

大型炭素鋼鋼塊の Λ 偏析帯に就て (III)

(大型炭素鋼鍛鋼品に現れる偏析きず—その 3)

河 合 正 吉*

ON THE Λ SEGREGATED ZONE OF LARGE CARBON STEEL INGOTS (III)

(Segregation-Flaws Appearing in Large Carbon Steel Forgings. Part-3)

Masayoshi Kawai

Synopsis:

Refer to Part-1 p. 85 of the previous issue (No. 2, 1956)

(2月号93頁よりつゞく)

II. 偏析きずの発生と製造条件

偏析きずの発生を支配する諸因子を直接に理論的に探求する事は困難である。依つて探求の端緒を攝む為に偏析きずの性状を調査して来たのであるが、更に諸因子の複合体とも称すべき製造条件と偏析きずの発生との関係に就て経験的、特に統計的に得られている知識を整理する事とする。

1. 鑄込条件

我々は古くからの経験に依り、鑄込温度が低いと砂が現れ、高いとゴーストおよび偏析きずの発生し易い事を知っている。この事実は砂と偏析きずとが互に排他的であり一方が現れると他方の出現が抑えられると云う経験的事実と表裏をなすものである。

Table 2. Statistical result about relation between casting temperature and appearing percentage of flaw.

Kind of flaw	Casting temperature	
	Lower	Higher
Scund	72.0%	71.3%
Sand	14.7%	7.4%
Segregation-flaw	14.3%	24.1%

他方著者は日常検査に就て次の様な統計的結果を得ている。即ち炭素鋼の大型鍛鋼品の 319 例に就て、38 例に砂が現れ、57 例に偏析きずが認められ、その中 5 例には砂と偏析きずとが共存した。詰り欠陥を砂と偏析きずとに限定すれば、319 例中 90 例に欠陥が現われ、両欠陥が共存したものはその中 5 例に過ぎなかつたのであ

る。但しこの統計に於いては如何なる軽微な欠陥も之を算入し、製品の合否は対象としなかつたのである。

次にこれ等の例を造塊時の鑄込温度に就て低目と高目との 2 群に分け、各群で欠陥なきもの、砂のあるもの及び偏析きずの発生せるものに対して百分比をとると Table 2 が得られる。この結果は上述の定性的な傾向を良く物語っている。

2. 熔鋼の水素含有量

著者は日常検査に於いて湿潤高温期、特に梅雨期に熔解した炭素鋼に対して、偏析きずの発生率が著しく上昇する事を経験している。この点は特殊鋼に白点が発生し易い事と同様である。他方前述の様に砂と偏析きずとは互に排他的であるが、この事実は製鋼条件に関して砂及び偏析きずに対する或安全範囲があり、製鋼条件がこの安全範囲の一侧に偏すれば砂が現われ、他側に偏すれば偏析きずが発生する事を意味するものである。この安全範囲は極めて狭隘であり、鋼塊の大きさが大なる程狭くなる傾向が認められる。即ち真に健全なる大型炭素鋼鍛鋼品を製造する為には、現在の処では殆んど制御不可能な狭い範囲内に製鋼条件を調節しなければならないのである。他方高温湿潤期の諸条件は恐らく偏析きずの発生を容易ならしめるものと考えられるが、この為に上述の安全範囲は偏析きず発生側より更に狭められ、製鋼条件が安全範囲を外れる確率は一層増大するであろう。例えば該期には偏析きずの発生を避ける為には、通常の時期よりも鑄込温度を低目にしなければならぬから、結果的には製鋼条件は砂発生側に偏する事となり、砂の発生率も増加するのである。斯様な傾向は実績に於いて、梅雨期の偏析きず及び砂の発生率が通常の時期の 2~4 倍

* 三菱製鋼、長崎製鋼所

Table 3. Mn/Si ratio of steel forgings C

Kind of flaw	No.	Mn/Si								Mean
		Observed value								
p	32	2.17	2.48	2.38	2.50	2.00	2.27	2.50	2.55	2.2125
		2.36	2.00	2.35	2.00	2.38	2.00	2.15	2.32	
		1.80	2.17	1.89	1.75	2.50	1.65	2.00	1.97	
		3.18	2.32	1.68	2.29	1.84	2.18	2.90	2.07	
c	15	2.28	1.89	1.47*	2.31	2.32	1.44	1.63*	2.21	1.9507
		1.60	2.50	2.14	1.90*	1.85	1.93	1.79		
s	14	1.69	2.19	1.61	1.47*	1.76	1.53	1.96	2.00	1.8621
		1.63*	2.18	1.90*	2.56	1.55	1.94			
Total mean									2.0677	

* Containing both flaws.

Table 4. Mn/Si ratio of steel forgings D.

Kind of flaw	No.	Mn/Si								Mean
		Observed value								
p	37	2.46	1.74	1.54	1.79	1.65	1.93	2.16	2.07	1.9690
		2.16	2.07	1.28	1.53	1.79	1.58	2.23	2.19	
		1.60	1.97	1.53	1.82	2.90	2.12	1.78	2.07	
		1.88	2.00	2.07	1.88	1.75	2.11	2.13	1.90	
		2.11	1.79	2.28	2.72	2.17				
c	10	2.09	2.07	1.93	2.10	2.34	1.56	2.18	2.08	1.9470
		1.53	1.59							
s	5	1.67	1.53	1.63	2.08	1.90				1.7620
Total mean									1.9448	

程度迄上昇する結果となつて現われている。

高温湿潤期の影響は主として熔鋼の水素含有量の上昇に求められるものと考えられるが、確かに梅雨期と雖も原料、造滓剤、差物及び熔鋼の接する耐火物の水分及び湿分を可及的少くし、酸化期中沸騰精錬に依つて充分脱水素を行い、還元期中の水素の侵入を極力防止すれば、偏析きの発生は或程度抑制する事が出来るのである。通常の時期の溶解では、熔鋼中の水素量は3~6cc/100g程度であるが、梅雨期に於いては水素含有量の制御に特に留意しなければ6cc/100g以上になる事が多い。著者は熔鋼の水素含有量7~8cc/100gの鍛鋼品で50%以上の廃却品を出した苦い経験をなめている。この事実は梅雨期に於ける偏析きずの発生率の著しい上昇が、熔鋼の水素含有量の増加に負う処が大である事を物語るものである。

3. 熔鋼の Mn/Si 比

塩基性電気炉で熔製された14~21t鋼塊から鍛造され

た2種類の大型鍛鋼品C及びDに就いて各種の化学成分と、砂及び偏析きずの発生との関係を調査したが、Mn/Si比のみが比較的強い相関をなす事が知られた。以下その結果に就いて報告する⁶⁾。なお簡単な為に欠陥なきもの、砂のあるもの及び偏析きずのあるものを、夫々p, s及びcなる符号で区別する事とする。

Table 3, 4に夫々鍛鋼品C及びDのMn/Si比を欠陥の種類別に掲げる。表より之等の鍛鋼品ではMn/Si比が1.4~3.2の範囲内に分布し、p, s, c3群の平均値を比較すれば、鍛鋼品Cではp>c>s, 鍛鋼品Dではp~c>sとなつている事が判る。なおc, sに属する鍛鋼品は必ずしもその欠陥の為に廃却されたものではなく軽微な欠陥でも之を伴つた鍛鋼品は凡て夫々の群に編入した。併て次に統計量としてMn/Si比は略々正規分布をなすものとして、各群の母集団の異同を検定する事

⁶⁾ 日本鉄鋼協会第42回講演大会に於て講演

とする。

(1) 鍛鋼品 C に於ける検定:—各群に関する統計量には夫々 p, c, s なる添字を附す事とする。

$$u_p^2 = 3 \cdot 46360 / 31 = 0 \cdot 11173$$

$$u_c^2 = 1 \cdot 53924 / 14 = 0 \cdot 10995$$

$$u_s^2 = 1 \cdot 27624 / 13 = 0 \cdot 09817$$

となり棄却限界を求めて各群の分布を修正する。即ち、Table 5 に示した棄却限界外に出たものは之を捨て、順次に整理すれば各群の正規性が改善される。例えば p 群では危険率 1% でも 3・18 は限界外に出るから之を捨て、更に棄却限界を求めた。c, s 群では凡ての実測値が限界内に入るから、全実測値がその儘使用される。斯くして p 群に関しては Table 6 が得られた。

Table 5. Limits of rejection for each flaw of C.

Kind of flaw	Risk Limit	1 %		5 %	
		Upper	Lower	Upper	Lower
p		1・2565	3・1685	1・5025	2・9225
c		0・9317	2・9697	1・2157	2・6857
s		0・8871	2・8371	1・1621	2・5621

Table 6. Calculated values of statistics for group p of C.

Risk (α) %	Mean	Unbiased estimate of population variance	Limit of rejection	
			Upper	Lower
1	2・1813	2・49735/30	1・3753	2・9819
5	2・1573	1・96359/29	1・4865	2・7283

以上の計算値を用いて p, c 群間で母標準偏差を検定すれば

$$u_c^2 / u_p^2 = \begin{cases} 1 \cdot 321 (< 2 \cdot 74) & \alpha = 1\% \\ 1 \cdot 785 (< 2 \cdot 05) & \alpha = 5\% \end{cases}$$

となり、両者の間に有意差は認められない。次に母平均に関しては

$$\begin{aligned} & (\bar{x} - \bar{y})^2 / w^2 \cdot MN / (M + N) \\ & = \begin{cases} 5 \cdot 84 (< 7 \cdot 27) & \alpha = 1\% \\ 5 \cdot 24 (> 4 \cdot 06) & \alpha = 5\% \end{cases} \end{aligned}$$

となり、母平均の差は危険率 1% では有意とは認められないが、5% の場合には有意となる。又 p, s 群間でも少く共母平均の差が危険率 5% の差で有意である事は視察に依つて判る。

(2) 鍛鋼品 D に於ける検定:—この場合には視察に依

つても p, c 群間の相違は検定不可能である事が判る、又 p, s 群間でも特に s 群の標本数が少い為に検定不可能であるが、更に標本数が増せば検定し得る可能性が窺われる。

(3) 考察:—Mn/Si 比は古くから鋼中の非金属介在物に関連する重要因子として注目されて来た。A. McCance⁷⁾ は Mn 含有量が多いと熔鋼と取鍋ライニング等との相互作用が激しくなり、非金属介在物の増加し易い事を報告している。最近 C. B. Post 等はこの見解を継承して、12t 塩基性電気炉で製鋼された 1t 内外の鋼塊より鍛造された軸受鋼等の特殊鋼に就いて、Mn/Si 比と非金属介在物との関係を論じ、Mn/Si 比を低くする事に依つて非金属介在物の減少する事を報告している。

併し斯様な製品で問題となる非金属介在物と、炭素鋼の大型鍛鋼品に現れる砂及び偏析線サンドとの間には、或程度質的な相違があり、問題はしかく簡単ではない。普通大型炭素鋼鍛鋼品では Mn 量は比較的高く採られ、従つて Mn/Si 比は高くなつている。

他方 W. Meisemeyer は塩基性平炉で 0・5~1・0% 程度の Mn に対して Si を 1・5~2・0% 程度迄増加して、優秀な 10~14t 鋼塊を製造し得る事を示した⁸⁾。即ちこの場合には Mn/Si 比は 1 より遙かに小である。又この報告に依れば特に非金属介在物に関しては酸性平炉鋼と同様な性状が観察され、介在物は比較的微細になり、従つて大型の砂は防止され、偏析部も比較的清浄になる。

又上述の統計的検討に依れば、Mn/Si 比は 1・4~3・2 の範囲では少く共砂は Mn/Si 比の小なる程発生し易く特に鍛鋼品 C では偏析さびに關しても Mn/Si 比の小なる程欠陥に敏感である事が知られた。この事情は鍛鋼品 C に於いては Fig. 17 に示す様な粗朴な欠陥の頻度曲線よりも窺われる。

Mn 及び Si が熔鋼中に存在する場合の温度低下に伴う析出脱酸の理論に依れば、Mn/Si 比が 4 以上ならば凝固過程に於いて最初から粘性の低い硝子状の珪酸塩を生ずるが、Mn/Si 比が非常に小なる場合には、凝固の殆んど全過程を通じて微細な固態の無水珪酸の析出が継続し、Mn/Si 比が 4 に近附くに従つて初期の無水珪酸の析出期間が短縮される。即ち Mn/Si 比が非常に小なる場合には大型の砂は生じ難く、上述の W. Meisemeyer

⁷⁾ Jour. Brit. Ir. & St. Inst., 47 (1918), 1, 239, 286.

⁸⁾ St. u. Ei., 71 (1951), 8.

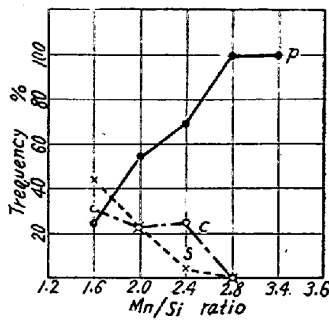


Fig. 17. Relation between Mn/Si ratio and appearing frequency of flaw in the case of steel forging C.

の場合には之に相当するものであろう。併し Mn/Si 比が、ある限度を超えると凝固初期には微細な無水珪酸が析出するが、途中から MnO の比較的多い硝子状の珪酸塩を生じ、比較的大型の砂が形成される様になる。而も斯様な場合には初期に生じた無水珪酸は浮揚が困難な為に熔鋼中に懸濁しているから、凝固時に於ける熔鋼中の非金属介在物の総量は、Mn/Si 比が大で凝固の初期から浮揚し易い大型の非金属介在物を生ずる場合よりも大であり最後に鋼中に残留する介在物の量も多く、凝固終期の MnO の流洋作用の為に介在物の大きさも比較的大となるであらう。併し Mn/Si が過度に大になると、析出脱酸生成物たる珪酸塩は浮揚し易く鋼中には残留し難いが、必然的に Mn 量が大となり、取鍋ライニング等と熔鋼との反応が盛んになるから、所謂砂かみの危険が増大する。依つて Mn/Si には適当な上限が存在する筈である。

以上の様に Mn/Si 比は鋼中の非金属介在物との関係が深いから、当然鍛鋼品に現れる砂及び偏析きず（主として S 型）と関係がある筈である。砂と関連が深い事は前述の統計結果が良く示している。即ち Mn/Si 比 1.4 ~ 3.2 の範囲では Mn/Si 比が小なる程砂が発生し易くなり、恐らく Mn/Si 比が非常に小なる場合には砂の量は多くなるであらうが、大型の砂は発生し難く、逆に Mn/Si 比が過大になると砂かみを生ずる様になり、実用上問題となる砂の発生に関して、Mn/Si 比に対して 2 個の危険範囲が期待されるのである。他方偏析きずと Mn/Si 比との相関は鍛鋼品 C に見られたに過ぎないが、この理由は日常作業では偏析きずを、Mn/Si 比と関係が深いと予想される S 型と C 型とに区別し難い事及び鍛鋼品 D は加工の関係上偏析きずが表面に現われ難い事に依るものと考えられる。従つて上述のデータ丈から結論を下す事は危険であるが、鍛鋼品 C に関する統計のみを基礎として考えると、程度の差はあるが偏析きずも

Mn/Si 比に対して砂と同様な傾向を示すものであろう。然りとすれば両欠陥に対しては Mn/Si 比の安全範囲が存在する事になり、之に単なる目安の意味で数値を与えれば、上述の統計結果を基礎として 2.5~4.0 として差支えないであらう。なお Mn/Si 比 < 1 の範囲に対しては、W. Meisemeyer の得た結果が真であるとすれば、ある安全範囲が期待されるが、実際には更に検討を要するであらう。

4. その他の製造条件

偏析きず特に S 型と Mn/Si 比との関係は前述の通りであるが、実際には鑄込時の最終値のみならず最終値に達する迄の途中の脱酸経過も偏析きずの発生に影響を及ぼす事が経験的に知られている。併し著者はこの点に就いて詳細に述べる程データを持合せていない。依つて唯特に精錬温度、C 脱酸の程度、Fe-Si の質及び使用法、之等と関係の深い所謂熔鋼の牙えの経過等に留意する必要がある事に言及するに止める。

次に大型鋼塊は赤材の儘鍛用加熱炉に装入する事が定石となつているが、この事は特に鋼塊に偏析線欠陥の存在する危険が大なる程重要であり、少く共偏析きずの害を最小にする為には不可欠の手段であらう。又偏析きずの出現には鍛造過程の適否が大きな影響を及ぼす事は当然予想される処であるが、高温に於いて一プレス毎の圧減率を小に採り、プレス回数を増す事が偏析きずの防止に有効である事が知られている。この事は前述の偏析きず SL 部の存在に関する考察からも推論される。又鍛造比が小さいと偏析きずが発生し易い事も我々の常に経験する処であるが、鋼塊欠陥の鍛着不十分なる事並びに必然的にプレス回数が少くなる事から当然予想される事柄である。

鍛造の熱的取扱も二次的な欠陥を誘起する原因となるが、実際に油冷乃至は水冷等の急冷処理を受けた鍛鋼品には二次的に開口したと思われる偏析きず及び伸長したと思われる大きな割れが観察される事がある。併し熱的取扱の不適のみに依つて新たに微細な毛割れを生じたと言う経験はない。又同様な意味において鍛造直後の空冷は偏析きずに対しては有害であらうが、空冷された鍛鋼品の組織を調査すると比較的高温で $\gamma \rightarrow \alpha$ 変態を完了しており、一次的な欠陥を起点としての毛割れの発生は考えられない事もないが、本質的な白点の発生のは特殊鋼の場合と比較して先ずないものと考えられる。但し大型鍛鋼品の A 偏析帯よりコアドリルに依つて試験片を採取して引張試験を行うと白点様の小さな異常破面を生ずる事がある。この破面は Fig. 5 の様に偏析きずの

破面そのものである場合及び偏析線中の硫化物が面状に分布した部分の破断面である場合と、微細な介在物を中心とした白点である場合とがある。併し後者の場合には予め引張試験前に脱酸素処理を行うと消失するから、この白点は熔接部の引張試験の際現れる魚目状破面と同様に、引張試験に於ける破断の際に生ずるものと考えられる。

III. 輪状偏析型と偏析きず

1. 輪状偏析型の分類

鍛鋼品に於いて鋼塊の A 偏析帯の横断面が現れる様な断面で硫黄写真をとると Fig. 18 の様な輪状の模様が見られる。この為に A 偏析を輪状偏析とも呼ぶ事がある。而してこの輪状偏析には色々な型があるが、之等は Fig. 18 に附記した様に略々 A, B, C, D, E の型に分類する事が出来る。以下各型の特徴に就いて簡単に説明すれば次の通りである。

(1) A型:—A 偏析帯の内部に特に濃度の高い輪状の帯の部分 (以下輪状帯部と呼ぶ事とする。)が存在し、特に外側の輪廓が明瞭であり、個々の偏析線の径は細く、而もその総数は少ないが、輪状帯部に集中して存在し、他の部分には偏析小素面のみが分布している。

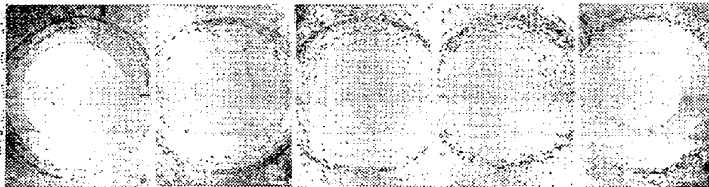


Fig. 18. Chart for type of annular segregation.

(2) B型:—A型に類似するが、輪状帯部の輪廓、殊に内側の輪廓が乱れ、輪状帯部に於ける偏析線の集中度はA型に劣り、輪状帯部からはみ出した偏析線が僅かに散見される。

(3) C型:—A 偏析帯の内側に近く比較的巾の狭い輪状帯部が存在し、その輪廓はA及びB型よりも不明瞭であつて、輪状帯部に対する偏析線の集中度はB型よりも遙かに劣り、輪状帯部の外方にも多数の輪析線が存在し全般的に偏析線の径が大である。

(4) D型:—輪状帯部の輪廓が極めて不明瞭でその巾が比較的広く、輪状帯部に対する偏析線の集中度が小さく、輪状帯部以外の部分にも多数の偏析線が存在し、偏析線の径はC型よりも更に大である。又場合に依つては局部的にB型を示す場合もある。

(5) E型:—D型に類似するが、輪廓の不明瞭な輪状

帯部の巾が比較的狭い。

以上の様な分類は勿論極めて定性的なものであつて、場合に依つてはその何れとも判定し難いものも存在する。又一般的に鋼塊が大型になると A, B 型が少くなる傾向がある。C 型はこれ等の型の中で最も少く、外観的に A, B, D (E) 型の間には連続的な変化を想定しての関連を看取する事が出来るのに対し、C 型はこの系列から外れた特殊な型の様にも思われる。

2. 偏析型と欠陥との関係

多数の同種類の鍛鋼品を日常検査し、その判定結果を統計的に検討する事に依り、鍛鋼品における欠陥発生と輪状偏析型との間に密接な関係のある事が発見された。

以下これ等の検討結果の一例として、209 例の或種の製品に就いて得られた結果を示す事とする。なお欠陥としては偏析きずと砂とのみに限り、他の欠陥を生じたものはその原因が明らかであり、又その数も僅かに 3 例に過ぎなかつたので、きずなきものの群に加えた。

Table 7 は統計結果を纏めたものであるが、更に輪状偏析型と欠陥頻度との関係を一目瞭然たらしめる為に Fig. 19 を掲げる。即ち図は各型に対する欠陥頻度の 100 分比を求めて、型 A, B, C, D, E の順にプロットしたものである。なお C 及び E は例数が少いから統計的結果に対する信頼度は夫丈少い事を附言して置く。

Table 7. Relation between type of annular segregation and appearing frequency of flaw.

Type of segregation	No.	Flawless	Segregation-flaw	Sand
A	38	34	0	4
B	82	71	1	10
C	13	9	1*	4
D	61	39	22**	1
E	15	7	8	0
Total	209	160	32	19

* Coexisting with sand.

** One of them coexisting with sand.

以上により先ず砂と偏析きずとの排他的な関係の存在する事は、既に屢々述べて来た処であるが、この場合にも明瞭に認められる。即ち偏析きずの頻度は A, B, C, D, E の順に多くなり、砂の頻度は C を除いて逆の傾向を示している。而してこの欠陥頻度の連続的な変化と、偏析型の外観の連続的な変化とが対応している事は、偏析型と欠陥頻度との間に、この種の統計としては稀に見る強い相関関係の存在する事を物語るものである。この事実はその背後に比較的簡明なる法則性の存在する事を予見せしめるものであろう。併しこの点に関する議論は

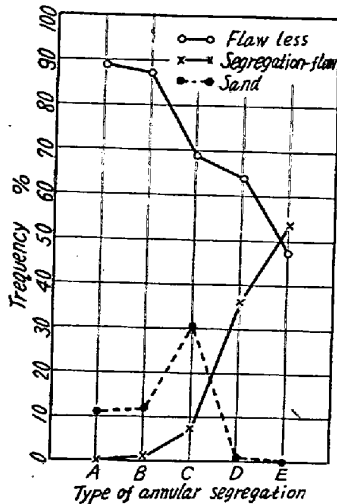


Fig. 19. Relation between appearing frequency of flaw and type of annular segregation.

第4報に譲る事とする。

IV. 結 言

大型炭素鋼鍛鋼品に現われる毛割れ状の偏析きずの性状を観察し、偏析きずは主として偏析線中に存在し、その状態によりC及びS型に分類される事を示した。又偏析きずの機械的性質に及ぼす影響を調査し、偏析きずはその状態により多少の破断抗力を有し、単なる亀裂ではない事を知った。更に偏析きずと組織との関係を調査し、その状態により各部がいくつかの型に分類されるが、何れも組織の生成に対して顕著な影響を及ぼした事が推論され、この事から偏析きずが鍛造終了前より存在する先天的な欠陥である事が結論された。次いで偏析きずの発生に及ぼす製造条件の影響を主として経験的に得られている知見に基づいて検討し、鑄込温度、熔鋼の水素含有量及び Mn/Si 比、鍛造比、熱処理条件等が顕著な影響を及ぼす事を説明した。終りに輪状偏析に種々の型式がある事を示し、これ等と偏析きずの発生との間に見事な相関関係の存在する事を例証した。(昭和 30 年 3 月寄稿)

白鉄の凝固速度について*

益 子 美 明**

SOLIDIFICATION RATE OF WHITE CAST IRON

Yoshiaki Masuko

Synopsis:

The solidification rate of white cast iron and the effect of casting temperature, mould temperature and casting size upon it were studied by means of the "pour-out method". By investigation of the roughness and microstructure in the solidification-front surface, the mechanism of solidification was discussed.

The results obtained were summarized as follows:—

(1) In the solidification of white cast iron, the linear relation between the thickness of solidified layer and the square root of solidification time was satisfied only in the early stage of solidification and it deviated from the above relation as time proceeded. Then, the solidification curve was the form of S letter which had two points of inflexion, in other words, white cast iron was solidified through three stages.

(2) From the linear relation in the early stage, the following equation, what was called an "equation of rate of skin formation" could be derived,

$$d = k\sqrt{t} - a$$

where, d: solidified layer (in inch)
t: solidification time (in mn)
k: solidification constant
a: constant

k or "rate of skin formation" decreased as the casting temperature and mould temperature became higher and the casting size became larger.

* 昭和 28 年 4 月本会講演大会にて講演 ** 住友金属工業株式会社製鋼所