

## 包装アーカイブス

### 輸送環境調査の今昔

#### 1. はじめに

輸送環境に適合した包装を開発するためには、輸送環境と対応した包装貨物試験規格がなければならない。輸送環境は年々歳々変化し続けるものであり、試験規格もこの変化に追従して、変更する必要がある。そのためには数年に一度は輸送環境調査（輸送試験）を行って、その時々々の輸送環境にマッチした試験規格を策定することが必要となる。

輸送環境調査の手法の基本部分は、50年前から変わっていない。大きく変わったのは、調査に利用する計測装置／機器類と、解析に利用されるコンピュータの進化である。計測装置／機器類が進化したことにより、データ採取及び読み取りは非常に簡単になった。また、入手できるデータの質と量についても、飛躍的なレベルアップが実現した。採取したデータの解析も、パソコンを利用して簡単に実施できるようになった。

上記した機器の進歩のおかげで、輸送環境調査に関する基本的な知識が無くとも、それらしいデータを得ることができるようになったため、十分な基礎知識を持たないまま輸送環境調査を実施して包装貨物試験の規格策定を行っている場合があり、誤った理解に基づいて実輸送とはかけ離れた試験規格を作成してしまう例や、不適切な規格のせいで無駄な包装を行っている例が散見される。

本稿では、我が国で輸送環境調査が行われ

るようになって間もない黎明期に、どのような計測機器が使われ、どのようにして輸送環境調査が実施されたのか、先人がどのようにして必要な知識を習得し、規格の作成を行ったかの一端を紹介する。これから輸送環境調査を行おうという技術者諸君に、十分な知識の必要性を認識して頂ければ幸いである。

#### 2. 輸送環境調査の必要性の認識

日本の民間企業が輸送包装に注力し始めた1965年頃といえば、発泡ポリスチレン（EPS）が包装用緩衝材として使われるようになったばかりで、最先端の包装技術が採用されていた家電品の包装でさえ、木箱と木毛の包装から段ボールとEPSの包装への切り替えが行われ始めた時代であった。それまで使われていた自然素材の緩衝材が、石油化学由来の素材であるEPSに変わっても、現場の包装設計者はそれまでの経験に基づいて試行錯誤による包装開発を行っており、緩衝設計の理論体系といえるものは存在しなかった。

米国では時を遡ること20年の1945年に、ベル電話研究所のRaymond D. Mindlin氏がDynamics of Package Cushioning<sup>1)</sup>という研究論文を発表した。この論文は、それまで確立されていなかった緩衝設計のための理論的な根拠を明確にしたものとして、米国の技術者に広く受け入れられたが、日本にこの情報が広く知られるようになったのはかなり遅く、1964年になって豊田、渡辺両氏による論文の解説書<sup>2)</sup>が「包装と材料」誌に掲載されて初めてこの情報が一般に知られることになった。

## 包装アーカイブス

この解説書は元の論文の内容を伝えるだけでなく、その周辺知識についても分かり易い説明を加えたもので、当時の技術者の多くは、この解説書によって緩衝設計に関する基礎理論が存在すること、この理論に基づいた数値解析を行えば最適緩衝設計ができる可能性があること、適正包装設計のためには試験方法と試験条件についての十分な理解が必要であることなどを知るようになったのである。

適正な緩衝設計を行うためには図1に示すように、製品の強さと外力の大きさが判っていなければならない。製品の強さについては原則として製品設計者が作成する包装設計依頼書に(信頼性は別として)記載されており、包装材料のデータに関しては、材料メーカーに依頼してデータを提供してもらうことで対応が可能であったが、輸送環境データに関しては、それが包装設計条件決定の大元であるにもかかわらず、自社で計測したデータを保有している企業はほとんど無く、試験規格に

関しても頼るべきものは JIS しかないという状況であり、また社内規格が存在する場合も根拠が明確でないものが殆どで、輸送事故が生じるたびに試験項目が変更・追加されるという状況にあった。先進的なメーカーでは海外の規格などを参考にして社内規格の見直しを行おうとしたのだが、基礎となる国内の輸送データが存在していないという状況では見直しもままならないということが判り、自力で輸送環境調査を行う以外にデータの入手方法がないということで、一部メーカーが自社スタッフによる物流環境調査を行い始めたのである。

その当時、輸送環境計測のやり方や解析方法に関して参考となる文献<sup>3) 4)</sup>は非常に少なく、計測データが発表されている文献<sup>5)</sup>もほとんど無いに等しい状況であった。発表されているデータも荷扱い衝撃に関するものは殆ど無く、国内の輸送機関の荷台振動に関しては振動周波数と加速度値(ピーク値か RMS 値かは不明)のみ、しかも数少ない発表データは総て同じもので、日通総研が調査した計測結果が転載されているという状況であった。そのため輸送試験は試行錯誤の連続で、失敗を繰り返す事によって知識を蓄積するという方法で推進することになった。

輸送環境調査は衝撃計測と振動計測で、実施方法、使用する計測機器、解析方法等が大きく異なっている。そのため、両者を個別に採り上げることにし、まず荷扱いによる衝撃計測から話を進めようと思う。

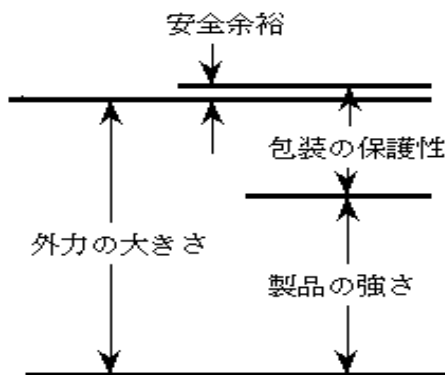


図1 製品強さ、外力の大きさ、包装の保護性の関係

## 包装アーカイブス

### 3. 衝撃計測を目的とした輸送環境調査

当時、衝撃計測を目的とした輸送環境調査では、機械式の輸送用小型衝撃記録計が利用された。輸送用小型衝撃記録計には、記録用紙を時計で送る方式のもの（時計送り記録計／図2）と、衝撃が加わると衝撃値の記録が行われると同時に記録用紙が送られる方式のもの（衝撃送り記録計）の2通りが存在した。この2種類の機器は、それぞれ全く異なる特徴を備えている。

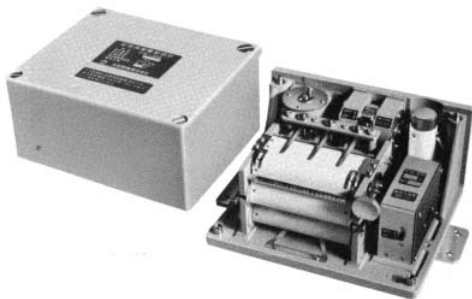


図2 輸送用小型衝撃記録計  
(3方向、時計送り)

時計送りの機器では衝撃発生時刻の特定ができるので、輸送ルートと経由時刻の情報と衝撃記録の関係を調べることによって、衝撃発生地点の特定とそこで生じた衝撃の大きさの把握は可能であるが、紙送りの早さが遅いため、1分程度の間隔で生じた衝撃は一つの衝撃であるかのように記録され、具体的な衝撃の発生状況が把握できない。

これに対し衝撃送りの機器では衝撃が発生した状況は把握できるが、発生時刻が記録できないため、輸送ルートの情報と衝撃記録の関係を調べることによって発生地点を特定し

ようとしても、各衝撃の発生地点の特定はできないという問題があった。

衝撃発生状況と発生時刻双方のデータを知るために、一つの試験品に両方の測定器を組み込んで試験を行う方法もあるのだが、計測器だけで重量が3kg程度になってしまい、大きな試験品でないと取り付けができないことと、データ解析の手間が2倍以上に増えてしまうことなどのためにこの方法が採用されることは少なく、どちらか種類の記録計だけで計測を行うのが普通であった。そのため、当時の輸送環境調査で計測したデータの精度は、近年の計測器を利用した環境調査に比べれば、かなりレベルが低いというのが実態であった。

データ解析の方法についてもいろいろな問題が生じた。具体的には機械式衝撃記録計の読み取り、一つの落下データと次の落下データの境界の判断、稜・角落下の解析方法、加速度データから落下高さへの変換及び、落下高さや発生回数との関係の解析方法である。機械式衝撃記録計では衝撃データはワックスを塗ったスタイラスペーパーという記録紙上に記録される（図3参照）。記録感度は50G

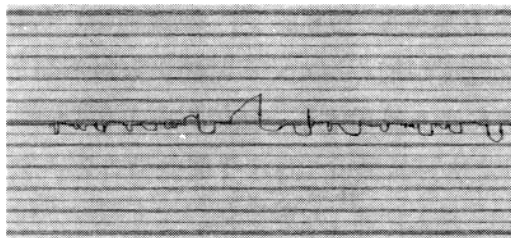


図3 スタイラスペーパーの記録の例  
(1方向、衝撃送り)

## 包装アーカイブス

用の場合で2mm/10Gだから、発生加速度を正確に読み取るのは困難である。読み取り精度を上げるため、大倍率のルーペを使用したり、拡大スコープを使用することで対応したが、計測器に過大な外力が加わったときゼロ点ズレが生じることや、記録紙への記録される線の太さが十分細くはないことなどの問題を解決することはできず、結局十分な読み取り精度を得ることはできなかった。

落下データと落下データの境界の判断は、非常に困難であった。一回の落下データは、包装品が床面に接触したときの衝撃の波形（加速度波形とは全くお別物である）だけでなく、その後のリバウンドや転倒の衝撃の波形も記録する。落下方向や高さによって、一回の落下によって生じる波形データの数は異なったものとなるため、どの波形からどの波形までが一組のデータなのかを判断することは、非常に困難であった。この判断を正確に行うためには、いろいろな高さからいろいろな方向の落下を行って落下時の波形モデルをリスト化しておき、輸送試験で得られたデータをこのリストとつぎあわせて判断する以外に方法がなく、非常に手間がかかることであったが、かなりの精度でデータを解析することが可能となった。

稜・角落下の解析については次のような問題があった。落下が面落下である場合には、最大衝撃は落下時点で生じるので、その衝撃を換算したものが落下高さで判断すれば問題ないのだが、稜落下や角落下では図4に示すように、地面への衝突時に生じる衝撃よりも、その後の転倒時の衝撃の方が大きいため、転

倒による衝撃を落下高さで誤認する可能性が高い。また記録計の紙送り方式がラッチ機構であるため、衝撃の状況によって送り幅が大きく変わることがあり、同じ衝撃が加わった場合でも記録波形の見かけが大きく異なったものになることがある。その対応策として、落下角度をいろいろ変えて等価落下試験を実施し、同じ条件のデータを繰り返し測定することにより、どのような姿勢で落下したときにどのような記録波形（上記のとおり衝撃の加速度波形とは全くの別物である）が得られるかを確認し、記録データの分類を行うという方法が考案された。この方法を採用することにより、落下高さ及び落下角度についてもかなりの精度で把握できるようになった。

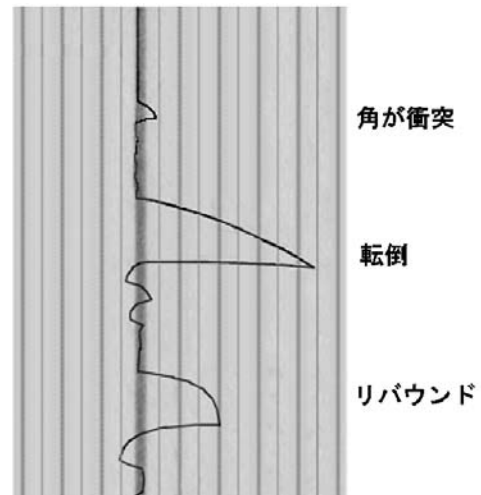


図4 角落下時の記録波形

最大の欠点は、等価落下試験の回数が多くなることと、実データの解析が面倒で時間がかかることであるが、精度を重視するためには仕方がないということで、この方法で解析

## 包装アーカイブス

を行った例は多い。

当時は落下高さと発生回数の関係について、どのような分布になっているかという報告が殆ど発表されておらず、わずかに公開されていた資料<sup>6)</sup>には両者の関係が指数関数で表されると説明されていた。筆者はこれと異なった考えを持っていたため、その当時、数値が公開されていた輸送試験データすべて（合計5組）と、筆者が実測した11回の輸送データ、合計16種類のデータについて、対数正規分布やワイブル分布など各種の分布と、指数関数や無理関数など各種の関数式との適合性を相関係数で比較することにより検証を行い、分布関数としてはワイブル分布、回帰式としては指数関数と無理関数を組み合わせた複合関数の適合性が最も優れていることを確認した<sup>7) 8)</sup>。この結果は日立社内での包装貨物試験制定のための基礎資料として利用されたほか、社外への情報提供などにより、各種輸送環境調査で、データ解析に利用されたという情報も得ている。

輸送中に生じる衝撃を正しく計測するためには、計測器の扱い以外にもいろいろな知識・ノウハウが必要である。当時はそれらの知識やノウハウを得るための解説書が存在しておらず、試行錯誤でやり方を覚える以外に方法がなかった。たとえば、試験に用いる試験品は、実製品ではなく製品を模擬したダミーを使う必要があること（実製品を使用すると共振の影響で正しいデータを得るのが難しい）、ダミーの特性が計測データに与える影響、ダミーの製作のポイントなどを覚え、さらに緩衝材は繰り返し応力を受け手も特性変化を

生じにくいポリエチレン製緩衝材が適していること、受圧面積は最適緩衝効果を示す面積よりも大きくした方がよいこと、包装の外観はどのようにすべきかなど、技術レベルの問題のみならずノウハウに区分される事項まで、当時輸送試験に携わったメンバーは、様々な情報を実地で覚えることになった。

その後各社が独自に自社試験規格策定のための輸送環境調査を実施したが、結果を利用して作成される包装試験規格が社外秘となる性質のものであるため、輸送試験のデータが公表されることは殆どなく、仲間内の情報として「あの会社が輸送試験を行ったようだ」などという噂が時々流れるだけという状況が続いた。衝撃計測を目的とした輸送環境調査のデータが、研究発表会などで一般向けに公表されることは、現在でも非常に少ないというのが実態である。

#### 4. 振動計測を目的とした輸送環境調査

当時トラック等の荷台振動計測を目的とした輸送環境調査で使用された計測機器としては、振動計測機器（振動計又は動ひずみ計）とデータレコーダを組み合わせた大がかりな振動計測システムが利用されていた（図5）。

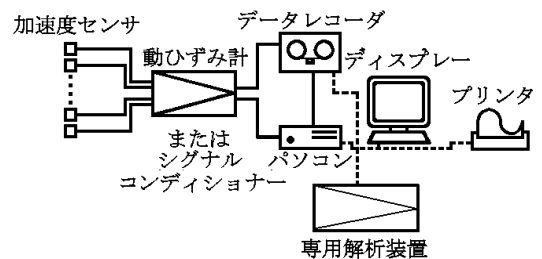


図5 輸送振動計測システム

## 包装アーカイブス

幸いなことに、振動計測機器やデータレコーダなど必要とされる計測機器に関しては、機能や精度など輸入品と比べても遜色ない特性を備えた国産の計測機器が開発され市販されていた(図6、図7)が、輸送試験のやり方、計測器の取り付け位置、データ採取の方法、データ解析法など、基本となる情報は殆ど知られておらず、まず機器の取り扱いを覚えること、測定技術に習熟することなどを目的と



図6 当時使用した動ひずみ計



図7 オープンリールタイプの  
車載用データレコーダ

して、トラックに計測機器を積み込んで、様々なコースを走り回って、機器についての知識に習熟するという段階からスタートせざるを得なかった。そういった状況であったことから、この当時輸送環境調査に取り組んだ技術者は、様々な経験と失敗を積み重ねることにより、加速度センサの取り扱い方、センサケーブルの引き回し、接着材の種類が計測データに与える影響、トラック荷台の計測位置による振動状況の違い、振動計測に伴うトラブル対策のため事前に十分すぎるくらいの準備をしておく必要があることなど、実際の輸送環境調査で必要となる様々な知識を習得していったのである。

輸送中の振動に関しては、1972年ソニーの大場氏が、S-N 曲線を利用して材料の疲労破壊の観点から振動試験条件を決定するという画期的な論文を発表した<sup>9)</sup>(図8参照)。この論文により、振動データに基づく試験規格の決定方法の考え方が明確化された。この論文の基礎となったのは MIL 規格<sup>3)</sup>の中の記述であるが、日本では十分に理解されていなかった内容を、同氏が具体的な内容を含めて発表したことにより、振動に関する輸送環境調

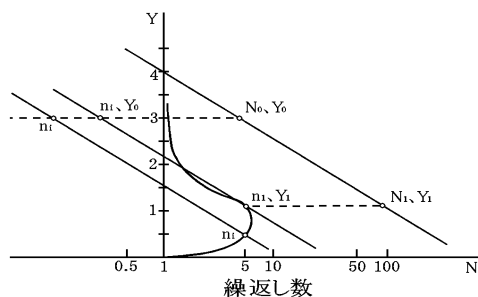


図8 S-N 曲線と疲労蓄積

## 包装アーカイブス

査についても基本的な知識が理解されることになった。

残念なことに、当時の振動試験装置の水準ではランダム加振試験を実施することが簡単ではなかったため、論文の内容も十分な議論を尽くしていなかったが、考え方の方向性は明示されていた。当時の研究者はこの論文に基づいて考え方を発展展開させることにより、実用的な試験規格を制定する方法を模索し新しい考え方を整理していった。現在も行われている振動試験条件決定の方法は、この時期に固まったといえる。

このころ以降、輸送試験の重要さが技術者に認識されたこともあって、輸送中の振動計測に取り組もうとする企業が増加したのだが、振動データの計測には多くの費用と時間がかかることと、計測したデータを利用して振動試験規格を策定するためには、振動と統計と数学に関する知識を備えた技術者が必要であり、上記した要求事項をすべてクリアできる企業はあまり多くないというのが実態であった。この状況は、各企業が若手の優秀な技術者を包装部門に投入するようになった 1980 年代以降改善され、研究成果が発表されるようになった。1980 年代の半ば以降、輸送中に包装品が受ける振動や衝撃に関して、いくつかの見べき研究成果が発表されている<sup>1) 11) 12)</sup>。

筆者が所属していた日立製作所では、1971 年に輸送中の振動計測と試験規格化の研究を開始し、自社製品の輸送ルートでの振動計測と規格化の検討を繰り返した後、1980 年以降、各工場の包装試験規格の見直しを行い、順次

規格の改定を実施していった。

さらに社内の各工場の製品を対象として輸送試験を繰り返し、輸送環境を把握すると共に、制定根拠が明確でない社内の試験規格の改定を実施した。現在の(株)日立製作所の包装試験規格は、この時代に改定した規格がベースとなって継続しているものが殆どである。

### 5. デジタル計測機器の出現と今後の変化

輸送環境の計測手法を大きく変化させたのは、デジタル計測機器の出現である。デジタル計測機器が出現したことで、それまで最大のネックであったデータ読み取りの苦労はなくなり、アナログの時代とは全く異なったデータ解析を行うことにより、輸送環境を高精度で把握することが可能になった。

輸送中の衝撃に関しては、従来の機械式小型衝撃記録計に変わって、デジタル衝撃記録計が登場した。デジタル衝撃記録計は加速度波形をそのまま記録できるだけでなく、衝撃発生の日時を秒単位で正確に記録できると共に、温湿度をも同時に記録することができる。測定可能期間も本体のみで 30 日、外部電池を併用すれば 60 日程度の連続計測が可能である（現時点で動作期間が最長である衝撃記録計は、本体のみで 100 日の連続計測記録が可能である）。また機種によって差があるが、データ解析ソフトに関して、PSD 解析や SRS 解析、落下高さや落下方向などの解析機能を備えている。機種によっては落下中の姿勢の解析まで行えるソフトが添付されている。図 9 に最近のデジタル衝撃記録計の外観を示し

## 包装アーカイブス

ておく。



図9 デジタル衝撃記録計

振動計測に関しては、データレコーダにデータを記録し、ラボでPCを利用して解析を行うというシステム化された計測方法の場合は、計測機器がデジタル化されたことによる大きな変化はないといえる。データレコーダがアナログ記録であった時代も、PSD解析などはアナログデータをデジタル化してから行っていたためである。変わったのは、計測データが最初からデジタル化されているため、アナログ→デジタル変換が不要になって手間が減少したことと、データがファイル化されているため管理が容易になったこと、パソコンが活躍する場が増加したこと位である。但し解析ソフトの機能は大幅に向上しており、従来はできなかった解析が可能になっている。

もう一つの大きな変化は、衝撃記録計のメモリ量が大きくなってきたため、デジタル衝撃記録計で振動計測を行うことが可能になったということである。現在最大記録容量を誇るデジタル衝撃記録計は1GBのメモリを搭

載しているが、このメモリ量はA/D変換：12bit、計測方向：三方向、サンプリングレート：1msを想定した場合、60時間分の振動データを連続記録することができるという大きさなので、荷台の振動計即には十分なスペックを備えているのである。

さらに最近では、GPSとの連動が可能な衝撃記録計が増加しており、GPSを内蔵した衝撃記録計まで登場している。GPSと衝撃記録計が連動すれば、衝撃発生位置と時刻をもピンポイントで把握できる訳であり、輸送中の振動計測も一昔前とは様変わりした状況になっている。

輸送試験データに基づく包装試験基準決定の方法は、ある程度固まったと考えている<sup>1)3)</sup>。今後は定期的に輸送環境の調査を行って、規格の見直しを行うことと、グローバル化が進む中で、海外の輸送環境を積極的に調査することが必要と思われる。これからの若手の活躍に期待するところ大である。

## 6. 参考文献

- 1) Raymond D. Mindlin : Dynamics of Package Cushioning Bell Telephone System Technical Publication monograph B-1369 Oct. (1945)
- 2) 豊田実、渡辺綱紀：緩衝包装の力学的な考え方、包装と材料、8-80 (1964) ~9-96 (1965)
- 3) 星野茂雄、豊田実：緩衝包装設計ハンドブック、日本生産性本部 (1969)
- 4) 国際機械振動研究所編：IMV TECHNICAL



## 包装アーカイブス

- REPORT (1971)
- 5) MIL-Standard-810C : Environmental Test Methods and Engineering Guidance
  - 6) 青木松三 : 試験輸送中に発生した衝撃に対する評価方法、全日本包装技術研究大会予稿集
  - 7) 長谷川淳英 : 流通過程で生じる振動と衝撃データの数式化、第 19 回包装研究発表会要旨集 (1987)
  - 8) Kiyohide Hasegawa : Analysis of Vibration and Shock Occurring in Transport System、Package Technology and Science、2、69-74 (1989)
  - 9) 大場武雄 : トラック輸送の等価再現振動、第 10 回全日本包装技術研究大会予稿集 (1972)
  - 10) 山口誠 : 包装貨物の落下中における衝撃値と落下テスト条件、第 19 回包装研究発表会要旨集 (1987)
  - 11) 河野澄夫 : 輸送シミュレーションの開発と食品輸送技術改善への応用 (1987)
  - 12) 具足島良昭 : ランダム振動導入事例、包装技術、26(19)、991-1001 (1988)
  - 13) 長谷川淳英 : 輸送試験データに基づく包装試験規格の決定、日本包装学会誌、13(2)、71-82 (2004)

長谷川技術士事務所 長谷川 淳英