

碳鋼、耐候鋼與鍍鋅鋼在不同腐蝕環境 近十年之大氣腐蝕行為研究

張耀南*¹、劉宏義¹、魏豐義²

A Study of almost 10 year Atmospheric Corrosion of Carbon,
Weathering and Galvanized Steels in Various Environments

Y. N. Chang*¹, H. Y. Liou¹, F. I. Wei²

摘 要

本研究是探討碳鋼、耐候鋼與熱浸鍍鋅碳鋼在不同腐蝕環境近十年之大氣腐蝕行為。研究方法是實際曝露試驗，並以 SEM/EDS 與 XRD 進行腐蝕生成物分析。結果顯示不論在工業區、濱海區或鄉村區，腐蝕量是碳鋼 > 耐候鋼 > 鍍鋅鋼。裸露鋼材的腐蝕速率滿足 $C = At^B$ 之定律 (C 與 t 分別表腐蝕量與時間，A、B 為常數)，且耐候鋼不僅在未生成銹層以前反應性比碳鋼低，而且在生成銹層後，其保護性也較佳。腐蝕生成物組成，耐候鋼有較易產生 α -FeOOH 之傾向，而碳鋼有較易產生 Fe_3O_4 之傾向，鍍鋅鋼在工業區與濱海區的銹皮組成相當複雜，在鄉村區的銹皮組成祇有 ZnO。鍍鋅鋼在工業區與濱海區的 η 相與 ζ 相都有受到腐蝕，在鄉村區祇有 η 相有受到腐蝕。結合前置研究結果，裸露鋼材在不同環境的腐蝕量是濱海區 > 工業區 > 多風都市區 > 鄉村區。

關鍵詞：碳鋼；耐候鋼；熱浸鍍鋅；大氣腐蝕。

ABSTRACT

This study is to investigate the atmospheric corrosion behaviors of carbon steel, weathering steel, and hot-dip galvanized carbon steel in various environments for almost 10 years. The experimental methods included actual exposure tests and analyses of corrosion products by SEM/EDS and XRD. The results revealed that, in industrial, coastal, and rural areas, the weight loss was ranked in the order: carbon steel > weathering steel > galvanized steel. The corrosion rates of bare steels obeyed the law $C = At^B$ (C and t represent corrosion amount and time,

-
1. 中國鋼鐵公司新材料研究發展處
New Materials R & D Dept., China Steel Corp.
 2. 中國鋼鐵公司業務部門
Commercial Division, China Steel Corp.
- * 連絡作者(t633@mail.csc.com.tw)

respectively, while A and B are constants). The weathering steel not only possessed lower initial reaction rate, but also exhibited better protective rust than carbon steel. The corrosion product of weathering steel had more tendency of generating α -FeOOH, while that of carbon steel had more tendency of forming Fe_3O_4 . The corrosion product of galvanized steel in both industrial and coastal areas were complex, while that in rural area was simply ZnO. Furthermore, both η and ζ phases were corroded in the above former two areas, while only η phase was corroded in rural area. Compared with that in previous study, the weight loss of bare steel in various areas was ranked in the order coastal > industrial > windy urban > rural.

Keywords : Carbon steel; Weathering steel; Hot-dip galvanized; Atmospheric corrosion.

1. 前言

台灣四面環海，又位處亞熱帶，是高溫高濕的海島型氣候國家，大氣腐蝕情形十分嚴重。許多學者指出，鋼材的抗大氣腐蝕性質，受到環境不同而有很大差異，因此，國外的實驗數據僅能當作參考，若直接引用來做設計工程標準，往往會付出慘痛的代價。中鋼公司幾乎是國內首先大規模進行一系列大氣曝露試驗之單位，也獲得良好的研究結果。近年來，為了瞭解中鋼公司擬開發之汽車用高耐候鋼的耐蝕性能，須進行此鋼材與碳鋼、熱浸鍍鋅碳鋼之比較研究。台灣地區，不同的大氣腐蝕環境有不同的嚴苛程度，前置研究^[1]已完成碳鋼、耐候鋼與鍍鋅鋼在多風都市區八年半之大氣腐蝕行為研究，本研究是這些鋼材在工業區、濱海區及鄉村區近十年的大氣曝露試驗與分析，以建立資料庫，提供將來應用於台灣大氣腐蝕環境之鋼材設計者參考。

2. 實驗方法

2.1 試驗鋼材

包括 SS400 (碳鋼)、耐候鋼 AS1、AS2 及 SS400+Zn (弘儀熱浸鍍鋅 SS400 鋼板)，合計四種，底材的化學成分如表1 所示。

2.2 腐蝕試驗

將鋼材加工成 150 mm x 100 mm x 厚度之大

小，經研磨、去脂、清洗、(或加鍍鋅)、稱重並量尺寸後，依 ASTM G50 規定之方式，分別放置於中鋼公司(工業區)、中山大學(濱海區)及樹林電力研究中心(鄉村區)進行大氣曝露試驗，試片與地面成 30° 角，且面向南方。完成試驗後，將腐蝕生成物洗淨(裸露鋼材以含抑制劑之 20% 鹽酸，鍍鋅鋼材以 20 g 鉻酸+50 ml 磷酸稀釋至 1000 ml (80°C))，洗淨後烘乾稱重，以計算腐蝕失重。

2.3 腐蝕生成物分析

將曝露試驗後之試片橫截面銹皮機械拋光至 0.05 μm ，以 3% Nital 蝕刻，用掃描式電子顯微鏡 (SEM) 觀察顯微組織，結合能量散佈光譜儀 (EDS) 做元素分佈分析。另外 XRD 是將腐蝕生成物刮下，磨成粉末，以 X 光繞射儀 (Siemens 500) 做繞射，以鑑定其組成，掃描速度為 3° /分鐘，相同粉末也做 SEM/EDS 分析，以確認 XRD 所鑑定之組成的元素是否存在。

3. 結果與討論

3.1 工業區

圖 1 是各鋼材在中鋼公司腐蝕失重對曝露時間之關係圖，顯示腐蝕失重 SS400 > AS1 > AS2 > SS400+Zn。依文獻^[2,3]報導，耐候鋼因含 P、Cu、Ni 等合金，可使其保護性更佳，故 AS1 之耐蝕性比 SS400 好應是有添加 P、Cu、Ni 之緣故，而 AS2 耐蝕性又比 AS1 好應是其 P 含量較 AS1 高的緣故(見

表1)。

依 ASTM A242-87 的要求，加磷耐候鋼之抗大氣腐蝕能力必須為一般碳鋼的四倍^[4]，該規範中無說明以何種方式評估抗大氣腐蝕能力，故本文以兩種方法定量評估此能力，第一種是直接求各個曝露時間 SS400 腐蝕失重對各鋼材腐蝕失重的比值，結果如圖 2 所示，此種比值 AS1 與 AS2 都沒有達到四倍的要求，但曝露時間達到近十年時，此種比值似乎有微量提高之現象。反倒是 SS400 + Zn，比值有達到四倍以上，但是在近十年其比值卻不增反減，此乃因 SS400 的腐蝕失重隨著鍍層變厚有減緩的趨勢，而鍍鋅鋼在 10 年期間似乎腐蝕失重仍維持快速增加。

早在 1984 年，Townsend 和 Zoccola^[5] 已利用線性迴歸方法，證實裸露鋼材腐蝕損失量 C 與曝露時間 t 之關係可表為

$$C = At^B \quad (1)$$

A、B 為常數。

$$\log C = \log A + B \log t$$

故 log C 對 log t 之關係圖應為一直線，由其斜率及在縱軸之截距可分別求出 B 及 A 之值。圖 1 中裸露鋼材 log C 對 log t 之關係如圖 3 所示，線性迴歸顯示 SS400、AS1 及 AS2 之 R² 值(如括弧內所示)均 ≥ 0.98，腐蝕失重應滿足 Eq.(1)，依此方法求得之 A、B 值列於表 2。A 值愈大，表示在未生成銹層以前，鋼材的起始反應性愈強；B 值愈大，表示銹層生成以後，其保護性愈差。由表中可看出，不論是 A 值或 B 值，三種鋼材的大小關係均是 SS400 > AS1 > AS2，且其 B 值都接近 0.5 或小於 0.5，顯示其銹皮應有相當不錯的保護性。Townsend 和 Zoccola^[5,6] 也曾以達到 250 μm 之腐蝕深度所需的曝露時間 t* 來評估鋼材耐大氣腐蝕性能，故本文以此種方式為第二種定量評估抗大氣腐蝕能力之方式。假設 Fe 的比重為 7.87，則 t* (year) = (196.75/A)^{1/B}，可算出各鋼材的 t* 值，亦列於表 2。顯示 t* 值的大小關係也是 AS2 > AS1 > SS400，AS1 與 AS2 之 t* 對 SS400 的比值都比圖 2 中各個曝露

時間之腐蝕失重的比值大，但也都沒達到四倍之需求。至於 SS400 + Zn 鋼，雖然 Legault 與 Pearson^[7] 報導鍍鋅鋼的腐蝕失重也滿足 Eq.(1) 之關係，但是腐蝕材質是 Zn 和 Fe，本研究試驗鋼料之鍍鋅層遠低於 250 μm (見前置研究^[1]及本文之 SEM 影像)，若以達到 250 μm 之腐蝕深度所需的曝露時間來評估鋼材耐大氣腐蝕性能，將產生很大的誤差，故本文未計算其 A、B 與 t* 值。

圖 4 是 SS400 + Zn 鋼經大氣曝露後橫截面鍍層/銹皮的 SEM/EDS 分析結果，EDS 分析可鑑定最外層(約 27 μm 厚)為含 Zn、O、S、C、Al、Si、Fe 之化合物，由於 Fe 的存在，顯示除了鍍鋅層 η 相(六方晶系純鋅層)受到腐蝕外，中間的鐵鋅合金層 ζ 相(單斜晶系)也有受到輕微腐蝕，此為與前置研究在多風都市區^[1]不同的地方，亦即在多風都市區祇有最外層 η 相受到腐蝕，而在此工業區，η 相與 ζ 相都受到腐蝕。中間層與內層都是未腐蝕的 Fe、Zn 合金層，前者也是 ζ 相，後者是 δ 相(六方晶系)，厚度約分別為 50 μm 及 30 μm，最內層為很薄的一層 Γ 相(體心晶系)^[8]，故整體顯示 η 相與 ζ 相之外層有受到腐蝕，ζ 相之內層與 δ 相未受到腐蝕，此外 EDS 也分析證實底材也沒有受到腐蝕(雖然圖 4 並未示出)。一般熱浸鍍鋅鋼的耐蝕機構是因在大氣中，Zn 的氧化物比 Fe 氧化物穩定，具有隔絕保護作用，同時當鍍鋅層被刮傷時，Zn 又具有犧牲保護的效果。本研究顯示經 10 年的大氣曝露後，未腐蝕的中間層仍很厚，故熱浸鍍鋅鋼材在此工業區的使用壽命應仍很長。

圖 5 是腐蝕生成物的 XRD 分析結果，結合圖 6 之 EDS 分析結果，SS400 與 AS1 的銹皮組成有 Fe₃O₄、γ-FeOOH 與 α-FeOOH，尚有可能來自大氣環境之 CaO₂，AS2 的銹皮組成祇有 γ-FeOOH 與 α-FeOOH，沒有 Fe₃O₄ 和 CaO₂。碳鋼的一般大氣腐蝕生成物為 FeOOH(α、β 或 γ 型)與保護性較差的 Fe₃O₄，一般耐候鋼應祇有 FeOOH 而沒有 Fe₃O₄^[2,9,10]。本文中，AS1 銹皮組成仍可看到 Fe₃O₄，顯示在此工業區環境之耐蝕性仍不十分良好。依幸英昭等人^[11]之研究指出，耐候鋼因添加了 P、Cu、Ni 等合金，經長期曝露試驗後將比一般碳鋼較容易在

γ -FeOOH 與底材間生成保護性較佳的 α -FeOOH，而本文中 AS2 銹皮不含 Fe_3O_4 ，應也是其保護性較 SS400 與 AS1 更佳的原因，故 AS2 之銹層保護性較 SS400 與 AS1 佳；除了合金含 P 較高外，另一原因是 Fe_3O_4 受到抑制。

3.2 濱海區

圖 7 是各鋼材在中山大學腐蝕失重對曝露時間之關係圖，顯示腐蝕失重 $\text{SS400} > \text{AS1} > \text{AS2} > \text{SS400+Zn}$ 。以上述方法，可求出各個曝露時間 SS400 腐蝕失重對各鋼材腐蝕失重的比值如圖 8 所示，此種比值 AS1 與 AS2 都沒有達到四倍的要求，但 SS400 對 AS1 腐蝕失重的比值有隨曝露時間之延長而微量提高之趨勢，對 SS400 + Zn 之比值則無此趨勢(雖然有達到四倍以上)。至於裸露鋼材 $\log C$ 對 $\log t$ 之關係，則如圖 9 所示，各鋼材線性迴歸之 R^2 值亦列於圖中，腐蝕失重應滿足 Eq.(1)，A、B 與 t^* 值也列於表 3，顯示 AS2 之 t^* 值過高，乃因其 A、B 值祇是以前三年之數據計算而得，誤差很大。

圖 10 是 SS400+Zn 鋼曝露 9.8 年後橫截面鍍層/銹皮的 SEM/EDS 分析結果，顯示約 $17 \mu\text{m}$ 厚的外層銹皮 A 含有 Fe、Zn、O、S、C、Cl、P、Al 等成分，該鍍層應是已經受到嚴重的腐蝕。中間層 B 與內層 C，由影像之型態可知應分別是 ζ 相及 δ 相，但 ζ 相厚度祇有 $50 \mu\text{m}$ ，比前置研究^[1]之 ζ 相的 $75 \mu\text{m}$ 甚薄，顯示 $17 \mu\text{m}$ 厚的銹層 A 應也是 ζ 相，亦即 ζ 相有 $17 \mu\text{m}$ 受到嚴重的腐蝕， $50 \mu\text{m}$ 受到輕微腐蝕，而原來最外層的 η 相應是已經腐蝕殆盡而剝落，且由銹層 A 中 Fe 的存在也可證實其為原來的 ζ 相，不是 η 相。至於內層 δ 相，約厚 $27 \mu\text{m}$ ，與前置研究^[1]之未腐蝕的 δ 相之 $25 \mu\text{m}$ 接近，最內層當然也是很薄的一層 Γ 相，而底材也可用 EDS 證實並未腐蝕。

腐蝕生成物以 XRD 分析鑑定之組成如表 4 所示，上述之工業區、下文之鄉村區與前置研究^[1]之多風都市區的腐蝕生成物亦列於該表中以供比較。顯示在濱海區，SS400 的銹皮組成有 Fe_3O_4 、 γ -FeOOH 與 α -FeOOH，但是 AS1 的銹皮組成祇有

α -FeOOH，沒有 Fe_3O_4 或 γ -FeOOH。一般 α -FeOOH 銹層保護性是比 γ -FeOOH 更好，AS1 銹皮中祇含 α -FeOOH，又不含 Fe_3O_4 ，這應也是其保護性較 SS400 更佳的原因。至於 SS400+Zn，腐蝕生成物組成有 ZnO、 Fe_2SiO_4 、FeS 與 $\text{ZnO} \cdot 2\text{ZnSO}_4$ ，由於 Fe_2SiO_4 與 FeS 的存在，再度證實此鋼材受到腐蝕的不是祇有最外的 η 相純鋅層，次內層的鐵鋅合金層應也有受到腐蝕，此為與前置研究^[1]多風都市區之 SS400+Zn 不同的地方。

3.3 鄉村區

圖 11 是各鋼材在樹林電力研究中心腐蝕失重對曝露時間之關係圖，顯示腐蝕失重 $\text{SS400} > \text{AS1} > \text{AS2} > \text{SS400+Zn}$ 。以上述方法，可求出各個曝露時間 SS400 腐蝕失重對各鋼材腐蝕失重的比值如圖 12 所示，此種比值 AS1 與 AS2 也都沒有達到四倍的要求，但有隨曝露時間的延長而微量提高的趨勢，對 SS400 + Zn 之比值則無此趨勢(雖然有達到四倍以上)。而裸露鋼材 $\log C$ 對 $\log t$ 之關係如圖 13 所示，各鋼材線性迴歸之 R^2 值亦列於圖中，腐蝕失重滿足 Eq.(1)，A、B 與 t^* 值也列於表 5，也顯示 AS1 與 AS2 之 t^* 對 SS400 之比值都比圖 12 中各個曝露時間之腐蝕失重的比值大，但是祇有 AS2 有達到四倍以上的要求。

圖 14 是 SS400+Zn 鋼曝露 9.8 年後橫截面鍍層/銹皮的 SEM/EDS 分析結果，顯示 SS400+Zn 祇有最外層之 η 相有 Zn 的氧化和硫化現象，中間 Fe、Zn 合金層 ζ 和 δ 相都沒有腐蝕，且其厚度都仍分別與前置研究^[1]尚未腐蝕的 ζ 和 δ 相鐵鋅合金層相近，底材也可用 EDS 證實並未腐蝕。

鄉村區腐蝕生成物以 XRD 分析鑑定之組成也如表 4 所示，SS400 的銹皮組成有 γ -FeOOH 與 α -FeOOH，但是 AS1 與 AS2 的銹皮組成祇有 α -FeOOH，沒有保護性較差的 γ -FeOOH，這應也是其保護性較 SS400 更佳的原因。至於 SS400+Zn，腐蝕生成物組成祇有 ZnO。

綜合以上三種腐蝕環境與前置研究^[1]在多風都市區的結果，在耐蝕性方面，AS1 與 AS2 之 t^* 值

對 SS400 之比值都比各個曝露時間 SS400 對其腐蝕失重的比值大，但祇有 AS2 在鄉村區與多風都市區有達到四倍以上之要求。至於鍍鋅鋼，各個曝露時間 SS400 對其腐蝕失重的比值都遠超過四倍以上。在 SEM/EDS 分析方面，鍍鋅鋼在鄉村區與多風都市區祇有最外層的 η 相有腐蝕，在工業區與濱海區則 η 相與 ζ 相都有受到腐蝕。在 XRD 分析方面，各腐蝕環境各鋼材之腐蝕生成物組成如表 4 所示。

3.4 不同環境之比較

結合前置研究^[1]之結果，相同鋼材在不同環境之比較如圖 15 所示。顯示裸露鋼材的腐蝕量是濱海區 > 工業區 > 多風都市區 > 鄉村區。鍍鋅鋼因腐蝕量較低，量測誤差較大，則無此現象，但如上述之三個腐蝕環境與前置研究^[1]之多風都市區鍍鋅鋼的鍍層/銹皮 SEM/EDS 分析結果，顯示祇有 η 相有受到腐蝕的多風都市區與鄉村區的腐蝕失重較小，反之， η 相與 ζ 相都有受到腐蝕的濱海區與工業區的腐蝕失重較大。

圖 16 是 AS1 在不同環境中曝露後橫截面銹皮的 SEM 影像與外層銹皮的 EDS 分析結果，顯示外層銹在工業區有受到 Ca 的污染；在濱海區有受到 Cl 的污染；在鄉村區則除了 S 外沒有污染。前置研究^[1]也顯示 AS1 在多風都市區曝露後的外層銹除了 S 外沒有污染。S 的出現乃因大氣中含有 SO_2 與鋼材反應產生 FeSO_4 所致^[2]，故 S 應是一般大氣腐蝕銹層常見之成分，碳鋼如此，耐候鋼也很難避免；工業區與濱海區如此，多風都市區與鄉村區也很難避免。至於其他裸露鋼材的 SEM/EDS 分析應也會有類似之結果，但污染物不一定能在 XRD 中顯示乃因其含量與一般銹層比較起來太少的緣故。

圖15(b) 顯示 AS1 在濱海區的腐蝕失重比在工業區大，上述之 XRD 分析顯示此鋼材在工業區的銹皮組成有 Fe_3O_4 、 γ -FeOOH 與 α -FeOOH，在濱海區的組成祇有 α -FeOOH，沒有 Fe_3O_4 或 γ -FeOOH，但是圖 16(a)、(b) 顯示微量的污染物不同，也會對長期的腐蝕量產生不同的影響(雖然此

種微量的污染物不一定能在 XRD 分析中鑑定出)。

4. 結論

1. 不論在工業區、濱海區或鄉村區，裸露鋼材的大氣腐蝕速率滿足 $C = At^B$ 之定律，且耐候鋼不僅在未生成銹層以前反應性比 SS400 低，而且在生成銹層後，其保護性也較佳。
2. 本文提出兩種定量評估鋼材對 SS400 耐蝕性的比較方式，第一種是直接求各個曝露時間 SS400 腐蝕失重對各鋼材腐蝕失重的比值，則 AS1 與 AS2 都沒有達到四倍以上之要求(雖然近十年的比值有微量增加之趨勢)。反之，SS400 + Zn 有達到四倍之以上要求，但無上述之微量增加之趨勢。第二種方法是以達到 250 μm 之腐蝕深度所需的曝露時間之比值來評估，則 AS1 與 AS2 此種比值都比第一種方法之值大，但祇有 AS2 在鄉村區有達到四倍之以上要求。
3. 在工業區 SS400 與 AS1 的腐蝕生成物組成有 Fe_3O_4 、 γ -FeOOH 與 α -FeOOH，AS2 祇有 γ -FeOOH 與 α -FeOOH；濱海區 SS400 有 Fe_3O_4 、 γ -FeOOH 與 α -FeOOH，AS1 祇有 α -FeOOH；鄉村區 SS400 有 γ -FeOOH 和 α -FeOOH，AS1 和 AS2 祇有 α -FeOOH。至於鍍鋅鋼，在工業區與濱海區的銹皮組成相當複雜，在鄉村區的銹皮組成祇有 ZnO。
4. 工業區與濱海區鍍鋅鋼的 η 相與 ζ 相都受到腐蝕，在鄉村區祇有 η 相有受到腐蝕。
5. 裸露鋼材在不同環境的腐蝕量是濱海區 > 工業區 > 鄉村區。
6. AS1 的外層銹皮在工業區有受到 Ca 的污染；在濱海區有受到 Cl 的污染；在鄉村區則沒有 Ca 或 Cl 污染。

參考文獻

1. 張耀南、劉宏義、魏豐義，防蝕工程，第 18 卷，第 1 期，2004 年，第 79 - 86 頁。

2. 陸志鴻譯，材料科學技術報導，第4卷，第4期，1972年，第279 - 282頁
 3. H. E. Townsend, Corrosion, Vol. 57, No. 6 (2001) pp. 497 - 501.
 4. M. E. Komp, Corrosion 87, San Francisco, CA (1987, March) Paper # 423.
 5. H. E. Townsend and J. C. Zoccola, ASTM Spec. Tech. Pub. 767 (1982) pp. 45 - 59.
 6. H. E. Townsend and J. C. Zoccola, Proc. 9th Congress on Metallic Corrosion, Toronto, Vol. 1.3 (1984, June) pp. 216 - 219.
 7. R. A. Legault and V. P. Pearson, Atmospheric factors affecting the corrosion of engineering metals (Ed. S. K. Coburn) ASTM STP 646 (1978) pp. 83 - 96.
 8. Y. Wakamatsu and M. Onishi, Tetsu-to-Hagane, 64 (1978) pp. 117 - 125.
 9. H. Okada, Tetsu-to-Hagane, 56 (1970) pp. 277 - 284 (BISI 8848).
 10. T. Misawa, Bulletin of The Iron and Steel Inst. of Japan, Vol. 6, No. 5 (2001) pp. 25 - 31.
 11. 幸英昭、上村隆之、土井教史、山下正人、三澤俊平，Materia Japan, Vol. 41, No.1 (2002) pp. 39 - 41.
- 收到日期：2004年5月27日
 修訂日期：2004年8月20日
 接受日期：2004年8月31日

表1. 試驗鋼材的化學成分(wt%)。

Table 1 Chemical compositions (wt%) of the investigated steels.

鋼材	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Ni	Ti	Al	Balance
SS400	.130	.19	.81	.015	.008	.06	.02	.05	-	.024	Fe
AS1	.005	.30	1.23	.069	.011	.28	-	.16	.02	.026	Fe
AS2	.012	.30	1.24	.110	.010	.29	-	.16	.02	.018	Fe

表2. 圖3之鋼材的腐蝕失重方程式之A、B和t*的值。

Table 2. Values of t* and A, B in the weight loss equation from Fig.3.

鋼材	SS400	AS1	AS2
A 值(mg/cm ² · year ^B)	45.6	32.0	30.6
B 值(無單位)	0.53	0.49	0.47
t* 值(year)	15.8	40.7	52.4
對 SS400 之 t* 比值	1	2.6	3.3

表 3. 圖9 之鋼材的腐蝕失重方程式之 A、B 和 t* 的值。

Table 3. Values of t* and A, B in the weight loss equation from Fig.9.

鋼材	SS400	AS1	AS2
A 值(mg/cm ² · year ^B)	38.6	32.8	30.4
B 值(無單位)	0.66	0.51	0.40
t* 值(year)	11.8	33.5	24160
對 SS400 之 t* 比值	1	2.8	&

&：因 AS2 之 t* 值太高，不合常理，故其對 SS400 之比值未算出。

表 4. 各鋼材在各腐蝕環境曝露後之腐蝕生成物以 XRD 鑑定之組成。

Table 4. The constitutes identified from XRD of the corrosion product of each steel after exposure in each environment.

曝露地點	鋼材	曝露時間	腐蝕生成物組成
工業區	SS400	9.6 年	Fe ₃ O ₄ 、γ-FeOOH、α-FeOOH
	AS1	9.6 年	Fe ₃ O ₄ 、γ-FeOOH、α-FeOOH
	AS2	9.6 年	γ-FeOOH、α-FeOOH
	SS400 + Zn	10 年	ZnO、Zn ₄ CO ₃ (OH) ₆ H ₂ O、Fe ₇ S ₈ 、Fe ₃ O ₄
濱海區	SS400	9.8 年	Fe ₃ O ₄ 、γ-FeOOH、α-FeOOH
	AS1	9.8 年	α-FeOOH
	AS2	9.8 年	&
	SS400 + Zn	9.8 年	ZnO、Fe ₂ SiO ₄ 、FeS、ZnO · 2ZnSO ₄
鄉村區	SS400	9.8 年	γ-FeOOH、α-FeOOH
	AS1	9.8 年	α-FeOOH
	AS2	9.8 年	α-FeOOH
	SS400 + Zn	9.8 年	ZnO
多風都市區 ^[1]	SS400	8.5 年	Fe ₃ O ₄ 、γ-FeOOH、α-FeOOH
	AS1	8.5 年	γ-FeOOH、α-FeOOH
	AS2	8.5 年	γ-FeOOH、α-FeOOH
	SS400 + Zn	8.5 年	ZnO、ZnO · 2ZnSO ₄

&：因曝露後之試片遺失，故未分析。

表5. 圖13 之鋼材的腐蝕失重方程式之 A、B 和 t* 的值。

Table 5. Values of t* and A, B in the weight loss equation from Fig.13.

鋼材	SS400	AS1	AS2
A 值(mg/cm ² · year ^B)	33.5	33.1	29.3
B 值(無單位)	0.53	0.43	0.40
t* 值(year)	28.2	63.1	116.8
對 SS400 之 t* 比值	1	2.2	4.1

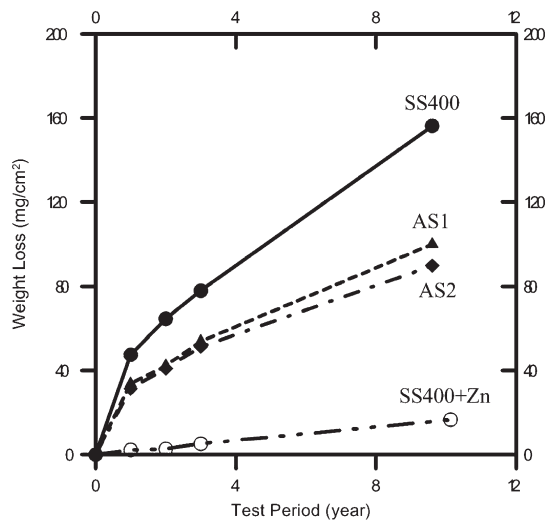


圖 1. 各鋼材在中鋼公司腐蝕失重對曝露時間之關係圖。

Figure 1 Test results of weight loss vs test period of each steel in China Steel Corp.

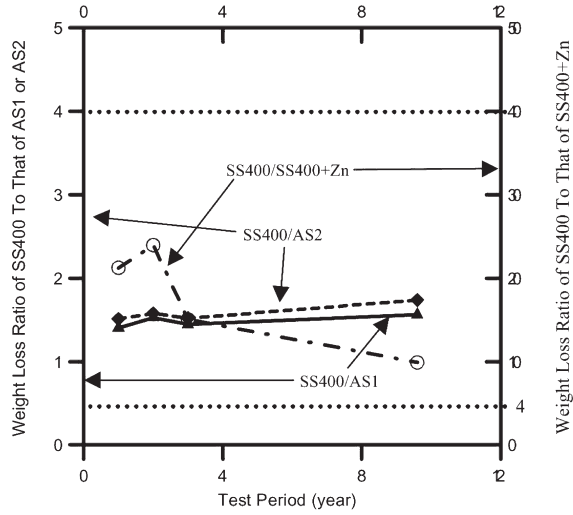


圖 2. 圖 1 中不同曝露時間 SS400 對各鋼材腐蝕失重之比值。

Figure 2 Ratios of weight loss of SS400 to those of other steels at each test period in Figure 1.

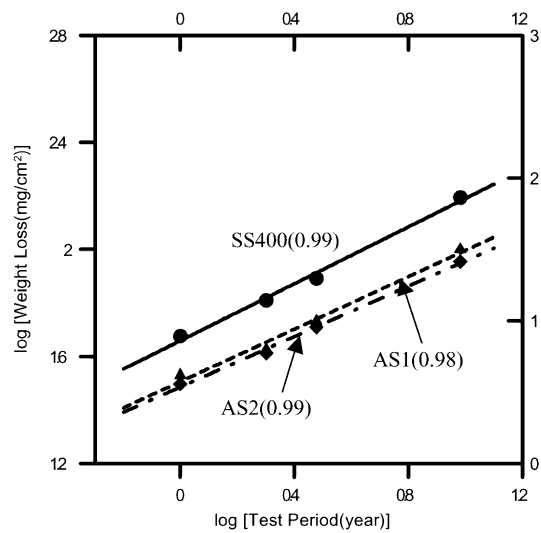


圖 3. 圖 1 中裸露鋼材腐蝕失重的對數對曝露時間之對數的關係圖。

Figure 3 Relation of the logarithm of weight loss to that of test period from Figure 1.

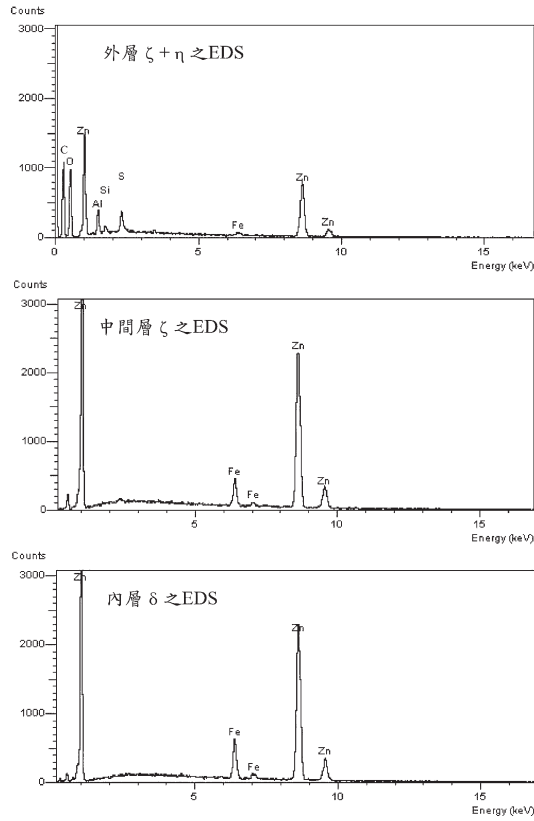
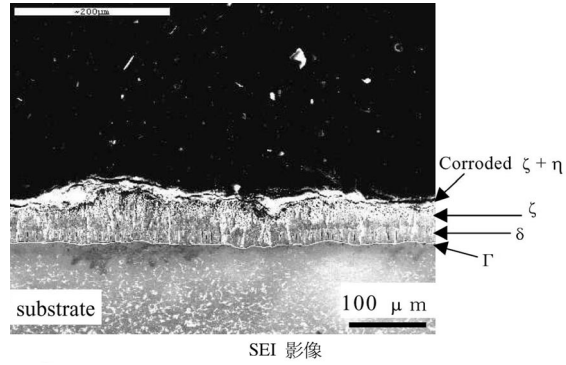


圖4. SS400 + Zn 鋼在中鋼公司曝露 10 年橫截面鍍層/銹皮的SEM/EDS 分析結果。
Figure 4 SEM/EDS analysis of the cross-sectional scale on the steel SS400 + Zn after exposure in China Steel Corp. for 10 years.

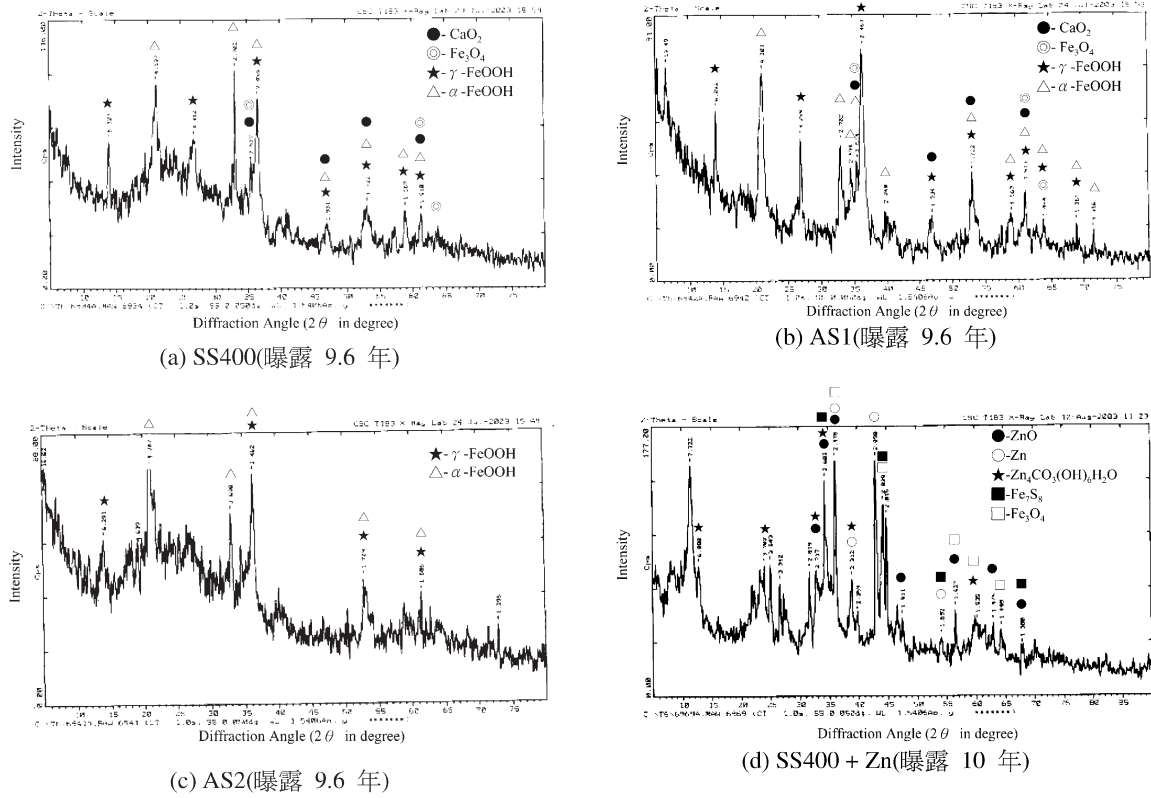
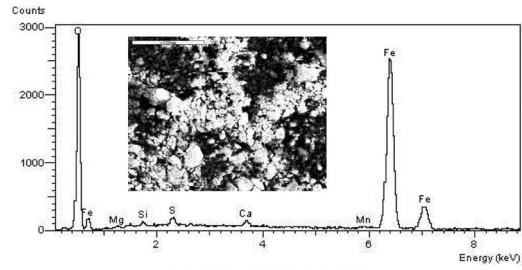
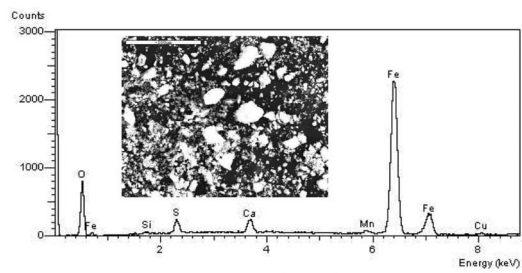


圖 5. 鋼材在中鋼公司經大氣曝露後腐蝕生成物的 XRD 分析結果。

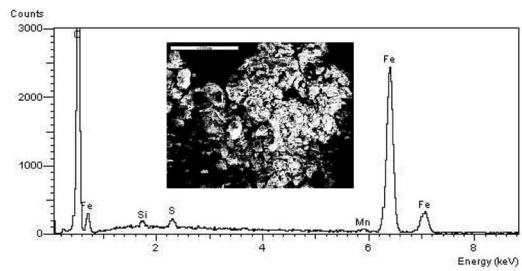
Figure 5 XRD analyses of the corrosion products of the steels after exposure in China Steel Corp.



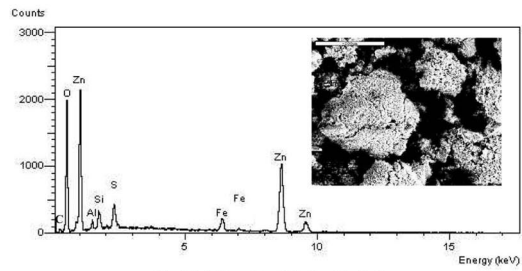
(a) SS400(曝露 9.6 年)



(b) AS1(曝露 9.6 年)



(c) AS2(曝露 9.6 年)



(d) SS400 + Zn(曝露 10 年)

圖 6. 鋼材在中鋼公司經大氣曝露後腐蝕生成物粉末的 SEM/EDS 分析結果。

Figure 6 SEM/EDS analyses of the corrosion products of the steels after exposure in China Steel Corp.

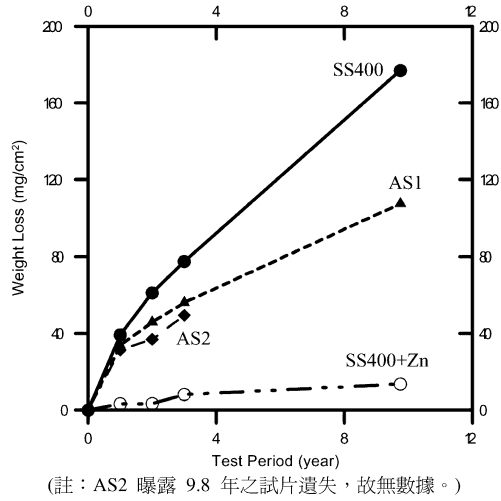


圖 7. 各鋼材在中山大學腐蝕失重對曝露時間之關係圖。
Figure 7 Test results of weight loss vs test period of each steel in Sun Yat-Sen University.

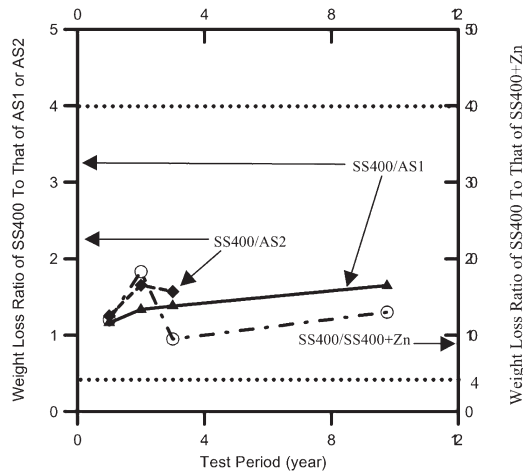


圖 8. 圖 7 中不同曝露時間 SS400 對各鋼材腐蝕失重之比值。
Figure 8 Ratios of weight loss of SS400 to those of other steels at each test period in Figure 7.

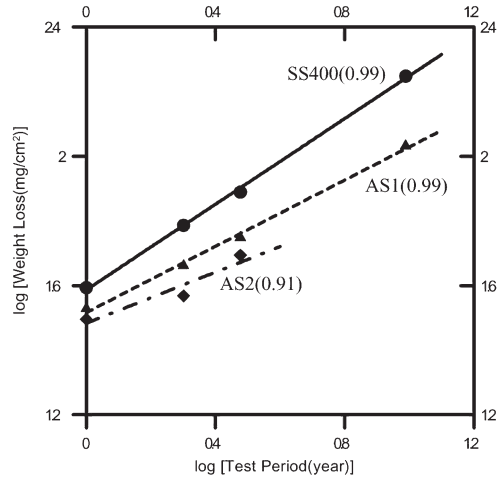


圖9. 圖7中腐蝕失重的對數對暴露時間之對數的關係圖。

Figure 9 Relation of the logarithm of weight loss to that of test period from Figure 7.

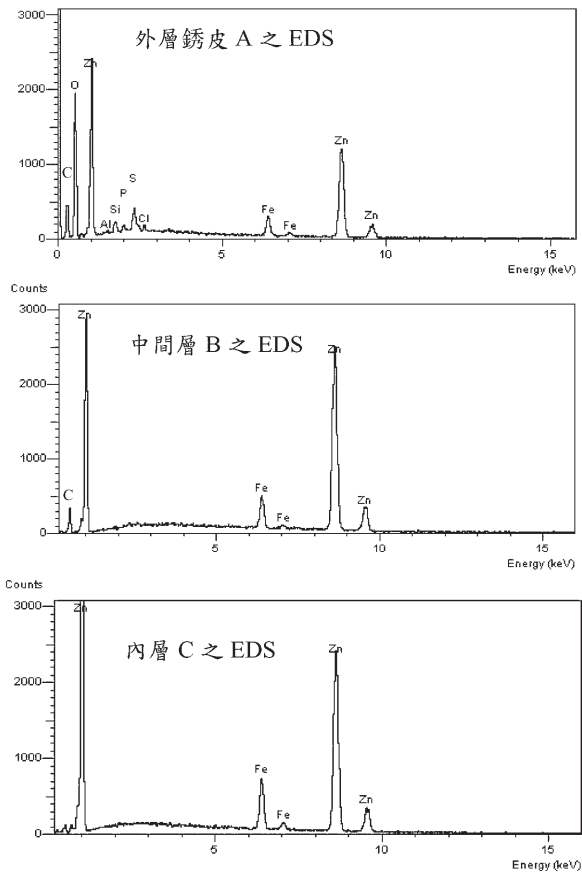
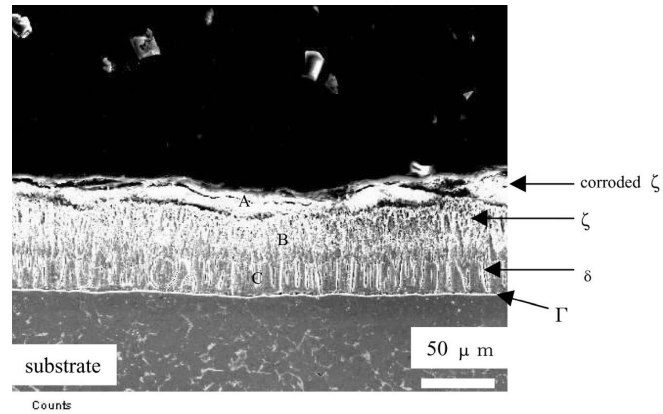


圖 10. SS400+Zn 鋼在中山大學曝露 9.8 年橫截面鍍層/銹皮的 SEM/EDS 分析結果。
Figure 10 SEM/EDS analysis of the cross-sectional scale on the steel SS400 + Zn after exposure in Sun Yat-Seng University for 9.8 years.

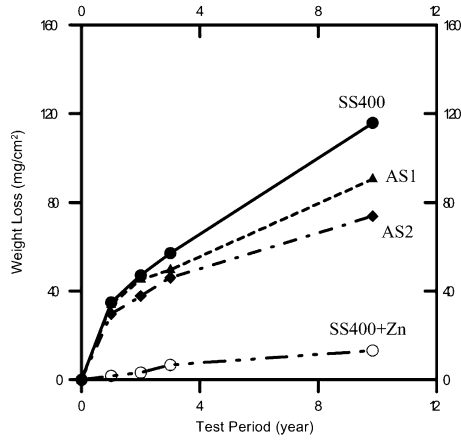


圖 11. 各鋼材在樹林腐蝕失重對曝露時間之關係圖。
 Figure 11 Test results of weight loss vs test period of each steel in Shu-Lin.

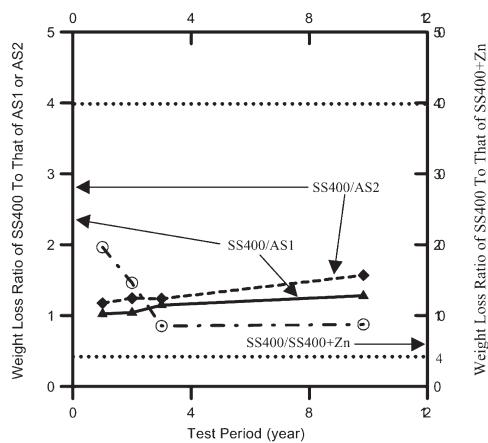


圖 12. 圖11 中不同曝露時間SS400 對各鋼材腐蝕失重之比值。
 Figure 12 Ratios of weight loss of SS400 to those of other steels at each test period in Figure 11.

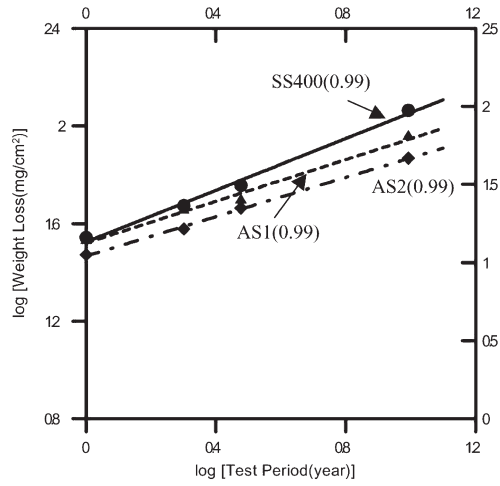


圖 13. 圖11 中腐蝕失重的對數對暴露時間之對數的關係圖。

Figure 13 Relation of the logarithm of weight loss to that of test period from Figure 11.

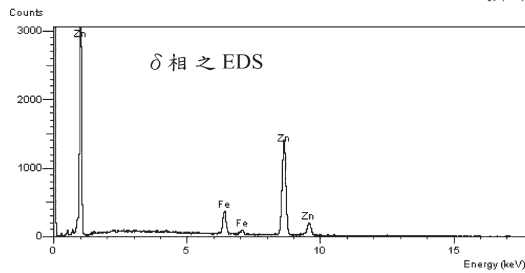
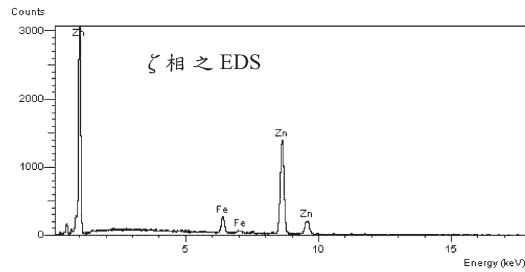
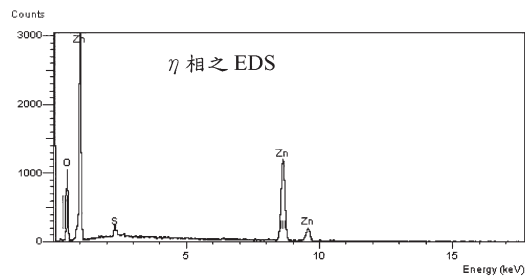
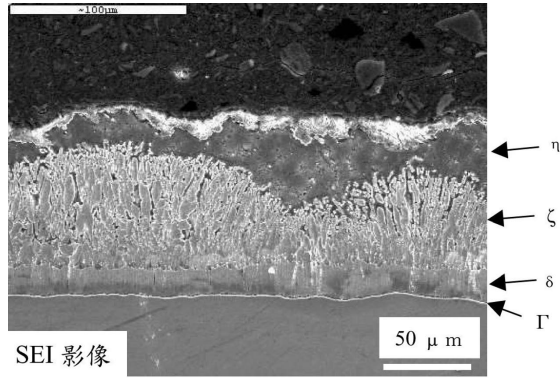


圖 14. SS400+Zn 鋼在樹林曝露 9.8 年側面鍍層/ 銹皮的 SEM/EDS 分析結果。

Figure 14 SEM/EDS analysis of the cross-sectional scale on the steel SS400 + Zn after exposure in Shu-Lin for 9.8 years.

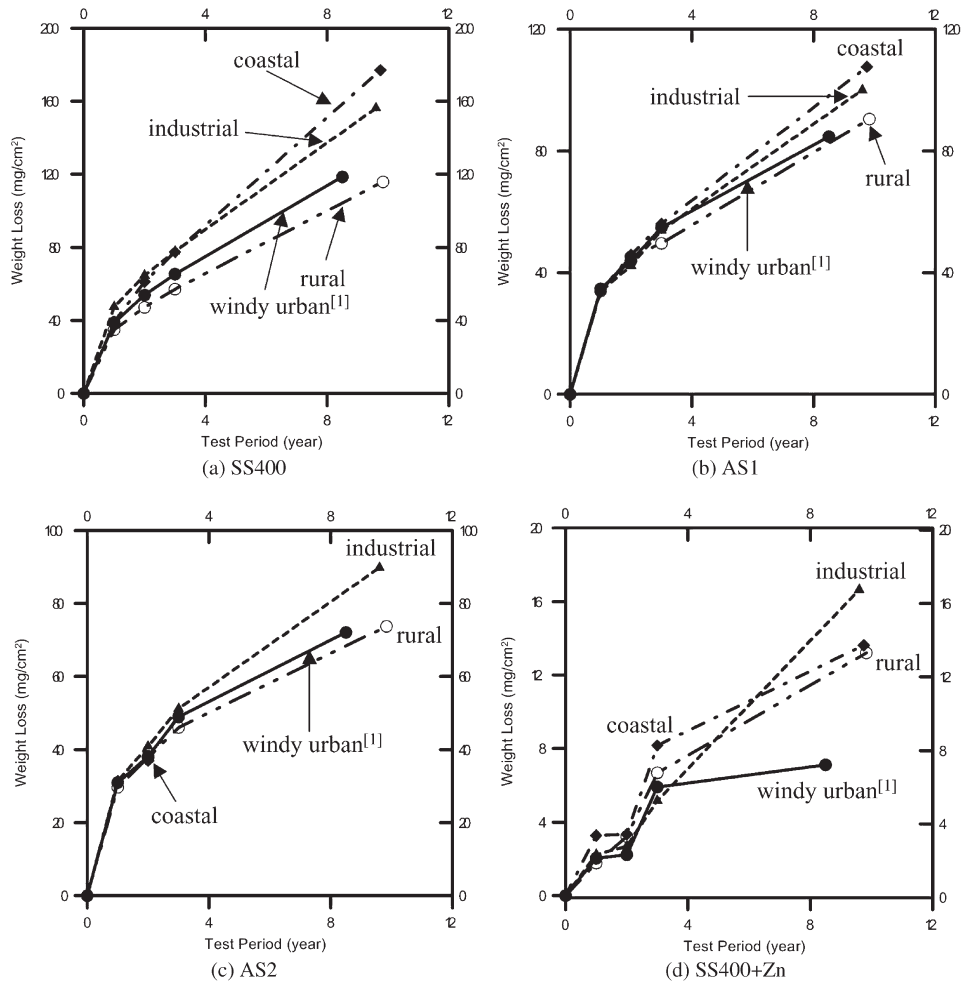
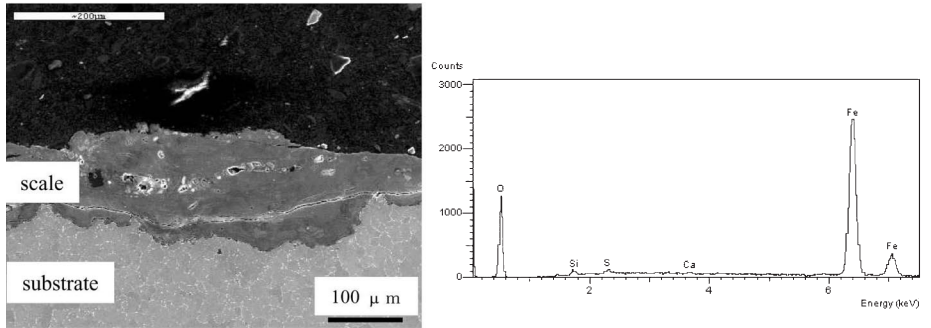
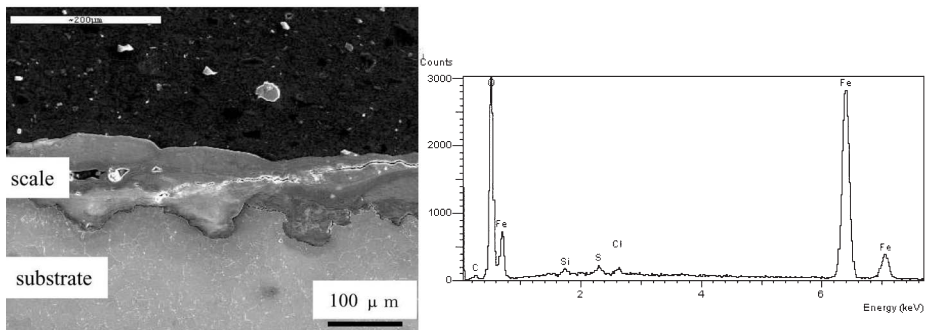


圖 15. 各鋼材在不同腐蝕環境中的比較關係圖。

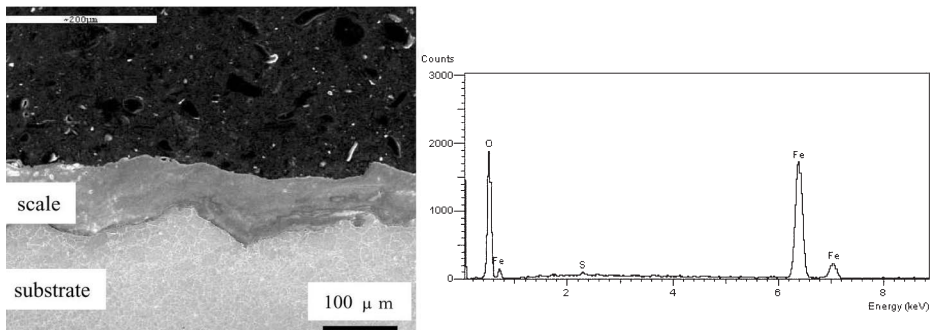
Figure 15 Comparisons of each steel in different exposure environments.



(a) 工業區(曝露 9.6 年)



(b) 濱海區(曝露 9.8 年)



(c) 鄉村區(曝露 9.8 年)

圖 16. AS1 在不同環境中曝露後橫截面銹皮的SEM影像與外層銹皮的EDS分析結果。
Figure 16 Cross-sectional SEM image and EDS analysis of AS1 after exposure in different environments.