

## 第Ⅱ部

陶范技術の実験考古学

陶范技术的实验考古学



国際研究会「陶范技術の実験考古学」

国際研讨会“陶范技术的实验考古学”

2019年2月24日

# 1. 商周青铜铸造泥模范的七个问题

## 商周青铜铸造土製范・原型をめぐる七つの問題

蘇榮譽

人类发明冶金术时即已认识到金属液的流动性和赋形能力，将熔融金属注入一定形状 of 型腔，凝固后可获得型腔的形状并保持金属的原有性能，这即是铸造技术的嚆矢。目前可追溯到公元前六千纪末的塞尔维亚（Serbia）的铜石并用时代遗址 Majdanpek 和 Pločnik<sup>1)</sup>。

世界上主要文明的青铜器制作，是以锻造为基础，锻、铸并行的技术系统，铸造则以石范浇注工具和兵器等小件器物、以失蜡法浇注复杂器物，也采用泥范铸锭和简单器物，但比例甚低。唯独中原古代青铜器，独以铸造成形、且几乎仅以泥范块范法铸造成器<sup>2)</sup>。明确认识到这一点，与中原早期考古发现的遗物密不可分。

古代铸型是先民铸造金属的遗存，包括范（mold）、芯（core）、浇注系统（gating system）和其他相关废弃物。按照铸件成形方式，可分为整体铸型和分块铸型，前者如失蜡法（lost-wax process），后者可称之为块范法（piece-molds）。但通常意义的块范法指铸型中包括两块以上范（或另加一块或数块芯）的铸型结构。按照铸件材质，可以分为铸铜（及其合金，下同）、铸铁、铸金、铸银、铸铅、铸锡等类型，铸铁对铸型的耐热性要求最高，在 1400℃ 左右，其次是铜和金，浇注温度在 1000-1100℃ 左右，其余金属的浇注温度在 250-900℃ 之间。按照材质可以分为石、泥砂、铜、铁等种类，其中只有泥砂可以制作复杂铸件的整体铸型。

因中国古代青铜器十分精美，古代典籍没有关于其制作的记载，当西方学者在十九世纪末和二十世纪初接触到这些艺术品时，很自然认为是失蜡法铸造的<sup>3)</sup>。直到二十世纪二十年代末，安阳殷墟开始的考古发掘，发现了铸造青铜器的模范，并经西方学者深入讨论后，泥范块范法铸造了中国古代青铜器才成为共识<sup>4)</sup>。

近百年来研究和探索，虽然构建了中国古代铸造技术的发展框架，并揭示出了其中的不少奥妙和细节，随着更多材料的发现、发表和研究工作的推进与深化，也揭示出若干未曾思考与证实的问题，有既往人云亦云之工序和工艺，也有不少新问题，其中某些可能还相当重要。现不揣浅陋，将自己一些不成熟的思考和疑虑，或者仅仅是问题和盘托出，以请教高明。

### 1. 关于中国早期青铜器生产中泥范块范法的独占性

中国的冶金术起源尚不清楚，新石器时代的金属制品，既有铸造也有锤锻成形，虽然均可上溯到仰韶文化半坡类型出土的黄铜片和管，但十分偶然，也缺乏连续性，迄今还不能梳理出发展脉络和彼此关联<sup>5)</sup>。

到二里头文化阶段，青铜时代得以肇建，铸造成形是唯一的青铜器制作技术，石和泥质铸型都已出现。自二里头文化二期开始，形成了独树一帜的泥范块范法工艺，并很快建立起别具一格的青铜技术体系和传统，泥范块范法在铜器制作中具有独占的支配地位<sup>6)</sup>（图 1）。与之相表里的青铜器，除刀、镞之类小用具外，所铸造的容器如爵、罍、角、鼎、盃等，兵器如戈，饰品如牌和合瓦截面的铃等<sup>7)</sup>，均是其他文明不曾有的造型，实用性甚差而不便，通常将之归为祭祀或随葬的彝器（图 2）；继之的商早期青铜器，以郑州商城二里岗期青铜器为代表，普遍以兽面纹、夔纹和牺首装饰器物，精细而华美<sup>8)</sup>，均是其他文明不曾有的装饰（图 3）。技术上的独特与造型、装饰上的别致，共同构成了中国古代青铜器的表里，具有尚未被揭示的内在联系。贝格立（Robert W. Bagley）讨论块范法与纹饰的关系<sup>9)</sup>，试图解析独特的块范法工艺与纹饰关系，但块范法工艺体系在纹饰尚未出现时已经形成。

泥范块范法的技术基础当然是新石器时代发达的制陶术，是故墨子（？ 476BC-？ 390BC）将陶铸并称（《墨子·耕柱》），孟子（？ 372BC-289BC）将陶冶并论（《孟子·滕文公上》）。对泥砂性质的深刻认识和得心应手的运用，很可能是陶工发明了冶金术，并在金属技术的初期，也是陶工将其技艺转向铸造青铜工具、用具和饰品制作，以至技艺纯熟，铸造陶礼器式样的铜器，迎来和塑造了中国青铜时代。这些所谓的礼器，目前对其内涵与使用还不很清楚，应具有某种神秘或至上的精神或权力象征，具有符号化特征。也正是如此，掌握青铜礼器铸造者及其所有者，在发展块范法铸造技艺的同时，排斥锻造加工技术，抑制石范铸造工艺，逐步取得了独占地位，支配着青铜器制作和生产<sup>10)</sup>。

继之，二里岗时期及其后的青铜技术传播和扩展，青铜工业的勃发和繁荣，不但囿于泥范块范法铸造体系，而且通过许

多工艺发明和技术创造强化了这一体系，使得中国古代的青铜技术后来居上，青铜艺术别开生面。当然，也形成了古代最为复杂的技术体系（图4）。

## 2. 关于铸型材料

二十世纪五十年代，即有学者分析商周泥范，但结果几乎都只是化学成分或组分，近于土壤，因同构材料很多，分析结果不能反映其物质形态。近些年来开展岩相分析（petrographic analysis）认识其物质组成，但发表的结果尚不多。

据岩相分析结果，商周铸铜的泥质模、范和芯的材料，基本上是细粉砂，粒度多在140目（104 $\mu$ m）以下，多孔，均匀，偶尔包含略大的砂粒或有机质。和陶器材料对比，可知是黄土经筛选、淘洗并分选而得，或者其中还羼和了别的细砂（图5），有些样品几乎不含粘土<sup>11)</sup>（图6）。淘洗粘土可以提高耐火度，增加铸型刚度，减少粘砂缺陷，早期的制陶术即有类似处理。若泥范将粘土淘洗净，必然引发新的问题：这些粉砂是如何粘结在一起制作成范和芯的。James B. Stolzman等依据电镜扫描结果，推测可能以石灰（CaO）为粘结剂，氧化钙是黄土的基本组分，其分布的均匀性和铸型尚有一定的差别<sup>12)</sup>。

对比砂型铸造，铸型通常使用石英质硅砂，占比为82%–99%，为改善性能或添加别的物质。湿型的粘结剂为膨润土（bentonite），干型粘结剂是普通粘土，即高岭石（kaolinite,  $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$ ）组粘土矿，粘结剂以粘结膜形式包覆砂粒，构成耐热的毛细管多空隙体，使砂型具有必要的强度和韧性，具有一定透气性。小于0.02毫米的细质需水洗去除，并以浮选减少型砂中中长石、云母和铁矿<sup>13)</sup>；还加入煤粉和淀粉，前者提高抗夹砂性和溃散性，后者以增加砂的粘性和起模性，也可能加入油脂提高型砂的造型性<sup>13)</sup>。

鉴于岩相分析的制样对分析结果影响较大，需要更多研究机构交差分析才能揭示出商周铸铜泥范的粘结剂问题。果若粘土很少或不存在，淀粉和油脂类有机粘结剂应成为探索的重要方向。

青铜的自由收缩率为1.4%，受阻收缩率为1.2%<sup>14)</sup>，铸型特别是芯的退让性是困扰商周铸工的难题，因为这一阶段盲芯退让性差导致鼎足出现裂纹者比比皆是。从西周中期开始，大量鼎足截面设计为槽形以应对收缩看，古代多数铸工没能找到合适的芯材。

## 3. 关于模

模在青铜器铸造中具有核心作用，贝格立推测二里头文化初铸容器未必有模，倪克鲁（Lukas Nickel）认为安阳和西周时期某些青铜器铸造未有模的说法都难以成立<sup>15)</sup>。但明显的事实是，除却侯马晋国铸铜遗址<sup>16)</sup>，其他遗址中出土模的数量很少，与侯马遗址形成巨大反差，当然也缺乏研究和理解器物设计的诸多资料。有学者推测的石、玉、木、竹、牙或金属质地的模，甚至以铜器为模，迄今也未有认定<sup>17)</sup>。

以安阳殷墟铸铜遗址为例，虽然二十世纪三十年代已经发现并辨识出容器泥模，但迄今还未发现较为完整的器模，都是局部或附饰模<sup>18)</sup>（图7）。即使是这些泥模，虽然个别有附贴纹饰的现象，但几乎不见塑制雕刻的痕迹，基本是翻制之品<sup>19)</sup>，也就是说这些遗物不是原始模，而是次生的次代模。可以推测，原始模只是容器的局部，或附饰或局部装饰，不是泥质而是其他材质的材料，经雕刻后被翻制成二代模，它们再组装成为完整的器模用于翻范，如此非常容易出现倪克鲁指出的不对称现象。果真如此，万家保推测的范作纹和模范合作纹几乎不存在。翻制二代模的遗物，或者被认为铸范亦未可知。当然，这一推测需要依靠铸铜遗址出土遗物和对它们的深入研究予以证实或否定。

同样，尽管侯马铸铜遗址出土泥模的数量巨大，也发现有原始设计的泥模，但细密纹饰的泥模俱是次代模而非原始模，原始模属于非泥质的可能性很大<sup>20)</sup>。

很明显，原始模的材料与形式、二代模组合成为整体泥模都是待解之谜<sup>21)</sup>。当然，商代是否存在或在什么程度上存在翻制纹饰范片以组合到铸型中的方法（pattern block），也是饶有趣味的问题。

## 4. 关于充型能力

充型能力是指熔融的金属或合金充满型腔、获得形态完整并具有清晰轮廓铸件的能力，通常是液态金属充满型腔，但也

有边充型边结晶的情况。实践证明，不同的金属，不同的铸造方法以至不同的铸型类型，充型能力不同，充型能力首先取决于金属或合金的流动性，也受铸型性质和浇注条件、铸件结构等因素的影响<sup>22)</sup>。

青铜是铜锡合金或铜锡铅合金，锡青铜的结晶温度范围宽（图8），呈糊状凝固，枝晶发达，很快在铸件内形成晶体骨架，开始线收缩，容易发生热裂<sup>23)</sup>。砂型铸造锡青铜（Sn9%-11%，Zn2%-4%），浇注温度为1040℃时，流动性是420毫米，远低于C+Si为5.9%铸铁在1300℃浇铸、砂型铸造的1300毫米<sup>24)</sup>。因此，铸件的壁厚有最低限制，因不同的铸造方法有所不同，铜合金砂型铸造小件最小壁厚为2-3毫米，熔模铸造尺度在50-100毫米铸件的最小壁厚2.0-2.5毫米，100-200毫米铸件的最小壁厚2.5-3.0毫米<sup>25)</sup>。国际材料学会推荐最小值为2.5毫米<sup>26)</sup>。显然，青铜合金的流动性不好。

但是，商周青铜器铸造质量精良，不仅造型复杂、纹饰华美，而且不乏薄壁铸件。早在青铜器的初始阶段的二里头文化时期，青铜器往往壁厚在两毫米之内，且不少的壁厚在一点五毫米左右甚至不到一毫米。说明那时铸工已经成功解决了充型问题，材料是成分波动较大的锡青铜或铅锡青铜，流动性不佳，提高充型能力的方向只能在于铸型和浇注过程。

虽然迄今已发现了若干商周铸铜遗址，发现了不少铸铜遗迹，出土了大量铸铜遗物，但商周青铜器的浇注过程，目前还只是推测，不能给出确定的工序和参数。发现的铸型很确切，虽有不少学者进行了复原试铸，但全面发表操作过程和结果的不多。谭德睿积多年调查研究传统铸造工艺的经验，以对古代铸型材料研究为基础，进行了多年的复原试铸，结果将古代铸型的优异充型能力归结为铸型中的植物硅酸体<sup>27)</sup>。

然而，古代铸型中植物硅酸体的含量和普遍性是需要调查确认的，植物硅酸体增强充型能力的作用机理还不十分清楚，怎样比例的植物硅酸体可以改善或大幅度提高充型能力，也是有待研究的问题。当然，临淄出土镜范比重小于一，其材料和制作工艺，同样需要深入研究才能突破。

## 5. 关于浇注与铸型的行为

熔融青铜浇注入铸型后，冷却凝固形成铸件。熔炉流出的青铜会迅速散失热量而凝固，因此，控制熔炼温度、增强浇包（pouring ladle）保温、缩短炉与铸型距离、设计合理的浇注系统、烘烤铸型，都可以是保证合适浇注温度的措施。

在关于中国古代青铜器铸造工艺的讨论中，常有加热或烘焙铸型、热型浇铸的说法，但迄今发现的铸铜遗址并没有提供有关证据。浇注前对铸型的烘焙可能相当普遍，以降低其水分、减少发气量，但与热型浇铸无关。

熔融的金属注入铸型后，形成了一千多摄氏度的温度场，必然会与铸型发生物理的、化学的和机械的作用，除在铸件上形成夹砂、沙眼、气孔、粘砂、热裂等缺陷外，在铸型上遗留了怎样的痕迹，或者对铸型产生了怎样的影响，迄今还是一个未被认真关注的问题。这些问题包括：不同的铸范会碎裂到怎样的程度，不同铸范的型腔表面会被烧蚀到怎样的程度，芯会发生怎样的形变与烧蚀，它们的硬度和强度会发生怎样的变化，等等。当然，这些问题直接涉及到对铸铜遗址中遗物的认识和判断，包括对使用有机质粘结剂的判定。

商周青铜器生产中，容器数量很大，说明芯用量很多，泥芯在浇铸后只能被一点点掏出，从圈足器底残存未完全清理的泥芯看，经过了一千来度的高温，已经坚硬如砖，一方面说明芯的溃散性差，另一方面也说明掏出泥芯实属不易，是故有些圈足器底部的泥芯也就没有清理干净甚至只清理了一部分，而器腹中残存泥芯的情况较少，说明大量的泥芯还是被掏出了，但铸铜遗址罕见报道这类信息。同样，考古发现的范数量，在安阳远多于芯，使用过的范也应有烧结痕迹，但考古发掘的这类材料很少，背景若何？

对侯马出土泥模、范和芯的观察，出自灰坑和房基的，基本上都是未经浇铸的，甚至有已经组合成铸型而未浇注的，且模的数量远较范和芯数为多，较完整的也基本是模<sup>28)</sup>。即使少量范，缘何废弃也是未被关心的问题，是因缺陷而丢弃？抑或因组装铸型尺寸不合而不用？陈志达指出安阳存在后一现象但却没有对具体的范进行讨论<sup>29)</sup>，尚属概念性的。在安阳铸铜遗址中发现的形状较为完整、纹饰清晰的范没有被浇铸，可能有共同的原因，是否属于生产次代模的“母模”，值得研究。

由此引申，对于铸铜遗址出土的范，能否完全根据它们对具体器物的铸型结构做出推测，如某些器物的水平分范问题，还需要更多验证和更多证据支持。前揭关于模的讨论，原始模的来源和二代模的生成是否与这些遗物有关，值得探讨。

## 6. 关于铸型的结构与制作

铸铜遗址发现的范和芯均残碎，结合青铜器遗留的披缝和空腔，可据以复原铸型。石璋如、巴纳（Noel Barnard）都是这样做的，但明显的事实是早期学者对铸型的划分很细，石璋如如此，巴纳较为极端。万家保先生建立起来的纵向分型、最少分型的框架，既符合铸造原理，也吻合所发现的泥范和器物遗迹。他率先确认极少数青铜觚曾水平分范，并通过模拟实验认识泥型的特点和问题，而后对某些器类的铸造作纵向的系统分析<sup>30)</sup>。华觉明先生参照他们的研究结果，也曾展开模拟实验认识泥型，对铸型结构提出了新认识，将铸接的研究向前推进了一大步<sup>31)</sup>。及至我们一代，将成批成组器物聚合并对比研究成为可能和方向，发现了活块模和铸型现象<sup>32)</sup>。

安阳孝民屯铸铜遗址发现了不少具有边缘的范，被认为曾经存在较为普遍的水平分范实例<sup>33)</sup>（图9），似有回归到巴纳说法的倾向。从铸造工艺实践看，如此分型不仅风险很大，而且会造成巨大的披缝清理工作量。从青铜器实物看，纵向的披缝多存在于器表，部分被打磨，但水平分型的披缝却几乎全然不见。对此，首先需要微痕分析确定水平披缝存在与否，果然曾经有大量的水平分型，无论对铸后加工研究，还是对审美角度的探讨，都应是难得的材料。

泥芯的制作是很少为人所关心的问题。最早讨论这一问题的是石璋如，他认为铸工将泥模均匀刮削一层成为泥芯，刮去层即器壁厚度<sup>34)</sup>。这样既回答了缘何出土泥模数量过少的问题，也解决了芯的制作及其与范的配合问题。六十多年来，虽然有更多铸铜遗址被发现、更多遗物出土，但能证明石氏假说的并不多。考虑到芯头的存在和泥芯的分段，石氏推测的可行性不大。除此之外的制作方法，推测的成分仍然较多<sup>35)</sup>。至于模-芯合作纹器物，泥芯必须翻制，加之侯马铸铜遗址所出泥芯均为芯盒翻制而成，商代器物的泥芯也应普遍是芯盒翻制的。当然，问题依然是铸铜遗址中可以认定为芯盒的遗物极少，或者还没有被辨识出来。

## 7. 关于浇注系统

浇注系统是铸型不可或缺的组成部分，功能是将熔融的金属导入型腔并充满之。现代工业铸造的浇注系统，通常由浇口杯（pouring cup）、直浇道（sprue）、直浇道窝（sprue base）、横浇道（runner）和内浇道（ingate）组成（图10）。参照砂型铸造，金属在浇注系统和型腔的流动属于粘性流体在多空管中不稳定流动，属于紊流（turbulence）。浇注系统的基本要求包括：

A，在一定浇注时间内，保证充满型腔，保证铸接轮廓清晰，防止出现浇不足缺陷；

B，能控制金属液流入型腔的速度和方向，尽可能平稳流入，防止发生冲击、飞溅和漩涡等，以免铸件产生氧化夹渣、气孔和砂眼等缺陷；

C，能将金属液中的熔渣和气体挡在浇注系统里，防止产生夹渣和气孔缺陷；

D，能控制铸件凝固时温度分布，减少或消除铸件产生缩孔、缩松、裂纹和变形等缺陷；

E，结构应力求简单，简化造型、减少清理工作量和液态金属的消耗。

根据金属液注入型腔形式，通常可将浇注系统划分为有顶注式、底注式、中注式、阶梯式、缝隙式和复合式等类型，各有特点或适用铸件<sup>36)</sup>。商周青铜器的浇注，因缺乏浇注系统实物，多根据器物上浇口遗留，做出的推断只有顶注式一种，是否别有式样，值得关注。

铜合金密度大，导热性好、充型容易。锡青铜的结晶温度范围宽，易产生缩松（shrinkage）缺陷，但氧化倾向较小。对小型实体铸件，可采用压边浇口；对大中型复杂铸件，可采用雨淋式等顶注式浇注系统。复杂中小锡青铜铸件的浇注系统建议浇道截面比为：直浇道：横浇道：内浇道=1:(1.2-2):(1.2-3)<sup>37)</sup>。

迄今发现的商周青铜铸范，具有浇注系统痕迹的不多，完整的浇注系统尚未得见。结合青铜器上内浇道的痕迹，可以知道内浇道的设计，但对于整个浇注系统的复原还停留在猜想的阶段，也基本上只有顶注式一种。一件青铜器浇注系统的压头多高，浇口杯、直浇道和内浇道等哪些因素存在并如何演变，浇注系统与铸件质量或缺陷间的关系如何，还缺乏资料和研究。但汉代铸钱规模宏大，存留有大量钱范和叠铸范盒，应是探讨这一问题不可多得的材料，廉海萍等有深入研究和复原实验<sup>38)</sup>，期待将来再能计算获得定量数据，早年对温县烘范窑的铸铁叠铸研究和计算值得借鉴<sup>39)</sup>。

关于中国古代青铜铸造技术的诸多方面还不清楚或有待推进，如原料来源特别是锡来源问题、砷铜原料问题、熔炉与鼓风问题、工场布局问题、焊接问题、铸后加工与刻纹问题、废品与回炉问题，等等。这里就模范问题粗略举例如上，有些困扰我的时间很长，有些是近些年才反思和遭遇的新问题，希望得到大家的指点、批评，也期待着与大家合作。

## 作者附记

1979-1983年，笔者在西安交通大学机械工程系铸造工艺与设备专业学习，记得是1982年初夏，教研室主任周庆德教授邀请千叶工业大学大野笃美教授给我们上“金属凝固理论”课（朱宪华老师翻译），虽然只有两次，但清晰，简洁，印象很深。这是我第一次接触日本人和日本学者，不能磨灭。尔后笔者从事金属史研究，日本诸多前辈考古学、艺术史和金工史家的好奇心、求知欲和认真态度，令人折服。在与日本学者的交往中，与很多学者结下了深厚的友谊，丹羽崇史是其中的一位。在他组织的“陶范技术的实验考古学研究会”（奈良：2019.2.24）上，作者便将困惑很久的问题托出，一则反哺自己从日本学者受到的教益，二则寄望推动新的合作。拙稿曾呈西安交大铸工91同学求正，权以之纪念四十年前我们成为同学学习铸造。

荣誉乙亥年冬月三十于北京

## 注

- 1) M. Radivojević, Th. Rehren, E. Pernicka, D. Šljivar, M. Brauns, & D. Borić, On the origins of extractive metallurgy: new evidence from Europe. *Journal of Archaeological Science*, 37 (2010), pp. 2775-2787.
- 2) 苏荣誉：《块范法与中原式失蜡法：春秋世变下青铜技术的本与末》，“中国早期的数学、艺术与文化交流：庆贺李零先生七秩华诞暨从事学术研究四十周年”学术讨论会论文，2017年6月12-13日：杭州，即刊。
- 3) Stephen W. Bushell, 1904, *Chinese Art*, volume I, London: Wyman and Sons, p. 73; 1907, p. 76. W. Perceval Yetts, 1929, *The George Eumorfopoulos Collection, Catalogue of the Chinese and Corean Bronzes, Sculpture, Jades, Jewellery and Miscellaneous Objects, Volume One, Bronzes: Ritual and Other Vessels, Weapons, etc.*, London: Ernest Benn, Ltd., pp. 35-38. 张子高：《中国化学史稿·古代之部》，科学出版社，1964年，第21页。
- 4) 刘屿霞：《殷代冶铜术研究》，《安阳发掘报告》第一册，1929年，商务印书馆，第681-696页。Orvar Karlbeck, *Anyang Moulds*, *Bulletin of the Museum of Far Eastern Antiquities*, No. 7, pp. 39-60.
- 5) 苏荣誉：《原始黄铜初探》，《青铜文化研究》第7辑，黄山书社，2011年，第148-158页。苏荣誉等：《中国上古金属技术》，山东科学技术出版社，1995年，第4-51页。
- 6) 苏荣誉、华觉明、李克敏、卢本珊：《中国上古金属技术》，山东科学技术出版社，1995年，第95-99页。廉海萍、谭德睿、郑光：《二里头遗址铸铜技术研究》，《考古学报》，2011年第4期，第561-575页。
- 7) 中国社会科学院考古研究所：《偃师二里头：1959-1978年考古发掘报告》，中国大百科全书出版社，1999年；《二里头：1999-2006》，文物出版社，2014年。
- 8) 河南省文物考古研究所：《郑州商城：1953-1985年考古发掘报告》，文物出版社，2001年。
- 9) Robert W. Bagley, 1980, *The Beginning of the Bronze Age: The Erlitou Culture Period*, in Wen Fong ed., *The Great Bronze Age of China, An Exhibition from the People's Republic of China*, New York: The Metropolitan Museum of Art, pp. 69-73; *Shang Ritual Bronzes Casting Technique and Vessel Design*, *Archives of Asian Art*, Vol. 43 (1990), pp. 6-20.
- 10) 苏荣誉：《二里头文化与中国早期青铜器生产的国家性初探——兼论泥范块范法铸造青铜器的有关问题》，《夏商都邑与文化》（一），中国社会科学出版社，2014年，第342-372页。
- 11) 岳占伟、荆志淳、刘煜、James B. Stoltman, Jonathan M. Kenoyer：《殷墟青铜器铸造技术相关问题》，《故宫文物月刊》第355期，2012年，第46-54页。

- 12) James B. Stoltman, Zhenwei Yue, Zhichun Jing, Jigen Tang, James H. Burton, Mati Raudsepp, New insights into the composition and microstructure of ceramic artifacts associated with the production of Chinese bronzes at Yinxu, the last capital of the Shang dynasty, *Archaeological Research in Asia*, 2017, pp. 1-13.
- 13) 柳百成、黄天佑主编《材料铸造成形工程》(上)(《中国材料工程大典》第18卷), 化学工业出版社, 2006年, 页571-591. Thomas S. Piwonka, *Aggregate Molding Materials*, in D. M. Stefanescu ed., *ASM Handbook*, vol. 15: Casting, 1998, The Materials Company, 1992, p. 457.
- 14) Thomas S. Piwonka, *Aggregate Molding Materials*, in D. M. Stefanescu ed., *ASM Handbook*, vol. 15: Casting, 1998, The Materials Company, 1992, p. 776.
- 15) Robert W. Bagley, *The Beginning of the Bronze Age: The Erlitou Culture Period*, in Wen Fong ed., *The Great Bronze Age of China, An Exhibition from the People's Republic of China*, New York: The Metropolitan Museum of Art, 1980, pp. 69-73. Lukas Nickel, *Imperfect Symmetry Re-Thinking Bronze Casting Technology in Ancient China*, *Artibus Asiae*, Vol. 66, No. 1 (2006), pp. 5-39. Robert Bagley, *Anyang Mold-making and the Decorated Model*, *Artibus Asiae*, Vol. 69, No. 1 (2009), pp. 39-90.
- 16) 山西省考古研究所:《侯马铸铜遗址》, 文物出版社, 1993年;《侯马白店铸铜遗址》, 科学出版社, 2012年。
- 17) 华觉明、冯富根、王振江、白荣金:《妇好墓青铜器群铸造技术的研究》,《考古学集刊》第1集, 中国社会科学出版社, 1981年, 第244-272页。中国社会科学院考古研究所:《殷墟发掘报告1958-1961》, 文物出版社, 1987年, 第33页。
- 18) 石璋如:《小屯后五次发掘的重要发现》,《六同别录》(上)(国立中央研究院历史语言研究所集刊外编第三种), 中央研究院历史语言研究所, 1945年, 第32页。中国社会科学院考古研究所:《殷墟发掘报告1958-1961》, 文物出版社, 1987年, 第31-33页。
- 19) 陈志达:《殷墟陶范及其相关的问题》,《考古》, 1986年第3期, 第269-277页。
- 20) 苟欢:《侯马铸铜遗址出土陶模范的纹饰研究》, 中央美术学院硕士论文, 2017年。
- 21) 李钟天:《模与范——以安阳孝民屯商代铸铜遗址出土泥模、范为对象》, 南京艺术学院硕士论文, 2019年。
- 22) 中国机械工程学会铸造分会编:《铸造手册第5卷·铸造工艺》(第2版), 机械工业出版社, 2003年, 第11-13页。
- 23) 陆文华、李隆盛、黄良余主编:《铸造合金及其熔炼》, 机械工业出版社, 1996年, 第340-346页。
- 24) 螺旋试样, 沟道截面8×8mm。柳百成、黄天佑主编《材料铸造成形工程》(上)(《中国材料工程大典》第18卷), 北京:化学工业出版社, 2006年, 页429, 表3.3-2。
- 25) 曲卫涛主编:《铸造工艺学》, 西北工业大学出版社, 1994年, 表12-1、表12-3。
- 26) Henry W. Stoll, *Casting Design and Processes, Casting Design and Performance*, Material Park: ASM International, 2009, p. 12, table 3.
- 27) 谭德睿:《中国青铜时代陶范铸造技术研究》,《考古学报》1999年第2期, 第211-250页。
- 28) 石璋如:《殷代铸铜工艺》,《中央研究院历史语言研究所集刊》第26本, 1955年, 第95-129页。Noel Barnard, *Bronze Casting and Bronze Alloys in Ancient China*, Canberra: The National University of Australia, 1961.
- 29) 陈志达:《殷墟陶范及其相关的问题》,《考古》, 1986年第3期, 第269-277页。
- 30) 李济、万家保:《殷墟出土青铜觚形器之研究》(古器物研究专刊第一本), 中央研究院历史语言研究所, 1964年;《殷墟出土青铜爵形器之研究》(古器物研究专刊第二本), 同上, 1966年;《殷墟出土青铜罍形器之研究》(古器物研究专刊第三本), 同上, 1968年;《殷墟出土青铜鼎形器之研究》(古器物研究专刊第四本), 同上, 1970年;《殷墟出土伍拾叁件青铜容器之研究》(古器物研究专刊第五本), 同上, 1972年。万家保:《安阳出土青铜三足器的演变》,《大陆杂志》第45卷4期(1972), 第1-11页。万家保:《辉县及汲县出土东周时期青铜鼎形器的铸造及合金研究》,《大陆杂志》第50卷第6期(1975), 第253-277页。苏荣誉:《2015d 万家保先生研究殷墟青铜器铸造技术管窥》,《中华艺术鉴赏》2015年第9期, 第92-103页。
- 31) 冯富根、王振江、白荣金、华觉明:《商代青铜器试铸简报》,《考古》, 1980年第1期, 第91-94页。冯富根、王振江、华觉明、

- 白荣金：《殷墟出土商代青铜觚铸造工艺的复原研究》，《考古》1982年第5期，第532-539、527页。华觉明、冯富根、王振江、白荣金：《妇好墓青铜器群铸造技术的研究》，《考古学集刊》第1集，中国社会科学出版社，1981年，第244-272页。
- 32) 苏荣誉等：《**虢**国墓地青铜器铸造工艺考察和金属器物检测》，卢连成、胡智生：《宝鸡**虢**国墓地》，文物出版社，1988年，第597-605页。
- 33) 李永迪、岳占伟、刘煜：《从孝民屯东南地出土陶范谈对殷墟青铜器的几点新认识》，《考古》2007年第3期，第52-63页。张昌平、刘煜、岳占伟、何毓灵：《二里冈文化至殷墟文化时期青铜器范型技术的发展》，《考古》，2010年第8期，第79-86页。
- 34) 石璋如：《殷代铸铜工艺》，《中央研究院历史语言研究所集刊》第26本，1955年，第95-129页。
- 35) 岳占伟、刘煜、岳洪彬、荆志淳：《殷墟陶模、陶范、泥芯的制作工艺研究》，《南方文物》2016年第2期，第129-140页。
- 36) 曲卫涛主编：《铸造工艺学》，西北工业大学出版社，1994年，第226-227页。
- 37) 柳百成、黄天佑主编《材料铸造成形工程》（上）（《中国材料工程大典》第18卷），北京：化学工业出版社，2006年，页795-824。
- 38) 廉海萍、丁忠明、周祥、徐惠康：《汉代叠铸法铸钱工艺研究》，《文物保护与考古科学》第20卷增刊（2008），第53-61页。
- 39) 河南省博物馆、《中国冶金史》编写组：《汉代叠铸：温县烘范窑的发掘和研究》，文物出版社，1978年。

人類が冶金技術を発明した時とは、液体化した金属には流動性と変形能力があり、溶解した金属を一定の形状の型に注入し、凝固すると、型の形状を呈し、かつ金属に既存の性能を保持したものが得られるのが認識されたということであり、これがすなわち铸造技術の嚆矢である。現在は紀元前6千年期末のセルビア（Serbia）の銅石併用時代の遺跡であるマイダンペック（Majdanpek）とプロシュニク（Pločnik）まで遡ることができる<sup>1)</sup>。

世界の主要な文明における青銅器の製作は、鍛造を基礎とし、鍛造・铸造併行の技術系統をもつ。铸造はすなわち、石范铸造で工具や兵器など小型の器物を、失蠟法を用いて複雑な器物を、土製范を用いてインゴットや簡単な器物を製作するものであり、技術水準は甚だ低かった。中原の古代青銅器のみが、铸造成形のみによって、かつほとんど土製范<sup>訳注1)</sup>の分割范（铸型）法のみで器物を铸造成形した<sup>2)</sup>。この点を明確に認識すると、中原初期の考古学的発見による遺物と密接で不可分であるとわかる。

古代の铸型は古人が金属を铸造した遺物であり、范（mold）、中子（core）、湯口系統（gating system）とその他関連する廃棄物を含んでいる。铸造製品の成形方法をみれば、一体式の铸型と分割范に分けることができる。前者は失蠟法（lost-wax process）などであり、後者は分割范法（塊范法、piece-molds）と称する。ただし通常、分割范法とは2つ以上の范（あるいはさらに1～数個の中子が加わる）から成る铸型構造を指す。铸造製品の材質からみれば、铸銅（およびその合金、以下同様）、铸铁、铸金、铸銀、铸鉛、铸錫などの類型に分けることができる。铸铁は铸型に必要な耐熱性が最高となり、1400℃前後、次点は銅と金で、铸込み温度は1000～1100℃前後となる。その他の金属の铸込み温度は250～900℃の間である。材質からみると石・泥砂・銅・鉄などの種類があり、その中で泥砂だけが複雑な器物の一体式の铸型の製作を可能にする。

中国古代の青銅器は十分に精美であり、古典籍にはその製作に関する記載がみられない。そのため西方の研究者が19世紀末から20世紀初めに初めてこの芸術品に触れた際、疑うことなく失蠟法で铸造されたものと認識した<sup>3)</sup>。20世紀20年代末になって、安陽殷墟で始まった発掘調査において青銅器を铸造した原型と范が発見され、西方の研究者が詳しく討論した結果、中国古代青銅器は土製范の分割范法で铸造したというのが共通認識となった<sup>4)</sup>。

百年近くにわたる研究と探索の末、中国古代铸造技術の発展の骨子は形成されたとはいえ、少なからず深妙で細かな問題も提示されてきた。また、さらに多くの資料が発見・発表されるにしたがって、研究作業は推進され、深化し、若干の思考と実証が及んでいない問題が浮上した。既往の研究において言及された工程と技術についても少なからず新たな問題があり、その中にはいくらか相当重要とみられるものもある。本文は、僭越ながら、私自身の未成熟な思考と疑問を顧み

ずに執筆するものであり、あるいはただ単に問題を提示するに留まる恐れもあるが、以って大方の教示を乞いたい。

## 1. 中国初期青銅器生産における分割範法の独占について

中国の冶金技術の起源はなお不明確であり、新石器時代の金属製品には、鑄造されたものと鍛造成形されたものがある。とはいえ、おしなべて仰韶文化半坡類型出土の黄銅の破片と管まで遡ることができるのであるが、ただし、偶然で、連続性にも乏しく、いまだに発展の脈絡を整理して、関連づけることができない<sup>5)</sup>。

二里头文化の段階になり、青銅時代が開始した。鑄造成形は唯一の青銅器製作技術であり、石製・土製鑄型がすでに出現していた。二里头文化2期より、独自の方法である土製範の分割範法が形成され、しかも急速に独特の風格を湛えた青銅技術体系と伝統が築かれた。土製範の分割範法は銅器製作において独占的で、支配的な地位を占めている<sup>6)</sup> (図1)。これによって製作された青銅器は、刀や鏃といった小型器具を除き、鑄造された爵・罍・角・鼎・盃などの容器、戈などの武器、牌と断面が紡錘形の鈴などの装飾具<sup>7)</sup>は、どれも他の文明では見られない造形であり、実用性が低く不便でもあるため、通常は祭祀あるいは副葬の彝器と考えられる (図2)。これに次ぐ商代前期の青銅器は、鄭州商城二里崗期の青銅器を代表とし、獣面紋・夔紋・犧首を装飾した器物が普遍的に存在する。精細かつ華やかで美しく<sup>8)</sup>、他の文明では見られない装飾である (図3)。技術上の独自性と造形・装飾の奇抜性は、中国古代青銅器の表裏を構成しており、なおかつ未だ明らかにされていない関係性を内包している。バグリー (Robert W. Bagley) が分割範法と紋飾の関係を論じており、これらの独特な関係を図解する試みを行っている<sup>9)</sup>。ただし、分割範法の技術体系は紋飾が出現する以前に形成されていたものである。

土製範の分割範法の技術的な基礎は、当然ながら新石器時代に発達した製陶技術にある。墨子 (B.C. 476 ? -B.C. 390 ?) が陶・鑄を併称し (『墨子』耕柱)、孟子 (B.C. 372 ? -B.C. 289) が陶・冶を併論する (『孟子』滕文公上) のがこの所以である。泥砂の性質に対する深い知識と、それを思いのままに運用する技術を見ると、陶工が冶金技術を発明した可能性は高い。しかも金属技術の初期において、陶工がその技術を青銅工具・用具・装飾の製作のために使い、技術が成熟してもなお、陶製礼器に似た銅器が鑄造されることにより、中国青銅時代が始まり、形成された。このような、いわゆる礼器については、現在もなお内包する意味や使用法が曖昧であるが、ある種の神秘性や至上の精神・権力などを象徴しており、記号化の特徴をもつ。このように青銅礼器の鑄造を掌握、あるいは所有する者は、分割範法による鑄造技術の発展と同時に、鍛造加工技術を排斥し、石範鑄造技術を抑制し、徐々に地位を独占して青銅器の製作と生産を支配した<sup>10)</sup>。

二里崗期およびその後の青銅技術の伝播と拡大、青銅工業の勃発と繁栄においては、土製範の分割範法による鑄造体系のみにとらわれず、多くの技術の発明と創造によりこの体系が強化されていった。このように中国古代青銅技術は他ものを追い抜き、新領域を開いた。当然、古代において最も複雑な技術体系をも形成した (図4)。

## 2. 鑄型の材料について

20世紀50年代、商周時代の土製範を分析した研究者がいたが、ほとんど化学成分あるいは組成のみの分析であった。これらは土壌に近く、同じ構成をもつ材料が多いため、分析結果はその物質の形態を反映したものにはならなかった。近年行われている岩相分析 (petrographic analysis) では物質の組成を知ることができるが、未だに発表されている成果は多くない。

岩相分析の成果によれば、商周時代の鑄銅用の土製の原型・範・中子の材料は基本的に細粉砂であり、粒度は多くが140目 (104 μm) 以下で、孔が多く、均質で、まれにやや大きな砂粒や有機質を含む。土器の材料と比較すると、黄土を篩にかけ水簸選別して得られたものであることがわかる。あるいはその中に別の細砂を加えたかもしれない (図5)。このようなものはほとんど粘土を含まない<sup>11)</sup> (図6)。水簸した粘土は耐火度を高めることができ、鑄型の強度を増強させ、焼付きによる欠陥を減少させる。初期の製陶技術では類似の処理を行っている。もし土製範が粘土を水簸して製作したも

のだとすると、必然的に新たな問題が浮上する。この粉砂はどのように結合して范と中子を形成しているのかということだ。James B. Stoltmanらは、走査型電子顕微鏡により、石灰 (CaO) を粘結剤としており、酸化カルシウムが黄土の基本成分であろうと推測するが、その分布の均質性は鑄型とは一定の差異がある<sup>12)</sup>とした。

砂型鑄造と比較すると、鑄型は通常、石英質珪砂を使用しており、82～99%を占める。性能を改善するために別の物質を加えることもある。生型の鑄型の場合、粘結剤はベントナイト (bentonite) であり、乾燥型の鑄型の粘結剤は普通の粘土、すなわちカオリナイト (kaolinite,  $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$ ) で構成される粘土鉱である。粘結剤は粘結膜となって砂粒を覆い、耐熱性をつくる毛細管と多くの空隙を生み、砂型に必要なとされる強靱さを持たせ、一定の通気性が備わる。水洗して0.02mm以下の細質を除去し、浮上分離で砂中の長石・雲母・鉄鉱を減少させる。さらに煤と淀粉を加える。前者は砂かみを防ぎ (抗夾砂性)、鑄ばらし時の鑄型の崩壊性 (潰散性) を高め、後者は砂の粘性と原型の型離れ (起模性) を向上させるためである。油脂を加えることで型砂の造形性を高めることも可能である<sup>13)</sup>。

岩相分析における試料調整の分析結果への影響が大きいかを考慮すると、より多くの研究機構が交差分析することで商周時代の鑄銅用土製范の粘結剤の問題を明らかにできる。もし粘土が少ないあるいは存在しないとすると、淀粉や油脂類といった有機質の粘結剤が検討における重要な対象となるであろう。

青銅の自由収縮率は1.4%、成形収縮率は1.2%<sup>14)</sup>である。鑄型、特に中子の退讓性は商周時代の鑄工の難題を複雑化する。この時期の青銅器の脚の内面にみられる中子の退讓性のちがいが原因となり、鼎の脚に亀裂が発生している。西周時代中期から、多数の鼎の脚が断面を槽形に設計して収縮に対応していたのを見ると、古代の多くの鑄工をもってしても適切な中子の材料が見つからなかったとみられる。

### 3. 原型について

原型は青銅器鑄造において核となる作用を有する。バグリーは二里頭文化で初めて鑄造された容器に原型があったとは限らないと考え、ニッケル (Lukas Nickel) は安陽と西周時期の一部の青銅器鑄造は原型を用いていなかったという説はいずれも成立し難い<sup>15)</sup>。ただし、侯馬晋国鑄銅遺跡<sup>16)</sup>を除き、その他の遺跡から出土した原型の数量は非常に少ない。こうした状況は侯馬遺跡と大きく異なり、当然、器物の設計を研究・理解するための多くの資料が欠乏しているのは明らか事実である。石・玉・木・竹・牙・金属質の原型、または銅器を原型としたのではないかと推測する研究者もいたが、未だに認定されてはいない<sup>17)</sup>。

安陽殷墟の鑄銅遺跡を例として、20世紀30年代にはすでに容器の土製原型が発見され認識されていたが、ただし今までに完形に近い原型が発見されたことはなく、すべて部分あるいは付飾品の原型であった<sup>18)</sup> (図7)。土製原型であるとしても、これらには個別に紋飾を貼り付ける現象はあるが、整形・彫刻の痕跡はほとんどみられず、基本的には転写して製作したもの<sup>19)</sup>と考えられる。すなわち、これらの遺物は一次原型ではなく、次世代に発生した原型ということである。一次原型に該当するのは容器の部分原型、あるいは付飾品・部分装飾のみであり、本来の一次原型は土製ではなく他の材質によるもので、彫刻した後に転写して二次原型を製作、それらを再度組み立てて一つの原型をつくり、范に転写したと推測できる。このように考えれば、ニッケルの指摘した対称現象は容易に発生する。そうであるとすれば、万家保の推測した范に刻む装飾と原型・范の両者に刻む紋飾はいずれもほとんど存在しないことになる。二次原型を転写した遺物は、鑄范と認定できるのかもまた判らない。当然、この推測は鑄銅遺跡から出土した遺物と、それらに対する深化した研究によって実証あるいは否定されなければならない。

同様に、侯馬鑄銅遺跡から出土した土製原型の数量は非常に多く、最初に設計された本来の土製原型も発見されている。ただし、細密な紋飾をもつ土製原型はいずれも二次原型であり、一次原型に該当するものは存在しない。一次原型は土製ではない可能性が高い<sup>20)</sup>。

明らかなのは、一次原型の材料と形式、および二次原型を組み合わせる一つの土製原型をつくることなどは、いずれも解明されていない謎であることである<sup>21)</sup>。また当然ながら、商代に紋飾を転写した部分范を組み合わせる鑄型とする方法

(pattern block) が存在したか否か、あるいはどの程度用いられたのかということも非常に興味深い問題である。

#### 4. 充填性能について

充填性能とは溶解した金属あるいは合金を型の空隙に充填させ、形態を整えて輪郭のはっきりした製品を生み出す能力である。通常は液体化した金属を鑄型の隙間に充填されることであるが、充填して結晶化する状況でもある。異なる金属、異なる鑄造方法、そして形式の異なる鑄型では、いずれも充填性能は異なること、また、充填性能はまず金属あるいは合金の流動性によって決まり、鑄型の性質と注湯条件、製品の構造などといった要素の影響も受けることが実践的に証明されている<sup>22)</sup>。

青銅は銅と錫の合金もしくは銅・錫・鉛の合金であり、錫青銅の結晶化温度の幅は広い(図8)。糊状凝固<sup>訳注2)</sup>を呈し、樹枝状結晶(デンドライト)が発達して、製品内で素早く結晶骨格を形成する。その後、線収縮を開始し、高温割れが容易に生じる<sup>23)</sup>。砂型で鑄造した錫青銅(Sn9～11%、Zn2～4%)は、鑄込み温度が1040℃の時に流動性は420mmとなり、C(炭素)とSi(シリカ)が5.9%の鑄鉄で、鑄込み温度1300℃で砂型を用いて鑄鉄した際の流動性1300mmには程遠い<sup>24)</sup>。このため、鑄造製品の厚みには最低制限があり、鑄造方法が異なれば、厚みの最小値も異なる。銅合金を砂型で鑄造した小型製品の厚みの最小値は2～3mmであり、消失原型による鑄造で大きさが50～100mmの製品は最小値が2.0～2.5mm、大きさ100～200mmの製品の厚みの最小値は2.5～3.0mmとなる<sup>25)</sup>。国際材料学会が勧める最小値は2.5mmである<sup>26)</sup>。ここから明らかかなように、青銅合金の流動性は良好ではない。

ただし、商周青銅器の鑄造は質量とも精良であり、造形が複雑であるだけでなく、紋飾は華やかで美しく、なおかつ器壁の薄い製品が少なくない。青銅器の初期段階でも早い時期に当たる二里頭文化の時期において、青銅器は往々にして器壁が2mm以内で、かつ1.5mm前後から1mmに満たない厚さのものも少なくない。これは当時の鑄造工人がすでに充填性能の問題を解決していたことを説明している。材料は起伏が大きい錫青銅あるいは鉛錫青銅で、流動性は良くなく、充填性能を高める鍵は鑄型と鑄込みの工程のみである。

今までに発見された商周時代の鑄銅遺跡は若干数であるとはいえ、検出された鑄銅遺構は少なくなく、多量の鑄銅遺物が出土している。ただし、商周青銅器の鑄造工程は今なお推測の域を出ず、正確な工程とパラメーターを確定することはできない。発見された鑄型はとても精確で、多くの研究者が復元するための実験鑄造を行ったが、操業の過程と結果を全面的に発表しているものは多くない。譚徳叡は、長年伝統鑄造技術の調査研究を行ってきた経験から、古代の鑄型材料研究を基礎として、長期にわたる復元鑄造実験を行った。その結果は、古代の鑄型の優れた充填性能は鑄型中の植物珪酸体(プラントオパール)に帰結されるというものであった<sup>27)</sup>。

しかるに、古代の鑄型中の植物珪酸体の含有量と普遍性は調査をして確認する必要がある。植物珪酸体が充填性能を増強する仕組みはまだ不明確であり、どのような比率の植物珪酸体が存在すれば充填性能を改善、あるいは大幅に高めることができるか、ということも特に究明すべき問題である。当然ながら、臨淄出土の鏡範の比重は1.0より小さく、その材料と製作技術について、同様に研究を深めれば現状を突破することができよう。

#### 5. 注湯と鑄型に関する操業

溶解した青銅を鑄型に流し込んだ後、冷却し凝固させて製品を形成する。熔解炉から流れ出た青銅は急速に熱を奪われて凝固する。このため、溶解温度をコントロールし、取瓶(pouring ladle)の保温性能を増強し、炉と鑄型との距離を短縮させ、合理性のある鑄込み系統を設計して、鑄型を加熱させる。これらは全て適切な注湯(鑄込み)温度を保証するための対策である。

中国古代青銅器鑄造技術に関する議論では、加熱または焼成した鑄型、すなわち「加熱鑄型」<sup>訳注3)</sup>へ注湯したという見解がある。しかしこれまで発見された鑄銅遺跡からは関連する証拠は明らかではない。注湯前の鑄型の焼成は相当普遍的である可能性があり、これによって水分を低下させ、ガス発生量を減少させる。ただし加熱鑄型への注湯とは関連性が

ない。

溶解した金属を鑄型に注入したのち、摂氏 1000 度以上の温度場を形成すると、鑄型には必然的に物理的・化学的・機械的作用が働く。製品に砂かみ・砂孔・巣・焼付き・高温割れなどの欠陥が生じることを除くと、鑄型にはどのような痕跡が残るのか、あるいは、どのような影響があるのか、これまでに真剣に注目されたことのない問題である。この問題には、異なる鑄型はどのような程度で破砕するのか、鑄型の空洞部の表面の融蝕（すり減り）はどの程度か、中子にはどのような変形と融蝕が生じるのか、硬度と強度にはどのような変化が生じるか、などの疑問も含まれる。当然、これらの問題は鑄銅遺跡の遺物の認識と判断に直接的に関わる。有機質粘結剤の使用に対する判断をも含む。

商周時代の青銅器生産では、容器の数量が非常に多い。これは中子の使用量も多いということでもある。中子は鑄込みの後ひとつひとつ取り出すしかなく、圈足をもつ器物の底部に残る除去しきれなかった中子を見ると、1000℃程の高温を経て、磚のように硬くなっている。このことは一方では中子の崩壊性に違いがあること、また他方では中子を取り出すのが容易でないことを示している。このため、圈足器の底部に残る中子も除去していない、もしくは一部分のみを除去したものであることになる。また、器物の腹部に中子が残存している状況は比較的少なく、やはり多量の中子を取り出されているということである。ただし、鑄銅遺跡の調査ではこのような情報はあまりみられない。同様に、出土した範（外範）の数量を見ると、安陽では中子よりはるかに多い。使用済みの範にも焼結痕跡が残るはずだが、考古発掘資料にはこのようなものはわずかである。これはどのような背景によるものであろうか。

侯馬出土の土製原型・範・中子を観察すると、土坑と建物から出土したのは基本的には未鑄造のものであり、しかもすでに組み合わせたのみで鑄込みを行っていない鑄型までである。なおかつ、原型の数量が範と中子に比べて多く、ほぼ完形のものも基本的に原型であった<sup>28)</sup>。すると、少量の範は何をもって廃棄されたのかというのも、これまで関心をもたれなかった問題である。欠陥があつて廃棄されたのだろうか。組み合わせた鑄型の大きさが合わず用を成さなかったのであろうか。陳志達は安陽では後者の現象がみられることを指摘しているが、具体的な範について検討を行っておらず<sup>29)</sup>、なお概念に留まっている。安陽鑄銅遺跡から発見された、比較的完形で紋飾が明瞭な範は、鑄込みを経ておらず、共通の原因による可能性がある。これらは二次原型を生産するための本来の原型（母模）ではないのか、研究の価値がある。

このことから派生するのは、鑄銅遺跡から出土した範のみから、具体的な器物の鑄型の構造について推測できるかどうかということである。例えば、青銅器の水平方向の範の分割の問題については、やはり更なる検証と証拠が必要である。前掲の原型についての議論における、一次原型の由来と二次原型の生成について、これらの遺物と関係性があるのかどうか、探るに値する。

## 6. 鑄型の構造と製作について

鑄銅遺跡から発見される範と中子はいずれも破片であるが、青銅器に残る範線と空隙をあわせて検討することで、これらを根拠として鑄型の構造を復元することができる。石璋如やバーナード (Noel Barnard) はいずれもこの方法を用いているが、明らかな事実として、初期の研究者は鑄型の分割についての仮説がとて細かいことである。石璋如はかくの如しであり、バーナードはより極端である。万家保氏によって築かれた垂直方向の分割および、最少の分割の枠組みは、鑄造の原理に適っており、出土した土製範と器物に残る痕跡にも合致している。彼は率先してごく少数の青銅觚が水平方向の範によるものであると確認し、模擬実験を通して土製範の特性と問題を認識し、その後、一部の器類の鑄造における垂直方向分割を系統的に分析した<sup>30)</sup>。華覚明氏は彼らの研究結果を参照し、模擬実験を行って土製鑄型を理解し、鑄型構造について新知見を提示し、鑄接の研究を大きく前進させた<sup>31)</sup>。そして我々の世代では、多くの器物を集めて対比研究を行い、可能性と方向性を探ることができるようになり、分割原型と鑄型現象を発見した<sup>32)</sup>。

安陽孝民屯鑄銅遺跡では多くの辺縁をもつ範が発見され、普遍的に水平方向の分割範の実例の存在が認知され<sup>33)</sup> (図9)、バーナードの説に回帰するような傾向となっている。鑄造技術の実践から見ると、このような鑄型の分割はリスクが高いだけでなく、範線を除去する作業が非常に多くなる。青銅器の実物からみれば、垂直方向の範線は表面に多く存在し、一

部は研磨されているが水平方向の分割による范線はほとんど確認できない。まず、わずかな痕跡から水平方向の范線が存在するか否かを確定する必要がある。もし水平方向に分割された鑄型が多量にあったとすれば、無論、鑄造後加工の研究や審美的視点からの研究などにとって、得難い材料となるだろう。

土製中子の製作は関心を寄せる人が非常に少ない問題である。最も早くこの問題を議論したのは石璋如であり、鑄造工人は土製原型を均一な厚みで削りとって中子を製作し、削りとった厚みがすなわち製品の厚みであると考えた<sup>34)</sup>。なぜ出土する土製原型の数量が少なすぎるのかという問題に答えており、中子の製作と、中子と范の組立ての問題をも解決している。それから60年来、さらに多くの鑄銅遺跡が発見され、出土した遺物も増加したが、石氏の仮説を証明できる材料はそう多くはない。中子受け(幅木)の存在と土製中子の水平方向の分割を考慮すると、石氏の推測の妥当性は高くはない。これを除く製作方法についても、推測にもとづく要素は今なお比較的多い<sup>35)</sup>。原型-中子を組み合わせると紋飾を製作する器物に至っては、土製中子は転写して成形しなければならない。さらに、侯馬鑄銅遺跡から出土した土製中子は全て中子范<sup>訳注4)</sup>を転写して成形されたものであった。商代青銅器の土製中子もまた基本的に中子范を反転して製作したものである。当然、問題は依然として、鑄銅遺跡で出土する中子范と認定できる遺物が極めて少ない、もしくは識別できていないということである。

## 7. 湯口系統について

湯口系統は鑄型に不可欠な構成要素であり、溶解した金属を鑄型の空洞部に注入して充満させる役割がある。現代の工業鑄造の湯口系統は、通常、受口(pouring cup)、湯口(sprue)、湯口底(sprue base)、湯道(runner)、堰(ingate)から成り立っている<sup>訳注5)</sup>(図10)。砂型鑄造を参照すると、湯口系統と鑄型の空洞部での流動は粘性流体に属し、多空管の中では不安定に流動するものであり、乱流(turbulence)に属する。湯口系統において基本的に求められることは以下の条件である。

- A. 一定の注湯時間内で鑄型の空洞を充満させること。さらに鑄接の輪郭が明瞭であることが保証され、湯まわり不良による鑄造欠陥の発生を防止できること。
- B. 鑄型の空洞に金属液を流入する速度と方向をコントロールすることができ、可能な限り安定して流入できること。衝撃・飛散・渦などの発生を防止し、鑄造製品に酸化スラグ・巣・砂孔などの欠陥が発生しないこと。
- C. 金属液中のスラグと気体の発生を湯口系統のなかで抑え、スラグ巻き込みや巣などの欠陥が発生しないこと。
- D. 鑄造製品が凝固する際の温度分布をコントロールでき、収縮巣(ひけ巣)<sup>訳注6)</sup>・亀裂・変形などの欠陥を減少もしくは除去できること。
- E. 構造はなるべく簡単にし、単純化した造形によって、調整作業と液体金属の消耗を減少できること。

金属液を注入する鑄型の空洞部の形状により、通常、湯口系統は頂注式・底注式・中注式・階段式・間隙式・複合式などに分類でき、それぞれに特徴と適した製品がある<sup>36)</sup>。商周青銅器の注湯は、湯口系統の実物に乏しいため、多くの場合、器物の湯口の痕跡に基づき、頂注式のみと推断したのであるが、他に方式があるか否かは注目に値する。

銅合金は密度が高く、熱伝導性が良く、充填が容易である。錫青銅の結晶温度範囲は広く、収縮巣(shrinkage)を生じ易いが、酸化傾向は比較的低い。小型の単純な製品には圧辺湯口<sup>訳注7)</sup>が適しており、大・中型の複雑な製品には雨淋式などの頂注式の湯口系統が適している。複雑な中・小型の錫青銅製品の湯口系統では、湯口の断面を湯口：湯道：堰=1:(1.2-2):(1.2-3)とすることが勧められている<sup>37)</sup>。

これまでに発見された商周青銅器の鑄型は、湯口系統の痕跡が残るものは多くはなく、完形の湯口系統は未だかつて見つかっていない。青銅器の堰の痕跡を検討すれば、堰の設計は知ることができるが、湯口系統全体の復元は想像の段階に留まっており、基本的には頂注式のみである。1点の青銅器の湯口系統の湯口から堰まで<sup>訳注8)</sup>の長さはどのくらいか、受け口、湯口、堰などにどのような要素があって、どのように展開するのか、湯口系統と製品の質量あるいは欠陥の間にどのような関係性があるのか、いまだに資料と研究が乏しい。ただし、漢代には鑄銭の規模が拡大しており、多量の銭范

と壘铸母范が遺存している。この問題を深く検討するには得難い材料であろう。廉海萍らは深化した研究と復元実験を行っており<sup>38)</sup>、将来的には定量データを算出することが期待される。研究初期における温県烘范窯の铸鉄壘铸研究と計算は参考にする価値がある<sup>39)</sup>。

中国古代青銅铸造技術は多方面において未だ不明確で、進展が待たれる部分がある。原料の由来の問題、特に錫の由来の問題、砒素銅の原料の問題、溶解炉と鑪の問題、工房の配置の問題、鑄付け（鋲接）の問題、铸造後の加工と刻紋の問題、廢品と鑄つぶしなどの問題などがある。本文では原型と范の問題を粗略に列挙したが、長い間私を悩ませてきた問題もあり、近年再考を行い、新たに遭遇した問題もある。読者の指摘と批評を希望し、共同研究も期待している。

### 作者附記

1979～1983年、筆者は西安交通大学機械工程系にて铸造技術・設備を専攻した。1982年の初夏、教研室主任・周慶徳教授の招聘により千葉工業大学・大野篤美教授の「金属凝固理論」課（朱憲華先生翻訳）を受講したのを覚えている。2回のみであったが、明瞭・簡潔で深く印象に残った。これが私にとって初めて日本人と日本の研究者と接した機会であり、忘れられない記憶となっている。その後筆者は金属史の研究に従事し、日本の考古学・芸術史・金工史の多くの諸先輩方の好奇心、探究心、実直な態度には頭の下がる思いがした。日本の研究者との交流の中で、多くの研究者と親交を結んだが、丹羽崇史はその中の一人である。彼が開催した「陶范技術的実験考古学研究会」（2019年2月24日、奈良）では筆者が長年頭を悩ませてきた問題を引き出された。一つには日本の研究者からフィードバックを受け、二つには新たな共同研究への希望を託した。拙稿は以前、西安交通大学鑄工91期の同級生に差し上げてご指摘をいただいた。今回の発表ができたことを、40年前に我々が同級生となり铸造を学んだ記念に捧げるものである。

榮譽乙亥年冬月三十于北京

### 註

- 1) M. Radivojević, Th. Rehren, E. Pernicka, D. Šljivar, M. Brauns, & D. Borić, On the origins of extractive metallurgy: new evidence from Europe. *Journal of Archaeological Science*, 37 (2010), pp. 2775-2787.
- 2) 蘇榮譽「塊范法与中原式失蠟法：春秋世變下青銅技術的本与末」『中国早期的数述・芸術与文化交流：慶賀李零先生七秩華誕暨從事學術研究四十周年』學術討論會論文、2017年6月12-13日、杭州、既刊。
- 3) Stephen W. Bushell, 1904, *Chinese Art*, volume I, London: Wyman and Sons, p. 73; 1907, p. 76. W. Perceval Yetts, 1929, *The George Eumorfopoulos Collection, Catalogue of the Chinese and Corean Bronzes, Sculpture, Jades, Jewellery and Miscellaneous Objects, Volume One, Bronzes: Ritual and Other Vessels, Weapons, etc.*, London: Ernest Benn, Ltd., pp. 35-38. 張子高『中国化学史稿 古代之部』科学出版社、1964年、21頁。
- 4) 劉嶼霞「殷代冶銅述研究」『安陽發掘報告』第1冊、1929年、商務印書館、681-696頁。Orvar Karlbeck, Anyang Moulds, *Bulletin of the Museum of Far Eastern Antiquities*, No. 7, pp. 39-60.
- 5) 蘇榮譽「原始黃銅初探」『青銅文化研究』第7輯、黄山書社、2011年、148-158頁。蘇榮譽他「中国上古金属技術」山東科学出版社、1995年、4-51頁。
- 6) 蘇榮譽・華覚明・李克敏・盧本珊『中国上古金属技術』山東科学技術出版社、1995年、95-99頁。廉海萍・譚德勸・鄭光「二里頭遺跡鑄銅技術研究」『考古學報』2011年第4期、561-575頁。
- 7) 中国社会科学院考古研究所『偃師二里頭：1959～1978年考古發掘報告』中国大百科全書出版社、1999年、および『二里頭：1999～2006』文物出版社、2014年。
- 8) 河南省文物考古研究所『鄭州商城：1953～1985年考古發掘報告』文物出版社、2001年。
- 9) Robert W. Bagley, 1980, *The Beginning of the Bronze Age: The Erlitou Culture Period*, in Wen Fong

- ed., *The Great Bronze Age of China, An Exhibition from the People's Republic of China*, New York: The Metropolitan Museum of Art, pp.69-73; *Shang Ritual Bronzes Casting Technique and Vessel Design*, *Archives of Asian Art*, Vol. 43 (1990), pp. 6-20.
- 10) 蘇榮譽「二里頭文化与中国早期青銅器生產的国家性初探——兼論泥范塊范法鑄造青銅器的有關問題」『夏商都邑与文化』(一)、中国社会科学出版社、2014年、342-372頁。河南省文物考古研究所『鄭州商城：1953～1985年考古發掘報告』文物出版社、2001年。
- 11) 岳占偉・荆志淳・劉煜・James B. Stoltman, Jonathan M. Kenoyer「殷墟青銅器鑄造技術相關問題」『故宮文物月刊』第355期、2012年、46-54頁。
- 12) James B. Stoltman, Zhenwei Yue, Zhichun Jing, Jigen Tang, James H. Burton, Mati Raudsepp, *New insights into the composition and microstructure of ceramic artifacts associated with the production of Chinese bronzes at Yinxu, the last capital of the Shang dynasty*, *Archaeological Research in Asia*, 2017, pp. 1-13.
- 13) 柳百成・黃天佑主編「材料鑄造成形工程」(上)『中国材料工程大典』第18卷、化学工業出版社、2006年、571-591頁。Thomas S. Piwonka, *Aggregate Molding Materials*, in D. M. Stefanescu ed., *ASM Handbook*, vol. 15: Casting, 1998, The Materials Company, 1992, p. 457.
- 14) Thomas S. Piwonka, *Aggregate Molding Materials*, in D. M. Stefanescu ed., *ASM Handbook*, vol. 15: Casting, 1998, The Materials Company, 1992, p. 776.
- 15) Robert W. Bagley, *The Beginning of the Bronze Age: The Erlitou Culture Period*, in Wen Fong ed., *The Great Bronze Age of China, An Exhibition from the People's Republic of China*, New York: The Metropolitan Museum of Art, 1980, pp.69-73. Lukas Nickel, *Imperfect Symmetry Re-Thinking Bronze Casting Technology in Ancient China*, *Artibus Asiae*, Vol. 66, No. 1 (2006), pp. 5-39. Robert Bagley, *Anyang Mold-making and the Decorated Model*, *Artibus Asiae*, Vol.69, No.1 (2009), pp. 39-90.
- 16) 山西省考古研究所『侯馬鑄銅遺跡』文物出版社、1993年、および『侯馬白店鑄銅遺跡』科学出版社、2012年。
- 17) 華覺明・馮富根・王振江・白榮金「婦好墓青銅器群鑄造技術的研究」『考古學集刊』第1集、中国社会科学出版社、1981年、244-272頁。中国社会科学院考古研究所『殷墟發掘報告 1958～1961』文物出版社、1987年、33頁。
- 18) 石璋如「小屯後五次發掘的重要發現」『六同別錄』(上)(国立中央研究院歷史語言研究所集刊外編第三種)、中央研究院歷史語言研究所、1945年、32頁。中国社会科学院考古研究所『殷墟發掘報告 1958～1961』文物出版社、1987年、31-33頁。
- 19) 陳志達「殷墟陶范及其相關的問題」『考古』1986年第3期、269-277頁。
- 20) 苟歡『侯馬鑄銅遺跡出土陶模範的紋飾研究』中央美術院碩士論文、2017年。
- 21) 李鐘天『模与范-位安陽孝民屯商代鑄銅遺跡出土泥模、范為对象』南京芸術学院碩士論文、2019年。
- 22) 中国機械工程学会鑄造分会編『鑄造手冊』第5卷・鑄造工藝(第2版)、機械工業出版社、2003年、11-13頁。
- 23) 陸文華・李隆盛・黃良余主編『鑄造合金及其溶鍊』機械工業出版社、1996年、340-346頁。
- 24) 螺旋仕様で、溝の断面は8×8mmである。柳百成・黃天佑主編「材料鑄造成形工程」(上)『中国材料工程大典』第18卷、化学工業出版社、2006年、429頁、表3.3-2。
- 25) 曲衛濤主編『鑄造工藝學』西北工業大学出版社、1994年、表12-1・表12-3。
- 26) Henry W. Stoll, *Casting Design and Processes, Casting Design and Performance*, Material Park: ASM International, 2009, p. 12, table 3.
- 27) 譚德叡「中国青銅時代陶范鑄造研究」『考古學報』1999年第2期、211-250頁。
- 28) 石璋如「殷代鑄銅工藝」『中央研究院歷史語言研究所集刊』第26本、1955年、95-129頁。Noel Barnard, *Bronze Casting and Bronze Alloys in Ancient China*, Canberra: The National University of Australia, 1961.

- 29) 陳志達「殷墟陶範及其相關的問題」『考古』1986年第3期、269-277頁。
- 30) 李濟・万家保『殷墟出土青銅觚形器之研究』(古器物研究專刊第一本)、中央研究院歷史語言研究所、1964年、および『殷墟出土青銅爵形器之研究』(古器物研究專刊第二本)、同上、1966年、および『殷墟出土青銅斝形器之研究』(古器物研究專刊第三本)、同上、1968年、および『殷墟出土青銅鼎形器之研究』(古器物研究專刊第四本)、同上、1970年、および『殷墟出土伍拾叁件青銅容器之研究』(古器物研究專刊第五本)、同上、1972年。万家保「安陽出土青銅三足器的演變」『大陸雜誌』第45卷4期(1972)、1-11頁。万家保「輝県及汲県出土東周時期青銅鼎形器的鑄造及合金研究」『大陸雜誌』第50卷第6期(1975)、253-277頁。蘇榮譽2015「万家保先生研究殷墟青銅器鑄造技術管窺」『中華藝術鑑賞』2015年第9期、92-103頁。
- 31) 馮富根・王振江・白榮金・華覺明「商代青銅器試鑄簡報」『考古』1980年第1期、91-94頁。馮富根・王振江・華覺明・白榮金「殷墟出土商代青銅觚鑄造工藝的復原研究」『考古』1982年第5期、532-539頁。華覺明・馮富根・王振江・白榮金「婦好墓青銅器群鑄造技術的研究」『考古學集刊』第1集、中國社會科學出版社、1981年、244-272頁。
- 32) 蘇榮譽他「**強**國墓地青銅器鑄造工藝考察和金屬器物檢測」、盧連成・胡智生『**寶鷄強**國墓地』、文物出版社、1988年、597-605頁。
- 33) 李永迪・岳占偉・劉煜「從孝民屯東南地出土陶範談對殷墟青銅器的幾點新認識」『考古』2007年第3期、52-63頁。張昌平・劉煜・岳占偉・何毓靈「二里岡文化至殷墟文化時期青銅器範型技術的發展」『考古』2010年第8期、79-86頁。
- 34) 石璋如「殷代鑄銅工藝」『中央研究院歷史語言研究所集刊』第26本、1955年、95-129頁。
- 35) 岳占偉・劉煜・岳洪彬・荊志淳「殷墟陶模、陶範、泥芯的制作工藝研究」『南方文物』2016年第2期、129-140頁。
- 36) 曲衛濤主編『鑄造工藝學』西北工業大學出版社、1994年、226-227頁。
- 37) 柳百成・黃天佑主編「材料鑄造成形工程」(上)『中國材料工程大典』第18卷、化學工業出版社、2006年、795-824頁。
- 38) 廉海萍・丁忠明・周祥・徐惠康「漢代量鑄法鑄錢工藝研究」『文物保護與考古科學』第20卷增刊(2008)、53-61頁。
- 39) 河南省博物館『中國冶金史』編寫組『漢代量鑄：溫縣烘範窯的發掘和研究』文物出版社、1978年。

## 訳注

- 1) 原文の「泥範」は「土製範」、「泥模」は「土製原型」、「泥質」は「土製」と訳し、そのほかの「泥砂」などはそのまま表記するか、文脈から「土製」と訳したものもある。廉海萍「上海博物館における陶範実験研究」(本書Ⅱ-3)で述べられるように、「泥」は「(水分の有無に関わらず)極めて細微な顆粒の集合体」を指す。
- 2) マッシイ型凝固。金属の凝固形態の一つで合金全体がほぼ同時に凝固するもの(自動車用語辞典編集委員会『日英中自動車用語辞典』社団法人自動車技術会、2006年、665頁)。
- 3) 原文は「熱型」。内部に巣や不純物の偏析がない製品を得るため、注湯時にあらかじめ加熱された鑄型のこと(大野篤美「加熱鑄型を用いた連続鑄造法O.C.C.」『日本金属学会会報』23-9、1984年)。
- 4) 原文は「芯盒」。中子を成形するための範。
- 5) 湯口系統の日本語名称については、以下の文献で用いられるものに従った。  
日本鑄造工学会(編)「湯口系」『図解 鑄造用語辞典』日刊工業新聞、1995年。
- 6) 原文の「縮孔」、「縮松」はいずれも「収縮巣(ひけ巣)」と理解した。
- 7) 側面に設けられた湯口(堰)を指す。適切な訳語が不明なため、原文の「圧辺」をそのまま用いる。
- 8) 原文は「圧頭」。頂注式の湯口系統における、受け口から湯口・湯道・堰までの全体を指すものとみられる。

(大平理紗・丹羽崇史 訳)

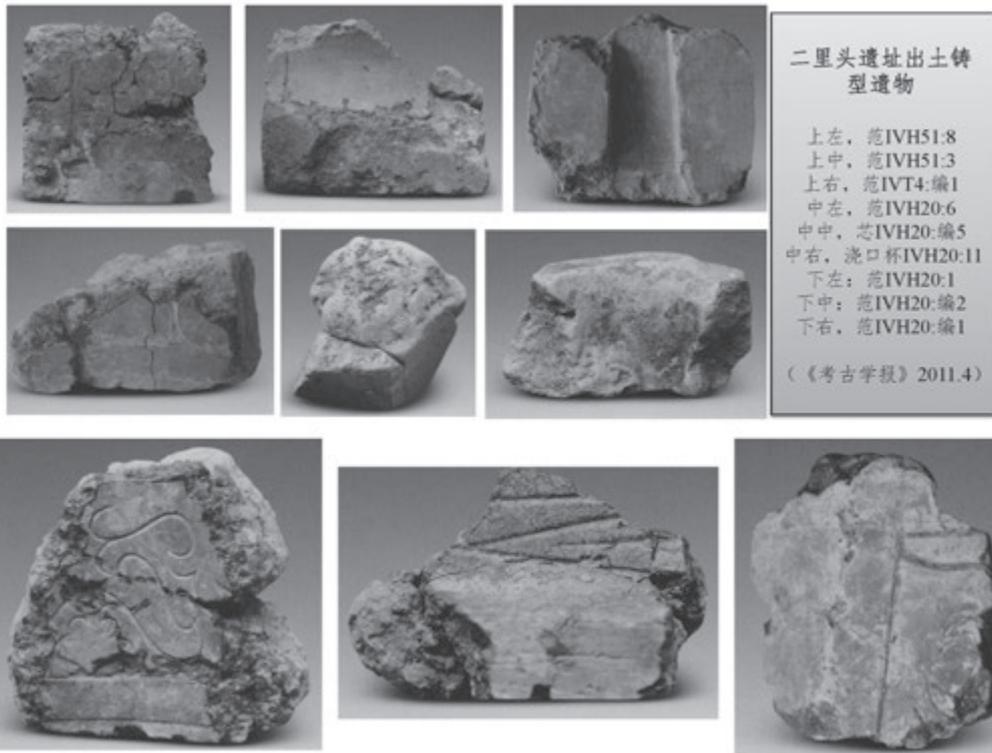


图1 二里头遗址出土铸铜遗物 (《考古学报》2011年第4期)

图1 二里头遗址出土铸铜遗物 (《考古学报》2011年第4期)



图2 二里头遗址出土青铜器

(中国青铜器全集编辑委员会(编)《中国青铜器全集1 夏·商1》文物出版社、1996年。中国社会科学院考古研究所(编)《偃师二里头1999-2006》文物出版社、2014年。中国社会科学院考古研究所(编)《偃师二里头: 1959年~1978年考古发掘报告》中国大百科全书出版社、1999年)

图2 二里头遗址出土青铜器

(中国青铜器全集编辑委员会(编)《中国青铜器全集1 夏·商1》文物出版社、1996年。中国社会科学院考古研究所(编)《偃师二里头1999-2006》文物出版社、2014年。中国社会科学院考古研究所(编)《偃师二里头: 1959年~1978年考古发掘报告》中国大百科全书出版社、1999年)



图3 郑州商城出土商早期（二里岗期）青铜器

(河南省文物考古研究所(编)《郑州商城 1953-1985年考古发掘报告》文物出版社, 2001年)

图3 郑州商城出土商代前期（二里岗期）青铜器

(河南省文物考古研究所(编)《郑州商城 1953-1985年考古发掘报告》文物出版社, 2001年)

泥范块范法铸铜流程图 苏荣春绘制于二零一七年

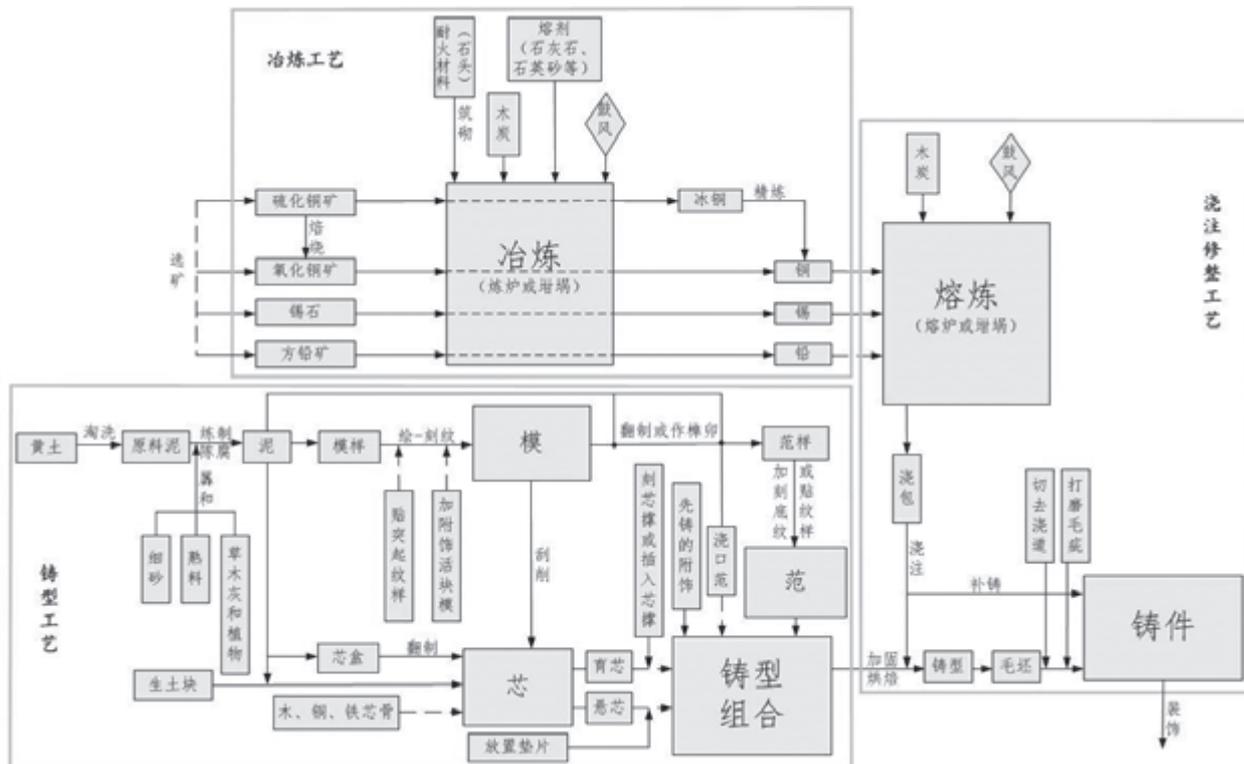


图4 泥范块范法铸铜流程图（笔者绘制于2017年）

图4 土製范の分割范法の工程（筆者2017年作成）

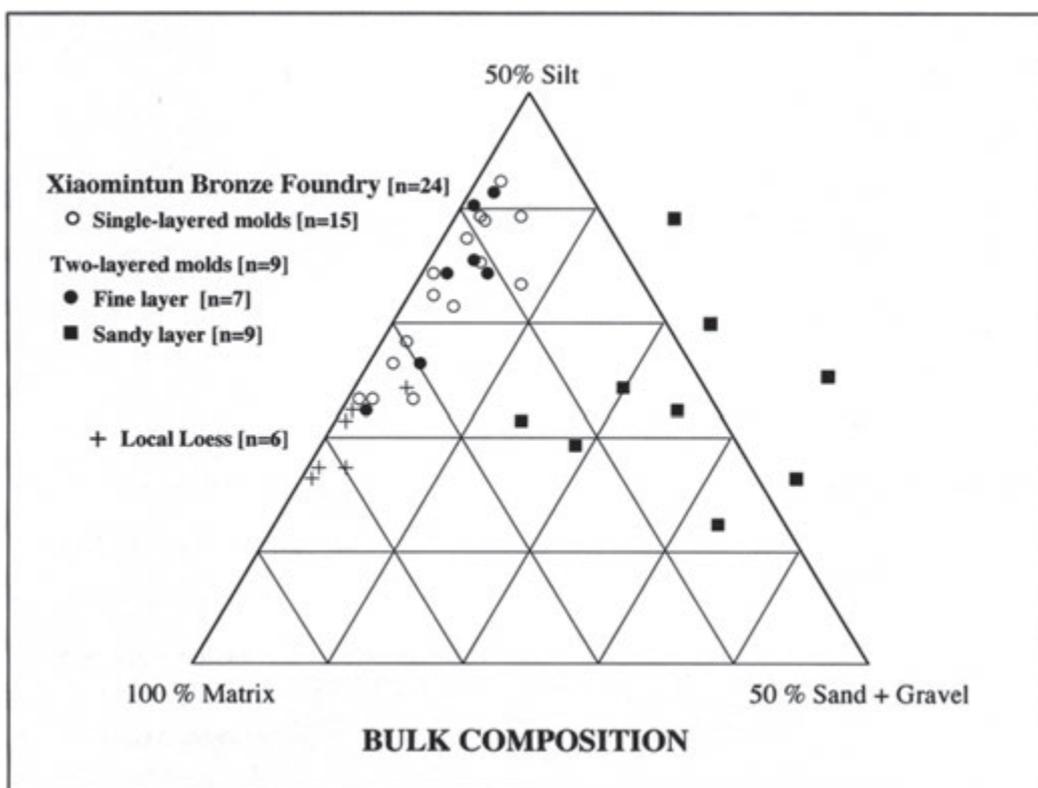


图5 安阳孝民屯铸铜遗址出土泥范组分（荆志淳教授惠供）

图5 安陽孝民屯鑄銅遺跡出土土製範の組成（荆志淳教授提供）

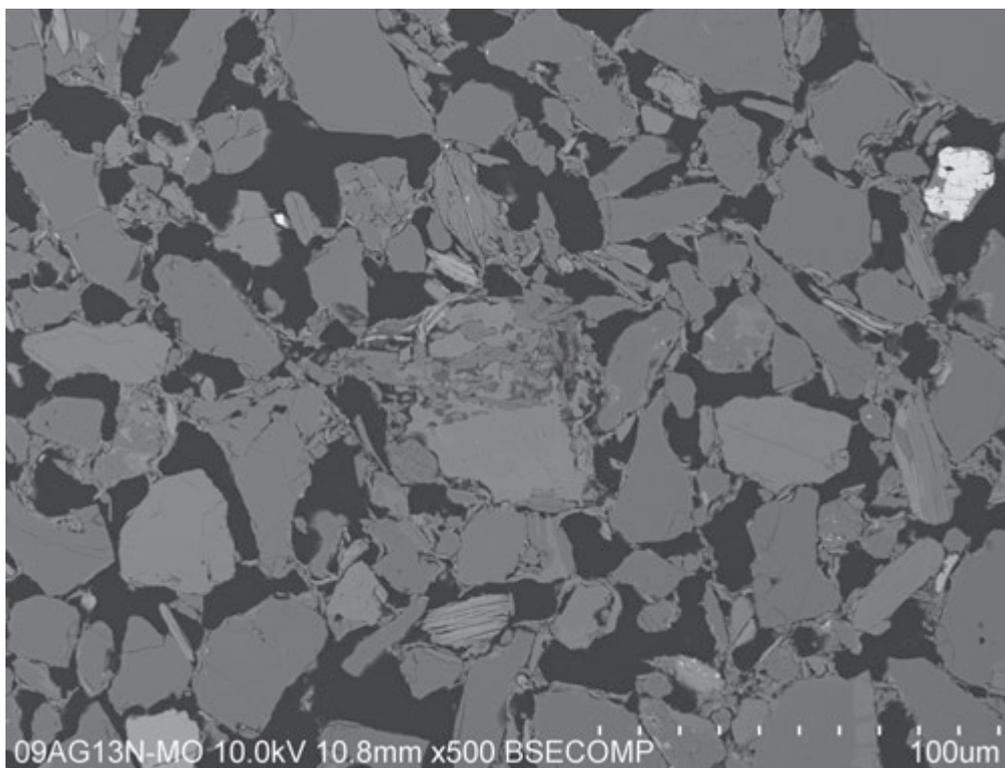


图6 安阳孝民屯出土泥范岩相结构（《故宫文物月刊》第355期 [2012] 48 页图4）

图6 安陽孝民屯出土土製範の岩相構造（『故宮文物月刊』第355期 [2012] 48 頁圖4）

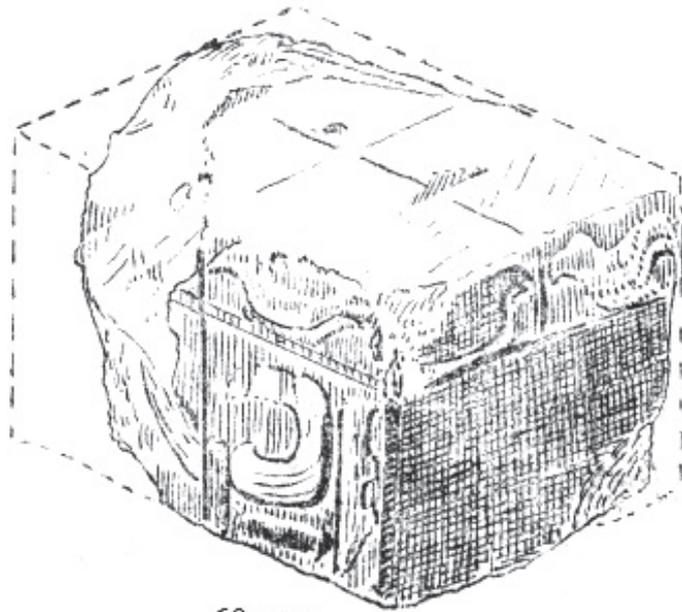


图7 安阳小屯出土泥方彝模 (中央研究院历史语言研究所《六同别录》上册第32页插图11, 1945年)  
 图7 安阳小屯出土方彝土製原型 (中央研究院历史语言研究所『六同别录』上册32頁插图11, 1945年)

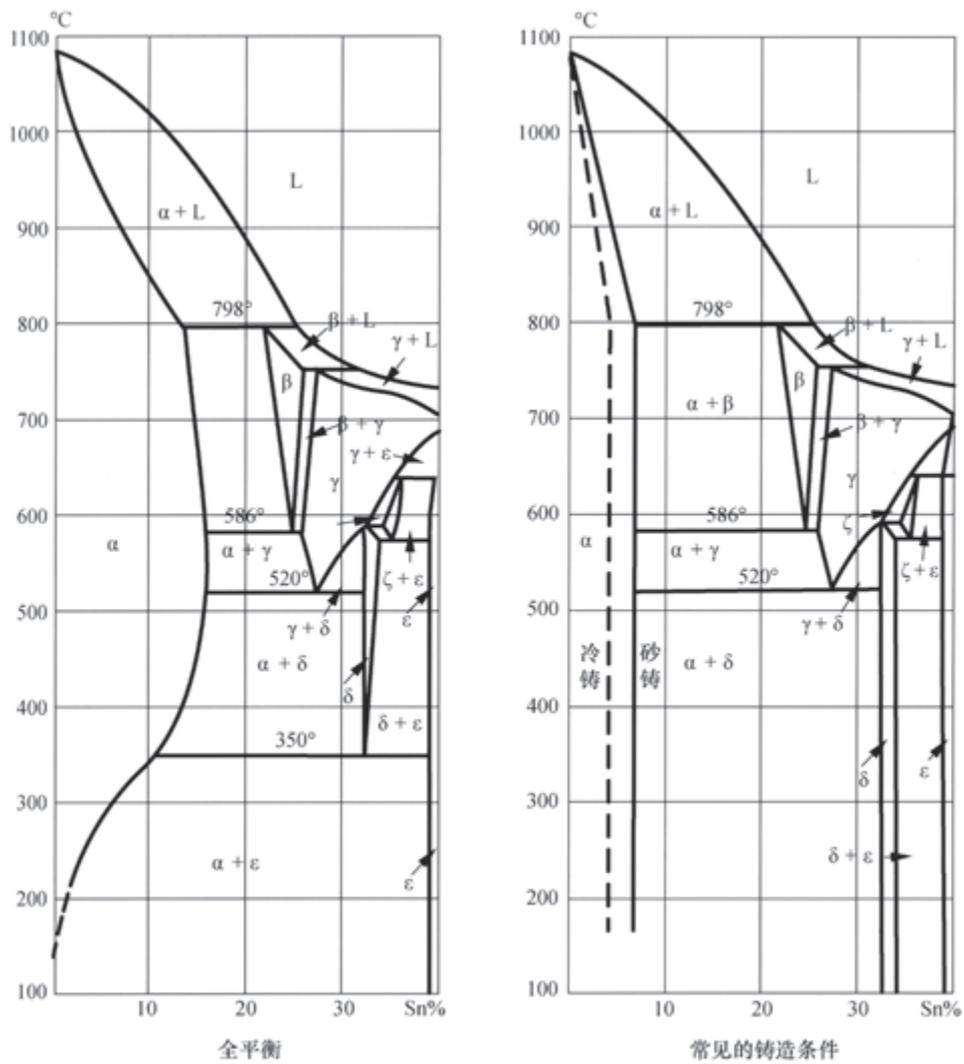


图8 铜-锡平衡态(左)和铸态(右)相图  
 图8 銅-錫平衡狀態圖(左)と鑄造組織狀態圖(右)の比較

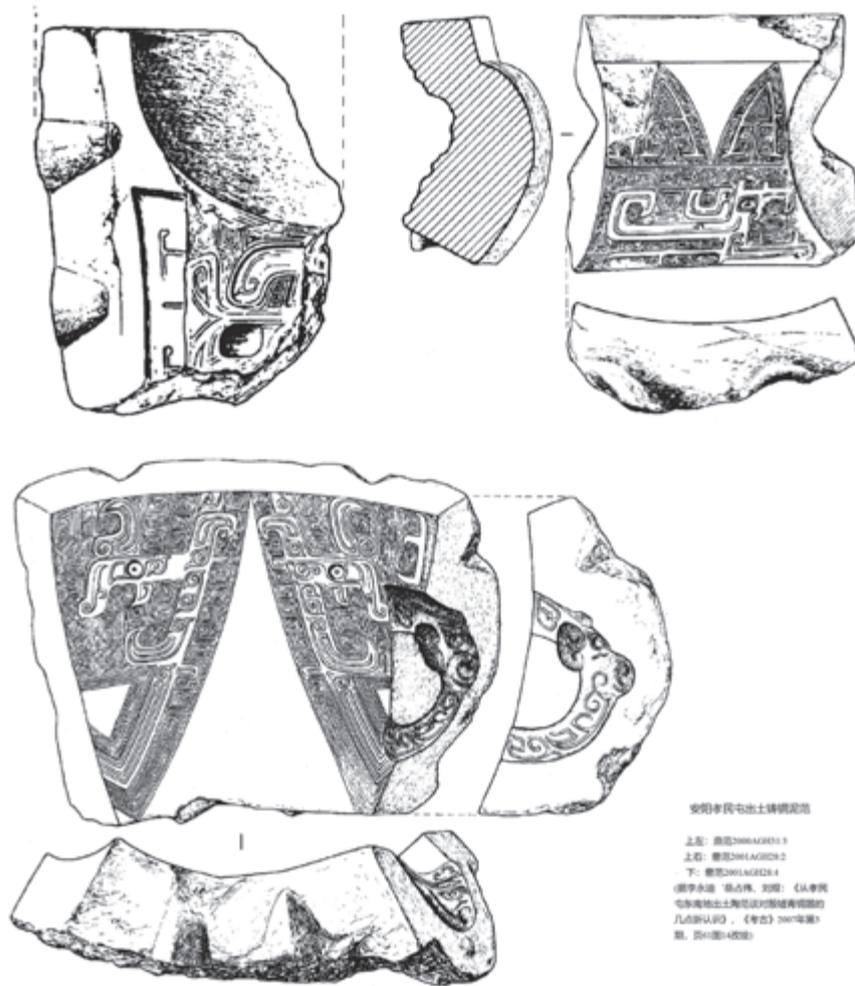


图9 安阳孝民屯出土水平分型范 (《考古》2007年第3期 61页图14改绘, 比例尺不同)  
 图9 安陽孝民屯出土水平分割范 (『考古』2007年第3期 61頁圖14改變 縮尺不同)

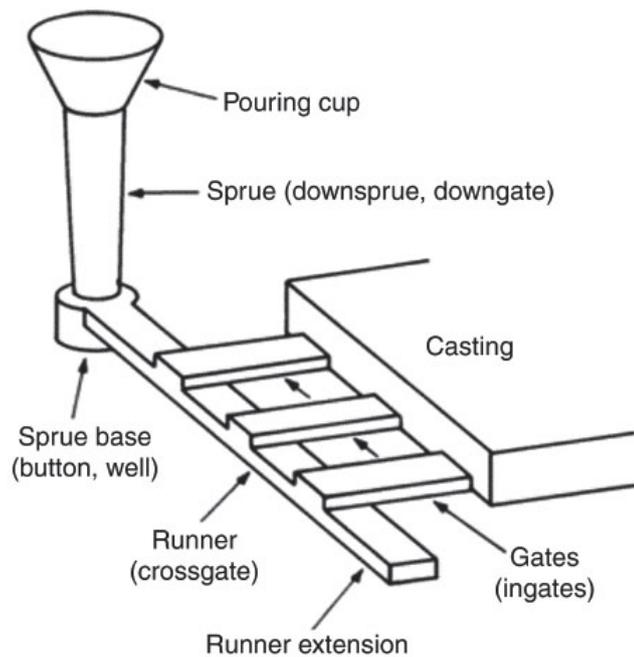


图10 普通浇注系统结构 (Casting Design and Performance, ASM International, 2009, p.73 fig.1)  
 图10 一般的な湯口系統の構造 (Casting Design and Performance, ASM International, 2009, p.73 fig.1)