

鉄筋コンクリート用棒鋼の腐食性状 に関する実験研究

月 永 洋 一*

An Experimental Study of Corrosion Characteristics of Steel Bar for Concrete Reinforcement

Yoichi TSUKINAGA

Abstract

To see how the corrosion characteristics of reinforcing bar depend on its type and particular environment where it is placed, plastically strained reinforcing bar and scale coated reinforcing bar were exposed outdoor to atmosphere at five points in Hachinoe for a corrosion test and further the same materials were sprayed salt water, artificial sea water for an accelerated corrosion test. The following conclusions were drawn:

(1) In the atmospheric exposure test in Hachinoe, the seaside area was found to have the most corrosive atmosphere, which was followed by the industrial area where the corrosion proceeded about 65% as fast as in the seaside area. The suburb, commercial and residential areas did not differ substantially, presenting the least corrosive atmosphere with the percentage corrosion rates of 31 to 38%.

(2) Climatic condition and air pollutant that were found to mainly affect the corrosion rates were temperature and chlorides. Environmental factors were found that the corrosion rates can be expressed by multiple regression equation of corrosion rates.

(3) The accelerated corrosion test in artificial sea water gave similar results to the atmospheric corrosion test in the seaside area.

(4) In our tests, plastically strained reinforcing bar differed practically nothing in the corrosion rates from the unstrained control.

(5) The scale coated reinforcing bar presented rather slow corrosion rates. The percentage uncorroded rates of scale coated reinforcing bar was estimated to about 80% in the inland area, about 35% in the seaside area and about 55% in the industrial area even five months after the start of exposure to atmosphere.

1. はじめに

日本における腐食対策費は、(社)腐食防食協会と(社)日本防錆技術協会との共同調査¹⁾によると、1974年度で2兆5,500億円と算定されている。腐食対策費を含めた腐食損失額は、GNPの3~4%といわれており、現在の金額を推定すると9兆円を上回る。腐食による経済損

失がいかに莫大なものであるかが窺える。

腐食反応は、金属と環境との境界面で起こる不均一系反応であり、その進行状態は、金属の形態と環境条件によって大きく異なる。金属側因子としては、表面構造が支配的である。実用上はこれによって局所的に集中して起こる局部腐食が問題であり、構造物全体が使用不能となる事態さえ生ずる。環境因子としては、近年にみられる構造物の海洋環境への進出、大気汚染の増大等があり、腐食の早期進行が顕在化して

昭和60年10月31日受理

* 八戸工業大学建築工学科講師

いる。

本研究は、以上のような視点から、金属側因子に関して材料使用時に不可欠の切削、曲げなどの加工による塑性変形と防錆能力を持つ黒皮について、また、環境側因子に関して大気腐食の地域性と環境要素について実験、検討したものである。

2. 実験概要

実験は、次の III シリーズよりなる。

実験 I —— 腐食促進試験

実験 II —— 最大 5 箇月間の 2 地域における大気暴露試験

実験 III —— 最大 1 年間の 5 地域における大気暴露試験

2.1 供試材

JIS G3112「鉄筋コンクリート用棒鋼」に規定する SR24 $\phi 16$ を用い、仕上げ # 400 の研磨紙で研磨した後、約 10% まで引伸ばした塑性ひずみを与えた鉄筋（実験 I では約 20% まで引伸ばした鉄筋も使用）と与えていない鉄筋および黒皮が付いたままの鉄筋の三種類を供試材とした。表-1 に供試鉄筋の化学成分・機械的性質を、図-1 に供試鉄筋の形状を示す。

表 1 供試鉄筋の化学成分・機械的性質

化 学 成 分 (%)						機 械 的 性 質		
C	Si	Mn	P	S	Cu	降 伏 点 (kg/mm ²)	引張強さ (kg/mm ²)	伸 び (%)
0.12	0.26	0.60	0.030	0.027	0.29	35	48	32

表 2 人工海水の組成

薬 品 名	質量(g/l)
塩化ナトリウム(NaCl)	24.5
塩化マグネシウム(MgCl ₂ ・6H ₂ O)	11.1
硫酸ナトリウム(Na ₂ SO ₄)	4.1
塩化カルシウム(CaCl ₂)	1.2
塩化カリウム(KCl)	0.7
炭酸水素ナトリウム(NaHCO ₃)	0.2

2.2 腐食促進試験

JIS Z2371「塩水噴霧試験方法」に準じて行った。試験溶液は、塩水および人工海水の 2 種類とし、塩水は塩化ナトリウム濃度 5% (質量) 溶液、人工海水は ASTM D1141「Standard Specification for Substitute Ocean Water」を参考とし、表-2 人工海水の組成に示す溶液を用いた。試験期間は、最大 30 日間とし、塩水 7 期間、人工海水 9 期間とした。

2.3 大気暴露試験

JIS Z0304「さび止め処理金属の大気暴露試験方法」を参考として行った。試験地域は、八戸市内の大気環境条件が異なる海岸地域、工業地域、商業地域、住居地域、郊外地域の 5 地域を設定した。実験 II では海岸地域と郊外地域、実験 III では全地域について試験を実施した。試験地点は、条件をなるべく統一するため、各地域とも 3 階建或いは 4 階建の建物の屋上とした。

環境要素の調査は、八戸測候所および青森県公害センターによる気象要素および大気汚染物質測定結果^{2),3)} にもとづき、暴露地点と同地点或いは最も近い環境条件にあると推定される地点の測定結果を抽出した。



図-1 供試鉄筋の形状

表-3 および図-2 に試験地域・地点および環境要素測定地点を示す。

試験期間は、実験 II においては昭和 57 年 7 月から同年 11 月までの 5 箇月間を最大とし、7 期間、実験 III においては昭和 58 年 9 月から昭和 59 年 8 月までの 1 年間を最大とし、11 期間とした。

2.4 腐食の評価方法

試験後の供試鉄筋表面に固着した腐食生成物を除錆液に浸漬して除去し、試験前後の供試鉄筋質量の差を腐食減量として、単位面積当りの腐食減量を腐食量、平均侵食深さを侵食量と定義し、次式より算出した。

表 3 試験地域、地点および環境要素測定地点

試験地域	試験地点	環境要素測定地点
海岸地域	S (3 F 屋上)	$s'(3F屋上) \cdot W$
工業地域	I (4 F 屋上)	$i(4F屋上) \cdot i'(3F屋上) \cdot W$
商業地域	C (4 F 屋上)	$c(4F屋上) \cdot W$
住居地域	R (3 F 屋上)	$o'r'(3F屋上) \cdot W$
郊外地域	O (3 F 屋上)	$o'r'(3F屋上) \cdot W$

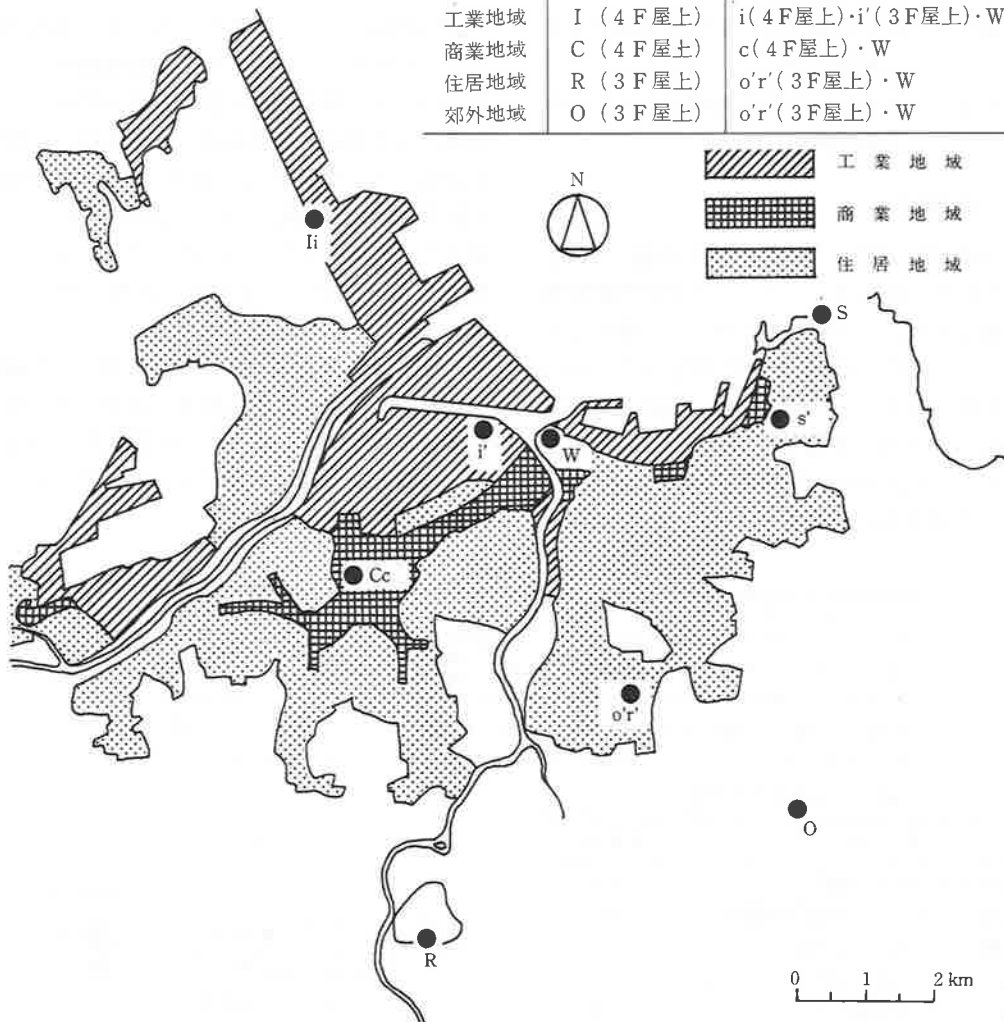


図-2 試験地域・地点および環境要素測定地点

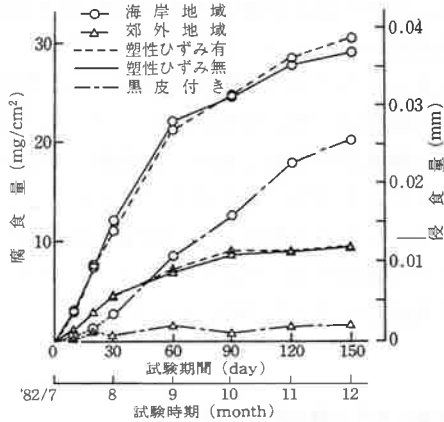


図-3 大気暴露試験における腐食量経時変化
(実験II)

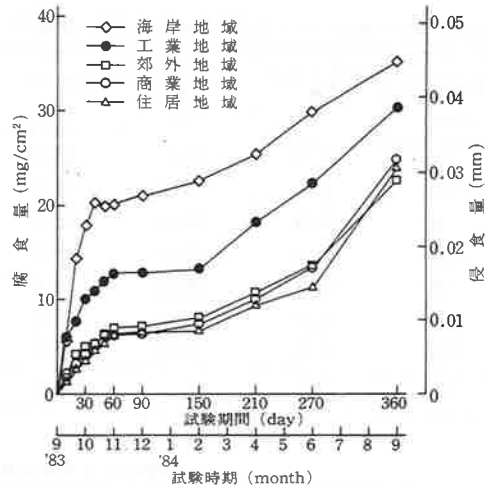


図-5 塑性ひずみ有の鉄筋の腐食量経時変化
(実験III)

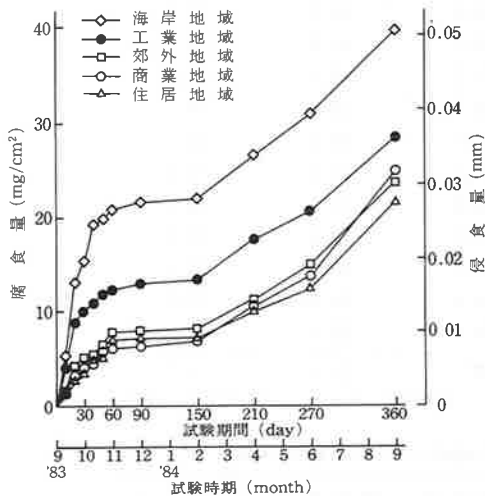


図-4 塑性ひずみ無の鉄筋の腐食量経時変化
(実験III)

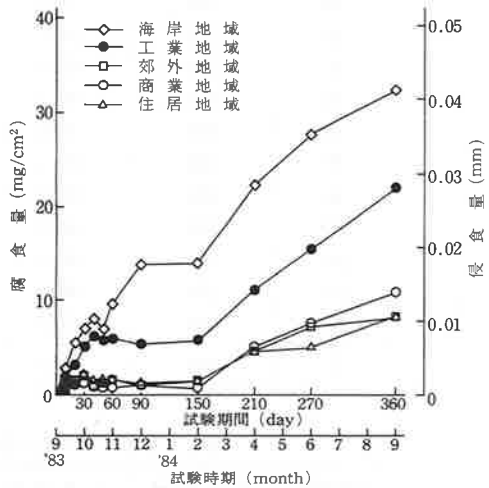


図-6 黒皮付鉄筋の腐食量経時変化
(実験III)

$$\text{腐食量}(\text{mg}/\text{cm}^2) = \frac{\text{腐食減量}(\text{mg})}{\text{供試鉄筋有効表面積}(\text{cm}^2)}$$

$$\text{侵食量}(\text{mm}) = \frac{\text{腐食量}(\text{mg}/\text{cm}^2)}{\text{供試鉄筋密度}(\text{g}/\text{cm}^3)} \times 10^{-2}$$

なお、除錆液による腐食生成物除去は、微量であるが金属部も侵され、黒皮付鉄筋の場合は黒皮も除去されるので、同時にブラントテストを行い、除錆液による金属部侵食量および黒皮除去量を求めた。

3. 結果および考察

3.1 大気腐食の地域性

図-3～図-6に大気暴露試験による腐食量経時変化を示す。また、表-4～表-7に各地域の腐食率を示す。

試験5地域において、最も高い腐食程度を示すのは海岸地域であり、海岸地域に対する各地域の腐食率は、長期間になる程高くなる傾向を示すが、平均値で示すと工業地域においてはど

表4 海岸地域に対する郊外地域の腐食率(実験Ⅱ)

試験期間 (day)	塑性ひずみ 無 (%)	塑性ひずみ 有 (%)	黒皮付き (%)
10	37.5	36.7	66.7
20	39.7	38.2	71.4
30	36.9	39.6	18.5
60	30.9	33.3	16.7
90	34.8	36.2	4.8
120	31.8	31.4	7.3
150	32.3	30.5	8.3
\bar{x}	34.8	35.1	27.7

の供試鉄筋も65%前後であり、他の三地域においては黒皮付鉄筋を除いて郊外地域、商業地域、住居地域の順に小さくなる傾向を示すが、三地域とも大差なく31~38%の範囲にある。黒皮付鉄筋の場合は、特に初期の値が大きいが、暴露初期は腐食量が微量であり、除錆液に浸漬する際に生ずる黒皮除去量の誤差によるものと推察される。この点を除けば、三地域の暴露後5ヶ月までの腐食率は、およそ10%以下であり、以降平均値で示すと約25%となる。

表5 塑性ひずみ無の鉄筋の海岸地域に対する腐食率(実験Ⅲ)

試験期間 (day)	海岸地域 (%)	工業地域 (%)	郊外地域 (%)	商業地域 (%)	住居地域 (%)
10	100	76.9	26.9	25.0	26.9
20	100	67.7	32.3	24.6	20.0
30	100	65.4	33.3	26.1	22.2
40	100	56.3	28.1	23.4	24.5
50	100	59.6	32.8	29.3	25.3
60	100	59.1	37.5	28.8	33.2
90	100	59.7	36.6	28.7	32.9
150	100	60.5	37.3	30.9	32.7
210	100	66.5	42.1	39.5	37.2
270	100	66.8	48.4	44.2	39.7
360	100	71.9	59.8	62.8	54.5
\bar{x}	100	64.6	37.7	33.0	31.7

表6 塑性ひずみ有の鉄筋の海岸地域に対する腐食率(実験Ⅲ)

試験期間 (day)	海岸地域 (%)	工業地域 (%)	郊外地域 (%)	商業地域 (%)	住居地域 (%)
10	100	107.0	29.8	36.8	21.1
20	100	52.8	29.2	22.2	18.1
30	100	55.9	27.9	23.5	19.6
40	100	53.4	26.0	26.0	22.5
50	100	60.0	31.5	31.0	26.5
60	100	63.7	34.8	30.8	31.3
90	100	61.1	34.1	30.3	30.8
150	100	52.2	35.7	32.6	29.5
210	100	71.8	42.4	39.6	36.9
270	100	74.7	45.7	45.0	38.0
360	100	86.4	64.9	70.8	68.3
\bar{x}	100	67.2	36.5	32.4	31.1

表7 黒皮付鉄筋の海岸地域に対する腐食率（実験Ⅲ）

試験期間 (day)	海岸地域 (%)	工業地域 (%)	郊外地域 (%)	商業地域 (%)	住居地域 (%)
10	100	75.9	31.0	37.9	20.7
20	100	60.7	30.4	21.4	25.0
30	100	74.6	31.0	18.3	32.4
40	100	79.3	12.2	13.4	19.5
50	100	84.1	18.8	13.0	26.1
60	100	62.9	16.5	8.2	16.5
90	100	39.6	7.9	7.9	9.4
150	100	41.4	10.7	5.7	10.7
210	100	49.8	20.9	23.1	20.9
270	100	56.1	26.3	27.7	18.3
360	100	68.0	25.5	33.5	25.8
\bar{x}	100	62.9	21.0	19.1	20.5

3.2 腐食に関する環境要素との解析

表-8～表-17に各地域における腐食量と対応させた環境要素の量およびこれら相互間の単相関関係を示す。なお、月ごとの腐食量は、実測値から期間ごとの値を求め、その間は直線的に増加するものと仮定して算出した。

腐食量と強度の正の相関を示す環境要素は、海岸地域と工業地域においては塩素イオン、他の三地域においては気温であった。前者二地域においては、他に降水量、気温、後者三地域においては、塩素イオン、降水量、日射量などが正の相関を示している。これらの要素は複合して大気腐食に影響を及ぼすものであるが、八戸市における腐食性状を特徴づける要素としては、気温と塩素イオンが考えられる。特に気温は、腐食反応速度の停滞する冬季において顕著な影響を及ぼすようであり、冬季における決定的要因と推察される。また、塩素イオン量は、夏季において内陸地でも比較的大きな値を示すが、八戸市の気象特性である夏季の偏東風によって、海塩粒子が内陸地まで運搬されるためと推察される。

以上の影響要素は、八戸市全域における共通の要素であり、地域による影響要素の特徴をみ

た場合、地域別の腐食量は海岸地域が最大で次いで工業地域の順となり、他の三地域は大差ない結果を示すことから、海岸地域においては、環境要素測定地点が内陸よりという点を考慮すると、塩素イオン量が支配的要素と推察され、工業地域においては、商業地域に比べ総じて大気汚染物質量の値が小さいが、硫黄酸化物量については値が著しく大きく、硫黄酸化物量が支配的要素と推察される。他の三地域においては、商業地域において大気汚染物質量が比較的大きな値を示すものの、三地域とも腐食量に大差はなく、特に大きく影響を及ぼす要素はないものと推察される。

以上の環境要素から、各地域のnヶ月における腐食量を算出することを試みた結果、次式の重回帰式を求めることができた。尚、日射量・日照時間および風速・風向については、それぞれ相互と気温とに相関性が認められるので、重複をさけるため、これらの要素を除いて検討した。

$$y = \sum_{i=1}^n (a + b_1x_{1i} + b_2x_{2i} + b_3x_{3i} + b_4x_{4i} + b_5x_{5i} + b_6x_{6i} + b_7x_{7i} + b_8x_{8i})$$

ここで

表8 海岸地域における腐食量と対応させた環境要素の量

年・月	腐食量 (mg/cm^2)	気 温 ($^{\circ}\text{C}$)	湿 度 (%)	風 速 (m/s)	風 向 (16方位)	降水量 (mm)	日射量 (MJ/m^2)	日 照 時 間 (h)	硫 黄 酸化物 (mg/day $/100\text{cm}^2$)	二酸化 窒 素 (ppm)	降 下 ばいじん (t/km^2)	塩 素 イオン (kg/km^2)	硫 酸 イオン (kg/km^2)
	S *	s' *	s' *	s' *	s' *	W *	W *	W *	s' *	s' *	s' *	s' *	s' *
58・9	15.30	18.8	81	1.2	ENE	180.5	396.8	178.2	0.08	0.007	4.58	1,498	304
10	5.50	11.3	70	2.5	WSW	40.5	361.0	207.4	0.16	0.012	2.94	284	164
11	0.80	6.2	77	2.1	WSW	33.0	241.5	164.8	0.13	0.013	2.11	201	101
12	0.20	0.6	73	2.7	W	50.0	207.8	162.6	0.23	0.016	4.43	325	231
59・1	0.20	-2.6	72	2.6	W	32.0	254.6	180.4	0.18	0.013	2.17	260	281
2	2.30	-3.4	76	2.7	W	52.5	282.6	158.4	0.23	0.009	3.79	454	782
3	2.30	-0.5	71	2.4	W	30.5	436.7	214.8	0.14	0.009	5.61	545	516
4	2.20	4.2	80	1.5	ENE	142.0	496.3	218.8	0.06	0.008	7.31	653	725
5	2.20	9.2	86	1.2	E	60.5	534.2	184.0	0.05	0.007	3.32	158	143
6	2.93	17.0	79	1.1	ENE	71.5	549.3	196.7	0.06	0.008	3.99	44	197
7	2.93	20.8	85	0.8	ENE	140.0	519.9	184.8	0.06	0.008	1.95	66	335
8	2.93	24.0	78	1.2	NE	43.0	598.6	273.9	0.05	0.006	3.96	378	198

* 記号は、測定地点を示す (図-2 参照)

表9 海岸地域における腐食量と対応させた環境要素相互間の単相関係係

	腐食量	気 温	湿 度	風 速	風 向	降水量	日射量	日 照 時 間	硫 黄 酸化物	二酸化 窒 素	降 下 ばいじん	塩 素 イオン	硫 酸 イオン
腐 食 量	1.000												
気 温	0.484	1.000											
湿 度	0.216	0.540	1.000										
風 速	-0.351	-0.831	-0.855	1.000									
風 向	-0.384	-0.803	-0.798	0.959	1.000								
降 水 量	0.661	0.446	0.619	-0.627	-0.663	1.000							
日 射 量	0.161	0.692	0.587	-0.828	-0.845	0.330	1.000						
日 照 時 間	0.017	0.477	-0.030	-0.352	-0.460	-0.056	0.695	1.000					
硫黄酸化物	-0.282	-0.754	-0.729	0.937	0.911	-0.494	-0.878	-0.530	1.000				
二酸化窒素	-0.412	-0.578	-0.641	0.757	0.784	-0.469	-0.858	-0.509	0.765	1.000			
降下ばいじん	0.148	-0.170	-0.048	-0.032	-0.209	0.313	0.255	0.343	-0.140	-0.280	1.000		
塩素イオン	0.818	0.070	0.019	-0.058	-0.162	0.588	-0.068	0.010	-0.046	-0.263	0.493	1.000	
硫酸イオン	-0.042	-0.459	-0.056	0.211	0.099	0.259	-0.029	-0.036	0.223	-0.230	0.592	0.306	1.000

表10 工業地域における腐食量と対応させた環境要素の量

年・月	腐食量 (mg/cm^2)	気 温 ($^{\circ}\text{C}$)	湿 度 (%)	風 速 (m/s)	風 向 (16方位)	降水量 (mm)	日射量 (MJ/m^2)	日 照 時 間 (h)	硫 黄 酸化物 (mg/day $/100\text{cm}^2$)	二酸化 窒 素 (ppm)	降 下 ばいじん (t/km^2)	塩 素 イオン (kg/km^2)	硫 酸 イオン (kg/km^2)
	I *	i' *	i' *	i' *	i' *	W *	W *	W *	i' *	i' *	i' *	i' *	i' *
58・9	10.00	18.8	83	3.8	WSW	180.5	396.8	178.2	0.40	0.017	7.02	1,686	805
10	2.30	11.1	73	4.4	WSW	40.5	361.0	207.4	0.48	0.017	2.63	317	164
11	0.60	5.8	81	3.8	WSW	33.0	241.5	164.8	0.40	0.016	2.70	172	135
12	0.20	0.4	80	4.5	WSW	50.0	207.8	162.6	0.41	0.019	3.53	380	45
59・1	0.20	-2.7	76	4.4	WSW	32.0	254.6	180.4	0.30	0.019	2.17	276	210
2	2.20	-3.5	79	4.5	WSW	52.5	282.6	158.4	0.52	0.014	2.10	265	398
3	2.20	-0.6	74	4.5	WSW	30.5	436.7	214.8	0.39	0.017	5.92	352	502
4	1.50	4.1	82	3.8	WSW	142.0	496.3	218.8	0.32	0.021	8.98	622	1,151
5	1.50	9.3	86	3.4	NE	60.5	534.2	184.0	0.23	0.020	6.29	155	720
6	2.63	17.1	80	3.2	NE	71.5	549.3	196.7	0.23	0.016	5.22	84	386
7	2.63	20.8	86	2.7	ENE	140.0	519.9	184.8	0.20	0.018	5.86	100	760
8	2.63	23.9	79	3.5	WSW	43.0	598.6	273.9	0.25	0.015	7.19	456	522

* 記号は、測定地点を示す (図-2 参照)

表11 工業地域における腐食量と対応させた環境要素相互間の単相関係係

	腐食量	気温	湿度	風速	風向	降水量	日射量	日照時間	硫酸黄酸化物	二酸化窒素	降下ばいじん	塩素イオン	硫酸イオン
腐食量	1.000												
気温	0.519	1.000											
湿度	0.221	0.401	1.000										
風速	-0.194	-0.779	-0.737	1.000									
風向	0.034	-0.427	-0.582	0.764	1.000								
降水量	0.692	0.450	0.618	-0.483	-0.185	1.000							
日射量	0.241	0.698	0.341	-0.718	-0.569	0.330	1.000						
日照時間	0.040	0.476	-0.240	-0.207	0.095	-0.056	0.695	1.000					
硫酸黄酸化物	0.089	-0.540	-0.526	0.809	0.710	-0.217	-0.706	-0.364	1.000				
二酸化窒素	-0.224	-0.198	0.302	-0.072	-0.170	0.292	0.053	-0.076	-0.346	1.000			
降下ばいじん	0.396	0.498	0.458	-0.515	-0.216	0.625	0.776	0.574	-0.523	0.358	1.000		
塩素イオン	0.856	0.230	0.114	0.116	0.407	0.646	-0.020	0.037	0.247	0.038	0.406	1.000	
硫酸イオン	0.422	0.324	0.553	-0.490	-0.244	0.764	0.659	0.311	-0.400	0.383	0.865	0.392	1.000

表12 郊外地域における腐食量と対応させた環境要素の量

年・月	腐食量 (mg/cm^2)	気温 ($^{\circ}\text{C}$)	湿度 (%)	風速 (m/s)	風向 (16方位)	降水量 (mm)	日射量 (MJ/m^2)	日照時間 (h)	硫酸黄酸化物 (mg/day /100 cm^2)	二酸化窒素 (ppm)	降下ばいじん (t/km^2)	塩素イオン (kg/km^2)	硫酸イオン (kg/km^2)
	O *	o'r *	W *	o'r *	o'r *	W *	W *	W *	o'r *	o'r *	o'r *	o'r *	o'r *
58・9	5.10	18.3	80	3.1	E S E	180.5	396.8	178.2	0.03	0.004	2.71	1,036	30
10	2.70	12.6	67	3.6	W	40.5	361.0	207.4	0.04	0.005	2.09	188	23
11	0.10	6.0	77	3.5	SW	33.0	241.5	164.8	0.06	0.007	1.78	106	63
12	0.15	0.1	73	4.1	W	50.0	207.8	162.6	0.09	0.008	3.23	306	104
59・1	0.15	-3.0	72	4.1	W	32.0	254.6	180.4	0.08	0.006	1.80	201	176
2	1.50	-3.8	75	4.0	WNW	52.5	282.6	158.4	0.11	0.007	1.98	134	351
3	1.50	-0.9	71	4.2	W	30.5	436.7	214.8	0.06	0.006	4.39	294	307
4	1.90	5.3	76	3.6	W	142.0	496.3	218.8	0.07	0.008	6.26	369	599
5	1.90	10.1	83	3.2	E	60.5	534.2	184.0	0.05	0.008	2.80	63	127
6	2.93	17.8	79	2.6	E S E	71.5	549.3	196.7	0.10	0.009	2.63	40	224
7	2.93	21.6	84	2.3	E S E	140.0	519.9	184.8	0.10	0.009	1.79	62	288
8	2.93	23.7	76	2.7	E	43.0	598.6	273.9	0.04	0.006	3.17	396	42

* 記号は、測定地点を示す（図-2 参照）

表13 郊外地域における腐食量と対応させた環境要素相互間の単相関係係

	腐食量	気温	湿度	風速	風向	降水量	日射量	日照時間	硫酸黄酸化物	二酸化窒素	降下ばいじん	塩素イオン	硫酸イオン
腐食量	1.000												
気温	0.763	1.000											
湿度	0.371	0.511	1.000										
風速	-0.645	-0.933	-0.714	1.000									
風向	-0.630	-0.847	-0.773	0.878	1.000								
降水量	0.681	0.452	0.569	-0.466	-0.377	1.000							
日射量	0.613	0.712	0.487	-0.729	-0.716	0.330	1.000						
日照時間	0.334	0.479	-0.153	-0.320	-0.290	-0.056	0.695	1.000					
硫酸黄酸化物	-0.386	-0.339	0.137	0.054	0.257	-0.071	-0.199	-0.451	1.000				
二酸化窒素	-0.302	0.020	0.481	-0.306	-0.155	0.023	0.249	-0.174	0.714	1.000			
降下ばいじん	0.035	-0.134	-0.113	0.197	0.189	0.263	0.336	0.449	-0.157	0.104	1.000		
塩素イオン	0.563	0.203	0.002	0.020	-0.141	0.571	-0.014	0.132	-0.563	-0.678	0.263	1.000	
硫酸イオン	-0.136	-0.337	0.080	0.153	0.345	0.286	0.193	0.029	0.513	0.472	0.626	-0.201	1.000

表14 商業地域における腐食量と対応させた環境要素の量

年・月	腐食量 (mg/cm^2)	気温 ($^{\circ}\text{C}$)	湿度 (%)	風速 (m/s)	風向 (16方位)	降水量 (mm)	日射量 (MJ/m^2)	日照時間 (h)	硫黄 酸化物 (mg/day ($/100\text{cm}^2$))	二酸化 窒素 (ppm)	降下 はいじん (t/km^2)	塩素 イオン (kg/km^2)	硫酸 イオン (kg/km^2)
	C *	c *	W *	c *	c *	W *	W *	c *	c *	c *	c *	c *	c *
58・9	4.00	18.7	80	2.4	E	180.5	396.8	178.2	0.08	0.010	6.77	1,697	791
10	2.00	11.0	67	3.1	WSW	40.5	361.0	207.4	0.07	0.009	2.97	210	166
11	0.20	5.8	77	2.6	WSW	33.0	241.5	164.8	0.09	0.014	3.18	338	434
12	0.30	0.1	73	3.3	WSW	50.0	207.8	162.6	0.11	0.014	5.22	299	98
59・1	0.30	-2.9	72	3.4	WSW	32.0	254.6	180.4	0.13	0.012	3.28	264	265
2	1.85	-3.6	75	3.3	WSW	52.5	282.6	158.4	0.15	0.010	3.21	161	366
3	1.85	-0.6	71	3.2	WSW	30.5	436.7	214.8	0.15	0.011	6.75	341	410
4	1.60	4.6	76	2.5	WSW	142.0	496.3	218.8	0.26	0.015	12.86	612	1,952
5	1.60	10.3	83	2.3	NE	60.5	534.2	184.0	0.15	0.015	8.22	367	1,188
6	3.77	18.0	79	2.2	NE	71.5	549.3	196.7	0.16	0.014	9.93	561	1,447
7	3.77	21.7	84	1.9	NE	140.0	519.9	184.8	0.19	0.014	10.21	900	1,880
8	3.77	24.0	76	2.3	WSW	43.0	598.6	273.9	0.09	0.009	12.91	1,327	2,310

* 記号は、測定地点を示す (図-2 参照)

表15 商業地域における腐食量と対応させた環境要素相互間の単相関関係

	腐食量	気温	湿度	風速	風向	降水量	日射量	日照時間	硫黄 酸化物	二酸化 窒素	降下 はいじん	塩素 イオン	硫酸 イオン
腐食量	1.000												
気温	0.836	1.000											
湿度	0.454	0.540	1.000										
風速	-0.679	-0.854	-0.822	1.000									
風向	-0.591	-0.607	-0.813	0.734	1.000								
降水量	0.549	0.455	0.569	-0.569	-0.517	1.000							
日射量	0.743	0.718	0.487	-0.763	-0.537	0.330	1.000						
日照時間	0.441	0.471	-0.153	-0.290	0.168	-0.056	0.695	1.000					
硫黄酸化物	0.027	-0.146	0.321	-0.249	-0.177	0.371	0.367	0.045	1.000				
二酸化窒素	-0.309	-0.100	0.507	-0.338	-0.373	0.175	0.067	-0.347	0.601	1.000			
降下はいじん	0.592	0.606	0.492	-0.721	-0.350	0.459	0.865	0.672	0.537	0.257	1.000		
塩素イオン	0.748	0.753	0.466	-0.612	-0.370	0.675	0.482	0.394	-0.152	-0.266	0.547	1.000	
硫酸イオン	0.633	0.699	0.586	-0.816	-0.389	0.449	0.863	0.638	0.478	0.206	0.944	0.566	1.000

表16 住居地域における腐食量と対応させた環境要素の量

年・月	腐食量 (mg/cm^2)	気温 ($^{\circ}\text{C}$)	湿度 (%)	風速 (m/s)	風向 (16方位)	降水量 (mm)	日射量 (MJ/m^2)	日照時間 (h)	硫黄 酸化物 (mg/day ($/100\text{cm}^2$))	二酸化 窒素 (ppm)	降下 はいじん (t/km^2)	塩素 イオン (kg/km^2)	硫酸 イオン (kg/km^2)
	R *	o'r *	W *	o'r *	o'r *	W *	W *	W *	o'r *	o'r *	o'r *	o'r *	o'r *
58・9	3.40	18.3	80	3.1	ESE	180.5	396.8	178.2	0.03	0.004	2.71	1,036	30
10	3.50	12.6	67	3.6	W	40.5	361.0	207.4	0.04	0.005	2.09	188	23
11	0.20	6.0	77	3.5	SW	33.0	241.5	164.8	0.06	0.007	1.78	106	63
12	0.05	0.1	73	4.1	W	50.0	207.8	162.6	0.09	0.008	3.23	306	104
59・1	0.05	-3.0	72	4.1	W	32.0	254.6	180.4	0.08	0.006	1.80	201	176
2	1.35	-3.8	75	4.0	WNW	52.5	282.6	158.4	0.11	0.007	1.98	134	351
3	1.35	-0.9	71	4.2	W	30.5	436.7	214.8	0.06	0.006	4.39	294	307
4	1.20	5.3	76	3.6	W	142.0	496.3	218.8	0.07	0.008	6.26	369	599
5	1.20	10.1	83	3.2	E	60.5	534.2	184.0	0.05	0.008	2.80	63	127
6	3.13	17.8	79	2.6	ESE	71.5	549.3	196.7	0.10	0.009	2.63	40	224
7	3.13	21.6	84	2.3	ESE	140.0	519.9	184.8	0.10	0.009	1.79	62	288
8	3.13	23.7	76	2.7	E	43.0	598.6	273.9	0.04	0.006	3.17	396	42

* 記号は、測定地点を示す (図-2 参照)

表17 住居地域における腐食量と対応させた環境要素相互間の単相関係係

	腐食量	気 温	湿 度	風 速	風 向	降水量	日射量	日 照 時 間	硫 黄 酸 化 物	二酸化窒素	降 下 ばいじん	塩 素 イオン	硫 酸 イオン
腐 食 量	1.000												
気 温	0.827	1.000											
湿 度	0.199	0.511	1.000										
風 速	-0.708	-0.933	-0.714	1.000									
風 向	-0.569	-0.847	-0.773	0.878	1.000								
降 水 量	0.433	0.452	0.569	-0.466	-0.377	1.000							
日 射 量	0.633	0.712	0.487	-0.729	-0.716	0.330	1.000						
日 照 時 間	0.452	0.479	-0.153	-0.320	-0.290	-0.056	0.695	1.000					
硫黄酸化物	-0.281	-0.339	0.137	0.054	0.257	-0.071	-0.199	-0.451	1.000				
二酸化窒素	-0.210	0.020	0.481	-0.306	-0.155	0.023	0.249	-0.174	0.714	1.000			
降下ばいじん	-0.113	-0.134	-0.113	0.197	0.189	0.263	0.336	0.449	-0.157	0.104	1.000		
塩素イオン	0.271	0.203	0.002	0.020	-0.141	0.571	-0.014	0.132	-0.563	-0.678	0.263	1.000	
硫酸イオン	-0.201	-0.337	0.080	0.153	0.345	0.286	0.193	0.029	0.513	0.472	0.626	-0.201	1.000

y : n ケ月における腐食量[mg/cm²]

x_1 : 月平均気温 [°C]

x_2 : 月平均湿度 [%]

x_3 : 月間降水量 [mm]

x_4 : 月間硫黄酸化物量 [mg/day/100 cm²]

x_5 : 月平均二酸化窒素濃度 [ppm]

x_6 : 月間降下ばいじん量 [t/km²]

x_7 : 月間塩素イオン量 [kg/km²]

x_8 : 月間硫酸イオン量 [kg/km²]

a および $b_1 \sim b_8$ は表-18 のとおり,

上記の重回帰式により算出した値と実測値の比較を図-7～図-11 に示す。腐食量月間値に対する回帰式の寄与率は、全地域 0.919～0.996 を示すが、腐食量実測値に対する回帰値は、海岸地域、住居地域、郊外地域の場合、実測値の±8%

以内に入り良く一致するものの、工業地域においては-15%、商業地域においては+27% の範囲で対応し、ややひらきが大きい。

3.3 大気暴露試験と促進試験の相関性

図-12 に促進試験における腐食量経時変化を、表-19 に促進試験人工海水と大気暴露試験海岸地域（実験 II）の腐食量の比較を示す。

促進試験人工海水による結果は、7 月から 11 月にかけて行った海岸地域の暴露試験結果に近似し、表-19 に示すように海岸地域の試験期間の丁度 1/5 の期間の値に近似する。以上から人工海水による促進試験は、海岸地域の夏季における腐食量を推定するための有効な方法であるといえる。

表18 重回帰式係数の値

係 数	海 岸 地 域	工 業 地 域	郊 外 地 域	商 業 地 域	住 居 地 域
a	40.256	8.582	-22.579	-5.455	-12.829
b ₁	-0.074	0.071	0.074	0.179	0.120
b ₂	-0.378	-0.029	0.512	0.118	0.357
b ₃	0.073	0.008	0.057	-0.008	0.049
b ₄	38.878	-1.941	190.291	26.621	173.021
b ₅	-1334.31	-317.97	-4990.61	-463.41	-4348.92
b ₆	-0.151	-0.353	4.385	0.200	3.792
b ₇	0.004	0.004	-0.021	0.001	-0.020
b ₈	-0.015	0.002	-0.028	-0.002	-0.024
重相関係数	0.981	0.959	0.985	0.988	0.990
寄 与 率	0.963	0.919	0.971	0.996	0.980

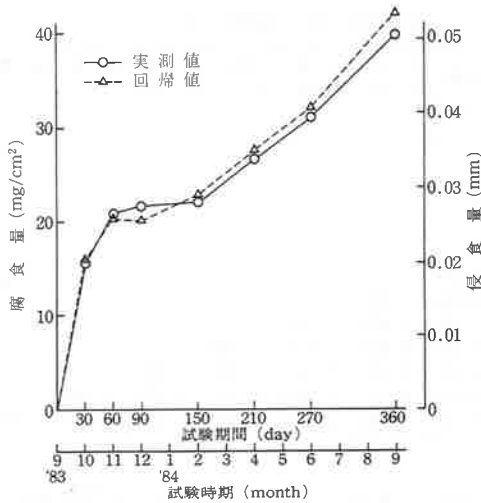


図-7 海岸地域における腐食量実測値と回帰値

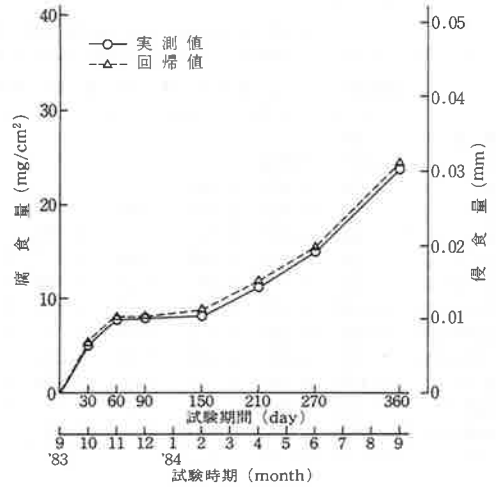


図-9 郊外地域における腐食量実測値と回帰値

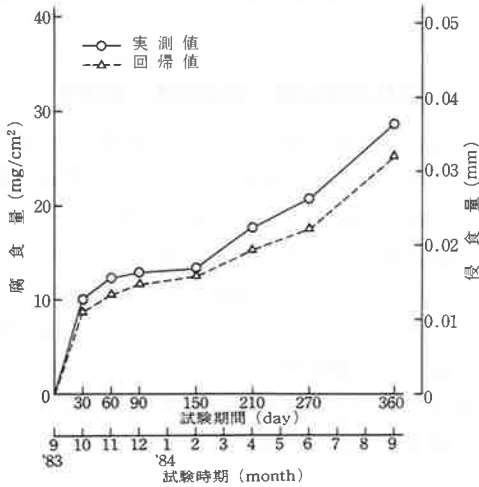


図-8 工業地域における腐食量実測値と回帰値

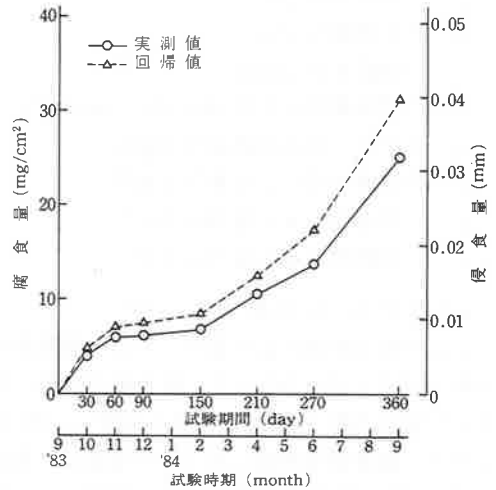


図-10 商業地域における腐食量実測値と回帰値

3.4 塑性ひずみを有する鉄筋と黒皮付鉄筋の腐食傾向

表-20～表-22 に塑性ひずみを有する鉄筋の腐食増大値を示す。

腐食環境によっては塑性ひずみを有する鉄筋の方が無い鉄筋に比べ腐食増大の傾向を示す場合もあるが、相対量としては微量であり、逆に塑性ひずみを持たない鉄筋の腐食量が多い場合もあって、本試験の結果からは塑性ひずみの有無による腐食程度の大差は認められないといえ

る。

表-23～表-25 に黒皮付鉄筋の黒皮防錆値を示す。

黒皮防錆率は、腐食が緩慢な地域では誤差を生じていると推察される初期を除いて暴露後5ヶ月まではおよそ80%の高い値を示し、腐食環境が厳しい海岸地域では約35%、工業地域で約55%を示して、以降漸次減少する傾向にある。

以上より、黒皮は腐食環境が緩慢な地域においては暴露後5ヶ月までは有効に働くといえる。

表21 塑性ひずみ有の鉄筋の腐食増大値(実験Ⅱ)

試験期間 (day)	海岸地域		郊外地域	
	増大量 (mg/cm ²)	増大率 (%)	増大量 (mg/cm ²)	増大率 (%)
10	-0.2	-6.2	-0.1	-8.3
20	0.3	4.1	0.0	0.0
30	-1.1	-9.0	-0.1	-2.2
60	-0.7	-3.2	0.3	4.4
90	0.2	0.8	0.4	4.7
120	0.6	2.2	0.1	1.1
150	1.4	4.8	-0.1	-1.1

4. まとめ

塑性ひずみを有する鉄筋および黒皮付鉄筋について、八戸市内5地域における大気暴露試験並びに塩水および人工海水による腐食促進試験を行った。その結果、以下の知見を得た。

(1) 八戸市における大気中の腐食程度は、海岸地域が最も高く、海岸地域に対して工業地域は約65%、郊外地域、商業地域、住居地域は大きく、31~38%の腐食率を示す。

(2) 腐食程度と強度の相関を示す環境要素は、海岸地域および工業地域においては塩素イオン、郊外地域、商業地域、住居地域においては気温であった。環境要素から腐食量を算出す

表22 塑性ひずみ有の鉄筋の腐食増大値(実験Ⅲ)

試験期間 (day)	海岸地域		工業地域		郊外地域		商業地域		住居地域	
	増大値 (mg/cm ²)	増大率 (%)	増大値 (mg/cm ²)	増大率 (%)	増大値 (mg/cm ²)	増大率 (%)	増大値 (mg/cm ²)	増大率 (%)	増大値 (mg/cm ²)	増大率 (%)
10	0.5	9.6	2.1	52.5	0.3	21.4	0.8	61.5	-0.2	-14.3
20	1.4	10.8	-1.2	-13.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
30	2.6	17.0	0.0	0.0	-0.1	-2.0	0.2	5.0	0.1	2.9
40	1.2	6.3	0.1	0.9	-0.1	-1.9	0.8	17.8	-0.1	-2.1
50	0.2	1.0	0.2	1.7	-0.2	-3.1	0.4	6.9	0.3	6.0
60	-0.7	-3.4	0.5	4.1	-0.8	-10.3	0.2	3.3	-0.6	-8.7
90	-0.5	-2.3	0.0	0.0	-0.7	-8.9	0.2	3.2	-0.6	-8.5
150	0.7	3.2	0.0	0.0	-0.1	-1.2	0.6	8.8	-0.5	-6.9
210	-1.1	-4.1	0.6	3.4	-0.4	-3.6	-0.4	-3.8	-0.5	-5.1
270	-1.0	-3.2	1.7	8.2	-1.3	-8.7	-0.2	-1.5	-0.9	-7.3
360	-4.5	-11.3	1.9	6.6	-0.9	-3.8	0.0	0.0	2.4	11.1

表23 黒皮付鉄筋の黒皮防錆値(実験Ⅰ)

試験期間 (day)	人工海水	
	防錆量 (mg/cm ²)	防錆率 (%)
1	2.8	70.0
2	5.3	68.8
3	6.0	73.2
4	5.0	45.0
5	5.9	43.4
6	5.3	37.3
10	4.4	29.7
20	3.4	15.0
30	5.6	19.2

表24 黒皮付鉄筋の黒皮防錆値(実験Ⅱ)

試験期間 (day)	海岸地域		郊外地域	
	防錆量 (mg/cm ²)	防錆率 (%)	防錆量 (mg/cm ²)	防錆率 (%)
10	2.9	90.6	1.0	83.3
20	5.9	80.8	1.9	65.5
30	9.5	77.9	4.0	88.9
60	13.6	61.8	5.4	79.4
90	11.8	48.4	7.9	92.9
120	9.8	35.4	7.5	85.2
150	8.7	29.9	7.7	81.9

表25 黒皮付鉄筋の黒皮防錆値(実験Ⅲ)

試験 期間 (day)	海 岸 地 域		工 業 地 域		郊 外 地 域		商 業 地 域		住 居 地 域	
	防錆量 (mg/cm ²)	防錆率 (%)	防錆量 (mg/cm ²)	防錆率 (%)	防錆量 (mg/cm ²)	防錆率 (%)	防錆量 (mg/cm ²)	防錆率 (%)	防錆量 (mg/cm ²)	防錆率 (%)
10	2.3	44.2	1.8	45.0	0.5	35.7	0.2	15.4	0.8	57.1
20	7.4	56.9	5.4	61.4	2.5	59.5	2.0	62.5	1.2	46.2
30	8.2	53.6	4.7	47.0	2.9	56.9	2.7	67.5	1.1	32.4
40	11.0	57.3	4.3	39.8	4.4	81.5	3.4	75.6	3.1	66.0
50	12.9	65.2	6.0	50.8	5.2	80.0	4.9	84.5	3.2	64.0
60	11.1	53.4	6.2	50.4	6.2	79.5	5.2	86.7	5.3	76.8
90	7.7	35.6	7.4	57.4	6.8	86.1	5.1	82.3	5.8	81.7
150	8.0	36.4	7.5	56.4	6.7	81.7	6.0	88.2	5.7	79.2
210	4.1	15.4	6.5	36.7	6.5	58.0	5.3	50.5	5.2	52.5
270	3.2	10.3	5.1	24.6	7.7	51.3	6.0	43.8	7.2	58.5
360	7.3	18.3	6.5	22.7	15.5	65.1	14.1	56.4	13.3	61.3

るための重回帰式を求めた。その結果、回帰値と実測値は、海岸地域、住居地域、郊外地域においては±8% 以内に入り良く一致し、工業地域においては-15%，商業地域においては+27% の範囲で対応する。

(3) 人工海水による促進試験の結果は、海岸地域における暴露試験の結果と近似し、前者は後者の腐食量を推定する有効な方法といえる。

(4) 塑性ひずみの有無による腐食程度の差は、本試験による場合、認められない。

(5) 黒皮付鉄筋の腐食程度は、暴露後5ヶ月までは内陸部において低い値を示し、黒皮防錆率は約80%を示す。海岸地域における5ヶ月までの黒皮防錆率は約35%，工業地域においては約55%を示す。

謝 辞

暴露台の設置に多大なるご協力をいただいた八戸市役所、青森県新産業都市建設事業団、住金鉱業株式会社、惣宝水産株式会社の関係各位に対し、謝意を表します。

環境要素の調査に関し、測定値をご教示願えた青森県公害センター所長・原子昭氏、技師・工藤真哉氏に対し、記して謝意を表します。

本研究の一部は、本学の卒業研修として昭和

57年度、昭和58年度、昭和59年度にわたり実施したものであり、卒業生諸兄に対し、謝意を表します。

参 考 文 献

- (社)日本防錆技術協会・(社)腐食防食協会一腐食損失調査委員会：我が国における腐食損失調査報告書（昭和52年3月）
- 八戸測候所：昭和58年日原簿、昭和59年日原簿
- 青森県公害センター：昭和58年度業務年報（昭和60年3月）
- 八戸市環境衛生部：昭和59年度八戸市公害白書
- 岸谷・笠井・中島：コンクリート用防錆剤の乾湿繰返し促進試験方法に関する実験研究，セメント・コンクリート，No.408（1981）
- 笠井：鉄筋の腐食と防錆剤，コンクリート工学，Vol.21，No.3（1983）
- 岡田・宮川：塩分雰囲気中における鉄筋の腐食，コンクリート工学，Vol.17，No.9（1979）
- 岸谷・佐久田・川上・沢田：海水から塩害を受ける場所での構造物の金属腐食に関する調査研究，日本建築学会大会学術講演梗概集（昭和55年）
- 月永：塑性ひずみを有する鉄筋の腐食促進試験および大気暴露試験，日本建築学会東北支部研究報告集，第43号（昭和59年）
- 月永・淡路：鉄筋コンクリート用棒鋼の大気暴露試験，日本建築学会東北支部研究報告集，第44号（昭和59年）
- 月永・塑性ひずみを有する鉄筋および黒皮付き鉄筋の腐食促進試験並びに大気暴露試験，日本建築学会大会学術講演梗概集（昭和60年）