4.(III) 土地利用変化・管理に伴う無機化された窒素からの N_2O 直接排出
（Direct nitrous oxide (N_2O) emissions from nitrogen (N) mineralization/immobilization associated with loss/gain of soil organic matter resulting from change of land use or management of mineral soils）（N_2O）

１．排出・吸収源の概要

１.１ 排出・吸収源の対象及び温室効果ガス排出・吸収メカニズム

土地利用変化・管理により土壌有機質中の炭素の消失に伴い有機物が分解されると、同時に窒素分が無機化される。この際生じた窒素が N_2O に転換される。土壌中窒素の N_2O 直接排出メカニズムは「3.D.a.5 土壌有機物中の炭素の消失により無機化された窒素からの N_2O 排出」、「4(I) 施肥に伴う N_2O 直接排出」の説明も参照のこと。

2006 年 IPCC ガイドラインでは、土壌炭素増加が生じている場合の土壌への窒素固定は、土壌中窒素の分解とは非対称的なプロセスであるため、窒素動態をより精緻に算定する Tier 3 が適用されている場合にのみ、算定を行うことが推奨されている。

森林においては、他の土地利用から転用された森林では土壌有機物が増加するため、転用のない森林における通常の森林管理による土壌有機物の損失に伴い無機化された窒素からの N_2O 排出を算定の対象とした。農地においては、転用のない農地については農業分野にて算定を行っているため、本カテゴリーでは他の土地から転用された農地からの当該排出のみを算定の対象とした。草地においては、土壌有機物の変化が起こるのは 3 つのサブカテゴリーのうち牧草地のみであるため、牧草地のみを算定対象とした。また、土壌有機物の変化は土地利用変化によるものと管理によるものを区別していないことから、転用のない草地で一括して報告した。転用のない湿地、転用のない開発地、転用のないその他の土地については、土壌炭素蓄積の減少が生じていないため「NA」で報告した。他の土地利用から転用された湿地については、土壌有機物の蓄積変化算定に関する方法論が存在しないため「NE」として報告した。他の土地利用から転用された開発地、他の土地利用から転用されたその他の土地においては、土地利用変化に伴い土壌炭素蓄積の減少を計算していることから、土壌有機物の消失に伴う排出を計算した。

１.２ 排出・吸収トレンド及びその要因

1990 年度以降、N_2O 直接排出量は減少傾向にあるが、これは開発地への土地転用面積の減少に伴う無機化窒素量の減少が影響している。

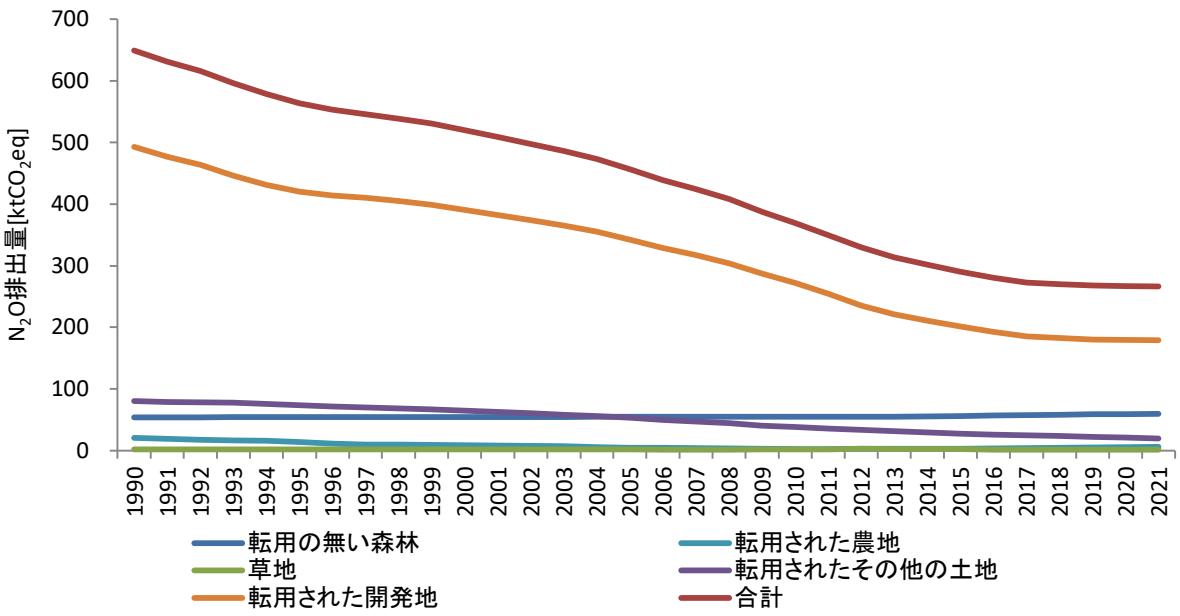

図 1　土地利用変化・管理に伴う無機化された窒素からの N_2O 直接排出量の推移

2．排出・吸収量算定方法

2.1 排出・吸収量算定式

2006 年 IPCC ガイドライン Vol.4 11.2.1 節に記載されている式 11.1 及び式 11.8 を用いて算定した。算定対象は、土壌炭素蓄積変化で炭素減少が生じ得る、転用の無い森林、転用された農地、草地、転用されたその他の土地とした。算定 Tier は、転用のない森林、転用された開発地、転用されたその他の土地については、Tier 1、転用された農地、草地については Tier 2 となる。

$$N_2O = N_2O - N_{direct_N_{mineral,i}} \times 44/28$$

$$N_2O - N_{direct_N_{mineral,i}} = F_{SOM,i} \times EF_{1,i}$$

$$F_{SOM,i} = \sum_k \left[\left(\Delta C_{Mineral,i,k} \times \frac{1}{R_{i,k}} \right) \times 1000 \right]$$

$N_2O\text{-}N_{direct\text{-}Nmineral}$ ：鉱質土壌の有機物の損失に伴う無機化された窒素からの N_2O-N 直接排出量［kg-N_2O-N］

F_{SOM} ：鉱質土壌の有機物の無機化による年間窒素放出量［kg-N］

EF_1 ：無機化された窒素量当たり N_2O-N 直接排出量［kg-N_2O-N/kg-N］

$\Delta C_{Mineral}$ ：鉱質土壌の有機物の損失に伴う土壌炭素の損失量［t-C］

R ：土壌有機物の炭素窒素比（C:N 比）

i ：土地利用・地目タイプ（転用のない森林、転用された農地（水田、普通畑、樹園地（果樹園、茶園））、草地（牧草地）、転用された開発地、転用されたその他の土地）

転用された農地、草地については、Shirato et al. (2021)[1]において示された方法論・係数にのっと

[1] Shirato, Y., Kishimoto-Mo, W. A. and Takata, Y., “A modeling approach to estimating N2O emission derived from loss of soil organic matter for the Japanese greenhouse gas inventory” Soil Science and Plant Nutrition, 67(3), p.347-352, (2021)

り、算定式は以下のようにまとめ、単位面積当たりの N_2O 排出係数（$EF_{N2O\text{-}Ni,j}$）［kg-N_2O-N］を設定し、面積に排出係数を乗じる形の算定方法を採用した。

$$N_2O_N_{direct_N_{Minerarl_{i,j}}} = c_{ms-loss_{i,j,k}} \times A_{i,j,k} \times \frac{1}{R_{i,k}} \times EF_i$$

$$= \left\{ EF_i \times \sum_k \left(c_{ms-loss_{i,j,k}} \times \frac{1}{R_{i,k}} \right) \right\} \times \sum_k \left(A_{i,j,k} \right)$$

$$= EF_{N2O_N_{i,j}} \times A_{i,j}$$

$c_{ms\text{-}loss}$ ：鉱質土壌の有機物の損失に伴う単位面積当たりの土壌炭素損失量［kg-C/ha］
A ：土壌有機物の損失に伴い土壌炭素を損失した鉱質土壌面積［ha］
i ：地目タイプ（水田、普通畑、樹園地（果樹園、茶園））、草地（牧草地））
j ：地域（北海道、東北、関東、北陸、東海・近畿、中国・四国、九州・沖縄）
k ：土壌タイプ（Yagasaki and Shirato (2014)[2] の分類に基づく土壌タイプ）
※農地・草地のみで考慮されている。

なお、草地については全面積で排出が生じているのではなく、草地更新が実施された場合にのみ排出が生じると整理した。詳細は農業分野「3.D.a.5 土壌有機物中の炭素の消失により無機化された窒素からの N_2O 排出」を参照。

2.2 排出・吸収係数

2.2.1 転用のない森林、他の土地から転用された開発地、他の土地から転用されたその他の土地

○土壌中の C:N 比（Ri）

転用のない森林は森林の C:N 比、転用された開発地と転用されたその他の土地については土地転用前の森林・農地・草地の C:N 比を用いた。森林の C:N 比は国内の調査値と IPCC デフォルト値に大きな差がなかったことから 2006 年 IPCC ガイドラインのデフォルト値を用いた。農地・草地の C:N 比は Matsui et al.（2021）の土壌調査から得られた地目別及び全体の平均値（**エラー! 参照元が見つかりません。**）を適用した。

表 1　土地利用別の土壌中 C:N 比

土地利用	C:N 比 （kg-C/kg-N）	引用文献
森林	15.0	2006 年 IPCC ガイドライン、Vol.4, chp.11, p11-16
農地・草地全体	12.0	Matsui et al.（2021）の取りまとめに利用された 2015-2018 年の定点調査を基にした土壌群データから、対象地目の有機質土を除いた総炭素量と総窒素量から設定。
水田	11.5	
普通畑	12.3	
樹園地	11.6	
牧草地	13.1	

○無機化された窒素量あたり N_2O の排出量（EF_1）

[2] Yagasaki, Y. & Shirato, Y., “Assessment on the rates and potentials of soil organic carbon sequestration in agricultural lands in Japan using a process-based model and spatially explicit land-use change inventories –Part 1: Historical trend and validation based on nation-wide soil monitoring”, Biogeosciences, 11, 4429-4442, doi:10.5194/bg-11-4429-2014, (2014)

2019 年改良 IPCC ガイドラインに記載されている EF_1 のデフォルト値［0.006 kg- N_2O-N/kg-N］を使用した。

○他の土地利用から転用された開発地、他の土地利用から転用されたその他の土地における鉱質土壌の有機物の損失に伴う土壌炭素の損失量（$\Delta C_{Mineral}$）

他の土地利用から転用された開発地、他の土地利用から転用されたその他の土地における鉱質土壌の有機物の損失に伴う土壌炭素の損失量は、「4.E.2 他の土地利用から転用された開発地」、「4.F.2 他の土地利用から転用されたその他の土地」で得られた土地利用変化により生じた鉱質土壌炭素蓄積減少量を使用した。

2.2.2 農地（他の土地利用から転用された農地）、草地

○土壌中の C:N 比

農地、草地については、Shirato et al. (2021)に基づき、下表のように設定した。

表 2　農地・草地各地目土壌タイプ群別の C:N 比

土壌タイプ群	水田	普通畑	樹園地	牧草地
低地土	10.9	11.4	11.0	11.6
黒ボク土	13.5	12.8	13.0	13.9
その他の土壌タイプ	10.8	10.3	10.5	11.4

（出典）shirato et al. (2021) ※2015～2018 年に農用地の地目ごと土壌タイプ別に実施された現地調査によって得られた 0～30 cm 深のデータを 3 つの土壌タイプ群に整理し、地目別に平均値を算出した結果。

○鉱質土壌の有機物の損失に伴う単位面積当たりの土壌炭素損失量（$c_{ms\text{-}loss\ i,j,k}$）

転用された農地、草地については、Roth C モデル（「4.B.1 転用のない農地」参照）を用い、過去の年度について長期間通常の土壌炭素量の変化を計算した後、直近年 1 年分のみ土壌への有機物投入量を 0 とした計算を行い、投入された有機物由来ではない土壌炭素の単位面積当たりの分解量を計算した。計算は年次変動を考慮して 2014～2018 年度の 5 年分に対して行い、地目、地域、土壌タイプごとに 5 年間の平均値を算出し、パラメータとして時系列全てにおいて固定で用いた。

○土壌における単位面積当たりの N_2O-N 排出係数（$EF_{N2O_Ni,j}$）

農地、草地に適用する排出係数は、5 つの土地利用・地目（水田、普通畑、果樹園、茶園、牧草地）と 7 つの地域（北海道、東北、関東、北陸、東海・近畿、中国・四国、九州・沖縄）別に設定した単位面積当たりの N_2O の排出量（$EF_{N2O\text{-}Ni,j}$）を用いた。各係数は次式で示される Mu et al. (2009)[3] の N_2O 統計モデルを用いて算出された。

$$EF_{N2O_N_{i,j}} = 0.0801 \times e^{0.00722 \times c_{ms-loss_{i,j,k}} \times \frac{1}{R_{i,k}}}$$

ただし、この統計モデルでは水田のデータが考慮されていないため、水田については 2019 年改

[3] Mu, Z., Huang, A., Kimura, D. S., Jin, T., Wei, S. and Hatano, R., Linking N2O emission to soil mineral N as estimated by CO2 emission and soil C/N ratio, Soil Biology & Biochemistry, 41, p.2593-2597（2009）

良 IPCC ガイドライン 11.2.1.2 の Table 11 に記載されている水田の無機化された窒素当たりの N_2O のデフォルト排出係数（$EF_{1FR}=0.004$）を用いて算出した。Shirato et.al. (2021) で実施された算出結果としての単位面積当たり N_2O 排出係数は下表のとおり。詳細は農業分野「3.D.a.5 土壌有機物中の炭素の消失により無機化された窒素からの N_2O 排出固定」を参照。

表 3　農地・草地地目別、地域別、単位面積当たりの N_2O の排出係数（$EF_{N2O\text{-}Ni,j}$）

地域	水田	普通畑	樹園地		牧草地
			果樹園	茶園	
北海道	0.244	0.210	0.246	－	0.206
東北	0.269	0.189	0.197	－	0.187
関東*	0.291	0.166	0.181	0.178	0.178
北陸	0.265	0.167	0.192	0.177	0.199
東海・近畿	0.284	0.172	0.194	0.179	0.195
中国・四国	0.307	0.200	0.190	0.199	0.191
九州・沖縄	0.310	0.197	0.181	0.178	0.173

* 甲信・静岡含む

2.3 活動量

転用のない森林、転用された開発地、転用されたその他の土地については、活動量は土壌炭素損失量（$\Delta C_{Mineral}$）であり、転用のない森林では、CENTURY-jfos モデルによって得られた単位面積当たりの土壌炭素蓄積変化量のうち土壌炭素の減少が生じた箇所を抽出し、当該箇所の面積を乗じて算出した。転用された開発地、転用されたその他の土地では、土壌炭素ストック変化の算定に用いた土壌炭素減少量をそのまま用いた。

転用された農地、草地については、面積が活動量となり、転用された農地については、転用された農地のうち鉱質土壌面積のみを抽出して活動量とした。草地における活動量は、「耕地及び作付面積統計（農林水産省）」より把握された牧草地面積から有機質土壌面積を差し引いた鉱質土壌面積に、「草地飼料畑の管理実態調査事業（平成 28 年度日本中央競馬会畜産振興事業報告書）（波多野、2017）」に掲載された、都道府県における牧草地の更新割合の結果から得られた牧草地更新率を乗じて把握した。有機質土壌面積の把握方法については「4.C.1.a 転用のない草地（牧草地）（2.3 活動量）」を参照。

表 4　転用のない森林、転用された開発地、転用されたその他の土地における土壌炭素損失量

		1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999
転用の無い森林	ktC	286	287	288	288	289	289	289	289	289	290
転用された開発地	ktC	2,214	2,148	2,096	2,022	1,958	1,905	1,876	1,859	1,834	1,807
転用されたその他の土地	ktC	400	394	390	388	378	368	360	351	343	336

		2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
転用の無い森林	ktC	290	290	290	290	291	291	291	291	291	291
転用された開発地	ktC	1,769	1,731	1,691	1,652	1,604	1,543	1,480	1,425	1,363	1,283
転用されたその他の土地	ktC	324	313	300	289	278	262	245	232	218	199

		2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
転用の無い森林	ktC	292	292	292	294	297	300	304	307	311	315
転用された開発地	ktC	1,215	1,136	1,048	988	940	898	862	831	818	809
転用されたその他の土地	ktC	188	175	165	153	142	133	126	117	112	106

		2020	2021
転用の無い森林	ktC	317	319
転用された開発地	ktC	806	803
転用されたその他の土地	ktC	101	94

表 5　転用された農地、牧草地の鉱質土壌面積

		1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999
転用された農地(鉱質土壌)	kha	194	181	171	157	150	136	117	103	97	93
草地(鉱質土壌)	kha	16	16	16	17	17	17	17	16	16	16

		2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
転用された農地(鉱質土壌)	kha	87	83	77	69	56	49	45	40	37	31
草地(鉱質土壌)	kha	16	16	16	16	16	16	13	15	15	19

		2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
転用された農地(鉱質土壌)	kha	27	25	27	30	30	30	31	35	41	46
草地(鉱質土壌)	kha	16	20	33	25	23	23	15	15	15	15

		2020	2021
転用された農地(鉱質土壌)	kha	50	56
草地(鉱質土壌)	kha	15	15

表 6　牧草地更新率

地域	2005以前	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016以降
北海道	3.0%	2.5%	2.8%	3.0%	3.7%	2.9%	3.5%	3.6%	3.3%	3.9%	4.1%	3.0%
都府県	1.3%	1.0%	1.2%	1.0%	1.4%	2.1%	3.8%	15.7%	9.6%	5.2%	3.5%	1.3%

※2005年度以前及び、2016年度以降は、2006～2010年度の平均値より設定

３．算定方法の時系列変更・改善経緯

表 7　初期割当量報告書（2006 年提出）以降の算定方法等の改訂経緯概要

	2013 年提出	2015 年提出	2016 年提出
排出・吸収量算定式	－	2006 年 IPCC ガイドラインの適用により、算定対象を拡大し、森林、草地、その他の土地の算定を開始した。	－
排出係数	－	N_2O 直接排出係数（EF_1）の値を農業分野の算定に合わせるように変更した。	N_2O 直接排出係数（EF_1）の値を修正した。
活動量	算定対象とする面積について、土地利用面積把握方法の修正を反映した。	転用のない森林、転用されたその他の土地の土壌炭素蓄積減少量、草地は草地更新対象鉱質土壌面積を活動量として利用した。	－

	2018 年提出	2019 年提出	2021 年提出
排出・吸収量算定式	－	－	－
排出係数	－	－	－
活動量	草地更新面積推計方法の修正を反映した。	鉱質土壌・有機質土壌面積の積推計方法の修正を反映した。	農地・草地に対し、2010 年度の土壌群データを反映した鉱質土壌・有機質土壌面積推計方法の修正を反映した。

	2022 年提出	**2023 年提出**
排出・吸収量算定式	農地･草地の算定方法を 2006 年 IPCC ガイドラインの方法に準拠して作成された学術論文に掲載された方法に変更した。	転用された開発地の土壌炭素損失量の算定開始に伴い、転用された開発地を追加した。
排出係数	農地・草地の排出係数を、学術論文に基づく、単位面積当たり排出係数に変更した。	森林、農地からの転用時に用いる C:N 比を新規に設定した。EF_1 を 2019 年改良 IPCC ガイドラインのデフォルト値に変更した。
活動量	－	転用された開発地、転用されたその他の土地の土壌炭素損失量の修正を反映した。

（１）初期割当量報告書における算定方法

1）排出・吸収量算定式

GPG-LULUCF に基づいて算定対象となっていた農地への転用に伴う N_2O 直接排出を Tier 1 の算定式に従って報告していた。

2）排出・吸収係数

○土壌中の C:N 比

11.3 を用いた（現行インベントリと同様。）。

○土壌における N-N_2O 排出係数（EF_1）

GPG-LULUCF の記載に従い、GPG-2000 の EF_1 デフォルト値（0.0125 kg-N_2O-N/kg-N）を利用

した。

3）活動量

「転用された農地」で算定した鉱質土壌の炭素ストック変化量を用いていた。

（2）2013 年提出インベントリにおける算定方法

1）排出・吸収量算定式

初期割当量報告と同様。

2）排出・吸収係数

初期割当量報告と同様。

3）活動量

農地、牧草地土壌の炭素蓄積変化の算定方法の変更に伴い、牧草地から農地への転用に伴う土壌炭素ストック変化が転用のない農地における算定から切り分けられなくなったことから、活動量の対象から除外された。それ以外は初期割当量報告と同様。

（3）2015 年提出インベントリにおける算定方法

1）排出・吸収量算定式

2006 年 IPCC ガイドラインの適用に伴い、転用のない森林、牧草地、転用されたその他の土地を算定対象に含めた。このうち、転用のない森林、転用されたその他の土地については、2006 年 IPCC ガイドラインインに基づく Tier 1 の算定方法（GPG-LULUCF の算定方法と同様に土壌炭素損失量を活動量とする式）を適用し、転用の無い農地、牧草地の面積に対して、バックグラウンド排出に相当する排出係数を乗じる方法論を適用した。

2）排出・吸収係数

転用のない森林、転用された森林に適用する EF1 は 2006 年 IPCC ガイドラインに記載されているデフォルト値（0.01 kg-N_2O-N/kg-N）、C:N 比は転用された農地に適用している 11.3 を使用した。

転用された農地、草地に適用する EF_1 について、農業分野で用いている値である 0.65 kg-N_2O-N/ha/年を利用した。

3）活動量

現行の算定方法と同様に求めた。ただし、牧草地の草地更新率は一律 3%として設定していた。

（4）2016 年提出インベントリにおける算定方法

1）排出・吸収量算定式

2015 年提出インベントリと同様。

2）排出・吸収係数

転用された農地、草地に適用する EF_1 について、農業分野の算定方法改定に合わせて 0.23 kg-N_2O-N/ha/年を利用した。

3）活動量

2015 年提出インベントリと同様。

（5）2018 年提出インベントリにおける算定方法

1）排出・吸収量算定式

2015 年提出インベントリと同様。

2）排出・吸収係数

2016 年提出インベントリと同様。

3）活動量

牧草地について、草地更新率を一律 3%の設定から、2006～2015 年度の調査結果を踏まえた値に変更した。詳細は「4.C.1.a 転用のない草地（牧草地）」を参照。

（6）2019 年提出インベントリにおける算定方法

1）排出・吸収量算定式

2015 年提出インベントリと同様。

2）排出・吸収係数

2016 年提出インベントリと同様。

3）活動量

2008～2016 年度における新規植林・再植林面積、森林減少面積の再計算及び水田・普通畑・牧草地における有機質土壌面積の推計方法の見直しに伴い、各土地利用における鉱質土壌面積値が変更された。詳細は「4.A.2 他の土地利用から転用された森林」、「4.B.2 他の土地利用から転用された農地」、「4.C.1.a 転用のない草地（牧草地）」を参照。

（7）2021 年提出インベントリにおける算定方法

1）排出・吸収量算定式

2015 年提出インベントリと同様。

2）排出・吸収係数

2016 年提出インベントリと同様。

3）活動量

農地、草地における最新のデータ（2010 年度値）に基づいた有機質土壌面積の修正に伴い、当

カテゴリーの算定に使用する鉱質土壌面積について、時系列全体の再計算を実施した。詳細は「4.B.1 転用のない農地」、「4.C.1.a 転用のない草地（牧草地）」を参照（現行インベントリと同様。）。

（8）2021 年提出インベントリにおける算定方法

1）排出・吸収量算定式

転用された農地と、草地の算定について、面積×排出係数という基本算定式は維持しつつも、算定方法は 2006 年 IPCC ガイドラインの方法に準拠して作成された学術論文に掲載された方法に変更した。

2）排出・吸収係数

転用された農地と、草地について、新たに学術論文に基づく面積当たり排出係数を用いた。

3）活動量

2021 年提出インベントリと同様。

（9）2023 年提出インベントリにおける算定方法

1）排出・吸収量算定式

新たに転用された開発地を追加し、土壌炭素損失量に基づく直接 N_2O 排出量を算定した。転用のない森林、転用された農地、草地、転用されたその他の土地は 2021 年提出インベントリと同様の方法論に基づいて算定した（現行インベントリと同様）。

2）排出・吸収係数

森林、及び森林・農地・草地からの土地転用に適用する土壌中の C:N 比を新規に設定した。また、森林、転用された開発地、転用されたその他の土地に適用する、無機化された窒素量あたり N2O-N 直接排出係数（EF_1）に 2019 年改良 IPCC ガイドラインに記載されているデフォルト値（0.006 kg- N_2O-N/kg-N）を使用した（現行インベントリと同様）。

3）活動量

転用された開発地、転用されたその他の土地の土壌炭素損失量の方法論変更に伴う再計算結果を反映した（現行インベントリと同様）。