低合金鋼の耐硫酸性におよぼす添加元素の影響について*

寺 前 章** 門 智**
乙 黒 靖 男** 轟 理 市**

Akira Teramae, Satoshi Kado, Yasuo Otoguro and Riichi Todoroki : Effect of Alloying Elements on the Corrosion of Low-Alloy Steels in Sulfuric Acid. In an attempt to develop the better effective low-alloy steel to the sulfur dewpoint corrosion in flue gases, an investigation was made in which the effects of alloying elements on the corrosion rate in 40% sulfuric acid at 60°C were studied. Since the superior effect of copper (0.1%) in steel had already been recognized, these effects of alloying elements were investigated in the presence of copper.

According to the results of weight-loss tests with 4-hour immersion in the same solution as mentioned before, the effects of alloying elements may be classified as follows :

- (1) more effective : Sb, Se, As (antimony was most effective),
- (2) slightly effective : Si,
- (3) little effective : Sn, Bi, Te,
- (4) slight accelerating effect on corrosion : C, Mn,
- (5) accelerating effect on corrosion : P, S, Ti, Mo, Cr, Ni (The corrosion rate was linear to the sulfur content, and exponential to the phosphorus content).

(Received March 26, 1968)

I. 緒 言

最近、火力発電所などで主原料としての石炭から重油への転換がさかんとなり、その結果、ボイラ低温部（たとえば、空気予熱器、煙道など）では、重油中に含まれるイオウ化合物に起因するいわゆる“イオウ露点腐食”が問題となり、この対策として、火力発電所などでは低過剰酸素吹込みによる運転など種々の研究を行ない、かなりの成果をあげて来た⁽¹⁾。

一方、鉄鋼各社もこの問題を取りあげ、硫酸域における耐食性低合金鋼の研究が活発に行なわれて来たが⁽²⁾⁽³⁾、硫酸中の鉄鋼の腐食については、古くは、遠藤、森岡らの含

銅鋼に関する研究⁽⁴⁾をはじめとして多くの研究が行なわれて来た。これらの従来の研究結果から明らかなように⁽⁵⁾、ほぼ0.1%程度以上のCuを含有する鋼は、硫酸・塩酸などの非酸化性の酸に対する耐食性を有するので、耐硫酸性低合金鋼は含銅鋼が基準となり、Cuと共存する他の添加元素との相乗作用によつて、さらに、耐食性を向上させたものでなければならない。

この線にそつた研究としては、最近の小若、諸石、室谷ら⁽²⁾および高村⁽³⁾の研究がある。すなわち、高村の研究によれば、1%硫酸中、25°C、5時間浸漬試験の結果では、Cuと共存するSの耐食性向上効果が著しいとされている。また、小若らの20~98%硫酸中での種々の温度での浸漬

** 富士製鉄株式会社中央研究所(Central Research Laboratories, Fuji Iron and Steel Co.Ltd., Sagami-hara)

* 耐硫酸性低合金鋼に関する研究(I), 1966年11月第13回腐食防食討論会に発表

(1) 火力発電, 16(1965), 低温腐食小特集, 537~580.

(2) 小若, 諸石, 室谷: 1966年4月東京大会講演概要, p.84.

(3) 高村: 第12回腐食防食討論会予稿集(1965), 152.

(4) 遠藤, 森岡: 本誌, 3(1939), 189.

(5) E. Williams and M.E. Komp: Corrosion, 21(1965), 9.

試験の結果では、Cu と共存する Sn および As は腐食速度を減少させ、一方、Mo, P, S および C などは腐食速度を増大させる作用があるとしている。

上述の S の例で明かなように、鋼材の耐食性におよぼす添加元素の効果は、硫酸濃度によって異なるようであるが、重油専焼のボイラーなどの低温部におけるイオウ露点腐食については、比較的高濃度の硫酸中での浸漬試験とよく対応することが知られているので⁽⁶⁾、著者らは、60°C、40% 硫酸中での浸漬試験を行ない、Cu を含有する鋼の耐硫酸性におよぼす各種添加元素の影響を比較検討した。

その結果、結局、Cu と共存する Sb, Se, As が極めて有効であることを見出したが、以下に耐硫酸性におよぼす添加元素の影響について述べる。

II. 実験 および 実験 結果

1. 供 試 材

Table 1, 2 および 3 に示した低炭素鋼はすべて真空溶解炉により溶製し、他の供試材は高周波誘導炉により溶製した後、鍛造、熱処理後 3×40×40 mm の試験片に加工した。試験片はエメリー研磨後脱脂し、硫酸浸漬試験に供した。供試材の化学成分は Table 1~4 に示してある。

2. 硫酸 浸 漬 試 験

硫酸濃度：40%

温 度：60°C

浸漬時間：4 hr

液 量：試験片 3 枚につき硫酸 1000 mL

の条件で行ない、浸漬試験後腐食生成物を除去し、乾燥後腐食減量を測定した。

3. 実験 結果

(1) Cu および C の 影 響 について

供試材の化学成分および実験結果は Table 1 に示してある。縦軸に腐食速度 (mg/cm²/hr)、横軸に鋼中の Cu 量 (重

量パーセント) をとり、鋼中の Cu 量と腐食速度との関係を図に示すと Fig. 1 のようになる。

Fig. 1 Effect of copper content on corrosion rate of carbon steels in 40% sulfuric acid at 60°C

Fig. 1 から明かなように、曲線 A (0.003% C) の場合にも曲線 B (0.5% C) の場合にも、Cu 量が 0.05% 位までは腐食速度は Cu 量の増加とともに急激に減少するが、0.05% をこえると腐食速度の減少はゆるやかとなり、約 0.2% Cu 程度で定常値に近づく。この実験結果は Williams ら⁽⁵⁾ の行なつた低炭素鋼についての実験結果とよく一致している。

Fig. 1 の曲線 A と曲線 B の比較から、硫酸中の含銅鋼の腐食におよぼす C の影響を知ることが出来るが、小若らの研究結果⁽²⁾と一致していて、C は腐食速度をわずかに増加させる傾向がある。

いま、試料 A-11 (0.1% C) を比較材として、曲線 A、曲線 B について 0.3% Cu で比較して見ると、Fig. 2 に示したように、C 量と腐食速度との間には直線関係があり、C 量の増加とともにわずかに腐食速度は大きくなる。この実験結果は <0.05% Cu を含む鋼について行なつた Damon⁽⁷⁾ の実験結果とは異なり、腐食速度と C 量との間には複雑な関係は見られない。

Table 1 Chemical composition and corrosion rate of Fe-Cu alloys exposed for 4 hours in 40% H₂SO₄ at 60°C

	No. of specimen	Chemical composition						Corrosion rate in mg/cm ² /hr
		C	Si	Mn	P	S	Cu	
Low carbon steel (0.003 C)	A-1	0.002	0.003	0.001	0.003	0.004	0.002	104.8
	2	0.002	0.003	"	"	"	0.050	18.1
	3	0.004	0.006	"	"	"	0.090	15.0
	4	0.003	0.005	"	"	"	0.27	8.6
	5	0.003	0.005	"	"	"	0.53	5.5
High carbon steel (0.5 C)	A-6	0.541	0.40	0.71	0.003	0.005	—	114.4
	7	0.516	0.24	0.68	"	0.006	0.06	26.5
	8	0.506	0.35	0.60	"	0.007	0.10	19.0
	9	0.483	0.41	0.69	"	0.007	0.21	12.9
	10	0.483	0.38	0.68	"	0.006	0.31	11.5
0.1C-steel	11	0.102	0.40	0.30	"	0.006	0.30	9.1

(6) H.D.Taylor : Trans. Faraday Soc., **47** (1951), 1114.

(7) C.H.Damon : Ind. Eng. Chem., **33** (1941), 67.

(2) Sb, Se, Sn および As の影響について

Fe-Sb, Fe-Se, Fe-Sn および Fe-As 2 元合金系 (各試料と

As の場合には, As 添加により, 0.3% Cu 鋼の耐硫酸性をさらに向上させ 0.5% Cu 鋼程度の耐食性を示すことから,

Fig. 2 Effect of carbon content on corrosion rate of copper bearing steels (0.3% Cu) in 40% H_2SO_4 at 60°C

も 0.01% Cu を含む) の供試材の化学成分および実験結果は Table 2 に示してある。比較のため, これらの実験結果は縦軸に腐食速度, 横軸に添加量をとって Fig. 3 に示した。Fig. 3 からわかるように, これらの合金元素の単独の

Fig. 3 Effect of Sb, Se, Sn and As on corrosion rate of iron in 40% H_2SO_4 at 60°C

Table 2 Chemical composition and corrosion rate of Fe-X alloys (X=Sb, Se, Sn, As) exposed for 4 hours 40% H_2SO_4 at 60°C

	No. of specimen	Chemical composition							Corrosion rate in mg/cm²/hr
		C	Si	Mn	P	S	Cu	Others	
Fe-Sb alloys	B-1	0.002	0.005	0.001	0.003	0.004	0.01	Sb 0.010	73.5
	2	0.002	0.004	0.001	0.003	0.004	"	0.035	49.9
	3	0.002	0.004	0.001	0.002	0.004	"	0.055	40.0
	4	0.004	0.004	0.001	0.007	0.004	"	0.10	34.5
	5	0.001	0.005	0.001	0.007	0.004	"	0.29	22.4
Fe-Se alloys	B-6	0.002	0.004	0.28	0.003	0.005	"	Se 0.021	40.0
	7	0.002	0.006	0.28	0.003	0.005	"	0.036	15.9
	8	0.002	0.004	0.28	0.003	0.005	"	0.078	10.1
	9	0.003	0.003	0.28	0.002	0.006	"	0.18	8.2
	10	0.004	0.004	0.29	0.006	0.007	"	0.35	7.0
Fe-Sn alloys	B-11	0.002	0.003	0.001	0.006	0.005	"	Sn 0.051	55.2
	12	0.001	0.003	0.001	0.003	0.005	"	0.11	53.5
	13	0.002	0.004	0.001	0.003	0.005	"	0.33	45.8
	14	0.002	0.002	0.001	0.003	0.005	"	0.47	40.6
Fe-As alloys	B-15	0.002	0.004	0.001	0.003	0.004	"	As 0.031	232.0
	16	0.002	0.004	0.001	0.003	0.004	"	0.077	167.7
	17	0.002	0.004	0.001	0.012	0.002	"	0.236	91.2
	18	0.002	0.003	0.001	0.006	0.003	"	0.382	71.5
	19	0.002	0.003	0.001	0.005	0.005	"	0.500	56.0

効果としては Se が最もすぐれ, ついで, Cu, Sb, Sn, As の順である。As は添加が少量では腐食度を著しく大きくするが, 添加量が多くなると腐食度の極大値を経て減少する。Sn は 0.05% 以上添加しても腐食速度はわずかしき減少しない。

Fe-Cu-Sb, Fe-Cu-Se, Fe-Cu-Sn および Fe-Cu-As 3 元合金系の供試材の化学成分および実験結果は Table 3 に示した。これらの 3 元合金系では, Cu (約 0.3% Cu) と共存する Sb, Se, Sn および As の効果は, Fig. 4 に示したように, 単独添加の場合とは異なり Sn の効果はほとんどなく,

As は付加的效果を持つことがわかる。

Sb および Se の場合には Cu との相乗作用が著しく耐食性におよぼす効果は極めて大きい。

(3) Ni および Cr の影響について

Table 4 の D-1~D-5 に, 0.1 C-0.4 Si-0.3 Mn-0.3 Cu 鋼の耐食性におよぼす Ni および Cr の影響を, 供試材の化学成分とともに示した。この実験結果から明らかなく, Ni および Cr は単独でも複合添加でもいずれの場合にも耐硫酸性を低下させる。

Table 3 Chemical composition and corrosion rate of Fe-Cu-X alloys (X=Sb, Se, Sn, As) exposed for 4 hours in 40% H₂SO₄ at 60°C

	No. of specimen	Chemical composition							Corrosion rate in mg/cm ² /hr
		C	Si	Mn	P	S	Cu	Others	
Fe-Cu-Sb alloys	C-1	0.003	0.003	0.001	0.002	0.005	0.29	Sb	8.7
	2	0.002	0.003	0.001	0.003	0.006	0.31	0.011	5.0
	3	0.002	0.003	0.001	0.003	0.006	0.31	0.037	3.8
	4	0.001	0.003	0.001	0.003	0.005	0.30	0.051	2.7
	5	0.001	0.003	0.001	0.003	0.005	0.31	0.096	2.7
Fe-Cu-Se alloys	C-6	0.002	0.006	0.29	0.002	0.007	0.31	Se	6.6
	7	0.002	0.005	0.29	0.002	0.005	0.30	0.020	6.0
	8	0.003	0.005	0.30	0.002	0.005	0.30	0.032	5.1
	9	0.003	0.004	0.28	0.002	0.005	0.30	0.070	4.6
	10	0.006	0.004	0.29	0.002	0.006	0.30	0.12	4.3
Fe-Cu-Sn alloys	C-11	0.001	0.003	0.001	0.002	0.005	0.29	Sn	8.9
	12	0.002	0.003	0.001	0.002	0.005	0.28	0.052	8.3
	13	0.001	0.003	0.001	0.003	0.005	0.30	0.11	8.2
	14	0.001	0.003	0.001	0.003	0.005	0.31	0.30	8.0
Fe-Cu-As alloys	C-15	0.002	0.002	0.001	0.003	0.005	0.29	As	8.7
	16	0.002	0.002	0.001	0.003	0.005	0.29	0.038	6.9
	17	0.002	0.005	0.001	0.003	0.005	0.32	0.084	6.5
	18	0.002	0.003	0.001	0.003	0.005	0.32	0.221	6.1
	19	0.002	0.004	0.001	0.003	0.003	0.33	0.369	5.5

Fig.4 Effect of third elements on corrosion rate of Fe-Cu-X alloys in 40% H₂SO₄ at 60°C

(4) NiおよびCrが存在する場合のSb₂の効果について

0.1 C-0.4 Si-0.3 Mn-0.3 Cu-0.5 Ni-0.5 Cr 鋼の耐硫酸性におよぼすSbの効果は供試材の化学成分とともにTable 4のD-6~D-13に示した。Fig.5にSb量と腐食速度との関係を示したが、Table 3のC-1~C-5に示したFe-Cu-Sb合金の場合よりも常に腐食速度が大きい。これは、C, Ni, Crなどの悪影響によるものであるが、しかしながら、耐食性におよぼすSbの効果については両者とも同じ傾向を示している。

(5) SおよびPの影響について

鋼中Sの耐食性におよぼす影響については、Table 4のD-14~D-17に示したように、0.1 C-0.4 Si-0.3 Mn-0.3 Cu-0.5 Ni-0.5 Cr-0.05 Sb 鋼について検討した。

実験結果はFig.6に示したが、鋼中のS量と腐食速度は直線関係が成立し、S濃度の増加とともに腐食速度は増大する。

Pについての供試材の化学成分および実験結果はTable 4のD-18~D-20およびFig.6にSとともに示してある。この図からわかるように、鋼中のPが増加するにつれて腐食速度は指数函数的に急激に増大する。

つぎに、SおよびPの量がほぼ0.04%程度の0.1 C-0.4 Si-0.3 Mn-0.3 Cu 鋼について、Sb添加の効果を検討した。供試材の化学成分および実験結果は、Table 4のD-21~D-30に示してある。これらの実験結果はFig.7に示してあるが、この図から見て0.3% Cuの場合には、0.1% Sb添加程度でPおよびSの悪影響を抑制しうる。また、0.6% Cuを添加するとPおよびSの悪影響は十分抑制され、0.05% Sb添加ですぐれた耐硫酸性を示す。

(6) Siの影響について

Table 4のD-31~D-35にSi濃度の影響を検討するために用いた供試材の化学成分および実験結果を示した。Fig.8にSi濃度と腐食速度との関係を示したが、この図から明らかのように、Si濃度の増大につれて耐硫酸性はわずかに増大しSi濃度と腐食速度との間には直線関係が成立つがSiの効果は小さい。

(7) Mo, Ti, TeおよびBiの影響について

Table 4のD-36~D-48に、比較材とともに、供試材の化学成分および実験結果を示した。これらの結果からわかるように、Mo, Tiなどは耐硫酸性を著しく低下させ、Te, Biなどはほとんど影響しない。

Table 4 Chemical composition and experimental results

No. of specimen	Chemical composition									Corrosion rate	
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Sb	in mg/cm ² /hr	Remarks
D- 1	0.102	0.40	0.30	0.003	0.004	0.30	—	—	—	9.1	Cu
2	0.103	0.42	0.31	"	"	0.30	0.48	—	—	19.8	Cu-Ni
3	0.104	0.74	0.30	"	"	0.31	—	0.48	—	12.4	Cu-Cr
4	0.108	0.41	0.27	"	"	0.31	0.49	0.47	—	15.0	Cu-Ni-Cr
5	0.102	0.44	0.27	"	"	0.32	0.49	0.50	—	17.7	Cu-Ni-Cr
6	0.116	0.35	0.26	"	"	0.30	0.49	0.48	0.047	6.7	Effect of Sb in Fe-Cu-Ni-Cr Alloys
7	0.101	0.41	0.24	"	"	0.31	0.47	0.50	0.093	6.1	
8	0.107	0.45	0.26	"	"	0.32	0.48	0.50	0.094	5.9	
9	0.108	0.43	0.32	"	"	0.32	0.50	0.51	0.098	4.5	
10	0.110	0.47	0.23	"	"	0.32	0.48	0.49	0.14	4.6	
11	0.105	0.41	0.27	"	"	0.31	0.49	0.47	0.19	3.6	
12	0.110	0.40	0.23	"	"	0.31	0.49	0.51	0.22	3.9	
13	0.102	0.43	0.26	"	"	0.32	0.50	0.49	0.39	4.1	
14	0.107	0.37	0.27	"	0.018	0.30	0.49	0.49	0.046	10.0	Effect of S in Fe-Cu-Ni-Cr-0.05 Sb Alloys
15	0.099	0.35	0.23	"	0.030	0.30	0.49	0.49	0.046	11.9	
16	0.099	0.39	0.26	"	0.046	0.30	0.49	0.49	0.053	14.1	
17	0.101	0.44	0.23	"	0.046	0.30	0.48	0.47	0.045	14.2	
18	0.099	0.40	0.25	0.018	0.004	0.31	0.49	0.49	0.049	10.3	Effect of P in Fe-Cu-Ni-Cr-0.05 Sb Alloys
19	0.101	0.37	0.27	0.032	0.004	0.31	0.49	0.45	0.048	19.8	
20	0.100	0.42	0.26	0.050	0.004	0.30	0.49	0.48	0.052	53.0	
21	0.103	0.40	0.30	0.016	0.025	0.30	—	—	0.05	11.1	Effect of S and P in Fe-Fe-Cu-Sb Alloys
22	0.116	0.42	0.30	0.016	0.027	0.30	—	—	0.11	6.9	
23	0.103	0.40	0.30	0.016	0.025	0.30	—	—	0.20	5.5	
24	0.095	0.41	0.28	0.018	0.023	0.31	—	—	0.32	5.3	
25	0.132	0.46	0.59	0.019	0.026	0.30	—	—	0.15	5.9	
26	0.121	0.42	0.62	0.019	0.025	0.31	—	—	0.28	5.5	
27	0.098	0.75	0.54	0.017	0.030	0.30	—	—	0.088	6.2	
28	0.103	0.80	0.42	0.017	0.028	0.59	—	—	0.10	4.8	
29	0.101	0.80	0.45	0.017	0.026	0.59	—	—	0.038	6.1	
30	0.121	0.47	0.39	0.017	0.025	0.60	—	—	—	9.9	
31	0.106	0.82	0.27	—	—	0.31	—	—	0.044	6.0	Effect of Si in Fe-Cu-0.05 Sb Alloys
32	0.102	0.38	0.25	—	—	0.28	—	—	0.038	6.8	
33	0.099	0.38	0.25	—	—	0.28	—	—	Sb 0.038	7.2	
34	0.102	0.25	0.30	—	—	0.30	—	—	0.045	7.4	
35	0.107	0.078	0.41	—	—	0.30	—	—	0.045	8.1	
36	0.105	0.21	0.27	—	—	0.78	—	—	—	12.1	Effect of Mo
37	0.105	0.23	0.27	—	—	0.80	—	—	Mo 0.57	65.8	
38	0.109	0.24	0.27	—	—	0.40	0.39	—	—	16.9	Effect of Ti
39	0.110	0.32	0.34	—	—	0.39	0.39	—	Ti 0.17	29.6	
40	0.153	0.22	0.29	—	—	0.40	0.40	0.78	—	16.1	Effect of Mn
41	0.118	0.31	0.76	—	—	0.41	0.40	0.81	—	23.1	
42	0.105	0.38	0.127	—	—	0.30	—	—	—	9.1	Effect of Te
43	0.103	0.29	0.16	—	—	0.31	—	—	Te 0.014	9.3	
44	0.103	0.46	0.33	—	—	0.31	—	—	0.042	9.2	
45	0.094	0.44	0.32	—	—	0.30	—	—	0.068	10.5	
46	0.098	0.46	0.35	—	—	0.31	—	—	Bi 0.014	9.7	Effect of Bi
47	0.088	0.46	0.36	—	—	0.31	—	—	0.037	10.2	
48	0.096	0.48	0.39	—	—	0.31	—	—	0.050	10.3	

III. 考 察

IIで述べたように、60°C、40% 硫酸中で4時間浸漬試験を行ない鋼中に添加される諸元素の耐食性を検討した結果、Cuと共存して

耐硫酸性向上に効果的なもの：Sb, Se, As

耐硫酸性向上にやや効果的なもの：Si

耐硫酸性にほとんど影響のないもの：Sn, Bi, Te

耐硫酸性をやや低下させるもの：C, Mn

耐硫酸性を低下させるもの：Ni, Cr

耐硫酸性を著しく低下させるもの：P, S, Ti, Moに分類される。

これらの実験結果と元素の周期律表とを比較して見ると、耐食性向上に効果のあるSb, Se, AsはVB, VIB族にあつて、しかもPおよびSのように耐食性を低下させる元素と同じ族に属する。これらの元素以外のTi, Mo, Crなどの金属元素はすべて耐硫酸性を低下させるので、Sb, Asなど金属元素と非金属元素の中間に位するいわゆるメタロイドの元素がCuと共存して耐硫酸性を向上させていることがわかる。

その物理的意味については明確ではないが、Fe-Cu-Sbまたは、Fe-Cu-Se系合金の場合には、鋼表面上に密な密着性のよい腐食生成皮膜が形成されており、このため、陰極における水素過電圧を大きくして陰極反応を抑制する

Fig. 5 Effect of antimony on corrosion rate of 0.1 C-0.4 Si-0.3 Mn-0.3 Cu-0.5 Ni-0.5 Cr steels in 40% H_2SO_4 at 60°C

Fig. 6 Effect of sulfur and phosphorus on corrosion rate of 0.1 C-0.4 Si-0.3 Mn-0.3 Cu-0.5 Ni-0.5 Cr-0.05 Sb steels in 40% H_2SO_4 at 60°C

Fig. 7 Effect of antimony on corrosion rate of steels containing approximately 0.04% of S and P

ものと考えられ、この腐食生成皮膜の構造の相違が Cu と共存する Sb, Se, As などの耐硫酸性の差異をもたらしているものと思われる。

Fig. 8 Effect of silicon on corrosion rate of steels in 40% H_2SO_4 at 60°C

IV. 結 語

重油専焼ボイラーの低温部では、重油に含まれるイオウ分に起因する“イオウ露点腐食”が問題となり、硫酸中における鋼材の腐食が重要視されるようになった。空気予熱器などの鋼表面上に凝縮する硫酸濃度については Taylor の研究⁽⁶⁾によりよく知られているので、60°C、40% 硫酸中での鋼の腐食量を測定し、添加合金元素の影響を検討した結果、

(1) Cu 添加により、硫酸に対する耐食性は著しく向上する。この場合、0.003% C 鋼でも 0.5% Cu 鋼でも Cu の効果は同じ傾向を示し、Damon の 0.05% Cu 以下の鋼についての実験結果とは異なり、鋼中炭素量と腐食速度との間には複雑な関係はなく、C 量と腐食速度との間には直線関係がある。

(2) Cu と共存して耐食性を向上させる元素は、Sb, Se および As の 3 元素であつて、その効果の順は $Sb > Se > As$ である。

(3) 鋼中の S および P は耐食性を著しく低下させるが、これらの元素の腐食速度の増大は S については直線的、P については指数関数的である。

(4) Si は耐食性をやや向上せしめるが、Sn, Bi, Te はほとんど耐食性に影響はなく、C, Mn はやや耐食性を低下させる。また、Ti, Mo, Cr, Ni など耐食性を低下させる。

ことなどが明らかとなつた。

Cu と Sb, Se, As などの相乗作用には相違があり、そのちがいは鋼表面上に形成される腐食生成物の差異によるものと思われるが、これらの Fe-Cu-X (X=Sb, Se, As など) 合金系の電気化学的特性や腐食生成物については後報にゆずる。

なお、この研究に関し、種々御指導をいただいた東京大学工学部 久松敬弘教授に心から謝意を表する。