

八郎瀉のヘドロ地盤の乾燥過程について

江 崎 要* 竹 中 肇**

I はじめに

八郎瀉は、東西 12 km、南北 27 km、総面積 22,024 ha の半かん湖で、琵琶湖に次ぐ日本第 2 の湖であった。

水深は最深部でも 4.5 m と非常に浅く、湖底は平坦で、大部分が肥沃な泥土で被われており、干拓に適した地形である。

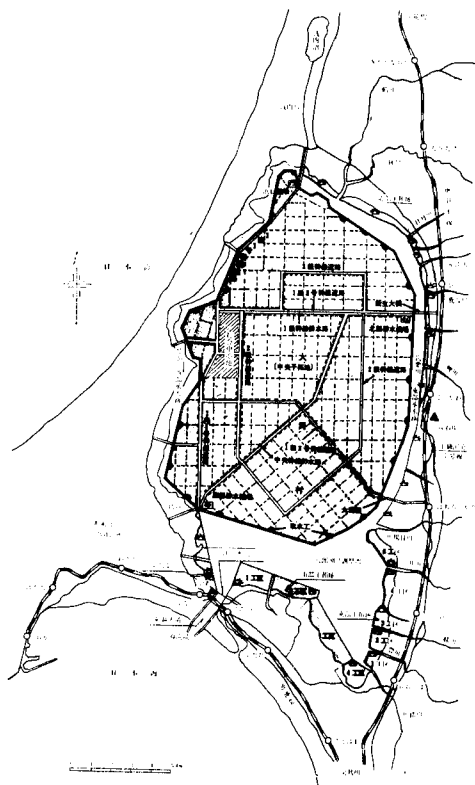


図-1 事業計画の概要図

八郎瀉 22,024 ha のうち、中央の 15,666 ha および周辺の 1,563 ha を干拓地として陸地化し、残余の水面は調整地、東部承水路、西部承水路として、洪水調節および用水源としての機能をもたせる。

調整地は船越水道に設ける防潮水門によって、外海か

* 農業土木試験場土地改良部

** 東京大学農学部 [1972. 10. 17 受理]

ら遮断され、淡水化される。

中央干拓地は延長約 52 km の堤防で囲まれ、地区内の余剰水は、南北に貫ぬかれた中央幹線排水路およびその末端の南部、北部排水機場によって排水される。

干拓された広大な土地には、60 ha を標準は場区画として、農道および用排水路が基盤目状に配置され、近代的農業が展開される。

すなわち、入植者 6 戸（入植者の配分面積は 1 戸当たり 10 ha が標準）の共同作業の形で、日本農業のモデル農村にふさわしい一貫した大型機械化営農が行なわれる。

八郎瀉干拓事業の工事着手は昭和 33 年で、昭和 38 年 11 月には、中央干拓地堤防の最終締切りが行なわれ、干陸が開始された。

翌 39 年 4 月以後、比較的標高の高い周辺部から順次陸地化され、昭和 42 年度には八郎瀉全体が干陸された。地表に現出した湖底の泥土は、ヘドロと呼ばれる非常に扱いにくい粘土である。含水比 250%~300%、間隙比 6~7、透水係数 10^{-7} cm/sec のオーダーであり、また粒度組成で、粘土分が 60%~70% をしめる地域（八郎瀉の西岸側）もあり、全国的にもあまり類例のない軟弱地盤である。しかも鋭敏比が 10 以上の値を示すので、一たん破壊すると急激に支持力を失ってしまう。

このような超軟弱地盤も、乾燥の進行とともにき裂の発生、酸化固化層の形成等、次第に耕地基盤としての条件を備えるようになり、昭和 43 年には、第 1 次入植者による大型機械化営農が開始された。

筆者らは、干陸以後八郎瀉のヘドロ地盤の経年変化、乾燥促進工法等について、検討を加え、その経過を見守ってきた。

その大略は、「八郎瀉のホ場乾燥に関する研究」（農土論集投稿中）としてまとめたが、この中からとくに地盤強度の発生、既乾燥履歴の影響等について報告する。

II 地盤強度の変化

A6 ほ場について、干陸以後、昭和 45 年までのコーン支持力経年変化（自然のまま放置した場合）を図-2 に示した。

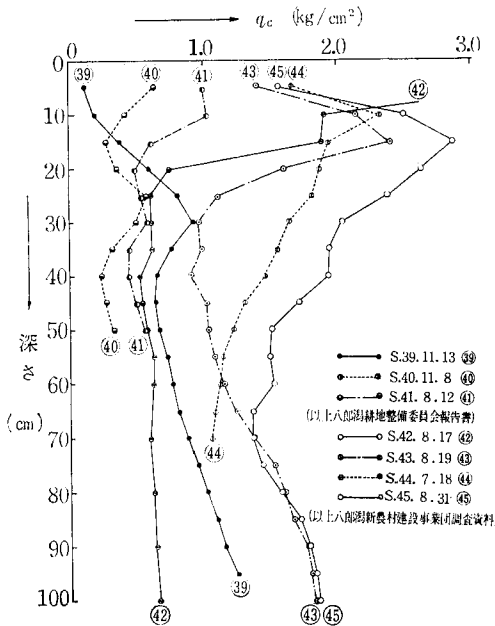


図-2 A₆ ほ場の各年度の最高コーン支持力値

ただし、コーン支持力は、コーン断面 6.45 cm²、プルビーンゲリング 30 kg、単管式コーンペネトロメーター (ただし 42 年度のみ二重管式) によって 3 回反復測定とした。

また 42 年以後の測定値は 6 ヶ所の平均である。

なお、A₆ ほ場 (総合中心地の南側でヘドロの深さは約 10 m、また標高はほぼ -3.00 m) の地表露出は、昭和 39 年 4 月 (干陸と同時に) で、各年度ともほぼ最高の強度に達する時期の観測値を選定した。

また地盤強度の経年変化と関連して、A₆ ほ場の地下水位の経年変化、中央干拓地区内の管理水位 (中央幹線排水路水位) の状況、および総合中心地における気象記録 (月別降水量、月別平均気温) を表-1, 2, 3 に示した。

表-1 地下水位の経年変化 (A₆ ほ場)

年次	40年	41年	42年	43年	44年	45年	備考
地下水位 (cm)	10	15	22	28	32	45	地表面からの深さ、冬季を除く年間平均値

表-2 中央干拓地区内の管理水位 (中央幹線排水路水位)

年次	39年	40年	41年	42年	43年	44年	45年
水位 (m)	-3.50	-4.00	-4.50	-5.00	-5.50	-5.50	-5.50

表-3 総合中心地における気象記録

区分	年次	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月
降水量 (mm)	昭和41年	50	75	103	238	140	169	280
	42	120	33	32	91	187	226	164
	43	60	105	55	68	358	126	93
	44	157	111	60	165	174	127	101
	45	—	40	65	43	79	145	162
	船川平均*	104	98	109	148	130	192	139
平均気温 (°C)	昭和41年	8.1	13.5	17.8	20.5	24.5	19.1	14.7
	42	8.6	15.7	18.5	23.5	23.9	19.4	13.1
	43	9.0	13.8	18.4	23.1	22.7	19.1	12.1
	44	8.7	13.4	18.2	22.6	23.5	18.7	12.5
	45	—	16.1	17.9	23.0	24.2	19.6	13.7
	船川平均*	9.0	14.0	18.6	23.2	25.3	20.5	14.0

* 船川 (男鹿市) における過去 25 年間 (昭和 11 年 ~ 35 年) の平均値である。

図-2 によって、A₆ ほ場の地盤強度の経年変化の状況をたどってみよう。

干陸後 2~3 年 (39 年 ~ 41 年) の強度変化は非常に小さく、地盤強度が大きくなったとはほとんどいい難いものに対して、42 年度以後の強度増加は、非常に顕著である。

42 年度にはいると、深さ 15 cm までの表層部の強度が非常に大きくなるが、この変化も表層部だけに限定されている。

これは 20 cm 付近にシジミ貝の死滅した貝がら層が存在し、この層によって乾燥の進行が妨げられたこともその一因と考えられる。

43 年度になると、深さ 5 cm の地表面の強度は、早くも低下するが、強度の大きい層が深さ方向に拡大して、ほぼ 20 cm ~ 25 cm となる。

この地表面での強度低下は、乾燥とともに発生する亀甲状の第 1 次、第 2 次き裂の段階が終了して、細屑化の段階に進んだことを示すものであろう。

44 年度以後では、深さ 30 cm 以下の深層部における強度増加が顕著に見られるようになる。

このように、42 年を境に、地盤強度は急速に上昇するが、この意味を含水比との関連から考察した。

図-3 は、第 1 次入植ほ場 H₉ ほ場における昭和 41 年度の含水比コーン支持力の関係である。

これによると、含水比がほぼ 180 % 付近に低下するまで、ほとんど強度増加はみられないが、含水比が 180 % ~ 150 % に低下するときに強度は急激に上昇している。

このように、乾燥過程のある一時期に、地盤強度が急

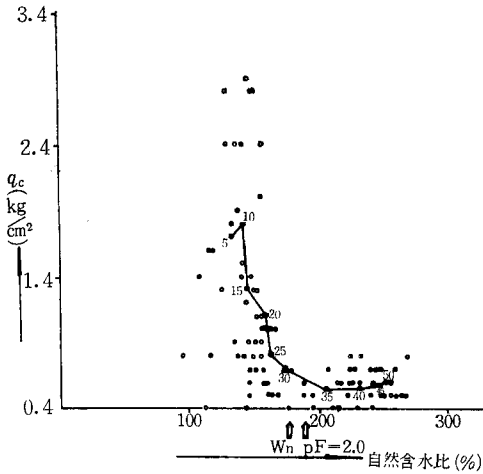


図-3 自然含水比とコーン支持力との関係
(H₉ほ場、深度5cm~50cm、昭和41年5月~11月10回測定)

激に上昇する現象は、八郎瀨全域にわたって一般的にみられる現象で、A₆ほ場の場合には約200%である。

ある特定の含水比を境に、地盤強度が急上昇する理由は次のように説明できるであろう。

一般に、水中沈積状態から、徐々に乾燥させて行なった場合、 $pF=2.0$ および液性限界が1つの力学的転移点とされている¹⁾。

このような面から、八郎瀨のA₆ほ場の場合について考察してみると、乾燥の進行とともに約300%の当初含水比から、ほぼ200%の含水比まで低下してくると、 pF では1.5~2.0の乾燥状態を経験するようになり、1つの力学的転移点に到達したと考えることができる。したがって、この含水比を境に急激な強度上昇がみられるということになるのであろう。

Ⅲ 乾燥履歴の記録

一般に、過去に経験した乾燥履歴はめいりょうに記憶されて、元の姿に完全に戻るようなことはないといわれている。

これは、高乾燥状態を経験することによって、土自体の性質が徐々に変化するためであり、過去の乾燥履歴の影響は、乾燥、湿潤を繰返すたびに、次第に強く現われるようになると思われる。

このような過去の乾燥履歴の問題を、昭和42年度A₆ほ場の定期定点観測値を基に、連続旱天時におけるコーン支持力、水分張力の変化から検討することにした。

地盤強度はいうまでもなく、降水の多少による乾燥期湿潤期に従って大きく変化するし、また長期間連続旱天

が続く乾燥期には、地盤強度も著しく増加するはずである。

昭和42年度には、連続旱天が長期間続く乾燥期が3回(第1回5月18日~6月28日、第2回7月14日~8月9日、第3回8月20日~9月1日)みられる。

この3回の乾燥期における乾燥速度の違いを知る方法として、累計計器蒸発量(以下単に累計蒸発量と称する)と、コーン支持力、水分張力の上昇との関係を求めることにした。

累計蒸発量とは、乾燥期の始点(かなり多量の降水後に、地表面の水分張力がほぼ0付近になったと思われる日)から起算して、その後の連続旱天日の日々の蒸発量の累計値(日雨量5%以下は連続旱天と考えたが、少量といえども降水として無視できないので、累計蒸発量から差し引いた)のことである。

この累計蒸発量とコーン支持力、水分張力の上昇との関係を、深さ5cmおよび15cmの場合について比較した結果が図-4である。

この図から、コーン支持力、水分張力ともに、過去の乾燥履歴をめいりょうに記憶していることがわかる。

深さ5cmでの水分張力変化をたどってみると、第1回乾燥期においては、累計蒸発量100%前後まで水分張力は直線的に増加して、ほぼ450cmに達するが、その後水分張力は横バイの状態に変化し、累計蒸発量130%を越えた時点で、再度上昇傾向がみられるようになり、乾燥期の末期には510cmの負圧を記録する。

第2回目の乾燥期になると、水分張力のこのような直線的増加は、第1回乾燥期よりもさらに急激で、第1回目に記録した510cmの水分張力は、わずかに累計蒸発量60%~70%で達成されてしまう。その後、水分張力はほぼ500cm前後の横バイ状態を続けた後、累計蒸発量130%を越した時点から、また水分張力の上昇傾向がみられるようになる。

このように、一たん過去に経験した乾燥状態までは、その後の乾燥期においては、前回よりもかなり小さな累計蒸発量で到達できるということが出来る。

図-5に、昭和42年度の第1回、第2回乾燥期、および昭和43年度、44年度の乾燥期について、累計蒸発量が約68%の場合の「水分張力~深さ」の関係を示したが、この図からも、明らかに事前乾燥履歴が増せば増すほど、乾燥速度は早くなるということが判明する。

このように、過去において、一たん経験したことのある乾燥状態までは、乾燥速度は非常に早くなる反面、過去に全く経験のないさらに進んだ段階の乾燥状態に突入するためには、ある程度長期間の連続旱天を必要とする

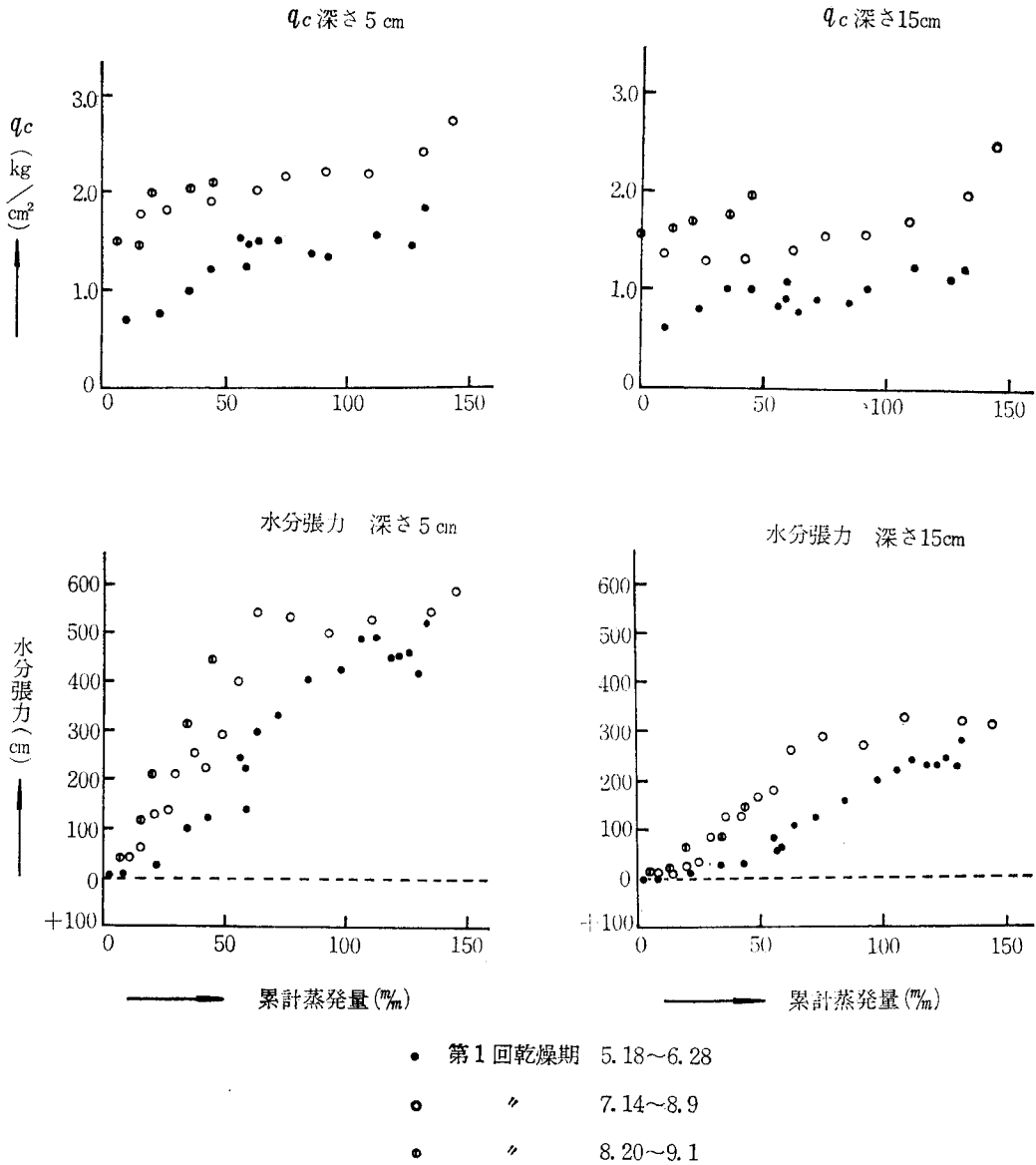


図-4 q_c , 水分張力~累計蒸発量の関係
(昭和 42 年度, A_6 は場放任区, 連続旱天時の比較)

ようである。

たとえば, 図-4 で, 深さ 5 cm のコーン支持力上昇にみられるように, かなり長期間の横バイ状態が続いた後, 乾燥期の末期, ほぼ累計蒸発量で 120%~130% を越した時点から, 急激な強度上昇が認められる。

このように, 地盤強度がある乾燥時点(水分張力)を境に, 急激に上昇する様子は, 昭和 42 年度第 1 回, 第 2

回乾燥期における A_6 は場の「コーン支持力~水分張力」の関係をまとめた図-6 を参照するとさらに明確になるであろう。

これによると, 地盤強度は深さ 5 cm の場合では 500 cm の負圧, 深さ 15 cm の場合では 300 cm の負圧を境に, 急激に上昇することがわかる。

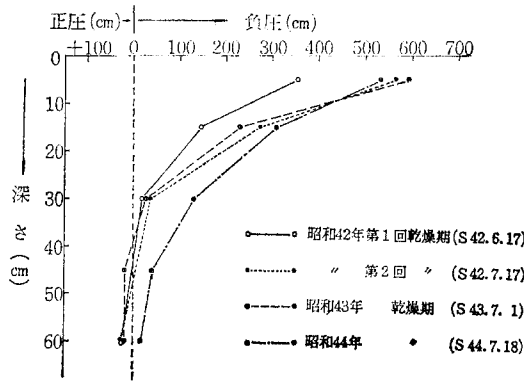


図-5 連続旱天時における水分張力の上昇状況 (A₆ほ場放任区, 累計蒸発量約68%の場合)

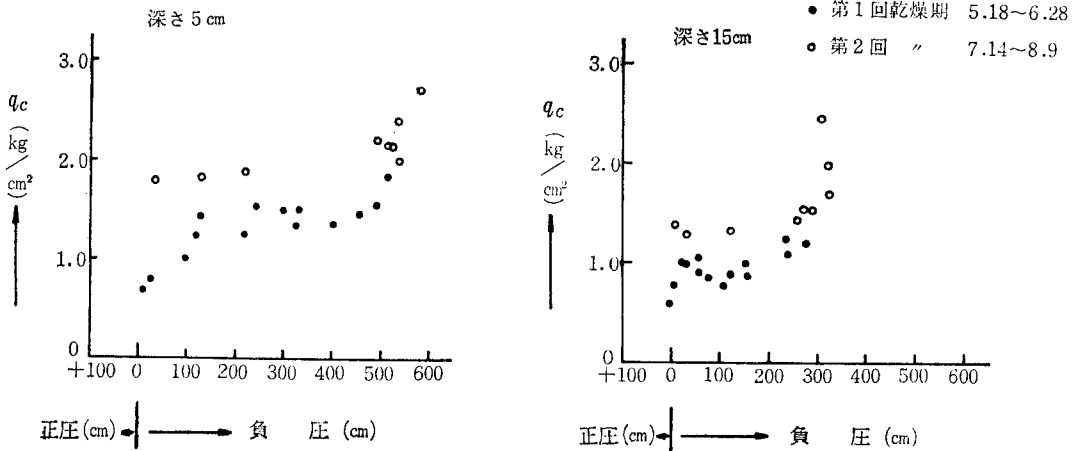


図-6 qc ~ 水分張力の関係 (昭和42年度, A₆ほ場放任区, 連続旱天時の比較)

IV 考 察

1 乾燥の進行と親水性の低下について

事前乾燥履歴の影響について述べたが、この現象はヘドロ自体の質的变化と関連した現象と考えられる。

乾燥の進行とともに、ヘドロ基盤は、表層から次第に深い層へと、ヘドロ自体の性質を変えながら土壌化が進んで行く。

この様子は、干陸後約5年の乾燥期間を経たA₆ほ場について、深度別に「pF～水分量」の関係を求めた図-7から、ある程度知ることができる。

「pF～水分量」との関係は、表層と深い層とでその位置、形もかなり異なっている。

深度30 cm, 40 cmの場合、pFの変化に対応する水分変化量は非常に大きく、またpF=2.0付近に急折点をもっているのに対して、深度20 cm以内の浅い層では、pF

の変化に対応する水分変化量の幅が非常に小さい。

これは、乾燥の進行とともに、不可逆的に親水性が低下して、次第に保水量が低下して行くこと、またpF=2.0以上の乾燥が非常に重要であることを示すものといえるであろう。

この保水量の減少は、仮比重の変化からも考察することができる。

乾燥の進行とともに、次第に、仮比重は不可逆的に増加するが、これに伴って含水比は低下する。すなわち仮比重と自然含水比との間には、次の相立関係がある。

仮比重大 → 含水比小

仮比重小 → 含水比大

これは、乾燥に伴う仮比重増加が、結果的には含水比の減少、すなわち保水量の低下をもたらすことを意味している。

このように、乾燥の進行によって、親水性が低下し、

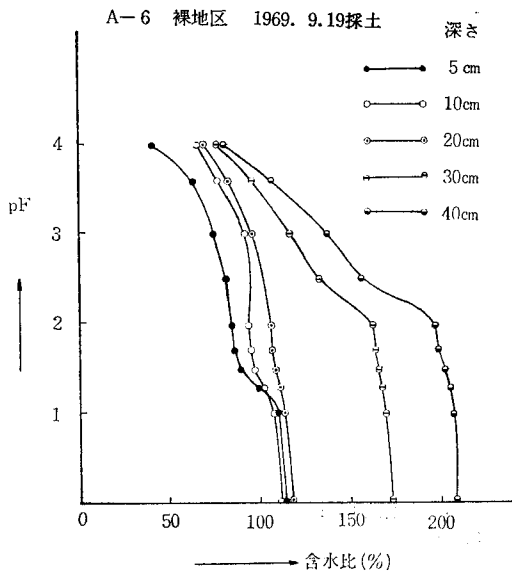


図-7 pF～水分曲線

保水量が減少するので、それだけ乾燥しやすい条件が作り出されてくると考えてもよいであろう。

このことは、干陸後2～3年の間、遅々として進まなかったは場乾燥が、昭和42年～43年を境に、急速に進行した事実とよく符号していると考えられる。

2 ヘドロ地盤における qc と pF の関係

地盤強度はある pF を境に急上昇することを示した(図-6 参照)が、この現象と関連して、qc と pF の関係について考察する。

干陸直後のヘドロはきわめて軟弱で、ほぼ理想的な塑性状態であると考えられる。

またコーン貫入時の貫入深さは、せいぜい100 cm 以内であるから、貫入時の土圧はさほど大きな影響をもたないので、実用上無視してもさしつかえない。したがって、これらの仮定条件から、コーン貫入時の土の挙動を整理すると、理論的に次式が得られる²⁾。

$$\log qc = -1.9 + pF$$

この式は、処女状態の軟質なヘドロが示す強度と水分との関係である。

この式に基づいて、比較的簡便なコーンの貫入作業によって得られる情報から、ヘドロの物理的工学的指標ともいえる pF を察知することが可能である。

初めて、乾燥状態に遭遇する処女状態のヘドロの pF と qc は、図-8 に示した直線上に位置しつつ変化して行く。

しかし、すでに述べたように、土は過去の乾燥履歴を記憶するため、一度 pF が上昇し、qc が増大した段階で、

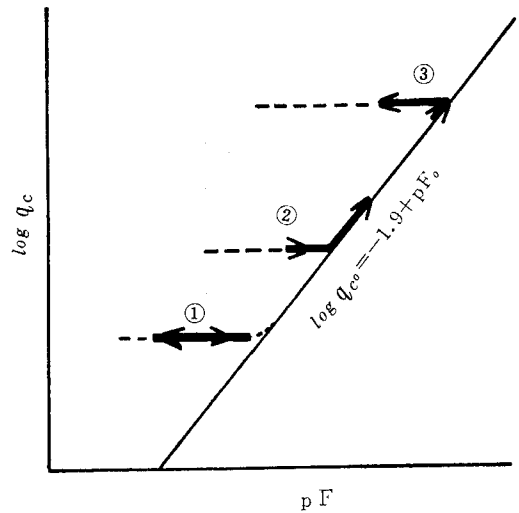


図-8 qc と pF の関係の模式図

再び湿潤化して pF が低下しても、qc の低下程度は小さい。

すなわち、土は乾燥時の内部応力の増加で、組織化され、強度が一たん発生すると、この過程を記憶していることを示す。

したがって、pF と qc の理論線からずれるときの pF₀、qc₀ の値が大きいほど、その土はきびしい乾燥履歴を受けたことを示す。

八郎瀧におけるヘドロ地盤は、天候、排水工法の実施状況、土の深度等による遅速はあっても、結局のところ図-8 に示したような変化の軌跡を辿りつつ、次第に固化して行ったものと考えられよう。

3 乾燥促進のための条件

地盤強度の経年変化と関連して、八郎瀧のような軟弱地盤を、乾燥促進させるための条件を考えてみよう。

八郎瀧のヘドロは、図-9 に示すように、自然含水比 W_n と液性限界 W_{LL} の値とがほぼ等しい。しかし、天候および排水条件(は場排水溝の有無、き裂の発達程度等)によって、土中水分はかなり変動して、自然含水比 W_n と液性限界 W_{LL} とは、おおむね次のような関係となる。

地表排水がきいていない場合、また干陸当初で天候が不順の時 $W_n \geq W_{LL}$

地表排水がきいて乾燥が進む場合、また連続干天が長く続く時 $W_n \leq W_{LL}$

すでに述べたように、液性限界は力学的転移点の1つでもあり、強度発生のためには、自然含水比が液性限界を少しでも下回ることが非常に大切である。

またこれを pF の面から考えれば、pF=2.0 程度の乾燥状態を経験することである。

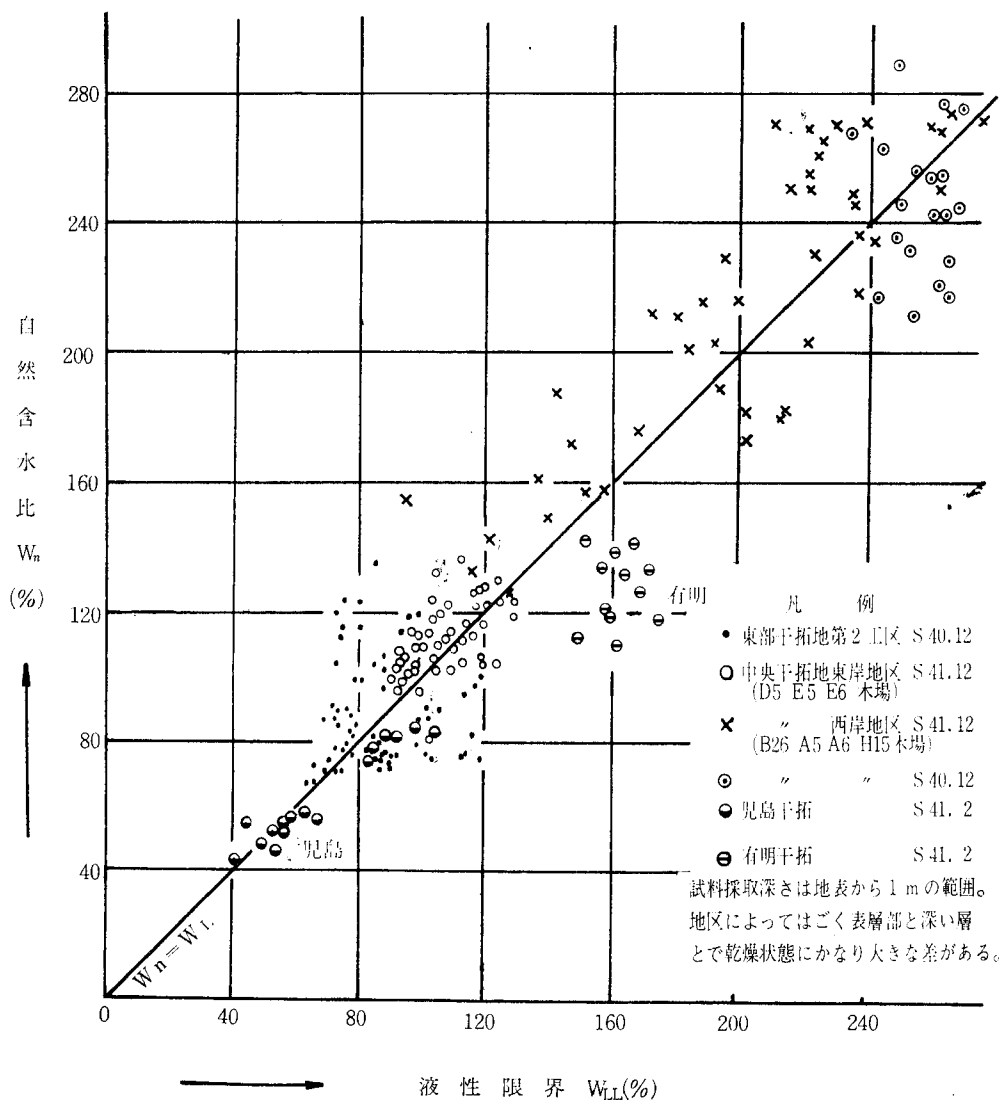


図-9 自然含水比と液性限界の関係

以上を要約すれば、次式の形で表現できるであろう。

$$W_n \leq W_{LL} \quad (\text{ここで } W_{LL} \doteq pF 2.0)$$

地盤強度を早期に発生させるためには、上記条件を満たしてやるのが非常に大切である。

このためには、天候がよいことが1つの条件である。しかし、八郎潟の場合、乾燥を急速に促進させるような有効連続干天は非常にまれか、または季節的な一時期に限定されるので、天候だけに期待するわけに行かない。

したがって、地表排水工を実施して、極力地表停滞水を排除して、乾燥が促進されるような条件を作り出しておくことが非常に大切である。

地表排水工によって、乾燥は促進され、これとともに

き裂が発生して、ヘドロ地盤の土壌化が進む。同時にこのき裂そのものが過剰水排除のための水ミチとなって、一層乾燥が促進されるということになる。

謝 辞

八郎潟のは場乾燥問題に関しては、農業土木学会内に組織された八郎潟耕地整備委員会（八幡委員長）でも、独自の調査検討が行われ、報告書が出されている。

この報文では、一部その成果も引用させていただいたと同時に、調査の過程、まとめの段階で、八幡先生をはじめ、委員会の諸先生の御討議、御示唆等、いろいろの面で御援助を賜わった点を明記し、厚く感謝申し上げます。次第です。

引用文献

- 1) 東山勇, 須藤清次: 土の力学的転移点, 一土のレオロジ的構造 (Ⅲ)一農土論集 14 号.
- 2) 新垣雅裕, 竹中肇: コーン支持力 q_c と pF との関係から見た水田土壌の挙動特性, 昭和 47 年度農業土木学会講演会, 講演要旨, p. 203~204.