

JAPAN ORGANIST

36

2009

日本オルガニスト協会

パイプオルガンの歴史的な合金の復元が 真のバロック音楽をよみがえらせる

B.バレットキー, M.フリーゼル, B.シュトラウマール
B.Baretzky, M.Friesel, and B.Straumal
(訳: 津田 能人, 山崎 敏昭)

要旨

パイプオルガンは楽器の王である。力強さ、音色、ダイナミックレンジ、音の複雑さ、壮大さでパイプオルガンに匹敵する楽器はない。オルガン製作の芸術はバロック時代(～1600-1750)にピークに達した: 19世紀の産業革命で、オルガン製作は伝統的な芸術家の仕事から工場での生産に移っていき、世代を通して受け継がれていたオルガンマイスターの深い知識は失われて、オルガンの美的概念やデザインは変化していった。

ヨーロッパ全体の研究者、音楽家、オルガン製作者の密接な協力で、この知識は再び創られてきている。17世紀から19世紀のオルガンパイプから採取された多数の金属サンプルが、これらの組成、微細構造、性質、製造過程を決定するために、金属科学の高度な方法を用いて探究されてきた。これらのデータに基づいて、鉛-スズのパイプ合金、リードパイプの真鍮部品のための鑄造、成形、ハンマーたたき、圧延、曲げ、アニーリング(焼きなまし)の技術が再び考案され、特定の時期、特定のヨーロッパの地域に応じたこれらのものを復元するためにカスタマイズされてきた。この方法で再製造された新しい物質は、古いオルガンの復元や真のバロックの音を持った新しいオルガンの製造のために現在も加工され、オルガン製作者によって用いられている。

序

最初のオルガンに似た楽器は、アレクサンドリアのクテシビオスという名のギリシャの職人によって246B.C.頃に造られた。世界に現存する最も古い演奏可能なオルガンは1435年あたりに造られたもので、スイスのシオンにある。17、18世紀

にオルガン製作の芸術は頂点に達した。プロテスタントの教会で、オルガンは教会儀式的な中心的な構成要素であった。結果として、北ドイツやオランダの豊かで強大なプロテスタント地域がバロック時代を通じてオルガン製作の中心となった。

産業革命、ロマン派と現代音楽のスタイルの影響、増大する熱心な聴衆が19、20世紀のオルガン製作の美的な考え方、デザイン、方法を急速に変化させた。初期の小さな工房での数少ない職人とオルガンマイスターによる製作に比べ、現在のオルガンは大工場で多くの労働者、機械によって製作されている(訳注:現在のオルガン製作が必ずしもすべて大工場で行われているとは限らないが、量的には圧倒的部分が大工場による生産品である)。現代の技術革新(例えば、機械部分の電子化など)による数多くの表現豊かなパイプ列やクレッシェンドペダル、新しい材質、巨大なオーケストラオルガンの要求はオルガンの音を劇的に変えてきた。結果として、何世代も渡って受け継がれてきたバロックオルガン製作の深い知識は失われた。¹⁻³

失われた芸術を取り戻す

20世紀の後半には、バロック音楽への関心が復活し、歴史的に正確な音はよりよく復元したバロック時代の楽器や伝統的な手法を用いて製作された新しい楽器によってしか達成されないことについての理解が見られるようになった。その結果、ふさわしい音質を持つ楽器の復元、新しい楽器の製作のためにオルガン製作の失われた芸術を復興することへの関心が育っていった。

最近の10年で、スウェーデンのイエーテボリ・オルガン芸術センター(Göteborg Organ Art

Center : GOArt) はチャルマーズ工科大学 (Chalmers University of Technology) (共にイエーテボリにある)の研究者と密接に協力して、科学研究に基づき、バロック時代の音をもつオルガンを製作する新しい技術を発展させた⁴⁵。結果として、彼らは、スウェーデンとヨーロッパが基金を提供した北ドイツオルガンプロジェクトの体制の中で、歴史的なバロックの楽器の正確な復元と本物のバロックの音を持つ新しいオルガンの製作の両方に成功した。北ドイツ、リューベック市の大聖堂 (Lübeck Cathedral) (1699年、1942年に倒壊)、ハンブルグの聖ヤコビ教会 (1693年) に造られたアルプ・シュニットガー・オルガンに啓発され、その種のオルガンの最初のものがGOArtの作業場内に組み立てられ、近年、イエーテボリのエルグリテ新教会 (Örgryte Nya Kyrka in Göteborg) に据え付けられた (図1)。本物のバロックの音を持った別の新しいオルガンは、北ドイツオルガンプロジェクトにも参加した、ヘン

ク・ファン・エーケン (Henk van Eeken) の工房で作られ、オランダの“北方教会”(訳注：“北方教会”とは、17世紀に造られたプロテスタント教会の総称、Noorderkerk → (独) Nordkirche) であるライセン教会 (Rijssen) に新設された。また、最近ソウルの韓国国立芸術大学 (Korean National University of Arts in Seoul) のためにもそのようなオルガンが新設された。J.S.バッハの音楽によく適しているとされるオルガンで、アダム・ゴットロープ・カスパーリーニ (Adam Gottlob Casparini) によって1776年に、リトアニア、ヴィルニウスの聖霊教会 (Church of the Holy Spirit in Vilnius, Lithuania) のために製造され、北ヨーロッパ後期バロックオルガンで最大かつもっともよく保存されたものの複製が、ニューヨーク州、ロチェスター市のイーストマン音楽学校のためにGOArtによって建造され、2008年にロチェスターのクライスト・チャーチに据え付けられることになっている。

図1

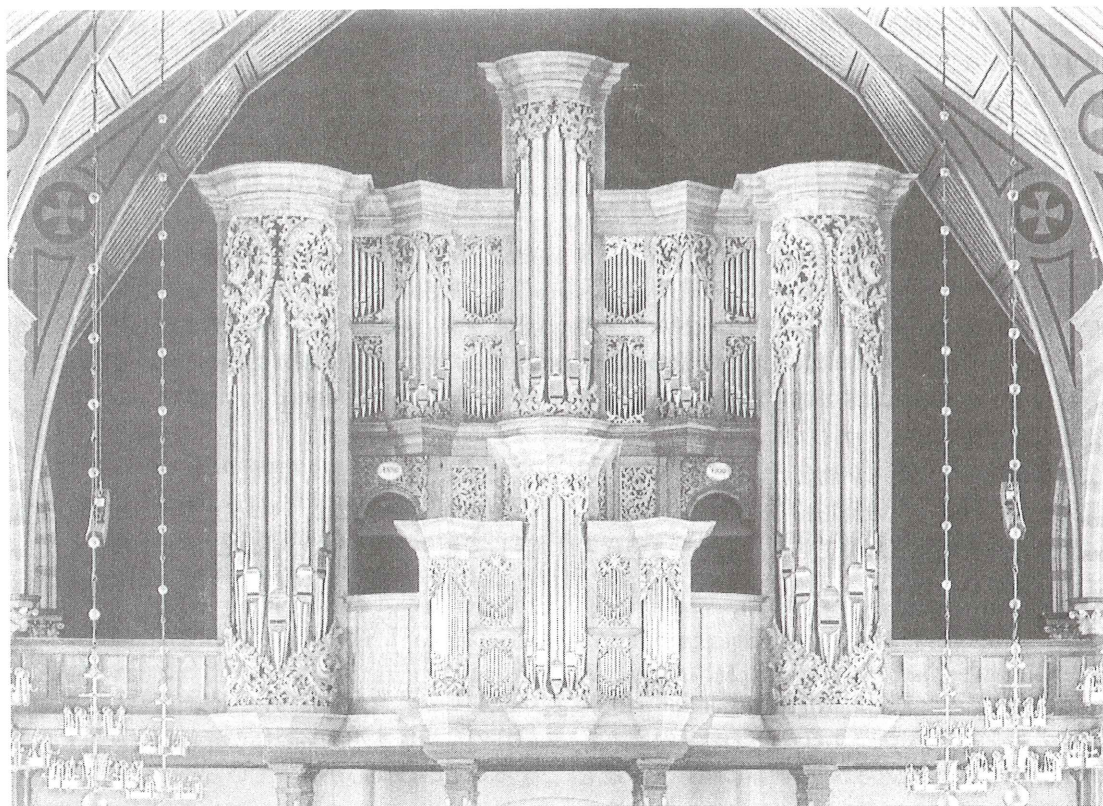


図1 バロックの技術を用いて組み立てられた新しいバロックスタイルのオルガンで、スウェーデン、イエーテボリのエルグリテ新教会 (Örgryte Nya Kyrka in Göteborg, Sweden) に1999年に据え付けられた。

バロック時代の楽器への要求——もとの楽器を復元するものも新しく再現するものも——は日増しに増大している。TRUESOUND と呼ばれるプロジェクトの中では、4つの研究機関と5人のオルガン製作者と一緒に歴史的な銅合金——真鍮——の再現に従事している。その真鍮は現在の普通に流通しているものと比べて、組成、微細構造、機械的性質、加工性が違うものである。このプロジェクトの結果として、オルガン製作者はこれらの合金からつくられた新しい部品を受け取り、テストし、バロック教会オルガンに組み込んだ。その中には、オランダ、アンローのマグヌスケルク (Magnuskerk in Anloo, the Netherlands) の1718年製のオルガン (図2)、ラトビア、ウガーレの福音ルーテル教会 (Evangelic Lutheran Church) の1701年製のオルガン、ヴィルニウスの有名なカスパリーニ・オルガンの新しく製造されたヴォックス・フマーナ音栓などがある。

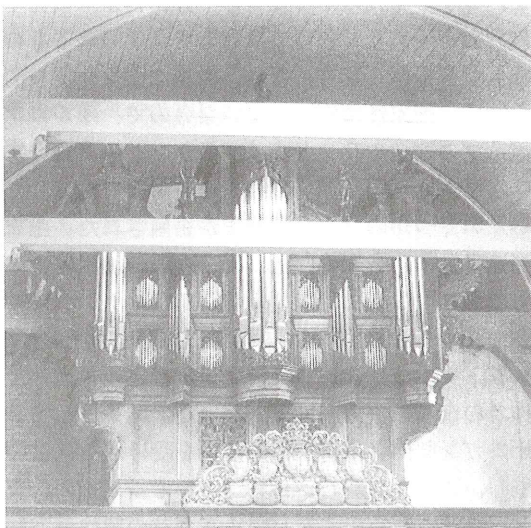
バロックのパイプオルガン：構造と操作

パイプオルガンは、巨大なパイプを通して一定の圧力で送り込まれる空気、'風'によって音が作り出される楽器である。オルガニストは、ノブを引いたり、キーを押したり、ペダルキーボードを用いたりして音の出るパイプを選択する。すべてのオルガンはフルーパイプ (唇管) (図3) を持つが、より高度化したオルガンはリードパイプ (舌管) も含んでいる (図4)。

フルーパイプの構造はリコーダーを思い起こさせる：フルーパイプは一般的に先が開いており、底に近づくにつれ細くなっていて、先細部分の上の平らな部分に'マウス'がある。パイプ内部には、'ラングイド'と呼ばれる固定された水平板があり、それとマウスの下側'リップ'の間に'フルー' (狭い隙間) がある。風が下側から大量に供給され、先細のフット (足部) でパイプの中に入り、パイプに振動を引き起こす。適切な音栓とキーの作動によって風がフルーパイプに行くようになると、風は上昇しながら流れていき、フルースリットから出るときには板状の噴流を形成する。噴流はマウスを流れ、上側のリップをたたく。そこで上側のリップとラングイドの間で相互作用が生じて、パイプ内に空気柱の振動を促し、パイプの'おしゃべり'を生じる一定の振動が維持されることになる。

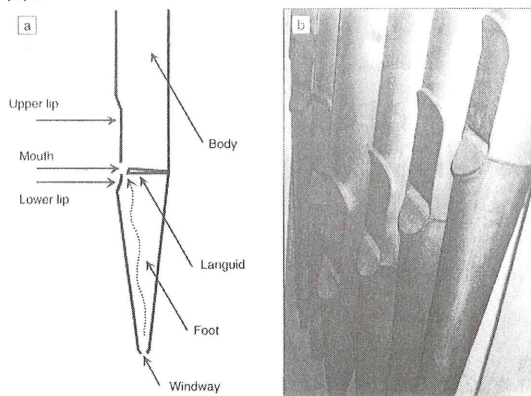
オーケストラのトランペットやトロンボーンを模したリードパイプは、オルガンの音色に美しい温かさと燃えるようなファンファーレを加える。リードパイプの音の生成はリード楽器と同様である。リードパイプの底から風が入ると、小さな金属タンクがシャロットに向かって振動し、音を作り出す。これが共鳴管によって増幅し、音が調整される (図4 a)。リードパイプの音は整音でオルガン製作者によって調整されたタンクのそり具合に決定的に依存する。リードパイプのピッチは調

図2



オランダ、アンローのマグヌスケルク (Magnuskerk in Anloo, the Netherlands) の古いバロックオルガン (1719年) で、バロックの技術を用いて1999年に再生された。

図3



(a) バロックオルガンのフルーパイプの概略図。点線は空気の流れを示す。(b) リトアニア、ヴィルニウスの聖霊教会 (Church of the Holy Spirit in Vilnius, Lithuania) のカスパリーニ・オルガン (1776年) の古いフルーパイプ。

律ワイヤーの位置を上げ下げすることで調整される。これはシャロットに対するタングの位置を保ち、タングが振動できる部分を長くしたり、短くしたりする。いくつかのパラメーターがオルガンの特徴的な音や音色を決定する：共鳴管の形、タングに用いられる金属、風の圧力、パイプの大きさなど。リードパイプがないと巨大なオルガンの音楽をうまく表現することはできない。

材料科学の科学者とオルガン製作者：共同研究

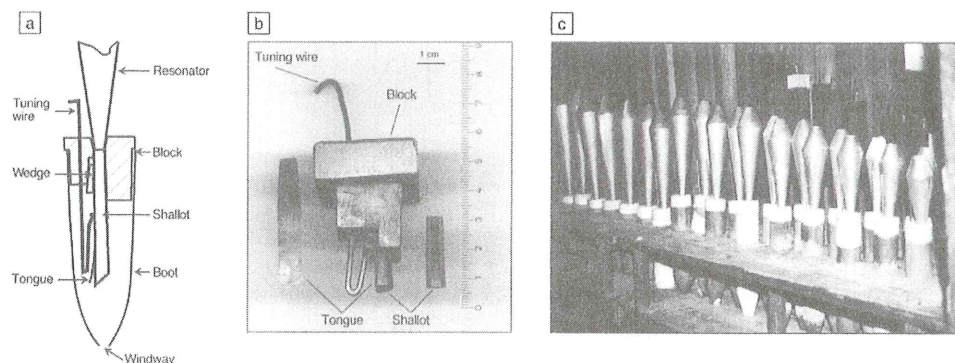
バロック時代のオルガンを十分に再生、復元するための適当な材料は商品として入手できるものでもないし、これらの組成、微細な構造や機械的な性質、加工性は知られていないので、オルガンパイプの合金やリードパイプのタングの真鍮を作り出し、処理する独自の技術の再構築を探究していくいくつかのプロジェクトが企画された。主な到達目標は、音質の向上および真鍮の加工性の向上であり、これは特にリードパイプのタングに重要である。EUが基金を出した TRUESOUND プロジェクトでは、材料科学の科学者とオルガン製作者の直接の協力が可能になった。結果として、オルガン製作者は新しい銅合金を受け取り、試験をし、これらの新しい材料を古いオルガンの修復と歴史的な音を出す新しいオルガンの製作両方に利用した。この論文では、これらの研究成果を簡単に述べる。

フルーパイプ（唇管）、リードパイプ（舌管）の共鳴管のための合金

歴史的なオルガンパイプの研究は、鉛錫合金のパイプが比較的多く砂上鑄造⁵で作られていることを示した。不幸にも、17世紀のオルガン製作者の砂上鑄造法の詳細な記述はもはや存在していない。

北ドイツオルガンプロジェクトでは、オルガンパイプ材料の鑄造過程が再考案された。^{1,2,4-6} 錫と鉛はルツボで溶かされる。合金の融解温度や鑄造するパイプの大きさによって決まるある温度で、溶けた金属は鑄造容器の中に注がれる。それから職人はすばやく鑄造容器を動かしながら、砂の延展床に一定速度で引き下ろしていくと、そこには薄い金属板が残る。鑄造容器を動かす技術によって、鑄造した板は端の方へ連続的に薄くのびていく。金属はすぐに、熱容量の大きい砂と液体（例えばオリーブオイル）の混合物でできた厚い砂床の上で凝固していく。金属板は砂床の温度まで急速に冷却され、その後は大変ゆっくりと冷却される。このような方法で作られたパイプの材質は、硬さ、安定性、加工性、音質の点で商品として入手できるパイプ板と比べて優れた性質を所有している。歴史的なオルガンパイプはまた先が薄くなっていて、このことが優れた安定性と同時に優れた音の共鳴を与えている。不純物や微量成分の比率、鑄造温度、砂と液体の温度は金属の性質、さらにその結果としての音質に影響を与えている。^{1,2,6}

図 4



(a) リードパイプの概略図 (b) ドイツ、ハンブルクの聖ヨハネ修道院教会に以前にあったアルプ・シュニットガー・オルガン (1680 年) のタング、シャロットを含むリードパイプの部品(共鳴管とブーツはなし)。このオルガンはドイツ、カッペルの聖ペーター & ポール教会 (St. Peter and Paul Church in Cappeln, Germany) に移設された (c) リトアニア、ヴィルニウスの聖霊教会のカスパーリーニ・オルガン (1776 年) の復元したヴォックス・フマーナ音栓

タングとシャロットの合金

リードパイプ (図4) はフルーパイプと違う方式で構成されている。この中心部分はタングと真鍮のシャロットから成る。共鳴管は一般にフルーパイプと同様に鉛錫合金で作られる。タングの振動はリードパイプの音を決定的に決める。振動の仕方は真鍮板の弾性に依存し、それゆえに主に真鍮の組成、微細構造、鑄造法に依存している。オルガン製作者は、鑄造し、機械的な扱い (ハンマーでたたき、圧延する) をし、アニーリング (焼きなまし) をした後で真鍮を受け取る。そして、タングに合う大きさ、薄さにするために板を切断し、薄くし、最後に優れた音を作り出すための適切なそりを与えるために、真鍮のタングを削り、わずかに曲げる。材質の加工性はパイプの製造の際の重要な問題である。仕事を容易にし、質を向上しようとするオルガン製作者が真鍮に特別な扱いをする上で、望むように反応するかどうかは加工性が決定的となる。

オルガン製作者の要求に応えるために、パートナーの科学者は材料の組成、一連の熱処理、機械的な形成過程を探究した。歴史的に再現した合金の加工性や音響性はオルガン製作者によって評価された。

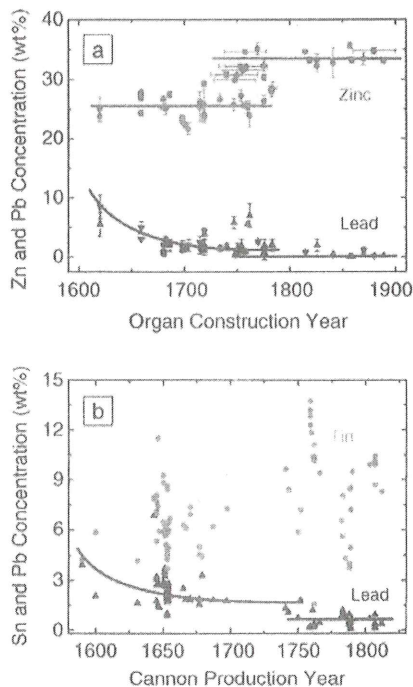
組成

様々なヨーロッパ諸国 (ベルギー、フランス、ドイツ、オランダ、イタリア、ラトビア、リトアニア、スウェーデン、イギリス) の1624年から1880年の間に製作されたオルガンから貸与された約30のサンプルで、古いタングやシャロットの組成が非破壊的に測定された。古い楽器を保存する必要性からテストに利用できる金属のサンプルの大きさや表面の扱いについて厳しい制限がつけられた。受け取ったタングやシャロットを用いて、全てのサンプルで中性子線回折 (ND) や X線回折 (XRD) の方法で非破壊的に主な成分 (銅 Cu、亜鉛 Zn、鉛 Pb) の濃度が測定された。このような分析は不純な表面層を含むので、数少ないタングの振動しない端の部分 (ブロック内で、タングを止めるワイヤーより後の部分) を切開して取り出した、小さな1~2mmの表面をきれいにした三角形のサンプルに電子プローブ微細分析 (EPMA) を適用して結果を出した。二次イオン質量分光分析

(SIMS) は、ND、XRD、EPMAによって検出されない微量成分を確認するために用いられ、誘導結合プラズマ発光分光分析 (ICP-AES) は化学分析に用いられた。この完全な方法で、鉛の濃度についての局所的な SIMS や EPMA の分析で得られたデータを確かめたが、それは鉛の濃度が真鍮の中で一様でない分布をしているものであった。真鍮の材質の微細構造を観察するために、振動しない小さな部分を注意深く磨いた短いタングに、光学顕微鏡、走査型電子顕微鏡が用いられた。ごくわずかではあるが、すでに損傷がひどく、そのために楽器には戻すことの出来ないサンプル (ラトビア、福音ルーテル教会のオルガンからのサンプルなど) もあり、それらからは、透過型電子顕微鏡で調べるために直径3mmの小さな部分が切り取られた。

タングとシャロットの主な成分は銅、亜鉛、鉛である。亜鉛は銅の中に溶けているが、鉛は溶けていない。別の元素 - 例えば、鉄、マンガン、ニッケル、錫 - の全体的な濃度は驚くほど小さい。17世紀のサンプルでは1 wt% (重量%) 以下で、19

図5



(a) 歴史的なオルガンのリードパイプからのタング、シャロットの真鍮における亜鉛、鉛の濃度 (b) 比較対象としての、古い大砲からの青銅の錫、鉛の濃度

世紀のものでは0.3-0.5 wt%以下である。不純物の濃度は銅の溶解度以下なので、不純物は全て固溶体になっていると考えられる。だから、これらは亜鉛と同様の形で真鍮の性質に影響する。そこで、新しい合金の開発と製造の際には考慮に入らなかった。

全てのサンプルで、亜鉛の濃度は時代を通じて驚くほど一定である(図5 a)。1624年から1790年の間に、これは26wt%程度である。これに、1750年あたりで32.5wt%程度の高濃度のものが現われて加わる。これら2つの濃度は40年共存している。18世紀の終わりから現在に至るまで、亜鉛の濃度は高濃度の32.5wt%に保たれている。銅-亜鉛の位相図によると、全ての歴史的なタングとシャロットは α -真鍮で作られており、これは唯一銅の濃度が高い相、つまり銅に対する亜鉛のfcc α 固溶体を含んでいる(図6)。亜鉛の濃度は銅の溶解度を越えていないので、銅-亜鉛の位相図の隣の相- β 相-は歴史的なタングとシャロットには現れていない。1750年以前には、タングとシャロットは常に鉛を含んでいた。鉛の濃度は、1624年の7-8wt%から18世紀半ばの2wt%までゆっくり減少していった。最初の鉛のないタングは1750年頃に現れた。1820年以降、鉛は完全に研究対象の真鍮からは消えた。

何故亜鉛の濃度は1790年以前に低いまま一定なのか? 何故後に増加して、32.5wt%のまま一定になったか? 1738年以前、亜鉛は酸化亜鉛、炭酸亜鉛“カラミン(訳注:薬用)”として入手できるだけで、純粋な金属としてではなかった。^{8,9} その結果、真鍮は銅と錫で青銅を作るときのように純粋な金属成分を一緒に溶かして製造することはできなかった。誰かが平炉で炭素によって亜鉛鉱石を還元しようとすれば、亜鉛はすぐに蒸発し、酸化される。

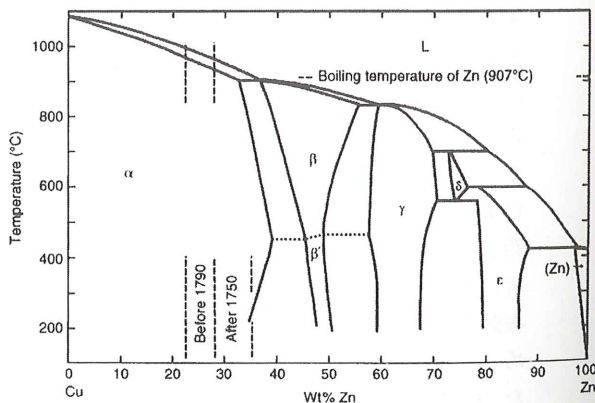
真鍮はセメンテーション(浸透結合法)と呼ばれる過程で製造された。これは、銅、石炭、カラミンの破片を一緒に炉の中に入れ、亜鉛の融点(907°C)以上ではあるが銅の融点(1083°C)以下である温度まで熱し、数時間焼きなますものである。だから、カラミンは還元され、蒸発した亜鉛は気体の状態で熱せられている間に高温で固体の銅の中に拡散していく。907°C以下ではこの過程は不可能で、一方907°Cよりはるかに高いと石炭を

多く必要として不経済である。だから、セメンテーションはかなり狭い温度範囲で実行される。経験にたけた人間の目は炉の色から20-30°Cの誤差範囲で温度を推定できる。真鍮の中の亜鉛の濃度は固相線濃度(固体の銅に対する亜鉛の溶解度の最大値)によって決定され、これは約920°Cではっきり26wt%になる(図6)¹⁰。だから、古い真鍮をセメンテーションする温度はおそらく920°Cくらいである。真鍮を作るこの方法はわずかの变化くらいで1858年同様、19世紀を通じて実行され、カラミン炉は現在でも動いている(例えば、南ウエールズで)。¹¹

ウィリアム・チャンピオンは1738年に炭、石炭で還元することによってカラミンから金属亜鉛を抽出するイギリスの特許をとった。⁹ 1781年に、金属亜鉛で真鍮を作る最初の特許がイングランドに登場した。亜鉛が純粋な金属として利用できるようになった後では、銅中での亜鉛の最大濃度ははや920°C(亜鉛の融点より上)での溶解度に限定されなくなった。しかし、銅-亜鉛の融解物が結晶化した後での最大溶解度に限定され、それは亜鉛が32.5wt%である。¹⁰ ヨーロッパ全体を通じてこれほど速く真鍮中の亜鉛濃度が26wt%から32.5wt%に変化したことは驚きである。

青銅の大砲中の錫と鉛の濃度(図5 b、H.フォーシェルによって測定された⁸)をオルガンの真鍮の組成と比べてみよう。青銅の大砲はオルガンの真鍮と同じ時期に同じヨーロッパで製造された。しかし、青銅はいつも銅と錫を直接一緒に溶解す

図6



銅-亜鉛位相図は、1790年以前と1750年以降に作られた真鍮の濃度範囲を示す。1750年から1790年の間は、2つの濃度が共存している。

ることで製造され、セメンテーションにはよらない。だから、青銅中の錫の含有量は図5bで表されているように幅広く変化している。錫の含有量をプロットした点は散らばっていて、真鍮中の亜鉛(図5a)のように水平線でグループ化していない。

加えて、図5は私たちに2番目の重要な問いへの答えを与えてくれる：鉛は意図的にタングの真鍮に加えられたのか、それとも不純物であるのか？鉛は銅に溶けず、真鍮を脆くする。わずかな変形をした後で、鉛を含んだ真鍮は内部応力を緩和するためにアニーリングしなければならない。一方で、これはクラックや物質の損傷を引き起こす。図の5a、5bを比較すると真鍮と青銅中の鉛の濃度が時代を通じて同様なレベルで変化していることがわかる。1600年から1750年の間に、歴史的な真鍮と青銅中の平均的な鉛の濃度は7wt%から2wt%までゆっくり減少し、1750年あたりでほとんどゼロまで急落する。歴史的な文献によると、18世紀初頭までの17世紀中の銅の精錬はかなり単純で限定された過程だった。イギリスのスワンシー、スウェーデンのファルン、ドイツのゴスラーのように、銅の精錬工場は銅鉱山の近くに置かれた。流通している銅の中に残っている様々な不純物は銅鉱山の由来を示す“指紋”のように見ることができる。実際に、化学分析では様々な鉱山からの銅の不純物は幅広く異なることが示されている。^{8,12}もちろん、バロック時代に市場や銅細工師から銅を購入したオルガン製作者は正確な組成を知っていない。しかし、彼らは違った鉱山からの銅製品の間の性質の違いや、どの鉱山の銅がどの利用により適しているかを知っていた。

18世紀の終わりに、銅の生産は飛躍的に増大し、銅の精錬工場は大変大規模になった。これらは鉱山の近くから港に移動した。銅は違った鉱山から集められ、海を越えて輸入までされた。⁹この銅の混合によって、結果的に原料の鉱山に無関係でよく似た性質の銅が生産されるようになった。かなり複雑な多段階の精錬過程が発明され、結果的に錫、鉄、鉛のような不純物の多くは除去された。¹²

ゲオルギウス・アグリコラ(1494-1555)の百科事典的な書物：De re metallica libri(金属の書)XII¹³による当時の冶金技術の記述によると、16世

紀でさえ鉛や銀を取り除いて銅を精錬することは職人の目標であったが、初期の一段階での精錬過程では銅から全ての鉛を取り除くことは簡単には出来なかった。オルガンの真鍮と大砲の青銅は完全に違う製品である。にもかかわらず、図5に示すように、鉛の濃度レベルは、オルガンの真鍮と大砲の青銅で同じパターンを示している。それゆえ、鉛がオルガンの真鍮に職人やオルガン製作者によって意図的に加えられたということはあるそうもない。追加的な鉛の供給源は、常に鉛を含む亜鉛鉱石からでもあるだろう。¹⁴

真鍮の機械的、熱的取り扱い

ドン・ベドス(Dom Bedos)が1766年に書いた書物によると、オルガン製作者自身は真鍮を製造してはいない(パイプのための鉛-錫合金と対照的に)。¹⁵それは、これが大変複雑で、特別に高温の設備を必要としていたからである。おそらくオルガン製作者は真鍮を直接銅職人から板状、帯状で購入していた。歴史的な文献が教えてくれることは、熔けた真鍮が鋳型で鋳造されたことであり、あるいは‘端が持ち上げられた1トン以上の2つの石の間に注がれ、鋳型は直立した位置に置かれ、金属は約70lb(ポンド)の板になるように冷やされた’ことである。⁹実験では、この方法によって得られる最も薄い板の厚みは3-4mmである。ドン・ベドスはオルガン製作者が購入した真鍮の厚みについては語っていない。しかし、真鍮のタングのために必要な最終的な厚みはピッチにもよるが、0.2-0.5mmである(訳注：訳にあたってアドバイスをいただいたGOArtのオルガン研究者、横田宗隆氏によると、この値は0.1-2.0mmということである)。シャロットの厚みは1-2mmである(訳者注：同様に、横田宗隆氏によるとこの値も0.5-2.5mmということである)。タングやシャロットにふさわしい厚みを得るために、それぞれ真鍮の板は薄くさせなければならなかった。

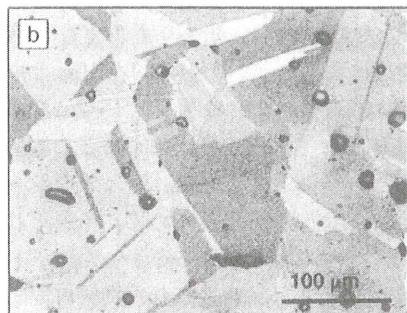
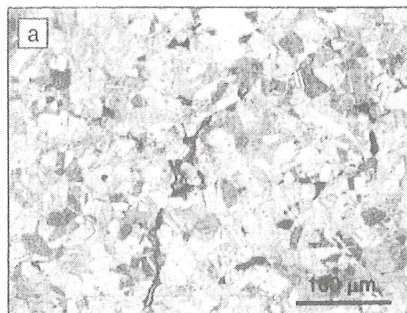
歴史的な文献によると、鋳造された真鍮の固まりは工場の銅職人は白で、オルガン製作者によっては手でハンマー打ちされた。^{8,9,11,13,14}17世紀の終わり頃、真鍮や銅のインゴットを平らに伸ばすために、ハンマー打ちの他に圧延が用いられるようになった(少なくともイギリスでは)。⁹最初は水力で、後には蒸気力で動かす巨大な圧延場が

あった。しかし、これらは小さなオルガン製作工場には経済的ではなかった。だから、おそらくオルガン製作者は2-4mmの厚みの真鍮板を得て、それをハンマーでたたいてもっと薄くしただろう。

15

しかし、もし1-2wt%の鉛を含む2mmの真鍮をハンマーでたたいて0.5mmにしようとする、真鍮はたやすく壊れるだろう。損傷を防ぐためには、何回か途中でアニーリング(焼きなまし)をしなければならなかった。微細構造の探究は、歴史的なタンクが、数多くの双晶を含むよくアニーリングされ再結晶化した粒を含んでいるのを明らかにしている。これは全ての銅合金に特有のものである(図7)。^{17,18} 平均的な粒の大きさは同じオルガンではかなり一定であるが、違ったオルガンからのサンプルでは10 μ mから200 μ mまで様々である(図7a, 7b)。X線回折の測定では圧延効果は明らかにならなかった。これらの結果からオルガンのタンクを機械的に取り扱う技術としての圧延

図7および解説



真鍮製タンクの光学顕微鏡像 (a) ドイツ、リュウディングヴォルトの聖ヤコブ教会 (St. Jakobi Church, Lüdingworth, Germany) でアルプ・シュニットガーによって1682年に再製されたアントニウス・ヴィルデ・オルガン(1598-1599年) (b) オランダ、アンローのマグナスカークのラデカー&ガレルス・オルガン (the Radeker & Garrels Organ in Magnuskerk, Anloo, the Netherlands) (1719年)

は除外できるだろう。鑄造とハンマーたたき(さらには、途中のアニーリング)がほとんどだったのであろう。銅を基礎とした固溶体にたいいて現れる数多くの双晶の境界面によって、歴史的な真鍮の中間のアニーリングの温度をおおまかに推定することが出来る。銅と銅合金の双晶の境界面は結晶学的に違った面を含んでいる。¹⁶⁻¹⁸ 融点に近い高温では、双晶の境界面にはただ2つの面のみが現れる。つまり、対称双晶面といわゆる9R面である。¹⁶⁻¹⁸ もしアニーリングの温度が下がると、結晶学的に異なる新しい面が次第に現れる。

違った面が現れる温度は実験的に測定された。歴史的な真鍮のタンクで観察された面のスペクトルは、現在の合金で観察される面のスペクトルと比較された。中間のアニーリングの概算された温度は600 $^{\circ}$ C程度である。

最終の段階で、タンクを両側から注意深く削り、わずかなそりを与えるために一方の端(上部)にわずかにロールをかけた。タンクとシャロットの間のギャップでリードパイプ内に空気が行くようにするためにこれは必要である。風の動きでタンクは振動し始める。

歴史的なリードパイプのための新しい真鍮の材質の製造

ここで述べられた私たちの探究を説明するために、17、18世紀の真鍮(25wt%の亜鉛と2wt%の鉛)、19世紀の真鍮(30wt%の亜鉛と、鉛なし)を再現するための2つの合金が用意された。10mmの厚みの鉛を含まない鑄造インゴットは600 $^{\circ}$ Cでの2-4回の中間アニーリングをしながらハンマーでたたかれ、また、鉛を含んだ合金は3mmの鑄造板から600 $^{\circ}$ Cでの6-8回の中間アニーリングをしながらたたかれて圧延された。5人のオルガン製作者は仕上げを行い、元のタンクおよび新しく再現したタンクで歴史的なリードパイプの整音を行った。彼らは、新しい合金の加工性が歴史的なタンクに大変近いと判断した。

優れた加工性は仕上げと整音過程には本質的である。最終的な過程は極度に細心の注意を要する。オルガン製作者は、タンクが正しい厚み、形、そりであり、これらが安定していて耐久性があることを確かめなければならない。これらのパラメーターはタンクの振動、すなわちリードパイプの音

質に決定的な影響を与える。タンクのそりを作る以前の最終的な機械的取り扱いで、オルガン製作者は特別なやすりを用いて最終的な厚みになるようにタンクを削る。やすりは、この扱いの間にゆがむのを防ぐために金属上を滑らなくてはならず、刺さってはならない。ゆがみは深刻な問題である。なぜなら、ゆがんだタンクはよりよく振動しないからである。最終段階の目標は、タンクの恒久性のあるそりを作ることである。オルガン製作者の観察によると、現在の真鍮の材質はこれらの要求すべてを満たしていない。

歴史的なリードパイプの新しいタンクの適切な処理と整音を実施すると、新しいタンクによって作られた音は歴史的なものと区別できなかった。新しい合金はラトビア、ウガールのルーテル教会の修復できない数多くの損傷したタンクを完全に再生させること、ヴィルニウス・聖霊教会のカスパリーニ・オルガンの失われたヴォックス・フマーナ音栓を作ることを可能にした。

結 論

私たちの探究の結果として、^{1,2,4-7,17,18} バロックパイプオルガンの古い音はよみがえった。新しく開発された合金は歴史的なオルガンの修復やバロックの音を持つ新しいオルガンの製造に適用された。ヨーロッパ9ヶ国の歴史的なオルガンの入念な探究は達成された。歴史的な真鍮の組成、構造、性質、処理過程のパラメーターは材料科学の高度な方法を用いて決定された。適切なパイプの合金の砂上鋳造とリードパイプの真鍮タンクの再現を行うことで課題の打開は達成された。

謝 辞

探究のために歴史的なタンクを提供していただき、また実りある討論をしていただき、オルガン製作者ヘンク・ヴァン・エーケン(オランダ)、パトリック・コロ(ベルギー)、マルコ・フラッチ(イタリア)、マッツ・アルビドソン(スウェーデン)、リマントス・グーチャス(リトアニア)、ヤニス・カルニンシュ(ラトビア)、アレクサンダー・シューケ(ドイツ)に感謝を申し上げたい。ハラルド・フォーゲル教授、ハンス・グヴィットソン教授の感動的なオルガン演奏と討論に心からお礼申し上げたい。技術プロジェクト

TRUESOUND(契約 COOPCT-2004-005876)とINTAS(契約 05-10000008-8120)の元でのヨーロッパ委員会によって、この探究は支援された。

参考文献

- 1 T. Clarke, *Nature* 427 (2004) p.8.
- 2 M. Yokota, *The Overtone Project*, edited by L.W.Ericsson (Musikhogskolan I Pieta, Sweden, 1997) .
- 3 G.A. Audsley, *The Art of Organ Building* (Dover, Mineola, NY, 1965) .
- 4 J. Speersta, ed., *The North German Organ Research Project at Göteborg University* (GOArt, Gothenburg, Sweden, 2002)
- 5 A. Carlsson, H. Davidsson, P. Ruiters-Feenstra, S. Dunthorne, and J. Speerstra, *Tracing the Organ Master's Secrets: The Vision, The Process, The Goal, The Reconstruction of the North German Baroque Organ for Örgryte Nyas Kyrka* (GOArt, Gothenburg, Sweden, 2000) .
- 6 P. Svensson and M. Friesel, *Influence of alloy composition, mechanical treatment and casting technique on loss factor and Young's modulus of lead-tin alloys* (Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden, 1999) .
- 7 B. Straumal, A. Mazilkin, A. Manescu, F. Rustichelli, M. Friesel, and B. Baretzky, *Wiederaufbau der Casparini Orgel in Vilnius*, edited by R. Gucas (University of Vilnius, Vilnius, Lithuania, 2007) .
- 8 H. Forshell, *The inception of copper mining in Falun* (Akademtryck AB, Edsbruk, Sweden, 1992)
- 9 W.O. Alexander, *Murex Rev.* 1 (1955) p.1.
- 10 T.B. Massalski, ed. *Binary alloy phase diagrams* (ASM International, Materials Park, OH, 1993)
- 11 J.Percy, *Metallurgy: The art of extracting metals from their ores, and adapting them to various purposes of manufacture* (John Murray, London, 1864)
- 12 Rh. Jenkins, *Trans. Bristol Gloucestershire Arch. Soc.* 63 (1946) p.1.
- 13 G. Agricola, *De re metallica libri X II* (Froben, Basel, 1556)
- 14 J.-G. Gallon and H.L. Duhamel du Monceau, *Die Kunst Messing zu machen, es in Tafeln*

- zu gießen, auszuschieden, und zu Drathe zu ziehen (Akademie der Wissenschaften zu Paris, Leipzig, 1766)
- 15 Dom François Bedos de Celles, *L'art du facteur d'orgues* (Académie Royale des Sciences, Bordeaux, 1766)
- 16 B.B. Straumal, S.A. Polyakov, and E.J. Mittemeijer, *Acta Mater.* 54 (2006) p.167.
- 17 B. Baretzky, M. Friesel, A. Petelin, A. Mazilkin, and B. Straumal, *Def. Diff. Forum* 249 (2006) p.275.
- 18 B. Baretzky, M. Friesel, A. Petelin, A. Shotanov, and B. Straumal, *Def. Diff. Forum* 258–260 (2006) p.397.

Reconstruction of Historical Alloys for Pipe Organs Brings True Baroque Music Back to Life

B. Baretzky, M. Friesel, and B. Straumal

Abstract

The pipe organ is the king of musical instruments. No other instrument can compare with the pipe organ in power, timbre, dynamic range, total complexity, and sheer majesty of sound. The art of organ building reached its peak in the Baroque Age (~1600–1750); with the industrial revolution in the 19th century, organ building shifted from a traditional artisans' work to factory production, changing the aesthetic concept and design of the organ so that the profound knowledge of the organ masters passed down over generations was lost.

This knowledge is being recreated via close collaborations between research scientists, musicians, and organ builders throughout Europe. Dozens of metallic samples taken from 17th– to 19th–century organ pipes have been investigated to determine their composition, microstructure, properties, and manufacturing processes using sophisticated methods of materials science. Based upon these data, technologies for casting, forming, hammering, rolling, filling, and annealing selected lead–tin pipe alloys and brass components for reed pipes have been reinvented and customized to reproduce those from characteristic time periods and specific European regions. The new materials recreated in this way are currently being processed and used by organ builders for the restoration of period organs and the manufacture of new organs with true Baroque sound.