

植被別 非共生性 好氣性 窒素固定細菌의 變動에 關하여

李 泰 雨 · 沈 載 國

(淸州師範大學 生物教育科)

Studies on the fluctuation of aerobic free-living nitrogen fixation
bacteria in soil beneath the plant covers

RHEE, Tai-Woo and Jae-Kuk SHIM

(Cheongju College of Education)

ABSTRACT

The numbers of aerobic free-living nitrogen fixation bacteria and factors in soil at different stands covered with *Pinus rigida*, *Quercus acutissima* and *Zoysia japonica* in Cheongju area were investigated from Feb. to Sept. 1981.

1. The numbers of N_2 -fixation bacteria, according to the seasonal changes, increased gradually from winter to spring and summer. But the growth pattern revealed some differences in accordance with plant cover stands: the numbers increased abruptly in May at Pinus, May-June at Quercus and Apr. May at Zoysia stand. The pick of numbers represented in Aug.-Sept. at Pinus, Jul.-Aug. at Quercus and May-Jun. at Zoysia stand, respectively.
2. The interrelationship between the monthly changes of environmental factors and numbers of N_2 -fixation bacteria at different stands, mainly depends upon the soil temperature than other soil factors ($r=0.71-0.84$). The numbers of N_2 -fixation bacteria may increase 5~7 times according to increase $10^\circ C$ of soil temperature, and optimal range was $20\sim 30^\circ C$ for growth. Equation of the interrelation between soil temperature and numbers could be stated as follows: $\log y=ax+b$.
3. In the case of high soil temperature, the bacterial numbers presented high level in drought periods. Therefore, the N_2 -fixation bacterial species in these soil seem to consist of resistant to desiccation.
4. The influence of soil organic matter for growth of N_2 -fixation bacteria indicated low correlation. The reason may be seen the content of organic matter in these soil existed abundantly above the quantities of limitation for growth.
5. In artificial gradients, the N_2 -fixation bacteria were predominated at $20\sim 30^\circ C$ same as natural condition, $pH7\sim 8$, and $20\sim 30\%$ of soil water contents.
6. The vertical distribution of bacteria marked decreasing trends from surface to lower layers, and the decreasing degree was shown well in Zoysia, Quercus and Pinus stand in order. But in the trees, the numbers increased at 30cm layer estimated the region of root than 20cm layer.

7. Both catalase negative and positive group of N_2 -fixation bacteria in soil increased according to the rise of the soil temperature. Catalase positive group was revealed as dominant group in winter, and catalase negative group revealed in summer. The change of dominant pattern was shown during Feb. to Apr.

緒 論

非共生性 窒素固定菌의 存在는 1893年 Winoogradsky 에 의해 혐기성균인 *Clostridium pasteurianum* 이 分離된 것을 효시로하여 Beijerinck (1901)에 의해 호기성균인 *Azotobacter chroococcum* 과 *A. agilis* 가 分離되었고, 그 후 많은 研究者들에 의해 *Azotobacter* 屬 以外에도 腸內細菌群, *Bacillus* 屬, 光合成細菌群, blue-green algae 等の 많은 prokaryotes 들이 非共生的으로 공증질소를 고정하는 것으로 밝혀졌다(1, 6). 또 이들 菌種은 水圈과 地圈에 걸쳐 널리 分布하는데, 서식지별로는 blue-green algae 等과 몇가지 진정세균류만이 주로 水圈에 서식하며 대부분의 진정세균류는 土壤中에 서식하면서 토양의 비옥도를 높여주는 것으로 알려져 있다(6, 7).

이러한 질소고정균의 作用에 의해서 고정되는 질소는 各生態系에서 1次生産力을 制限하는 重要한 要因으로 作用하게 되는데, Hubbard brook 의 森林生態系를 조사한 Likens 等(1977)에 의하면, 年中을 通해 input 되는 질소의 양은 20.7 kg/ha 이고, output 되는 양은 4.0kg/ha, 로서 net gain 이 +16.7 kg/ha 에 達한다고 보고하였으며, 그리고 이러한 축적의 대부분은 土壤微生物에 의해서 많은 영향을 받았을 것으로 지적하고 있다. 또 Bormann 等(1977)의 조사에 따르면 사탕단풍, 미국너도밤나무 등의 낙엽활엽수림에서는 14.2 kg/ha/yr 가 net fixation of nitrogen 에 의해 유래된다고 하였다.

한편 free-living nitrogen fixation bacteria 는 무기태 질소화합물이 비교적 적고 또 에너지 원으로서 有機炭素源이 充分하여야 잘 成長하므로 그들의 성장과 固定되는 질소의 量은 이러한 토양조건에 따라서 差異가 클 것이다. 그러나 실제 자연환경조건하의 토양에는 이들 菌群의 生育을 저해할만큼 무기태 질소가 다량 축적되는

것은 생각할 수 없으며 또 특수한 경우를 제외하고는 유기물의 함량도 全無한 상태는 없으므로 실제 이들 菌群의 成長이나 分布 等은 이들 조건 이외에도 토양함수량, soil atmosphere, 온도, pH 等の 環境條件에 의해서 많은 영향을 받게 된다. 그러므로 菌量은 이들 環境要因의 seasonal rhythm 에 對하여 seasonal pattern 을 갖게되며, 특히 季節變動에 對하여는 氣候要因이 一般的으로 重要하게 作用한다고 알려져 있다 (9).

土壤內 질소고정균의 分布와 變動에 關한 研究는 高井(1972)와 石澤 等(1973)의 研究와 國內에서도 일부 조사된 바 있다. 本研究는 韓半島의 中部인 忠北 淸州地方에서 *Pinus rigida*, *Quercus acutissima*, *Zoysia japonica* 의 植被下 土壤中の 非共生性 好氣性 窒素固定菌群과 土壤要因의 年中變動을 調査하여 그 關係를 比較 檢討하였다.

材料 및 方法

1. 調査地所의 選定과 調査期間

土壤中の 비공생성 호기성 질소고정균群의 月變動을 調査하기 爲하여 1981年 2月부터 9월까지 忠北 淸州市 九龍峯 一帶의 *Pinus rigida*, *Quercus acutissima* 林, *Zoysia japonica* 草地에서 每月 土壤을 採取하여 菌量과 土壤의 物理, 化學的 性質을 測定하였다.

2. 土壤의 採取와 土壤要因의 測定

(1) 土壤의 採取

調査地所 모두가 사람의 영향을 많이 받는 곳이어서 litter 層이나 humus 層의 發達이 微弱하였으므로 土壤層位에 關係없이 litter 와 humus 層을 除外시킨 맨 위의 層을 表土로 하고, 그곳으로부터 10 cm 깊이마다 30 cm 까지의 토양을 採取하였다. 채취된 토양은 비닐봉지에 넣어 밀폐한 後 곧 실험실로 운반하여 菌量 및 토

양함수량의 측정을 위하여 사용하였고, 나머지는 風乾시켜 토양의 其他 要因 測定에 使用하였다.

(2) 土壤要因의 測定

토양 온도는 每 土壤採取時 12:00~14:00時 사이에 各 깊이별로 직접 측정하였고, 토양함수량은 채취직후의 토양을 85°C dry oven에서 含水量이 없을 때까지 건조시킨후 生量에 對한 含水量의 百分率로 表示하였다. 토양유기물함량은 風乾토양을 85°C dry oven에서 완전히 건조시킨 다음 400~600°C의 전기로에서 灼熱소실시켜 含水量을 百分率로 表示하였고, 토양 pH는 風乾토 1:중류수 5의 비율로 하여 浸탕후 electric pH meter(Corning, Model 7)로 測定하였다.

3. 菌數의 測定

採取直後의 土壤 1g을 生理食鹽水(0.5% NaCl) 9 ml에 희석하는 方法으로 적당농도까지 희석하여 重層平板培養法에 依한 single colony method로 菌數를 算定하였으며, 菌의 培養은 무질소배지(glucose 1g, KH₂PO₄ 0.1g, MgSO₄·7H₂O 0.02g, CaCO₃ 0.1g, NaCl 0.02g, Na₂MO₄·2H₂O 0.0005g, agar 1.5g, D.W. 100ml, pH 7)에서 실시하였다(15). 接種後 25~27°C incubator에서 4~7日間 배양후 colony를 count하였으며, 3% H₂O₂를 使用하여 各 colony의 catalase reaction test를 실시하였다.

結果 및 考察

1. 土壤要因의 變動

토양 pH는 토양온도가 증가하는 夏季로 移行함에 따라서 점차 낮아지는 경향을 나타냈으며, 리기다소나무林과 잔디下 토양에서는 pH 4.6~6.2, pH 5.0~6.4의 範圍에서 變動하였고, 토심별 차이는 뚜렷하지 않았으나 상수리나무林下 토양에서는 pH 4.6~5.8범위에서 토심이 깊어질수록 pH 값은 낮아지는 경향을 보였다.

토양함수량은 全 調査地所에서 2,3月の 表土에서 가장 높은 값(30.7~40.7%)을 나타냈는데, 이는 積雪이나 凍結로 因해 수분이 누적된 때문으로 思料되며, 5月을 前後하여 가장 낮은 값(7.3~8.1%)을 나타냈다. 토양유기물함량은 모든 地所에서 表土가 가장 높았으며, 年中 變動幅은 잔디下에서 3.9~4.9%, 리기다소나무林下에서는 5.5~8.7%, 상수리나무林 下에서는 4.3~11.8% 범위에서 各 各 變動하였으며, 그 差異는 落葉이 지는 時期나 量, 落枝의 分解速度와도 關係가 있는 것으로 思料된다.

토양온도는 全 地所 모두 7月の 表土에서 最高(리기다소나무林下 28.5°C, 상수리나무林下 28.0°C, 잔디下 35.5°C)에 達했으며, 3月 以後에는 깊이별로 정한 구배를 나타냈다.

2. 菌數의 年中變動

토양중의 好氣性 非共生性 窒素固定菌의 數는

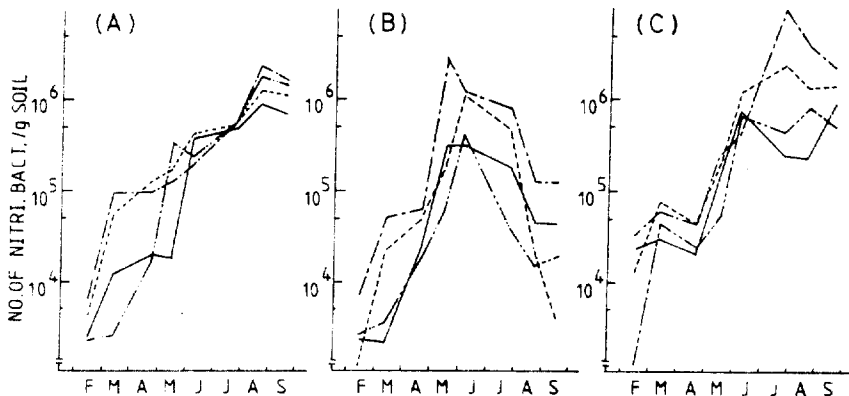


Fig. 1. Monthly changes in the number of aerobic free-living nitrogen fixation bacteria in soil beehath the different plant covers and depth. (A: *Pinus rigida* stand, B: *Zoysia japonica* stand, C: *Quercus acutissima* stand. ---: surface,: -10cm, - -: -20cm, - · - ·: -30cm)

겨울에서 夏季로 감에 따라 增加하는 一般의 傾向을 나타냈으나 春季에 菌量이 增加하는 傾向이나 菌數가 最高에 이르는 時期는 植被에 따라서 差異를 보였다(Fig. 1) 年中을 通해 가장 급격히 菌量이 增加하는 時期는 리기다소나무林 下에서 3~5월에, 상수리나무林 下에서 5~6월에, 잔디下에서는 4~5월이었다. 또 最大菌量을 나타내는 時期는 리기다소나무林 下에서 8~9월에, 상수리나무林 下에서 7~8월에, 잔디 下에서는 5~6월에 各各 最高水準을 나타냈다. 特別히 잔디 下에서는 他 植被下의 菌量이 pick를 이루는 7,8월에 오히려 甚한 감소를 나타냈는데 이는 잔디의 키가 작기 때문에 夏季의 強한 복사에너지를 完충시켜 줄 充分한 공간을 갖지 못한 때문으로 思料된다. 이와 같이 植被別로 菌量變動 pattern의 差異가 나타나는 것은 植被을 이루는 植物의 生活形에 따른 차이 때문인데 즉 木本과 草本, 落葉樹와 常綠樹 또는 침엽수와 활엽수에 따른 植物의 키나 잎의 밀도 등의 植被別 差異가 土壤內 菌量變動 pattern에 影響을 주는 때문으로 생각된다.

3. 菌量變動과土壤要因과의 關係

토양중의 微生物은 環境要因에 對하여 各各의 optimal range를 갖기 때문에 그들의 分布와 活性, 群의 크기 등은 환경요인에 따라 決定되며 變動하게 될 것이다(1).

各 調査地所의 토양요인과 菌量變動과의 關係를 相關係數로 나타내면 Table 1과 같다.

年中 變動하는 菌量과 가장 큰 상관을 나타낸 要인은 토양온도로서 모두 1% 水準에서 유의성을 나타냈다.

토양에 대해서는 모두 陰의 相關을 나타냈는데 이는 夏季로 감에 따라 各 調査地所의 菌量이 증가함에도 불구하고 토양 pH는 점차 낮아지는 傾向을 보였기 때문이다. 그러나 토양 pH는 soil

minerals들의 化學的 性質과 降雨에 따른 leaching이나 adsorption의 差異, 그리고 extracellular enzyme 등에 依해서도 變化될 수 있는 要인이기 때문에 서식하고 있는 生物에 wide ranging effect를 나타내므로 토양 pH에 對한 菌量變動 pattern은 상관계수 이상의 매우 복잡한 影響을 받을 것으로 思料된다.

土壤含水量과의 關係에서도 陰의 相關으로 나타났는데 이는 積雪이나 凍結로 因해 含水量이 높은 冬季에 菌量이 적었기 때문이며 菌量이 급격히 증가하는 春夏季에는 토양수분의 不足이 초래되는 경우가 있기 때문으로 思料된다. 그러나 토양내의 질대수분량이 부족함에도 불구하고 상당량의 호기성 질소고정세균의 양을 유지하는 것은 resistant structure를 형성하여 오랜 기간 水分不足에 對한 내성을 갖는 菌種이 상당량 分布하고 있음의 의미하는 것이라고 하겠다. 降雨에 따른 토양함수량의 증가는 토양의 物理的 性質에 따라 다르지만 全體菌量에 對하여 미치는 影響은 일시적으로 soil atmosphere의 量을 變化시키므로 단순한 함수량 以上の 重要한 要인 으로 될 수 있다고 하겠다.

공중질소고정균의 生育에는 반드시 에너지원으로서 유기물, 특히 糖을 要求하므로 토양유기물함량은 菌量決定에 절대적인 制限要因이 되며 특히 菌量은 呼吸할 수 있는 가용한 유기물로의 decomposition index에 따라 큰 影響을 받는다. 그런데 本 調査地所에서의 유기물함량과 菌量과의 相關係數는 各各 0.01~0.33으로 낮은 相關을 나타내고 있다. 이는 토양내의 유기물함량이 공중질소고정균의 分布를 制限하지 않을 만큼 充分한 범위내에서 年中 變動하고 있기 때문으로 思料된다.

全 地所를 통합하여 溫度要因이 菌量分布에 미치는 影響을 조사하였다. 온도요인에 대한 토양

Table 1. Correlation coefficient between the number of aerobic free-living nitrogen fixation bacteria and soil factor beneath the different plant covers.

Strands(covered plant)	pH	Water content	Organic matter content	Soil temperature
<i>Pinus rigida</i>	-0.12	-0.33	0.33	0.88**
<i>Quercus acutissima</i>	-0.46**	-0.54**	0.01	0.71**
<i>Zoysia japonica</i>	-0.55**	-0.74**	0.11	0.79**

** : 1% significant

함수량과 유기물함량 각각의 상관에 따른 菌量의 分布를 보면 (Fig. 2) 비공생 호기성 질소고정균량의 年中變動은 토양온도에 의하여 절대적

토양효소의 완성도 급격히 저하되는 것(未發表)으로 보아 유기물함량이 4% 이하에서는 菌量이 制限받을 수 있었다.

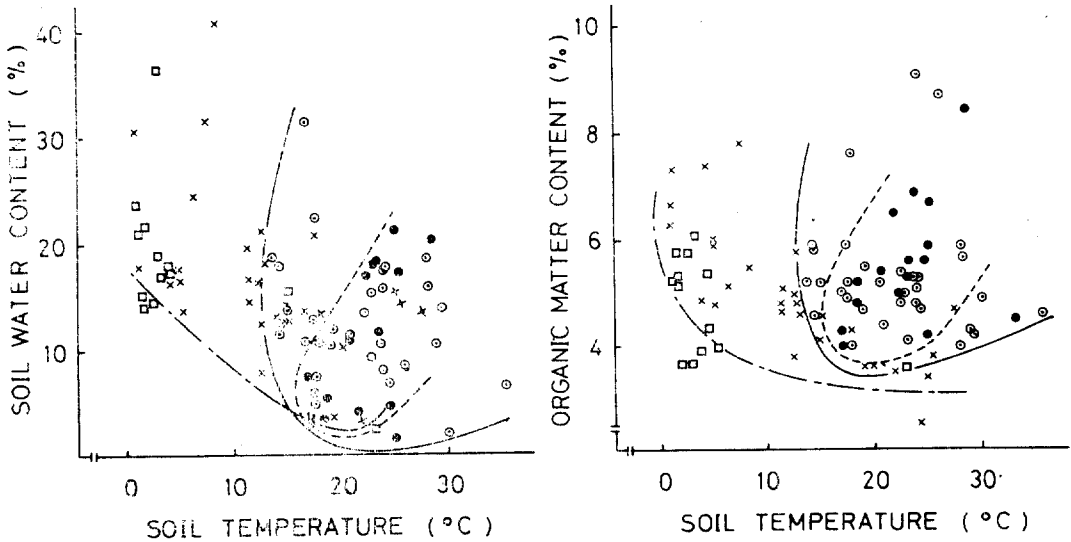


Fig. 2. Distribution of the total numbers of aerobic free-living nitrogen fixation bacteria in all investigated stands covered with *Pinus rigida*, *Quercus acutissima* and *Zoysia japonica* (●: 10⁶, ○: 10⁵~10⁶, ×: 10⁵~10⁴, □: 10⁴)

인 영향을 받으며 토양함수량이나 유기물함량의 영향은 매우 낮은 것으로 나타났다. 이는 진술한 바와 같이 年中 이 두 要因의 變動이 균량에 制限을 줄 만큼 큰 범위에서 변동하지 않음을 의미하는 것이라고 하겠다. 그러나 유기물함량이 약 4% 이하에서는 菌량이 급격히 감소하였고,

그러므로 年中 菌量變動에 關한 限 토양온도가 第1의 制限要因으로 作用하는 것으로 판단되며, 토양온도에 따른 菌量의 變動은 Fig. 3과 같이 비례적인 관계를 나타내므로 토양온도 x에 대한 비공생성 호기성 질소고정균수 y의 관계는 $\log y = ax + b$ 로 表示된다. 여기에서 a는 植

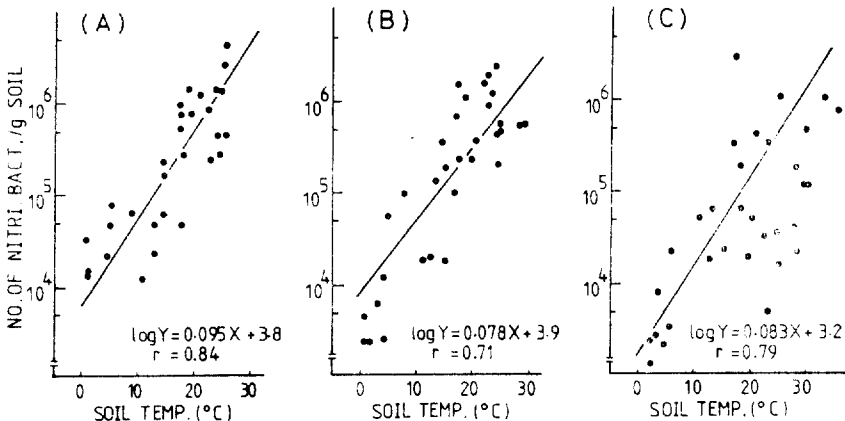


Fig. 3. Interrelationship between the number of free-living nitrogen fixation bacteria and soil temperature beneath the different plant covers. (A: *Pinus rigida* stand, B: *Quercus acutissima* stand, C: *Zoysia japonica* stand)

被에 따르는 常數이며, b는 各植被下 토양에서의 최저균량으로 생각할 수 있다.

그러므로 本 調査에 따르면 우리나라 中部地方의 리기다소나무林, 상수리나무林, 잔디下 토양에서의 호기성 비공생성 질소고정균數는 지온 10°C 상승에 따라 약 5~7배 증가하는 것으로 나타났으며, 균량이 가장 많이 分布한 온도는 20~30°C 範圍였다. 그러나 이와 같은 현상은 赤道附近이나 極地方에서는 本 調査와는 相異할 것으로 豫見된다.

4. 人爲的 環境勾配에 따른 菌量의 變動

前述한 바와 같이 韓國中部地方의 自然環境條件下에서는 실제로 菌量에 制限을 줄 정도로 年中의 環境要因이 크게 變化하는 경우가 적다. 그러나 여러 環境要因의 相互作用에 따라 菌量이 결정되므로 自然狀態下에서는 單一要因의 구

實驗은 單一菌種에 對한 調査가 아니므로 各 菌種의 好適範圍가 overlapping 되었다는 것을 豫見할 수 있으나 토양내 非共生性 好氣性 窒素固定菌群 全體의 單一環境勾配에 對한 反應으로서 本 實驗은 重要할 것으로 思料된다.

5. 菌量의 垂直分布

토양의 수직적 조건에 따른 環境要因의 變化는 온도, 수분, 등에도 차이가 있으나 가장 현저한 것은 soil atmosphere로서 O₂의 감소와 CO₂나 ethylene 등의 대사산물의 축적 등에 따른 물리적 성질에 큰 차이를 나타낸다.

토양내에 서식하는 호기성균의 分布는 깊이에 따른 물리적 環境要因의 구배에 의하여 그 分布가 달라지게 되는데 일반적으로 깊이가 증가함에 따라 菌量은 감소하는 傾向을 보이거나 菌種에 따라서는 반대현상도 종종 나타난다고 한다(9, 12, 14)

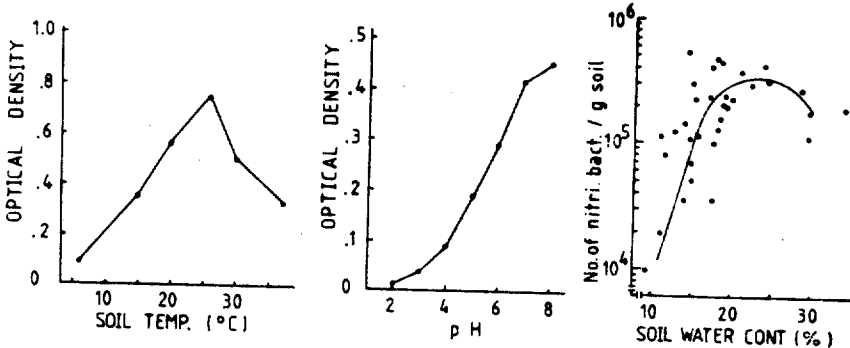


Fig. 4. Growth responses of aerobic free-living nitrogen fixation bacteria in artificial environmental gradient.

배에 대한 菌량변동을 알기 어렵다. 그래서 pH와 온도조건이 각기 다른 무질소 배지에 토양을 접종시킨 후 菌량을 비교해 본 결과 pH7~8, 온도 20~30°C에서 成長이 가장 왕성하였으며, Fig. 2에서 20~30°C일 때 菌량이 가장 많았던 결과와 一致하였다. 또 table 1에서는 pH와 菌량의 關係가 全 地所에서 陰의 상관을 나타냈으나 인위적 環境조건에서는 pH 7~8에서 成長이 가장 좋았으며, 陽의 關係를 나타내었다.

또 9월에 비온지 2~3일 후의 토양을 채취(수분함량 약 35%)하여 25°C incubator에서 건조시키면서 菌량을 조사한 결과 토양함수량이 20~30%일 때 가장 많은 菌數를 나타냈으며 以後 含水량이 줄면서 菌數도 감소하였다. 물론 本

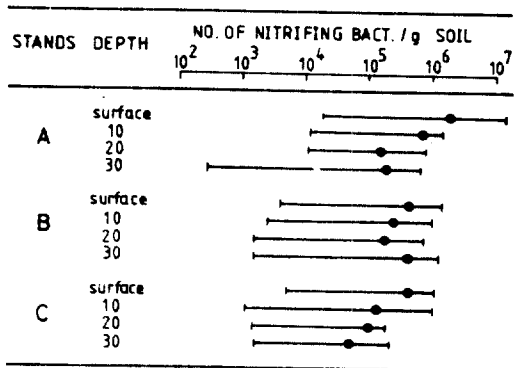


Fig. 5. Vertical distribution of aerobic free-living nitrogen fixation bacteria in soil beneath the different plant covers. (A: *Pinus rigida* stand, B: *Quercus acutissima* stand, C: *Zoysia japonica* stand)

本調査에서 各 植被下 토양층의 깊이 별 年中 비공생성 호기성 질소고정균량의 변동폭과 그 평균값의 分布는 Fig. 5와 같다. 菌량은 깊이에 따라서 점차 감소하는 경향을 나타냈으나 상수리 나무林과 리기다소나무林 下에서는 토양의 유기물함량이나 기타 物理的 環境要因이 불리했음에도 불구하고 20cm 층에서 보다 30cm 층에서 菌량이 오히려 增加하였다, 그 이유는 뚜렷하지 않으나 이층이 잔뿌리의 分布域으로 생각되며, 樹木의 뿌리로부터 유리되거나 分泌되는 어떤 respirable substrate의 增加때문으로 추측된다.

6. Catalase 陰性菌과 陽性菌의 變動

리기다소나무林과 상수리나무林 및 잔디下 土양에서 catalase 陰性和 陽性的 非共生性 窒素固定菌群의 年中 構成比率는 Fig. 6과 같다, 모든 植被에서 catalase 陰性和 陽性群의 菌량은 夏季로 移行되면서 溫度가 上昇함에 따라 모두 增加되었다, 그러나 陰性群과 陽性群의 構成比는 冬季에는 陽性群이 그리고 夏季에는 陰性群이 優點群으로 나타나는데 이는 陰性菌群이 陽性菌群보다 溫度上昇에 대한 增加速度가 훨씬 빠른 때문이다. 即 2月에는 陽性菌群의 數가 많으나 以後에는 陰性菌群이 相對的으로 빨리 增加하는 때문에 4月을 起點으로 夏季에는 陰性群이 優세하나 온도가 適溫以下로 下降함에 따라 菌량이 빨리 減少하기 때문에 冬季에는 相對的으로 陽性群이 優세한 것이다. 이와같이 온도가 높은

시기에 陰性菌群의 量이 많으므로 年中을 通한 窒素의 固定作用은 catalase 陰性菌群에 의한 役割이 더 큰 것으로 思料된다.

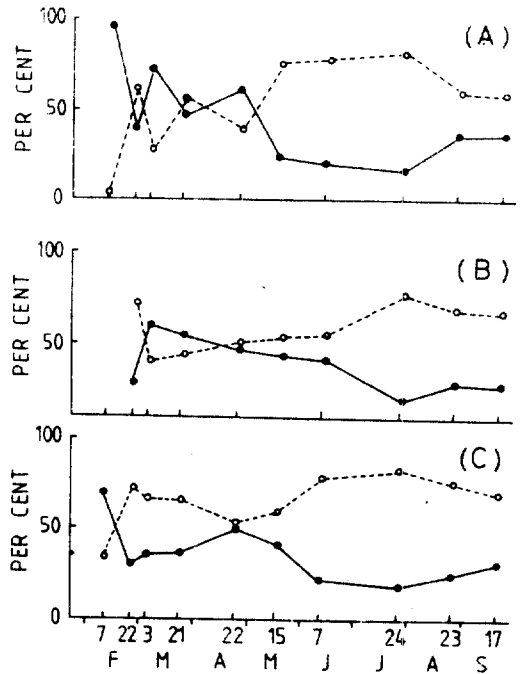


Fig. 6. Changes in composition ratio of catalase negative and positive groups of aerobic free-living nitrogen fixation bacteria at the different stands. (A: *Pinus rigida* stand, B: *Quercus acutissima* stand, C: *Zoysia japonica* stand. —: catalase positive group, ---: catalase negative group)

摘 要

植被型에 따른 非共生性 好氣性 窒素固定菌의 年變動을 알아보기 위하여 1981年 2月부터 9月까지 忠北 清州市 九龍峰 一帶의 *Pinus rigida* 林과 *Quercus acutissima* 林 및 *Zoysia japonica* 草地下 土壤內의 菌量과 土壤要因을 調査하였다.

1. 窒素固定菌의 量은 冬季에서 夏季로 移行되면서 점차 增加하였으나 增加하는 pattern은 植被型에 따라 差異가 있었다. 年中 가장 급격히 菌량이 增加한 時期는 리기다소나무林과 상수리나무林에서는 각각 5月과 5~6月이었는데 잔디下에서는 4~5月이었고, 또 最大菌量을 나타낸 時期는 各各 8~9月과 7~8月 및 5~6月로 植被에 따라 差異가 있었다.

2. 年中 土壤環境要因의 變化에 따른 菌량의 變動은 溫度要因과 큰 相關을 나타냈으나 (r=0.71~0.84) 기타 要因들의 影響은 비교적 낮았다. 溫度가 10°C 增加하는데 對해 菌량은 5~7倍 增加하였고, 20~30°C 域에서 最大菌量을 나타냈으며, 菌量(log y)과 溫度(x)間에는 log y=ax+b의 關係式이 성립하였다.

3. 土壤含水量이 매우 낮은 時期에도 溫度가 높으면 多量의 菌이 존재하는 것으로 미루어 本調査地所의 질소고정균은 대부분 耐乾性이 강한 菌種으로 構成된 것으로 思料된다.

4. 菌량의 變動과 土壤有機物含量間에는 매우 낮은 相關을 나타냈는데, 이는 調査地 土壤內의 有機物含量이 질

소고정균의 生育限界量 以上으로 充分하였기 때문으로 思料된다.

5. 人爲的 環境勾配 實驗에서 最適溫度域은 20~30°C 로서 自然狀態와 같았으며, pH 7~8, 含水量 20~30%에서 成長이 좋았다.

6. 垂直分布는 土深이 깊어질 수록 菌量은 減少하였으나, 年平均量의 경우, 林木下에서는 30cm 層에서 20cm 層 보다 菌量이 많았다.

7. 年中 catalase 陰性과 陽性인 窒素固定菌群의 菌量은 土壤溫度가 上昇함에 따라서 모두 增加하였다. 그러나 冬季에는 陽性群이 그리고 夏季에는 陰性群이 優點群으로 나타났으며, 2~4月 사이에 두 群間의 優點度가 바뀌었다.

引用 文 獻

1. Atlas, R.M. and R. Bartha(1981), Microbial ecology, fundamentals and applications. Addison-Wesley Publishing Co.
2. Baubiuk, L.A. and E.A. Paul(1970), *Canad. J. Microbiol.*, **16**, 57.
3. Bormann, F. H., G.E. Likens and J. Melillo(1977), Nitrogen budget for an aggrading northern hardwood forest ecosystem. submitted to Science.
4. Campbell, R. (1977), Microbial ecology, basic microbiology Vol.5. Blackwell Scientific Publications.
5. Likens, G.E. et al.(1977), Biogeochemistry of a forested ecosystem. Springer-Verlag.
6. Lynch, J.M. and N.J. Poole(1979), Microbial Ecology, a conceptual approach. Blackwell Scientific publication.
7. Mishustin E.N. and V.T. Yemstev(1975), Anaerobic nitrogen-fixing bacteria of different soil types, in Nitrogen fixation by free-living microorganisms, edited by W.D.P. Stewart. I.B.P. 6 Cambridge Univ. Press. p.29~38.
8. Sivester W.B. (1978), Nitrogen Fixation and Mineralization in Kauri(*Agathis anstralis*), in Microbial Ecology Edited by M.W. Loutit and J.A.R. Miles p.138~143. Springer-Verlag
9. Sprent, J.I. (1979), The biology of nitrogen-fixing organisms. McGraw-Hill Book Co.
10. Suzuki T.I. Tanabe and M. Araragi(1970), Proc. 2nd symp. Nitrogen Fixation and Nitrogen cycle, editid by H. Takahashi p.41~49.
11. Winogradsky, S.(1925), *Ann. Inst. Pasteur*, **39**, 299.
12. 石澤修一, 鈴木達彦, (1973), 土壤微生物의 生態, 共立出版社, p. 80~94.
13. 近藤熙, 高井康雄(1972), 土壤學會講演要旨, 18集, 34.
14. 李泰雨, (1982), 雲峰 李址烈博士 華甲記念論文集, p. 129~133.
15. 鈴木達彦(1975), 土壤微生物實驗法, 養賢堂.