

水スプレーと高温金属試料間の熱伝達係数の数式化

三塚 正志*

Numerizing of Heat Transfer Coefficient between Water Spray and Heated Metal Specimens

Masashi MITSUTSUKA

Synopsis : The author made four kinds of water spray cooling experiments to numerize heat transfer coefficient h between water spray and a heated specimen as a function of water flux W , water pressure P and specimen surface temperature θ_s . In this report, the author described numerizing of the equation: $h=f(W, P, \theta_s)$. The specially fixed water flux W_d (W1 to W4), water pressure P_d (P1 to P4), specimen surface temperature θ_{sd} (50, 75, to 900°C), and the most probable values of heat transfer coefficient h_{sa} obtained from these experiments were introduced for numerizing of the above-mentioned equation.

The principal contents are as follows: ① In each θ_{sd} , the exponents $n1$ to $n4$ of the equation: $h_{sa}=AW_d^n$ corresponding to P_d : P1 to P4 respectively were obtained (A is constant). The mean exponent \bar{n} is $(n1+\dots+n4)/4$. ② In each θ_{sd} , the exponents $m1$ to $m4$ of the equation: $h_{sa}=BP_d^m$ corresponding to W_d : W1 to W4 respectively were obtained (B is constant). The mean exponent \bar{m} is $(m1+\dots+m4)/4$. ③ By using \bar{n} and \bar{m} , the equation: $h=C(W^{\bar{n}}P^{\bar{m}})$ among arbitrary W , arbitrary P and h was numerized in every θ_{sd} (C is constant). ④ h_1 and h_{i+1} corresponding to θ_{sd} : θ_{sdi} and θ_{sdi+1} respectively were calculated by using the equation: $h=C(W^{\bar{n}}P^{\bar{m}})$. Next, by using the relations: [h_i vs. θ_{sdi}] and [h_{i+1} vs. θ_{sdi+1}], the equation: $h_x=f(\theta_{sx})$ to obtain h_x corresponding to an arbitrary θ_{sx} between θ_{sdi} and θ_{sdi+1} , was numerized.

Key words : cooling; heat treatment; continuous casting; thermochemical-treatment.

1. 緒言

高温鋼材の水冷過程の伝熱計算には、境界条件として冷却水と鋼材間の熱伝達係数 h が必要である。 h は水側条件と鋼材側条件に影響される。前者には冷却方法（スプレー、ラミナ、浸漬冷却など）、冷却水の鋼材への噴射状態と衝突圧力、水温などが、後者には鋼材の表面温度 θ_s と表面性状（スケールの付着状態、表面粗さなど）、鋼材の寸法・形状と配置などが含まれる。

著者はスプレー冷却について、試料への噴射水量密度 W 、ノズルヘッド内水圧 P および θ_s が h に及ぼす影響を定量化・数式化する研究を行った。実験には、水量分布の均一性を重視しフルコーンスプレーを用いた。スプレー冷却では、試料への衝突圧力はノズル・試料間距離に影響されるので、この値を約 170 mm に固定し、衝突圧力の代わりに上記の P を用いた。試料寸法は 204 mm ϕ \times 30 mm t で、試料を垂直に配置しその両面にスプレーを噴射した。試料の酸化状態は沸騰熱伝達に強く影響するが、酸化状態を定量化することはむずかしいので、実験には高温酸化された試料を用いた。水温も冷却に影響するが、実験には常温の水を用いた (10~30°C)。

h の定量化・数式化の対象温度範囲を 50~900°C にした。この範囲には、非沸騰、核沸騰、核膜共存沸騰、膜沸騰が

含まれるので、1種類の実験で全温度範囲の h を得ることは不可能である。そこで、それぞれの沸騰状態に対応する4種類の実験を行った。これらの実験結果を総合解析することによって、これらの実験から得られる最も確からしい h 、すなわち「熱伝達係数の最確値 h_{sa} 」を求めた。次に、この h_{sa} を用いて、スプレー冷却の「 $h=f(W, P, \theta_s)$ 」を数式化した。

別報¹⁾に、各実験の概要と主な実験結果、これらの結果を用いて得られた h の最確値曲線、この曲線から読み取った最確値 h_{sa} などについて記述した。本稿では、別報¹⁾の h_{sa} を用いて上記の式の関数関係を数式化する方法、得られた関係式、 W と P が h に及ぼす影響、 θ_s と冷却水の沸騰状態の関係、 θ_s と h の関係、 h_{sa} の値と他の研究者 h の値の比較などについて記述する。

2. 代表値と最確値

水量密度 W 、水圧 P および表面温度 θ_s と熱伝達係数 h の間の関係式：(1)式

$$h=f(W, P, \theta_s) \dots \dots \dots (1)$$

を数式化するには、それぞれの代表値： W_d 、 P_d および θ_{sd} が必要である。それぞれの代表値の記号と値は、

W_d [L/min·m ²]	P_d [MPa]	θ_{sd} [°C]
W1: 50	P1: 0.052	θ_1 : 50
W2: 100	P2: 0.089	θ_2 : 75
W3: 200	P3: 0.157	↓ 25°C 間隔
W4: 400	P4: 0.275	θ_{35} : 900

である。各代表値に対応する熱伝達係数の最確値 h_{sa} の値を別報¹⁾に記述してある。

3. 総合解析の方法

総合解析すなわち(1)式の数式化に際しては、Fig. 1に示すように4種類の実験(定常実験、非沸騰実験、低温実験、高温実験)の結果を用いて、手順1~3に従って数式化した。このため、代表表面温度 θ_{sd} における代表水量密度 W_d と代表水圧 P_d に対応する熱伝達係数の最確値 h_{sa} を用いる。 θ_{sd} は50から900°Cまでの35レベル、 W_d はW1~4の4個、 P_d はP1~4の4個である。なお、 h_{sa} の値については、別報¹⁾を参照されたい。

3.1 $h=f(W, P)$ の数式化 (手順2)

各 θ_{sd} において、 W_d と h_{sa} の関係を(2)式、 P_d と h_{sa} の関係を(3)式

$$h_{sa} = AW_d^n \dots \dots \dots (2)$$

$$h_{sa} = BP_d^m \dots \dots \dots (3)$$

とし、最小2乗法でそれぞれ定数A、Bと指数n、mを求めた。これらの4個のnとmの平均値をそれぞれ \bar{n} 、 \bar{m} とした。(2)式と(3)式の間があるから、(4)式が成り立つ。

$$h_{sa} = C(W_d^{\bar{n}} P_d^{\bar{m}}) \dots \dots \dots (4)$$

(4)式は、 W と P が同時に h に及ぼす影響を表す関係式である。(4)式の確認と定数Cを求めるため、 $(W_d^{\bar{n}} P_d^{\bar{m}})$ と h_{sa} の関係を(5)式と仮定する。

$$h = C(W^{\bar{n}} P^{\bar{m}})^l \dots \dots \dots (5)$$

各 θ_{sd} について、(W1~4)×(P1~4)の16個の $(W^{\bar{n}} P^{\bar{m}})$ とそれぞれこれらに対応する h_{sa} を用いて、(5)式の定数Cと指数 l の値を最小2乗法で求める。 l の値は1になるので、(4)

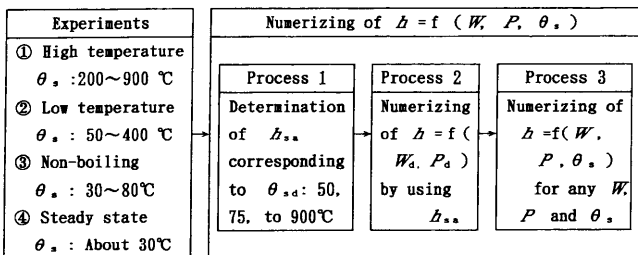


Fig. 1. Process of numerizing of an equation: $h=f(W, P, \theta_s)$.

式と(5)式は同じである。各 θ_{sd} について、(4)式から任意の W と任意の P に対応する h を求めることができる。

3.2 $h=f(W, P, \theta_s)$ の数式化 (手順3)

手順3の(1)式の数式化の方法は次のとおりである。別報¹⁾に示すように、 θ_s と h の間には「 θ_s -log h 」の関係があるから、狭い温度範囲では θ_s と h の関係を(6)式と仮定する (a, b: 定数)。

$$\log h = a + b\theta_s \dots \dots \dots (6)$$

次に、任意の θ_{sd} を θ_{sdi} とし、 $i=1:50, i=2:75 \rightarrow i=35:900$ °C とする。 θ_{sx} が $\theta_{sdi} < \theta_{sx} < \theta_{sdi+1}$ の場合、この θ_{sx} に対応する h を h_x とする。 θ_{sdi} と θ_{sdi+1} に対応する h を(4)式から求め、それぞれ h_i と h_{i+1} とする。比例関係を用いると、 h_x は(7)式から得られる。

$$\log h_x = \log h_i + \left[\frac{\log h_{i+1} - \log h_i}{\theta_{sdi+1} - \theta_{sdi}} \right] \times (\theta_{sx} - \theta_{sdi}) \dots \dots \dots (7)$$

3.3 $h=f(W, P, \theta_s)$ の計算法

(1)式: $h=f(W, P, \theta_s)$ の計算法は、次のとおりである。

- ① 任意の表面温度 θ_{sx} が、「 $\theta_{sdi} < \theta_{sx} < \theta_{sdi+1}$ 」にあるものとする。
- ② (4)式を用いて、任意の W と任意の P に対応する θ_{sdi} と θ_{sdi+1} における h_i と h_{i+1} をそれぞれ求める。
- ③ 上記①の θ_{sdi} 、 θ_{sx} および θ_{sdi+1} の値と上記②の h_i と h_{i+1} の値を(7)式に代入して h_x を求める。この h_x が、任意の W 、任意の P および任意の θ_s に対応する h である。

4. 総合解析の結果

4.1 熱伝達係数=f(水量密度, 水圧) の数式化

代表水量密度 W_d : W1~4 と熱伝達係数の最確値 h_{sa} の関係の例を Fig. 2 に示す。このような関係は、代表表面温度 θ_{sd} が35レベル、代表水圧 P_d が4個なので合計140ケースある。すべてのケースについて、最小2乗法で(2)式の定数Aと指数nを求めた。各 θ_{sd} について、 P_d : P1~4に対応する4個のnの平均値 \bar{n} を求め、この値を Table 1 に示す。

P_d : P1~4 と h_{sa} の関係の例を Fig. 3 に示す。上記と同様に、最小2乗法で(3)式の定数Bと指数mを求めた。各 θ_{sd} について、 W_d : W1~4に対応する4個のmの平均値 \bar{m} を求め、この値も Table 1 に示す。

各 θ_{sd} に対応する \bar{n} と \bar{m} が得られれば、各 θ_{sd} において $(W_d^{\bar{n}} P_d^{\bar{m}})$ と h_{sa} の間に(5)式が成り立つ。 $(W_d^{\bar{n}} P_d^{\bar{m}})$ と h_{sa} の関係の例を Fig. 4 に示す。最小2乗法で(5)式の定数Cと指数 l を求めた。すべての θ_{sd} において、 l の値は1.0000 となったので、(4)式と(5)式は同じである。両式の定数Cの値も Table 1 に示す。(4)式から各 θ_{sd} において、任意の W と任意の P に対応する h の値を求めることができる。

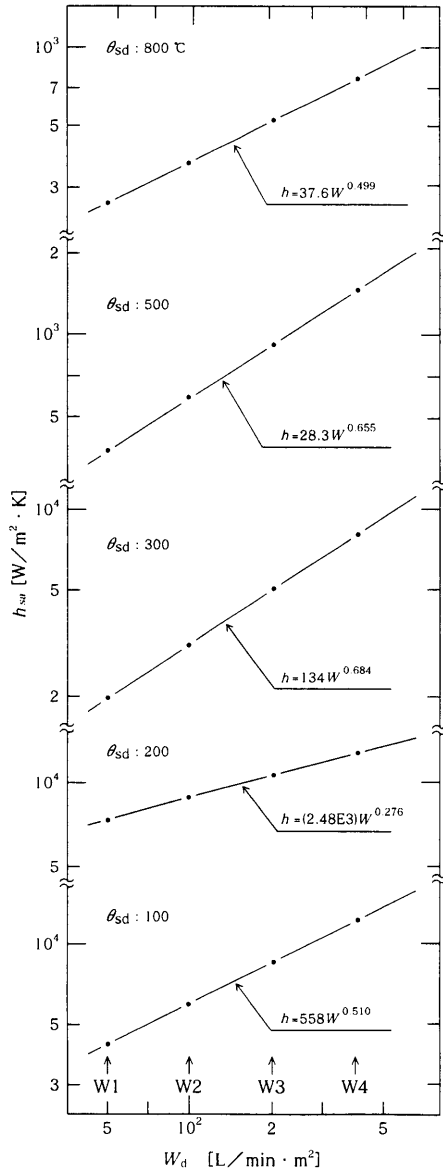


Fig. 2. An example of relationship between W_d and h_{sa} (P_d : P3).

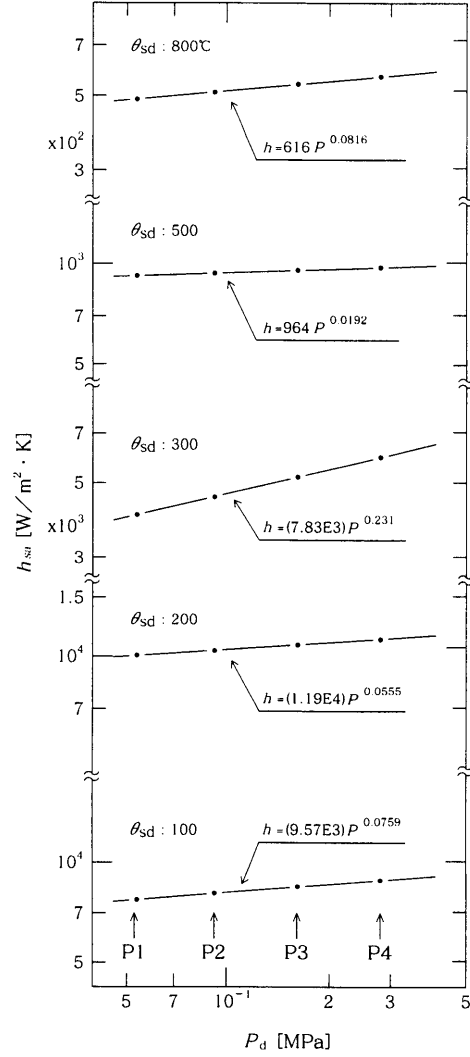


Fig. 3. An example of relationship between P_d and h_{sa} (W_d : W3).

Table 1. Values of the constant C and the mean exponents \bar{n} and \bar{m} in Eq. (4).

θ_{sd}	\bar{n}	\bar{m}	C	θ_{sd}	\bar{n}	\bar{m}	C	θ_{sd}	\bar{n}	\bar{m}	C
50	0.722	0.112	1.92E2	325	0.709	0.283	1.52E2	625	0.595	0.0825	3.12E1
75	0.621	0.0920	3.41E2	350	0.708	0.257	1.15E2	650	0.578	0.0825	3.29E1
100	0.519	0.0887	6.28E2	375	0.702	0.210	8.56E1	675	0.563	0.0853	3.49E1
125	0.421	0.0756	1.12E3	400	0.696	0.172	6.59E1	700	0.542	0.0912	3.82E1
150	0.315	0.0607	2.06E3	425	0.692	0.125	4.96E1	725	0.530	0.0980	4.03E1
175	0.261	0.0706	3.00E3	450	0.679	0.0869	4.04E1	750	0.516	0.100	4.27E1
200	0.299	0.105	2.66E3	475	0.669	0.0594	3.41E1	775	0.503	0.101	4.50E1
225	0.457	0.162	1.20E3	500	0.653	0.0439	3.13E1	800	0.493	0.103	4.71E1
250	0.627	0.223	4.54E2	525	0.645	0.0406	2.90E1	825	0.488	0.103	4.80E1
275	0.685	0.249	2.70E2	550	0.625	0.0495	2.98E1	850	0.484	0.106	4.91E1
300	0.721	0.282	1.86E2	575	0.613	0.0664	3.05E1	875	0.483	0.107	4.93E1
				600	0.604	0.0831	3.12E1	900	0.483	0.107	4.94E1

4.2 熱伝達係数=f(表面温度)の計算法

任意の表面温度 θ_s に対応する熱伝達係数 h の計算法については、3.2節に記述した。

4.3 熱伝達係数=f(水量密度, 水圧, 表面温度)の計算法

任意の W , 任意の P および任意の表面温度 θ_s に対応する

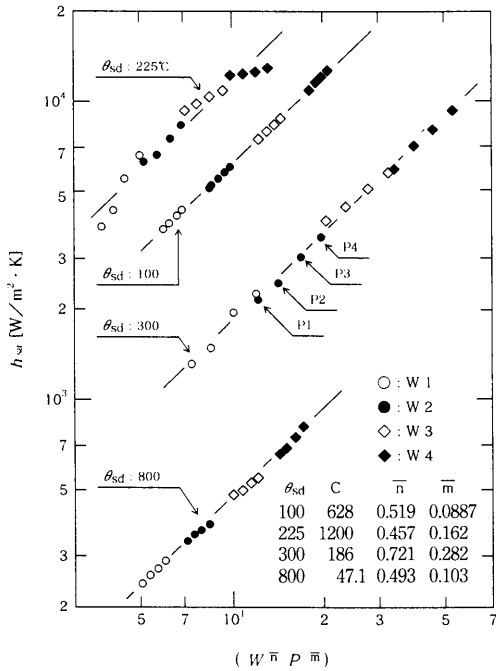


Fig. 4. An example of relationship between $(W_d^n P_d^m)$ and h_{sa} ($h_{sa} = C(W_d^n P_d^m)$) in each θ_{sd} .

熱伝達係数 h の計算法については、3.3 節に記述した。

5. 考察

5.1 熱伝達係数=f(水量, 水圧) の検討

Table 1 の C, \bar{n} および \bar{m} の値を (4) 式に代入すると、任意の代表表面温度 θ_{sd} において、任意の W と任意の P に対応する熱伝達係数の計算値 h_{ca} が得られる。 $(W1\sim4) \times (P1\sim4)$ の 16 個の値を (4) 式に代入して h_{ca} を求め、これらの計算条件と同じ条件に対応する h_{sa} との差を検討する。この検討には (8) 式で定義する σ を用いる。

$$\sigma = (h_{ca} - h_{sa}) / h_{sa} \dots\dots\dots (8)$$

各 θ_{sd} について、 σ の絶対値の平均値 $\bar{\sigma}$ と σ の最大値 σ_{max} (正と負がある) を Table 2 に示す。

この表から、

- ① θ_s : 200~275°C の範囲で $\bar{\sigma}$ と σ_{max} は大きいこと、
- ② θ_s : 200~275°C の範囲を除くと、 $\bar{\sigma}$ は約 3% 以内であること、
- ③ θ_s : 225~250°C の範囲を除くと、 σ_{max} は約 10% 以内であること、

がわかる。

θ_s : 200~275°C の範囲では、Fig. 5 に示すように n と m の値が大きく変動している。このように変動の大きい n と m のそれぞれの平均値 \bar{n} , \bar{m} を用いるので、(4) 式から計算される h_{ca} の値が変動するは当然である。この温度範囲では激しい核沸騰から膜沸騰へ移り始めるため、沸騰現象が非常に不安定である。この沸騰現象の不安定さが n と m の変

Table 2. Comparison of the values of h obtained from Eq. (5) with that of h_{sa} .

θ_{sd}	$\bar{\sigma}$	σ_{max}	θ_{sd}	$\bar{\sigma}$	σ_{max}	θ_{sd}	$\bar{\sigma}$	σ_{max}
50	1.34	+6.1	325	2.16	-4.3	625	3.14	+7.5
75	1.34	+6.5	350	2.43	+5.1	650	3.15	+7.2
100	1.13	+3.6	375	3.29	+10.7	675	2.73	+6.8
125	1.33	+3.2	400	3.18	+8.9	700	2.36	+5.6
150	2.01	+3.5	425	3.50	+10.2	725	2.26	+5.0
175	1.29	-5.3	450	3.16	+9.7	750	2.10	+4.2
200	3.33	+9.1	475	3.09	+7.5	775	2.04	+3.8
225	6.76	+17.9	500	2.90	+5.6	800	1.89	-4.2
250	6.79	-15.4	525	2.71	+4.6	825	2.04	-4.0
275	3.83	-10.2	550	2.79	-5.8	850	2.15	-4.4
300	3.08	-7.3	575	3.00	-5.9	875	1.91	-4.3
			600	2.98	+6.2	900	2.17	-4.7

$$\sigma = [(h_{ca} - h_{sa}) / h_{sa}] \times 100 [\%]$$

$\bar{\sigma}$: Mean value of sixteen σ [%]

σ_{max} : Maximum value in sixteen σ [%]

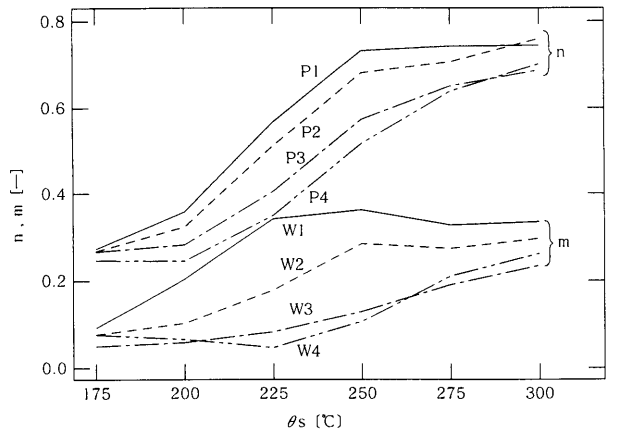


Fig. 5. Relationship between θ_s and the exponents n in Eq. (2) and m in Eq. (3).

動、換言すれば $\bar{\sigma}$ と σ_{max} を大きくする主な原因と考えられる。熱伝達現象が安定している温度域、すなわち θ_s : 200~275°C を除く温度域では、 n と m の変動が小さいから、Fig. 4 の θ_{sd} : 100, 300 および 800°C のように、 $(W_d^n P_d^m)$ と h_{sa} の関係の変動も小さい。この結果、 $\bar{\sigma}$ も σ_{max} も小さくなる。

以上の検討から、任意の W と P に対応する h を計算する (4) 式 (Table 1 の値を使用) は、スプレー冷却の伝熱計算に適用できるものと考えられる。ただし、 θ_s : 200~275°C の範囲では、(4) 式から計算される h にはかなりの誤差が含まれる。

5.2 熱伝達係数=f(表面温度) の検討

任意の水量密度・水圧・表面温度 θ_s に対応する熱伝達係数 h を求めるため、3.2 節の方法を採用した。このとき隣り合う代表表面温度 θ_{sd} の間では、 θ_s と $\log h$ の関係を直線と仮定し (6) 式を導入した。別報¹⁾ に示すように、 θ_s に対する h の変化量 $dh/d\theta_s$ は、激しい核沸騰域の近傍の θ_s : 150~225°C で最も大きい。この変化量の大きい P1-W1

とP4-W1について、別報¹⁾の原図から得られる最確値 h_{sa} の値と(7)式から得られる計算値 h_{ca} の値を比較すると、

	P1-W1	P1-W1	P4-W1
表面温度[°C]	162.5	187.5	187.5
別報 ¹⁾ の h_{sa}	5.64E3	5.47E3	7.00E3
(7)式の h_{ca}	5.50E3	5.32E3	6.82E3
差[%]	2.5	2.7	2.6

である。 θ_s には隣り合う θ_{sd} の中央の値を採用した。W1の θ_s :150~225°Cでは、両者の差は最大で約3%である。他の温度域では $dh/d\theta_s$ が小さいから、両者の差は約1%以内である。以上の検討から、任意の θ_s に対応する h の算出に(7)式を採用することは妥当である、と考えられる。

5.3 水量、水圧および表面温度が冷却に及ぼす影響

実機の冷却設備では、冷却強さは水量密度 W によって制御されることが多い。作業中にノズルを交換することはむずかしいので、 W は水圧 P によって制御されている。この結果、 W と P が同時に冷却強さに影響しているものと推測される。したがって、 W と P が同時に冷却能力に及ぼす影響を調べることが必要である。(2)式(P_d :一定)の指数 n と(3)式(W_d :一定)の指数 m は、 W と P がそれぞれ単独に h に及ぼす影響を表す。Table 1の \bar{n} と \bar{m} を θ_s の関数としてFig. 6に示す。この図から、

- ① すべての温度域において、 \bar{n} も \bar{m} も正であること、
 - ② すべての温度域において、 $\bar{n} > \bar{m}$ であること、
 - ③ \bar{n} と \bar{m} の値は θ_s に強く影響されること、
 - ④ θ_s :約325°Cで \bar{n} も \bar{m} も極大になること、
- がわかる。

①の現象は、すべての温度域において、 W と P がそれぞれ冷却に寄与することを示している。スプレーが試料に衝突する状況は、ノズル距離 D 、水滴径 d などに影響される。解析に用いた「 P と W の関係」は垂直下向きスプレーで測定されたが、本実験の試料は水平噴射のスプレーで冷却された。重力の作用でノズル-試料間で水滴が降下すると、試料に衝突した実際の水量と解析に用いた水量が異なるこ

とになる。水滴の降下状況の観察結果によると(D :170 mm)、 d の大きい水滴はほとんど降下しないが、 d の小さい水滴は降下した。 d が小さくなると、ノズル-試料間で水滴が減速される度合いが大きくなるため、重力の作用で降下するようである。噴出流量の小さいノズルの場合(スプレーの広がり角度も小さい)、 P の指数 m が負になることもあった²⁾。この原因として、水滴の降下による試料への衝突水量の減少が考えられる。したがって、①の現象は本実験の条件のもとで得られた結果である、と理解すべきである。

②の現象は、 W と P がそれぞれ単独で冷却へ寄与する割合は、すべての温度域で「 $W > P$ 」であることを表している。

③の現象は、冷却水の沸騰状態が冷却に強く影響することを示唆している。 θ_s が175°Cの近傍で \bar{n} と \bar{m} が極小になる現象は、この温度域で激しい核沸騰が起こるためと考えられる。この温度域では、試料に冷却水が接触していれば水は激しく沸騰するから、沸騰可能な限界水量を越える水は、沸騰しないで落下するため冷却にはほとんど寄与しないことになる。文献³⁾に記述したように、W1(50 L/min·m²)は限界水量を越えている。この結果、代表水量W1~4から得られた \bar{n} が小さくなったものと考えられる。また、冷却水は試料に接触すれば激しく沸騰するから、水滴の衝突速度も冷却にほとんど関与しないことになる。この結果、 \bar{m} も小さくなったものと考えられる。

④の現象については、この温度域では膜沸騰と核沸騰が共存しており、一方蒸気膜を通して伝導と放射によって試料から冷却水へ伝達される熱量 Q が小さいため、蒸気膜は不安定な状態になっている。冷却水による蒸気膜の破壊割合は、試料に衝突する冷却水の衝突圧力 p_1 に比例して増大する。蒸気膜が破壊されるとそこで沸騰が起こるため熱伝達は急増する。 p_1 は W と P の両方に比例するので、この温度域で \bar{n} と \bar{m} の両方が極大になるものと考えられる。

θ_s が約450~約800°Cの範囲では、 θ_s の上昇につれて \bar{n} は単調に減少している。また θ_s が約350~約500°Cの範囲では、 θ_s の上昇につれて \bar{m} は単調に急減している。これらの現象の理由は、 θ_s の上昇につれて Q が増大し、蒸気膜がより安定化するため、冷却水による蒸気膜の破壊割合が減少するためと考えられる。

Müllerら⁴⁾とJunk⁵⁾によると(Fig. 7参照)、水スプレー冷却では θ_s が約800°C以上で定常状態を実現できる、とのことである。この事実は、この温度域ではほぼ完全な膜沸騰になっているものと推測される。完全な膜沸騰の場合、試料から水への熱伝達は蒸気膜を通しての伝導伝熱と放射伝熱によって行われる。この結果、熱流束 q と熱伝達係数 h は、蒸気膜厚さの関数になる。試料が1000°C(放射率 ϵ :0.8)、水が100°C(ϵ :0.95)の場合、蒸気の熱伝達率を0.041 W/m·Kとすると、 q と h は蒸気膜厚さの関数になり、これ

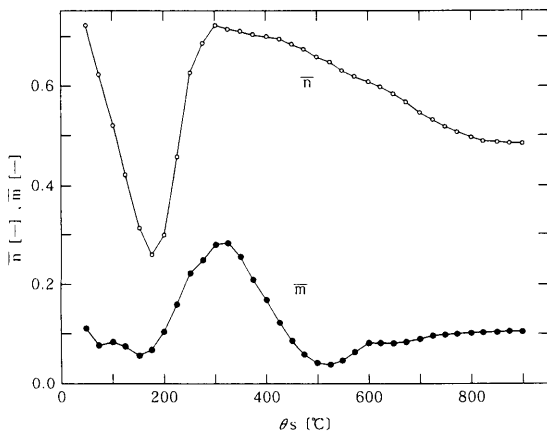


Fig. 6. Relationship between θ_s and the mean exponents \bar{n} and \bar{m} .

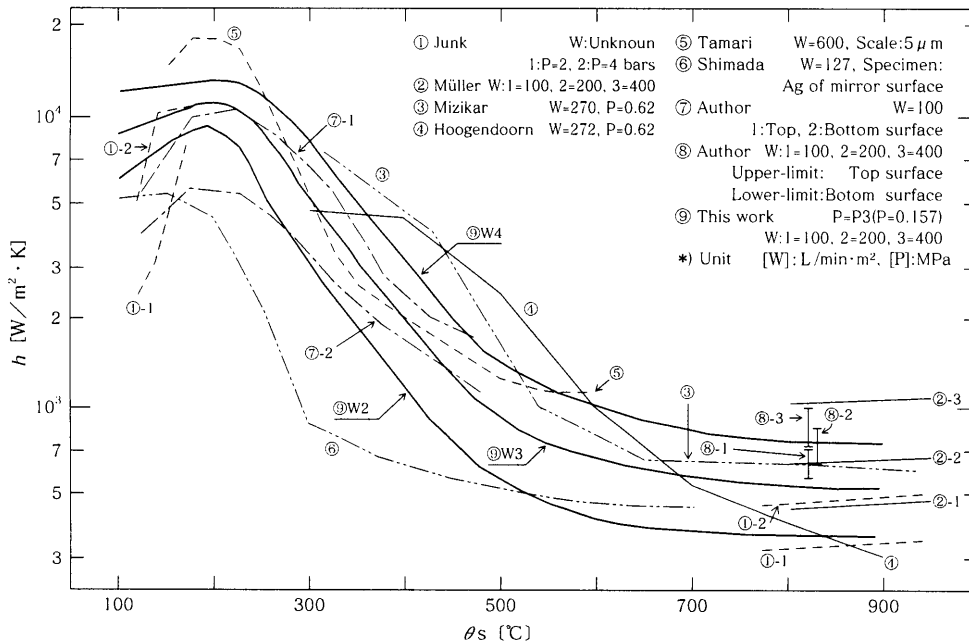


Fig. 7. Comparison of h_{sa} of this work with h of other researchers.

らの計算値は、

蒸気膜厚さ [μm]	20	50	100	200	500
放射 q [MW/m^2]	115	115	115	115	115
伝導 q [MW/m^2]	1838	733	366	184	73
放射 h [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$]	117	117	117	117	117
伝導 h [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$]	1875	748	373	187	74
伝導 h + 放射 h [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$]	1992	865	490	305	191

である。一方、各研究者の膜沸騰域における h の測定値 (伝導 h + 放射 h) は、

Müllerら (1000°C)	Junk (1000°C)	本実験 (900°C)
W: 100 200 400 P: 2 4 6 bars	W: 100 200 400	W: 100 200 400
498 697 1094	372 523 669	361 523 756

である。これらの結果から、膜沸騰域における蒸気膜厚さは $50 \sim 200 \mu\text{m}$ と推測され、この厚さはスプレーの p_i に逆比例して減少するようである。

このような理由から、 θ_s が約 800°C 以上の範囲ではほぼ完全な膜沸騰状態になり、試料から水への熱伝達は蒸気膜を通しての伝導伝熱と放射伝熱によって行われるようである。放射伝熱の q は蒸気膜の厚さに影響されないであろう。これに対して、蒸気膜の厚さがスプレーの p_i に逆比例して薄くなるものと仮定すると、伝導伝熱の q は蒸気膜厚さに逆比例して増大するはずである。この結果、スプレーの p_i が h に影響することになる。このような理由から、この温度域では \bar{n} (約 0.5) も \bar{m} (約 0.1) もほぼ一定になるものと考えられる。

θ_s が約 175°C 以下の範囲では、 θ_s の上昇につれて \bar{n} は単調に急減し、 \bar{m} は単調に漸減している。非沸騰域の熱伝達は試料表面に接触している水の温度境界層の擾乱によって促進される。温度境界層の擾乱度合いは冷却水の p_i に比例

するであろう。この p_i への寄与割合が「水量 > 水圧」のため、 $\bar{n} > \bar{m}$ になるものと考えられる。沸騰域に入ると、 θ_s の上昇につれて核沸騰の面積割合が増大するため \bar{n} が減少し、 θ_s : 175°C の近傍で最も激しい核沸騰が起こるため \bar{n} が極小になるものと考えられる。

θ_s が約 $200 \sim 300^\circ\text{C}$ の範囲では、 θ_s の上昇につれて \bar{n} と \bar{m} は単調に急増している。この理由は、上記のようにこの温度域では θ_s の上昇につれて、不安定な膜沸騰の面積割合が増大するためと考えられる。

5.4 熱伝達係数の最確値と文献の値との比較

本実験で得られた熱伝達係数の最確値 h_{sa} と各研究者の熱伝達係数 h を比較検討する。検討には、実験条件が明記されており、かつ本実験と近い条件で行われた実験の結果を採用する。各研究者の主な実験条件を Table 3 に、 h を Fig. 7 に示す。

5.4.1 各研究者の実験条件

(1) 定常状態実験

Junk⁵⁾ ①と Müllerら⁴⁾ ②は、小さい鋼試料を通电加熱し、試料温度：約 800°C 以上で定常状態を実現している。約 800°C 以下では定常状態を維持できないようである。①の水圧 P は 2, 4, 6 bars で水量密度 W は記載されていない。②の実験式には W とスプレーの噴出速度は導入されているが、 P は導入されていない。

(2) 非定常状態実験

各研究者は高温鋼材 (連続鋳造、厚板など) の水冷に適用することを前提にして水スプレー冷却実験を行っているため、炭素鋼や 18Cr-8Ni 鋼を試料に用いている。Mizikar⁶⁾ ③と Hoogendoornら⁷⁾ ④は 18Cr-8Ni 鋼試料を用い、加熱温度は③: 1093°C 、④: 1000°C である。本実験

Table 3. Experimental conditions of the other researchers' experiments.

*A	Researcher	Specimen			Heated temp. [°C]	Nozzle		W [L/min·m²]	P [MPa]
		Material	Size [mm]	*B		Distance	Type		
A1	①Junk	*1	2.5tx83wx850L	B1	800-1300	600mm	*C3	Unknown	0.2-0.59
	②Muller	Steel	6-10tx20wx60L	B1	800-1200	100-200	C1, C2	18-540	0.06-0.53
	③Mizikar	18-8	16tx127x127	B1	-1093	102-305	C1	163-1140	0.07-0.62
	④Hoogendoorn	18-8	25tx185φ	B2	-1000	170-550	C1	36-1500	0.1-0.098
	⑤Tamari	Steel	10tx140wx170L	B2	1200	Unknown	C1	600, 1200	Unknown
A2	⑥Shimada	Ag	2t x 30φ	B1	800	400-500	C4	33-127	*6
	⑦Author	Steel	*2	B2	- 630	600	C2	5-100	0.06-0.78
	⑧Author	Steel	*3	B2	*4	*5	C2	100-1120	0.01-0.26
	⑨-1 This work	18-8	30tx204φ	B1	1025	170	C1	34-1000	0.04-0.063
	⑨-2 This work	Cu, Al	30tx204φ	B1	470	170	C1	34-1000	0.04-0.063

*A)A1:Steady state experiment, A2:Unsteady state experiment, *B)B1:Vertical placement, B2:Horizontal placement, *C)C1:Fullcone spray, C2:Flat spray, C3:Oval spray, C4:Air-atomizer
*1)Heat-resisting steel, *2)22-51tx550wx1000L, *3)2.2-3.8tx about 1000wxL(strip) *4)Mean temperature:about 825 °C, *5)Top:1000, bottom:139, *6)Impinging speed:9-15m/s

⑨-1の試料も18Cr-8Ni鋼で加熱温度は約1025°Cである。玉利ら⁸⁾⑤は炭素鋼試料を1200°Cに加熱し、冷却過程に工夫をこらし試料表面のスケールの厚さを調整し(5と10μm)、約750°Cから水冷している。

著者ら⁹⁾⑦では、幅広鋼板試料を水平に配置して630°Cに加熱し、α領域のみで実験した。著者ら¹⁰⁾⑧では、連続熱延工場ROTの入側に実験装置を設置し、γ領域(平均鋼板温度:約825°C)のみで実験した。

上記のように沸騰熱伝達では試料表面の酸化状態が熱伝達に強く影響するから、銅以外の試料を用いた実験の結果も採用した。島田ら¹¹⁾⑥は鏡面のAg試料を800°Cに加熱し、気流噴霧器からの噴霧流で冷却した。本実験⑨-2では、非鏡面かつ酸化されているCu試料とAl試料を用いた。

5.4.2 本実験と各研究者の熱伝達係数の比較

本実験の代表として、データの信頼性が高い代表水圧:P3で代表水量:W2~4の最確値 h_{sa} を用いる。

(1) 膜沸騰域における熱伝達係数の比較

完全な膜沸騰域の熱伝達は、5.3節に記述したように蒸気膜を通して伝導と放射で行われる。伝導と放射による h をそれぞれ h_{co} と h_{ra} とすれば、 $h=h_{co}+h_{ra}$ である。 θ_s が一定の場合、 h_{co} は蒸気膜の厚さに逆比例して減少するが、 h_{ra} は一定である。文献⑧の θ_s が約825°Cなので、825°Cにおける各文献の h は、

本実験⑨		文献②		文献⑧下面		文献①	
W	h	W	h	W	h	(P)	h
100	363	100	454	100	576	(2.0)	330
200	535	200	651	200	640	(4.0)	469
400	756	400	1047	400	733	—	—

である。本実験の h は、②と⑧のそれらより小さい。⑧は偏平スプレー冷却で、かつノズル-試料間距離は139mmと小さい。したがって、⑧の h と本実験の h を単純に比較できない。①の W は不明だが、この h と本実験の h はほぼ等しい。以上の検討結果から、膜沸騰域における本実験の

h は文献のそれらより小さいようである。

(2) 核沸騰域における熱伝達係数の比較

h の極大値は最も激しい核沸騰に対応し、この極大値に対応する θ_s は約200°Cである。 θ_s :200°Cにおける各文献の h は、

本実験⑨		文献⑤		文献⑦	
W	h	W	h	W	h
100	9.1E3	—	—	100	上面10.2E3 下面5.6E3
400	13.0E3	600	18.0E3	—	—

である。⑤の W は600なので、これを400にすれば h も小さくなる。⑦の試料は広くかつ水平配置なので、下面の h を採用すべきであり、下面の h は本実験の値より小さい。この温度域では、 h の変動が大きいことを考慮すれば、本実験の h と文献の h はほぼ等しいようである。

(3) 核・膜共存沸騰域における熱伝達係数の比較

核・膜共存沸騰域の代表として、 θ_s :400と600°Cにおける本実験と文献の h を比較する。

●400°Cにおける熱伝達係数の比較

θ_s :400°Cにおける各文献の h は、

本実験⑨		文献④		文献⑤		文献③	
W	h	W	h	W	h	W	h
200	2090	272	4420	—	—	270	4830
400	3290	—	—	600	2090	—	—

である。この温度域では、本実験の h は、 $W<300$ では文献の値より小さく、 $W>400$ では文献の値より大きいようである。

●600°Cにおける熱伝達係数の比較

θ_s :600°Cにおける各文献の h は、

本実験⑨		文献④		文献⑤		文献③	
W	h	W	h	W	h	W	h
200	670	272	1000	—	—	270	800
400	1010	—	—	600	1130	—	—

である。 W :200~400の範囲では、水量の補正を行えば本

実験の h と文献の値はほぼ等しいようである。

(4) 鏡面試料と酸化試料の熱伝達係数の比較

沸騰熱伝達では、試料が酸化されると熱伝達は増大する。高温酸化されたCu試料とAl試料を用いた本実験⑨と鏡面Ag試料の文献⑥の h を比較すると、

	W	$\theta_s: 200$	400	600°C
本実験⑨	100	9070	1190	420
文献⑥	127	4560	640	470

である。酸化試料の本実験の h は、 $\theta_s: 200$ と 400°C では鏡面試料の値のほぼ2倍だが、 600°C では両者の h はほぼ等しい。 $\theta_s: 600^\circ\text{C}$ ではほぼ膜沸騰状態なので、試料の表面性状が h に及ぼす影響は小さく、両者の h がほぼ等しいものと考えられる。これらの結果から、酸化試料の h は核・膜共存沸騰域($\theta_s: 200\sim 500^\circ\text{C}$)では鏡面試料のそれより大きい、膜沸騰域($\theta_s: 600^\circ\text{C}$)では両者の h はほぼ等しくなるようである。

5.4.3 本実験と文献の熱伝達係数の比較のまとめ

これまでの検討結果をまとめると、次のようになる。

- 1) 膜沸騰域では、非定常実験の本実験の h は定常実験の h より小さいようである。
- 2) 核沸騰域では、本実験の h と酸化層厚さ $5\mu\text{m}$ の炭素鋼試料の文献⑤の h はほぼ等しいようである。
- 3) 核・膜共存沸騰域では沸騰現象が複雑なため、各文献の h は大きく変動しているが、全体として本実験の h と文献それらはほぼ等しいようである。
- 4) 上記1)~3)の結果から、本実験の h の最確値と文献の h はほぼ等しいようである。

5.5 本実験結果の実機への適用に際しての検討項目

本実験の結果を実機へ適用する場合、冷却設備と鋼材について種々の検討が必要である。

(1) 冷却設備の構造と冷却水以外の冷却

本実験では、垂直配置の小さい円板試料の両面を中実円錐スプレーで冷却した。実機では多くの場合、大きな鋼材がローラテーブル上を水平状態で移動しながら、その上下側に配置された多数の扁平スプレーで冷却される。水平状態の幅広鋼板はスプレー以外に、上面は板上水によって、下面は低温のローラによって冷却される。連続鋳造二次冷却帯の鋳片は、鋳片とガイドロールの接触部の溜り水や低温のローラによっても冷却される。このように本実験の結果を実機に適用する場合、鋼材はスプレー以外に種々の要因によっても冷却されることを考慮せねばならない。

(2) スプレーノズルの種類と配置

本実験では、試料の両側にそれぞれ1個の中実円錐ノズルを用いたが、実機では多数の扁平ノズルが用いられる。実験では試料は時間的に連続して冷却されたが、実機の鋼材は間欠的に冷却され、表層部では冷却と復熱が繰り返される。中実円錐ノズルには中子があり、これがノズル閉塞の原因になる。実機ではノズル閉塞を回避するため、中子

のない扁平ノズルが用いられる。中実円錐ノズルでは水滴は円錐状に広くほぼ均一に噴射されるが、扁平ノズルでは水滴は扇状に集中して噴射される。このスプレーの水滴分布の違いは、膜沸騰域の蒸気膜の破壊に強く影響する。

本実験のノズル-試料間距離 D は約170mmであるが、実機の D は設備の構造上大きく変動する。 D は、スプレーの鋼材への衝突速度に強く影響する。したがって、本実験の結果を実機に適用する場合、スプレーノズルの種類と配置、 D の値などを考慮せねばならない。

(3) 鋼材の酸化状態

鋼材の酸化状態は膜沸騰の蒸気膜の崩壊に強く影響する。酸化層が厚い場合、蒸気膜はより高温域で崩壊するため、この厚さは冷却能力に強く影響する。再加熱鋼材の酸化状態は本実験の試料のそれとほぼ同じだが、熱間圧延直後の高温鋼材の酸化層の厚さは本実験の試料のそれより薄く、冷延鋼板の酸化層の厚さはさらに薄い。したがって、本実験の結果を実機の鋼材の冷却に適用する場合、鋼材の酸化状態を考慮せねばならない。

(4) 実機への適用に際しての検討事項

本実験によって、高温鋼材のスプレー冷却の基本的な現象の一部が解明された。上記のように、実機で高温鋼材を水冷する場合、鋼材の特性、冷却設備の特性、操業の特性など多くの複雑な要因が冷却に関与する。したがって、本実験の結果を実機の鋼材の冷却に適用する場合、これらの複雑な要因を総合的に調査し、その対応策を検討することが必要である。

6. まとめ

水スプレーと高温試料間の熱伝達係数 h を水量密度 W 、水圧 P および試料表面温度 θ_s の関数として定量化・数式化するため、各沸騰域に対応する4種類の実験を行った。これらの実験から得られた h の最確値 h_{sa} を用いて、 W 、 P および θ_s が h に及ぼす影響を定量化・数式化した。数式化には、代表水量密度 W_d : W1~4, 代表水圧 P_d : P1~4および代表表面温度 θ_{sd} : 50, 75, $\rightarrow 900^\circ\text{C}$ を用いた。得られた主要結果は次のとおりである。

(1) 各 θ_{sd} について、P1~4に対応する「 $h_{sa} = AW_d^n$ 」の指数 n 1~4, およびW1~4に対応する「 $h_{sa} = BP_d^m$ 」の指数 m 1~4を求めた。

(2) 上記(1)で得られた n 1~4の平均値を \bar{n} 、 m 1~4の平均値を \bar{m} とし、これらを用いて各 θ_{sd} ごとに W と P が h に及ぼす影響の式: $h = C(W^{\bar{n}}P^{\bar{m}})$ を数式化した。

(3) 隣り合う θ_{sd} : θ_{sdi} と θ_{sdi+1} の間の θ_{sx} に対応する h を h_x とする。上記(2)で得られる「 $\theta_{sdi} - h_i$ 」と「 $\theta_{sdi+1} - h_{i+1}$ 」の関係を用いて、 θ_{sx} に対応する h_x を求める式: $h_x = f(\theta_{sx})$ を数式化した。

(4) 上記(2)と(3)の関係式を用いることにより、任

意の W 、任意の P および任意の θ_s に対応する h を求めることができる。なお、この式の適用範囲は、 $W: 34 \sim 560 \text{ L/min} \cdot \text{m}^2$ 、 $P: 0.039 \sim 0.36 \text{ MPa}$ 、 $\theta_s: 50 \sim 900^\circ\text{C}$ である。

(5) 上記(2)の \bar{n} と \bar{m} を用いて、水量、水圧および表面温度が冷却に及ぼす影響を解明した。

(6) h_{sa} の値は、主な研究者の h の値とほぼ等しい。

最後に、実験装置と試料の製作を指導していただいた日本文理大学藤澤巖氏および木本和宏氏、実験装置と試料の製作、実験の実施および実験結果の解析を担当していただいた平成3年度から平成16年度までの日本文理大学三塚研究室の卒業研究生に感謝します。

記号

θ : 温度 [$^\circ\text{C}$]
 θ_s : 表面温度
 θ_{sd} : 代表表面温度
 h : 熱伝達係数 [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$]
 h_{sa} : 熱伝達係数の最確値

W : 水量密度 [$\text{L}/\text{min} \cdot \text{m}^2$]

W_d : 代表水量密度 ($W1: 50, W2: 100, W3: 200, W4: 400$)

P : 水圧 [MPa] (ブルドン管圧力計の指示値)

P_d : 代表水圧 ($P1: 0.052, P2: 0.089, P3: 0.16, P4: 0.27$)

D : ノズル-試料間距離 [mm]

文 献

- 1) M.Mitsutsuka: *Bull. Nippon Bunri Univ.*, **33** (2005), No. 1, 1.
- 2) M.Mitsutsuka: *Bull. Nippon Bunri Univ.*, **31** (2003), No. 2, 1.
- 3) M.Mitsutsuka: *Bull. Nippon Bunri Univ.*, **32** (2004), No. 2, 1.
- 4) H.Müller and R.Jeschar: *Arch. Eisenhüttenwes.*, **44** (1973), 8, S.589.
- 5) H.Junk: *Neue Hütte*, **17** (1972), 1, S.13.
- 6) E.A.Mizikar: *Iron Steel Eng.*, (1970), 53.
- 7) C.J.Hoogendoorn and R.den Hond: 5th Int. Heat Transf. Conf., Vol. IV, (1974), 139.
- 8) T.Tamari and H.Yoshida: *CAMP-ISIJ*, **8** (1995), 444.
- 9) M.Mitsutsuka and K.Hukuda: *Tetsu-to-Hagané*, **69** (1983), No. 2, 262.
- 10) M.Mitsutsuka, K.Hukuda and T.Yokokura: *Bull. Nippon Bunri Univ.*, **32** (2004), No. 1, 1.
- 11) M.Shimada, N.Takeda and S.Akabane: *Tetsu-to-Hagané*, **62** (1976), No. 3, 372.