表面欠陥検査装置の変遷

オムロン株式会社*¹ インダストリアルオートメーションビジネスカンパニー 検査システム事業部

友村 匡

Technological Transition of Web Inspection System

Tadashi Tomomura

Inspection System Business Promotion Division, Industrial Automation Business
Company, OMRON Corporation*¹

Abstract

Web Inspection System has carved a history of about 50 years in Japan. Once the except for the inspection of special paper, WIS which has not been considered less important than the instrumentation, such as QCS, became indispensable important system to making paper now. The manufacturer of new entrants to WIS increase, manufacturer to sell currently in Japan, was about more than 10 companies. There are some strong demands for the quality of the user, the result of competition between WIS manufacturers, performance and function became very well. I will introduce the evolution of WIS technology.

分類：V₂ 紙パルプ工程制御システム，V₃ 紙パルプ工程計器およびセンサ

1. はじめに

表面欠陥検査装置（Web Inspection System 以下欠陥検査装置という）は、国内の製紙業界では1960年頃に東英電子工業が「スポットディテクター」の商品名で発売したのが最初とされる。今でも欠陥検査装置のことをSD計とも表記されるのは、この名残である。1963年に立石電機（現オムロン）も布地の検査向けに欠陥検査装置を開発し、以降製紙業界を中心に約50年の歴史を刻んできた。当初は一部の製品での用途を除き、B/M計等の他の計装機器に対してさほど重要とされていなかった欠陥検査装置も、今ではこれなしでは紙が出荷できないまでに重要な計装機器となった。新規参入するメーカーも増え、現在国内で販売される欠陥検査装置のメーカーは、国内外を合わせて10社以上になった。ユーザの品質への向上心とメーカー間の競争により、性能、機能も格段に向上してきている。本文では欠陥検査装置の技術の進歩と変遷について述べ、今後についても考察してみる。

2. 欠陥検査装置の技術の進歩と変遷（図1）

欠陥検査装置の原理は、紙等のシート上に光を照射し、センサーで黒点や穴等の欠陥と地合い（良品）との受光量を測り、その差をもって欠陥と判定するものである。欠陥検査装置は光学、電子、メカ、制御、コンピューター、ソフトウェア等の様々な技術を組み合わせた高度な総合システムであるが、本章ではその基幹をなすセンサー、光源、データ処理、欠陥判別・分類、検査方式について技術の進歩と変遷について述べる。

2.1 センサー技術

透過光方式の場合は、シート下面（または上面）から光を照射し、シート上面（または下面）で受光することで、欠陥と地合いの透過光量を測り、それに差があれば欠陥とする。投光する光源や受光する素子やカメラ、欠陥判別方法は時代により違いはあるが、この基本原理は不変である。センサーデバイスとしては、CDS、太陽電池、CCDと進化を遂げており、本節ではこれについて述べる。

(1) CDS方式

最初の欠陥検査装置のセンサーは、CDSと呼ばれるフォトレジスタを幅方向に並べたものであった。フォトレジスタは光の強度が増加すると抵抗値が低下する特性を持つ。欠陥がセンサー上を通過すると、光量に変化し、CDSの

*¹〒108-0075 東京都港区港南 2-3-13 品川フロントビル
7 F/Shinagawa Front Building 7 F, 2-3-13 Konan
Minato-ku, Tokyo 108-0075, Japan

図 1 欠陥検査装置の技術の変遷

抵抗値の変化するのを捉えて欠陥検出をする。CDS はその後太陽電池に変わり、この方式は短命に終わった。

(2) 太陽電池方式

CDS 方式と原理はほぼ同じであるが、CDS の代りに太陽電池を並べたもので、立石電機が 1963 年頃に鋳物製のフレームの中に太陽電池を隙間なく並べた欠陥検査装置を開発し、1965 年に大蔵省印刷局（現財務省印刷局）に納入した。その後、写真 1 に示すユニット化した検出器（形 KZ 20 T 5・KZ 20 R 5）を開発。太陽電池は薄板状の素子のため、CDS に比べて幅方向に隙間なく並べることができ、図 2 に示すアナログの差動アンプ回路で欠陥検出をしていた。後年 CCD カメラ方式が開発されそれが主流となっても、太陽電池方式は安価で故障も少ないこともあってロングセラーとなったが、1980 年頃には太陽電池の生産中止とともに惜しまれつつも姿を消した。

(3) 回転ミラー（フライングスポット）方式

1970 年頃から主に鉄鋼の擦り傷の検査を目的に、図 3 に示す回転ミラー（フライングスポット）方式という、レーザー光を高速で回転するミラーを貼り付けた多面体に反射させ、シートの全幅にレーザー光を照射し、その反射光を太陽電池等で検出する欠陥検査装置があった。この方式は

東芝、安川電機、富士写真フィルム等の各社から発売されていた。製紙業界では、コーターマシンで発生するストリーク欠陥の検出に使われた。ストリーク欠陥は、地合いと濃さがほとんど変わらず幅も狭いことから、太陽電池方式ではほとんど検出できなかった。ストリーク欠陥は印刷前では視認はかなり困難であるが、印刷後はインクがのらないために、細いスジ状になった印刷抜けがはっきりと視認できる。これを検出するために、東英電子工業は回転ミラー方式で対応した。しかし、回転体の機械的安定性が低く、この方式は製紙業界では多くは普及しなかった。

図 3 回転ミラー方式

写真 1 太陽電池式検出器（立石電機製 形 KZ 20 T 5・KZ 20 R 5）

図 2 太陽電池式検出器回路

(4) 振動ミラー（フライングイメージ）方式

1970年頃に立石電機は、図4に示すフィルム検査向けに振動ミラー方式の欠陥検査装置を開発した。製紙業界向けには、コーターマシンの塗布抜けやストリーク欠陥検出にこれを応用し、十條製紙（現日本製紙）石巻工場に納入した。レーザー光をシェーバーの剃り刃のように振動するミラーに照射し、その反射光を写真2に示す検出器で検出するものであった。回転ミラー方式よりは構造が簡単ではあったが、それと同じく機械的安定性が低く、この方式も多くは普及しなかった。

(5) CCDカメラ方式

今やすっかり身近になったCCDデバイス（Charge Coupled Device）は、1970年に米国ベル研究所の研究者らによって発明された。国内では1975年頃から日本電気、ソニー、松下電器産業（現パナソニック）、東芝、沖電気工業等の大手電機メーカーが様々な用途のCCDカメラやCCDデバイスをこぞって開発した。

欠陥検査装置では1977年には、早くも立石電機が写真3に示すラインCCD式カメラ（形KZD-10X）を開発し、1号機を大日本印刷王子工場に、製紙業界では十條製紙石巻工場に納入した。CCDカメラの原理は、すでに多くの論文等で述べられているので本稿では省くが、基本原理は当時も今も変わっていない。最初のラインCCD式カメラは256bit 2.5MHzであり、製紙業界では8Kbit 320MHzのカメラが用いられることもある今と比べると、非常に分解能が低いカメラであった。表1にCCDカメラの仕様の進化を示し、図5に分解能の進化を示す。それまでの太陽電池方式より検出能力が向上しただけではなく、太陽電池では欠陥があるとしかわからなかったのが、CCDカメラ

によって欠陥の濃さと大きさの組み合わせで欠陥を分類できるようになったのは、画期的なことであった。立石電機は「CCDカメラを用いた欠陥検査装置用の開発」で、1982年に第10回佐々木賞を受賞。この後CCDカメラは、多ビット、高速走査、多波長へと進化を遂げることになる。

(6) 三板式カラーカメラ

1995年にオムロンは、大日本印刷と共同でフルカラー印刷検査装置（DOPRIME）を開発。それに使用するカラーCCDカメラは、高嶋技研と富士写真光機と開発した。このカメラは図6に示すような、高精度のプリズムで赤・緑・青に分光する三板式で、専用レンズとの組合せで光学性能は非常に優れていたが、非常に高価であった。後にオムロンは、製紙業界向けでは恐らく世界初のカラー欠陥検査装置「カラーエイジ」を開発し、1997年にはリンテッ

写真3 CCDカメラ（立石電機製 形KZD-10X）

写真2 振動ミラー方式検出器（立石電機製 形KZD7V1）

図4 振動ミラー方式

表1 CCDカメラの仕様の進化

	年代	1977		1980		1990		2000		2010	
モノクロ	カメラ形式	10X	50X	N10X	100X	N50X	N200X		S200/400X		M400/800X
	bit数	256bit	2048bit	256bit	1024bit	4096bit	2048bit		2048/4096bit		4096/8192bit
	走査周期	2.5MHz	2.5MHz	2.5MHz	15MHz	15MHz	32MHz		60MHz		320MHz
カラー	カメラ形式						KPF510	C200X	C240/440X	T240/440X	
	bit数						2048bit	2048bit	2048/4096bit	2048/4096bit	
	走査周期						20MHz	25MHz	40MHz	80MHz	
IR	カメラ形式										QIR280/480X
	bit数										2048/4096bit
	走査周期										80MHz

図 5 CCD カメラの走査周期と流れ分解能 (500 m/min)

図 6 三板式カラーカメラ

図 7 3ライン式カラーカメラ

ク土居工場に1号機を納入した。三板式カラーカメラも新たに自社開発したが(形KPF-510)、モノクロと比べるとシステム価格が約1.5倍と割高であったのと、走査周期が2Kbit 20MHzと遅く、このカメラは印刷検査以外では多くは普及しなかった。

(7) 3ライン式カラーカメラ

2007年にオムロンは、日本製紙石巻工場のアドバイスを得て「スーパーNASP」を開発。続いてカラー検査機能も搭載し、同社伏木工場にカラータイプの1号機を納入した。これ以降、製紙業界では他業界に先駆けてカラー検査の導入が急速に進んだ。上質紙以外にも、ライナー紙、白板紙にカラー検査装置の導入が進んだのはこの頃である。図7に示す3ライン式CCDカメラ(形KZD-C 200X)は、従来の三板式より安価で2Kbit 25MHzと走査周期が速く、NED社のカメラをベースにして開発された。その後、カナダDALSA社のカメラをベースとしたものに変更され、4Kbitカメラもラインアップされた。(形KZD-C 240X・440X) 2Kbit 40MHzに走査周期もあがり、さらに高速ラインでの検査が可能となり、製紙業界でのカラー検査の導入がさらに進んだ。

(8) 現在の三板式カラーカメラ

製紙業界では、3ライン式カメラの登場でカラー検査化は急速に進んだが、カッターやワインダーのような後工程のオフライン機は、加速と減速を繰り返すために、ライン速度に急激な変化がある。CCDの赤・緑・青のセルが流れ方向に並んでいるために、走査ポイントの位置が異なる3ライン式では、ライン速度を瞬時に認識し、その速度に合わせたライン合成処理を行い、3色を合成することで画像を得る。理論上はぴたりと合成された画像になるはずであるが、シートに不規則なバタツキやうねりがあると、完全に3色を合成できずに、画像ににじみが発生することがあった。これは、色ずれ現象と呼ばれる。色ずれ現象が起きると、欠陥画像の見栄えだけでなく欠陥の大きさの誤判別につながることもある。合成処理アルゴリズムの精度向上で色ずれ現象の発生確率はかなり改善されたが、完全にはなくなる。

そこで、同じ走査ポイントからの入射光をプリズムで3色に分光するためにライン合成処理が不要で、そのために色ずれ現象が全く発生しない三板式が再び注目を浴びるようになった。オムロンは、JAI社の三板式をベースにしてこれを開発した(形KZD-T 240X・T 440X)。前述した

ように1990年代の三板式はコストや走査周期に課題があったが、このカメラのコストはほぼ3ライン式と同等、走査周期は2 K 80 MHzと3ライン式以上に改善され、今では三板式が標準的なカラーカメラとなっている。王子板紙（現王子マテリア）祖父江工場と共同でフィールドテストを行い、加減速時に色ずれ現象が全く発生しないことを検証し、2012年に同社大分工場に1号機を納入した。

(9) 近赤外線カメラ

特にリチウムイオン電池のセパレータでは、導電性のある金属異物が表面に付着し、または内部に混入すると、電池容量の低下、寿命の低下、爆発や火災の恐れがある。また、電子部品を製造する工程で使用するシートにおいても、シートに付着した金属異物が電子部品に転写すると、金属により短絡がおき、動作不良や焼損に至る場合がある。しかし、従来からの欠陥検査装置では、金属異物の存在は検出できても、有害欠陥の金属異物と無害欠陥の非金属異物との見分けはできなかった。金属を構成する自由電子の存在から、金属は図8に示すように近赤外光も可視光も同様に反射し、非金属は図9に示すようにそれらの反射率が異なる。オムロンはこのことに着目し、金属判別機能を有する欠陥検査装置を2014年に開発した。セパレータや電子部品用途の機能性フィルムや機能紙に導入されており、最新技術として注目されている。

2.2 光源の変遷

光源はセンサーに比べると地味な存在であるが、欠陥検査装置においては重要なデバイスであり、電球、蛍光灯、LEDと進化を遂げた。21世紀になり省エネや有害物質廃止に世間が注力するようになり、急速にLED化が進んだ。本節ではこれについて述べる。

(1) 電 球

発熱電球は1860年頃に英国人スワン（有名なエジソンではない）によって発明された。白熱電球の点灯の原理は本稿では省くが、欠陥検査装置ではより明るい光源を得るために、ガラス球の内側にアルミニウムを付着させて反射鏡としたレフランプや、ガラス球の中にハロゲンガスを封入したハロゲンランプを当初から使用していた。さらに、水銀とハロゲン化金属の混合蒸気中でのアーク放電を利用した高輝度のメタルハライドランプを使用することもあった。

坪量の大小や紙の色の濃淡の差が大きい時は調光が必要であるが、電球は電圧を変えることにより容易にリニアに幅広く調光できること、安価であることから欠陥検査装置では多く用いられた。電球は幅方向にいかに密に並べても、欠陥検査装置で求められる連続した線光源にはならず、点光源にしかならない。そのために光を拡散させる必要があり、すりガラスやガラス面に乳白層を塗布したオパールガラスを発光前面に設置して、できるだけ光を均一に拡散させ、線光源に近づけていた。かなりの数が普及した電球ではあったが、政府の省エネ政策により2008年に国内では電球は生産中止となり、電球を使用した欠陥検査装置の光源は姿を消しつつある。

(2) レーザー

今では医療や金属加工等、日々の生活でも身近になったレーザーであるが、初期の欠陥検査装置でもレーザー光を使用していた。レーザー光の直進性を生かして、前述した回転ミラー方式や振動ミラー方式の光源として用いられたが、取り扱いが面倒であったため次第に衰退していった。今でも、鉄鋼やフィルムの検査ではレーザー光を使用している例はあるが、製紙業界ではほとんど見かけなくなった。

(3) 蛍 光 灯

蛍光灯の発光の原理は以下の通りである。負極に電流を流して予熱して高温にすることで、エミッターから電子を放出して正極に飛ばし、ガラス管内にアルゴン等の不活性ガスと共に封入された水銀と衝突する。電子に衝突された水銀は紫外線を発生し、ガラス管内壁に塗布された蛍光体に反応して可視光線を発生する。この蛍光体の調合を変えることにより、白色、青色等の蛍光灯の光の色（波長）を変えることができる。管長や管径を変えて、消費電力や光量を変えることもできる。欠陥検査装置では、一般的の事務所で使用する直管の白色蛍光灯より1.5～2倍の光量を得られる、図10に示すガラス管内に直線状に反射膜と蛍光体を塗布しないアパーチャ形や、図11に示す蛍光体のみを塗布しないリフレクタ形を使用することが多い。特殊な用途として、蛍光染料を含む塗工紙の塗工抜けやむらを検出しやすくするために、蛍光染料に発光するブラックライトや複写機灯（いずれも300～400 nm程度の紫外線を発する）を使用することもあった。紫外線カット透明フィルムのピンホール検査用には、殺菌灯（253.7 nmの紫外

図8 金属欠陥の波形

図9 非金属欠陥の波形

図 10 アパーチャ形

図 11 リフレクタ形

線)を使用することもあった。

蛍光灯は目にはわからない高速で点滅灯を繰り返しているが、CCD カメラはそれよりさらに高速で走査するために、滅灯時に走査すると誤検出する可能性がある。それを防止するためとさらに光量を明るくするために、40~50 KHz 程度の高周波点灯電源で点灯させる。電源出力電圧を変えることで調光することもできるが、その範囲は70~100% 程度と狭い。そのため、カメラのレンズの絞り羽根を自動的に動かして光量を変える自動絞りレンズや、CCD 出力を自動的に増減幅する AGC (Auto Gain Control) 機能付きカメラを使用することが多かった。蛍光灯は電球と異なり端部を除くと線光源のほぼ均一な光源であり、安価で交換も容易であったことから、欠陥検査装置でも多く使用された。しかし、有害物質である水銀を封入していることから、2010 年頃から徐々に製造が規制されてきている。国内大手蛍光管メーカーでは、すでにアパーチャ形もリフレクタ形も生産中止しており、欠陥検査装置で新たに蛍光灯を使うシステムはわずかとなった。

(4) LED 光源

1996 年に白色 LED が発明され、その後照明用の高輝度白色 LED が開発された。欠陥検査装置の光源の交換寿命が、蛍光灯の約 3,000 時間に対して、LED は約 4 万時間(使用条件・環境により異なる)と、LED は長寿命であるのと、高い発光効率が特長である。政府の省エネ政策や有害物質廃止の推進から、電球や蛍光灯が生産中止されていったことや、また年々高輝度の LED 素子が開発されていったこともあり、今では欠陥検査装置の光源としては最も一般的となっている。LED 光源を国内の製紙業界向け欠陥検査装置で初めて使用したのが米国コグネックス社(現アメテック社)で、当初はお椀型の反射板の中央に LED 素子を埋め込んだように配置したものだったと記憶する。メーカーによって詳細の構造は異なるが、今では図 12 に示すように LED 素子を基板に実装し、集光レンズや拡散フィルムで照度を保ちながら均一な光を照射できる構造となっている。

(5) ファイバー光源

さらに明るく幅方向に均一に連続した光源として、ファイバー光源がある。図 13 に示すように照明器に内蔵したハロゲンランプ、メタルハライド、LED 等を光源とし、ミラーで集光してファイバーで光伝送する。ファイバー出口

図 12 LED 光源

図 13 ファイバー光源

側の端面を 1 本ずつ平行に並べて接着することで、平行光に近い線光源を作っている。ファイバーの接着や研磨に手間がかかり非常に高価なために、検査物の幅が狭く、より平行に近い光線が有用な欠陥の検査以外にはコストメリットがないため、欠陥検査装置での使用例は少ない。

(6) 斜め光源

一般的な検査方式である反射方式や正反射方式では検出しづらい、シワやカタのような欠陥を検出しやすくした光源が斜め光源である。詳細の構造はメーカーにより異なるが、図 14 に示すようにシートのエッジ側から幅方向に向けて光を照射し、わずかな凹みやふくらんだ欠陥に影を作って検出しやすくしている。特定の欠陥をターゲットとする光源であり、導入事例はまだ少ない。

2.3 欠陥判別・分類の変遷

欠陥検査装置は、カメラからの出力から欠陥だけを地合いと判別し、さらにそれを欠陥種毎に分類する。初期の欠

図 14 斜め光源

陥検査装置では、欠陥の明暗、濃さ、大きさのパラメータのみで地合いとの判別と欠陥分類を同時に行うものであった。今の欠陥検査装置は、1次処理で欠陥だけを地合いと判別し、2次処理で何種類ものパラメータを組み合わせで多数の欠陥種に分類できる。最近では、欠陥名称まで判定して、それが有害欠陥と無害欠陥とへの分類もできるようになり、品質向上と歩留り向上にさらに貢献している。

(1) アナログ判別

前述したように初期のCDS方式や太陽電池方式の欠陥検査装置は、差動アンプ回路で欠陥を判別していた。その後CCDカメラ方式に変わるが、図15に示すように、CCDからのアナログ出力に直接回路上でしきい値をかけ、そのしきい値にかかった欠陥の幅を求めて、欠陥判別と欠陥分類を同時に行うというやり方をしていた。カメラ内部の回路で欠陥判別・分類して、カメラ出力は欠陥種毎にトランジスタ出力するタイプと、制御盤内の処理ボードの回路で欠陥判別・分類するタイプとがある。アナログでは、今のデジタル処理のように、多数のパラメータで細分化して多

数の欠陥種に分類することはできなかった。欠陥検査装置が言わば「モールス信号からラジオに変わった。」

(2) 欠陥画像表示(欠陥自動録画)

欠陥を自動で欠陥種に分類するものではないが、人の目によって欠陥分類を助けるものとして、写真4に示す欠陥自動録画システムがある。このシステムは図16に示すように、CCDカメラの欠陥出力をトリガ信号とし、エリアCCDカメラのシャッタを切って欠陥を撮像し、その画像を保存・再生するものである。従来の欠陥検査装置では明欠陥と判別できたが、貫通穴も貫通していないスケ欠等も同じ明欠陥と判別され、現物の製品を見なければ区別ができなかった。感熱紙原紙に貫通穴があった場合、次工程のコーターで塗工液がその穴から抜けてロールに転写し、それがさらに製品に転写して大量の不良紙を作るので、原紙には確実にパッチをあてる処置をしなければならない。欠陥自動録画システムで撮像した欠陥画像を確認することで、現物の製品を見なくても貫通穴か貫通していないスケ欠陥かが予め区別でき、作業効率が大幅に改善された。

欠陥自動録画システムは、車のナンバープレートを撮影することで所要時間を表示するシステムのために、オムロンが開発した高速シャッタカメラ(形PJLG-51)を用いた。欠陥検査装置で画像が見えるようにしたのは恐らく世界初で、三菱製紙高砂工場の発案でオムロンと共同開発し、1989年に同工場に導入。1994年に「欠陥自動録画システムの開発」で第22回佐々木賞を三菱製紙とオムロンが共同受賞した。欠陥検査装置が言わば「ラジオがテレビに変

図 15 アナログ判別

写真 4 欠陥自動録画システム

図 16 シャッタカメラ方式

わった。」

しかし、シャッターカメラ方式は、欠陥検出用のカメラとは別にその下流に撮像用のシャッターカメラを設置しなければならず、欠陥検査装置のフレームの下流に広い設置スペースが必要で、すぐには多くの導入は進まなかった。その後、欠陥検査装置の CCD カメラの 1 スキャンの波形を流れ方向に連続してメモリすることで、画像を表示できるようになる。これで設置スペースの制約はなくなり、一気に欠陥自動録画システムの普及は進んだ。約 25 年経過した今では、画像表示は当たり前で、さらに、欠陥自動録画システムのように、人が欠陥画像を見て欠陥種を分類しなくとも、自動的に欠陥種に分類できるようになっている。欠陥自動録画システムで培った技術は、次代のデジタル判別に生かされている。

(3) デジタル判別

1990 年代後半になって、欠陥検査装置の判別処理がデジタル化される。国内の製紙業界に初めてデジタル化した欠陥検査装置を納入したのは、東芝エンジニアリングまたはコグネックス社であると言われている。欠陥検査装置が言わば「アナログ放送から地デジに変わった。」デジタル判別は CCD カメラから出力されたアナログ信号を明暗に $-128 \sim +128$ 階調のデジタルデータ化し、それに対して微分、積分、連結、輝度累積、流れ加算、十字フィルタ等の様々な画像処理演算を加えることで、地合いに比べて欠陥だけをより強調し、欠陥として判別・分類しやすくしたものである。これにより、淡欠陥やスジ欠陥等の検出能力が格段にあがり、多数の欠陥種に分類もでき、欠陥種自動判定も可能になった。メーカーによって画像処理演算のやり方に違いはあるが、今では国内で販売されている欠陥検査装置の大半は、デジタル判別を搭載している。

(4) カラー判別

前述したデジタル処理はモノクロであったが、1990 年代前半にはカラーデジタル処理も可能になった。色は色相・明度・彩度の三属性で構成され、その組み合わせで人の目に色として映る。それをカラー CCD カメラでは、赤・青・緑の 3 色に反応する CCD でそれを再現する。したがって、カラー判別ではモノクロ判別の 3 倍のデータ量を

扱う必要があり、高速ラインの多い製紙業界での欠陥検査装置では、かつてはその処理が追い付かなかった。1999 年にオムロンは、製紙業界向けにカラー検査装置「カラーエイジ」を開発。2007 年に「スーパー NASP カラー」としてリニューアル。画像は 3 色のフルカラーであるが、欠陥判別は特殊なグレースケール変換処理（カラーグレー処理）を用いることで、製紙業界の欠陥検査装置で求められる処理時間を実現した。高速ラインで色判別ができるようになったことで、赤色の欠陥とその他の色の欠陥とで不良とする欠陥の大きさの基準を変えられることや、写真 5 に示すように、淡色の欠陥や地合いの色と同系色の欠陥の検出能力があがり、食品、薬品用途の白板紙、ライナー紙や色上質紙の検査で一気に導入が進んだ。

さらに、従来の色判別は、赤・青・緑各色のそれぞれに数値で色判定値を入力しなければならなかったが、色相・明度・彩度を図 17 に示すような色パレットで視覚的に再現し、これを見ながらマウスで色範囲を選択するだけで色判定値が決められ、簡単に色設定ができるようになった。最近では、検出能力の高さを理由に、印刷用紙や新聞紙にもカラー検査は導入されてきている。欠陥検査装置が言わば「白黒テレビからカラーテレビに変わった。」2015 年に「カラー検査装置」で第 43 回佐々木賞をオムロンは受賞した。

2.4 データ処理技術の変遷

欠陥を検出し分類した後にマンマシンを担うのが、データ処理である。初期の欠陥検査装置は、欠陥を検出するとリレー回路でブザー鳴動、表示灯を点灯、マーカを動作させるだけのものであり、感度設定もアナログのボリュームであった。リレー回路が小型 PLC (Programmable Logic Controller) に変わり、感度設定は簡易キーと液晶パネルでできるようになったが、基本的な機能には変わりはない。その後マイコンやパソコンに変わり、様々な情報をユーザに提供でき、複雑な設定も可能になった。本節ではそれについて述べる。

(1) マイコンによるデータ処理

1970 年頃になるとマイコンが普及し、オムロンでは欠陥検査装置に 8 bit のマイコンボード（形 OMRAC-810）

写真 5 カラー欠陥と出力波形

図 17 色パレット

を開発して搭載した。簡単なロール紙プリンタで欠陥データを印字できたが、その内容は欠陥種、流れ方向の原点からの距離、カメラ番号だけであった。1980年頃になると、米国ザイログ社のZ80や米国モトローラ社の6809を搭載した汎用8bit SBC (Single Board Computer) を開発して搭載し、英数カナ文字ではあるがモニタに表示、設定もキーボード入力になった。(形OMFAC-101) その後パソコンが普及し、データ処理にマイコンを使用する欠陥検査装置は姿を消した。

(2) パソコンによるデータ処理

1990年頃になると、欠陥検査装置のデータ処理にMS-DOS上で動作するパソコンを使用するようになり、その結果、モニタ画面も充実し設定パラメータも増やすことができた。オムロンは1990年にNEC製FC-9800を搭載したモデル(形ASP-V1000P)を開発。1998年にはWindowsモデル「NASP」を開発。その後もパソコンと周辺機器の性能の向上にあわせて欠陥検査装置も進化していった。今の欠陥検査装置では様々な欠陥情報、欠陥表示、各種設定、欠陥分類が可能になっている。

2.5 検査方式の変遷

欠陥検査装置は前述したように、シート上に照射した光の変化を太陽電池やCCD等の光電変換素子で捉えるのを原理としている。光源とカメラの位置関係により多数の検査方式がある。本節ではこれについて述べる。

(1) 透過光方式

図18に示すのが透過光方式である。カメラと光源とをシートを挟んで設置し、シートを透過する光の変化を捉える。穴や黒点の検出が主たる目的で、大半は片面設置でコストも安い。欠陥検査装置導入初期の製紙業界では大半がこの方式であり、透明フィルムでは現在もこの方式が主力である。

(2) 反射光方式

図19に示すのが反射光方式である。表面上の汚れの検出が主たる目的で、シートからの反射した光の変化を捉える。光が透過しづらい坪量の大きい紙では表面と裏面に設置する必要もあり、透過光方式より投資コストがかさむこともある。そのため欠陥検査装置導入初期の製紙業界では、ライナー紙や裏ねず色の白板紙等の片面は検査が不要の紙での片面検査が大半であった。その後は、透過反射併用方式との組合せが主流となり、この方式単独での導入はあまり進まなかった。

(3) 透過反射併用方式

図20に示すのが透過反射併用方式である。透過光方式と反射光方式を合わせた方式で、コストパフォーマンスがよかったことから、製紙業界では1990年代から多く導入され始めた。裏面検査には反射方式を付けて、透過反射併用方式+反射光方式とする場合も多い。

(4) 正反射光方式

図21に示すのが正反射光方式である。光源からカメラへの入射角度を同じにして、反射光方式では検出しづらい凹凸の欠陥、ストリーク、シワ、スジ等の反射角度によって見え方が異なる欠陥を検出しやすくしたものである。この方式は入射角度が変わると検査能力に影響があるため、シートのバタツキに弱く、ロール面上への設置が求められるためにスペースの制約が多く、製紙業界ではあまり導入は進まなかった。しかし2000年代後半になって、かなり細かいストリーク、シワ、スジ等の欠陥への品質要求が高まり、コーターマシンにこの方式も設置する事が多くなった。

(5) 透過反射複合(SF)方式

ここまで述べた方式は、欠陥検査装置の登場時にすでに確立されたスタンダードな検査方式である。2010年以降に新たな技術が開発され、新たな検査方式が生まれた。透過反射併用方式は省設置スペースという長所を持つが、透過光方式では検出できる貫通していないスケ欠陥や、紙に抄き込まれた欠陥は、透過反射併用方式では、写真6に示すように透過光に反射光が打ち消すように干渉して、検出能力が低下することがある。この透過反射併用方式の短所を補うためには、反射+反射+透過光方式というように、反射光と透過光とを分離するのが望ましいが、3系統のフレームを設置しなければならず、設置スペースを取ってしまい設置が困難な場合が多く、製紙業界での導入は限られたものであった。また、設備購入コストや工事コストも膨んでしまった。反射+反射+透過光方式検査かつ省スペースでという製紙業界のニーズで生み出されたのが、図22に示す透過反射複合方式である。カラーカメラは赤色・緑色・青色のそれぞれの光に反応するCCDを搭載しており、各色のCCDの出力は、色が混じることなく各色を個別に画像処理ができる。反射は青色LED、透過は赤色LEDの光源を照射する事で、反射は青色CCD出力、透過は赤色CCDの出力を並行して画像処理すると、写真7に示すように透過光検査と反射光検査が独立して行える。この応用例として図23に示すように、反射のみを白色LEDとし

図18 透過光方式

図19 反射光方式

図20 透過反射併用方式

図21 正反射光方式

写真 6 透過反射併用方式の欠陥画像

写真 7 透過反射複合 (SF) 方式の欠陥画像

図 22 透過反射複合 (SF) 方式

図 23 透過反射複合 (SF) 方式応用

て反射はカラー検査を行うこともできる。その結果、透過反射複合方式のいずれの方式でも、反射透過併用検査方式とほぼ同じ設置スペースで、透過光方式と反射光方式との異なる検査方式を同時に行うことができる。オムロンは2011年に1号機を納入。以降、製紙業界での導入が徐々に増えてきている。

3. 応用装置

ここまでは欠陥検査装置本体の技術の変遷について述べたが、本章では製紙業界において欠陥検査装置を応用した装置の代表的なものについて述べる。

3.1 カッターソータ制御装置

板紙等の仕上工程の自動化を目的として、カッターソータ制御装置は1977年に立石電機が開発し、三菱製紙八戸工場に1号機を納入した。カッターの切断前の連続紙の時にカメラで欠陥検出を行い、コンベア上を流れる平版紙のどれが欠陥のある不良紙かを判別し、不良紙がソーターのゲートを通する時にゲートを動作させて不良紙をリジェクトするものである。開発初期のカッターソータ制御装置は、無接点リレーユニットでタイミングを計ってゲートに出力するだけであった。その後演算処理が付加され、オンラインカッターまたはオフラインカッター、さらにダブルカッターでも予め設定や学習した切断長やコンベア速度から演算して、精度よく不良紙をリジェクトすることができるようになった。処理部は8 bit 専用マイコン (形 OM-RAC-810)、8 bit SBC、16 bit SBC と変遷し、今の PLC

に至っている。枚数マーカ制御、レイボーイ制御、フォーク制御、山替え制御、スプライス処理、自動山札発行も可能で、仕上工程ではなくてはならないものとなっている。

3.2 平版枚葉選別機

印刷用紙等の薄紙の仕上げ工程の自動化を目的として、平版枚葉選別機は1988年頃に開発された。十條製紙は平版紙を1枚ずつベルトに挟んで搬送する方式の搬送装置を開発し、スポット欠陥用としてはヒューテックの欠陥検査装置を搭載して同社八代工場に導入、ストリーク欠陥用としては立石電機の欠陥検査装置を搭載して同社石巻工場に導入した。王子製紙は三菱重工の印刷機を応用した平版紙の端をクリップでつかんで搬送する方式の搬送装置に、東英電子工業の欠陥検査装置を搭載し、同社米子工場に導入した。1992年に「平版枚葉自動選別機」で第20回佐々木賞を王子製紙、三菱重工、東英電子工業の3社は受賞した。現在では、搬送装置は東京給紙機のエアーでコンベアに吸着して搬送する方式の搬送装置に変わり、各社の欠陥検査装置を搭載している。

3.3 ワインダー作業支援装置

十條製紙は1980年代初期に、ワインダー作業の効率化と品質管理を目的として、「FCS」(Fault Control System)を開発し導入していた。他社でも同様なシステムを開発導入していたものと思われる。このシステムには、抄紙機やコーターマシンの欠陥検査装置で検出した欠陥情報を上位システムで収集管理し、次工程のワインダーに設置した端末でそれを確認し、欠陥の除去やパッチを貼る等の処置が

必要な欠陥位置で自動停止させる機能があった。ワインダーに掛ける枠の欠陥の情報を端末でモニタし、この欠陥は処置を行うために徐動・停止すると入力すると、次の処置する欠陥までの紙面距離がワインダーの自動定尺装置に送られる。紙には原点マークがされており、そこを0mとして自動定尺装置が計算して処置する欠陥の位置で徐動・停止させる。1986年に立石電機は同じ目的ながら欠陥検査装置とワインダーが1対1に限定される、小規模工場向けのワインダー作業支援装置「WCS」(Winder Control System)を開発し、製紙業界全体に広まった。

2000年頃になるとワインダーの欠陥位置での停止精度を、さらによくできないかとの要求が高まってきた。紙の伸び縮みやスリップ、距離を測るエンコーダに誤差があると、処置したい欠陥位置で正確に停止しないこともあったからである。2004年頃にコグネックス社は「AWAシステム」を国内で販売。ワインダーに掛ける前の工程の抄紙機やコーターマシンで、紙のエッジにインクジェットプリンタで原点からの距離コード(欠陥検査装置が認識している距離と同じ)を印字する。ワインダーではCCDカメラでそのコードを読み取り、その距離をもって紙の伸び縮み等によって生じる誤差を補正していた。これにより±10cm程度の誤差で欠陥の位置で停止できたと聞く。オムロンも従来のWCSを改善した「NWCS」(New Winder Control System)を開発し、各社でのフィールドテストを経て、±10cm以内の誤差で欠陥の位置で停止させている。

4. 欠陥検査装置の今後

欠陥検査装置の技術の進歩の歴史は、かつてはいかに高速ラインで微小欠陥を検出するかであった。今でも光学フィルムでは微小欠陥検出へのチャレンジは続いているが、紙の検査においてはそれはほぼその限界点に達し、大きさに関係なく視認しづらいスジやカタのような欠陥の検出技

術や、有害欠陥か無害欠陥かの見分けのための欠陥分類技術が求められるようになった。それらを実現するための技術はまだ開発途上にある。しかし、ユーザとメーカーがそれにチャレンジする限り、近日それを達成することであろう。

5. さいごに

本稿では機密保持の縛りがない限り、欠陥検査装置の技術の歴史を後世に残すために、他社技術でもできるだけ社名を挙げて記述した。万一誤記述があれば、各位にご迷惑をおかけすることに深くお詫びするとともに何卒ご容赦をお願いする。また弊社以外のメーカーの技術についてもできるだけ多くを記述したかったが、他社技術については手元の資料に乏しく、弊社の技術が中心となってしまったことをお詫びする。振り返ると技術の進歩は、ユーザとメーカーとが一緒になって創造し努力した結果であった。先達の諸氏には尊敬と感謝の意を表する。今後も、製紙業界と関連デバイスメーカーおよび欠陥検査装置業界の発展を願う次第である。また、弊社は1965年に欠陥検査装置1号機を納入してから本年で50周年。この記念すべき年に荣誉ある第43回佐々木賞を受賞させていただき、本稿の執筆の機会をいただいた関係各位には、紙面を借りて改めて感謝の意を表する。

References

- 1) 野本明「紙パルプ産業における計装技術のあゆみ」紙パルプ技術タイムス テックタイムス社 2009年
- 2) 谷本房夫「自動検査システム」ラミネート加工便覧 加工技術研究会 1978年
- 3) 塩野浩一「CCDイメージ・センサの歴史」トランジスタ技術 CQ出版社 2003年
- 4) デバイスメーカー各社ホームページ
- 5) 欠陥検査装置メーカー各社ホームページ

(受理：2016.7.12)