楽器の弦

その歴史と製法

A Primer on the History and Technology of Strings

Ephraim Segerman

2005

エフラム・セジャーマン著

伊賀健一、野村成人　共訳

2013/09/30

Ver 1.3

目次

訳者より 2

１．弦の素材　String Materials 4

１．１　古い時代の素材　Materials used in ancient times 4

１．２　その後使われた非金属の素材　Subsequently used non-metallic materials 4

１．３　金属弦　Metal strings 6

２．弦の構造　String Constructions 8

２．１　ガット弦の撚り Twist in gut strings 8

２．２　ロープ編みのガット弦　Roped gut strings 9

２．２　撚った金属弦　Twisted metal strings 10

２．３　巻線　Overspun or wound strings 10

３．弦の製造技術　String Technology 12

３．１　メルセンヌーテイラーの法則　Mersenne-Taylor Law 12

３．２　巻線　Wound strings 13

３．３　異なる弦の相対テンション　Relative tensions of different strings 14

３．４　変位　Displacement 14

３．５　伸縮性とフックの法則　Elasticity and Hooke's law 15

３．６　不安定なピッチ　Pitch instability 15

３．７　弦の最高音限界　Highest pitch for a string 16

３．８　ガット弦の最高音限界　Highest pitches for gut strings 17

３．９　金属弦の限界最高音　Highest pitches for metal strings 18

３．１０　ピッチのひずみ　Pitch distortion 18

３．１１　ピッチひずみを考慮した最低音　Lowest pitch due to pitch distortion .. 19

３．１２　倍音（ハーモニクス）の非調和性　Inharmonicity 19

３．１３　非調和性によるピッチの最低限界　Lowest pitch due to inharmonicity ... 20

３．１４　ガットに含まれる水分の影響　Effects of moisture content on gut 21

３．１５　素材変形による音への影響　Effect of creep on sound 22

３．１６　弦の診断　String pathology 22

３．１７　ガット弦の外見　Visual appearance of gut 23

３．１８　古くなった弦　Aged strings 24

表Ｉ：ガット弦の長さとピッチの限界（プレトリウスによる） 25

参考文献 26

著者略歴 28

訳者略歴 28

訳者より

本書は、エフラム・セジャーマン（Ephraim Segerman）博士著の

「A Primer on the History and Technology of Strings」の邦訳です。

原文はこちらにあります：http://www.nrinstruments.demon.co.uk/StrPrim.html

本書は、楽器に使われる弦の歴史、物理的特性、ピッチ、音質などについて解説したものです。ま

た、バロック時代以前からの古い弦楽器や鍵盤楽器に用いられてきた弦についての研究にも及んでおり、楽器の弦について幅広い知見に触れることができます。後半の技術的な内容は数式が出てきてとっつきにくいところもあるかと思いますが、普段楽器の弦を扱っている皆様が感じていらっしゃる弦の性質は「こういうことだったのか」と改めて発見される部分が多々あるかと思います。

この度、セジャーマン氏の了解を得て邦訳し、公開して皆様の便に供することができました。なるべく原文に忠実に、かつ読み易いように努力したつもりです。

野村成人が全文を訳し、数式とその解釈については伊賀健一が担当しかつ全体的な表現について見直しを行うという作業を行いました。訳者らは、共通の知人である野田一郎氏（フランクフルト市立歌劇場管弦楽団首席コントラバス奏者）の紹介によるもので、この翻訳が可能となりました。改めて感謝申し上げます。楽器及び弦の販売を業としている野村と，科学を専門としかつコントラバス奏者である伊賀によって、相補的な翻訳が出来たと感じています。

なお、原文の著作権はセジャーマン氏に、訳文の著作権は（有）コースタルトレーディング／ムジカアンティカ湘南保留といたします。

2013/09/30

訳者
伊賀健一
東京工業大学名誉教授

野村成人
（有）コースタルトレーディング／ムジカ・アンティカ湘南　代表取締役

１．弦の素材　String Materials

１．１　古い時代の素材　Materials used in ancient times

リラ(lyres)、支柱のないハープ(pillar-less harps)、長いネックのリュート(long lutes)などの絵は紀元前３０世紀頃から中近東で見られるようになります[1)]。

ヨーロッパや中近東で弦の素材について触れられたのは紀元前９世紀のホメロスによる「オデッセイ」で、リラの弦が「撚った羊腸」と特定されています[2)]　ギリシャの古い伝承によればもともと撚った麻が使われていましたが、羊腸に置き換わっていきました[3)]。　古代の記録を残した人達は、麻(bast)、亜麻(hemp)、蔦(flax and lianas)のような植物性の素材にも触れています[4)]。　紀元前１５～１６世紀のエジプトで作られた長いネックのリュートが残っていますが、弦はガットのように見えます[5)]。　極東では紀元前１１世紀に作られた長いネックの弦楽器であるツィター(zither)が見られるようになり、弦の主な素材はずっと絹が使われていました[6)]。

１．２　その後使われた非金属の素材　Subsequently used non-metallic materials

Ｃ．ペイジは５世紀から１４世紀にかけてヨーロッパで記述された楽弦の素材について研究しています[7)]。大半の資料ではガットが使われたとあります。ほとんどの事例では腸と特定されているので間違いないと思われますが、明確でない用語、「動物の内部」とか「はらわた」など、が使われている場合もあり、はっきりと違うもの（腱、神経、革など）を指している場合もあります。

腱を使って弦を作ることもできますし、１６世紀の（弦の）処方の中には馬の背中の腱から作る方法が含まれています。布につつんで、木槌で叩きます。抽出された繊維をつなぎ合わせるために、膠を付けて撚りあわせます[8)]。

化学的には腱はガットと同様にコラーゲンでできているので、特性は似ています。中世の解剖学の知識では神経と腱は今日の我々の理解するようには区別されていませんでしたし、ここでの目的のためには同じものとして扱えます。

皮（または革）を弦に使うのは、その強度の無さと、良い音がするように均一にそろえることが難しいことからして一般的であったとは思えません。弦の素材として革や腱が使われたという記録の大半は、弦の見かけ上から革や腱に見えた（内臓というよりも）ためで、実際にはガットであったと思われます。

近年（２１世紀に入って)、食肉（ソーセージ）生産業界の競争が激しくなり、羊腸の不足と価格高騰を招きました。コラーゲンでできていてガットによく似た性質をもつ、牛の漿膜が羊腸の安価な代用品としてよく使われます。漿膜は動物の体内で腸を腹膜につないで支える膜状の器官です。

ガット弦を使う中世の楽器にはリラ(lyres), ハープ(harps), ロート(rotes), フィドル(fiddles)、（ジーグ(giges)　やレベック(rebecs)を含む), ハーディー・ガーディー(hurdy gurdies)、 シトール(citoles)、リュート(lutes)、 ジターン(gitterns)　などがあります。

ガットの素材はほとんど常に羊から取られました。また時には、特に雄羊か去勢羊と特定されました。たまに狼のガットに触れている資料もありますが、ほとんどの場合「狼のガットと羊のガットを一台の楽器で混ぜて使うとトラブルのもとだ」という俚諺とともに警告が添えられています。２０世紀には豚の腸で作られた紐が上げ下げ窓の釣り合い重り用のロープとして使われました。

ガット弦は、弦作りが専業とされるようになるまでは、もともと演奏者自身が作っていました。(専業メーカーの最古の記録はドイツ、ミュンヘンで１５世紀のものです）[9)]。１３世紀の製法によると、以下のような説明があります[10)]。

> *「羊の内臓をとりだしてきれいに洗ってから、腱のような素材から肉質が簡単にとれるようになるまで、水か灰汁に半日以上漬けます。それからきれいな指か羽軸などで素材から肉質をきれいにとります。それから強い灰汁か赤ワインに二日間浸します。それから取り出して、亜麻布で拭いて乾かし、ほしい太さにあわせて３～４本をあわせて充分に撚り合わせます。次にそれを壁にそって掛けて乾かします。乾いたらおろして、湿気すぎず、乾きすぎない場所に保管します。乾燥しすぎたり湿気すぎたりすると弦は傷みます。それから使うまで保管します。」*
> *10)*

訳注：現代でも基本的なプロセスは 13 世紀と同じです。写真左から羊腸材料、クリーンアップ、ワインディング、乾燥ラック　写真：ＴＯＲＯ社提供

中世の初期には中国から絹作りの技術がアラビアに伝わりました。９世紀ごろには、アラビアのリュートにはガット弦同様に絹も使われました。６世紀半ばには絹作りはビザンティウムにも伝播し、１５世紀にかけてヨーロッパの他国にも拡がりました[11)]。 ペイジ氏の研究では１４世紀初期の資料２点が絹の弦について触れています。一つは、高価な装飾を施されたフィドルについての記載で、もう一つはガットや金属とならんで弦の素材として触れられています。１９世紀の文献によると絹糸はアラビアゴムで束ねられており、その時代から弓で弾く弦楽器用にガット弦の代品として時折使われました。１８世紀後半から、ギターに使われる巻線の芯として絹綿が標準的に使われるようになりました。

２０世紀中ばにはギター用巻線の芯材としてナイロン綿が絹に置き換わり、ナイロンの単線がガッ

トの裸線に置き換わりました。それ以来、ナイロンなどのプラスチック材や金属を編んだ線が大半の弦楽器用の弦の芯材としてガットに置き換わっています。

ポリエステル弦はガットに近い比重を持っています。フッ化ビニリデン樹脂はガットよりもずっと比重が重いので、ギターやリュートではナイロンの単線よりも良い音を出すためにこれらのタイプが使われています。

ペイジが調べた中世の資料の一つでは、フィドルの弦はガットか、または馬の毛だったと書いてあります。その資料は１５世紀イギリスのもので、詩編 150:4 について１４世紀に書かれた注釈を引用しています[12)]。

１４世紀のウェールズの資料では楽器によっては馬の毛が使われたと示唆しています[13)]。
今でも、民族楽器によっては馬の毛が使われているものがあります。

１．３　金属弦　Metal strings

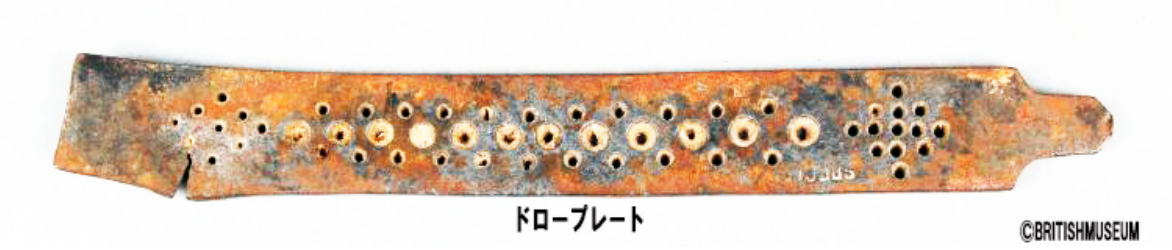
金属弦が使われた最も初期の記録は１２世紀後半のものです。その記録では、アイルランドとそれを模倣したウェールズ、特にスコットランドでの速く複雑な奏法のことを述べています。

その記録ではそれぞれの国で使われた楽器の名前に触れています。それらの名前が具体的になにをさすのかは今日でははっきりしませんが、ハープがその中に含まれたことはいかにもありそうなことです。それらでは、銅合金が使われました（実際の説明では「ブロンズ（青銅）」とありますが、銅合金であればなんであってもおかしくありません）。

その資料では、金属がガットに置き換わったのか、それとも代用品であったのかははっきりしません[14)]。１３世紀初頭のフランスの二つの記録と、１世紀あとのものでは、銀または金の弦をはったハープについて触れています。ハープに金属弦を張る習慣はフランスでは根付きませんでしたが、アイルランドではバロック後期まで続きました。

伝統的に金属弦を張る他の唯一の中世の楽器はプサルテリウム(psalterium)です。１３世紀中ばに始まって、多くの資料が、銅合金または銀（それ以前と、それ以後も時折ガット弦も）であったと述べています。ヨーロッパ以外では１３世紀までに中国で銅合金の弦が使われたという報告があります[15)]。

古く古典時代や中世初期には、鉄線は針金としてはその強さで、釘としてその固さで尊重されました。しかし鉄は他の銅合金や貴金属のようにドロープレート（針金引き抜き用板　次頁写真参照）を使って引き抜くには固すぎたので、鍛造（ハンマーで叩いて整形）されました。鍛鉄は楽弦に使うにはあまりにもむらが有りすぎました。１４世紀にドイツの針金メーカーが水力を利用して鉄を引き抜くことを実用化しました。それ以前の他の金属線（銅線、貴金属線）に比べて鉄線ははるかに強度があるので、鉄線を使うとより高音に調弦することができるようになりました。



訳注：均質な太さの針金を作るためには上記のような板に穴が空いた「ドローブレート」から金属を引き抜いて作りました。従って、炭素鋼などの固い素材は非常に力がいるので作れず、昔は金銀などの貴金属や真鍮などの銅合金が主に使われました。

この結果、高音域には鉄弦を、また低音域には銅合金の弦を張ることによって弦長の限られた楽器でより広い音域を演奏できるようになりました。このことは直接的に１４００年ごろにハープシコードやクラビコードの発達に寄与しました。鉄弦は他の素材よりも安定して耐久性もあるので、限られた音域しか必要ない楽器でも有利な点があります。これは１５世紀イタリアでのチェトラ(cetra)の開発に貢献しました。この楽器は古代のシトール(citole)を復活させたもので、後代のシテルン(cittern)の先祖にあたります。

１５８０年前後に、それ以前のものよりも半オクターブ高く（ガット弦なみに）調弦できるくらいさらに強い鉄弦が開発されました。それはニュルンベルクのヨプスト・ミュラー(Jobst Meuler)が極秘の製法を使って作ったものです。イギリスのシターン(cittern)やオルファリオン(orpharion)などの新しい楽器がこの新弦による音域を試すために開発され、またヴァイオリンやアーチリュートなどの既存の楽器でも試されることがありました。プレトリウスの記録によれば、１６００年以降、ミュラーはさらに強度を増すような技術を開発しました。しかし、その後の経緯を見ると彼はあきらかに政治家としてよりも冶金技術者としての能力が優れていたようです。１６０８年にウィーンの皇室裁判所によって、ライバルの一人が全ての針金生産についての独占権を認められました。一方１６１０年にニュルンベルクの市議会はミュラーが他者は作れない需要の大きな新種の針金を発明したという主張を支持し、一旦は独占の対象外であると認められました。しかし１６２０年にウィーンは、ライバルにさらに強固な独占権を与え、ミュラーが個々の注文に対応するにはその都度市議会の承認を得なければならないことになりました。その結果、ミュラーは製法の秘密を公開しないまま事業をやめてしまいました[16]。

この後、ミュラーの針金ほどハイピッチ（ガット同様か、それ以上に高く）にチューニングできる針金は、１９世紀になってスチールのピアノ線が開発されるまで現われませんでした。

２０世紀の後半には宇宙技術開発の派生技術として生まれたピアノ線よりずっと強い金属合金が、強度を必要とする新しいヴァイオリン族のために、アメリカの弦メーカーによって利用されました。

訳註：１９世紀後半から炭素含有率の高いスチール弦（いわゆるピアノ線）が実用化されましたが、それ以前には一般的に低炭素の鉄線が使われました。チェンバロ用の弦などでも、 iron を 古代鉄と訳される場合もあり、昔の鉄弦(iron)と近代の産物であるスチール／ピアノ線とを区別するためにここでは「鉄弦」と訳しました。

２．弦の構造　String Constructions

２．１　ガット弦の撚り　Twist in gut strings

ルネッサンス期とそれ以降の典型的な弦撚り器は弦を撚る場所の下には、細長い槽が据えてありました。その槽は、濡れたガットから落ちる水を受けて流すためです。また、実際に強く撚られた際に縮んで固まってしまわないように、弦を低く垂らして浸けられるだけの深さがあります。槽の片側には同じ大きさの歯車がついた二つのフックがあって、回すためのハンドルがついた大きな三つ目の歯車と噛み合わさっています。このギヤシステムで、ハンドルをまわすと二つのフックは同じ方向に同量だけ回転します。槽の反対側には固定した掛け釘があって、先の二つのフックの片方からもう一つのフックにガットの撚り糸を掛け回します。撚り糸の一端はループにしてフックにかけ、掛け釘にゆるく引っかけてから他のフックに引っかけ、また掛け釘をまわしてから最初のフックに戻します。(訳注：4 頁、右から二つ目の写真が今も使われている弦撚機です)

この作業を、最終的な弦の太さに充分な撚り糸の量（経験で判断します）になるまで繰り返し、端をループにして結んでからフックにかけて余分な端は切り落とします。

撚りをかけたあと、弦端のループをフックからはずし、乾燥棚の２本の掛け釘にかけわたします。撚りの度合いは、撚った結果どの程度全体の長さが縮んだかによって判断できます。直接的にはガットの目に見える繊維の方向と、弦の長さ方向との角度で解ります。典型的なローツィストでは３０度以下、典型的なハイツィストのものでは４５度以上になります。

特定の撚りを得るために必要な撚りの回数は最初の弦の直径に反比例するので、細い弦は太い弦以上に撚らねばなりません。同じ撚り回転数であれば、細い弦よりも太い弦の方により撚りを与えます。もし最大限の撚りを加えようと思うなら、乾燥棚で弦が乾いて直径が小さくなるにつれて少しずつ撚りを足していきます。さらに縮む余地を与えるためにペグの位置を動かさねばならないかもしれません。撚り作業中に、弦の一部（通常は端のほう）がコルク栓抜きのような螺旋状に変形し始めたら撚りは最大限と言えます。全体がこのようなコルク栓抜き状になるまで撚ることもできますが、ここまで撚ると通常は実際に使いものになるテンションになる前に切れます。

弦を撚ると、表面に近い繊維は中心に近い繊維よりも長い距離をとっています。ラックにかけて撚られると、表面側の繊維にかかるテンションが大きいので、全体として繊維の長さとテンションを平均化するように（内側の弱いテンションがかかった繊維を外側に押しやりながら）中心に向けて移動します。最初から撚ってある細い弦を数本編み合わせて作ったヴェニスカトリンのような場合、この作用はより効果的に働きます。

２．２　ロープ編みのガット弦　Roped gut strings

１２世紀初頭の、プサルテリーと道徳観念を関連付けて考察した文章で、「弦は乾かして、撚られて、引き延ばされる。同様に人は肉欲から解脱（乾燥）して、道徳で編まれて、愛を敷衍しなければならない」と述べました[17)]　編まれてというのは弦についてではなく徳について述べられていますが、これで見るとルネッサンス期以前にも奏者が適当と思えば、ロープ編みのガット弦は奇抜な物とは見られなかっただろうと思われます。演奏家達は、普通の作り方では作れないような太い弦がほしい場合に、いつでも手元にある細い弦を何本か捩り合わせて欲しい太さにしたのはとてもありそうな事に思えます。[18)]

ベニスカトリン　写真:TORO 社提供

リュートの第六コースに開放弦が加えられるとロープ編みのガット弦が役に立ち、上記のような弦撚器が使われて弦製作が専門化されるようになると現実的な解決法になりました。こういった弦撚器を使うときは、まず最初に二本かそれ以上の同じ弦を作ってから、それらをあわせてフックにかけてまた撚ります。最初のところであまり撚らなければ、できたロープの表面は普通のロープ編みに見られる凹凸がなく、また弦の伸 びも少なくなります。最初にいっぱいに撚ると、弦の表面はでこぼこします。それは磨いてなめらかにはできますが、伸びは大きくなります。

特に均質で柔軟な弦が１６世紀初頭にミュンヘンで作られていたという記録があります。[19)]　おそらく高価格だったためと思われますが、あまり普及はしませんでした。その後、アメリカ大陸からの金のおかげで豊かであったスペインから、高価ではありますが入手することができました。バルセロナで弦の製造が盛んになっています。[20)]　１５４３年のフランス王室の勘定書きを見ると、弦がいかに高価だったかがわかります。この勘定書きにはヘンリー二世のためのヴィオール四台が１８０ルーブルで、一台のヴィオールのための１セットの弦が９ルーブル。つまり、５本のガット弦５セットが、王のために作られたヴィオール一台の価格と同じだったということになります。

ヴィウエラが突然使われなくなったのは、１５５７年のスペイン王家の突然の経済破綻と時を同じくするように見えます。このスペイン王家の破綻は当時経済を支えていた南ドイツの豪商たちの多くを破産させました。[21)]　ヴィウエラの衰退は、これらの弦が入手できなくなったことに由来するようにも思えます。つまり、もともとのミュンヘンの弦メーカーたちがバルセロナの弦産業を経営しており、この破綻の犠牲者に含まれたことを示唆しています。スペインから弦の入手が出来た時代には、これらの弦はイギリスで'catlin'という名前がつけられました。多分、バルセロナが属するカタロニア地方 'Catalan' に由来すると思われます。１５７０年代以降は、弦生産はフランス、ドイツとイタリアで盛んになりました。そこでは比較的安価に、安定した供給が見込めたので、これらを使った新しい楽器の開発も安心してできるようになりました。当時はロープ状に編んだガット弦は、太い弦は特に、凹凸が目立ちました。イタリアではこれらはコルドーネと呼ばれました。

２．２　撚った金属弦　Twisted metal strings

濡れたガット繊維はとても柔らかくよく滑るので、撚られる時に繊維相互の位置が入れ替わったりこすれあったりしてもほとんど抵抗がありません。このために、全ての撚るプロセスは、片側を撚るだけで実行できます。しかし実際の弦撚器では両端を撚ります。全弦長の真ん中を反対側のフックを通すことによって弦から落ちる水を受ける水槽の長さを撚り終えた最終の弦の長さの半分ですませ、また両端を同時に撚ることでハンドルの回転数も半分ですむようにという工夫です。

金属線や通常の太い縄を編むための植物性の繊維では、この柔軟さと滑りのよさはありません。これらの場合は、回転するフックと移動ブロックとの間で撚りをかけます。ロープ状に編まれた部分が長くなるにつれてブロックを離して撚りの角度を一定に保ちます。ロープ部分とブロックとの距離によって繊維がロープに編み込まれる角度が決まるので、ブロックの動きで撚りの強さをコントロールします。繊維のもう一方の端は二つ目の移動ブロックにつながり、ロープをピンと張っておく役割を果たします。ロープの撚りが二つのブロックの間の繊維を撚り、第二のブロックには金属線の場合には断線したり、植物系の繊維の場合は螺旋状の大きなねじれを起こしたりすることがないように緩衝装置(provision)が組み込まれねばなりません。第二ブロックは撚り作業中には繊維にかかるテンションが変わらないようにフックの方に向かって移動させます。

金属線を撚って（または編んで）作られた弦の記録は１６世紀中頃、フランスのシターン用の弦に遡ります。同世紀後半ではイギリスでマクシマム-ツウィスト真鍮弦(maximum-twist brass strings)が作られるようになり、斜めのフレットや扇状ブリッジをもったバンドーラ(bandoras)やオルファリオン(orpharions)が作られました。撚りをかけた真鍮弦は１７世紀に入っても作られました。１８世紀にはそれはシターンやマンドリンに使われましたが、最大撚り真鍮弦を断線しないように作るのはとても難しく、作られなくなったようです。今日に至るまで、巻線の芯線としてはスチールの撚り線が使われています。

２．３　巻線　Overspun or wound strings

全てのテンションを支える芯線があって、そのまわりに重さを増すためのなんらかの材料を巻き付けたものを「巻線」(covered, overspun, or wound strings)と呼びます。この種の弦は１７世紀中頃に発明されました。その後の半世紀ぐらいは、楽器のサイズが小さいために通常の弦では充分低く調弦できないという楽器をのぞいて普及はしませんでした。１８世紀には低音を拡張したい楽器以外にもたとえばヴァイオリンの４Ｇ弦など、より早いレスポンスがほしい弦にも使われるようになりました。

巻線機の作業　　写真：TORO社提供

巻線を作るには、芯線を二つの回転するフックのセット間にピンと張るか、回転するフックと、もう一方は芯線が反対側の回転フックによる捻りによって自由に回転するフックとの間に張ります。

被覆材料は、まず一端をフックにかけた芯線に固定し、伝統的には、平均的に巻き付くように一定のテンションがかかるように手で調整しながら回転する芯線に巻き付けます。作業者のもう一方の手は被覆材が芯線にあたる部分に触れて余計な振動を抑え、巻きをガイドします。充分な長さまで巻いたら被覆材を芯線に固定し、残りを切り取ります。ガット芯に巻く場合、最後の固定は最終の巻きの下に巻き込んで素早くぐいっと引くことで切ります。金属芯に巻く場合は、しばしば芯線の最後の部分を事前に平らにしてほつれにくくしておきます。近代の製造機では巻位置が移動するのにあわせて被覆線をフィードする作業は機械化されています。安定して高速に作業する目的で両サイドから同時にフィードすることもあります。

２０世紀中ばまでには、大半の巻線はガット芯線に丸い金属線を密に巻いたいわゆるクローズワウンド弦(close wound)が作られていました。１９世紀から２０世紀にかけて、ときおりこういった丸い金属線を巻いたままの丸巻線の表面を磨いてスムーズにすることも行われました。クローズワウンドの弦というのは、弦は各巻き毎に前の巻に密着して巻かれたものを言います。１９世紀以前には各巻の間にすきまがある弦（フランス語で demi-filée　訳注：オープンワウンドという呼び方をされることもあります）が作られ、一般に裸弦の最低弦よりさらにもう一つ低い弦として使われました。これで裸弦とクローズワウンドの巻線との間の音色変化をなだらかにすることができましたが、やり方として通常の裸ガット芯線のなめらかな表面の上に巻いたのか、でこぼこしたロープ状芯線の表面の溝に巻いたのかは不明です。

鉄芯か絹芯の上に金属を巻いた弦は１８世紀中ばに撥弦楽器用として現れました。絹芯の上に絹を巻いた弦は、現代でも伝統的な日本の琴用弦として使われています。(近年、アメリカのリュート製作者が真似をして、ガット芯の上にガットを巻いた弦を作りました。)

プレトリウス（Michael Praetorius）によると、ガイゲンヴェルク（geigenwerck）というチェンバロに似た楽器の弦として、太めの真鍮か鉄芯に薄い羊皮紙（パーチメント）を巻いた重めの弦が作られていました。ここで羊皮紙を使ったのは、松脂を塗った羊皮紙によってホィール（wheel）と呼ばれるドラムの引っかかりをよくするためと思われます。羊皮紙は軽いので、特に重さを増す目的に使われたとは思えないので、ホィールがあたる近辺だけに巻かれていた可能性もあります。

訳注）　geigenwerck というのは、チェンバロの撥弦機構を一連のホイール（ドラム）　状のものに変えたような形をしており、それで弦をこすって音をだす楽器です。実際の楽器製作は非常に難しく、その後途絶えた楽器です。発音機構的にはハーディー ガーディーを大がかりにしたようなものです。ホイールが回って弦をこすって音を出すので、その動作を bowing と言っているの だと思います。

２０世紀中頃から、薄く平らな金属を機械で何層かに巻いた弦が弓で弾く弦楽器用の弦として一般

的になりました。芯線と最初の被覆、また各金属の被覆層の間には合成繊維の層が巻かれました。この繊維層は芯線が伸びて細くなったときにゆるくなった金属被覆からビリつきノイズが出るのを防ぎます。芯線が伸びても被覆線は伸びないので、被覆線の巻きの間にすきまができることはありません。丸巻き線が芯線に食い込んでいるために起きることがありますが。ガット芯線の場合、この方法によって被覆線の間から染み込んでくる湿気によるチューニングの不安定さを抑止します。一方で、繊維被覆のために振動エネルギーが抑えられて少しだけパワーが落ちますが、通常はボーイングによって充分なパワーが入力されるのでカバーされます。クラシックギターなどの撥弦楽器については瞬間的にはじかれた弦振動の全エネルギーを活かしたいのでこういった平巻き線は使われませんでした。

３．弦の製造技術 String Technology

３．１　メルセンヌーテイラーの法則 Mersenne-Taylor Law

メルセンヌーテイラーの法則によれば、４つの変数のうち３つが与えられれば、最後の一つは計算できます。変数は、振動弦長（L）と演奏される音の基音ピッチ（f）、弦のテンション（T）、それに弦の比重（m_L）です。これら四つの変数の関係は下記数式（１）となります。

$$fL = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{T}{m_L}} \qquad (1)$$

もし素材が均一な円筒形であれば、$m_L=\rho A$ (ρ は素材の密度、A は断面積です。弦の素材に対するストレス（S)は T/A として表されます。素材が破断される前の最大ストレスはその「引っ張り強さ」と定義されます。

また、断面積は $A = \pi D^2/4$ と定義されます。D は弦の直径です。（これらの等式の中での全ての変数は首尾一貫した単位で表示されなければなりませんが、実際には単位を変えた方が便利な場合もあります。たとえば、弦長（L）はｃｍで、弦の直径（D)は mm で、弦のテンション（T）は kg で、弦の密度(ρ)はｃｍ^{3}あたりのグラム数で、などです。

このような単位を用いた場合、メルセンヌ-テイラーの法則は、

$$fLD = 5588\sqrt{\frac{T}{\rho}} \qquad (2)$$

となります。

もし弦が均一な円筒形でない場合（たとえばロープ状に編んででこぼこしているような場合)、D は等価的な直径を意味します。すなわち、真円と同等とみなされる直径、つまり単位長あたり、均一な円筒形であった場合と同じ質量になるような直径です。

３．２　巻線　Wound strings

１９世紀以前には、弦メーカーが巻線を商業的に提供したという記録はありません。ガット弦や金属弦の上に金属を巻くというのは、演奏者、楽器製作者、または音楽用品の専門調達業者によって行われました。特定の弦を巻くのに使われる金属線の直径は極秘とされたことを示唆する資料もあります。

さて、弦楽器に用いる弦において、コアの周りを別の線で巻いた弦の等価的な口径についてはこれまで色々な計算方法が提案されています。 コアの直径 D_c、密度 ρ_c、元々の巻線の直径 D_w、密度 ρ_w とすると、通常の密巻線では下記の式が使われます。

$$D^2 = D_C^2\left[1+\pi\frac{\rho_W}{\rho_C}\frac{D_W}{D_C}M\right] \tag{3}$$

ここで M は、近似による係数です。どのような近似も正確とは言えませんが、普通は高い精度は要求されません。そこで、MRI 社では次の式を用いています。

$$M = \sqrt{A+B\left(\frac{D_W}{D_C}\right)^2} \tag{4}$$

ここで、q は弦の軸方向における巻線ターンごとの間隔として、定数 A と B は次式で表されます[22)]。

$$A = \left(\frac{D_W}{q}\right)^2 \tag{5}$$

$$B = \frac{1}{\pi^2} \tag{6}$$

この式は粗巻線ではよく成り立つし、密巻線の場合でも、D_w が D_c よりも小さい場合にも適用できます。スチール線のコアに銅の巻線を用いる場合で、D_w と D_c がほぼ同じ場合、体験的に $A=2$ 、 $B=0.9$ であることを当社(NRI)では確認しています。

３．３　異なる弦の相対テンション　Relative tensions of different strings

高い音の弦のほうが低い音の弦よりも細いのが普通です。その楽器の周波数毎のレスポンスの違いや演奏者の弦から受けるタッチ、また我々がどういうふうに音を聴くかなどの複雑な要素によって太さがどう違うかは変わってきます。違いを説明するのに弦のテンションのバランスは有用です。その楽器の全ての弦の長さが同じでかつほとんどの弦にわたってメロディーが演奏される場合、そこに張ってある弦のテンションはほぼ同じように思われます。この原則は６コースでナットが一つのリュートにはあてはまりましたが、後年付け加えられた低音バス弦ではテンションは落ちる傾向にありました。ヴィオール族についてはだいたい当てはまりましたが、小型のルネッサンス期のものの最低音弦では、ハイツィストのガットをちゃんと鳴らすために幾分低いテンションで張られました。１８世紀中ばまではフィドルでもあてはまりましたが、イタリアではおそらくレスポンスの速さを最大にするために４弦に巻線を使ってテンションを下げました。この低音弦のテンションを下げる習慣は、イタリアにおけるオペラの流行とともに拡がって今日のヴァイオリンまで伝わっています[23)]。１９世紀にはチェロもこのやり方にならいましたが、時によって４弦のテンションが３弦よりも高く、１弦のテンションに近いぐらいまで張られることもありました。

長さの異なる弦が張られている楽器では、大半の弦のテンションは弦長に対して特定の乗数に比例するという法則に見合っているように思えます。この乗数の法則では、弦１と弦２について、それらのテンション $T_2/T_1=(L_2/L_1)p$ となります。ここで L_2/L_1 は長さの比率で、p はべき乗数です。モダンハープの裸線では、p は約０．６です。Rose & Law 便覧にあるオリジナルの弦のセッティングによれば、ハープシコードの高音４弦か上１オクターブでは p が０．３で当てはまります[24)]。

特殊な事例は 、$p=0$ 及び $p=1$ の場合です。$p=0$ というのは、長さに関係なくテンションは一定ということです。これはごく一般的に、一本の弦を指板にそって上や下のほうで押さえた場合に起こります。また、これは初期の鍵盤楽器の弦の間でも起きました。$p=1$ の場合は、テンションは長さに比例します。これはテンション-長さの原則で、一般にナット（上駒）とブリッジ（駒）が並行である撥弦楽器、擦弦楽器族の対応する弦にあてはまるように思われます。

３．４　変位　Displacement

弦を弾くとき、弦を開放する直前にはもともとの定位置から距離 d だけずれた位置になります。弾く位置は、ブリッジから距離 X にあるとします。弦の振動弦長は L とします。弦を弾く力を F とした場合、d が X よりずっと小さい場合（普通に楽器を演奏する場合）は $dLT=FX(L-X)$となります。弦が伸

びる量を ΔL とすると [55]、

$$\frac{\Delta L}{L}=\frac{d^2}{2X(L-X)}=\frac{X(L-X)}{2L^2}\left(\frac{F}{T}\right)^2 \tag{7}$$

３．５　伸縮性とフックの法則　Elasticity and Hooke's law

フックの法則（Hooke's law）では、伸縮性のある弦で張力の変化はそれが引き起こす圧力の変化に比例すると述べています。張力の変化は弦の伸びの相対値（$\Delta L/L$）で、圧力の変化(ΔS)はテンションを断面積で割った($\Delta T/A$)です。伸縮性またはヤング率(E)は、張力で圧力を割ったもの、または

$$E=\frac{\Delta T/A}{\Delta L/L} \tag{8}$$

と定義づけられます。これは、素材の伸縮性があがるほど率は小さくなるので、逆数を取ってスティフネス（stiffness）と呼んでももいいでしょう。伸縮率は、でこぼこしたロープ編みのガットではハイツィストガットの半分で、それはさらにローツィストガットの半分です。

圧力や張力に関わらず、もしその素材が伸びるときにその原子や分子が常に隣接した相手との関係を保つならば、弾性定数はまさに定数です。もし圧力の結果で変形して近傍関係が変化する場合、圧力が変わったための伸びは大きくなります。これは、もし圧力がなくなった時にもとにもどらないならば非弾性の伸びと呼ばれます。これは圧力が破断限界に近づくとほとんどの素材で起こります。そこまででなくとも、真鍮、ガット、多くのプラスチック素材で、分子同士の近傍関係が崩れる場合発生しますが、そのうち時間が経つと安定した状態になります。

ガットでは半弾性の伸びと呼んでもよいような中間の状態があります。弦をまったくテンションのない状態に音をずらした後、しばらくすると少し張力がもどっている状態です。この変形からの復活は、高い張力下と低い張力下では繊維の落ち着く道筋が異なる結果です。

３．６　不安定なピッチ　Pitch instability

実際に弦が振動して出す音は、弦を弾く強さ、つまり振動の大きさによります。上で述べたことから、ある瞬間におけるピッチの変位は、

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{1}{2}\frac{E}{S}\frac{\Delta L}{L} \tag{9}$$

振動周期における$\Delta f/f$の平均は最大の半分、または

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{1}{4}\frac{E}{S}\frac{\Delta L_{\max}}{L} \tag{10}$$

で表されます。ここで、$\Delta L_{\max}/L$は周期中の最大変位長です。撥弦楽器ではこの最大変位長は弦をリリースする直前の変位なので、$\Delta L_{\max}/L = d^2/[2X(L-X)]$となります。この変位を起こしたエネルギーが、弦のもつ全ての運動エネルギーなので、楽器自体が振動してそのエネルギーを吸収するにつれて弦の振動の大きさは減ってピッチも下がります。最悪の場合、耳で聴いた最初のピッチがすぐに継続して確認されなければボロンという程度の聞こえ方になります。これは弦が非常に弱くはられたときに起こりがちです。弓で弾く弦では最大変位は弦の中央部で起こり、

$$\frac{\Delta L_{\max}}{L} = \frac{2d_{\max}^2}{L} \tag{11}$$

です。フレットの無い弓で弾く楽器でとても強く弾く場合は、しばしばチェロのC弦で行われるように、ピッチを合わせるためにフィンガリングを少しフラット（♭）目に押さえて調整します[26]。

３．７　弦の最高音限界　Highest pitch for a string

チューニングに関する初期の解説では、最高音弦を切れる直前まであげるところから始まります。切れる直前ということは、もっと低いストレスがかかった状態に比べるとより変形が進んでいるので、切れやすく高価に付く選択です。そのため、どこまでピッチをあげるかというのは、どれだけ弦を長持ちさせたいかという判断を伴うことになります。最近の意見では、弦が切れる音の高さよりもほぼ１全音低いピッチにあわせれば良いというのを聞きました。ハープシコードの最高音の鉄弦は、約半音低く、クラビコードでは、半音の２倍くらいが良いでしょう。この楽器では弦は手荒く叩かれるからです。

弦が切れる力の等式は下記で表されます。

$$S_{\max} = \frac{T_{\max}}{A} \tag{12}$$

撚りあわされた弦の耐張力は、繊維は弦全体より以上に引き延ばされることになるので、撚りの量に関係します。最高音弦では、強度を最大限に保つために、使いものになる最低限度の撚りにとどめます。金属単線の弦では、その弦を作るときに針金引き板から引き出す力の強さによります。大きな力で引き出すほどもろくなります。このもろさで、ピンのまわりに巻き付けたときに太い弦ほど細い

弦よりも切れやすくなります。したがって、細い弦のほうが太い弦よりも強い力で引き出されても使用に耐える強度を維持します。

最高音弦は通常は均一の円筒形なので、弦が切れるときのメルセンヌーテイラーの法則は

$$(fL)_{\max} = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{S_{\max}}{\rho}} \qquad (13)$$

で表されます。ある演奏上の様式（カルチャー）の中で、音楽家が容認する安全な張力の上限は、上限の周波数と振動弦長の積(fL)となります。ここで、名目上のピッチと標準ピッチの両方を知る必要があります。弦長はメートル法で表して、この最大値を fL 値と呼びます。弦の素材が違えば繊維の強度が違い、また密度も違うので fL 値も異なります。

３．８　ガット弦の最高音限界　Highest pitches for gut strings

プレトリウスのシンタグマ・ムジクム[16,19,20]では、広範囲の種類の楽器について、彼の基準ピッチ（a が約４３０Ｈｚ）と名目上のピッチ名と弦長（比率の正しいイラストによって）を知ることができます。開放弦で最も広い音域幅を持っている楽器は、安心して使える範囲のもっとも高音域の弦を使っていたように思えます。これらの楽器は、リュート、パドアのテオルボ、大型の５弦フィドル、それにヴィオラ・バスタルダ(viola bastarda)です。fL 値はそれぞれ 211, 209, 207, 209 m/秒で、210 が一般的な値として想定されます[27]。この fL 値を使って、表 I の左半分ではプレトリウスの時代に最も一般的に使われた基準ピッチの範囲で使われていたと考えられる最高音用の最長弦長を示しています。なお、イタリアのコリスタ（corista)、イギリスのコンソートピッチは、ドイツのコアトーンと同じです。

１９世紀半ばにオーケストラの木管楽器が、より輝かしい音を求めて基準ピッチを上げる方向で開発されたとき、多くのバイオリニストは彼らのガット１弦で fL 値の限界に悩まされました。１９世紀後半での妥協点は、a'=440Hz で、ヴァイオリンの１弦の fL 値は 216 でした。音楽家の中には、近代のガットは昔のものより弱いという人もいましたが、ハープの高音弦によっては 220 を超えても大丈夫でしたから、そんなことはありそうも無いと思えます。近代のバロックヴァイオリン奏者たちは、ヴァイオリンを学ぶ過程でモダンヴァイオリンに使われる耐久性の高いスチール弦に慣れてはいます。しかしながら、近年のバロック演奏習慣である a'=415Hz に基づくヴァイオリン１e''弦の fL 値である 203 では発生する断線のリスクが小さいので、このような低い値の使用を受け入れているのです。

３．９　金属弦の限界最高音　Highest pitches for metal strings

もしプレトリウスが描いたバンドーラ（bandora）の弦長が、扇形フレッティングが発案されたころから変わっていないとするなら、またこのようなフレッティングが開放弦のチューニングピッチの最大限界の結果だとみなすなら、第一コースの鉄弦の *fL* 値は 157 で、ガット弦の場合よりも 5 半音分だけ低くなります[28]。ミュラーの鉄弦は fL 値 157 で作られました。プレトリウスのオルファリオン（orpharion）では、第一コースの g'で 6 半音分高くなっています。さらにミュラーが技術を改良した結果、プレトリウスのテオルボリュート（theorboed lute）では近代のピアノ線とさほど違わない fL 値 276、ほぼ 4 半音高い値を達成しました。彼の秘密の製法が、ピアノ線に似た製品を作り出したというのもあり得ない事ではないでしょう。

ニュルンベルクの他の針金製造者たちは、ミュラーの針金の真似をしようとしたことでしょう。彼らは製法を改良して、昔のハープシコード弦として *fL* 値 180 まで達成しました。今に残る古いハープシコード弦の切れ端から、強化するための添加物は近代のスチールのようなカーボンではなくて、リンだったことがわかります。これはカーボンを含まない鉄の場合のみ有効ですが。彼らはまた、真鍮線の *fL* 値も約 150 まで改良したようです。

３．１０　ピッチのひずみ　Pitch distortion

ここでピッチのひずみとは、弦を押さえているときに少し引き延ばすことによってピッチが上がることを言います。これはギターやハーディーガーディーでヴィブラートをかけるときに普通に使われる方法です。また、これはフレットを打ってある楽器で特定のタイプの金属弦がどの程度まで低音弦に使えるかを限定します。弦を伸ばすとテンションはあがります。フックの法則から、$\Delta T/T = (E/S)(\Delta L/L)$。メルセンヌ-テイラーの法則から引き出せるのは、どの程度ピッチがあがるかは

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{\Delta L}{L} + \frac{1}{2}\frac{\Delta T}{T} = \frac{\Delta L}{L}\left[1 + \frac{1}{2}\frac{E}{S}\right] \tag{14}$$

で定義されます。*E/S* は通常は 1 よりずっと大きい（ヴァイオリンのスチール第 1 弦では 140）ので、1 は無視してもよいぐらいです。したがって、

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{1}{2}\frac{E}{S}\frac{\Delta L}{L} \tag{15}$$

著者の耳で我慢できる $\Delta f/f$（ピッチの上昇）は、約 0.02 で、半音の三分の一ぐらいです。この限界

に近づくと、次の低音弦の弾性率はより低いものが必要になります。バロック時代初期の金属弦の順番は、ミュラーの鉄弦（1580～1620）、通常の鉄弦、真鍮、真鍮の撚弦（低→高）でした。

３．１１　ピッチひずみを考慮した最低音　Lowest pitch due to pitch distortion

ある決まった弦長の特定の弦のタイプでは、限界ピッチより低くチューニングすると良い音が出ません。上記のように問題が $\Delta f/f = (1/2)(E/S)(\Delta L/L)$ のピッチ歪みであれば、張力 S をメルセンヌ-テイラーの法則 $\Delta f/f = (1/2)(E/S)(\Delta L/L)$ によって、より意味のある変数に置き換えると

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{1}{8}\frac{E/\rho}{f^2L^2}\frac{\Delta L}{L} \qquad (16)$$

になります。

訳者註）原文の式(16)に誤りがあり、著者により上記に訂正されています

$(\Delta L/L)$ は弦と指板の相互作用で微調整して最小化することができますし、いずれにせよ一台の楽器の中で考えれば定数としてとらえられます。我慢できる最大限のピッチ歪み $\Delta f/f$ も定数としてとらえられるので、許容できる最低音の fL は $\sqrt{E/\rho}$ に比例すると見なしてよいでしょう。

これで特定の弦素材の最低音域を他の素材の弦から弾性比率と密度を使って計算できます。プレトリウスのバンドーラ（bandora）から最高音域で fL 値 157 と想定できる昔の鉄は昔のフランスのシターン cittern に張られた鉄弦からすると約５半音分だけ低い最低音域を想定できそうです。１８世紀のギタッラ・バッテンテ(guitarra battente)では、全部鉄弦が張られており開放弦で６度（半音９個）の音域を持っていたので、もう一つ推論することができます。E と ρ の値は既定なので鉄またはスチール、銅または真鍮、銀、金とローツィストのガットの $\sqrt{E/\rho}$ ははそれぞれ約 5,100, 3,100, 2,800, 2,140 m/秒になります[29]。　このように、一定の弦長の場合、鉄またはスチールに比べて、銅または真鍮の最低音は８.6 半音低く、銀では１０．４個分、金では１５個分、ローツィストのガット弦は１５．４個分低くなります。ローツィストのガット弦は非調和性（inharmonicity）のために金属弦よりもずっと高いピッチで使えなくなります。

> 訳注）　inharmonicity という単語の適切な訳語が見つけられなかったので「非調和性」という造語を作りました。
> 適切な訳語をご存じの方がいらっしゃいましたらどうぞご教示ください。

３．１２　倍音（ハーモニクス）の非調和性　Inharmonicity

ある特定のタイプのガット弦において使いものになる最も低い音とは、基音の倍音（ハーモニクス）が消えて鈍く焦点の定まらない音になったところといえます。倍音が無くなるということは、倍音が

基音および他の倍音との間で調子はずれになって位相が互いに打ち消されることから起こります。どれだけの非調和倍音があるかは

$$\frac{f_n}{nf_1} = 1 + B(n-1)^2 \tag{17}$$

で表されます。ここで、各変数は下記を表します。

f_1：基音すなわち第１次モードの周波数

f_n:　第ｎモードと呼ばれる倍音の実際の周波数

nf_1：基音とチューニングがとれているとした場合の第ｎモードの名目の周波数（f_nとは等しくない）

　また B は、

$$B = \frac{\pi^2}{32}\frac{E}{S}\left(\frac{D}{L}\right)^2 \tag{18}$$

である非調和倍音の定数です。Bが小さいけれど無視できない大きさの場合、高次倍音が少し高くなります。ことのために、ピアノやダルシマーのスチール弦で見られるように独特の響きを与えます。このために、オクターブの正確なチューニングに問題が出てきます。（例えば、１オクターブ上の音を基音のオクターブ上に正確にチューニングしても、基音の１オクターブ上の倍音はそれとは異なる音なのです。）また、最高次倍音を減らすようにすると、状況によって柔らかい音になる反面輝きをなくします。

３．１３　非調和性によるピッチの最低限界　Lowest pitch due to inharmonicity

最低音の弦で非調和性の問題が出る場合、非調和性の定数を得る等式の中の S を非調和音定数に置き換えて

$$B = \frac{\pi^2}{128}\frac{E}{\rho}\frac{D^2}{f^2L^4} \tag{19}$$

を得ます。もし議論を特定の楽器群に限定するなら、テンション／弦長の原則（テンションは弦の振動長に比例する）を当てはめることができます。そうすると、許容できるぎりぎりの非調和音の定数 f^4L^5 はこのタイプのガット弦、少なくともこの種の楽器に適用できる定数です。　この関係において低音域での大きなサイズの楽器では小さい楽器よりも全体として使い物になるピッチの範囲が大きいと言えます。このことは歴史的に見た体験とも合致しています。

　オクターブのペアになったセットの弦では、高い方のオクターブ弦が上記の非調和効果で失われた倍音を補完するので、最低音の単弦の場合よりも非調和が受容しやすくなります。プレトリウスのリュートは開放弦で非常に広い、２オクターブ半の音域を持っていました。最低音はオクターブ・ペア

の弦として限界の低さだったと思われます。彼のビオラ・バスタルダ(viola bastarda)タイプのヴィオールは２オクターブと４度の開放弦音域を持っており、少なくともヴィオールとしては単弦として最低音の限界だったと見なして良いのではないかと思います。f と L のそれぞれから定数の f^4L^5 が計算でき、各弦長から最低音のピッチが計算でき、また各最低音に対して最短の弦長も計算することができます。プレトリウスの他のヴィオールに関する資料やイギリスのヴィオール（サイズは同じだがピッチが異なる）についてのデータはヴィオラバスタルダから計算された限界と一致しています。プレトリウスのフィドルについてのデータも同様です。上で計算された定数 f4-の値は（最低音の単弦でもオクターブペアでも）ロープ状に編まれたガット弦の一般的な最低音限界についても充分な推定値とみなしてよいのではないでしょうか。[30)]

表Ｉのリストの右半分は、プレトリウスの時代に最も一般的に使われた３種の標準ピッチで使われる可能性のある最低音に対する最小弦長のリストです。なお、イタリアのコリスタ(corista)とイギリスのコンソートピッチ(consort pitch) はドイツのコアトーン (chorthon)と同じでした。

ロープ編み、またはカトリン弦のピッチに加えてハイツィスト弦の最低音弦に該当する４度高いピッチの欄もあります。

３．１４　ガットに含まれる水分の影響　Effects of moisture content on gut

ガットには吸湿性があるので、水分は湿ったガットからは蒸発するし、乾燥したガットは空気中の水分を吸収します。蒸発も吸収も起こらない状態では、含水率（その重さに対する水の比率%）は相対湿度の平衡点（その気温のときに空気中に含まれうる最大限の水分）にあります。テンションをかけると繊維は強く押しつけられるので、水気の吸収を妨げます（水は繊維を膨らませる傾向がありますから)。その結果、相対湿度の如何にかかわらず、ガットの平衡含水率は下がります。

昔からの製法の巻線は、ガットが湿気で膨らむと巻いてある金属が伸び、乾燥した時にガットが縮んだ結果巻線がゆるくなって雑音が出るようになります。もしこういう巻線が密閉した袋に入れてあるなら、楽器に装着して調弦できるときまで封を開けないことをお勧めします[31)]。芯線がふくらんで雑音のもとになることを少しでも防ぐためです。　１９００年前後に書かれたコントラバス４E 弦のある仕様では、最初に鉄を巻いてあとで銀メッキされた銅線を巻くというものがあります。ガットが湿気で膨張することを鉄が防ぐという意図でしょう。

湿度の低いところから高いところに楽器を移動した際に、ガット弦はピッチが高くなる傾向があります。これは、弦が膨らんで、繊維は撚り合わせてあるので、弦端の留めの間の弦を膨らませ、結果としてテンションを強くするからです。もし湿気が特別に高いところに、弦が吸湿して平衡点に達するほど長く置くと、弦の重さが増してピッチを下げます。

高湿度はガット弦の引っ張り強度を相当に弱めます。このことの理由は、湿気は最終的に弦が破断

するような変形を促進するからです。

楽器の置かれている環境の温度が夜間に下がると、まわりの空気中に含まれる水分の量は変わらないために相対湿度があがり、ガット弦の水分もあがることになります。楽器を充分クッションの効いた気密なケースに入れておくと、宵越しの断線の恐れを減らせるでしょう。

３．１５　素材変形による音への影響　Effect of creep on sound

弦の素材に力がかかったために変形する場合、英語の”creep”（這う）という言葉どおりに、とてもゆっくりと着実に進行するように見えます。しかし、微視的なレベルでは実態は違います。ミクロンレベルの各部分は、それぞれ圧力のかかり方が違います。変形は、最大の圧力がかかっている部分が近接する部分に対して突然ずれることで起こります。これは、こういったズレを起こせるような弱い切断面がある場合にのみ起こります。このズレる動きでこの部位への圧力が弱まる一方、近接部位に圧力を分散させて他の場所が最大の圧力を受けるようになり、同じような変形を引き起こします。ガット、プラスチックまたは真鍮のような材料でできた弦は素材変形のために伸びたら戻りません。最初にチューニングされて、あとは安定します。安定するのは直前の動きによって組成が動いて、剪断可能な面がなくなるためです。弦が切れるのは、負荷がかかっている数本の微細構成部分、または繊維の破断から始まります。その結果、残っている部分にさらに過大なストレスを与え、その結果なだれ現象的に同様の破断が続いてとまらなくなります。

構成組織が突然滑ると、微少な音振動を起こします。同様に音の振動は、それがなければ起こらなかったような組織の滑りを引き起こす可能性があります。これが起こると、すべりによって振動のエネルギーが吸収されるので、伸び続けている弦はいくぶんか音を吸収してしまいます。このためにハープシコードに張られた新しい弦はその弦の最大限の音を響かせる前に落ち着くための時間が必要で、またガット弦を使う奏者はそれが切れる直前には音が鈍くなることに気がつきます。

３．１６　弦の診断　String pathology

昔の指導書のでは、「ガット弦の品質を試すには両手の指で両端をはさんで引っ張っておいて、空いている指で弾いてみる。もし見かけ上、はっきりと２本の弦のイメージが見えるようなら良い弦で、二本のイメージの間にぼやけて見えたり、波うって見えたりする場合はよくない弦だ」と解説してあるものが多く見られます。　二つの放物線状のイメージは、弦が振動サイクルの中で振動の両端に近く一番とどまっている時間が長い場所です。ここでは弦の全長の中で単位あたりの質量が平均的である

かどうかをテストしています。もし特定の場所の質量が平均より大きかったり小さかったりすると弾かれたときにそこで異質の波が起こります。もしこういう良くない弦を楽器に張ると、これらの異質の波が正常な波と干渉して（過度の不協和音のように）振動波の位相を打ち消して倍音を弱め、音を鈍くします。

中世の鉄弦は、こういった均一性を欠くために楽弦としては使えませんでした。針金引き板で作られた針金は断面が一定（引き板の穴と同じ大きさで）なので、楽弦として使えます。近代の芯無し研削盤を使うと、ガットやプラスチックの素材で高度な均一性を出すことができます。それ以前の、平たい研磨板の下で何本ものガット弦を回転させて磨く方法は、断面が真円ではなく楕円形になるという別の症状を起こしていました。金属弦で、針金引き板の穴が正円でない場合も同じ症状を起こします。

弦振動は平面の中で起こり、振動する際に影響する弦の曲げ強度はこの平面内でみた弦の太さによります。ここから、振動の周期は振動の方向に影響されると言えます。実際には、弦の振動方向は安定していません。結果として音が出ている間の周波数には、お互いに影響しながら幅があることになります。

ガット弦の曲げ強度は、弦が使われるテンションに関係します。もし弦を構成する繊維がお互いにゆるく押しつけられていれば、弦は曲げに対してとても柔軟ですが、チューニングされてテンションがかかり、繊維をお互いに強く押しつけられると繊維どうしがしっかり結合されているのと大差なくなります。多くの音楽家が曲げ強度は音の暖かさに関係するというので、しっかりと固められていない弦に魅力を感じるようです。

ところが、この件に関して以下に紹介するすべての古い資料は、しっかりとしたボンド（結合）を意味する固い弦が好まれたことを示しています。すなわち、

- ダウランド(1610):「もしそれらが固ければ、しっかりと保持してとても良い。
  （原文　‘If they finde stiffe, they hould them then as good.’）　」
- バーウェル(c.1670):「固い(Hard)。」
- メース(1676)「指でさわって固い(Stiffness to the Finger)。」
- ガレアッツィ(1791):「柔軟で強い(Elastic and Strong.)。グニャグニャして曲がりやすいのは駄目(Not limp and yielding.)。」

いずれにしても、ボンドが弱くなっているのは古くなった証拠です。

３．１７　ガット弦の外見　Visual appearance of gut

早い時代の資料ではガット弦の外見を述べるのに「クリア」とか「透明」といった言葉を使っています。これは、指でつまんだときに、向こう側の蝋燭の光が多少なりとも見える、少なくとも半透明と

いう状態です。もしまったく光が通らなければ、光を吸収してしまう色素があるか、透過する前に全ての光を乱反射させてしまっているかのどちらかでしょう。光を乱反射させるのは光の通り道にあたる素材の屈折率の大きさの程度によります。

品質のよくない弦に見られるように、繊維の間に空気層があると弦がとても白く見えます。このすきまを例えばオイルのような他の素材で充填すると、その素材の屈折率がガットに近いほど弦は透明に見えるようになります。初期の記録は弦メーカーがオイルを使ったことを示唆しています。通常のガット弦をオイルに浸すと透明度が増します。繊維の間に（巻線のように弦の重さを増すために）重金属の粉や重金属塩を入れると提唱する人もいますが、初期の記録とは違うと思います。

３．１８　古くなった弦　Aged strings

繊維の間に含まれる油脂分は、時間とともに蒸発したり変質したりして、オイルを沁ませたガット弦はより透明になります。ガットそのものは、時間がたつと（酸化のためかもしれませんが）茶色くなり幾分か弱くなります。博物館などで、茶色く不透明な弦を見ることがあります。これらは１８世紀以前のものではなく、おそらく、当時一般的だったようにもともと二酸化硫黄で漂白されていたと思われます。こういった処理は伝統的に乾燥果物の保管のために使われました。こういった漂白処理される以前には、ガット弦の保存にとっては細菌による腐食が一番の問題でした。現在、古楽器ではオリジナルの楽器を復元したものが珍重されており、それらは古びて見えます。この観点から、しばしば、漂白していない不透明な弦を好む古楽奏者もいます。

古くなった鉄弦は本来の強さは失いませんが、表面の錆が進むと微細なひびわれが発生して内部に進行し、弦が切れる原因になり得ます。真鍮は長期に見ると不安定な素材で、亜鉛が銅に溶け合った個溶体なのですが、亜鉛が銅から溶け出して結晶境界に集まる傾向があります。これは脱亜鉛現象と呼ばれて、真鍮弦（真鍮製の楽器もそうですが）の寿命を縮めます。

<本文了＞

表 I: ガット弦の長さとピッチの限界（プレトリウスによる）

Table I: Gut String Limits of Pitch and String Length from Praetorius

最高音に対する最長の弦長				最低音に対する最短の弦長							
弦のタイプ	基準ピッチ			弦のタイプ		基準ピッチ					
	Mersenne	Chorthon	Cammerthon			Mersenne		Chorthon		Cammerthon	
ローツィスト	375 Hz	383 Hz	430 Hz	カトリン	ハイツィスト	375 Hz		383 Hz		430 Hz	
						単	オクターブ	単	オクターブ	単	オクターブ
pitch	(cm)	(cm)	(cm)	pitch	pitch	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)
c'''	24	23	21	c'	f	23	21	23	20	21	19
b''	25	24	22	b	c'	24	22	24	21	22	19
	26	26	23			26	23	25	22	23	20
a''	28	27	24	a	d'	27	24	26	23	24	21
	30	29	26			28	25	28	25	25	22
g''	31	31	27	g	c'	29	26	29	26	26	23
	33	33	29		b	31	27	30	27	28	25
f''	35	35	31	f		32	29	32	28	29	26
e''	37	37	33	e	a	34	30	33	30	30	27
	40	39	35			35	31	35	31	32	28
d''	42	41	37	d	g	37	33	36	32	33	29
	44	44	39			39	34	38	34	35	31
c''	47	46	41	c	f	41	36	40	35	36	32
b'	50	49	44	B	e	43	38	42	37	38	34
	53	52	46			45	40	44	39	40	35
a'	56	55	49	A	d	47	41	46	41	42	37
	59	58	52			49	43	48	43	44	39
g'	63	62	55	G	c	51	45	50	45	46	41
	67	65	58		B	54	48	53	47	48	43
f'	71	69	62	F		56	50	55	49	50	45
e'	75	73	65	E	A	59	52	58	51	53	47
	79	78	69			62	55	61	54	55	49
d'	84	82	73	D	G	65	57	63	56	58	51
	89	87	78			68	60	66	59	61	54
c'	94	92	82	C	F	71	63	70	62	63	56
b	100	98	87	BB	E	74	66	73	65	66	59
	106	104	92			78	69	76	68	70	62
a	112	110	98	AA	D	81	72	80	71	73	65
	119	116	103			85	76	84	74	76	68
g	126	123	110	GG	C	89	79	88	78	80	71
	133	130	116		BB	93	83	92	82	84	74
f	141	138	123	FF		98	87	96	85	88	78
e	150	146	130	EE	AA	102	91	101	89	92	82
	158	155	138			107	95	106	94	96	85
d	168	164	146	DD	GG	112	100	111	98	101	89
	178	174	155			118	104	116	103	106	94
c	188	184	164	CC	FF	123	109	121	108	110	98
					EE	129	115	127	113	116	103
						135	120	133	118	121	108
					DD	142	126	139	124	127	113
						148	132	146	129	133	118
					CC	155	138	153	136	139	124

参考文献

1) C. Sachs, The History of Musical Instruments (Norton, New York, 1940), pp. 78, 80.

2) H. Panum, Stringed Instruments of the Middle Ages (Reeves, London, 1940), ed J. Pulver, p.24.

3) C. Sachs, op. cit. p.131.

4) W. Bachmann, The Origins of Bowing (O.U.P., 1969), p. 81.

5) W. Bachmann, op. cit. p. 79.

6) W. Bachmann, op. cit. p. 78.

7) C. Page, Voices & Instruments of the Middle Ages (Dent, London, 1987), Appendix 4.

8) M. Peruffo, 'More on gut strings', Comm. 1417, FoMRHI Quarterly No. 82 (Jan. 1996), p. 36.

9) K. Dorfmuller, Studien zur Lautenmusik in der ersten Halfte des 16. Jahrhunderts (Tutzing, 1967), p. 32.

10) C. Page, op. cit. p. 235.

11) W. Bachmann, op. cit. p. 78.

12) C. Page, op. cit. p. 240.

13) C. Page, op. cit. p. 216.

14) C. Page, op. cit. p. 229-30.

15) W. Bachmann, op. cit. p. 80.

16) That there was an anomalously strong wire available around 1600 became apparent in the analyses of pitches and string lengths reported by Abbott & Segerman in Galpin Soc.J. XXVII (1974). A few years later, Michael Morrow called my attention to a letter by Heinrich Schutz referring to Jobst Meuler, the string-maker, that seemed to be relevant. I mentioned this in Comm. 438 FoMRHI Q 29 (1982). That letter was the subject of Comm. 439 FoMRHI Q 30 (1983) by Karp. The evidence on strong wire was summarised by me in Comm. 440 FoMRHI Q 30 (1983), and the story about Jobst Meuler was properly researched and reported in Comm. 866 FoMRHI Q 51 (1988) by R. Gug.

17) C. Page, op. cit. p. 227.

18) Mimmo Peruffo has shown me a photo of a lyre depicted on a silver cup from Roman times discovered in Berthouville (Normandy) in 1830, now in the Bibliotheque Nationale. The lyre had 7 strings, each of which appears to be made from thinner strings twisted together.

19) Vitale, Compositione di meser Vicenzo Capirola (c. 1517) ms in Newberry Library, Chicago, ed. O. Gombosi, (Neuilly-sur-Seine, 1955), p. XCII.

20) J. M. Ward, The Vihuela de Mano and its Music, New York University PhD (1953), p. 22.

21) F. Braudel, The Mediterranean and the Mediterranean World in the Age of Philip II 2nd ed. (1966), English transl. Reynolds (1972), p. 511.

22) E. Segerman & D. Abbott, 'Overspun string calculations', Comm.163, FoMRHI Quarterly 13 (Oct. 1978), p. 50.

23) E. Segerman, 'Strings through the ages', The Strad 99/1173 (Jan 1988), pp. 52-5, 99/1175 (Mar 1988), pp.195-201 & 99/1176 (Apr 1988), pp. 295-9.

24) E. Segerman, 'A power law in the stringing of instruments with varying string length', Comm. 1418, FoMRHI Quarterly 82 (Jan. 1996), p. 38.

25) E. Segerman, 'Some relationships involving string displacement', Comm. 1806, FoMRHI Quarterly 107-8 (Apr-Jul 2002), p. 25.

26) E. Segerman, 'Some theory on pitch instability, inharmonicity and lowest pitch limits', Comm. 1766, FoMRHI Quarterly 104 (Jul 2001), pp. 28-9.

27) E. Segerman, 'Further on the pitch ranges of gut strings', Comm. 1657, FoMRHI Quarterly 96 (Jul 1999), pp. 54-8.

28) E. Segerman, 'Praetorius's plucked instruments and their strings', Comm. 1593, FoMRHI Quarterly 92 (Jul 1998), pp. 33-7.

29) E. Segerman, 'Some theory on pitch instability, inharmonicity and lowest pitch limits', Comm. 1766, FoMRHI Quarterly 104 (Jul 2001), pp. 28-9.

30) E. Segerman, ibid

31) E. Segerman, 'Stress and equilibrium moisture content in gut and wood', Comm. 1771, FoMRHI Quarterly 104 (Jul 2001), p. 39.

End

著者略歴

エフラム・セジャーマン　Ephraim Segerman

１９２９年にニューヨークで生まれる。１０代のころから趣味でリュートとヴィオールを演奏。若い頃は結晶学と物理学者として最初はアメリカの、後にイギリスの石鹸産業に勤務。マンチェスター大学で物理の博士号を取得。マンチェスター工科大学で生物物理学を、王立ノーザン音楽大学とマンチェスター大音楽学部で音響学の教鞭をとる。１９７０年代から友人の楽器製作者の求めに応じて音楽が本来どういう響きを持っていたのかという未解決のテーマに取り組む。ここから楽器用弦の歴史と製造技術について集中した研究を始め、またそれは続いている。研究の成果として発見した、歴史的に作られていたと思われる楽器や弦（ガット、シルク、各種の金属）を実際に作るために、ジルダ・アボットと共にノーザン・ルネッサンス・インストゥルメント（ＮＲＩ）社を創業。ジェレミー・モンタギュー、ジルダ・アボットとともに FoMRHI (The Fellowship of Makers and Researchers of Historical Instruments 歴史的楽器の制作・研究振興会)を設立。最初の４半世紀の間、会の季刊誌の編集者を務め、この間に彼自身が１００近くの記事を寄稿。２００６年に「ヨーロッパの弦楽器の発達」'The Development of European StringedInstruments' (ISBN 978-1-84753-356-2)　という本を上梓。

訳者略歴

伊賀健一　（いが　けんいち）

1940 年広島県生まれ。1963 年東京工業大学卒、工学博士。1984～2001 年東工大教授。面発光レーザを中心とする光通信用デバイスに関する研究。2007～2012 年東工大・学長。2013 年の Franklin 賞（Bower Award）を授賞。

学生時代よりコントラバスを始める。野田一郎氏に師事。町田フィルハーモニー交響楽団コントラバス奏者、町田フィル・バロック合奏団代表。

野村成人（のむら　しげと）

1949 年大分県生まれ。1973 年神戸大学卒。1973～2005 年日本楽器製造（株）（現　ヤマハ（株））勤務。2006 年（有）コースタルトレーディングを創業。代表取締役に就任。チェンバロ、ヴィオラ・ダ・ガンバ、ガット弦などの古楽器を中心に輸入販売。ネットショップ「ムジカ・アンティカ湘南」を通じて全国に顧客層をもち、良質のガット弦の提供、使用方法の知識普及に努める。

A Primer on the History and Technology of Strings

- 楽器の弦 -　その歴史と製法

第一版　1刷

2013年9月

© 2013 Shigeto Nomura　All rights reserved