

総説

有機質廃棄物のコンポスト化における微生物接種の効果

中崎清彦^{1*}

1) 創価大学プランクトン工学研究所 〒192-8577 東京都八王子市丹木町 1-236

Effects of microbial inoculation on composting of organic wastes

Kiyohiko Nakasaki^{1*}

1) *Institute of Plankton Eco-engineering, Soka University, 1-236 Tangi-cho, Hachioji, Tokyo 192-8577, Japan*

** Corresponding author: nakasaki@soka.ac.jp*

2024 年 4 月 27 日受付、2024 年 5 月 6 日受理

Abstract Composting converts organic waste into compost and effectively restores soil fertility via the action of microorganisms. As the global population increases, the demand for rapid composting to manage substantial quantities of organic waste also increases. To achieve rapid composting, optimal conditions for moisture content, temperature, oxygen supply, pH, and the C/N ratio should be determined. In addition to controlling these conditions, methods have been developed to accelerate the process by inoculating compost, which is believed to contain high concentrations of effective microorganisms, or cultured microorganisms with high activity in decomposing organic materials. However, the efficacy of microbial inoculation in composting remains controversial. Therefore, this review analyzes and summarizes published studies on appropriate composting systems to clarify the effects of microbial inoculation and the conditions for effective microbial inoculation to improve the composting process.

An appropriate composting system must meet the following conditions: reproducible composting process (differences with and without microbial inoculation are clearly attributable to inoculation), correct assessment of experimental errors, and evaluation based on scientific rationale. A small-scale composting apparatus, in which the composting conditions are strictly controlled, and the same raw material is used, is suitable for obtaining reproducible data. A quantitative method for monitoring the composting process, such as measuring the CO₂ emissions resulting from microbial activity associated with organic matter decomposition, is advantageous for evaluating the effects of microbial inoculation. An example of false evaluation against scientific rationale is the conclusion that non-thermotolerant microorganisms survive the thermophilic phase and significantly contribute to the temperature decline phase when inoculated into compost raw material. Composting is operated with the intention of eliminating human and plant pathogens using thermophilic temperature; hence, inoculated non-thermotolerant microorganisms cannot

survive, rendering such inoculation ineffective.

Microbial inoculation has significant effects when raw compost materials contain inhibitory substances, such as organic acids or furan compounds, which only specific microorganisms can decompose. Organic acid degradation in the compost material and an increase in pH are crucial for accelerated composting. Inoculation of organic acid-decomposing microorganisms into raw materials rich in organic acids is effective for rapid organic acid decomposition and maintaining favorable pH conditions for co-existing composting microorganisms. Consequently, microbial inoculation enhances the succession of composting microorganisms, thereby promoting organic matter decomposition. Effective microbial inoculation in composting was observed when furan compounds were generated during the hydrothermal pretreatment of kitchen refuse to improve the hydrolysis of solid organic material. Inoculation with furan-degrading microorganisms effectively facilitates rapid furan decomposition and accelerates the composting process. In addition, a significant inoculation effect occurs when composting tackles hardly degradable substances, such as polysaccharides and biodegradable plastics, which require microorganisms that are not typically present in high concentrations. The degradation of poly- ϵ -caprolactone, a biodegradable plastic, is accelerated by microbial inoculation. Furthermore, effective inoculation was observed under special composting conditions; only specific microorganisms were active, and the growth conditions of the inoculated microorganisms aligned with the composting conditions.

Under some composting conditions, if the growth conditions of the inoculated microorganisms differ from the composting operating conditions, actively controlling the composting conditions to favor inoculated microbial growth over native microorganisms enhances the microbial inoculation effect. Using the example of producing value-added compost (functional compost) by inoculating suppressive microorganisms against plant pathogens, this review highlights the importance of combining temperature control and timing of microbial inoculation during composting. Overall, integrating microbial inoculation with composting process control is necessary for the stable growth and survival of inoculated microorganisms and the expected benefits during composting.

Keywords: composting, microbial inoculation, organic matter degradation, process control

1. コンポスト化とは何か

コンポスト化は、家庭からの生ごみ、家畜ふんや農作物の残渣、食品工場からの廃棄物、汚泥などの有機質廃棄物を微生物の働きによって分解し、コンポストに変換する方法である。Golueke (1977) はコンポスト化を「有機質廃棄物をコントロールされた条件下で、取り扱い易く、貯蔵性良くそして環境に害を及ぼすことなく安

全に土壌還元可能な状態まで微生物分解すること」と定義している。化学肥料が安価に入手できるようになると、取り扱いが不便なコンポストは、一時期使用されなくなり、耕地への有機物投入量が減少することで土壌中での有機物濃度が低下した。有機物濃度が低下すると土壌中の微生物数が減少し微生物の多様性も失われるが、この現象は地力の低下として知られている。やがて、地力の低下が顕在化するとコンポスト施用の重

要性が再び認識されるようになった。コンポストは、土の中に豊かで変化に富んだ土壌微生物群を養うことによって、耕地での植物の生育を促すとともに、植物に対する病原菌の働きを抑制する重要な役割を果たしている。

コンポスト化は微生物による有機物分解プロセスであるため、そこで働いている微生物の環境条件をいかに整えるかによってコンポスト化の速度は影響を受ける。コンポスト化を担う微生物は、主として腐生性の化学合成従属栄養微生物であり、動植物残渣などの有機物を分解し、生物由来の高分子物質を最終的には二酸化炭素、水、ミネラルなどにまで分解する。これらの微生物は、高温に耐えて増殖するだけでなく、この高温を利用して常温におけるよりもはるかに速い速度で有機物を酸化分解する能力をもった好熱性微生物であり、この好熱性微生物をいかに効率良く働かせるかでコンポスト化の効率も影響を受ける。これらの微生物の働きを左右する因子としては、コンポスト堆積層の含水率、温度、酸素供給、pH、コンポスト原料の炭素と窒素の比 (C/N 比) などがあり、以下に示すような高速コンポスト化のための最適条件が知られている。

2. 最適条件としてどんなことが知られているか

コンポスト化プロセスでは、適切な水分と十分な酸素の条件を同時に満たすことが必要であり、水分が少なすぎると微生物の活性が低下し、水分が多すぎると微生物に十分な量の酸素を供給できず、嫌氣的になると有機物分解速度が著しく低下する。また、嫌氣的になると強い悪臭が発生することがある。コンポスト化の最適水分は 40 ~ 65% 程度であることがわかっている (Dougherty 1998)。

また、微生物分解を促進するためには適切な温度の維持が必要である。異なる温度の条件では異なる微生物が優勢になる。有機物の微生物分解は発熱反応であり、有機物が活発に分解されるとコンポスト堆積層の温度は上昇する。コンポスト堆積層内に通気をおこなわないか、または通気量が少ない場合には、層内部の温

度は、しばしば 80℃ 近い高温に達する。微生物の中には温泉水のような有機物濃度が低い貧栄養条件において 90℃ 以上でも生育できる高度好熱菌の存在も知られているが、コンポスト化過程で見られる好熱菌は 70℃ 以上になるとその活性を失ってしまい、70℃ 以上で活発に有機物を分解する微生物は知られていない。このため、コンポスト化の速度を高めるには堆積層を適正な温度の範囲に維持することが必要である。コンポスト化の最適温度は 60℃ 付近にあることが知られている (Bach et al. 1984)。

高速コンポストにおいては堆積層内で有機物分解を担っている微生物が活発に働くために、好気条件が維持されていなければならない、投入原料の含水率の調整と通気性改良材 (バルキング材) の使用、および通気、コンポスト堆積層の混合攪拌 (切り返し) が特に重要である。なお、通気性改良材は、コンポスト化進行に必要な酸素を供給するための空間を堆積層内につくる目的で用いられる。木材チップなど吸水性のある資材を用いた場合には、同時に原料の水分を調整することもできる。切り返し時に層内に取り込まれた空気中の酸素はコンポスト中の微生物により直ちに消費される。より多くの酸素を供給する目的で、切り返しを高頻度でおこなうと堆積層温度が低下してしまうので注意が必要である。また、切り返し作業のコストの観点からも頻度をきりもなく上げることはできないので、強制通気によって酸素の要求を満たす方法がしばしば用いられる。原料の種類や堆積層の大きさによっても最適な通気速度は異なるが、実用規模の家畜ふんコンポスト化では活発な有機物分解がおこっているコンポスト化初期の最適通気速度は $50 \sim 300 \text{ L min}^{-1} \text{ m}^{-3}$ の範囲にあるとされている (宮竹 2015)。この値は堆積層内での微生物の活動によって消費される酸素を賄うのに必要な空気量の 10 倍以上にも達することがわかっているが、過大な通気は堆積層を高すぎる温度から冷却するとともに、堆積層を乾燥させる目的のためにも用いられている。なお、切り返しは均一なコンポストを得るためにも必須と考えられている。

コンポスト化における有機物分解は、中性から弱

アルカリ性の範囲で活発におこることが知られている (Nakasaki et al. 1933) が、コンポスト原料の中には、しばしばその pH が中性から大幅に離れているものがある。例えば、嫌気条件下で放置された生ごみは、酢酸などの低級脂肪酸が蓄積し、pH が 4 ～ 5 付近まで低下している。逆に脱水助剤として石灰と塩化第二鉄を用いて脱水した下水汚泥では、pH は 12 付近の高い値を示す。原料の pH が低い場合には、消石灰等を混合する、また、pH が高い場合には酸を添加する方法がおこなわれることもある。そして、活発なコンポスト化がおこなえば、コンポストの pH は 8 よりやや高い値に自然に調節される。このため、製品コンポストをコンポスト原料に混合することには、pH 調整の効果もあることがわかっている。

また、微生物分解を促進するためにはコンポスト原料の C/N 比を適正な値の範囲に維持することが重要とされている。最適 C/N 比は約 25 ～ 30 といわれている (Choi 1999)。種々の廃棄物の C/N 比はそのままではこの値からずれているものも多いので、一般には C/N 比の高い原料と低い原料を組み合わせる C/N 比を調整する方法が用いられる。C/N 比の高いパーク (樹皮) のコンポスト化を効率よく進めるために、鶏ふんなどを混合するのはその例である。

ここでは高速コンポスト化のための操作条件についてまとめたが、これ以外の操作条件として、活性の高い微生物を原料に添加することによって飛躍的な効率の向上をはかろうとする試みが従来からおこなわれてきた。製品の一部をコンポスト原料に混合し、微生物の接種源として用いる方法が一般的に行われているが、特別に培

養した微生物を含む接種剤も数多く市販されている。

3. 効果の有無が分かれる微生物接種の効果

微生物を接種することによるコンポスト化促進の効果をデータに基づいて定量的に評価したのは、Golueke et al. (1954) の研究が最初といってよい。Golueke らは生ごみとわら、また、これに紙を混合したモデル都市ごみのコンポスト化をおこなって微生物接種の効果を検討している。この論文はコンポスト化に必要な微生物は原料から供給されて自足することを主張した啓蒙的な論文でもある。しかしながら、この研究では使用するコンポスト原料が不均質な生ごみ (生ごみは、その性質上どうしても不均質にならざるを得ない) を含んでいるため、また、サンプルも不均一であるため、サンプルを分析して有機物の分解率を求める方法では定量性にも限界があった。このため、微生物接種の効果の有無は、必ずしもはっきりしていないと考える研究者も多く、引き続いて微生物接種の効果を検証する多くの研究がおこなわれた。現在までに、効果がある、効果がないと2つの異なる結論を導いた論文が発表されてきているが、その例を Table 1 にまとめた。有機物分解、コンポスト化促進に効果の見られないものと、効果が見られたものとが示されている。また、コンポスト化促進効果は見られないものの、優勢となる微生物の種類が異なり、微生物叢に影響が現れた (Loakasikarn et al. 2021) とした論文もある。なお、微生物接種に効果があったとした報告の中には、窒素の動態 (Zhang et al. 2016) への影響に言及したものもある。

Table 1 Summary of the effects of microbial inoculation on composting as seen in previous literatures.

Raw material	Composting scale	Seed/Inoculum	Composting stage for inoculation	Temperature profile	Effect of inoculation	References
vegetable trimmings, chopped straw and paper	from laboratory to field scale: 19 L glass jars (3 kg)/ 208 L steel drums (70 kg)/ 1 m square and 1.5 m high bin (450 kg)/ 1.5 m high open pile (2700kg)	Garden soil, horse manure, partially decomposed organic material, and a commercial preparation of special bacterial cultures	initial	Laboratory studies: in a room maintained at 50°C±5°C Open pile: ambient temperature	No measurable effects resulted on the course of temperature, increase in per cent ash, or decrease in per cent carbon	Golueke et al. 1954

Sewage sludge	300 mmΦ × 400mm depth 3kg	Compost product	initial	60°C constant and uniform	No significant effect on the rate and degree of organic matter degradation	Nakasaki et al. 1985
Grape pulps	70-litre batch reactor (70×50×50 cm) 20 kg (wet weight).	mesophilic and thermophilic strains from a culture containing grape pulps and fresh sheep manure/ cellulolytic strains isolated from grape pulps and tree bark	initial	Maximal temperature >60°C	cellulolytic and ligninolytic bacteria had no effect on the degradation of organic matter	Faure & Deschamps 1991
Grass straw and leaf mix	51 cm height, 47 cmΦ 8.2 kg	commercially available seeding material (<i>Bacillus</i> , <i>Streptomyces</i> , <i>Pichia</i> , <i>Saccharomycopsis</i> , <i>Aspergillus</i> , and <i>Mucor</i>)	initial	N.A.	Positive effects in total organic carbon and organic matter contents, the effect was not obvious in microbial biomass and CO ₂ evolution rate	Rajbanshi et al. 1998
Garbage from cafeteria	8.7 L 19×27×17 cm (W×L×H)	mixing microorganisms having substantial activity on various organic substrates	initial	maximal >60°C for inoculated, around 40°C for non-inoculated	temperature, CO ₂ and O ₂ concentrations, pH, and dry matter decrease were improved	Shin et al. 1999
Wood chips Sewage sludge	plastic bins (60×40×30 cm)	Commercial preparation of micro-organisms (<i>Pseudomonas</i> , <i>Lactobacillus</i> , <i>Saccharomyces</i> spp.)	initial	(20–25°C) for a period of 28 days	a microbial inoculant did not have a significant effect on the decomposition process	Maboeta & van Rensburg 2003
MSW	34 L	<i>Bacillus azotofixans</i> , <i>Bacillus megaterium</i> and <i>Bacillus mucilaginosus</i> / <i>Trichoderma koningii</i> , <i>Streptomyces cellulosae</i> and White-rot fungi	initial	peak temperature >60°C (inoculated) peak temperature =58°C (uninoculated)	Oxygen uptake rate and total cumulative O ₂ uptake were larger in the inoculated compostings than uninoculated control	Xi et al. 2005
OFMSW	46 kg fresh refuse	a microbial inoculum originated from the MSW leachate	initial	temperature once increased near 70°C	The positive effects were observed in terms of pH, oxygen uptake ratio and cellulase activity, though other parameters were not significantly different	Li et al. 2008
Straw and certain agro-industrial wastes	each pile at the beginning was about 1.5 m length×1.0 m width×0.80 m height	Cellulose degrading fungi: <i>Trichoderma reesei</i> (NRRL 11236), <i>Phanerochaete chrysosporium</i> (NRRL 6361) and <i>Trichoderma viride</i> (EMCC 107)	initial	temperature attained a maximum peak at the 16th day and surpassed 60°C	Inoculation of composting mixtures enhanced the biodegradation of recalcitrant substances	Rashad et al. 2010
Kitchen-waste	6 kg 2 reactors	a microbial cocktail consisting seven types of bacteria and eight types of fungi isolated from soils	initial	the composters were placed in a laboratory at 27±5°C and kept at 45°C. Compost cycle was for 30-days	use of a microbial cocktail did not show advantages in accelerating the composting process.	Abdullah et al. 2013

Household organic waste	dry leaves (1.6 kg total) were added to each bin once a day, for 60 days Five-200 L bin	MC (mature compost) EM (lactic acid bacteria, photosynthetic bacteria and yeast) LDD1 (fungi, actinomycetes and lipase-producing bacteria)	MC was mixed at the initial/ EM and LDD1 were mixed with the organic waste daily	Highest peak ranged from 45 to 50°C	not be necessary to add commercial inoculants to facilitate composting	Karnchanawong & Nissaikla 2014
Rice straw and chicken manure	lab-scale cylinder reactors, about 10 kg raw materials	enriched ammonia-oxidizing bacteria	initial	temperature control Heating phases 37.6-57°C, Thermophilic phases 50-57°C, Cooling phases 40.2-50°C, Mature phases 39.5-40.2°C	inoculation reduce ammonia emission and nitrogen loss by transforming ammonium into nitrite	Zhang et al. 2016
dairy manure and corn straw	8 kg fresh weight of mixture of material	The greatest cellulosic enzymatic strains with tolerance to high temperature/ <i>Streptomyces</i> sp. H1, <i>Streptomyces</i> sp. G1, <i>Streptomyces</i> sp. G2, <i>Actinobacteria</i> bacterium T9	different stages	temperature increased once to 57°C, then dropped linearly	improved cellulase activities, accelerated the degradation of cellulose, increased the content of humic substances	Zhao et al. 2017
Sugarcane processing residues	3.2×1.6×25 m (base×height×length)	phosphate-solubilizing bacteria (PSB), <i>Pseudomonas aeruginosa</i> PSBR12 and <i>Bacillus</i> sp. BACBR01	initial	temperature increased rapidly, and then remained above 60°C until the end of composting	inoculation of PSB reduced the levels of Ca-bound P and increased the labile organic P fraction	Estrada-Bonilla et al. 2017
Sludge	Box with internal dimension 0.54 m×0.49 m×0.47 m (length×width×height)	A thermophilic bacterium (<i>Geobacillus stearothermophilus</i> CHB1)	initial	maximum temperature: 56.5°C for inoculated, and 51.9°C for non-inoculated	inoculation with CHB1 would enhance the quality and efficiency of composting	Fang et al. 2019
Sugarcane leaves and dairy manure	total weight of each pile was approximately 25 kg in a cylinder compost reactor (60 L)	compost-born multifunctional thermophilic microbial consortium (CTMC)	Two step: first inoculation (day 0) second inoculation (day 9)	thermophilic phase (>50°C) was two days longer in the inoculated composting than non-inoculated one	enhance the mineralization of organic carbon, accelerate the lignocellulose degradation and promote the humification process	Xu et al. 2019
Rice straw	small cylinder (18 cmΦ, 45 cm height) 12.5 L working volume	The inoculum was the blend of five bacterial strains/ <i>Aeromonas caviae</i> sp. SD3, <i>Shinella</i> sp. XM2, <i>Rhizobium</i> sp. S8, <i>Corynebacterium pseudotuberculosis</i> sp. SD1, <i>Streptomyces clavuligerus</i> sp. XM	at cooling phase (day 13)	temperature cooling phase is favorable for the inoculated microorganisms	Fenton pretreatment with bacteria inoculation provided a new method to promote the HS amount	Wu et al. 2020
Model food waste (Rabbit food)	laboratory-scale (100 mL) mini reactor	one commercial seeding material and two brands of compost products	initial	60°C constant and uniform	the rates and degrees of organic matter degradation were similar though the microbial communities were different	Loakasikarn et al. 2021

Mushroom residue and wood chips	large pile 3.4 m×1.2 m×0.5 m (in length, width and height)	<i>Aspergillus</i> , <i>Penicillium</i> , <i>Bacillus</i> , <i>Streptomyces</i>	initial	Temperature rose to near 60°C and kept high level under the ambient temperature of 3–11°C	beneficial for the starting of the aerobic composting at low temperature and the degradation of cellulose	Jia et al. 2021
Cattle manure and rice straw	mixed materials (100 kg) in a cubic composting reactor (200 L)	<i>Malbranchea cinnamomea</i> , <i>Gloeophyllum trabeum</i>	single-stage inoculation: SSI (both at the start) two-stage inoculation: TSI (successively)	<i>G. trabeum</i> was inoculated at the end of cooling stage (50–40°C) in TSI	TSI promoted the degradation degree of cellulose, hemicellulose and lignin, and increased the total nutrients and humus carbon	Zhu et al. 2021
N.A.	N.A., but must be large, since the term, "windrow-based compost piles" was used, and sample weight was large	Two PSB strains <i>Pseudomonas aeruginosa</i> CMG4 and AAC1	initial	Maximal temperature around 50°C	inoculation does not affect the temperature, MC, carbon to nitrogen ratio, organic matter and Mg content but increased the accessible Ca content	Ahmad et al. 2022
Food waste	1 m ³ self-made pilot-scale intelligent aerobic composting equipment	mature compost	initial	Maximal temperature reached near 70°C	increased the reduction rate of volatile solids by 71.4% and shortened the composting period by 7 days	Wang et al. 2022
Spent mushroom substrate and chicken manure	length, width, height and thickness of 65.7 cm, 61.1 cm, 60.5 cm and 6.2 cm about 26.9 kg	A mixture of <i>Bacillus subtilis</i> SL-44, <i>Enterobacter hormaechei</i> Rs-189 and <i>Trichoderma reesei</i> / Commercial Microbial agents	initial	Maximal temperature reached around 70°C	Microbial inoculum elevated the temperature in the thermophilic phase, enhanced humification degree, and promoted composting maturity and quality	Li et al. 2024

微生物接種の効果があるか否かの判定においては、研究方法が微生物接種の効果を評価するのに適したものになっているか、実験誤差を正しく評価しているか、科学的根拠に基づく評価になっているかについて、注意が必要である。研究方法が適正であるためには、再現性のある実験結果が得られるシステムでなければならないことはいままでもないが、再現性に疑問がある研究報告も多く見られている。例えば、生ごみを用いて大型の積み山方式でコンポスト化するときには、生ごみ自身の組成が不均質であることに加えて、通気性改良材や微生物接種剤を均一に混合する操作すら容易ではない。また、積み山の形状、大きさによっても、微生物による代謝で発生する熱の損失量が異なって、堆積層の温度は異なってしまう。そのような場合、見かけ上同じ操作をしても、真の意味で同じとは言えないので、再現

性のある結果を得ることは極めて難しい。そして、そのような条件下では、微生物接種の有無を変えたコンポスト化で、たとえ差が見られたとしても、それは、微生物接種の効果とは言いきれない。

実用規模のコンポスト化では、原料が不均質であったり、温度、水分、通気性などが堆積層内で大きな分布を生ずるために微生物接種の効果は明確になりにくい。このため、少なくとも原理的に効果があるか否かを調べる段階では実験条件を詳細に制御できる実験室規模の装置で確かめることが有利である。そして、原理的に効果があるとしたら、それを実用規模のコンポスト化にどのように応用するかについては、別途、そのための研究が必要である。少なくとも原理的に効果がなければ、実用規模コンポスト化で効果を期待できないことはいままでもない。なお、微生物接種の効果を検証するためには、

有機物分解をできるだけ定量的に比較する必要があるが、密閉通気型装置からの二酸化炭素発生量を測定する方法をその一つとして用いることができる。この方法では、固体サンプルの灰分率の変化をもとに有機物分解率を計算するときなどに生じやすい、大きな誤差を避けることができる。

微生物接種の効果を検証するには、測定誤差を正しく評価することも重要である。これまでに報告されている多くの論文の中には、微生物の接種の有無によって有機物分解率にわずか数%の差が観察されたことをもって、微生物接種の効果があると主張する論文も散見されている。コンポスト化においては、全く同一の原料を用いて、操作も同一にしても有機物分解率に数%の差が生じることがある。このため、有機物分解率に数%の差しかないときには、有意な差であることの主張は難しい。また、きわめて精密なコンポスト化操作と有機物分解の定量手法の導入によって、数%の差を有意な差であることを主張できたとしても、逆の見方をすれば、微生物接種にともなう有機物分解促進効果はわずか数%に過ぎないということになる。なお、セルロース分解菌を接種したコンポスト化でセルロースの分解促進効果が見られているときに、セルロースを含む有機物全体の分解量には、差が見られないという整合しない実験結果をもとに微生物接種の効果を論じた研究報告もある。この結果は、微生物接種の効果を検証するには、測定誤差について慎重な検討が必要であることを示している。

微生物接種の効果に対する主張が科学的根拠に基づいたものになっているかは、さらに重要である。高温条件下で生き残ることができない微生物を原料に接種し、コンポスト化の高温過程での効果を期待するものはいくつか報告されているが、そのような微生物が高温過程の有機物分解に貢献することは困難である。また、高温条件では生残できない微生物を原料に接種し、コンポスト化の後半で温度が低下したときの増殖と貢献を期待していると思われる研究もあるが、コンポスト化の過程で高温にさらされるとこれらの微生物は死滅する。コンポストの積み山が大きい場合には、積み山の内部は

高温でも表面付近は温度が低く、高温条件では生き残れない微生物も生き残るのではないかと考える向きもあるかもしれない。しかしながら、これらの微生物が生き残る操作を認めることは、コンポスト化の高温過程で人や植物に対する病原菌を殺菌できずに、病原菌が生き残ることも許容することであり、安全なコンポスト化に本来的に求められている条件を満たすことができていないことになる。なお、実際のコンポスト化では適正に切り返しをおこない、病原菌を堆積層の高温域に移動させることで生き残ることがないように操作される。このため、高温条件では生残できない微生物を原料に接種したときに、たとえ効果があったとしても実際の操作における有用性は疑問である。

また、コンポスト原料にセルロース分解菌を接種して、コンポスト化の初期段階でセルロースの分解を促進しようとした研究も見られるが、その効果は限定的と考えてよい。よく知られているように、セルロースは他に易分解性の有機物が共存するときには、易分解性有機物の分解が進まないと、その分解は開始しない。このため、接種した微生物が直ちにセルロースを分解して大きな接種の効果が見られる条件は限られている。なお、嫌気性のセルロース分解菌として芽胞を形成し、耐熱性も高い *Clostridium* 属細菌を用いれば、コンポスト化初期の易分解性有機物が多く、高温となる期間を生き延びて、温度が低下して条件が整ったときにセルロースの分解に寄与するのではと期待することがあるかもしれない。しかしながら、*Clostridium* 属細菌が好気コンポスト化の条件で大きな効果を発揮することは困難と考えるべきであろう。

ここで述べたもの以外にも、微生物接種に効果があるかもしれないが、その効果の有用性が明確でない研究の報告もある。重金属を含む原料のコンポスト化において外部から微生物を接種することで、コンポスト製品中から重金属が溶出しにくくなるとした報告では、コンポスト中に生成された腐植がキレート物質として作用し重金属が保持される、あるいは、いまだ説明されていないメカニズムで重金属が不動化すると説明している。たと

え微生物の接種にそのような効果があるとしても、製造されたコンポストを長年にわたって土壌に施用し続けるとしたら、土壌中での重金属溶出の問題は避けて通ることはできないと思われるので、そこで見られた微生物接種の効果はコンポスト製造という視点から、大きなメリットにはなりえないものと考えられる。

4. 再現性の高いシステムを用いて得た微生物接種の効果がない場合

先に述べた通り、微生物接種の効果を明確に示すためには、コンポスト化における有機物分解をできる限り定量化し、同一条件のコンポスト化では再現性のある実験結果が得られるシステムを用いる必要がある。そのようなシステムの一例を Fig. 1 に示す。(Nakasaki et al.2011) このシステムでは、密閉通気型の小型装置を用いており、有機物分解速度を定量化するために、微生物による有機物分解の結果として発生する二酸化炭素の発生速度を測定し、有機物分解率は、原料中の炭素重量に対して二酸化炭素として揮散した炭素重量の比と定義した炭素変化率を計算している。また、微生物接種以外のコンポスト条件、すなわち、原料も、温度、水分、通気性などの操作条件も同一にして比較することで、微生物接種の効果のみを評価できる。Nakasaki et al. (1985) は、Fig.1 と同一ではないが、同じ考え方に基づいて設計されたコンポスト化システムを用いて微生物接種の効果を検証している。なお、微生物接種剤としてはコンポスト製品を用いて、コンポスト原料に乾燥重量基準で 0、10、20% に変えて添加しているが、微生物接種の有無で微生物濃度以外の物理化学的特性、例えば通気性、pH、含水率などに影響がでることを避けるために、コンポスト製品を添加しない、あるいは減らしたコンポスト化では、ガンマ線照射で滅菌した滅菌コンポスト製品を添加している (Fig. 2 参照)。なお、従来からのコンポスト化における微生物接種の効果に関する研究ではコンポスト化過程で微生物がどのような影響を受けるかについて示されていなかったが、この論文ではコンポスト化過程の微生物叢変化も測定している。

コンポストと滅菌コンポストの割合を変えて外部から接種する微生物濃度を変化させても、コンポスト化における有機物分解に顕著な差は見られないことから、実験に用いた下水汚泥のコンポスト化においては、有機物分解に寄与の大きい好熱性微生物は種菌を接種しなくても原料中に含まれていたものが速やかに増殖し、微生物接種はコンポスト化の有機物分解に顕著な効果はないと結論付けている。

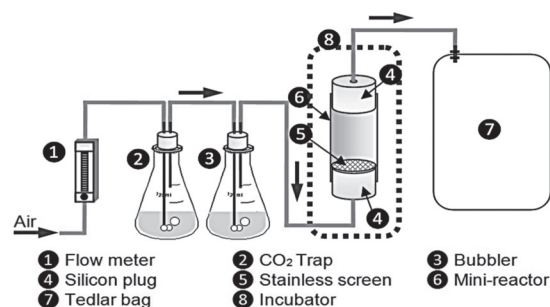


Fig. 1 Laboratory-scale composting system.

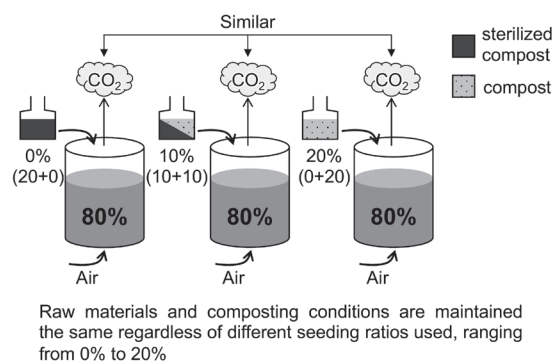


Fig. 2 Experimental design for confirming the effects of microbial inoculation using a mixture of compost and sterilized compost.

同一のシステムは食品加工残渣を原料としたコンポスト化にも適用され、微生物の接種濃度が異なることによって有機物分解速度の変化パターンには差が見られるものの、コンポスト化の発酵終了時の有機物分解率には差がみられないことを確かめている (Nakasaki et al. 1992)。また、複数の市販微生物接種剤の効果についても検討した結果、こちらも有機物分解速度の変化パターンには差があるが、最終的な有機物分解率には顕著な差がないことを明らかにしている (中崎ほか 1993)。なお、この研究では、コンポスト過程で出現する微生物の種類の違いについても検討しているが、分子生物学

が適用される以前の研究であるため、寒天平板上のコロニー観察のデータではあるものの、コンポスト化過程の初期の微生物の種類が微生物接種剤によって異なっていたことを報告している。

その後、異なる微生物接種剤を用いたコンポスト化において、分子生物学を適用し優勢となる微生物の種類が異なることを明らかにした結果が、Loakasikarn et al. (2021) によって報告されている。この論文では、コンポスト中微生物叢を詳細に解析するとともに、酵素遺伝子の存在度についても言及している。実験室規模のコンポスト化において、3 種類の接種材料（市販の微生物接種剤 1 種類と市販のコンポスト製品 2 種類）を比較したところ、有機物の分解速度と分解率は、接種剤の種類によらず同程度であったが、微生物叢は各実験で異なっており、微生物の接種が微生物叢の遷移に大きく影響することが示された。また、接種剤が異なると存在する微生物の種類が異なるにも関わらず、多くの酵素遺伝子の存在度はコンポスト化が進むにつれて同様となった。コンポスト中の微生物は、たとえ種類は異なっているにも関わらず、同様の酵素を生成するポテンシャルを有していたと報告している。

以上、種菌の効果が無い、あるいは極めて小さいコンポスト化についてまとめたが、効果が見られたコンポスト化について次に解説する。

5. 再現性の高いシステムを用いて得た微生物接種の効果がある場合

微生物接種の効果がみられる例に、コンポスト原料中の有機酸を分解し、pH を上昇させる微生物の働きがある。この効果は、実際のコンポスト化でも特に有用なものである。コンポスト化における最適 pH の項ですでに述べた通り、嫌気条件下で放置された生ごみは、酢酸などの低級脂肪酸が蓄積し、pH が 4 ～ 5 付近まで低下して、酸性の状態を示しているが、低 pH の条件では、コンポスト化微生物の活性は低く抑えられ、活発な有機物分解が開始するまでに長い時間を要する。原

料中の有機酸を分解するためには、必ずしも有機酸を分解する微生物を外部から接種しなくてもよい。それは、時間が経過すれば、コンポスト原料中に含まれる有機酸分解菌が緩やかにではあるが増殖を始め、増殖にともなって少量の酸が分解すると pH はわずかに上昇し、pH が上昇すると有機酸分解菌の活性はもう少し高くなり、さらに有機酸の分解が進むという循環がおこって、やがて、有機酸は余すことなく分解され、pH も上昇するためである。しかしながら、コンポスト原料に有機酸分解能力の高い微生物を高濃度に接種することはこの変化を加速することができることも報告されてきている。有機酸分解能力の高い微生物の例として、酵母 *Pichia kudriavzevii* RB1 がある (Nakasaki et al. 2013)。有機酸を添加したモデル食品廃棄物に RB1 株を接種したところ、RB1 株はコンポスト原料に含まれる有機酸を急速に分解し、pH を中性以上に上昇させた。また、RB1 株を接種したコンポストでは、有機酸の分解が早まることで、コンポスト中有機物の分解を担う中温性細菌と好熱性細菌の両者 (*Bacillus thermoamylovorans*, *Bacillus foraminis*, *Bacillus coagulans*) が、接種していないコンポストよりも早く増殖を開始したことを報告している。RB1 株には耐熱性がないのでコンポスト堆積層の温度上昇とともに死滅したが、高温段階に入る前のコンポスト化の初期段階に影響を及ぼし、コンポスト化にかかわる微生物の増殖開始のための遅滞期を短くすることで、コンポスト化プロセス全体を速くすることが可能になったと説明している。

微生物接種の効果がみられるのは、有機酸分解による、pH の改善に限らない。コンポスト過程における生分解性プラスチックの分解に促進効果があるという結果も報告されている (Ohtaki et al. 1998)。生分解性プラスチックは例えば生ごみを収集するゴミ袋として用いて、生ごみを取り出すことなく、ゴミ袋ごとコンポスト化するなどの用途が考えられている。生分解性プラスチックは本来、コンポスト中のみならず、土壌、河川、海洋などの自然環境中で分解されるように設計されているので、様々な環境中に分解微生物が存在することは前提

となっているが、通常的环境中ではその濃度は高くない。また、コンポスト原料中でも分解性の高い微生物は、その濃度がきわめて低い、あるいは存在しないということもおこりうる。生分解性プラスチックとしてポリ-ε-カプロラクトン (PCL) を用いて、50℃でコンポスト化した場合の PCL の分解性に及ぼす接種菌の種類の影響を調べたところ、PCL の分解性は、使用した2種類の異なる微生物接種剤で大きく異なり、一方の微生物接種剤を使用した場合に観察された分解性は、他方の約2倍であったと報告している。

他に接種効果が見られた例として、Tang et al. (2011) は、海藻であるワカメのコンポスト化において微生物接種の効果を確かめている。ワカメに含まれるバイオポリマーであるアルギン酸の分解菌 *Halomonas* sp. AW4 および *Gracilibacillus* sp. A7 を接種したコンポスト化では、これらの微生物を接種しない対象区に比べて、アルギン酸の分解も、全乾燥重量の減少も大きくなったと報告している。アルギン酸を分解する微生物は環境中に少なくないが、コンポスト原料中での濃度が低く、そのため、このコンポスト化で微生物接種の効果がみられたものと考えられた。

また、微生物接種剤の効果は、コンポスト原料を高温高压 (亜臨界) 水で前処理したコンポスト化でも観察されている (Nakasaki et al. 2015)。コンポスト化の初期段階では、固体の有機物が微生物の分泌する菌体外酵素で可溶化し、水溶性有機物に変化する。そして、その可溶化の段階は、引き続く、水溶性有機物が微生物に取り込まれて二酸化炭素と水、およびミネラルまで完全分解される段階に比べて時間がかかることが知られている。このために、固体の可溶化を促進する方法として高温高压水による前処理が用いられることがある。この論文では、レストラン、コンビニエンスストア、食品加工工場から回収した生ごみをおがくずと混合し、180℃、30 分間の高温高压水で処理して、コンポスト原料を調製しているが、処理の過程で 5-HMF (5-ヒドロキシメチルフルフラール) およびフルフラールなどのフラン類が生成する。フラン化合物は、コンポスト化微生物の活性

を著しく阻害し、コンポスト化における有機物分解の開始を遅らせる結果となった。しかしながら、このコンポスト原料にフラン類分解能を有する真菌 *Paecilomyces* sp. FA13 を接種することで、フラン化合物の分解が著しく促進され、その結果として、コンポスト化に寄与する細菌の活性も向上し、有機物の活発な分解の開始が早まることが観察されている。フラン化合物のように、通常のコンポスト微生物が高濃度に曝されることのない物質を含む原料であれば、微生物接種には確かな効果が観察されることも不思議ではない。

以上述べたように、微生物の活性を阻害する有機酸やフラン化合物のような物質が原料中に含まれている場合、また、多糖類や生分解性プラスチックのように、物質そのものは微生物の活性を阻害しない (実際、生分解性プラスチックそれ自体は固体であり、可溶化するまでは微生物の生育を抑制も促進もしない) が、分解性が低く、その分解微生物が自然環境中に高濃度に存在しない場合には、外部から微生物を接種することが有効であることが示されている (Fig. 3 参照)。

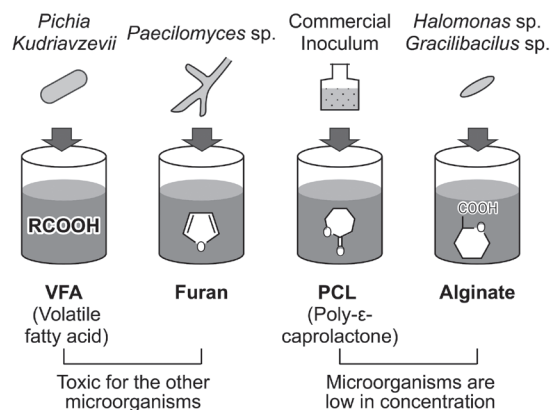


Fig. 3 Positive effect of microbial inoculation on accelerating composting by rapidly decomposing certain chemicals present in the raw compost material.

6. コンポスト化プロセスにおける制御の重要性

すでに上述した通り、中温性の微生物が高温条件で働くことを期待することには無理があるが、高温条件

でなければ、接種効果が期待できるかもしれない。このことは、微生物接種の効果が、コンポスト化の条件と切り離すことはできないことを意味している。別のいいかたをすれば、コンポスト化の条件を制御することで接種した微生物を有効に利用できる可能性がある。ここでは、微生物の接種とコンポスト化プロセスの積極的な制御を組み合わせた報告について紹介する。

Nakasaki et al. (1998) は、植物病原菌に対する抑制菌をコンポスト原料に接種して、増殖、定着させることで、病害を防除し、農薬の代わりとして使用できる高付加価値コンポスト（Nakasaki らは、機能性コンポストと呼んでいる）の製造を試みている。対象病害は、芝草のリゾクトニア病害（ラージパッチ病）で、原因菌である *Rhizoctonia solani* AG2-2 を抑制する有効菌として、*Bacillus subtilis* N4 を接種微生物として用いている。この有効菌は芽胞を形成して高温期を生き延びることができる中温性細菌であるが、高温期は増殖することができない。また、増殖可能な温度であっても、共存する他のコンポスト微生物に比べて増殖速度が遅いため、共存微生物と競合して高濃度にまで増殖することができない。そのため、まず、コンポスト化初期の自己発熱による 80℃ の高温を維持することで、増殖において競合する可能性のある原料中の中温性微生物を殺菌、低濃度化する。その後、温度を室温まで低下させて有効菌を接種し、引き続き有効菌の増殖に適した 40℃ に維持することで、コンポスト中にこの微生物を高濃度に増殖させている。すなわち、微生物を原料に接種するのではなく、接種のタイミングをずらすことに特徴がある。また、40℃ を 3 日間維持することで、有効菌が高濃度に増殖し、芽胞が形成されたことを確かめて、その後、コンポスト化の温度を 60℃ に上昇、維持する。この操作によって、コンポスト中の有効菌の濃度を高く維持しながら、衛生的で高速度のコンポスト化を可能にしている。また、このようにして製造されたコンポストは、芝草病害の防除に有効であることを確かめている。この結果は、微生物の接種とコンポスト化プロセスの積極的な制御を組み合わせることの重要性を裏付けている（Fig. 4 参照）。

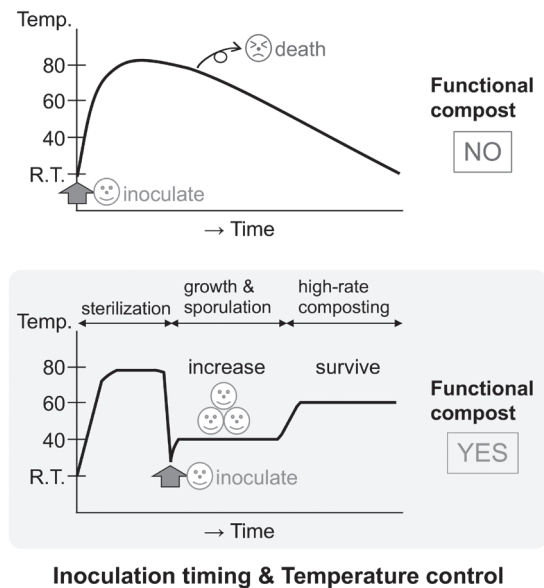


Fig. 4 Combination of delayed inoculation of suppressive microorganisms and temperature control enabling the production of value-added (functional) compost.

さらに *Bacillus subtilis* N4 よりも抗菌スペクトルが広く、より多くの植物病原菌を抑制することができる真菌 *Coprinellus curtus* GM-21 をコンポスト化過程で接種して、高濃度に増殖させることで、植物病害を防除する機能性コンポストを製造する手段が報告されている（Nakasaki & Suzuki, 2008）。コンポスト化初期の高温期が終わって温度が低下するタイミングで GM-21 株を接種した。この時点では、すでにコンポスト化物に残存する有機物濃度のレベルが低くなっており、細菌に比べて貧栄養条件下でも増殖できる真菌の増殖に有利となっている。さらに、pH を細菌の増殖は抑制するが、真菌の増殖には適した 6 付近の値に維持することで真菌の選択的増殖を可能にしている。単に、コンポスト原料に微生物を接種するだけでなく、接種する微生物の性質に合わせて、コンポスト化プロセスを制御することの重要性がここにも示されている。

微生物接種のタイミングを考慮したコンポスト化には Zhou らの論文（Zhou et al. 2015）もある。牛ふん尿に稲わらを混合したコンポスト原料に、コンポスト化進行に合わせて 3 段階に分けて微生物を接種している。第 1

段階はコンポスト原料に高温を達成、維持する目的で *Thermoactinomyces* sp. を、高温期が終了した後、リグニンの分解促進のために *Coprinus cinerea* と *Coprinus comatus* を、さらに時間が経過したときにセルロースの分解を目的として *Trichoderma harzianum* と *Rhizopus oryzae* を接種している。目的の異なる3種類の微生物を3段階に分けて接種することで、リグニンとセルロースの分解が促進されたと報告している。

また、コンポスト化プロセスの制御の重要性を示したもう一つの例に、先に示した酵母 RB1 株を接種し、その活性が高い 40℃ の温度を維持する時間を変えて、コンポスト化における有機物分解に及ぼす影響を明らかにした研究がある (Nakasaki & Hirai 2017)。有機酸が生成されやすい炭水化物含有量の高いモデル生ごみを使用すると、コンポスト化初期段階で新たに多量の有機酸が生成されるが、コンポスト化の温度を 40℃ に維持しなければ有機酸を分解し終わる前に、RB1 株は高温により死滅してしまうので、pH 低下によってコンポスト化は中断する。このため、コンポスト化が中断することなく進行するには、40℃ の温度を維持することが重要で、温度制御の時間がコンポスト化の有機物分解速度に大きく影響するという結果を得ている。

7. 微生物接種の効果についての考え方

微生物活性を阻害する物質、あるいは難分解性物質が存在しても、それを分解する微生物が極めて特殊な微生物でなければ、原料中に低濃度に存在するであろう分解微生物が、いずれは増殖して分解が可能と考えられる。しかしながら、それらの微生物が自然に充足されるとしても、増殖のために長時間を要するとすれば、それらを高濃度に含む微生物接種剤を外部から添加することは、分解開始までの遅滞時間を短くするために有効なはずである。しかしながら、接種する微生物の増殖速度が大腸菌並みに速く、倍加時間が 20 min としたときには、最初 1 cell が 10^6 cell まで 100 万倍に増殖するのに必要な時間は、わずか7時間弱に過ぎな

い。また、倍加時間が 6 h と増殖速度の遅い微生物であれば、100 倍、1 万倍、100 万倍の濃度に増えるために、それぞれ、40h、80h、120h 程度が必要となる。微生物を接種することによる、これらの時間の短縮が重要か否かはコンポスト化全体にかかる時間に依存する。

一方で、期待する機能を持つ微生物が、もともとの原料に含まれていない場合は、コンポスト化の時間をいくら長時間にしてもその微生物は増えてくることがない。例えば、植物病原菌を抑制して病害を防除することのできる微生物は、どんな原料中にも含まれているわけではない。このような状況では有効菌を接種することは有効な手段となるであろう。しかしながら、ここで注意を要するのは、原料に微生物を接種するだけでは、期待する効果は得られないということである。

活性の高い微生物を外部から接種することによって飛躍的な効率の上昇をはかろうとする試みはコンポスト化に限らない。化学物質で汚染された土壌や河川、海洋を微生物の作用で浄化するバイオレメディエーションの技術においても、コンポスト化と同様に、接種した微生物が定着、増殖できず、汚染を浄化できない場合のあることがしばしば観察されている (Harkness et al. 1993)。土壌や河川、海洋に接種された微生物がその環境に適応できない場合、例えば、温度、酸素濃度などが生育範囲から外れている、あるいは、汚染物質の濃度が接種微生物の処理可能な濃度よりも高すぎる場合などにも効果が見られないことは不思議ではない。さらに、環境中にすでに存在する微生物と接種微生物の間の競合が、接種微生物の定着を妨げる場合もある (Ghoul & Mitri 2016)。バイオレメディエーションにおいては、環境条件、例えば温度などを制御するのは容易ではないが、コンポスト化では環境条件が制御可能な場合もあり、その時には、積極的な制御をおこなうことで微生物接種の効果が見込まれることもある。

また、生きて腸に届く乳酸菌を取り込んで、私たちの体内で定着させるプロバイオティクスの考えが実用されてきているが、腸内にはすでに多くの微生物が生息しているために定着は容易ではない。プロバイオ

ティクスに用いることができる微生物は慎重なスクリーニングを経たものであり、どんな微生物でも可能というわけではない。一方で、外部から取り込まれた微生物が新しい環境で容易に定着できないのは、困ったことばかりではない。私たちは、病原菌に感染しても必ずしも病気にはならない。そのことは、生体の持つ免疫誘導のメカニズムに加えて、常在菌との競合で病原菌が増殖できないためと説明されることがある。常在菌とは、人間や動物の体表や体内に定着している微生物のことで、これらの微生物が病原菌と競合することによって病原菌の増殖を抑制する現象は直接的な拮抗と呼ばれている (Buffie & Pamer 2013)。

以上の報告からもコンポスト化に限らず、外来の微生物は、その増殖と定着に工夫が必要であることがわかる。コンポスト化においては、どのような原料のどのような操作条件のコンポスト化で、どのタイミングで接種するとどのような原理で効果があるということが明示されずに、ある微生物を接種すると、漠然と高品質のコンポストが速く製造できる、コンポスト化の過程で臭気を発生しないなどとした研究成果は、説得力に乏しいと言わざるを得ない。

8. まとめ

コンポスト化において微生物接種の効果が期待できるためには、接種する微生物の性質を理解し、その微生物が増殖、定着して、他の共存する微生物に対しても優位になる環境を維持することが重要である。このために、コンポスト化条件の積極的な制御が必要になることもある。近年、発展著しい分子生物学は、コンポスト化の制御ためにも有効な手段になると考えられる。分子生物学は接種した微生物の動態を把握することを可能にするばかりでなく、共存する他の微生物に対する影響についても知ることができるようになってきている。接種微生物の動態とコンポスト化の操作条件を関係づけることにより、求めている効果が得られるコンポスト化条件を見出すことができる可能性がある。接種した微生物を生かして使うために、分子生物学を取り込んだ、新しい微

生物接種操作の進展が望まれる。

引用文献

- Abdullah N, Chin NL, Mokhtar MN, Taip FS (2013) Effects of bulking agents, load size or starter cultures in kitchen-waste composting. *Int J Recycl Org Waste Agric* 2: 1–10.
- Ahmad A, Zafar U, Khan A, Haq T, Mujahid T, Wali M (2022) Effectiveness of compost inoculated with phosphate solubilizing bacteria. *J Appl Microbiol* 133:1115–1129.
- Bach PD, Shoda M, Kubota H (1984) Rate of composting of dewatered sewage sludge in continuously mixed isothermal reactor. *J Ferment Technol* 62: 285–292.
- Buffie CG, Pamer EG (2013) Microbiota-mediated colonization resistance against intestinal pathogens. *Nat Rev Immunol* 13: 790–801.
- Choi K. (1999) Optimal operating parameters in the composting of swine manure with wastepaper. *J Environ Sci Health Part B* 34: 975–987.
- Dougherty M (1998) Composting for municipalities: planning and design considerations. Ithaca, N.Y.: Natural Resource, Agriculture, and Engineering Service, Corporate Extension, 126 pp.
- Estrada-Bonilla GA, Lopes CM, Durrer A, Alves PRL, Passaglia N, Cardoso JBN (2017) Effect of phosphate-solubilizing bacteria on phosphorus dynamics and the bacterial community during composting of sugarcane industry waste. *Syst Appl Microbiol* 40: 308–313.
- Fang Y, Jia X, Chen L, Lin C, Zhang H, Chen J (2019) Effect of thermotolerant bacterial inoculation on the microbial community during sludge composting. *Can J Microbiol* 65: 750–761.
- Faure D, Deschamps AM (1991) The effect of bacterial inoculation on the initiation of composting of grape pulps. *Bioresour Technol* 37: 235–238.
- Ghoul M, Mitri S (2016) The ecology and evolution of microbial competition. *Trends Microbiol* 24: 833–845.
- Golueke CG, Card BJ, McGauhey PH (1954) A critical evaluation of inoculums in composting. *Appl Microbiol* 2: 45–53.
- Golueke CG (1977) Biological reclamation of solid

- wastes. Rodale Press, Emmaus, PA, United States, 272 pp.
- Harkness MR, McDermott JB, Abramowicz DA, Salvo JJ, Flanagan WP, Stephens ML, Mondello FJ, May RJ, Lobos JH, Carroll KM, et al. (1993) In situ stimulation of aerobic PCB biodegradation in Hudson River sediments. *Science* 259: 503-507.
- Jia X, Qin X, Tian X, Zhao Y, Yang T, Huang J (2021) Inoculating with the microbial agents to start up the aerobic composting of mushroom residue and wood chips at low temperature. *J Environ Chem Eng* 9: 105294.
- Karnchanawong S, Nissaikla S (2014) Effects of microbial inoculation on composting of household organic waste using passive aeration bin. *Int J Recycl Org Waste Agric* 3: 113-119.
- Li H, Yang Z, Zhang C, Shang W, Zhang T, Chang X, Wu Z, He Y (2024) Effect of microbial inoculum on composting efficiency in the composting process of spent mushroom substrate and chicken manure. *J Environ Manage* 353: 120145.
- Li M, Peng X, Zhao Y, Ding W, Cai H, Liu G, Wu Z (2008) Microbial inoculum with leachate recirculated cultivation for the enhancement of OFMSW composting. *J Hazard Mater* 153: 885-891.
- Loakasikarn T, Kubota Y, Koyama M, Nakasaki K (2021) Effect of seeding materials on organic matter degradation and microbial community succession during model organic waste composting. *Biocatal Agric Biotechnol* 37: 102182.
- Maboeta MS, van Rensburg L (2003) Bioconversion of sewage sludge and industrially produced woodchips. *Water Air Soil Pollut* 150: 219-233.
- 宮竹史仁 (2015) 堆肥化施設の苦悩と現場ニーズに対応したシステム開発. *環境バイオテクノロジー学会誌* 15: 9-16.
- Nakasaki K, Sasaki M, Shoda M, Kubota H (1985a) Effect of seeding during thermophilic composting of sewage sludge. *Appl Environ Microbiol* 49: 724-726.
- Nakasaki K, Watanabe A, Kitano M, Kubota H (1992) Effect of seeding on thermophilic composting of tofu refuse. *J Environ Qual* 21: 715-719.
- 中崎清彦, 渡辺淳, 片岡稔, 久保田宏 (1993) コンポスト化における種菌の繰り返し使用の効果. *用水と廃水* 35: 32-37.
- Nakasaki K, Yaguchi H, Sasaki Y, Kubota H (1933) Effects of pH control on composting of garbage. *Waste Manage Res* 11: 117-125.
- Nakasaki K, Hiraoka S, Nagata H (1998) A new operation for producing disease-suppressive compost from grass clippings. *Appl Environ Microbiol* 64: 4015-4020.
- Nakasaki K, Suzuki N (2008) Method for producing functional compost, functional compost and compost for proliferation of filamentous fungi. WO2008149846.
- Nakasaki K, Ohtaki A, Takemoto M, Fujiwara S (2011) Production of well-matured compost from night-soil sludge by an extremely short period of thermophilic composting *Waste Manage* 31:495-501
- Nakasaki K, Araya S, Mimoto H (2013) Inoculation of *Pichia kudriavzevii* RB1 degrades the organic acids present in raw compost material and accelerates composting. *Bioresour Technol* 144: 521-528.
- Nakasaki K, Mimoto H, Tran QNM, Oinuma A (2015) Composting of food waste subjected to hydrothermal pretreatment and inoculated with *Paecilomyces* sp. FA13. *Bioresour Technol* 180: 40-46.
- Nakasaki K, Hirai H (2017) Temperature control strategy to enhance the activity of yeast inoculated into compost raw material for accelerated composting. *Waste Manage* 65: 29-36.
- Ohtaki A, Akakura N, Nakasaki K (1998) Effects of temperature and inoculum on the degradability of poly- ϵ -caprolactone during composting. *Polym Degrad Stab* 62: 279-284.
- Rajbanshi SS, Endo H, Sakamoto K, Inubushi K (1998) Stabilization of chemical and biochemical characteristics of grass straw and leaf mix during in-vessel composting with and without seeding material. *Soil Sci Plant Nutri* 44: 485-495.
- Rashad FM, Saleh WD, Moselhy MA (2010) Bioconversion of rice straw and certain agro-industrial wastes to amendments for organic farming systems: 1. Composting, quality, stability and maturity indices. *Bioresour Technol* 101: 5952-5960.

- Shin H-S, Hwang E-J, Park B-S, Sakai T (1999) The effects of seed inoculation on the rate of garbage composting. *Environ Technol* 20: 293-300.
- Tang J, Wang M, Zhou Q, Nagata S (2011) Improved composting of *Undaria pinnatifida* seaweed by inoculation with *Halomonas* and *Gracilibacillus* sp. isolated from marine environments. *Bioresour Technol* 102: 2925-2930.
- Wang Y, Tang Y, Yuan Z (2022) Improving food waste composting efficiency with mature compost addition. *Bioresour Technol* 349: 126830.
- Wu D, Wei Z, Qu F, Ahmed T, Zhu L, Zhao Y, Jia L (2020) Effect of Fenton pretreatment combined with bacteria inoculation on humic substances formation during lignocellulosic biomass composting derived from rice straw. *Bioresour Technol* 303: 122849.
- Xi B, Zhang G, Liu H (2005) Process kinetics of inoculation composting of municipal solid waste. *J. Hazard Mater* 124: 165-172.
- Xu J, Jiang Z, Li M, Li Q (2019) A compost-derived thermophilic microbial consortium enhances the humification process and alters the microbial diversity during composting. *J Environ Manag* 243: 240-249.
- Zhang Y, Zhao Y, Chen Y, Lu Q, Li M, Wang X, Wei Y, Xie X, Wei Z (2016) A regulating method for reducing nitrogen loss based on enriched ammonia-oxidizing bacteria during composting. *Bioresour Technol* 221: 276-283.
- Zhao Y, Zhao Y, Zhang Z, Wei Y, Wang H, Lu Q, Li Y, Wei Z (2017) Effect of thermo-tolerant actinomycetes inoculation on cellulose degradation and the formation of humic substances during composting. *Waste Manag* 68: 64-73.
- Zhou C, Liu Z, Huang Z-L, Dong M, Yu X-L, Ning P (2015) A new strategy for co-composting dairy manure with rice straw: Addition of different inocula at three stages of composting. *Waste Manage* 40: 38-43.
- Zhu N, Zhu Y, Kan Z, Li B, Cao Y, Jin H (2021) Effects of two-stage microbial inoculation on organic carbon turnover and fungal community succession during co-composting of cattle manure and rice straw. *Bioresour Technol* 341: 125842.