

製鋼スラグと人工腐植による森林再生の取り組み

Reforestation Efforts with Steelmaking Slag and Artificial Humus

鳥井 孝一*

Koichi TORII

池田 耕一

Koichi IKEDA

田中 賢治

Kenji TANAKA

浜崎 拓司

Takuji HAMAZAKI

岡田 剛

Takashi OKADA

神保 正人

Masato JIMBO

抄 録

栄養塩が減少し荒廃した森林再生を目的に、林業で発生する木質チップを自然由来の酢液で養生した酸性有機資材（人工腐植）と、鉄鋼業で発生する植物に有益なミネラルを多く含んだアルカリ性無機物質（製鋼スラグ）を組み合せ、植物に必要なミネラルの溶出・保持機能を持った環境再生資材、人工ミネラルを開発した。この人工ミネラルは、これら配合割合を変えpHを調整することで様々な貧栄養化した環境へ適応が可能で、森林再生だけに止まらず、公園などの都市緑化や農業への適用といった将来性がある優れた技術である。

Abstract

“Artificial Mineral” is developed in order to recovery deserted forests, in which nutrient salts are leached. It's made of artificial humus and steelmaking slag, are useful materials in different industries. Artificial humus is acid organic material which soaked woody chip in pyroligneous acid. Woody chip and pyroligneous acid are useful materials in forest industry. On the other hand, Steelmaking slag is alkali inorganic material, includes a lot of useful mineral for plant. It is also useful materials in steel industry. The combination of them creates new value to elute and chelate necessary minerals for plant. “Artificial Mineral” is new material to recovery oligotrophic environment. It can be applied to various oligotrophic environments by changing the composition to adjust pH. The range of application is not only reforestation but also urban greening, agriculture and so on. It has possibilities and superior technology.

1. はじめに

日本の国土は3780万haあり、その66%である2500万haが森林で、34%が天然林、27%が建築用材等の確保を目的とした人工林である。人の手によって拡大造林された杉・檜人工林は、植林されてから建築用材に利用されるまで人の手によって間伐、枝打ち等の施業を行うことで健全な森林に維持されてきた。

従来から森林は、木材の生産現場という位置付けであったが、近年においては地球温暖化防止、水源涵養機能、レクリエーションの場、防災機能など、実に様々な役割が求められてきている。2011年12月に内閣府から出された“森林と生活に関する世論調査”によると、森林に対して山崩れや洪水等の自然災害を防止する働きに期待が高まっている（表1）。

表1 森林に期待する働き
Function expected for forest

Expected function	Ratio (%)
To prevent disasters such as landslide, flood	48.3
To forestall global warming by carbon dioxide absorption	45.3
To retain water resources	40.9
To clean up air and to reduce noise	37.3
To provide comfortable and peaceful environment	27.2
To produce wood for housing-related material, furniture and paper	23.6

本来、手入れの行きとどいた森林は、適度な照度が保たれ、下層植生も多いが、昨今の安価な輸入外材の台頭や林業従事者の高齢化、後継者不足によって人工林が放置され、荒廃が進んでいる（写真1(a), (b)）。

健全な森林では、落葉落枝や下層植生が、そこに生息す

* 和歌山製鉄所 環境・エネルギー部 リサイクル技術室長 和歌山県和歌山市湊1850番地 〒640-8555

る土壌生物によって分解され、腐植となる。また、母岩の造岩鉱物が風化変質によってミネラル（粘土鉱物）となり、腐植と合わさって粘土腐植複合体となる。これが砂、礫、シルトと共に土壌を形成している（図1）。しかし、間伐や枝打ち等の施業が不十分になると、光環境が悪化して、下層植生が衰退し、さらに、落葉落枝を分解する土壌生物が減少する為、植物の生育に必要な“ミネラル（粘土鉱物）”を保持する“腐植”が生成されない。また、降雨の影響で土壌の酸性化が進み、ミネラル（粘土鉱物）の溶脱した土壌となり、その結果、森林が荒廃し、表層崩壊や土砂崩れ等の自然災害の要因となっている。

そこで、荒廃した森林の再生を目的に、林業分野と鉄鋼分野で発生する有益な資材を利用した森林に不足している



写真1 (a) 健全な森林（島根県奥出雲町）
Healthy forest in Okuizumo, Shimane Pref.



写真1 (b) 荒廃した森林（島根県南出雲町）
Deserted forest at Okuizumo, Shimane Pref.

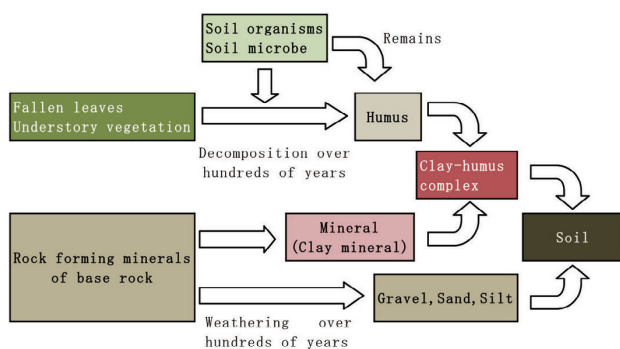


図1 森林土壌の成り立ち
Formation of forest soil

ミネラルを供給する“人工ミネラル”を開発した。

2. 開発した技術の内容と特徴

製鋼スラグを利用し、酸性化が進んだ森林土壌を中和し、溶出したミネラルを人工腐植で保持し、植物が必要な時に供給する“人工ミネラル”を開発した。人工腐植は木質チップを自然由来の酢液で養生して作成したもので、植物に必要なミネラル保持機能を有する酸性資材である。製鋼スラグは鉄を鋼に精製する工程において投入する石灰成分が冷却されて固化したもので、植物に必要なミネラル（Ca, Si, P, Fe等）を多く含んだ、アルカリ性を有する資材である。

2.1 構成

2.1.1 人工腐植

腐植はミネラル保持や土壌 pH の調整機能を有し、動物遺体を土壌微生物等が分解、結合してできる物質で、腐植層 1cm の形成には 100 年以上かかり、一度失われると再生することが困難である。同じような性質を持ったピートモスや草炭、泥炭等の海外発掘資材を利用することは可能であるが、輸送コストがかかり経済的ではなく、数年で栄養分が溶脱する為、定期的に施工し直す必要がある。また、採掘資源であり、その量に限りがある。一方、国内自給できる有機質資材としてバーク堆肥があるが、1～2年程度の短期に堆積、熟させたもので、腐植としては十分でない。このような背景から、国内自給が可能で、より腐植化した資材が望まれていた。腐植を人工的に作成する研究は古くから行われており、近年では熊田による実験室レベルでの人工腐植物質の作成例がある。

この成果を基礎とし、林業で発生する木質チップを自然由来の酢液で養生し、短時間で自然界の腐植と同等の機能を有する酸性資材を工業的に製造する方法を確立し、人工腐植とした²⁾（写真2）。

この人工腐植は、バーク堆肥と比較して腐植含有率が高く（図2）、自然界の腐植と同じミネラル保持や土壌の pH 調整機能を有するが、それ自体はミネラルの含有が少ない為、機能を高めるためにミネラルを添加する必要がある。



写真2 人工腐植
Artificial humus

2.1.2 製鋼スラグ

製鋼スラグは、銑鉄を鋼に精製する工程において投入する石灰成分が冷却されて固化したもので、天然の石灰石が起源である為、天然の鉱物と同様な成分で構成されており、植物に必要なミネラル (Ca, Si, P, Fe 等) を多く含んでいる (表2, 写真3, 図3)。

製鋼スラグからどのような様なミネラルが溶出するかを調査する為に、製鋼スラグを充填したカラムクロマト管に純水を連続的に注水し、所定の液固比 (= 通水量 (g) / スラグ量 (g)) で採取した抽出液の pH と溶出成分を測定する連続通水テストを実施した。Ca²⁺, Mg²⁺ はイオンクロマトグラフィ,

T-Si, T-P は ICP-AES, Fe²⁺ は吸光光度法で分析を行った。その結果を図4に示す。また、連続通水試験前後のスラグ試料の EPMA 分析を行った結果を表3に示す。

製鋼スラグから溶出するミネラルを調査したところ、Ca の溶出が支配的で、高アルカリを示し、若干の Si が溶出することが確認できたが、P, Fe, Mg は分析限界以下であった。このことから製鋼スラグ単体ではアルカリ性を示す為、他のミネラルが溶出し難いことを確認した。

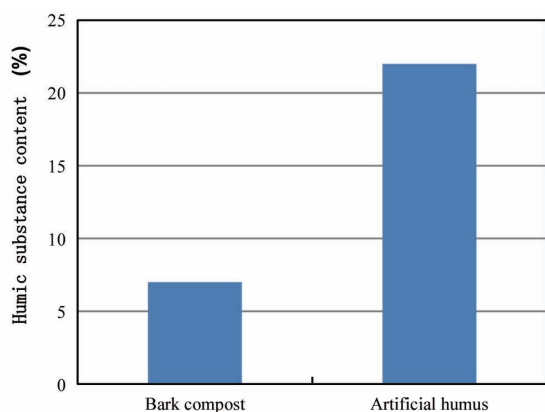


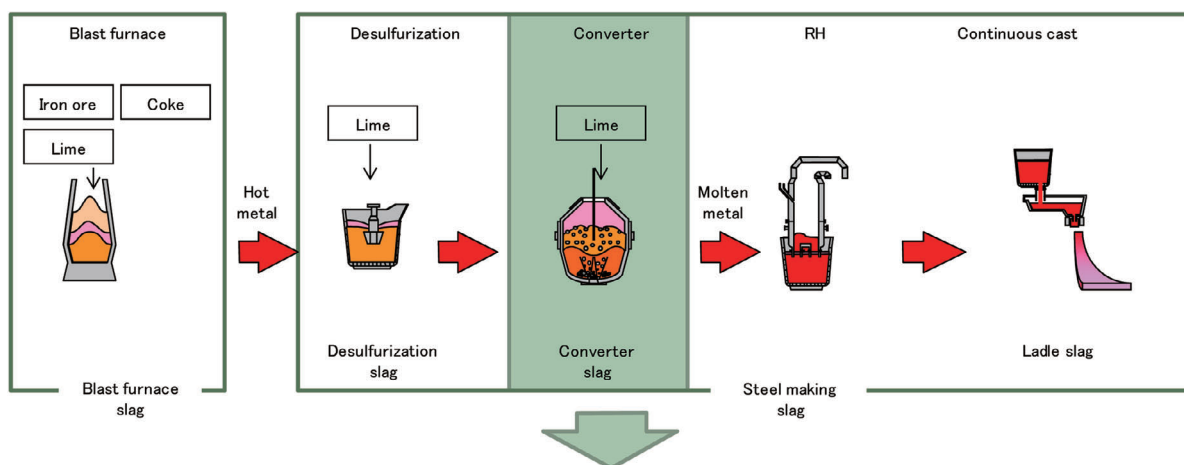
図2 バーク堆肥と人工腐植の腐植含有
Comparison of humic substance content between bark compost and artificial humus

表2 製鋼スラグ組成
Compositions of steelmaking slag

	Composition (%)				
	CaO	SiO ₂	P ₂ O ₅	T.Fe	MgO
Steelmaking slag	42.1	20.0	4.3	8.8	1.9
ex) Andesite	5.8	59.6	-	3.1	2.8



写真3 製鋼スラグ
Steelmaking slag



Several minerals as same as natural mineral are contained in converter slag, in which Si, P and Fe in hot metal are removed in blowing, and toxic elements don't exist.

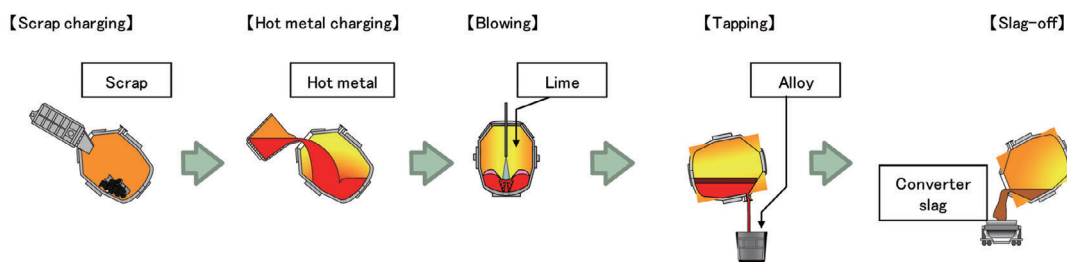


図3 製鋼スラグの生成過程
Process of steel making slag

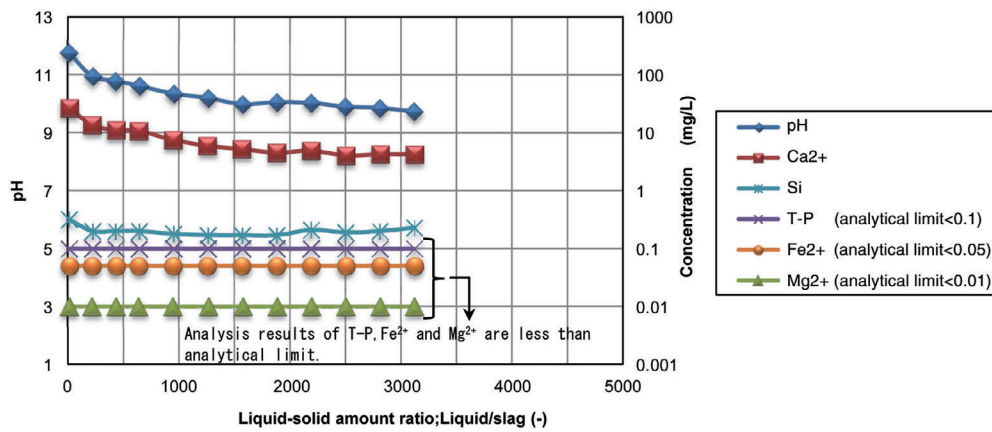


図4 製鋼スラグ通水試験 分析結果
Dissolution test result of steelmaking slag

表3 連続通水試験前後の製鋼スラグ EPMA 結果
EPAM result of steelmaking slag before or after solution test

	SEM	EPMA			
		Ca	O	Si	Fe
Before solution test					
After solution test					

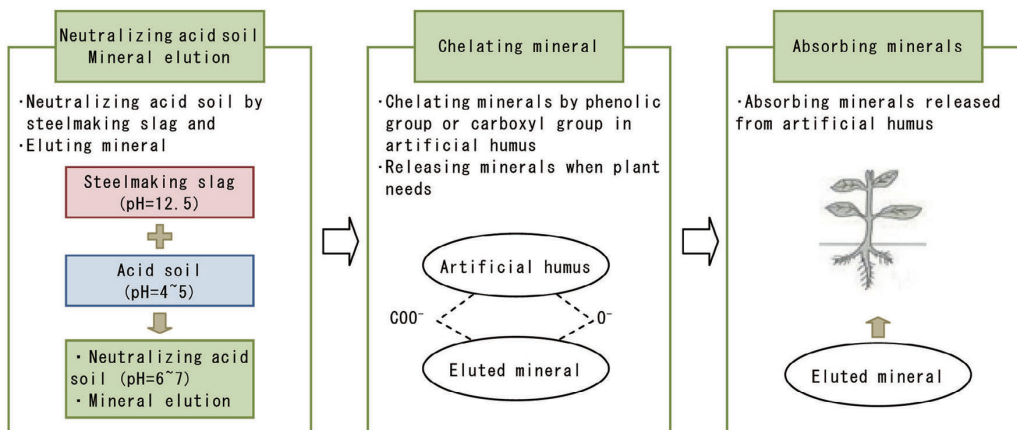


図5 人工ミネラルのメカニズム
Mechanism of artificial mineral

2.2 メカニズム

荒廃して酸性化した森林土壌に対して、鉄鋼スラグのアルカリ性を利用し、土質改良材として利用できることを見出した。また、長期にアルカリ性を持続することが利点となり、一度施工すると数年はメンテナンスが不要で、人

工腐植との組み合わせで、ミネラルが溶出しやすい pH に調整し、植物に必要なミネラルを溶出、保持することが可能となり、植物が必要なタイミングで供給できる目処を得た(図5)。

2.2.1 荒廃した森林に対する最適 pH

土壌の pH は、植物に必要なミネラルをバランスよく保持する為に、陽イオン交換と陰イオン交換の両機能が必要であることから、pH = 6 程度が最適である³⁾ (図6)。島根県や長崎県で行ってきた森林土壌の調査の結果、間伐等の森林施業が行われていない荒廃した杉、檜林の場合、森林土壌の pH は極強酸性で、4.4 を下回り、植物が土壌のミネラルを吸収する為に分泌する根酸よりも遙かに低い値となっていることを確認している。

2.2.2 pH の調整と溶出ミネラル

製鋼スラグから溶出するミネラルと pH の関係を調査す

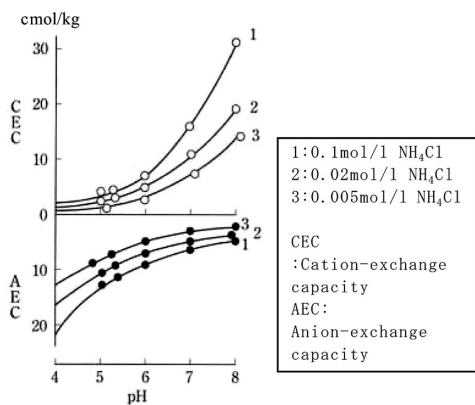


図6 供試する溶液濃度の違いが黒ぼく土の荷電特性に及ぼす影響

Influence of solution concentration to charge characteristic in andosol

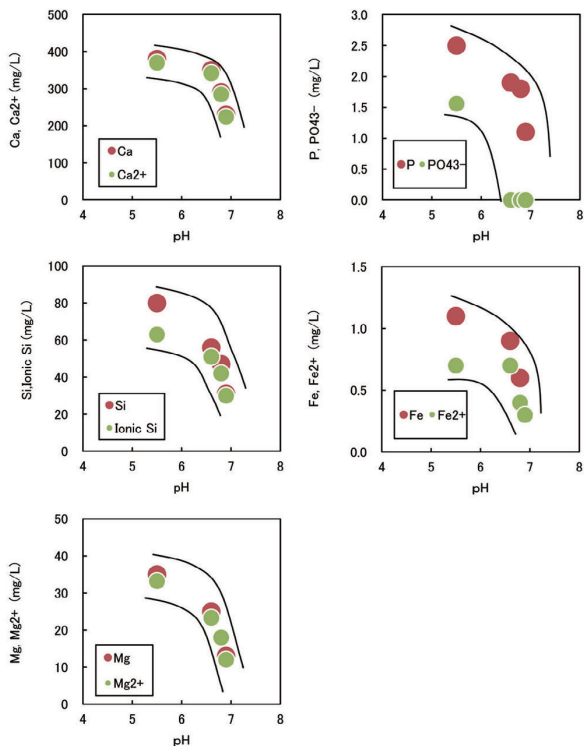


図7 ミネラル溶出試験結果
Result of mineral dissolution test

る為に、人工腐食と製鋼スラグの配合を変え、pH 調整した試料を作成し、ミネラル溶出試験を実施した。その結果を図7に示す。製鋼スラグと酸性資材の配合比を変え、pH 調整をした資材のミネラル溶出量を調査したところ、Ca, Si のほかに、P, Fe, Mg の溶出を確認した。

3. 実証試験

3.1 島根県飯南町

島根県飯南の森林に培地表層 2cm 当たり転炉スラグを 0.0, 2.5, 5.0, 7.5, 10.0 容量% 散布し、土壌化学分析及び下層植生の被植率の調査を行った。その結果、散布前に比べ、散布後のミネラル含有量が改善され、被植率が 25% から 100% に増加した⁴⁾ (表4, 写真4(a), (b))。この取り組みは、地元小学校の環境学習の一環として行い (写真5),

表4 島根県飯南町杉林の土壌化学分析結果と植被率
Result of soil chemical analysis and planting rate at cedar forest in linan, Shimane Pref.

	Converter slag distribution ratio (vol%)					
	0.0	2.5	5.0	7.5	10.0	
pH	5.1	6.8	6.8	7.3	7.2	
Humic substance content (%)	6.9	5.8	4.4	4.3	6.0	
Ca (mg/100g)	132	905	7151	346	1159	
Mg (mg/100g)	21.3	53.8	46.4	80.8	65.2	
Bivalent iron (ppm)	6.0	17.5	25.3	47.3	62.8	
Planting rate (%)	Beginning	5	5	5	3	25
	Half a year later	7	30	50	50	100



写真4 (a) 散布直後 (被植率 25%)
Beginning (planting rate 25%)



写真4 (b) 6か月後
Half a year later (planting rate 100%)



写真5 現地での授業風景

Extracurricular study for distributing artificial mineral in deserted forest

表5 宮崎県新燃岳国有林 土壌化学分析
Soil chemical analysis of national forest in Shinmoe, Miyazaki Pref.

	Control	Experiment		
		①	②	③
Steelmaking slag (L/m ²)	0	2	4	6
pH	4.5	6.3	6.2	6.1
Electric conductivity (μS/cm)	48	90	130	125

地域の環境保全啓蒙活動の一助として成果を上げている。

3.2 宮崎県新燃岳檜林

宮崎県新燃岳周辺の国有林で、火山灰降灰林地の酸性緩和試験を行った。散布した製鋼スラグは1m²当たり0L, 2L, 4L, 6Lとし、土壌化学分析及び下層植生の植被率を調査した。製鋼スラグを施用することでpHが上昇し、電気伝導度(EC)も植物の発芽、育成に適切な120μS/cm以上となった(表5, 写真6(a), (b), (c))。

4. 実施例

静岡県小山町のスコリア流出対策として、人工腐植10vol%, バーク堆肥86vol%, 製鋼スラグ4vol%を配合した人工ミネラルを用いた緑化工を現在までに2000m²行っている(写真7)。火山噴出物であるスコリアは流動性がよく、ミネラル保持力が弱くて、ミネラル自体も少ない(表6, 写真8(a), (b), (c))。この為、植生による表土流亡の防止工法(緑化工法)でのスコリア流出対策は困難であった。よって、従来より行われている散布に鉄枠を設置し、表土流亡を抑える山腹基礎工による対策をせざるを得なかったが、人工ミネラルを散布することで、土壌改良が図られ、緑化工が可能となった。その結果、従来工法と比較すると1000m²当たりのコストが約40%削減でき、工期も約70%短縮可能となった。また、施工時に排出するCO₂量も約75%削減することが可能となった(表7)。

写真6 (a) 試験前
Before experiment写真6 (b) 対照区 4か月後
4 months later in control写真6 (c) 試験区② 4か月後
4 months later in experiment ②写真7 森林内におけるスコリア堆積状況
Scoria deposition in forest

5. 他分野への展開

開発した人工ミネラルは、その配合割合を変えpHを調整することで様々な貧栄養化した環境への適応が可能で、森林再生だけに止まらず、公園などの都市緑化や農業への適用といった将来性がある優れた技術である。

5.1 都市緑化 東京都 恵比寿東公園

東京都恵比寿東公園に人工ミネラルを表層 10cm に対し 20vol%すき込み、芝生に適した土壌改良を行った。すき込んだ人工ミネラルはバーク堆肥 89vol%, 人工腐植 9vol%, 製鋼スラグ 2vol%とし、ティフトン芝の植え付けを行った。その結果、pH は弱酸性となり、電気伝導度も改善された (表 8, 写真9 (a), (b), (c))。



写真8 (a) 施工前
Before construction

5.2 宮崎県都城市 きらり農場高木

宮崎県都城市のきらり農場高木に人工ミネラルを農地表土 20cm に対し 2.5vol%すき込み、ほうれんそうの作付けを行った。すき込んだ人工ミネラルはバーク堆肥 86vol%, 人工腐植 10vol%, 製鋼スラグ 4vol%とした。比較の為、牛糞堆肥とバーク堆肥を農地表土 20cm に対し 2.5vol%すき込んだ区画も設け、ほうれんそう 1 枚当たりの収穫重量の比較を行った。その結果、従来の牛糞堆肥やバーク堆肥を施肥した圃場に比べ、人工ミネラルを添加した圃場で収穫したほうれんそうの重量が増加した (写真 10, 図8)。



写真8 (b) 施工中
Under construction

5.3 大阪府泉大津市 防潮風林 (大阪府港湾局)

大阪府泉大津市の大阪府港湾局区内の防潮堤に建設残

表6 静岡県小山町スコリア堆積地区土壌化学分析
Soil chemical analysis and planting rate at Koyama, Shizuoka Pref.

	Before	3 months later
pH	7.0	7.8
Electric conductivity (μS/cm)	0.02	0.24
Cation-exchange capacity (meq/100g)	4.6	23.1
Planting rate (%)	0	40



写真8 (c) 施工後
After construction

表7 従来工法 (山腹基礎工) と新工法 (人工ミネラルを用いた緑化工) の比較
Comparison between conventional work and developed work



	Convention Foundation works of erosion control afforestation	Development Seeding and planning works with artificial mineral
		
Economic efficiency (M¥/1000 m ²)	4.8	3.0
Term (day/1000 m ²)	30.7	9.0
CO ₂ emission under construction (ton/1000 m ²)	19.9	5.0

表8 恵比寿東公園 土壌化学分析
Soil chemical analysis at Ebisu-higashi Park

	Before	After
pH	8.6	6.7
Electric conductivity ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	0.08	0.13



写真9 (a) 施工前
Before construction



写真9 (b) 芝の植え付け
Under construction (sodding)



写真9 (c) 施工後
After construction

土 50cm に対し人工ミネラルを 25 vol% 混合し緑化を行った。混合した人工ミネラルはバーク堆肥と人工腐植の混合物を 17 vol%, 製鋼スラグ 8 vol% とした。植林に適した土壌改良を行い良い結果を得ている (写真 11(a), (b))。

6. おわりに

本技術は、林業分野で発生する木質チップを自然由来の酢液で養生した酸性有機資材（人工腐植土）と、鉄鋼分野で発生する植物に有益なミネラルを多く含んだアルカリ性無機物質（製鋼スラグ）を組み合わせ、植物に必要なミネラルを溶出、保持し、必要な時に植物へ供給できる優れた森



写真 10 ほうれんそう個体比較 (左から牛糞堆肥, バーク堆肥, 人工ミネラル)
Comparison of spinach (from left, cow manure, bark compost and artificial mineral)

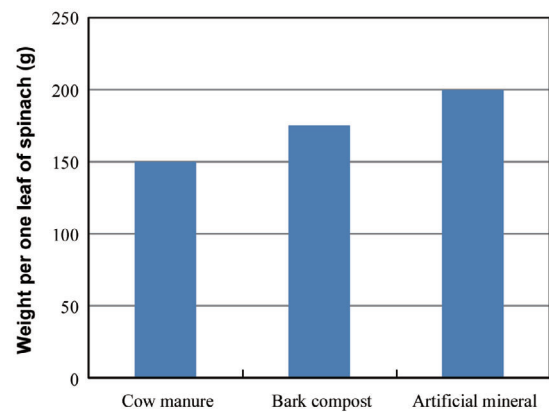


図8 ほうれんそう1枚当たりの収量比較
Comparison of weight per one leaf of spinach among cow manure, bark compost and artificial mineral



写真 11 (a) 施工前
Before planting

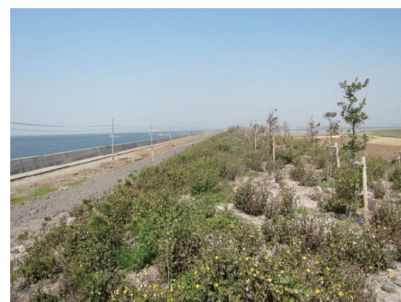


写真 11 (b) 施工後
After planting

林再生技術である。またこの技術は、これら配合割合を変え pH を調整することで様々な貧栄養化した環境への適応が可能で、陸域だけに止まらず、海域への利用も可能である。

参考文献

- 1) 熊田恭一：日本土壤肥料学会誌. 26 (1), 5 (1995)
- 2) 田中賢治：平成 22 年度技術士 CPD・技術士業績・研究発表年次大会, 東京, 2010-6
- 3) 松中照夫：土壌学の基礎. 初版. 東京, 農山漁村文化協会, 2003, p.128
- 4) 鳥井孝一 ほか：材料とプロセス. 25 (1), 344 (2012)



鳥井孝一 Koichi TORII
和歌山製鉄所 環境・エネルギー部
リサイクル技術室長
和歌山県和歌山市湊1850番地 〒640-8555



田中賢治 Kenji TANAKA
国土防災技術(株) 執行役員 事業本部
緑環境事業部 部長



岡田 剛 Takashi OKADA
黒崎播磨(株) 執行役員 第二営業部
和歌山支店長



池田耕一 Koichi IKEDA
和歌山製鉄所 生産技術部 主幹



浜崎拓司 Takuji HAMAZAKI
和歌山製鉄所 環境・エネルギー部
リサイクル技術室 主査



神保正人 Masato JIMBO
和歌山製鉄所 環境・エネルギー部
リサイクル技術室 スタッフ