$$W = \frac{1}{2}\times m\times(v_{xb}^2 + v_{yb}^2 + v_{zb}^2) - \frac{1}{2}\times m\times(v_{xa}^2 + v_{ya}^2 + v_{za}^2)\cdots(3.23)$$

$$v_b^2 = v_{xb}^2 + v_{yb}^2 + v_{zb}^2\cdots(3.24)$$

$$v_a^2 = v_{xa}^2 + v_{ya}^2 + v_{za}^2\cdots(3.25)$$

$$W = \frac{1}{2}\times m\times v_b^2 - \frac{1}{2}\times m\times v_a^2\cdots(3.26)$$

２００７年現在のニュートン力学では（3.27）を運動エネルギー（kinetic energy）と呼ぶ．（3.27）の右辺は慣性質量 m および速さ v で移動している質点 m^p の持つ運動エネルギーを記述している．（3.27）を使用して（3.26）の右辺の運動エネルギーの変化量を（3.28）の左辺で記述すると（3.26）は（3.29）で記述できる．

$$K = \frac{1}{2}\times m\times v^2\cdots(3.27)$$ 運動エネルギー

$$\Delta K = \frac{1}{2}\times m\times v_b^2 - \frac{1}{2}\times m\times v_a^2\cdots(3.28)$$ 運動エネルギーの変化量

$$W = \Delta K\cdots(3.29)$$

上述の計算では保存力に限定して（3.29）を導出した．（3.6）の右辺の力を保存力に限定しないで一般の力にして，（3.12）～（3.29）と同様の計算をすると（3.30）を導出できる．（3.30）のことを文献１１では the work-energy theorem と呼んでいる．英語の the work-energy theorem に対して日本語で仕事量-エネルギー原理と記述できることから，本書では仕事量-エネルギー原理と呼ぶことにする――一部の和書ではエネルギー原理と呼んでいたことを著者は記憶している．――．仕事量-エネルギー原理（3.30）は質点に対して計算したものである．（3.30）では質点 m^p に作用しているすべて

の力の合力のなす仕事は，その質点 m^p の持つ運動エネルギーの変化量に等しい．質点の持つエネルギーの変化量とその質点に作用する合力のなす仕事量との関係を４章で説明をした．４章の説明では，質点の持つエネルギーの変化量をポテンシャルエネルギーの変化量について説明している．

$$\left(\frac{1}{2}\times m\times v^2\right)_{\mathbf{b}}-\left(\frac{1}{2}\times m\times v_0^2\right)_{\mathbf{a}}=\int_{\mathbf{a}}^{\mathbf{b}}\mathbf{F}_{\mathrm{resultant}}\cdot\mathbf{ds}\cdots(3.30)\ \text{the work-energy theorem}$$

（3.4）と（3.29）を使用すると（3.31）が記述できる．(3.31）から（3.32）に書き直す．(3.32）を（3.33）に記述できるものとする．(3.33）の右辺はポテンシャルエネルギーと運動エネルギーの和は変化していないことを意味している．このことからポテンシャルエネルギー（3.3）と運動エネルギー（3.27）の和を定数として（3.34）で記述できるものとする．(3.34）は，その左辺のポテンシャルエネルギーを蓄えている質点系内に在る質点 m^p に成立する．(3.34）の左辺のポテンシャルエネルギーは質点 m^p との相対的配置で考えるポテンシャルエネルギーであり，質点系に蓄えられているものとして扱うことができる．一方，(3.34）の左辺の運動エネルギーは質点 m^p の持っているエネルギーとして扱うことができる．

$\Delta U_{ab}\equiv -W_{ab}\cdots(3.4)$ 質点 m^p との相対的配置でのポテンシャルエネルギーの変化量 ΔU_{ab} の定義

$$\Delta U=-\Delta K\cdots(3.31)$$

$$\Delta U+\Delta K=0\cdots(3.32)$$

$$\Delta(U+K)=0\cdots(3.33)$$

$$U+K=E,(E:\mathrm{const.})\cdots(3.34)$$

（3.10）および（3.29）を使用すると（3.32）は（3.35）に記述できる．(3.35）の左辺を（3.36）の左辺のように書き直す．(3.36）を（3.37）のように整理すると（3.37）の右辺に示すように定数であることが分かる．(3.36）は（3.33）に対応している．(3.37）には（3.34）が対応している．

$$U(x_b,y_b,z_b)-U(x_a,y_a,z_a)=-\int_{\mathbf{a}}^{\mathbf{b}}\mathbf{F}(\mathbf{s})\cdot\mathrm{d}\mathbf{s},(\Delta U_{ab}=-W_{ab})\cdots(3.10)$$

$$\left(U(x_b,y_b,z_b)-U(x_a,y_a,z_a)\right)+\left(\frac{1}{2}\times m\times v_b^2-\frac{1}{2}\times m\times v_a^2\right)=0\cdots(3.35)$$

$$\left(U(x_b,y_b,z_b)+\frac{1}{2}\times m\times v_b^2\right)-\left(U(x_a,y_a,z_a)+\frac{1}{2}\times m\times v_a^2\right)=0\cdots(3.36)$$

$$U(x_b,y_b,z_b)+\frac{1}{2}\times m\times v_b^2=U(x_a,y_a,z_a)+\frac{1}{2}\times m\times v_a^2=\mathrm{const.}\cdots(3.37)$$

仕事量-エネルギー原理（3.30）の右辺の合力を（3.38）のように記述する．(3.38）の右辺の第１項を保存力とする．(3.38）の右辺の第２項を外力と呼ぶ．

$$\mathbf{F}_{\mathrm{resultant}}=\mathbf{F_c}+\mathbf{F_{ex}}\cdots(3.38)$$

合力（3.38）を仕事量-エネルギー原理（3.30）の右辺に代入すると（3.39）が記述できる．(3.39）の左辺を（3.40）のように記述する．(3.39）の右辺を（3.41）のように項別に積分する．

$$\left(\frac{1}{2}\times m\times v^2\right)_{\mathbf{b}}-\left(\frac{1}{2}\times m\times v_0^2\right)_{\mathbf{a}}=\int_{\mathbf{a}}^{\mathbf{b}}(\mathbf{F_c}+\mathbf{F_{ex}})\cdot\mathbf{ds}\cdots(3.39)$$

$$\Delta K=\frac{1}{2}\times m\times v^2-\frac{1}{2}\times m\times v_0^2\cdots(3.40)$$

$$\int_{\mathbf{a}}^{\mathbf{b}}(\mathbf{F_c}+\mathbf{F_{ex}})\cdot\mathbf{ds}=\int_{\mathbf{a}}^{\mathbf{b}}\mathbf{F_c}\cdot\mathbf{ds}+\int_{\mathbf{a}}^{\mathbf{b}}\mathbf{F_{ex}}\cdot\mathbf{ds}\cdots(3.41)$$

（3.41）の第１項は保存力の仕事である．この保存力の仕事は（3.4）のようにポテンシャルエネルギーの変化量（3.42）に記述できる．このポテンシャルエネルギーの変化量（3.42）を（3.41）の右辺に代入して，（3.40）を（3.39）の左辺に代入すると（3.43）を記述できる．

$$\Delta U=-\int_{\mathbf{a}}^{\mathbf{b}}\mathbf{F}_{\mathbf{c}}\cdot\mathbf{ds}\cdots(3.42)$$

$$\Delta K=-\Delta U+\int_{\mathbf{a}}^{\mathbf{b}}\mathbf{F}_{\mathbf{ex}}\cdot\mathbf{ds}\cdots(3.43)$$

（3.43）は（3.44）に記述できる．（3.44）のことを力学的エネルギー保存の法則（a law of conservation of mechanical energy）と呼ぶ．一般に，２００７年現在のニュートン力学では力学的エネルギーとはポテンシャルエネルギーおよび運動エネルギーの和のことである．（3.37）では位置 a および位置 b に質点 m^p が在る時のそれぞれの力学的エネルギーは等しい定数であることを意味する．

$$\Delta U+\Delta K=\int_{\mathbf{a}}^{\mathbf{b}}\mathbf{F}_{\mathbf{ex}}\cdot\mathbf{ds}\cdots(3.44)\text{力学的エネルギー保存の法則}$$

（3.38）の右辺の第２項を「外力」と呼んだ．このことには，（3.42）のポテンシャルエネルギーが定義されている質点系内に，質点 m^p が在ることを仮定している．（3.38）の右辺の第２項は質点系に作用する外力に解釈できる場合があるので使用した．この質点系に作用する外力については付録ⅱおよび付録ⅲの質点系のエネルギー保存則に記述した．質点を質点系に見なすことでも同様に外力を考えられる．

（3.10）および（3.39）を使用すると力学的エネルギー保存の法則（3.44）は（3.45）に記述できる．（3.45）の左辺を（3.46）の左辺のように整理する．(3.46) の左辺は質点 m^p との相対的配置で考えるポテンシャルエネルギーと質点 m^p のもつ運動エネルギーの和の変化量である．（3.46）の右辺は外力のなす仕事である．（3.46）では，質点 m^p の力学的エネルギーの変化量は外力のなす仕事量に等しいことを示す．（3.46）も力学的エネルギー保存の法則と呼ばれる．

$$\left(\frac{1}{2}\times\mathrm{m}\times v^2-\frac{1}{2}\times\mathrm{m}\times v_0^2\right)+\left(U(x,y,z)-U(x_0,y_0,z_0)\right)=\int_{\mathbf{a}}^{\mathbf{b}}\mathbf{F}_{\mathbf{ex}}\cdot\mathbf{ds}\cdots(3.45)$$

$$\left(U(x,y,z)+\frac{1}{2}\times\mathrm{m}\times v^2\right)-\left(U(x_0,y_0,z_0)+\frac{1}{2}\times\mathrm{m}\times v_0^2\right)=\int_{\mathbf{a}}^{\mathbf{b}}\mathbf{F}_{\mathbf{ex}}\cdot\mathbf{ds}\cdots(3.46)\text{力学的エネルギー保存の法則}$$

———質点系で考察する力学的エネルギーの法則———

ポテンシャルエネルギーは，質点の相対的配置で与える質点系に蓄えられているものと３章の最初の方に定義した．そのような相対的配置に在る——質点系内に在る——ひとつの質点 m^p の移動から生じる質点系の保つエネルギーの変化量を説明する力学的エネルギー保存の法則（3.46）の左辺である．（3.46）の右辺は，その質点系に作用している外力——（3.38）の右辺の第２項に記述してある．——のなす仕事量である．そのように質点系に作用することでも，その外力が作用している対象は質点系内のひとつの質点 m^p の場合の（3.46）である．（3.39）の場合では，ポテンシャルエネルギーの変化量を生滅させる保存力の合力——（3.38）の右辺の第１項に記述してある．——のなす仕事量を右辺に記述している．その保存力の合力——総和である保存力である．——が作用する質点は，質点 m^p に仮定できる．その保存力の合力では，そのポテンシャルエネルギーを蓄えている質点系の各質点に，総和である保存力を説明している各保存力が作用していることを仮定している．

$$\mathbf{F}_{\mathrm{resultant}}=\mathbf{F}_{\mathbf{c}}+\mathbf{F}_{\mathbf{ex}}\cdots(3.38)$$

$$\left(\frac{1}{2}\times m\times v^2\right)_{\mathbf{b}}-\left(\frac{1}{2}\times m\times v_0^2\right)_{\mathbf{a}}=\int_{\mathbf{a}}^{\mathbf{b}}(\mathbf{F_c}+\mathbf{F_{ex}})\cdot\mathbf{ds}\cdots(3.39)$$

（3.39）の左辺の運動エネルギーの変化量は，その合力（3.38）が作用する質点系の移動を意味するものと仮定する．その質点系の移動では，その質点系を構成する各質点の相対的配置が変化しないものと仮定できる．この仮定では，そのポテンシャルエネルギーの変化量が零になる．質点系を構成している他の質点にも力が作用して，質点系の相対的配置が変化しないように質点系全体が移動しているものと仮定できる．この質点系に作用する外力で移動する質点 m^p では，運動エネルギーおよびポテンシャルエネルギーが変化する．（3.39）の右辺の保存力のなす仕事量は，そのポテンシャルエネルギーの変化量を消滅させる．この消滅を説明する仕事量は，各質点の位置が変化しても相対的配置が変化しないために質点 m^p との相対的配置で蓄えるポテンシャルエネルギーは変化しないことを仮定できる．（3.41）での右辺の保存力のなす仕事量を（3.45）の両辺に加えることで，（3.39）になる．この保存力は，相互作用している．保存力が作用している質点の移動で，仕事量が計算できる．互いに逆向きの大きさが等しい保存力が質点 m^p に作用していることを仮定する．この場合では，（3.47）を記述できる――（3.47）の右辺の第１項については付録ｉの最後の（3.10）に関係を持つ．――．（3.47）の右辺では，第１項および第２項の仕事量の保存力は大きさが等しく向きが逆であるものと仮定できる．（3.47）の右辺は，（3.48）の右辺のように書き直すことができる．

$$\int_{\mathbf{a}}^{\mathbf{b}}(\mathbf{F_c}+\mathbf{F_{ex}})\cdot\mathbf{ds}=\int_{\mathbf{a}}^{\mathbf{b}}\mathbf{F_c}\cdot\mathbf{ds}+\int_{\mathbf{a}}^{\mathbf{b}}\mathbf{F_{ex}}\cdot\mathbf{ds}\cdots(3.41)$$

$$\left(\frac{1}{2}\times\mathrm{m}\times v^2-\frac{1}{2}\times\mathrm{m}\times v_0^2\right)+\left(U(x,y,z)-U(x_0,y_0,z_0)\right)=\int_{\mathbf{a}}^{\mathbf{b}}\mathbf{F_{ex}}\cdot\mathbf{ds}\cdots(3.45)$$

$$\Delta U-\Delta U=-\int_{\mathbf{a}}^{\mathbf{b}}\mathbf{F_c}\cdot\mathbf{ds}+\int_{\mathbf{a}}^{\mathbf{b}}\mathbf{F_c}\cdot\mathbf{ds}\cdots(3.47)$$

$$\Delta U-\Delta U=\int_{\mathbf{a}}^{\mathbf{b}}(-\mathbf{F_c}+\mathbf{F_c})\cdot\mathbf{ds}\cdots(3.48)$$

（3.48）の右辺は，（3.49）の右辺のように書き直すことができる．（3.49）の右辺では，質点 m^p に作用する保存力は零である．このことでは，仕事量は零であり，ポテンシャルエネルギーの変化量は零である．

$$\Delta U-\Delta U=\int_{\mathbf{a}}^{\mathbf{b}}(\mathbf{0})\cdot\mathbf{ds}\cdots(3.49)$$

ポテンシャルエネルギーが蓄えられている質点系での各質点の相対的配置が変化しない質点の移動である．このような移動では，各質点に保存力が作用していないで各質点が移動しているものと仮定できる．（3.4）の右辺の仕事量は，ポテンシャルエネルギーの変化量を記述するものである．仕事量を計算する積分区間は，座標系での位置を指定している．質点 m^p が位置ａから位置ｂまで移動していることが事実である場合には，積分区間は位置ａから位置ｂまでになる．質点系内でのポテンシャルエネルギーの変化量が生じない質点 m^p の移動では，その質点に保存力が作用していないものと仮定できる．質点 m^p が外力で移動することで生じるポテンシャルエネルギーの変化量がある．その変化量を消滅させて零にするのに，質点 m^p には保存力が作用していないものと定義（3.4）で仮定できる．ポテンシャルエネルギーの変化量を定義する保存力が作用していないことを定義（3.4）で仮定できる．

$\Delta U_{ab}\equiv -W_{ab}\cdots(3.4)$ 質点 m^p との相対的配置でのポテンシャルエネルギーの変化量 ΔU_{ab} の定義

運動エネルギーの変化量に変換されたエネルギー分は，（3.39）の右辺の外力のなす仕事量で加えられたものと解釈できる．その（3.39）の外力のなす仕事量で，その質点系に（3.39）の左辺に記述した運動エネルギーの変化量分が加えられたものと解釈できる．その質点 m^p の運動エネルギーの変化量を（3.39）の左辺で記述している．この質点系の保つ力学的エネルギーの一部の増減を説明できる．

その質点系を構成する各質点の相対的配置が変化するものと仮定する．この仮定では，その質点系内の質点 m^p に外力が作用している．その外力で質点 m^p が移動していることを仮定している．その外力の移動では，その質点系内でポテンシャルエネルギーの変化量が生じる．そのポテンシャルエネルギーの変化量分が運動エネルギーの変化量に変換されたものと解釈できる．その質点 m^p の運動エネルギーの変化量を（3.39）の左辺で記述している．この運動エネルギーの変化量には，（3.39）の右辺に記述した外力のなす仕事量で加えられた運動エネルギーの増減分も含む．定義（3.4）では，（3.39）の右辺の保存力で定義できるポテンシャルエネルギーの変化量（3.42）を（3.43）の右辺に記述できる．（3.43）の右辺のポテンシャルエネルギーの変化量には，（3.43）の左辺の運動エネルギーの変化量に変換されている分を仮定できる．この変換では，（3.43）は（3.45）に書き直すことができる．このことでは，（3.39）を力学的エネルギー保存の法則（3.46）に書き直すことができる．

$$\Delta K = -\Delta U + \int_{\mathbf{a}}^{\mathbf{b}} \mathbf{F_{ex}} \cdot \mathbf{ds} \cdots (3.43)$$

（3.39）の左辺の運動エネルギーは，その質点系の運動エネルギーの一部を記述している．質点系のエネルギー保存則については，付録ⅱで説明している．

―――エネルギーおよび仕事量の物理量としての意味の相違―――

力学的エネルギー保存の法則（3.46）の左辺を（3.50）で記述する．力学的エネルギーの変化量（3.50）を使用すると，力学的エネルギー保存の法則（3.46）は（3.51）で記述できる．

$$\left(U(x,y,z)+\frac{1}{2}\times \mathrm{m}\times v^2\right)-\left(U(x_0,y_0,z_0)+\frac{1}{2}\times \mathrm{m}\times v_0^2\right)=\int_{\mathbf{a}}^{\mathbf{b}} \mathbf{F_{ex}} \cdot \mathbf{ds} \cdots (3.46)$$ 力学的エネルギー保存の法則

$$\Delta E_N = \Delta U + \Delta K \cdots (3.50)$$ 力学的エネルギーの変化量

$$\Delta E_N = \int_{\mathbf{a}}^{\mathbf{b}} \mathbf{F_{ex}} \cdot \mathbf{ds} \cdots (3.51)$$ 力学的エネルギー保存の法則

力学的エネルギー保存の法則（3.51）の左辺は，力学的エネルギーの変化量である．力学的エネルギー保存の法則（3.51）の右辺は，質点に作用した外力のなす仕事量である．ポテンシャルエネルギーの変化量の定義（3.4）で記述したように，エネルギーの物理量としての意味は，仕事量の物理量としての意味とは異なる．

$$\Delta U_{ab} \equiv -W_{ab} \cdots (3.4)$$ 質点 m^p との相対的配置でのポテンシャルエネルギーの変化量 ΔU_{ab} の定義

力学的エネルギー保存の法則（3.51）では，左辺の力学的エネルギーの変化量の値が右辺の外力のなす仕事量の値に等しいことを意味している．この法則の議論は，絶対時間および絶対空間でのニュートン力学の議論である．相似の記述が絶対時間および絶対空間を使用しない座標系上で成立する．このことについては，４章で説明している．絶対時間および絶対空間については，付録ⅳで簡単に説明している．

―――特殊相対性理論でのエネルギーについて―――

（3.44）および（3.46）では力学的エネルギー保存の法則を説明した．付録のⅱでは質点で構成する系のエネルギー保存則（conservation of energy）について説明している．本書は，この系のエネルギー保存則を使用して幾つかの考察をする．参考までに付録のⅱにエネルギー保存則について簡単な説明をした．３章の運動エネルギーはニュートンの運動の第２法則が成立することを前提にして論じた．しかし，ニュートンの運動の第２法則が成立しないことが考えられる

場合もある．そのような場合も含めたエネルギーについて付録iiiでは説明をした．付録iiiでは特殊相対性理論および量子論でのエネルギーについて説明している．特殊相対性理論での運動エネルギーは，ニュートン力学の運動エネルギーとは異なる解釈である．このことは，慣性質量がニュートン力学のものと特殊相対性理論のものとは異なることで生じる．慣性質量の相違でエネルギーの変化量が異なる記述になる．そのようなエネルギーの変化量については，４章で説明している．エネルギーの変化量の記述の相違は，運動方程式の記述で説明できる．

4. 質点の持つ全エネルギーと仕事量（work）[11), 18), 19)]

質点を仮定する．その質点に作用している力の合力は運動方程式（the equation of motion）（4.1）の左辺とする．運動方程式（4.1）の右辺には，運動量 $m\cdot\mathbf{v}$ を記述している．運動量 $m\cdot\mathbf{v}$ を記述している慣性質量（4.2）は，定数であるものとは限らない．そのような慣性質量については付録のiiiで説明をしている．

$$\mathbf{F}_{\mathrm{resultant}}=\frac{\mathrm{d}(m\cdot\mathbf{v})}{\mathrm{d}t}\cdots(4.1)\text{運動方程式}$$

$$m\cdots(4.2)$$

運動方程式（4.1）の左辺を使用して，位置 a から位置 b へ移動した質点の合力のなす仕事量である（4.3）の右辺を記述できる．（4.3）の左辺は，その質点の持つ全エネルギーの変化量を意味する．（4.3）で質点に作用する力の合力（4.1）のなす仕事量は，その質点の持つ全エネルギーの変化量に等しいことを説明している．（4.3）の右辺の仕事量は，（4.1）の合力が作用している質点が位置 a から位置 b まで移動していることを説明している．そのような質点の運動では，その質点の持つ全エネルギーの変化量を（4.3）の右辺の仕事量に等しいものと記述している．

$$\Delta E_p=\int_a^b\mathbf{F}_{\mathrm{resultant}}\cdot\mathrm{d}\mathbf{s}\cdots(4.3)$$

運動方程式（4.1）の左辺には，保存力が記述されている場合も仮定できる．保存力に対してはポテンシャルエネルギーを定義した．そのポテンシャルエネルギーの変化量には，その保存力のなす仕事量を仮定した定義（3.4）を与えた．

$$\Delta U_{ab}\equiv -W_{ab}\cdots(3.4)$$

（3.4）を（4.4）で記述できるものと仮定する．（4.4）の右辺に記述した（4.5）は，その質点に作用するひとつの保存力であるものと仮定する．ここでは，その質点に作用している保存力の個数は定めないものとする．

$$\Delta U_{iab}=-\int_a^b\mathbf{F}_{ci}\cdot\mathrm{d}\mathbf{s}\cdots(4.4)$$

$$\mathbf{F}_{ci}\cdots(4.5)\text{保存力}$$

（4.4）を（4.6）に書き直す．（4.6）の左辺の仕事量は（4.3）の右辺の仕事量の一部を記述できるものとする．ポテンシャルエネルギーの変化量で，その質点の移動を保存力（4.5）のなす仕事量（4.6）のように説明できる．

$$\int_a^b\mathbf{F}_{ci}\cdot\mathrm{d}\mathbf{s}=-\Delta U_{iab}\cdots(4.6)$$

このような場合では，（4.1）の左辺は（4.7）で記述できる．（4.7）の右辺の第１項は，質点に作用する合力（4.7）から（4.7）の右辺の第２項（4.5）を差し引いた力を意味する．質点に作用する合力（4.7）を（4.3）の右辺に代入すると（4.8）になる．（4.8）は（4.9）のように記述できる．

$$\mathbf{F}_{\mathrm{resultant}}=\mathbf{F}_i+\mathbf{F}_{ci}\cdots(4.7)$$

$$\Delta E_p=\int_a^b(\mathbf{F}_i+\mathbf{F}_{ci})\cdot\mathrm{d}\mathbf{s}\cdots(4.8)$$

$$\Delta E_p = \int_a^b \mathbf{F}_i \cdot \mathbf{ds} + \int_a^b \mathbf{F}_{ci} \cdot \mathbf{ds} \cdots (4.9)$$

（4.9）の右辺の第２項に（4.6）の右辺を代入すると（4.10）を記述できる．（4.10）の右辺には保存力（4.5）に対して定義したポテンシャルエネルギーの変化量を記述している．このことでは，（4.10）の左辺の全エネルギーの変化量は，（4.4）のポテンシャルエネルギーの変化量を記述して説明することができる．

$$\Delta E_p = \int_a^b \mathbf{F}_i \cdot \mathbf{ds} - \Delta U_{iab} \cdots (4.10)$$

このような（4.10）の右辺のポテンシャルエネルギーの変化量は，質点に作用している保存力の個数分だけ考えることができる．その際には，それぞれの保存力に対してポテンシャルエネルギーを定義する．たとえば，万有引力――万有引力は保存力である．――がｎ個生じているならば，それぞれの万有引力にポテンシャルエネルギーを定義する．その質点の持つ全エネルギーの変化量（4.3）の左辺は，質点に作用する保存力のなす仕事量（4.6）のポテンシャルエネルギーの変化量で書き直した（4.10）の右辺のように記述できる．この記述は，質点および質点系についてのエネルギーの保存則が関係する．これらのことは，付録ⅱおよび付録ⅲで説明している．

運動方程式（4.1）をニュートンの運動方程式（4.11）に仮定すると，（4.3）では（4.12）を記述できる．（4.12）の左辺は運動エネルギーの変化量を記述している．ここで，（4.12）の右辺を（4.10）のように記述して（4.13）を仮定する．（4.13）の右辺では，ポテンシャルエネルギーの変化量を記述している．（4.13）の左辺に記述した運動エネルギーの変化量は，（4.13）の右辺に記述したポテンシャルエネルギーの変化量での説明を与えている．

$$\mathbf{F}_{\text{resultant}} = m \cdot \frac{\mathbf{dv}}{\mathrm{d}t}, (m = \text{const.}) \cdots (4.11)$$ ニュートンの運動方程式

$$\Delta K_p = \int_a^b \mathbf{F}_{\text{resultant}} \cdot \mathbf{ds} \cdots (4.12)$$

$$\Delta K_p = \int_a^b \mathbf{F}_i \cdot \mathbf{ds} - \Delta U_{iab} \cdots (4.13)$$

上述までの説明のように，質点の仕事量（4.3）は質点の持つ全エネルギーの変化量を記述している．この記述では，質点系として説明できる粒子を質点として扱っている．その質点系に蓄えられているポテンシャルエネルギーの変化量は，そのポテンシャルエネルギーを定義した保存力（4.5）のなす仕事量（4.6）を説明する．その仕事量（4.6）では，その質点の移動を説明している．その質点の移動で計算する合力のなす仕事量は，その質点として扱える質点系の保つ全エネルギーの変化量（4.3）について説明できる．

$$\Delta E_p = \int_a^b \mathbf{F}_{\text{resultant}} \cdot \mathbf{ds} \cdots (4.3)$$

$$\int_a^b \mathbf{F}_{ci} \cdot \mathbf{ds} = -\Delta U_{iab} \cdots (4.6)$$

ポテンシャルエネルギーは，質点の相対的配置で与える質点系に蓄えられているものと３章で定義した．そのような相対的配置に在る――質点系内に在る――質点の移動から生じる仕事量（4.6）である．仕事量（4.6）の保存力は，（4.6）の右辺のポテンシャルエネルギーの変化量を定義できる．保存力のなす仕事量（4.6）は，質点系――質点でない．――内の質点が移動することで質点系――質点である．――の持つ全エネルギーの変化量（4.3）について説明をする．その質点である質点系は，ひとつの質点として（4.3）の記述もできることを仮定している．合力（4.7）のなす仕事量（4.3）は，その質点の持つ全エネルギーの変化量（4.3）を説明できる．このことから，そのようなポテンシャルエネルギーの変化量（4.4）は，合力（4.7）のなす仕事量（4.3）の一部を（4.14）で記述する．

$$\Delta U_{iab} = -\int_a^b \mathbf{F}_{ci} \cdot \mathbf{ds} \cdots (4.4)$$

$$\mathbf{F}_{\mathrm{resultant}} = \mathbf{F}_i + \mathbf{F}_{ci} \cdots (4.7)$$

$$\int_a^b \mathbf{F}_{\mathrm{resultant}} \cdot \mathbf{ds} = \int_a^b \mathbf{F}_i \cdot \mathbf{ds} + \int_a^b \mathbf{F}_{ci} \cdot \mathbf{ds} \cdots (4.14)$$

ニュートンの運動方程式では，その質点に作用する合力を記述している．著者が学生時代に物理学書で読んだものには，質点に作用する力を記述するものと指導しているものがあった．質点に作用する力のベクトルの総和が合力のベクトルである．このように，質点に作用する力は，その質点に作用する合力とは異なる．

$$\mathbf{F}_{\mathrm{resultant}} = m \cdot \frac{\mathrm{d}\mathbf{v}}{\mathrm{d}t}, (m = \mathrm{const.}) \cdots (4.11)$$ ニュートンの運動方程式

運動方程式（4.1）は，特殊相対性理論でアインシュタイン先生が修正したニュートンの運動方程式の記述である．運動方程式（4.1）の慣性質量は，変数である．ニュートンの運動方程式（4.11）の慣性質量は，定数である．アインシュタイン先生が修正したニュートンの運動方程式でも質点に作用する合力を記述するものである．

$$\mathbf{F}_{\mathrm{resultant}} = \frac{\mathrm{d}(m \cdot \mathbf{v})}{\mathrm{d}t} \cdots (4.1)$$ 運動方程式

質点の持つ全エネルギーおよび変数となる慣性質量については，付録iiiで説明している．変数となる慣性質量とポテンシャルエネルギーの関係についても付録iiiで説明してある．質点の持つ全エネルギーの変化量および質点に作用する合力のなす仕事量の関係も付録iiiで説明してある．

5.あとがき

本書の第１回では，保存力とポテンシャルエネルギーについて説明した．次回――第２回――では，３章のポテンシャルエネルギーを使用して，静電気的ポテンシャルエネルギーを説明する．この静電気的ポテンシャルエネルギーでは，電磁気学のクーロンの法則を使ってポテンシャルエネルギーを計算する．静電気的ポテンシャルエネルギーは，電位を定義するときにも使用する重要な物理量である．

静電気的ポテンシャルエネルギーは，本書の本文での統一的な呼び名として使用する．第１回の３章のポテンシャルエネルギーのことを，和書の物理学書ではポテンシャルと呼んでいるものもあった．また，次回に説明する静電気的ポテンシャルエネルギーのことを和書の物理学書では電荷の持つ位置エネルギーと呼んでいるものもある．日本の一部の物理学指導では，ポテンシャルと位置エネルギーを異なるものとして扱うことがある．本書の本文では，位置エネルギーとは呼ばずに，ポテンシャルエネルギーとして統一してある．

英語では静電気的ポテンシャルエネルギーを electrostatic potential energy と記述する．２００７年現在までの日本の物理学指導では本書で「静電気的ポテンシャルエネルギー」と呼ぶ量を「静電エネルギー」と呼ぶものもある．「静電エネルギー」で表現してしまうと，ポテンシャルエネルギーであるものか全エネルギーなのか，あるいは他の種類のエネルギーを意味するものか不明瞭である．静電気力で定義したポテンシャルエネルギーであることを明瞭にすることもねらい，本書では「静電気的ポテンシャルエネルギー」と呼ぶ．

また，電位のことを electrostatic potential と記述する．日本語の一部の指導で potential energy をポテンシャルと呼ぶことがある．このことは，英語の電位の意味になる electrostatic potential と誤解する恐れがあるので，本書では上述の説明のように統一して呼んでいる．

量子論および量子力学などの物理学では，静電気的ポテンシャルエネルギーは不連続な値を示すことが説明される．

本書は，電気の回路論についての電位の説明を趣旨としているので量子論および量子力学以後のミクロスケールの物理学は副次的な内容になる．２００８年現在，このような電気の回路では電子回路，半導体および光学分野の説明とは関係を持つ．このために，第１回の付録では特殊相対性理論および量子論でのエネルギーについての説明を与えた．本書の第２回の付録では，第１回の付録の量子論でのエネルギーの量子化についての知識を使用して，ボーアの水素原子モデルでの静電気的ポテンシャルエネルギーおよび運動エネルギーが不連続な値になる場合を説明する．

水素（hydrogen）は水あるいは他の物質を構成する原子として，多くの物質に関連するものと考えられる．そして，その構成は，ひとつの陽子およびひとつの電子のみで説明できるものもある．第２回のボーアの水素原子モデルで使用した水素原子の原子核はひとつの陽子として扱えるものである．２００８年現在では，一般の原子は，幾つかの陽子と中性子で構成された原子核および幾つかの電子で構成されているものと考える．このような一般の原子と比較すると，水素原子は単純な構造なので計算が簡単なものと考えることもできる．そのような水素原子内でのひとつの電子での力学的エネルギーが，どのような現象で不連続な値になるかをボーアの水素原子モデルで考察する．このようなエネルギーの不連続性の説明に加えて，著者の専攻になる心臓血管系の回路モデルに関連のある「モデル」についての扱い方にも考慮をして，本書の付録でのボーアの水素原子モデルの説明を与える．

２０１７年現在では，特殊相対性理論の慣性座標系および一般相対性理論の加速度座標系を基礎にしてエネルギーおよび力について記述できる．そのような慣性座標系および加速度座標系で，基礎物理学の体系を成すものを著者は考えている．このような体系では，時間および空間にニュートン力学の絶対時間および絶対空間は直接には使用しないで電磁場および重力場を仮定した．そのように場を記述することを仮定して，さらに２重性を量子論で導入する．２重性の導出では，文献２４の「理論物理学での波の関数３」で著者が独自に定義した時間を使用した．文献２７の「理論物理学での関数６」で特殊相対性理論を応用して，著者の独自の方法を使用して２重性を導出している．時間および空間は，時空として扱いローレンツ変換を基礎とする．ローレンツ変換を基礎とした慣性座標系を使用して，加速度座標系を仮定する．２重性は水素原子モデルにも関係がある．水素で電気エネルギー（electric energy）を生じさせることができる．水素および酸素の結合で水が生じることを化学で説明していることを著者は記憶している．その際には，内部エネルギーの変化が生じて水素および酸素（oxygen）の質点系が水としての性質を示すものと著者は考える．このようなことを考えるのに，付録ⅱの質点系のエネルギー保存則の説明で定義した内部エネルギーを使用する．電気エネルギーには，静電気で説明する場合では静電気的ポテンシャルエネルギーを使用する．静電気的ポテンシャルエネルギーは，第２回で説明する．静電気的ポテンシャルエネルギーは，クーロン力で導出できる．クーロン力は，第２回で説明する静電気力である．化学結合（chemical bond）では，原子を構成している電子で各原子が結合する構造（structure）が報告されている．水素では，水素原子（hydrogen atom）が化学結合する．その化学結合している水素分子のイオン（ion）H_2^+のエネルギーを説明できることは，著者には化学で学んだ記憶がある．H_2^+は，２つの陽子（proton）およびひとつの電子（electron）で構成されているものと考える．H_2^+は，H およびH^+を結合するエネルギーを仮定している．このような原子の結合を説明するのに静電気力を使用して考えることを化学で報告されている．

人体が６０兆個の細胞で構成されていることが報告されている．１個の受精卵から細胞分裂を繰り返すことで，人体ができるものと考えられている．細胞の原形質を造る成分のおおまかな割合は，ほとんどの細胞で水が約８５％であり蛋白質が約１０％であるものと報告がある．水は，H_2Oであり水素原子を含む．水素原子で，人体はおおくの部分が構成されている．水素原子は物質である．その水素原子で，細胞の原形質のほとんどを構成している．細胞が生命活動を行うことを仮定していることは，辞書でも読むことはある．物質である水素で電子および陽子の結合を考えることは，第２回で説明するボーアの水素原子モデルでも説明できる．電子および陽子の結合に，エネルギーの量子化を仮定する．その量子化では，光の粒子である光子の量子エネルギーを使用する．このことでは，電子および光子で説明する水素原子のエネルギーに光子の量子エネルギーを使用する．真空中の光で，時間を観測できることは特殊相対性理論で説明す

る．真空中の光の量子エネルギーを応用することで，物質の２重性を導出できる．２重性で，粒子の性質としてエネルギーを説明して波の性質として周期を説明できる．周期は時間である．文献２４の『理論物理学での波の関数３』で著者が時間およびエネルギーの関係から我々の「心が無始無終で存在する」ことを導出した．そのような心は，時空には無いことを仮定している．時空に存在しない心で我々としての各区別を仮定する．さらに，我々の体を時空に持つことで我々を区別できる．時空に存在する我々の体には寿命が有る．２０１７年現在の物理学で説明する時空の我々の体は有始有終である．始まりが無く存在している我々の心に応じる時空の体が水素で構成されている．その水素からは光の量子エネルギーが放出および吸収できることをボーアの水素原子モデルで説明できる．始まり無く存在する我々の心が先に有り，存在していなかった我々の時空の体が生まれている．我々の体を構成する際に必要な物質を結合するエネルギーは，光の粒子の運動で説明できる部分を仮定する．そのエネルギーには，受精卵が分裂を繰り返すことでの放出および吸収を考えることができる．そのエネルギーは，母体から配分されるものと多くは考えることができる．このことでは，肉体が生じる以前に存在する我々の心が時空に与える影響を仮定できる．我々の肉体となる受精卵が，我々の心に応じて発達していくものか問題を見つけることになる．受精卵の内外に力が作用することで，受精卵の細胞分裂を理論物理学での物質の運動で説明していくことは可能であるものと仮定する．さらに．我々の心に力が作用することを文献２４および文献２５の著者が構築している「心のモデル」で仮定する．そのような力が心および時空の体の細胞に作用することでは，過去の現象が関係することで生じるものと考えることができる．このことは，現在の我々に起こっていることには過去の現象に因る所を仮定できることになる．過去には，我々が体を持って活動していることを否定できない．この意味では，体を持ち心の性を持ち体に相を持つことを仮定できる．この仮定では，相・性・体を過去から現在に我々が持っていることを考えている．このことでは，生は時空に考えることができる．始まりもなく存在する心には，生じることは否定できる．時空に生を考えることで滅も時空に考えることができる．時空の滅では，我々の肉体が滅することで時空での死を意味するものと考えることができる．時空に生死を考えることができた．時間および空間の無い所に存在する心では，性が変化することを仮定できる．この変化は，同じ心に性が変化することで性の生滅を考えることができる．我々の心に新しい性が生じることおよび持っていた性が滅することを考えることができる．性が生滅することでは，相が変化することを考えることができる．心の本体を不動のひとつに仮定できると本の我々の体はひとつである．そのひとつの体で性が変化することで生じる相に，相・性・体を仮定する．その体は，生じたものであるので滅を仮定する．このように考えることでは，無始無終に存在する我々の心に不動のひとつの体を仮定して，その体を支配する法を仮定する．その法に従う我々の心が存在するものと考える．我々の心の性が変化することでは，その心の性が生じた相に仮定した相・性・体の性で心の性の生滅を扱うことができる．このような心の性の生滅を心の生滅として扱うことでは，無始無終の心の存在を肯定している．無始無終の心の存在には，相に観る心を説明できる．その相に観る心の性の変化に，「心の有始有終」で「心の生滅」を対応させることは日本語の表現では可能である．このようなことを文献２４，文献２５および文献２７で考察している．過去に遡る際には，我々が存在している宇宙が生じる以前のことが現在の我々に影響を与えていることを観測できるかは大事なことであるものと２０１７年現在の著者は考えている．時間を観測することでは，２重性でエネルギーを考えることができ時空を仮定できる．我々の宇宙が生じる以前からの時間を使用して来歴を明らかにすることでは，過去からの影響を説明できる余地が有るものと著者は考える．過去から現在に影響を及ぼすことで，現在の物質の運動が未来の物質の運動に影響を及ぼすことを仮定できる．現在の我々のものがすべてを統合する法に支配されて，力は未来のものが因るものに作用するものと考えることができる．現在のものが過去に因ることでは，過去のことは現在の我々のものを顕す一部である．このことでは，時間を使用しているので時空を採用しているものと考えることができる．心が時空に存在しないことでは，心の性の変化を生じさせる力の作用を考え心が因る過去のものから招く現在のものを考えることができる．時空およびエネルギーに心と一体となる世間を考えることができるすべてを統合する法を仮定する．その仮定した法に，電磁場および重力場を時空およびエネルギ

一の議論で扱う理論物理学が収められていることを２０１７年現在の著者は考えている．

不変の道理の教相の徳から眼目の徳が生じ，眼目の徳から道理を信じ顕す徳が生じ，道理を信じ顕す徳から智慧の徳が生じ，智慧の徳から不変の道理の義の徳が生じ，不変の道理の義の徳から不変の道理の教相の徳が生じるものか．妙なる法の智慧で不変の道理を顕すことは影身（かげみ）に添うものと考えると，妙なる法で心は顕すことができるものか．眼・舌・身・意・鼻・耳で，妙なる法の智慧の徳がどのように生じるものか２０１７年現在の著者は以下のように考えてみる．

妙なる智慧の身は大なる光明を支配して身身に影従し，身に常に一体となる世間で起こる波上の蓮の地から出る仮初めの粉砕される大石が達して招く法の生滅の相を十方に聞く．日輪の光明の本で知恵を用いる人の国土の生滅は，天に有る汝の風波が達して招く生滅に譬える．妙文の不動の体から生じる相の中での性の生滅で顕示する法の生滅を身心に考える２０１７年現在の著者である．

付録（appendix）

ｉ．(3.10) からのポテンシャルエネルギーの計算と (3.11) からの保存力について[6), 7), 10), 30)]

(a.1.1) のように記号を約束する．(a.1.1) の約束は数学の勾配――グラディエント (gradient) ――の記号である．∇は，ナブラ (nabla) と呼ばれグラディエント (gradient) に等しいものである．文献３０での説明で，∇は del および atled とも呼ばれている．atled は delta を逆の順序で記述している．(a.1.1) を使用すると (3.11) は (a.1.2) で記述できる．(3.11) あるいは (a.1.2) の記述は，次回――本書の第２回――で説明する静電気的ポテンシャルエネルギーと (2.4) の左辺の力との関係を記述する.また，静電場 (2.1) ――電界とも呼ぶ．――と本書の第３回で説明する電位との関係を記述することができる．

$$\mathrm{grad} = \frac{\partial}{\partial x}\mathbf{i} + \frac{\partial}{\partial y}\mathbf{j} + \frac{\partial}{\partial z}\mathbf{k}, (\mathrm{grad} = \nabla, \mathrm{grad} : \mathrm{gradient}, \nabla : \mathrm{nabla}) \cdots (\mathrm{a.1.1})$$

$$\mathbf{F(s)} = -\frac{\partial U}{\partial x}\mathbf{i} - \frac{\partial U}{\partial y}\mathbf{j} - \frac{\partial U}{\partial z}\mathbf{k} \cdots (3.11)$$

$$\mathbf{F} = -\nabla U = -\mathrm{grad}\, U \cdots (\mathrm{a.1.2})$$

$$\mathbf{F} = q \times \mathbf{E} \cdots (2.4)$$

$$\mathbf{E} \equiv \frac{\mathbf{F}}{q}\ \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{C}}, (q \neq 0) \cdots (2.1)$$

１９９０年代の日本の一般的な物理学指導では，(a.1.3) で位置エネルギーを算出することになる．この考え方では，(a.1.3) の第２項が位置エネルギーを計算する際の基準点になるものとみなす．この基準点は，(a.1.4) に示すように定数になる．(a.1.3) での位置エネルギーは，基準点の定数によって値が異なることが分かる．

$$U(x_b, y_b, z_b) = -\int_{\mathbf{a}}^{\mathbf{b}} \mathbf{F(s)} \cdot \mathrm{d}\mathbf{s} + U(x_a, y_a, z_a) \cdots (\mathrm{a.1.3})$$

$$U(x_a, y_a, z_a) = \mathrm{const.} \cdots (\mathrm{a.1.4})$$

(3.11) を満足する位置の関数を位置エネルギーと考えることが，１９９０年代の日本の物理学指導では一般的であるものと著者は記憶している．そのような位置の関数をポテンシャルエネルギーとして定義すると，本書の３章で定義したポテンシャルエネルギーとは異なる意味になる部分もある．

$$\mathbf{F(s)} = -\frac{\partial U}{\partial x}\mathbf{i} - \frac{\partial U}{\partial y}\mathbf{j} - \frac{\partial U}{\partial z}\mathbf{k} \cdots (3.11)$$

(3.11) では，質点系および相対的配置についての明確な説明を記述していないものと扱える．(3.11) を (a.1.3) に等しいものと仮定するならば，(a.1.3) では質点系内の各質点の相対的な配置について明確に記述をしていない．(a.1.3)

では，右辺の第１項の仕事量および第２項の位置の関数で空間内の位置を明確に示しているのみである．質点系内の各質点の相対的配置は，各質点の間の距離および各質点の空間内の位置で与えることができる．そして，３章のポテンシャルエネルギーの定義では各質点が系内に配置されているのみでポテンシャルエネルギーを決定できるものである．このことは，(a.1.3) の右辺の第１項に記述した仕事量では説明できていないものと著者は考えている．上述までの説明では相対的配置と位置とは異なる意味になる．２００７年現在，このような日本語の「相対的配置」および「位置」の意味の異なることからも，著者はポテンシャルエネルギーと呼ぶことを好んでいる．本書の本文では位置エネルギーとは呼ばず，ポテンシャルエネルギーと呼ぶことに統一している．

２０１７年３月現在の著者の説明では，次のようになる．(a.1.3) の右辺の第１項の仕事量の始点および終点の位置は保存力 (3.11) が作用している質点の移動の位置の説明である．質点系を構成するには２つ以上の質点が必要である．(a.1.3) では，保存力 (3.11) が作用する質点の移動する前の位置の位置エネルギーおよび移動後の位置の位置エネルギーを記述している．移動する前の位置の位置エネルギーは，(a.1.3) の右辺の第２項である．移動後の位置の位置エネルギーは，(a.1.3) の左辺である．

$$U(x_b, y_b, z_b) = -\int_{\mathbf{a}}^{\mathbf{b}} \mathbf{F}(\mathbf{s}) \cdot d\mathbf{s} + U(x_a, y_a, z_a) \cdots (\mathrm{a.1.3})$$

質点系を構成するもうひとつ以上の質点が必要になる．(a.1.3) では，その質点の記述を明確に記述していない．このように相対的配置の説明が無いことで，ポテンシャルエネルギーを定義することは (a.1.3) および (3.11) のみでは不適切な記述であるものと著者は判断する．移動前および移動後の各位置のポテンシャルエネルギーは，他の質点との相対的配置で定義できるものである．これは，３章の本文で説明した．(a.1.3) でポテンシャルエネルギーの値を決定することは，(a.1.4) のように基準となる位置のポテンシャルエネルギーを定数にしている．これについては，次で説明する．

２０１７年３月現在では，電場あるいは重力場を扱うことがある．静電場は静電気力が作用する．静電気力は，電気量を持つ質点に相互作用するものと考える．静電場内に在る電気量を持つ２つの質点には，それぞれ静電気力が作用する．その静電気力が作用している２つの質点には，互いに相対的配置の関係が有る．このような相対的配置については，第２回で説明するクーロンの法則で考えることができる．重力は，ニュートン力学で万有引力の法則を使用して説明している．万有引力の法則でも質量を持つ２つの質点の相対的配置を記述する．重力場は，一般相対性理論で導入できる．重力場は，質量で生じるものと仮定できる．重力は質量で生じた重力場内に他の質量が存在するときに，質量を持つ質点に作用するものと仮定できる．電場あるいは重力場内で２つ以上の質点が相対的配置にあることで，(3.11) のような力が作用すると (a.1.3) のようなポテンシャルエネルギーを計算できる．

$$\mathbf{F}(\mathbf{s}) = -\frac{\partial U}{\partial x}\mathbf{i} - \frac{\partial U}{\partial y}\mathbf{j} - \frac{\partial U}{\partial z}\mathbf{k} \cdots (3.11)$$

$$U(x_b, y_b, z_b) = -\int_{\mathbf{a}}^{\mathbf{b}} \mathbf{F}(\mathbf{s}) \cdot d\mathbf{s} + U(x_a, y_a, z_a) \cdots (\mathrm{a.1.3})$$

(a.1.3) のようなポテンシャルエネルギーの計算は，保存力 (3.11) が作用している質点で仕事量を説明している．仕事量は，質点を考えていても質点系を考えることなく計算できる．このような計算では，保存力が作用する質点の移動を仮定している．そのような質点の移動で仕事量が増減しても，(a.1.3) の左辺のポテンシャルエネルギーを２つ以上の質点の相対的配置で蓄えるものとは定義できない．(a.1.3) の質点の移動で変化するポテンシャルエネルギーは，(a.1.3) の右辺の第２項に記述した定数となるポテンシャルエネルギーを仮定することで説明している．(a.1.3) の右辺の第２項に記述したポテンシャルエネルギーが変化すると，右辺の仕事量が変化しなくても (a.1.3) の左辺の値は変化する．こ

のように，(a.1.3) では，ポテンシャルエネルギーが変動をしてしまいポテンシャルエネルギーを定義できない．このような変動は，質点系の各質点の相対的配置でポテンシャルエネルギーを定義しないで，(a.1.3) のような仕事量の質点の移動でポテンシャルエネルギーの値を与えることに因る．仕事量でポテンシャルエネルギーが変動することでは，保存力が作用する質点の移動でポテンシャルエネルギーが異なる値になる．このような値の変動は，ポテンシャルエネルギーの意味から与えるものではない．ポテンシャルエネルギーの値が決定することで，(a.1.3) の計算ができる．このことで，ポテンシャルエネルギーを定義できる質点系を考慮していない (a.1.3) の計算でも値を変動させることができる．ポテンシャルエネルギーの値の決定は，ポテンシャルエネルギーの意味を定義して与えるものとなる．本書では，３章でポテンシャルエネルギーの意味を定義している．

ポテンシャルエネルギーが質点系に蓄えられることでは，その蓄えられたポテンシャルエネルギーは変動していない部分であるものと扱える．ポテンシャルエネルギーの変化量 (3.5) は (a.1.3) の右辺の第１項では (3.10) の右辺の仕事量で計算できても，ポテンシャルエネルギーの値 (3.3) は与えることはできない．

$\Delta U_{ab} = U(x_b, y_b, z_b) - U(x_a, y_a, z_a) \cdots (3.5)$ 質点 m^p との相対的配置でのポテンシャルエネルギーの変化量

$$U(x_b, y_b, z_b) - U(x_a, y_a, z_a) = -\int_{\mathbf{a}}^{\mathbf{b}} \mathbf{F}(\mathbf{s}) \cdot \mathrm{d}\mathbf{s}, (\Delta U_{ab} = -W_{ab}) \cdots (3.10)$$

$U \cdots (3.3)$

ポテンシャルエネルギー (3.3) の値は，質点系に蓄えられたポテンシャルエネルギーの量で導出できるものである．そのような導出では，質点系に蓄えられているポテンシャルエネルギーの変動を変化量 (3.4) として管理して，その質点系に蓄えられているポテンシャルエネルギーの量 (3.3) を説明できる．

$\Delta U_{ab} \equiv -W_{ab} \cdots (3.4)$ 質点 m^p との相対的配置でのポテンシャルエネルギーの変化量 ΔU_{ab} の定義

(3.4) では，左辺のポテンシャルエネルギーの変化量の値は右辺の仕事量 (3.6) の値とは異符号である．質点系に蓄えられたポテンシャルエネルギーが増加すると，仕事量 (3.6) は減少する．質点系に蓄えられたポテンシャルエネルギーが減少すると，仕事量 (3.6) は増加する．このように，質点系内に在る質点に作用する保存力のなす仕事量 (3.6) で，ポテンシャルエネルギーの変化量 (3.4) を管理できる．そのようなポテンシャルエネルギーの増減の量を管理して，質点系に蓄えられているポテンシャルエネルギー (3.3) の値を管理できる．

$$W_{ab} = \int_{\mathbf{a}}^{\mathbf{b}} \mathbf{F}(\mathbf{s}) \cdot \mathrm{d}\mathbf{s} \cdots (3.6)$$

この意味で，ポテンシャルエネルギー (3.3) は質点が持つものではない．質点の移動で質点系に蓄えられているポテンシャルエネルギー (3.3) が増減しても，その移動をしている質点が持つエネルギーではない――４章でも説明している．――．

(3.10) の右辺には，負号が付いている．その右辺の負号を保存力に付けることで，質点に作用している保存力に抗する力と解釈する――著者が学生時代に読んだ――和書の指導を著者は記憶している．このような説明が，電位の説明に有ったことを著者は記憶している．電位は，第３回で著者が独自に定義している．

$$U(x_b, y_b, z_b) - U(x_a, y_a, z_a) = -\int_{\mathbf{a}}^{\mathbf{b}} \mathbf{F}(\mathbf{s}) \cdot \mathrm{d}\mathbf{s}, (\Delta U_{ab} = -W_{ab}) \cdots (3.10)$$

このような解釈では，(3.10) で左辺のポテンシャルエネルギーの変化量の値は，右辺の保存力に抗する力のなす仕事量の値に等しいものとなる．このことは，一般的な保存力が作用している質点系でのポテンシャルエネルギーの変化量を記述できる現象ではない．一般的な (3.10) の物理現象は，質点系内のひとつの質点に保存力が作用している場合でのポテンシャルエネルギーの変化量の記述である．このことでは，(3.10) では，左辺のポテンシャルエネルギーの変化量

の値は，右辺の仕事量の値とは異符号である．（3.47）の右辺の第 1 項は，‘保存力に抗する力のなす仕事量’に関連の記述である．

$$\Delta U-\Delta U=-\int_{\mathbf{a}}^{\mathbf{b}}\mathbf{F}_{\mathrm{c}}\cdot d\mathbf{s}+\int_{\mathbf{a}}^{\mathbf{b}}\mathbf{F}_{\mathrm{c}}\cdot d\mathbf{s}\cdots(3.47)$$

（3.10）のような記述で，電位を説明するのに‘静電気力に抗する力’を著者が学生の時に予習で読んだすべての和書の電位の説明で採用していた記憶が有る２０１７年８月現在である．付録ⅵで，電位の定義ついて簡単な説明をしてある．本書では第３回で電位の定義を与えている．

ⅱ.内部エネルギーとエネルギー保存則[2),11)]

著者の経験では，付録ⅱで説明する系のエネルギー保存則および熱力学の第 1 法則は物理学の経験から成立するものとして報告されている．系のエネルギー保存則については理論的導出が紹介されていることもある．

付録ⅱで説明するエネルギーの保存則には「内部エネルギー」を使用する．このために，付録ⅱでの内部エネルギーを意味する記号を以下のように約束する．（a.2.1）は質点系での内部エネルギーを意味する．（a.2.2）は熱力学系での内部エネルギーを意味する．ここでは，熱力学系は質点系とは異なるものとして扱う．一般的に，熱力学系として使われるものには気体がある．大学１年生の科目での基礎の物理学では，理想気体を使用して論じているものを著者は記憶している．付録ⅱでは，そのような理想気体での物理学理論を参考にした．

$E_{\mathrm{internal}}\cdots(\mathrm{a}.2.1)$ 質点系の内部エネルギー

$E_{\mathrm{internal\_thermo}}\cdots(\mathrm{a}.2.2)$ 熱力学系の内部エネルギー

質点系の内部エネルギーの変化量は（a.2.3）で示す．熱力学系の内部エネルギーの変化量は（a.2.4）で示す．

$\Delta E_{\mathrm{internal}}\cdots(\mathrm{a}.2.3)$ 質点系の内部エネルギーの差

$\Delta E_{\mathrm{internal\_thermo}}\cdots(\mathrm{a}.2.4)$ 熱力学系の内部エネルギーの差

最初の状態での質点系の内部エネルギーを（a.2.5）で示す．そして，最終の状態での質点系の内部エネルギーを（a.2.6）で示す．（a.2.6）は（a.2.7）で記述できるものとする．

$E_{\mathrm{internal\_i}}\cdots(\mathrm{a}.2.5)$ 最初の状態での質点系の内部エネルギー

$E_{\mathrm{internal\_f}}\cdots(\mathrm{a}.2.6)$ 最終の状態での質点系の内部エネルギー

$E_{\mathrm{internal\_f}}=E_{\mathrm{internal\_i}}+\Delta E_{\mathrm{internal}}\cdots(\mathrm{a}.2.7)$

質点系の内部エネルギーの変化量（a.2.8）が成立するならば，（a.2.7）では（a.2.9）が成立する．（a.2.9）では，最初の状態での質点系の内部エネルギー（a.2.5）は最終の状態での質点系の内部エネルギー（a.2.６）に等しい．付録ⅱでは，質点系での（a.2.5）～（a.2.9）は，熱力学系での（a.2.2）および（a2.4）でも同様に記述する．

$\Delta E_{\mathrm{internal}}=0\cdots(\mathrm{a}.2.8)$

$E_{\mathrm{internal\_f}}=E_{\mathrm{internal\_i}}\cdots(\mathrm{a}.2.9)$

以下では，質点系のエネルギー保存則について説明をした後に熱力学系のエネルギー保存則について説明をする．次に，質点系の内部エネルギーと熱力学系の内部エネルギーの異なる箇所について説明する．最後に，文献２での質点系のエネルギー保存則の使用方法について簡単に触れる．

本文では，質点について説明した．ここでは，２個以上の質点で構成する系のエネルギーの保存則について簡単に説明する．質点系のエネルギーの保存則には内部エネルギーを使用する．その内部エネルギーを（a.2.10）を使用して著者は独自に定義する．（a.2.10）の右辺の第１項は系（system）に作用している外力がなした仕事――外部仕事量とも呼ぶ．

――を意味する．（a.2.10）の右辺の第２項と第３項の各項の和は，（a.2.11）で定義して質点系の力学的エネルギーの変化量とする．（a.2.11）の右辺は，３章で説明したポテンシャルエネルギーおよび運動エネルギーの変化量である．ただし，３章では質点のポテンシャルエネルギー――質点系に蓄えられているポテンシャルエネルギーを記述できる質点で説明した．――と運動エネルギーを説明した．（a.2.11）を使用して（a.2.10）を（a.2.12）で記述できる．質点系の力学の一般的な解釈では，（a.2.10）の左辺は，質点系を構成している各質点を構成する原子あるいは分子など――原子を構成する電子あるいは原子核などにも考えることがある．――のもつ運動エネルギーやその質点系に蓄えられているポテンシャルエネルギーとして解釈できる．

$\Delta E_{\mathrm{internal}} \equiv W_{\mathrm{external}} - (\Delta U + \Delta K) \cdots (\mathrm{a.2.10})$ 質点系の内部エネルギーの変化量

$\Delta E_{\mathrm{mechanical}} \equiv \Delta U + \Delta K \cdots (\mathrm{a.2.11})$ 質点系の力学的エネルギーの変化量

$\Delta E_{\mathrm{internal}} = W_{\mathrm{external}} - \Delta E_{\mathrm{mechanical}} \cdots (\mathrm{a.2.12})$

（a.2.10）で（a.2.13）が成立するならば，（a.2.8）が成立する．（a.2.8）が成立するならば（a.2.9）になることは明らかである．

$W_{\mathrm{external}} = \Delta E_{\mathrm{mechanical}} \cdots (\mathrm{a.2.13})$

（a.2.10）および（a.2.12）では力学的エネルギーの変化量および外力のなす仕事量との差は，その系の内部エネルギーの変化量になる．もし，（a.2.12）で外力のなす仕事量が零（a.2.14）であるならば内部エネルギーの変化量（a.2.15）は力学的エネルギーの変化量とは異符号の値になる．（a.2.15）では力学的エネルギーの変化量が生じることで，内部エネルギーの変化量を算出できる．

$W_{\mathrm{external}} = 0 \cdots (\mathrm{a.2.14})$ 外力のなす仕事量が零

$\Delta E_{\mathrm{internal}} = -\Delta E_{\mathrm{mechanical}} \cdots (\mathrm{a.2.15})$ 内部エネルギーの変化量

（a.2.10）から（a.2.16）を記述できる．（a.2.16）を系のエネルギー保存則と呼ぶことがある．（a.2.12）から（a.2.17）を記述できる．（a.2.16）と（a.2.17）が等価であることは明らかである．

$\Delta U + \Delta K + \Delta E_{\mathrm{internal}} = W_{\mathrm{external}} \cdots (\mathrm{a.2.16})$ 系のエネルギー保存則

$\Delta E_{\mathrm{mechanical}} + \Delta E_{\mathrm{internal}} = W_{\mathrm{external}} \cdots (\mathrm{a.2.17})$

系のエネルギー保存則（a.2.16）の左辺を（a.2.18）で記述する．（a.2.19）では，（a.2.18）の最初の状態での質点系の全エネルギー（a.2.20）および最終の状態での質点系の全エネルギー（a.2.21）との差で（a.2.18）の左辺を記述している．

$\Delta E_{\mathrm{S}} = \Delta U + \Delta K + \Delta E_{\mathrm{internal}} \cdots (\mathrm{a.2.18})$（a.2.16）での質点系の全エネルギー

$\Delta E_{\mathrm{S}} = E_{\mathrm{S\_f}} - E_{\mathrm{S\_i}} \cdots (\mathrm{a.2.19})$

$E_{\mathrm{S\_i}} \cdots (\mathrm{a.2.20})$（a.2.18）の最初の状態での質点系の全エネルギー

$E_{\mathrm{S\_f}} \cdots (\mathrm{a.2.21})$（a.2.18）の最終の状態での質点系の全エネルギー

（a.2.19）から（a.2.22）を記述できる．（a.2.22）の左辺は（a.2.21）になる．（a.2.22）の右辺は，（a.2.18）の左辺および（a.2.20）との和を記述している．（a.2.18）を使用すると，系のエネルギー保存則（a.2.16）は（a.2.23）で記述できる．

$E_{\mathrm{S\_f}} = E_{\mathrm{S\_i}} + \Delta E_{\mathrm{S}} \cdots (\mathrm{a.2.22})$

$\Delta E_{\mathrm{S}} = W_{\mathrm{external}} \cdots (\mathrm{a.2.23})$

（a.2.8）～（a.2.13）のような質点系の内部エネルギーの定義をしないで（a.2.24）を記述して系のエネルギー保存則を記述することもある．この場合でも，（a.2.24）の左辺の第３項を内部エネルギーの変化量と呼ぶ．一般には，この内部エネルギーは質点系を構成している各質点を構成する原子あるいは分子の持つエネルギー――原子を構成する電子あるいは原子核などにも考えることがある．――として解釈する．（a.2.16）と（a.2.24）は記述上では等価である．しか

し，理論上に異なる解釈がある．

$\Delta U+\Delta K+\Delta E_{\mathrm{internal}}=W_{\mathrm{external}}\cdots(\mathrm{a}.2.24)$

質点系の内部エネルギーを（a.2.25）で定義する場合もある．付録ⅱでは，系のエネルギー保存則（a.2.16）で内部エネルギーを使用するので，（a.2.25）では系の内部エネルギーを定義しない．（a.2.25）では，質点系を構成している各質点を構成する質点を仮定している．この仮定のように，質点系を構成している各質点を構成する質点の質量および位置などの情報が与えられるものとは限らない．このことでは，（a.2.25）で質点系の内部エネルギーが計算できるものとは限らない．付録ⅱでは，（a.2.8）～（a.2.13）のように質点系の内部エネルギーを定義する．この定義では，質点系を構成している各質点を構成する質点の質量および位置などの情報がなくても質点系の内部エネルギーを与えることができる．

$\Delta E_{\mathrm{internal}}=\Delta U_{\mathrm{internal}}+\Delta K_{\mathrm{internal}}\cdots(\mathrm{a}.2.25)$

質点系のエネルギー保存則（a.2.16）で（a.2.26）を満足する場合には，その質点系を孤立系と呼ぶことにする．そのような孤立系では（a.2.27）が成立する．

$W_{\mathrm{external}}=0\cdots(\mathrm{a}.2.26)$

$\Delta U+\Delta K+\Delta E_{\mathrm{internal}}=0\cdots(\mathrm{a}.2.27)$

（a.2.27）では，孤立している系の全エネルギーは変化せずに定数である．このことは，孤立系のエネルギーの保存を意味する．質量の保存および電気量の保存のような保存則を使用すると，そのような系のエネルギーは次のようになる．物理学理論上，その系内でエネルギーを造る――創成する――ことはなく，また，滅失することはない．この場合では，質点系の内部仕事量で，孤立している系のエネルギーを他の種類のエネルギーに変換できる．ここでのエネルギーの種類とは，ポテンシャルエネルギー，運動エネルギーおよび内部エネルギーのことである．

系のエネルギー保存則を本書の作成における考察で必要な場合は，著者は（a.2.16）を使用して本書の作成をしている．上述の言葉による系のエネルギー保存則の解釈を直接に使用はしていない．

$\Delta U+\Delta K+\Delta E_{\mathrm{internal}}=W_{\mathrm{external}}\cdots(\mathrm{a}.2.16)$ 系のエネルギー保存則

上述までが，質点系のエネルギーの保存則についての説明である．次に，熱力学系でのエネルギー保存則について説明する．

熱力学系でのエネルギーを転送するひとつの手段として，エネルギー差 ΔE を熱量 Q_{thermo} として扱う方法がある．熱力学の第０法則では，熱力学的平衡状態を使用して温度の考えを与えることができる．その「温度の考え」を使用して熱量を説明することができる．この熱量を扱う方法では，系およびその系を取り巻く環境との間でその系およびその環境との温度差に起因して移動をするエネルギー差 ΔE は，熱量 Q_{thermo} として転送することができる．

（a.2.28）を<u>熱力学系およびその熱力学系を取り巻く環境との間のエネルギー差</u>とする．（a.2.29）を<u>熱力学系およびその熱力学系を取り巻く環境との間を移動する熱量</u>とする．ここでは，エネルギー差（a.2.28）および熱量（a.2.29）は（a.2.30）を満足する．（a.2.31）は熱力学系の熱力学温度とする．（a.2.32）はその熱力学系を取り巻く環境の熱力学温度とする．ただし，「熱力学温度」と呼ぶことは文献１５に従った．

$\Delta E\cdots(\mathrm{a}.2.28)$ 系およびその系を取り巻く環境との間のエネルギー差

$Q_{\mathrm{thermo}}\cdots(\mathrm{a}.2.29)$ 系および環境との間を移動する熱量

$\Delta E=Q_{\mathrm{thermo}}\cdots(\mathrm{a}.2.30)$

$T_{\mathrm{S}}\ \mathrm{K}\cdots(\mathrm{a}.2.31)$ 熱力学系の熱力学温度

$T_{\mathrm{E}}\ \mathrm{K}\cdots(\mathrm{a}.2.32)$ 熱力学系を取り巻く環境の熱力学温度

（a.2.33）が成立するならば，熱力学系から熱量がその環境へと移動する．そして，その移動した熱量の符号を（a.2.34）として記述する．

$T_{\mathrm{S}} > T_{\mathrm{E}} \cdots (\mathrm{a}.2.33)$

$Q_{\mathrm{thermo}} < 0 \cdots (\mathrm{a}.2.34)$

（a.2.35）が成立するならば，熱力学系を取り巻く環境から熱量がその熱力学系へと移動する．そして，その移動した熱量の符号を（a.2.36）として記述する．ただし，ここでの（a.2.34）および（a.2.36）の説明では断熱は生じないものとする．

$T_{\mathrm{S}} < T_{\mathrm{E}} \cdots (\mathrm{a}.2.35)$

$Q_{\mathrm{thermo}} > 0 \cdots (\mathrm{a}.2.36)$

上述の熱量を使用して，熱力学の第１法則を（a.2.37）で記述できる．熱力学の第１法則（a.2.37）は熱力学系でのエネルギー保存則になる．熱力学の第１法則（a.2.37）の左辺は，熱力学系の内部エネルギーの変化量である．熱力学の第１法則（a.2.37）の右辺の第１項は，熱力学系およびその環境間を移動する熱量である．熱力学の第１法則（a.2.37）の右辺の第２項（a.2.38）は，熱力学系に外部から作用した力のなす仕事量である．一般には，仕事量（a.2.38）は熱力学系の特性となる巨視的スケールの圧力および体積で記述できる．

$\Delta E_{\mathrm{internal\_thermo}} = Q_{\mathrm{thermo}} + W_{\mathrm{thermo}} \cdots (\mathrm{a}.2.37)$ 熱力学の第１法則

$W_{\mathrm{thermo}} \cdots (\mathrm{a}.2.38)$

熱力学平衡状態での熱力学系の内部エネルギーは（a.2.39）を満足する．そして，熱力学系の内部エネルギーは状態関数として解釈できる．この状態関数は，熱力学系の状態によって値を変える関数である．その熱力学系の状態を記述するには巨視的スケールでの量を独立変数とする．熱力学系がどのような過程で最終の状態になるかは，状態関数の変化量を決定するのには関係がない．熱力学系の最初の状態および最終の状態のみで，その状態関数の変化量は決定する．ただし，ここでの熱力学系の最初の状態および最終の状態は熱力学的平衡状態になっているものとする．

$E_{\mathrm{internal\_thermo}} = \mathrm{const.} \cdots (\mathrm{a}.2.39)$ 状態関数

（a.2.40）が成立するならば熱力学の第１法則（a.2.37）では（a.2.41）が成立する．（a.2.41）の左辺を（a.2.42）で記述するならば，（a.2.43）が成立することは明らかである．付録ⅱでは（a.2.37）および（a.2.40）～（a.2.43）で熱力学系の内部エネルギーを定義する．

$Q_{\mathrm{thermo}} = -W_{\mathrm{thermo}} \cdots (\mathrm{a}.2.40)$

$\Delta E_{\mathrm{internal\_thermo}} = 0 \cdots (\mathrm{a}.2.41)$

$\Delta E_{\mathrm{internal\_thermo}} = E_{\mathrm{internal\_thermo\_f}} - E_{\mathrm{internal\_thermo\_i}} \cdots (\mathrm{a}.2.42)$

$E_{\mathrm{internal\_thermo\_f}} = E_{\mathrm{internal\_thermo\_i}} \cdots (\mathrm{a}.2.43)$

熱力学系および環境を使用して，熱力学の第１法則（a.2.37）での熱力学的平衡状態，熱量および仕事量についての説明をする．図 a.2.1～図 a.2.3 では次のように表示した．system は熱力学系を意味する．環境は，その熱力学系を取り巻く環境を意味する．平衡状態は，熱力学的平衡状態を意味する．

図 a.2.1 は熱力学系が平衡状態になっている場合を示している．この場合では，熱力学の第０法則から（a.2.44）が成立する．ここで，熱力学の第１法則（a.2.37）からその熱力学系の内部エネルギーの変化量を（a.2.45）で記述する．熱力学の第０法則から（a.2.46）を記述できる．（a.2.44）が成立するならば熱量（a.2.47）が成立する．（a.2.45），（a.2.46）および（a.2.47）から（a.2.48）になることは明らかである．一般に，（a.2.48）は熱力学の第０法則から熱力学的平衡状態を使用しても計算できる．

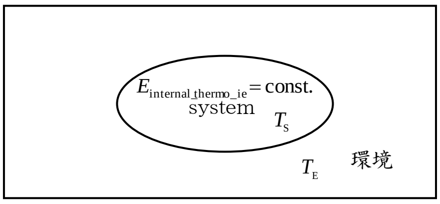
$T_{\mathrm{S}} = T_{\mathrm{E}} \cdots (\mathrm{a}.2.44)$

$\Delta E_{\mathrm{internal\_thermo\_ie}} = Q_{\mathrm{thermo\_ie}} + W_{\mathrm{thermo\_ie}} \cdots (\mathrm{a}.2.45)$

$$\Delta E_{\text{internal\_thermo\_ie}} = 0 \cdots (\text{a.2.46})$$

$$Q_{\text{thermo\_ie}} = 0 \cdots (\text{a.2.47})$$

$$W_{\text{thermo\_ie}} = 0 \cdots (\text{a.2.48})$$



$\Delta E_{\text{internal\_thermo\_ie}} = 0$

$Q_{\text{thermo\_ie}} = 0$

$W_{\text{thermo\_ie}} = 0$

$T_{\text{S}} = T_{\text{E}}$

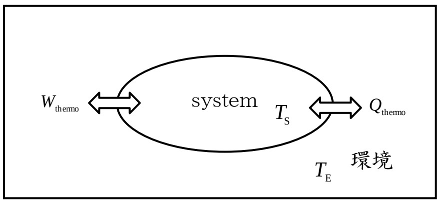
図 a.2.1　最初の平衡状態

図 a.2.2 では熱力学的平衡状態が成立していないものとする．この場合では，(a.2.49) および (a.2.50) が成立する．(a.2.49) が成立していても，断熱変化の場合は (a.2.51) が成立する．

$$T_{\text{S}} \neq T_{\text{E}} \cdots (\text{a.2.49})$$

$$\Delta E_{\text{internal\_thermo}} \neq 0 \cdots (\text{a.2.50})$$

$$Q_{\text{thermo}} = 0 \cdots (\text{a.2.51})$$



$\Delta E_{\text{internal\_thermo}} \neq 0$

$\Delta E_{\text{internal\_thermo}} = Q_{\text{thermo}} + W_{\text{thermo}}$

$T_{\text{S}} \neq T_{\text{E}}$

図 a.2.2　熱力学現象の過程での交換

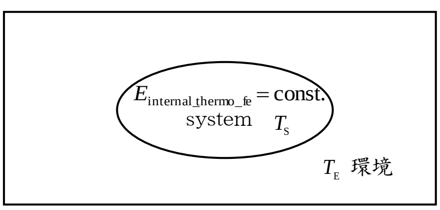
図 a.2.3 は熱力学系が平衡状態になっている場合を示している．この場合では，熱力学の第 0 法則から (a.2.44) が成立する．ここで，熱力学の第 1 法則 (a.2.37) からその熱力学系の内部エネルギーの変化量を (a.2.52) で記述する．熱力学の第 0 法則から (a.2.53) を記述できる．(a.2.44) が成立するならば熱量 (a.2.54) が成立する．(a.2.52)，(a.2.53) および (a.2.54) から (a.2.55) になることは明らかである．一般に，(a.2.55) は熱力学の第 0 法則から熱力学的平衡状態を使用しても計算できる．

$$\Delta E_{\text{internal\_thermo\_fe}} = Q_{\text{thermo\_fe}} + W_{\text{thermo\_fe}} \cdots (\text{a.2.52})$$

$$\Delta E_{\text{internal\_thermo\_fe}} = 0 \cdots (\text{a.2.53})$$

$$Q_{\text{thermo\_fe}} = 0 \cdots (\text{a.2.54})$$

$$W_{\text{thermo\_fe}} = 0 \cdots (\text{a.2.55})$$



$\Delta E_{\text{internal\_thermo\_fe}} = 0$

$Q_{\text{thermo\_fe}} = 0$

$W_{\text{thermo\_fe}} = 0$

$T_{\text{S}} = T_{\text{E}}$

図 a.2.3　最終の平衡状態

図 a.2.1 の最初の熱平衡状態では (a.2.56) を記述できる．図 a.2.3 の最終の熱平衡状態では (a.2.57) を記述できる．図 a.2.2 での熱量および仕事量は (a.2.58) および (a.5.29) である．熱力学の第 1 法則では (a.2.56) ～ (a.2.59) を使用すると，熱力学系の内部エネルギーの変化量 (a.2.37) を記述できる．

$$E_{\text{internal\_thermo\_i}} = E_{\text{internal\_thermo\_iei}} = E_{\text{internal\_thermo\_ie}} \cdots (\text{a.2.56})$$

$E_{\mathrm{internal\_thermo\_f}} = E_{\mathrm{internal\_thermo\_fe\_f}} = E_{\mathrm{internal\_thermo\_fe}} \cdots (\mathrm{a}.2.57)$

$Q_{\mathrm{thermo}} \cdots (\mathrm{a}.2.58)$

$W_{\mathrm{thermo}} \cdots (\mathrm{a}.2.59)$

$\Delta E_{\mathrm{internal\_thermo}} = Q_{\mathrm{thermo}} + W_{\mathrm{thermo}} \cdots (\mathrm{a}.2.37)$

上述までに説明をした質点系のエネルギー保存則の内部エネルギーおよび熱力学の第 1 法則での内部エネルギーの比較について論じる．熱力学では，質点系のエネルギー保存則のように質点の質量および位置などの情報を必要としない扱いがある．そして，物理学の対象が質点系および熱力学系の両方で扱える場合もある際に，内部エネルギーをどのように考えることができるかを論じる．

系のエネルギーの保存則での内部エネルギーは熱力学の第１法則の内部エネルギーとは異なるものとして扱えることを説明する．熱力学では，熱力学の第１法則の内部エネルギーを巨視的スケールでの量として扱い，状態関数として解釈する．一方，質点の位置，速度および質量などは微視的スケールでの量として扱う．このような微視的スケールでの量を使用して，系のエネルギーの保存則での内部エネルギーを記述することになる．そして，微視的スケールの物理量および巨視的スケールの物理量は関係を記述できる場合がある．本書では，このような内部エネルギーでの解釈を前提にして，系のエネルギーの保存則および熱力学の第１法則について以下に説明をする．

著者の知る熱力学では，熱力学系を仮定して，巨視的な物理量としての圧力および体積などを使用して熱力学的平衡状態を与えている．２００９年現在では，本書でも，そのように熱力学的平衡状態を与えるものとする．そのような熱力学的平衡状態を使用して導入した量である温度は，熱力学系として与えることができない系では扱えない．このような温度の解釈からも，熱力学の第１法則は熱量を使用するので熱力学系として扱えない質点系では使用できない．このように，熱力学の第１法則を解釈すると，系のエネルギーの保存則の内部エネルギーは熱力学の第１法則の内部エネルギーとは異なる．

質点系および熱力学系として扱うことができる或る対象を仮定する．質点系のエネルギー保存則（a.2.16）でポテンシャルエネルギーの変化量（a.2.60）および運動エネルギーの変化量（a.2.61）を仮定する．（a.2.60）および（a.2.61）を（a.2.16）に代入すると，質点系の内部エネルギーの変化量（a.2.62）を記述できる．

$\Delta U + \Delta K + \Delta E_{\mathrm{internal}} = W_{\mathrm{external}} \cdots (\mathrm{a}.2.16)$系のエネルギー保存則

$\Delta U = 0 \cdots (\mathrm{a}.2.60)$

$\Delta K = 0 \cdots (\mathrm{a}.2.61)$

$\Delta E_{\mathrm{internal}} = W_{\mathrm{external}} \cdots (\mathrm{a}.2.62)$

熱力学系として，その対象の内部エネルギーの変化量を熱力学の第１法則（a.2.37）の巨視的スケールの量で記述できる．（a.2.63）が成立するならば，（a.2.37）は（a.2.64）で記述できる．

$\Delta E_{\mathrm{internal\_thermo}} = Q_{\mathrm{thermo}} + W_{\mathrm{thermo}} \cdots (\mathrm{a}.2.37)$

$Q_{\mathrm{thermo}} = 0 \cdots (\mathrm{a}.2.63)$

$\Delta E_{\mathrm{internal\_thermo}} = W_{\mathrm{thermo}} \cdots (\mathrm{a}.2.64)$

一方，（a.2.62）は微視的スケールの量で記述したものである．（a.2.62）の右辺は，微視的スケールで記述した外部仕事量である．（a.2.37）の右辺は，巨視的スケールの量である熱量および外力のなす仕事量である．質点系の内部エネルギーは熱力学系の内部エネルギーとは異なることを既に説明した．その対象の熱力学系の内部エネルギーの変化量が生じる場合は，その対象の質点系のエネルギーの変化量が生じることが考えられる．エネルギーの保存則には，その対象のエネルギーが増加――あるいは減少――するならば，その増加――あるいは減少――がエネルギーの保存則で説明で

きることを期待する．(a.2.62) および (a.2.64) では，熱力学系および質点系のエネルギーの変化量はそれぞれの内部エネルギーの変化量のみの記述になった．(a.2.37) および (a.2.62) では，それぞれ別のエネルギーの保存則での内部エネルギーの変化量である．それぞれの内部エネルギーの変化量は巨視的スケールの量および微視的スケールの量で説明をしている．質点系で使用する微視的スケールの量で，熱力学系で使用する巨視的スケールの量を説明できない場合でも (a.2.62) の値と (a.2.37) の値を追跡することで検討はできる．このような検討の仕方では，(a.2.62) と (a.2.64) での比較でも同様である．

文献２では，著者の専攻である心臓血管系の回路モデルでの血液を質点系として考察をした．この考察では，質点系のエネルギー保存則を使用して血液のエネルギーについて論じている．その際に，質点系に作用する外力を巨視的スケールの量となる圧力――微視的スケールの量で記述する圧力もある．――で記述できる場合を仮定している．系のエネルギー保存則 (a.2.16) は微視的スケールの量で記述することを既に説明した．この説明との整合性について付録ⅱの最後に説明をする．

物理学理論では，流体を質点系として扱うことがある．その流体の面には圧力を生じさせる外力が作用することがある．その外力を微視的スケールの量および巨視的スケールの量でそれぞれ次のように説明できる．その流体の各分子が面に作用させる外力の総和を，その流体の面に圧力を生じさせる外力として説明することができる．一方，その流体の面の圧力および面積――その圧力を定義できる面の直交断面積である．――を使用して，その流体の面に作用する外力を記述することがある．後者の圧力は巨視的スケールの量として扱う．この巨視的スケールの圧力で記述できる外力が，前者の外力に等しいものと仮定することで質点系のエネルギー保存則 (a.2.16) を使用することができる．このような計算では，巨視的スケールの量を使用して記述した外力が，微視的スケールの量で記述した外力として扱える場合になる．

ⅲ.特殊相対性理論および量子論でのエネルギー[11), 12), 16), 18), 19), 20), 21), 24), 25), 26), 27), 31)]

本書の第１回の本文では，古典理論のニュートン力学での枠の中でポテンシャルエネルギーおよび運動エネルギーについての説明をした．付録ⅲでは，そのニュートン力学の枠では収まらない物理学理論でのエネルギーについての説明をする．ここでは，特殊相対性理論と量子論でのエネルギーについての考察である．２００８年現在の日本の大学課程での電気・電子系の工学では，特殊相対性理論と量子論は，主に，電子回路，半導体，磁気および光の分野を理解する際の基礎となる知識である．

２０１７年現在では，著者の心のモデルでも特殊相対性理論および量子論は時空および心との関係を考察するのに重要である．文献２４で，著者が独自に心のモデルを言葉のモデルで構築し始めている．心が無始無終で存在することを導く時空の考察で,「相対性」および著者が独自に定義した「時間」を説明するのにエネルギーおよび周期を用いている．著者の心のモデルでは，心および時空を相・性・体で説明している．その心のモデルで主の徳，師の徳および親の徳を説明するのに,「知能」および「智慧」を研究対象として扱う.「主の徳」で世界を支配するものを考える.「師の徳」で仕向け従わせるものを考える.「親の徳」で生むものを考える．世界を支配するものが智慧を用いるものと仮定する．その智慧は，仕向け従わせるものが明らかに顕すものと仮定する．その明らかに顕されたものは，生むものが生じさせるものと仮定する．主・師・親の徳は，文献２５で著者の心のモデルを用いて考察している．主の徳には性を対応させる．親の徳には体を対応させる．師の徳には相を対応させる．このような対応では，性が体を扱う．その体から相が生じるものと仮定している．このような主・師・親の徳の説明では，智慧および知能の本体から心および時空を顕すものと仮定できる．

このような知能および智慧の研究では，我々の肉体が死んだ後にも我々は存在して知能および智慧を持つことを仮定

している．我々の肉体は，我々の心が知恵で用いるものである．肉体の相は，我々が用いる知恵で変化する．肉体の変化は，我々の心の性を変えることもある．この肉体は，太陽系の時空に存在する物質で構成されている．肉体の変化は，構成している物質の運動の変化で考えることができる．物質の運動は，エネルギーで説明できる．物質のエネルギーは慣性質量で記述できることを特殊相対性理論で導出できる．このことは，この付録で説明している．その慣性質量のエネルギーは，周期で記述することが可能である．周期は時間である．周期で振動数を記述できる．振動数でエネルギーを記述することでは，エネルギーを離散化するものと扱うことになる．このようなエネルギーの離散化は，量子論で説明する．このことも，この付録で説明している．量子エネルギーの周期は，時間およびエネルギーの関係を記述している．慣性質量で記述できる物質の全エネルギーは，時間および空間の相対性を説明できる．その我々を相・性・体で記述できることを仮定している．我々を相・性・体で記述することで，すべての世間を記述できるものと仮定している．

国土を構成する物質である水素を考えることで，陽子および電子を扱う原子モデルを使用できる．そのようなモデルは，ボーアの水素原子モデルである．ボーア理論は，第２回の付録で説明してある．そのような原子モデルでは，光の粒子を仮定することでエネルギーの量子化を説明している．国土の多くが水素で構成されている．人体も国土に在る物質で構成されている．このことでは，水素で人体の細胞の多くの部分が構成されているものと考える．イオンを扱うことでは，電気量の計算をするものである．電気量の移動では，電磁場をマクスウェルの方程式系――第４回の付録で説明した．――で説明する．電磁波は，動的な電磁場で観測できる．電磁波である光は，脳神経系での電磁場の現象を説明するのに使用する．脳神経系での電磁場では，イオン化した液体の移動で脳神経系の電磁場を説明できる．脳神経系で情報を処理する．情報を処理する電磁場は，脳内の液体よりも電気量の移動で記述する現象である．電気量を持つ物質がエネルギーを持つことでは，質量を仮定できることを特殊相対性理論で説明している．質量が存在することで，一般相対性理論で重力場が生じることを説明できる．この重力場を使用することでは，質量を持った物質に重力が作用することを仮定する．重力場にもエネルギーを仮定している．重力は，万有引力の法則で近似として説明できる場合がある．万有引力の法則および静電気力で，それぞれの質点系に蓄えるポテンシャルエネルギーを扱うことになる．このことでは，脳内の情報処理を説明する際に電磁力および重力でのポテンシャルエネルギーの分布を用いることができる．付録ⅱの質点系のエネルギー保存則および熱力学系のエネルギー保存則を使用して，エネルギーの分布での情報処理を仮定している．このような「場」を導入した議論での国土の物理現象は，脳神経系に限定できない．エネルギーの分布で情報処理を説明することには，エネルギーを説明する法則で「性」を区別できる．エネルギーの分布は数値で示すことができ，「相」を示す．電磁力および重力が作用する質点を仮定できることでは，質点に「体」を観ることができる．波では，相を描くことができる．このように情報処理に，相・性・体を考えることができる．情報を知恵で処理することは，我々の活動で我々が認めている．このような情報処理に「心的機能」を仮定することは，「知性」という言葉を『広辞苑 第六版 DVD-ROM 版』で検索して確認ができる．一般に，心的機能が働くことで知恵を用いた情報処理に知性が働くものと扱う．知性が働くのに，獲得した情報を処理する．信号から情報を獲得する．信号を記述するのに，時空の現象を用いる．そのような時空を説明するのにエネルギー分布で説明できる．知性が働くことで，情報の識別をして物質の運動を生じさせる．物質の運動を説明するのに力を採用する．時空の物質に作用する力については，物理学で扱う．心に作用する力に知力を考えることができる．知力は知能が機能して生じる力である．知能が機能することで，心的機能の情報処理に知恵が用いられる．このような情報処理は，心と時空とを結びつける処理であるものと２０１７年現在の著者は考える．心と時空を結び付ける情報処理で，知恵およびエネルギー分布が結び付けられることを仮定できる．心についての機能は，時空のエネルギー分布で説明できる個所が有る．これは，心が存在する所を発見しているものではない．心が無始無終で時間，空間およびエネルギーの存在しない所に有ることを否定するものではない．文献２４で，著者は心が無始無終で時間，空間およびエネルギーの存在しない所に有り法に従っていることを仮定している．智慧は，その心で保つことができることを仮定した考察を文献２５および文献２６で試みている．相・性・体で世界を記述する

ことでは，時空でない所と時空を結び付けるものである．このことで，心および物質を結び付けた説明を時空でない世間を仮定して記述できる．

特殊相対性理論および量子論では，上述のように知能について扱い心について考えることができる．このようにエネルギーの分布を説明してエネルギーの保存則を研究することで，「知性」を時空で解析できる個所を持つものと２０１７年現在の著者は考える．

１９０５年にドイツ出身の物理学者であるアルベルト　アインシュタイン（Albert Einstein）が発表した特殊相対性理論では，次のようなエネルギーを与えた．(a.3.1) は質点が持つ全エネルギーと呼ばれるものである．エネルギー (a.3.1) はアインシュタインの特殊相対性理論から導出できた．アインシュタインの特殊相対性理論では，そのエネルギー (a.3.1) は（a.3.2）で記述できる．（a.3.2）の右辺に記述した（a.3.3）は真空中の光の速さ（speed of light in a vacuum）を意味する定数である．本書の第２回の付録――文献６のことである．――で真空中の光の速さを説明した．（a.3.2）の右辺に記述した（a.3.4）は，エネルギー（a.3.2）を持つ質点の速さである．（a.3.2）の右辺の記述から，（a.3.2）の質点の速さ（a.3.4）は区間（a.3.5）内の値になることは明らかである．ただし，ここでの（a.3.4）は実数の値である．

$$E \cdots (\mathrm{a.3.1})$$

$$E = \frac{m_0}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} \times c^2 \ \mathrm{J} \cdots (\mathrm{a.3.2})$$

$$c = 299\,792\,458 \,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}} \cdots (\mathrm{a.3.3})$$ 真空中の光の速さ

$$v \,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}} \cdots (\mathrm{a.3.4})$$ 質点の速さ

$$0 \le v < c \cdots (\mathrm{a.3.5})$$

4 章で質点の持つ全エネルギーの変化量（4.3）を記述している．質点の全エネルギー（4.3）の右辺の合力は，運動方程式（4.1）のものである．運動方程式（4.1）の慣性質量（4.2）は変数である場合を仮定している．このような慣性質量（inertial mass）は相対論的質量（relativistic mass）（a.3.6）で導出できる．相対論的質量（a.3.6）を使用することで，質点の持つ全エネルギーの変化量（4.3）の左辺は（a.3.2）で記述できることになる．

$$\Delta E_p = \int_a^b \mathbf{F}_{\mathrm{resultant}} \cdot \mathrm{d}\mathbf{s} \cdots (4.3)$$

$$\mathbf{F}_{\mathrm{resultant}} = \frac{\mathrm{d}(m \cdot \mathbf{v})}{\mathrm{d}t} \cdots (4.1)$$

$$m \cdots (4.2)$$

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} \ \mathrm{kg} \cdots (\mathrm{a.3.6})$$ 相対論的質量

アインシュタインの特殊相対性理論では，慣性座標系で論じている．慣性座標系は，等速度運動している座標系である．アインシュタインの特殊相対性理論での２つの慣性座標系では，どちらの慣性座標系が絶対的に静止しているものかは決定できないものと解釈できる――付録ⅳで簡単な説明をしている．――．そのような慣性座標系上で（a.3.2）は解釈を与えられ導出された．その（a.3.2）の質点の速さ（a.3.4）は，その質点の速度を定義した慣性座標系上での質点の速度の速さである．このことから，質点の速さ（a.3.4）は，慣性座標系によって異なる値になる．速度については文献１

８で説明を与えた．
（a.3.2）の右辺には相対論的質量（relativistic mass）と呼ばれる（a.3.6）を記述している．相対論的質量（a.3.6）は慣性を示す質量であるので慣性質量（inertial mass）であるものと解釈できる．相対論的質量（a.3.6）を使用してエネルギー（a.3.2）を記述すると（a.3.7）になる．（a.3.7）では相対論的質量は質点の全エネルギー（a.3.7）を決定する量である．逆に，質点の全エネルギー（a.3.7）は相対論的質量を決定する量である．
$E = m \times c^2 \cdots (\mathrm{a.3.7})$
相対論的質量（a.3.6）に，その質点の速さ（a.3.8）を代入すると（a.3.9）になる．（a.3.9）の右辺は（a.3.6）の分子に記述してある．（a.3.9）の右辺を，静止質量（rest mass）と呼んでいる．静止質量（a.3.9）は慣性質量であるものと解釈できる．
$v = 0 \cdots (\mathrm{a.3.8})$
$m = \dfrac{m_0}{\sqrt{1-\dfrac{0}{c^2}}} = m_0 \cdots (\mathrm{a.3.9})$静止質量
（a.3.2）を使用すると，質点（material particle）の速さが（a.3.8）の場合の，その質点の持つ全エネルギーを静止エネルギー（a.3.10）で記述できる．エネルギー（a.3.2）およびエネルギー（a.3.10）を使用すると，アインシュタインの特殊相対性理論での運動エネルギーは（a.3.11）で記述される．（a.3.11）から質点の全エネルギー（a.3.12）を記述できる．
$E_0 = m_0 \times c^2 \cdots (\mathrm{a.3.10})$静止エネルギー
$K = E - E_0\ \mathrm{J} \cdots (\mathrm{a.3.11})$運動エネルギー
$E = E_0 + K, \left(m \times c^2 = m_0 \times c^2 + K\right) \cdots (\mathrm{a.3.12})$質点の全エネルギー
　アインシュタインの特殊相対性理論での質点の全エネルギー（a.3.2）は，真空中の光の速さ（a.3.3）を持つ質点には使用できない．このことは，（a.3.2）および（a.3.5）から明らかである．
$0 \le v < c \cdots (\mathrm{a.3.5})$
電磁波は真空中を真空中の光の速さ（a.3.3）で伝搬するものと解釈されている．この電磁波がエネルギーを持つことを電磁気学では説明している．エネルギーの保存を仮定して，アインシュタインの特殊相対性理論ではエネルギー（a.3.13）を持つ電磁波には（a.3.14）の質量を考えることができるものと報告されている．このために，（a.3.14）から電磁波のエネルギー（a.3.15）を記述できる．ただし，本書では電磁波についての説明は，本書の Option――文献１０のことである．――で与えた．
$E_S\ \mathrm{J} \cdots (\mathrm{a.3.13})$
$m_S = \dfrac{E_S}{c^2}\ \mathrm{kg} \cdots (\mathrm{a.3.14})$
$E = m_S \times c^2 \cdots (\mathrm{a.3.15})$
さらに，一般にはエネルギー（a.3.13）を持つ質点は質量（a.3.14）を持つものとされている．同様に，質量（a.3.14）を持つ質点はエネルギー（a.3.13）を持つものとされている．そして，（a.3.14）では真空中の光の速さの場合でも使用できる．
　エネルギーの変化量（a.3.16）が生じた場合には，そのエネルギー（a.3.16）を失った質点の質量が質量の変化量（a.3.17）だけ減少するものと解釈される．このことでは，エネルギー（a.3.16）を放出――あるいは吸収――した質点には，慣性を示すものと解釈できる質量（a.3.17）分の減少――あるいは増加――が，その質点の質量に生じることになる．
$\Delta E_S > 0 \cdots (\mathrm{a.3.16})$エネルギーの変化量

$\Delta m_S = \frac{\Delta E_S}{c^2} > 0 \cdots (\mathrm{a}.3.17)$ 質量の変化量

質点系として扱うことができる粒子を仮定する．この粒子を質点として扱う場合には，その質点の相対論的質量を（a.3.18）で示す．その質点の静止質量を（a.3.19）で示す．相対論的質量（a.3.6）で記述できる全エネルギーは（a.3.20）になる．

$m \cdots (\mathrm{a}.3.18)$

$m_0 \cdots (\mathrm{a}.3.19)$

$m = \frac{m_0}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}\,\mathrm{kg} \cdots (\mathrm{a}.3.6)$ 相対論的質量

$E_S = m \times c^2 \cdots (\mathrm{a}.3.20)$

相対論的質量（a.3.18）を持つ質点に生じた質量の変化量を（a.3.21）で示す．質量の変化量（a.3.21）が生じることで，質点の全エネルギーの変化量は（a.3.22）になるものと解釈できる．

$\Delta m \cdots (\mathrm{a}.3.21)$

$\Delta E_S = \Delta m \times c^2 \cdots (\mathrm{a}.3.22)$

その質点の静止質量（a.3.19）の変化量を（a.3.23）で示す．質量の変化量（a.3.23）が生じることで，質点の静止エネルギーの変化量は（a.3.24）になる．

$\Delta m_0 \cdots (\mathrm{a}.3.23)$

$\Delta E_0 = \Delta m_0 \times c^2 \cdots (\mathrm{a}.3.24)$

一方，その粒子を質点系として扱う場合のエネルギーの変化量を（a.2.18）で記述する．（a.2.18）を使用すると（a.2.23）が記述できることは既に付録 ii で説明をした．

$\Delta E_\mathrm{S} = \Delta U + \Delta K + \Delta E_\mathrm{internal} \cdots (\mathrm{a}.2.18)$

$\Delta E_\mathrm{S} = W_\mathrm{external} \cdots (\mathrm{a}.2.23)$

質点の持つ全エネルギーの変化量（4.3）は，仕事量に等しいことを記述している．この意味は，全エネルギーの変化量の値が（4.3）の右辺の仕事量の値に等しいことを説明している．物理量としてのエネルギーが仕事量と同じ意味であることを主張している記述ではない．（a.2.23）は，ひとつの粒子を質点系として扱うことを仮定している．質点系のエネルギーの保存則（a.2.23）を質点として扱うことでは，（4.3）と等価であることを仮定できる．

$\Delta E_p = \int_a^b \mathbf{F}_\mathrm{resultant} \cdot \mathrm{d}\mathbf{s} \cdots (4.3)$

3 章で，相対的配置でのポテンシャルエネルギーの変化量を（3.4）で定義した．ポテンシャルエネルギーの変化量（3.4）では，左辺のポテンシャルエネルギーの変化量が増加すると右辺の仕事量は減少する．逆に，（3.4）の左辺のポテンシャルエネルギーの変化量が減少すると右辺の仕事量は増加する．このように，物理量としては，エネルギーおよび仕事量とは意味が異なる．エネルギーの増減は，仕事量の増減とは逆になることを（3.4）で説明している．

$\Delta U_{ab} \equiv -W_{ab} \cdots (3.4)$ 質点 m^p との相対的配置でのポテンシャルエネルギーの変化量 ΔU_{ab} の定義

（a.2.18）および（a.2.23）を使用すると，系のエネルギー保存則（a.2.16）を記述できる．ここで，粒子を質点として記述した場合の全エネルギーの変化量（a.3.22）を（a.2.18）に使用すると（a.3.25）になる．

$\Delta U + \Delta K + \Delta E_{\mathrm{internal}} = W_{\mathrm{external}} \cdots (\mathrm{a}.2.16)$

$\Delta m \times c^2 = \Delta U + \Delta K + \Delta E_{\mathrm{internal}} \cdots (\mathrm{a}.3.25)$

質点系の運動エネルギーは，その質点系の各質点の運動エネルギーの総和である．（a.2.18）を使用すると，質点系の運動エネルギーの変化量は（a.3.26）で記述できる．アインシュタインの特殊相対性理論での質点の運動エネルギーは（a.3.11）を使用すると（a.3.27）で記述できる．ただし，（a.3.27）では質点の運動エネルギーを記号 K_S で記述した．アインシュタインの特殊相対性理論での質点の運動エネルギーの変化量は（a.3.27）から（a.3.28）で記述できるものとする．

$\Delta K = \Delta E_{\mathrm{S}} - (\Delta U + \Delta E_{\mathrm{internal}}) \cdots (\mathrm{a}.3.26)$ 質点系の運動エネルギーの変化量

$K = E - E_0$ J $\cdots (\mathrm{a}.3.11)$ 運動エネルギー

$K_S = E_{\mathrm{S}} - E_0 \cdots (\mathrm{a}.3.27)$ アインシュタインの特殊相対性理論での質点の運動エネルギー

$\Delta K_S = \Delta E_{\mathrm{S}} - \Delta E_0 \cdots (\mathrm{a}.3.28)$ アインシュタインの特殊相対性理論での質点の運動エネルギーの変化量

（a.2.16）の記号を使用すると質点系の全エネルギーは（a.3.29）で記述できる．質点系のポテンシャルエネルギーは，その質点系内に蓄えられているポテンシャルエネルギーの総和である．質点の全エネルギーは（a.3.27）から（a.3.30）で記述できる．この議論では質点の全エネルギー（a.3.30）は質点系の全エネルギーであるので，その質点系のポテンシャルエネルギーはその質点の静止エネルギー E_0 を記述する．（a.3.30）の右辺の第１項は質点系――質点系として扱う粒子の議論である．――の運動エネルギーである．このことから，その質点系のポテンシャルエネルギーは（a.3.30）の右辺の第２項に記述することが明らかである．

$E_{\mathrm{S}} = U + K + E_{\mathrm{internal}} \cdots (\mathrm{a}.3.29)$

$E_{\mathrm{S}} = K_S + E_0 \cdots (\mathrm{a}.3.30)$

（a.3.30）の右辺の第２項に記述した静止エネルギーは（a.3.29）の質点系のポテンシャルエネルギーを使用すると（a.3.31）で記述できる．静止エネルギー（a.3.31）の右辺の第２項は質点系のポテンシャルエネルギー以外で静止エネルギー E_0 を記述するエネルギーである．

$E_0 = U + E_{0\alpha} \cdots (\mathrm{a}.3.31)$

アインシュタインの特殊相対性理論での質点の運動エネルギーの変化量（a.3.28）から（a.3.32）を記述できる．（a.2.23）を使用すると，アインシュタインの特殊相対性理論での質点の全エネルギー（a.3.32）を（a.3.33）に書き直すことができる．

$\Delta E_{\mathrm{S}} = \Delta K_S + \Delta E_0 \cdots (\mathrm{a}.3.32)$

$W_{\mathrm{external}} = \Delta K_S + \Delta E_0 \cdots (\mathrm{a}.3.33)$

静止エネルギー（a.3.31）の変化量を（a.3.34）で記述できるものとする．静止エネルギーの変化量（a.3.34）を（a.3.33）の右辺に代入すると（a.3.35）を記述できる．

$\Delta E_0 = \Delta U + \Delta E_{0\alpha} \cdots (\mathrm{a}.3.34)$

$W_{\mathrm{external}} = \Delta K_S + \Delta U + \Delta E_{0\alpha} \cdots (\mathrm{a}.3.35)$

（a.3.35）を（a.3.36）に書き直すことができる．ここで，本書で説明した質点系の内部エネルギーの変化量（a.2.10）と（a.3.36）を比較すると（a.3.36）の左辺は質点系の内部エネルギーの変化量であることは明らかである．（a.3.36）の左辺を内部エネルギーの変化量として（a.3.37）の右辺の記号で記述すると，（a.3.34）の右辺は（a.3.38）に記述できる．

$\Delta E_{0\alpha} = W_{\mathrm{external}} - (\Delta U + \Delta K_S) \cdots (\mathrm{a}.3.36)$

$\Delta E_{\mathrm{internal}} \equiv W_{\mathrm{external}} - (\Delta U + \Delta K) \cdots (\mathrm{a}.2.10)$

$\Delta E_{0\alpha} = \Delta E_{\mathrm{intenal}\,\alpha} \cdots (\mathrm{a}.3.37)$

$\Delta E_0 = \Delta U + \Delta E_{\mathrm{intenal}\,\alpha} \cdots (\mathrm{a}.3.38)$

（a.3.38）の右辺に記述した内部エネルギーの変化量は（a.3.29）での質点系を粒子として扱った場合の特殊相対性理論での質点の全エネルギーの静止エネルギーを記述している質点系の内部エネルギーの変化量である．この議論での粒子を構成している質点系を（a.3.29）の質点系に等しいものとしているので，同一時点でのひとつの質点系の内部エネルギーが一意に定まることを仮定すると（a.3.39）になる．

$\Delta E_{\text{intenal}\,\alpha} = \Delta E_{\text{intenal}} \cdots (\text{a}.3.39)$

（a.3.39）の右辺の記号を使用すると（a.3.31）は（a.3.40）で記述できる．（a.3.40）では特殊相対性理論での質点の全エネルギーの静止エネルギーは，――その質点を粒子として扱った場合を仮定する．――その粒子を構成している質点系のポテンシャルエネルギーおよび内部エネルギーで記述できることになる．

$E_0 = U + E_{\text{internal}} \cdots (\text{a}.3.40)$

（a.3.39）を使用すると，（a.3.36）は（a.3.41）で記述できる．（a.2.10）および（a.3.41）は（a.3.42）のように等しい．このことは，（a.2.10）および（a.3.41）の左辺が等しいことから明らかである．

$\Delta E_{\text{internal}} = W_{\text{external}} - (\Delta U + \Delta K_S) \cdots (\text{a}.3.41)$

$W_{\text{external}} - (\Delta U + \Delta K) = W_{\text{external}} - (\Delta U + \Delta K_S) \cdots (\text{a}.3.42)$

（a.3.42）から（a.3.43）を導出できる．（a.3.43）では，特殊相対性理論での質点の運動エネルギーの変化量（a.3.28）は質点系の運動エネルギーの変化量（a.3.26）に等しいことを記述している．（a.3.43）を使用すると特殊相対性理論での質点の全エネルギー（a.3.30）は（a.3.44）で記述できる．

$\Delta K = \Delta K_S \cdots (\text{a}.3.43)$

$E_{\text{S}} = K + E_0, (m \times c^2 = E_0 + K) \cdots (\text{a}.3.44)$

内部エネルギーの変化量（a.3.39）の右辺を使用すると，質点の静止エネルギーの変化量（a.3.38）は（a.3.45）で記述できる．(a.3.45) の左辺に (a.3.24) を代入すると，(a.3.46) を記述できる．(a.3.46) では静止エネルギーの変化量 (a.3.24) を質点系のポテンシャルエネルギーの変化量および内部エネルギーの変化量で記述している．

$\Delta E_0 = \Delta U + \Delta E_{\text{internal}} \cdots (\text{a}.3.45)$

$\Delta E_0 = \Delta m_0 \times c^2 \cdots (\text{a}.3.24)$

$\Delta m_0 \times c^2 = \Delta U + \Delta E_{\text{internal}} \cdots (\text{a}.3.46)$

（a.3.2）および（a.3.15）では，エネルギーの保存および質量の保存を説明しているものと解釈できる．ニュートン力学では，エネルギーの保存および質量の保存はひとつの法則で説明することができなかったものと扱われる．一方，アインシュタインの特殊相対性理論ではエネルギーの保存および質量の保存を（a.3.2）および（a.3.15）ではひとつの式で説明することができる．このことは，アインシュタインの特殊相対性理論の重要な成果のひとつとして，一般には扱われる．上述でのアインシュタインの特殊相対性理論のエネルギーおよび相対論的質量の変換については文献１９に説明をしてある．文献１９の変換は２つの慣性座標系の間で記述する変換のことである．

$$E = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \times c^2 \ \text{J} \cdots (\text{a}.3.2)$$

$E = m_S \times c^2 \cdots (\text{a}.3.15)$

次は，量子論でのエネルギーについての説明をする．白熱電球のフィラメントのように物体が光を放つことがある．そのような光を放つ現象は熱の放射――熱放射とも呼ぶ．――もしている．この熱の放射ではエネルギー差を放出していることになる．この熱の放射のエネルギー差は，電磁波のエネルギーとして説明することができる．

電磁波のエネルギーの研究で，空洞放射と呼ばれる熱の放射についての研究が行われた．一様な温度になっている空洞――或る物体の壁を貫いて開けた小さな穴のこと．――を構成することで，理想的な放射を空洞放射では考える．ここでの理想的な放射のスペクトルの特性は，空洞を構成している壁の熱のみで決定する．そして，その放射のスペクトルの特性は空洞の材質，形および大きさによらないものとする．ここでのスペクトルの特性は，スペクトル放射の曲線で放射のエネルギーの出力を記録して，その特性を表わす．ただし，一般には，光のスペクトルとは光をスリットおよびプリズムなどを使用して，波長によって分類して，その光のエネルギーを使ってプレートなどに記録した波長の成分を示した線・帯などで表示される映像のことである．

１９００年に，ドイツの物理学者であるマックス　プランク（Max Planck）が空洞放射でのエネルギーの量子化を仮定したことが報告されている．そのエネルギーの量子化は次のようなものとして説明されている．空洞放射が生じる空洞を構成している壁内での電子による振動子を考える．その振動子は，エネルギー（a.3.47）で記述できる不連続なエネルギー値から成る或る集合を構成しているエネルギーのみを吸収あるいは放出をできるものと仮定する．ただし，（a.3.47）の右辺に記述した（a.3.48）はプランク定数（Planck constant）と呼ばれるものである．そして，（a.3.47）の右辺に記述した（a.3.49）は量子数と呼ばれるものである．量子数（a.3.49）は０以上の整数である．（a.3.47）の右辺に記述した（a.3.50）は周波数である．

$E = n \cdot h \cdot \nu$ J$\cdots$(a.3.47) プランクのエネルギーの量子化

$h = 6.626\,070\,040(81) \times 10^{-34}$ J s$\cdots$(a.3.48) プランク定数

$n = 0,1,2,\cdots$ $\cdots$(a.3.49) 量子数

ν Hz$\cdots$(a.3.50) 周波数

（a.3.47）を使用したエネルギーの不連続性のために，その振動子は如何なるエネルギーでも吸収あるいは放出できると言うことにはならない．エネルギー（a.3.47）では周波数（a.3.50）を固定して定数として扱っても量子数（a.3.49）が大きくなると，そのエネルギーの値は大きくなる．そして，量子数（a.3.49）は０以上の整数であるので，エネルギー（a.3.47）の値は不連続に大きくなっていく．一方，エネルギー（a.3.47）の量子数（a.3.49）を固定して定数として扱い，周波数（a.3.50）を大きくしていくとエネルギー（a.3.47）の値は大きくなる．そして，ここでのプランクの仮定での振動子は或る集合を構成しているエネルギーのみを吸収あるいは放出できる．このために，その振動子に決まっている周波数（a.3.50）でないと，その集合を構成するエネルギーにはならない．

１９０５年に，次のような仮定をアインシュタインがしたものとして報告されている．光は，その光のエネルギーが集中して，小さな塊として振る舞う，ことを仮定した．その仮定された光のエネルギーの小さな塊を光量子（light quantum）と呼ぶ．そして，ひとつの光量子は (a.3.51) のエネルギーを持つ．(a.3.51) の右辺にはプランク定数 (a.3.48) を記述している．（a.3.51）の右辺には，その光の周波数（a.3.52）を記述している．

$E = h \cdot \nu$ J$\cdots$(a.3.51) 光量子のエネルギー

ν Hz$\cdots$(a.3.52) 周波数

古典理論での電磁気学では，光は電磁波となる波であることを説明している．物理光学でも光を波動として扱っている．幾何光学でも波の射線を使用して光線を説明することができる．一方，光量子の仮定を使用すると，光線を光量子の連続であるように振る舞うもの，と解釈する．２００８年現在では，「コンプトン効果」と呼ばれる実験で光量子の小さな塊を物理学での粒子として扱えることを，一般に認められている．このことで，光量子の小さな塊を粒子として扱い，「光子」と呼んで光量子とは異なる物理学上の解釈であることを区別する．

（a.3.51）ではプランクの空洞放射でのエネルギーの量子化の（a.3.47）を応用して，アインシュタインが光量子のエネルギーを仮定しているものとして報告されている．１９２３年にはコンプトンは「コンプトン効果」と呼ばれる実験で光子として扱える場合を示したこと，が報告されている．

ⅳ.ローレンツ変換に近似する場合の絶対時間および絶対空間で導出するガリレイ変換[11),17),18),27)]

慣性座標系には，S および S_1 で時間および空間を異なるものとして記述する．慣性座標系は，速さ（a.4.1）で x 軸方向に等速度運動していることを S および S_1 の慣性座標系上で互いに観測できることを仮定している．ここで，慣性座標系で使用する時計はひとつではない．慣性座標系上に有る異なる時計で観測する．時計は，慣性座標系 S 上の各位置（a.4.2）に定義されている．慣性座標系 S 上の各時計は，同期が取られている．慣性座標系 S_1 でも同様である．慣性座標系 S の各位置（a.4.2）の時計は，慣性座標系 S_1 の各位置（a.4.3）の時計とは同期を取っていない．

$u \cdots (\text{a.4.1})$

$(x, y, z) \cdots (\text{a.4.2})$

$(x_1, y_1, z_1) \cdots (\text{a.4.3})$

慣性座標系 S の時計の時点は，（a.4.4）で記述する．慣性座標系 S 上では時点（a.4.4）の各時計の同期が取られているので，時点は（a.4.4）のみで記述できる．

$t \cdots (\text{a.4.4})$

慣性座標系 S_1 の時計の時点は，（a.4.5）で記述する．慣性座標系 S_1 上では時点（a.4.5）の各時計の同期が取られているので，時点は（a.4.5）のみで記述できる．

$t_1 \cdots (\text{a.4.5})$

（a.4.6）～（a.4.9）がローレンツ変換式（Lorentz transformation equations）である．ローレンツ変換で使用する係数（coefficient）に（a.4.10）を仮定している．時点の変換式（a.4.9）および係数（a.4.10）に真空中の光の速さ（a.3.3）を記述してある．ローレンツ変換で使用される慣性座標系は，アインシュタインの特殊相対性理論のものである――図 a.4.1 に表示している．――．

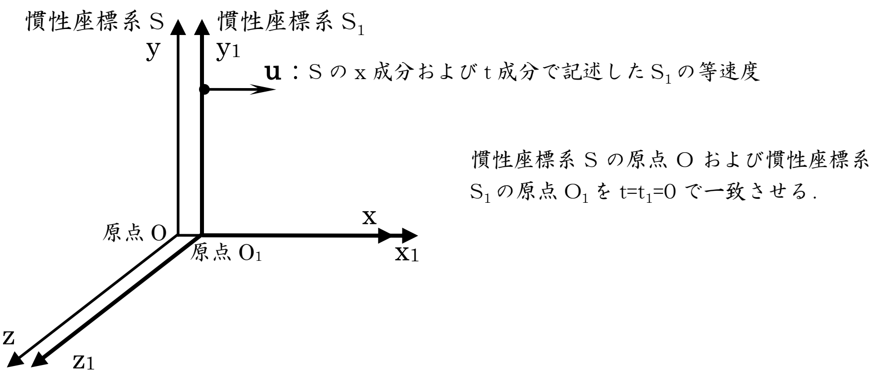


図 a.4.1　アインシュタインの特殊相対性理論での慣性座標

$x_1 = \gamma \cdot (x - u \cdot t) \cdots (\text{a.4.6})$ 慣性座標系 S_1 の x_1 軸の値

$y_1 = y \cdots (\text{a.4.7})$ 慣性座標系 S_1 の y_1 軸の値

$z_1 = z \cdots (\text{a.4.8})$ 慣性座標系 S_1 の z_1 軸の値

$t_1 = \gamma \cdot \left(t - \frac{u \cdot x}{c^2} \right) \cdots (\text{a.4.9})$ 慣性座標系 S_1 の時間軸 t_1 の値

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}} (= \text{const.}) \cdots (\text{a.4.10})$$

$c = 299\,792\,458\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}} \cdots (\mathrm{a}.3.3)$ 真空中の光の速さ

ローレンツ変換の（a.4.6）および（a.4.9）では，慣性座標系（inertial coordinate-system）の等速度の速さ（a.4.1）を真空中の光の速さ（a.3.3）と比較している．このことで，各慣性座標系間の位置および時点の変換が決定する．時点の変換式（a.4.9）では，時点および位置の相対性を説明している．慣性座標系 S の x 軸上の位置 x に定義した時計の時点（a.4.4）は，慣性座標系 S_1 の x_1 軸上の位置 x_1 に定義した時計の時点（a.4.5）に変換できることを（a.4.9）で記述している．時点の変換（a.4.9）では，絶対時間（absolute time）を否定している．ローレンツ変換の慣性座標系の速さ（a.4.1）は（a.4.11）のように真空中の光の速さ（a.3.3）以上にはならない．ただし，各時計は，その慣性座標系上の各位置——x 軸，y 軸および z 軸で座標を与える．——に定義している．

$0 \le u < c \cdots (\mathrm{a}.4.11)$

係数（a.4.10）は（a.4.12）のように値を得る．係数（a.4.10）では，慣性座標系 S および慣性座標系 S_1 が互いに等速度の速さ（a.4.1）で移動していることを（a.4.11）で仮定している．このことでは，（a.4.10）で絶対空間（absolute space）を否定している．このことは，時点の変換（a.4.9）および位置の変換（a.4.6）でも記述している．

$1 \le \gamma < \infty \cdots (\mathrm{a}.4.12)$

ローレンツ変換の慣性座標系上では，真空中の光の速さ（speed of light in a vacuum）で光が等速直線運動していることを公理としている．この公理は，特殊相対性理論（the special theory of relativity）で採用している．光が電磁波であることは電磁気学（electromagnetism）で説明している．電磁波が持つエネルギーを保証されることで，特殊相対性理論ではエネルギーを慣性質量（inertial mass）に変換できる．この慣性質量を使用して，ローレンツ変換の慣性座標系上では真空中の光の速さで等速度運動する光の粒子を仮定している．その光の粒子は，慣性の法則（the law of inertia）を満足している．その粒子の慣性質量で，慣性の法則を観測することができる．慣性の法則は，光の粒子の運動エネルギー（kinetic energy）の変化量で観測できる．慣性質量の変化量は，質点の持つ全エネルギーの変化量を決定できる．慣性質量が重力質量（gravitational mass）に等しいことでは，重力質量の変化量の観測で質点の持つ全エネルギーの変化量を決定できる．重力質量の観測では，一般相対性理論（the general theory of relativity）を使用する．真空中の光の速さ（speed of light in a vacuum）が変化することでは，重力場を仮定している加速度座標系上での慣性座標系上の真空中の光の観測である．光速不変の原理が慣性座標系上で保証されている．慣性座標系上では，慣性の法則が保証されている．加速度座標系上では，慣性の法則は保証されていない．光の粒子の速さが変化することでは，その光の粒子の慣性質量が変化する．光の粒子の静止質量（rest mass）には零を仮定している．光の粒子の慣性質量の変化は，その光の粒子の運動エネルギーの変化を決定できる．

真空中の光の速さ（speed of light in a vacuum）が変化すると，真空中の光で時間を観測しているので時間の変化率が変化する．重力場が時間に静的であるか動的であるかを観測することで，ニュートンの万有引力の法則（Newton's law of universal gravitation）が近似で成立するかどうかを仮定する．その時間では，重力場（gravitational field）を仮定している加速度座標系の加速度で近似の説明ができる．光速不変の原理（the principle of the constancy of the velocity of light）が保証されている慣性座標系上では，重力場は説明できない上にニュートンの万有引力の法則は導出できない．ローレンツ変換の慣性座標系上で説明する慣性質量（inertial mass）を使用して，重力質量（gravitational mass）を説明できないことで慣性の法則を保証できる．このような慣性の法則（the law of inertia）の保証では，絶対時間を否定できる——慣性の法則が保証できない加速度座標系では，絶対空間は否定できる．——．真空中の光の速さは，（a.3.3）のように定数である．この真空中の光の速さ（a.3.3）の光速不変の原理は，ガリレイ変換（a.4.13）～（a.4.16）に従わない．

$c = 299\,792\,458\,\dfrac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}} \cdots (\mathrm{a}.3.3)$ 真空中の光の速さ

ニュートン力学（Newtonian mechanics）の絶対時間での真空中の光の速さ（speed of light in a vacuum）についての議論になる．絶対空間では，慣性座標系および真空中の光の速さを観測する．その絶対空間上で使用する慣性座標系上の光の粒子の速さは，ガリレイ変換では（a.3.3）を保つことができない．ローレンツ変換で真空中の光の速さが無限大に発散することを仮定すると，ガリレイ変換を導出できる．特殊相対性理論（the special theory of relativity）の慣性座標系上の各位置に定義した時計は，真空中の光の速さで時間を観測する．その真空中の光の速さの無限大への発散を仮定すると，各慣性座標系上の各位置に定義した時計の時間はガリレイ変換の絶対時間（absolute time）として扱うことができる．このことは，付録ⅳの後で説明している．ニュートン力学の慣性座標系で，マクスウェルの方程式系（Maxwell's Equations）を扱うことができるものか問題が生じる．マクスウェルの方程式系——本書の第４回の付録ⅳに掲載している．——の真空中の光の速さは定数である．その定数は，観測では（a.3.3）のように報告できる．この報告では，真空中の光の速さが無限大に発散していない．これでは，絶対時間を真空中の光の速さ（a.3.3）で説明できない．絶対時間の説明では，無限大の速さで移動する質点で時間を観測することは上述の光の粒子についての議論で仮定できる．時間を観測する真空中の光の速さが無限大に発散することで，慣性座標系の各位置に定義した時計は絶対空間（absolute space）に仮定した絶対時間の時計の時間に一致する．この意味では，絶対空間で観測する真空中の光の速さは無限大に発散することで，特殊相対性理論の慣性座標系上で観測するものとは異なる．光速不変の原理（the principle of the constancy of the velocity of light）が絶対空間で成立することを仮定すると，その絶対空間が慣性座標系と異なることを失う．慣性座標系から絶対空間を観測すると，絶対空間が等速直線運動をしている．絶対空間で慣性座標系の等速度を観測して，その慣性座標系上の質点の速度を観測する．他方の慣性座標系上で，その質点の速度を観測するとガリレイ変換で記述できるものと仮定する．ガリレイ変換では，絶対速度（the absolute velocity）および絶対加速度（the absolute acceleration）を使用する．この絶対速度では，速度の相対性を説明できない．各座標系が等速直線運動して光速不変の原理が成立することで，基準となる時計は確認できない．このことで，速度は時間の相対性を仮定して観測することになる．この時間の相対性の時間は絶対時間ではない．光速不変の原理が保証されている慣性座標系では，絶対空間のように基準となる時計を定義している座標系はないものと扱う．このことでは，慣性座標系を観測する座標系が，光速不変の原理を保証されている慣性座標系になる．絶対空間上で光速不変の原理を仮定している．これらのことでは，絶対空間ではなく慣性座標系として扱える．その光の粒子の速さ（a.3.3）が満足する慣性の法則を観測できる各座標系は，絶対での静止をしていない慣性座標系である——特殊相対性理論の慣性座標系のことである．——．各座標系が，すべて絶対での静止をしていると各座標系が等速直線運動している仮定に反する．この絶対での静止をしていることでは，ローレンツ変換を導出できない．（a.4.9）の時間が相対的に異なることでは，絶対空間で採用している絶対時間ではない．（a.4.9）の時間では，時間の基準となる座標系が確認できていない．このことで，ニュートン力学（Newtonian mechanics）のように基準となる時計を絶対空間に仮定して慣性座標系の速さを観測するものとは異なる．ローレンツ変換の時点の変換（a.4.9）では，真空中の光で時計が時間を記録する．この時計の時点を用いることで，慣性座標系上で真空中の光が等速直線運動していることを保証している．異なる速度で等速直線運動している各慣性座標系を仮定して，係数（a.4.10）は導出されている．絶対時間および絶対空間を使用するニュートン力学の慣性座標系では，マクスウェルの方程式系（Maxwell's Equations）を扱えないことになる．このことで，ニュートン力学を修正（modification）することになる．

各慣性座標系上で真空中の光の速さで光の粒子が等速度運動し，各慣性座標系上での速度の相対性を説明できる——加速度座標系での速度の相対性の近似の計算は文献３２の目次の「重力場での光速不変の原理」で説明している．——．図 a.4.2 および図 a.4.3 は，その速度の相対性について考える図である．図 a.4.2 では，慣性座標系 S 上に垂直上方に真

空中の光を真空中の光の速さで放出している――y 軸方向に真空中の光が等速度運動することを仮定できる．――．図 a.4.3 では，慣性座標系 S 上で垂直上方に放出した真空中の光を慣性座標系 S_1 上から観察した場合の図である．慣性座標系 S_1 上では，慣性座標系 S 上の真空中の光は慣性座標系の x 軸方向である水平方向に等速度の速さ（a.4.1）で移動をしているように観察できる．このために，慣性座標系 S_1 上では，図 a.4.3 のように斜め上方に等速度運動しているように観察できる．この現象は，速度の相対性を説明している．このことは，速度の変換式（a.7.1）～（a.7.3）でも導出できる．すべての慣性座標系は，空間に等速直線運動している．その空間内で光速不変の原理が成立している．空間には時間を仮定して，各慣性座標系で相対的に異なる各時空として扱うことになる．慣性座標系が存在している空間は時空に位置情報を与える空間として仮定でき，時空の時点とは分離できない様子をローレンツ変換で記述している．ひとつの時空に位置情報を与える空間の部分を仮定している．その仮定されている空間に，他の慣性座標系が等速直線運動できることを仮定している．時空ごとに，そのように他の慣性座標系が等速直線運動できる空間を仮定している．このように空間には時間をそれぞれ仮定している慣性座標系が等速直線運動をしている．このことで，各慣性座標系から他方の慣性座標系の等速度を観測できる．このような慣性座標系の等速直線運動の観察では，絶対空間を使用していない．このような時間および速度の相対性で各座標系が，慣性の法則を保証している等速直線運動している慣性座標系であることを説明できる．

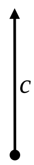


図 a.4.2　慣性座標系 S 上の真空中の光の速さ

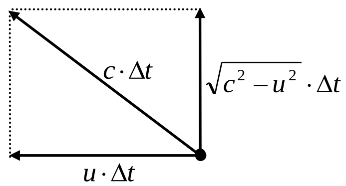


図 a.4.3　慣性座標系 S_1 上で観測する慣性座標系 S の真空中の光の速さ

ニュートン力学では、絶対空間で慣性座標系を観測する．アインシュタインの特殊相対性理論では，ひとつの慣性座標系で他の慣性座標系を観測する．これらの観測では，慣性の法則が成立している．観測者が静止しているひとつの加速度座標系に重力場（gravitational field）を仮定して，他の加速度座標系および慣性座標系を観測することを仮定できる．この場合は，一般相対性理論で説明する．観測者が静止している加速度座標系の加速度に等しい他の加速度座標系は，――その観測者が静止しているひとつの加速度座標系上では――等速直線運動しているように観測できる．さらに，その観測者が静止しているひとつの加速度座標系上では慣性座標系が加速度運動しているように観測できる．この意味では，慣性の法則が成立していない．慣性の法則が成立しなくても，座標系間の相対的な時間が異なる座標系の速さで近似の計算が（a.4.9）に成立する場合を仮定できる．

$$t_1=\gamma\cdot\left(t-\frac{u\cdot x}{c^2}\right)\cdots\text{(a.4.9)}$$ 慣性座標系 S_1 の時間軸 t_1 の値

このようなローレンツ変換の導出を可能にしていることで，各座標系は等速直線運動している座標系で慣性の法則を満足する．この意味で，各座標系は慣性座標系である――ニュートン力学の慣性座標系とは異なる．――．

（a.4.13）～（a.4.16）は，ガリレイ変換式（Galilean transformation equations）である．ガリレイ変換の時点の変換（a.4.16）では，慣性座標系 S の各位置に定義した時計の時点（a.4.4）は慣性座標系 S_1 の各位置に定義した時計の時

点（a.4.5）に等しい．時点の変換（a.4.16）で，絶対時間を使用していることになる．ガリレイ変換（a.4.13）～（a.4.16）では，座標系が等速度運動していないで絶対に静止していることを否定できない．このことで，絶対空間を使用していることになる．ガリレイ変換の（a.4.13）では，慣性座標系上で等速直線運動をしているものを保証していない．後で説明するように，ローレンツ変換で導出できる近似の式として成立するガリレイ変換である．この近似は，慣性座標系の速さにも使用する比較である．等速度運動あるいは加速度運動であることの決定は，真空中の光を扱う方法で選択できる．この選択は，慣性の法則が成立する座標系の決定になる．ローレンツ変換では，真空中の光の速さで光が等速直線運動していることを保証している．絶対時間および絶対空間は，ニュートン力学（Newtonian mechanics）で使用している．ニュートン力学の慣性座標系上では，各位置に定義した時計はすべて等しく同期して同じ時間を示す．このことでは，各位置に時計を定義する必要はなく時計はひとつで十分である．その時計が絶対空間上で観測する時間の時計であることを（a.4.13）の右辺に記述しているものと扱える．ただし，ガリレイ変換では，絶対空間で慣性座標系 S および S 上の質点の速度の観測を（a.4.13）の右辺に記述して，その左辺に慣性座標系 S_1 上の位置を記述するものと解釈できる．

$$x_1 = x - u \cdot t \cdots (\mathrm{a.4.13})$$

$$y_1 = y \cdots (\mathrm{a.4.14})$$

$$z_1 = z \cdots (\mathrm{a.4.15})$$

$$t_1 = t \cdots (\mathrm{a.4.16})$$

ガリレイ変換では，慣性座標系 S の等速度の速さ（a.4.1）には不等式（a.4.17）を採用する．不等式（a.4.17）では，0 以上の速さで等速度運動している．この意味では，質点が無限大の速さで等速度運動できる．このことは，特殊相対性理論で質点が真空中の速さを超えることができないこととは異なる．

$$0 \le u \cdots (\mathrm{a.4.17})$$

空間を移動する際に，速さに限界があることでは移動時間を要する．慣性座標系上の各位置に定義した時計は，すべて同期が取られている．ひとつの慣性座標系上のすべての空間の位置で同じ時点を示す．時点の隔たりである時間（a.4.18）が零であることでは，ローレンツ変換およびガリレイ変換で距離の変換（a.4.19）が零である．ここでの時間および距離が零に向かうことでは，速度の変換でローレンツ変換とガリレイ変換とは異なる．速度の変換は，文献１８で導出している．

$$\Delta t_1 = \Delta t = 0 \cdots (\mathrm{a.4.18})$$

$$\Delta x_1 = \Delta x = x_1 - x_1 = x - x = 0 \cdots (\mathrm{a.4.19})$$

ローレンツ変換の係数（a.4.10）は，（a.4.20）のように書き直すことができる．係数（a.4.20）は，近似式（a.4.21）に書き直すことができる．近似式（a.4.21）は，さらに（a.4.22）に書き直せる場合がある．

$$\gamma = \left(1 - \frac{u^2}{c^2}\right)^{-\frac{1}{2}} \cdots (\mathrm{a.4.20})$$

$$\gamma \approx 1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{u^2}{c^2} \cdots (\mathrm{a.4.21})$$

$$\gamma \approx 1 \cdots (\mathrm{a.4.22})$$

ローレンツ変換の位置の変換（a.4.6）は，近似式（a.4.22）を使用するとガリレイ変換の位置の変換（a.4.13）に近似の記述（a.4.23）になる．この意味では，ガリレイ変換の位置の変換（a.4.13）は，ローレンツ変換の位置の変換（a.4.6）に近似している場合がある．

$$x_1 \approx x - u \cdot t \cdots (\mathrm{a.4.23})$$

ローレンツ変換の時点の変換（a.4.9）では，その括弧の中に記述した第２項に近似式（a.4.24）が記述できる場合がある．近似式（a.4.24）は，x 軸上の位置および慣性座標系の速さ（a.4.1）の積を真空中の光の速さ（a.3.3）の２乗と比較している．このことでは，慣性座標系の速さ（a.4.1）で（a.4.24）が成立することは，x 軸上の位置との相対性に説明する．

$t_1 = \gamma \cdot \left(t - \frac{u \cdot x}{c^2} \right) \cdots (\mathrm{a.4.9})$ 慣性座標系 S_1 の時間軸 t_1 の値

$\frac{u \cdot x}{c^2} \approx 0 \cdots (\mathrm{a.4.24})$ 時点の変換式（a.4.9）の右辺に記述した第２項の近似式

近似式（a.4.24）および（a.4.22）を使用して，ローレンツ変換の時点の変換式（a.4.9）はガリレイ変換の時点の変換式（a.4.16）に近似している場合を（a.4.25）で記述できる．特殊相対性理論では，質点は真空中の光の速さ（a.3.3）より速くはなれないことを導出できる．ローレンツ変換の時点の変換式（a.4.9）が（a.4.25）で記述できる場合では，慣性座標系の速さ（a.4.1）は真空中の光の速さ（a.3.3）より十分に遅い．この意味では，ガリレイ変換の時点の変換（a.4.16）は，ローレンツ変換の時点の変換（a.4.9）に近似している場合がある．

$t_1 \approx t \cdots (\mathrm{a.4.25})$

ニュートン力学で使用するガリレイ変換では，質点の速さは無限大に発散が可能である．ローレンツ変換では，慣性座標系上の各位置に定義している時計は真空中の光の速さ（a.3.3）で時間を観測する．ローレンツ変換で真空中の光の速さが（a.4.26）のように発散することを仮定する．ローレンツ変換の時点の変換式（a.4.9）に，（a.4.26）の極限値を計算すると（a.4.27）になる．極限値（a.4.27）は，極限値（a.4.28）に記述できる．ローレンツ変換の時点の変換での極限値（a.4.28）では，ガリレイ変換の時点の変換（a.4.16）になる．

$c \to \infty \cdots (\mathrm{a.4.26})$

$$\lim_{c \to \infty} t_1 = \lim_{c \to \infty} \left\{ \gamma \cdot \left(t - \frac{u \cdot x}{c^2} \right) \right\} \cdots (\mathrm{a.4.27})$$

$$\lim_{c \to \infty} t_1 = t \cdots (\mathrm{a.4.28})$$

ローレンツ変換の位置の変換式（a.4.6）に，（a.4.26）の極限値を計算すると（a.4.29）になる．極限値（a.4.29）は，極限値(a.4.30)に記述できる．ローレンツ変換の位置の変換での極限値(a.4.30)では，ガリレイ変換の位置の変換(a.4.13)になる．

$$\lim_{c \to \infty} x_1 = \lim_{c \to \infty} \{ \gamma \cdot (x - u \cdot t) \} \cdots (\mathrm{a.4.29})$$

$$\lim_{c \to \infty} x_1 = x - u \cdot t \cdots (\mathrm{a.4.30})$$

v.２重性（duality） 12)，17)，19)，22)，23)，24)，25)，26)，27)，28)，31)

光量子のエネルギーは，（a.3.51）で仮定している．この量子エネルギーは，光子（photon）の量子エネルギーである．光子は，光の粒子である．電磁気学で，光は電磁波であることを説明する．光学でも，光は波であるものとして説明している．光には，波（wave）および粒子（particle）の性質を仮定している．

$E = h \cdot \nu \ \mathrm{J} \cdots (\mathrm{a.3.51})$ 光量子のエネルギー

慣性座標系上で，等速度運動している質点を仮定する．その等速度の速さは，（a.5.1）で記述する．その等速度運動している質点がエネルギーを持つことを仮定する．そのエネルギーは量子エネルギー（a.5.2）であるものと仮定する．量

子エネルギー（a.5.2）の右辺には，質点が備える振動数（a.5.3）を記述している．量子エネルギー（a.5.2）は，絶対空間および絶対時間では議論しないものとして２０１７年現在の著者は扱う．特殊相対性理論の慣性座標系を仮定している．さらに，加速度座標系には，一般相対性理論のものを仮定している．

$v_{S\_\mathrm{masspoint}} \cdots (\mathrm{a.5.1})$ 質点の等速度の速さ

$E_{S\_v_{\mathrm{wave}}}\left(v_{S\_\mathrm{masspoint}}\right) = h \cdot \nu_{S\_v_{\mathrm{wave}}} \cdots (\mathrm{a.5.2})$ 質点の量子エネルギー

$\nu_{S\_v_{\mathrm{wave}}} \cdots (\mathrm{a.5.3})$ 質点が備える振動数

慣性座標系上を速さ（a.5.1）で等速度運動している質点の持つ慣性質量（inertial mass）は，特殊相対性理論の（a.5.4）で記述できる．質点の運動量（momentum）の大きさは，（a.5.5）で記述できる．

$m_{S\_v_{\mathrm{wave}}}\left(v_{S\_\mathrm{masspoint}}\right) \cdots (\mathrm{a.5.4})$ 慣性座標系上の質点の慣性質量

$p_{S\_v_{\mathrm{wave}}}(t) = m_{S\_v_{\mathrm{wave}}}\left(v_{S\_\mathrm{masspoint}}\right) \cdot v_{S\_\mathrm{masspoint}}(t) \cdots (\mathrm{a.5.5})$ 質点の運動量

慣性座標系上での質点の運動量（a.5.5）は，（a.5.6）で記述できる．運動量（a.5.6）の右辺には，質点が備える振動数（a.5.3）の波長（wavelength）（a.5.7）およびプランク定数（a.3.48）を記述している．

$p_{S\_v_{\mathrm{wave}}}(t) = \dfrac{h}{\lambda_{S\_\mathrm{wave}}}, \left(\lambda_{S\_\mathrm{wave}} \neq 0\right) \cdots (\mathrm{a.5.6})$ 運動量および質点が備える振動数の波長との関係

$\lambda_{S\_\mathrm{wave}} \cdots (\mathrm{a.5.7})$ 質点が備える振動数の波長

$h = 6.626\,070\,040(81) \times 10^{-34}\ \mathrm{J\,s} \cdots (\mathrm{a.3.48})$ プランク定数

質点が持つ全エネルギー（a.5.8）は，特殊相対性理論で導出できた．（a.5.8）は，文献１９で導出している．質点が持つ全エネルギー（a.5.8）の右辺には，質点が持つ慣性質量（a.5.4）および真空中の光の速さ（a.3.3）を記述している．

$E_{S\_v_{\mathrm{wave}}}\left(v_{S\_\mathrm{masspoint}}\right) = m_{S\_v_{\mathrm{wave}}}\left(v_{S\_\mathrm{masspoint}}\right) \cdot c^2 \cdots (\mathrm{a.5.8})$ 質点の持つ全エネルギー

$c = 299\,792\,458\,\dfrac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}} \cdots (\mathrm{a.3.3})$ 真空中の光の速さ

質点が備える振動数（a.5.9）は，真空中の光の量子エネルギーを使用することで導出できる．文献２７の「理論物理学での波の関数６」で，質点が備える振動数（a.5.9）を導出した．

$\nu_{S\_v_{\mathrm{wave}}} = \dfrac{m_{S\_v_{\mathrm{wave}}}\left(v_{S\_\mathrm{masspoint}}\right) \cdot c^2}{h} \cdots (\mathrm{a.5.9})$ 質点が備える振動数

運動量(a.5.6)の右辺の波長は，質点が備える振動数(a.5.9)を導出する際に使用する真空中の光子の備える波長(a.5.10)を使用することで（a.5.11）になる．その質点が備える波長（a.5.11）には，その質点の静止質量（a.5.12）を記述している．質点の静止質量（a.5.12）は，著者が独自に文献１９で定義したものである．

$\lambda_{S\_c} \cdots (\mathrm{a.5.10})$ 真空中の光子の備える波長

$\lambda_{S\_\mathrm{wave}} = \dfrac{\lambda_{S\_c}}{\sqrt{1 - \dfrac{\left(m_{0S\_\mathrm{masspoint}}\right)^2}{\left(m_{S\_v_{\mathrm{wave}}}\left(v_{S\_\mathrm{masspoint}}\right)\right)^2}}}, \left(v_{S\_\mathrm{masspoint}} \neq 0\right) \cdots (\mathrm{a.5.11})$ 質点が備える波長

$m_{0S\_\mathrm{masspoint}} \equiv m_{S\_v_{\mathrm{wave}}}\left(v_{S\_\mathrm{masspoint}}\right) \cdot \sqrt{1 - \left(\dfrac{v_{S\_\mathrm{masspoint}}}{c}\right)^2}, \left(0 \leq v_{S\_\mathrm{masspoint}} \leq c\right) \cdots (\mathrm{a.5.12})$ 静止質量の定義その光子の備える波長

波長（a.5.11）を導出する際に，その質点の等速度の速さ（a.5.1）および質点が備える振動数（a.5.9）の波の速さ（a.5.13）との関係は（a.5.14）になることを文献２７「理論物理学での波の関数６」で仮定した．特殊相対性理論の慣性座標系での計算であるので，質点の速さは真空中の光の速さまでとなる．このことを使用すると（a.5.14）では，質点が備える波

の速さは，真空中の光の速さを超えることになる．

$v_{S\_\mathrm{wave}}(t)=v_{S\_v_{\mathrm{wave}}}\cdot\lambda_{S\_\mathrm{wave}},(\lambda_{S\_\mathrm{vwave}}\neq 0)\cdots$(a.5.13) 質点が備える振動数の波の速さ

$$\frac{v_{S\_\mathrm{wave}}(t)}{c}\cdot\frac{v_{S\_\mathrm{masspoint}}(t)}{c}=1,(v_{S\_\mathrm{masspoint}}\neq 0)\cdots\text{(a.5.14)}$$

（a.5.14）は，運動量（a.5.6）を導出する際に仮定したものである．このことは，特殊相対性理論での導出であるので電磁力を扱うことはできても重力は扱うことはできない．このような限界では，一般相対性理論で重力を扱う際に特殊相対性理論の慣性座標系を使用するので（a.5.14）は重力でも考慮は可能である．ここでの波は，質点が存在する位置に波長（a.5.10）を仮定している．波長は波の長さである．（a.5.4）の質点は慣性質量（inertial mass）を持った点である．質点の位置を示す座標の点は，その質点が備える波長の長さの区間内に存在するものと仮定できる．その区間内の位置は，質点が備える振動数（a.5.9）の波で質点が存在する座標の点がどこら辺にあるものかを考えるための情報となる．そのような波は，振動数（a.5.9）および波長（a.5.11）で仮定する群速度の波の群れで説明する波である．群速度（a.5.15）では，波数（a.5.16）を使用している．群速度（a.5.17）は，慣性座標系上で等速度運動している質点の速さ（a.5.1）に等しい．

$$v_{\mathrm{group\ velocity}}=\frac{\mathrm{d}v_{S\_v_{\mathrm{wave}}}}{\mathrm{d}\kappa_{S\_\mathrm{wave}}}\cdots\text{(a.5.15)群速度}$$

$$\kappa_{S\_\mathrm{wave}}=\frac{1}{\lambda_{S\_\mathrm{wave}}},(\lambda_{S\_\mathrm{wave}}\neq 0)\cdots\text{(a.5.16)波数}$$

$v_{\mathrm{groupvelocity}}=v_{S\_\mathrm{masspoint}}\cdots$(a.5.17) 質点の等速度の速さ

$v_{S\_\mathrm{masspoint}}\cdots$(a.5.1) 質点の等速度の速さ

特殊相対性理論の運動エネルギーは（a.3.11）であることを説明した．慣性質量を使用すると，（a.5.18）で記述できる．（a.5.18）の右辺には，慣性質量の変化量（a.5.19）を記述しているので運動エネルギー（a.5.18）は（a.5.20）で記述できる．

$K=E-E_0$ J$\cdots$(a.3.11) 運動エネルギー

$K=m_{S\_v_{\mathrm{wave}}}(v_{S\_\mathrm{masspoint}})\cdot c^2-(m_{0S\_\mathrm{masspoint}})\cdot c^2\cdots$(a.5.18) 質点が持つ全エネルギーで記述する運動エネルギー

$\Delta m_{S\_v_{\mathrm{wave}}}=m_{S\_v_{\mathrm{wave}}}(v_{S\_\mathrm{masspoint}})-m_{0S\_\mathrm{masspoint}}\cdots$(a.5.19) 静止質量を慣性質量から引いた慣性質量

$K=\Delta m_{S\_v_{\mathrm{wave}}}\cdot c^2\cdots$(a.5.20) 慣性質量（a.5.19）で記述する運動エネルギー

真空中の光の速さよりも十分に質点の速さが遅いことを（a.5.21）で仮定する．仮定（a.5.21）では，ローレンツ変換はガリレイ変換に近似する．

$c\gg v_{S\_\mathrm{masspoint}}\cdots$(a.5.21) ローレンツ変換がガリレイ変換に近似する場合の質点の等速度の速さ

仮定（a.5.21）で，質点の慣性質量（inertial mass）の変化量（a.5.19）に近似値（a.5.22）を仮定する．仮定（a.5.22）では，運動エネルギー（a.5.18）は，運動エネルギーの近似値（a.5.23）で記述できるものと扱う．

$(\Delta m_{S\_v_{\mathrm{wave}}})^2\approx 0\cdots$(a.5.22) 近似値でゼロ

$$K\approx\frac{m_{S\_v_{\mathrm{wave}}}(v_{S\_\mathrm{masspoint}})}{2}\cdot(v_{S\_\mathrm{masspoint}})^2\cdots\text{(a.5.23)運動エネルギーの近似値}$$

運動エネルギーの近似値（a.5.23）の右辺は，ニュートン力学での運動エネルギーの記述に相似である．慣性質量（a.5.4）および静止質量（a.5.12）は，（a.5.24）の関係にある．（a.5.24）を使用すると，運動エネルギーの近似値（a.5.23）は

（a.5.25）の関係にある．

$m_{S\_v_{\text{wave}}}\left(v_{S\_\text{masspoint}}\right)\cdots$(a.5.4)慣性座標系上の質点の慣性質量

$$m_{0S\_\text{masspoint}} \equiv m_{S\_v_{\text{wave}}}\left(v_{S\_\text{masspoint}}\right)\cdot\sqrt{1-\left(\frac{v_{S\_\text{masspoint}}}{c}\right)^2},\left(0\le v_{S\_\text{masspoint}}\le c\right)\cdots(\text{a.5.12})$$ 静止質量の定義その光子の備える波長

$$m_{S\_v_{\text{wave}}}\left(v_{S\_\text{masspoint}}\right)\ge m_{0S\_\text{masspoint}}\cdots(\text{a.5.24})$$

$$\frac{m_{S\_v_{\text{wave}}}\left(v_{S\_\text{masspoint}}\right)}{2}\cdot\left(v_{S\_\text{masspoint}}\right)^2\ge\frac{m_{0S\_\text{masspoint}}}{2}\cdot\left(v_{S\_\text{masspoint}}\right)^2\cdots(\text{a.5.25})$$

ニュートン力学の慣性質量 (a.5.26) を仮定する．慣性質量 (a.5.26) を使用すると，ニュートン力学での運動量は (a.5.27) を記述できる．慣性質量（a.5.4）および慣性質量（a.5.26）は，近似式（a.5.28）の関係にある．

$$m_{\text{Newton}\_S\_v_{\text{wave}}},\left(m_{\text{Newton}\_S\_v_{\text{wave}}}=\text{const.}\right)\cdots(\text{a.5.26})$$

$$p_{\text{Newton}\_S\_v_{\text{wave}}}(t)=m_{\text{Newton}\_S\_v_{\text{wave}}}\cdot v_{S\_\text{masspoint}}(t),\left(m_{\text{Newton}\_S\_v_{\text{wave}}}=\text{const.}\right)\cdots(\text{a.5.27})$$ ニュートン力学の運動量

$$\frac{m_{S\_v_{\text{wave}}}\left(v_{S\_\text{masspoint}}\right)}{m_{\text{Newton}\_S\_v_{\text{wave}}}}\approx 1,\left(m_{\text{Newton}\_S\_v_{\text{wave}}}\ne 0\right)\cdots(\text{a.5.28})$$

近似式（a.5.28）を使用すると，特殊相対性理論の運動量（a.5.5）およびニュートン力学の運動量（a.5.27）は（a.5.29）の関係にある．特殊相対性理論の運動量（a.5.6），ニュートン力学の運動量（a.5.27）と近似の関係（a.5.30）を仮定できる．ニュートン力学の運動量（a.5.30）を使用すると，（a.5.14）は近似式（a.5.31）になる．

$$p_{S\_v_{\text{wave}}}(t)=m_{S\_v_{\text{wave}}}\left(v_{S\_\text{masspoint}}\right)\cdot v_{S\_\text{masspoint}}(t)\cdots(\text{a.5.5})$$ 質点の運動量

$$p_{\text{Newton}\_S\_v_{\text{wave}}}(t)\approx p_{S\_v_{\text{wave}}}(t),\left(\lambda_{S\_\text{wave}}\ne 0\right)\cdots(\text{a.5.29})$$

$$p_{S\_v_{\text{wave}}}(t)=\frac{h}{\lambda_{S\_\text{wave}}},\left(\lambda_{S\_\text{wave}}\ne 0\right)\cdots(\text{a.5.6})$$ 運動量および質点が備える振動数の波長との関係

$$p_{\text{Newton}\_S\_v_{\text{wave}}}(t)\approx\frac{h}{\lambda_{S\_\text{wave}}},\left(\lambda_{S\_\text{wave}}\ne 0\right)\cdots(\text{a.5.30})$$ ニュートン力学の運動量（a.5.24）および運動量（a.5.6）との関係

$$\frac{v_{S\_\text{wave}}(t)}{c}\cdot\frac{v_{S\_\text{masspoint}}(t)}{c}\approx 1,\left(v_{S\_\text{masspoint}}\ne 0\right)\cdots(\text{a.5.31})$$

近似式（a.5.31）では，質点が持つ全エネルギー（a.5.8）を仮定している．特殊相対性理論の慣性座標系上で，ニュートン力学に近似した計算を仮定した近似式（a.5.31）である．

$$E_{S\_v_{\text{wave}}}\left(v_{S\_\text{masspoint}}\right)=m_{S\_v_{\text{wave}}}\left(v_{S\_\text{masspoint}}\right)\cdot c^2\cdots(\text{a.5.8})$$ 質点の持つ全エネルギー

ニュートン力学の慣性座標系（inertial coordinate-system）では，万有引力の法則を重力理論として導出できる．アインシュタインの特殊相対性理論では，電磁力を扱えても万有引力の法則が導出できないので重力は扱えない．一般相対性理論では，万有引力の法則よりも厳密な重力理論を扱う．万有引力の法則は，一般相対性理論では近似式として導出できる．一般相対性理論では、加速度座標系を扱う．その加速度座標系は，特殊相対性理論の慣性座標を使用して定義する．ここでは，その加速度座標系を採用することで仮定（a.5.21）からローレンツ変換がガリレイ変換に近似する等速度運動を仮定している．この仮定の場合に，ニュートンの運動方程式を使用できる近似の記述を（a.5.25）に考えている．この意味では，ニュートンの運動方程式を使用する近似の説明で２重性を仮定できる．

$c\gg v_{S\_\text{masspoint}}\cdots(\text{a.5.21})$ ローレンツ変換がガリレイ変換に近似する場合の質点の等速度の速さ

vi．電位（electrostatic potential）の定義について[7),8),30)]

電位の定義は，第３回で与えている．付録viでは，電位の定義についての比較を簡単に行う．（a.6.1）で電位（a.6.2）を定義する際には，静電場（electrostatic field）を仮定している． 静電場（a.6.1）は，（a.6.3）でも記述できる．（a.6.1）および（a.6.3）は（a.6.4）のように等しい．（a.6.1）および（a.6.3）で使用している記号（a.6.5）はナブラ（nabla）と呼ぶ．ナブラ（a.6.5）の説明は，付録ｉでも与えている．

$\mathbf{E} = -\nabla (V_r + \mathrm{C}_1) \cdots (\mathrm{a.6.1})$

$V_r \cdots (\mathrm{a.6.2})$

$\mathbf{E} = -\nabla V_r \cdots (\mathrm{a.6.3})$での電位の定義について

$\mathbf{E} = -\nabla V_r = -\nabla (V_r + \mathrm{C}_1) \cdots (\mathrm{a.6.4})$

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x}\mathbf{i} + \frac{\partial}{\partial y}\mathbf{j} + \frac{\partial}{\partial z}\mathbf{k}, (\mathrm{nabla}) \cdots (\mathrm{a.6.5})$$

定数（a.6.6）で，電位（a.6.2）の値は変化する．電位（a.6.2）に定数（a.6.6）を加えたものも電位である．この意味で，（a.6.1）の右辺の勾配（a.6.5）を計算する関数は電位の関数である．（a.6.1）および（a.6.3）では，右辺の電位は異なる値である．（a.6.1）および（a.6.3）のような異なる電位で，同じ静電場（a.6.4）を記述できる．

$\mathrm{C}_1 \cdots (\mathrm{a.6.6})$

———単位電気量当たりのポテンシャルエネルギーとした電位の定義の説明———

この静電場(2.1)では,右辺の分子の静電気力(electrostatic force)を仮定する.静電気力は,クーロンの法則(Coulomb's Law）で説明している．クーロンの法則で与えるクーロン力では，２つの点電荷（point charge）の距離（２乗の法則）を記述している．クーロンの法則は，本書の第２回で説明している．

$$\mathbf{E} \equiv \frac{\mathbf{F}}{q} \ \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{C}}, (q \neq 0) \cdots (2.1)$$

２つの点電荷の両方に，相互作用するクーロン力である．静電場は，そのクーロン力が作用する場として定義されている．静電気力のベクトル表示は，それぞれに作用する点電荷の静電気力のベクトルを使用する．ひとつの静電気力のベクトルは，仮定している２つの点電荷のひとつの方のみに作用する静電気力のベクトルを記述しているだけである．そのようにひとつの点電荷に作用する静電気力ベクトル（2.4）では，他方の点電荷と共に静電気力を生じさせるエネルギーを説明している記述——（3.11）では，そのエネルギーを記述している．——ではない．静電場は，静電気力（2.4）が相互作用している２つ以上の点電荷で生じる．

$\mathbf{F} = q \times \mathbf{E} \cdots (2.4)$静電気力

$$\mathbf{F(s)} = -\frac{\partial U}{\partial x}\mathbf{i} - \frac{\partial U}{\partial y}\mathbf{j} - \frac{\partial U}{\partial z}\mathbf{k} \cdots (3.11)$$

その静電場では，２つ以上の点電荷での質点系に蓄えられている静電気的ポテンシャルエネルギー（electrostatic potential energy）を保存力（conservative force）である静電気力に定義している．静電気力（a.1.2）は，ポテンシャルエネルギーで保存力を記述している．そのポテンシャルエネルギー（3.3）には，静電場内の各位置で異なる値を仮定できる．

$\mathbf{F} = -\nabla U = -\mathrm{grad}\, U \cdots (\mathrm{a.1.2})$

$U \cdots (3.3)$

静電気力（2.4）の右辺を（a.1.2）の左辺に代入すると，（a.6.7）を記述できる．静電気力（a.6.7）の左辺の電気量は，

静電場内の位置に仮定している．静電場内の各位置で異なるポテンシャルエネルギー（potential energy）は，各位置に仮定する電気量で異なる．このことは，（a.6.7）で明らかである．各位置に電気量を仮定することで，相対的配置で蓄えられるポテンシャルエネルギーを仮定できる．

$q \times \mathbf{E} = -\nabla U = -\mathrm{grad}\,U \cdots (\mathrm{a}.6.7)$

（a.6.7）の右辺の静電場は，(a.6.8) で記述できる．(a.6.8) では，左辺の静電場は右辺のポテンシャルエネルギー（potential energy）で生じていることを説明している．各位置のポテンシャルエネルギーが分からないことは，静電場を生じさせているエネルギーが分からないことになる．静電場を生じさせているポテンシャルエネルギーが分かることでは，各位置での点電荷の運動を扱うことに便利である．

$$\mathbf{E} = -\nabla \frac{U}{q} = -\mathrm{grad}\frac{U}{q}, (q \neq 0) \cdots (\mathrm{a}.6.8)$$

ポテンシャルエネルギーは，保存力に定義している．静電場では，その保存力はクーロン力である静電気力で説明できる．静電気的ポテンシャルエネルギーが零であることでは，ポテンシャルエネルギーの変化量の定義（3.4）の左辺を零に仮定できる．このことで，（3.4）の右辺が零になる．

$\Delta U_{ab} \equiv -W_{ab} \cdots (3.4)$ 質点 m^p との相対的配置でのポテンシャルエネルギーの変化量 ΔU_{ab} の定義

その右辺が零であることは，仕事量（a.6.9）が零である．静電気的ポテンシャルエネルギーの変化量を定義している仕事量（a.6.9）は，クーロン力で記述する仕事量である．

$$W_{ab} = \int_{\mathbf{a}}^{\mathbf{b}} \mathbf{F}(\mathbf{s}) \cdot d\mathbf{s} \cdots (\mathrm{a}.6.9)$$

ポテンシャルエネルギーが零であることでは，電気量が零であることを仮定できる．ポテンシャルエネルギーが定義されている静電気力（2.4）が零であることで，ポテンシャルエネルギーが定義できる静電気力を仮定できない．

$\mathbf{F} = q \times \mathbf{E} \cdots (2.4)$ 静電気力

静電気力が仮定できないことでは，静電場（2.1）を定義できない．静電気力（2.4）の右辺の電気量は，静電場内に仮定されている電気量である．その電気量が静電場内に置かれていないことでは，静電場が存在しないことではない．静電場が存在しないことで，静電気力が零であることは仮定できる．静電気力が零であるので，移動する点電荷も仮定できない．移動する点電荷も無く静電気力も無いことでは，仕事量は定義できない．静電気力が零に仮定できても仕事量は零である．このことで，静電気的ポテンシャルエネルギーが無いことでは，静電気力（2.4）が無いものと帰結できる．静電気的ポテンシャルエネルギーが無いことでは，静電場（2.1）が無いものと説明できる．静電場が無いことは，静電場を生じさせる２つの点電荷も無いものと説明できる．点電荷が無いことでは，電気量が零であるものと説明できる．

$$\mathbf{E} \equiv \frac{\mathbf{F}}{q} \ \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{C}}, (q \neq 0) \cdots (2.1)$$

さらに，静電場内に仮定する各位置に在る電気量でポテンシャルエネルギー（potential energy）の値が異なることに工学での応用を考えることができる．そのポテンシャルエネルギー（3.3）が変化することで，静電場（a.6.8）が変化する．静電気力として扱える電気力の相互作用を説明できる電場の変化では，電気回路で利用する静電場（2.1）がある．

$U \cdots (3.3)$

$$\mathbf{E} = -\nabla \frac{U}{q} = -\mathrm{grad}\frac{U}{q}, (q \neq 0) \cdots (\mathrm{a}.6.8)$$

このような静電場（a.6.8）の属性の変化を，その静電場を生じさせているポテンシャルエネルギー（3.3）で説明することは実用には不便である．このことは，各位置に電気量を仮定することで説明できる．電位（a.6.2）は，そのような不便な各位置の電気量を仮定しないで静電場の属性の変化を知ることができる自然の世界には存在しない人為的に定義し

た量である．

$V_r \cdots$(a.6.2)

一方，ポテンシャルエネルギーは，理論物理学では自然の法則として自然の世界に存在する量である．この意味では，電位（electrostatic potential）は（a.6.1）で定義してしまうと，ポテンシャルエネルギーについての直接的な説明を失うことになる．

$\mathbf{E} = -\nabla(V_r + \mathrm{C}_1) \cdots$(a.6.1)

このことでは，その静電場の属性を記述する量としての単位電気量当たりのポテンシャルエネルギーとしての電位（a.6.8）の意味が不明瞭である．(a.6.1) の電位の説明では，ポテンシャルエネルギーとして説明するものではなく静電場内で点電荷が移動することで記述できる仕事量を説明するものとなる．仕事量は，ポテンシャルエネルギーとは異なる――（3.4）では明らかである．――．

$\Delta U_{ab} \equiv -W_{ab} \cdots$(3.4) 質点 m^p との相対的配置でのポテンシャルエネルギーの変化量 ΔU_{ab} の定義

（3.4）は，(3.10）で記述できる．(3.10）の左辺はポテンシャルエネルギーの変化量である．その変化量は，(3.10）の右辺の仕事量とは異符号になる．

$$U(x_b, y_b, z_b) - U(x_a, y_a, z_a) = -\int_{\mathbf{a}}^{\mathbf{b}} \mathbf{F}(\mathbf{s}) \cdot \mathrm{d}\mathbf{s}, (\Delta U_{ab} = -W_{ab}) \cdots (3.10)$$

正の仕事量は，点電荷の運動に用いる静電場内のポテンシャルエネルギー（3.3）を減少させることで計算できる．質点系に蓄えられているポテンシャルエネルギー (3.3) で生じている静電場は，移動する点電荷を仮定することで保たれる場ではない．もし，その静電場に蓄えられているポテンシャルエネルギーが完全になくなってしまうと，その静電場は消滅してしまう．静電場の属性は，ポテンシャルエネルギーで説明する方が静電場の存在を保証するのに重要である．電位が自然の世界には存在しない物理量であることでは，単位電気量当たりのポテンシャルエネルギーとした定義の方が明確に説明している．本書の第３回での定義の方が電位（electrostatic potential）の定義には（a.6.1）よりも優れているものと著者は考えている２００７年現在である．

$U \cdots$(3.3)

―――（a.6.1）の右辺の負号の説明―――

ポテンシャルエネルギーの変化量の定義（3.4）では，左辺のポテンシャルエネルギーの変化量（3.5）の値は右辺の仕事量の値に負号を付けたものに等しいことを説明している．右辺では，合力が作用している質点の移動で説明する仕事量である．質点に作用している合力には，保存力で記述できる部分を仮定している．その保存力のなす仕事量が（3.4）の右辺の仕事量である．(3.4）では，値を定義しているものである．左辺のポテンシャルエネルギーの意味は，別に定義している――２章で定義は与えている．――．右辺の仕事量の意味も別に定義している．

$\Delta U_{ab} \equiv -W_{ab} \cdots$(3.4) 質点 m^p との相対的配置でのポテンシャルエネルギーの変化量 ΔU_{ab} の定義

$\Delta U_{ab} = U(x_b, y_b, z_b) - U(x_a, y_a, z_a) \cdots$(3.5) 質点 m^p との相対的配置でのポテンシャルエネルギーの変化量

静電気力（2.4）を使用すると，(3.10）は（a.6.10）に書き直すことができる．(a.6.10）の右辺には，静電場（2.1）を仮定できる．

$\mathbf{F} = q \times \mathbf{E} \cdots$(2.4)静電気力

$$\frac{U(x_b, y_b, z_b)}{q} - \frac{U(x_a, y_a, z_a)}{q} = -\int_{\mathbf{a}}^{\mathbf{b}} \frac{\mathbf{F}(\mathbf{s})}{q} \cdot \mathrm{d}\mathbf{s}, \left(\frac{\Delta U_{ab}}{q} = -\frac{W_{ab}}{q}\right) \cdots (\text{a.6.10})$$

$$\mathbf{E} \equiv \frac{\mathbf{F}}{q} \ \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{C}}, (q \neq 0) \cdots (2.1)$$

静電場（2.1）の左辺を（a.6.10）の右辺に代入すると，(a.6.11）を記述できる．(a.6.11）の右辺の仕事量は，(a.6.12）の右辺に書き直すことができる．

$$\frac{U(x_b, y_b, z_b)}{q} - \frac{U(x_a, y_a, z_a)}{q} = -\int_{\mathbf{a}}^{\mathbf{b}} \mathbf{E} \cdot \mathrm{d}\mathbf{s}, \left(\frac{\Delta U_{ab}}{q} = -\frac{W_{ab}}{q} \right) \cdots (\mathrm{a}.6.11)$$

$$-\int_{\mathbf{a}}^{\mathbf{b}} \mathbf{E} \cdot \mathrm{d}\mathbf{s} = \int_{\mathbf{a}}^{\mathbf{b}} (-\mathbf{E}) \cdot \mathrm{d}\mathbf{s} \cdots (\mathrm{a}.6.12)$$

（a.6.12）の右辺では，保存力は（a.6.13）で記述している仕事量である．保存力（a.6.13）のなす仕事量は（a.6.14）で記述できる．

$$\mathbf{F}_{\varepsilon} = q \cdot (-\mathbf{E}) \cdots (\mathrm{a}.6.13)$$

$$\int_{\mathbf{a}}^{\mathbf{b}} \mathbf{F}_{\varepsilon} \cdot \mathrm{d}\mathbf{s} = \int_{\mathbf{a}}^{\mathbf{b}} \{q \cdot (-\mathbf{E})\} \cdot \mathrm{d}\mathbf{s} \cdots (\mathrm{a}.6.14)$$

（a.6.9）および（a.6.14）は，(a.6.15）になる．(a.6.15）の右辺の保存力（a.6.13）は，保存力（2.4）とは異なる．

$$W_{ab} = \int_{\mathbf{a}}^{\mathbf{b}} \mathbf{F}(\mathbf{s}) \cdot \mathrm{d}\mathbf{s} \cdots (\mathrm{a}.6.9)$$

$$-W_{ab} = \int_{\mathbf{a}}^{\mathbf{b}} \mathbf{F}_{\varepsilon} \cdot \mathrm{d}\mathbf{s} \cdots (\mathrm{a}.6.15)$$

$\mathbf{F} = q \times \mathbf{E} \cdots (2.4)$ 静電気力

（a.6.14）の右辺を（a.6.15）の右辺に代入すると，(a.6.16）になる．(a.6.16）は，(a.6.17）に書き直すことができる．

$$-W_{ab} = \int_{\mathbf{a}}^{\mathbf{b}} \{q \cdot (-\mathbf{E})\} \cdot \mathrm{d}\mathbf{s} \cdots (\mathrm{a}.6.16)$$

$$\frac{-W_{ab}}{q} = \int_{\mathbf{a}}^{\mathbf{b}} (-\mathbf{E}) \cdot \mathrm{d}\mathbf{s}, (q \neq 0) \cdots (\mathrm{a}.6.17)$$

（a.6.13）の右辺に記述した負号の意味は，(2.4）の静電場とは逆向きに保存力が作用することを意味する．この意味では，(a.6.8）の右辺の負号の意味が説明できていない．

$$\mathbf{E} = -\nabla \frac{U}{q} = -\mathrm{grad} \frac{U}{q} \cdots (\mathrm{a}.6.8)$$

ポテンシャルエネルギーの変化量の定義（3.4）の右辺に記述した負号を使用することで，(a.6.8）の右辺の負号を説明できる．(3.4）を使用して，(3.10）を記述できる．積分（3.10）は，微分で記述すると（a.1.2）になる．このことでは，(a.1.2）の右辺の負号は，(3.4）の右辺の負号であるものと説明できる．

$\Delta U_{ab} \equiv -W_{ab} \cdots (3.4)$ 質点 m^p との相対的配置でのポテンシャルエネルギーの変化量 ΔU_{ab} の定義

$$U(x_b, y_b, z_b) - U(x_a, y_a, z_a) = -\int_{\mathbf{a}}^{\mathbf{b}} \mathbf{F}(\mathbf{s}) \cdot \mathrm{d}\mathbf{s}, (\Delta U_{ab} = -W_{ab}) \cdots (3.10)$$

$$\mathbf{F} = -\nabla U = -\mathrm{grad}\, U \cdots (\mathrm{a}.1.2)$$

（3.4）の右辺の負号では，ポテンシャルエネルギーの変化量の増減が保存力のなす仕事量とは異符号で説明できることになる．ポテンシャルエネルギーが増加すると，保存力のなす仕事量は負になる．仕事量が負であることでは，質点が保存力の方向とは逆向きに移動しているものと仮定できる．ポテンシャルエネルギーが減少すると，保存力のなす仕事量は正になる．仕事量が正であることでは，質点が保存力の方向とは同じ向きに移動しているものと仮定できる．(a.6.11)

で（3.4）の負号について考察すると，電位の大小で質点の運動を説明できる．

$$\frac{U(x_b,y_b,z_b)}{q}-\frac{U(x_a,y_a,z_a)}{q}=-\int_{\mathbf{a}}^{\mathbf{b}}\mathbf{E}\cdot d\mathbf{s},\left(\frac{\Delta U_{ab}}{q}=-\frac{W_{ab}}{q}\right)\cdots(\mathrm{a}.6.11)$$

保存力の向きと質点が移動する向きが同じ向きである場合では，（a.6.11）から（a.6.18）を記述できて質点がポテンシャルエネルギーの高い所から低い所へ移動していることを（a.6.19）で仮定できる．電位の高い位置から低い位置へ点電荷が移動する．

$$\frac{U(x_b,y_b,z_b)}{q}-\frac{U(x_a,y_a,z_a)}{q}<0\cdots(\mathrm{a}.6.18)$$

$$\frac{U(x_b,y_b,z_b)}{q}<\frac{U(x_a,y_a,z_a)}{q}\cdots(\mathrm{a}.6.19)$$

保存力の向きと質点が移動する向きが逆向きである場合では，（a.6.11）から（a.6.20）を記述できて質点がポテンシャルエネルギーの低い所から高い所へ移動していることを（a.6.21）で仮定できる．電位の低い位置から高い位置へ点電荷が移動する．

$$\frac{U(x_b,y_b,z_b)}{q}-\frac{U(x_a,y_a,z_a)}{q}>0\cdots(\mathrm{a}.6.20)$$

$$\frac{U(x_b,y_b,z_b)}{q}>\frac{U(x_a,y_a,z_a)}{q}\cdots(\mathrm{a}.6.21)$$

このような点電荷の運動は，ポテンシャルエネルギーの変化量および仕事量の関係を記述している（3.4）の右辺の負号で説明している．

（a.6.1）で電位を定義することでは，右辺の負号の意味を明確に説明していない．右辺に電位を記述することで，左辺の電場および右辺の電位との関係を負号および数学のナブラ（nabla）の記号（a.6.4）で与えている．

$$\mathbf{E}=-\nabla(V_r+\mathrm{C}_1)\cdots(\mathrm{a}.6.1)$$

$$\nabla=\frac{\partial}{\partial x}\mathbf{i}+\frac{\partial}{\partial y}\mathbf{j}+\frac{\partial}{\partial z}\mathbf{k}\cdots(\mathrm{a}.6.4)$$

電位（a.6.2）は，電場の属性として扱うことができる．自然の世界に存在しない電位を人為的に導入しているものである．自然の法則で静電場に電位が自然の世界に存在することを認めるものではない．

$$V_r\cdots(\mathrm{a}.6.2)$$

静電場は，静的に相対的な配置に有る２つ以上の点電荷で生じるものと仮定できる．この場合では，２つ以上の点電荷の静的な相対的配置で静電気的ポテンシャルエネルギーを蓄えていることを仮定できる．このことでは，静電気的ポテンシャルエネルギーを蓄えている２つ以上の点電荷の静的な相対的配置から生じている静電場であるものと仮定できる．（a.6.1）は，２つ以上の点電荷の相対的配置を説明してない．静電場で電位を定義することは，質点系で静電場が生じることを電位で保証できない．静電場が２つ以上の点電荷の静的な相対的配置で生じていることを仮定している基礎物理学の指導については，２０１７年現在までの専門書では異なるものが存在するか？客観性では，著者が知る上では認められないものも記憶に有る．（a.6.1）で電位を定義することで，点電荷で構成する質点系に蓄えられているポテンシャルエネルギーを管理して静電場を制御することは直接には説明できていない．電気回路では，電位を管理することで電流およびエネルギーの制御を説明する．このような応用は，静電場が静電気的ポテンシャルエネルギーに因る現象を使用している．静電気的ポテンシャルエネルギーで，静電場内の点電荷の運動を制御できることを根拠にできる応用になる．この点電荷の運動の基礎には，（3.4）の右辺の負号で説明できる静電気的ポテンシャルエネルギーの変化量および仕事量との関係が有る．

$\Delta U_{ab} \equiv -W_{ab} \cdots (3.4)$ 質点 m^p との相対的配置でのポテンシャルエネルギーの変化量 ΔU_{ab} の定義

このように電位が電磁気学の現象を説明するのに便利である．自然界に無い電位を人為的に定義することで，静電場を生じさせる静電気的ポテンシャルエネルギーおよびクーロン力のなす仕事量との関係（3.4）を説明できる．(3.4）に電位を応用することで，(a.6.11）を記述できる．(a.6.11）で，静電場内での各点電荷の運動を電位で説明できる基礎となる方程式として扱える．

$$\frac{U(x_b, y_b, z_b)}{q} - \frac{U(x_a, y_a, z_a)}{q} = -\int_{\mathbf{a}}^{\mathbf{b}} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s}, \left(\frac{\Delta U_{ab}}{q} = -\frac{W_{ab}}{q} \right) \cdots (a.6.11)$$

本書の「電位の簡単な入門２００７第３回」では，静電気的ポテンシャルエネルギーを採用して電位を定義している．そのような電位の定義の方が上述の理由から（a.6.1）で電位を定義するよりも優れているものと２００７年現在の著者は考えている．

ⅶ.ニュートン力学の慣性座標系および加速度[32]

ニュートン力学（Newtonian mechanics）では，絶対空間（absolute space）および絶対時間（absolute time）で慣性座標系の等速度ベクトルを観測する．２つの慣性座標系の等速度ベクトルは，すべて絶対空間上で絶対時間を使用して観測する．絶対空間のひとつの座標から２つの慣性座標系の速度ベクトルを記述できる．それらの速度ベクトルの差は，ひとつの慣性座標系上から観測した他方の慣性座標系の速度ベクトルになる．それらの速度ベクトルの差を記述するのに絶対空間を使用するので，速度の相対性は説明できていない．一方，アインシュタインの特殊相対性理論では，速度の相対性を説明できる．図 a.7.1 では，絶対空間および絶対時間を使用していない特殊相対性理論での慣性座標系を表示している．速度の相対性では，ひとつの慣性座標系 S_1 に仮定した質点の速度ベクトルはその質点の他方の慣性座標系 S 上で観測した速度ベクトルおよび慣性座標系 S_1 の速度ベクトルで説明する――（a.7.1）の $v_{x1}(t_1)$，$v_x(t)$ および u で説明できる．ここでは，慣性座標系 S は慣性座標系 S_1 の x $_1$ 軸上の負の方向に速さ u で等速度運動することを仮定している．S および S_1 の x 軸は重ねることにする．時点が零の時に，慣性座標系 S は慣性座標系 S_1 の原点は一致させる．――.

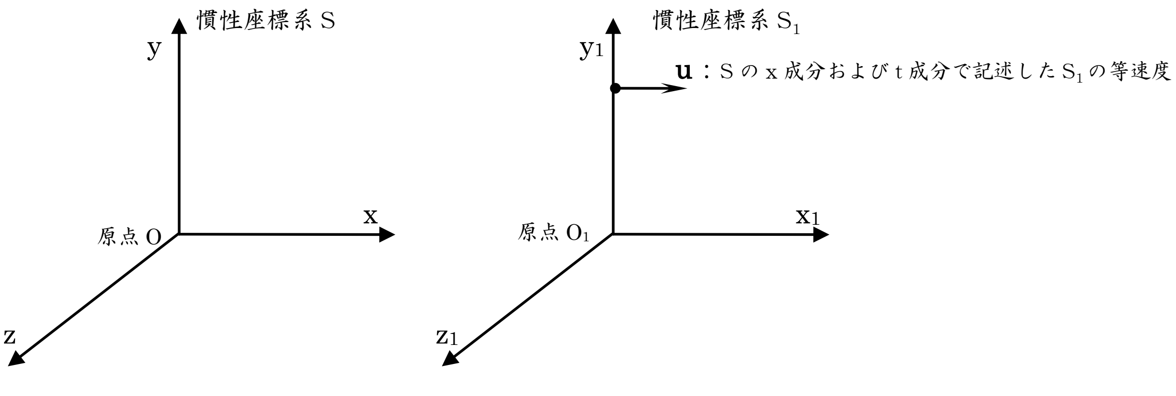


図 a.7.1　慣性座標系

$$v_{x1}(t_1) = \frac{v_x(t) - u}{1 - \dfrac{u}{c^2} \cdot v_x(t)} \cdots (a.7.1)$$ x $_1$ 軸の速度成分

$$v_{y1}(t_1)=\frac{v_y(t)}{\gamma\cdot\left(1-\frac{u}{c^2}\cdot v_x(t)\right)}\cdots(\mathrm{a.7.2})$$ y ${}_1$軸の速度成分

$$v_{z1}(t_1)=\frac{v_z(t)}{\gamma\cdot\left(1-\frac{u}{c^2}\cdot v_x(t)\right)}\cdots(\mathrm{a.7.3})$$ z ${}_1$軸の速度成分

$$\gamma=\frac{1}{\sqrt{1-\frac{u^2}{c^2}}}(=\mathrm{const.})\cdots(\mathrm{a.4.10})$$ 係数（coefficient）

ひとつの慣性座標系 S_1 の速度は，他方の慣性座標系 S 上で観測する．２つの慣性座標系の速度は，互いに向きが逆で速さは等しいものである．そのような図 a.7.1 の慣性座標系間のみの観測には，絶対空間は使用しない．このような速度の相対性は，絶対空間を使用するニュートン力学では説明できないことになる．速度の変換式（a.7.1）～（a.7.3）では，係数（a.4.10）を記述している．（a.7.1）の右辺の分子の第２項は，慣性座標系の速さである．

アインシュタインの特殊相対性理論（Einstein's special theory of relativity）では，加速度の相対性は説明できない．アインシュタインの一般相対性理論（Einstein's general theory of relativity）で，加速度の相対性を扱うことになる．一般相対性理論（the general theory of relativity）の加速度の相対性は，加速度座標系を使用して説明できる．その加速度座標系の加速度は，特殊相対性理論（the special theory of relativity）の慣性座標系上で観測する．加速度の相対性は，ひとつの加速度座標系上に仮定する質点の加速度は他方の加速度座標系上での加速度および加速度座標系の加速度で近似できる．一般相対性理論では，ニュートンの万有引力の法則に代わる厳密な重力理論を研究して加速度座標系で重力（gravitational force）を説明している．

ニュートンの万有引力の法則（Newton's law of universal gravitation）は，慣性座標系上で使用する．その慣性座標系は，絶対空間および絶対時間上で観測するので地球上では理論物理学上は存在しないものと説明できる．ニュートン力学では，万有引力の法則とは別に重力のみの自由落下加速度（the free-fall acceleration due to the gravitation）が落下する質点の質量に関係なく一定であることを経験的な法則として扱う．この経験則は，ニュートン力学の慣性座標系上での理論物理学ではない．ニュートン力学以前から観測されているものと報告される．加速度の計算は，ニュートン力学の慣性座標系上で記述するものである．このことでは，ニュートンの運動方程式（Newtonian equation of motion）を使用して上述の経験則を記述する．そのような運動方程式（the equation of motion）には，ニュートン力学で万有引力の法則に関係を与えることができる．万有引力の法則では，ニュートンの万有引力定数（Newtonian constant of gravitation），地球の重力質量（gravitational mass）および地球の中心からの距離で地球と地表の質点との単位質量当たりの万有引力の大きさを説明できる．ニュートンの万有引力定数は，（a.7.4）のような定数である．

$$\mathrm{G}=6.674\,28(67)\times10^{-11}\ \mathrm{m^3\ kg^{-1}\ s^{-2}}\cdots(\mathrm{a.7.4})$$ ニュートンの万有引力定数

地球の重力質量も定数として扱うことができる．地球の中心からの距離は，近似にすることで定数に仮定できる．この場合では，地球と地表の質点との単位質量当たりの万有引力の大きさは定数に仮定できる．この定数は，重力のみの自由落下加速度に等しいものと仮定できる．この仮定では，ニュートン力学の慣性座標系で重力のみの自由落下加速度（the free-fall acceleration due to the gravitation）が定数であることを説明できる――上述のことは文献３２で説明している．――．このニュートン力学の自由落下加速度では絶対空間および絶対時間での説明であるので，加速度の相対性が説明できない．重力のみの自由落下加速度を使用して，重力（gravitational force）を説明できる．その重力は，絶対加速度でニュートン力学の計算をしている．その絶対加速度は，絶対空間および絶対時間で観測しているものである．絶対空間および慣性座標系上で観測している絶対加速度はひとつのみである．一方，上述の経験則は，一般相対性理論

の加速度座標系で説明するほうがより正確であるものと２０１８年現在の理論物理学では扱う．地球の中心からの距離で重力のみの自由落下加速度が異なることの観測は，一般相対性理論の加速度座標系でも説明できる．一般相対性理論の加速度座標系上で慣性座標系を観測しても，その慣性座標系が加速度運動しているように見えることを仮定できる．このことでは，慣性座標系上で等速度運動している質点が加速度座標系上では加速度運動していることを仮定できる．加速度座標系上に重力のみの自由落下加速度で加速度運動しているように見える質点は，慣性座標系上で観測すると等速度運動していることを仮定できる．このことは，加速度の相対性で質点の加速度は観測する加速度座標系で異なることを説明できる．このような加速度の観測は，絶対加速度とは異なる．

地球は回転しているので，加速度運動している．地球上に座標系を仮定すると，加速度座標系になる．その加速度座標系は，一般相対性理論で説明できるものである．特殊相対性理論の慣性座標系の速度で，その加速度座標系の速度を観測できる．加速度座標系の加速度が十分に小さい場合には，その加速度座標系の速度が十分に遅いことを仮定できる．加速度座標系の速度が十分に遅いことで，その加速度座標系の速度は観測している慣性座標系の速度に近似できることを仮定する．この場合で十分に時間が短い場合では，加速度座標系は慣性座標系に近似できる．その慣性座標系は，特殊相対性理論のものである．特殊相対性理論では，ローレンツ変換式（Lorentz transformation equations）（a.4.6）～（a.4.10）を使用する．

$x_1=\gamma\cdot(x-u\cdot t)\cdots(\mathrm{a.4.6})$ 慣性座標系 S_1 の x_1 軸の値

$y_1=y\cdots(\mathrm{a.4.7})$ 慣性座標系 S_1 の y_1 軸の値

$z_1=z\cdots(\mathrm{a.4.8})$ 慣性座標系 S_1 の z_1 軸の値

$t_1=\gamma\cdot\left(t-\frac{u\cdot x}{c^2}\right)\cdots(\mathrm{a.4.9})$ 慣性座標系 S_1 の時間軸 t_1 の値

$$\gamma=\frac{1}{\sqrt{1-\frac{u^2}{c^2}}}(=\mathrm{const.})\cdots(\mathrm{a.4.10})$$

ローレンツ変換は，十分に時間が短く慣性座標系の速度が遅い場合にはガリレイ変換（a.4.13）～（a.4.16）に近似できる．ガリレイ変換式（Galilean transformation equations）は，ニュートン力学の慣性座標系に使用する変換である．

$x_1=x-u\cdot t\cdots(\mathrm{a.4.13})$

$y_1=y\cdots(\mathrm{a.4.14})$

$z_1=z\cdots(\mathrm{a.4.15})$

$t_1=t\cdots(\mathrm{a.4.16})$

ニュートン力学の慣性座標系上で記述するニュートンの万有引力の法則は，特殊相対性理論の慣性座標系上で近似できることを説明できた．その慣性座標系は，一般相対性理論の加速度座標系に近似できることを説明している．この説明で，ニュートンの万有引力の法則は一般相対性理論の加速度座標系上で近似できることになる．同じ加速度で移動している場合にはひとつの加速度座標系から他方の加速度座標系を観測すると，他方の加速度座標系が等速度運動していることになる．この等速度運動していることでは，ひとつの加速度座標系上が静止しているように扱うと他方の加速度座標系が慣性座標系に見える．このことでは，上述でニュートンの万有引力の法則は一般相対性理論の加速度座標系上で近似できる．他方の加速度座標系が慣性座標系に見えるので，その慣性座標系に見える加速座標系上で万有引力の法則を近似できる．同じ加速度でない場合でも，ひとつの加速度座標系の加速度に十分に近似できる加速度で加速度運動している場合にも同様に応用でき，加速度座標系を慣性座標系として扱うことができる．上述の近似については，文献２８および文献３２で説明している．

参考文献（References）

１）　富岡和人，“AL_COM.CVSyst.1 on Dec. 27, 2006”，心臓血管系に関する研究報告，(2006-12-27)

２）　富岡和人，“AL_COM.CVSyst.2_on_Dec. 25, 2008”，心臓血管系に関する研究報告，(2008-12-25)．

３）　富岡和人，“心臓血管系の回路モデルの簡単な初級講座 2007 第一回”

４）　富岡和人，“心臓血管系の回路モデルの簡単な初級講座 2007 第二回”

５）　富岡和人，“心臓血管系の回路モデルの簡単な初級講座 2007 第三回”

６）　富岡和人，“電位の簡単な入門 2007 第二回”

７）　富岡和人，“電位の簡単な入門 2007 第三回”

８）　富岡和人，“電位の簡単な入門 2007 第四回”

９）　富岡和人，“電位の簡単な入門 2007 第五回”

１０）　富岡和人，“電位の簡単な入門 2007Option”

１１）　ROBERT RESNICK，DAVID HALLIDAY，KENNETH S. KRANE，1992：PHYSICS 4th Edition Volume1，John Wiley & Sons，Inc.，pp.64-66，pp.80-83，pp.151-167，pp.363-365，pp.473-477，pp.482-484，pp.494-497，pp.514-516，pp.547-548，pp.555-557.

１２）　ROBERT RESNICK，DAVID HALLIDAY，KENNETH S. KRANE，1992：PHYSICS 4th Edition Volume2，John Wiley & Sons，Inc.，pp.605-608，pp.1031-1034，pp.1045-1046.

１３）　金原寿郎編：『基礎物理学　上巻』，（裳華房，1963 年），pp.77-78.

１４）　後藤憲一，山本邦夫，神吉健共編：『詳解物理学演習　上』，（共立出版，1990）pp.57-60.

１５）　Bureau international des poids et mesures：The International System of Units(SI) 8th edition 2006，pp. 113-114.　(http:// www) .bipm.org/utils/common/pdf/si_brochure_8.pdf

１６）　H.A.LORENTZ, A.EINSTEIN, H.MINKOWSKI AND H.WEYL, 1923 TRANSLATION：THE PRINCIPLE OF RELATIVITY，DOVER PUBLICATIONS，INC.，pp.35-65，pp.68-71，　pp.97-104，p.109.

１７）　Peter J. Mohr，Barry N. Taylor，and David B. Newell，National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland 20899-8420, USA (Dated: December 28, 2007)：CODATA Recommended Values of the Fundamental Physical Constants: ２００６，p.95. (http://physics) .nist.gov/cuu/Constants/codata.pdf

１８）　富岡和人，“特殊相対性理論の速度の変換”，p.2，pp.32-59.

１９）　富岡和人，“特殊相対性理論のエネルギーの変換と相対論的質量の変換”．

２０）　ROBERT RESNICK，DAVID HALLIDAY，1992：Basic Concepts in Relativity and Early Quantum Theory SECOND EDITION　A Pearson Education Print on Demand Edition，Macmillan Publishing Company，pp.127-139.

２１）　John Stachel，Roger Penrose，2005：Einstein's miraculous year，Princeton University Press，pp.177-198.

２２）　富岡和人，“理論物理学での波の関数１”

２３）　富岡和人，“理論物理学での波の関数２”

２４）　富岡和人，“理論物理学での波の関数３”

２５）　富岡和人，“理論物理学での波の関数４”

２６）　富岡和人，“理論物理学での波の関数５”

２７）　富岡和人，“理論物理学での波の関数６”

２８）　富岡和人，“理論物理学での波の関数７”

２９）　富岡和人，“細胞膜の回路モデル”，信学技報，MBE2001-64，Jul.2001

３０）　THEORETICAL PHYSICS, Georg Joos With the Collaboratiopn of Ira M.Freeman, 1958：Third Edition,

Dover Publications, Inc. , New York, p.21,p.30.
３１） Peter J. Mohr, David B. Newell, and Barry N. Taylor, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland 20899-8420, USA, (Received 28 April 2016; accepted 6 September 2016; published online 22 November 2016) , CODATA Recommended Values of the Fundamental Physical Constants: 2014, p.57.
３２） 富岡和人, “ 慣性力および加速度”, pp.6-7, pp.42-72, pp.72-78.

免責事項

著作権

電位の簡単な入門 2007 第１回 富岡和人(とみおかかずひと)著
作成日：2007 年 02 月 22 日
発行日：2007 年 02 月 22 日
改訂発行日：2007 年 03 月 03 日
改訂発行日：2007 年 10 月 12 日
改訂発行日：2007 年 10 月 23 日
改訂発行日：2007 年 11 月 08 日
改訂発行日：2007 年 11 月 25 日
改訂発行日：2007 年 12 月 22 日
改訂発行日：2008 年 08 月 13 日
改訂発行日：2008 年 08 月 23 日
改訂発行日：2009 年 06 月 22 日
改訂発行日：2009 年 07 月 19 日
改訂発行日：2009 年 08 月 21 日
改訂発行日：2009 年 12 月 27 日
改訂発行日：2010 年 02 月 20 日
改訂発行日：2017 年 03 月 16 日
改訂発行日：2017 年 03 月 30 日
改訂発行日：2017 年 08 月 28 日
改訂発行日：2018 年 09 月 29 日

２０１８年現在では，下記のページでの著者の著作物である PDF ファイルのダウンロードのみが著者が著作権で承諾しているインターネット上のページでのダウンロードになります．

ホームページ

http://www.alifecom.info/

http://book.geocities.jp/alifecominfo/

http://alifecominfo.aikotoba.jp/

電気の回路のページ

http://www.alifecom.info/circuit_analysis.htm

http://book.geocities.jp/alifecominfo/circuit_analysis.htm

http://alifecominfo.aikotoba.jp/circuit_analysis.htm

特殊相対性理論のページ

http://www.alifecom.info/relativity.htm

http://book.geocities.jp/alifecominfo/relativity.htm

http://alifecominfo.aikotoba.jp/relativity.htm

波のページ

http://www.alifecom.info/theoryofwaves.htm

http://book.geocities.jp/alifecominfo/theoryofwaves.htm

http://alifecominfo.aikotoba.jp/theoryofwaves.htm