

金属鑄造と砂型：1.その歴史と最近の進展

永瀬 丈嗣* 柏井 茂雄** 兼吉 高宏***
 浅野 和典**** 北村 一浩*****

1. はじめに

持続可能な開発目標 (SDGs: Sustainable Development Goals) は、地球を救うための行動指針と言われるほど環境問題を解決するために大切な役割を果たすまでになっている。SDGs と金属・鑄造という言葉からは、希少金属元素と限られた資源の分配、金属資源生産における二酸化炭素の排出、資源循環とリサイクル、エネルギー・水・医療衛生などの社会インフラ、など様々な課題を連想できる。金属素形材は、環境というキーワードを抜きには語ることが出来ない時代になっている。

本解説記事のキーワードは、金属素形材の生産に必要な不可欠な「砂」である。金属素形材が SDGs と強い関連があることは言うまでもないが、「砂」が SDGs と関連したものは考えにくい。砂はありふれた物質のようであり、山・川・海(砂浜)にいけば無尽蔵に存在する物質のように思われる。しかし、砂の種類と用途を考えた場合、非常に限られた範囲で採取できる砂しか産業利用できない。図1に、鑄物や砂型プリンターに利用される代表的な砂の写真を示す。(a)砂型プリンターに利用される砂、(b)鑄造に利用される山砂、(c)天然珪砂、(d)人工砂は、形状や粒度分布が大きく異なっていることがわかる。見た目だけではなく、材質や成分にも違いがある。これは、鑄造される金属の種類と求められる特性の違いを反映しているためである。別の言い方をすれば、選び抜かれた砂でなければ、金属素形材の中核生産技術の一つである鑄造に使用される鑄物砂として利用できないということを意味している。鑄物砂に限らず、砂が限られた資

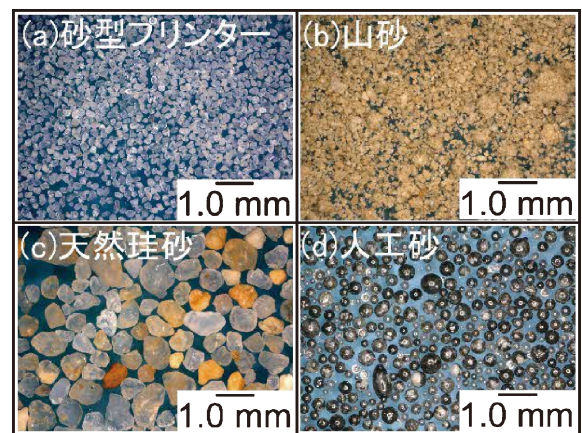


図1 代表的な鑄物砂の写真。(a)砂型プリンターに利用される砂、(b)山砂(大阪・羽曳野)、(c)天然珪砂(島根・大田温泉津)、(d)人工砂。写真データは山川産業株式会社⁽³⁾より提供いただいた。

源であること、その戦略物質としての重要性は、文献⁽¹⁾⁽²⁾に詳細に記載されている。鑄物砂の産地は大きく限られ、鑄物が発達してきた場所は砂の産地と密接に関連してきた。現在では、多くの人工砂が利用されるに至っている。

「砂」は地理に大きく依存する貴重な資源・戦略物質であり、この資源の偏在性が鑄造・鑄鉄の発展とその歴史に大きな影響を与えてきた。本解説記事では、金属鑄造における古代から現代の三次元積層造形技術にいたる歴史と地理との関連性を、「砂」という観点から、(1)砂型の歴史と最近の進展、(2)金属の歴史と地理を学習する砂型実習教材の開発、(3)大学における砂型鑄造実習の現状、の3部からなる解説

* 兵庫県立大学；教授(〒671-2280 姫路市書写2167)

** 公益財団法人 新産業創造研究機構；技術コーディネーター

*** 兵庫県立工業技術センター；部長

**** 近畿大学；教授

***** 愛知教育大学；教授

Metal Casting and Sand Mold: (1) History and Recent Development; Takeshi Nagase*, Shigeo Kashiwai**, Takahiro Kaneyoshi***, Kazunori Asano**** and Kazuhiro Kitamura***** (*University of Hyogo, Himeji. **The New Industry Research Organization (NIRO), Kobe. ***Hyogo Prefectural Institute of Technology, Kobe. ****Kindai University, Higashi-Osaka. *****Aichi University of Education, Kariya)

Keywords: casting, sand mold, history, geography, additive manufacturing, 3D printer

2022年1月6日受理[doi:10.2320/materia.61.340]

記事として、特に兵庫県や大阪府を中心とする関西地区の活動について紹介をする。

2. 鑄造の歴史と鑄型の歴史

鑄造の歴史は鑄型の発展と密接に関連している⁽⁴⁾⁻⁽⁶⁾。表1に、文献(4)を参考とした鑄造の歴史と鑄型の歴史の対応表を示す。古代文明発祥の国々では、銅器・青銅器時代を経て鉄器時代へと金属文化が進み、石器、青銅器、鉄器と時代が明確に区分される。一方、我が国では、中国大陸から朝鮮半島へ伝播した青銅器・鉄器およびその製造技術が、弥生時代に日本へ渡来したため、この2種の金属である銅と鉄がほぼ同時に使用され始めた⁽⁷⁾。鉄に関して注目すると、我が国では古代から近世にかけて、砂鉄や鉄鉱石を粘土製の炉で木炭を用いて比較的低温で還元し純度の高い鉄を生産する「たたら製鉄」が発展した。たたら製鉄と言えば、日本刀の原料になる玉鋼のような純度の高い鉄である「ケラ・鋳」の生産を思い浮かべる場合も多いが、銑鉄・鑄鉄にあたる「ブク・銑」の生産も主流であったとも言える。明治維新を経て、明治時代後半から工業用鑄鉄鑄物の生産が本格化した。

戦後、鑄鉄としては強度・韌性に優れた球状黒鉛鑄鉄が普及するとともに、鉄や銅だけではなくアルミニウム鑄物やマグネシウム鑄物の生産が本格化した。近年では、三次元積層造形法の実用化が進むに至っている。金属素形材の基礎的生産技術である鑄造は、何千年にもわたる歴史を持っており、鑄造の歴史は人類の金属使用の歴史そのものであると言える。表1より、鑄造法・鑄造に用いられる金属元素・鑄造で生産された製品の移り変わりとともに、鑄型も連動して変化していることが分かる。別の言い方をすれば、鑄造の歴史は鑄型の歴史であり、鑄型の歴史は鑄造の歴史であると言える。鑄型の歴史の中心として「砂」の存在がある。鑄型への砂の利用の開始、鑄物砂の発展、そして砂型プリンターへと至る歴史と地理の関係を、次節で解説する。

3. 砂型の誕生と歴史

鑄造を鑄型・粉体工学からみた視点で解説した文献(4)を参照すれば、鑄型は、①石型、②土型、③砂型と金型、と発展してきたとされている。図2は、鑄型の歴史として、③砂型と金型の発展形であるAM(Additive Manufacturing、④

表1 鑄造の歴史と鑄型の歴史の対応。文献(4)を引用改変。

年代	代表的な鑄物	材質	鑄型	備考	対応する図
前300				(中国大陸から朝鮮半島をへて、青銅器・鉄器が伝来)	
前300~200	銅鐸、銅矛など	Cu	石、土	大阪・茨木、大阪・寝屋川、兵庫・姫路、兵庫・赤穂、福岡・春日、熊本・熊本など	↑ 図3 ↓
600~700	飛鳥大仏、奈良大仏	Cu	土	奈良・飛鳥、奈良・奈良	
700	貨幣	Cu	土	和同開珎(その後、皇朝12銭)ただし流通には至らず。	
	梵鐘	Cu	土	奈良東大寺鐘	
900	銅、釜 (鑄物師が各地に分散)	Fe	土	大阪・南河内、栃木・佐野、埼玉・川口など	↑ 図4 図5 ↓
	鏡	Cu	土、砂	平安時代に化粧道具として貴族社会へ普及(和鏡)。	
1600	茶釜、灯籠	Fe	砂	福岡・芦屋、栃木・佐野、京都・京都、岩手・盛岡など	
1900				(強度を必要とする工業用鑄鉄鑄物の製造開始)	↑ 図2 ↓
	大砲	Fe	砂	青銅製→鑄鉄製→鑄鋼製→鍛鋼製 大阪・大阪(大阪砲兵工廠)	
	鑄鉄部材	Fe	砂、金型	水道管、マンホール	
1950年以降				(球状黒鉛鑄鉄の発明と日本での普及)	
	自動車部品、その他	Fe, Cu, Al, Mg	砂、金型	2020年銑鉄鑄物生産量: 1.愛知県、2.島根県、3.福島県	
	その他	Al, Mg	砂、金型	ホイール(Alダイカスト)、 パソコン躯体(Mgダイカスト)	
2000年以降				(人工砂の発明と実用化)	
	金属積層造形法		鑄型レス		
	砂型積層造形法		砂	公設試験場として 兵庫県・秋田県・三重県が保有	↑ 図6,7 ↓

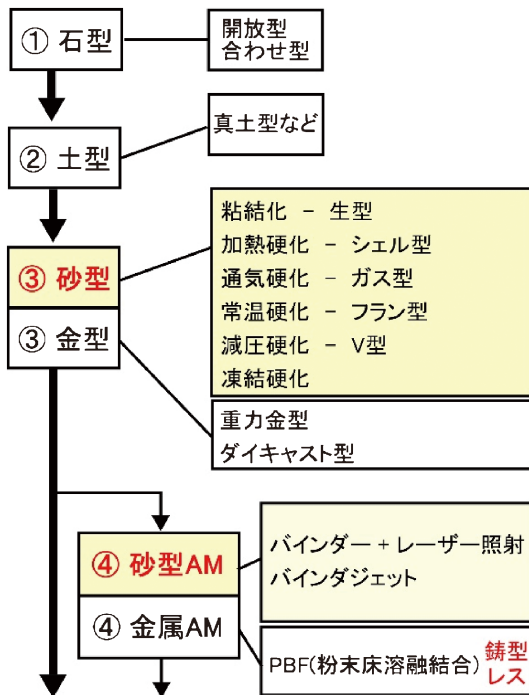


図2 鋳型の移り変わり. 文献(4)を引用改変.

金属直接積層造形と砂型プリンター)を加えた図である.

我が国に鋳造技術が入ってきたのは弥生時代である. 弥生時代前期にも青銅器の出土は認められるものの, これらの事例は舶載品を再加工したものであり, 日本列島における青銅器鋳造を示すものではない. この時代における確実な鋳造に関連する遺物の出土は弥生時代「中期」になる. 鋳造技術が最初に入ってきたのは北部九州であり, 北部九州からの伝播として関西にその技術がもたらされたと考えられる. これらの時代の鋳造関連遺物が出土した代表的な遺跡としては, 熊本県熊本市・八ノ坪遺跡⁽⁸⁾⁽⁹⁾, 福岡県春日市・須玖タカウタ遺跡⁽¹⁰⁾, 兵庫県姫路市・名古山遺跡⁽¹¹⁾, 兵庫県赤穂市・上高野遺跡⁽¹²⁾⁽¹³⁾, 大阪府茨木市・東奈良遺跡⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾, 奈良県磯城郡田原本町・唐古・鍵遺跡⁽¹⁶⁾, 大阪府寝屋川市・楠遺跡⁽¹⁷⁾などがある. 図3は, これら砂型・土型に関する遺跡の場所を示した地図である. 九州では弥生時代を通じて非常に数多くの石型が出土することから, 九州では基本的には石製鋳型の使用が主流であったと考えられている. 一方, 関西では, 当初は石型の使用が主流だったが, 弥生時代中期後半段階では一部の青銅器に土型の利用が始まり, 弥生時代中期末～後期初頭には, 土製鋳型外枠のなかに真土(まね)(現在において金属工芸・鋳金などの分野で利用されている真土とは異なるもの)を詰めて鋳型とする技術が登場しこの鋳型が主流になっていくという違いがみられる. 弥生時代の次の時代である古墳時代では, 青銅器鋳造に関連する遺物がほとんど見つかっていないが, 仿製三角縁神獣鏡などの青銅鏡をはじめ, 各種青銅器の多くは土型で製作されたと考えられる. 弥生時代・古墳時代における鋳造の全体像は明らかとはなっていないが, 石型から土型の移行は単純ではなく, 当初は石



図3 古代日本における石型, 土型に関する代表的な遺跡. 文献(4)-(6)を引用改変.

型・土型ともに存在するものの石型が主であったのが, 古墳時代までに地域差を持ちながら土型が主となっていくというイメージを想像することができる. 土型への転換という意味では, 関西は九州と比べて「先進的」とも考えられる. 600年代ごろの飛鳥大仏(奈良県)の製造では, 土型が利用されている⁽⁴⁾.

石型では大きな製品や複雑な製品は, 鋳造しにくい. さらに, 石型では, 凝固に伴う金属の収縮に対応することが出来ない. このため, 石型から土型, さらに砂型へと鋳型は進化した. 砂型は, 江戸時代末期から明治時代にかけて日本古来の手法として発展し, 明治維新以降は欧米の技術を導入しながら発展してきた⁽²⁾⁻⁽⁴⁾. 現在では砂型プリンターが開発されるにいたる, 現在も発展しつつある分野である. 砂型に利用される鋳物砂は, すべて砂というわけではなく, 一般に「砂」と「粘土」と「水」を適度に混合したものである. 鋳物砂と砂型には, (1)造形性, (2)流動性, (3)通気性, (4)強度, (5)耐熱性, (6)再利用特性, (7)均一性, (8)崩壊性, など多くの特性が必要とされる. 流動性が良く, かつ室温において造形性に優れ, 造形後は鋳型が鋳造時の熱衝撃に耐えかつ変形しないような強度を持ちつつも発生するガスに対処するため通気性にすぐれ, 鋳物を取り出す際には型ばらしが容易であるだけでなく作業環境の点から発生する粉塵が少ないものでなくてはならない. さらに, 再利用が可能であるかも極めて重要な因子となる. これらの条件を満足するためには, 砂の材質だけでなくその粒度, 砂と粘土の比率などが重要となる. したがって, 鋳物砂として利用可能な砂は, 海砂や川砂では満足することができず, ごく一部の限られた地域において産出される山砂でしか対応できない. 様々な特性を満足する必要があるという大きな制約, さらに砂は重量物であり輸送インフラの整っていない時代では輸送が大

変に困難であるという成約から、金属鑄造は、山砂が産出される地域で発達してきたことは自然であると考えられる。砂型に利用される鑄物砂は「砂」と「粘土」と「水」を適度に混合したものであるので、資源的制約が大きい山砂だけではなく、「砂」と結合材である「粘土」を混ぜ合わせることで鑄物に適した砂を得る技術が発達した。このような混練での造形に適した鑄物砂に利用される天然砂の原料としては、「天然珪砂」が利用される。図4に、山砂および天然珪砂の

産地として報告されている地名を示す⁽⁷⁾。図5に、日本各地における鑄物業発祥と伝わる地名と年代⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾を示す。早い年代では、大阪・河内(700頃)、栃木・佐野(781)、埼玉・川口(940)、奈良・香芝下田(1000頃)、山形(1051)、兵庫・姫路野里(1130頃)、などが見られる。図4より、山砂や天然珪砂の産地と、現代でも鑄造が盛んな地域に相関関係があることが分かる。図4と図5より、古代から鑄造が盛んであった地域が、現在でも鑄造が盛んである傾向が分かる。これらの傾向は、良質な山砂や天然珪砂が取れる地域で鑄造が発達し、その伝統を引き継いで現在まで鑄造がその地域を支える主力産業として活躍している、と理解することが出来る。我が国における鑄造の歴史は、鑄型の歴史であり、さらに砂の地域偏在性と関連した地理と歴史と密接に関連がある。我が国において、「鑄鉄・鑄造」と「鋼・鍛冶」が発達してきた場所が異なる特徴を持つことの要因として「砂」の地理的偏在性も大きな要因となっていることは、文献⁽²⁰⁾の歴史地理学的研究の立場から検証された文献においても指摘されている。

現在では、人工砂が開発・実用化されている。人工砂とは、耐火度に優れた砂を配合して、そして天然の砂の欠点である砂粒の不規則な形を球状にしたものである。図1に示すように、人工砂は球状で流動性がよい。人工砂は耐火度が高く、熱伝導が良く、各種鑄型製造プロセスへの応用が可能である。さらに、人工砂で作製された砂型は「型落ち」や「すくわれ」などの鑄型の欠陥が少なく、産業廃棄物がほとんどでないなどのメリットがある。型ばらし時に発生する粉塵が極度に少ないことから、鑄物工場での作業環境の劇的な改善をもたらしたことも特筆すべき点である。我が国の鑄造、そして自動車・重工業・建築・水道などの社会インフラの発展の一端を、「鑄物砂」の発展が担ってきたとも言える。

4. 砂型プリンターへ

砂は戦略物質・重要資源であり、古来においては山砂や天然珪砂が利用できる地域が必然的に鑄物の産地が形成される重要条件であった。輸送インフラの発達や人工砂の開発に伴い、砂の産地は大きく広がるとともに鑄物の産地も日本全国へと広がった。金属鑄造の歴史は、金属そのものだけではなく、鑄型発展の歴史と砂の地理的制約にも大きく依存してきたと言える。

この砂と鑄型との歴史に近年新しい展開が訪れようとしている。これまで必要としてきた木型等の模型が不要で直接造形を行う砂型三次元積層造形(砂型3Dプリンター)である。三次元積層造形法は、三次元データを基に断面形状データ(スライスデータ)を計算し、スライスデータを造形、積層することにより三次元形状を具現化する方法である。図6に砂型3Dプリンターおよび砂型の例⁽¹⁹⁾を示す。

砂型3Dプリンターでは、バインダーをレーザー照射して溶融させる方法と直接バインダーを噴射する方式(バインダージェット方式)が存在するが、いずれも砂そのものを結合

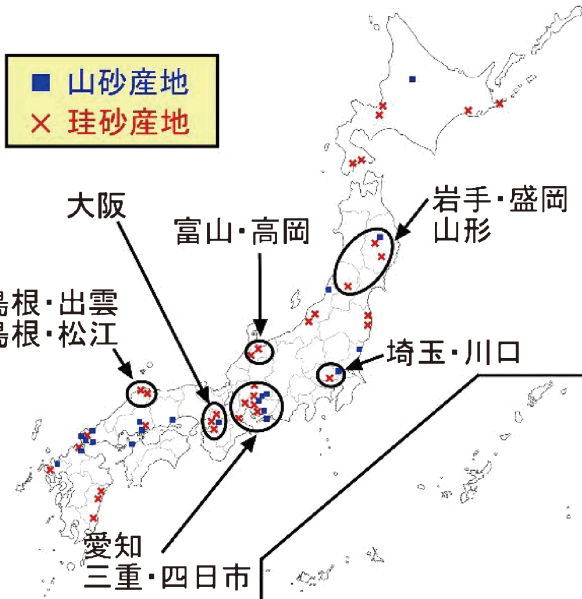


図4 山砂と天然珪砂の産地。文献(7)を引用改変。現代でも鑄造が盛んな地域との対応関係がある。

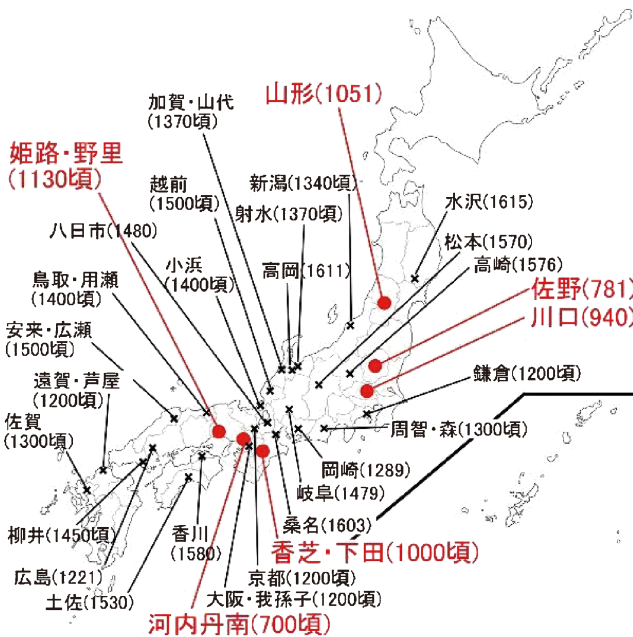


図5 鑄物業発祥の年代。文献(18)(19)を引用改変。早い年代では、大阪・河内(700頃)、栃木・佐野(781)、埼玉・川口(940)、奈良・香芝下田(1000頃)、山形(1051)、兵庫・姫路野里(1130頃)、などが見られる。

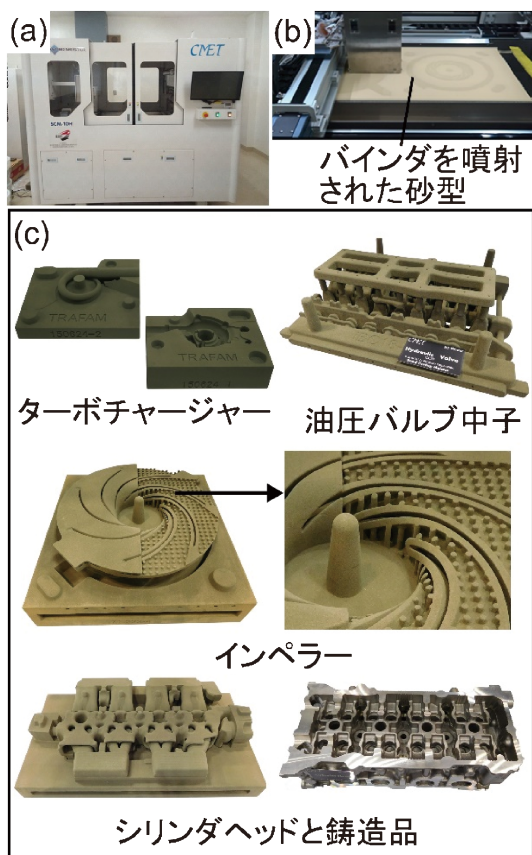


図6 兵庫県立工業技術センターに設置されている砂型プリンターと造形体の例。文献(21)を引用改変。(a)国産砂型積層造形装置砂型プリンターSCM-10H, (b)砂型プリンターの内部, (c)造形した砂型の一例。

させて形作るのではなく、バインダー(樹脂などの有機バインダー、あるいは無機バインダー)により砂を結合させる方法で砂型の造形を行う。これは、従来の砂とバインダーを混練して型取りすることによる方法と基本的には同じ方式であるため、3Dプリンターで造形した砂型は従来法で作製した砂型とほとんど同じものであると言える。

砂型3Dプリンターを使うことのメリットとしては、(1)木型等の模型が不要で直接砂型を造形できる、(2)木型等からの抜け勾配が不要となり、形状制限があまり無い、(3)型の割り面や分割等に制限がなく、自由度の高い方案が可能、等が挙げられる。一方で3Dプリンターも万能ではなく、デメリットとして、(1)現状では高価(造形サイズによるが、数千円～数億円)な装置が必要、(2)粒度の均一性や特殊加工が必要な砂材料を使うため、材料も高価となる、(3)原理上、硬化した部分と未硬化部分が混在し、境界の不鮮明さが発生するとともに、未硬化砂の除去が必要となる、(4)積層造形の原理上、局面等において階段状の積層痕が生じる、(5)3Dプリンターを活かす砂型設計、デジタルデータ技術が必須、等が挙げられる。特に、デメリットの(5)にある砂型設計やデジタルデータ技術については、3Dプリンターを活用するために非常に重要となってくる。なお、デジタルデータは、3Dプリンターに利用するだけでなく、铸造シミュ

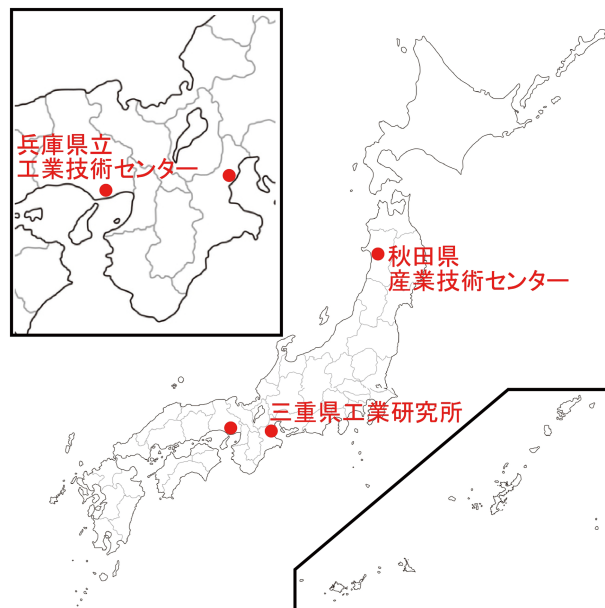


図7 砂型プリンターが設置されている公設試験研究機関。

レーション等のComputer Aided Engineering(CAE)技術にも活用できるため、設計・解析・製造の各プロセスで利用でき、これからのデジタルトランスフォーメーション(DX)に欠かすことができないものとなっていくのは間違いなく、砂型プリンターはDXと結びついてさらに発展していくと考えられる。

上述のように、3Dプリンターにもメリット・デメリットがあり、従来砂型製造法と3Dプリンター造形法それぞれのメリットを活かした利用方法が存在するため、砂型3Dプリンターが従来の砂型製造に完全に取って代わることはないと思われるが、従来技術との連携や新たな製造技術として活用されることは間違いなく考えられる。そのため、铸造業界において砂型3Dプリンターやデジタルデータの活用技術を習得していくことが非常に重要となってくる。現在、国内の公設試験研究機関等に砂型3Dプリンターが導入されている(図7)。公設試験研究機関では、セミナーや機器利用等の技術支援が行われているので、活用をお勧めする。

5. 終わりに

金属铸造の歴史は、金属だけではなく砂にも大きく支配されてきた。このような背景は、たたら製鉄の歴史(鋼:ケラを原料とする鋼の歴史)(銑鉄・铸件:ズクを原料とする銑鉄・铸件の歴史)、明治期における鉄鋼・铸件産業の発展(鋼:世界遺産・明治日本の産業革命遺産 製鉄・製鋼, 造船, 石炭産業⁽²²⁾)(铸件:鉄鋼と同じく集成館からはじまり、大阪砲兵工廠へと続く歴史⁽²³⁾)において、鉄鋼と铸件が異なる道を歩んできた歴史とも深く関連している。金属铸造は、「砂」に関連した、地域の地理と歴史に深く関連した金属素形材生産の中核技術であり、最近では三次元積層造形技

