二、三の高マンガン鋼の耐摩耗特性について*

中山 正大** 財満 鎮雄*** 斎藤 大八****

On the Wear Resisting Property of Some High Manganese Steels

by

Masamichi NAKAYAMA, Shigeo ZAIMA and Daihachi SAITO
(Nippon Casting Co., Ltd.) (Yamanashi University) (Aichi Mechanical Industry Co., Ltd.)

Following the tests reported previously, the abrasion tests on high manganese steels of various components were conducted by means of a tube-mill type abrasion tester.

The results are summarized as follows:

- (1) As to the effect of heat treatment on the wear resisting property of the ordinary high manganese steel, a good result is obtained in the case of 250°C tempering after quenched into water (even though there is not so much difference as compared with quenched ones), and the characteristics become worse when the tempering temperature rises to 650°C.
- (2) The wear resisting property is adversely affected by adding the silicon content in the ordinary high manganese steel.
- (3) And also adding of chromium content is no good for the wear resisting property.
- (4) The special manufactured high manganese steel shows excellent wear resistance notwithstanding its chemical composition which is not so different from that of ordinary high manganese steel.
- (5) The result reported in the previous report, that the steel of large grain size is inferior to the steel of small grain size in the wear resisting property, is applied in this case.
- (6) The relation between the wearing time and the amount of wear may be formularized experimentally as the formula (1), and in this case the constants in the formula show nearly constant values regardless of the quality of each material.
- (7) The relation between the wearing time and the hardness is closely connected. The formula (2), and the constants in the formula are nearly equal in each material, and agree with the previous result that the increase of hardness with wearing time is very remarkable as compared with the carbon steel.

(Received Jul. 9, 1959)

1. ま え が き

従来から、炭素0.8~1.3%, マンガン10~14%を含む高マンガン鋼はいわゆる水じん法を施せば、強じんにして摩耗に耐え、かつ衝撃に対する抵抗も大きくなるといわれ、土木機械、鉱山機械などのように強度を要し耐摩耗性を必要とするものによく使用されている。しかし、他の材料における場合と同様にその耐摩耗性の実態を十分に把握することは非常に困難であり、その大きな原因の一つとしては、実施された摩耗試験

の結果がただちにすべての場合に適用できないことがある。研削加工のさいにはこの材料の強じんさと加工困難なことに手をやき、グラインダーの消耗はとくにはなはだしいことはしばしば経験するところであるが、最近の報告では転動にすべりを伴った摩耗試験において(とくにレールを対象として)高マンガン鋼はかなりの摩耗量が認められている。したがって、高マンガン鋼の耐摩耗特性を検討するに充分な摩耗試験の諸条件を確立するためには、さらに今後の研究に待つべきことと思われる。

著者らはさきにチューブミル型式による摩耗試験機を試作し、その套部の裏張りに試料を用いて鋼球と珪砂を入れて回転し、使用条件に近い方法で種々の成分

* 原稿受付 昭和34年7月9日、当協会第8期総会講演会にて講演(昭34.5)

** 日本鑄造株式会社川崎工場

*** 正員 山梨大学工学部

**** 愛知機械工業株式会社

の普通高マンガン鋼の摩耗試験を実施した²⁾。その結果、普通の炭素鋼と比較して耐摩耗特性の概要を知ることができ、製造のさいのいちおうの目安を得た。

ここに報告するものは、焼入れ(水じん)した普通高マンガン鋼を焼戻した場合の耐摩耗性、クロームを添加したクロームマンガン鋼およびその含有成分は、普通高マンガン鋼と比べて大差ないが、その溶解法に特殊な考慮を払った特殊溶解高マンガン鋼などの耐摩耗性について、引続いて行なった実験結果についてである。

2. 試料および実験条件²⁾

実験に供した試料は前報と同様に、Fig. 1 の形状に

Fig. 1 The specimen

Table 1 The chemical compositions of specimens (1)

Specimen	Material	Compositions						Remarks
		C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Cr (%)	
No. 1	Ordinary high manganese steel	1.00	0.31	12.08	0.048	0.008	—	1050°C quenched (water)
No. 2								250°C tempered
No. 3								650°C tempered
No. 4		1.02	0.30	13.96	0.039	0.013	—	1050°C quenched (water)
No. 5								250°C tempered
No. 6								650°C tempered
No. 7		1.02	0.29	13.33	0.052	0.009	—	1050°C quenched (water)
No. 8								250°C tempered
No. 9								650°C tempered

Table 2 The chemical compositions of specimens (2)

Specimen	Materials	C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Cr (%)	Remarks
No. 10	Chrome manganese steel	1.09	1.30	13.55	0.030	0.004	1.760	1050°C quenched (water)
No. 11								
No. 12								
No. 13								
No. 14								
No. 15								
No. 16	Ordinary high manganese steel (high silicon)	0.97	1.42	13.09	0.028	0.008	—	1050°C quenched (water)
No. 17								
No. 18								
No. 19	Specially manufactured high manganese steel	1.04	0.54	12.25	0.048	0.009	0.030	1050°C quenched (water)
No. 20								
No. 21								
No. 22								
No. 23								
No. 24								
No. 25								
No. 26								
No. 27								

それぞれ1個ずつ鑄込んだ Table 1 および Table 2 に示すような成分の高マンガン鋼である。すなわち、普通高マンガン鋼を 1050°C(1hr 保持)より水焼入れ(20

Table 3 The mechanical properties of specimens

Specimen	Tensile strength (kg/mm ²)	Elongation (%)	Hardness		
			Brinell hardness	Rockwell hardness	Shore hardness
No. 1	93.9	64.0	179	44.3	37
No. 4	93.5	54.0	191	37.2	34
No. 7	91.3	55.0	207	37.1	35
No. 10	95.1	47.8	211	45.1	38
No. 16	91.6	53.0	190	41.0	33
No. 19	91.0	54.6	177	40.1	35

°C)した No. 1, No. 4 および No. 7 と、熱処理効果をみるためそれらの試料を 250°C(1hr)に焼戻した No. 2, No. 5 および No. 8, 650°C(1hr)に焼戻した No. 3, No. 6 および No. 9 について検討し、さらにこれまで検討してきた普通高マンガン鋼は珪素含有量が 0.2~0.5 % 程度であったので、珪素の含有効果をみるため炭素およびマンガン量はこれまでと大差ないが、珪素が 1.4 % と多量に含んだ高マンガン鋼を同様に 1050°C より水焼入れした試料 No. 16~No. 18, クロームの添加効果をみるため 1.76 % Cr を加えたクロームマンガン鋼を 1050°C より水焼入れした試料 No. 10~No. 15, およびマンガン、炭素、珪素そのほか含有成分は普通高マンガン鋼と同様な成分をもつが、その製法、とくに溶解のさい特別な処理をした特殊溶解高マンガン鋼を 1050°C より水焼入れした試料 No.

No. 1

No. 2

No. 3

Photo. 1 Ordinary high manganese steel, specimen No. 1 (as water quenched), No. 2 (250°C tempered) and No. 3 (650°C tempered) ($\times 100 \times 2/3$)

No. 10

No. 17

No. 19

Photo. 2 Chrome manganese steel, specimen No. 10 (as water quenched), ordinary high manganese steel (high silicon), No. 17 (as water quenched) and specially manufactured high manganese steel, No. 19 (as water quenched) ($\times 100 \times 2/3$)

19~No. 27 について特性を求めた。

これらの試料の二、三の機械的性質を示せば Table 3 のようになる。表よりみれば、No. 1, No. 4, No. 7, (以上普通高マンガン鋼), No. 16(高珪素普通高マンガン鋼) および No. 19(特殊溶解高マンガン鋼) では引張強さ、伸びあるいは硬さについても大差ないが、No. 10(クロームマンガン鋼) では引張強さおよび硬さは前者に比べていくぶん高く、伸びは低いことがわかる。

顕微鏡組織($\times 100 \times 2/3$)を示せば Photo. 1 は普通高マンガン鋼の熱処理による変化を示すが、No. 2 では焼戻しの影響は明瞭ではなく、No. 3 では焼戻しによる第 2 相の析出が認められている。Photo. 2 は No. 10, No. 17 および No. 19 を示すが、成分および溶解法の違いによる組織の差はみることができなかった。

これらの試料を 9 枚と比較のための標準試験片として同型の 0.14% 炭素鋼片(前報で用いたものと同一成分で、 880°C 水焼入れすれば試験前のロックウェル硬さ H_{RB} が試料とほぼ同じであるために採用した)を 1 枚入れて、前報で示したチューブミル型式の摩耗試験機の套部の裏張りとし、その中に軸受鋼球(約 2.8 kg)を 10 個、珪砂を 500 gr/5hr の割合で入れて 20 rpm の回転を与え、回転と打撃による摩耗試験を行なった。

3. 普通高マンガン鋼

普通高マンガン鋼の熱処理による耐摩耗性の変化は Fig. 2 のようである。図よりみれば、 250°C の焼戻したもの (No. 2, No. 5, No. 8) では焼入れのままのもの (No. 1, No. 4, No. 7) より多少耐摩耗性はよくなる傾向にあったが大差なく、 650°C 焼戻し (No. 3, No. 6, No. 9) では耐摩耗性は悪くなることがわかる。前報で知った試験時間の経過とともに硬さ(ロックウェル硬さ H_{RB} およびショアー硬さ H_s で検討した)が標準炭素鋼に比べて急激にかつ高く上昇して飽和値に近づいた特性と同傾向に現われ、また、オーステナイト粒度を調べれば、後述の Table 4 などのように No. 1 は 2, No. 4 は 3, No. 7 は 5 であり、初期粒度の小さいほうが耐摩耗性の良好であった前報の結果に一致した。

つぎに、珪素の含有効果をみるために行なった結果は Fig. 3 のようになり、Table 2 よりみて機械的性質は普通高マンガン鋼に比べほとんど大差ないにもかかわらず、いずれも標準炭素鋼あるいは Fig. 2 の普通高マンガン鋼に比べ劣り、珪素は耐摩耗性に悪い効果を示すことがわかった。また、結晶粒度からみればこの場合も粗粒が劣ることは Table 4 にもみられるとおりであり、硬さ変化も前述の場合と同傾向の特性をとった。

Fig. 2 The relation between the wearing time T and the worn amount A in the case of the ordinary high manganese steel

Fig. 3 The relation between the wearing time T and the worn amount A in the case of the ordinary high manganese steel (high silicon)

4. クロームマンガン鋼

クロームマンガン鋼について同様な実験を行なった結果は Fig. 4 のようになり, Table 3 からみれば機械的強度はかなりすぐれているようであるが, この場合も普通高マンガン鋼あるいは標準炭素鋼に比べて耐摩耗特性は非常に劣っている^{*}. しかし, 結晶粒度は, Table 4 にみるように 3~5.5 の範囲でいずれも比較的微細なもののみであるためか, 明瞭な粒度の差は認められなかった.

摩耗時間 T の経過による試験面のロックウェル硬さ (B スケール) H_{RB} , およびショアー硬さ H_S の変化の一例を示せば Fig. 5 のようになり, 標準炭素鋼とは異なった高マンガン鋼特有の摩耗時間の経過に伴ない硬さの急上昇特性をとるが, 硬さの飽和値にいたるまでの時間が他の場合に比べていくぶん長くかかるようである (とくに H_S にその傾向が強い).

5. 特殊溶解高マンガン鋼

摩耗時間 T の経過と摩耗量 A の関係は Fig. 6 のようになり, 普通高マンガン鋼に比べて非常にすぐれた耐摩耗特性を示すことがわかり, この場合も初期粒度の細かい場合が粗粒の場合に比べて摩耗量が少ないことがみられる. 化学成分からみれば普通高マンガン鋼

Fig. 4 The relation between the wearing time T and the worn amount A in the case of the chrome-manganese steel

Fig. 5 The change of hardness (Rockwell hardness H_{RB} and Shore hardness H_S) in the case of the chrome-manganese steel

Fig. 6 The relation between the wearing time T and the worn amount A in the case of the specially manufactured high manganese steel

* 鉬石処理に実際に使用した結果では, 硬い鉬石の場合クロームを含有しないほうが摩耗面の状態は良好であったが, 比較的軟い鉬石の場合クロームを含有したほうが普通高マンガン鋼より良好となった. 今後の検討を要するところと思う.

とほとんど大差ないにもかかわらず、製造のさいとくに特殊溶解処理によってこのように特性にいちじるしい差ができたことがわかる。

また、摩耗時間 T と硬さ H_{RB} および H_S の変化との関係は、たとえば Fig. 7 のように高マンガン鋼特有の硬さの急上昇をとるが、前述の普通高マンガン

Fig. 7 The change of hardness (Rockwell hardness H_{RB} and Shore hardness H_S) in the case of the specially manufactured high manganese steel

Fig. 8 Example of the logarithmic relation between the wearing time T and the worn amount A

鋼およびクロームマンガン鋼に比べて硬さの上昇飽和は急激でかつ早かったようである。

6. 結果の検討

前報の結果より判断すれば、普通高マンガン鋼は摩耗の初期に摩耗量はかなりはげしいが、時間の経過により硬さが急上昇して、飽和値に近づくにつれて摩耗量も定常化してき、また、八木氏の結果によっても加工硬化の充分でない時期における摩耗量の多いことが認められたことから、高マンガン鋼ではとくに加工によって硬さが急上昇して飽和するまでの初期摩耗がとくに重要な意味をもつことが考えられる。この場合についてもこのことはだいたい正しいとみてさしつか

Table 4 The constants a and b in Eq. (1)

Specimen		$A=a \cdot T^b$ (A =Worn amount in mg/cm^2 T =Wearing time in hour)		Mean		Grain size
		a	b	a	b	
Standard carbon steel		11.8	0.49			
		9.7	0.58	10.3	0.58	
		9.5	0.66			
Ordinary high manganese steel	No. 1	13.3	0.43			3
	No. 2	12.5	0.37			4
	No. 3	19.3	0.36			3.5
	No. 4	9.2	0.48			2
	No. 5	8.2	0.52	9.4	0.51	3
	No. 6	16.2	0.49			3.5
	No. 7	5.7	0.63			-2
	No. 8	5.9	0.65			-1
	No. 9	13.2	0.43			2.5
Chrome manganese steel	No. 10	17.3	0.51			5.5
	No. 11	17.8	0.48			5.5
	No. 12	15.2	0.48	15.3	0.52	3
	No. 13	12.4	0.57			3
	No. 14	15.5	0.48			3.5
	No. 15	13.6	0.61			4
Ordinary high manganese steel (high silicon)	No. 16	16.5	0.44			5
	No. 17	14.9	0.52	16.4	0.48	3
	No. 18	17.8	0.49			2
Specially manufactured high manganese steel	No. 19	4.2	0.88			2.5
	No. 20	2.4	1.00			2
	No. 21	2.6	0.96			3
	No. 22	5.2	0.68			2
	No. 23	3.4	0.86	3.8	0.86	3.5
	No. 24	2.4	0.98			4
	No. 25	3.8	0.83			3
	No. 26	5.4	0.71			5
	No. 27	4.4	0.77			5

えないようで、ここでは主として初期摩耗について検討を加えた。

前述の摩耗特性曲線を摩耗時間 T と摩耗量 A の両対数線図にとれば(前記各試料群より各一例をとれば), たとえば Fig. 8 のようになり直線の関係が得られる。すなわち, 材料による定数を a, b とすれば定性的に

$$A=a \cdot T^b \tag{1}$$

が成立する。これら a, b の定数を最小自乗法によって各試料別に求めてみれば Table 4 を得る。それぞれ同一試料群では a, b ともにそれぞれほぼ等しい値をとることがわかり, したがって, その平均値も併記した。 a の値の大きい高珪素高マンガン鋼, クロームマンガン鋼では初期摩耗がはなはだしく, a のとくに小さい特殊溶解高マンガン鋼では初期摩耗の少ないことが明らかになっている。普通高マンガン鋼の熱処理効果も, 250°C 焼戻しでは焼入れのままのものよりやや耐摩耗性は良いようであるが, 650°C 焼戻しでははなはだ劣ることも表から定量的にも明瞭に知ることができる。

また, 摩耗初期における摩耗時間 T と硬さ H を両対数線図にまとめると, たとえば Fig. 9 のようになり, すべての場合に c, d を材料による定数とすれば定性的に

$$H=c \cdot T^d \tag{2}$$

が成立する(ロックウェル硬さ H_{RB} およびショアー硬さ H_S について)。各試料について定数 c, d を最小

Fig. 9 Example of the logarithmic relation between the wearing time T and the hardness (Rockwell hardness H_{RB} and Shore hardness H_S)

自乗法によってまとめれば, ロックウェル硬さ H_{RB} の場合 Table 5, ショアー硬さ H_S の場合 Table 6 のようになる。それぞれ各試料群においてはほぼ等しい値をとり, c の値の大きいことはとくに初期における硬さ上昇のはなはだしいことを示す。

以上の結果より, この場合, 硬さ曲線は各試料ともだいたい 150 時間経過すればそれぞれ飽和値に近くなるようであったので, 実験開始後 150 時間における各試料についての初期硬さと上昇率の関係を求めれば, ロックウェル硬さについては Fig. 10, ショアー硬さについては Fig. 11 を得た。初期硬さの低いものが全

Table 5 The constants c and d in Eq. (2) in the case of Rockwell hardness

$H_{RB}=c \cdot T^d$ (H_{RB} =Rockwell hardness) (T =Wearing time in hour)					
Specimen	c	d	Mean		Grain size
			c	d	
Standard carbon steel	89.5	0.046	90.7	0.041	
	93.7	0.021			
	88.7	0.055			
Ordinary high manganese steel	No. 1	93.8	100.7	0.041	3
	No. 2	104.7			4
	No. 3	99.8			3.5
	No. 4	104.7			2
	No. 5	107.4			3
	No. 6	102.6			3.5
	No. 7	103.5			as
	No. 8	103.5			quench
	No. 9	103.5			-2
Chrome manganese steel	No. 10	97.1	98.1	0.039	5.5
	No. 11	89.2			5.5
	No. 12	101.2			3
	No. 13	98.0			3
	No. 14	102.0			3.5
	No. 15	100.3			4
Ordinary high manganese steel (high silicon)	No. 16	99.1	98.3	0.037	5
	No. 17	98.0			3
	No. 18	98.0			2
Specially manufactured high manganese steel	No. 19	98.0	98.0	0.053	2.5
	No. 20	98.0			2
	No. 21	100.0			3
	No. 22	98.0			2
	No. 23	96.4			3.5
	No. 24	99.1			4
	No. 25	96.6			3
	No. 26	99.8			5
	No. 27	97.5			5

般的にみて硬さ上昇率も高いようであるが、各材料とも標準炭素鋼に比べ非常に大きな硬さ上昇率を示すことは、従来のオーステナイト鋼の特性と矛盾しなかった。図よりみるように、同一試料群ではほぼ等しい硬さと上昇率を示すことがわかるが、ロックウェル硬さとショア硬さでその傾向が異なった。すなわち、ロックウェル硬さでみれば、初期硬さは普通高マンガン鋼がもっとも低く、クロームマンガン鋼はやや高く、特殊溶解高マンガン鋼はもっとも高く出て、しかも硬さ上昇率は後者がもっとも少なく、普通高マンガン鋼がもっとも多いようであったが（珪素添加の効果は顕

Table 6 The constants c and d in Eq. (2) in the case of Shore hardness

$H_S = c \cdot T^d$ (H_S = Shore hardness T = Wearing time in hour)					
Specimen	c	d	Mean		Grain size
			c	d	
Standard carbon steel	31.0	0.26	29.1	0.21	
	25.5	0.13			
	30.8	0.23			
Ordinary high manganese steel	No. 1	41.1	37.9	0.17	3
	No. 2	43.3			4
	No. 3	47.3			3.5
	No. 4	33.3			2
	No. 5	41.9			3
	No. 6	36.1			3.5
	No. 7	34.4			-2
	No. 8	38.6			-1
	No. 9	37.5			2.5
Chrome manganese steel	No. 10	37.9	38.8	0.14	5.5
	No. 11	36.7			5.5
	No. 12	40.2			3
	No. 13	41.0			3
	No. 14	38.6			3.5
	No. 15	38.4			4
Ordinary high manganese steel (high silicon)	No. 16	39.4	39.2	0.13	5
	No. 17	41.2			3
	No. 18	37.1			2
Specially manufactured high manganese steel	No. 19	46.5	40.5	0.15	2.5
	No. 20	21.0			2
	No. 21	21.5			3
	No. 22	61.0			2
	No. 23	45.6			3.5
	No. 24	43.4			4
	No. 25	50.6			3
	No. 26	32.6			5
	No. 27	42.0			5

著ではなかった)、ショア硬さでみれば初期硬さは普通高マンガン鋼、特殊溶解高マンガン鋼、普通高マンガン鋼(高珪素)、クロームマンガン鋼の順に高くなり、硬さ上昇率はこの順に少なくなっているようであった。

7. あとがき

前報に引続いて、チューブミル型式による摩耗試験機を用い各種高マンガン鋼のとくに摩耗初期における耐摩耗特性を検討した結果、

(1) 普通高マンガン鋼の熱処理による耐摩耗特性の変化は水焼入れ(水じん)した後、250°Cに焼戻したものは水焼入れのままのものに比べてやや向上するようであるが差はなかったが、650°Cのように焼戻温度をあげると特性は悪くなった。

(2) 普通高マンガン鋼に珪素量を増加すれば耐摩耗性に悪い影響を及ぼすことがわかった。

(3) クローム添加も同様に耐摩耗性に良好な結果

Fig. 10 The relation between the increase of hardness Z_{HR} and the initial Rockwell hardness H_{RB} in each specimen

Fig. 11 The relation between the increase of hardness Z_{HS} and the initial Shore hardness H_S in each specimen

を与えないことがわかった。

(4) 特殊溶解処理を施したものは普通高マンガン鋼に比べて、その化学的成分はほとんど大差ないにもかかわらず耐摩耗性はすぐれた特性を示した。

(5) オーステナイト粒度の粗粒のものが細粒のものに比べ耐摩耗性が劣るという前報の結果はこの場合も適用できた。

(6) 摩耗時間と摩耗量の関係は実験的に(1)式が成立し、式中の定数は各試料群においてそれぞれほぼ等しい値をとることがわかった。

(7) また、摩耗時間と硬さの関係も(2)式が成立

し、式中の定数はそれぞれ試料によってほぼ等しい値を取ったが、時間の経過につれて硬さの上昇が炭素鋼に比べてはなはだいちじるしいことは前報の結果と一致した。

本研究の実施は日本鑄造株式会社川崎工場の御援助によったことを付記する。

参 考 文 献

- 1) 八木, 材料試験, 8, 68, 423 (昭34)
- 2) 中山, 財満, 材料試験, 5, 37, 595 (昭31)
- 3) 特許出願中(日本鑄造株式会社)につき詳細は省略する

外国文献紹介

材料試験法および試験機

偏光塑性学に関する研究 (Studies in Photoplasticity) M.M. Frocht and R.A. Thomson, Proceedings of the Third U.S. National Congress of Applied Mechanics (1958), pp. 533-540, 図11, 表なし

セルロイド模型を使って平面断塑性応力状態の偏光実験に関する基礎的問題が検討されている。塑性状態における応力は、その荷重履歴により影響されるような荷重の減少ないし除去がおこるような問題は取り扱われていない。実験法は非直線的な Stress-optic 法則と等傾線の測定による。セルロイドの Birefringence (n) はいっばんに応力 (σ) とひずみ (ϵ) に関係するが、ひずみ (ϵ) は応力 (σ) と実験における時間 (t) によるとしてひずみ (ϵ) を消去できる。さらに Birefringence (n) に及ぼす時間 (t) の影響はクリープ曲線の充分時間経過した値をとるとすると無視できるとして Stress-optic 法則を得られる。偏光塑性実験の実験 Prototype への応用性に関しては両材料の (i) 応力-ひずみ

曲線, (ii) 降伏条件, (iii) 塑性域におけるポアソン比 (ν) が同じでなければならない。セルロイドの $\nu=0.493$, (i) および (ii) の条件はアルミニウムに類似する。セルロイドの Birefringence (n) および応力-ひずみ曲線は温度および相対湿度に影響されるから、できるだけ一定に保たれた。しかしながら、この条件を変えてセルロイドの応力-ひずみ曲線を変化せしめると、セルロイド模型による偏光塑性実験が新しい応力-ひずみ曲線をもった材料へ応用しうる。一円孔を有する平板やノッチ、およびフィレットのある平板における応力集中係数および一円孔を中心とする平板の対称軸に沿う応力分布が偏光塑性的に実験された。前者の実験結果はひずみ測定法による応力集中係数の計算と比較してよく一致している、後者の実験結果は Ramberg-Osgood の方程式を使って応力-ひずみ曲線を無元的に書き変え Rayleigh rity の方法と関連した数値計算で得た "correction stress" を理論解析塑性応力と比較されて、塑性変形があまり大きくない場合以外はかなりよく一致している。

(伊藤勝彦)