

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	根系の肥大生長を対象とした屋上緑化に用いられる各種部材の耐根性評価手法の検討
Title(English)	Development of evaluating test method for root resistance to some components used for roof garden focus on the thickneing growth of root
著者(和文)	石原沙織
Author(English)	saori ishihara
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第8381号, 授与年月日:2011年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:田中 享二
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第8381号, Conferred date:2011/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:
学位種別(和文)	博士論文
Type(English)	Doctoral Thesis

平成 22 年度 学位論文

根系の肥大生長を対象とした
屋上緑化に用いられる各種部材の耐根性評価手法の検討

東京工業大学

石原 沙織

目 次

論文要旨	i
Abstract	iii
第 1 章 序論	
1.1 研究の背景	1
1.2 研究の目的	3
1.3 研究の構成	4
1.4 既往の研究	5
第 2 章 根の肥大力測定装置の開発	
2.1 はじめに	10
2.2 根の肥大力測定装置の開発	11
2.3 根の肥大力測定の概要	12
2.4 根の肥大力測定結果	13
2.5 根の直径変化量測定装置の開発	14
2.6 根の直径変化量測定の概要	15
2.7 根の直径変化量測定結果	16
2.8 天候別の根の肥大力及び直径の日変化と樹液流速との関係	17
2.9 まとめ	20
第 3 章 根を対象とした耐根性評価試験に用いる模擬根の作製と試験適用例	
3.1 はじめに	21
3.2 対象とした樹木と根の形状	22
3.3 根の断面と力学的性質	23
3.4 模擬根の作製	24
3.4.1 模擬根の基本的な考え方	
3.4.2 機構と構成	
3.4.3 ソメイヨシノの根の肥大力の再現の確認	
3.5 模擬根を用いた屋上緑化歩行面の耐根性評価の試み	28
3.5.1 アスファルト舗装の不具合事例調査	
3.5.2 試験体	

3.5.3	試験方法	
3.5.4	試験結果及び考察	
3.5.5	シミュレーションによるアスファルト舗装の耐根性評価との比較	
3.6	模擬根を用いた屋上緑化見切り部の耐根性評価の試み	49
3.6.1	試験体	
3.6.2	試験方法	
3.6.3	試験結果及び考察	
3.7	まとめ	56

第4章 地下茎の肥大力測定装置の開発

4.1	はじめに	57
4.2	地下茎の肥大量の測定	58
4.3	地下茎の肥大量測定装置	59
4.4	地下茎の肥大力の測定方法	60
4.5	地下茎の肥大力の測定結果	62
4.6	地下茎の伸長量測定方法	69
4.7	地下茎の伸長量の測定結果	69
4.8	肥大力測定に適する地下茎の位置の考察	75
4.9	地下茎の肥大力測定装置の開発	76
4.10	地下茎の肥大力測定方法	78
4.11	地下茎の肥大力測定結果及び考察	84
4.12	まとめ	

第5章 地下茎を対象とした耐根性評価試験に用いる模擬地下茎の作製と試験適用例

5.1	はじめに	85
5.2	模擬地下茎の作製	86
5.2.1	機構と構成	
5.2.2	模擬地下茎の加圧力測定	
5.3	模擬地下茎を用いたシート防水ジョイント部の耐根性評価の試み	90
5.3.1	試験体	
5.3.2	試験方法	
5.3.3	試験結果	

5.4 実植物を用いた耐根性評価試験結果との比較	94
5.4.1 試験体及び試験方法	
5.4.2 試験結果及び考察	
5.5 まとめ	102
第6章 結論	103
本研究の今後の課題	105
参考文献	107
研究に関連して著者が発表した論文	110
付録	112
謝辞	121

論文要旨

本論文は「根系の肥大生長を対象とした屋上緑化に用いられる各種部材の耐根性評価手法の検討」と題し、木本類植物の根と草本類植物の地下茎を対象とした模擬根及び模擬地下茎を作製し、模擬根及び模擬地下茎を用いた屋上緑化に用いられる各種部材の耐根性評価手法について検討を行うことを目的とした研究であり、全 6 章から成っている。

第 1 章「序論」では研究の背景、研究の目的、研究の範囲、研究の構成、既往の研究に関して述べている。

第 2 章「根の肥大力測定装置の開発」では、木本類植物の根の肥大力測定装置を開発し、ソメイヨシノの根を用いて、冬期から夏期にかけて約 9 ヶ月間、実際の根の肥大力を測定している。その結果、冬期は肥大力の変化が見られないのに対し、夏期は蒸散による一日毎の周期的な増加減少を繰り返しながら全体的に増加し、今回作製した装置を用いた測定では、最大で 440N/cm の肥大力を計測している。

第 3 章「根を対象とした耐根性評価試験に用いる模擬根の作製と試験適用例」では、まず耐根性評価試験に用いる模擬根を作製している。模擬根の作製にあたり、その形状はソメイヨシノの根系の寸法の実測から、被覆材料はソメイヨシノの根の圧縮試験結果との比較からそれぞれ決定し、内部に油圧ジャッキを内蔵した模擬根を作製している。この模擬根には内部にロードセルも内蔵しており、耐根性評価試験の際に、模擬根の加圧力を測定できるようにしている。また、完成した模擬根が、第 2 章で測定されたソメイヨシノの根の肥大力である 440N/cm 以上の荷重を作用させることが可能であることを確認している。そして、この模擬根を用いて耐根性試験を行っている。アスファルト舗装の耐根性試験では、路盤層の厚さをパラメータとし、ブロックによる見切り部の耐根性試験では、ブロックの個数及び目地材料をパラメータとして耐根性試験を行っている。それらの試験結果をもとに、模擬根の耐根性評価試験への適用の有用性を示している。

第 4 章「地下茎の肥大力測定装置の開発」では、草本類植物の地下茎の肥大力測定装置を開発し、クマザサの地下茎を用いて、実際の地下茎の肥大力を測定している。測定に先立ち、肥大力測定に適した部位を調べるために、クマザサの地下茎の肥大量と伸長量の測定を行っている。その結果、先端から 10mm の部位が肥大力測定に適していることを示している。その部位で肥大力を測定した結果、ソメイヨシノと同様、夏期は蒸散による一日毎の周期的な増加減少を繰り返しながら全体的に増加し、今回作製した装置を用いた測定では、夏期の 10 日間で最大で 26.5N/cm の肥大力を計測している。

第 5 章「地下茎を対象とした耐根性評価試験に用いる模擬地下茎の作製と試験適用例」では、まず耐根性評価試験に用いる模擬地下茎を作製している。模擬地下茎は中空のパイプで作製した模擬地下茎軸部と、その周りを覆うゴム材とで構成されている。この模擬地下茎軸部に油圧を作用させ

ゴム材を膨張させることで、地下茎の肥大生長を再現している。また、作製した模擬地下茎が、第 3 章で測定されたクマザサの地下茎の肥大力である 26.5N/cm 以上の荷重を作用させることが可能であることを確認している。そして、この模擬地下茎を用いて接着強度をパラメータとしたシート防水ジョイント部の耐根性評価試験を行っている。実植物（クマザサ）を用いた耐根性試験結果と比較することで、模擬地下茎の耐根性評価への適用の有用性を示している。

第 6 章「結論」では、本研究の結論と今後の課題について述べている。

Abstract

The components used for roof garden such as path pavements, retaining walls, garden furniture, waterproofing membrane and root barrier sheet should have root resistance. Because roots act as the external force of those components and causes damage and water leak. Especially, the risk of damage caused by root growth in roof garden increase because the soil thickness of roof garden is thinner than normal planting area. To avoid the failures caused by root growth, root resistance of those components used for roof gardens should be estimated by a suitable test before actual applications of them. The purpose of this study is to develop a test method both intended woody plant and herbaceous plant to evaluate root resistance caused by thickening growth of root.

First, we measured the enlargement force of actual plant roots using a cherry tree as example of woody plant. The enlargement force increased gradually over repeating daily cycle caused by transpiration and it was found that the enlargement force reached to approximately 440N/cm during four months of summer.

Next, a simulated root for similarly reproducing the thickening growth was developed on the basis of the actual behavior of the root. It consists of two half cylinders of aluminum and a hydraulic jack inserted between them, and the whole simulated root covered with EVA sheet to give the similar mechanical property of the root.

Then, the test was carried out using the simulated root for an asphaltic pavement and concrete blocks which were used for roof garden. It was found that the simulated root was useful for evaluating root resistance of those components.

Also, we measured the enlargement force of actual plant rhizomes using a bamboo grass as example of herbaceous plant. The enlargement force increased gradually over repeating daily cycle caused by transpiration and it was found that the force reached to approximately 26.5N/cm during 10 days of summer.

Next, a simulated rhizome for similarly reproducing the thickening growth was developed on the basis of the actual behavior of the rhizome. Thickening growth of rhizome was simulated by inflated rubber tube which have similar diameter to rhizome and adding pressure using hydraulic jack.

Then, the test was carried out using the simulated root for joint parts of waterproofing membrane with different adhesive strength. It was found that the simulated rhizome was useful for evaluating root resistance of those components.

第 1 章

序 論

1.1 研究の背景

近年では、屋上緑化、壁面緑化、人工地盤上の緑化など、建造物に接して植物を利用する事例が数多く見られるようになってきた。しかし、植栽域周辺に用いられる部材は、植物からの損傷を受けないものである必要がある。特に植物の根はこれら部材に対して外力として作用し、例えば写真 1.1 に見られるような、縁石や歩道ブロックの損傷、あるいは写真 1.2 に見られるような石組壁の損傷、あるいは写真 1.3 に見られるような、耐根シートジョイント部への根の侵入などを生じさせる。これらの不具合を回避するためには、植栽域周辺に用いられる部材の根に対する抵抗性、すな



写真1.1 根による歩道舗装の損傷事例



写真1.2 根による石組壁の損傷事例

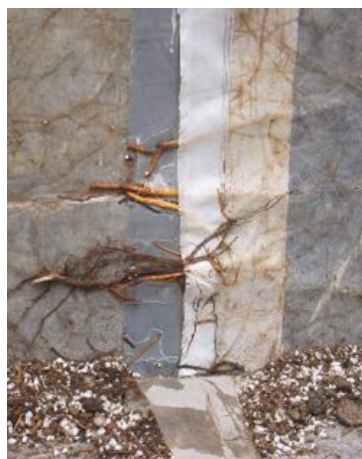


写真1.3 耐根シートジョイント部への根の侵入事例

わち耐根性を、あらかじめ調べる必要がある。

その方法として、実際の植物を用いて耐根性を評価する方法がある。特に屋上緑化用メンブレン防水工法については、JASS8 T-401 に「屋上緑化用メンブレン防水工法の耐根性試験方法（案）」として規定されている。この試験方法は屋上スラブ・ベランダ等に施工する屋上緑化用植栽の下部

に施工し、建物の防水性を確保するメンブレン防水工法に対する植物の根・地下茎による貫通抵抗性の試験方法について規定されたものであり、木本植物としてタブノキとヤシャブシ、草本植物としてクマザサとノシバを用い、試験用コンテナの中に試験体を敷き詰め、2年間ビニールハウス等の施設内で育成させ、防水層への根または地下茎の貫通および接合部からの侵入状況を観察し、貫通、侵入が認められないものを耐根性ありと評価する方法である。実際の植物を使用した試験のため、耐根性の有無の説得力が高いという反面、試験結果を得るまで長期間を要すること、試験が大掛かりとなること、植物の生育状況が試験結果に影響を与えることなどの特徴を有しており、簡便に確実に耐根性を評価できる方法が望まれている。

ここで植物の根の挙動を外力として見た時、その挙動は大きく二つに分けられる。一つは根軸方向の生長、すなわち根が前方に伸びようとする伸長生長、今一つは根軸と直交方向の生長、すなわち根が円周方向に太ろうとする肥大生長である。前者は、例えば屋上緑化の防水層、耐根シートなど障害物に突き当たると、それらを突き破ったり押し付けたりする力となる。これについては、田中、表らにより研究が行われており、特に強い押し付け力を発生するクマザサ、ノシバの押し付け力の実測を基に、根を模した模擬針を用いた耐根性評価試験方法が提案されている。一方、後者の肥大する生長は、根系の先端が部材の隙間や脆弱部に入り込み肥大生長することで、部材に損傷を及ぼしたり、損傷を拡大させたり、移動させたりする。また、その力は、木本植物の場合、例えば石を割るなどの大きな力であることが予想され、根の肥大生長による不具合は深刻化する可能性がある。しかし、この根の挙動を対象とした耐根性評価試験方法は、これまで検討されていない。

1.2 研究の目的

部材の耐根性を、短期間に簡便に確実に評価する方法として、本研究では根の挙動を機械的な力に置換した耐根性評価試験方法を提案することを目的としている。

まず実際の根の挙動、すなわち肥大生長に伴い発生する力（以後、肥大力）及び根の直径の拡大量を調べる必要がある。それらを測定する装置を作製し、木本植物として、街路樹や緑地、屋上緑化でも用いられるサクラ類の一種ソメイヨシノ（バラ科サクラ亜科サクラ属 学名：*Prunus yedoensis* Matsum.）、草本植物として、和風の屋上緑化などでしばしば用いられるクマザサ（イネ科ササ属 学名：*Sasa veitchii*）を用いて、それぞれの根の挙動を把握する。次にそれらの挙動を基に根の肥大生長を再現する模擬根及び模擬地下茎を作製し、それらを用いた耐根性評価試験方法の検討を行う。模擬根の耐根性評価試験への適用例として、屋上緑化歩行面及び屋上緑化で用いられる見切り材を例に、模擬地下茎の耐根性評価試験への適用例として、シート防水ジョイント部を例に、それぞれ試験を行い、模擬根を用いた耐根性評価試験の有用性について検討する。

なお、実際に耐根性評価を行うには、評価基準を定める必要があるが、そのためには更に多くの植物の根の肥大力を測定する必要があると考えられる。そのため、本研究では、図 1.1 に示す通り、耐根性評価方法の提案までを研究の範囲とし、評価基準の設定は範囲外とする。

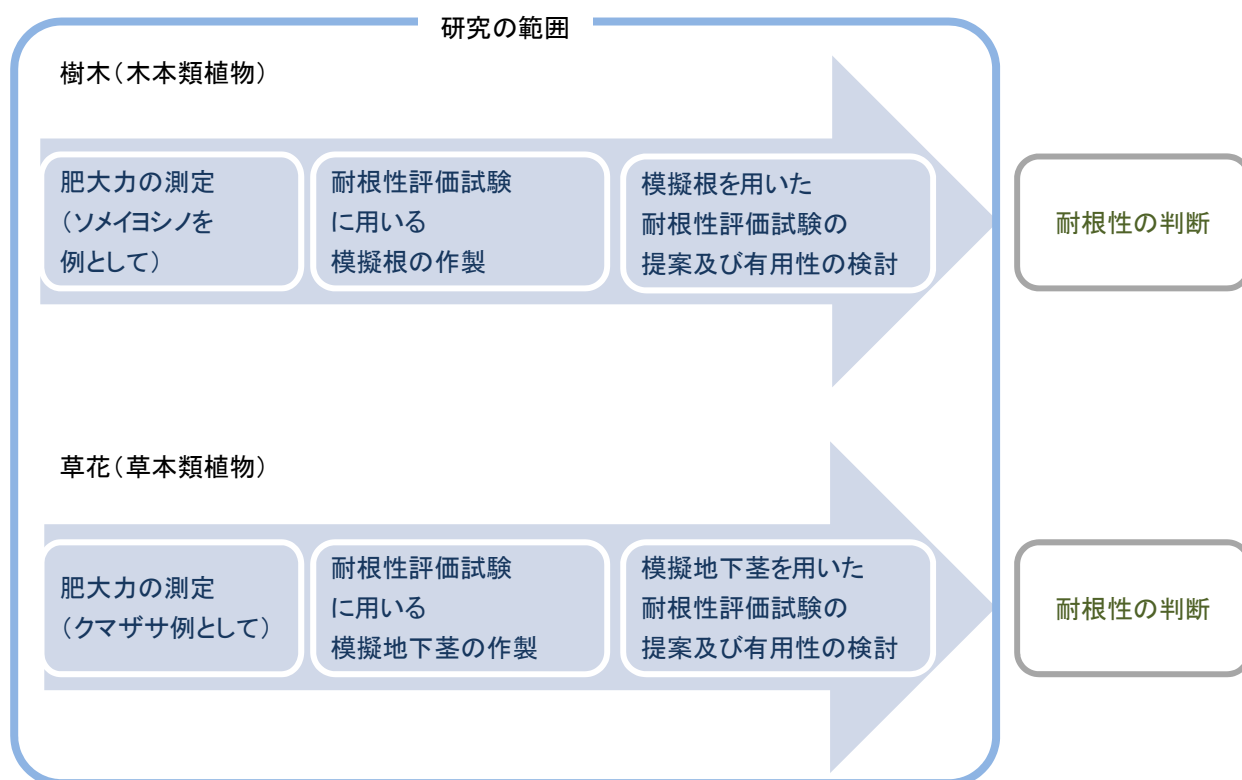


図1.1 研究の範囲

1.3 研究の構成

本研究の構成を図 1.2 に示す。

本研究では、木本類植物の根を対象とした耐根性試験方法と、草本類植物の地下茎を対象とした耐根性試験方法に大別される。先述の通り、それぞれにおいて根及び地下茎の肥大力を測定する装置を作製し、その測定を行い、それを基に耐根性評価試験に用いる模擬根及び模擬地下茎を作製し、それらの耐根性評価試験への適用について検討を行う。

「第2章 根の肥大力測定装置の開発」では、根の肥大力測定装置を開発し、ソメイヨシノの根を用いて、実際の根の肥大力を測定する。測定は冬期から夏期まで連続して行う。「第3章 根を対象とした耐根性評価試験に用いる模擬根の作製と試験適用例」では、耐根性評価試験に用いる模擬根を作製する。そして作製した模擬根を用いて、屋上緑化歩行面としてアスファルト舗装、見切り部分としてブロックによる見切り部を想定し、模擬根の耐根性評価試験への適用の有用性を検証する。「第4章 地下茎の肥大力測定装置の開発」では、地下茎の肥大力測定装置を開発し、クマザサの地下茎を用いて、実際の地下茎の肥大力を測定する。測定は冬期と夏期にそれぞれ行う。「第5章 地下茎を対象とした耐根性評価に用いる模擬地下茎の作製と試験適用例」では、耐根性評価試験に用いる模擬地下茎を作製する。そして作製した模擬地下茎を用いて、防水シートジョイント部を想定し、模擬地下茎の耐根性評価試験への適用の有用性を検証する。

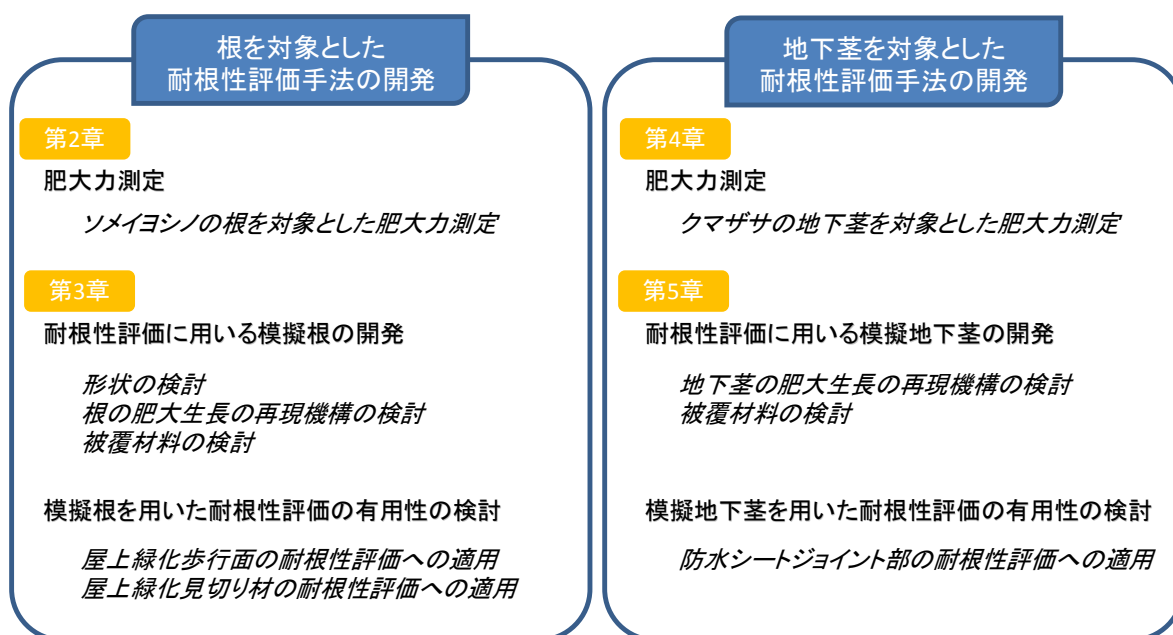


図1.2 論文の構成

1.4 既往の研究

植物学の分野で、根の伸長生長に関する研究は古くから行われている。伸長生長量を測定したもの、伸長生長の際に発生する、根の押し付け力を測定したもの、土壌環境を変えた際の伸長生長の違いなど、様々の植物を用い研究が行われてきた。

G. C. HEAD

「Studies of Diurnal Changes in Cherry Root Growth and Nutational Movements of Apple Root tips by Time-lapse Cinematography」

Annals of Botany, N.S., Vol.29, No.114, pp.219-224, 1965

(概要)

セイヨウザクラとリンゴの木の根の先端の伸長を、微速度フィルムにより撮影し分析したものである。セイヨウザクラの木の根では一日の伸長の変化を観察し、その結果 16:00~23:59 の間に最も早く伸長し (約 0.44mm/h 程度)、8:00~16:00 の間に最も伸長が遅くなること (約 0.17mm/h) を実験結果より示している。リンゴの木の根では2日半の伸長の変化を観察し、土中で伸長する際、周期的な動きを示しながら、2日半で約 7mm 伸長したことを実験的に示している。

G. C. Aggrwal and S. S. Praihar

「A simple technique to determine axial root growth force」

Plant and Soil, 42, pp.485-489, 1975

(概要)

ヒヨコマメとトウモロコシの苗木の幼根を対象に、根軸方向の押し付け力を、開発した上皿天秤を応用した装置を用いて測定している。最大の押し付け力は、ヒヨコマメは $14.2 \pm 3.6\text{g}$ 、トウモロコシは $28.6 \pm 7.7\text{g}$ で、最大の生長の圧力は、ヒヨコマメは $0.45 \pm 3.8\text{MPa}$ 、トウモロコシは $1.09 \pm 5.9\text{MPa}$ であったことを実験的に示している。

A. G. Bengough and C. J. MacKenzie

「Simultaneous measurement of root force and elongation for seedling pea roots」

Journal of Experimental Botany, Vol.45, No.270, pp.95-102, 1994

(概要)

開発した天秤を応用した押し付け力測定装置を用いて、エンドウマメの幼根を対象に押し付け力を測定している。この装置は押し付け力を力変換機により測定し、滑車装置の反対側にある釣り合いおもりに、重りを加えたり除いたりすることで力を調整している。押し付け力は 125mN に及び、

これは 0.1MPa の成長圧力に相当することを示している。また、機械的抵抗による根の直径の増大及び、根の成長圧力の減少を確認している。

Lawrence J. Clark and Peter B. Barraclough

「Do dicotyledons generate greater maximum axial root growth pressures than monocotyledons?」

Journal of Experimental Botany, Vol.50, No.336, pp.1263-1266, 1999

(概要)

開発した装置により、双子葉植物と単子葉植物の根の押し付け圧力を測定している。対象とした植物は双子葉植物としてエンドウ、ルピナス、ひまわり、単子葉植物としてトウモロコシ、コムギ、オオムギ、イネである。それぞれの幼根の最大押し付け圧力は、エンドウは 0.58MPa、ルピナスは 0.41MPa、ひまわりは 0.24MPa、トウモロコシは 0.43MPa、コムギは 0.49MPa、オオムギは 0.49MPa、イネは 0.34MPa であったことを実験的に示している。

COLIN D. HANBURY and BRIAN J. ATWELL

「Growth Dynamics of Mechanically Impeded Lupin Roots: does Altered Morphology Induce Hypoxia?」

Annals of Botany, 96, pp.913-924, 2005

(概要)

ルピナスの根を対象に、根周りの土壌を 15KPa で圧密した際の、根の形態的な変化を、主に酸素との関係という観点から定量的に述べている。前半は、圧密と根の伸長及び直径に関する測定結果が述べられている。圧密後 10 時間以内の根の伸長は、1.1mm/h から 0.4mm/h まで減少した。それに対し圧密しない場合は 1.0mm/h から 1.3mm/h に増加した。また、根軸と直交した方向の生長は、圧密すると根の直径が増加し、根の頂点から 9mm の部分において、圧密した場合は直径が 0.95mm 程度であるのに対し、圧密しない場合は 0.55mm 程度であったことを実験から明らかにした。

田中享二，表淳珠，宮内博之

「防水層に対する地下茎先端の押し付け力測定装置の開発と測定結果」

日本建築学会構造系論文報告集、第 602 号、pp.67-71, 2006

(概要)

屋上緑化用防水の耐根性評価のため、根系がどの程度の力で防水層や耐根シートに侵入してくるのかを調べたものである。まず、ロードセルを使用した、地下茎の侵入しようとする力を測定する

装置を作製した。そして特に侵入しようとする力が強いと考えられるクマザサとノシバの地下茎を用いて、その押し付け力と伸長量を測定したものである。2週間の測定で得られた押し付け力は、クマザサの場合最大で 9.8N, ノシバの場合最大で 6N であった。また、2週間行われた伸長量の測定では、クマザサの場合最大で 35mm, ノシバの場合最大で 38mm であった。

Kyoji TANAKA, Saori ISHIHARA, Soonju PYO, Hiroyuki MIYAUCHI

「DEVELOPMENT OF TEST METHOD FOR EVALUATING ROOT RESISTANCE OF WATERPROOFING MEMBRANE」

Proceedings of the Eleventh International Conference on Durability of Building Materials and Components, 11dbmc, Volume Three, pp.1047-1056, 2008

(概要)

屋上緑化用防水の耐根性評価のため、根系がどの程度の力で防水層や耐根シートに侵入してくるのかを調べたものである。まず、ロードセルを使用した、地下茎の侵入しようとする力を測定する装置を作製した。そして特に侵入しようとする力が強いと考えられるクマザサとノシバの地下茎を用いて、その押し付け力と伸長量を測定したものである。2週間の測定で得られた押し付け力は、クマザサの場合最大で 9.8N, ノシバの場合最大で 6N であった。また、2週間行われた伸長量の測定では、クマザサの場合最大で 35mm, ノシバの場合最大で 38mm であった。

肥大生長に関する研究は、肥大生長量を測定した研究は古くから行われてきているが、肥大力を測定した研究は、筆者の知る限り見当たらない。

M.G.HUCK, BETTY KLEPPER and H.M.TAYLOR

「Diurnal Variations in Root Diameter」

Plant Physiology, 45, pp.529-530, 1970

(概要)

一日におけるワタの木の根の直径の変化を微速度撮影法により、主に収縮に着目し観察している。測定に使用した根の直径は 0.4mm である。乾燥した晴天日の日中における根の収縮は、直径の最大値の 60%であった。この収縮は土壌の含水率と蒸散の両方に関係しており、根の水分吸収より蒸散が大きくなった時に、根の収縮が起こると推察している。また、夜間には根は水のフィルムで覆われ、明け方にかけて、水のフィルムが徐々に消えていくという現象を確認している。

Michel Genard, Svetlana Fishman, Gilles Vercambre, Jean-Gerard Huguet, Claude Bussi, Jacques Besset and Robert Habib

「A Biophysical Analysis of Stem and Root Diameter Variations in Woody Plants」

Plant Physiology, Vol.126, pp.188-202, 2001

(概要)

幹と根の直径の変化の包括的なシミュレーションを開発している。このシミュレーションは気温、溶質の蓄積、キシレンの蓄積、水分ポテンシャルにより、直径の変化を計算している。論文ではシミュレーションと実測の比較のため、実測データも記載されている。実測はセイヨウスモモの根を用いて行われている。測定は9月2日～16日までの2週間行われている。根の直径は一日毎の周期的な変化を繰り返しながら、測定開始後2週間後には測定開始時と比べ3%程度増加していた。またシミュレーションを行ったところ、シミュレーションと実測結果はよく一致しており、このモデルにより膨圧や浸透圧の変化が、キシレン水ポテンシャルの変化より小さいことが予測できるとしている。

また、根の肥大生長を対象とした部材の耐根性に関する研究は、舗装の分野でいくつか行われている。

岩田彰隆, 木田幸男, 甲野毅, 荏住昇

「ケヤキ街路樹の根系生長が歩道に与える影響」

ランドスケープ研究, 第59号, pp.49-52, 1996

(概要)

街路樹として植栽されているケヤキ167本を対象に、その歩道に与える影響を調査している。根株から縁石までの距離が50cm以内の範囲では根株の肥大生長により縁石が移動したり、盛り上がったたりしていることを確認している。また、そのうち5本のケヤキについて、トレンチ枠法で根系調査を行っている。トレンチ断面の根系分布数は大径木ほど表層に多く、歩道はその間隙に侵入した根系の肥大生長により盛り上がることを示している。

大川秀雄, 栗原翔馬

「植物による歩道舗装の破壊に関する検討」

舗装, 42-7, pp.21-24, 2007

(概要)

新潟市内の歩道舗装において、様々な街路樹の根元にある舗装の状態を調査し、その破壊状況を樹種、高さ、幹囲、舗装の種類、新しさ、植柵の大きさにより分類し、舗装の持ち上げ高さの測定を行っている。その結果から、樹種の使い分け、コンクリート舗装の使用、植柵の拡幅による舗装の破壊防止対策が有用であることを示している。

松江正彦，飯塚康雄

「樹木の根上がり対策に関する調査」

国土交通省国土技術政策総合研究所緑化生態研究室報告書，第 21 集，2006

(概要)

国営公園を対象とし、樹木の根系が植栽地周辺の舗装等の構造物に及ぼす影響を調査している。樹木の形状，植栽環境より被害状況を整理し、一部で根系の調査を行い、被害発生要因を検討している。被害の要因としては、植栽基盤が狭いため、縁石下部に根系が侵入できる空間があるため、アスファルト舗装の場合は、樹種による根の伸長特性を示しながら舗装に適応させているための三点が挙げられている。

第2章

根の肥大力測定装置の開発

2.1 はじめに

樹木の根の肥大生長による不具合事例は、身近なところでは歩道舗装等で散見される。前章の写真 1.1 ではブロック舗装が樹木の根の肥大生長により不陸が発生し、部分的にブロックが剥離し、根や土壌が露出している状況が見られる。また、アスファルト舗装が根の肥大生長により持ち上げられており、表面には亀裂が発生している部分もある。また、写真 2.1 から 2.4 に見られる不具合は、健常者でもつまづく場合もあり、特に子供や高齢者、障害者にとっては、重大な怪我を引き起こす原因になり得る。また、美観上でも不具合となり、特に屋上緑化の場合は美観性も重視されるため、これらの不具合は未然に防ぐ必要がある。

しかし、どの程度の力で、これらの部材を持ち上げたり、移動したり、損傷を及ぼしているか、という点については、これまで検討が行われてきていない。根の耐根性評価手法を検討する上では、まず、根の肥大に関する情報を把握しておくことが必要不可欠である。

これらを背景に、本章では根の肥大に関する情報、すなわち肥大する量（以後、肥大量）と肥大生長に伴い発生する力（以後、肥大力）を、実際の植物を用いて調べようとするものである。



写真2.1 縁石とアスファルト舗装の剥離



写真2.2 アスファルト舗装の分断



写真2.3 根元保護材の持ち上がり



写真2.4 コンクリート板の持ち上げ

2.2 根の肥大力測定装置の開発

植物の根は円周方向に全体的に肥大生長すると考えられるが、前章の写真 1.1 及び写真 2.1 から 2.4 に見られる不具合は、主に根の直径方向の拡大に起因することが多い。そのためここでは、直径方向の根の肥大力を測定する装置を開発した。

測定装置概要を図 2.1 に示す。根の上下を幅 20mm のアルミニウム製の角棒で挟み、根が肥大生長する際にアルミニウム製の角棒を押し付ける力を、アルミニウム製の角棒の上部に左右対称に取り付けたロードセル（ミネベア㈱社製ビーム型ロードセル CBE1 型）にて測定する構成である。なお、角棒とロードセルは直径 8mm の全ネジで連結されており、角棒とロードセルの上下はそれぞれボルトで固定され、根の拡大は拘束された状態で測定される。

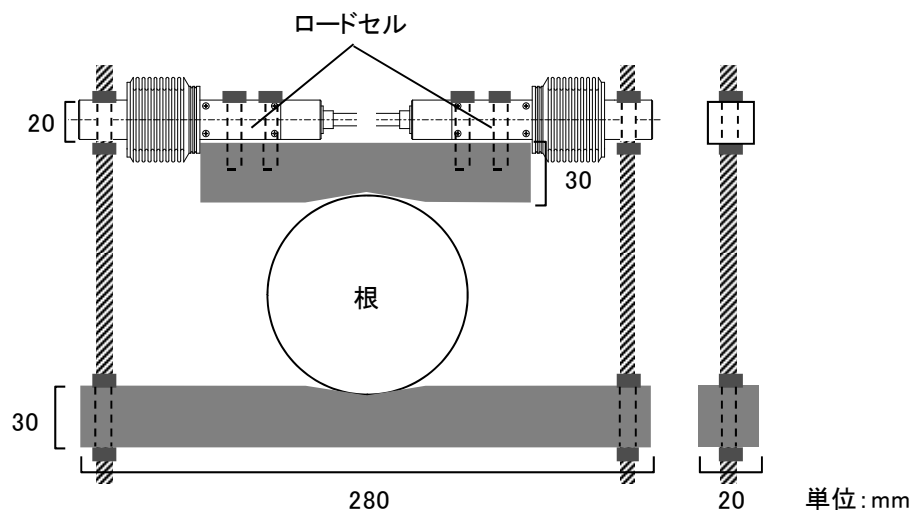


図2.1 肥大力測定装置

2.3 根の肥大力測定の概要

測定対象樹木は東京工業大学長津田キャンパス内のソメイヨシノ（樹齢約 21 年、樹幹の胸高周囲 138cm）である。ソメイヨシノは街路樹や公園等の緑地で多く植栽されており、根による不具合事例も散見される。また屋上緑化でも植栽されることのある樹木であるということから、根の肥大力測定の一例として、ソメイヨシノを選択した。

この樹から約 2m 離れた位置を掘り起こし、測定装置を取り付けた。測定装置を取り付けた部分の根の直径は、約 8.8cm である。根の表面は凹凸があるため、装置と根の接着を確実にするため、装置のアルミニウム角棒と根の間にできる部分的隙間にエポキシ樹脂を充填し、装置と植物を密着させた。写真 2.5 に測定に用いたソメイヨシノ、写真 2.6 に肥大力測定装置の設置状況を示す。今回の測定では根の周囲は土壌のない状態となっているが、露出部分の過度の乾燥を避けるため、吸水性のある紙を多層巻きつけ、できるだけ土壌内に近い状態とした。またそれらを保護するため、装置上方に日射、雨、風除けのため、金属板による覆いを取り付けた。

測定は冬期から夏期にかけて行った。わが国では夏期に大きな生長が期待され、冬期は停滞することが予測されたためである。冬期は 2008 年 12 月 9 日～2009 年 3 月 31 日、夏期は 2009 年 4 月 1 日～2009 年 8 月 5 日で測定を行った。



写真2.5 測定に用いたソメイヨシノ



写真2.6 肥大力測定装置取り付け状況

2.4 根の肥大力測定結果

夏期と冬期の測定結果を図 2.2 に示す。冬期はほとんど肥大力の変化が見られないのに対し、夏期の肥大力は、一日毎の小さな周期的な変化を繰り返しながら、4月中旬より全体的に増加する傾向が見られた。しかし7月下旬からは、増加が緩慢となっている。測定期間中の全体の増加量は、約 440N/cm に達した。これは、根の内部の細胞が木部を形成していく一方で、その外側の形成層で細胞分裂がさかんとなり、根軸に直交する方向に細胞を送り出し肥大生長が起こる、二次肥大生長と呼ばれる生長に依るものであると考えられる。この生長に伴い力を発生しているものと推察される。

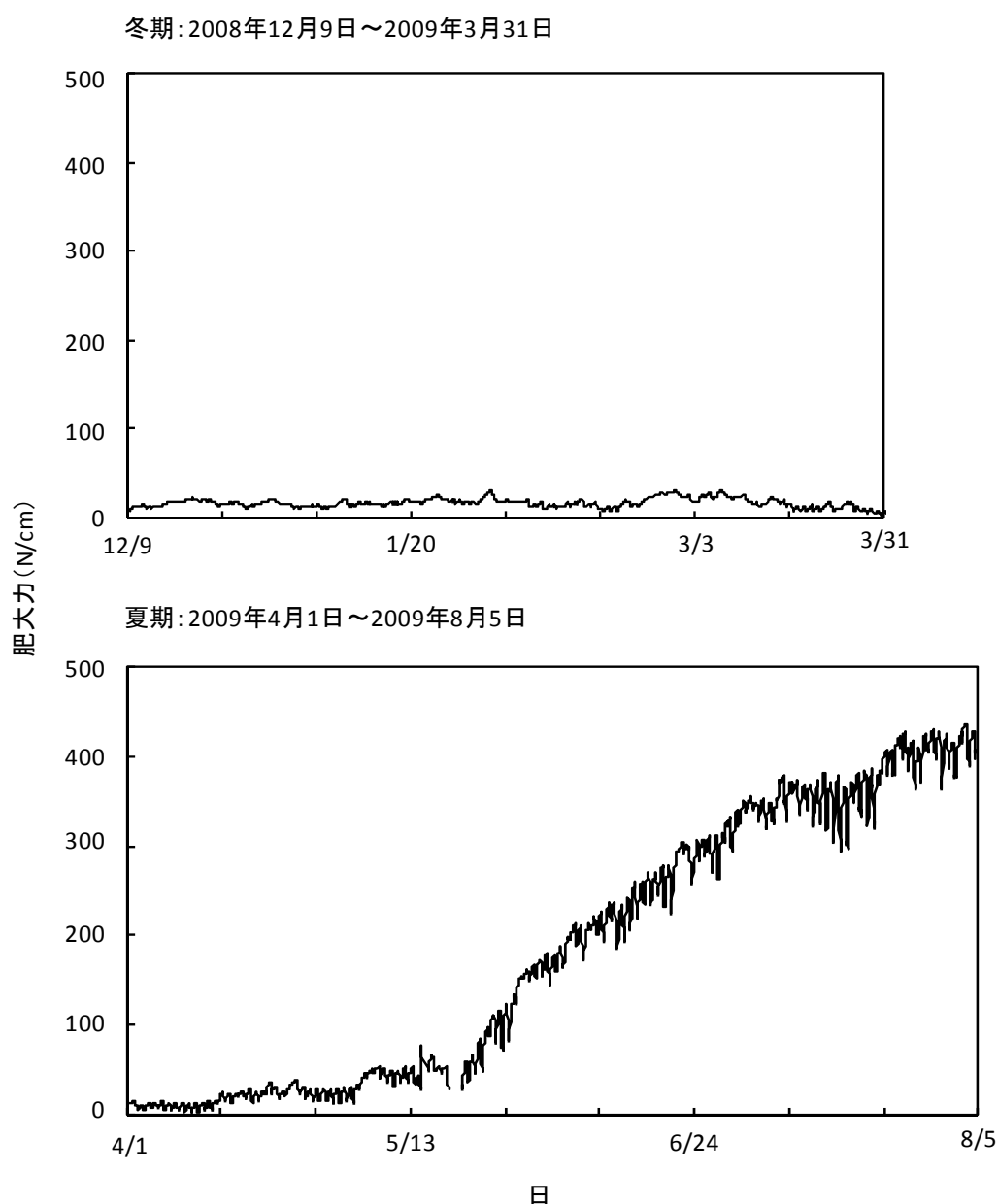


図2.2 肥大力測定結果

2.5 根の直径変化量測定装置の開発

肥大力の発生は、根が肥大生長することに起因する。そのため根がどの程度肥大生長するのかを明らかにする目的で、根の直径変化の測定を行った。

肥大力測定装置と同様に、直径方向の根の肥大量を測定する装置を開発した。

測定装置概要を図 2.3 に示す。根の上下をアルミニウム製の角棒で挟み、角棒の間の変位を、その両端に取り付けた変位計（新光電機㈱社製変位センサ LV5 型）で測定する構成である。今回作製した装置では、変位計の可動範囲は 10mm であり、従って約 10mm までの直径の変化が測定可能である。なお、肥大力測定の時には、根の拡大は拘束された状態で測定されているが、直径変化量の測定は、拘束無し状態で測定した。

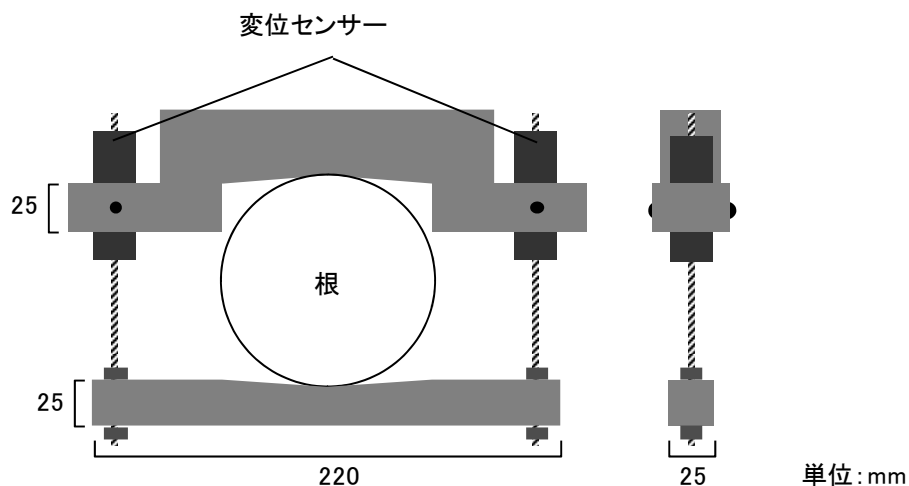


図2.3 根の直径変化量測定装置

2.6 根の直径変化量測定の概要

測定対象樹木は、肥大力測定に使用したものと同様の東京工業大学長津田キャンパス内のソメイヨシノ（樹齢約21年、樹幹の胸高周囲138cm）とした。この樹から約80cm離れた位置を掘り起こし、測定装置を取り付けた。装置を取り付けた部分の根の直径は約7.5cmである。肥大力測定同様、装置のアルミニウム製の角棒と根との間の隙間にエポキシ樹脂を充填し、装置と植物を密着させた。写真2.7に測定装置の設置位置と設置状況を示す。装置上方には肥大力測定と同様、日射、雨、風除けのため、金属板による覆いを取り付けた。また露出された根の表面は、肥大力測定と同様に、吸水性のある紙を多層巻きつけ、できるだけ土壌内に近い状態とした。

測定は冬期から夏期にかけて行った。わが国では夏期に大きな生長が期待され、冬期は停滞することが予測されたためである。冬期は2008年12月9日～2009年3月31日、夏期は2009年4月1日～2009年8月5日で測定を行った。



写真2.7 肥大量測定装置取り付け状況

2.7 根の直径変化量測定結果

夏期と冬期における測定結果を図 2.4 に示す。冬期は直径変化がほとんど見られないのに対し、夏期の直径変化は肥大力同様、一日毎の周期的な変化を繰り返しながら、4月中旬以降から全体的に増加する傾向が見られた。しかし7月下旬以降は、直径変化量の増加が緩慢となっている。測定期間中の全体の増加量は、約 0.42mm であり、直径に対する直径変化量の割合は約 0.6%であった。これは肥大力同様、根の二次肥大生長に依るものと考えられる。

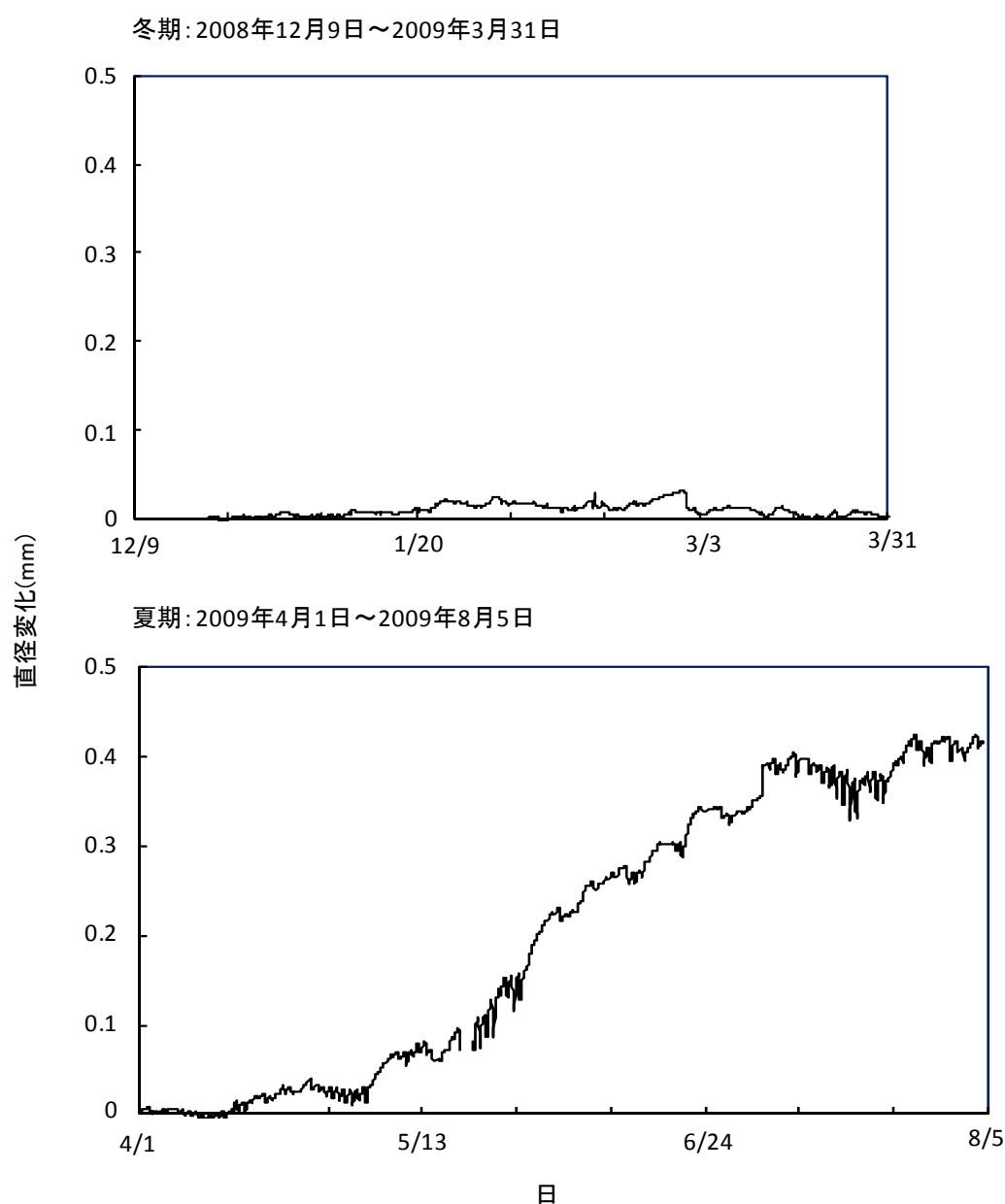


図2.4 根の直径変化量測定結果

2.8 天候別の根の肥大力及び直径の日変化と樹液流速との関係

前述の通り4月中旬以降の肥大力及び直径変化量は、一日毎の小さな周期的な変化を繰り返していた。その周期性は天候の影響を受けており、晴天日、曇天日、雨天日の周期性はそれぞれ異なる。これは、蒸散（木部中の水が葉の気孔から蒸発する現象）に起因する、木部の膨張収縮によるものであると考えられる。そこで、樹液流速の測定を行った。樹液流速測定は、植物の蒸散を調べるために広く用いられている手法である。樹液流速とは根から茎を通じて葉の方向に流れる水の流速のことであり、樹液流速が速い程蒸散が活発に行われており、樹液流速が0に近づくと蒸散が止まる事を示すものである。

樹液流速の測定は、環境条件に影響を及ぼすことなく測定可能な、Granier法を用いて行った。Granier法とは作物・林学・農業気象学等の分野で広く用いられている測定方法である。写真4.8の右に示すように、一対のニードルを樹幹の中に差し込んで、樹液の流速を測定する方法であり、下方に差し込んだニードルに熱を加えた際、そのニードル周囲の樹液の温度と、上方に差し込んだニードル周辺の樹液の温度を熱電対により測定し、その温度差により樹液流速を算出する。

樹液流速測定状況と測定位置を写真2.8に示す。測定位置は北側の高さ130cmの位置とした。直径2mm長さ20mmの一対のニードルを15cmの間隔で樹幹の中に差し込んだ。ニードル周辺は雨水の浸入を防ぐために防水パテで覆った。また雨、日射、風除けのため、測定域全体に覆いを取り付けた。

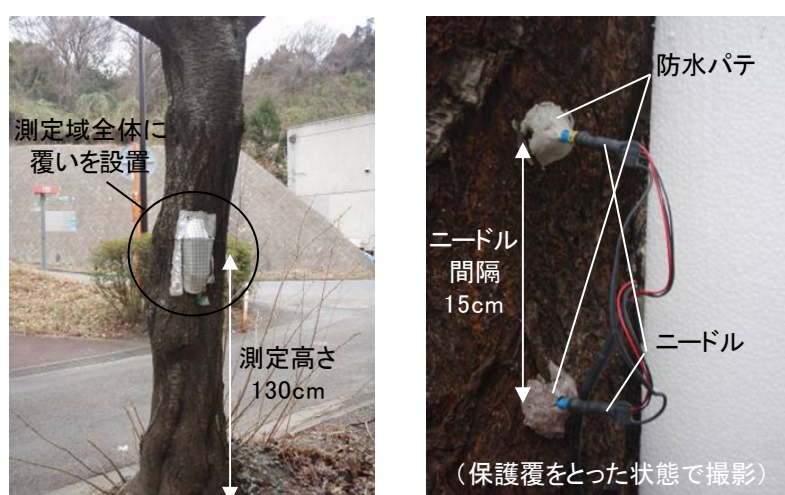


写真2.8 樹液流速測定状況と測定位置

夏期及び冬期の、異なる天候時の樹液流速と肥大力及び直径変化量の一日の変化を図2.5に示す。また樹液流速は気象条件の影響を受けるため、併せて温度、日射量の関係も同図に示す。なお、温度は今回の測定地である横浜の気象庁のデータを、全天日射量は、横浜の気象台では測定されて

いないため、今回の測定地から一番近隣の東京の気象庁のデータを引用した。ここで、肥大力及び直径変化量は、各日における午前0時を基準とし、その変化量として表してある。

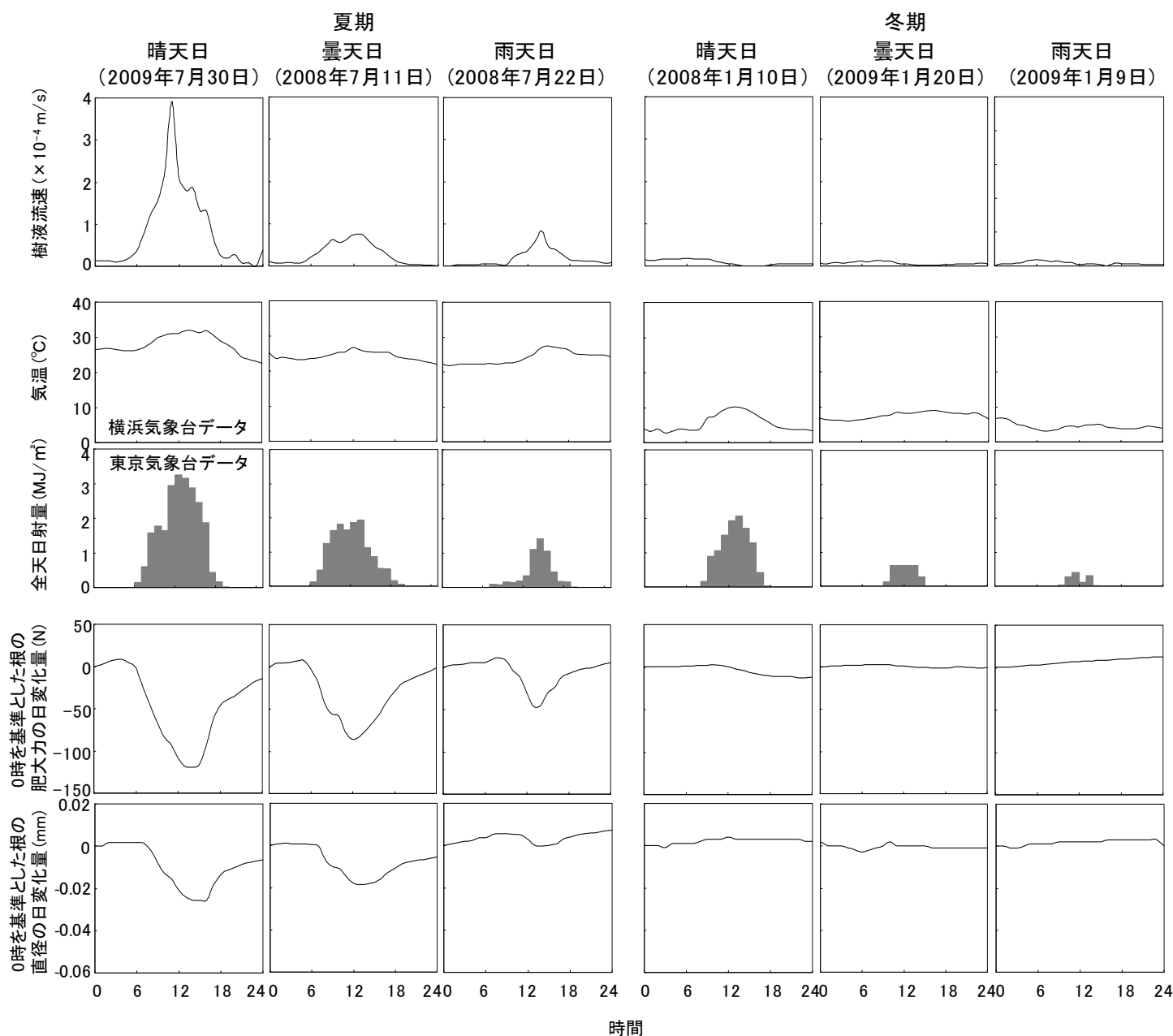


図2.5 根の肥大力及び直径と樹液流速の関係

夏期の樹液流速は、明け方から日中にかけて増加し、夜間にかけて減少している。すなわち日中に蒸散が活発に行われ、夜間は緩慢となっていることを示している。肥大力及び直径変化量は樹液流速と連動しており、樹液流速が増加するに従い肥大力及び肥大量は減少し、樹液流速が減少するに従い肥大力及び直径変化量は増加する傾向を示している。夏期の晴天日と曇天日を比較すると、樹液流速の日変化量が曇天日の方が小さくなっており、それに伴い肥大力及び直径変化量の日変化

量も小さくなっている。また雨天日は樹液流速の変化が小さく、肥大力及び直径変化量は極めて緩慢となっている。

冬期の樹液流速は天候によらずほとんど変化が見られない。そのため肥大力及び直径変化量もそれに追従し、ほとんど変化が見られない。

2.9 まとめ

木本類植物の根の肥大力測定について、以下の知見が得られた。

- 1) 肥大力装置を開発し、それらの測定を可能にした。作製した装置を用いて、ソメイヨシノの根を例とした肥大力の測定で、夏期において約 440N/cm の肥大力の増加を観測した。
- 2) 根の直径変化量についても直径変化の測定装置を開発し、夏期において約 0.46mm の直径の拡大を観測した。
- 3) 夏期の肥大力及び直径変化量は、一日毎の周期的な変化を繰り返しながら全体的に増加する傾向であることを示した。そして樹液の流速測定により、一日毎の周期的な変化は、蒸散に起因する膨張収縮によるものであることを示した。

第3章

根を対象とした耐根性評価試験に用いる 模擬根の作製と試験適用例

3.1 はじめに

本章では、耐根性評価試験に用いる模擬根の作製と試験適用例について述べる。

屋上緑化の場合、土壌の厚さは植物の生育を妨げない程度まで薄く施工される場合がある。この場合、植物の根による不具合発生の可能性が、十分な土壌厚を持つ一般的な緑地より高くなると考えられる。また、根による不具合が発生すると、一般的には補修し使用するが、屋上緑化では、これらの部材を補修する際、植物を傷めたり、その下側の防水層や耐根シートを傷つけるなどの事故を招く恐れがあり、これらの耐根性を事前に試験、評価しておく必要がある。ただこれらは、部材単独での評価では不十分なことが多く、土壌等も含めた状態での評価が望まれる。その手段として実際の植物を使用して耐根性評価試験を行うことも可能であるが、試験が大掛かりとなり、さらに結果を得るためには長期間を要する。そして結果は植物の生育状況の影響を受けるといった問題点が残る。評価を確実に、しかも簡便に短期間で行うためには、根の挙動を模した模擬根を使用すると方法が有用である。

前章で、木本類植物の根の肥大力の一例としてソメイヨシノの根の肥大力を測定した。本章ではその測定結果を基に、植栽域周辺に用いられる部材の耐根性評価に利用できる模擬根を開発する。また模擬根を用いた耐根性評価試験の適用例として、屋上緑化の舗装面及び屋上緑化で使用される見切り材を想定し、模擬根利用の有用性について検討する。

3.2 対象とした樹木と根の形状

模擬根作製のためには、実際の根の形状と力学的性質の情報が必要である。ここでは、街路樹や時には屋上緑化でも使用頻度の高いソメイヨシノを選定し、その根の形状と力学的性質について調べた。

写真3.1は今回各種測定に使用した、東京工業大学すずかけ台キャンパス内の樹齢約21年のソメイヨシノの根の部分である。図3.1にその根系の一部のスケッチとおおよその寸法を示す。樹幹から数本の太い支持根が横に伸び、それが枝分かれし細くなっている。また途中から側根が生じている。これらの中で歩道などの舗装や外構部材、緑化用資材に、歩行上や美観上の不具合を生じさせているものは、ほとんどが幹から近い数m程度の範囲にある主となる根部分である。その部分の直径は10cm程度から数十cmであった。



写真3.1 研究に用いたソメイヨシノの根系
(樹齢21年、樹幹の胸高周囲138cm)

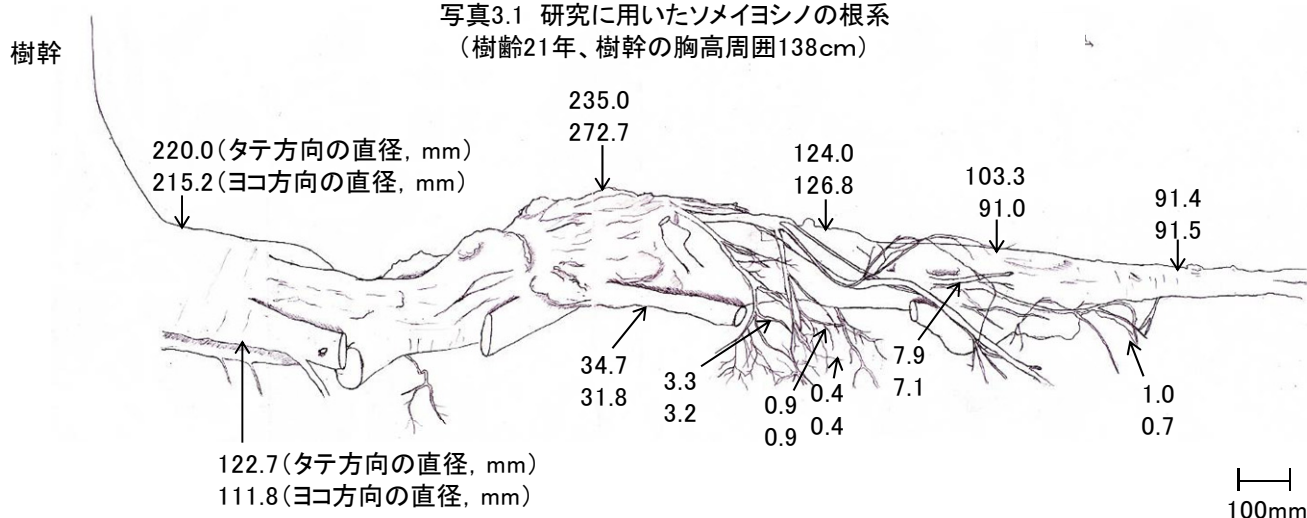


図3.1 測定に使用したソメイヨシノの根系の寸法(タテ方向の直径, ヨコ方向の直径)

3.3 根の断面と力学的性質

ソメイヨシノの樹幹から約 1.5m の位置における根の断面（直径約 10cm）を写真 3.2 に示す。根の断面は基本的に円形もしくは縦長の楕円形である。ただ根は幹や枝と違って、すべての部分にわたってきれいな形状をしているわけではなく、部分的にはいびつになっているところもある。

この根の円形に近い部分を何ヶ所か切り出し、その力学的性質を圧縮試験により測定した。試験体とした根の直径は約 10cm、長さは 3cm であり、1mm/分の速度で加圧した時の荷重と変形の関係を調べた。なお、試験体数は 5 個とした。測定状況を写真 3.3 に、測定結果を図 3.2 に示す。圧縮が進行するにつれて荷重は単調に増加している。なお模擬根開発にはそれほど大きな変形のところまでのデータは必要としないため、変位量は 2mm までで測定を打切った。



写真3.2 力学的性質測定に用いたソメイヨシノの根の断面

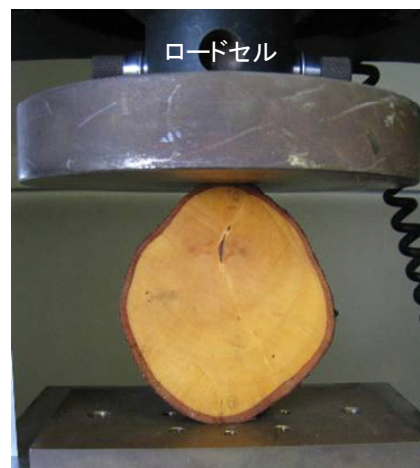


写真3.3 ソメイヨシノの根の断面の圧縮試験状況
(1mm/分, 20℃)

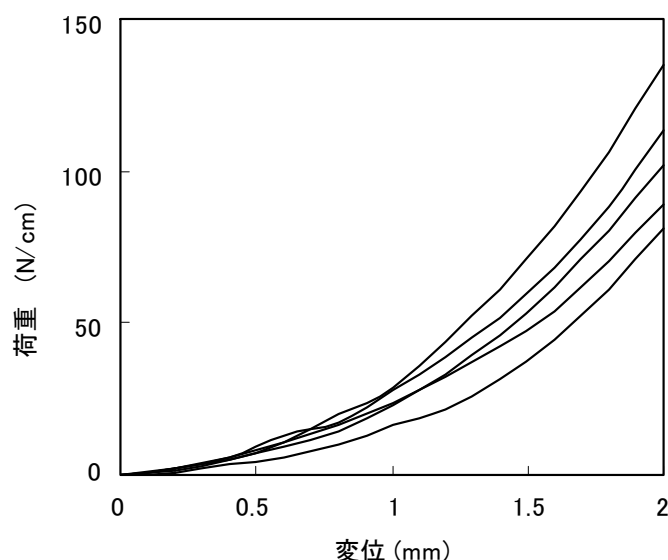


図3.2 ソメイヨシノの根の圧縮試験結果

3.4 模擬根の作製

3.4.1 模擬根の基本的な考え方

前章の測定で、 440N/cm の肥大力を観測した。そのため、模擬根としては最低でもこの程度の力を作用させることができる必要がある。ここで実際の根では円周方向に肥大するため、模擬根全体を拡大させて力を作用させることが望ましいが、不具合事例は主に下から持ち上げられること、もしくは片側に押し広げることによる損傷が多く、単純に片側からの加圧だけでも耐根性の評価はできそうに思える。従って、ここでは機構の簡便さを考慮して、一軸方向に加圧する機構を採用することとした。また試作目標とする根の太さに関しては、大きな損傷を及ぼしている部分の代表として「3.2 対象とした樹木と根の形状」の観察結果を踏まえ、直径 10cm した。

3.4.2 機構と構成

具体的な機構として図 3.3 及び写真 3.4 に示すように、根の断面を模擬した上下二つのアルミニウム製の半円柱を、小型油圧ジャッキ（エナパック社製 RSM-100）を介して押し上げることにより、根の肥大を模擬するものとした。なお、使用した小型油圧ジャッキは最大ストロークが 10mm であり、従って模擬根は原理的には最大 10mm まで肥大させることが可能である。模擬根内部には荷重測定のロードセル（三菱長崎機工社製 MTC302A 型 30000N ）が取り付けられており、試験中の模擬根が発生させる圧力を測定できるようにしてある。

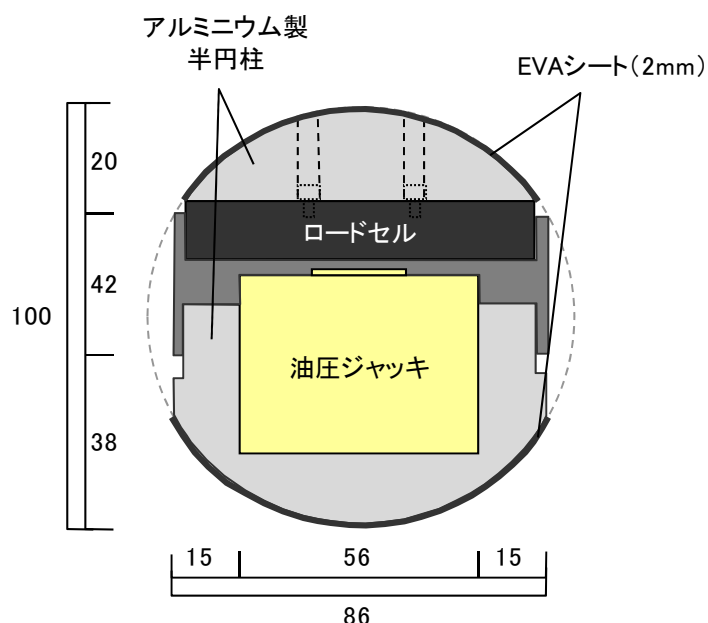


図3.3 模擬根の断面

単位:mm

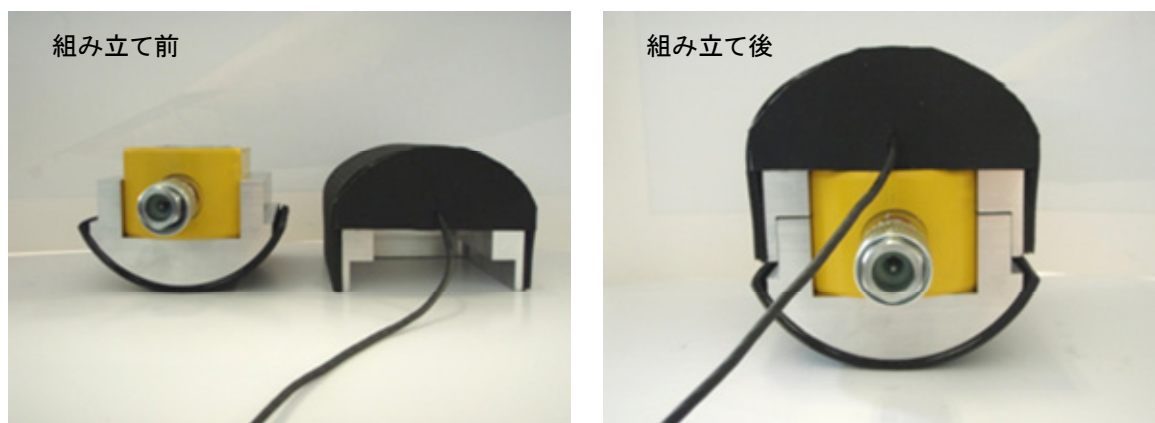


写真3.4 組み立て前の模擬根と組み立て後の模擬根

さらに実際の根と似た力学的性質とさせるため、アルミニウム材単体だけでは硬すぎるため、表面を弾力性のある材料で被覆することにより、力学的性質を近似させることとした。

この被覆材料選定のために、前述の油圧ジャッキを挟み込んだアルミニウム製の円柱の外側に、各種弾力のあるシートを巻きつけ、実際のソメイヨシノの根の圧縮試験と同様に（測定部分長さ3cm）1mm/分で圧縮し、荷重と変形との関係を調べた。被覆材料決定のために、選定したシート状材料を表3.1に示す。

表3.1 被覆材選定のために調べたシート

材料	厚さ (mm)	硬度*	重量 (kg/m ²)
コルクシート	2	51.5	0.59
ネオプレンゴムシート	3	63.2	3.89
EVAシート (エチレン・ビニル・アセテート)	2	27.2	0.35
	3	28.3	0.51
	5	29.4	0.88
スポンジシート	5	7.4	0.47
補強布入りEPDMゴムシート	1.5	66.1	1.68

*ゴム・プラスチック硬度計TYPE Aを用いて測定

測定結果を図3.4に示す。変位量の増加に伴い、スポンジシート、EVAシート、コルクシート、EPDMゴムシート、補強入りEPDMゴムシートの順に荷重が大きくなる傾向が見られた。この中で、EVAシート（2mm）を巻きつけた場合の圧縮時の挙動が、図3.2で示した実際の根の圧縮時の挙動と近似している。そのため、アルミニウム製の半円柱全体をEVAシート（2mm）で被覆し、模擬根とすることとした。完成した模擬根と加圧システムを写真に示す。なお、模擬根の直径は10cm、長さも10cmとして作製した。

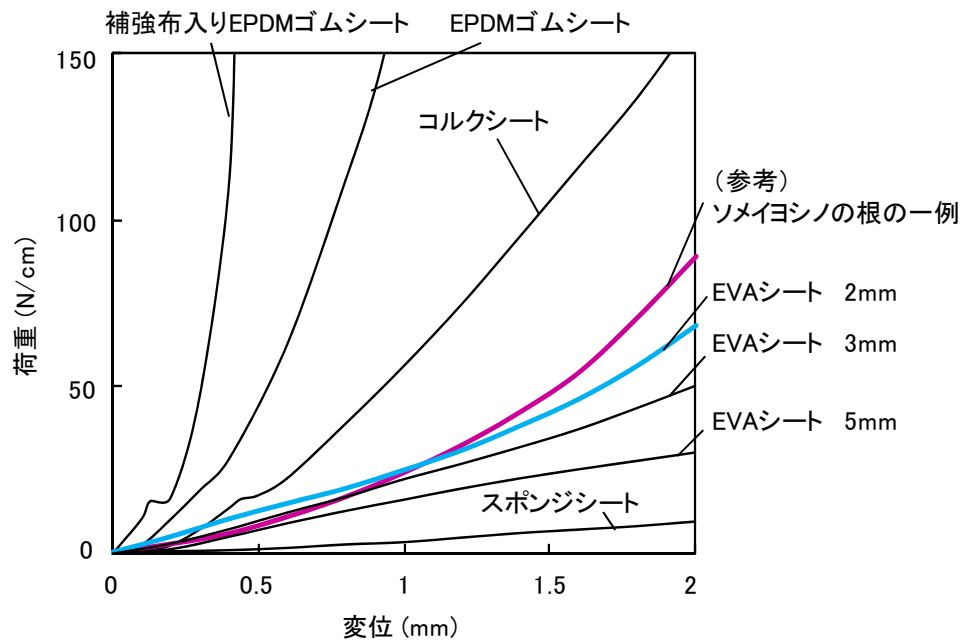


図3.4 各種被服材料を巻きつけた時の模擬根の圧縮試験結果
(1mm/分, 20°C)

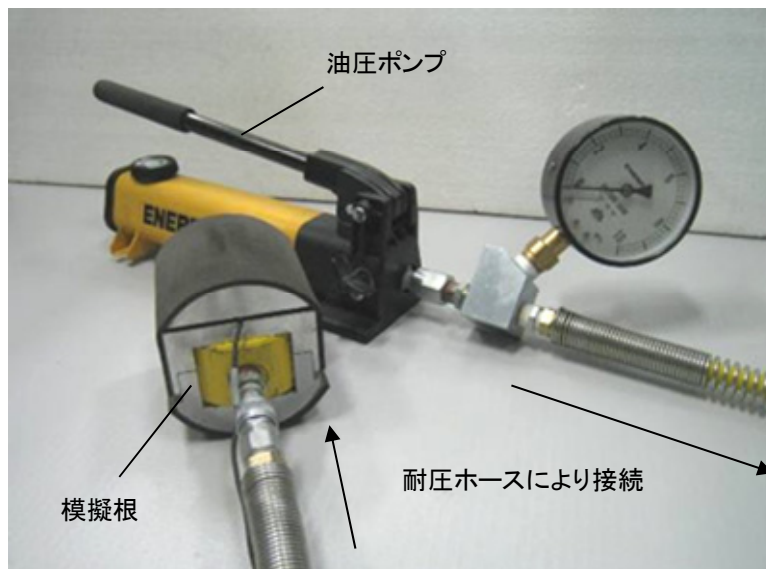


写真3.5 完成した模擬根と加圧のための油圧ポンプ

3.4.3 ソメイヨシノの肥大力の再現の確認

模擬根が、ソメイヨシノの肥大力測定で得られた 440N/cm 以上の荷重を作用させることが可能であるかを確認するため、写真 3.6 に示すように、模擬根をソメイヨシノの根の肥大力を測定した装置に挿入し、模擬根の上下の変形を固定した状態で模擬根を油圧ジャッキにより加圧し、その時の模擬根の荷重と、肥大力測定装置により得られた荷重を測定した。なお模擬根の加圧は、模擬根の荷重が 440N/cm を越した時点で終了させた。

図 3.5 の測定結果より、模擬根はソメイヨシノの肥大力測定で得られた 440N/cm 以上の荷重を実際の根と同様に作用させることが可能であると思われる。

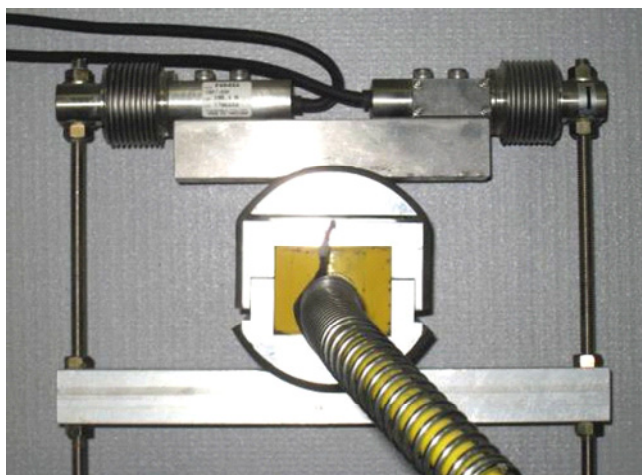


写真3.6 模擬根の加圧力の測定状況

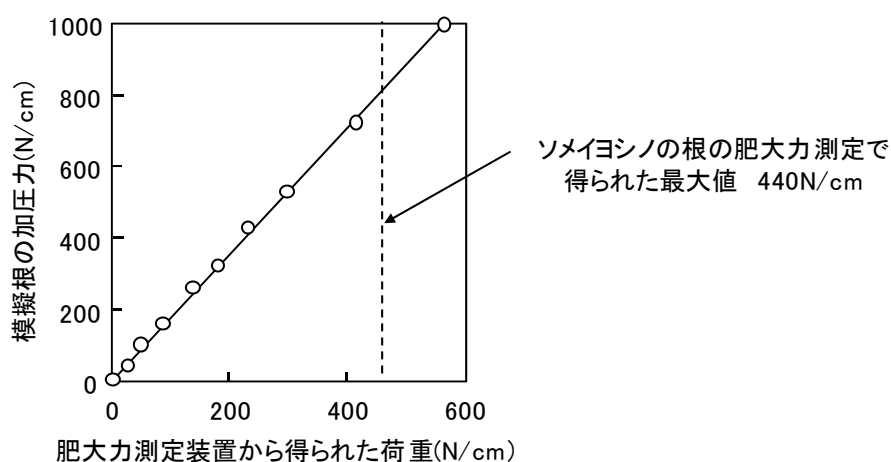


図3.5 模擬根の加圧力の測定結果

3.5 模擬根を用いた屋上緑化歩行面の耐根性評価の試み

3.5.1 アスファルト舗装の不具合事例調査

作製した模擬根の耐根性評価への有用性を、屋上緑化歩行面を想定したアスファルト舗装を例として検討した。その試験体の幅を決定するため、まず、実際のアスファルト舗装で見られる根による不具合事例の調査を行った。

調査は2009年10月13日神奈川県横浜市青葉区あざみ野の、アスファルト歩道舗装脇に植栽されているソメイヨシノ50本において行った。調査地の状況を写真3.7に示す。



写真3.7 アスファルト舗装の不具合調査地

調査項目は、ソメイヨシノ50本に対し、アスファルト舗装の不具合発生の有無、最もひどい不具合部分の不具合のパターン、不具合発生の幅、持ち上げ高さの4項目である。持ち上げ高さの測定は、根がアスファルト舗装を持ち上げた最も高い部分に、長さ1mの棒の中間位置が接するように置き、棒のどちらか一方の先端の舗装面からの高さを測定し、中点連結定理より持ち上がり高さを求めた。

ソメイヨシノの根の肥大生長によるアスファルト舗装の不具合のパターンは写真3.8に示す3種



写真3.8 アスファルト舗装の不具合のパターン

類に分類される。すなわちアスファルト舗装の部分的な持ち上がり、全体的な持ち上がり、縁石との界面剥離である。

不具合発生の有無と不具合パターン別件数を、図3.6及び3.7にそれぞれ示す。調査木50本の中で、不具合を発生させていたのは全体の7割強の36件であった。その36件の、最もひどい不具合部分の、それぞれの不具合のパターンの件数は、部分的な持ち上がりが最も多く23件、全体的な持ち上がりが6件、縁石との界面剥離が7件であった。それぞれの不具合の不具合発生幅と持ち上げ最大高さを図3.8及び3.9にそれぞれ示す。不具合発生幅は20cmから80cmに分布しており、その中でも40cmから50cmのものが最も多かった。また、持ち上げ最大高さは数mmから高い所では10cmに達するものもあった。その中でも2から3cmのものが最も多かった。

以上の結果より、試験体の幅は調査において最も多く見られた、不具合発生幅40cmから50cm以上とすることとし、ここでは60cmとすることにした。

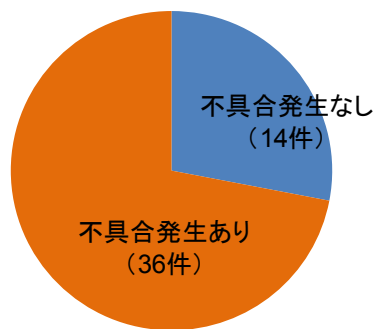


図3.6 不具合発生の有無

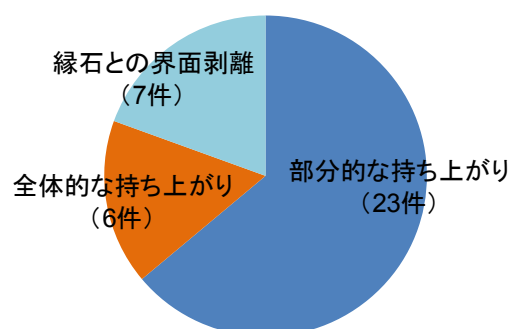


図3.7 不具合パターン別件数

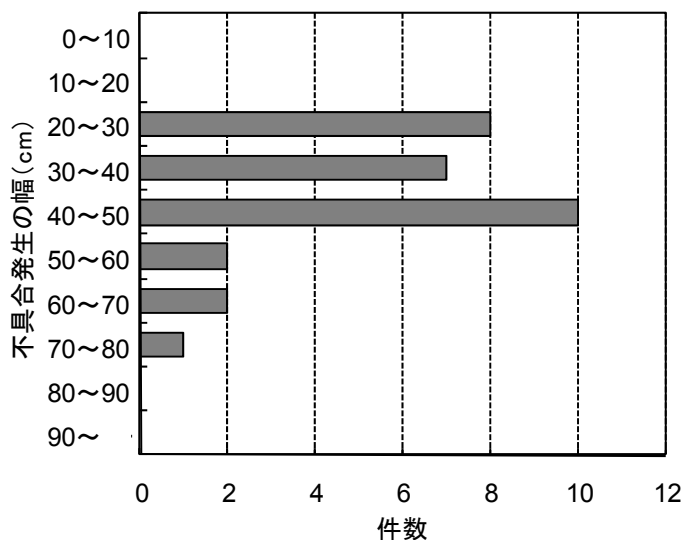


図3.8 不具合発生幅別の件数

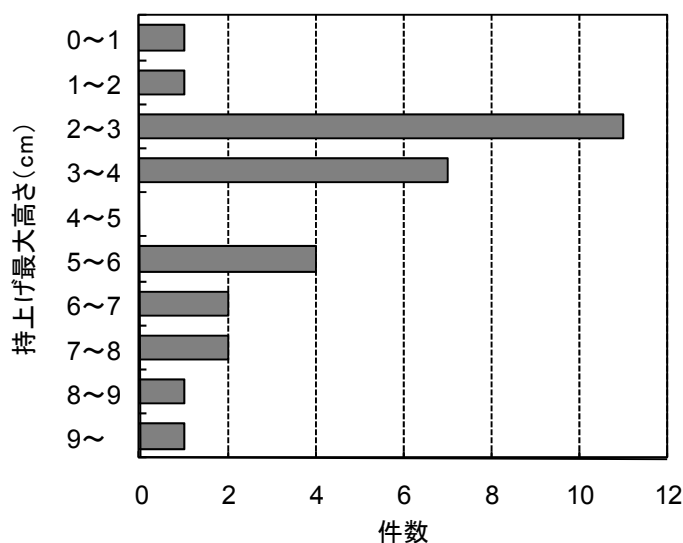


図3.9 持ち上げ最大高さ別の件数

3.5.2 試験体

歩道用のアスファルト舗装は、路床の上に十分な厚さの砕石、砂利、スラグ等の路盤材をしっかりと敷き込んだ本格的なものから、スラブの上に路盤材として砂を敷き均し舗装する簡便なものまで範囲が広い。ここでは模擬根を用いた耐根性評価試験方法の有用性を確認する目的で、屋上緑化を想定した図 3.10 に示す比較的簡便な構成の試験体とした。この中で危険側と考えられる場合として、根が剛性のあるスラブ上で生長し、スラブ方向には生長できず、路盤方向に生長する場合を想定した。構成は路盤として砂を敷き、その上にアスファルト舗装を施したものである。

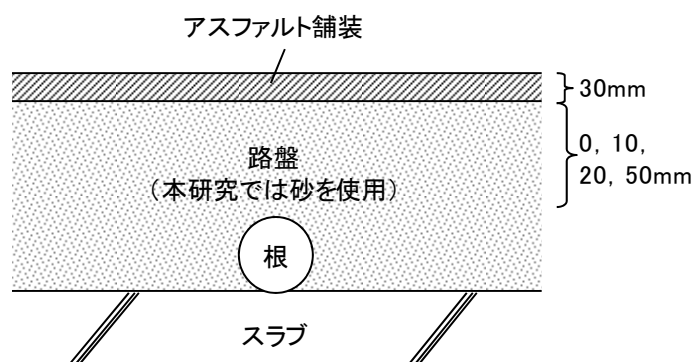


図3.10 試験に用いたアスファルト舗装の断面

(1) 砂層

根の上方にある砂層の厚さは、アスファルト舗装表面のひび割れや持ち上がり等の不具合に影響を及ぼすと推定される。そのため試験体は、模擬根直上の位置から砂層の厚さを4段階（0mm, 10mm, 20mm, 50mm）に変えたものを作製した。

なお、本試験で用いた砂は静岡県産岡産砂である。JIS A 1224「砂の最小密度・最大密度試験方法」に準拠し測定した砂の最小密度は 1.50g/cm^3 、最大密度は 1.81g/cm^3 である。

(2) アスファルト舗装

実際のアスファルト舗装の損傷は、施工直後の柔軟性がある場合にはあまり見られず、経年劣化していると思われるものが多い。そのため、試験に用いたアスファルト舗装は、横浜市港南区の宅地沿いの補修工事前の歩道から採取した。アスファルト舗装の採取現場及び路面を写真 3.9, 3.10 にそれぞれ示す。採取したアスファルト舗装の施工年、成分等は記録が残っておらず分からないが、路面表面が酸化し、骨材が露出した状態である。これを長さ 680 mm、幅 100mm、厚さ 30mm の大きさにコンクリートカッターで切断した。

このアスファルトの力学的特性を把握するため、三点曲げ試験を行った。載荷速度は 1 mm/分 で行った。支点間距離は 600 mm であり、その中央部に載荷する。試験体数は 3 体であり、 20°C



写真3.9 アスファルト舗装の採取現場



写真3.10 アスファルト舗装の路面の状態

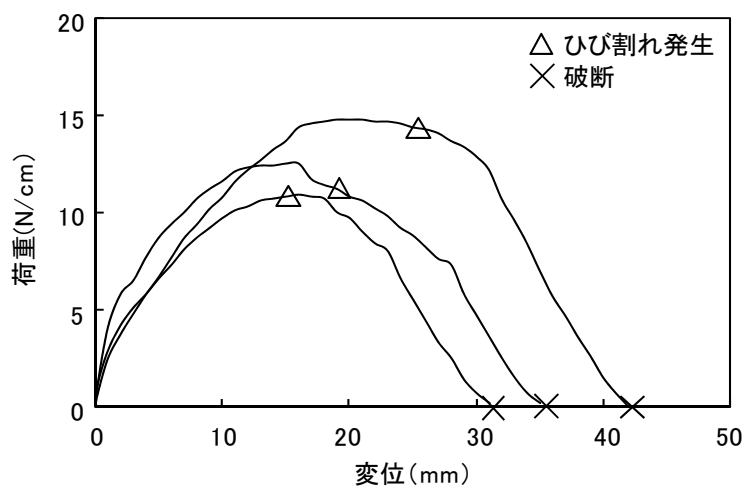


図3.11 アスファルト舗装の三点曲げ試験結果

一定の室内で試験を行った。試験結果を図 3.11 に示す。この試験結果より、変位 10mm 時の荷重値、試験体の断面縦 30mm×横 100mm、支点間距離 600mm を用いて求めた、アスファルト舗装のヤング率は、 $2.14 \times 10^8 \text{N/m}^2$ である。

3.5.3 試験方法

耐根性評価試験方法は、支持点間隔 600mm で固定したアスファルト舗装試験体を、砂層を介して模擬根からの肥大による加圧力を作用させるものであり、加圧後の試験体の変形と損傷状況を調べた。

そのための試験装置は、前述の試験体を収納できるように内寸長さ 700mm、幅 110mm、高さ 330mm の容器とし、その底部の中央に模擬根が設置されるようになっている。また模擬根による路盤の加圧により、アスファルト舗装は持ち上げられるが、その時両端部が動かないように、間隔 600mm に設置した支持用丸棒で、アスファルト舗装を抑えるようにしている。この支持棒の設置用の孔は縦に長く開けられており、任意の路盤厚さの試験が行うことが可能としてある。

試験の手順は以下のとおりである。まず容器に模擬根を設置する。次いで砂層を所定の厚さまで敷設した。その際、砂を容器に深さ 1cm 入れる毎に、容器側面を木づちで十分に打撃し、前述の最大密度となるよう砂層を十分に締め固めた。なお砂層は、含水比が締め固め度に及ぼす影響を排除するため、105℃で 24 時間乾燥させた絶乾の砂を用いている。その上にアスファルト舗装試験体を敷設し、支持棒で両端を固定した。次に模擬根のジャッキに油圧ポンプから油を送り込み、砂層、アスファルト舗装を下から加圧した。加圧速度についてであるが、実際の根の肥大力増加速度は図 2.2 に示すように、5 月から 7 月までの 3 ヶ月間で 440N/cm まで上昇しており、平均すると 1 日あたり 5N/cm という極めてゆっくりとした速度である。しかしここでは室内試験として、短時間で結果を得るため、手動であるが毎分 5N/cm の加圧速度を目標として加圧した。

試験の状況を写真 3.11 に示す。目視により、アスファルト舗装面のひび割れの観察を行った。同時にアスファルト舗装中央部の持ち上がり高さを、変位計により測定した。なお、アスファルト舗装にひび割れが発生した時点、もしくは模擬根自体の最大変形量 (10mm) に達した時点で試験を終了した。

試験体数は、砂層の各厚さごとにそれぞれ 3 体とした。

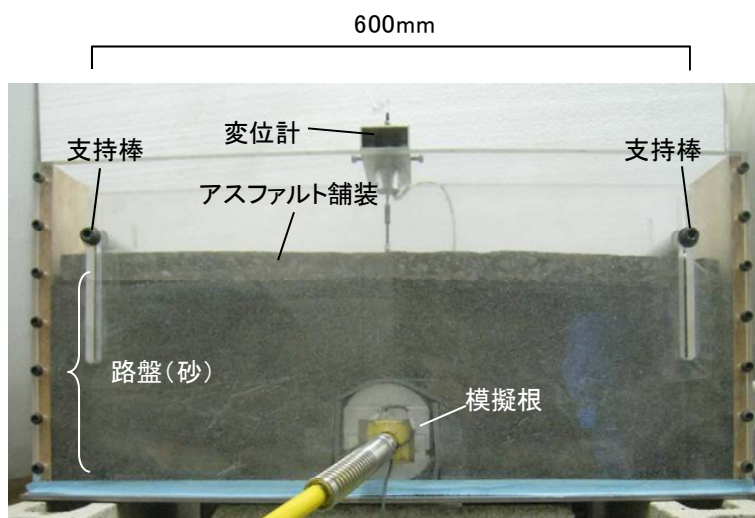


写真3.11 耐根性評価試験の試験状況

3.5.4 試験結果及び考察

図 3.12 に模擬根で加圧した時のアスファルト舗装表面の持ち上がり高さを示す。模擬根への加圧の上昇に伴い、次第にアスファルト舗装表面が持ち上げられた。模擬根直上の砂層の厚さが 0mm, 10mm の場合、アスファルト舗装表面にひび割れが発生した。ひび割れ発生時の模擬根の加圧力は、模擬根直上の路盤厚さが 0mm の場合は 45N/cm 程度であるのに対し、路盤厚さが 10mm の場合は 60N/cm 程度であった。また、路盤が厚くなるに従い加圧力に対する持ち上がり高さが低くなる傾向が見られた。これは砂層が薄い場合は、アスファルト舗装に直接模擬根からの力が作用するのに対し、路盤がある場合は路盤が緩衝層として作用し、模擬根からの力を分散させるためと推察される。実際、模擬根の拡大変位量は大きくなっているが、荷重はそれほど上昇していない。いずれにしてもアスファルト舗装の損傷には、アスファルトから根までの距離が重要であると思われる。

アスファルト舗装の持ち上がり状況を写真 3.12 に、模擬根直上の砂層の厚さごとのアスファルト舗装表面のひび割れ状況の一例を写真 3.13～3.16 にそれぞれ示す。ひび割れが発生した位置は、模擬根直上の砂層の厚さに係わらず、模擬根付近であった。これらの損傷形態は、実際の歩道用のアスファルト舗装で見られるものと類似しており、ここでの開発した模擬根は、屋上緑化歩行面の耐根性評価に利用できると思われる。

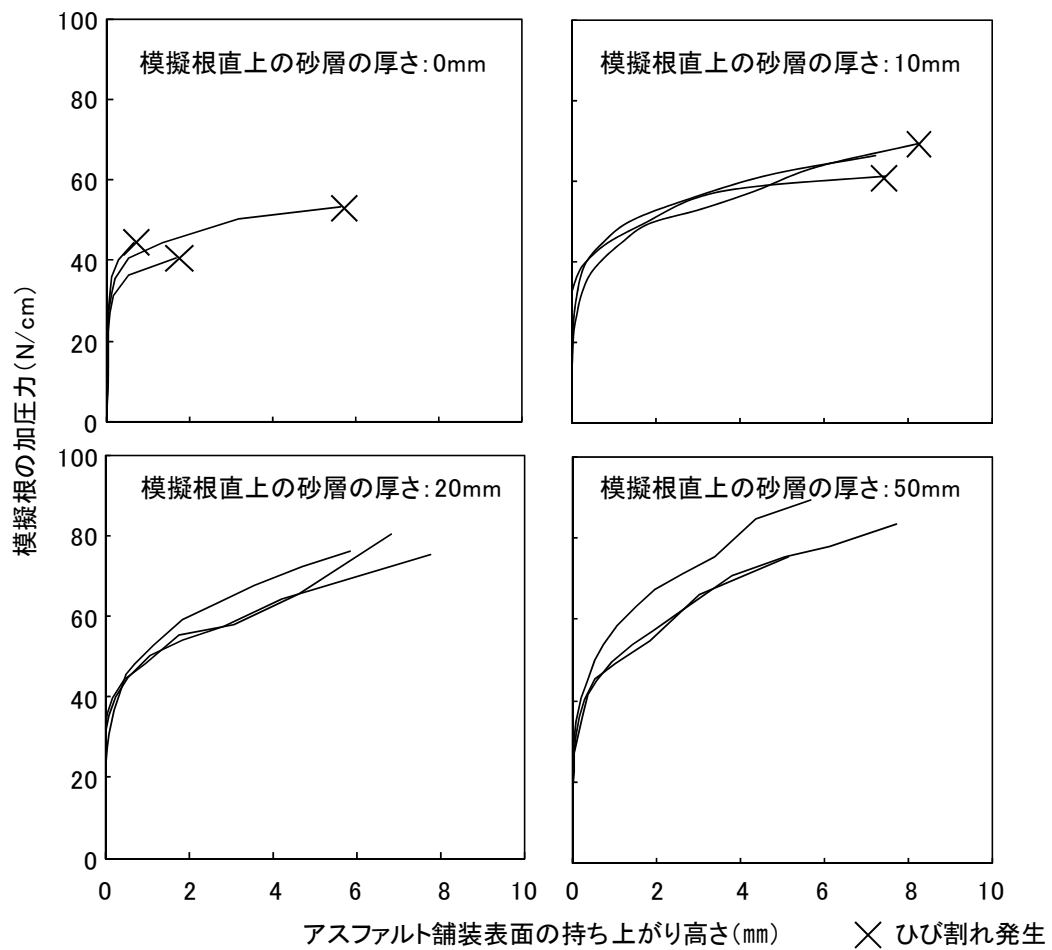


図3.12 模擬根直上からアスファルト舗装までの砂層の厚さごとのアスファルト舗装表面の持ち上がり高さ

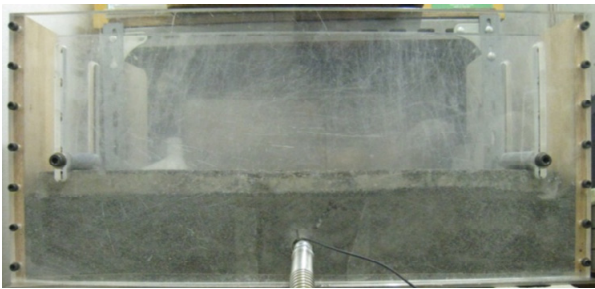
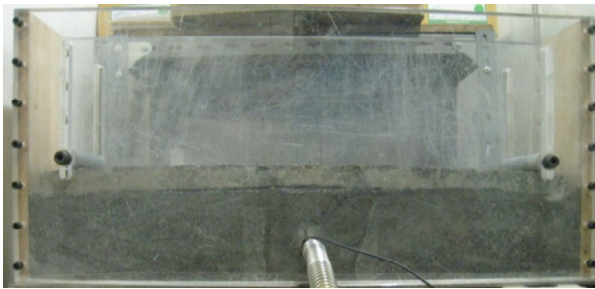
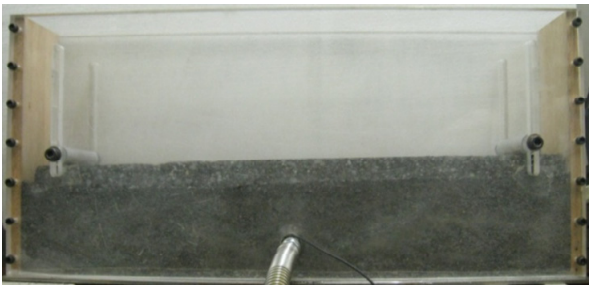
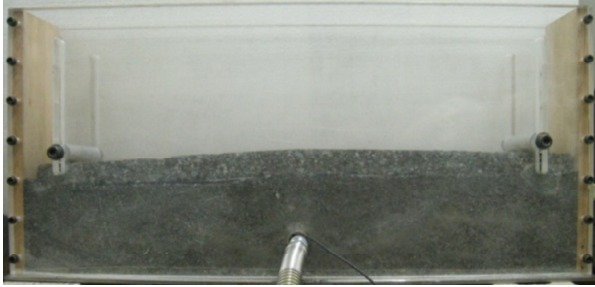
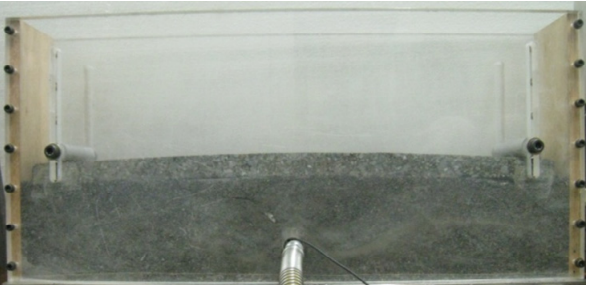
模擬根直上の砂層の厚さ	試験前	試験終了時
0mm		
10mm		
20mm		
50mm		

写真3.12 アスファルト舗装の持ち上がり状況



写真3.13 アスファルト舗装表面のひび割れ状態の一例(模擬根直上の砂層の厚さ0mm) 1/2



写真3.13 アスファルト舗装表面のひび割れ状態の一例(模擬根直上の砂層の厚さ0mm) 2/2

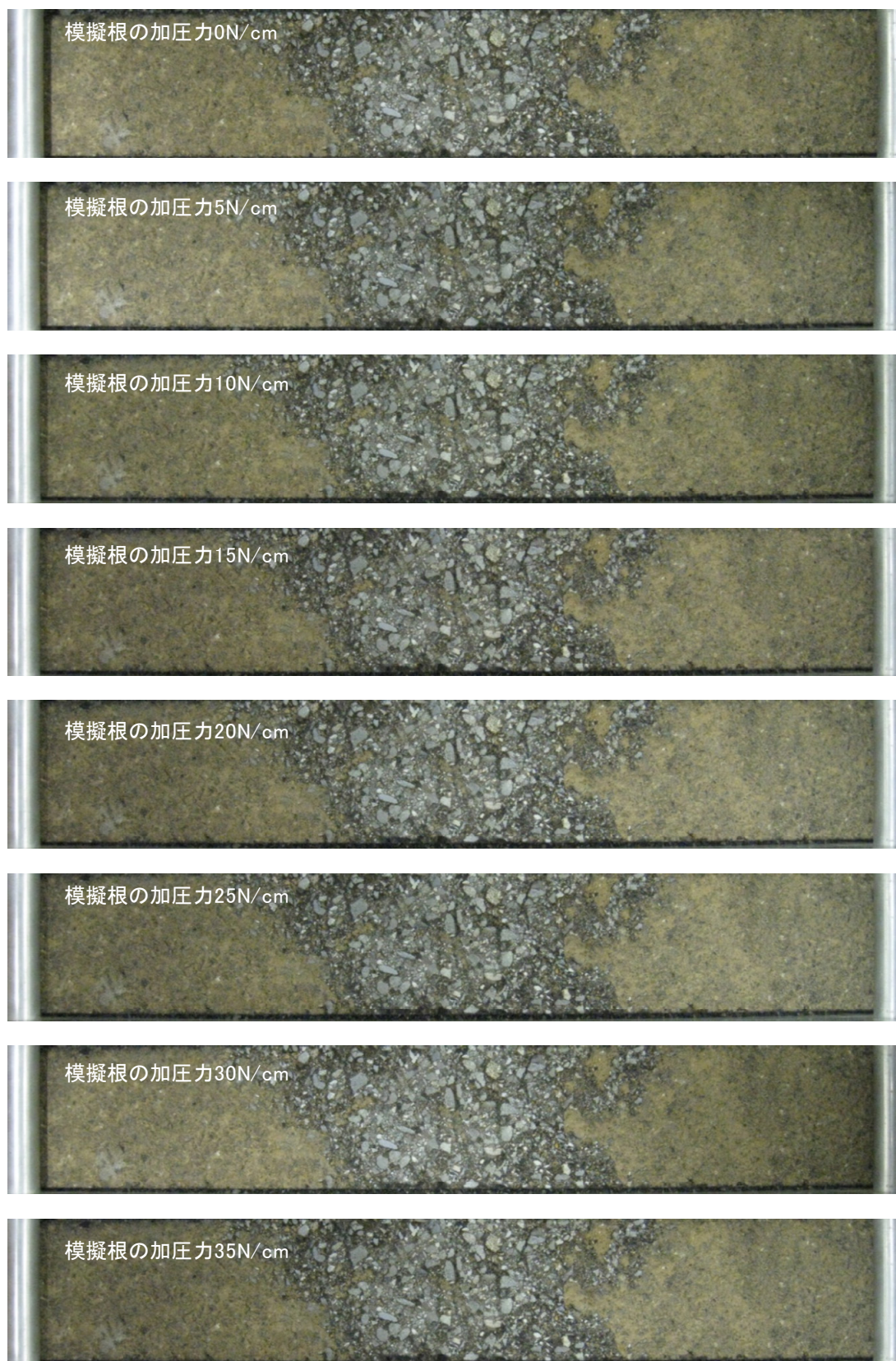


写真3.14 アスファルト舗装表面のひび割れ状態の一例(模擬根直上の砂層の厚さ10mm) 1/2

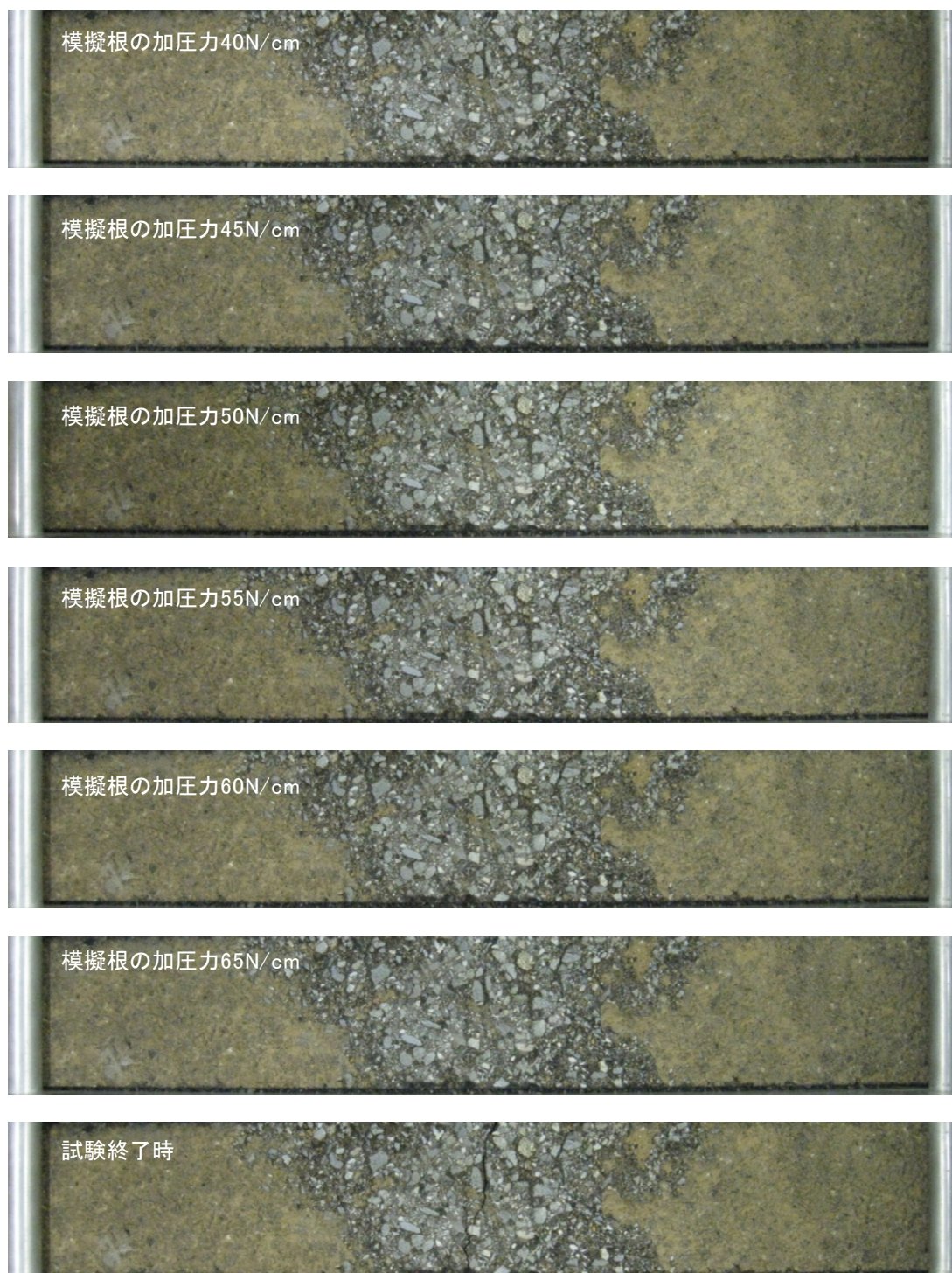


写真3.14 アスファルト舗装表面のひび割れ状態の一例(模擬根直上の砂層の厚さ10mm) 2/2

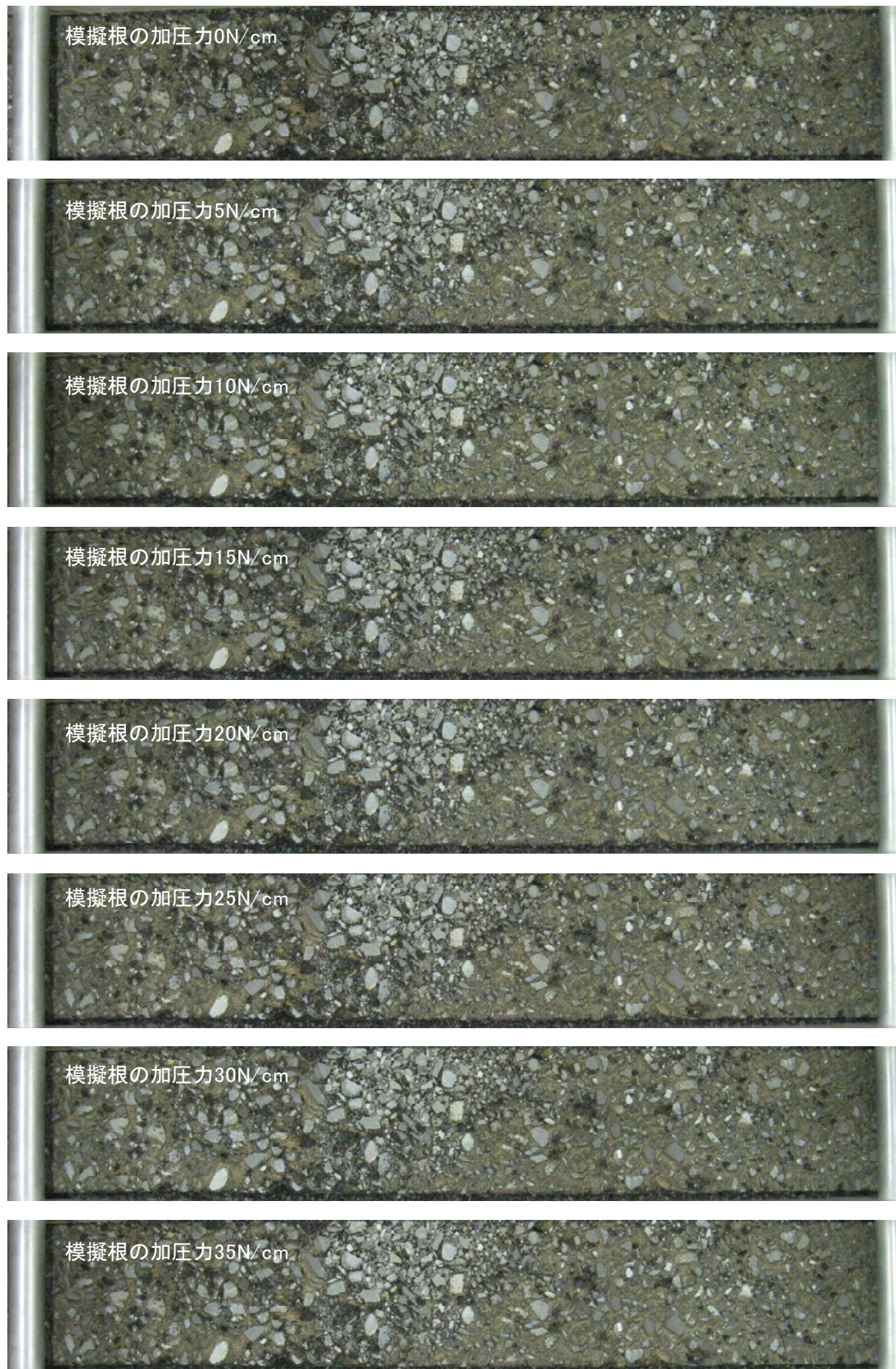


写真3.15 アスファルト舗装表面のひび割れ状態の一例(模擬根直上の砂層の厚さ20mm) 1/3

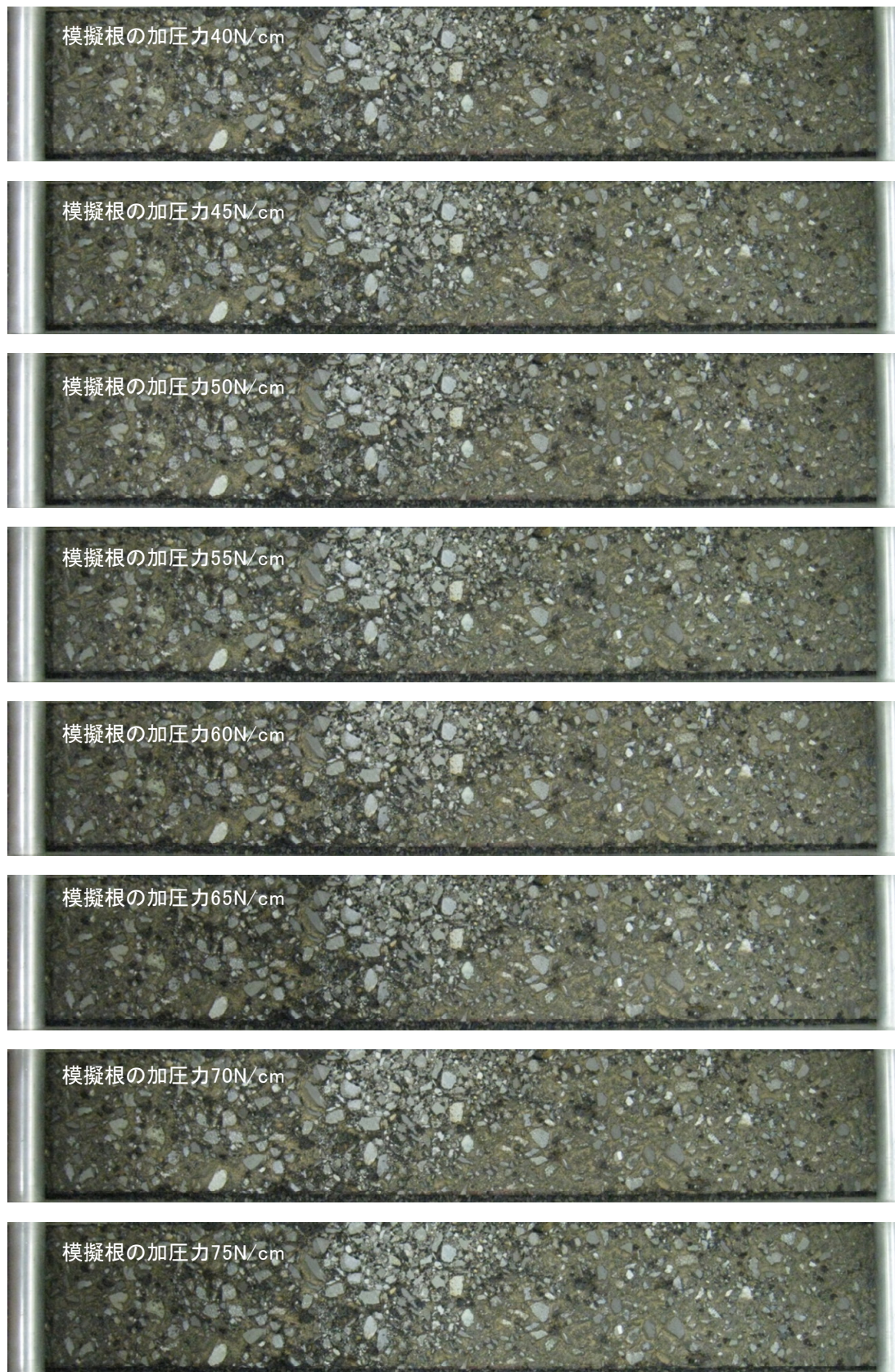


写真3.15 アスファルト舗装表面のひび割れ状態の一例(模擬根直上の砂層の厚さ20mm) 2/3

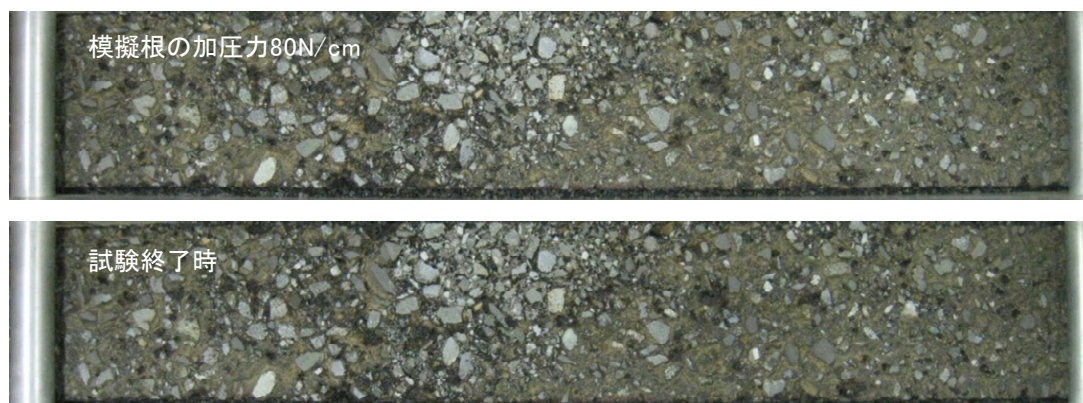


写真3.15 アスファルト舗装表面のひび割れ状態の一例(模擬根直上の砂層の厚さ50mm) 3/3

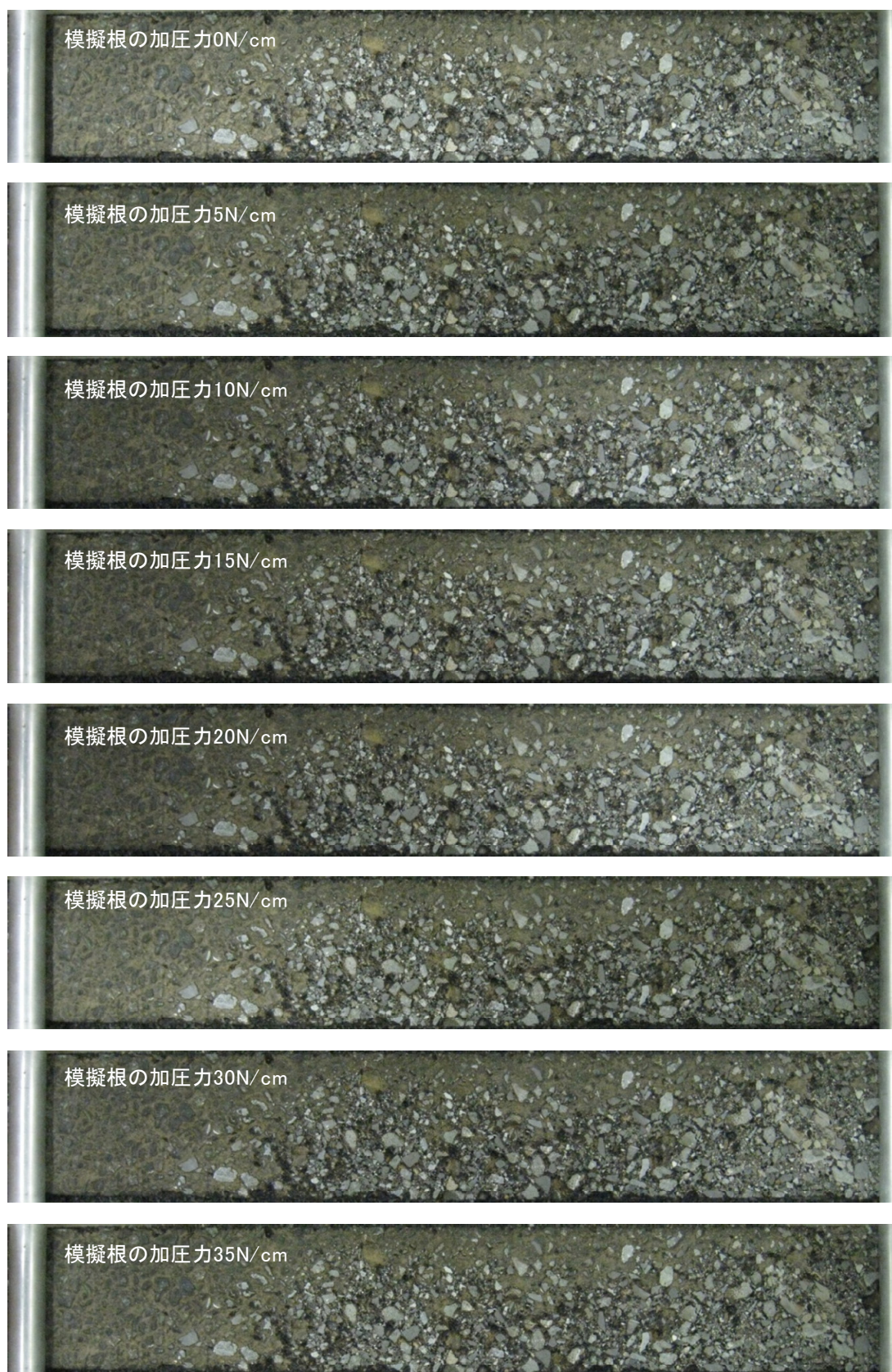


写真3.16 アスファルト舗装表面のひび割れ状態の一例(模擬根直上の砂層の厚さ50mm) 1/3

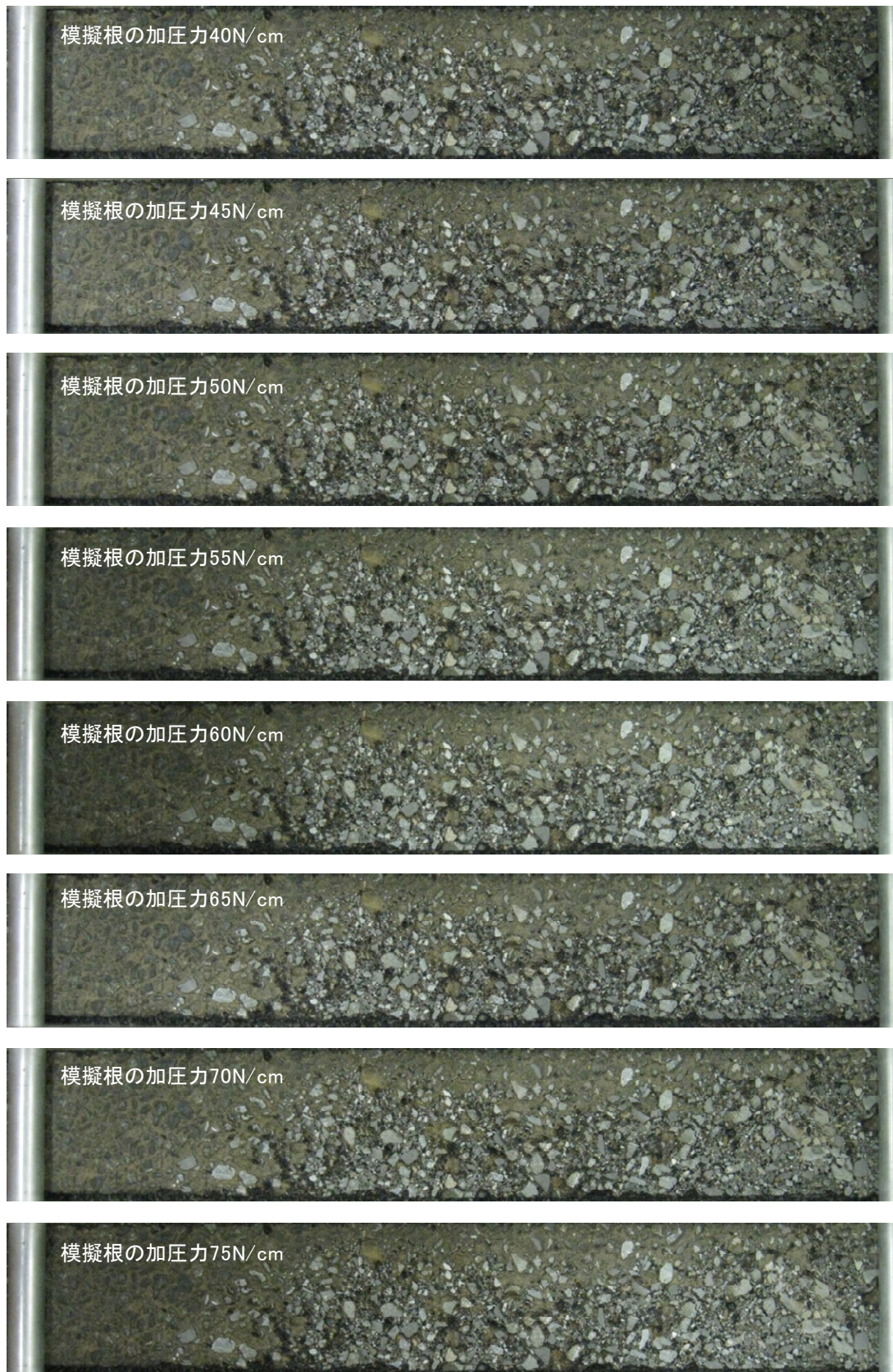


写真3.16 アスファルト舗装表面のひび割れ状態の一例(模擬根直上の砂層の厚さ50mm) 2/3

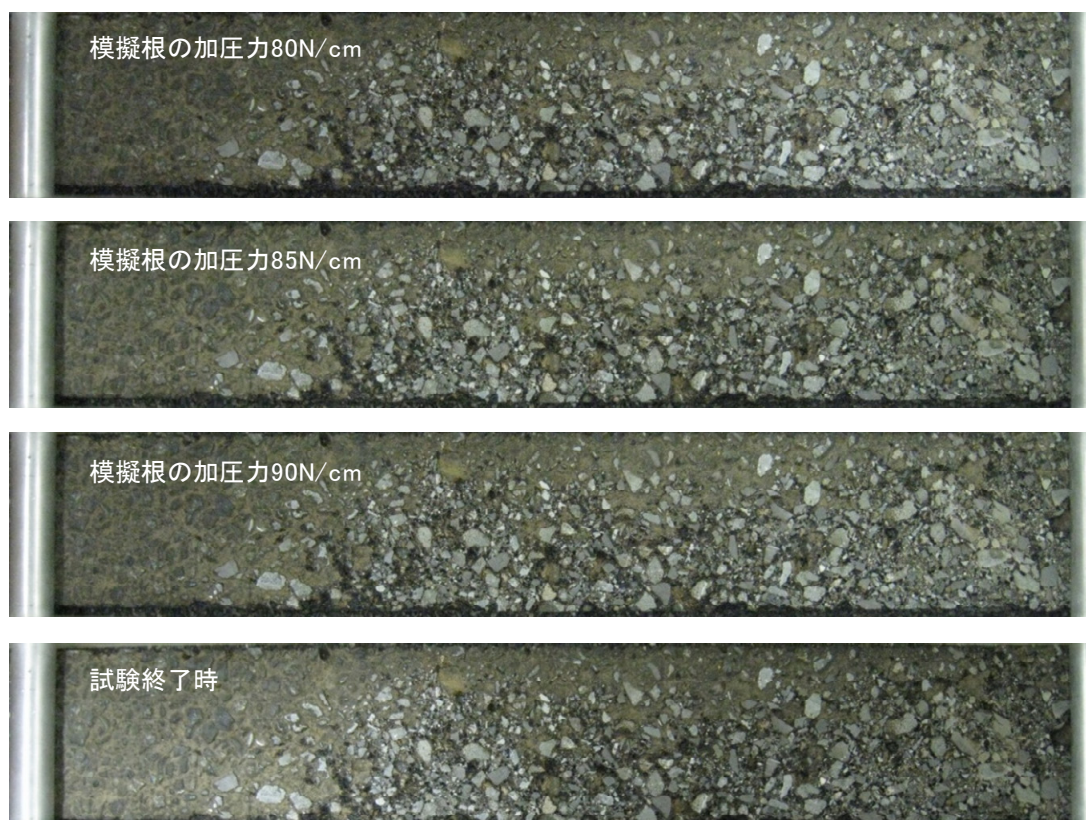


写真3.16 アスファルト舗装表面のひび割れ状態の一例（模擬根直上の砂層の厚さ50mm） 3/3

3.5.5 シミュレーションによるアスファルト舗装の耐根性評価との比較

3.5.4 の試験結果の検証のため、模擬根の加圧力とアスファルト舗装表面の持ち上がり高さの関係を、有限要素法による汎用構造解析システム DIANA9.1 を用いてシミュレーションを行った。

まず、実験結果との比較を行うため、模擬根直上の砂層の厚さが 0mm の場合において、シミュレーションを行った。ここで、アスファルト舗装及び砂は等方性材料と仮定した。アスファルト舗装のヤング率は、前述のアスファルト舗装の三点曲げ試験結果より求めた $2.1 \times 10^8 \text{N/cm}^2$ を、ポアソン比は文献値より 0.35 とした。また砂層のヤング率及びポアソン比は文献値よりそれぞれ $2.0 \times 10^7 \text{N/cm}^2$ 及び 0.4 とした。また、今回のシミュレーションでは、アスファルト表面に発生するひび割れは考慮に入れず、模擬根からの加圧力に対する、アスファルト舗装中央部の持ち上がり高さを計算した。拘束条件は、最下面は水平及び鉛直方向に、左右両辺は水平方向に、アスファルト舗装の両端部は鉛直方向にそれぞれ拘束している。ここで模擬根の場合は、上半分のアルミニウム製半円柱を油圧ジャッキにより持ち上げ加圧しているが、シミュレーションでは、図 3.13 に示すように円周方向に加圧させる機構とした。

メッシュは各辺とも 10mm 間隔で設けている。シミュレーションに用いたアスファルト舗装のモデル図及びメッシュを図 3.14 に示す。

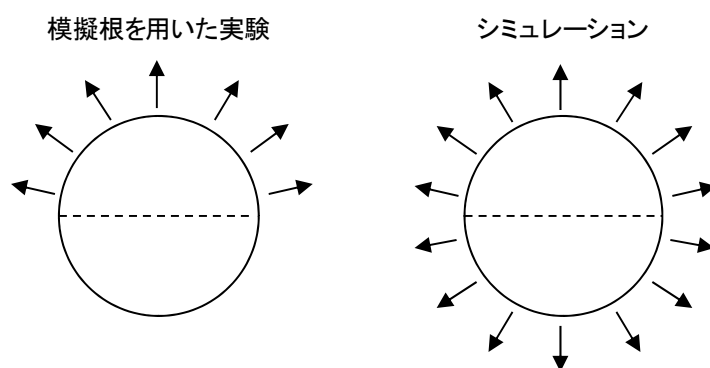


図3.13 模擬根の加圧方向

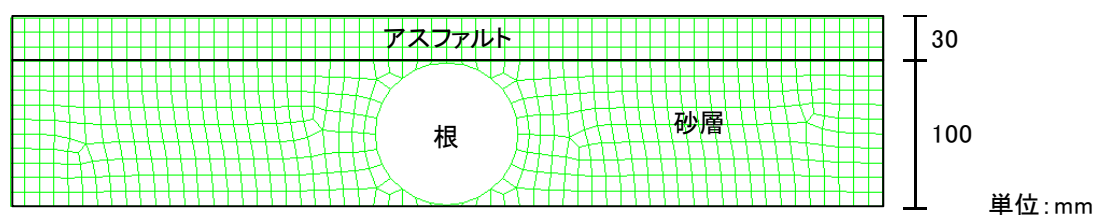


図3.14 シミュレーションに用いたアスファルト舗装のモデル図

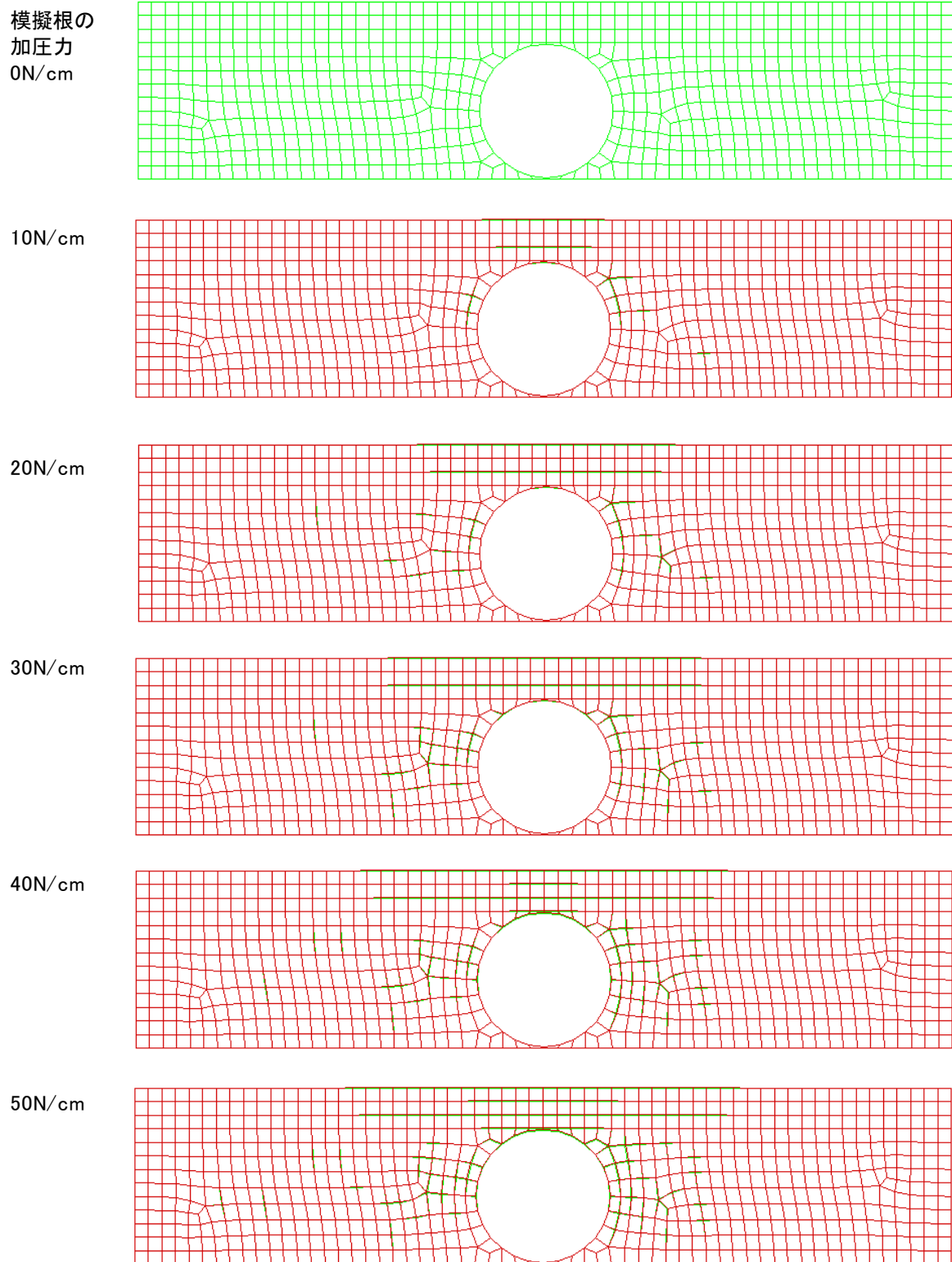


図3.15 アスファルト舗装の変位図

シミュレーションでは、模擬根を用いた実験においてひび割れが発生する前までの加圧力、すなわち模擬根の加圧力が 50N/cm に至るまで、0N/cm から 10N/cm ずつ増加させた。それぞれの加圧時のアスファルト舗装の変形図を図 3.15 に示す。初期を緑色の実線で、加圧後を赤色の実線で示している。加圧を増加させるに従い、模擬根周辺より変形が見られ、それがアスファルト舗装表面に伝達していく様子が見られる。

また、アスファルト舗装中心部の変形量を図 3.16 に示す。シミュレーションでは、模擬根の加圧による砂層の圧密の影響を含めずに計算しているため、模擬根の加圧力とアスファルト表面の変位量が線形に変化しているが、模擬根の加圧力に対するアスファルト舗装表面の変位量は、実験値とシミュレーションによる計算値がほぼ同様の値を示している。このことから、模擬根を用いた耐根性評価試験が妥当であると言える。

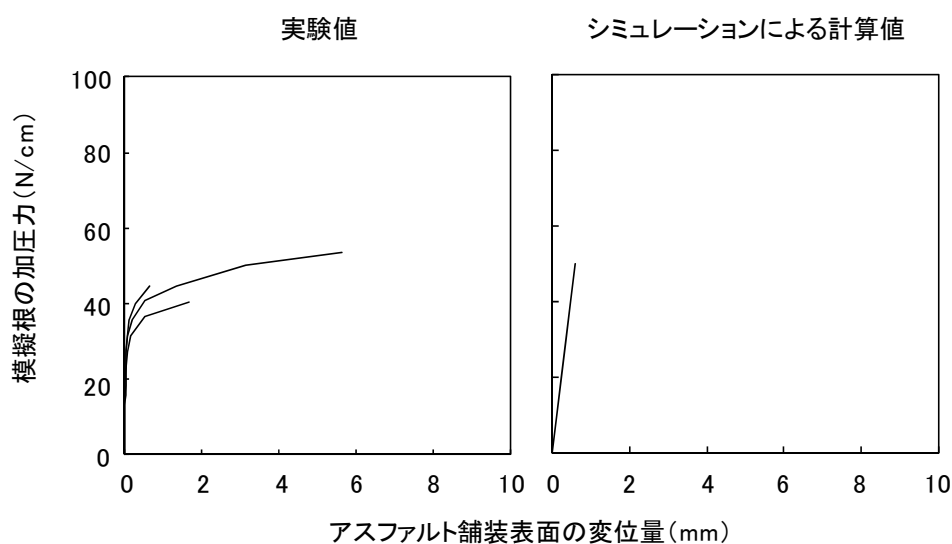


図3.16 アスファルト舗装表面の変位図

3.6 模擬根を用いた屋上緑化見切り部の耐根性評価の試み

3.6.1 試験体

屋上緑化では写真 3.17 に示すように、見切り材（緑化部分と非緑化部分を分離するために、緑化部分の端部に設置される部材）としてブロックや縁石等を並べて設置する。しかしその接続部分の隙間に根が入り込み肥大し、それらを移動させたり損傷させることがある。そこで見切り材の損傷状況に対する適用を検討する。



コンクリートブロック



レンガ



石材



現場打ちコンクリート

写真3.17 屋上緑化で見られる見切り材の例

実際の損傷では、細い根が対象になると思われるが、超小型の油圧ジャッキが市販されておらず、現状では小型模擬根の作製が難しいため、今回試作した太径の模擬根で代用した。

試験体はコンクリートブロックで構成される見切り部位の一部を取り出したものとした。コンクリートブロックの隙間に侵入した根は、肥大により両側に押し広げようとするため両側にブロックを必要とするが、ここでは試験体長さを短くするため、片側を固定した図 3.17 に示す試験体とした。なお、ここで使用したコンクリートブロックは横 390mm、縦 100mm、高さ 190mm の重量 15.4kg の角型のものである。

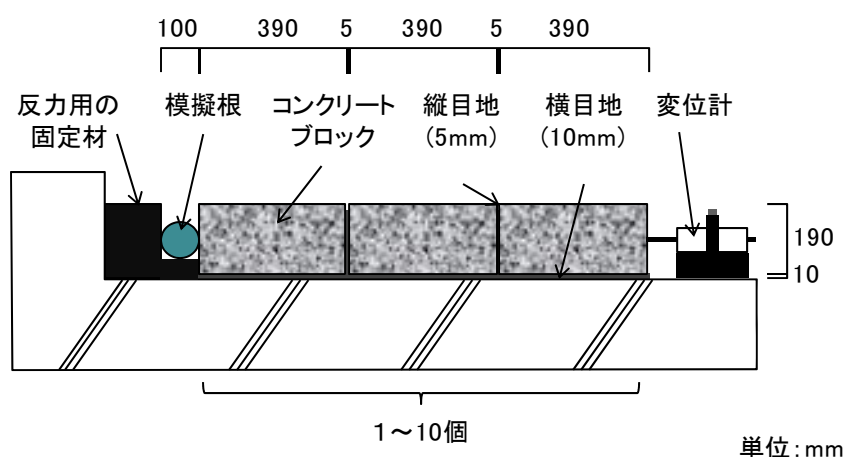


図3.17 コンクリートブロックを用いた模擬見切り部分の試験体

根の肥大による影響は、ブロックの隙間に充填される材料及び並べられるコンクリートブロックの数に依存すると思われる。そのため表 3.2 に示す試験体を用意した。すなわち、目地についてはセメントモルタル、黒土、それと比較のための何も充填しないもの（空目地）の3種類とした。セメントモルタル、黒土による目地詰め目地幅については、縦目地 5 mm、横目地 10 mm とした。空目地の場合は突き付けとした。敷き並べたブロック数は1個から10個までとした。試験体数は各々2体ずつである。

表3.2 見切り部分の耐根性評価に用いた試験体の種類

横目地(10mm)	縦目地 (5mm)	コンクリート ブロックの数
セメントモルタル※ ¹	セメントモルタル※ ¹	1個
黒土※ ²	黒土※ ²	1～10個
空目地	空目地	1～10個

※¹ 水セメント比50%, セメント砂比1:3

セメント: 普通ポルトランドセメント 細骨材: 静岡県沢丘産砂

※² 粒径2.5mm以下

3.6.2 試験方法

まずコンクリートブロックと反力用の固定材との間に、模擬根を挟み込んだ。高さ方向の位置はコンクリートブロックの中央部と模擬根の中央部が同一となるよう設置した。この状態から模擬根の油圧ジャッキに油圧ポンプから油を送り込み、敷き並べたコンクリートブロック試験体に圧力を作用させた。模擬根とは反対側のコンクリートブロックの端部には変位計を取り付け、模擬根の加圧による、コンクリートブロック試験体の変位量を測定した。なお、加圧時に加圧軸方向以外にコンクリートブロックが移動しないようにするため、コンクリートブロックの両側面にはアングルに

よりガイドを設けている。加圧速度は手動であるため正確ではないが、3.5 模擬根を用いた屋上緑化歩行面の耐根性評価の試みと同様、毎分 5N/cm 程度である。なお、加圧はソメイヨシノの肥大力の実測値の 440N/cm を参考とし、それより少し大きい 450N/cm に達した時点、もしくは模擬根自体の最大変形量（10 mm）に達した時点まで行った。

3.6.3 試験結果及び考察

コンクリートブロック端部の変位量及び模擬根の加圧力を図 3.18 に、それらの測定値を基にコンクリートブロック端部の最大変位量と、それを観測した際の模擬根の加圧力を整理したものを図 3.19 にそれぞれ示す。

セメントモルタル目地の場合は、コンクリートブロック 1 個の場合でも移動はなかった。黒土を充填したものは、コンクリートブロック数を増やすに従って、試験体端部での変位量は少なくなり、9 個からは変位が見られなくなった。これは目地に詰められた黒土が、模擬根の加圧による変形を吸収したためと推定される。目地に何も充填しない空目地の場合は、コンクリートブロックの端部は模擬根の肥大によって動かされ、コンクリートブロックを 10 個敷き並べた場合でも移動を止めることはできなかった。

根の肥大により、見切り部分は動かされるが、その影響は目地に用いる材料により異なることが明らかになった。セメントモルタルのように十分な接着強度のある材料を使用した場合は、かなり安全と思われるが、空目地のようにブロックが接触しているだけの様な場合は、移動は避けられない。ただ黒土のように、それ程強い接着強度の期待できない材料でも緩衝効果により全体として見切り部分の形状保持がなされていた。

ここでは、模擬根の実務での簡便な耐根性評価の有用性のみを目的として検討したが、この特性を生かした見切り材部分の構法状の工夫は出来そうに思われる。

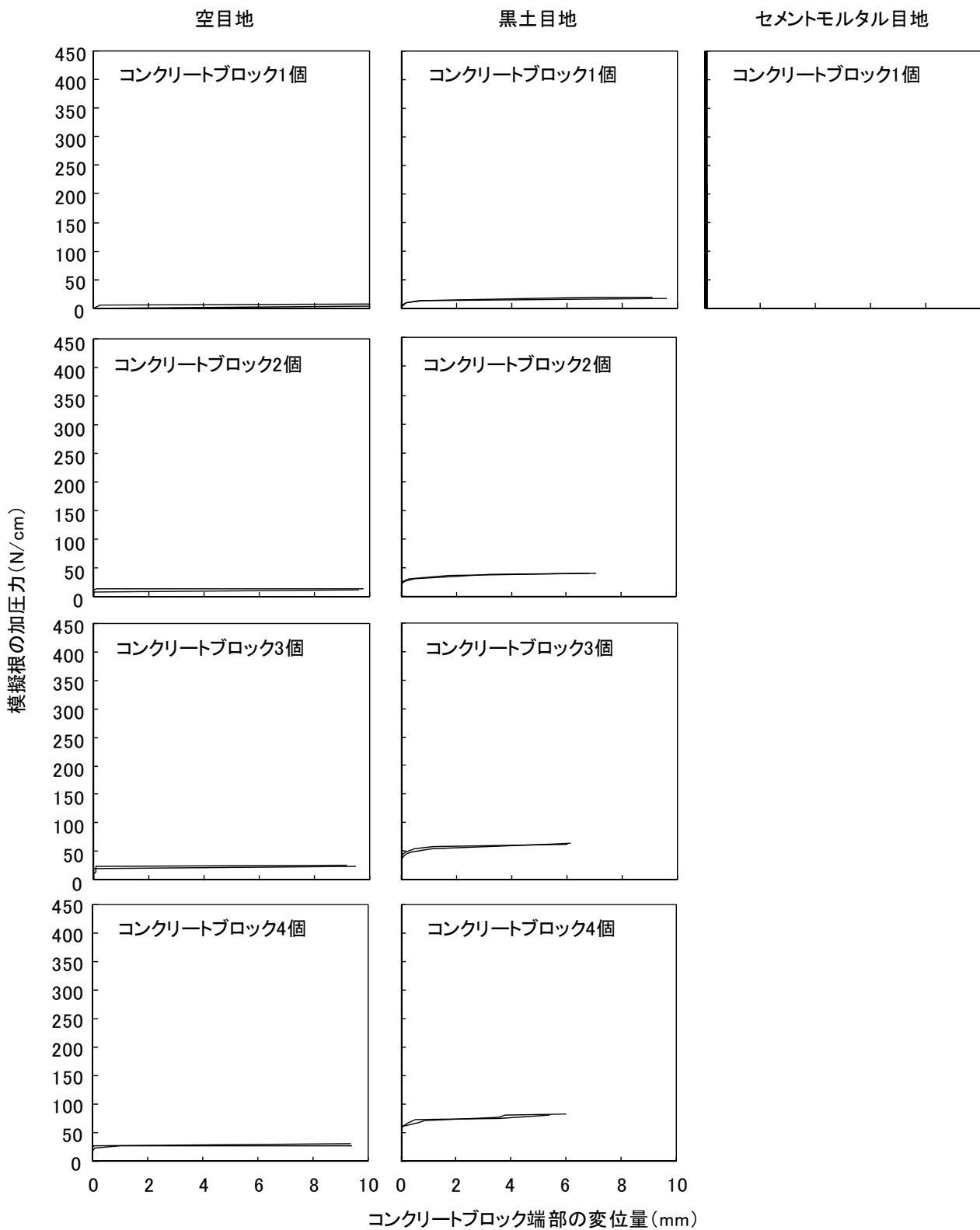


図3.18 コンクリートブロック端部の変位量と模擬根の加圧力 1/3

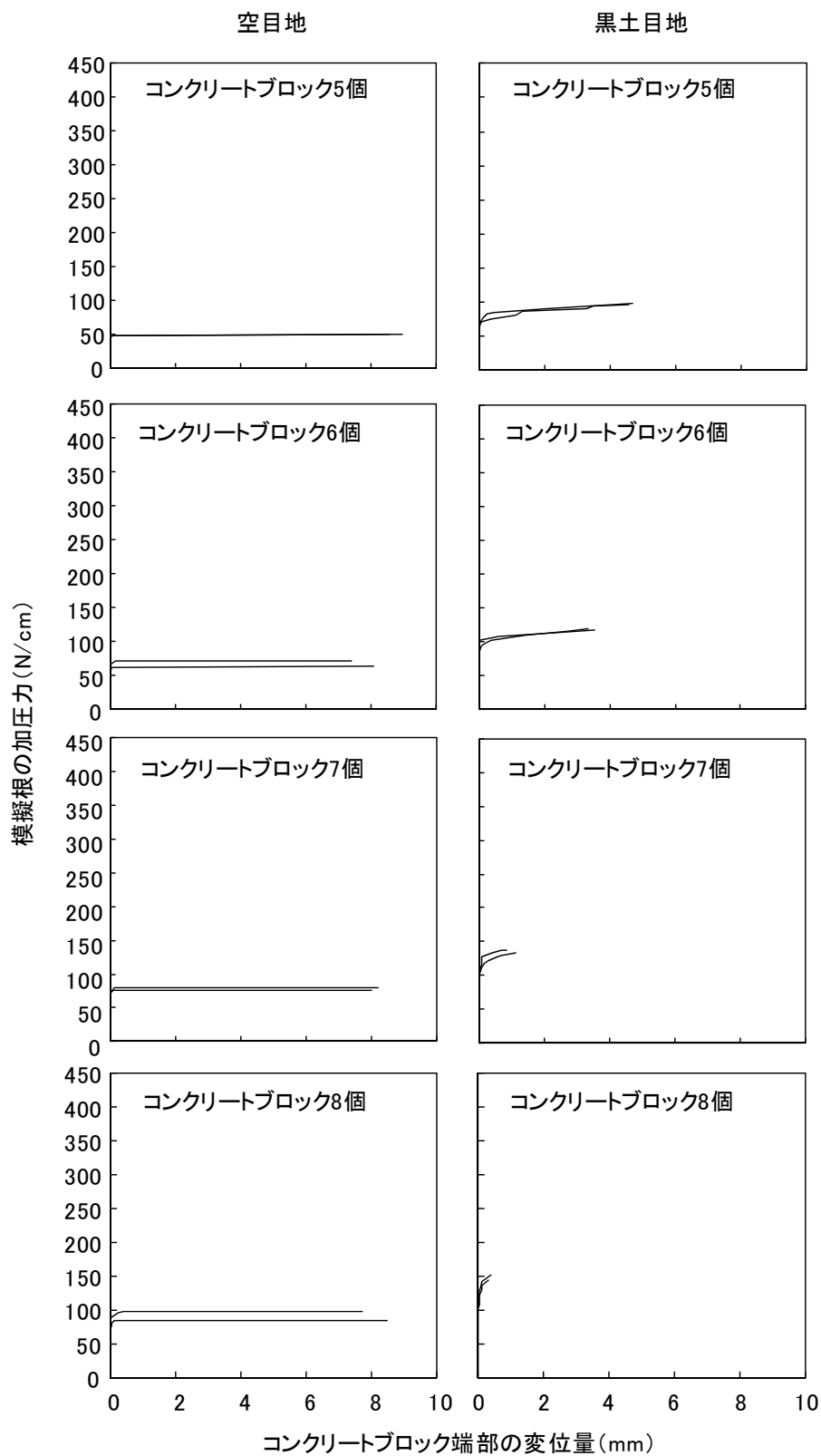


図3.18 コンクリートブロック端部の変位量と模擬根の加圧力 2/3

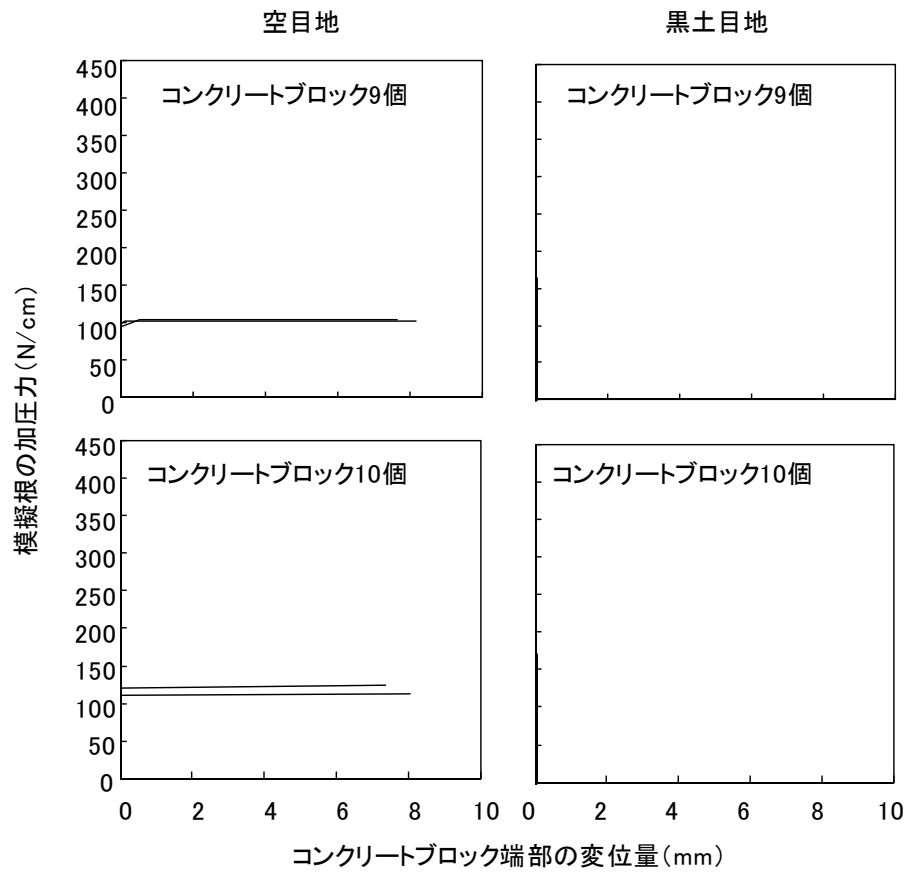


図3.18 コンクリートブロック端部の変位量と模擬根の加圧力 3/3

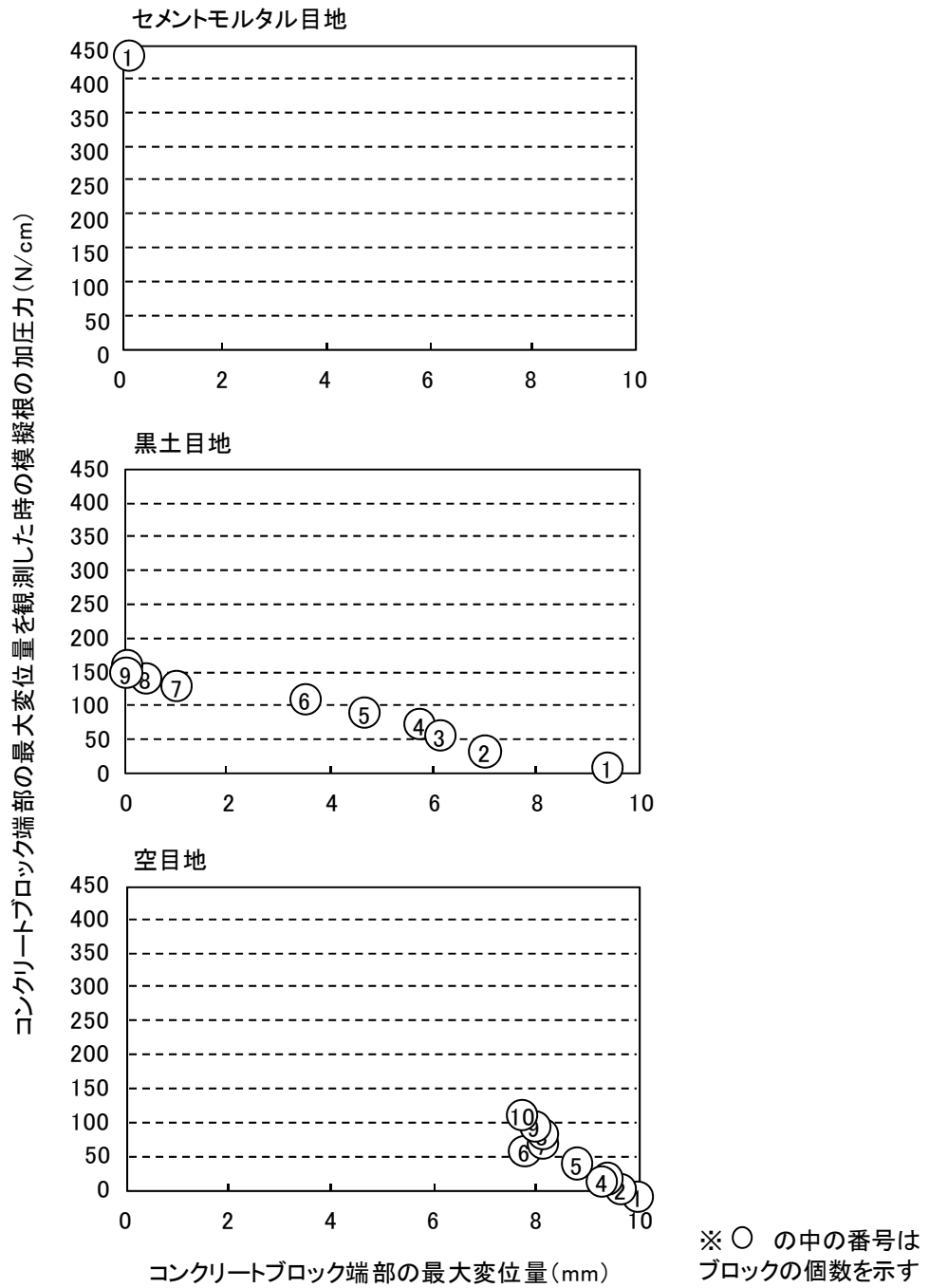


図3.19 コンクリートブロック端部の最大変位量とその時の模擬根の加圧力

3.7 まとめ

根の肥大生長を模擬した模擬根の作製及び、模擬根の耐根性評価試験への適用の有用性の検討を行い、以下の知見が得られた。

- 1) 内部に油圧ジャッキを内蔵し、実際の根と似た形状、力学的性質をもたせた模擬根を開発した。
- 2) この模擬根は、ソメイヨシノの根の実測で得られた肥大力（440N/cm）以上の荷重を作用させることが可能であることを確認した。
- 3) 作製した模擬根を用いて、屋上緑化歩行面及び見切り部分の耐根性試験を行い、模擬根の耐根性評価試験への適用の有用性を示した。

第4章

地下茎の肥大力測定装置の開発

4.1 はじめに

既往の研究では、草本類としてクマザサ地下茎の前方への伸長生長に伴う防水層等の障害物に対する押し付け力の測定が行われている。しかし、障害物がなくてもわずかな隙間があった場合、その隙間に地下茎が侵入し、横方向に肥大生長することにより損傷を拡大する。このことは特に、防水層のジョイント部で問題となる。写真4.1は防水層のジョイント部に、根系が侵入している事例である。根系は、侵入すると同時に肥大生長し、防水層のジョイント部に剥離を発生させ、漏水の危険性を高めている。



写真4.1 防水層ジョイント部に侵入した根系

木本類については、前章まででその肥大力を測定し、肥大生長の挙動を明らかにした。ただ屋上緑化では、木本類植物はかなりの重量増加となるため、実際には草本類植物の利用が多い。草本類植物は草花であり、木本系植物と比べると根系はそれほど強靱とは思えないが、例えばササ類やシバ類等地下茎を有するものは、前述の防水層ジョイント部や緑化の見切り材の材料間のような細かい隙間に地下茎が侵入した場合、その後の肥大生長により損傷を拡大する恐れがある。屋上緑化ではこれに対する安全性も事前に確認しておく必要がある。

本章では、まず地下茎の肥大力や肥大量がどの程度であることを明らかにする。

4.2 地下茎の肥大量の測定

肥大力の発生は地下茎が肥大生長することに起因する。そのため、まず地下茎の肥大量と伸長量の測定を行った。対象植物は写真 4.2 に示すクマザサとした。クマザサは根張りが強く、既往の研究でも、その地下茎が伸長生長する際、大きな押し付け力が観測されている植物である。また、写真 4.3 に見られるように、屋上緑化にしばしば用いられる植物の一つであり、特に和風の屋上緑化の場合は、好んで用いられている。



写真4.2 測定に使用したクマザサ



写真4.3 屋上緑化にクマザサが植栽されている事例

4.3 地下茎の肥大量測定装置

まず地下茎を自由に生長させる必要があり、図 4.1 に示すような測定装置を作製した。装置は植栽部と測定部に分けられている。クマザサの植えられている植栽容器の側面に直径 10mm の孔を開け、その孔より地下茎を測定部に誘導した。測定部は、直径 18mm 長さ 150mm の塩化ビニル樹脂パイプであり、これを植栽容器側面に開けた孔に取り付けた。塩化ビニル製樹脂パイプ内は、良好な生育環境を保つため、写真 4.4 に示すゲル状の高吸水性ポリマーを充填し、底面には排水孔を設けた。なお、生長を促進させるため、高吸水性ポリマーには、濃度 1% 程度の液体肥料を混入させている。

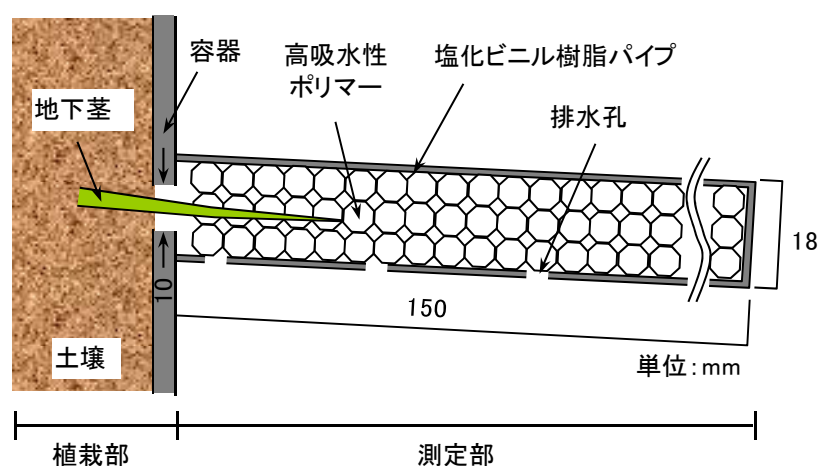


図4.1 肥大量測定装置



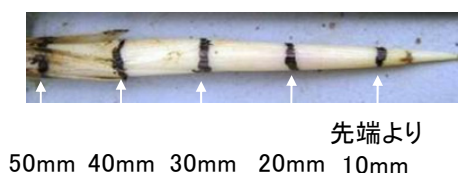
写真4.4 高吸水性ポリマー

4.4 地下茎の肥大量の測定方法

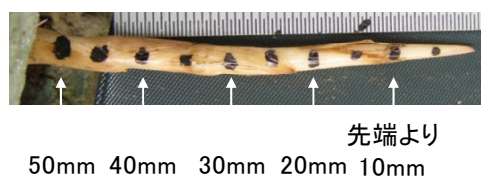
測定はソメイヨシノと同様に、夏期に大きな生長が期待され、冬期は停滞することが予測されたため、夏期は2008年7月28日～試験体数1体、2009年5月11日～試験体数2体、冬期は2009年2月17日～試験体数2体でそれぞれ測定を行った。地下茎を植栽部で十分養生させた後、地下茎を測定部に誘導した。

それぞれの測定に使用した地下茎及びその測定点を写真4.5に示す。先端から10mm間隔で5点設けた測定点で、地下茎の直径すなわち肥大量を測定した。毎日午前8時に塩化ビニル製樹脂パイプを取り外し、地下茎の直径をノギスにより測定した。

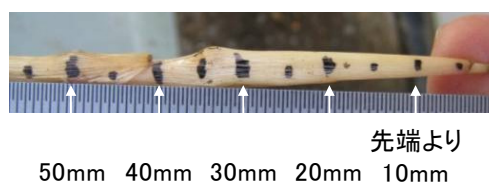
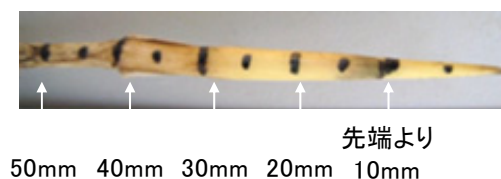
夏期の測定 2008年7月28日測定開始



2009年5月11日測定開始



冬期の測定 2009年2月17日測定開始



10mm

写真4.5 肥大量の測定に使用したクマザサ地下茎と測定点

表4.1 測定開始前の各測定点における鉛直方向及び水平方向の直径

測定開始日	測定点の先端からの距離	鉛直方向直径(mm)	水平方向直径(mm)
2008年7月28日	10mm	2.35	2.25
	20mm	3.40	3.30
	30mm	4.00	4.00
	40mm	4.40	4.20
	50mm	3.45	3.55
2009年5月11日 n=1	10mm	2.40	2.30
	20mm	3.60	3.80
	30mm	4.15	4.00
	40mm	4.25	4.65
	50mm	4.45	4.45
2009年5月11日 n=2	10mm	2.20	2.00
	20mm	2.70	2.80
	30mm	2.90	2.90
	40mm	3.15	3.00
	50mm	3.10	2.95
2009年2月17日 n=1	10mm	1.95	1.95
	20mm	3.00	3.00
	30mm	3.20	3.20
	40mm	3.90	3.45
	50mm	2.7	2.65
2009年2月17日 n=2	10mm	2.40	3.40
	20mm	3.50	3.40
	30mm	4.25	3.90
	40mm	3.10	3.35
	50mm	4.65	5.10

4.5 地下茎の肥大量の測定結果

地下茎の直径の変化を図 4.2 に示す。冬期は先端と先端から遠い部分共に、測定初期の直径からほとんど変化が見られていないが、夏期は当然のことながら先端に近いほど測定初期の直径は細いが、時間の経過とともに肥大し、先端から遠くなるに従い当初の直径は太いが、その後の肥大はわずかとなった。また、冬期夏期共に鉛直方向と水平方向の直径の差異はほとんど見られていない。

それぞれの測定点の最大肥大量（観測された直径の最大値－測定前の直径）を図 4.3 に示す。冬期は先端と先端から遠い部分に係わらず、ほとんど肥大生長していないが、夏期は先端から 50mm の部分でも肥大生長が観測されている場合もある。しかし特に先端から 10mm, 20mm, 30mm の範囲内で肥大生長が顕著であり、特に顕著であった先端から 10mm の部位におけるそれぞれの肥大量は、2008 年 7 月 28 日測定開始では鉛直方向 2.05mm（測定開始前の直径 2.35mm）、水平方向 2.1mm（測定開始前の直径 2.25mm）、2009 年 5 月 11 日測定開始 n=1 では鉛直方向 0.9mm（測定開始前の直径 2.40mm）、水平方向 1.0mm（測定開始前の直径 2.30mm）、2009 年 5 月 11 日測定開始 n=2 では鉛直方向 0.55mm（測定開始前の直径 2.20mm）、水平方向 0.55mm（測定開始前の直径 2.00mm）であった。

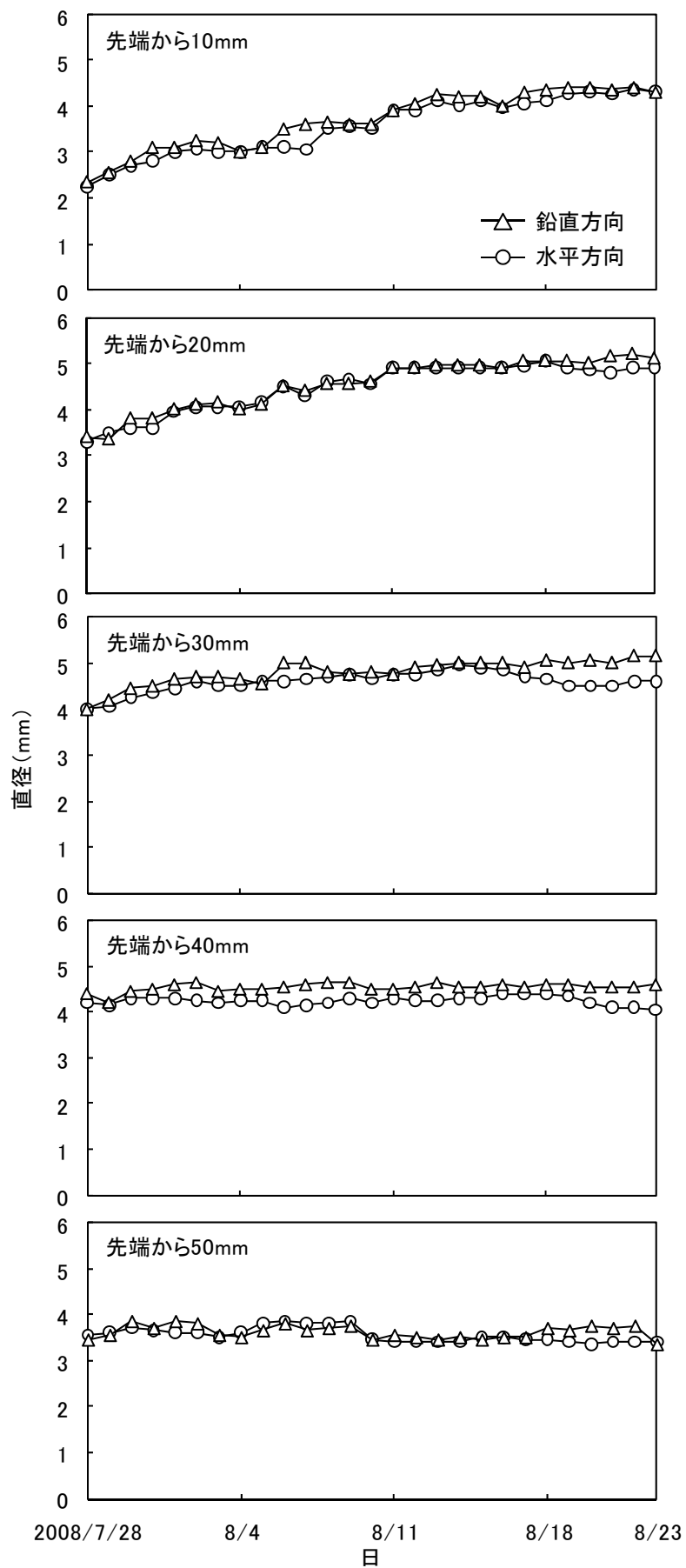


図4.2 肥大量測定結果(2008年7月28日測定開始)

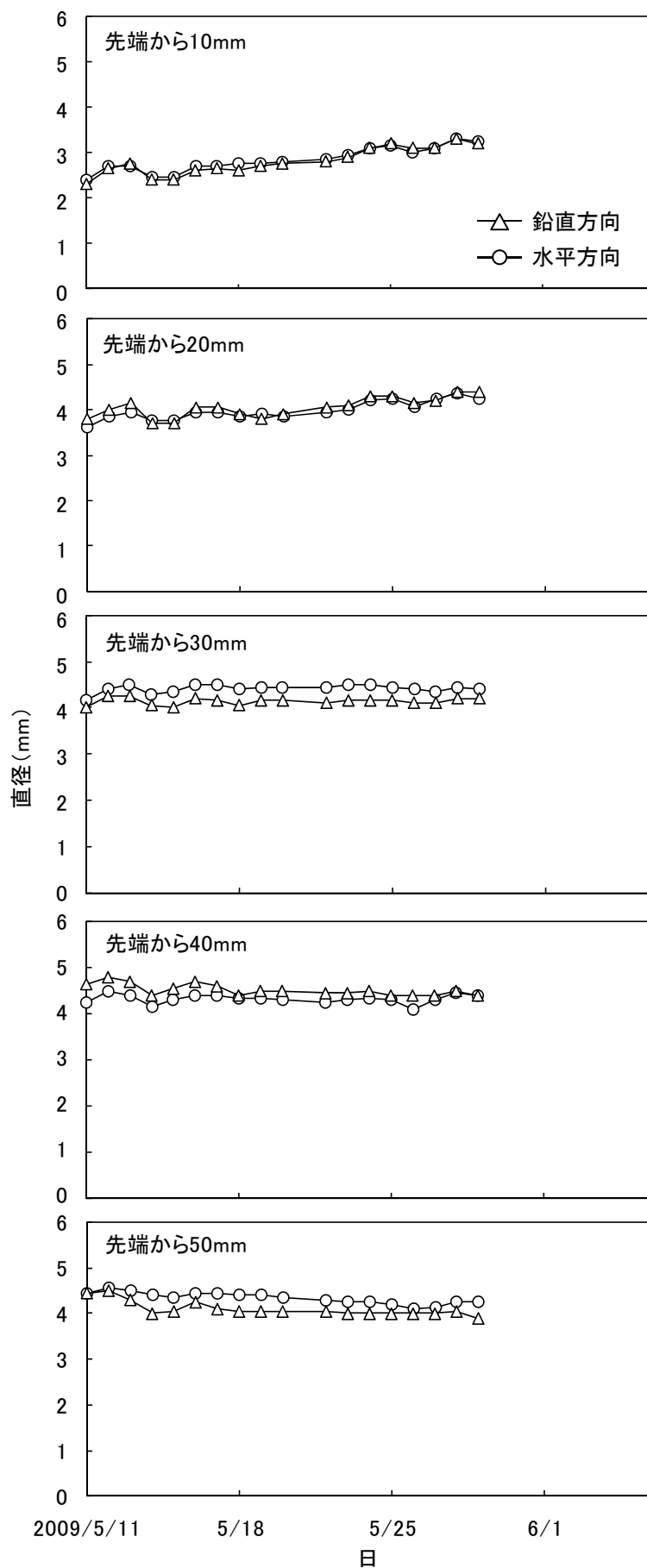


図4.2 肥大量測定結果(2009年5月11日測定開始 n=1)

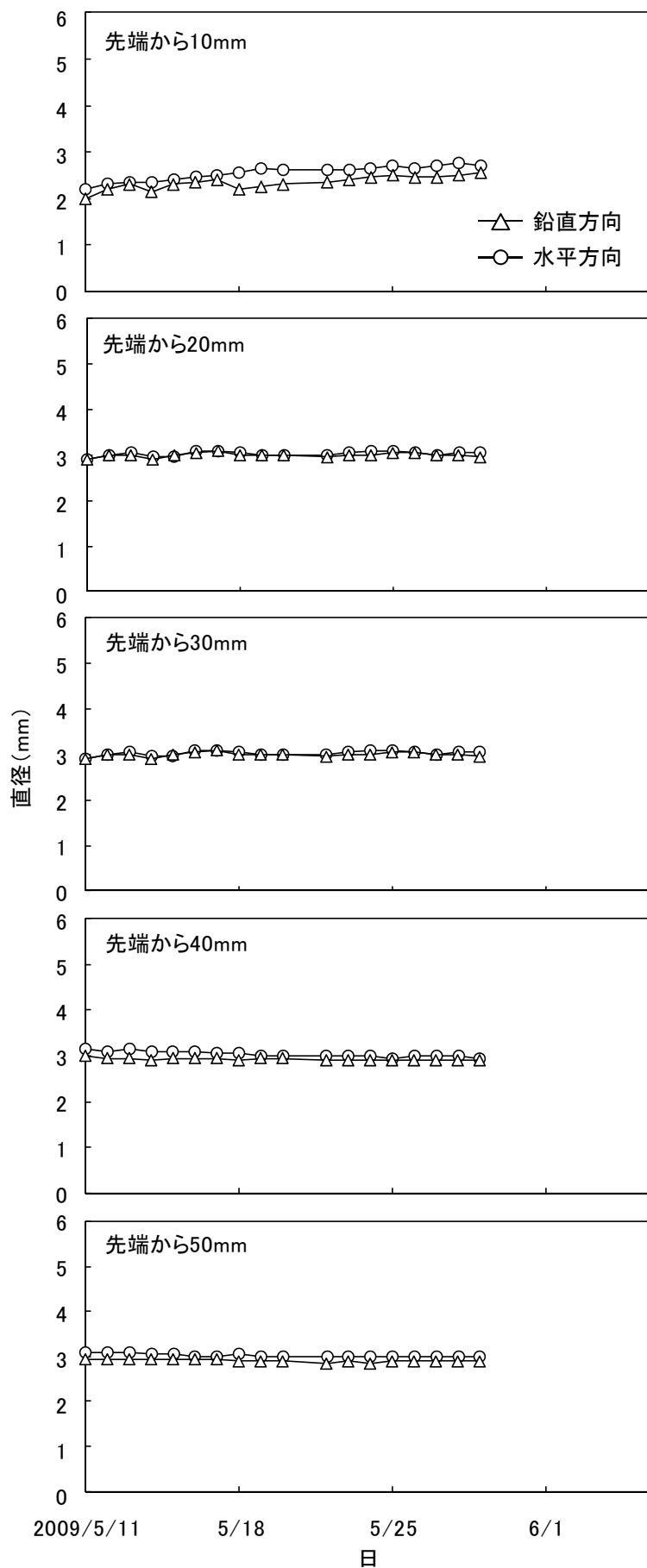


図4.2 肥大量測定結果(2009年5月11日測定開始 n=2)

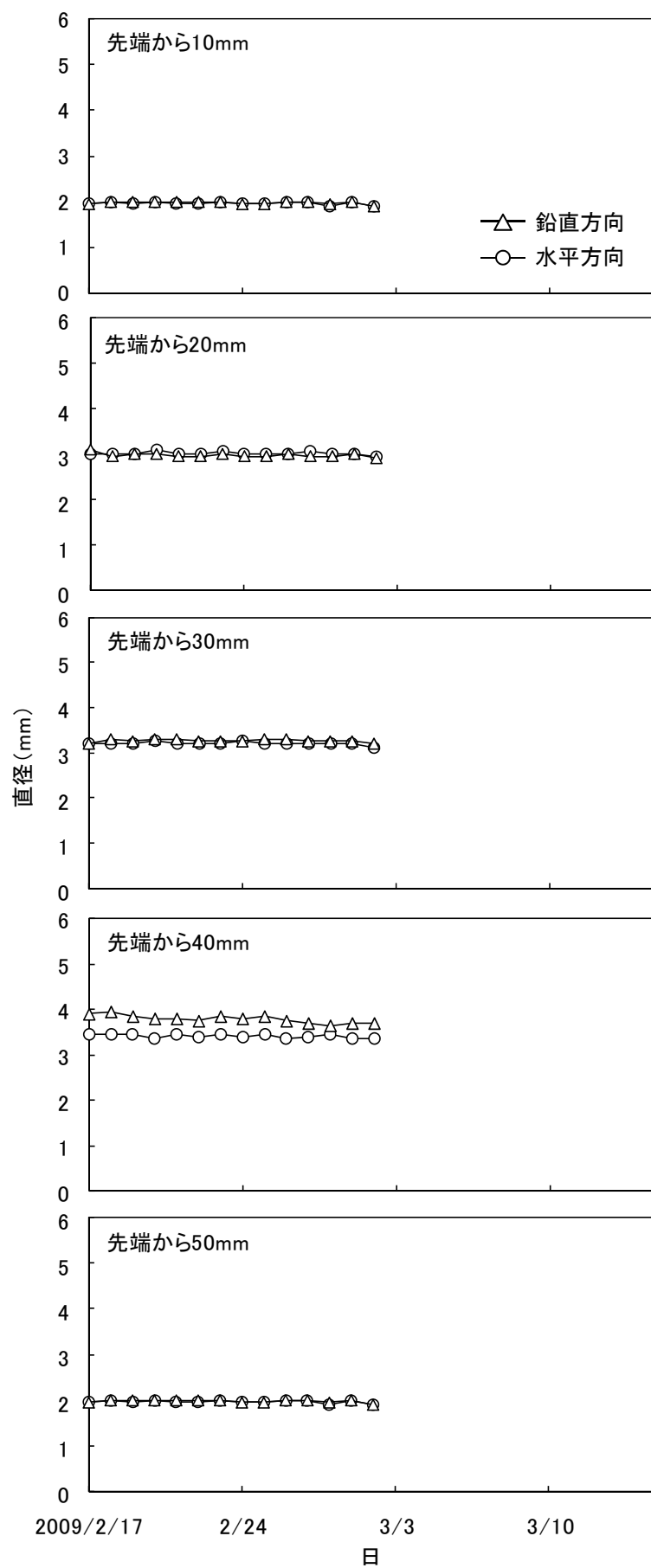


図4.2 肥大量測定結果(2009年2月17日測定開始 n=1)

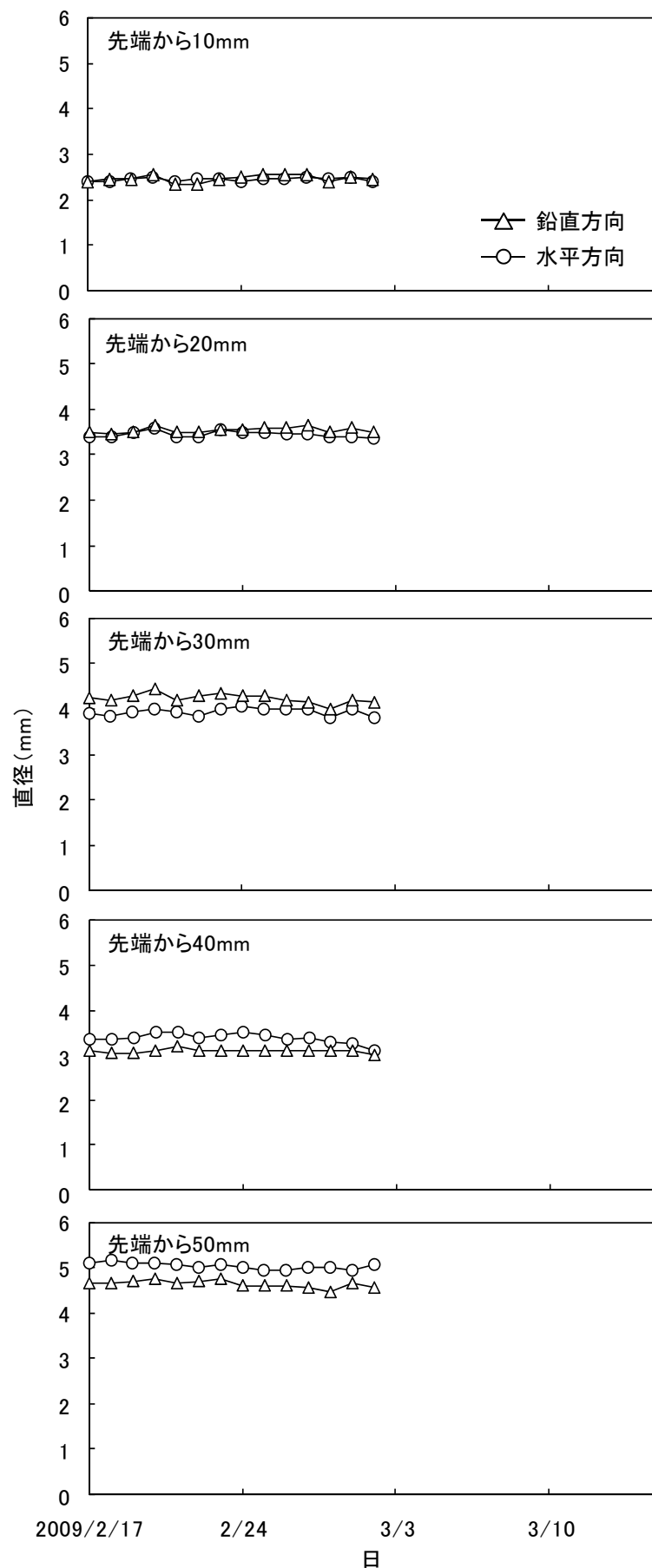


図4.2 肥大量測定結果(2009年2月17日測定開始 n=2)

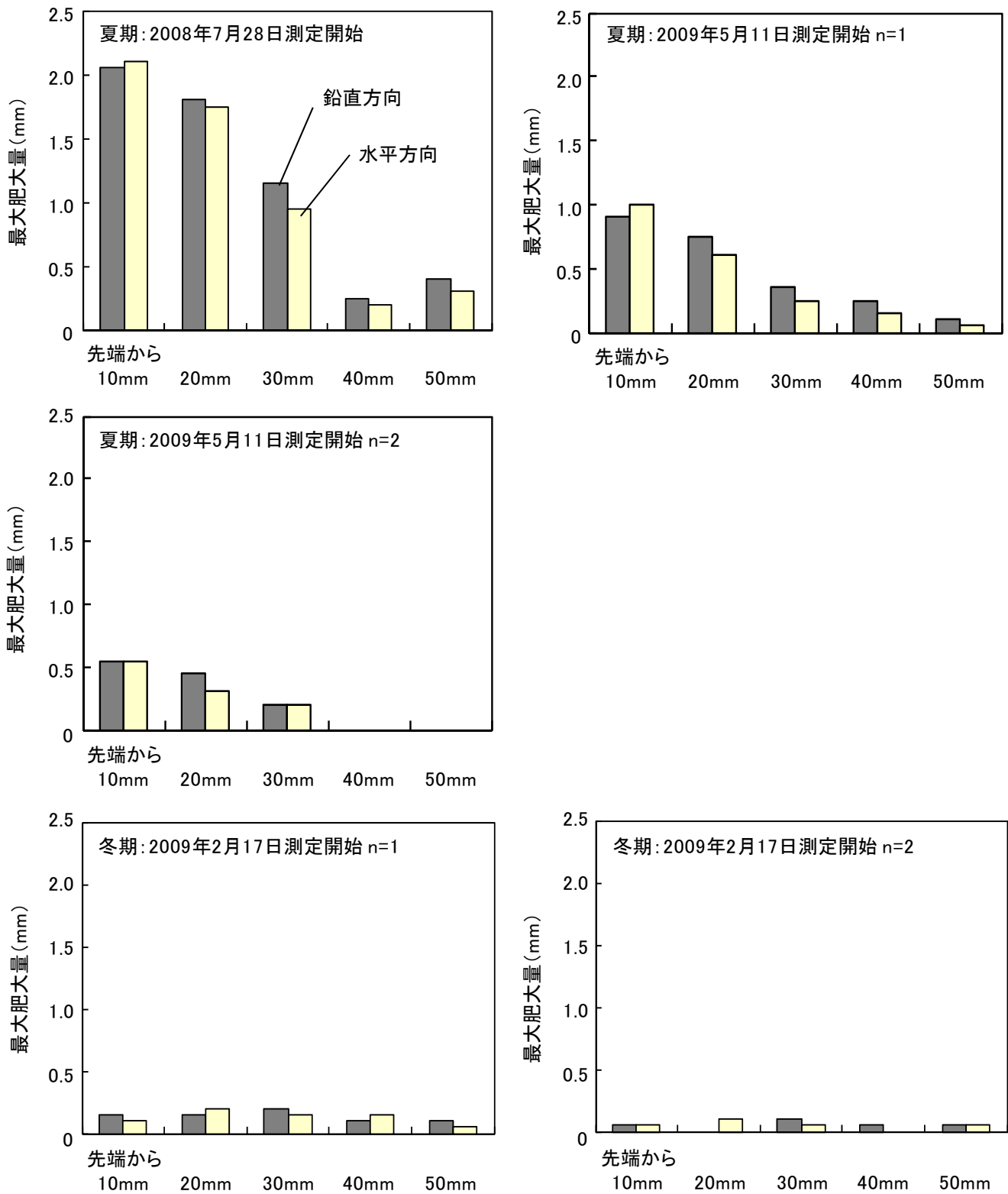


図4.3 最大肥大量

4.6 地下茎の伸長量測定方法

肥大生長は先端から 30 mm 以内で著しいことが明らかになったが、その部分の伸長状態をさらに測定した。すなわち地下茎先端から 5mm 間隔で 4 点の測定点を設け、区間の伸長量を測定した。

測定には地下茎の肥大量測定装置と同様、図 4.1 に示す測定装置を用いた。

測定は地下茎の肥大量測定と同様、夏期と冬期に行った。夏期は 2009 年 5 月 11 日～、冬期は 2009 年 2 月 17 日～それぞれ試験体数 2 体で行った。

4.7 地下茎の伸長量の測定結果

写真 4.6 に測定前と測定後の地下茎の写真を示す。冬期はほとんど変化が見られないのに対し、夏期は先端に近い部分で顕著に伸長生長していることが分かる。また、各測定点における地下茎の伸長量の変化を図 4.4 に、測定期間中に観測されたそれぞれの測定点の最大伸長量を図 4.5 にそれぞれ示す。2009 年 5 月 11 日測定開始 n=1 では先端から 5 mm までの部分では、測定期間内に約 4.3mm、2009 年 5 月 11 日測定開始 n=2 では約 6.4mm の伸長生長が見られたが、それより先端から遠い部分では、ほとんど伸長生長が見られていない。



写真4.6 伸長量の測定前と測定後の地下茎

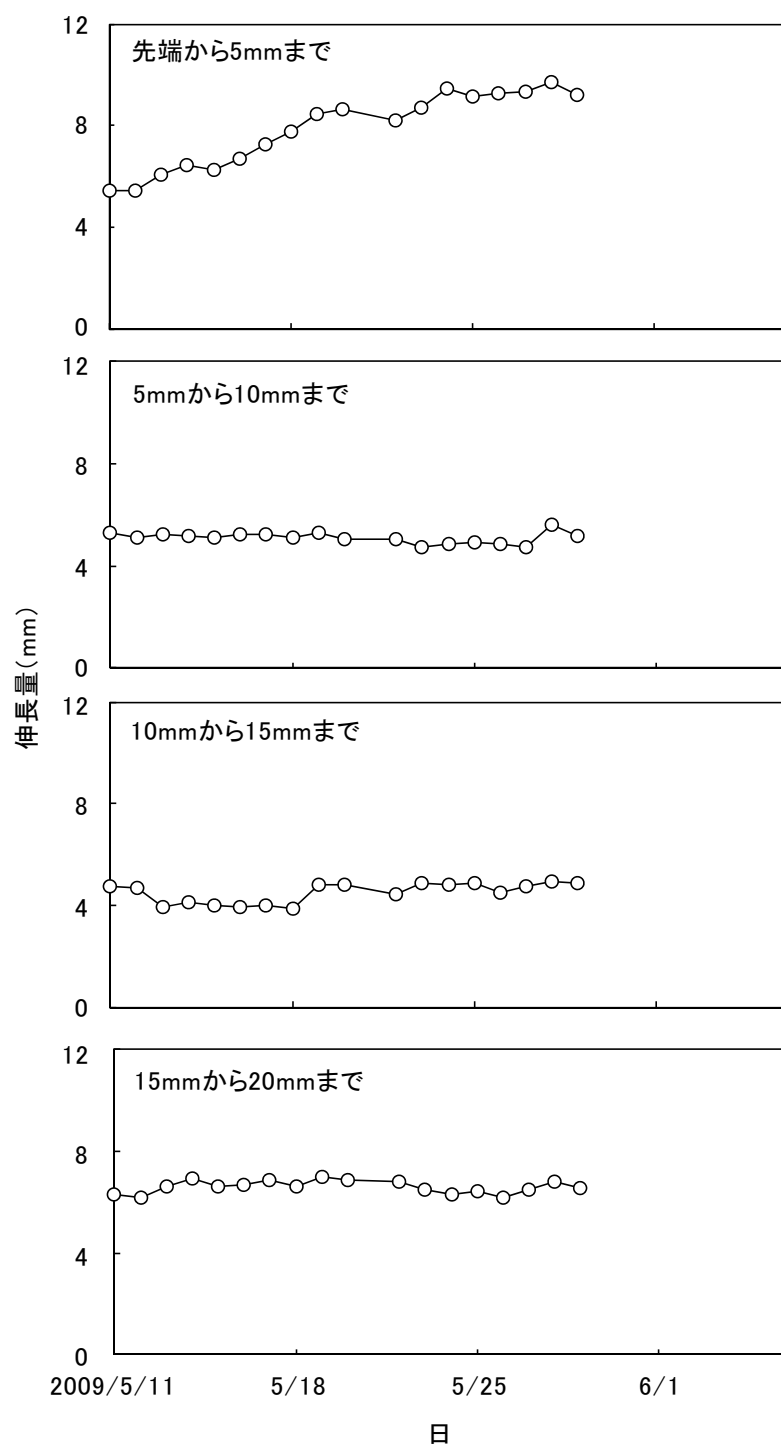


図4.4 肥大量測定結果(夏期:2009年5月11日測定開始 n=1)

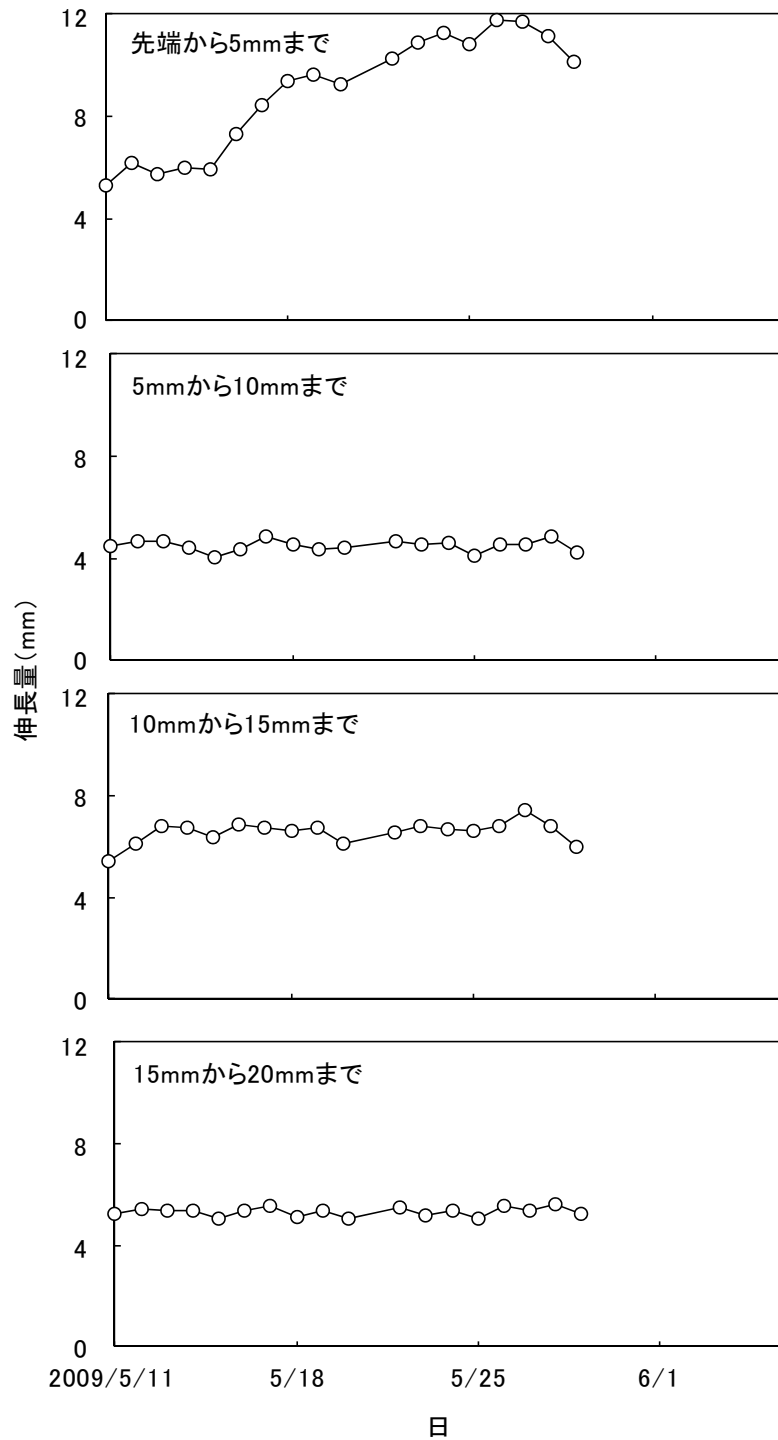


図4.4 肥大量測定結果(夏期:2009年5月11日測定開始 n=2)

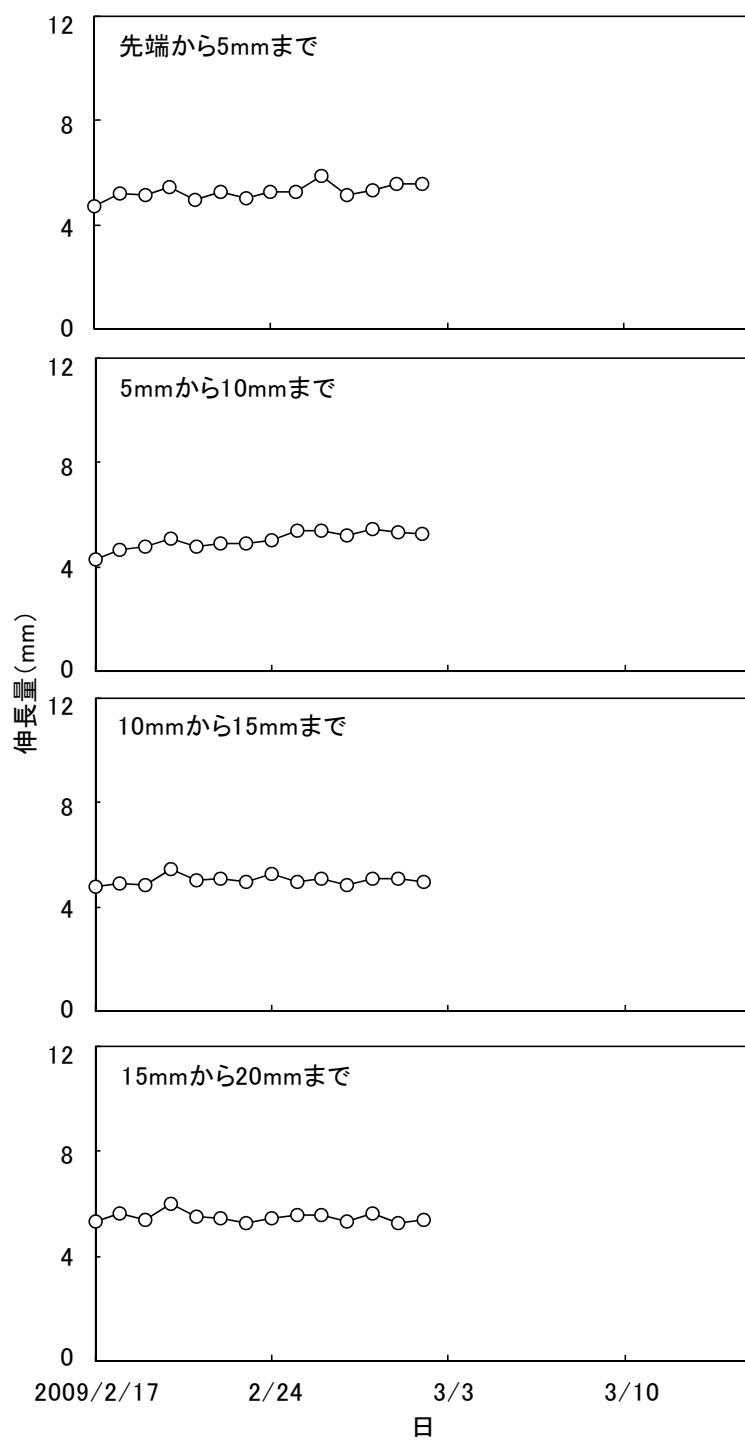


図4.4 肥大量測定結果(冬期:2009年2月17日測定開始 n=1)

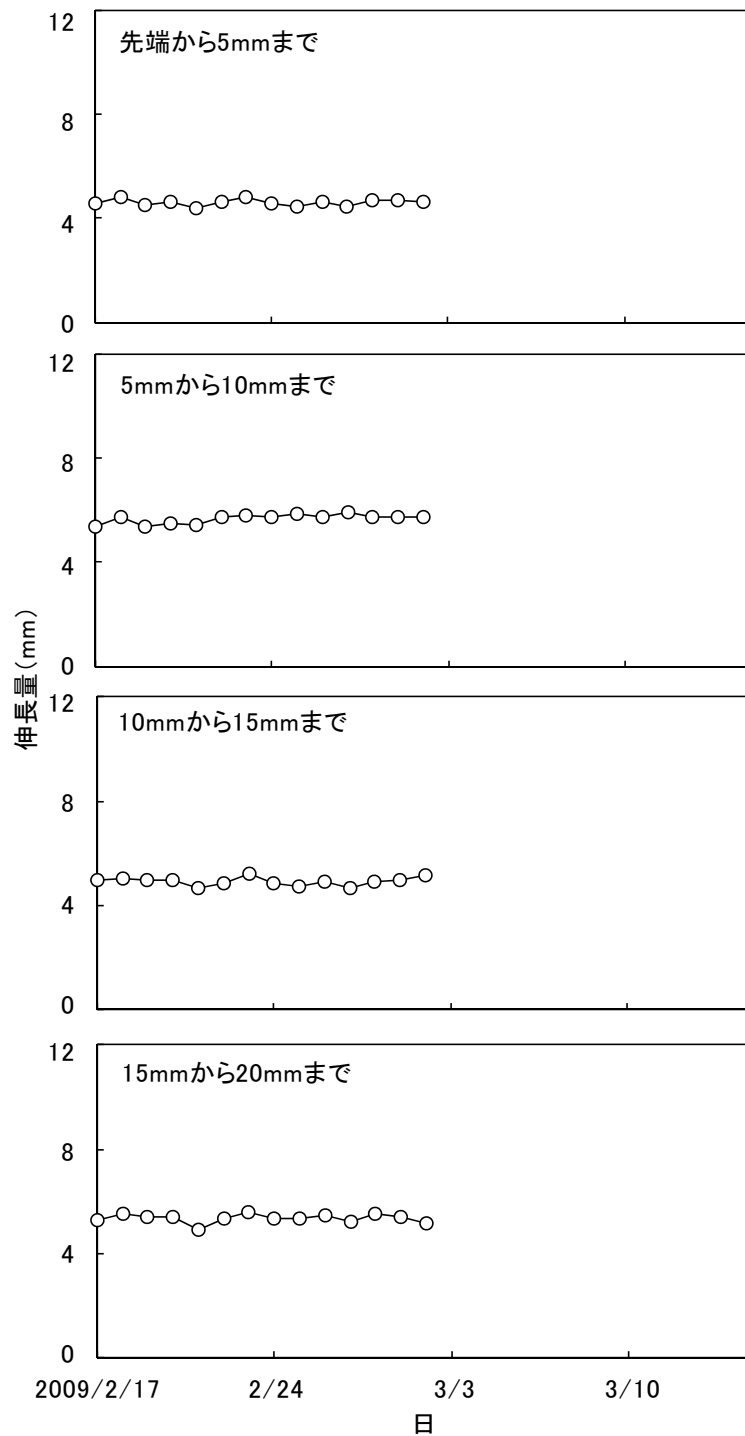


図4.4 肥大量測定結果(冬期:2009年2月17日測定開始 n=2)

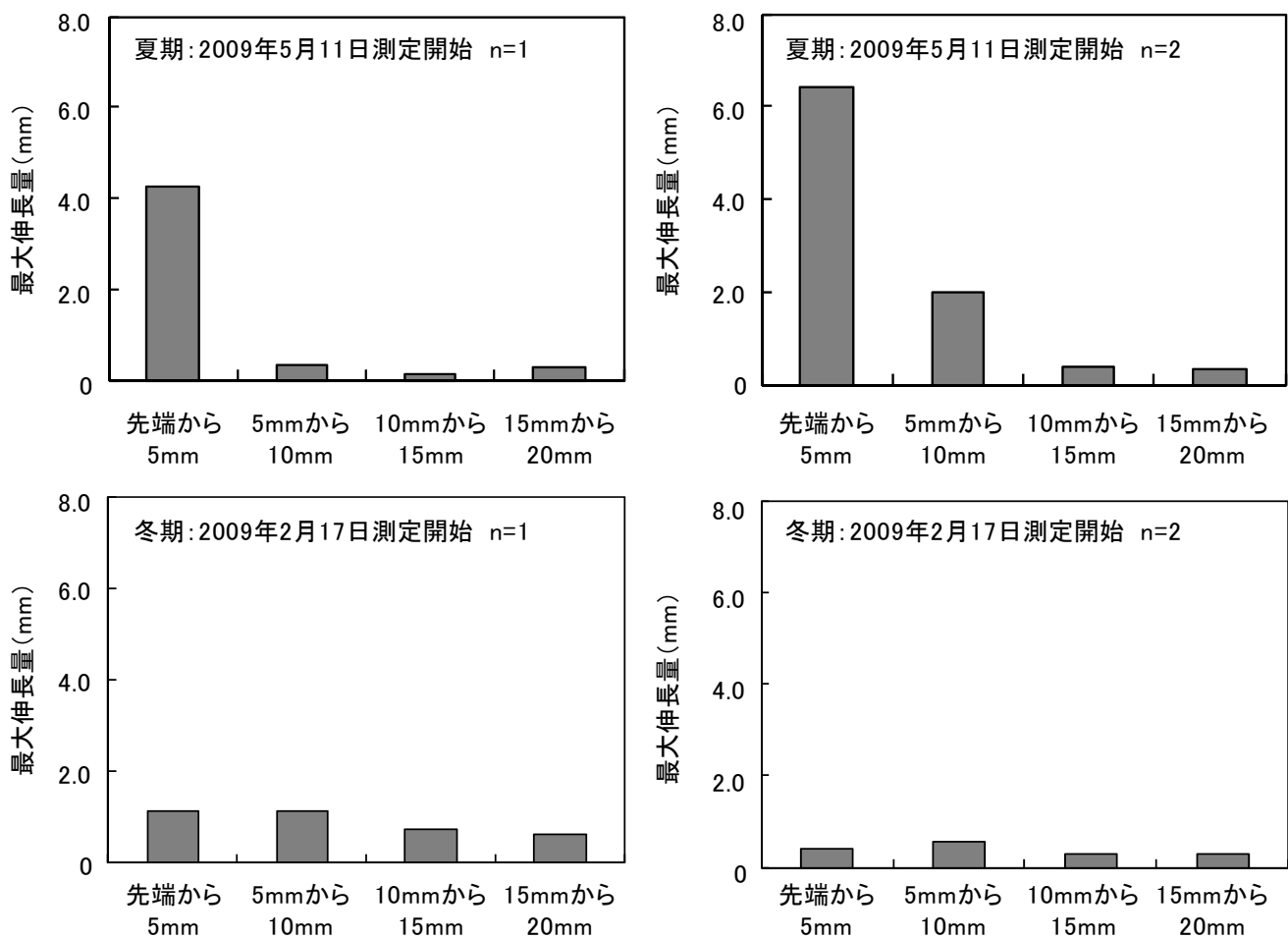


図4.5 最大伸長量

4.8 肥大力測定に適する地下茎の位置の考察

地下茎の肥大量及び伸長量の各測定点による差は、根の組織構造によるものであると考えられる。一般的に根の先端に近い部位には、細胞分裂が盛んに行われる分裂組織があり、細胞分裂と細胞自体の生長により、顕著な生長が見られる。しかし先端より遠い基部に近い部位には、組織が成熟する成熟帯があり、根の先端のような顕著な生長は見られない。そこで、地下茎の先端部（先端から約10mm）及び基部（先端から約50mm）の地下茎の根軸付近の断面を、光学顕微鏡により観察した。写真4.7に地下茎の断面写真を示す。先端部では、細胞自体がまだ小さいが、基部では細胞自体が大きく組織が成熟していると推察される。これらの部位ごとの組織の差異により、地下茎の先端に近い部位ほど最大肥大量及び肥大率が増加したと考えられる。

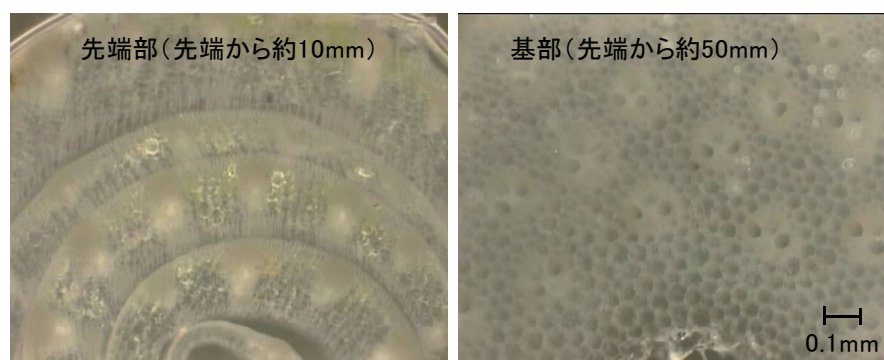


写真4.7 地下茎の断面写真

今回の測定から肥大は地下茎先端から10mm以内で最も顕著であることが判明したが、過度に先端に近づき過ぎると、その部分は急速に伸長する部分であり、測定が困難となることが予想される。また、その部分は生長の最も活発な部位、分裂帯（細胞分裂が盛んに行われる部分）でもあり、過度に圧迫すると地下茎の生長を阻害し枯死させる恐れがある。そのため、肥大力測定はある程度地下茎の組織が安定し、しかも肥大力の大きな増大の期待される先端から10mm近傍が望ましいと考えられた。

4.9 地下茎の肥大力測定装置の開発

肥大力測定装置を図4.6及び写真4.8に示す。ロードセルに取り付けた受力部で地下茎を上下から挟み、地下茎が肥大生長する際に受力部を押し付ける力（肥大力）を測定するものである。なお受力部の幅は6mmとした。肥大力測定装置取り付けから測定開始までの状況を写真4.9に示す。受力部周辺には地下茎の生長を妨げないよう、湿潤土壌を充填した。また湿潤土壌充填部には排水用の孔を開け、土壌水分の過度の蒸発を防ぐため、土壌充填部全体を厚さ1mmのアルミニウム製の覆いを取り付けた。植栽容器の側面に直径10mmの孔を開け、その孔に合わせて肥大力測定装置を取り付け、受力部に地下茎を誘導できるようにしてある。

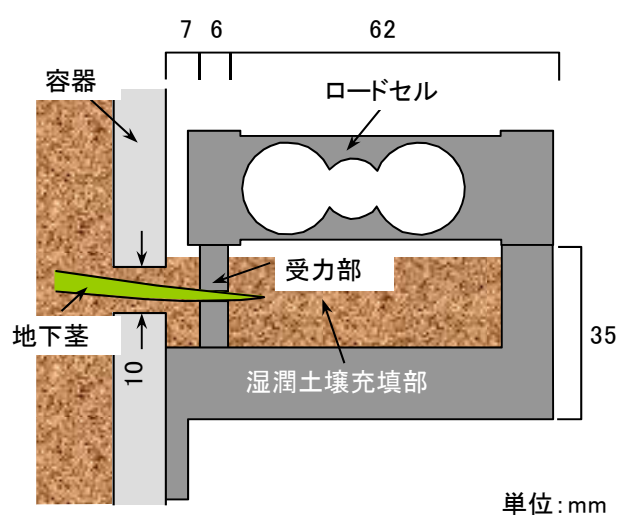


図4.6 肥大力測定装置(断面図)

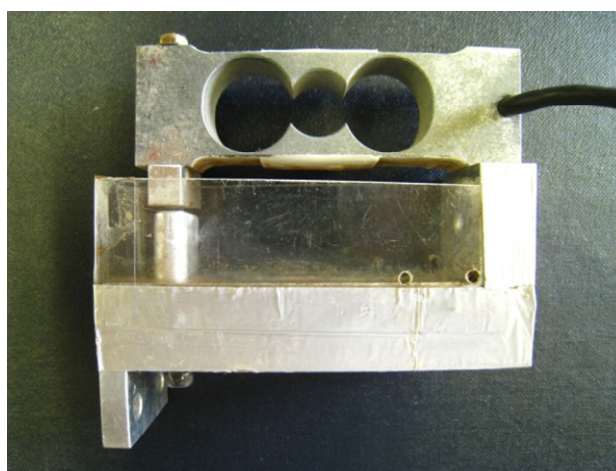
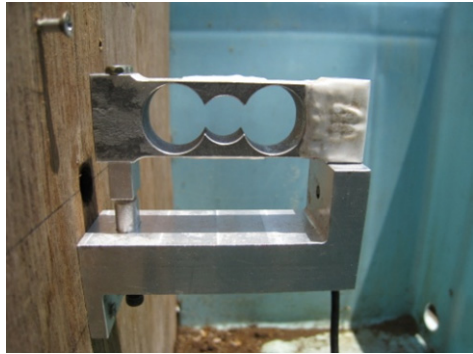


写真4.8 肥大力測定装置



容器側面に装置を固定



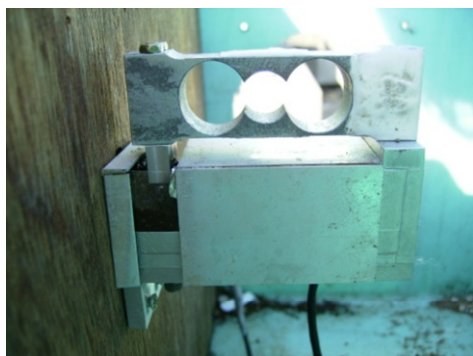
地下茎を受力部に誘導



受力部で地下茎を挟みこんでいる様子



受力板周辺に土壌を充填



土壌乾燥防止のプレートの取り付け

写真4.9 肥大力測定装置取り付け状況

4.10 地下茎の肥大力測定方法

植栽容器でクマザサを十分に養生させた後、地下茎の先端を受力部に誘導した。地下茎の肥大量及び伸長量の測定と同様、測定は夏期と冬期に行った。夏期は2008年6月14日～、2008年7月19日～、2009年5月15日～、2009年5月27日～、冬期は2009年2月16日～、2009年3月2日～行った。なお、測定は、「4.8 肥大力測定に適する地下茎の位置の考察」を基に、地下茎の先端から約10mmの位置で行った。

4.11 地下茎の肥大力測定結果及び考察

測定結果を図4.7に示す。ソメイヨシノの肥大力と同様に、冬期はほとんど変化しないのに対し、夏期の肥大力は単調に増加するのではなく、日中から夜間にかけて増加し、明け方から日中にかけて減少するという周期的な変化を繰り返しながら、全体的には増加した。しかし、測定開始数日後には、上限に到達し、それ以降の増加はわずかとなる。

今回行った測定で観測された肥大力の最大値は、2008年6月14日測定開始では8.2N/cm、2008年7月19日測定開始では7.7N/cm、2009年5月15日測定開始では9.0N/cm、2009年5月27日測定開始では26.5N/cmであった。

夏期及び冬期の一日の肥大力の変化と気温及び全天日射量の日変化を図4.8に示す。温度は今回の測定地である横浜の気象庁のデータを、全天日射量は、横浜の気象台では測定されていないため、今回の測定地から一番近隣の東京の気象庁のデータを引用した。ここで、肥大力は各日における午前0時を基準とし、その変化量として表してある。最も大きな肥大力が観測された2009年5月27日測定開始の場合、肥大力の一日の最大変化量および最大増加速度は、各々11.3N/cm、2.8N/cm・hrであった。これらの肥大力の日変化は、ソメイヨシノの肥大力測定結果と同様、夏期は日射量とほぼ同期しており、クマザサの葉からの蒸散による植物体内の圧力状態に起因していると考えられる。また冬期は日射量に関わらず、植物の生育が緩慢となっているため、肥大力の変化は見られていない。

ここで、最も大きな肥大力が観測された2009年5月27日測定開始の測定後の地下茎の状態を写真4.10に示す。生長を阻害されることなく自由に生長した地下茎に比べ、肥大力を測定した地下茎は鱗片葉が発達し、ふくらみのある形状へと変化している。また基部側では写真4.11に示すように、側根の発達が顕著となっている。一般的に、根の断面方向の組織構成は図4.9に示す通り、外側から表皮、皮層、中心柱という構成になっている。機械的抵抗に対しては肥大するという。この機械的抵抗によって引き起こされる根の直径の変化は、主に皮層の厚さが変化することによって

いる場合が多いという。この肥大生長のプロセスは「第2章 根の肥大力測定装置の開発及び測定」で見られた、ソメイヨシノの根の肥大生長とは異なる。すなわち、ソメイヨシノの肥大生長は、根の中心柱内で新たな形成層の細胞分裂がさかんとなり引き起こされる二次肥大生長であるのに対し、機械的抵抗による肥大は皮層により引き起こされる。今回は肥大力を測定する際に、受力板で地下茎を上下から挟んでいるため、その部分において地下茎に機械的抵抗を与えていることになる。そのため皮層が厚くなり、結果として機械的抵抗を与えずに測定した「4.5 地下茎の肥大量の測定結果」よりも顕著な地下茎の肥大が確認されたと考えられる。この状況は例えば防水シートや耐根シートのジョイント部あるいは、見切り材等緑化資材の空隙部に地下茎が侵入した場合、地下茎は機械的抵抗を受けながら生長することになり、機械的抵抗なしで生長するよりも更に危険な状況となることが推察される。

また、参考として既往の研究より、地下茎の押し付け力の測定結果を図4.10に示す。これはクマザサの地下茎の押し付け力を2005年5月21日から6月10日まで測定されたものである。押し付け力も肥大力と同様に、日毎の周期的な変化を繰り返しながら全体的に増加し、この測定では、最大で9.8Nの押し付け力が観測されている。押し付け力測定においては、地下茎の先端が受力板にどの程度接していたか不明なため、肥大力の測定結果と単純に比較はできないが、押し付け力は地下茎の先端の点で作用するのに対し、肥大力は面で作用する。そのため、今回の測定で得られた肥大力と既往の研究の押し付け力のように、肥大力が押し付け力の3倍近い力となる場合もある。これらの点からも、肥大生長を加味した耐根性評価試験方法の必要性が再確認される。

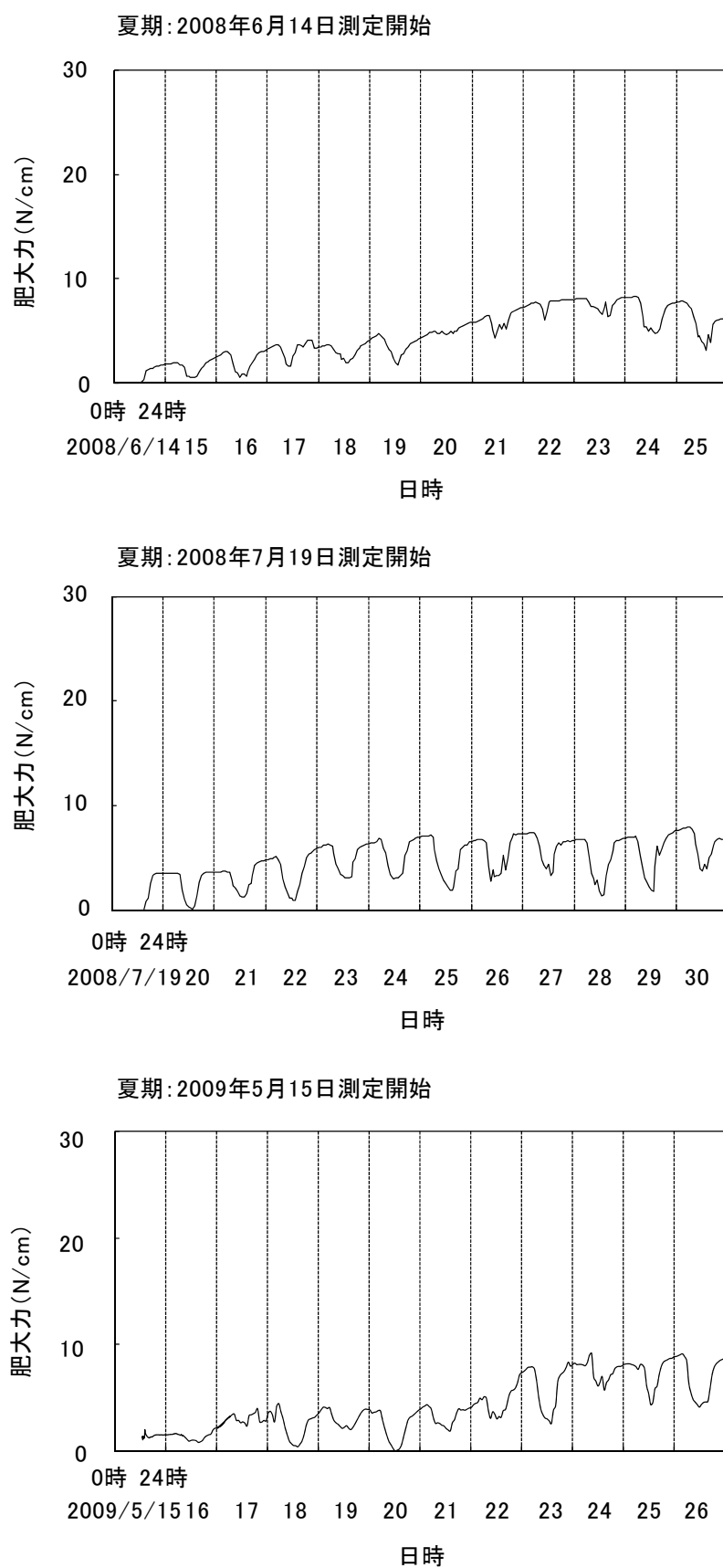


図4.7 肥大力測定結果 1/2

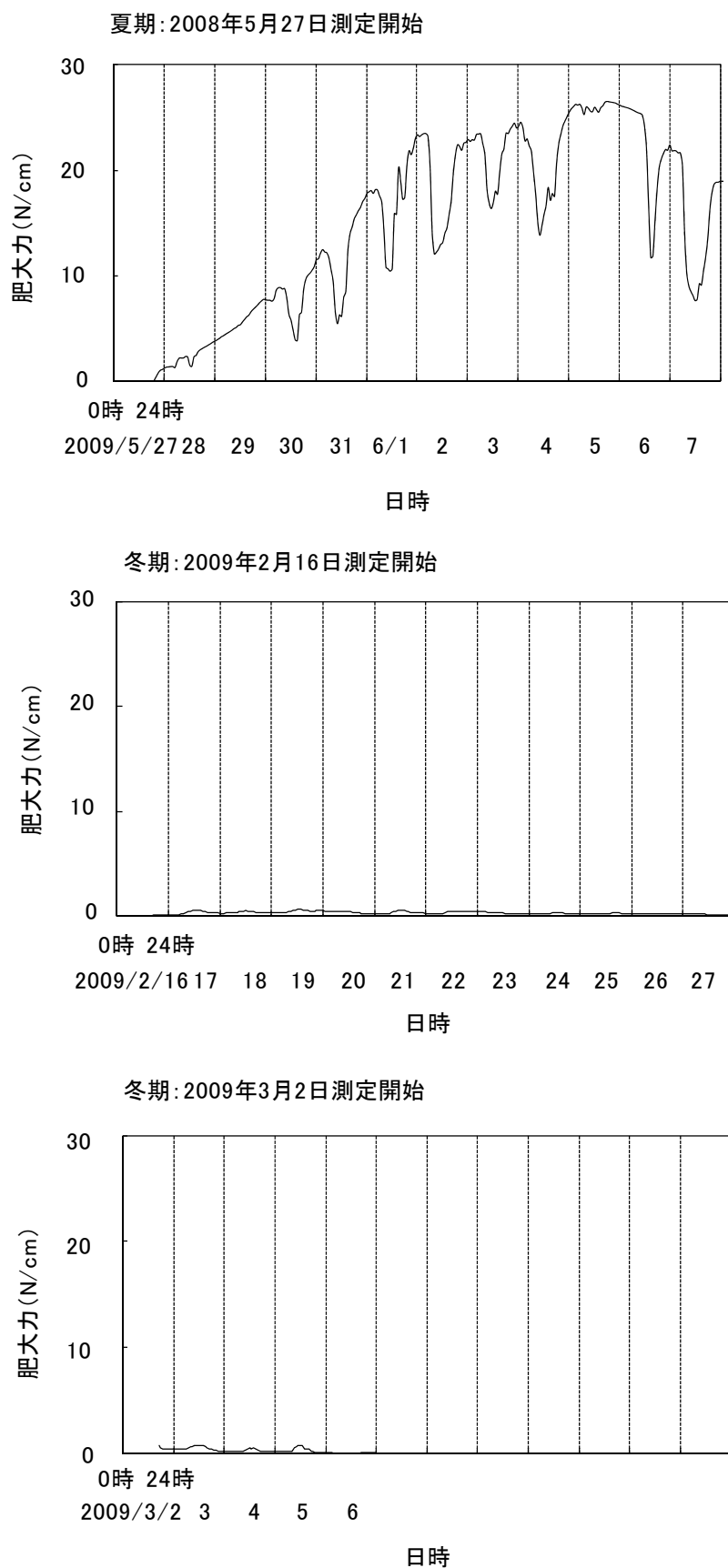


図4.7 肥大力測定結果 2/2

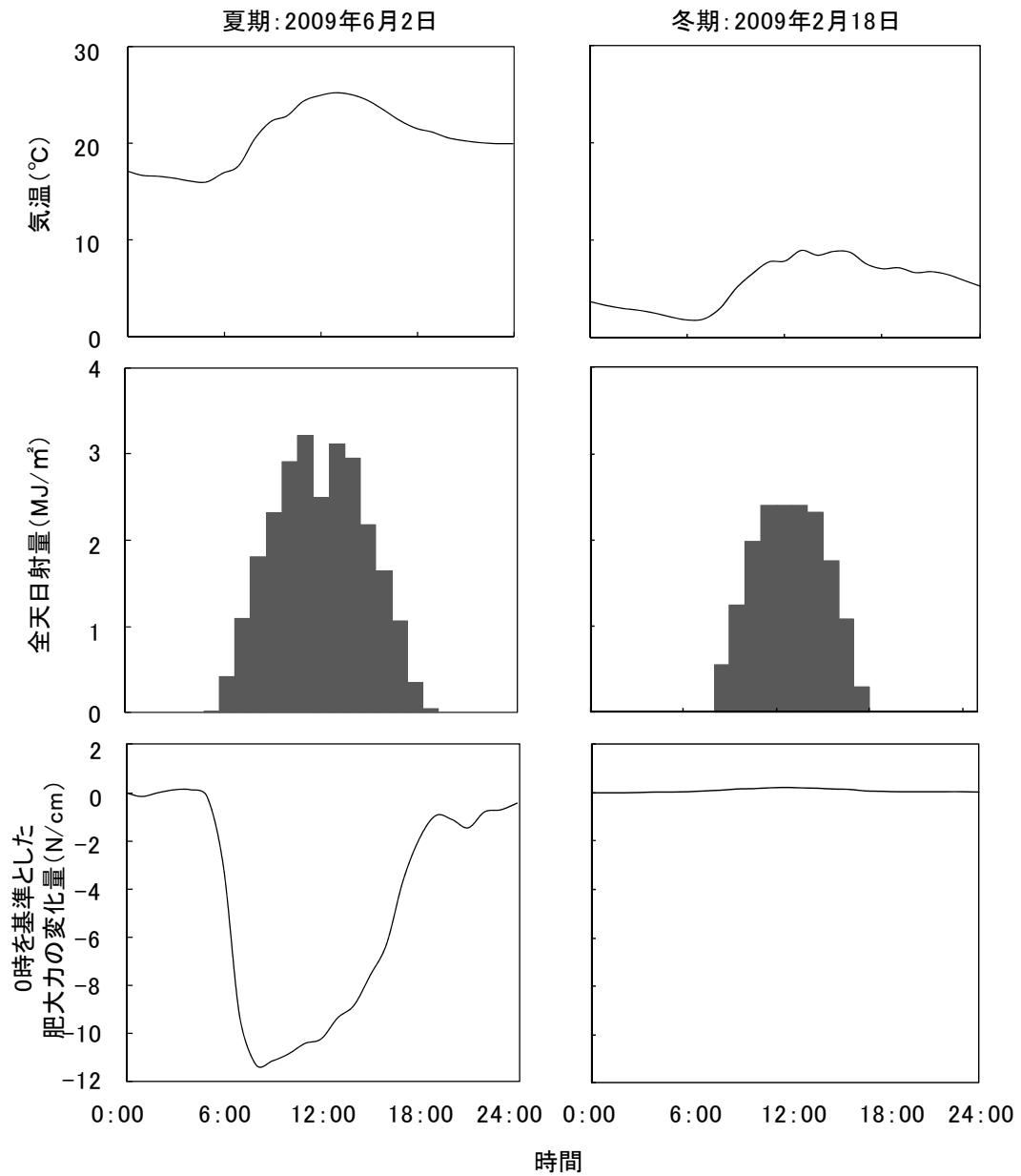


図4.8 肥大力及び気温、全天日射量の一日の変化

肥大力測定後の地下茎

(参考)自由に生長した地下茎



写真4.10 肥大力測定後の地下茎



写真4.11 基部側に見られる顕著な側根の発達

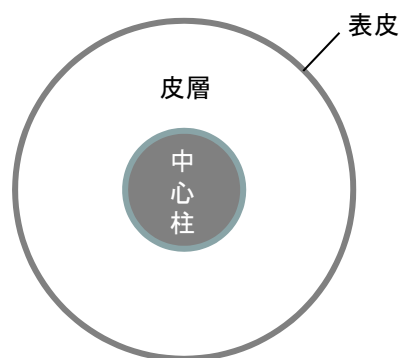


図4.9 一般的な根の断面方向の組織構成

4.12 まとめ

草本類植物の根の肥大力測定について、以下の知見が得られた。

- 1) 地下茎の肥大力及び伸長量の測定を行い、肥大力の測定に適した部位の検討を行った。
- 2) 肥大力測定装置を開発し、それらの測定を可能にした。作製した装置を用いて、クマザサの地下茎を例とした肥大力の測定で、夏期において訳 **26.5N/cm** の肥大力の増加を観測した。
- 3) 夏期の肥大力は、一日毎の周期的な変化を繰り返しながら全体的に増加する傾向を示した。これは蒸散に起因する膨張収縮によるものであることが推測された。

第5章

地下茎を対象とした耐根性評価試験に 用いる模擬根の作製と試験適用例

5.1 はじめに

本章では、耐根性評価試験に用いる模擬地下茎の作製と試験適用例について述べる。

前章で、草本類植物の地下茎の肥大力の一例としてクマザサの地下茎の肥大力を測定した。本章では、その測定結果を基に、緑化にかかわる部位、部材の耐根性評価に利用できる模擬地下茎を開発する。また模擬地下茎を用いた耐根性評価試験の適用例として、屋上緑化のシート防水ジョイント部を想定し、模擬地下茎利用の有用性について検討する。

5.2 模擬地下茎の作製

5.2.1 機構と構成

クマザサの地下茎は、太い部分で直径が 5mm 程度ある。そのため、作製する模擬地下茎は、その程度の太さのゴムチューブに油を充填し、そこに圧力をかけゴムチューブを膨張させることで肥大生長を再現させる方法を用いることとした。

作製する模擬地下茎は、実測された 26.5N/cm 以上の力を作用できるものである必要がある。そこで、それを再現させるため、模擬地下茎軸部と、それを覆い圧力を作用させるためのゴムチューブとから構成される模擬地下茎を作製した。

試作した模擬地下茎を図 5.1 に示す。模擬地下茎軸部は写真 5.1 に示す真鍮製の長さ 70mm、外径 2 mm ϕ 、内径 1mm ϕ の中空パイプを加工したものであり、5mm 間隔で直径 0.8 mm の孔が 9 個開けられている。この模擬地下茎軸部に油圧ポンプから油を送り込むことにより、模擬地下茎軸部に開けられた孔を介してゴムチューブ内に油が充填され、圧力を作用させる機構となっている。ゴムチューブ部分の長さは 60 mm であり、端部と模擬地下茎軸部は針金で結束させエポキシ樹脂で接着し、油が漏れないようにした。また、ゴムチューブ内の圧力は、油圧ジャッキに取り付けた圧力計により測定できるようにした。

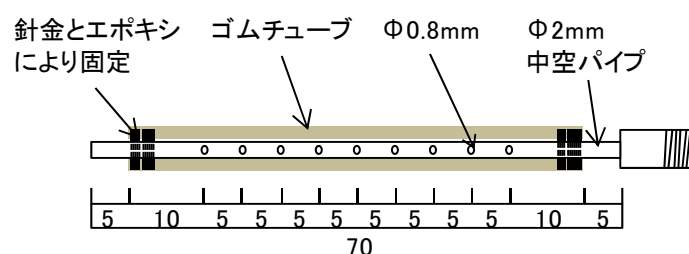


図5.1 作製した模擬地下茎



写真5.1 模擬地下茎軸部

模擬地下茎軸を覆うゴムチューブであるが、その材質、肉厚によっては過度に変形したり、ゴムチューブが圧力に耐えられず破損してしまい、クマザサ地下茎の肥大力測定で得られた 26.5N/cm 以上の力を作用させることができない場合がある。そこで、材質と肉厚の異なる表 5.1 及び写真 5.2

に示す4種のゴムチューブを選択し、ゴムチューブ内に圧力を作用させた際の模擬地下茎の加圧力の測定を行った。

表5.1 試験に用いたゴムチューブ

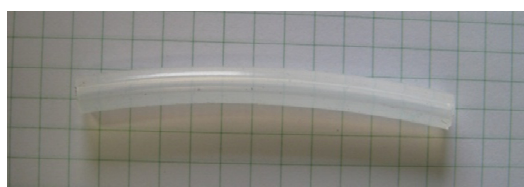
材質	内径(mm)	外径(mm)
肉厚ニトリルゴム	2	6
肉薄ニトリルゴム	4	6
シリコンゴム	2	6
塩ビ系・高分子ポリマーゴム	2	5



肉厚ニトリルゴム



肉薄ニトリルゴム



シリコンゴム



塩ビ系・高分子ポリマーゴム

写真5.2 試験に用いたゴムチューブ

5.2.2 模擬地下茎の加圧力測定

模擬地下茎の加圧力はクマザサ地下茎の肥大力測定に用いた図 4.6 に示した測定装置に、クマザサ地下茎に替わり模擬地下茎を挿入し、ゴムチューブ内に圧力を作用させた際の、模擬地下茎の加圧力の測定を行った。加圧力の測定位置は、模擬地下茎中央部であり、ゴムチューブ内の圧力を 0.1MPa ずつ上昇させ、模擬地下茎の加圧力が 50N/cm に達するまで加圧を行った。

ゴムチューブ内の圧力と模擬地下茎の加圧力の関係を図 5.2 に示す。肉薄ニトリルゴム、シリコンゴム、塩ビ系・高分子ポリマーゴムの場合は、模擬地下茎の加圧力がそれぞれ 27N/cm, 36N/cm, 30N/cm に達した時点で、ゴムチューブは圧力に耐えきれず、破損した。一方、肉厚ニトリルゴムは 50N/cm を超えても破損は生じなかった。また、破損が生じた肉薄ニトリルゴム、シリコンゴム、塩ビ系・高分子ポリマーゴムは、写真 5.3 に示すように加圧中に部分的に膨らみが発生し、破損に至ったり、全体的に過度に膨張しゴムに亀裂が発生し破損に至った。

これらの測定結果より、模擬地下茎に用いるゴムチューブは肉厚ニトリルゴムが適していると考えられる。このゴムチューブを用いて作製した模擬地下茎を写真 5.4 に示す。

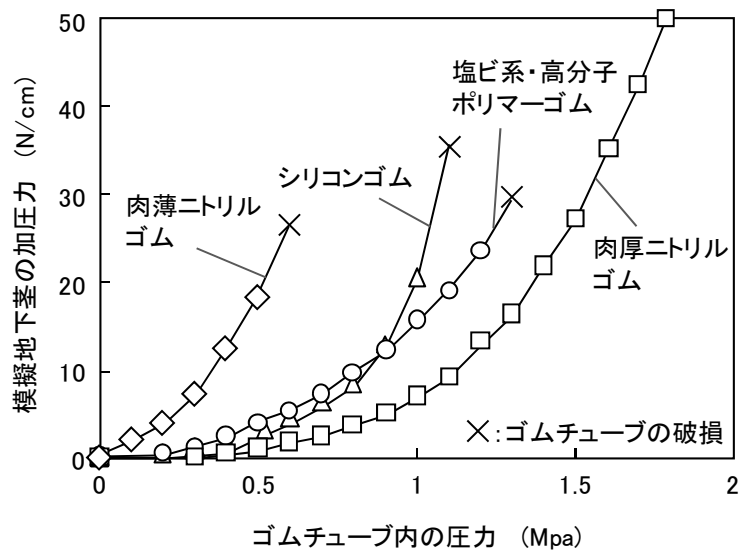


図5.2 ゴムチューブ内の圧力と模擬地下茎の加圧力の関係

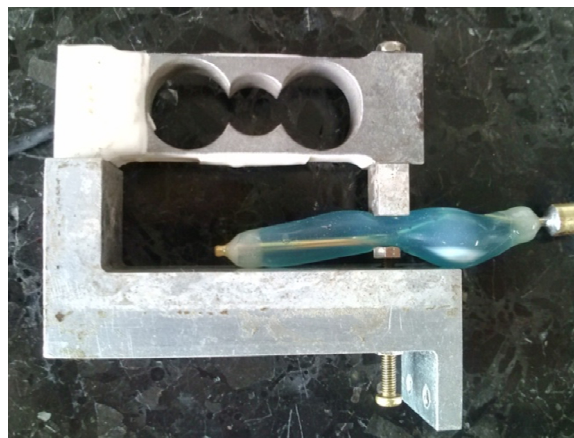


写真5.3 部分的に膨らみが発生した例

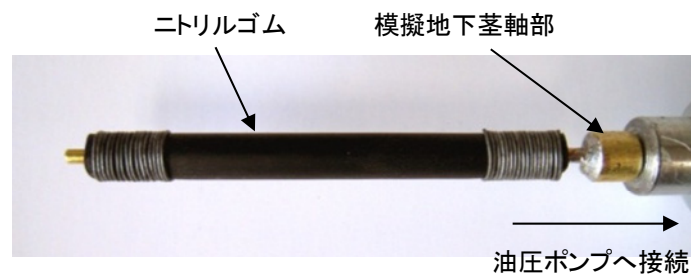


写真5.4 完成した模擬地下茎と加圧システム

5.3 模擬地下茎を用いたシート防水ジョイント部の耐根性評価の試み

5.3.1 試験体

作製した模擬地下茎の耐根性評価への適用の有用性を、シート防水ジョイント部を例として検討した。

「建築工事標準仕様書・同解説 JASS 8 防水工事 付録 T-401 屋上緑化用メンブレン防水工法の耐根性試験方法（案）」によると、「シート状材料では重ね合せ部分が、塗膜系液状材料では塗り継ぎ部分が防水性能上および耐根性能上弱点となりやすい。」としており、耐根性試験を行い試験体には、必ず重ね合せ部分を設けることとしている。また、「公共建築工事標準仕様書（建築工事編）平成二十二年度版」によると、耐根層のジョイント部は「長期（2年以上）にわたり、クマザサ等の地下茎伸長力の強い植物に対して貫通帽子能力をもつものとする。また重ね合わせ部についても同等の性能をもつものとする。」としており、シート防水及び耐根シートにおいて、ジョイント部が問題となることが多いと考えられる。肥大生長に着目すると、例えばジョイント部に地下茎が侵入し、そこで肥大生長することにより、剥離が発生しみずみちを作り、漏水を引き起こす可能性が高まることが考えられる。そのため、ここではシート防水ジョイント部を例として検討することとした。

ここで「建築工事標準仕様書・同解説 JASS 8 防水工事 1 節メンブレン防水工事」によると、シート防水ジョイント部は、加硫ゴム系の場合はクロロプレンゴム系、ブチルゴム系による接着材による接着、塩化ビニル樹脂系の場合はテトラヒドロフラン系による溶剤溶着、熱融着、エチレン酢酸ビニル樹脂系はポリマーセメントペーストによる接着などで接着される。しかし、その接着の程度が耐根性に影響を及ぼすと考えられる。そこで、表 5.2 に示す剥離強度の異なる試験体を準備した。剥離強度は剥離試験により求めたものである。剥離試験は、図 5.3 に示す長さ 150mm、幅 50mm のシートを 2 枚重ね、長さ 100mm を接着させ、シートを上下方向に 10mm/分で引っ張り

表5.2 試験体

試験体	剥離強度 (N/cm)	溶着剤・接着剤の 材質・成分
接着なし	0	—
両面接着シートによる接着	3.5	アクリル系
溶着剤による接着	36.8	テトラヒドロフラン

行った。試験温度は20℃、試験体数は5体である。なおシートは、これから行う耐根性評価試験に合わせ、一方をガラスクロス補強複合塩化ビニル樹脂系シート、一方を透明の塩化ビニル樹脂系シートとして試験を行った。剥離試験結果を図5.4に示す。試験開始後の剥離強度は急速に上昇するが、剥離が始まるとほぼ一定の値となり剥離が進行した。表5.2の剥離強度は、剥離試験において荷重がほぼ一定となった領域の平均値で表している。

模擬地下茎を用いたシート防水ジョイント部の耐根性評価の試験体には、比較のため、接着なしの試験体も準備した。試験体に用いたシートは、一方を防水層に一般的に用いられているガラスクロス補強複合塩化ビニル樹脂系シート、一方を透明の塩化ビニル樹脂系シートとした。これは、模擬地下茎に加圧力を作用させた際にシート防水ジョイント部の剥離状況の観察を可能とするためである。なお、試験体の寸法は縦40 mm×横200 mmである。

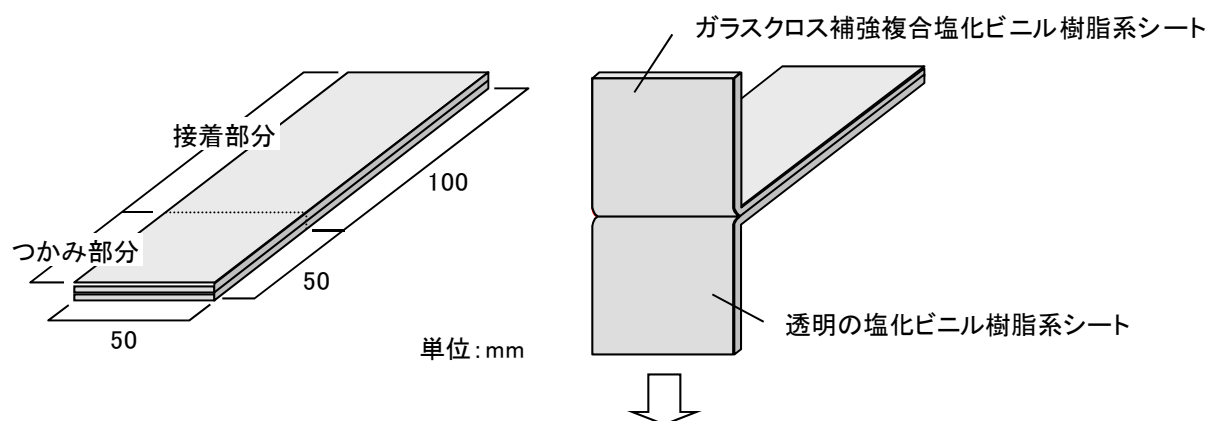


図5.3 剥離試験体と試験方法

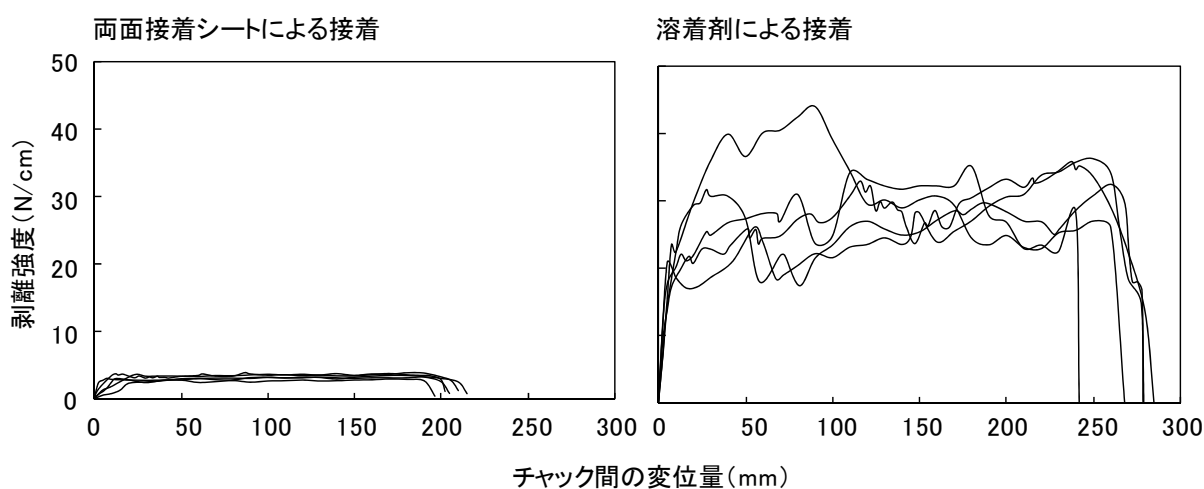


図5.4 剥離試験結果

5.3.2 試験方法

試験体の断面図を図 5.5 に示す。下地板の上にガラスクロス補強複合塩化ビニル樹脂系シートを置き、その中央部に模擬地下茎を設置し、その上から透明の塩化ビニル樹脂系シートを表 5.2 に示す方法により接着させた。試験状況を写真 5.5 に示す。

模擬地下茎の加圧力が 0, 10, 20, 30N/cm と 10N/cm 刻みで、ゴムチューブ内の圧力を調整し、力を作用させ、それぞれの加圧時のシート防水ジョイント部の、模擬地下茎を中心として両側に広がる剥離長さをノギスにより測定した。試験体数はそれぞれ 3 体とした。

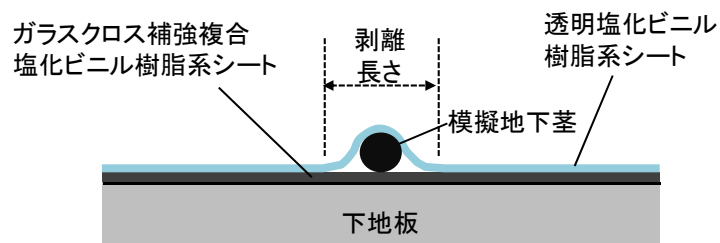


図5.5 シート防水ジョイント部中央部の耐根性評価試験体断面図

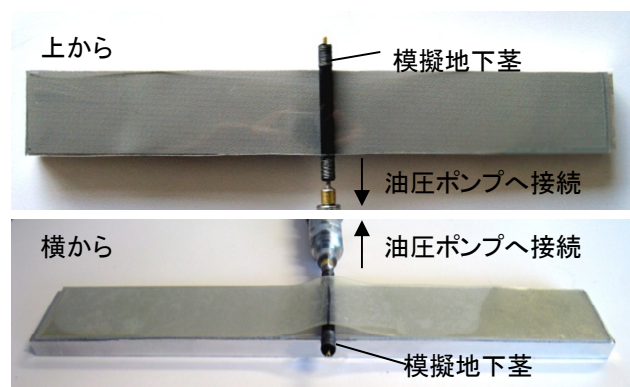


写真5.5 シート防水ジョイント部耐根性評価試験状況

5.3.3 試験結果

加圧時のシート防水ジョイント部の剥離長さを図 5.6 に示す。接着なしの試験体では、当然のことながら加圧直後から剥離が進行するが、両面接着シートにより接着させた試験体では、接着なしに比べ、剥離の進行が遅くなっている。しかし、クマザサ地下茎の肥大力測定で観測された 26.5N/cm に到達する前に剥離は進行している。一方溶着剤により接着させた試験体では、26.5N/cm を超えても剥離の進行はほとんど見られていない。

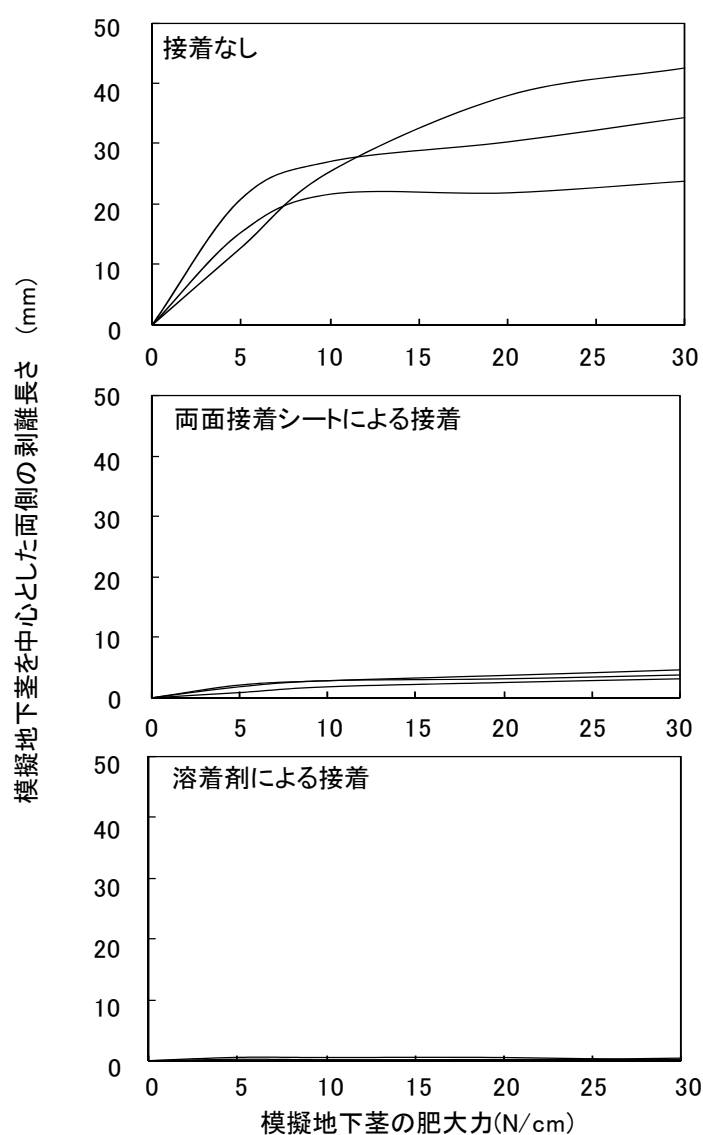


図5.6 模擬地下茎の肥大力に対するシート防水ジョイント部の剥離長さ

5.4 実植物を用いた耐根性評価試験結果との比較

5.4.1 試験体及び試験方法

「5.3.3 試験結果」で得られた結果と、実際の植物を用いて行う耐根性評価試験結果の比較を行うため、クマザサを用いたシート防水ジョイント部の耐根性評価試験を行った。

試験方法は、簡便な耐根性評価試験方法を用いた。この試験方法は、地下茎を確実に試験体に接触させるため、図5.7及び写真5.6に示すように試験容器の側面に地下茎が通り抜けるための10mmφの孔をあけ、その手前に地下茎誘導のための円錐形のガイドを取り付けている。そして地下茎の伸長方向前方に試験試料を固定板に固定した。固定板の中央部には、地下茎が伸長生長できるよう、10mmφの孔をあけてある。

試験体の形状であるが、通常ラップ部分は図5.8左に示すように単純に重ね合わせて作られる。ただこのままでは試験が難しいため、作業をしやすくし、且つ地下茎を確実に接合部に誘導させるため、図5.8右に示す剥離試験に用いるようなT形状の試験体とした。なお接合部長さは各緑化防

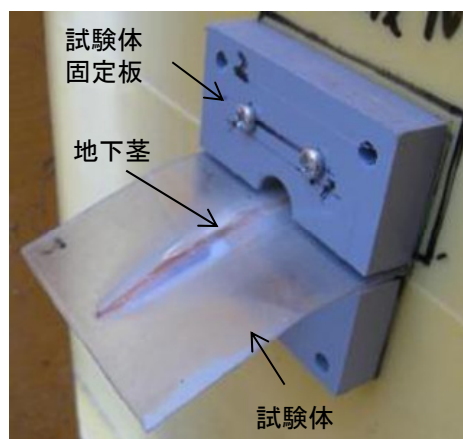
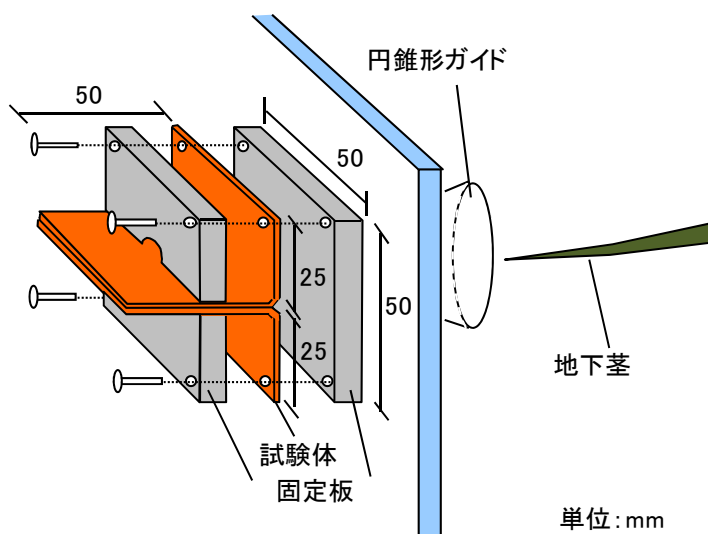


図5.7 実植物を用いた耐根性試験の試験体取り付け

写真5.6 シート防水ジョイント部の試験体取り付け状況

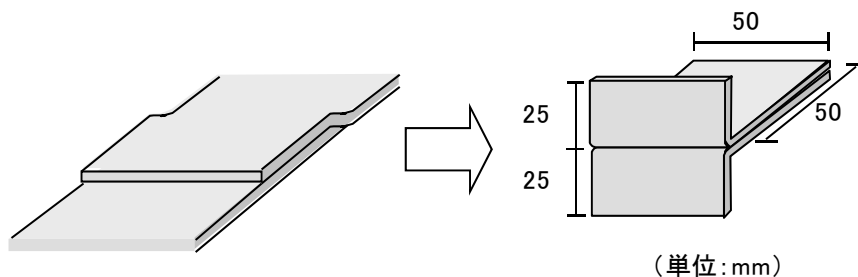


図5.8 ジョイント試験片

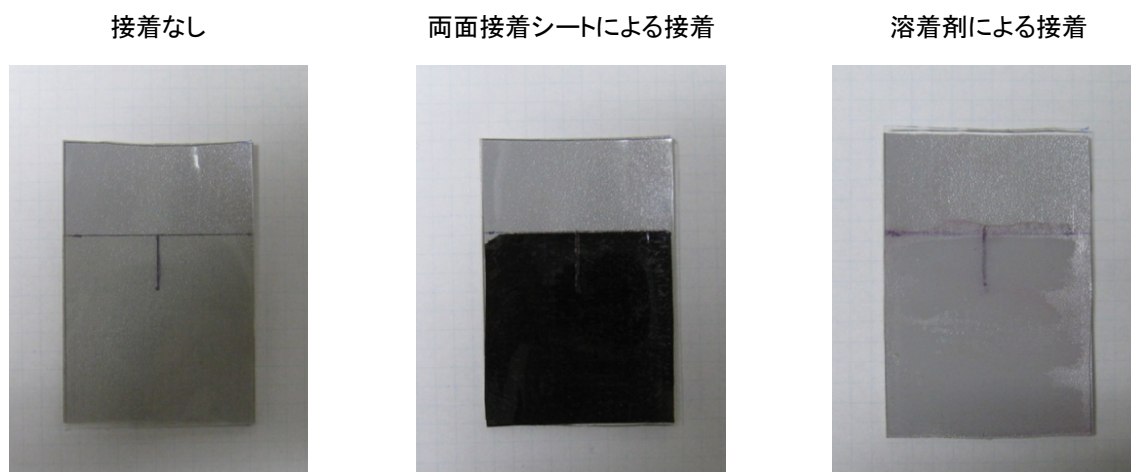


写真5.7 シート防水ジョイント部の試験体



写真5.8 シート防水ジョイント部の試験状況

水システムで仕様化されている長さが原則であるが、地下茎の侵入はその一部がジョイント部に侵入すると、ジョイント長さに依存せずそのまま侵入し続けたという既往の研究に基づき、ここでは試験のし易さも考慮し、ジョイント長さを 50mm とした。ジョイント部は模擬地下茎を用いた耐根性評価試験方法と同様に、表 5.2 に示す 3 種類の方法で接着させた。試験体を写真 5.7 に、試験状況を写真 5.8 にそれぞれ示す。

クマザサを植え込んだ容器は、東京工業大学すずかけ台キャンパスにある建物の屋上に設置された。地下茎先端のガイドへの誘導は 2010 年 6 月 16 日である。クマザサ地下茎の先端を、あらかじめ試験体固定板から 10mm の位置まで挿入し、試験を開始した。測定項目は、剥離長さの測定及び、試験体固定板表面部における地下茎の直径である。剥離長さの測定は、試験体直上より撮影した写真上で、最も剥離が進行している位置における地下茎を中心とした両側の剥離長さを測定した。また、地下茎の直径はノギスを用いて、シート防水の上から鉛直方向の直径の測定を行った。試験は地下茎の肥大生長がほぼ終了したと思われる 6 月 30 日まで、毎日午前 9 時に測定を行った。

5.4.2 試験結果及び考察

各試験体における剥離状況を写真 5.9 に、剥離長さを図 5.9 に、地下茎の直径の変化を図 5.10 にそれぞれ示す。

クマザサ地下茎の肥大力で観測された 26.5N/cm 以下の剥離強度を有する試験体の場合、すなわち接着なし及び両面接着シートにより接着した試験体では、伸長生長を伴いながら肥大生長しており、地下茎の直径は試験開始から 14 日間で、それぞれ約 1.2mm 程度増加している。またそれに伴い剥離の進行が確認された。しかし、クマザサ地下茎の肥大力で観測された 26.5N/cm 以上の十分な剥離強度を有する溶着剤により接着した試験体では、伸長生長も肥大生長も見られず、剥離の進行が確認されなかった。すなわち、ジョイント部にわずかな空隙があり地下茎が侵入したとしてもそこでは肥大生長せず、剥離も進行しないことから、耐根性ありと評価することができるが示唆された。これらの試験結果は、模擬地下茎を用いた耐根性評価試験結果と同様の結果であり、シート防水ジョイント部の耐根性評価への模擬地下茎利用の有用性を示している。

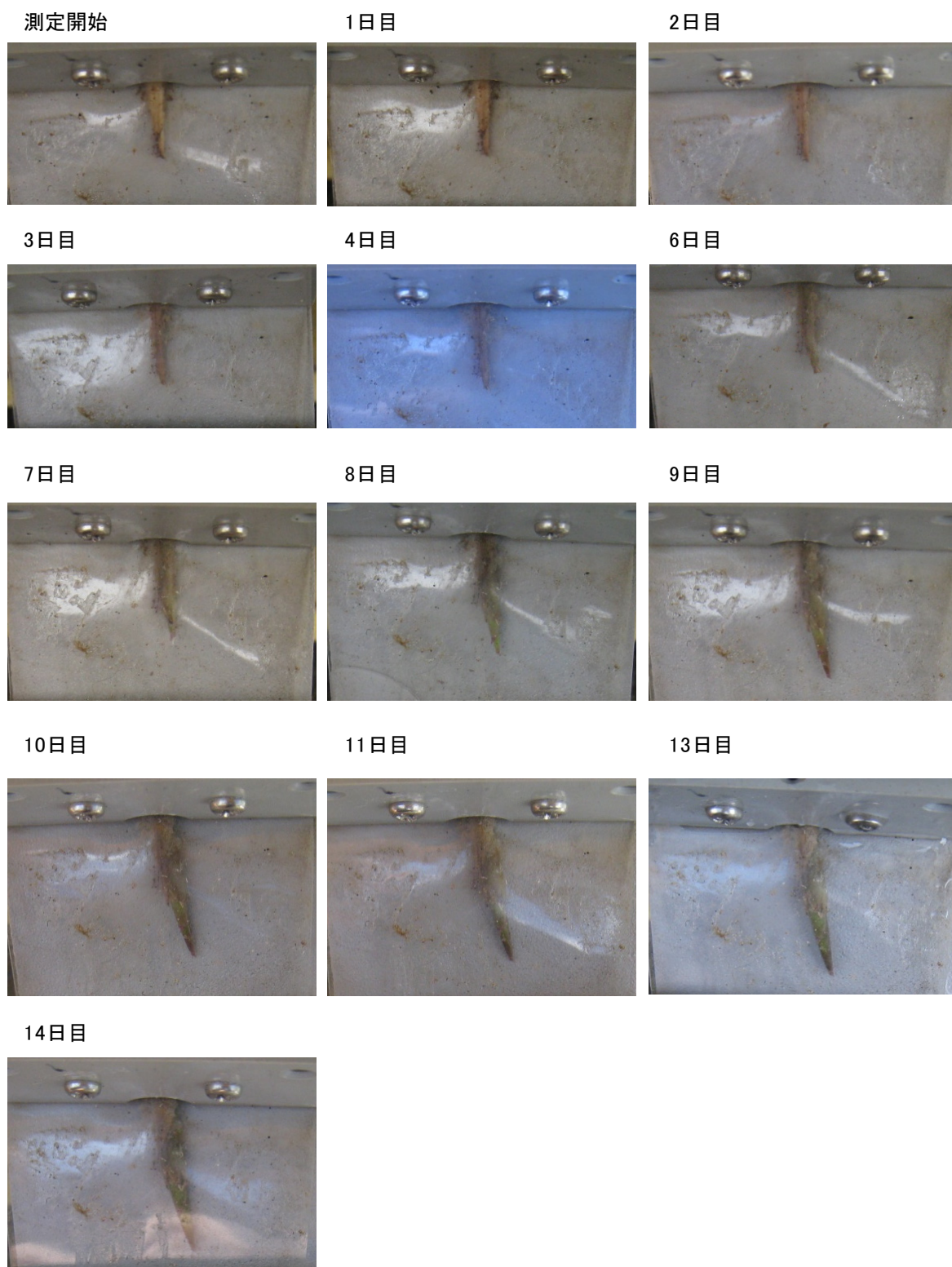


写真5.9 シート防水ジョイント部の剥離状況(接着なし)

測定開始



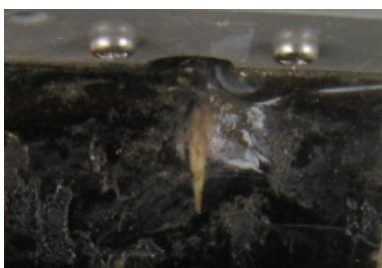
1日目



2日目



3日目



5日目



6日目



7日目



8日目



9日目

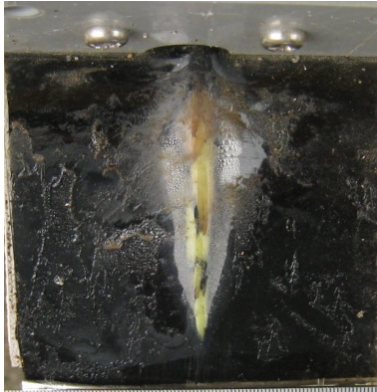


写真5.9 シート防水ジョイント部の剥離状況(両面接着シートによる接着)1/2

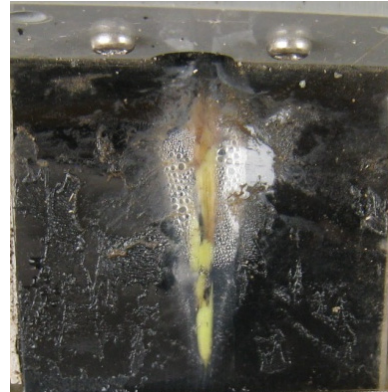
10日目



12日目



13日目



14日目

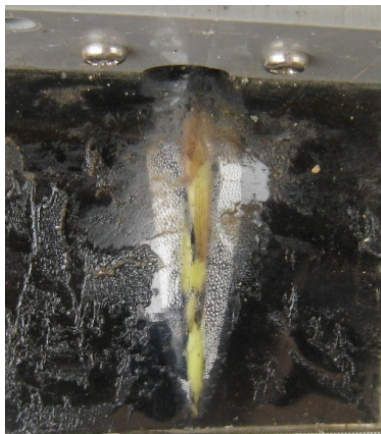


写真5.9 シート防水ジョイント部の剥離状況(両面接着シートによる接着)2/2

測定開始



1日目



2日目



3日目



4日目



6日目



7日目



8日目



9日目



10日目



11日目



13日目



14日目



写真5.9 シート防水ジョイント部の剥離状況(溶着剤による接着)

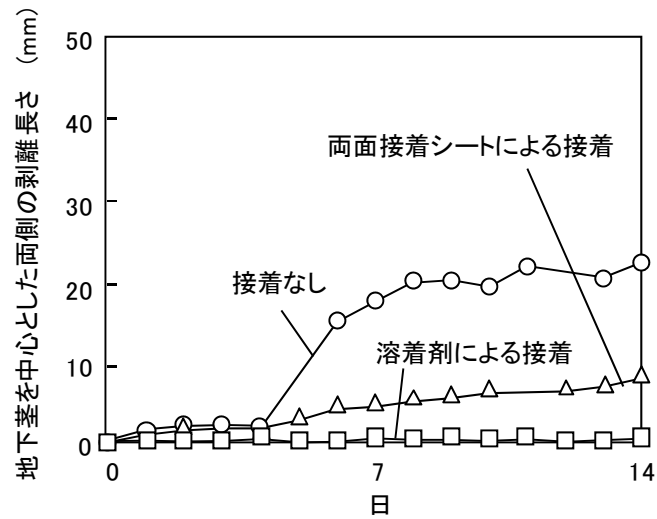


図5.9 シート防水ジョイント部における剥離長さ

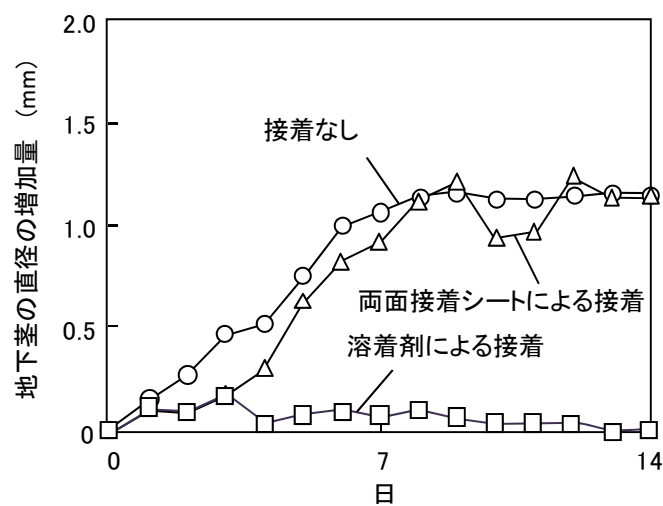


図5.10 防水シートジョイント部におけるクマザサ地下茎の直径の増加量

5.5 まとめ

地下茎の肥大生長を模擬した模擬根の作製及び、模擬根の耐根性評価試験への適用の有用性の検討を行い、以下の知見が得られた。

- 1) クマザサの地下茎の肥大力及び肥大量の測定を基に、模擬地下茎を開発した。
- 2) 作製した模擬地下茎を用いて、シート防水ジョイント部の耐根性試験を行い、実植物を用いた耐根性評価試験結果と比較し、模擬地下茎の耐根性評価への有用性を示した。

第 6 章

結 論

結 論

以下に本研究の結論を示す。

1. ソメイヨシノの根の肥大力の実測を踏まえ、耐根性評価試験に用いる模擬根を開発した。また、模擬根を用いた耐根性評価試験方法の有用性を示した。
2. クマザサの地下茎の肥大力の実測を踏まえ、耐根性評価試験に用いる模擬地下茎を開発した。また、模擬地下茎を用いた耐根性評価試験方法の有用性を示した。

以下に各章より得られたまとめを総括して示す。

- 1) 肥大力装置を開発し、それらの測定を可能にした。作製した装置を用いて、ソメイヨシノの根を例とした肥大力の測定で、夏期において約 440N/cm の肥大力の増加を観測した。
- 2) 根の肥大量についても直径変化の測定装置を開発し、夏期において約 0.46mm の直径の拡大を観測した。
- 3) 夏期の肥大力及び肥大量は、一日毎の周期的な変化を繰り返しながら全体的に増加する傾向を示した。そして樹液の流速測定により、一日毎の周期的な変化は、蒸散に起因する膨張収縮によるものであることを示した。
- 4) 内部に油圧ジャッキを内蔵し、実際の根と似た形状、力学的性質をもたせた模擬根を開発した。
- 5) この模擬根は、ソメイヨシノの根の実測で得られた肥大力 440N/cm 以上の荷重を作用させることが可能であることを確認した。
- 6) 作製した模擬根を用いて、屋上緑化歩行面及び見切り部分の耐根性試験を行い、模擬根の耐根性評価試験への適用の有用性を示した。
- 7) 地下茎の肥大力及び伸長量の測定を行い、肥大力の測定に適した部位の検討を行った。その結果、先端から 10mm の部位が肥大力の測定に適していることを示した。

- 8) 肥大力測定装置を開発し、それらの測定を可能にした。作製した装置を用いて、クマザサの地下茎を例とした肥大力の測定で、夏期において約 26.5N/cm の肥大力の増加を観測した。
- 9) 夏期の肥大力は、一日毎の周期的な変化を繰り返しながら全体的に増加する傾向を示した。これは蒸散に起因する膨張収縮によるものであることを示した。
- 10) クマザサの地下茎の肥大力及び肥大量の測定を基に、模擬地下茎を開発した。
- 11) 作製した模擬地下茎を用いて、シート防水ジョイント部の耐根性試験を行い、実植物を用いた耐根性評価試験結果と比較し、模擬地下茎の耐根性評価への有用性を示した。

本研究の今後の課題

本研究の今後の課題

本研究は、「1.2 研究の目的」でも述べた通り、耐根性評価の評価基準の設定については研究の範囲外としている。本研究で測定したソメイヨシノの根の肥大力及び、クマザサの地下茎の肥大力は、現段階までに観測された肥大力の最大値であり、すべての植物の最大値というわけではない。そのため評価基準を設定するためには、今後更に様々な植物の根の肥大力を調べ検証し、定めていく必要があると考えられる。そのために必要な本研究の今後の課題についてここに述べる。

「第2章 根の肥大力測定装置の開発及び測定」では、一例としてソメイヨシノの根の肥大力を、冬期から夏期にかけて約9ヶ月間測定している。耐根性評価のためには、樹種による根の肥大力のデータベースを作製することが望ましい。ここで対象とする樹木は、屋上緑化で用いられている樹木にとどまらず、今後は本耐根性評価試験方法を歩道舗装の根上がり対策等にも適用していくため、街路樹として植栽されている樹木にまで範囲を広げ測定することが望ましいと考えている。ここで、よく街路樹として植栽されており、且つ歩道舗装に不具合を発生させている樹木の一例として、メタセコイア（スギ科メタセコイア属 学名：*Metasequoia glyptostroboides*）、ユリノキ（モクレン科ユリノキ属 学名：*Liriodendron tulipifera*）、ケヤキ（ニレ科ケヤキ属 学名：*Zelkova serrata*）、スズカケノキ（スズカケノキ科スズカケノキ属 学名：*Platanus orientalis*）、モミジバフウ（マンサク科フウ属 学名：*Liquidambar styraciflua*）、イチョウ（イチョウ科イチョウ属 学名：*Ginkgo biloba*）などが挙げられる。更に、夏期は肥大力が増加し冬期になるとそれが緩慢となるが、次の夏期には、また更に増加するため、単年度の測定に加え、複数年度に渡った測定をすることが望ましいと考えられる。

同様に「第4章 地下茎の肥大力測定装置の開発及び測定」では、一例としてクマザサの地下茎の肥大力を測定している。クマザサは屋上緑化で用いられる草本類植物の中でも特に根の力が強いとされている植物であるが、クマザサと同様に地下茎を有する植物として、更に強い力を発生させると考えられる植物がある。それはタケ類である。近年、屋上緑化や人工地盤上での緑化でタケ類を用いられる場合も増加してきており、例えば JASS8 T-401 の耐根性評価試験（使用植物 木本類：タブノキ、ヤシヤブシ 草本類：クマザサ、ノシバ）で耐根性有と判定されたものでも、タケ類の場合は耐根性がないと判定されるものもありうる。予備試験として測定したダイミョウチクの地下茎の押し付け力は、これまで測定されたクマザサの地下茎の押し付け力の2倍以上の力が観測されている。そのため肥大力もクマザサの地下茎の肥大力よりも大きな力が発生することが推測されたため、この測定をする必要がある。測定に用いるタケ類として、ダイミョウチク（イネ科タケ亜科トウチク属 学名：*Sinobambusa tootsik*）、モウソウチク（イネ科タケ亜科マダケ属 学名：*Phyllostachys heterocycla f. pubescens*）などが挙げられる。

根及び地下茎を対象とした耐根性評価試験の評価基準を定める上では、上述の樹種による根及び

地下茎の肥大力のデータを蓄積し、更にそれらの実植物を用いた耐根性評価試験結果と比較することで、評価基準、すなわち模擬根及び模擬地下茎で何 N 以上の力を作用させた時に不具合が発生しなければ耐根性有と判断する、その力を定めることが必要であると考えられる。

また、この耐根性評価試験方法を規格化する際には、何ををもって不具合が発生したと判断するか、予め定義しておく必要がある。例えば歩道舗装の場合は、少しでも舗装表面が持ち上げられたら耐根性なしと判断されるのか、あるいは何 mm 以内なら耐根性ありとするか、またシート防水や耐根シートの場合は、少しでも剥離したら耐根性なしと判断されるのか、あるいは少し剥離してもその後剥離が進展せず、漏水を引き起こさなければ耐根性ありとするか、その部材、材料によってその定義が異なるため、それを定める必要がある。この点については人によって判断の分かれる部分であると思われるので、建築学会の委員会等で皆で定義し検討していく必要があると考えられる。

参考文献

参考文献

- 1) P. Fischer, R. Bohlen, R. Klein, J. Liesecke, G. Losken, P. Siebert, W. Tebart and R. Walter : Procedure for investigation resistance to root penetration at green-roof sites, The Landscaping and Landscape Development Research Society e.V. (FLL), January 2002
- 2) DIN 4062 : Testing the Weed Resistance of Everlast-Roofskin
- 3) The National Roofing Contractors Association : The NRCA Vegetative Roof Systems Manual Second Edition, 2009
- 4) JASS8T-401 屋上緑化用メンブレン防水工法の耐根性試験方法 (案), 日本建築学会標準仕様書 JASS8・防水工事, pp.410-437, 2008.2
- 5) 国土交通省大臣官房官庁営繕部 : 公共建築工事標準仕様書 (建築工事編) 平成 22 年版, 公共建築協会, 2010
- 6) 国土交通省大臣官房官庁営繕部 : 公共建築改修工事標準仕様書 (建築工事編) 平成 22 年版, 公共建築協会, 2010
- 7) 国土交通省大臣官房官庁営繕部 : 建築工事管理指針 平成 22 年版 (下巻), 公共建築協会, 2010
- 8) M.G.HUCK, BETTY KLEPPER, H.M.TAYLOR : Diurnal Variations in Root Diameter : Plant Physiology, 45, pp.529-530, 1970
- 9) Michel Genard, Svetlana Fishman, Gilles Vercambre, Jean-Gerard Huguet, Claude Bussi, Jacques Besset and Robert Habib : A Biophysical Analysis of Stem and Root Diameter Variations in Woody Plants : Plant Physiology, Vol.126, pp.188-202, 2001
- 10) G. C. HEAD : Studies of Diurnal Changes in Cherry Root Growth and Nutational Movements of Apple Root tips by Time-lapse Cinematography, Annals of Botany, N.S., Vol.29, No.114, pp.219-224, 1965
- 11) G. C. Aggarwal and S. S. Praihar : A simple technique to determine axial root growth force, Plant and Soil, 42, pp.485-489, 1975
- 12) A. G. Bengough and C. J. MacKenzie : Simultaneous measurement of root force and elongation for seedling pea roots, Journal of Experimental Botany, Vol.45, No.270, pp.95-102, 1994
- 13) Lawrence J. Clark and Peter B. Barraclough : Do dicotyledons generate greater maximum axial root growth pressures than monocotyledons?, Journal of Experimental Botany, Vol.50, No.336, pp.1263-1266, 1999
- 14) COLIN D. HANBURY and BRIAN J. ATWELL : Growth Dynamics of Mechanically Impeded Lupin Roots: does Altered Morphology Induce Hypoxia?, Annals of Botany, 96,

pp.913-924, 2005

- 15) M.G.HUCK, BETTY KLEPPER and H.M.TAYLOR : Diurnal Variations in Root Diameter, Plant Physiology, 45, pp.529-530, 1970
- 16) Michel Genard, Svetlana Fishman, Gilles Vercambre, Jean-Gerard Huguet, Claude Bussi, Jacques Besset and Robert Habib : A Biophysical Analysis of Stem and Root Diameter Variations in Woody Plants, Plant Physiology, Vol.126, pp.188-202, 2001
- 17) 橘大介, 清水市郎, 澤西良三, 田中享二, 三輪隆, 立山富士彦, 大森遼次 : 屋上緑化防水システムのための耐根性能の評価・その 1・耐根性能評価試験の考え方 ; 日本建築学会大会学術講演梗概集 A, pp.801-802, 2005.9
- 18) 澤西良三, 清水市郎, 橘大介, 田中享二, 三輪隆, 立山富士彦, 大森遼次 : 屋上緑化防水システムのための耐根性能の評価・その 2・耐根性能評価試験方法 ; 日本建築学会大会学術講演梗概集 A, pp.803-804, 2005.9
- 19) 田中享二, 橘大介, 清水市郎, 澤西良三, 三輪隆, 立山富士彦, 大森遼次, 後藤良昭 : 屋上緑化防水の耐根性試験方法の開発 ; 日本建築学会技術報告集, 14 号, 27 巻, pp.13-16, 2008.6
- 20) 田中享二, 表淳珠, 宮内博之 : 防水層に対する地下茎先端の押し付け力測定装置の開発と測定結果 ; 日本建築学会構造系論文報告集, 第 602 号, pp.67-71, 2006.4
- 21) 表淳珠, 宮内博之, 田中享二 : 防水層の耐根性評価のための簡便な試験方法の開発 ; 日本建築学会構造系論文報告集, 第 606 号, pp.35-41, 2006.8
- 22) 表淳珠, 石原沙織, 宮内博之, 田中享二 : 防水層・耐根シートのジョイント部の耐根性評価のための簡便な試験方法の開発 ; 日本建築学会構造系論文報告集, 第 623 号, pp.43-48, 2008.1
- 23) 岩田彰隆, 木田幸男, 甲野毅, 荻住昇 : ケヤキ街路樹の根系生長が歩道に与える影響 : ランドスケープ研究, 第 59 号, pp.49-52, 1996
- 24) 国土交通省 国土技術政策総合研究所 環境研究部 緑化生態研究室 : わが国の街路樹の動向 : 道路と自然, 第 14 号, pp.46-51, 2008
- 25) 大川秀雄, 栗原翔真 : 植物による歩道舗装の破壊に関する検討 : 舗装, 42-7, pp.21-24, 2007
- 26) 松江正彦, 飯塚康雄 : 樹木の根上り対策に関する調査 : 国土交通省国土技術政策総合研究所 緑化生態研究室報告書, 第 21 集, 2006
- 27) Morio Iijima and Yasuhiro Kono : Interspecific differences of the root system structures of four cereal species as affected by soil compaction : Japan. Jour. Crop Sci., 60(1), pp.130-138, 1991
- 28) 飯嶋盛雄:根の生長と土壌の機械的抵抗(1):農業および園芸,第 67 巻,第 11 号,pp.1151-1156, 1992
- 29) 飯嶋盛雄:根の生長と土壌の機械的抵抗(2):農業および園芸,第 67 巻,第 12 号,pp.1262-1266, 1992

-
- 30) 日本草本植物根系図説：清水建美，梅林正芳，平凡社，1995
 - 31) 樹木根系図説：苅住昇，誠文堂新光社，1991
 - 32) 室井ヒロシ：タケ・ササ，日本放送協会，1977
 - 33) 根の発育学：森田茂紀，東京大学出版会，2000
 - 34) 根の事典：根の事典編集委員会編，朝倉書店，2004
 - 35) 根の生態学：H.デクルーン，E.J.W.フィッサー著，森田茂紀，田島亮介訳，シュプリンガー・ジャパン，2008
 - 36) 根ハンドブック：森田茂紀，阿部淳編集，根研究会，1995
 - 37) 絵とき植物生理学入門：増田芳雄監修 山本・櫻井共著，オーム社，2007
 - 38) 日本造園建設業協会：都市緑化ハンドブック（街路樹編）美しい街路樹をつくる－樹形のつくり直し－，環境緑化新聞／株インタラクショント，2008
 - 39) 桜井盛男：わかりやすい道路と舗装の設計，現代理工学出版，1997
 - 40) 屋上開発研究会：屋上緑化設計・施工ハンドブック，2007

研究に関連して著者が発表した論文

研究に関連して著者が発表した論文

1. 査読付論文

1. 石原沙織, 宮内博之, 田中享二: 緑化防水・耐根シートおよびそれらのジョイント部耐根性の植物を用いた簡便な評価試験方法、日本建築学会構造系論文集、第 634 号、pp.2085-2090、2008.12
2. 石原沙織, 田中享二: 木本類植物根としてのサクラの根の肥大力と肥大量の測定、日本建築学会構造系論文集、第 640 号、pp.1013-1018、2009.08
3. 石原沙織, 田中享二: 木本類植物の根の肥大生長を対象とした模擬根の開発と屋上緑化で用いられる部材の耐根性評価へのいくつかの適用、日本建築学会構造系論文集、第 660 号、pp.237-244、2011.2
4. 石原沙織, 田中享二: クマザサ地下茎の肥大力の測定と模擬地下茎の作製、日本建築学会構造系論文集 (2010 年 12 月 10 日投稿済み、現在審査中)

2. 国際会議

1. Saori ISHIHARA, Kyoji TANAKA: Development of apparatus for measuring the enlargement force of a root, Proceedings of 9th Korea/Japan Joint symposium on Building Materials & Construction、pp.109-113、2008.08
2. Saori ISHIHARA, Kyoji TANAKA: Development of test method for evaluating root resistance of pavement used for roof garden caused by thickening growth of root, Proceedings of International Conference on Building Envelope Systems and Technologies (ICBEST 2010)、Volume 2、pp.95-96、2010.06
3. Saori ISHIHARA, Kyoji TANAKA: Measuring the increment of diameter and the enlargement force of a rhizome of bamboo grass to develop the test method for evaluating root resistance of waterproofing membrane and root barrier sheet, Proceedings of 10th Korea/Japan Joint symposium on Building Materials & Construction、pp.97-102、2010.09

3. 口頭発表

1. 石原沙織, 田中享二: 緑化用防水の簡便な耐根性試験方法、2007 年度日本建築学会関東支部研究報告集、pp.89-92、2008.03
2. 石原沙織, 明石礼代, 田中享二: 緑化用防水の耐根性を考慮した植物の肥大成長力の測定、2007 年度日本建築学会関東支部研究報告集、pp.93-96、2008.03

3. 石原沙織, 田中享二: 緑化用防水の耐根性のための植物の肥大成長力の測定、日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1、pp.25-26、2008.09
4. 石原沙織, 明石礼代, 田中享二: 緑化用防水の簡便な耐根性試験方法、日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1、pp.29-30、2008.09
5. 石原沙織, 田中享二: 草本類植物根としてのクマザサの根の肥大量及び肥大力の測定、2008年度日本建築学会関東支部研究報告集、CD-ROM、2009.03
6. 石原沙織, 田中享二: クマザサ地下茎の肥大量及び肥大力の測定、日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1、pp.103-104、2009.08
7. 石原沙織, 田中享二: 木本類植物の根の肥大生長を対象としたアスファルト舗装の耐根性評価試験方法の検討、日本材料学会関東支部学生研究交流会講演論文集、pp.1-2、2009.10
8. 石原沙織, 田中享二: 木本類植物の根の肥大生長を対象とした耐根性評価試験方法の検討、2009年度日本建築学会関東支部研究報告集、CD-ROM、2010.03
9. 石原沙織, 田中享二: 木本類植物の根の肥大生長を対象とした耐根性評価試験 その1 模擬根の開発、日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1、pp.531-532、2010.09
10. 田中享二, 石原沙織: 木本類植物の根の肥大生長を対象とした耐根性評価試験 その2 アスファルト舗装を用いた模擬根適用の有用性の確認、日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1、pp.533-534、2010.09

4. その他

1. 日本建築学会材料施工委員会耐根シート試験法 WG: 屋上緑化用材料の新しい耐根性評価方法 4.耐根性に関する最新の研究成果、第5回防水シンポジウム資料集、pp.133-166、2009.11
2. 石原沙織, 田中享二: 木本類植物の根の肥大生長を対象とした模擬根の開発と屋上緑化で用いられる部材の耐根性評価への適用、第2回韓中日防水シンポジウム論文集、pp.43-50、2010.10
3. 石原沙織, : 根の肥大生長を対象とした建築材料の耐根性評価手法、特殊緑化技術に関する研究発表会、p.27-35、2010.12

付 録

付録

(「3.5.1 アスファルト舗装の不具合事例調査」 損傷発生木の調査結果)

調査木全景	植栽枳周辺部 損傷詳細情報	損傷部
	 損傷パターン : 縁石との界面剥離 持ち上がり高さ : 7.7cm 損傷の幅 : 70cm	
	 損傷パターン : 部分的な持ち上がり 持ち上がり高さ : 3.3cm 損傷の幅 : 26cm	
	 損傷パターン : 部分的な持ち上がり 持ち上がり高さ : 2.9cm 損傷の幅 : 25cm	
	 損傷パターン : 部分的な持ち上がり 持ち上がり高さ : 0.8cm 損傷の幅 : 21cm	

調査木全景	植栽柵周辺部 損傷詳細情報	損傷部
	 損傷パターン : 部分的な持ち上がり 持ち上がり高さ : 2.7cm 損傷の幅 : 40cm	
	 損傷パターン : 全体的な持ち上がり 持ち上がり高さ : 4.7cm 損傷の幅 : 27cm	
	 損傷パターン : 部分的な持ち上がり 持ち上がり高さ : 6.8cm 損傷の幅 : 45cm	
	 損傷パターン : 部分的な持ち上がり 持ち上がり高さ : 2.9cm 損傷の幅 : 47cm	

調査木全景	植栽柵周辺部 損傷詳細情報	損傷部
	 損傷パターン : 部分的な持ち上がり 持ち上がり高さ : 5.4cm 損傷の幅 : 48cm	
	 損傷パターン : 部分的な持ち上がり 持ち上がり高さ : 5.6cm 損傷の幅 : 24cm	
	 損傷パターン : 部分的な持ち上がり 持ち上がり高さ : 2.9cm 損傷の幅 : 40cm	
	 損傷パターン : 部分的な持ち上がり 持ち上がり高さ : 2.9cm 損傷の幅 : 50cm	

調査木全景	植栽枳周辺部 損傷詳細情報	損傷部
	 損傷パターン : 全体的な持ち上がり 持ち上がり高さ : 5.2cm 損傷の幅 : 34cm	
	 損傷パターン : 部分的な持ち上がり 持ち上がり高さ : 2.6cm 損傷の幅 : 41cm	
	 損傷パターン : 縁石との界面剥離 持ち上がり高さ : 5.1cm 損傷の幅 : 50cm	
	 損傷パターン : 部分的な持ち上がり 持ち上がり高さ : 2.5cm 損傷の幅 : 28cm	

調査木全景	植栽枿周辺部 損傷詳細情報	損傷部
	 損傷パターン : 部分的な持ち上がり 持ち上がり高さ : 2.8cm 損傷の幅 : 20cm	
	 損傷パターン : 部分的な持ち上がり 持ち上がり高さ : 2.2cm 損傷の幅 : 35cm	
	 損傷パターン : 全体的な持ち上がり 持ち上がり高さ : 4.5cm 損傷の幅 : 20cm	
	 損傷パターン : 縁石との界面剥離 持ち上がり高さ : 3.4cm 損傷の幅 : 36cm	

調査木全景	植栽枡周辺部 損傷詳細情報	損傷部
	 損傷パターン : 部分的な持ち上がり 持ち上がり高さ : 3.9cm 損傷の幅 : 40cm	
	 損傷パターン : 部分的な持ち上がり 持ち上がり高さ : 2.4cm 損傷の幅 : 42cm	
	 損傷パターン : 縁石との界面剥離 持ち上がり高さ : 5.2cm 損傷の幅 : 30cm	
	 損傷パターン : 部分的な持ち上がり 持ち上がり高さ : 3.4cm 損傷の幅 : 24cm	

調査木全景	植栽枳周辺部 損傷詳細情報	損傷部
	 損傷パターン : 部分的な持ち上がり 持ち上がり高さ : 7.0cm 損傷の幅 : 60cm	
	 損傷パターン : 縁石との界面剥離 持ち上がり高さ : 7.5cm 損傷の幅 : 42cm	
	 損傷パターン : 全体的な持ち上がり 持ち上がり高さ : 8.2cm 損傷の幅 : 測定できず	
	 損傷パターン : 部分的な持ち上がり 持ち上がり高さ : 2.8cm 損傷の幅 : 60cm	

調査木全景	植栽柵周辺部 損傷詳細情報	損傷部
	 損傷パターン : 部分的な持ち上がり 持ち上がり高さ : 3.5cm 損傷の幅 : 40cm	
	 損傷パターン : 部分的な持ち上がり 持ち上がり高さ : 1.4cm 損傷の幅 : 33cm	
	 損傷パターン : 全体的な持ち上がり 持ち上がり高さ : 5.0cm 損傷の幅 : 測定できず	
	 損傷パターン : 部分的な持ち上がり 持ち上がり高さ : 6.0cm 損傷の幅 : 31cm	

調査木全景	植栽柵周辺部 損傷詳細情報	損傷部
	 損傷パターン : 全体的な持ち上がり 持ち上がり高さ : 1.4cm 損傷の幅 : 測定できず	
	 損傷パターン : 縁石との界面剥離 持ち上がり高さ : 10.0cm 損傷の幅 : 28cm	
	 損傷パターン : 縁石との界面剥離 持ち上がり高さ : 3.5cm 損傷の幅 : 34cm	
	 損傷パターン : 部分的な持ち上がり 持ち上がり高さ : 4.0cm 損傷の幅 : 30cm	

謝 辭

謝 辞

本論文は、筆者が東京工業大学大学院総合理工学研究科環境理工学創造専攻博士課程の学生として、田中研究室に在籍した3年間をかけて行った研究をまとめたものです。

本研究を進めるにあたり、終始懇切なる御指導、御助言を賜りました恩師、田中享二先生（東京工業大学教授）に心から深く感謝申し上げます。修士1年次から今日に至るまで、研究者・教育者としての基本姿勢など多くのことを教えて下さいました。心より深く御礼申し上げます。

また、本論文の審査をして頂きました林静雄先生（東京工業大学教授）、梅干野晁先生（東京工業大学教授）、三上貴正先生（東京工業大学准教授）、横山裕先生（東京工業大学准教授）に深く感謝申し上げます。

研究を進めるうえで、また実験の面において、御指導賜りました宮内博之先生（韓国・忠南大学校助教授 元東京工業大学助教）に心より感謝申し上げます。

実験装置の作製を快く御協力して下さいました河島公夫氏（東京工業大学応用セラミックス研究所研究支援員）、石井元氏（元東京工業大学応用セラミックス研究所実験工場）、小屋畑洋平氏（東京工業大学精密工作技術センター）に心より感謝申し上げます。

学会の活動を通して貴重な御助言を頂きました、日本建築学会材料施工委員会耐根シート試験法WGの主査 清水一郎氏（（財）建材試験センター）、幹事 橘大介氏（清水建設技術研究所）をはじめ、委員の皆さまに心より感謝申し上げます。

材料生産系ゼミでは、高橋宏樹先生（ものづくり大学教授）、横井健先生（東海大学講師）に御助言を頂きました。心より感謝申し上げます。

実験やゼミなどを通じて御意見、御協力を賜りました市川裕一氏（東急建設技術研究所）、榎本教良氏（サンスター技研）、塚越雅幸氏（首都大学東京特任助教）、岡本肇氏（竹中工務店技術研究所）、竹本喜昭氏（清水建設技術研究所）、劉靈芝氏（東京工業大学非常勤研究員）、明石礼代氏、管野拓氏、鴻上嘉延氏、Che Daravuth 氏、新島瞬氏、林涛氏、古澤洋祐氏、山本哲也氏に深く感謝致します。

なお、本研究の一部は、（財）トステム建材産業振興財団 研究助成金及び（財）竹中育英会 建築研究助成を受けて行ったものであります。ここに深く感謝致します。

最後に、これまで見守り続け、様々な協力をして下さった両親、姉夫妻と、心の支えになって下さいました親友に心より感謝申し上げ、これを謝辞とさせていただきます。

平成二十三年 三月

石原 沙織