

#### (4) 熱帯林生態系における樹冠部調査法に関する研究

研究代表者 森林総合研究所 遠藤利明

林野庁 森林総合研究所

生産技術部	作業技術科	遠藤利明
	システム計画研究室	田中利美
	造林機械研究室	佐々木尚三

平成2—4年度合計予算額 16,666千円

〔要旨〕熱帯林樹冠部における研究を推進するため、環境保全性と軽量・簡便性に富む樹冠部移動・作業システムの開発を行った。炭素繊維、ポリアミド系繊維等の新素材や軽合金、FRPなどの、軽量、高強度素材の特徴を生かした樹冠部移動・作業システムを考案し、試作した。これは、水平移動システムと垂直移動システムからなる。水平移動システムは、軽量で高強度であり、伸びの少ないケブラー繊維ロープを用いて、釣り橋状の樹冠内移動足場システムを開発した。架設試験の結果、安定性、安全性ともに十分であった。一層の軽量化と低コスト化を図りながら実用に供することが可能である。垂直移動システムは、炭素繊維ロープを樹幹上部に装着した軽合金枠から正方形に垂下し、中間の接続枠による接続を繰り返して地上との間をつなぎ、この炭素繊維ロープ間にFRPの棧を渡しこれによって形成される角柱状内部空間内を棧を足場として昇降するという新しい発想によるものである。架設試験の結果、軽量ながら高い強度と安定性を有し、作業性も高いという優れた特性を有していることがわかった。また、両システムの林分における同時架設試験の結果、地表の損傷は皆無に近く、樹木への損傷も軽微であり、環境に与える影響が非常に少ないことがわかった。さらに、樹冠上面の構造や諸現象の観察を効果的に実施するための気球による低空写真撮影のシステムについても開発を実施し、低コストで簡便なりモコン撮影装置を開発し、実地に撮影試験を行った。

〔キーワード〕 樹冠、樹上調査、気球、低空写真、手法開発

#### 1. 序

熱帯降雨林においては、樹高が極めて高い、空中湿度が高い等の理由により、優占木の生活活動や生態系を構成する動植物の分布が樹冠部に集中しているため、熱帯降雨林の研究は、樹冠部に重点をおいた研究を実施していく必要がある。しかしながら、時には50メートル以上に及ぶ高所であることから、研究が困難であるため、従来も研究が遅れており、未知の領域が今なお多い。従って、今後研究を推進していくためには、樹冠部における研究のための安全で能率的な昇降、移動のための足場や、遠隔操作を利用した観察及び観測手法を確保することが不可欠の課題となっている。これには、通常の高所での研究に用いられる、梯子、鉄パイプ等による方法を適用することは、環境への影響や簡便性の点から困難が伴う。

このため、本研究においては、炭素繊維、ポリアミド系繊維等の新素材や軽合金、FRPなどの軽量素材を用いることにより、軽量、高強度というこれらの素材の特徴を生かした新しい樹冠部移動・作業システムを考案し、試作することとした。また、樹冠上面における樹冠構造、開花結実状況、昆虫・鳥類等の行動観察を効果的に実施するための気球による低空写真撮影のシステムについても併せて検討を行い、両システムを併せて、図-1に示すような樹冠部研究に必要な調査システムの確立を目指した。

## 2. 樹冠部移動・作業システムの開発

### (1) 水平移動システムの開発

#### ① システムの概要

水平移動システムは、ポリアミド系繊維であるケブラーを素材とする繊維ロープを利用した軽量高強度の樹幹間の釣り橋状の足場である(図-2)。

足場本体は、長さがそれぞれ8mと7mの2ユニットに分割され、標準の合計スパンは15mであるが、一方のユニットのみでの設置も可能で、さらにユニットを追加して用いることも今後の検討課題である。歩行面となる底面の幅は70cm、両側の壁面高さは140cmであり、何れの面も、径2mmのケブラー線を2本撚りあわせたものを60mmの目合いに編んだ強靱なネットで覆われている。なお、底面には歩行用と底面の幅員保持を兼ねて、50cm間隔に2本づつFRP製のパイプが固定されている(図-3)。また、壁面は上部40cmと下部100cmの各幅に、長さ方向に設けた中間ロープ(径9mm)によって分けられ、上部には資料採取、観察等のための幅2mのファスナー

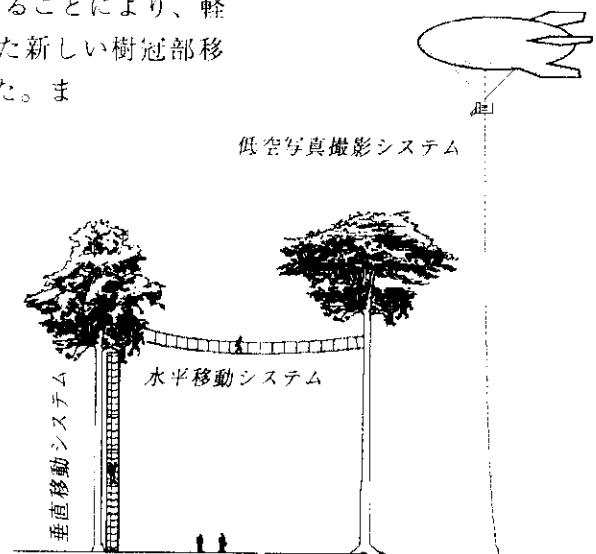


図-1. 樹冠部調査システムの概念図

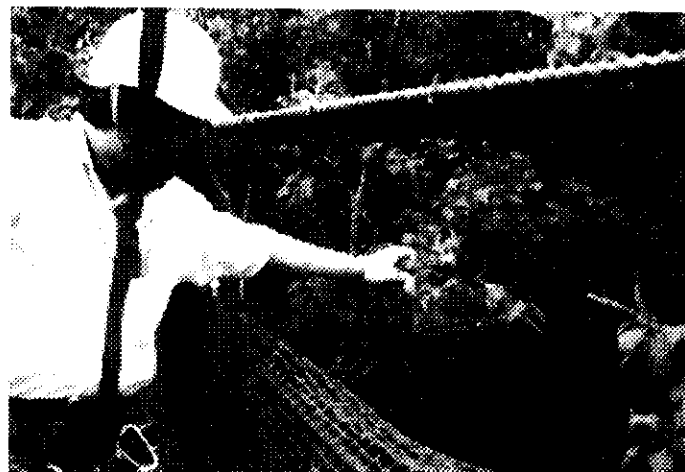


図-3. 水平移動システムの本体歩行部(左)

図-4. 資料採取、観察等のための上部開閉窓(上)

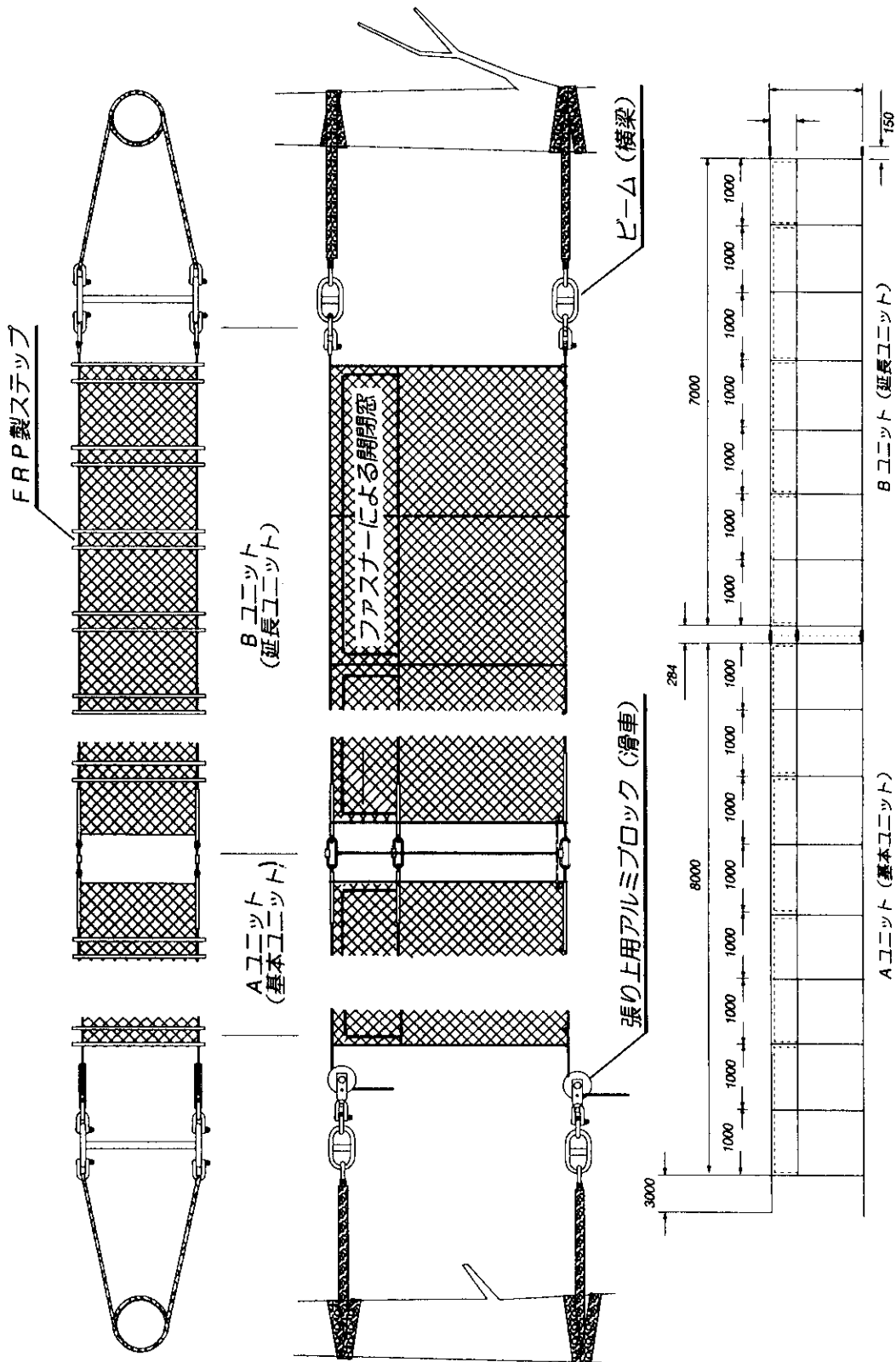


図-2. 水平移動システムの全体図

による開閉窓が全面にわたって設けられている(図-4)。本体各部の重量と使用スパン別の総重量は、表-1のとおりである。

表-1. 本体各部の重量と使用スパン別の総重量

区分	部材名	数量	単位	単位あたり重量(Kg)	合計重量(Kg)
1システム 当たり部材	本体A(8m)	1	式	51.3	51.30
	本体B(7m)	1	式	46.3	46.30
	主索用ブロック	4	個	2.41	9.64
	ビーム	2	個	2.04	4.08
	合計				111.32

この本体の保持は、底面両側と左右

の各壁面の 上端に配置された断面の 4 隅を樹幹間に渡されたケブラー製のメインロープによって行う。底面のメインロープ(径16mm)と、それぞれの上部に位置する壁面上面のメインロープ(径9mm)との間を1m間隔に設けたハンガーロープ(径9mm)で連結して荷重の分散と軽減を図り、長方形の断面形状を維持する。また樹幹と本体の間に上下に配置され、メインロープ引張の始点となるビーム(横梁)は、結合具としての機能と、左右のメインロープ間の距離を保持して本体断面形状を維持する役割がある。ビームの樹幹への取り付けは、立木への損傷を防ぐため、繊維ベルトを用いる(図-5)。

ユニット連結数	本体総延長(m)	合計重量(Kg)
1	8.0	56
2	15.3	111
3*	22.6	148

\*3ユニット連結については、今後の検討課題の参考として算出したもので、安全性等について実際には確認していません。

## ② 性能の評価

水平移動システムは、平成3年度に設計試作を行い、平成4年度に改良を行ったが、当初試作した水平移動システムについて、国内のヒノキ人工林内で地表近くでの架設試験を行ない、構造安全性を中心に性能を調べた。張り上げ時(無負荷時)のメインロープの張力は、70Kgで、このときの中央垂下量は415mmであった。次に、負荷として、成人が8名まで順次搭乗し、メインロープの張力の変化と垂下量(メインロープの垂れ下がり量)を調べた。図-6は、本体中央部付近に1、2、3、4、6、8名と順次搭乗した場合のメインロープにかかる張力と中央垂下量を示したものである。これによると、負荷による張力は、殆ど下側のロープにかかること、本システムの設計前提である3名搭乗を遥かに越える8名搭乗時においても、張力は850Kgfであり、メインロープの耐え得る張力は9500Kgfであるので、約11という十分な安全率を有していることがわかった。また、歩行面を支える下側ロープの垂下量は、張力の増加による伸びの少ないケブラーロープの特徴を示して600~700mm程度に安定しており、歩行などの行動中、強靱で安定した感触が得られた。次に、2名が搭乗して、上下及び左右に全力で揺らし、衝撃荷重の大きさを調べた。この結

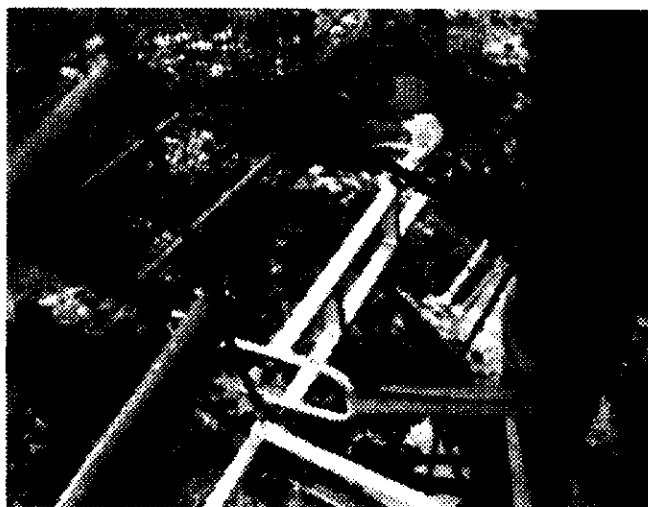


図-5. 繊維ベルトによるビームの取り付け

果は、平成3年度に設計試作を行い、平成4年度に改良を行ったが、当初試作した水平移動システムについて、国内のヒノキ人工林内で地表近くでの架設試験を行ない、構造安全性を中心に性能を調べた。張り上げ時(無負荷時)のメインロープの張力は、70Kgで、このときの中央垂下量は415mmであった。次に、負荷として、成人が8名まで順次搭乗し、メインロープの張力の変化と垂下量(メインロープの垂れ下がり量)を調べた。図-6は、本体中央部付近に1、2、3、4、6、8名と順次搭乗した場合のメインロープにかかる張力と中央垂下量を示したものである。これによると、負荷による張力は、殆ど下側のロープにかかること、本システムの設計前提である3名搭乗を遥かに越える8名搭乗時においても、張力は850Kgfであり、メインロープの耐え得る張力は9500Kgfであるので、約11という十分な安全率を有していることがわかった。また、歩行面を支える下側ロープの垂下量は、張力の増加による伸びの少ないケブラーロープの特徴を示して600~700mm程度に安定しており、歩行などの行動中、強靱で安定した感触が得られた。次に、2名が搭乗して、上下及び左右に全力で揺らし、衝撃荷重の大きさを調べた。この結

果、上下揺動時に瞬間最大値として2.16倍の増加比が測定された。これを、3名（187Kg<sub>f</sub>）搭乗時の張力（440Kg<sub>f</sub>）に乗じて安全率を算出すると、約10となり、十分なメインロープ強度と考えられた。他に安定性を調べるために、上半身を外へ乗り出す、転倒する、走る等の動作を行なったが、何れの場合にも、身体や本体がメインロープの強靱な弾力によって支えられる事により、高い安定感が得られた、また、本体に目だった捻れも見られなかった。これらの試験の結果、軽量化と運搬性の向上のため、負荷の少ない上側メインロープの径を当初の16mmから9mmに交換すること、本体を2分割することなどの改良すべき点を見出した。

改良後の水平移動システムについて、研究期間終了後となったが、後述の垂直移動システムとあわせて平成5年の夏期に森林総合研究所構内樹木園内で地上約11mの地点で実施した（図-7）。まず、架設作業については、5名で1日程度を要し、撤去は2名で1日までは要しなかった。前の試験で人力により張り上げが可能であると予測していたが、ロープ各部での摩擦抵抗等が大きく、簡易な引張用手工具を使用しなければならなかった。張り上げ後の本体の安定性は前の試験と同様に優れており、高強度繊維ロープの優れた特性が十分に生かされていた。高所での恐怖感については、本体の安定性と高い壁面が効果を上げ、試乗した者から不安感の訴えはなかった。当初は緊張感の緩和のため、底面をシート等で覆うことを考えていたが、ネットの色彩で下の景色がさほど目立たないことや、ロープが強靱なため、ネット上に乗っても十分な安定感が得られる（図-8）ことから、この対策は不要であることがわかった。

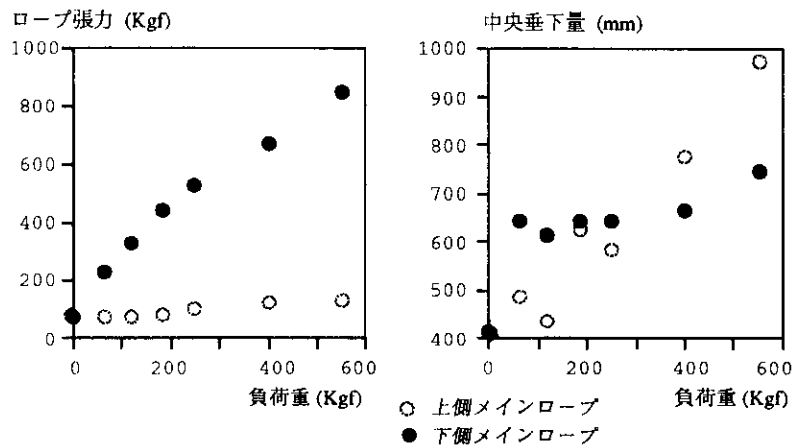


図-6 負荷重とメインロープ張力・中央垂下量の関係



図-7. 森林総研樹木園内樹冠部に架設した水平移動システム

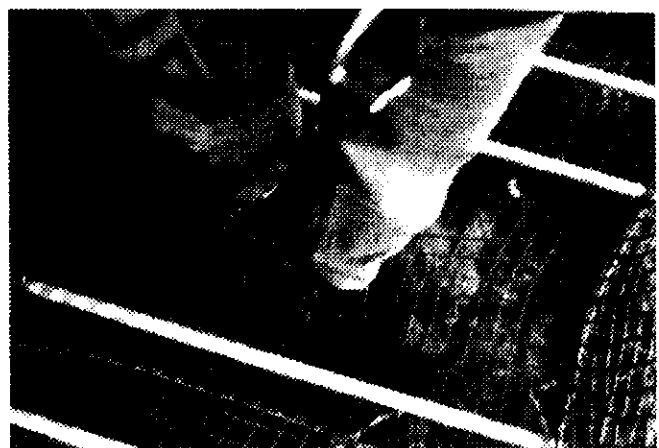


図-8. 強靱な底部のケブラーネット

### ③ 高木取り付け時の安定性

最も注意を要するのは、本システムの架設と利用によって、幹先端付近の本体（ビーム）の取り付け部に数100kgfという大きな横荷重が働き、本体を支える樹幹自体が不安定になることで、具体的には両側樹幹が設置方向に傾き、本体が大きく撓むこと等である。これを防ぐため、引張力と反対方向に向けて、地上に近い地点と他の立木などから控え（ステー）ロープを設置する必要がある。この場合に留意すべき点は、第一に、横方向の安定性も図る必要があることから、複数の控えロープを、水平面で本体の設置方向と角度を設けて左右のバランスがよくなるように設置することである。第二に取り付け木の樹幹に沿って下方方向に派生する分力は、取り付け木を座屈（腰折れ）させる力となるので、これを小さくするため、地表との角度をできるだけ小さくすること、すなわち、なるべく遠くから張ることである。第三に、樹幹上の本体（ビーム）の取り付け部と控えロープの取り付け部を同一の高さとするか、なるべく近づけることが大切で、互いに離れると大きなモーメントが生じ、幹折れや不安定の原因になる。控えロープについても、本システムでは6ないし9mm径のケブラーロープを用いて軽量化と設置の簡易性を図っており、これによって極めて簡易に強力な控えロープを設置することが出来る。なお、台風のような強風時における安定性については未解明であり、立木への損傷を絶対に避けなければならない設置条件の場合は、当面は事前にブロック側のロープをゆるめることにより、下に垂らし、随所を樹幹にロープ等で固定して強風時をしのぐのが得策である。

### ④ 実用に向けて

今後の量産品については、底面部以外の両側壁の防護ネットが高張力を必要としないため、特注ケブラーネットに替えて既製品の化繊製ネットを使用することにより、大幅な軽量化と低コスト化を計る必要がある。

## （2）垂直移動システムの開発

### ① システムの概要

垂直移動システムは（図-9）、水平移動システムを架設する樹冠部へ安全に到達するためのもので、立木に繊維ベルトによって係留され水平に保った正方形の係留用の枠の各頂点から吊り下げた4本の12.5mm径のCFCC（炭素繊維ロープ）に、FRP製の横棧を定間隔に渡して、4本のロープ間隔を保つとともに、このFRP製の桁を梯子状の足掛にして、内部を通路として昇降するものである（図-10）。CFCCの水平間隔は720mm、FRP製桁の上下の間隔は500mmである。炭素繊維ロープは約4mを1ユニットとして、各ユニットの継ぎ目には、四隅の上下に炭素繊維ロープが固定できる連結用の中間枠を介し

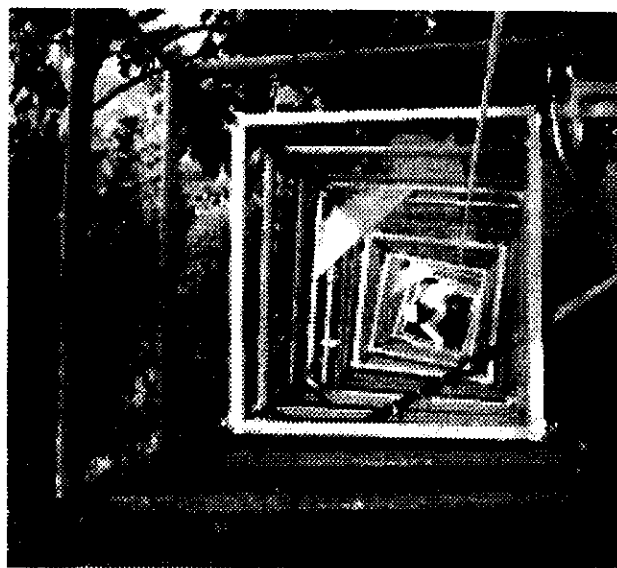


図-10. 上部からみた内部昇降空間

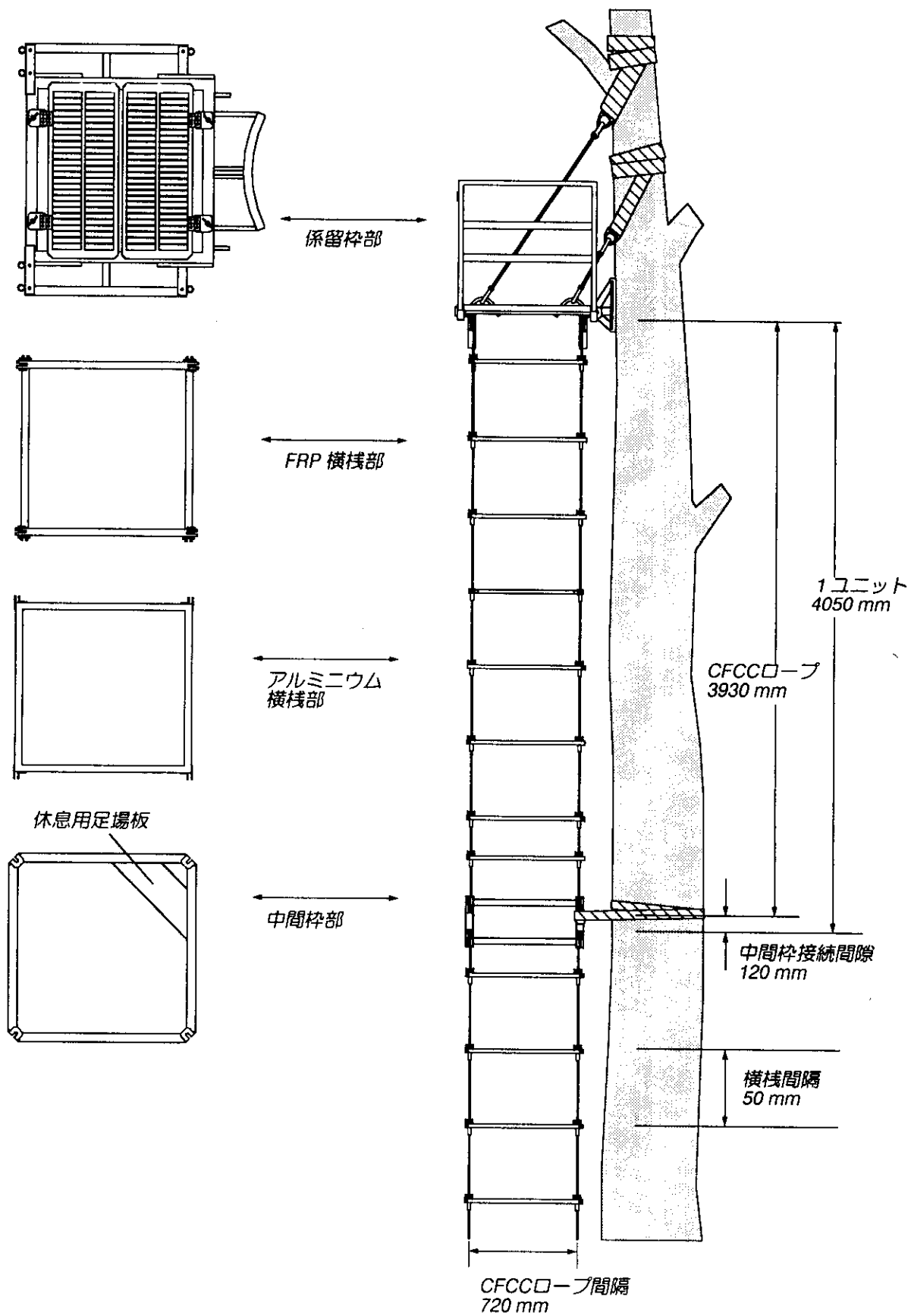


図 - 9. 垂直移動システムの全体図

て必要な高さまで複数のユニットを接続できる。この中間枠は、4本のロープ間隔を正方形に保つとともに、樹幹への中間の固定点、昇降時の休息箇所、転落防止用ネットの装着箇所等としての役割も果たす。また正方形の保持のため、必要に応じて係留用枠または中間枠の間に方形に溶接されたアル

ミニウム製の横横を用いる。係留用枠、中間枠は何れもアルミニウムを用いて軽量化を図っている。本体各部の重量と使用スパン別の総重量は、表-2のとおりである。

C F C Cの上端及び下端には連結用スリーブが、また50センチメートル間隔に横横固定用スリーブが工作されている。上端と下端のスリーブは係留枠又は中間枠のソケットにはめ込まれ、横横固定用スリーブは、FRP製またはアルミニウム製の横横両端のスリットを蝶ネジで装着する(図-11)ことにより、横横にかかる昇降者の体重等の荷重を支える役割を果たす。

最上部の係留枠は、立木に係留するためのロープ固定部、樹幹の曲面に密着し枠を安定させると同時に接触部にゴム厚板を張り、樹幹の損傷を防ぐための樹幹接触部を有している。また、中央の昇降空間上面にあたる部分は、上方両側に開くハッチ構造となっている。容易に枠上に立つことができ、垂直移動システムや水平移動システムの架設、撤去作業の拠点とする事が出来る。また、観察や資料収集の場所としても好適である。このため、枠上面には樹幹に面しない3辺上に着脱式の手摺が装備されている。

## ② 性能の評価

本システムは、平成3年度に構想を固め、C F C Cのソケット加工や立木への取り付け方法等に

表-2. 各部の重量と使用スパン別の総重量

区分	部材名	数量	単位	単位あたり重量(Kg)	合計重量(Kg)
1システム 当たり部材	係留枠	1	台	20.3	20.30
	手すり	3	個	2.8	8.40
	合計				28.70
1ユニット 当たり部材	C F C Cケーブル	4	本	2.30	9.20
	中間枠	1	台	6.12	6.12
	FRP横横	18	本	0.42	7.56
	アルミニウム横横	2	個	1.90	3.80
	蝶ネジ・ナット	80	組	0.06	4.80
	合計				31.48

ユニット 連結数	本体総延長 (m)	合計重量 (Kg)
1	4.3	60
2	8.3	92
3	12.4	123
4	16.4	155
5	20.5	186
6	24.5	218
7	28.6	249
8	32.6	281
9	36.7	312
10	40.7	344

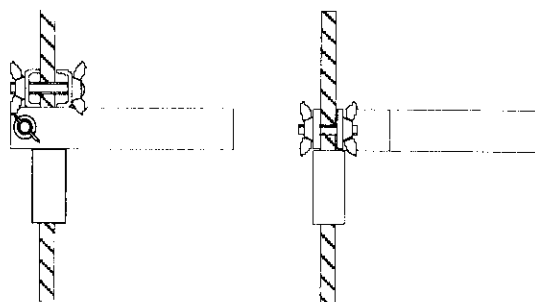


図-11. FRP(左)およびアルミニウム(右)横横のC F C Cスリーブへの固定



ついて検討を進め、平成4年度に2度の仮設試験を経て、前述の水平移動システムについて行った森林総研構内樹木園における林内架設試験を経て開発に至ったものである。

約4mのユニットを3ユニット試作し、樹高約17mのユリノキに架設した。係留枠上の目の高さでの到達高は約14mであった。架設には5名で2日を要し、撤去には3名で1日を要した。最下部を含めた3基の中間枠の箇所繊維テープによって樹幹に係留した。



図-12 中間枠における繊維テープによる係留

安全性については、特に問題がなく、各部材が軽量でありながら強度が高いため、昇降や作業にともなう揺れは、減衰が非常に速やかで不安を感じさせなかった。また、構造物の中を昇降することによる緊張感の軽減効果が著しかった。また、昇降の場としてだけでなく、種々の作業の足場としても安定性が高かった。

### ③ 高木架設時の安定性

垂直移動システムが立木に与える負荷は、立木強度が極めて大きい垂直方向の負荷が大部分であることや、非常に軽量であること、風の抵抗が少ないことから、水平移動システムに比べて安定性は高いと考えられる。さらに中間枠やその他の任意の点で立木への多点係留(図-12)が可能であるため、荷重の分散が可能である点も非常に有利である。現に樹木園における架設試験期間中有数の強風を伴う台風におそわれたが、垂直移動システムは架設したままで立木や施設に被害は起きなかった。

また、構造全体を吊り下げているCFCCについては、同径のワイヤーロープの約1.5倍の強度を有しており、使用している12.5mmの場合、1本当たりの破断荷重は14,500kgfと、システムの自重や予想負荷に対して非常に大きい安全率を有しており、大樹高の場合にも十分適用が可能であると考えられる。また、自立構造である足場やタワーのように自重による倒壊の危険性がなく、また倒壊を防ぐための構造の巨大化や基礎工事の必要もない点が有利である。

### ④ 実用に向けて

今後の量産品については、コスト的に負担の大きいCFCCのシーブ加工の強度が現在数トンと非常に大きいので、横桟固定部についてはより簡単な加工により軽量化と低コスト化を図る必要がある。また、係留枠と中間枠の大きさや形状を変えれば、より大きいまたは小さい、あるいは三角形などの昇降空間とすることができ、用途に合わせた設計が可能である。



図 - 13. CFCCとの接触部で起きた枝の損傷



図 - 14. 繊維ベルトによる  
係留枠の装着部

### (3) 樹冠部移動・作業システムの環境保全性

本システムの開発の前提として、環境保全性を重視していたが、この点ではほぼ目標を達成できた。森林総研樹木園における水平・垂直両システム架設試験の結果、架設、撤去作業は少人数で動力機器類を一切用いることなく可能であり、地表を掘削する必要はなく、さらに、不慣れな作業で手間取ったにも関わらず、架設、撤去作業及び昇降利用に伴う立木や林地表面に対する損傷は極めて軽微なものであった。

樹木に対する損傷については、CFCCと枝の接触箇所において枝の損傷が起きた。(図 - 13) これは架設時点で予測可能であるので、布を巻くなどの措置により今後は予防できるものと考えられる。架設、撤去作業に伴って、落葉や小枝の折損は相当あったが、大枝(1次ないし2次枝)の折損はなく、施設の規模の割には極めて軽微と考えられた。これは、非金属を主とした、曲げや変形が容易で小さな部材が多いことによると考えられる。また、立木への係留はすべて繊維ベルトや繊維テープを使用したことにもよる(図-14)落葉や小枝の折損は、特に控えロープの設置によって多く生じた。

## 2. 気球による樹幹上面撮影システムの開発

ヘリウム気球を用いた低空写真の撮影システムを構築した。気球は、ビニール製飛行船型(図-15)であり、ヘリウム容量は15立方メートル、全重量は7240gである。掲揚用ロープは、ケブラー製で5mm、1m当り13g強であり、120mで約1590gとなる。リモコン撮影装置は35mmカメラ、2チャンネルラジコン用プロポ送受信機、サーボモーター、マイクロスイッチ、小電力トランシーバおよびVOXユニットからなり、空中ユニットは、軽合金製のベースに組み込み、電池、フィルム等を含めた全重量は、2520gである。特徴は、ごく普通の低価格の一般市販品を用いてるため、きわめ

て安価であること、また、複雑な機構を用いていないので動作が確実に点検が容易なこと、シャッターの動作が地上で確認出来ることである。これを用いて、国内の林分において最高120mの上空から試験的な撮影を2度にわたって行なった(図-16)。この結果、強風や乱流がなければ、特段の習熟を要せずに、樹幹上面の写真撮影が可能であることがわかり、十分な実用性を備えていることがわかった。



図 - 15. 開発したリモコン撮影装置  
を装着した気球

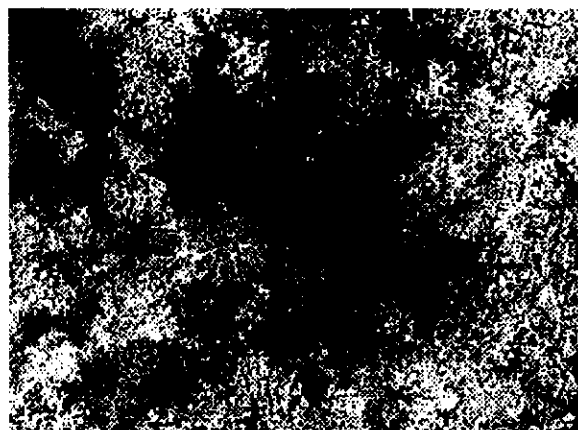


図 - 16. 低空から撮影した広葉樹林内の  
ギャップの映像

### 3. おわりに

本課題の所期の目的は達成されたと考えている。本課題は、他の課題をサポートする事が主な目的という性格であるので、本研究の成果を広く利用して頂けることが本当の成果である。本成果の特徴は環境影響の少なさと軽量・簡便さにある。特に、垂直移動システムは前例のない方法であり、多くの利点を持っているので、着目していただきたい。

なお、樹冠部移動・作業システム開発は、東網商事およびその関連企業との密接な協力関係のもとに実施された。また、森林総研小沼順一室長ならびに神谷文夫構造性能研究室長からは貴重なご助言とご助力を頂いた。各位に厚くお礼申し上げます。

### 研究発表の状況

遠藤利明：空中写真と気球からの低空写真から見た伐出作業跡地の植生回復過程、森林航測

No.170、12-16、1993