高炉操業における粉粒体の制御技術

清水 正 賢*
Masakata SHIMIZU

1. はじめに

製鉄所のシンボルとも言える高炉(溶鉱炉)は、高温の還元ガスによって鉄鉱石を還元し、熔融して銑鉄を造り出す反応器である。14世紀にドイツで開発された高炉製鉄法は、1735年にイギリスのダービー父子がコークスを燃料とする製鉄法を確立して以来急速な発展を遂げてきた。とりわけ、近年における高炉製鉄技術の進歩と規模の拡大は日本で著しく、過去20年の間に高炉内容積で5倍、単基出鉄量では10倍となり、かつての日産千トンの高炉に代る1万トン高炉(内容積5000 m³)の出現をみるに至っている。こうした日本における超大型高炉の誕生は、生産量の拡大という経済的な諸施策だけでなく、製鉄工程全般に亘る著しい技術革新に導かれてきたことは言うまでもない。製鉄工程を概観すれば、その90%が粉粒体の処理作業で占められており、多くの研究や技術開発は、原料の事前処理やハンドリング技術の改善に向けられてきた。高炉操業の中で、粉粒体制御技術が、いまだ完全に確立されたものとは言い難いが、ここでは1日に2万トンにも及ぶ鉱石とコークスを取り扱う高炉プロセスを紹介し、そこでの粉粒体制御技術と、炉内での装入物の挙動について概説する。

2. 高炉法による銑鉄の製造

鉄鉱石から銑鉄(粗鋼)を造る基本プロセスは、鉄鉱

石中の酸化鉄から酸素を取り除く還元過程と、還元された鉄鉱石中の鉄分を他の不要成分(鉱石中に含まれるSiO₂やAl₂O₃など)から分離する熔融過程から成っている。この還元-熔融という鉄製錬のプロセスは、基本的には今も昔も変りないが、高炉という大量生産設備で行なうようになったのは、14世紀に還元剤と熱源として木炭を使う溶鉱炉が発明されてからである。高炉法の特徴は、鉱石の還元-熔融プロセスを同じ炉の中で連続して行なうところにあり、他の代替を許さないその熱効率の高さが、高炉の反応器としての優位性を今なお維持している最大の理由である。現在、世界の銑鉄の大部分は高炉でコークスを使って製造されており、少量の特殊な銑鉄だけが木炭高炉や電気炉で造られている。

鉄を造るには主原料である鉄鉱石の他に、熱源、還元剤としてのコークスや重油、また溶剤として石灰石や少量のマンガング石などが使用される。これら装入原料は、炉内での反応効率や熔融特性を高めるために、原料工場ですべてに成分調整や粒度調整が行なわれ、厳しい物理・化学性状の管理のもとに高炉へ送られている。製鉄所における銑鉄製造工程は、その多くが粉粒体の処理作業で占められており、その規模は製鉄所の総面積の1/3にも及んでいる。製鉄工程を大別すると、(1)原料の事前処理工程と(2)高炉での還元-熔融工程の二つに分けられ、事前処理工程は、鉄鉱石の塊成化部門とコークス製造部門から構成されている。

(1) 原料の事前処理

鉄鉱石には多くの種類があるが、一般には赤鉄鉱(Fe₂O₃)、磁鉄鉱(Fe₃O₄)、褐鉄鉱(Fe₂O₃・3H₂O)などが使用されている。鉄鉱石に求められる望ましい条件は、(1)鉄分が豊富であること、(2)還元が容易であること、(3)硫黄、燐、銅などの有害成分が少ないこと、(4)粒度が適当であることである。しかし、このような理想的な鉱石は少なく、産地や銘柄により鉄分含有量

昭和61年1月22日受付

* (株)神戸製鋼所鉄鋼技術センター製鉄研究室
(〒651神戸市中央区脇浜町1丁目3)
TEL. 078-251-1551内2597

(著者紹介)

昭和46年、新潟大学工学部化学工学科卒

昭和46年、株神戸製鋼所に入社

入社以来「技術開発本部鉄鋼技術センター製鉄研究室」に所属、高炉操業に関する研究に従事、現在主任研究員に至る。

や形状等が異なり、そのまま高炉に装入することはできない。高炉を効率的に操業するために、各種鉱石を混ぜ合わせて品質を均一化したり、一定粒度に焼き固めるなどの塊成化処理が施されている。塊成化された鉱石原料のうち、不定形のを焼結鉱、球状に成型したものをペレットと呼んでいる。

コークスは高炉内で鉄鉱石や石灰石などを溶解する熱源であると同時に、鉄鉱石の還元剤として不可欠なものであり、さらに炉内のガス通気性を確保するという重要な役割を担っている。高炉用コークスとして具備すべき条件は、(1)強度に優れていること、(2)粒度が適正な大きさに揃っていること、(3)灰分等の不純物が少ないことである。このような性質を備えるコークスを造るには、原料として粘結性に富む強粘結炭を選ぶ必要があり、弱粘結炭の多いわが国では、海外から大量の強粘結炭を輸入し、国内炭と混合して使用している。コークスは石炭を 1000～1300℃ の高温で数時間蒸し焼きにして造られるが、品質の揃った高強度のコークスを製造するには、破碎、整粒、乾燥作業やコークス炉への石炭の充填方法など、高度な粉粒体の処理技術が要求される。

(2) 高炉炉内プロセス

高炉内での鉄鉱石の還元-溶融プロセスを図1に模式的に示す。鉱石原料とコークスは原料装入用ベルトコンベアで炉頂に運ばれ、炉の頂部から炉内へ装入される。装入された原料が一定量降下すると次の原料が自動的に装入される。通常の高炉操業では、鉄鉱石とコークスが交互に装入され、炉内では鉱石層とコーク

ス層が交互層状構造をなして堆積している。炉内温度は炉口部で 100～200℃、下部へ向うにしたがって高温となり、燃焼帯と呼ばれる羽口近傍は約 2300℃ の高温域となっている。羽口からは約 1000～1300℃ の空気が吹き込まれ、羽口前のコークスを燃焼して CO ガス(還元ガス)に変える。炉頂から装入された鉄鉱石は、燃焼帯で生成した高温の CO ガスによって加熱、還元されながら降下し、1200～1400℃ の温度域で軟化溶融する。軟化した鉄鉱石は上部からの粉体圧によって相互に融着し、その後銑鉄とスラグ(鉄以外の不要成分)に溶融分離して滴下帯と呼ばれる赤熱コークス層中を炉床部へ流下していく。鉱石が軟化融着する領域を「軟化融着帯」と呼び、炉内で最も圧力損失の大きい場所となっている。この領域では、上昇するガスは融着層を突き抜けることができないため、融着層に挟まれたコークス層中を炉軸側から炉壁側に向って流れ出ることになり、コークス層が上昇ガスのスパーサーとして重要な役割を果たしている。炉床部へ流下した溶銑とスラグは比重分離して溜り、一定時間毎に出銑口から排出されて次工程へ運ばれる。

近年、高炉操業は反応効率を高めるための高圧化や羽口からの補助燃料(重油や微粉炭)吹き込みなどの技術革新により、単位容積当りの出銑量が大幅に増大した。炉床平均径 12m、内容積 5000m³ にも及ぶ大型高炉には、1日に約 16000トンの鉄鉱石と 5000トンのコークスが装入され、羽口から毎分 7000m³ の高温空気が吹き込まれている。この場合、炉内では約 800mm / 時もの豪雨に相当する溶銑が炉床部へ降り注いでいることになり、その情景は想像を絶すると言えよう。製鉄所の生産効率を律する高炉操業において最も重要なことは、トラブルの無い安定した操業を維持し、予定した日々の生産量を確実に確保することである。

高炉は基本的に気・固・液三相からなる向流移動層型反応器である。その安定性や能率を高めるには、炉内でのガス流分布の適正化が最も重要であることは言うまでもない。その手段として、堆積層の通気抵抗分布制御が高炉操業の鍵とされてきたのは当然と言える。高炉成績の 90% は装入物分布制御で決まるという共通した認識から、炉内への原料の装入方法^{1)~10)}や堆積層の降下運動^{11)~13)}に関する研究が精力的に行なわれてきた。

ここでは、製鉄工程における多種多様な粉粒体処理技術の中でも、5～100mm の比較的大きな粒子を対象とする高炉の装入物分布制御技術並びに炉内での装入物の降下挙動について以下に述べる。

図1 高炉内の状況

3. 高炉内への原料装入

3.1 炉頂装入装置

高炉の原料装入装置には、図2-(a)に示すベル・アーマー方式と(b)に示すベルレス方式(旋回シュート方式)の二種類がある。ベル・アーマー方式はベルの下降によって原料を装入し、反撓板(アーマープレート)に当てて落下位置を制御する機構である。この装置は円周方向での堆積量や粒度偏析を防ぐため、通常2～3段のベルから構成されており、炉頂部に旋回ホッパーを設けている高炉も多い。一方、ベルレス方式は旋回シュートから原料が装入され、シュートの回転速度や傾動角を変えることによって径方向分布を広範に制御することが可能である。ベルレス式は機構が複雑であるが、その制御性^{14, 15)}の良さから、最近では本装置を採用する高炉が増加しつつある。

3.2 装入物分布制御

高炉内へは鉱石とコークスが交互に炉周辺部から装入されるため、図3に示すような炉中心部で低く周辺部で高い堆積形状を示す。熱効率や反応効率を高めるには、理想的には両者を水平に充填し、均一なガス流分布を得ることが望ましいが、炉口径10mの炉内へ粒度分布や安息角の異なる鉱石とコークスを、水平でか

図2 高炉の原料装入装置

図3 鉱石とコークスの堆積状況

図4 最適な炉頂ガス温度分布

表1 一般的な高炉装入物の物理性状³⁾

	嵩密度 [kg/m ³]	空隙率 ε[-]	平均粒度 D _p [μm]	形状係数 φ[-]	通気抵抗 F ^{*1)} [l/m]	安息角 [deg]
コークス	525	0.51	50	0.63	205	35
焼結鉱	1,660	0.45	18	0.67	876	33
ペレット	2,150	0.41	12	0.85	1,469	26

* 1) $F = (\Delta P/h) g_c / \rho u^2 = 1.75(1-\epsilon)/(\phi D_p \cdot \epsilon^3)$
 ΔP : 圧力損失(kgw/m²), u : 空塔ガス流速(m/s),
 ρ : ガス密度(kg/m³), h : 層高[m], g_c : 重力換算係数
(kg·m/kgw·s²)

つ均一に充填することは非常に困難であり、万一粒度偏析等によってガス流分布が乱れた場合には、炉内の軸対称性が崩れ、操業上のトラブルが発生して炉況不調に陥いる。現在最適とされている高炉安定操業法は、炉中心部の狭い範囲で局所的にガス流を強化させる

「中心流操業」であり、図4に示すような炉頂ガス温度分布を得るべく様々な装入物分布制御が行なわれている。しかし、表1に示すような物理性状の異なる装入物を周辺部から装入した場合、図3のように安息角の小さい鉱石は炉の中心側に、コークスは周辺側に多く堆積し、図4のようなガス温度分布は得られない。中心ガス流分布を得るには、中心領域の通気抵抗を低く抑える必要があり、その制御手段として、装入面高さ(装入線)²⁾や装入量⁸⁾、アーマープレート設定位置⁷⁾などを操作因子とする高炉特有の装入物分布制御が行なわれている。

(1) 粒度分布の制御

図5に示すように、ベルから装入された原料は炉壁方向へ放物線状に落下するため、炉内の堆積層表面位置(装入線)によって径方向の粒度分布が大きく異なる。装入線をHに設定した場合には、炉壁部に大塊が、中心部には中塊が堆積し周辺ガス流が発達する。一方、装入線をLに設定した場合には、炉壁部に細粒が、中心部に大塊が堆積し中心側のガス流が発達する。周辺部のガス流が著しく発達した場合には、ガス利用率の悪化や炉壁熱損失が増大し、生産性を高めることはで

図5 装入線レベルと炉内分布との関係

きない。また、中心流過多の場合には、周辺部が不活性化して炉壁付着物が生成し、装入物の降下が不安定になる。

(2) O/C(鉱石量/コークス量)分布の制御

通常、鉱石とコークスはある一定比率で装入されるが、この比率が一定であっても1チャージ当りの装入量によって径方向のO/C分布が変化する。図6は装入量と層厚分布の関係²⁾を図示したものである。鉱石とコークスは安息角が異なるため、径方向でのO/C分布は装入量に依存して変り、装入量を減少させると中心側のO/Cが増大する。したがって、装入量によってO/C分布を制御するには、前もって鉱石とコークスの安息角(炉内堆積傾斜角)を正確に把握しておく必要があり、実物大模型⁸⁾や縮小模型⁴⁾を用いた堆積傾斜角の調査が盛んに行なわれた。本来、傾斜角は粒子の形状や粒度分布、密度、付着力、装入装置が変らなければ一定値を示すと考えられてきたが、実物大模型での調査⁸⁾は、傾斜角そのものも装入量によって変化するという注目すべき結果(図7)をもたらした。傾斜角が装入量によって変化するという現象は、装入時における堆積層の「ひずみ速度効果」¹⁶⁾に原因すると考察され、装入物の球形度(ペレット配合率)が高い程顕著になる。1チャージ当り50～100トンにも及ぶ原料を数秒の間に一気に装入する高炉操業では、こうし

図6 装入量と層厚分布との関係

図7 鉱石層表面の傾斜角に及ぼす装入量とペレット配合率の影響(H:平均堆積層厚、R:炉口半径、O ↓:全量装入、O ↓ O ↓:2分割装入)

た傾斜角の変化をも考慮したO/C分布の制御が行なわれている。

(3) 局所的なO/Cの制御

炉周辺部のO/C値は、主として鉱石やコークスに対するアーマープレートの設定位置によって調整される。一方、操業上最適とされる図4のような炉頂温度分布を得るためには、中心部の限られた領域に多量のコークスを堆積させ、O/C値を局所的に低く抑える必要がある。鉱石とコークスの静力学的な安息角の関係に立てば、このようなO/C分布を得ることは不可能である。しかし、現実には多くの高炉で局所的に発達した中心ガス流を確保していることから、西尾ら¹⁷⁾は堆積挙動に及ぼすガス流れの影響を調査し、鉱石装入時には中心部のコークスが流動化して盛り上がり、中心部への鉱石の侵入を妨げるという特異現象を見出した。図8はガス流存在下での堆積挙動を模式的に示したものである。コークス層上に通気抵抗の高い鉱石を装入するとガス流れが一時的に中心側へ偏流し、中心近傍のコークスが流動化(もしくは層膨張)して鉱石の中心部への侵入を妨げ、中心部にコークスの単味層が形成される。図9¹⁸⁾は、堆積状態に及ぼす炉口ガ

図8 ガス流存在下での鉱石の堆積挙動

図9 装入物分布に及ぼす炉口ガス流速(U_t)の影響
(白色部：ペレット(P)又は焼結鉱(S)，黒色部：コークス(C))

ス流速の影響を示しており、ガス流速が0.8 m/s以上になると中心部にコークス単味層が形成され、流速の増大とともに拡大していることがわかる。この結果は、高炉での装入物分布制御が単に装入物の安息角といった粉体力学的な物性値だけでなく、鉱石の通気抵抗やコークスの流動化開始速度といった流体力学的な物性値に基づいて為されなければならないことを提示したものであり、特に中心部のO/C制御に対し極めて重要な知見をもたらした。

4. 高炉内での装入物の降下挙動

高炉内のガス流れを支配するもう一つの要因として、降下時における堆積層の充填構造変化が上げられる。特に高炉はその炉体形状に特徴があり、水平断面が高さ方向で一定ではない。このような炉内を降下する堆積層は断面積の変化に応じて充填構造(粒子配列)や降下速度が変化する。また、炉壁部でのコークスと鉱石の混合化現象^{11, 19, 20)}など、降下に伴う堆積層の通気抵抗変化を無視することはできない。ここでは、高炉

図10 高炉内における固体の流線と等時間線

模型を用いて調査された炉内での堆積層の降下特性と応力分布について述べる。

4.1 堆積層の降下運動

トレーサー粒子を用いて得られた高炉内での固体粒子の流線と等時間線を図10¹³⁾に示す。シャフト部では流線は等無次元半径位置を結ぶ直線群にはほぼ一致する。等時間線はほぼ水平であり、バルクの流れは巨視的にはプラグフローとなっている。一方、炉下部(ベリーからボッシュ部)では粒子を周辺部(羽口部)から排出しているため、中心側には死領域(炉芯不動層)が形成され、縮流部の流れはファンネルフローを呈する。

高炉シャフト部のような末広がり型容器内で堆積層がプラグフローを呈することは、鉱石層やコークス層の傾斜角あるいは層内の粒子配列構造が降下とともに変化することを示唆するものであり、鉱石層とコークスの境界面や炉壁部での混合層の形成あるいは空間率の変化を検討する上で極めて重要な特性といえる。

4.2 堆積層の傾斜角変化

シャフト部では堆積層がプラグフローを呈するため、降下速度はシャフト断面積に反比例して変化し、炉上部で速く、下部で遅い。このように、炉高方向で降下速度分布を持つ炉内へ装入物を周辺部から装入してV型に堆積させた場合、傾斜した堆積層の降下速度は図11³⁾に示すように炉中心部より炉壁側で速い。すなわち、炉頂部でV型に堆積した鉱石やコークス層は降下とともにフラット化し、シャフト下部ではほぼ水平に近い状態で降下する。

4.3 充填構造の変化

炉内では鉱石層とコークス層が交互層状構造を維持しながら降下するが、炉壁部では粒子と壁面との摩擦抵抗や断面積の拡大による局所的な滑りによって層状

構造が乱れ、鉱石とコークスの混合層(炉壁混合層¹¹⁾)が形成される。図12は炉壁混合層の形成に及ぼすシャ

図11 降下に伴う傾斜角変化の原因

図12 降下時における充填構造の変化
(C : コークス, S : 焼結鉱)

フト角(S.A.)の影響を調べた結果であり、興味ある現象は混合化の開始位置や幅がシャフト角によって異なることである。図からわかるように、混合層の形成状態はS.A.=83°の場合に形成開始位置が最も低く幅も狭い。混合領域がシャフト角によって異なる現象は、炉壁近傍の応力状態に依存しており、S.A.=90°の場合は受働応力場での滑り特性に、S.A.=79°の場合は主働応力場での滑り特性に類似している。こうした炉壁混合層の形成は、炉内ガス流の偏流要因として回避すべきであり、現在の大型高炉のシャフト角が約83°付近に設定されていることは、ガス流れの安定性維持という観点から適正なものと言える。

さらに、堆積層の充填構造変化として、降下とともに鉱石やコークス層の層厚低下が上げられる。図12に示すように、末広がり型シャフト内の各層は降下とともに径方向全域に亘ってほぼ等しく層厚が低下している。これは、層内の粒子配列構造が常に変化していることを意味しており、単位バルク内の空間率が粒子接点数の変化に対応して粗密変動を繰返していると推察される。これに対し、S.A.=90°の場合には層厚変化が見られず、プラグフロー領域は充填時の粒子配列を維持したまま降下する。

この様に、同じプラグフローであっても粒子配列が常に変化している系と一定のままである系が存在することは、移動層型反応器を設計する上で特に留意すべき点であろう。

4.4 応力分布

定常流動時の炉壁および炉内の応力分布¹¹⁾を図13に示す。炉壁応力 σ_w は振幅が著しく、壁面では装入物

図13 定常降下時の炉壁および炉内応力分布と土圧係数分布

が断続的に降下していることがわかる。応力の最大ピークはベリー部に現われ、通常のホッパーにおける応力集中位置と一致する。層内の水平応力 σ_h は壁応力と良く相似しているが、下部縮流域では著しい径方向分布が存在している。垂直応力 σ_v はシャフト下部で最大となり、縮流部で急激に低下する。シャフト部では中心から周辺に向かって応力が低下する。土圧係数(σ_h / σ_v)は、シャフト部では塑性平衡値である0.21(試料の内部摩擦角 $=40^\circ$)にほぼ近い値を示すことから、層内は降状限界にあり、前述した層厚低下や粒子配列構造の変化が滑りによっていることを力学的に説明できる。また、下部縮流部では1以上の値となることから、炉内の応力場は、シャフト部で主動状態、ベリー・ボッシュ部(縮流部)で受働状態となっている。図14に降下速度の影響¹¹⁾を示すが、水平、垂直応力共に降下速度の影響は認められない。

4.5 炉芯不動層(死領域)の推定

炉下部の中心領域に形成される炉芯不動層の外部形状は滑り線解析^{11,21,22)}によって近似的に推定できる。

鉛直軸と角 θ をなすボッシュ壁面で囲まれた領域が受働応力状態で、しかも降状限界にあると仮定した場合、モール円解析から求められる滑り線の特性格線群

図14 応力分布に及ぼす降下速度の影響

図15 炉芯不動層形状の計算値と実測値

は図15のように示される。図中にプロットした実測値は、理論解析から求めた a 、 b 一対の特性格線のうち、 b -滑り線と良く対応し、排出口(コークスの燃焼消失部)を起点とする b -滑り線を求めることにより、不動層の形状を近似的に推定することが可能である。

5. おわりに

製鉄工程における粉粒体の処理技術を高炉操業に焦点を当てて解説した。ここで取り上げた技術は高炉操業の基本とされるものであるが、現象に対する普遍性や定量的理解は必ずしも十分ではない。粒度分布の広い大粒子を大量に取り扱う高炉の分布制御に対しては、実験や研究のむずかしさもあるが、より確度の高い制御技術を確立するために、現象についての理論的な検討も盛んになりつつあり、今後の発展が期待される。本解説には、若干の議論の偏りもあり得と思われるが、この分野に関心を持つ研究者・技術者に多少の参考となれば幸いである。

引用文献

- 1) 秋本圭一, 中路 茂, 法領田宏, 西村 治, 岡 芳雄: 鉄と鋼, **66**, 29(1980)
- 2) 里見弘次: "第3版鉄鋼便覧", II製鉄・製鋼(日本鉄鋼協会編), p. 259, 丸善(1979)
- 3) 稲葉晋一, 西尾浩明: "高炉内現象とその解析(日本鉄鋼協会鉄鋼基礎共同研究会高炉内反応部会編)" p. 44 (1979)
- 4) 浜田尚夫, 小坂橋寿光, 岡部俠児: 鉄と鋼, **66**, 363 (1980)
- 5) 山田孝男, 佐藤政明, 宮崎伸吉, 嶋村鎮郎, 田口整司: 川鉄技報, **6**, [1], 16 (1974)
- 6) Gotlib, A.D. (館訳): "高炉製鉄法の理論", 日本鉄鋼協会, p. 17 (1966)
- 7) 城本義光, 金山有治, 奥野嘉雄, 磯山 正: 製鉄研究, **272**, 23 (1971)
- 8) 成田貴一, 稲葉晋一, 小林 勲, 沖本憲市, 清水正賢, 矢場田武, 玉田慎一: 鉄と鋼, **65**, [3], 358 (1979)
- 9) 松崎真六, 奥野嘉雄: 鉄と鋼, **71**, (1985)

- 10) 小西行雄, 武田幹治, 田口整司, 福武 剛, 小口満, 山崎 信:鉄と鋼, **70**, 91(1984)
- 11) 清水正賢, 山口荒太, 稲葉晋一, 成田貴一:鉄と鋼, **68**, [8], 936(1982)
- 12) 田村健二, 一田守政, 奔 勝也, 林 洋一:鉄と鋼, **71**, 75(1985)
- 13) 清水正賢, 山口荒太, 稲葉晋一, 松井良行:鉄と鋼, **71**, 891(1985)
- 14) Heynert, G., F. Toussaint, J. Willems, and G. Quade: *Stahl u. Eisen*, **80**, [8], 473(1960)
- 15) 西尾浩明, 有山達郎, 佐藤道貴, 中谷源治, 牧 章, 齊藤典生:鉄と鋼, **69**, 53(1983)
- 16) 河上房義:“土質力学”, 森北出版, p.107 (1976)
- 17) 西尾浩明, 有山達郎, 丹羽康夫, 山口 篤, 脇元一政:鉄と鋼, **65**, 601(1979)
- 18) 成田貴一, 稲葉晋一, 清水正賢, 小林 勲, 沖本憲市, 山口荒太:鉄と鋼, **66** [5], 459(1980)
- 19) 大野陽太郎, 近藤国弘:鉄と鋼, **70**, 51(1984)
- 20) 一田守政:鉄と鋼, **69**, 61(1983)
- 21) Nishio, H., W.Wenzel, and H.W., Gudenau: *Stahl u. Eisen*, **97**, [18], 867 (1977)
- 22) 磯部浩一, 桑原 守, 鞭 厳:鉄と鋼, **67**, [4], 53(1981)

粉 体 風 物 誌

(7)

中国の石臼類の出土品

＜ 2 ＞

写真は前述と同様石器時代の石臼であるが、紀元前21世紀～前16世紀に相当し、同じく河南省安陽の婦好墓からの出土品である。玉石でできた杵と臼である。

(奥田 聡)

玉杵臼 (石器時代) 河南省出土