

韓国における 3次元情報モデルにもとづく橋梁エンジニアリング — Three-Dimensional Information Model-Based Bridge Engineering in Korea —

著：Chang - Su Shim, Kwang - Myong Lee, James Hwang and Yonghan Kim
訳：山崎 啓治, 三浦 廣高

設計から施工、維持管理に至る一連の流れの効率的な連携を可能にするために提供されるものが統合モデル (integrated model) である。本文は、橋梁プロジェクトにおける計画から維持管理に至るライフサイクルを通じて統合的かつ相互運用性のある作業を可能とするために開発された3次元橋梁情報モデル (3D bridge information model) について述べたものである。橋梁分野へのモデル拡張のために、オブジェクト指向の3次元モデルおよび相互運用性のためのニュートラル・スキーマを構築した。その際、ワーク・ブレイクダウン・ストラクチャー (work breakdown structures. 以下、WBS) およびプロダクト・ブレイクダウン・ストラクチャー (product breakdown structures. 以下、PBS) の手法を採用した。こうして構築された橋梁情報モデルを実際の斜張橋建設プロジェクトの設計照査 (design check)、構造解析、自動見積り (automated estimation)、4次元工程管理、5次元建設マネジメントそしてデジタルモックアップ作成に適用した。開発された情報モデルおよび関連システムによって、エンジニアリング業務の生産性が劇的に向上し、プロジェクトのリスク低減が可能となるであろう。

キーワード：3次元情報モデル、ニュートラル・スキーマ、デジタルモックアップ、相互運用性、連携、4次元工程管理、5次元建設マネジメント

1. はじめに

ビルディング・インフォメーション・モデリング (building information modelling. 以下、BIM) とは、3次元モデルと属性データにより構成される最新技術の一つである。BIMの普及によって建設産業の「2次元の書面ベース」プロセスから「モデルベース (model-based)」プロセスへの移行が徐々に進んでいくものと期待されている。現地で構造物が実際に造られる前に仮想空間上で構築を行う「モデルベース」プロセスは、バーチャル設計・施工 (Virtual Design and Construction) とも呼ばれる。

BIMとはインフラの建設から運営をシミュレーションするために、情報処理可能なモデルを構築および活用することである。そのようにして構築されたビルディング・インフォメーション・モデルは、属性情報や各種パラメータなど、多くの情報を含むオブジェクト指向的機能を持ち、ユーザーはそこから情報を抽出、分析することで業務に利用することができる。技術者は連携と情報共有を通じて製品、プロセスおよび資源を扱う必要がある。

バーチャル建設システム (virtual construction system) 開発という研究プロジェクトを通じて、公共調達サービスのためのBIMガイドラインが検討されてきた。韓国政府は、公共調達庁 (public procurement service. PPS) が2012年から4500万US\$ (54億円相当) を超えるターンキー・プロジェクトにBIMを適用することを発表した。超高層ビルのみならず土木インフラにとっても、韓国建設業界においてBIMは新たに期待される技術革新なのである。3次元情報モデルはプロジェクト初期段階においてある参加者が作成し、多数の関係者により共有される

ことで効果を発揮するが、現状の設計はまず2次元図面が先にあり、それを元に3次元モデルを作成し、デジタルモックアップ (digital mock-up)、数量算出 (quantity take-off)、4次元または5次元シミュレーションに用いられている。

BIMアプリケーションにおいては、初期のモデル構築から最終的な運営および維持管理プロセスに至るまでの間、段階毎に詳細レベルを定め、おのおのの関係者が共同作業を行うための情報スキーマを定めていく必要がある。CADエンジンが相互運用性のためのニュートラルなフォーマットを提供しているが、橋梁プロジェクトに対するモデルデータ共有までは不可能なため今後の開発が求められている。

本文は、各セクターがBIMを今後展開するにあたり統一性を損なわないよう、プロジェクト関係者のニーズを考慮した3次元モデル構造をニュートラル・スキーマとして提案するものである。今回、斜張橋およびそのアプローチ橋を建設する大型橋梁プロジェクトに当モデルを試験的に適用し、その適用妥当性の検討を行った。コントラクターの要求事項は、主にWBSとPBSを検討することであった。

2. 3次元橋梁モデルの構造

BIMを構成する主要3要素、製品 (product)、プロセス (process) および資源 (resource) が、情報モデル構築のために最初に確定すべき事項である。モデル構造とそこに含まれる情報は、BIMアプリケーションを通じてモデルの共有を可能にするためだけでなく、設計、見積りおよびシミュレーションなど他のソリューションに利用

できるよう設定されなければならない。現行の IFC (Industry Foundation Classes) モデルは主に建築構造物向けに構築されたものであり、橋梁のような土木構造物には不向きである。ここではまず線形・構造、情報スキーマおよびプロセスに関して、関係者の同意を基に定義付けを行った。

2.1 詳細レベルと統合計画

BIM 実施初期段階に対象橋梁の設計が完了し、2次元図面とその他関連書類が提供された。最初に行うべきことは、関係者にとっての BIM アプリケーション使用の主目的を把握することであった。コントラクターにとっての主目的は、特定部材のデジタルモックアップの作成、図面の改訂、設計変更によるコスト評価、4次元工程およびリスクの可視化 (risk visualization) などであった。その他追加要望として、施工計画および橋梁端部における新設と既設との干渉確認があった。本プロジェクトはターンキー契約であったため、コスト低減が最優先事項であった。

ヒアリング結果を受けて、3次元モデルにおける詳細レベル (level of details. 以下, LOD) および統合計画が策定された。3次元モデルは階層的な要素分析表 (component decomposition chart) をもち、各要素に固有コードを与えるための名称が作成される。関係者おのものが異なる CAD エンジンおよびインハウス・プログラムを用いるため、デジタルファイルを共有できる相互運用性の確立が必要であった。図 - 1 に示されるようにモデル作成者は構成データを集め、3次元モデリングの成果に求められるものを調査した。異なる BIM アプリケーションによって作成、改訂されるモデルの詳細レベルについての議論が行われ、モデルの共有とその統合方法の計画が行われた。

標準的な分類付けと専門用語を考慮し、仮想現場モデル (virtual site model) および基本構造モデルを含むベースモデルが作成された。一般に普及している CAD エンジンを用いてメタデータを含む3次元モデルを作成し、

新しく情報を追加、変換して更新されたデジタルモデルを6者の関係者に提供した。各人はそれを運用し、提供されたモデルの改訂を行った。そうした最終モデルと成果品はウェブベースの共同運営システムにアップロードされた。

2.2 共同作業のためのニュートラル情報スキーマ

情報の共有と伝達のためには相互運用性がきわめて重要である。今日に至るまで、3次元 CAD エンジンまたは BIM ソリューションとも橋梁の相互運用性のあるニュートラルなフォーマットを提供できていない。異なるソリューション下で3次元モデルを共有するためのニュートラルなファイルフォーマットとして整備されたのが XML (Extensible Markup Language) 形式の情報データベースである。このような既存のフォーマットを用いることで、エンジニアリングプロセスの各構成タスクを確実に達成することができた。3次元モデルの構築着手前に、モデル作成者は各関係者から PBS および WBS を収集し、図 - 2 のような情報構造ツリーを作成した。XML 形式で表現された情報モデルは情報伝達に活用された。開発された建設プロジェクト・ライフサイクル・マネジメント (Construction Project Life Cycle Management. 以下, CPLM) システムは BIM を用いた関係者間の共同作業をサポートした。

現在のところ、IFC-BRIDGE [訳者注*] のような橋梁情報モデルの標準フォーマットは、実用的なアプリケーションであるとはいいがたい。分類方法とネーミングがモデルの再利用性にとって重要である。基本的なジオメトリフレームワークは ISO 12006-2 で規定される Omni Class を踏まえて構成される。この分類法を基にモデルを抽出できるようにすることで、モデル内の情報データベースにリンクできるようになる。

WBS とは、プロジェクトにおける作業を細かい単位 (エレメント) に分割し、階層構造などで管理する手法のことである。エレメントとはハードウェア、サービスおよびデータにおける特定のアイテムを表したものであ

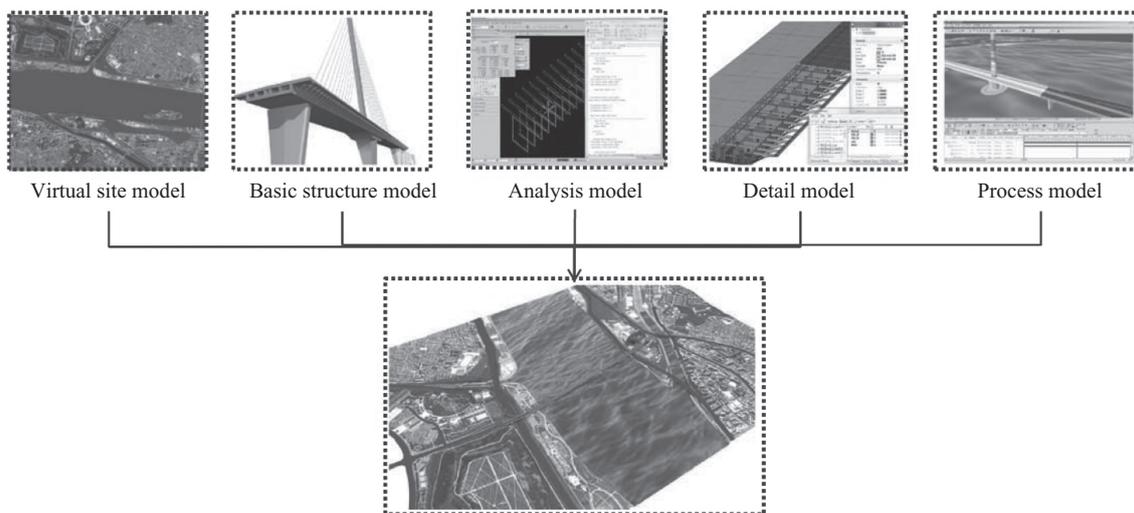


図 - 1 詳細レベル (LOD) と BIM の統合

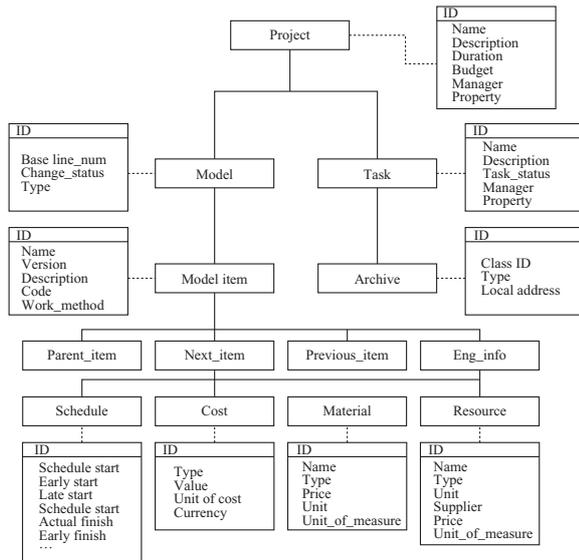


図 - 2 3次元モデルのニュートラル・スキーマ

る。WBSにおける下位エレメントに行くほど表現が詳細になる。8階層に定義された各プロダクトに対し、3階層のWBSが3次元モデルに適用される。2次元図面は3次元モデルをもとに抽出する必要がある。現状の設計出力品に求められる要求事項に適合した形式で出力できるようWBSを定義することで、既存の2次元図面の定義を3次元モデルに関連付けた。

3. 建設プロジェクト・ライフサイクル・マネジメント・システム

CPLMシステムが共同運営をサポートするために提案された。多様な形式のシステムが混在するなかでは、情報およびプロセスモデルを統合的にマネジメントすることが必要になる。CPLMインテグレーターは多様な形式のシステム内に混在する情報を変換するために開発されたものである。このシステムに基づき建設プロジェクトを実施するにあたっては、ワークフローとそのデータを他のエンジニアリングアプリケーション（3次元CADモデル、構造データ、シミュレーションモデルおよび一般書類など）に変換できるようになっていなくてはならない。

図 - 3に統合フレームワークの概念を示す。エンジニアリング・アプリケーションはこのインテグレーターを通じてウェブ上のデータとワークフローにアクセスすることができる。その結果、プロジェクトに関わる技術者は、いつでもどこであっても共同作業を行うことができる。

このインテグレーターはCPLMアダプターとCPLMレジスターから構成される。各モジュールはエンジニアリング・アプリケーションからシステムにアクセスすることとなる。全ワークフローリストを検索したのち、インテグレーターはシステム内ワークフローのノードである割りあてられたタスクのチェックを行う。そのアプリケーションで作業している技術者はインテグレーター（アダプター）によって割りあてられたタスクとともに添付

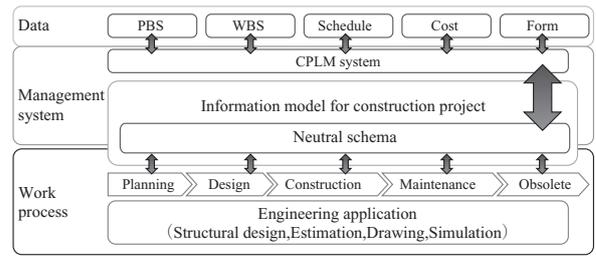


図 - 3 統合フレームワークの概念

ファイルをダウンロードすることができる。次のステップとしてインテグレーター（レジスター）は、技術者の業務成果品をシステムにアップロードし、現行のワークフローへの関連付けの援助を行う。最終的に、インテグレーター（レジスター）は現行ノードを終了し、ワークフローモデルにおける次のタスクへと進む。インターネット上の情報システムをもとにインテグレーターを開発することで、ウェブクライアントを利用したりシステムの通常のローカルベースなクライアントを利用したりする複雑な作業をすることなく、技術者間での円滑なエンジニアリング・データの受け渡しが可能となる。さらには、図 - 4に示すようにインテグレーター内のデータ交換プロセスを自動化することによって、建設プロジェクトすべてに関わるエンジニアリング・データおよびプロセスの統合的マネジメントも可能である。

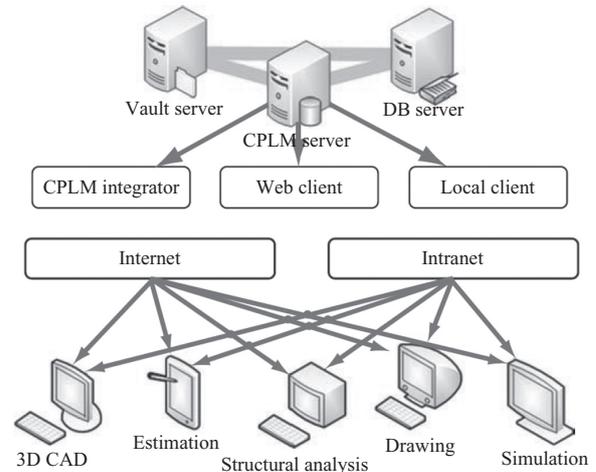


図 - 4 統合フレームワークのシステム構成

4. 仮想現実シミュレーションのための建設プロセスの定義

近年のプロジェクト規模の大型化や新技術採用の増加に伴い、建設プロジェクトにおけるリスク要因が増加してきている。しかしながら多くの建設現場において、リスクマネジメントはマネージャーの経験にもとづく直観に強く依存しているのが現状である。さらに、リスク分析に関わる情報は数学的手法から導き出されたものであるもので実用的とはいいがたい。これらの問題を解決する

ため、本研究において数学的なリスクの度合いを視覚的な情報に変換することで、コスト面、工程面、安全面からより実用的なリスクマネジメント手法への改善を行った。定量化されたリスク情報は4次元CADとリンクしたリスクの可視化シミュレーションシステムに組み込まれ、実用性の検証を行うためのケース・スタディーを行った。

4.1 リスクの程度を定量化するためのリスク分析と4次元CAD

通常、リスク・ファクターはそのリスクの度合いによって優先度が決められ、度合いを定量化するためにさまざまな分析手法が用いられている。定量化のためのリスク分析手法には階層分析法 (analytic hierarchy process, 以下, AHP) やファジー手法などがあげられる。AHPとは、判断の対象となる選択肢を2つ一組として、どちらがよりよいか、どちらを選択するかなどの比較判断を行うことである。ファジー手法とは判断基準を、数学的理論を用いて明らかにする手法である。ファジー関数を用いることで曖昧で不確実な表現の定量化が可能になる。4次元CADシステムでは、工程情報と3次元化された図面を複合させることで工事の作業進捗状況を仮想現実システム上でシミュレーションすることができる。

図-5はリスク分析と可視化されたリスクシミュレーションモデルのセットアップのために必要となるシステムの概念図である。モデルへの入力、アウトプットデータおよびリスクシミュレーションの可視化プロセスが、機能モデリングのための統合的定義 (integrated definition for function modelling, IDEF0) 手法を用いて表現されている。本文で言及する可視化されたリスクシミュレーションは以下の2つのフェーズにより構成される。

- (a) 各アクティビティに対するリスクの定量化と分析
- (b) 4次元CADベースのシミュレーションによるリスクの可視化

前者がAHP、ファジー手法に基づくプロセスを提唱するのに対し、後者は4次元CADと繋がるプロセスを提唱する。

このシステムにおけるプロセスは、本研究で提唱された方法論を基に構築されており、システム開発にあたってはVisual Basic 6.0が活用された。さらにリスクの可視化システム開発のために、AHP分析およびファジー分析

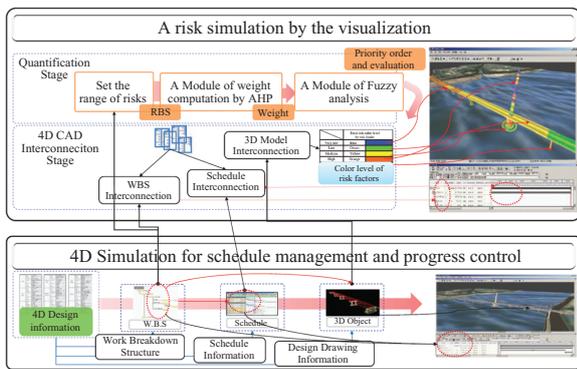
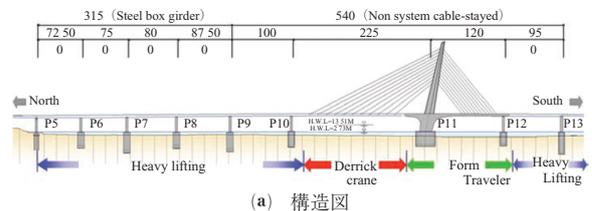


図-5 リスク情報可視化の概念図

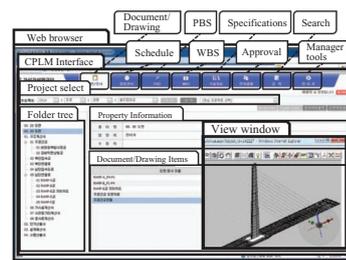
においてC++ベースのモジュールが使用された。AHP分析モジュールなどのシステムの主機能はリスクの定量化、ファジー分析モジュール、優先度分析などのために用いられ、4次元CADシミュレーションシステムモジュールはリスク情報の可視化のために用いられる。

5. 斜張橋プロジェクトにおける試験運用

麻浦区 (Mapogu) および永登浦区 (Yeongdeungpogu) の間に位置するソウル市内の漢江 (Hangang) にあるワールドカップ橋がパイロットプロジェクトとして選ばれた。本橋は斜張橋区間 (540 m) および鋼箱桁、コンクリート箱桁のアプローチ橋からなる幅員 30.7 m, 延長 1 980 m の橋梁である (図-6(a))。仮想現場モデルを含む3次元モデルが作成され、コラボレーションのためのパイロット (試作) ウェブベース CPLM モデルが開発された。



(a) 構造図

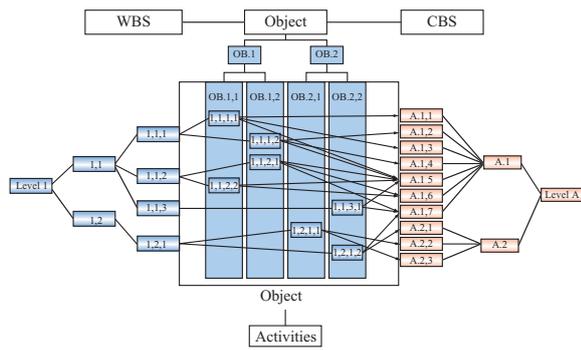


(b) CPLM システム

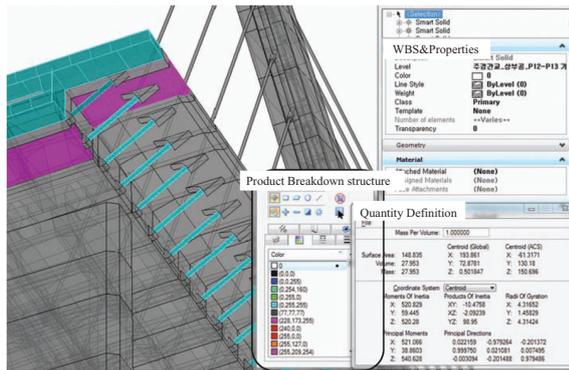
図-6 ワールドカップ橋と CPLM システム

2次元図面から作成されたデジタルモックアップによって複雑な細部の設計検討を実施した。とくに斜材定着部と主塔は詳細なモデルを作成し、部材等の干渉チェックを実施した。デジタルモックアップによる検討報告書によると、橋梁端部における接続部に大きな設計変更が行われるものと想定された。そのため、設計変更時に迅速な対応ができるよう設計検討と2次元図面の準備が進められた。具体的には、開発されたシステムにおいて最新の3次元図面から自動的に2次元図面を作成できるような定義付けなどである。プログラムはCPLMシステムに組み込まれ、断面図や図面に示される製品情報を認識する機能をもつ。

設計における費用区分構成 (cost breakdown structures, 以下, CBS) は、パイロットテストを通じて定義されたWBSに結び付けられる。オブジェクト指向モデルについては、構成要素間のマッピングを図-7(a)に示すように行った。この統合によって4次元シミュレーションツールを用いて5次元シミュレーションを作成することが可能になる。図-7(b)に示されるように、数量に関する



(a) WBS と CBS のマッピング



(b) 3次元モデルを用いた数量算出

図 - 7 3次元モデル

情報と WBS が 3 次元モデルに含まれている。型枠数量算出のためのモデル作成には多くの時間を消費することとなった。

リスク情報分析のためのインプットデータが、ワールドカップ橋プロジェクトでの作業に用いられた。リスク要素の定量的分析の完了にとともに、速やかに結果を得ることができる。結果はリスクの程度によって表現される。リスクはその程度によって 5 段階に分類され、それぞれ異なる色 (青, 緑, 黄, オレンジ, 赤) が割り当てられることで視覚的な判断が可能である。分析結果が 4 次元シミュレーションに反映されると、各リスク基準と関連性のあるすべての 3 次元モデルはそのリスクレベルに応じた配色を施されて表現される。それにより 3 次元モデル上で表現されるすべての構成要素を色によって識

別できる。この情報は 4 次元シミュレーションにも反映されるので、工程によって刻一刻と変化していくリスクレベルの識別も可能となる。可視化されたリスクシミュレーションは、リスク要因とそれに対する解決法の選択肢を提供する機能も持っている。

6. おわりに

橋梁プロジェクトにおける効率的な連携作業環境を提供する統合的 3 次元モデルは、設計、建設および維持管理の一連のプロセスに必要なものである。本研究によって建設マネジメントの観点から、BIM の施工初期段階における有効性が実証された。

本文では 3 次元モデルをもとに CPLM システムが提唱され、その主概念が説明された。デジタルモックアップと設計精度向上のために WBS と PBS を導入し、3 次元橋梁モデルを構築した。施工前の設計検討として干渉の有無のチェックを行った。実作業を進めるに伴い発生しうる問題を特定し、解決法を導いた。このようなアプリケーションによって工期短縮や試行錯誤による手戻りなくなり、コスト削減効果が期待される。

以上から、橋梁工事における BIM の適用はリスクの低減および建設マネジメントに大きく貢献するものといえる。本研究で開発されたリスクの可視化システムは、リスクを適切に定量化するだけでなく、既存の数学的手法による表現の可視化を実現し、意思決定ツールとして広く一般的に普及できるものと期待される。4 次元オブジェクトはリスク情報の利用によってさらに実用化の幅を広げることができる。

原典

Chang-Su Shim, Kwang-Myong Lee, James Hwang and Yonghan Kim : Three-Dimensional Information Model - Based Bridge Engineering in Korea, Structural Engineering International 1/2012, pp8-13

【訳者注】

訳者注*1: IFC-BRIDGE とは、フランスの SETRA (Service d' Etudes Techniques des Routes et Autoroutes : 道路及び高速道路技術研究所) が中心となって開発した橋梁一般を対象とする BIM モデル。

【2015 年 7 月 9 日受付】