

最近の西欧における土壌構造と作物生産に関する研究

久保田 徹*

1964年の11カ月間、英国ロザムステッド試験場に留学する機会に恵まれた。留学のテーマは「飼料作物栽培と土壌の理化学性」というもので、化学部に席を置きG.W. Cooke 部長の指導を仰いだ。当時、筆者は農林省四国農試において稲-牧草輪換栽培の技術体系の研究に従事し、主にイタリアンライグラスの肥培管理があと作水稲に及ぼす影響を調べていたが、Agronomist の立場から牧草栽培土壌の特性や牧草による土壌物理性改良が生産力に果たす役割について明らかにしたかった。

留学中の知見、研究結果、西欧の研究所見学时に得た見聞などから標題のものをまとめた。ここでいう土壌構造は Pedologist の用いる形態学的用語ではなく edaphologist や一部の土壌物理学者の用いるそれで土壌構造の生産力的機能を中心としたものである。なお、7年前の知見は陳腐であるかも知れないが、この点は御容謝頂きたいと思う。

1. ロザムステッド物理部について

始めにロザムステッド物理部について簡単に紹介します。

物理部の創設は1913年で、B. A. Keen の土壌水の研究から始まった。土壌水の研究はその後の主要な研究の柱となり引き継がれ発展した。世界に研究の威容を誇るに至ったのは1920年代と思われる。この頃、W. B. Haines の土壌水の状態と移動の研究、凝集力理論、Keen 等の耕耘の研究、E. M. Crowther, A. N. Puri 等の土壌の膠質学的研究などの土壌物理の古典的研究が陸続と発表された。当時の J. agric. Sci. Camb. vol 25 (1925) を見ると全45論文中実に16篇がこの物理部の仕事である。Haines は従来の土壌孔隙毛管仮説から新しくセル説を提唱し現在の土壌孔隙の概念を打ち出した。後にH. L. PenmanはHainesのセル理論を基にして土壌通気、蒸発の機構の解明を行った。また、長期の圃場耕耘実験の結果は、毛管説で考えられるほど耕耘は土壌水分に影響を及ぼさなかったと記されている。Keen 等は圃場の水の動き、

透水、蒸発散の測定を開始したが、この蓄積が後の農業気象学の礎を創っているように思われる。

1930年代に R. K. Schofield が pF 理論を発表し土壌水の熱力学的把え方を定着させると同時に灌漑の実際の指標に大きな役割を果たした。当時のロザムステッド年報では彼はコロイド物理学者として記されており物理部の研究領域の幅の広さがうかがえる。Schofield の研究の多彩さは改めて述べる迄もないが、土壌物理の研究に粘土の荷電の究明が不可欠であるとして、後に同型置換荷電の他に解離型荷電の存在を明らかに粘土科学に貢献した。この頃、E. W. Russel の粒団生成機構の理論が発表された。

1940年代から Penman を中心に土壌水蒸発の機構や灌漑の研究が精力的に行なわれ土壌物理から農業気象の性格が強まって来る。そして現在は Penman を部長とし御気象学の J. L. Monteith, ガス拡散の J. A. Currie から数名の研究者が活躍中である。

ロザムステッドの研究の源は実験圃場にあるといわれている。有名なクラシカル・エクスペリメント圃場はもとより土壌や耕作管理経歴の異なる膨大な圃場を有し、常に新しい研究材料を提供して来た。緑豊かな広大な実験圃場に立つと農業研究に従事する喜びをしばしば感じる事があった。

2. 牧草による土壌物理性改良と生産力

牧草あと地は畑作物あと地よりも多収性であると一般にいわれている。英国では19世紀始めから、例えば Norfolk 型輪換で知られるように畑作物輪作中に1~3年の牧草栽培(これを ley という)が割込むようになり、病害、雑草の回避や土壌肥沃度の維持に効果が認められて来た。そして第2次大戦中の食糧難時代に古い草地を耕作したが、この頃から ley の土壌改良効果が特に注目されだしたといわれている¹⁾。

ley が団粒形成、孔隙性、保水性、透水性等に及ぼす効果については Troughton の著書²⁾に詳しいのでここでは述べないが、ley あと地の多収性に対して物理性の改良効果はどの程度寄与しているであろうか。

* 農業技術研究所

英国ではロザムステッドやハーレー草地研究所で ley の試験が古くから行なわれ、作物の多収性が認められているが、これらの報告⁸⁾⁴⁾⁵⁾によると、ley は易耕性や発芽をよくすることはあっても物理性改良が增收をもたらすことはほとんどなく、增收の原因は窒素地力の増大にある。Clement³⁾ (1931) は ley 圃場試験成績の重回帰分析から增收要因を解析したが、ley あと地の麦の增收は地力窒素の有利な利き方によって団粒形成とは全く相関がないと報告している。このように物理性改良の增收効果は否定的である。ちなみに諸外国では、例えば Van Bavel ら⁶⁾ はマーシャル微砂質壤土の傾斜地で ley あと地の耐水性団粒量ととうもろこし収量の相関を認めしたが、Mchenry ら⁷⁾ はチェルノーゼム微砂質壤土で ley の団粒化や孔隙変化ととうもろこし収量の関連を必ずしも見出せなかった。

筆者は ley の物理性の効果を抽出すべく設計された試験を探したが英国では次例しかなかった。ICI・ジェロットヒル研究所の Low¹⁾ (1963) は砂壤土で施肥を過剰量迄順次増進することにより化学性を消去し燕麦を栽培した。ley あと地では施肥窒素の利用率がよく、畑作土壌では達し得ない增收を得て物理性の効果を示唆している。後に、フランス・ベルサイユ農業研究センターの Trocmé 栽培部長から同部で蔬菜について Low と同様の多肥多収性になる結果を得たと話に同った。

1964年夏、ハーレー研究所で草地に関するハーレー・ワグニンゲン共同シンポジウムが開かれ、その中で ley の多収性がとり上げられた⁹⁾。オランダでは草地は概して重粘質土壌の永久草地であるが近年 ley 方式の研究が行われている。Grotenhuis, Harmsen らによって、オランダの新しい干拓土壌(砂質土壌)で ley あと地は畑作地より常に增收になること、しかしハーレーでは多肥により畑作地でも ley と同等の収量を挙げ得ることが報告された。この場合土壌窒素を主体に討議が行なわれたが、天候不順時には作土の slaking や滞水の防止に特にシルト質土壌で ley の効果が顕著になることも報告された。

ley によりいわゆる改良されたといわれる土壌構造とそれに対する作物の感応の関係は土性や腐植含量等の土壌条件、地勢、気象条件、作物の種類や栽培管理方法によって多様であろう。浸蝕やクラスト形成等の物理的障害の大きい地帯では增收効果が発現するかも知れないが障害の軽微な地帯では効果は期待できないように思われる。英国の畑作地帯は主にイングランド東部に分布し、緩かな起伏と温和な降雨条件にあり土壌浸蝕は問題になっていない。この地帯は氷河堆積物からなり下層に堆積するチョークを混入したチョーク質土壌が多く土壌自身

良好な構造を維持し、恢復する性質を備えているといわれる。加えて施肥量が低く農業収約度が低い。これらのことから ley やその他物理性の改良が增收に結びつき難い地理的条件にあるように思われた。またこの方面の試験研究に対する感心は後述の大英諸国に比べてかなり低いことも事実であった。

一方、ley が易耕性をよくし良い播種床が得られることは広く認められている。¹⁾³⁾⁴⁾⁹⁾¹⁰⁾ イングランドの粘質地帯のように春の農耕作業が天候に極めて左右されるところで ley is beneficial といわれているのは、降雨後でも ley は排水がよく耕耘播種作業が易容なことに理由がある。

農業機械踏圧の障害についてシルソー農業機械研究所土壌部の Fountain, Payne ら¹¹⁾ (1952)は広く調査を行ない、通常の農業機械の使用の範囲では土壌圧縮は軽微で栽培上無視できると結論した。以来、機械踏圧による構造悪化はイングランドではあまり心配ないと考えられている。これも先に述べた土壌の特性と ley 方式が障害軽減に役立っているように思われた。事実彼らの調査圃場は ley あと地または輪換地が多い。また ley あと地は圧縮され難いと述べている(有機物の土壌圧縮に対する効果について Russell ら¹²⁾, Taylor ら¹³⁾の報告がある)。諸外国の踏圧の影響を見ると、Weaver ら¹⁴⁾ (1950)はデビッドソン土壌におけるトラクターの使用は下層土を圧縮し硬盤形成の要因となること、Trowse ら¹⁵⁾ (1961)はハワイのラトソルで機械踏圧は作土の仮比重を高めさとうきびを減収させること、一方 Bolton ら¹⁶⁾ (1959)はブルックストーン粘質土壌でトラクターの過剰踏圧をしても孔隙減少や燕麦の減収がないと報告している。Bolton の供試圃場の多くは牧草輪換地か ley あと地であるのが特徴的である。これらの踏圧障害の差異も土壌の構造維持特性と管理方法の差異に由来するものであらうと思われる。

筆者等¹⁷⁾ (1937) は次の圃場試験で ley の効果を確かめた。下記の土性と管理方法の異なる3圃場に、大麦と赤ビートを播種後ローラまたはランドローバで踏圧処理し孔隙性の変化と作物の感応を調べた。

a 圃場: LiC (粘土29%) C 0.5%

長期間有機物無施用の畑作連作地

b 圃場: CL (粘土20%) C 1.5%

8年 ley の耕起直後

c 圃場: SL (粘土10%) C 0.6%

長期間有機物無施用の畑作連作地

1) 踏圧と構造の変化

径1~2mmの団粒と2.5cmの土塊の孔隙量をケロシン法,¹⁸⁾¹⁹⁾ワックス法²⁰⁾で測った。(図-1)。団粒の孔

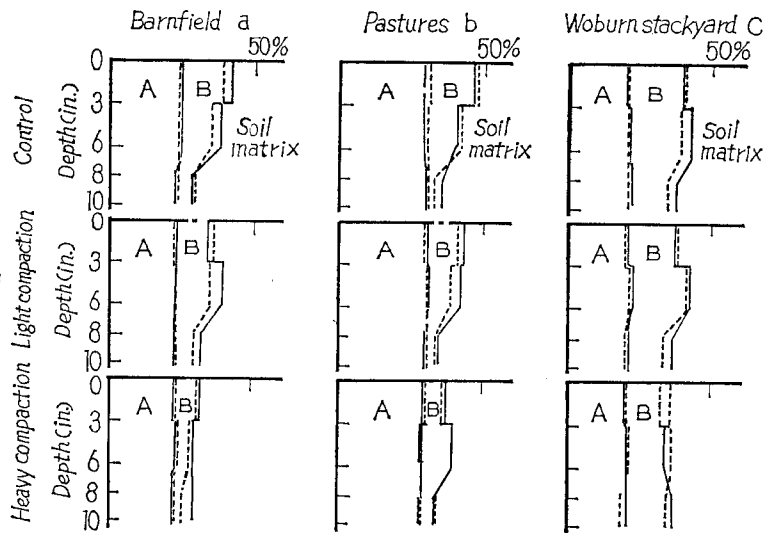


図-1 Pore distribution. A, Total pore space in 1-2mm aggregates; B, total pore space in clods. Two kinds of line show duplicate plots.

隙量はどの圃場でも踏圧の影響を受けず、25cmまでの深さ別の差異もほとんど認められなかった。団粒の孔隙量 (<0.04mm) は土性や有機物等の土壤管理で支配されるが耕耘作業や踏圧には無関係であると考えられた。一方、土塊の孔隙 (>0.04mm) は踏圧で減少するが20~25cm深では影響は明らかでない。ley あと地は圧縮に対する抵抗性がある事が明らかに認められた。土塊の破壊強度²¹⁾は畑土壌では踏圧で増大したが ley あと地では増大しなかった。踏圧後の降雨で粘質土壌踏圧区は滞水したが ley あと地ではよく排水した。

2) 生育, 収量, 養分吸収

ley では踏圧による発芽率の低下が軽微であった。発芽を阻害する臨界仮比重は粘質より砂質土壌の方が大きかった。土塊固有の大型孔隙と発芽率は見掛上比例関係にあった。

発芽後の乾燥で粘質土壌踏圧区は亀裂を生じ、根はそ

表-1 The effects of compacting soil on the relative total uptake of nitrogen and phosphorus by barley and globe beet

| Data are ratios | total uptake of phosphorus / total uptake of nitrogen | | |
|------------------|---|----------|-----------|
| | Barnfield | Pastures | Stackyard |
| Barley | | | |
| No treatment | 0.161 | 0.241 | 0.126 |
| Light compaction | 0.151 | 0.240 | 0.132 |
| Heavy compaction | 0.157 | 0.234 | 0.105 |
| Globe beet | | | |
| No treatment | 0.170 | 0.197 | 0.192 |
| Light compaction | 0.193 | 0.201 | 0.128 |
| Heavy compacton | 0.148 | 0.196 | 0.083 |

れにそって伸長し、個体当りの生育は比較的良いが、砂質土壌では踏圧はラスト形成を促進し根は矮小化して生育が非常に劣った。ley では踏圧区は無処理区と同等の生育をした。踏圧はどの圃場でも土壌水分量とその経時変化にほとんど影響を及ぼさなかった。容気量は砂質土壌が粘質土壌より高く経過したが生育との関係は認められず、作土表層の通気性が生育にとって重要であると考えられた。

弱度踏圧でも砂質土壌は減収したが ley あと地と粘質土壌は減収しなかった。強度踏圧による減収は ley あと地では小さかった。

踏圧による根の伸長の差異は養分

吸収によく反映し矮小根は易動性養分である硝酸を良く吸うが難動性養分である磷酸の利用率は劣り、両吸収量は3圃場の構造維持特性と踏圧処理の影響をよく表わした(表-1)。この問題は後述する。

ley の物理性改良についておもしろいと思った報告を次に挙げる。

ロザムテテッドの Emerson²²⁾ (1955) は粘質土壌でも ley あと地は排水が良いことに注目して、牧草根の木化導管は枯死後毛細管として水の伝達作用をもつことを確かめた。ペレニアルライグラスやメドーフエスクの根は径 20~30μ の木化導管をもち、これは土壌の飽和透水係数の 6×10^{-7} sec を担うが、不飽和では透水の効果が大きいと考察している。

Low¹⁾ (1955) は畑作土壌を何年牧草栽培すると永久草地と同等の構造を恢復するかを透水性、保水性、団粒化度の点から調査した。極砂質又は粘質土壌では5~10年、中粒質(たとえば微砂質壤土、埴壤土)では数十年以上の長期間を要するが、普通2~4年で構造は顕著に変化するという。

ハーレーの Clement²³⁾ (1958) は ley による団粒化や土壌窒素の富化は作土表層 2~3 cm に著しく、耕耘はこれを稀釈してしまうと報告している。彼らは ley あと地は不耕起で構造を破壊しない方が水や窒素養分の収支に有利であると考えて除草剤(パラコート)と sod-seeder により麦やケイルの不耕起栽培を継続していたが良好な結果を得ていた²⁴⁾。同様の ley あとの不耕起栽培はジェロットヒル研究所でも実施されていた²⁵⁾。筆者らはこの不耕起栽培をライグラス跡地の水稲乾田直播栽培

に適用したが、初期生育がよく地力窒素の供給が後期にまで持続し、地上部も根もあとまきりの生育をして増収し省力、多収安定栽培法として有効であることを確かめた⁴⁰⁾。

3. 土壤構造と養分吸収特性

作土の構造は根の伸長を支配し植物の養分吸収に直接影響を及ぼす。オランダ・ Groningen 土壤肥沃度研究所の Wiersum^{26,27)} (1961・1962) は、植物による土壤養分利用の効率は根の分布密度と同時に養分の mobility が重要な因子であるという。構造の変化は土壤と根の接触面積の変化であるが、これは硝酸、カリ等の易動性養分の吸収には影響は小さく、リン酸、マンガンらの難動性養分の吸収には影響が大きい。彼の計算によると通常の耕作では難動性養分は土壤容積で 2~5% しか利用されない²⁷⁾。Wiersum は団粒の大きさ別に栽培実験を行ない粗粒では細粒よりも N/P 吸収量が大きくなることを認めて上記考への妥当性を確かめた²⁷⁾。前述の筆者らが得た踏圧と両養分吸収比の成績も Wiersum の考へに添った結果である。ロザムステッドで Cornforth²⁸⁾ (1968) は Wiersum の追試を行なったが、ライグラスによる大型団粒中の硝酸の吸収は予想に反してあまり大きくなかった。そして、団粒中の硝酸の浸出利用には土壤の乾湿回復が必要であろうと考察した。

当時注目されていた報告に Passidura ら²⁹⁾ (1963) の土壤圧密とマンガン吸収の報告があった。泥炭や腐植質の軽しろう土壤で麦類にマンガン欠乏がよくでるが、彼らは欠乏症の燕麦を踏圧すると症状が消えることに気づいた。従来考えられるマンガン有効化の経路はこの場合あてはまらず、新しく根による接触吸収説を唱えた。踏圧は根と土壤の接触面積を増しマンガン吸収を促進したという。同様にトラクターの轍の跡では麦のマンガン欠乏が出ないという話を西ドイツ・ブラウンシュヴァイヒ農業研究センター土壤耕作研究所長 Frese 氏から同った。ついでながら Frese 氏は筆者らの踏圧試験に興味を示した数少ない人の一人でロザムステッド来所の折に会うことができたが彼の研究所では土壤構造と作物生産について種々研究が進められている様子であった。

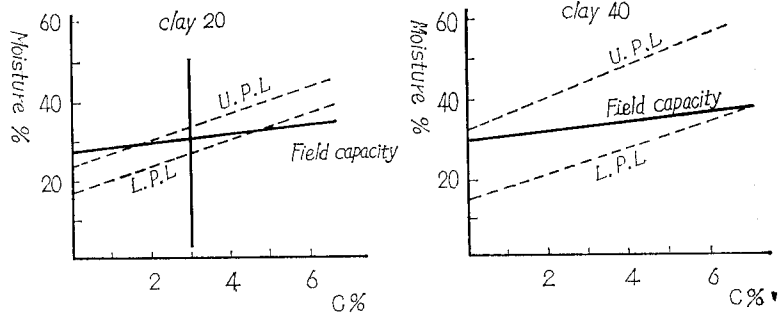
4. 西欧の研究見学

1964年夏、主に土壤構造の edaphic な研究を行なっている下記を見学した。

ゲント農業大学土壤物理部 (Prof. De Boodt)
Groningen 土壤肥沃度研究所土壤物理部 (Dr. Peerkamp, Dr. Boekel)

ベルサイユ農業研究センター土壤部 (Dr. Henin)
ベルギーは耕地面積当りの肥料消費量が世界でも高く収約農業国である。しかし施肥技術だけでは生産力を上げられない物理性の劣悪な耕地が多く、特に東部、北部に分布するレス地帯では作土の土壤構造が生産力を支配している。土壤生産力地図作成上構造の調査が重要な位置を占めるとして、ゲント大学の De Boodt らは精力的にこの面の調査研究を行っている。作物生育に良い物理性を構造指標として導き出すべく、構造の諸因子と生育収量の関係や構造の測定法、調査法の研究が多い³⁰⁾³¹⁾³²⁾。レス質土壤で団粒安定指標と麦や根菜の収量が密接に関係するという報告³¹⁾ (1961)、孔隙、保水性、団粒化度を総合した構造指標と麦、根菜の収量に関する報告³²⁾ (1958) 等作物がよく構造の差異に感応している。このことについて De Boodt は、多肥栽培を行っている壤土質のレス土壤で下層土迄均質でなかつ平坦面にあり垂直方向にのみ水が移動し地下水の影響の少ないところでは生育が作土の構造に感応するという話であった。De Boodt の団粒安定指標とは処理前の土壤の団粒平均重量直径と水中振とう節別後の耐水性団粒の平均重量直径の差に相当し団粒構造の不安定性の程度を捉えている。De Boodt の実験室には pF-水分用の圧膜装置が10台ほど並んでおり迅速水分計と共に能率よく土壤水の測定が行われていた。迅速水分計³³⁾は乾燥機と直読天秤を組み合わせたもので半自動的に熱乾水分が測定できる。また簡便な土壤通気測定装置があった³⁴⁾。

オランダ・ Groningen 研究所土壤物理部では Peerkamp



図—2 Effect of organic matter on lower and upper plastic limit and moisture content at pF 2 (Boekel 1963)

粘質土壤はより粗粒質土壤に比べて圃場容量が UPL より低く、分散し難い水分状態にあるが、LPL より高く外力で塑性変形を受け易い水分状態にある。有機物の増加は圃場容量を増大させるがそれを上回って UPL, LPL を増大させ、改良効果が認められる。

kamp 部長のもとに風蝕防止、灌漑、土壌構造と生育や耕耘に関して農業に密着した研究が行われていた。チューリップ球根やアスパラガスが海岸沿いの砂質土壌やレス質土壌に栽培されているが春先の風蝕が問題となっている。スプリングラー散水でクラストを作ったり多量に産する馬鈴薯澱粉を散いでその糊作用で風蝕を防ぐというようなローコストの実際的技術の検討も行われていた。土壌改良剤はとてもしき合わないそうである。構造と生育について Boekel³⁵⁾ (1963) は pF 2 の気相率が粘質土壌は15%、シルト質土壌は50%、砂質土壌は20~50%をもつ構造が生育に良いと報告している。易耕性について Boekel の興味深い研究³⁶⁾³⁷⁾がある。作土の構造は踏圧、降雨、過湿状態における重力の3つの破壊作用に対していかに不安定な状態にあるかを見るのが重要であるとして、アッターベルグ限界の液性限界や塑性限界がそれぞれ土壌の分散、塑性変形に直接関係する水分点であることを注目し、これら水分点が圃場含水量に対してどういう位置にあるかを見ることにより作土土壌の構造維持力が推定できるというものである。この方法で Boekel は粒径組成と構造維持特性の関係、有機物施用の改良効果などを定量的に確かめた³⁸⁾ (1963)。(図一2)

フランス・ベルサイユ農業研究センター土壌部の見学では会話が難かしく正確さを欠くがおよそ次のとおりである。Heninを中心に果樹を含む広範な耕地土壌の構造の調査と、同時に生成学的な構造の研究も併行しているように見受けられた。彼等の調査項目の一つに土壌団粒の分散の特性をとらえた団粒不安定度というのがある。これは、水、アルコール、ペンゼン等の親和性の異なる各分散媒に対する団粒不安定度を指標化したもので、生成の異なる土壌間差異や化学肥料の差異に基づく作土の性質の変化がよく把握されるということ、また粘質土壌で果樹の生育と相関があったという話であった。これらの成果は Henin 等の著書“Le Profil Cultural”に著している模様である。

最後に西欧土壌構造研究グループについて述べたい。1958年5月国際土壌学会の分科会としてゲント大学で国際土壌構造シンポジウムが開催され、前述の De Boedt, Peerkamp, Frese, Henin, Low らを中心に多数の研究報告と討議がなされた³⁹⁾。以来西欧の土壌構造研究グループが各国1名の代表者で結成され緊密な連繫をもち、1967年に「西欧諸国における土壌構造測定法」³⁹⁾を集収編纂した。内容は、野外の調査法、サンプリング、構造に関連した土壌成分分析法、Soil Geometry の諸性質の測定(三相分布、水分、通気性、ガス拡散、透水性、薄片法)、外力と土壌の挙動(土質力学的性質、団粒不安定度)、

野外測定法の各章に分かれ総数205の方法が記載されている。

ゲントシンポジウムにおける土壌構造研究をめぐる討議と結論の中から重要と思われる部分を以下に抜粋する。

- 1 土壌構造が作物に及ぼす効果は土壌(特に下層上の性質)と気象条件で異なる。構造の良、不良を見極めるには長期にわたり気象との関連で見るのが重要である。
- 2 土壌構造はある一時点の静的状態を見てもあまり意味がなく構造の経時変化または外力による構造の変化を把握することが重要である。
- 3 作物の感応は供試作物により異なり、たとえば麦類は発芽時に、根菜類は生育後半によく構造に感応する。
- 4 作物生産を支配するのは土壌構造自身ではなく水や空気の収支、熱の伝播、機械的障害等の孔隙の機能である。

おわりに

土壌構造と作物生産を直結する研究よりもその前にまたは並行して土壌構造と物質移動、土壌構造と粒子の力学的挙動等の機能面を明らかにすることが重要であると現在筆者は考えるが、この方面の研究について紹介することが出来ず力が足りなかったことを痛感する。

留学の御援助を頂いた四国農試鈴木新一栽培部長、農事試野本亀雄場長、当時四国農試におられた荒木浩一技官、中野啓三技官に深甚の謝意を表します。

引用文献

- 1) Low, A. J. (1955) Improvement in the structural stage of soils under leys. *J. Soil Sci.* 6, 179-197
- 2) Troughton, A. (1957) The underground organ of Herbage grasses. *Bul. 44, Commonwealth Bureau of Pastures and Field Crop.* Hurley. 125-129
- 3) Williams, T. E. (1960) Leys and subsequent arable productivity. *J. Brit. Grassland Soc.*, 15, 139-194
- 4) Cooke, G. W. (1963) Effects of leys and green manure on soil. *J. Royal Agric. Soc. England*, 121, 143-150
- 5) Clement, C. R. (1951) Benefit of leys-structural Improvement or nitrogen reserves. *J. Brit. Grassland Soc.*, 16, 194-200
- 6) Van Bavel, C. H. M. and Schaller, F. W. (1959) Soil aggregation, organic matter, and yields in a long-time experiment as affected by crop management. *Proc. Soil Sci. Soc. Am.*, 15, 399-404
- 7) Mchenry, J. R., Zook, L. L., and Phoades, H. F. (1950) Pore space and aggregation in a chernozem soil as affected by age of perennial grass sod. *Agron. Jour.*, 42, 377-380
- 8) Low, A. J., Piper, F. J. and Roberts, P. (1963) Soil Changes in ley-arable experiment. *J. Agric. Sci. Camb.*, 60, 229-233
- 9) Hurley/Wageningen Symposium, Hurley Glassland Inst., Berks., May 1964

- 10) Hood, A.E.M. (1953) An experiment on the effect of leys on soil fertility. 3th Intern. Grassland Congr. session 10A, 10~13
- 11) Fountaine, E.R. and Payne, P.G.T. (1952) The effects of tractors on volume weight and on the soil properties. National Inst. Agric. Engineering, Silsoe, Case study, 17
- 12) Russell, M.B. Klute, A. and Jacob, W.C. (1952) Further studies on the effect of long-time organic matter additions on the physical properties of Sassafras silt loam. Proc. Soil Sci. Soc. Am., 16, 155~9
- 13) Tailor, H.M., and Henderson, D.W. (1959) Some effects of organic additives on compressibility of yolo silt loam soil. Soil Sci., 83, 101~9
- 14) Weaver, H.A. (1959) Tractor use effects on volume weight of Davidson loam. Agric. Engng. St. Joseph Mich., 31., 132~3
- 15) Trouse, A.C. and Humbert, A.P. (1961) Some effects of soil compaction on the development of sugar cane roots. Soil Sci., 91, 208~17
- 16) Bolton, E.F., and Aylesworth, J.W. (1959) Effects of tillage traffic on certain physical properties and crop yield on a Brookston clay soil. Can. J. Soil Sci., 39, 93~102
- 17) Kubota, T. and Williams, R.J.B. (1937) The effect of changes in soil compaction and porosity on germination, establishment and yield of barley and globe beet. J. Agric. Sci. Camb., 63, 227~33
- 18) Kawaguchi, K. and Toratani, H. (1953) Determination of apparent density of soil aggregates by the kerosene displacement method. J. Sci. Soil Manure, Tokyo, 29, 337~40
- 19) Currie, J.A. (1936) The Volume and porosity of soil clumb. J. Soil Sci., 17, 24~35
- 20) Russell, E.W. and Balcerak, W. (1944) The determination of the volume and air space of soil clods. J. agric. Sci. Camb., 34., 123~32
- 21) Williams, R.J.B. and Cooke, G.W. (1951) The effects of farmyard manure and grass residues on soil structure. Soil Sci., 92, 30~9
- 22) Emerson, W.W. (1955) Water conduction by severed grass roots. J. agric. Sci. Camb., 45, 241~245
- 23) Clement, C.R. and Williams, T.E., Meded. Landb-Hogeschool, Ghent, 24, 166 (1958)
- 24) Arnott, R.A. and C.R. Clement (1932) Sowing winter wheat on leys destroyed with a herbicide. Nature Lond., 195, 1277~8
- 25) Hood, A.E.M., Jameson, H.R. and Cotterell, R. (1963) Destruction of pastures by paraquat as a substitute for ploughing. Nature Lond., 197, 748
- 26) Wiersum, L.K. (1951) Utilization of soil by the plant root system. plant and Soil, 15, 189~192
- 27) Wiersum, L.K. (1952) Uptake of nitrogen and phosphorus in relation to soil structure and nutrient mobility. Plant and Soil, 15, 62~70
- 28) Cornforth, I.S. (1938) The effect of the size of soil aggregates on nutrient supply. J. agric. Sci. Camb. 70, 83~35
- 29) Passidura, J.B. and Leeper, G.U. (1953) Soil compaction and Mn deficiency. Nature Lond., 200, 29~30
- 30) De Boodt, M. and De Leenheer, L. (1954) The practical meaning of pore sizes with respect to texture of soil. Intern. Congr. Soil Sci. Leopoldville. August 1954, 11, 104~110
- 31) De Boodt, M, De Leenheer, L. and Don Kirkham (1951) Soil aggregate stability indexes and crop yields. Soil Sci., 91, 135~46
- 32) De Boodt, M, De Leenheer, L. (1953) Soil Structure and plant growth. Meded. Landb Hogesch., Ghent. 24, 312~321
- 33) Soil moisture Determination in a current of warm air according to De Leenheer (1957) West European Methods for Soil Structure Determination, Intern. Soil Sci. Soc., IV, 5
- 34) Air permeability determination in the laboratory according to Kirkham, De Boodt and De Leenheer (1957), West European Methods for Soil Structure Determination, Intern. Soil Sci. Soc. V, 93
- 35) Boekel, P. (1953) Soil Structure and Plant Growth. Neth. J. agric. Sci. 11, 120~27
- 36) Boekel, P. (1953) Evaluation of the structure of clay soils by means of soil consistency. Meded. Landb-Hogeschool, Ghent, 24, 312~321
- 37) Boekel, P. (1953) The effect of organic matter on the structure of clay soils. Neth. J. agric. Sci., 11, 250~63
- 38) Intern. Symposium on Soil Structure, Meded. Landb Hogesch., Ghent, May 1953, 24
- 39) West European Working Group on Soil Structure : West European Methods for Soil Structure Determination, Intern. Soil. Sci. Soc., (1967)
- 40) 千葉繁, 高橋和夫, 久保田敬 (1970) イタリアンライグラスあと地における水稲不耕起直播栽培, 四国農試報告 21, 1~22