

平成25年度補正 林野庁委託事業

CLT等新製品・新技術利用促進事業のうち
CLT実用化促進（長期挙動データの収集・分析）
成果報告書

平成27年3月

独立行政法人 森林総合研究所
地方独立行政法人 北海道総合研究機構
一般社団法人 日本CLT協会
公益社団法人 日本木材加工技術協会

林野庁委託研究
「CLT 等新製品・新技術利用促進事業のうち CLT 実用化促進
(長期挙動データ等の収集・分析 (H25 長期))」 報告書

目 次

1. 事業計画	1
1.1 目的	1
1.2 実施内容	1
1.3 事業実施体制	2
2. CLT の長期変形挙動に関する測定方法の妥当性の検討	5
2.1 CLT の長期変形挙動に関する測定方法の検討の意義	5
2.2 CLT の長期変形挙動に影響を及ぼす測定上の因子	7
2.3 温湿度管理システムの構築と、試験室の温湿度管理能力の把握	11
3. 決定した測定方法における CLT の長期挙動データの収集と収集した CLT の長期挙動データの解析	25
3.1 長期挙動データ導出のための荷重水準の決定	25
3.2 曲げ荷重下における長期挙動データの収集と解析－広島総研の成果	27
3.3 曲げ荷重下における長期挙動データの収集と解析－建研の成果	31
3.4 曲げ荷重下における長期挙動データの収集と解析－森林総研の成果	35
4. 進行状況の管理	40
4.1 はじめに	40
4.2 進行管理委員会への出席者	40
4.3 現地検討会	42
4.4 まとめ	45
4.5 謝辞	45
5. 事業成果の総括と残された課題	46

[委員・オブザーバー・課題担当者・事務局一覧]

進行管理委員会：	安村 基	静岡大学農学部（委員長）
	青木 謙治	東京大学大学院農学生命科学研究科 生物材料学専攻
	尾方 伸次	公益財団法人日本合板検査会
	岡部 実	一般財団法人ベターリビングつくば建築試験センター
	鷺海 四郎	公益財団法人日本住宅・木材技術センター
	河合 直人	工学院大学建築学部建築学科
	河合 誠	一般社団法人日本 CLT 協会
	黒木 勝一	一般財団法人建材試験センター 中央試験所
	園田 里見	富山県農林水産総合技術センター 木材研究所
	横田 俊峰	独立行政法人農林水産消費安全技術センター
オブザーバー：	高木 直人	国土交通省住宅局建築指導課
	歌代 純平	〃
	中熊 靖	農林水産省消費安全局表示・企画課
	小坂善太郎	林野庁木材産業課木材製品技術室
	高畑 啓一	〃
	加藤 裕二	〃
	西村 紘明	〃 住宅資材班
	平間 昭光	北海道立総合研究機構 林産試験場
課題担当者：	中島 史郎	独立行政法人建築研究所
	荒木 康弘	〃
	朝倉 靖弘	北海道立総合研究機構 林産試験場
	大崎 久司	〃
	秋津 裕志	〃
	大橋 義徳	〃
	松本 和茂	〃
	高梨 隆也	〃
	佐々木貴信	秋田県立大学木材高度加工研究所
	小川 俊治	愛媛県農林水産研究所 林業研究センター
	玉置 教司	〃
	藤田 和彦	広島県立総合技術研究所 林業技術センター
	孕石 剛志	一般社団法人日本 CLT 協会
	宮武 敦	独立行政法人森林総合研究所
	平松 靖	〃
	新藤 健太	〃
	渋沢 龍也	〃
	長尾 博文	〃
	塔村真一郎	〃
	宮本 康太	〃
事務局：	黒田 尚宏	公益社団法人日本木材加工技術協会
	海老原 徹	〃

（順不同，敬称略）

1. 事業計画

1.1 目的

戦後造成した人工林が本格的な利用期を迎える中、農林水産業・地域の活力創造プランに基づき、鉄筋コンクリート造や鉄骨造が主流となっている中層・大規模建築物等の分野における木質の新製品・新技術の開発を加速化し、新たな木材需要を創出していく必要がある。

現在、新規の木質材料として、ひき板を構成要素とした「CLT: Cross Laminated Timber」が欧米を中心として実用化されている。CLT は、ひき板を並列することで単層を構成し、その単層の軸方向を直交させながら積層接着した大きな断面を持つ面状の集成加工材料であり、合板の構成要素を単板から製材に置き換えたもの、と考えると理解しやすい。CLT は、床・壁に使用することで、木材を多用する新しい木造建築構法を実現できることから、わが国でも木材資源の大きな需要先として期待を集めており、先般 CLT を対象とした「直交集成板の日本農林規格」が制定され、いよいよその利用が端緒についたところである。

しかしながら、CLT は新しい木質材料であるため、国内の研究開発はいまだ萌芽段階にあり、原料として利用可能な製材の品質や得られる製品の強度性能の水準、使用可能な接着剤の種類と接着性能の担保の方法など、解決すべき製造上の問題点が存在する。また、わが国では建築材料としての位置づけがなく、一般的な構造設計法が確立されていないため、現在は、時刻歴応答解析による非常に限られた設計手法でしか使えない状況にあり、製品の性能特性値・調整係数の導出や設計手法の確立など、解決すべき利用上の問題点が多い。CLT の利用拡大のためには、製法・性能に関する技術データの蓄積が必要であり、CLT の適正利用のためには、材料の強度・耐久・耐火性能など、幅広い検討が必要である。建築物は長期間利用されるものであることから、耐用年数の間、確実に安全が確保されるよう、材料の長期挙動に関するデータの蓄積は必須である。さらに、長期挙動のデータ収集には、実際の使用時を想定した測定環境・条件を考案し、長期間にわたる測定・観察が必要であることから、長期挙動データの蓄積は、他のデータ収集に先駆けて集中的に実施する必要がある。

本提案は、CLT の長期挙動データを収集することで、中層・大規模建築物の木造化に必須である長期性能の設計に資することで CLT の開発・普及を促進することを目的とするものである。今後、CLT の基礎的性質の解明や、製造方法・利用方法など、技術的な検討を進めることは、CLT の実用化を促進し、国内の木材資源の利用拡大につながるものと考えられる。

1.2 実施内容

木質材料は粘弾性体であることから、荷重等の外力が長期間作用すると、変形の増大や最悪の場合、建物の倒壊を招く恐れがある。したがって、想定する建物の使用期間に合わせて、作用する外力による影響が無視できるよう、材料の強度や断面寸法を選択する必要がある。本提案では、建築基準法において定められている指定建築材料ごとの技術基準（測定方法等）に準じ、一定の温湿度環境下において一定の外力が作用する場合の CLT の長期変形挙動に関する測定方法の妥当性を検討するとともに、当該条件下における長期挙動の測定を実施し、建物の設計に使用可能な長期挙動データを収集する。

本提案の事業期間とスケジュールは以下の通りとする。

課題内容	H26									H27	
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2
①測定方法の検討			○		→						
②ア荷重水準の決定					→						
②イ長期挙動データの収集					→						
③ア長期挙動データの解析					→						
③イ製造因子の分析					→						
④検討委員会の開催			○	○				○			○
報告書作成											○

1.3 事業実施体制

本課題は以下の各機関との協力の下に実施することで、効率化、高精度化を図る。課題の進行管理については公益社団法人日本木材加工技術協会が担当する。課題の一部については独立行政法人建築研究所及び広島県立総合技術研究所林業技術センターに再委託する。

- ・中核機関：独立行政法人森林総合研究所
- ・参画機関：地方独立行政法人北海道立総合研究機構林産試験場
日本 CLT 協会
公益社団法人日本木材加工技術協会
- ・再委託先：広島県立総合技術研究所林業技術センター
独立行政法人建築研究所

※参画機関とは、協定を結ぶこととしている。

共同提案者の役割分担

以下の通りとする。

- ・参画機関：地方独立行政法人北海道立総合研究機構林産試験場

業務の範囲：長期挙動データの収集における含水率管理条件の決定

必要性：CLT 長期挙動データの収集において、製造から実験中に至るまでの材料の含水率変動を把握し適切な試験体の水分管理条件を検討するために、木質材料内の熱水分に関する知識を有する専門家が参画する必要がある。

- ・参画機関：日本 CLT 協会

業務の範囲：断面構成等 CLT の製造因子が長期挙動に与える影響の分析

必要性：CLT の断面構成等の製造因子が CLT の長期挙動に与える影響について分析し、今後の CLT の製造方法にフィードバックする方法について検討するためには CLT の製造者団体が参画する必要がある。

- ・参画機関：公益社団法人日本木材加工技術協会

業務の範囲：課題①～③の進行管理のための委員会の設置，招集・議事録の作成。本提案の成果報告取りまとめ。

必要性：本提案の円滑な進行のため課題間の連携を図り，進捗状況を把握するためには外部機関に設置された委員会において学識経験者の意見を聞く必要があることから，木材の利用・加工技術に関する唯一の学術団体が参画する必要がある。

再委託先の業務内容

以下の通りとする。

・広島県立総合技術研究所林業技術センター

1) 課題②ア) の遂行に係る業務

業務の範囲：CLT 長期挙動データの収集に適した測定条件の決定

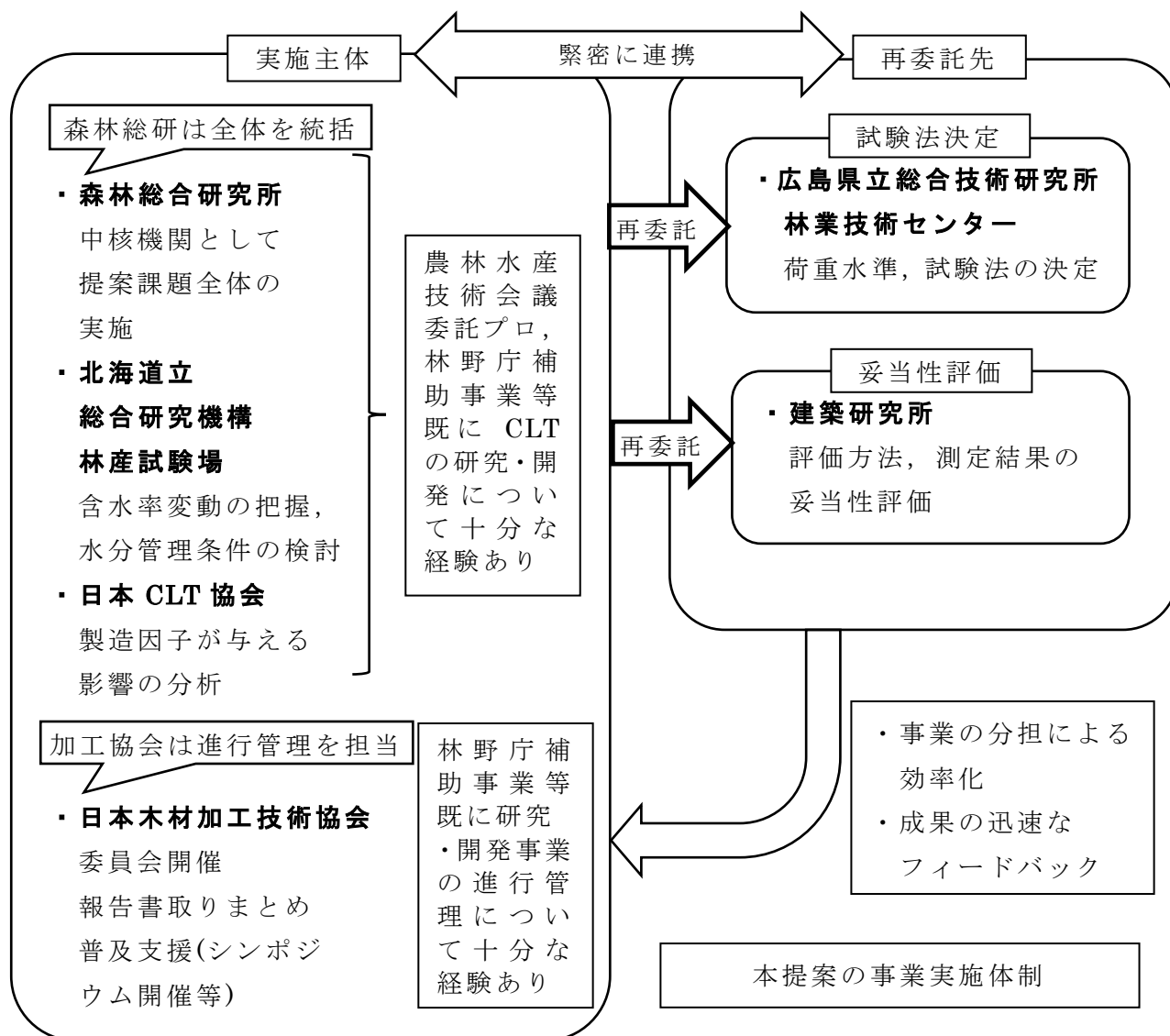
必要性：CLT 長期挙動データ導出のための荷重水準の決定には強度測定の専門家が参画する必要がある。再委託先はこれまでに CLT の強度性に関わる試験研究を多数実施した唯一の公設試験研究機関であり，他に適した再委託先は存在しない。

・独立行政法人建築研究所

2) 課題③ア) の遂行に係る業務

業務の範囲：得られた CLT の荷重継続時間と曲げ変形量の関係より曲げ荷重下における長期挙動を定量的に表現する数値を導出し，その妥当性を検討する。

必要性：CLT の長期挙動を評価するためには，建設省告示に定められた評価方法を適用し，他の木質材料の長期挙動に関する指標と比較する必要がある。再委託先は建築に関わる総合的研究を実施する唯一の公的学術研究機関であり，他に適した再委託先は存在しない。



2. CLT の長期変形挙動に関する測定方法の妥当性の検討

2.1 CLT の長期変形挙動に関する測定方法の検討の意義

構造材料において、面外曲げ性能は床・屋根など水平構面に使用される場合、鉛直荷重に対する耐荷重性能及び耐変形性能として要求される基本性能であり、壁など鉛直構面に使用される場合、風圧力等に抵抗する性能として考慮すべき性能である。さらに、構成要素の物性値と断面構成から性能設計が可能であることから、構造材料の日本農林規格(以下 JAS 規格)等において品質管理の指標にも利用される重要な性能項目であると考えられる。一方、建築物に要求される主要な性能は、建築物が崩壊しない(倒れない)ことと居住性能に影響を与えるような変形を生じないことである。また、長期間にわたって使用されることから、初期の性能がどの程度維持されるかも重要である。したがって、曲げ荷重下における長期変形挙動を同定することは、建築物が著しい性能低下を生じずに使用可能な荷重範囲を決定するために必要な検討である。例えば、現在の規定^{1,2)}における、継続時間に係る調整係数の導出には、各 10 体の試験体に対して 3 以上の応力レベルを適用し、少なくとも 1 以上の応力レベルの破壊荷重継続時間が 6 ヶ月以上となるように設定して破壊時間と応力レベルの関係をもとめることとされており、調整係数の測定には、多大な労力と時間を要する。このため、木質系構造材料に対する実大寸法における長期変形挙動の測定事例は極めて少ない。

本事業の検討対象である CLT は、建築物の構造用途で使用することを目的とした木質材料である。建築基準法第 37 条においては、「建築物の基礎、主要構造部その他安全上、防火上又は衛生上重要である政令で定める部分に使用する木材、鋼材、コンクリートその他の建築材料として大臣が定めるもの」は指定建築材料として規定されている。指定建築材料が満たすべき性能については、JIS 規格または JAS 規格を引用する形で各規格の要求性能を満たすことが指定されている。CLT の品質を担保する材料規格は直交集成板の JAS 規格として、平成 25 年 12 月 20 日に制定された。しかしながら、現時点では建築基準法上の位置付けはなされておらず、一般的な構造材料として使用するための方策は整備されていない。

そこで本項では、指定建築材料に関する技術的基準を参考に、CLT を構造材料として使用するために要求される可能性がある性能の項目について検討する。

現在、指定建築材料の対象となる木質材料は、木質接着成形軸材料（接着剤を用いて単板又はストランドを成形した軸材料＝PSL 及び OSL）、木質複合軸材料（製材、集成材、木質接着成形軸材料その他の木質材料を接着剤を用いて複合した軸材料＝I ビーム）、木質断熱複合パネル（平板状の有機系発泡材の両面に構造用合板その他これに類するものを接着した材料＝フォームコアパネル）、木質接着複合パネル（木材で組まれた枠組に構造用合板その他これに類するものを接着した材料＝ストレススキンパネル）の 4 種である。これらに対して、同告示に引用されている既存の材料規格は、木質接着成形軸材料に相当する構造用単板積層材の JAS 規格のみである。

その他の材料規格が存在しない材料に関しては、平成 12 年建設省告示 1446 号「建築物の基礎、主要構造部等に使用する建築材料並びにこれらの建築材料が適合すべき日本工業規格又は日本農林規格及び品質に関する技術的基準」に定められた項目について、同告示の試験方法に基づいてその性能を測定し、国土交通大臣による認定を受ければ使用するこ

とが可能となる。本事業で対象とする直交集成板は、その用途としては、木質断熱複合パネル、木質接着複合パネルに類似していると考えられる。そこで、同告示において、木質断熱複合パネル、木質接着複合パネルの両材料に要求される性能をみると、以下の 13 項目である。

1. 寸法及び曲がりの基準値
2. 各部の品質（接着剤の同等性含む）
3. 面内圧縮性能の基準値
4. 面外曲げ性能の基準値
5. めりこみの応力の生ずる部分に用いる場合は、めりこみ強さの基準値
6. セン断の応力の生ずる部分に用いる場合は、せん断性能の基準値
7. 温度による著しい変形のおそれがある部分に用いる場合にあっては、耐熱性能の基準値
8. 湿潤状態となるおそれのある部分に用いる場合は、曲げ強さ及び曲げ弾性係数に対する含水率の調整係数
9. 面内圧縮強さ、面外曲げ強さ、めり込み強さに対する荷重継続時間の調整係数
10. 曲げ弾性係数に対するクリープの調整係数
11. 面内圧縮強さ、面外曲げ強さ及び曲げ弾性係数、めり込み強さに対する事故的な水掛りを考慮した調整係数
12. 接着耐久性に関する強さの残存率が、それぞれ 0.5 以上であること
13. 防腐処理による力学特性値の低下率及び防腐処理に用いる木材防腐剤の名称

同告示は、基本的な性能として、曲げ、せん断、めりこみを挙げ、これらの性能に対して、実験的に求めた強度・弾性係数の統計的下限値を算出し、含水率・荷重継続時間・クリープの各因子の影響を調整係数により定量化することによって最終的な値を導出しようとするものである。試験体は、材料の全体を代表するように採取することとしており、製品内・製品間の物性の変動を考慮すると、試験体の採取方法には工夫が必要となる。曲げ以外の性能に関しては、合理的な方法によって曲げ性能の調整係数を適用できることが確認された場合には、曲げ性能における各調整係数を用いてよいこととしている。また、性能の基準値を定めているものは、項目 10 の接着耐久性に関する強さの残存率のみであり、その他の項目では、製造者が基準値を定めて宣言する形となっている。なお、防腐処理の効力に関する要求事項は同告示には定められておらず、他の制度、例えば(財)日本住宅・木材技術センターの AQ 認証制度等による保証が必要となるが、有効な防腐処理が施されている場合に、構造材料として要求される性能が、無処理の材料に対してどれだけ低下するかを数値で示すことが要求されている。

一方、2007 年枠組壁工法建築物構造計算指針では、材料の許容応力度及び弾性係数の算出は長期の場合、下式によることとされている。

使用環境 I(20℃, 95%RH) : $F_A = 2/3 \times F \times K_{1-1} \times K_2$, $E_A = E \times K_{a-1} \times K_b$

使用環境 II(20℃, 85%RH) : $F_A = 2/3 \times F \times K_{1-2} \times K_2$, $E_A = E \times K_{a-2} \times K_b$

使用環境 III(20℃, 65%RH) : $F_A = 2/3 \times F \times K_2$, $E_A = E \times K_b$

ここで、

RH : 相対湿度, F_A : 長期許容応力度, 2/3 : 安全率, F : 基準強度, K_{1-1} : 使用環境 I

における含水率に係る強度調整係数， K_{1-2} ：使用環境 II における含水率に係る強度調整係数， K_2 ：荷重継続時間に係る強度調整係数， E_A ：長期の応力に対する弾性係数， E ：基準弾性係数， K_{a-1} ：使用環境 I における含水率に係る剛性調整係数， K_{a-2} ：使用環境 II における含水率に係る剛性調整係数， K_b ：クリープに係る剛性調整係数。

上式の概念は，材料のバラツキを考慮して下限値を算出可能な試験体数を用いた測定結果を元に，初期の強度・弾性係数を求め，施工時の降雨等の影響と使用される環境毎の長期使用時の性能低下を勘案し，安全を確保することである。

本事業は，直交集成板の面外曲げ荷重下における長期変形挙動を明らかにすることを目的としており，上記の要求項目に当てはめると，4，9，10 について検討することとなる。また同告示では，試験体の寸法，採取方法についても規定が存在するため，それらが性能に与える影響についても考察を要するものと考えられる。したがって，本事業で採用すべき測定方法は直交集成板の JAS 規格に準拠しながら，同 JAS 規格に規定がない項目については，上述の告示・指針に引用されている方法に可能な限り準ずるよう配慮することが必要であろう。さらに，既存の規格・基準において規定されていない測定上の影響因子についても，工学的根拠に基づき許容される範囲を検討しておく必要がある。

2.2 CLT の長期変形挙動に影響を及ぼす測定上の因子

粘弾性体である材料に一定の荷重を作用させた場合，時間の経過とともに変形が増大する。この現象をクリープ現象と呼ぶ。荷重の水準が高い場合，変形が増大するのみならず，破壊に到ることがある。これをクリープ破壊現象と呼ぶ。クリープ破壊が生じる時間と荷重水準には負の相関が見られることから，その相関を荷重継続時間(DOL: Duration of Load)の影響によるものと表現する。これらより，一定荷重を作用させた際の経時的な変形増大を測定する試験をクリープ試験，一定荷重水準時のクリープ破壊時間を測定する試験をクリープ破壊試験または DOL 試験と呼ぶ。なお，測定時の温湿度環境が変化する場合，変形増大とクリープ破壊時間は異なるため，温湿度環境を一定に保たない場合の現象をメカノソープティブ現象と呼び分けることが一般的である。

建築物に要求される主要な性能は，建築物が崩壊しない(倒れない)ことと居住性能に影響を与えるような変形を生じないことである。したがって，建築に用いる構造材料には弾性係数・強度に加え，長期荷重下の変形増大量と許容される荷重水準を定量化した数値が要求される。例えば，一般の木材の場合，荷重継続時間の調整係数(短期：2.0，中短期：1.60，中長期：1.43，長期：1.10)が提案されており，これらの数値を用いることで，建築物の目標とする使用期間に応じた設計が可能である。

集成材，単板積層材については，木材と同等の調整係数が適用されている。これは，集成材，単板積層材が各構成要素の繊維方向をほぼ並行に集成・積層されているため，接着が正しく行われ，欠点とならなければ，木材と同様の機械的性質を有することが推測されるためであると考えられる。一方，新規の材料である CLT は，構成要素の繊維方向を直交させながら集成した材料であることから，集成材，単板積層材と同様に木材と同等の調整係数を適用して良いか，検討を要すると考えられるが，現時点では判断材料となる工学的根拠はないため，実験的に確認する必要がある。しかし，実大材を用いた CLT の DOL 試験は実施例が少なく，測定方法が確立されているとは言い難い。そこで，本項では，DOL

試験の実施にあたり、測定結果に影響を及ぼしうる因子について検討する。

曲げ荷重下のクリープ試験、DOL 試験を実施する場合、荷重方式としては以下の方式が考えられる。

- ・実荷重による静荷重載荷(デッドロード)方式
- ・油圧・バネ圧等を用いた機械的加力方式

デッドロード方式の場合、荷重は載荷する重錘の重量によって決定されるため、特段荷重を測定する装置を必要としないが、重錘を有するため試験装置の重量が増加する。機械的加力方式の場合、重錘を持たないため、本来、試験装置重量は軽量となる可能性があるが、加力時の反力を試験装置が負担する場合、装置のフレームの強度・剛性を高くする必要があり、加力容量によっては試験装置重量が増大する恐れもある。また、機械的加力方式の場合、荷重を測定するためのセンサーが必要であり、バネ圧、モーター等の動力を用いる場合は、さらに一定荷重を与えるために反力部分に変位を与える必要も生じる。試験装置重量や反力負担の有無は、設置場所の床の耐荷重等、考慮すべき要素が増えることに注意が必要である。

デッドロード方式には、てこを用いて増力することで載荷荷重を小さくする方式も含まれる。図 2.2-1 にてこ式加力装置の模式図を示す。図中の力点に重錘による荷重を掛ければ、作用点に増力された負荷を与えることができる。力点のモーメントアーム(支点から力点までの距離)を L_2 、作用点のモーメントアーム(支点から作用点までの距離)を L_1 とし、力点の重錘の重量を P_2 、作用点に生じる負荷を P_1 とすると、てこは力のモーメントの釣り合いを利用するため、 $P_1 \cdot L_1 = P_2 \cdot L_2$ である。てこ式加力方式の場合、てこ比(図中の L_2/L_1)を大きく採れば、重錘は軽量で済むため、試験装置重量は軽量になり、また作業性も向上する。加力開始時の作業性は、経時的変化を測定する試験においては、測定精度に直接影響する重要な因子である。例えば、てこ比を 100 倍とすれば、 $P_1 = P_2 \cdot L_2/L_1$ であるから、10N(≒1kg)の重錘を載荷するだけで 1kN(≒100kg)の加力が可能である。

てこ比を大きく採るためには、 L_2 を大きくする、 L_1 を小さくする、またはその両者とすればよい。しかし、 L_2 を大きくすることは、試験装置の設置面積が増大するため現実的でない。また、 L_1 を小さくする場合、図から分かるとおり、力点と作用点の移動量はモーメントアームの比に比例するため、作用点における試験体の変形量に対応した力点の移動量が大きくなり、重錘が床面に着いてしまう恐れがある。さらに、てこが回転すると作用点は平行方向にも移動するため、回転角(図中の θ)が大きい場合、試験体に対する負荷の水平方向成分の影響を無視できなくなる。とくに、4 点曲げ試験の場合、加力点の負荷を均等化するため、ロードイーブナーを使用することが一般的であるが、試験体に対する負荷に水平方向成分が生じると、逆にいずれかの加力点の負荷を卓越させる恐れがあり、注意が必要である。

たとえば、5 層 5ply 厚さ 150mm の試験体の場合、試験体長さは 3,450mm(=厚さの 23 倍)であるから、 $L_2 - L_1 \geq 1,725\text{mm}$ とできる。そこで、 $L_2 = 2,000\text{mm}$ 、 $L_1 = 200\text{mm}$ とすれば、てこ比は 10 倍であるから、5 層 5ply 厚さ 150mm の CLT の破壊荷重(3 章参照)より 50kN(≒5,000kg)の荷重を作用させるためには、5kN(≒500kg)の重錘を負荷すればよい。ただし、このとき、破断時の最大変形量 70mm(3 章参照)作用点が鉛直方向に移動すれば、力点は 700mm 移動することになる。このときのてこの回転角は 20.5° であるから、作用点

は水平に 12.7mm 移動しようとする。これらの条件を勘案し，測定上問題とならないことを確認する必要がある。

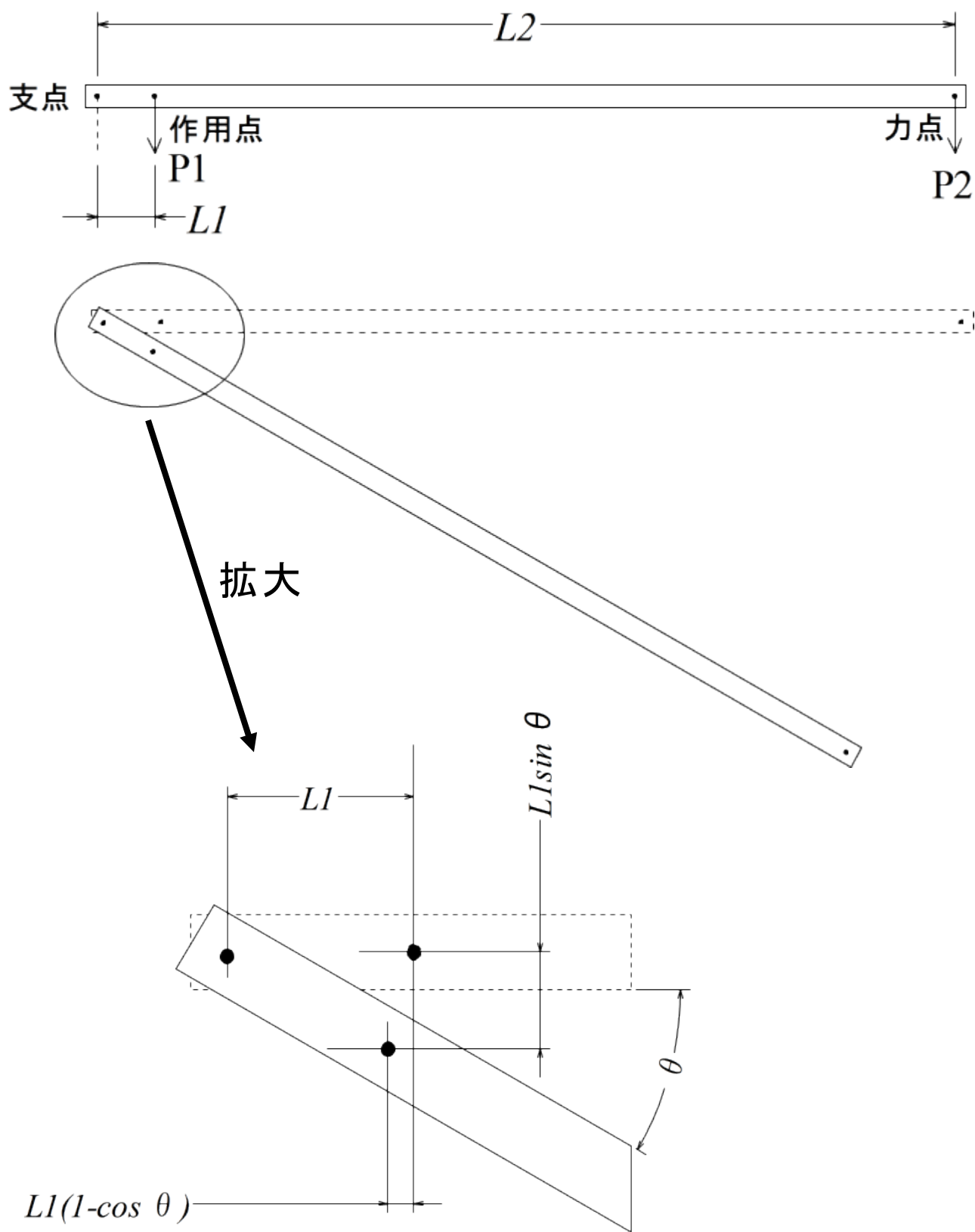


図 2.1-1 てこ式加力方式の模式図

文献

- 1) 枠組壁工法建築物設計の手引・構造計算指針編集委員会編：“2007 年枠組壁工法建築物構造計算指針”，(社)日本ツーバイフォー建築協会(2007)
- 2) “建築物の基礎，主要構造部等に使用する建築材料並びにこれらの建築材料が適合すべき日本工業規格又は日本農林規格及び品質に関する技術的基準を定める件”，建設省，平成 12 年 5 月 31 日建設省告示第 1446 号 (2000) (最終改正：平成 15 年 4 月 28 日国土交通省告示第 461 号)

2.3 温湿度管理システムの構築と、試験室の温湿度管理能力の把握

CLT の長期荷重試験において、試験体含水率の変動は大きな影響因子となる。木材の粘弾性的性質は試験中に含水率が経時的に変化する非平衡状態では、平衡状態とその性質が大きく異なることが知られている。しかしながら、CLT のように過去に検証を受けていない材料では、含水率変動が力学的性能に与える影響に関しては今後の検討を待たねばならない。CLT の長期変形挙動を検討する上では、その第一歩として平衡状態に出来るだけ近い条件での試験を行う必要がある。そのため、長期試験時の試験体周囲の温湿度は一定かつ試験体位置や同時に測定する試験体間等のばらつきを極力小さくすることが望ましい。そこで、森林総合研究所に設置された長期荷重試験装置の温湿度が適切に管理されているかを検討するために温湿度の管理システムの構築を行い、それを用いて温度湿度の経時的な安定性検証と試験体間の比較を行った。

2.3.1 温湿度管理システムの概要

管理システムの概要を図 2.3-1 に示す。温湿度センサとして TR-72wf-H（ティアンドデイ社製：温度精度 $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ 、湿度精度 $\pm 2.5\%\text{RH}$ ）を用いた。また、同センサは出荷時に校正を受けたものを使用した（校正温湿度 $20^{\circ}\text{C} 65\%\text{RH}$ ）。同センサは長期荷重試験室の無線 LAN ネットワークに接続され、クラウドサーバにデータが送られる。データはユーザー名とパスワードで保護される。また、センサの状態も遠隔監視可能であるため、異常時の発見を迅速に行う事が可能である。今後は異常変動時等のメールによるアラート通知も検討中である。



図 2.3-1 管理システムの概要

（ティアンドデイ社 Web ページから引用したものに加工）

図 2.3-2 にセンサの設置位置を示す。センサは各試験体につき 4 ヶ設置した。センサはマグネットスタンドを用いて試験装置に固定され、試験体交換時に容易に取り外せるようにしている。センサの位置は JIS A 1470-1（建築材料の吸放湿性試験方法—第一部：湿度応答法）を参考に、試験体近傍 5cm の位置に設置した。センサの取付状況を図 2.3-3 に示す。サンプリング間隔は 5 分、データ送信は 30 分とした。

2.3.2 試験室の温湿度管理能力の検討

1) 初期起動からの温度湿度変化と扉開閉時の温湿度復帰性能

平成 27 年 2 月 26 日 17 時から 3 月 6 日 17 時までの 8 日間の温湿度変化のグラフを図 2.3-4 から図 2.3-13 に示す。記録開始とほぼ同時に試験室の温湿度コントロールを開始した。本運転の前には、試験室は試運転等の短期間の運転を除き停止状態に有り、長時間の温湿度コントロール運転は初めてとなる。運転直後に最大 79%RH の加湿オーバーシュートが観測された。運転開始後 1 週間後の 3 月 4 日及び 3 月 5 日に見学のために扉の開放が行われ温湿度の変動があったが、温度湿度とも 5 時間ほどで目標温湿度に復帰した。

2) 温湿度の安定性の検討

温湿度環境の安定性を検討するための一つの指標として前述の JIS A 1470-1 の温湿度変動範囲を引用する。同規格では温度は目標温度 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ (温度差 1°C)、湿度は目標湿度 $\pm 2\%\text{RH}$ (湿度差 $4\%\text{RH}$) と示されている。表 2.3-1 に 3 月 4 日 16 時から 3 月 5 日 16 時までの 24 時間の各測定点の温湿度平均値と最大値と最小値を示す。各点とも最大値、最小値はほぼ上記範囲内に収まっていることから、経時的安定性は高いと考えられる。また、測定点間の最大温湿度差の経時変化を図 2.3-14 に示す。温湿度差は上記の範囲内にあり、測定点間の差は小さい。これらのことから試験室の温湿度安定性は高く、荷重試験の測定が十分安定的におこなわれると予測される。

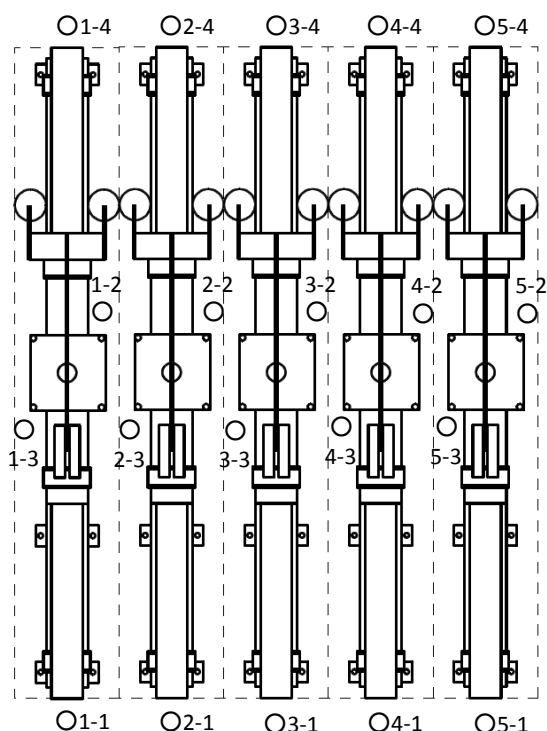


図 2.3-2 温湿度センサの設置位置



図 2.3-3 温湿度センサの設置状況

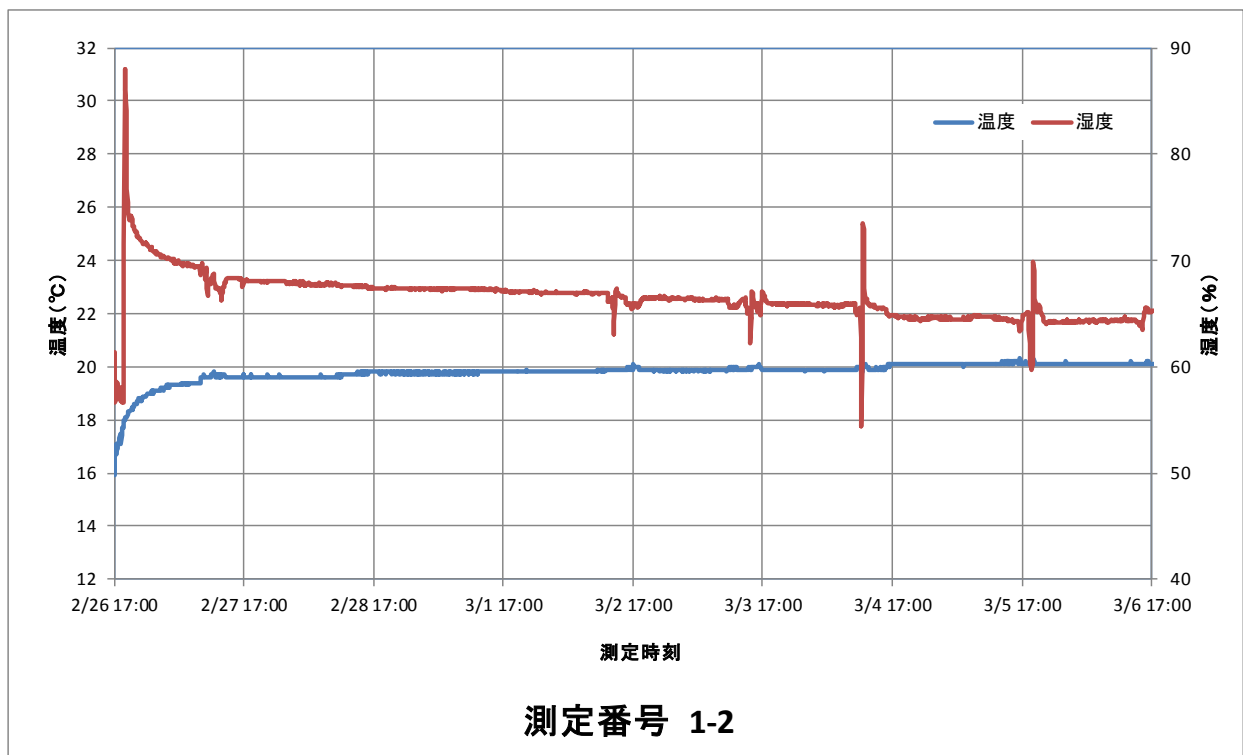
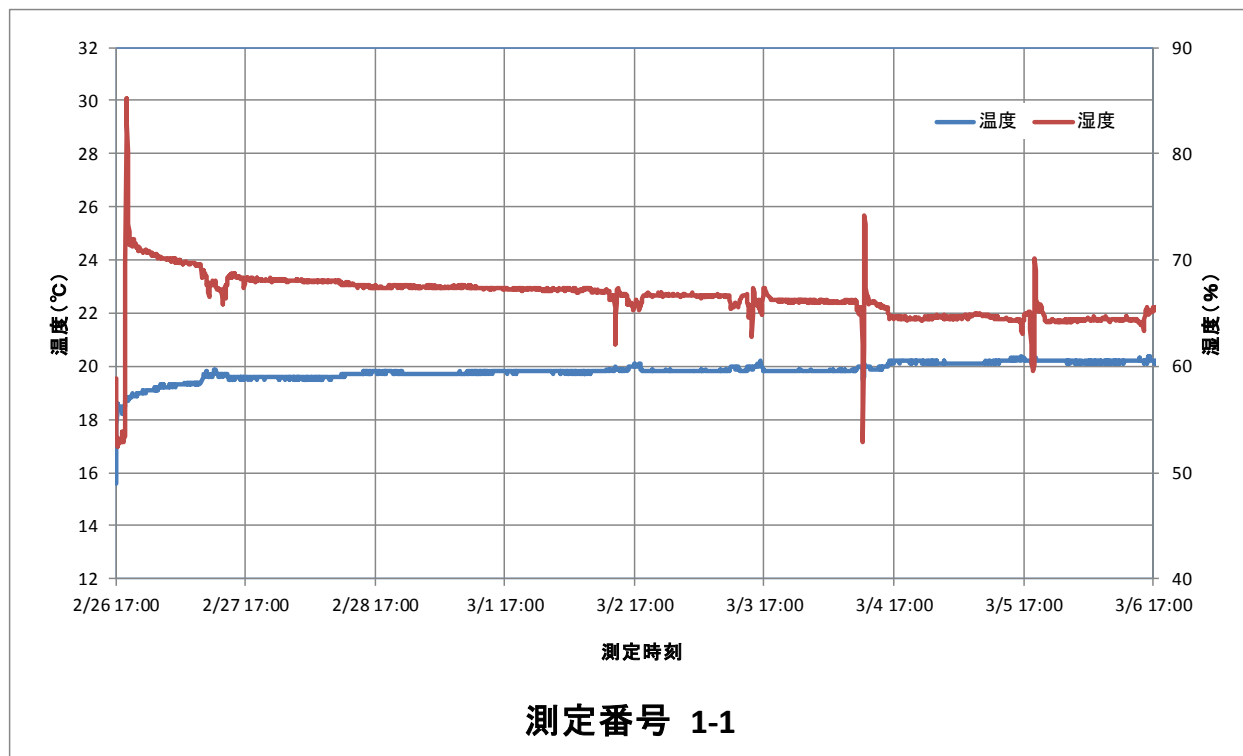


図 2.3-4 各測定点の温湿度の経時変化

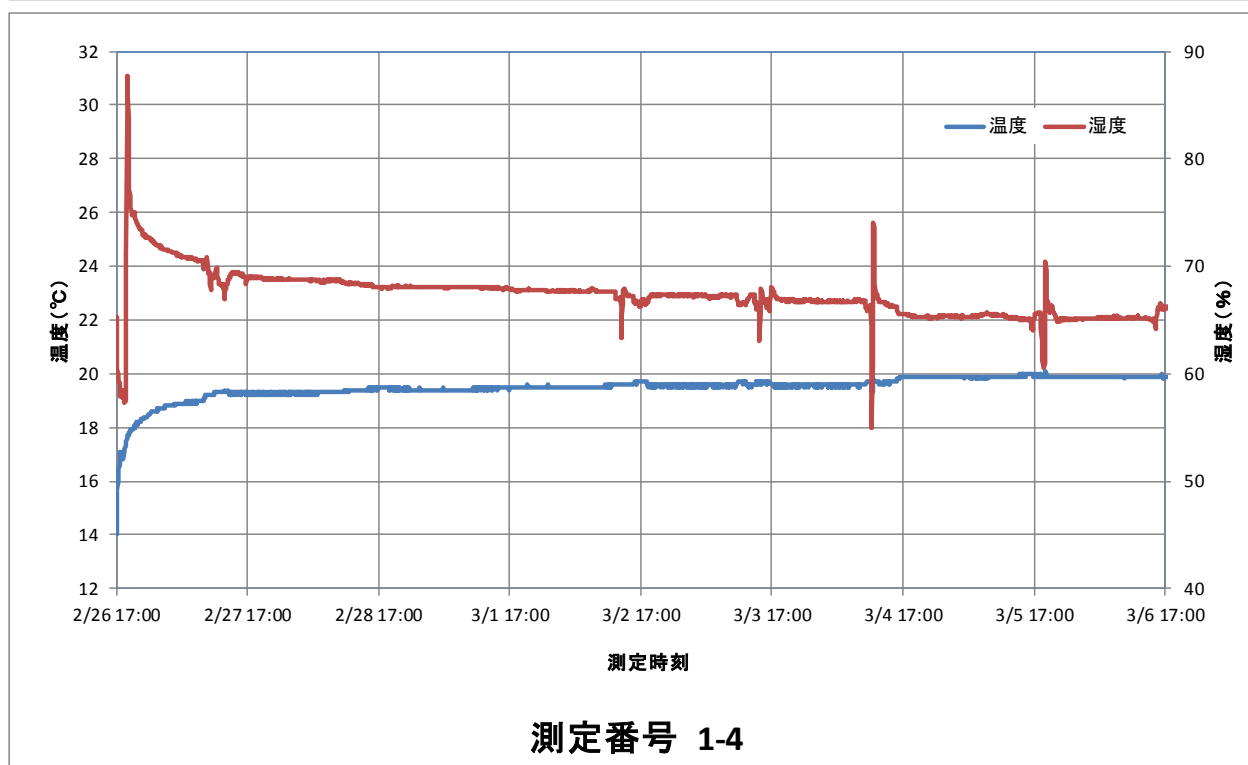
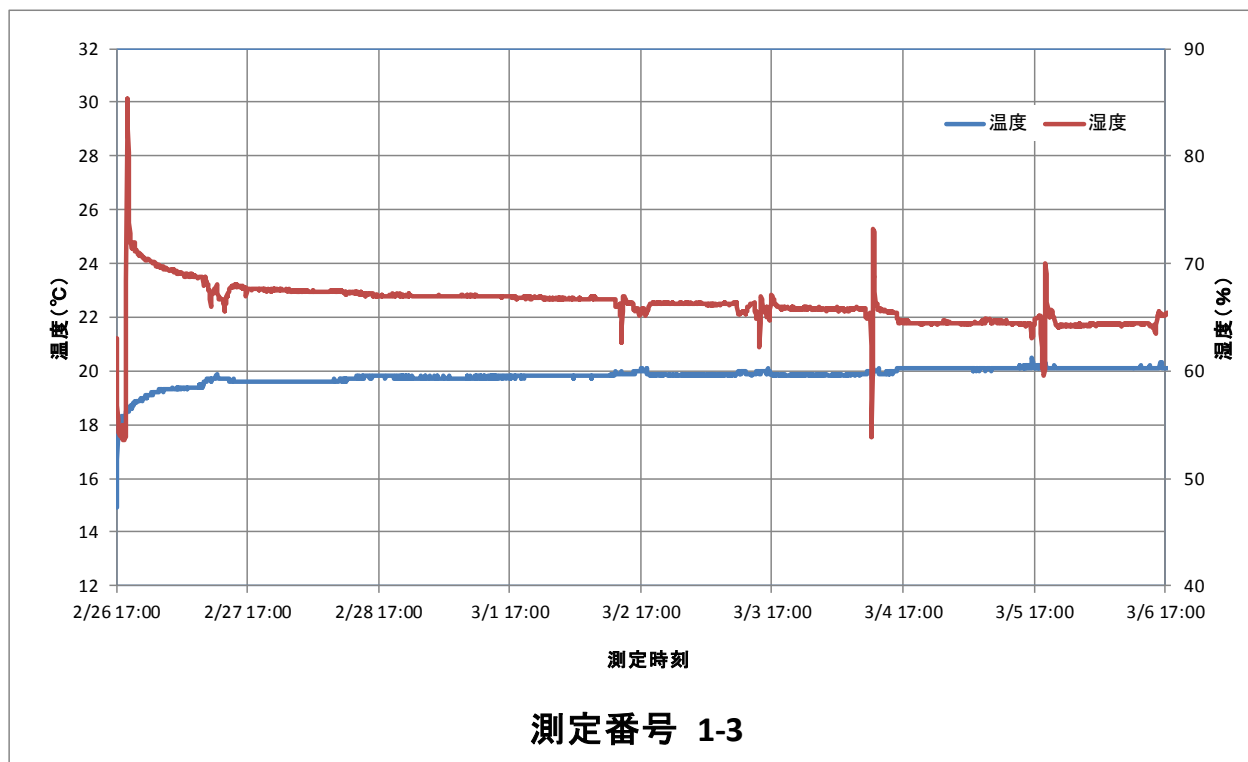


図 2.3-5 各測定点の温湿度の経時変化

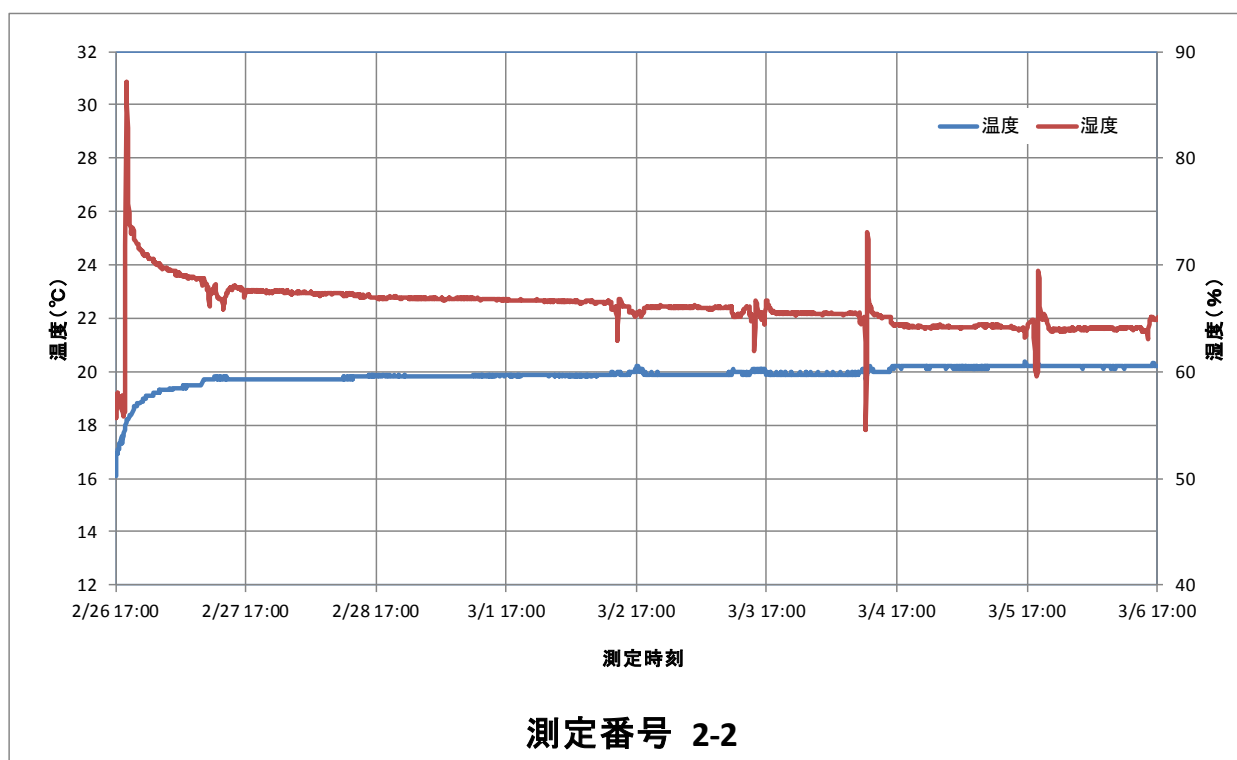
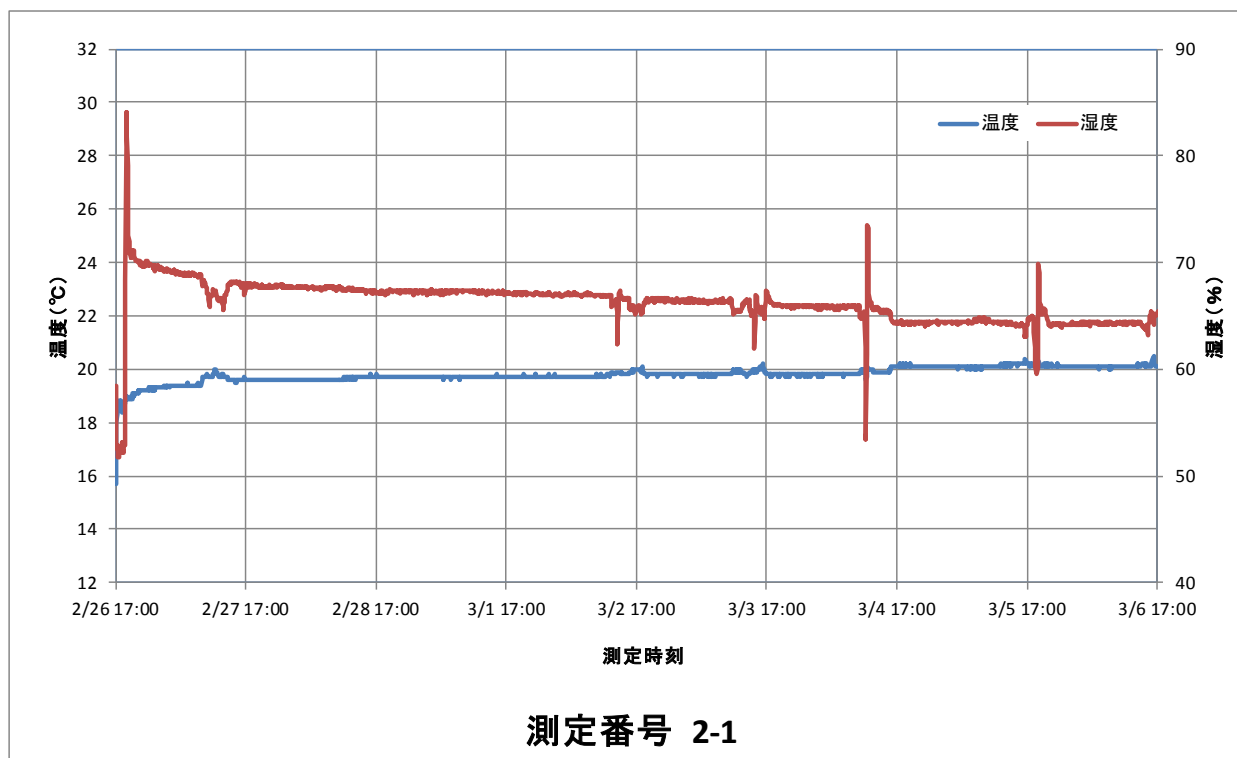


図 2.3-6 各測定点の温湿度の経時変化

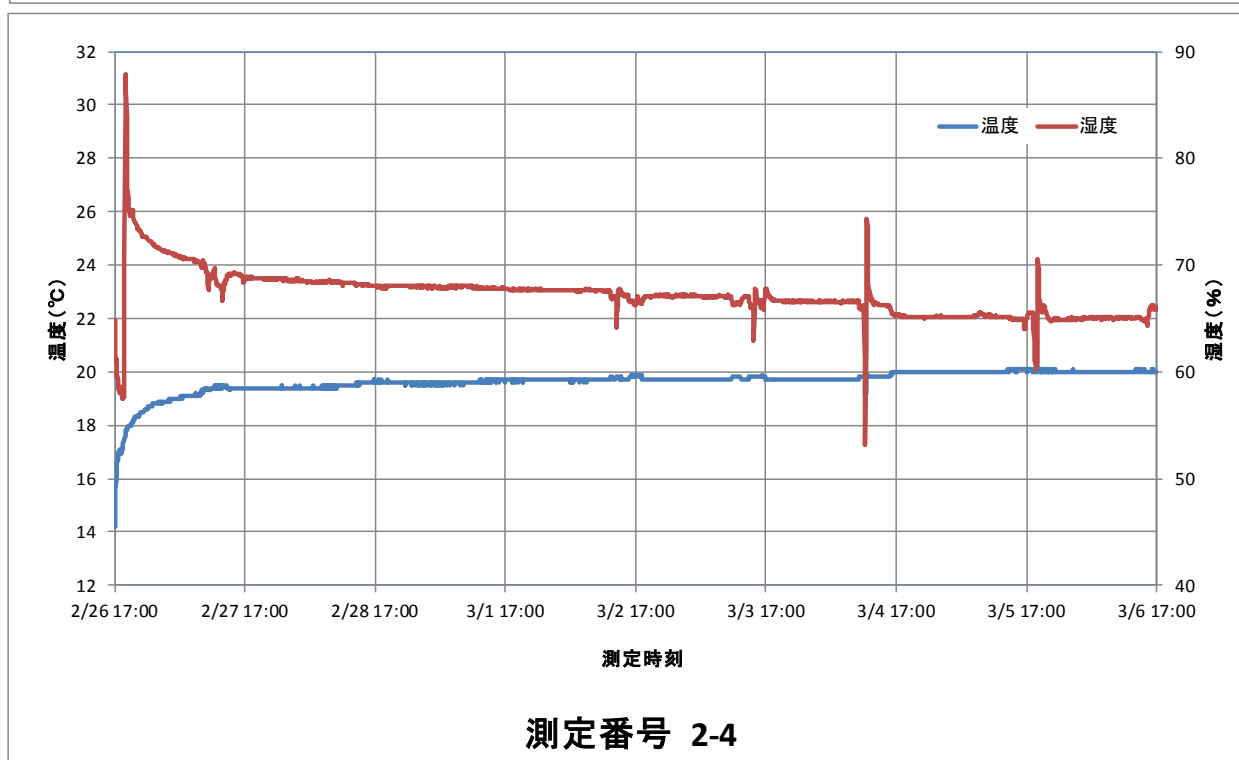
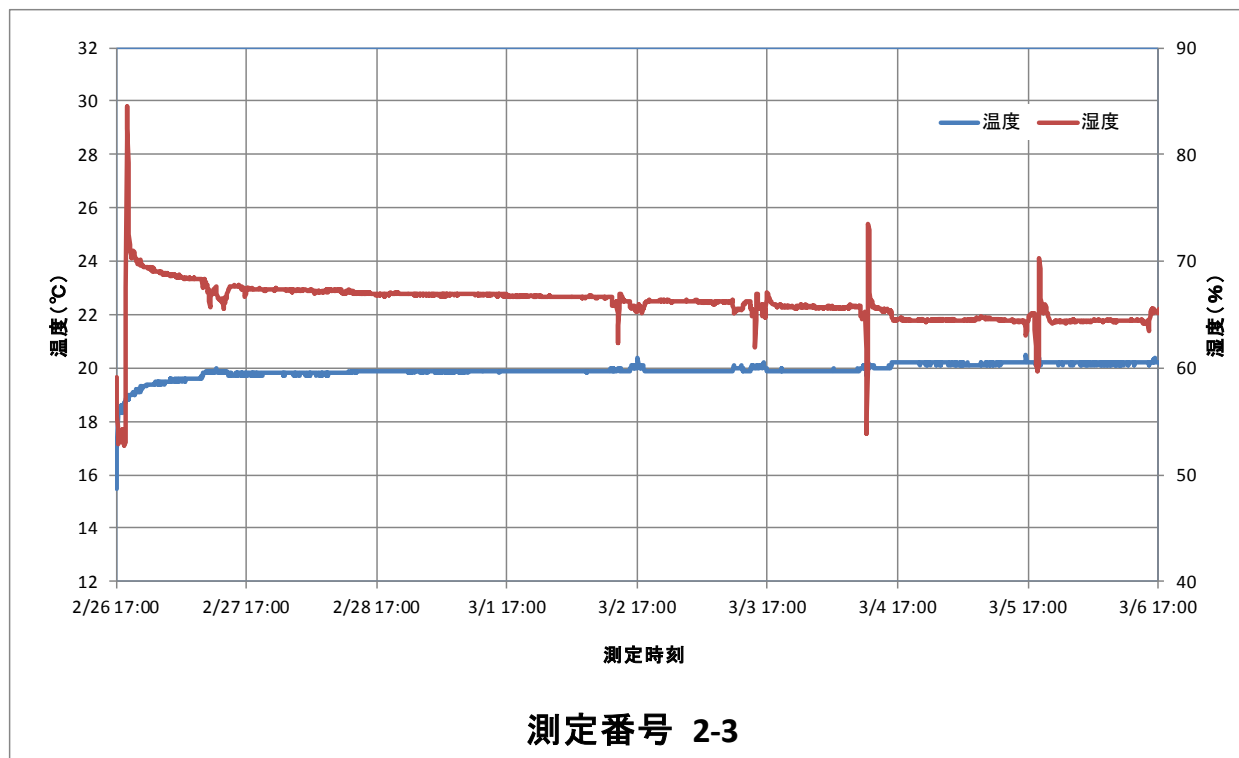


図 2.3-7 各測定点の温湿度の経時変化

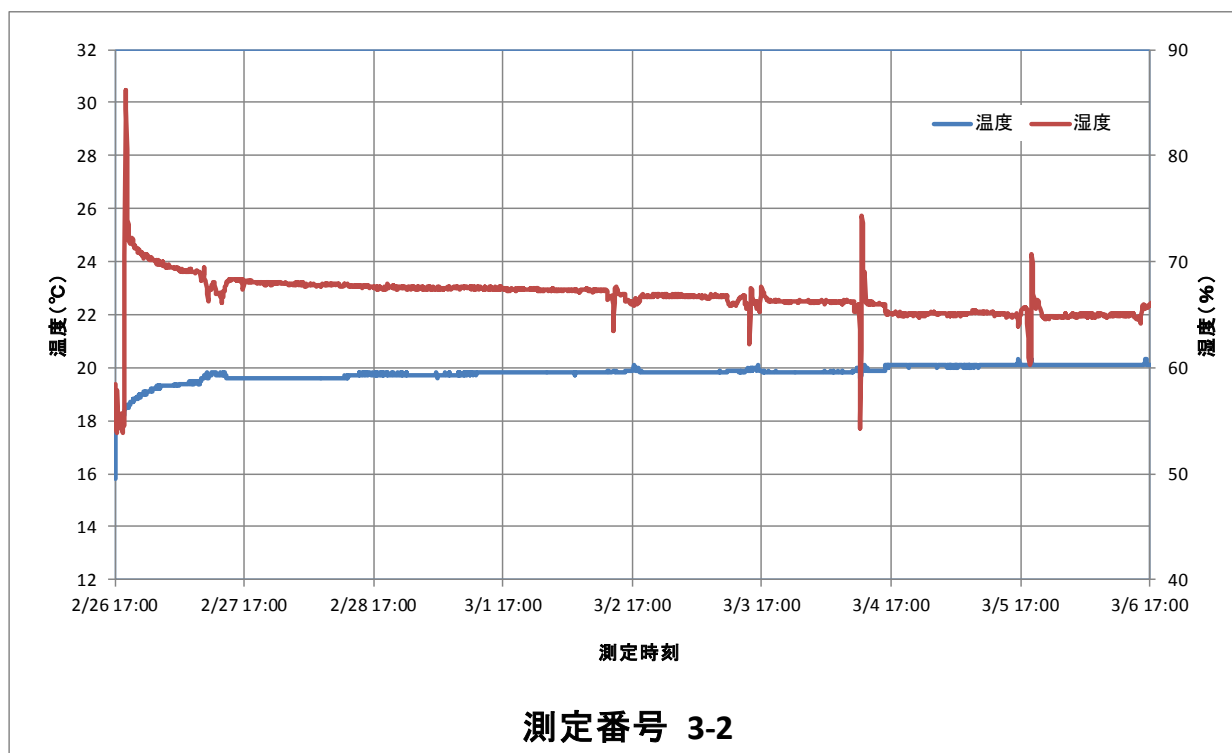
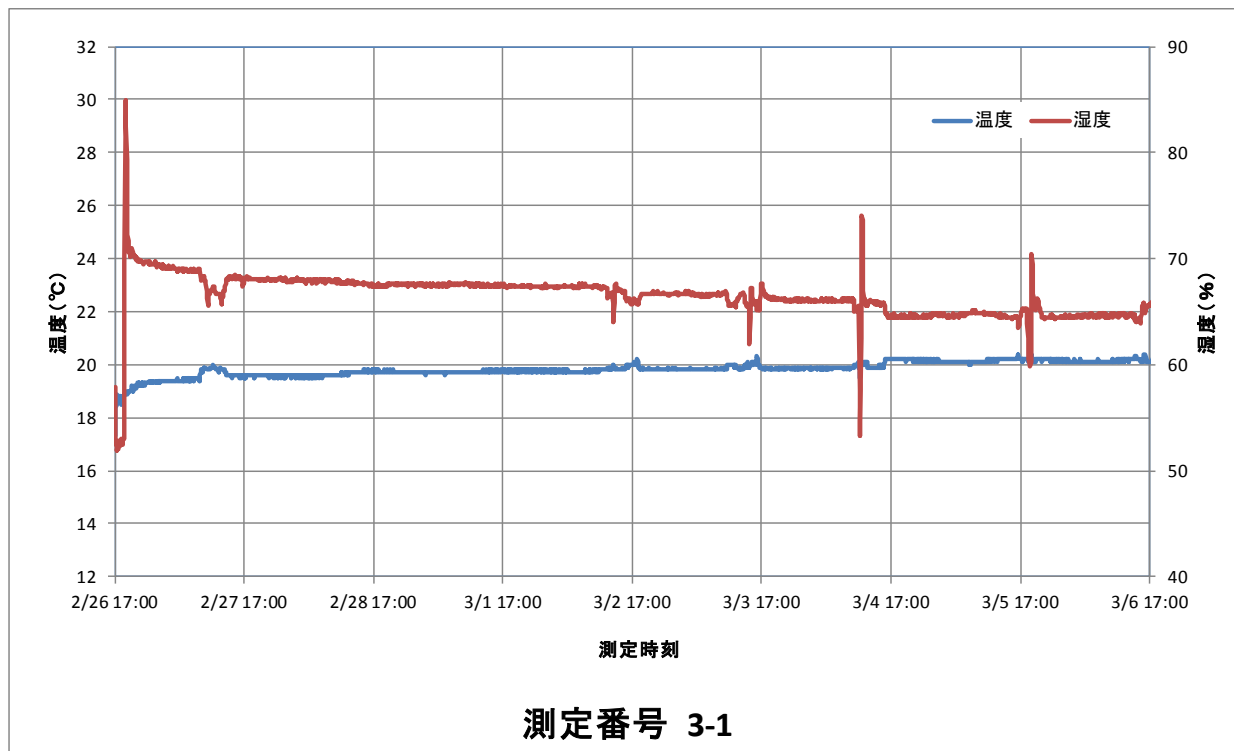


図 2.3-8 各測定点の温湿度の経時変化

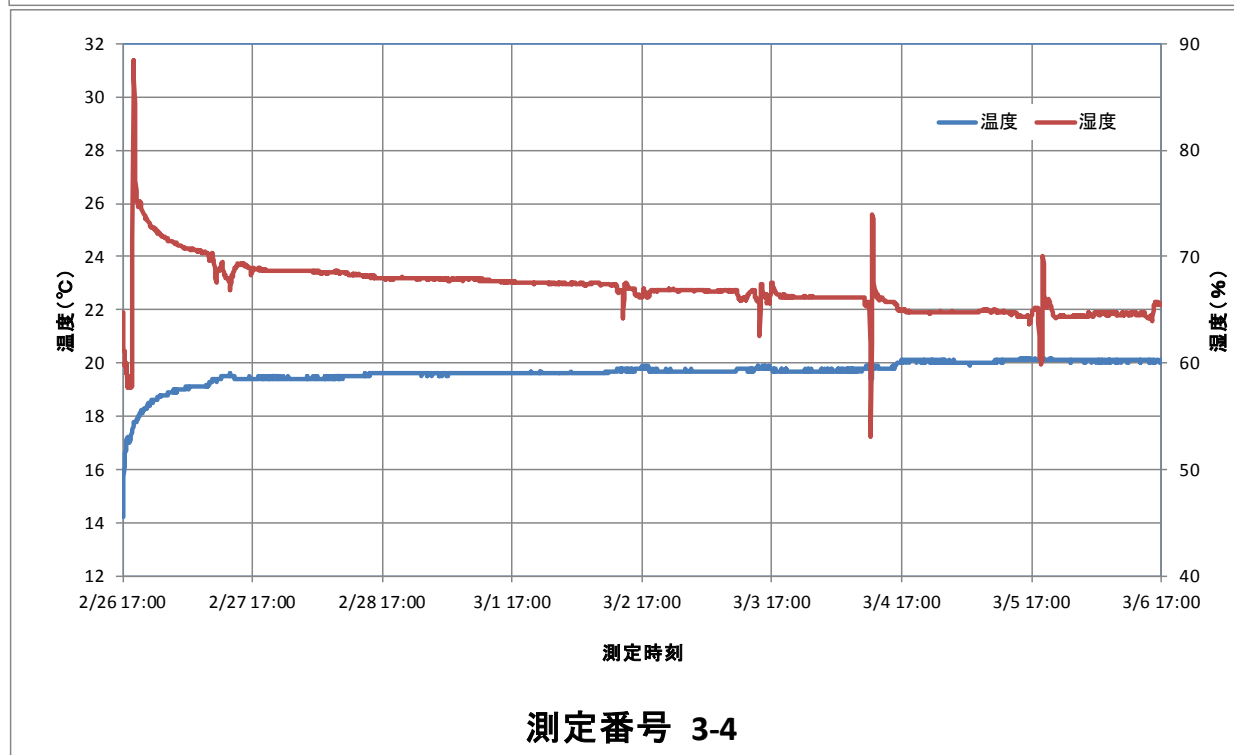
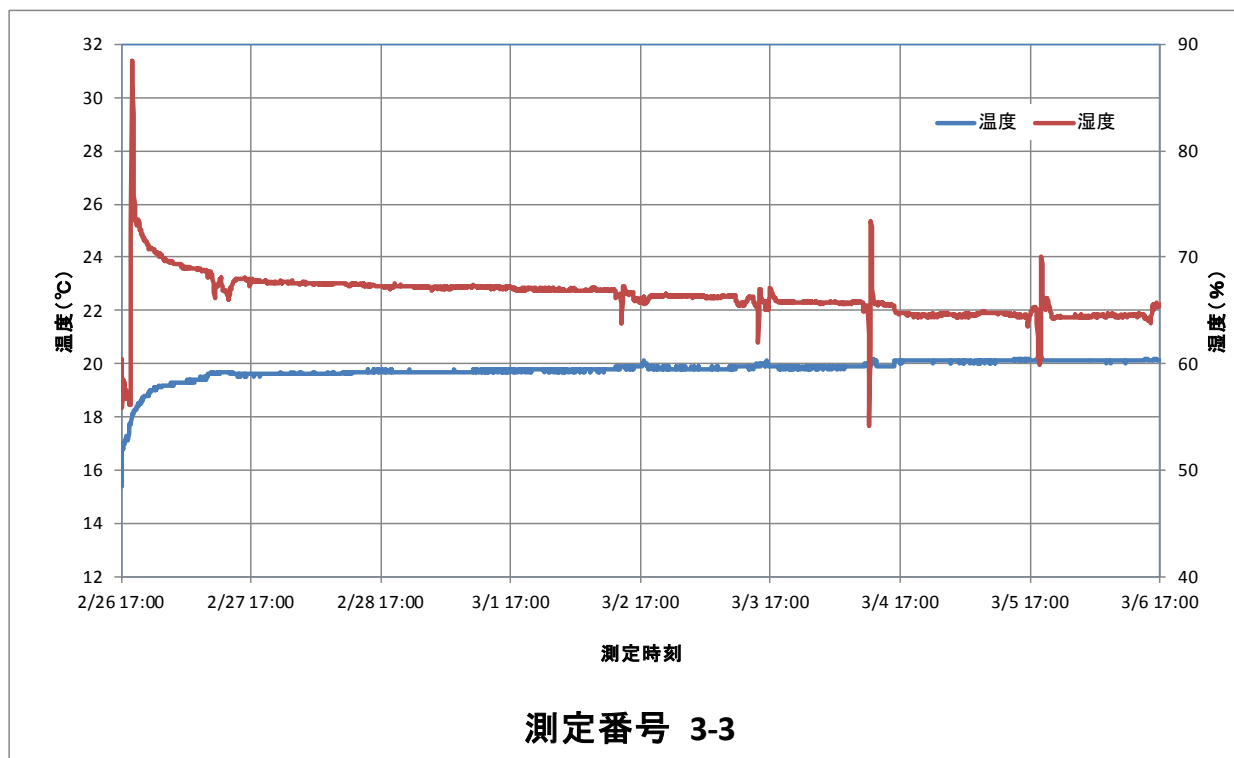


図 2.3-9 各測定点の温湿度の経時変化

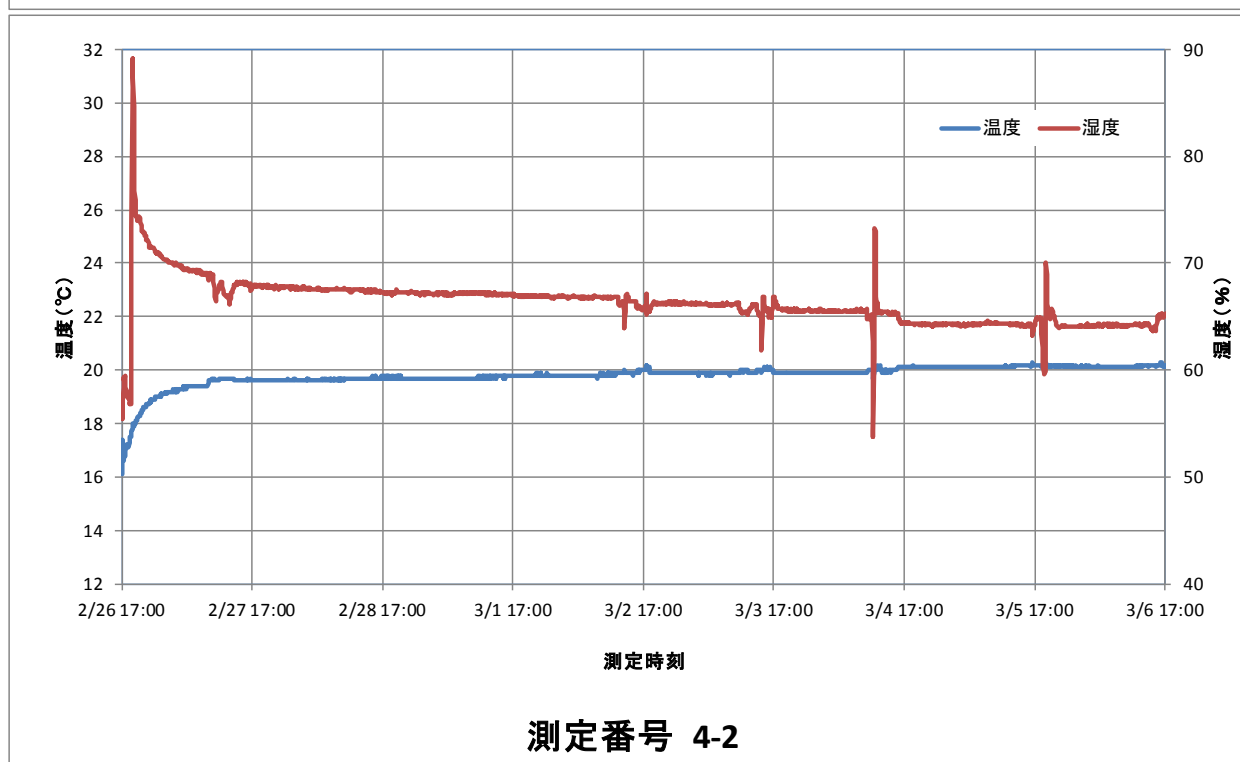
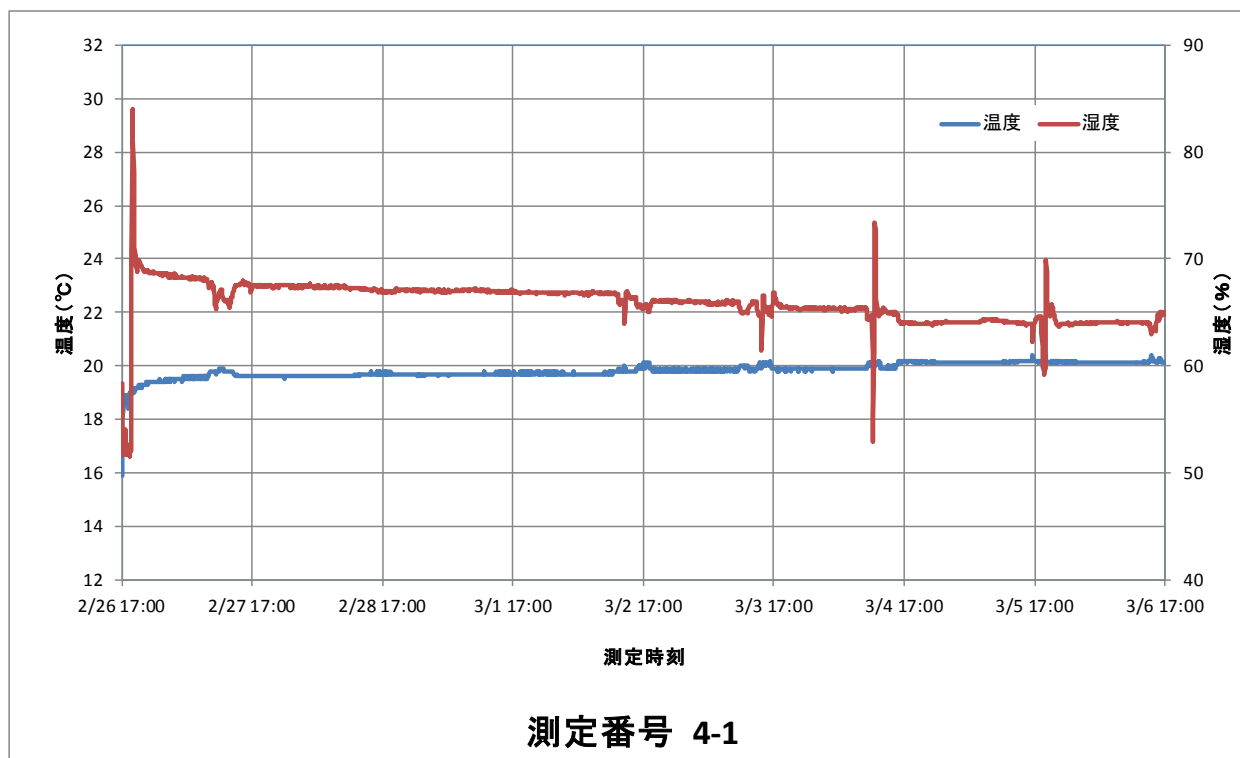


図 2.3-10 各測定点の温湿度の経時変化

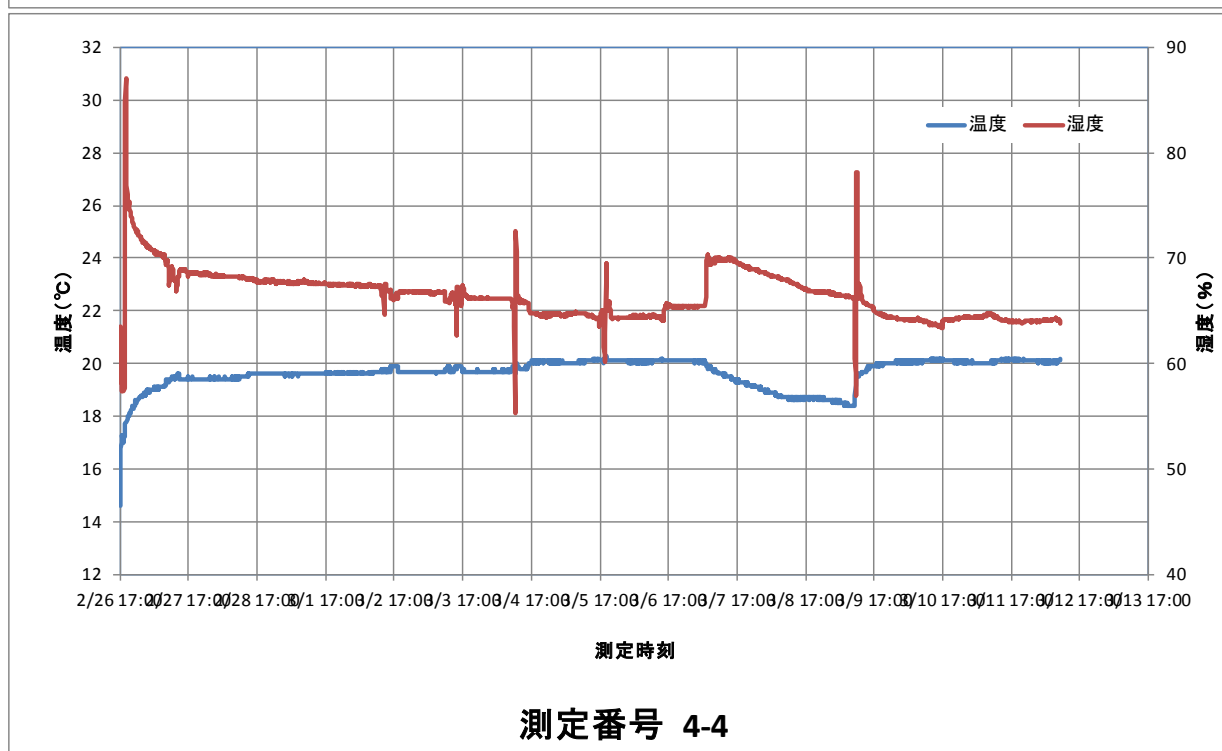
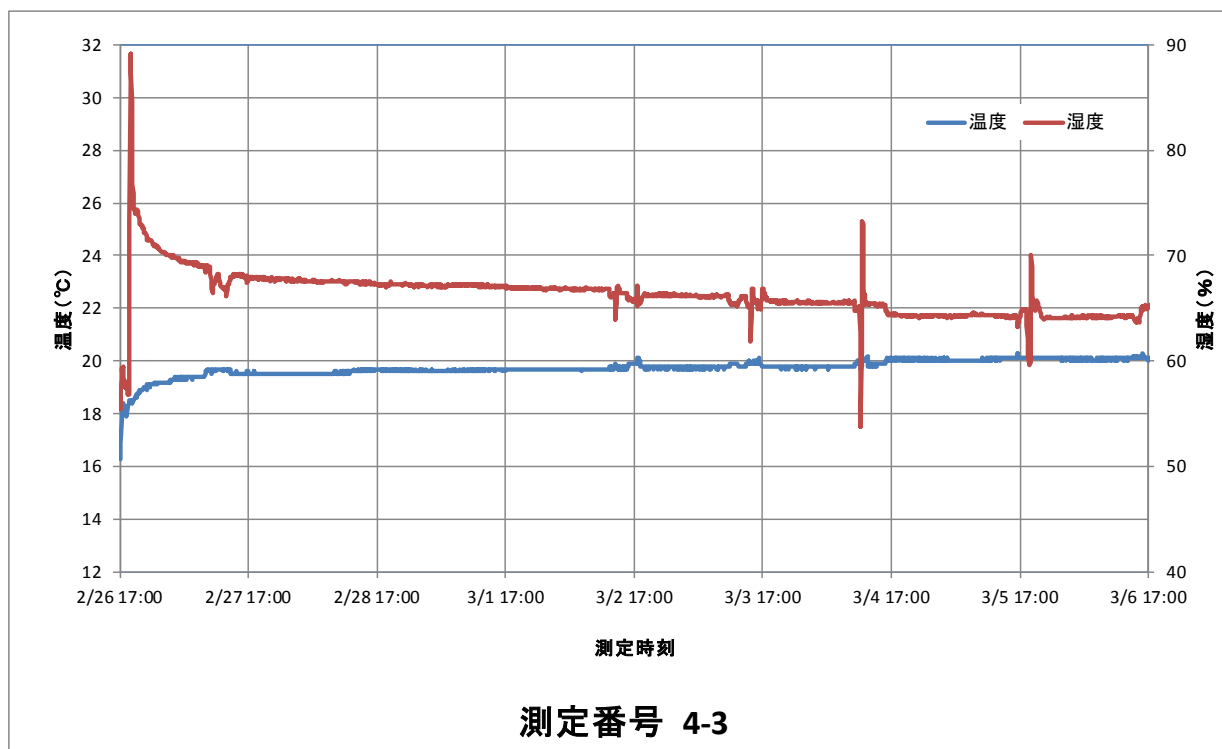


図 2.3-11 各測定点の温湿度の経時変化

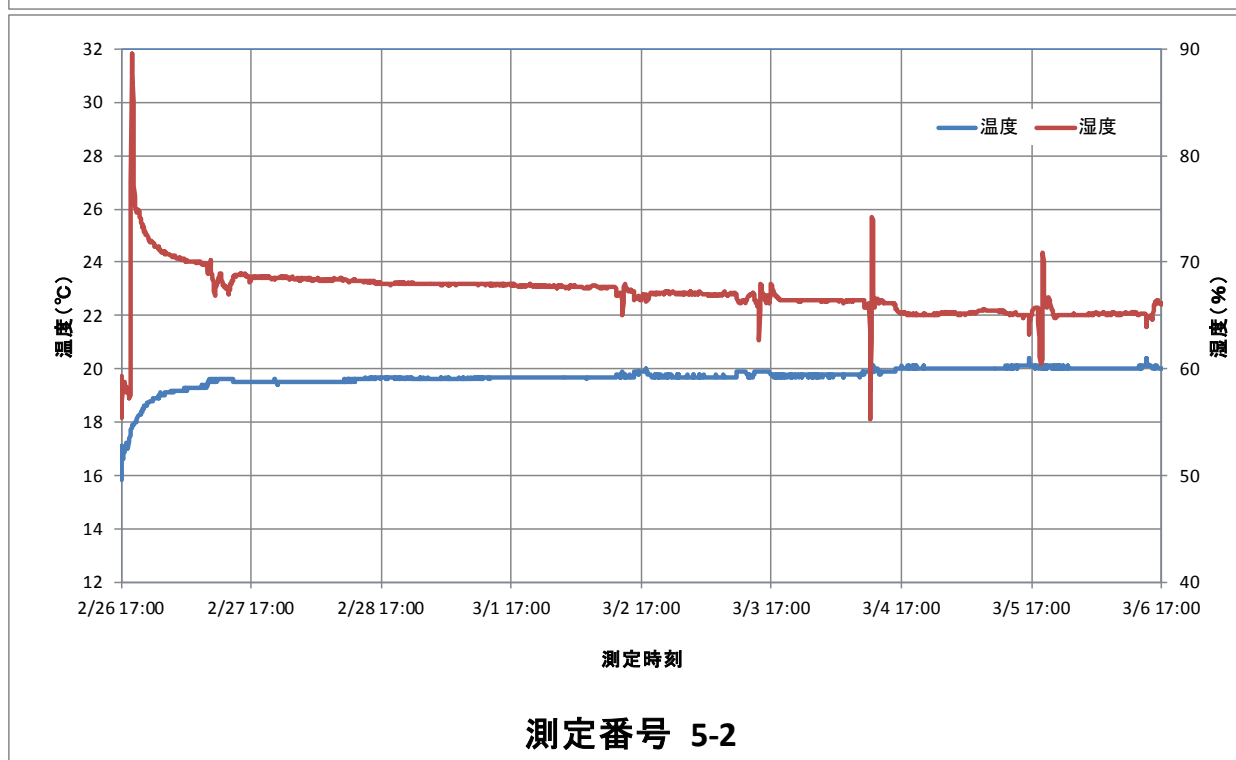
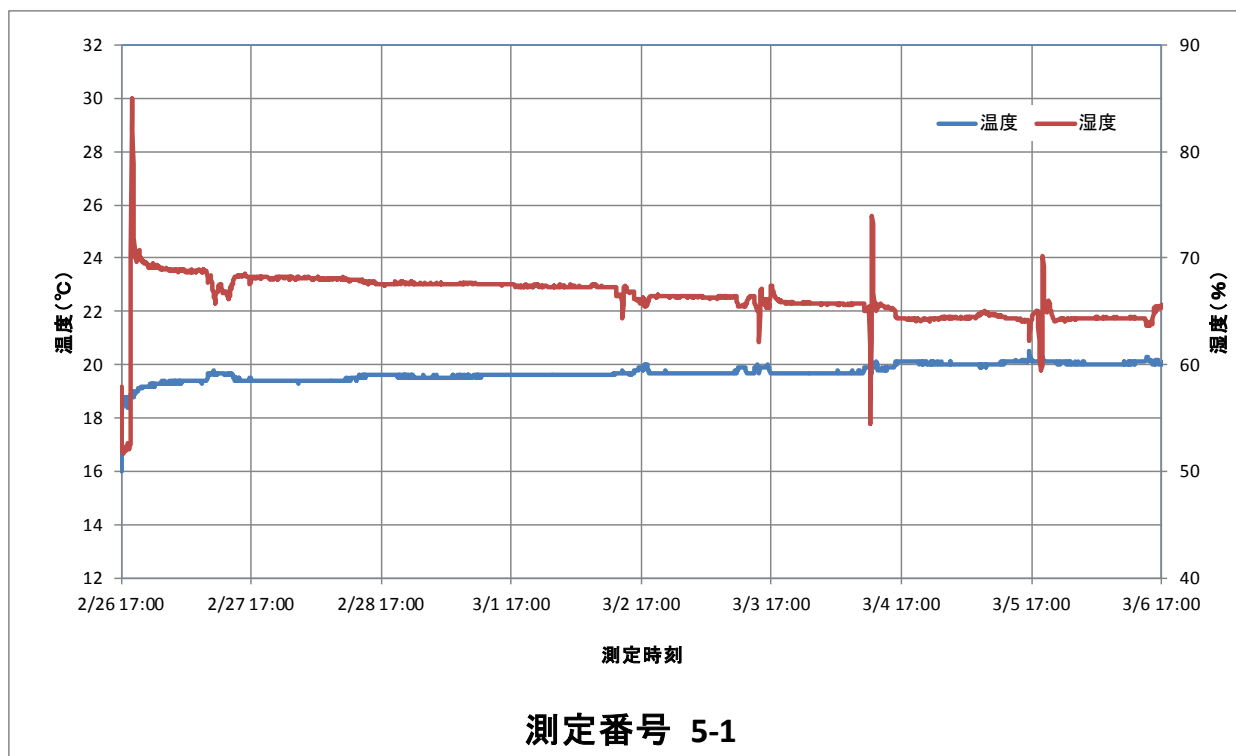


図 2.3-12 各測定点の温湿度の経時変化

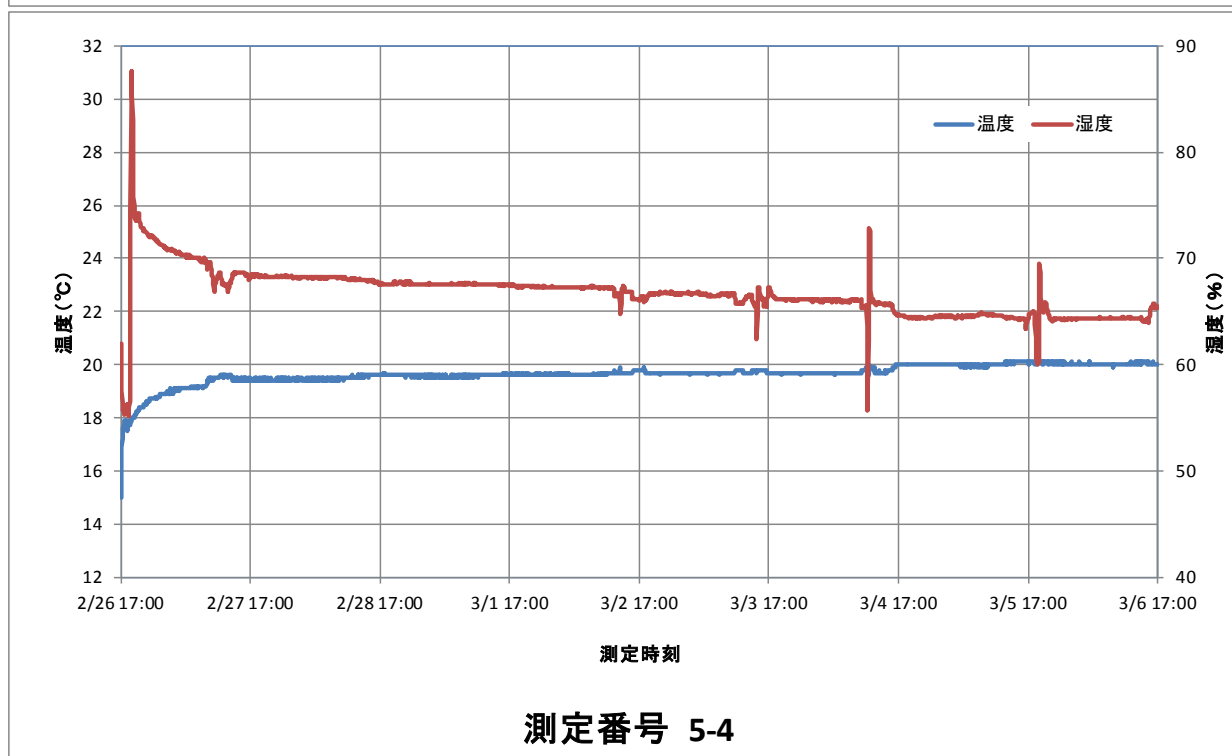
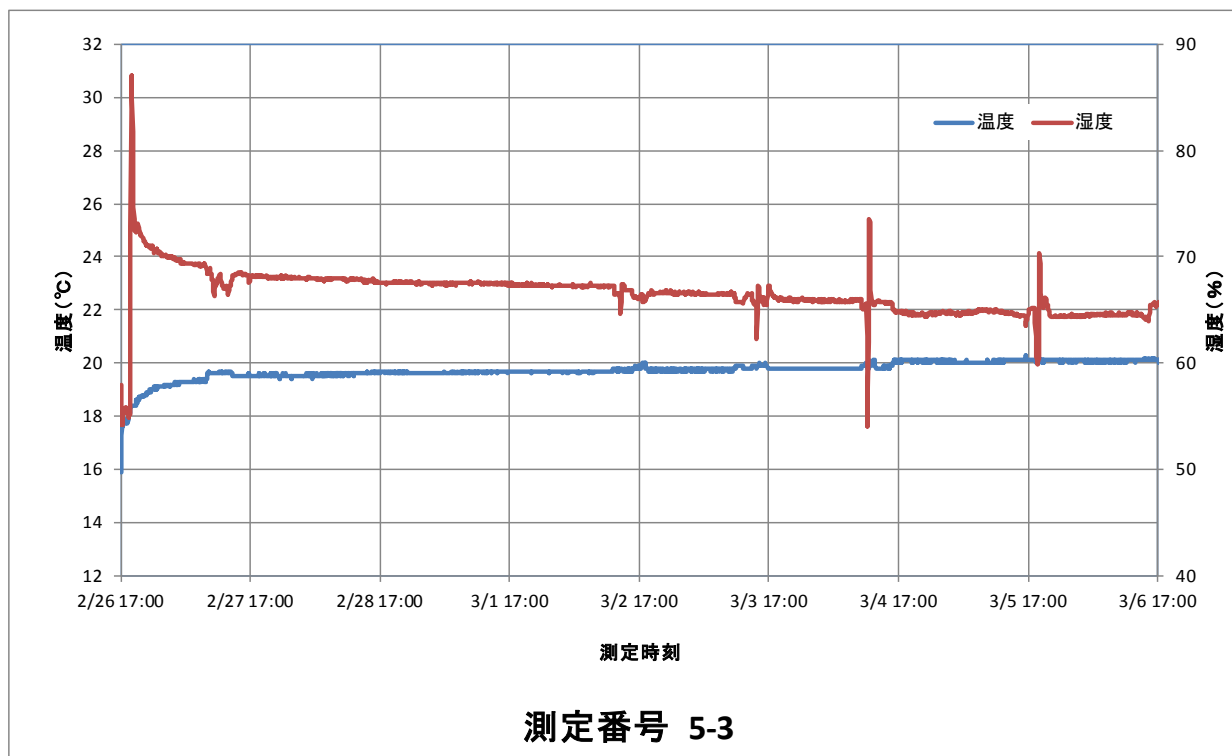


図 2.3-13 各測定点の温湿度の経時変化

表 2.3-1 測定点間の温湿度変動

	1-1		1-2		1-3		1-4		2-1		2-2		2-3		2-4	
	温度	湿度	温度	湿度	温度	湿度	温度	湿度	温度	湿度	温度	湿度	温度	湿度	温度	湿度
平均値	20.0	64.6	20.1	64.3	20.1	64.9	20.0	65.6	20.1	64.5	20.2	64.2	20.2	64.5	20.0	65.2
最大値	20.2	65.0	20.2	64.7	20.2	65.3	20.1	66.1	20.2	65.0	20.2	64.6	20.2	64.8	20.1	65.8
最小値	20.0	64.3	20.0	63.9	20.0	64.6	19.9	65.3	20.0	64.1	20.1	63.9	20.1	64.3	19.9	64.8
温湿度差	0.2	0.7	0.2	0.8	0.2	0.7	0.2	0.8	0.2	0.9	0.1	0.7	0.1	0.5	0.2	1.0

	3-1		3-2		3-3		3-4		4-1		4-2		4-3		4-4	
	温度	湿度	温度	湿度	温度	湿度	温度	湿度	温度	湿度	温度	湿度	温度	湿度	温度	湿度
平均値	20.1	64.7	20.1	65.1	20.1	64.6	20.0	64.8	20.1	64.0	20.1	64.3	20.0	64.3	20.1	64.6
最大値	20.2	65.1	20.1	65.4	20.2	65.0	20.2	65.4	20.2	64.4	20.2	64.8	20.1	64.6	20.2	65.3
最小値	20.0	64.3	20.0	64.7	20.0	64.3	19.9	64.3	20.1	63.8	20.1	64.0	20.0	64.0	20.0	64.2
温湿度差	0.2	0.8	0.1	0.7	0.2	0.7	0.3	1.1	0.1	0.6	0.1	0.8	0.1	0.6	0.2	1.1

	5-1		5-2		5-3		5-4	
	温度	湿度	温度	湿度	温度	湿度	温度	湿度
平均値	20.0	64.4	20.0	65.2	20.0	64.7	20.0	64.5
最大値	20.2	65.0	20.1	65.6	20.1	65.1	20.1	65.2
最小値	19.9	64.0	20.0	64.8	20.0	64.4	19.9	64.2
温湿度差	0.3	1.0	0.1	0.8	0.1	0.7	0.2	1.0

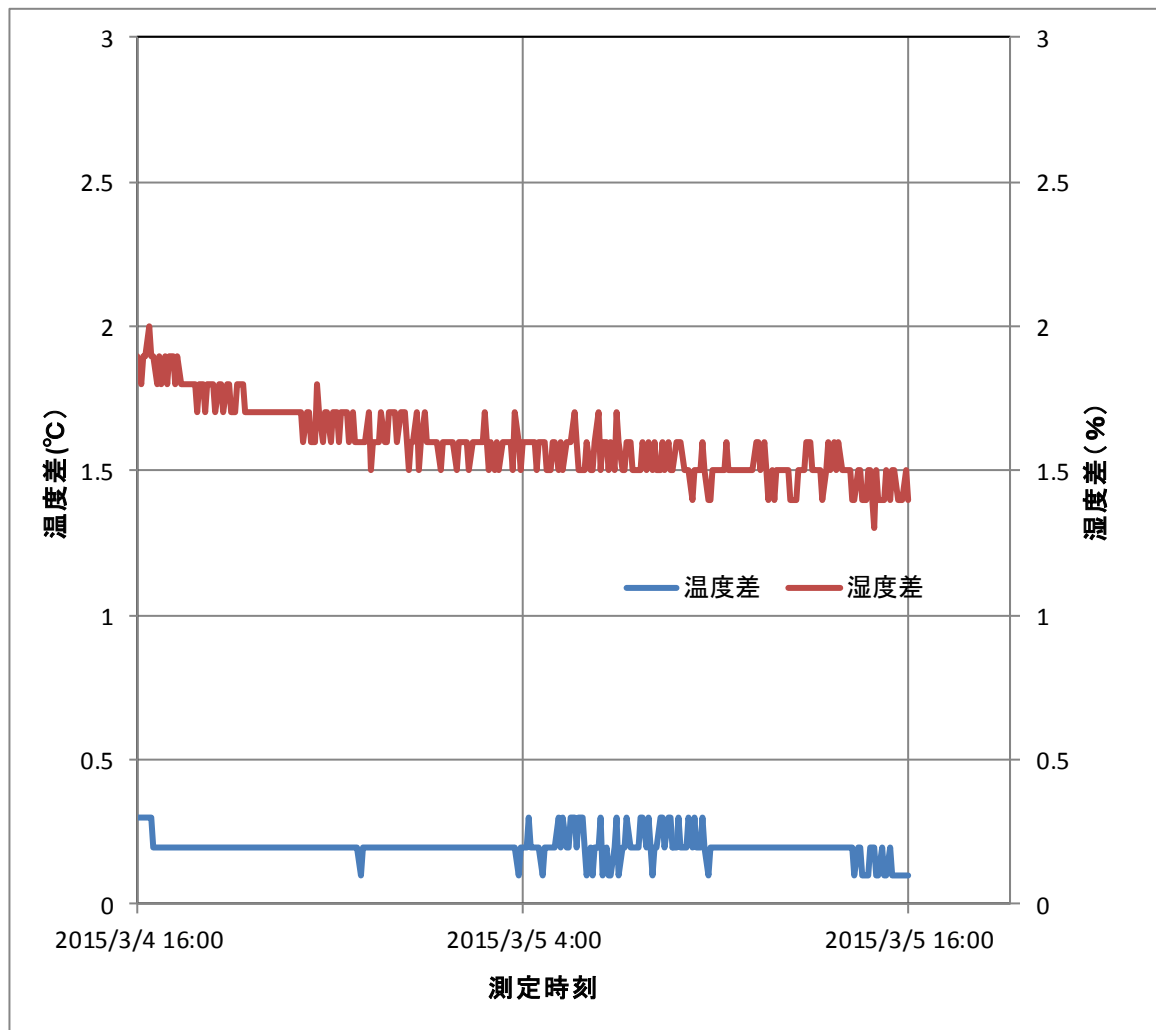


図 2.3-14 測定点間の最大温度差の経時変化

2.3.3 まとめ

本検討から長期荷重試験装置が設置された試験室は極めて良好な温湿度環境を発現せしめており，扉の開放時も閉鎖後速やかに目標温湿度に復帰した。今後は外気温湿度変化等の影響を長期にわたって検証する必要がある。

3. 決定した測定方法における CLT の長期挙動データの収集と収集した CLT の長期挙動データの解析

3.1 長期挙動データ導出のための荷重水準の決定

CLT は、ひき板又は小角材をその繊維方向を互いにほぼ平行にして幅方向に並べ又は接着したものを、主としてその繊維方向を互いにほぼ直角にして積層接着し 3 層以上の構造を持たせた一般材¹⁾であり、製材や集成材と構造が異なっている。このことにより CLT の長期載荷荷重に対する性能が製材や集成材と異なる可能性がある。このため、面外曲げの長期的かつ継続的に作用する荷重に対する CLT の力学的な性状に関する知見を得ることを目的として、クリープ破壊試験 (Duration of Load(DOL) 試験) を実施した。

CLT は、未だ長期載荷荷重に対する性能が明らかではなく、クリープ破壊試験による試験条件は、試験体の厚さ、支点間や荷重点間距離により結果が変わる可能性もある。このため次の 3 項目に分けて試験を行った。

(1) 広島総研

加力方法 : 4 点加力
支点間距離 : 2700mm (厚さの 18 倍),
荷重点間距離 : 900mm (厚さの 6 倍) 及び 600mm (厚さの 4 倍) の 2 条件
載荷荷重 : 短期面外曲げ試験により得られた強軸試験体最大荷重の平均値の 85%

(2) 森林総合研究所, 建築研究所

加力方法 : 3 等分点 4 点加力
支点間距離 : 3150mm (厚さの 21 倍)
荷重点間距離 : 1050mm (厚さの 7 倍)
載荷荷重 : 短期曲げ試験により得られた強軸試験体の最大荷重の平均値の 80%, 70%等

(1)の広島総研短期面外曲げ試験方法

短期面外曲げ試験に供した CLT は、ラミナの組合せを JAS に準じて異等級構成強度等級 Mx60 とした。いずれも内層に用いるラミナは M30 以上のスギとし、外層に用いるラミナは M60 のスギである。ラミナの断面寸法は厚さ 30×幅 110mm で、CLT の断面構成は 5 層 5ply (厚さ 150mm) とした。なお、フィンガー (以下 FJ) 長は 15mm, 傾斜 1/12, 接着剤は水性高分子イソシアネート系樹脂であった。ラミナの幅はぎ接着はしなかった。試験体 (幅 300mm, 長さは厚さの 23 倍) は、外層ラミナの繊維方向が試験体と平行な強軸試験体を 16 体用意した。

1) 動的試験

面外曲げクリープ破壊試験を行う前に、せん断弾性係数の簡便な非破壊評価方法として、動的弾性係数の測定を試みた。測定は、たわみ振動法 (T.G.H.法)²⁾により行った。

たわみ振動法 (T.G.H.法)では、スパンを試験体の長さの 0.552 倍の距離として台の上に置き、試験体中央部材面を上からハンマーで打撃し、下面方向からマイクロフォンで高次の固有振動数を測定した。

また、縦振動法による縦振動ヤング係数も測定した。

たわみ振動法 (T.G.H.法)では、試験体長さ、断面 2 次半径、密度を求め、せん断分布定

数(1.2), せん断弾性係数の初期値(0.8GPa)を設定する。次に, 振動次数 n に依存する係数 m_n と F_{mn} , 1 から 6 次程度までの曲げ固有振動数, 各 n における見かけの曲げヤング係数を求める。さらに各 n におけるプロット用の系列 X, Y を求め, その 1 次回帰式 $Y=aX+c$ とプロットが一致するとき, 傾き a と切片 c が次の関係となる。

$$a = -1.2 \left(\frac{E_{fr-t}}{G_{fr-t}} \right), \quad c = E_{fr-t} \quad (2.3-1)$$

E_{fr-t} : 真の曲げヤング係数

G_{fr-t} : せん断弾性係数

縦振動法では次の式により縦振動ヤング係数を計算した。

$$E_{fr} = (2fl)^2 \rho \quad (2.3-2)$$

E_{fr} : 縦振動ヤング係数

f : 固有振動数

l : 材長

ρ : 密度

2) 短期静的面外曲げ試験

長期載荷試験の荷重レベルを決定するためには, 短期の静的面外曲げ試験平均値を求める必要がある。この値は短期面外曲げ試験により求めた。表 3.1-1 に非破壊試験と短期面外曲げ試験結果を示す。

表 3.1-1 非破壊及び短期面外曲げ試験結果

強軸 $n = 16$	密度 kg/m^3	E_{fr} kN/mm^2	E_{afb} kN/mm^2	E_{fr-t} kN/mm^2	G_{fr-t} kN/mm^2	E_{fr-t}/G_{fr-t}	E_m kN/mm^2	E_{afb}/E_m	E_b kN/mm^2	E_{fr-t}/E_b	f_b	P_{max} kN
平均値	427	4.54	5.31	5.64	0.299	18.9	5.21	1.02	5.39	1.05	19.6	42.5
変動係数%	1.9	4.9	6.2	6.7	6.3		6.4		8.1		13.1	12.9

※ E_{fr} : 縦振動法によるヤング係数, E_{afb} : たわみ振動法による見かけの曲げヤング係数, E_{fr-t} : TGH法による真の曲げヤング係数,

G_{fb} : TGH法によるせん断弾性係数, E_m : 見かけの曲げヤング係数, E_b : 真の曲げヤング係数, f_b : 曲げ強さ, P_{max} : 最大荷重。

この結果, クリープ破壊試験による荷重レベルの 100% 荷重値を 42.5kN と決定した。

(2)の森林総合研究所, 建築研究所短期面外曲げ試験方法

試験方法は (1)の広島総研短期面外曲げ試験方法と同じである。仕様は Mx60 で 5 層 5ply である。表 3.1-2 に非破壊試験と短期面外曲げ試験結果を示す。

表 3.1-2 非破壊試験と短期面外曲げ試験結果

強軸 n = 10	重量 kg	全長 mm	幅 mm	厚 mm	密度 kg/m ³	ヤング係数 E_{fr} kN/mm ²	TGH E_{fr-t} kN/mm ²	TGH G_{fr-t} kN/mm ²
最小値	63.50	3448	299	150.03	408	4.31	5.87	0.249
平均値	64.91	3450	300	150.47	417	4.58	6.29	0.274
最大値	65.95	3450	300	150.78	423	4.80	6.79	0.299
標準偏差	0.73	0.67	0.37	0.20	4.5	0.15	0.316	0.016
変動係数%	1.1	0.0	0.1	0.1	1.1	3.3	5.0	5.7

せん断変形の影響を含んだ曲げヤング係数(E_m)

強軸 n = 10	最大荷重 kN	最大荷重時 変形量 mm	曲げ強度 N/mm ²	見かけ E_m kN/mm ²	比例限度 荷重 kN	比例限度 強度 N/mm ²	比例限度 変形量 mm	最大荷重時 までの仕事量 kN・mm
最小値	43.12	51.2	19.9	5.28	41.37	19.1	50.1	1183
平均値	54.67	69.2	25.4	5.61	50.23	23.3	59.1	2080
最大値	66.61	100.5	30.9	6.04	56.94	26.4	67.2	3934
標準偏差	7.49	14.25	3.46	0.28	5.30	2.48	6.56	809
変動係数%	13.7	20.6	13.6	5.1	10.6	10.6	11.1	38.9

せん断変形の影響を含まない曲げヤング係数(E_b)

強軸 n = 10	最大荷重 kN	最大荷重時 変形量 mm	曲げ強度 N/mm ²	真 E_b kN/mm ²	比例限度 荷重 kN	比例限度 強度 N/mm ²	比例限度 変形量 mm	最大荷重時 までの仕事量 kN・mm
最小値	43.12	5.8	19.9	5.33	41.37	19.1	5.6	134
平均値	54.67	7.7	25.4	5.78	49.23	22.8	6.7	249
最大値	66.61	9.0	30.9	6.13	54.08	25.0	7.6	492
標準偏差	7.49	1.21	3.46	0.32	4.54	2.13	0.75	103.4
変動係数%	13.7	15.7	13.6	5.5	9.2	9.3	11.2	41.5

この結果、クリープ破壊試験による荷重レベルの 100% 荷重値を 54.7kN と決定した。

文献

- 1) 直交集成板の日本農林規格, H25.12.20 農林水産省告示第 3079 号
- 2) 久保島吉貴：未発表資料

3.2 曲げ荷重下における長期挙動データの収集と解析－広島総研の成果

3.2.1 面外曲げクリープ破壊試験の方法

クリープ破壊試験における長期載荷は図 3.2-1, 写真 3.2-1 に示すようにモーメントアーム式を採用した。アームの長さは支点から錘をかける個所まで 4000mm, 支点から荷重点まで 250mm である。写真 3.2-2 の加力点軸のネジを回転させることでアームを持ち上げ載荷できるようにした。載荷中でもゆっくりネジを回転させてアームを水平に保つことが可能である。写真 3.2-3 はアーム及びおもり, 写真 3.2-4 は加力点(左 600mm, 右 900mm)である。

試験室は温度湿度が調整できないため, 継続的に温湿度を測定することとした。

試験条件として, 加力方法は 4 点加力, 支点間距離は 2700mm (厚さの 18 倍), 荷重点間距離は 900mm (厚さの 6 倍) 及び 600mm (厚さの 4 倍) の 2 条件, 載荷荷重は短期面外曲げ試験により得られた強軸試験体最大荷重の平均値の 85%とした。

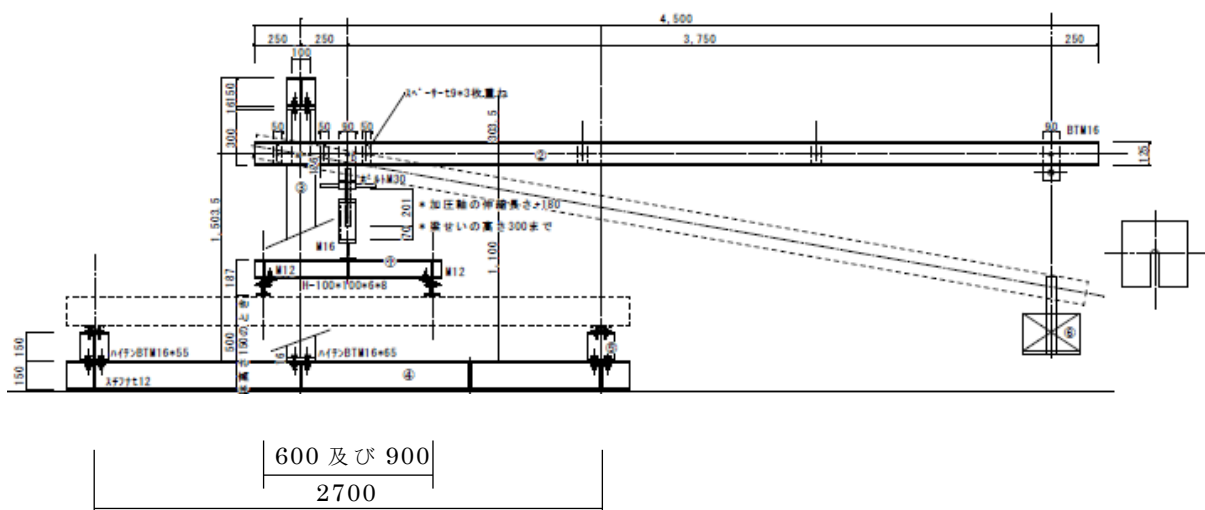


図 3.2-1 モーメントアーム方式のクリープ破壊試験機



写真 3.2-1 モーメントアーム式試験機



写真 3.2-2 加力点軸ネジ部



写真 3.2-3 アーム及びおもりの状況



写真 3.2-4 加力点（左 600mm，右 900mm）

3.2.2 面外曲げクリープ破壊試験の評価方法

荷重継続時間の調整係数は、通常は応力レベルを 3 以上選択し、応力レベルごとの破壊荷重継続時間の常用対数と応力レベルとの関係について回帰直線を求め、回帰直線上にお

いて破壊継続時間が 50 年に相当する応力レベルとして求める¹⁾。ちなみに、製材の荷重継続時間の調整係数は 0.55（Wood のカーブ，Madison Curve）と言われている。今回は、応力レベルを 85%とし，加力点の距離が異なる 2 条件の比較のため，破壊に至る時間の差による評価を行う。

3.2.3 面外曲げクリープ破壊試験の結果

最初に加力点 900mm を 4 体，600mm を 4 体，載荷試験を開始した。破壊に至るまでの時間を表 3.2-1 に示す。また，写真 3.2-5 はすでに破壊した試験体の状況，写真 3.2-6 から写真 3.2-8 には破壊個所の状況を示す。破壊個所は FJ が並列しており，破壊に至るまでの時間が短時間であった。なお，各荷重スパンにおける破壊時間が決定後に破壊に至る時間の差による評価を行う。

表 3.2-1 載荷から破壊に至るまでの時間（継続中も含む）

No	荷重条件	荷重継続時間(min)	状況
1	6:6:6	8147	継続
2	7:4:7	8142	継続
3	6:6:6	8133	継続
4	7:4:7	901	破壊
5	6:6:6	8120	継続
6	7:4:7	8116	継続
7	6:6:6	8111	継続
8	7:4:7	8106	継続



写真 3.2-5 試験体破壊(7:4:7)



写真 3.2-6 破壊状況側面



写真 3.2-7 破壊状況 3 枚ラミナ中 FJ2 か所



写真 3.2-8 破壊状況 FJ 以外

3.2.4 まとめ

面外曲げクリープ破壊試験による荷重点間の違いによる荷重継続時間を評価するため、長期載荷をモーメントアーム式により行った。アームの長さは支点からおもりをかける個所まで 4000mm，支点から荷重点まで 250mm である。加力点軸のネジを回転させることでアームを持ち上げ載荷できるようにした。載荷中でもゆっくりネジを回転させてアームを水平に保つことが可能である。試験室は温度湿度が調整できないため、継続的に温湿度を測定することとした。試験条件として、加力方法は 4 点加力，支点間距離は 2700mm（厚さの 18 倍），荷重点間距離は 900mm（厚さの 6 倍）及び 600mm（厚さの 4 倍）の 2 条件，載荷荷重は短期面外曲げ試験により得られた強軸試験体最大荷重の平均値の 85%とした。

加力点 900mm を 4 体，600mm を 4 体，載荷試験を開始した。8 体中 1 体が 15 時間程度で破壊した。それ以外の試験体は継続中である。なお，各荷重スパンにおける破壊時間が決定後に破壊に至る時間の差による評価を行う。

文献

- 1) 日本ツーバイフォー建築協会：「2002 年枠組壁工法建築物構造計算指針」，工業調査会，186,2002

3.3 曲げ荷重下における長期挙動データの収集と解析－建研の成果

3.3.1 目的と概要

木造建築物の構造体を構成する横架材に長期間，継続的に荷重（以下，「長期継続荷重」と呼ぶ）が作用し続けると，たとえその荷重の大きさが横架材の曲げ耐力よりも小さな値であっても，材の中で微視的な破壊が徐々に進行し，この微視的な破壊の蓄積量が一定レベルを超えた時点で材が破壊することが一般に知られている。この現象は一般に「クリープ破壊」と呼ばれている。荷重継続時間に係る調整係数は，長期，中長期，中短期，短期に作用する荷重に対して木材や木質材料などによる曲げ部材がクリープ破壊しないように，基準強度に乗じる調整（低減）係数である。「荷重継続時間に係る調整係数」という用語は用いられていないが，建築基準法施行令第 89 条と平成 13 年国土交通省告示第 1024 号に定められている木材，集成材，単板積層材の許容応力度を求める際に基準強度に乗じる値がこれに相当する。木材等に対する荷重継続時間に係る調整係数は，無欠点小試験片に対して行った長期荷重載荷試験の結果を用いて Wood ら^{1,2)}が誘導した実験式（Madison Curve）を参考としてその基本的な値が定められている（図 3.3-1 参照）。Wood ら以降，実大材を用いた長期荷重載荷試験が Madsen³⁾らによって行われ，長期載荷荷重に対する実大材の性状についての知見も蓄積されてきている（図 3.3-2 参照）。

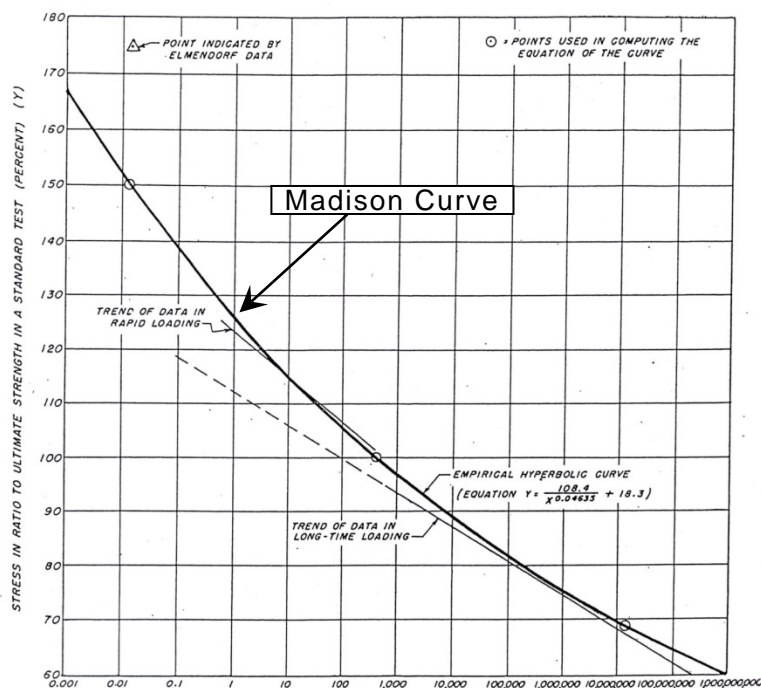


図 3.3-1 Wood らによる研究結果

（解説）縦軸が応力比，横軸が荷重継続時間の対数である。実線が Madison Curve であり，下に凸の曲線となる。

CLT は，ラミナの繊維方向を隣り合う層で互いに直交させているという点と，同じ層の中でラミナの幅はぎを行わずに平面的に並べているという点において，製材や集成材と構造が異なっており，このことにより CLT のクリープ破壊性状が製材や集成材と同じにならないことも考えられる。したがって，CLT の荷重継続時間に係る調整係数を製材等と同じとして良いかどうかについて確認する必要がある。

本課題では CLT に対する荷重継続時間に係る調整係数を求めるために、CLT のクリープ破壊試験を行った。

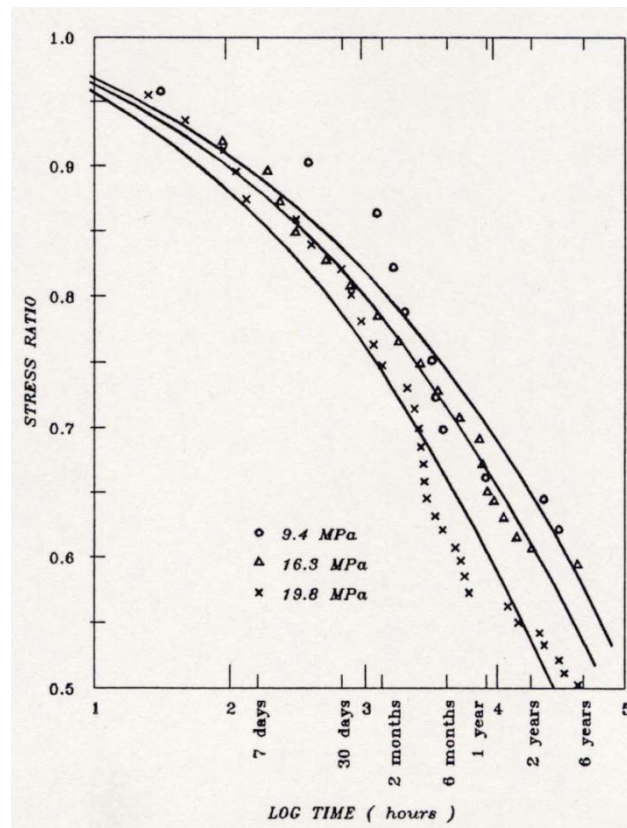


図 3.3-2 Madsen による研究結果

(解説) 縦軸が応力比、横軸が荷重継続時間の対数である。実大材については上に凸の曲線となる。

3.3.2 試験体

クリープ破壊試験とクリープ変形試験に供した試験体の仕様と寸法は以下に示すとおりとした。

規格：直交集成板の日本農林規格に定める Mx60-5-5

樹種：スギ

寸法：長さ 3450mm×厚さ 150mm×幅 300mm

3.3.3 試験方法

クリープ破壊試験を以下に記す載荷条件及び荷重量により実施した。写真 3.3-1 にクリープ破壊試験を行っている様子を示す。

加力方法：3 等分点 4 点加力

支点間距離：3150mm

荷重点間距離：1050mm

載荷荷重：曲げ試験により得られた最大荷重の平均値の 80%

試験体数：2 体

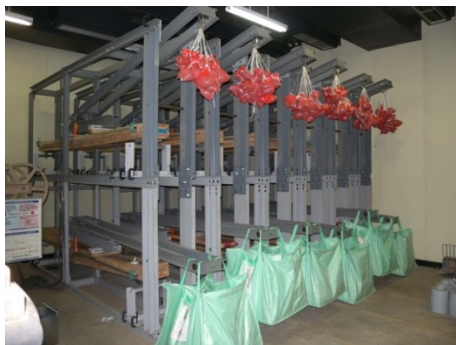


写真 3.3-1 クリープ破壊試験の様子

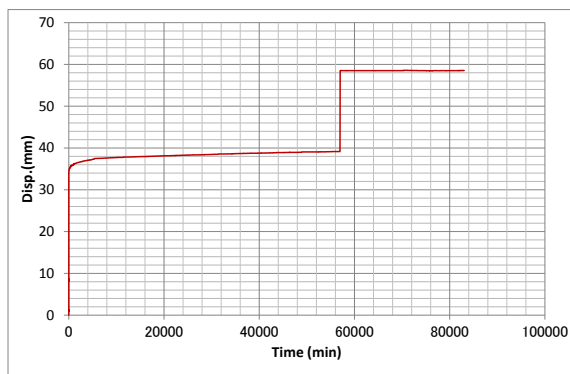
(解説) 温度 20℃，相対湿度 65%の恒温恒湿室内にて試験を実施。下段がクリープ破壊試験。

3.3.4 結果及び考察

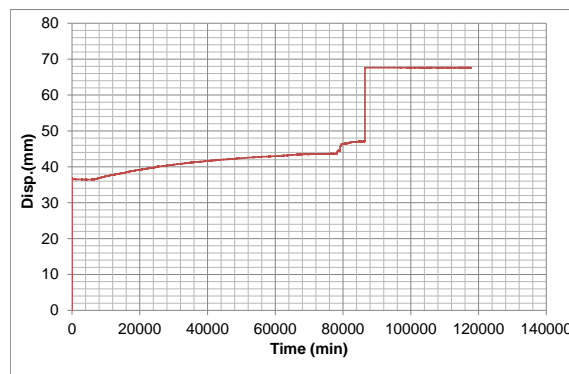
表 3.3-1 に試験結果を示す。試験体 2 体のうち 1 体は 39.6 日，もう 1 体は 60.0 日で破壊した。また，図 3.3-3 に両試験体のクリープ曲線を示す。

表 3.3-1 クリープ破壊試験の結果

荷重比 (%)	荷重継続時間 (min)	状況
80	56992 (39.6 日)	破壊
80	86467 (60.0 日)	破壊



(a) 荷重比 80%



(b) 荷重比 80%

図 3.3-3 クリープ曲線

図 3.3-4 に荷重比と時間の対数と関係を示す。図中の青線は前述のマディソンカーブであり，両試験体ともにマディソンカーブの右側にプロットされている。製材同等として良いかどうかについては，今後，試験体数を増やし，さらに，荷重比が異なる試験を行って確認する必要がある。

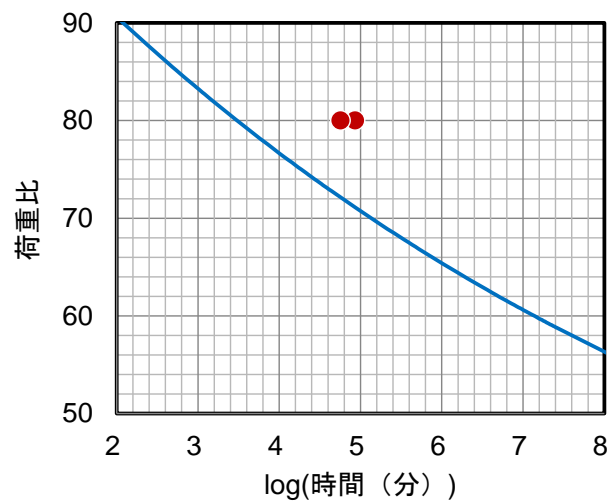


図 3.3-4 荷重比と時間の対数と関係

文献

- 1) Wood, L.W. 1951, "Relation of Strength of Wood Duration of Load", F.P.L. Report No. R1916.
- 2) Liska, J.A. 1950, "Effect of Rapid Loading on the Compression and Flexural Strength of Wood", F.P.L. Report No. R1767.
- 3) Borg Madsen, "Structural Behaviour of Timber", Timber Engineering LTD., 1992.

3.4 曲げ荷重下における長期挙動データの収集と解析－森林総研の成果

森林総合研究所には、実大寸法の CLT の長期変形挙動を測定可能な試験設備・装置を所有しなかったため、本事業により試験装置を整備した。試験装置の整備に先立ち、装置を設置するための試験棟を建設した。試験棟の諸元は以下の通りである。

- (1) 建物名称 次世代木造建築実験棟
- (2) 所在地 茨城県つくば市松の里 1 番地
- (3) 工 期 平成 26 年 10 月 22 日～平成 27 年 1 月 30 日
- (4) 構造・階数 木造平屋建て（枠組壁工法：小屋組トラス工法）
- (5) 面 積 **【建築面積】 132.49m² 【延床面積】 132.49 m²**
- (6) 仕 上 **【外部仕上】** 屋根：カラーガルバリウム鋼板張り
外壁：窯業系サイディング張り
【内部仕上】 床：コンクリート金ごての上、防塵塗装仕上
壁・天井：構造用合板張りの上、塗装(UC)仕上

上記、試験棟と試験装置の設置に掛かる工程は以下の通りである。

- 平成 26 年 11 月 4 日：工事着工
- 平成 26 年 12 月 15 日：木造建方開始
- 平成 26 年 12 月 26 日：屋根葺き完了
- 平成 27 年 1 月 27 日：消防検査
- 平成 27 年 1 月 27 日：つくば市建築主事完了検査
- 平成 27 年 1 月 28 日：工事監理者・発注者（森林総研）完成検査
- 平成 27 年 1 月 30 日：直交集成板含水率調整装置（恒温恒湿室）着工
- 平成 27 年 2 月 15 日：直交集成板含水率調整装置（恒温恒湿室）設置作業完了
- 平成 27 年 2 月 22 日：直交集成板クリープ試験装置（試作機）設置作業開始
- 平成 27 年 2 月 28 日：直交集成板クリープ試験装置設置作業完了予定

本事業では、試験装置として、直交集成板含水率調整装置及び直交集成板クリープ試験装置（試作機）2 台の整備を行った。試験装置については、「2. CLT の長期変形挙動に関する測定方法の妥当性の検討」において検討した結果を踏まえ、現時点で想定される測定因子の影響を極力排除できるよう、その仕様を決定した。以下、試験装置の主要諸元を示す。

[直交集成板含水率調整装置]

装置の概要

本装置は直交集成板(CLT)の長期挙動を実験的に評価する際の試験体の含有水分率を一定に保つために必要な性能を有するものとする。

基本性能仕様

制御温度：20℃／制御湿度：65％

以下、JIS C 60068-3-6：2008 による性能（但し、床近傍は除く）

温湿度変動：±0.5℃／±4％

温湿度勾配：2.5℃／8％

空間温湿度偏差：2.5℃／8%

以下，JTM K 03：2001 による性能（但し，床近傍は除く）

温湿度変動：±0.25℃／±2.0%

温湿度分布：±1.0℃／±5%

換気量：120m³/h 以上

試験室内寸法：W7000×D9000×H3000mm

送風構造：天井全面吹き出しとし，ステンレス製のパンチング板から室内に送風されるような構造であること。

送風機：1.5kW 以上

冷却方式：冷凍機の冷媒流量を無段階に調節可能な電子式膨張弁による自動制御とし，十分な冷却能力を有するよう，3.5kW 相当以上とすること。

加熱方式：フィンヒーターによる電気加熱方式とし，十分な加熱能力を有するよう，6kW 以上のものとする。

加湿方式：室外設置のボイラー加湿方式とし，十分な加湿能力を有するよう，6kW 以上のものとする。加湿水の入れ替えによる自動洗浄動作で不純物が付きにくいものとする。

湿度センサー：湿球ガーゼなどのメンテナンスを不要とするため，静電容量式のものを採用すること。

純水製造装置：加湿用水の純水化のため，以下の機能を有する純水製造装置を有すること。

- ・水温 5℃においても 30L/h 以上の純水が生成できるものであること。
- ・前処理として，プレフィルターと活性炭フィルターとを装備していること。
- ・水質モニター及び表示ディスプレイを有すること。
- ・40L 以上の純水貯留用タンクを有すること。
- ・加湿器内の純水が減少した時に，自動で純水が供給できるよう，連動していること。
- ・逆浸透膜機器や貯留用タンクから万が一水漏れがあった時には，装置内で一次側給水を遮断する機能を有していること。

[直交集成板クリープ試験装置（試作機）]

装置の概略

本装置は直交集成板(CLT)の長期挙動を評価するため，面外曲げ性能におけるクリープに掛かる調整係数ならびに荷重継続時間に掛かる調整係数を実験的に導出するために必要な性能を有するものとする。

装置の構成及び数量

本装置は下記のものより構成されるものとする。

- | | |
|--------------|-----|
| (1) 試験機本体 | 2 台 |
| (2) 曲げ試験治具 | 2 式 |
| (3) 計測制御装置 | 1 台 |
| (4) 試験体搬入出装置 | 1 台 |

各部の仕様

(1) 試験機本体

- ・最大負荷容量：15,000kg 以上
- ・載荷方式：テコ比 1:50 以上のデッドウェイト方式または同等以上の精度を有する方式とする。
- ・荷重精度：±1.0%
- ・荷重精度：測定室内温度に左右されることがなく，ドリフトがないこと。
- ・対象試験体寸法（最大）：幅 300mm×高さ 450mm×長さ 7,000mm
- ・最大曲げたわみ：500mm 以上
- ・たわみ測定精度：0.1%以内

- ・ 載荷範囲：1,000～15,000kg の範囲以上
- ・ 荷重ステップ：100kg 以下
- ・ 破断検出機構を有すること。
- ・ 緩衝装置を有すること。
- ・ 装置寸法：幅 900mm×奥行 7,000mm×高さ 2,600mm 以下であること。
- ・ 装置重量：2,500kg 以下であること。

(2) 曲げ試験治具

- ・ 下部曲げ支点間隔：最大 6,000mm とし、可変であること。

曲げ支点幅：450mm

曲げ支点材質：樫材

最大たわみ量：500mm

曲げ支点台：スライド調節機構を有すること。

- ・ 上部曲げ加力点間隔：最大 2,000mm とし、可変であること。

曲げ加力点幅：450mm

曲げ加力点材質：樫材

曲げ加力点台ポンチ：スライド調節機構を有すること。

(3) 計測制御装置

- ・ 制御装置仕様

① 試験力計測

ロードセル容量：20,000kg

② 変位計測：非接触方式，最大 500mm，試験体中央，加力点 2 点の合計 3 点

③ 条件設定方式：タッチパネルによる設定

設定内容：試験条件（サンプリングパターン，破断条件，試験時間）

④ 表示内容：試験状態表示（荷重，変位量，試験経過時間）

⑤ 荷重計：ロードセル用増幅器を付属すること。

⑥ 部出力：CF カードへ csv 形式で出力できること。

⑦ 拡張性：最大 5 台まで制御可能であること。

- ・ データ収集仕様

① データ収集：開始より終了までを 4 パターンに分けそれぞれのデータ収集間隔が任意に設定可能であること。

② データ収集間隔：100ms／点～1hr／点

③ 表示桁数：荷重 整数 5 桁(xxxxxx kg)，変位 整数 3 桁，小数 2 桁(xxx.xx mm)

④ データ出力：日付，時刻，経過時間，荷重値，変位値

⑤ 試験終了条件：試験体破断時，設定時間終了もしくは試験中に停止を押した時点で終了できること。

⑥ 停電時対策：制御装置に UPS を内蔵し，停電時には直前までのデータをシステム内に自動保存できること。

(4) 試験体搬入出装置

試験体の搬入・設置から搬出までの作業を簡素化し 2 名程度で対応できる装置を付属すること。

また，破断した試験体も取り出し可能な機構とし，あらかじめその手法を提示すること。

これらの仕様に基づき、試験装置を整備した。試験棟及び試験装置の概略を写真 3.4-1～3.4-3、図 3.4-1 に示す。なお、クリープ試験装置のうち 2 台が本事業で整備されたものである。



写真 3.4-1 クリープ試験室外観



写真 3.4-2 含水率調整室内観



写真 3.4-3 クリープ試験装置設置状況

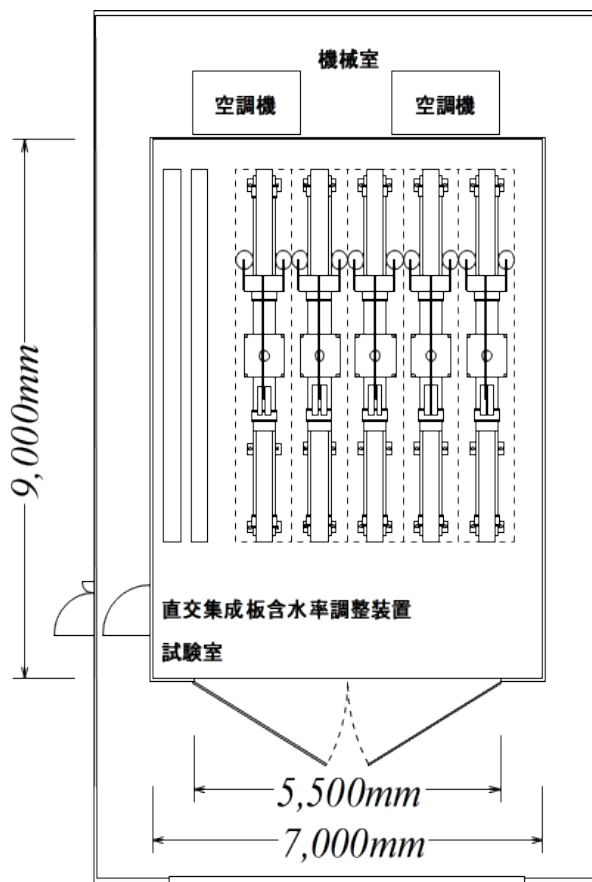


図 3.4-1 クリープ試験装置の配置

整備された試験装置を用いて、試験体 2 体の長期変形挙動を測定した。供試した試験体は 3.1～3.3 で供試した試験体とサイドマッチングを行って採取した Mx60 の 5 層 5ply スギ CLT である。3.3 の測定結果と比較することで試験体寸法の影響について検討できるよう、曲げスパンを厚さの 18 倍とした 3 等分点 4 点曲げ方式とした。3.1 で決定された荷重レベルに従って、破壊荷重の 68%，78% の 2 水準の荷重レベルとなるように載荷した。測定状況を写真 3.4-4 に示す。測定結果を図 3.4-2, 3.4-3 に示す。

載荷直後の初期たわみは、荷重レベル 68% で 43.2mm，荷重レベル 78% で 46.8mm であり，3.1 における静的破壊試験の破断時たわみのそれぞれ 62%，68% 程度にあたる。変形の増大は 66 時間後に荷重レベル 68% の場合 46.2mm で，荷重レベル 78% の場合 50.3mm

であり、初期たわみから 7%程度増加している。両試験体の DOL 試験は、事業期間内では終了できないため、継続して測定を行うこととする。



写真 3.4-4 クリープ試験測定状況

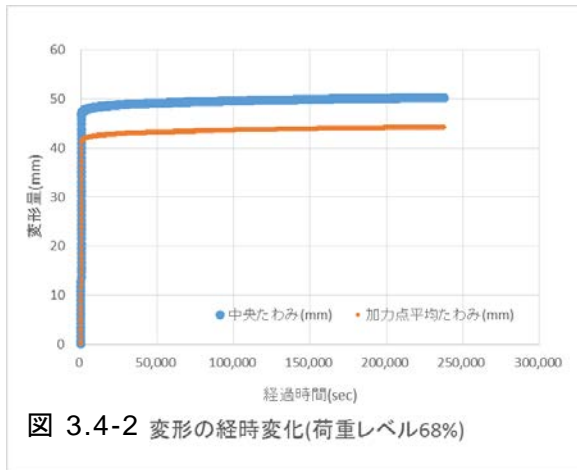


図 3.4-2 変形の経時変化(荷重レベル68%)

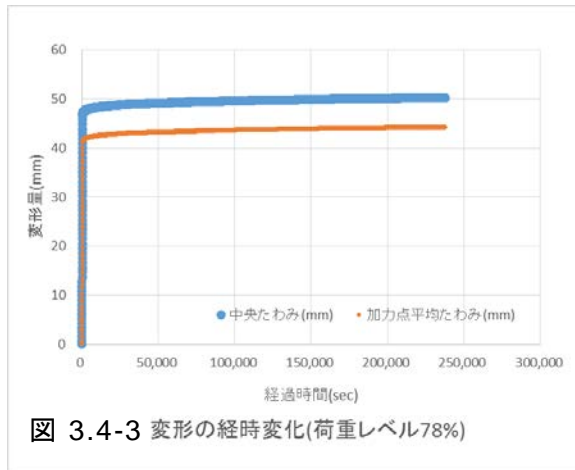


図 3.4-3 変形の経時変化(荷重レベル78%)

4. 進行状況の管理

4.1 はじめに

森林総合研究所では林野庁委託事業により、CLTの実用化促進に関する試験研究を行っている。本稿では、受託した事業の概略と進捗について報告する。

4.2 進行管理委員会への出席者（敬称略）

①第1回進行管理委員会

進行管理委員

静岡大学農学部・安村 基（委員長）

東京大学大学院農学生命科学研究科 生物材料学専攻・青木謙治

公益財団法人日本合板検査会・尾方伸次

公益財団法人日本住宅・木材技術センター・鴛海四郎

工学院大学建築学部建築学科・河合直人

一般社団法人日本 CLT 協会・河合 誠

一般財団法人建材試験センター中央試験所・黒木勝一

富山県農林水産総合技術センター木材研究所・園田里見

一般社団法人日本ツーバイフォー建築協会・辻村行雄

独立行政法人農林水産消費安全技術センター・横田俊峰

オブザーバー

国土交通省建築指導課建築物防災対策室・高木直人

国土交通省住宅局建築指導課・歌代純平

林野庁木材産業課木材製品技術室・小坂善太郎

林野庁木材産業課・高畑啓一氏，西村紘明

農林水産省消費安全局表示・企画課・中熊 靖

北海道水産林務部林務局林業木材課・熊谷 操

課題担当者

独立行政法人建築研究所・中島史郎

北海道総合研究機構林産試験場・朝倉靖弘，秋津裕志，大橋義徳，松本和茂，高橋隆也

秋田県立大学木材高度加工研究所・佐々木貴信

愛媛県農林水産研究所林業研究センター・玉置教司

一般社団法人日本 CLT 協会・孕石剛志

独立行政法人森林総合研究所・宮武 敦，長尾博文，平松 靖，渋沢龍也，宮本康太事務局

公益社団法人日本木材加工技術協会・黒田尚宏，海老原 徹

②第2回進行管理委員会

静岡大学農学部・安村 基（委員長）

東京大学大学院農学生命科学研究科 生物材料学専攻・青木謙治

公益財団法人日本合板検査会・尾方伸次

公益財団法人日本住宅・木材技術センター・鴛海四郎

工学院大学建築学部建築学科・河合直人

一般社団法人日本 CLT 協会・河合 誠（代 有賀康治）

一般財団法人建材試験センター中央試験所・黒木勝一

富山県農林水産総合技術センター木材研究所・園田里見

独立行政法人農林水産消費安全技術センター・横田俊峰

オブザーバー

国土交通省建築指導課建築物防災対策室・高木直人

国土交通省住宅局建築指導課・歌代純平

林野庁木材産業課木材製品技術室・小坂善太郎

林野庁木材産業課・高畑啓一，西村紘明，加藤裕二

農林水産省消費安全局表示・企画課・中熊 靖

北海道立総合研究機構林産試験場・平間 昭光

課題担当者

独立行政法人建築研究所・中島史郎，荒木康弘

北海道総合研究機構林産試験場・朝倉靖弘，大崎久司，秋津裕志，大橋義徳，松本和茂，
高橋隆也

秋田県立大学木材高度加工研究所・佐々木貴信

愛媛県農林水産研究所林業研究センター・小川俊治

一般社団法人日本 CLT 協会・孕石剛志

独立行政法人森林総合研究所・宮武 敦，渋沢龍也，長尾博文，平松 靖，塔村真一郎，
新藤健太，宮本康太

事務局

公益社団法人日本木材加工技術協会・黒田尚宏，海老原 徹

4.3 現地検討会

4.3.1 CLT 製造視察及び現地打合せ会

時期：平成 27 年 1 月 14 日～15 日

場所：銘建工業（株）（岡山県真庭市勝山 1209）

出席者：

進行管理委員

日本住宅木材技術センター・鴛海四郎

日本合板検査会・尾形伸次

富山県農林水産総合技術センター木材研究所・園田里見

日本ツーバイフォー建築協会・辻村行雄

課題担当者

北海道立総合研究機構林産試験場・秋津裕志，朝倉靖弘，大崎久司

森林総合研究所・渋沢龍也，宮本康太，前田 啓

事務局

日本木材加工技術協会・海老原徹

概要

①研究打ち合わせ（1 月 14 日）

- ・翌日の製造実験見学の行程確認。
- ・今後のスケジュールの確認。
- ・広島県立総合技術研究所林業技術センターにて床を想定した大板(6×2m 程度)のクリープ試験等を行う予定であり，その見学については日程が決まり次第連絡する。
- ・森林総研で建築中のクリープ試験棟については 3 月 4，5 日頃に見学可能の予定。

②CLT の製造ラインの見学会（1 月 15 日）

- ・工場担当者より会社及び工場の概要，ラインの特徴や管理方法についての説明を受けた。
- ・製造工程では様々なノウハウが蓄積され，適切な生産管理がなされていることを確認。
- ・材料の歩留まり向上のため，規格を満足する範囲での低質ラミナを使用するノウハウの蓄積が必要，接着性能と製品強度との関係や接着性能の評価方法の検証等が必要と考えられる（尾方委員）。

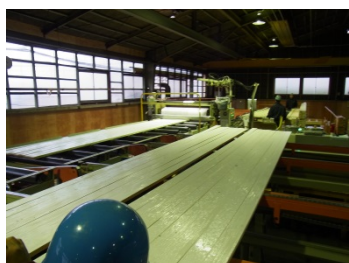


写真 1 CLT パネル製造施設

写真 2 同写真 1

写真 3 CLT パネル加工施設

（写真 1～3：園田委員提供）

4.3.2 クリープ試験等実施状況視察

時期：2 月 12～13 日

場所：広島県立総合技術研究所林業技術センター 三次高平施設
(広島県三次市十日市町)

出席者：

進行管理委員

日本住宅木材技術センター・鴛海四郎

日本合板検査会・尾形伸次

課題担当者

北海道立総合研究機構林産試験場・大崎久司

森林総合研究所・渋沢龍也，宮本康太

事務局

日本木材加工技術協会・黒田尚宏

概要：

①木材実験棟，CLT の面外せん断試験の視察

- ・藤田和彦氏（広島県）による実験施設概要の説明。実大強度試験機（曲げ 500kN），実大引張り試験機（最大 500kN），壁体せん断試験機（最大 100kN，試料寸法最大 4m×3m），圧縮試験機（2000kN）など，木材・木質材料の強度試験機器を整備。
- ・CLT 試験体（厚さ 210mm，幅寸法 300mm，長さ 1470mm，5 層 7 プライ/ヒノキ 2+スギ 3+ヒノキ 2）の面外せん断試験における荷重－変形曲線（最大荷重が 200kN を超える），荷重レベルと破壊状況などを視察。

②CLT クリープ試験の視察

- ・旧研修施設や食堂スペースに設置されたクリープ試験機による面外曲げクリープ破壊試験等を視察。試験室は温度湿度調整不可のため，継続的に温湿度測定。
- ・設置された試験機は，モーメントアーム式により 4 点荷重で長期載荷を行う方式，載荷荷重，荷重点間距離を調整。荷重は，短期曲げ試験で得られた破壊荷重を基に設定。試験体 8 体ほどを試験中，破壊までに長時間を要することを確認。
- ・その他，集成材や繊維板など，数種のクリープ試験が実施されている状況を視察。
- ・木材実験棟内に設置された中央集中，アーム式荷重方式による実大 CLT 版のクリープ試験を視察。

③打合会

- ・長期載荷試験実施にかかわる試験体，荷重レベル，室内環境などの試験条件にかかわる問題や，試験スケジュールについて意見交換。
- ・実大材のクリープ試験，JAS 格付け検査のための試験機の容量など，今後の研究計画，将来的な問題点も議論。

4.3.3 クリープ試験装置視察

時期：平成 27 年 2 月 25～26 日

場所：独立行政法人森林総合研究所（茨城県つくば市松の里 1）

出席者：

進行管理委員

建材試験センター中央試験所長・黒木勝一

建材試験センター中央試験所 特別参与・高橋 仁
富山県農林水産総合技術センター木材研究所・園田里見
課題担当者
北海道立総合研究機構林産試験場・秋津裕志，朝倉靖弘
森林総合研究所・渋谷龍也，宮本康太

概要

①CLT クリープ試験の見学会

- ・設置された次世代木造建築実験棟（CLT クリープ試験室）におけるクリープ試験の視察を行い，課題担当者より施設，装置及び測定方法に関する説明を受けた。

②研究打ち合せ

- ・測定方法についての打ち合せ会を行った。



写真 1 次世代木造建築実験棟



写真 2 クリープ試験装置



写真 3 温湿度の計測状況

4.4 まとめ

本事業では、CLT の普及に向けて実用的な性能データを蓄積することを目標としており、地味ではあるが、実用上必要不可欠な検討を進めている。本事業で設置した進行管理委員会は、CLT を対象とした評価方法、測定条件等、技術的な内容について深く検討する唯一の場となっていると考えられる。こうした事業を進める上で効果の高い一つの方法を見いだしたことも本事業の成果であろう。

4.5 謝辞

本研究は、平成 25 年度林野庁委託事業「CLT 等新製品・新技術利用促進事業のうち CLT 実用化促進(強度データ等の収集・分析)」,「CLT 等新製品・新技術利用促進事業のうち CLT 実用化促進(長期挙動データ等の収集・分析)」,平成 26 年度林野庁委託事業「CLT 等新たな製品・技術の開発促進事業のうち中高層建築物等に係る技術開発等の促進(CLT 強度データの収集)」,「CLT 等新たな製品・技術の開発促進事業のうち中高層建築物等に係る技術開発等の促進(CLT 長期挙動データの収集)」の一環として実施された。見学にご対応いただいた銘建工業株式会社の皆様をはじめ、関係各位に衷心より感謝の意を表する。

5. 事業成果の総括と残された課題

直交集成板（CLT）は、我が国でも国産材の新しい利用法として期待が高く、その実用化が急務となっている。平成 25 年 12 月には「直交集成板の日本農林規格（JAS 規格）」が制定され、現在、構造材として一般的に用いるための建築基準の整備に向けた強度データ等の収集が進められている。

強度データとしては、基準強度と併せて、床設計等に不可欠である長期挙動のデータを蓄積することが必要である。このため本事業では、CLT の長期挙動データ収集・分析を行い、以下の成果を得た。

ア CLT の長期変形挙動に関する測定方法の妥当性の検討

新たな建築部材である CLT の長期挙動の測定方法について、平成 12 年建設省告示第 1446 号などを参考にし、測定結果に与える因子を特定し、CLT の長期挙動に関する測定方法の妥当性を検討した。

イ CLT の長期挙動データの収集

（ア）長期挙動データ導出のための荷重水準の決定

CLT を使用する際に最も重要である曲げ性能に関する長期挙動データを収集するためには、一定の温湿度環境下で一定荷重水準に相当する静荷重を作用させる必要がある。本課題では、静的曲げ試験の結果を踏まえて作用させるべき荷重水準を決定した。

（イ）長期挙動データの収集

スギ等の国産針葉樹を用いた CLT 試験体 2 体以上を使用して、アの結果を踏まえた測定方法によってイ（ア）の結果を踏まえた荷重水準を作用させる実験を行い、荷重継続時間と変形量の関係を記録した。

ウ 収集した長期挙動データの解析

（ア）曲げ荷重下における長期挙動の解析

イ（イ）により得られたデータより、曲げ荷重下における長期挙動を定量的に表現する数値を導出した。導出する方法としては、「相対曲げ変形の逆数の常用対数」と「荷重継続時間の常用対数」との関係を直線回帰する方法と、相対曲げ変形量と荷重継続時間の関係をべき乗関数曲線で回帰する方法の 2 つを用いた。

（イ）CLT の製造因子が長期挙動に与える影響の分析

ウ（ア）により求めた CLT の長期挙動の指標となる数値に、CLT の断面構成等の製造因子が与える影響について分析し、今後の CLT の製造方法にフィードバックする方法について検討した。

本事業の成果により、曲げ荷重下における CLT の長期挙動に関する妥当な測定方法を同定し、CLT 試験体 2 体以上による長期挙動データを導出した。今後、さらに断面構成等、製造条件の異なる CLT について、同様のデータを蓄積する必要がある。