

SHINAGAWA TECHNICAL REPORT

高炉出銑孔の開孔速度に及ぼす
マッド材特性，開孔設備の影響

Influences of Taphole Mix Properties and
Drilling Equipment Performance on
Drilling Rate of Blast Furnace Taphole

飯 田 正 和
Masakazu IIDA

品川技報

高炉出銑孔の開孔速度に及ぼすマッド材特性、開孔設備の影響

Influences of Taphole Mix Properties and Drilling Equipment Performance on Drilling Rate of Blast Furnace Taphole

飯 田 正 和*
Masakazu IIDA

要 旨

高炉出銑孔の開孔を記述する数値モデルを作成した。モデルによる計算は実際の開孔をよく再現し、マッド材のヤング率が高くなると開孔所要時間が増大すること、開孔設備の能力が低下すると開孔所要時間が増大すること、などを示すことができた。さらに、ある深度で突然開孔が不能になる状態を計算した結果、開孔不能はマッド材組織で説明することは困難であることがわかった。

Abstract

A numerical model describing blast furnace taphole drilling was established. The calculated results reproduced variations in the drilling rate of the blast furnace taphole well. By using the model, decreases in drilling rate caused by the increase in Young's modulus of taphole mix or deteriorations of drilling equipment performance were successfully calculated. Moreover, as a result of the simulative calculations for the sudden interruptions which occur during drilling, it was verified that the cause of the sudden interruptions is difficult to explain only by taphole mix sintering.

1. 緒言

高炉からのメタル/スラグの排出（出銑）は、3～4mの長さ（深度）の出銑孔を先端径40～70mm程度の水冷ドリルで掘削する開孔により開始する。開孔中、掘削速度は低下していき、炉内に貫通するまでの所要時間は5～15分程度である。開孔に用いたドリルは炉内に蓄積されている溶融スラグ中に貫通するため、開孔の都度新品が用いられる。

開孔中、溶融物は排出されず炉内に蓄積され続けるが、炉内溶融物レベルが上昇し過ぎると高炉

1. Introduction

Drainage of molten iron and slag from the blast furnace (hereafter, referred to as tapping) starts by drilling the taphole, which is 3 to 4m in length, using a 40 to 70mm diameter water cooled drill. During drilling, the drilling rate decreases as drilling progresses and the total drilling time is usually 5 to 15min. Since the drill tip contacts the molten slag in the furnace, a new drill is applied for each drilling operation.

While the drilling operation is being carried

* 技術研究所 第3研究グループ グループマネージャー Manager, Specific Area Refractories R&D Group, Research Center

操業が不安定になるため^{1)~4)}, スムーズな開孔が望ましい。しかし, 実際には開孔所用時間の大きなばらつきや開孔の途中でドリルが進まなくなる開孔不能などの不具合が生じる場合がある。

開孔には出銑孔を形成するマッド材の品質や開孔設備の能力, ドリルの摩耗などが影響すると考えられるが, それぞれの要因の影響を明確にすることで開孔における不具合を適切に評価できるようになると考えられる。そこで, それらの影響を半定量的なモデルで評価した。

2. 開孔速度モデル

開孔の解析にあたって, (1)開孔中にドリルが摩耗し, 摩耗量はマッド材のヤング率に比例して増大する, (2)開孔速度はマッド材のヤング率に反比例して低下する, (3)開孔速度はドリルの摩耗量に比例して低下する, と仮定して数値モデルを検討した。ここでヤング率を指標としたのは, セラミックス材料において硬さとヤング率の間に比例関係が認められるとされているからである⁵⁾。

出銑孔を Δl の長さに等分した場合の k 番目について, ヤング率を E_k , ドリルの摩耗体積を ΔV_k とおくと, c を定数として,

$$\Delta V_k = c \cdot E_k \cdot \Delta l \cdots \cdots (1)$$

従って, k 番目までのドリルの摩耗量の積算値 V_k は,

$$V_k = \sum_{i=1}^k (c \cdot E_k \cdot \Delta l) \cdots \cdots (2)$$

ドリル摩耗を考慮しない場合の開孔速度を v_k' とすると, v_k' はマッド材のヤング率に反比例するので, u を定数として,

$$v_k' = u / E_k \cdots \cdots (3)$$

開孔速度へのドリル摩耗量の影響について掘削能力指数 P ($0 \leq P \leq 1$) を考える。 P はドリルの摩耗体積 V が 0 の場合を 0, 掘削不可能な状態まで摩耗した場合を 1 とする仮想的な概念である。 $P=1$ に達したときのドリルの摩耗量が V_m , 摩耗量 V_k に対する P の低下が $f(V_k)$ で与えられるとすると,

out, molten iron and slag are not drained out, thus, the liquids are stored in the furnace. Since the excessive rise of liquid level in the blast furnace hearth has an adverse effect on stable furnace operation^{1)~4)}, smooth drilling is required. In practice, however, drilling difficulties cause considerable deviations in drilling time and sudden drilling interruptions also occur.

It is reasonable to assume that the properties of the taphole mix that has been plugged in the taphole at the end of previous tapping, performances of drilling equipment, and wear of the drill bit influence the drilling rate. Clarification of the influence of each factor can be considered to give suitable ideas to countermeasure drilling difficulties, the influences were evaluated using semi-quantitative models in this study.

2. Drilling Rate Model

In order to describe the drilling rate variation numerically, the following were hypothesized; (1) the drill bit is worn during drilling and the wear volume of the drill bit is in proportion to Young's modulus of a taphole mix, (2) the drilling rate decreases in an inverse proportion to Young's modulus of a taphole mix, and (3) the drilling rate decreases proportionally as the wear volume of the drill bit increases. In the hypotheses, Young's modulus is selected as the index describing the influence of taphole mix since the proportional relation between hardness and Young's modulus is recognized among various ceramic materials⁵⁾.

The drilling rate variations were simulated by slab model in which the taphole is comprised of layers of slabs with a thickness of Δl . Considering k th slab from outer end of the taphole with Young's modulus of E_k , the wear volume of drill bit can be described as;

$$\Delta V_k = c \cdot E_k \cdot \Delta l \cdots \cdots (1)$$

Where, c is a coefficient.

$$P = 1 - f(V_k), 0 \leq V_k \leq V_m, f(V_m) = 1 \quad \cdots \cdots (4)$$

ここで、さまざまな摩耗状態での掘削能力 P において(3)の関係が成り立つので、掘削速度 v_k とヤング率、摩耗量の関係は $v_k' \times P$ で与えられ、

$$v_k = (1 - f(V_k)) \cdot u / E_k, 0 \leq V_k \leq V_m, \\ f(V_m) = 1 \quad \cdots (5)$$

$f(V_k)$ の関数形は、単調増加関数であるので最も単純な場合を仮定して一次関数と考えると、定数 b を導入して、

$$v_k = (1 - bV_k) \cdot u / E_k, 0 \leq V_k \leq V_m, bV_m = 1 \quad (6)$$

この中で、仮定(2)開孔速度はマッド材のヤング率に反比例して低下する、については実験で検証を行った。種々のマッド材を $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}$ および $65 \times 65 \times 115 \text{ mm}$ に成形し、 $500 \sim 1400^\circ \text{C}$ の温度範囲で焼成することで様々なヤング率の試料を得た。 $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}$ の試料について超音波法でヤング率を測定、 $65 \times 65 \times 115 \text{ mm}$ の試料は孔開け試験に供した。孔開け試験はボーリングマシンに 40ϕ のダイヤモンドビットを取り付け流水しながら行った。その際、ボーリングマシンのモーターの負荷は 3 A 一定とし、貫通に要する時間を測定、掘削速度を算出した。Fig. 1に示すよう

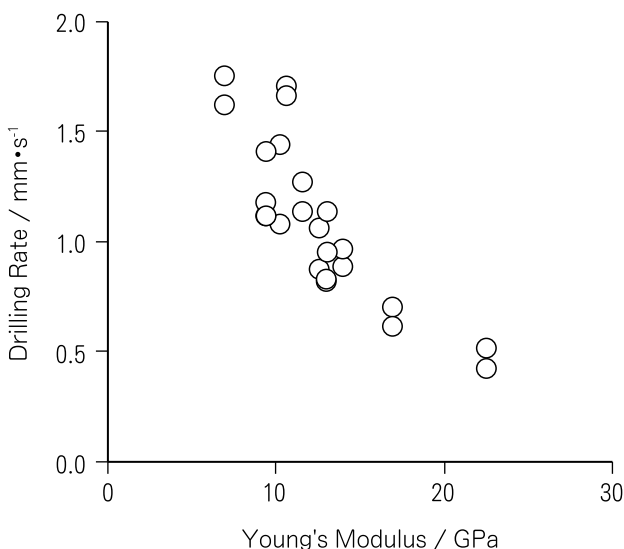


Fig. 1. Variations of experimentally evaluated drilling rate as a function of Young's modulus of taphole mix.

Thus, the cumulative wear volume of drill bit V_k is expressed as;

$$V_k = \sum_1^k (c \cdot E_k \cdot \Delta l) \quad \cdots \cdots (2)$$

The drilling rate (v_k') of which wear of the drill bit has not been taken into consideration is assumed inversely proportional to the Young's modulus of taphole. Thus, by employing u as a coefficient;

$$v_k' = u / E_k \quad \cdots \cdots (3)$$

To take the wear volume of the drill bit into account, drilling ability index P ($0 \leq P \leq 1$) is introduced. When the wear volume of the drill bit is zero, the value of P is set at 0. On the contrary, the value of P is set at 1 when the wear volume of the drill bit is too large to drill. Defining the critical wear volume of the drill bit of which drilling ability reaches zero as V_m and the function of P as $f(V_k)$

$$P = 1 - f(V_k), 0 \leq V_k \leq V_m, f(V_m) = 1 \quad \cdots \cdots (4)$$

Principally, equation (3) holds for various wear statuses of the drill, thus, relations among v_k , E , and V_k are expressed as;

$$v_k = (1 - f(V_k)) \cdot u / E_k, 0 \leq V_k \leq V_m, \\ f(V_m) = 1 \quad \cdots \cdots (5)$$

While it is difficult to give an accurate function of $f(V_k)$, it is obvious that the function shows monotonic increase. In this study, linear function with gradient b is assumed.

$$v_k = (1 - bV_k) \cdot u / E_k, 0 \leq V_k \leq V_m, bV_m = 1 \quad (6)$$

Among the above mentioned three hypotheses, (2) the drilling rate decreases in an inverse proportion to Young's modulus of a taphole mix, was experimentally validated. In order to prepare the taphole mix specimens in a wide Young's modulus range, some kinds of taphole mixes were pressed in $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}$ and $65 \times 65 \times 115 \text{ mm}$ rectangular shapes followed by heating at various temperatures between 500 and 1400°C . The heated $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}$ specimens were used for Young's modulus measurement by ultra-sonic method. The heated

に、開孔速度はマッド材のヤング率に反比例して低下する傾向が示された。

3. 出銑孔内のヤング率分布

実高炉の開孔を解析するには、出銑孔のヤング率分布を仮定する必要がある。これについては、A高炉におけるドリルを2本使用した開孔速度と出銑孔内の温度分布/変化から検討した。Fig. 2にA高炉でドリルを2本使用した場合の開孔速度変化を例示する。Fig. 2より、1本目と2本目の開孔速度とその低下の傾きはほぼ等しいことがわかる。これより、出銑孔はほぼ全域にわたって同じヤング率と考えてよいことがわかる。

これは出銑孔内のマッド材の到達温度で説明できる。Fig. 3にA高炉で測定した出銑孔の温度分布/変化を示す。出銑孔の温度は深度によって異なり炉内側ほど高いが、測定データを外挿するとマッド材充填直後はいずれの深度も1000～1100℃に収束することがわかる。これより、出銑孔に充填されたマッド材は出銑中に銑孔壁に蓄積された熱で加熱され、全域でほぼ同じ温度に達した後で冷却され、炉壁の温度分布に近づくと推定され

65×65×115mm specimens were experimentally bored by boring machine with a diamond bit of 40mm in diameter. During the boring test, water flowed inside the bit and the motor load was kept at 3A. The drilling rate was evaluated by the time required for complete boring. As can be seen in Fig. 1, the inversely proportional relation between the drilling rate and Young's modulus is recognizable.

3. Young's Modulus Distribution in Taphole

In order to analyze the drilling of the blast furnace taphole, the assumption of Young's modulus distribution in the taphole is necessary. It was assumed by evaluating the drilling rate variation data in cases where 2 drills were applied to the drilling obtained from blast furnace A. Fig. 2 shows some examples of drilling rate variation using 2 drills. As shown in Fig. 2, the drilling rate and rate decrease gradient of the second drill are almost identical to those of the first drill. Hence, it is acceptable to assume that the same Young's modulus is achieved through almost whole part of the taphole.

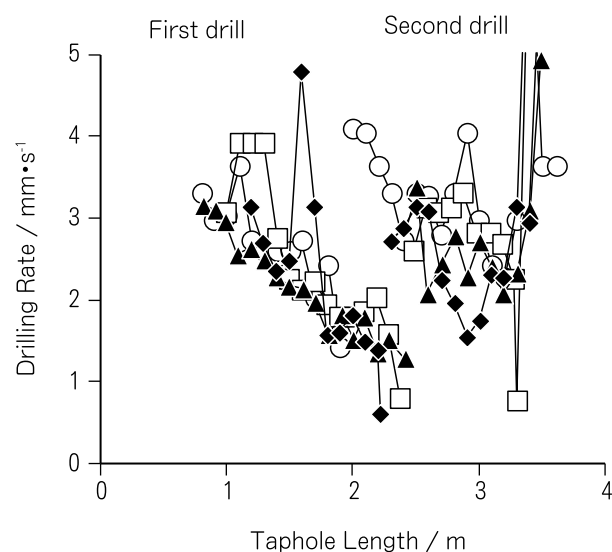


Fig. 2 Changes in drilling rate of blast furnace A when two drills were applied.

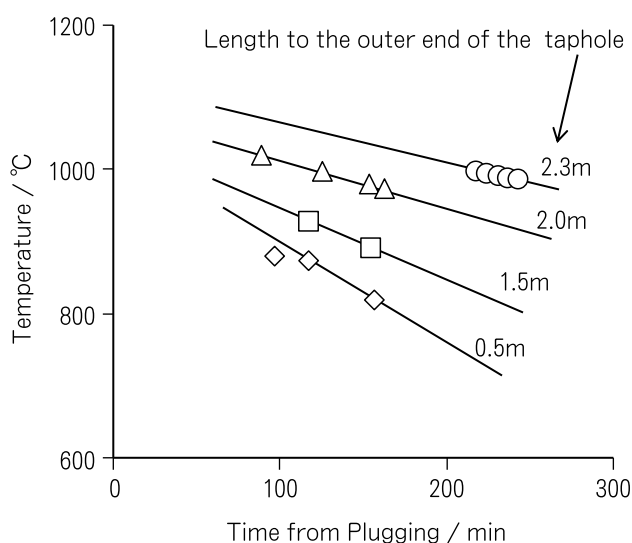


Fig. 3 Temperature distributions/changes in taphole measured at blast furnace A.

る。そのため、いずれの深度においてもマッド材は同程度の焼結状態を示すのであろう。

本報ではマッド材のヤング率として1200℃焼成後の値を用いて開孔速度を解析した。

4. 解析結果

4.1 A高炉におけるマッド材ヤング率の影響

A高炉は比較的開孔機の能力が弱く、ヤング率が8GPaのマッド材を使用していた。このA高炉においてヤング率が11GPaの高強度マッド材を適用するテストを行った際の開孔を解析した。出銑孔全域のヤング率を8GPaとし定数 c , u , b を調整してヤング率が8GPaのマッド材を使用した開孔のデータを再現、マッド材のヤング率のみ11GPaにした場合の計算を行い、実データと比較した。

Fig. 4に開孔深度の時間変化を示す。計算結果と測定データはよく一致した。Fig. 4で開孔深度

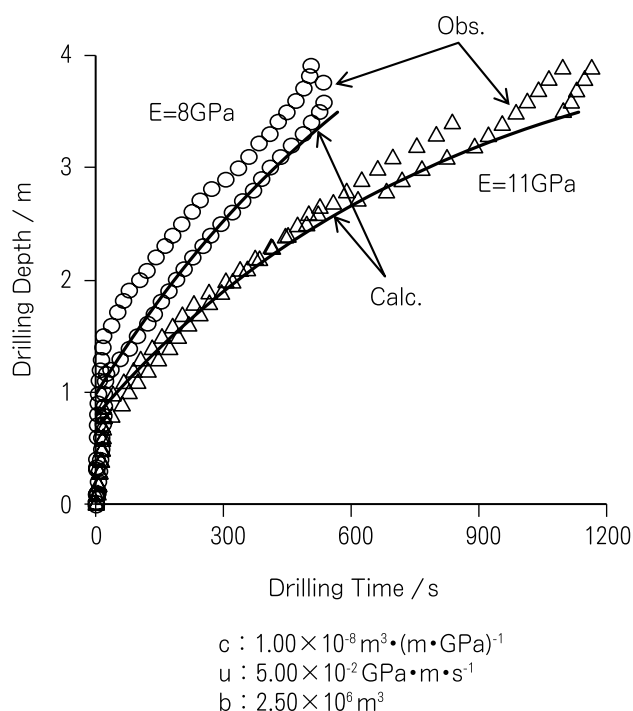


Fig. 4 Comparisons of changes in drill position between measured values and calculated results.

This tendency is explainable by the maximum temperature that the plugged taphole mix was subjected to. Fig. 3 shows the temperature distributions/changes in the taphole of a blast furnace A. The higher temperatures were measured at the area close to the inner furnace, while, extrapolations of the temperatures were converged to the range between 1000 to 1100℃ just after the plugging. Therefore, taphole mix in the taphole is considered to be heated by heat stored in the taphole wall during tapping and reaches 1000 to 1100℃ over almost the whole range and then cools in accordance with the furnace wall temperature distribution.

In this study, Young's modulus of a taphole mix heated at 1200℃ was used for analysis.

4. Analyzed Results

4.1 Influence of Young's modulus of taphole mix at blast furnace A

For blast furnace A which is equipped with relatively lower performance drilling equipment, a taphole mix with Young's modulus of 8GPa was used. At the furnace, a high strength taphole mix with Young's modulus of 11GPa was applied as a trial and the drilling data were analyzed. For the first step, Young's modulus for the entire taphole was assumed to be 8GPa and coefficients c , u , and b were tuned to reproduce the drilling data of a taphole plugged with a taphole mix with a Young's modulus of 8GPa. Next, only Young's modulus was changed to 11GPa and the results were compared.

Fig. 4 shows the changes in drill position during the drilling operation. Calculations and measurements were in good agreement. In Fig. 4, each curve has an intercept, which is a result of the pre-drilling performed to determine the taphole center as a guide in order to carry out a smooth drilling operation.

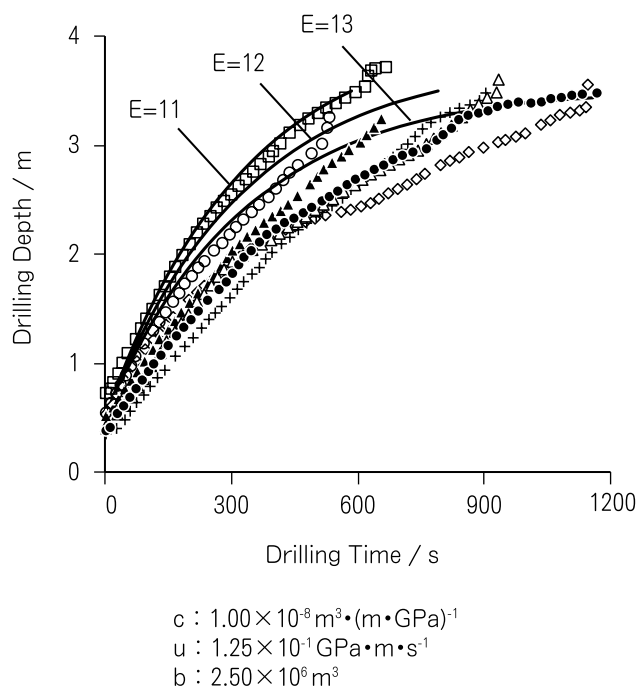


Fig. 5 Influence of taphole mix Young's modulus (E) on drill position variations.

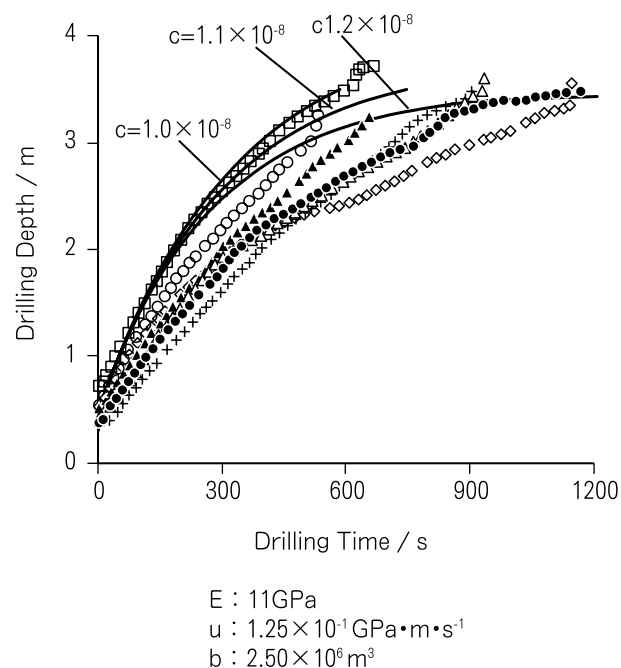


Fig. 6 Influence of coefficient c on drill position variations.
Coefficient c is considered to be the susceptibility to wear of drill bit.

の時間変化データは切片をもっているが、開孔作業をスムーズに進めるために事前に実施する位置決めのための掘削によるものである。

4. 2 B高炉における開孔設備とマッド材ヤング率の影響

B高炉は比較的開孔機能力が高く、ヤング率が11GPaのマッド材を使用していた。しかし、ある時期、開孔所要時間のばらつきが非常に大きくなるがあった。これについて、マッド材ヤング率のばらつき、ドリルのばらつき、開孔設備の不具合、などが考えられ、それらの影響について計算で評価した。

Fig. 5にマッド材のヤング率を変化させて計算した結果を測定データとともに示す。ヤング率が高くなることで開孔所要時間は長くなるが、開孔深度変化の曲線は測定データと異なった。これより、開孔所要時間のばらつきはマッド材ヤング率のばらつきの影響ではないと考えられた。

4. 2 Influence of drilling equipment performance and Young's modulus of taphole mix at blast furnace B

For blast furnace B, a taphole mix with Young's modulus of 11GPa had been used since relatively higher performance drilling equipment was installed. Over a certain period, however, considerable deviations in total drilling time were observed. To explain the phenomena, the deviations in Young's modulus of taphole mix, deviations in drill bit cutting performance, and deterioration of drilling equipment were suspected. Hence, the impacts of deviations in the indices on drilling rate variations were evaluated by calculations.

Fig. 5 shows the calculated results in which the Young's modulus of a tap hole mix has been varied in comparison to the measured data. Though the total drilling time was increased by application of a higher Young's modulus

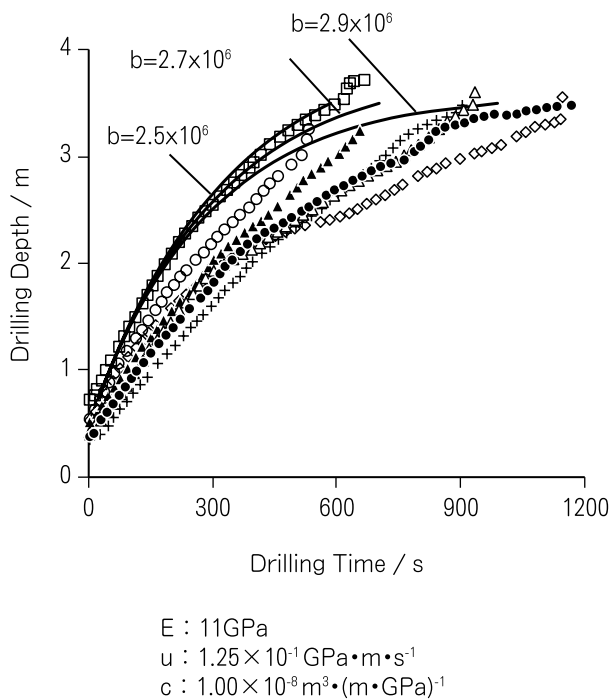


Fig. 7 Influence of coefficient b on drill position variations.
 Coefficient b is considered to be degree in deterioration of cutting performance of drill bit after wearing.

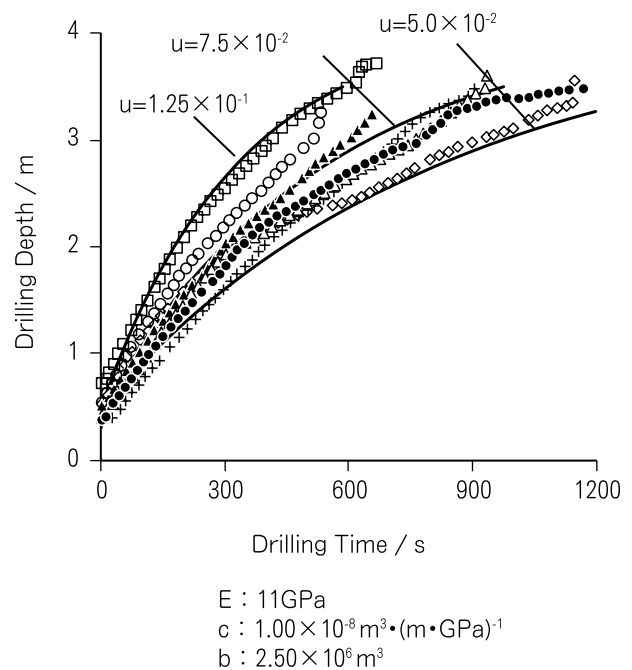


Fig. 8 Influence of coefficient u on drill position variations.
 Coefficient u is considered to be the drilling equipment performance.

Fig. 6に c を変化させたときの、Fig. 7に b を変化させたときの計算結果を示す。このうち c はドリルの摩耗しやすさ、 b はドリル摩耗時の掘削能力の低下のしやすさを示す指標であり、ドリルビットの能力に関する指標である。Figs. 6, 7ともに開孔深度変化は測定データと異なったことから、開孔所要時間のばらつきはドリルビットの能力によるものでもないと考えられた。

Fig. 8に u を変化させた場合の計算結果を示す。 u はマッド材ヤング率の開孔速度への影響を表わす定数であり、開孔設備の回転や送りなどの能力に関する指標である。 u を変化させた場合の開孔深度変化は実際のバラツキの状態をよく再現した。これより、開孔設備の能力が安定しないために開孔所要時間にばらつきが生じている可能性が高いと結論された。実際、調査によりドリルの回転の駆動力を伝達する系統に不具合を生じてい

taphole mix, the calculated changes in the drill position did not agree with the deviations in the measured data. Thus, the deviation in total drilling time wasn't attributable to the deviation in Young's modulus of taphole mix.

Figs. 6 and 7 show the calculated variations in drill positions during drilling operations regarding c and b as variables. c and b are the coefficients indicating susceptibility to wear of drill bit and degree in deterioration of cutting performance of drill bit after wearing, respectively. Doing so allows us to evaluate the influences of drill bit performance on drilling rate. As shown in Figs. 6 and 7, calculated drill position variations didn't agree with the measured deviation.

Fig. 8 shows the calculated results regarding u , which describes the influence of Young's modulus of the taphole mix on drilling rate, as a

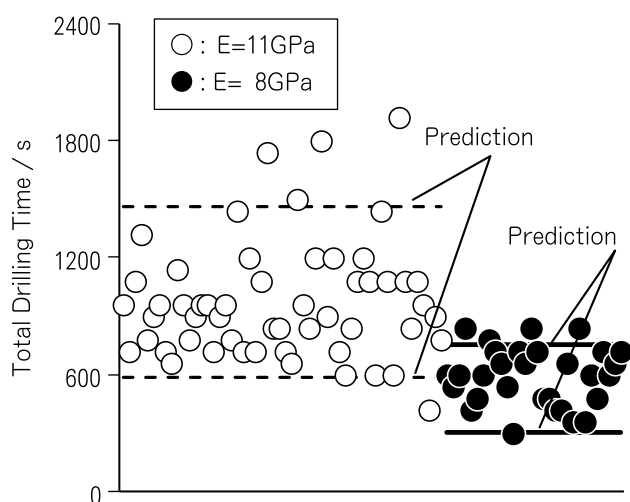


Fig. 9 Trend of total drilling time measured at blast furnace B.

たことがわかった。

これより、ドリルの整備が実施されるまでの間はヤング率が8GPaのマッド材を適用する対策がとられた。Fig. 9に開孔所要時間のトレンドを示す。出銑孔深度を3.5mとしてマッド材のヤング率が11GPaと8GPaのそれぞれの場合に $u=1.25 \times 10^{-1}$, 5.0×10^{-2} として計算された開孔所要時間を併記したが、ほぼ計算どおりの開孔所要時間を示したことがわかる。

4. 3 開孔不能状態

実際の開孔作業において、順調に開孔していてもある深度で突然掘削できなくなる場合がある。ここでは、開孔中にドリルが進まなくなるためには、その部分がどの程度高ヤング率化していなければならないか、開孔モデルで試算した。その結果をFigs. 10, 11に示す。Fig. 10は仮定したヤング率分布で、(i)一様に8GPaの場合、(ii)3mより奥で2倍になった場合、(iii)3mより奥で5倍になった場合、を想定した。Fig. 11は開孔速度の計算結果である。これより、開孔中にドリルが進まなくなるためには、その部分のヤング率が5倍以上になっている必要があることが示され、マッド材

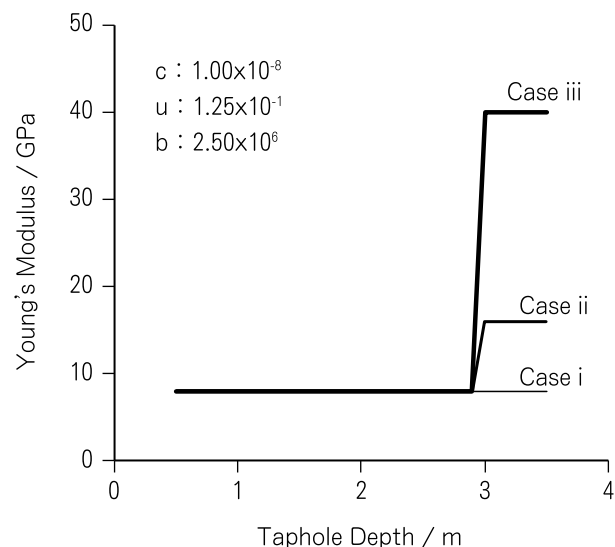


Fig. 10 Assumed distribution of Young's modulus in taphole.

variable. u is considered to be the performance of drilling equipment such as drilling torque, pushing force, and so on. The results obtained by calculations carried out varying the coefficient u are in good agreement with the observed deviations. They are evidence that the deviation in total drilling time was attributable to the deterioration of drilling equipment. As a matter of fact, failure of the actuator of the actual rotating device was found.

Until drilling equipment repair, a tap hole mix with a Young's modulus of 8GPa was applied as a temporary expedient. Fig. 9 shows the trend in total drilling time associated with the values predicted by calculations. The calculations were done with the assumptions that; taphole length=3.5m, Young's modulus=11GPa and 8GPa, $u=1.25 \times 10^{-1}$ and 5.0×10^{-2} . As shown in Fig. 9, the calculation accurately predicted the deviation in total drilling time.

4. 3 Sudden interruption

On rare occasions, smooth drilling is suddenly interrupted at a certain position and subsequent drilling becomes impossible. This phenomenon,

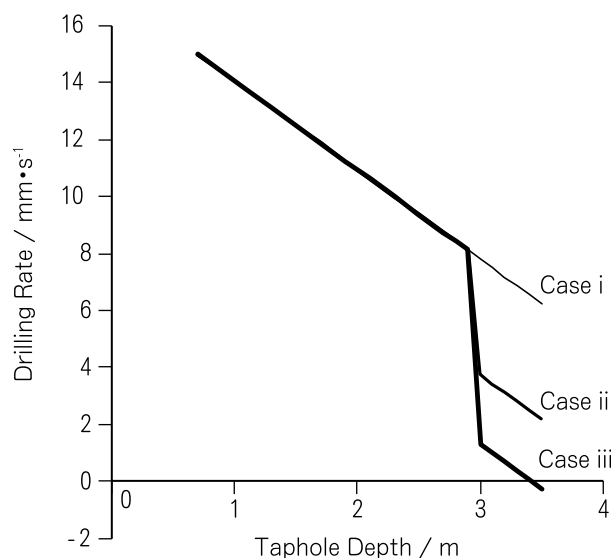


Fig. 11 Changes in drilling rate calculated for case (i), (ii), and (iii).

組織で説明することは不可能であることがわかった。

このような高いヤング率は、炉底に生成した“skull”が出銑孔位置に到達しているとして説明できる可能性がある。最近、高炉の解体調査で炉底におけるskullの存在が確認されてきている^{(6)–(8)}。SkullはCaOやCaSに富んだスラグであり、Huangら⁷⁾は、「高炉スラグからのSiO₂ガスの蒸発によって形成され、炉内温度において固体で存在している」とした。酸化物（硫化物）セラミックスが固体で存在しているとすれば、非常に高いヤング率を示す組織も説明可能となる。ただし、操業中の高炉でskullが出銑孔レベルに達していることを直接観察することは不可能であり、間接的な証明も現時点では困難であることから、本報ではその可能性を示唆するにとどめる。

5. 結論

高炉出銑孔の開孔について半定量的なモデルで検討した。モデルは、掘削によりドリルが摩耗し、それに伴い掘削能力が低下していくというも

which is referred as “sudden interruption” in this study, was evaluated by assuming Young’s modulus distribution in the taphole. The results are shown in Figs. 10 and 11. Fig. 10 shows Young’s modulus distribution with the assumptions (i) uniform 8GPa over the whole length (3.5m), (ii) twice at the range of over 3m, and (iii) five times at the range of over 3m. Fig. 11 shows the drilling rate variations corresponding to the three cases. As indicated in Figs. 10 and 11, the five times in Young’s modulus is required to reproduce the sudden interruption. Such considerable increase in Young’s modulus is impossible to explain only by a taphole mix sintering property.

To explain such a high Young’s modulus, the concept of skull is suggested as one of the possibilities. Recently, formations of skull, which is slag that contains a larger amount of CaO and CaS, were observed in some dissected blast furnace hearths^{(6)–(8)}. Huang et. al⁷⁾ suggested that the bottom skull is formed by the evaporation of SiO₂ gas and it exists as solid phase in furnace bottom. Assuming that oxide (sulfide) ceramics exist in the furnace hearth and reaches the taphole level, the high Young’s modulus structure inducing sudden interruption becomes explainable. In practice, however, it is impossible to observe the skull or to verify the existence of the skull indirectly in commercially operated blast furnaces. Therefore, in this study, the author can suggest only the possibility.

5. Conclusion

The drilling operation of the blast furnace taphole was simulated by numerical model. The model describes the drilling rate variation during the drilling operation by taking deterioration of cutting performance due to drill bit wear during drilling into account. In addition, it is assumed that Young’s modulus of taphole mix affects not

ので、出銑孔を形成するマッド材のヤング率がドリルの摩耗と掘削速度に影響するとした。モデル計算により、開孔深度の時間変化データを説明することができた。さらに開孔中にドリルが進まなくなる条件について計算し、ドリルが進まなくなるためにはある部分のヤング率が5倍以上になっている必要があり、マッド材組織で説明することは不可能であると考えられた。

only to the drilling rate but also drill bit wear. The calculated changes in drill position during the drilling operation accurately reproduced the data obtained from commercially operated blast furnaces. Furthermore, as a result of the trial calculations simulating the sudden interruption, it was concluded that the sudden interruption is impossible to explain only by taphole mix sintering because a 5 times increase in Young's modulus is necessary.

References

- 1) T. Fukutake and K. Okabe : Tetsu-to-Hagane, 60 (1974), 607 (In Japanese).
- 2) T. Fukutake and K. Okabe : Trans, Iron Steel Inst. Jpn., 16 (1976), 309.
- 3) T. Fukutake and K. Okabe : Trans, Iron Steel Inst. Jpn., 16 (1976), 317.
- 4) W. B. U. Tanzil, P. Zulli, J. M. Burgess and W. V. Pinczewski: Trans. Iron Steel Inst. Jpn., 24 (1984), 197.
- 5) T. Nishida and E. Yasuda : Evaluations of Physical Properties of Ceramics, *Nikkan-Kogyo-Shinbunsha*, Tokyo, (1989), 22 (In Japanese).
- 6) P. Exter, R. Molenaar, G. Tjihuis and H. Toxopeus : Proceedings of ISSTech 2003 Conference, (2003), 479.
- 7) D. Huang, P. Chaubal, H. Abramowitz and C. Zhou : Proceedings of AISTech 2005, (2005), 101.
- 8) J. Swanljung, P. Inkala and P. Mannila 3rd International Conference on Science and Technology of Ironmaking, (2003), 340.