

氏名	リックイ プレマチュリ RICKSY PREMaturi
本籍（国籍）	インドネシア共和国
学位の種類	博士（農学）
学位記番号	連論第187号
学位授与年月日	令和3年9月24日
学位授与の要件	学位規則第5条第2項該当論文博士
研究科及び専攻	連合農学研究科
学位論文題目	<b>Characteristics of post mining soils in Indonesia and its remediation (インドネシアの鉱山跡地土壌の性質およびその修復)</b>
学位審査委員	主査 山形大学教授 俵谷 圭太郎 副査 山形大学教授 程 為国 副査 弘前大学教授 松山 信彦 副査 岩手大学准教授 立石 貴浩

## 論文の内容の要旨

Tropical rainforests in Indonesia supply the world's abundant terrestrial biodiversity and play an important role in the global climate. However, area of rainforest in Indonesia has been decreasing from time to time. Opencast bauxite mining, opencast nickel mining, gold tailings and oil extraction have significant impacts on tropical rainforests, affecting their vegetation and animal biodiversity, soil fertility, ecological function and services. Land remediation activities are required for reduction of damage caused by opencast mining, gold tailings and oil extraction. The remediation of damaged forests in Indonesia is difficult, due to effect of mining and oil extraction process on the landscape of the local environment. It is necessary to select plant species, and to use microbial activity for remediation of degraded areas. The aims of this study were (1) to clarify the effects of opencast bauxite mining on the chemical characteristics of soil and its effect on the plant growth, (2) to clarify chemical characteristics of gold mine tailings and its effect on the growth of plants under greenhouse conditions, (3) to determine the impact of opencast nickel mining on soil chemical properties and its effect on the growth of two fast-growing tropical tree species under greenhouse conditions, (4) to determine the effect of inoculation with two indigenous arbuscular mycorrhizal (AM) fungi on the growth of plants in the nursery and post-opencast bauxite mining field conditions, and (5) to clarify the effect of Asteraceae plants on degradation of petroleum hydrocarbon in contaminated soils.

Soils were collected from both natural forest and post mining land in Indonesia, nearby bauxite mining site in Bintan Island, Sumatera; nickel mining site at Sorowako, East Luwu, South Sulawesi and gold mining site at Pongkor, Bogor, West Java. Soil pH, total carbon (C), nitrogen (N), and available phosphorus (P) concentrations, cation

exchange capacity (CEC), C/N ratio and exchangeable K, Na, Mg, Ca, Fe and Ni concentrations of post mining soil from bauxite, nickel and gold tailings were analyzed.

The plant species used in this investigation were *Gmelina arborea* (Verbenaceae), *Samanea saman* (Fabaceae), *Falcataria moluccana* (Fabaceae), *Enterolobium cyclocarpum* (Fabaceae). Aster family plants were also used, including *Achillea filipendulina* Lam., *Anthemis tinctorial* (L.) J. Gay ex Guss., *Tagetes erecta* L., *Chrysanthemum coronarium* (L.) Cass. Ex Spach., *Calendula officinalis* L., *Zinnia elegans* Jacq., and *Callistephus chinensis* L., *Cosmos caudatus* Kunth, and *Tagetes* sp. *F. moluccana* and *S. saman* were grown for 15 weeks and shoot heights, shoot and root dry weights were measured. Two native AM fungi, *Rhizophagus clarus* and *Gigaspora decipiens*, were inoculated into seeds of *G. arborea*, *S. saman*, *F. moluccana*, and *E. cyclocarpum*. The seeds were sown in post-bauxite mining soil and grown in the nursery for three months. The seedlings were transplanted into a post-opencast bauxite mining field and grown for 12 months. AM fungal colonization and shoot and root dry weights were measured. Initial soils with 40 and 90 g kg<sup>-1</sup> of total petroleum hydrocarbon (TPH) were prepared. There were three treatments: (1) no addition, (2) addition of FeCl<sub>3</sub> and nitrilotriacetic acid (NTA) solution, and (3) addition of FeCl<sub>3</sub> and NTA and the cultivation of nine Asteraceae plants. The concentration of (TPH) was measured using infrared spectrophotometer, 2 and 3 months after transplanting (MAT). Shoot and root dry weight were measured 3 MAT.

Total N, C, and available P concentrations and exchangeable Ca, Mg, and Na concentrations in the post bauxite mining soils decreased by 75, 75.7, 15.7, 92, 100, and 52%, respectively, in comparison with the natural forest soils. The shoot and root dry weights of *F. moluccana* when grown in the post bauxite mining soils were also lower than those from the natural forest soils. There was no difference in the shoot and root dry weights of *A. saman* when grown in the two soil types. Total N, C and available P of gold mine tailings were lower than that of forest soil. CEC, Mg, K and Fe of gold mine tailings were lower than that of forest soil. C/N ratio of gold mine tailings were higher than that of forest soil. The pH (KCl), pH (H<sub>2</sub>O), Ca and Na concentration of gold-mine tailings were higher than that of forest soil. There was no difference in Ni concentration between forest soil and gold mine tailings. Shoot dry weight and root dry weight of *F. moluccana* on gold mine tailings were lower than that of forest soil. Shoot and root dry weight of *A. saman* grown on gold mine tailings were higher than that of forest soil. The post nickel mining soils TN, TC, available P, CEC, and exchangeable Ca and Na concentrations decreased by 98%, 93%, 11%, 62%, 85%, and 74%, respectively, in comparison with the natural forest soils. The pH of post nickel mining soil was higher than natural forest soil. Shoot dry weight of *F. moluccana* seedlings grown in post mining soil was lower than that of seedlings grown in natural forest soil. There was no difference in shoot dry weight between *A. saman* seedlings grown in natural forest soil and post mining soil, as well as root dry weights of both species. Under nursery conditions, *G. arborea* inoculated with *G. decipiens* increased shoot and root dry weights by 1,431 and 359 %, respectively, while shoot dry weight of *E. cyclocarpum* inoculated with *R. clarus* and *G. decipiens* increased by 510 and

220%, respectively, in comparison with control seedlings. Root dry weight of *E. cyclocarpum* inoculated with *R. clarus* increased by 224%, in comparison with control seedlings. Shoot dry weight of *E. cyclocarpum* inoculated with *R. clarus* increased by 90%, in comparison with seedlings inoculated by *G. decipiens*. Twelve months after transplanting into post-opencast field conditions, the shoot dry weight of *F. moluccana* inoculated with *G. decipiens* was higher than that of the control seedlings by 188%. Shoot dry weight of *E. cyclocarpum* inoculated with *R. clarus* and *G. decipiens* increased by 198% and 149%, respectively, in comparison with control seedlings. Shoot dry weight of *E. cyclocarpum* seedlings inoculated with *R. clarus* was higher by 20% than that of seedlings inoculated with *G. decipiens*.

The concentration of TPH in soil cultivated with *C. caudatus* was lower than that of the initial soil (40 g kg<sup>-1</sup> TPH), 2 MAT. The concentrations of TPH in soils cultivated with *Calendula officinalis*, *C. chinensis*, *C. caudatus*, and *Tagetes* sp. were also lower than that in the initial soil, 3 MAT. The concentrations of TPH in soils cultivated with *A. filipendulina*, *A. tinctoria*, *T. erecta*, *C. coronarium*, *C. officinalis*, *C. chinensis*, and *C. caudatus* were lower than that in the initial soil (90 g kg<sup>-1</sup> TPH), 2 MAT. The concentrations of TPH in soils cultivated with *T. erecta*, *A. tinctoria*, *Zinnia elegans*, *C. chinensis*, *C. caudatus*, and *Tagetes* sp. were lower than that in the initial soil, 3 MAT. *A. filipendulina* and *C. coronarium* died at both 40 and 90 kg<sup>-1</sup> TPH soils.

These findings suggest that opencast bauxite mining, opencast nickel mining and gold tailings decreased the soil fertility, low fertility inhibited the initial growth of two leguminous tree, *F. moluccana* and *A. saman* were adapted better to post mining land. AM fungal inoculation promoted the growth of tropical tree species on post opencast bauxite mining land both in the nursery and field conditions. The roots of Asteraceae plants degraded petroleum hydrocarbon in contaminated soil and *C. chinensis* and *Z. elegans* were more suitable for TPH remediation. Plant survival and extensive root system were important factors for the remediation of TPH in contaminated soil.

インドネシアの熱帯雨林は、世界の豊富な陸上の生物多様性を供給し、地球の気候において重要な役割を果たしている。しかし、インドネシアの熱帯雨林の面積は減少している。露天掘りボーキサイト採掘、露天掘りニッケル採掘、金採掘、および石油採掘は、熱帯雨林に重大な影響を及ぼし、それらの植生と動物の生物多様性、土壌肥沃度、生態学的機能とサービスに影響を与える。露天掘り、金の採掘、石油の採掘によって引き起こされる被害を減らすために、土地の修復活動が必要である。インドネシアの被害を受けた森林の修復は、鉱業と石油採掘プロセスが地域環境の景観に影響を与えるため、困難である。植物種を選択し、劣化した地域の修復のために微生物活性を使用する必要がある。この研究の目的は、(1) 露天掘りボーキサイト採掘が土壌の化学的性質と植物の成長に及ぼす影響を明らかにすること、(2) 温室条件下で金鉱山の跡地の化学的性質と植物の成長に及ぼす影響を明らかにすること、(3) 土壌の化学的性質に対する露天掘りニッケル採掘の影響と、温室条件下での 2 つの早生熱帯樹種の成長に対するその影響を決定すること、(4) 苗床および露天掘り後のボーキサイト採掘現場条件での植物の成長に対する 2 つの土着のアーバスキュラー菌根 (AM) 菌の接種が苗床及び露天掘りボーキサイト採掘跡地での植物

の生長に及ぼす影響を明らかにすること、および (5) 汚染土壌における石油炭化水素の分解に対する Asteraceae 植物の影響を明らかにすることである。

土壌は、インドネシアの天然林とビンタン島のボーキサイト採掘現場の近く、南スラウェシの東ルウのソロアコにあるニッケル採掘現場及び西ジャワのボゴールのポンコールにある金採掘現場から採取された。ボーキサイト、ニッケル、金採掘後の土壌の pH、全炭素 (C)、窒素 (N)、および可給態リン (P) 濃度、陽イオン交換容量 (CEC)、C/N 比、および交換性 K、Na、Mg、Ca、Fe、および Ni 濃度を分析した。

この調査で使用された植物種は、*Gmelina arborea* (クマツヅラ科)、*Samanea saman* (マメ科)、*Falcataria moluccana* (マメ科)、*Enterolobium cyclocarpum* (マメ科) であった。*Achillea filipendulina* Lam、*Anthemis tinctorial* (L.) J. Gay ex Guss、*Tagetes erecta* L.、*Chrysanthemum coronarium* (L.) Cass Ex Spach、*Calendula officinalis* L.、*Zinnia elegans* Jacq、*Callistephus chinensis* L.、*Cosmos caudatus* Kunth、および *Tagetes* sp. のキク科植物も使用された。*F. moluccana* と *S. saman* を 15 週間栽培し、地上部の高さ、地上部と根部乾物重を測定した。2 つの土着の AM 菌、*Rhizophagus clarus* および *Gigaspora decipiens* を、*G. arborea*、*S. saman*、*F. moluccana*、および *E. cyclocarpum* の種子に接種した。種子はボーキサイト採掘後の土壌に播種され、苗床で 3 か月間栽培された。苗木は、露天掘り後のボーキサイト採掘場に移植され、12 か月間栽培された。AM 菌の菌根形成と地上部および根部の乾物重を測定した。40 および 90g kg<sup>-1</sup> の全石油炭化水素 (TPH) を含む初期土壌を準備した。(1) 無添加、(2) FeCl<sub>3</sub> とニトリロ三酢酸 (NTA) 溶液の添加、(3) FeCl<sub>3</sub> と NTA の添加と 9 つのキク科植物の栽培の 3 つの処理区があった。TPH の濃度は、移植 2 か月後と 3 か月後に赤外分光光度計を使用して測定した。地上部と根部の乾物重は 3 ヶ月後に測定された。

ボーキサイト採掘後の土壌における全 N、C、および可給態 P 濃度と交換性 Ca、Mg、および Na 濃度は、天然林の土壌と比較して、それぞれ 75、75.7、15.7、92、100、および 52% 減少した。ボーキサイト採掘後の土壌で栽培されたときの *F. moluccana* の地上部と根部の乾物重も、天然林の土壌からのものよりも低かった。2 つの土壌タイプで栽培した場合、*A. saman* の地上部と根部の乾物重に差はなかった。金採掘後の全 N、C および可給態 P は、森林土壌のそれよりも低かった。金採掘後の土壌の CEC、Mg、K、Fe は森林土壌よりも低かった。金採掘後の土壌の C/N 比は、森林土壌の C/N 比よりも高かった。金採掘後の土壌 pH (KCl)、pH (H<sub>2</sub>O)、Ca および Na 濃度は、森林土壌の濃度よりも高かった。森林土壌と金採掘後の土壌間で Ni 濃度に差はなかった。金採掘後の土壌における *F. moluccana* の地上部乾物重と根部乾物重は森林土壌のそれよりも低かった。金採掘後の土壌で育てられた *A. saman* の地上部と根部の乾物重は森林土壌のそれよりも高かった。ニッケル採掘後の土壌の全 N、全 C、可給態 P、CEC、および交換性 Ca と Na の濃度は、天然林の土壌と比較して、それぞれ 98%、93%、11%、62%、85%、74% 減少した。ニッケル採掘後の土壌の pH は、天然林の土壌よりも高かった。採掘後の土壌で育てられた *F. moluccana* の苗の地上部乾物重は、天然林の土壌で育てられた苗のそれよりも低かった。天然林土壌と採掘後土壌で育てられた *A. saman* 実生の間地上部乾物重、ならびに両方の種の根部乾物重に差はなかった。苗床条件下で、*G. decipiens* を接種した *G. arborea* は、地上部と根部乾物重をそれぞれ 1,431 と 359% 増加させ、*R. clarus* と *G. decipiens* を接種した *E. cyclocarpum* の地上部乾物重は 510 と 220% 増加した。それぞれ、対照の実生と比較

して。 *R. clarus* を接種した *E. cyclocarpum* の根部乾物重は、対照の実生と比較して 224% 増加した。 *R. clarus* を接種した *E. cyclocarpum* の地上部乾物重は、*G. decipiens* を接種した実生と比較して 90% 増加した。開花後の野外条件に移植してから 12 か月後、*G. decipiens* を接種した *F. moluccana* の地上部乾物重は、対照の実生のそれより 188% 高かった。 *R. clarus* および *G. decipiens* を接種した *E. cyclocarpum* の地上部乾物重は、対照の実生と比較して、それぞれ 198% および 149% 増加した。 *R. clarus* を接種した *E. cyclocarpum* 実生の地上部乾物重は、*G. decipiens* を接種した実生のそれより 20% 高かった。 *C. caudatus* が栽培された土壤中の TPH の濃度は、最初の土壌 ( $40 \text{ g kg}^{-1}$  TPH) の 2 ヶ月後よりも低かった。 *Calendula officinalis*、*C. chinensis*、*C. caudatus*、および *Tagetes sp.* が栽培された土壤中の TPH の濃度は 3 ヶ月後に最初の土壌よりも低かった。 *A. filipendulina*、*A. tinctoria*、*T. erecta*、*C. coronarium*、*C. officinalis*、*C. chinensis*、および *C. caudatus* が栽培された土壌の TPH 濃度は、初期土壌 ( $90 \text{ g kg}^{-1}$ ) よりも 2 ヶ月後に低かった。 *T. erecta*、*A. tinctoria*、*Zinnia elegans*、*C. chinensis*、*C. caudatus*、および *Tagetes sp.* が栽培された土壌中の TPH の濃度は 3 ヶ月後に最初の土壌よりも低かった。 *A. filipendulina* と *C. coronarium* は、 $40 \text{ kg}^{-1}$  と  $90 \text{ kg}^{-1}$  の TPH 土壌の両方で枯死した。これらの調査結果は、露天掘りボーキサイト採掘、露天掘りニッケル採掘、および金採掘が土壌の肥沃度を低下させ、低肥沃度が 2 つのマメ科樹木の初期成長を阻害したことを示唆している。AM 菌の接種は、苗床と野外の両方の条件で、露天掘り後のボーキサイト採掘地での熱帯樹種の成長を促進した。キク科植物の根は汚染土壌中の石油炭化水素を分解し、*C. chinensis* と *Z. elegans* は TPH 修復により適していた。植物の生存と広範な根系は、汚染された土壌における TPH の修復のための重要な要因であった。

## 論文審査の結果の要旨

露天掘りボーキサイト採掘、露天掘りニッケル採掘、金採掘、および石油採掘は、インドネシアの熱帯雨林の植生と動物の生物多様性、土壌肥沃度、生態学的機能とサービスに影響を与えている。これらの被害を減らすために、森林の修復が必要である。

本論文は露天掘りボーキサイト採掘、金採掘及びニッケル採掘が土壌の化学的性質と植物の成長に及ぼす影響、アーバスキュラー菌根 (AM) 菌の接種が露天掘りボーキサイト採掘跡地での植物の生長に及ぼす影響、および汚染土壌における石油炭化水素の分解に対するキク科植物の影響を明らかにすることにより以下の知見を得た。

ボーキサイト採掘後の土壌における全 N、C、および可給態 P 濃度と交換性 Ca、Mg、および Na 濃度は、天然林の土壌と比較して、減少した。ボーキサイト採掘後の土壌で栽培された *F. moluccana* の地上部は天然林の土壌よりも低かった。金採掘後の土壌の全 N、C および可給態 P は、天然林の土壌よりも低かった。金採掘後の土壌における *F. moluccana* の地上部乾物重は森林土壌よりも低かった。ニッケル採掘後の土壌の全 N、全 C、可給態 P、CEC、および交換性 Ca と Na の濃度は、天然林の土壌と比較して、減少した。採掘後の土壌で育てられた *F. moluccana* の地上部乾物重は、天然林の土壌よりも低かった。野外

に移植してから12か月後、*G. decipiens* を接種した *F. moluccana* の地上部乾物重は、対照の実生のそれより高かった。*R. clarus* および *G. decipiens* を接種した *E. cyclocarpum* の地上部乾物重は、対照の実生と比較して、増加した。*R. clarus* を接種した *E. cyclocarpum* 実生の地上部乾物重は、*G. decipiens* を接種した実生のそれより高かった。

*C. caudatus* が栽培された土壌中の石油炭化水素 (TPH) の濃度は、最初の土壌 ( $40 \text{ g kg}^{-1}$  TPH) の2ヶ月後よりも低かった。*Calendula officinalis*、*C. chinensis*、*C. caudatus*、および *Tagetes* sp. が栽培された土壌中の TPH の濃度は3ヶ月後に最初の土壌よりも低かった。*A. filipendulina*、*A. tinctoria*、*T. erecta*、*C. coronarium*、*C. officinalis*、*C. chinensis*、および *C. caudatus* が栽培された土壌の TPH 濃度は、初期土壌 ( $90 \text{ g kg}^{-1}$ ) よりも2ヶ月後に低かった。*T. erecta*、*A. tinctoria*、*Zinnia elegans*、*C. chinensis*、*C. caudatus*、および *Tagetes* sp. が栽培された土壌中の TPH の濃度は3ヶ月後に最初の土壌よりも低かった。

これらの結果は、露天掘りが土壌の肥沃度を低下させ、低肥沃度がマメ科樹木の成長を阻害したことを示唆している。AM 菌の接種は、苗床と野外の両方の条件で、露天掘り後の土壌での熱帯樹種の成長を促進した。キク科植物の根は汚染土壌中の石油炭化水素を分解し、*C. chinensis* と *Z. elegans* は TPH 修復により適していた。

以上より、本審査委員会は、「岩手大学大学院連合農学研究科博士学位論文審査基準」に則り審査した結果、本論文を博士（農学）の学位論文として十分価値のあるものと認めた。

#### 学位論文の基礎となる学術論文

1 . Prematuri, R., Mardatin, N. F., Irdiasturi, R. Turjaman, M. Wagatsuma, T. and Tawaraya, K. (2020)

Petroleum hydrocarbons degradation in contaminated soil using the plants of the Aster family.

Environmental Science and Pollution Research, 27, 4460-4467

2. Prematuri, R. Turjaman, M., Sato, T. and Tawaraya, K. (2020)

Post buxite mining land soil characteristics and its effects on the growth of *Falcataria moluccana* (Miq.) Barneby & J. W. Grimes and *Albizia saman* (Jacq.) Merr.

Applied and Environmental Soil Science, Volume 2020, Article ID 6764380, 8 pages

3. Prematuri, R., Turjaman, M., Sato, T. and Tawaraya, K. (2020)

The impact of nickel mining on soil properties and growth of two fast-growing tropical trees species.

International Journal of Forest Research, Volume 2020, Article ID 8837590, 9 pages

4. Prematuri, R., Turjaman, M., Sato, T. and Tawaraya, K. (2020)

Chemical characteristic of forest soil and gold mine tailings and their effect to the plant growth of two leguminous trees.

International Journal of Plant & Soil Science, 32(2), 11-20

5. Prematuri, R., Turjaman, M. and Tawaraya, K. (2020)

Effect of arbuscular mycorrhiza fungal inoculation on growth of tropical tree species under nursery and post-opencast bauxite mining field in Bintan Island, Indonesia.

International Journal of Plant & Soil Science, 32(20), 1-13