

광학설계기술의 다양화를 향해서...

최근 광학기기의 디지털화에 동반해 고성능화, 광학소자의 미세화 등의 진화 속도가 확실히 빠르고 다양화되고 있다. 그것에 대해서 광학설계기술의 진보는 분야별로 격차가 있지만 그 진전을 전반적으로 돌아볼 필요가 있고, 이는 향후 과제에 대해 미리 준비한다는 차원에서 중요한 작업이 될 것으로 여겨진다. 본고는 광기술컨택트 2010년 1월호에 게재된 Kato Masatake(캐논주식회사 이미지커뮤니케이션사업본부 렌즈개발센터)의 기고 내용을 발췌한 것이다. 〈편집자 주〉

1. 머리말

광학설계자에게 있어 중요한 것이 광학설계 Tool 이고, 이것의 좋고 나쁨이 설계결과로 나타나 광학기기 생산을 크게 좌우하는 것이 사실이다. 예를 들면 새로운 디바이스 재료 등이 개발되거나 새로운 해석이론과 과제해결의 발상을 구현화·검증하는 경우, 목적에 일치한 시뮬레이션 Tool의 활용은 필수 불가결하게 된다.

더욱이 광학메이커의 광학설계 툴은 많은 광학기기 니즈의 다양화에 의해 그리고 계산기의 놀라운 고속화에 의해 여러가지 것이 개발되어 판매되어 왔다.

그림1에 1990년대 초부터의 대표적인 광학설계 툴을 나타냈는데, 퍼스널컴퓨터가 진화한 오늘날에 있어서는 저가이고 우수한 소프트가 개발되어 용도별로 Free소프트웨어도 많이 출현하고 있어 열거할 수 없을 정도이다.

그림2에는 계산기의 고속화가 진행된 경과를 나타냈다. 1976년 미국의 Cray Research사에 의해 본격적인 슈퍼컴퓨터 CRAY-1이 만들어졌다. 순간최대성능은 160MFLOPS이고, 1MFLOPS는 1초간에 100만 회의 부동소수점연산을 행하는 능력을 나타낸다. MIPS라는 단위도 잘 사용되는데, MIPS는 1초간에 100만 회의 기계명령을 행하는

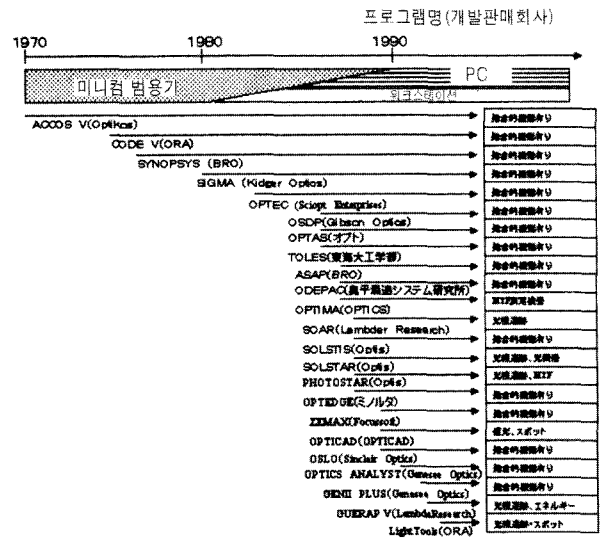


그림1. 광학CAD연표

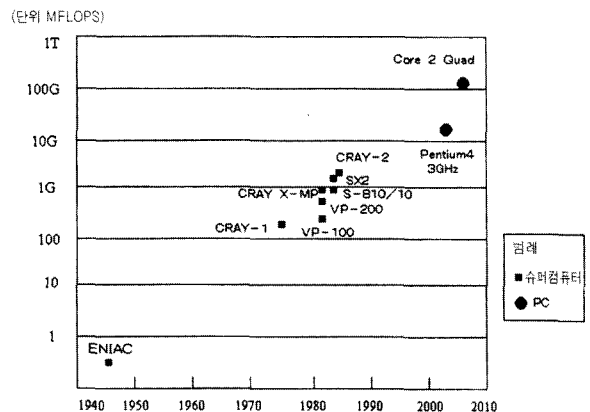


그림2. 계산기의 고속화

능력이고, 1MFLOPS는 2.35MIPS에 상당한다.

1982년 후지쯔(富士通)가 VP-100(267MFLOPS) VP-200(533MFLOPS)을 제작, 1983년에는 히타치 제작소가 S-820/10(857MFLOPS)을, 日本電氣가 SX-2(1333MFLOPS)를 발표했다. 여기에 이르러 일본제도 미국제에 쫓겨 큰 변혁을 가져왔다.

그리고 근래에 퍼스널컴퓨터의 눈부신 진화에 힘입어 노트북에서도 간단한 광학설계 툴이 취급되도록 되었다. 이 계산기의 고속화에 의해 근사계산이었던 것이 보다 엄밀한 수치계산에 의한 평가를 가능하게 했는데, 결과로서 유저가 독자적으로 스스로 목적에 일치한 소프트웨어를 제작하는 경우도 생겨나 이것이 증가해 오고 있다.

2. 광학설계기술과 광학설계 툴

이러한 배경 하에 현재의 광학설계기술과 광학설계 툴의 관계를 아래의 3가지로 분류해서 부감(俯瞰)해 보겠다.

- 1) 최적화 기술
- 2) 보다 엄밀한 평가방법
- 3) 복합화된 시뮬레이션 기술

1) 최적화 기술

광학설계, 특히 렌즈설계에 대한 최적화 기술의 역사는 오래되고, 여러 방식이 개발되어 광학설계 툴에 실장되어 왔다. 전술의 컴퓨터의 현저한 발달에 의해 대규모의 수치계산이 가속인 한편 간단히 실행할 수 있도록 되었다.

이 수학적 처리의 최적화 방법을 사용한 렌즈설계를 자동설계라고 하는데, 완전 자동적으로 최종렌즈형상이 얻어지는 것은 아니고 렌즈설계가 본질적으로 시행착오인 것은 바뀌지 않는다.

• 최소2승법(1955)

렌즈계의 구성요소인 곡률, 간격, 굴절률 등을 변수X, 목표성능 등의 목표값과 현재값의 차를 평가함수F(X)

로 하고, 모든 평가함수의 단일평가척도를 메리트함수 $\Phi(X)$ 로 해서 각 평가함수F(X)가 모두 0으로 되는 것을 요청하는 대신에 메리트함수 $\Phi(X)$ 의 최소화를 도모한다.

• 감쇠최소2승법(DSL법)

1957년 영국의 Wynne^{1,2)}가 렌즈자동설계에 적용했다. 수차보정은 비선형문제이기 때문에 최소자승법에서는 바람직한 해를 얻기 어렵다. 이 방법은 본래 메리트함수의 제2항으로서 Dumping Factor(감쇠인자)라고 하는 비선형성보정항을 추가한 것이다. 설계가 국소해(局所解)에 가까우면 감쇠인자가 자동적으로 크게 되어 그 해에서의 이탈을 불가능하게 한다.

이 방법의 결점은 이 방법에 의해 얻어지는 설계해가 설계자가 종종 선택한 출발점의 근방에 있는 국소적인 해에 지나지 않는다는 것이다.

• 직교화법(1961)

D.S.Grey³⁾에 의해 개발되었다. 지금까지 실용화되어 온 자동설계프로그램의 대부분은 평가함수의 선형근사에 입각한 방법이다. 그러나 많은 경우 전술했듯이 평가함수 및 메리트함수는 비선형이기 때문에 뭔가 보정이 필요로 하다. Grey의 직교화법은 변수가 서로 직교하도록 Gram-Schmidt 방법에서 변수변환을 행하고, 그것에 의해 생기는 변수의 독립성을 이용해서 비선형 영향의 보정을 행하는 것이다. DLS에 비해 계산시간을 요하지만 강력한 수속해(收束解)를 얻을 수 있다.

상기 방법은 어느 것도 출발점근방의 유일한 최적해를 검출하는 것이고, 소위 국소적 최적화방법이다. 이것에 대해서 변수공간의 보다 넓은 범위에서 그리고 복수의 최적해를 검출할 수 있는 대역적(大域的) 최적화방법에 관한 시도가 1985년쯤부터 시작하고 있다.

• Annealing법

메리트함수의 지형(地形)을 기체분자의 운동에너지의 존재확률 Boltzmann분포에 비유해 변수 스템을 어느 확률함수에 의해 컨트롤하는 것으로, 국소해에 Trap되는것 없이 대국적 최소값을 찾아내는 방법이다.

• Simulated annealing법(1985) Hearn^{4,5)}

- ASA법(Adaptive Simulated Annealing) Jones and Forbes^{6,7,8)} 상기의 것은 그 확률함수가 다르다.

- GS(Global Synthesis)(1992) Kuper and Harris⁹⁾ Optical Research Associates사의 CODE-V에 실장되어 있지만 구체적인 알고리즘은 공개되어 있지 않다.

- Escape함수(1995) 一色, 小野, 中楯¹⁰⁾ 국소해에 도달한 후, 메리트함수에 Escape함수되는 항을 추가해서 국소해 영역을 변경한다. 그 후 이 항을 제외해서 최적화한 결과 최초의 국소해와 동일한 해인지를 판단하고, 어느 문턱값 이하의 변화였던 경우는 Escape는 실패였다고 판단해서 파라미터를 변경한 Escape함수를 사용해서 별도의 국소해를 복수로 구해간다.

- 유전적 알고리즘(Genetic Algorithm) 1975년 Holland에 의해 제안되고, 렌즈최적화에도 적용되어 있다^{11,12)}.

렌즈계 구성요소의 해를 1조의 유전자로 표현한 “개체”를 복수준비해서 하나의 우수한 현 개체에서 차세대の子개체로의 추이에서 선택(selection), 교차(crossing over), 돌연변이(mutation)되는 처리를 행하고, 교체군의 전체적인 특성을 서서히 높여가는 것이다.

이 방법의 특징은 주요한 탐색수단인 교차가 국소탐색은 아닌 것이고, 다층막설계로 적용한 예¹³⁾도 보고되고 있다.

이 외에도 Expert시스템, BUSD(Blow UP/Settle Down), 샘플링법 등 각종 방법이 존재하고 있고, 렌즈설계에도 Metaheuristics한 알고리즘을 넣는 움직임이 있다.

한편, 목표성능을 극한까지 추구하는 경우에 초점거리, 가장자리두께 등 렌즈가 만족해야 하는 제약조건을 적절히 처리하는 제약조건처리방법이 중요하게 되고 있다.

- Penalty함수법 부등호 및 등호제약조건을 평가함수에 포함해서 취급하기 위해 제약조건이 없는 경우의 최적화방법을 그대로 이용할 수 있기 때문에 적용범위가 넓어지지만,

제약조건이 침해되어 있는 상태에서 수속이 늦게 된다.

- Lagrange 미정승수법(L. U. M) M개의 등식제약조건 $G(X)=0$ 하에서 $F(X)$ 의 극값을 취하는 X 를 구하고 싶은 경우 또 하나의 변수열 λ (Lagrange 미정승수)를 사용해서 다음과 같은 함수 $L(X, \lambda)$ 을 생각하자.

$$L(X, \lambda) = F(X) + \lambda G(X) \quad (1)$$

이 극값조건은

$$\frac{\partial}{\partial X} L(X, \lambda) = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial \lambda} L(X, \lambda) = 0 \quad (3)$$

을 풀어 解벡터 X 가 얻어진다.

- 활성제약법(active set method) • 후에 의해 제안되고, 광학설계 툴 ODEPAC¹⁴⁾, TOLES¹⁵⁾에 실장되어 있다. 상기 L.U.M에서 부등식 제약조건 $G(X) \leq 0$ 의 조건하에서 Kuhn-Tucker정리를 사용해서 L.U.M이 모두 正으로 되기까지 반복처리를 행해 등식화 처리를 행한다.

최적화방법을 사용한 렌즈자동설계는 상술한 방법을 토대로 세부적인 개량이 더해지는 것이 많지만, 광학설계 툴에 넣어 상세를 알 수 없는 경우도 많다. 자동설계의 최적화능력을 비교하는 경우도 동일한 출발점데이터 및 평가함수가 바람직하지만, 현실은 비교가 곤란하다.

더욱이 계산기능력 때문에 3차수차계수를 평가량으로 취하는 것으로 그 렌즈가 가지고 있는 특징의 골조를 이해하면서 자동설계를 행했다. 최근에는 1951년 Hertzberger에 의해 제창된 기하광학적 강도분포인 스폿다이아그램을 단일평가값으로서 채용하는 경우가 있다. 이 단일평가값으로서 2승평균값 또는 그 제곱근(RMS)이 잘 사용되고, 자동설계에서는 전자의

값을 보정대상으로 하는 것이 많다. 또는 스폿다이아그램 분포의 밀집도를 나타내는 단일겹침값을 정의하고, 그것을 평가량으로 취하는 경우도 있다. 이러한 이유로서는 초기의 구상(構想)설계단계에서 복잡히 얽힌 광선수차를 신경쓰지 않고 간이로 자동목표값 설정을 사용해서 설계를 진행할 수 있는 편리성에 의한다.

최근의 디지털카메라용의 촬영렌즈 설계는 촬상소자의 소형고정세화 및 고배율화가 급격히 진행됐기 때문에 촬영렌즈 설계가 매우 어렵게 되고 있다. 소형고 성능화하기 위해 비구면을 다용하는 것으로 되고, 초기 구상설계단계에 대한 효과적인 비구면 도입방법이 요구되고 있다. 즉, 렌즈구성매수와 비구면매수가 적은 경우는 예측도 되기 쉽지만, 복잡한 구성으로 되면 최적의 해에 도달하는 예측이 되기 어렵기 때문이다. 한편, 중요시되는 것이 제조민감도이고, 성능을 유지하면서 얼마나 제조민감도를 내리는가에 주의를 해야 한다. 또 비구면에서도 축대칭이 아닌 자유곡면을 사용한 Head Mount Display 등의 편심광학계에서도 같이 초기 구상설계가 중요한 실마리로 된다. 공축계(共軸系)와 달리 편심광학계에서는 설계자가 광선경로를 직관적으로 이미지해서 구성하고, 편심수차이론 등을 활용할 수 있는 설계 툴이 출현하는 것에 기대를 건다.

2) 보다 엄밀한 평가방법

높은 광학성능이 요구됨에 따라 정도가 높은 성능평가 시뮬레이션이 요구된다. 아래에 몇 가지 예를 들어 보겠다.

• 조명계산

구체적인 예로서 액정프로젝터의 조명계산을 들 수 있다. 투과형, 반사형, DLP를 상관하지 않고 광원에서 방사되는 광속에너지가 얼마나 패널에 집광시키는가에 따라 프로젝터의 밝기가 결정된다.

조명계산¹⁶⁾에서는 일반적으로 몬테카를로법을 사용해서 단시간에 많은 광선을 추적해서 조도분포를 계

산한다.

몬테카를로법의 연구는 Von Neumann에 의해 시작하고, 일반적으로 유한한 면적을 가지는 광원에서 광선을 발생시켜 평가면에 대한 기하광학적인 조도분포를 구할 때에 광원특성을 반영시키도록 의사난수(擬似亂數)에 의하고, 이 점에서의 사출각도를 결정해서 1분의 광선을 정의한다. 조도분포는 평가면상의 임의 미소구분에 도달하는 광선본수를 카운트하는 것으로 표현한다. 이 방법에 의해 광선을 규칙적으로 사출하는 경우에 나타나는 무의미한 기하학적 모양은 생기지 않는다. 또 어느 정도의 유효한 광선본수가 추적되어 있으면 설정본수 도중에서 계산을 중지해도 되고, 그리고 다시 계산을 속행해도 된다. 광선추적 중에 확산면이 있는 경우도 확산분포특성에 따른 의사난수를 발생시켜 광선의 사출방향을 편향시킨다. 계산시에 설정한 광학면 순서로 광선과의 교점이 얻어지지 않는, 소위 Non Sequential한 광선추적평가에서는 평가면에 도달하지 않는 막대한 무효광선이 생기기 때문에 광선본수의 카운터에 의한 조도분포계산시에 평가면의 처리를 충분히 생각할 필요가 있다.

광원이 점광원에 가까울수록 집광효율이 높은 조명계를 설계할 수 있지만, 조명계산의 시뮬레이션 정도를 높이는 심요(心要)조건으로서 광원모형을 충실히 설정하는 것을 들 수 있다. 경험과 노하우를 살려 광원모형을 자유롭게 Customize할 수 있는 조명계산 툴도 많이 출현하고 있다. 그리고 조명계산에서 중요한 것이 편광광선추적이고, Stokes파라미터와 Jones벡터를 사용해서 계산하는 경우가 많다.

• 전자파해석

회절광학소자의 회절효율, 광도파로, Photonic결정, 액침노광장치 마스크의 투과회절광 등에서 광전자파해석이 중요하게 되어 있다. 여기에서는 회절광학소자 DOE를 예로해서 대표적인 해석방법에 대해서 언급하겠다.

회절광학소자의 설계법¹⁷⁾으로서 위상함수법과 고굴절률법의 2가지 광선추적 방법이 있다. 위상함수법은 광선 입사점의 회절격자 공간주파수에서 출사광선 방향을 결정한다. 고굴절률법은 Sweatt가 1977년에 발

표한 방법으로 박형회절소자를 굴절을 무한대의 두께가 없는 렌즈에서 근사하는 방법이고, 일반적인 광학설계 툴의 광선추적식이 사용되어 편리하다.

한편, DOE 회절효율 등을 정도 좋게 구하는 경우, 전자파 해석의 대규모 계산이 필요하게 된다. 전자파 해석에서는 해석적인 엄밀 해는 존재하지 않기 때문에 특성해석에는 계산기 능력 Up을 유효활용해서 반해석적 혹은 수치적 방법을 사용한다.

방법을 대별하면 아래의 것이 대표적¹⁸⁾이다.

- ① 모드법
- ② 적분방정식법
- ③ 미분방정식법 RCWA
- ④ FDTD법

잘 사용되는 방법에 대해서 언급하면 ③이고, 엄밀결합파해석 RCWA(Rigorous Coupled-Wave Analysis)는 고유모드를 사용하는 미분방정식법의 대표적인 방법이다. 격자영역을 다분할한 후에서 격자단면 형상을 계단근사해서 각층 내에서는 유전율의 소자두께방향으로 변화가 없다고 가정하면 각층의 전자계는 Maxwell방정식의 고유모드에서 전개할 수 있다.

③에서 유한차분시간영역법 FDTD(Finite Difference Time-Domain)¹⁹⁾은 Maxwell방정식을 직접, 시간을 쫓아 미분을 차분(差分)형식으로서 수치적으로 풀어가는 것으로 해석대상으로 되는 구조 제한은 거의 없고, 비주기 구조와 비선형광학 등에도 적용가능하다.

소자구조의 크기와 주기가 사용하는 전자파 파장에 비해 큰 경우는 RCWA사용이 적합하고, 미세회절격자, 근접장광학 등 구조가 파장에 비해 동정도인 경우에 FDTD법의 적용이 유효하다.

균일한 매질의 주기구조에는 RCWA가 적합하고, 복잡한 홈 형상과 불균일한 매질로 구성되는 DOE에는 FDTD를 사용할 필요가 있다.

3) 복합화된 시뮬레이션 기술

이 분야도 엄밀한 평가방법의 하나로 생각되지만, 광학설계 툴 단독이 아니라 복수 툴을 연대시켜 계산하기 때문에 복합시뮬레이션 또는 연성(連成)이라고도

할 수 있다.

아래에 몇 가지 예를 들었지만, 이것들의 대용량 계산 결과를 Graphical로 묘화해서 직감적으로 설계 지침으로 도움 되는 것을 겨냥하는 것이 많다.

• 화상처리를 고려한 결상성능평가

디지털화에 동반해 최근의 디지털카메라에서는 왜곡수차 보정과 색수차, 주변 광량 보정과 카메라 내부의 Digital Signal Processor 고속화이고, 실시간의 리얼타임 처리가 가능하게 되어 왔다. 이미 광학계 특성에 맞춘 화상처리를 전제로 한 광학설계의 최적화가 요구되는 단계에 들어와 있다. 고정세한 원(元)화상에 대해서 광학계의 OTF를 중첩시키는 것으로 중간적인 잠상(潛像)을 계산하고, 디지털카메라 내부에서 행하고 있는 화상처리를 충실히 컴퓨터상에서 재현하는 것으로 실기에서 촬상한 화상과 동일한 것이 디스플레이상, 또는 프린트 상에서 가시화할 수 있다. 같은 방식으로 손떨림이 발생한 상태의 손떨림 방지기구의 화상으로의 효과확인도 이 연장선에서 행할 수 있다.

• Ghost

광학기계에서는 광원과 고휘도물점의 불필요 고스트 광이 영상에 악영향을 주는 경우가 많다. 최근에는 광학면 상호의 다중반사 고스트뿐만 아니라 확산반사를 일으키는 기구부품과 광학면과의 다중반사 고스트도 문제가 된다.

통상 광원을 지정하고 입사동(入射瞳) 면상을 분할해서 다수 광선을 추적하여 복수면에서의 반사에 의해 결상평가면에 도달한 고스트 광을 최종화상에 가까운 형에서 가시화한다. 고스트 광의 발생은 광학면에 큰 각도에서 입사했을 때에 반사방지코팅 효과를 잃어버리는 것이 눈에 띄게 많다. 따라서 고스트광선추적에 있어서는 Non Sequential 광선추적에 의해 문제로 하는 고스트 광의 반사방지코팅으로의 입사각에서 반사특성을 고려해서 평가면에서의 집광강도분포를 겹친다. 고스트 광의 강도뿐만 아니라 색미(色味)를 평가하는 경우는 복수파장에서의 광선근적(光線近跡)이 필요하고 초사 데이터, 코팅정보와 촬상카메라계의 분광데이터 등의 실측데이터를 계산에 넣은 것으로

결과와 합치도(合致度)를 올릴 수 있다.

줌 렌즈도 보다 고배율화 되어 렌즈 매수가 증가하면 최적화 설계단계에서 고스트 광을 회피하는 것이 요구되지만, 설계 자유도가 빼앗기는 것으로 설계상은 매우 곤란함이 동반된다.

• 응력 변형, 열변형 해석

구조 해석, 열응력 해석 등에서는 유한요소법(Finite Element Method, FEM)을 사용한 해석 툴이 주로 된다. 유한요소법은 수치해석법의 하나이고, 해석적으로 푸는 것이 어려운 미분방정식의 근사해를 영역 전체를 소영역으로 분할하고, 각 소영역에는 비교적 단순히 공통인 보간(補間)함수를 사용하면서 전체정도를 확보해 간다.

열응력변형에서는 등방적인 굴절률변화와 선팽창률 영향뿐만 아니라 FEM해석에서 광탄성정수에 응해 굴절률 분포를 구해 복굴절 영향 등을 계산한다. 현재에서는 구조 해석과 열변형 해석 툴은 많은 시판 툴이 있고, 이것들과 광학설계 툴을 유기적으로 연대시켜 효율화를 올려가는 것이 가능하다.

4) 이후를 향해서

이상 광학설계 툴의 변천을 살펴보았는데, 광학기기의 다양화와 관련하여 광학설계기술이 다양화하는 것은 당연한 것이고, 이것에서 광학설계기술자가 갖추어야 하는 범위도 넓게 되어야 한다.

이번은 광학설계기술을 3가지 영역으로 대별해서 보았지만, 2)와 3)은 평가에 관한 부분이고, 해석시스템 구축에 역점이 두어졌다. 물론 광학기술자로서도 여기에 많은 관심을 모아야 하지만, 중요한 것은 평가결과를 설계에 피드백 해 가는 과정이다.

이후도 계산기의 고속화에 의해 여러 광학성능평가가 보다 정도 좋고, 간편화되어 가기 마련이고 시행착오에서 탈피해서 자동설계에 넣어질 것이다.

광학설계자의 역할은 그 부분에서 중요하고, 단순히 계산역할 뿐만이 아니라 디자이너(설계자)로서 광학기기 발전에 기여해 가도록 노력해야한다.

참고문헌

- 1) C. G. Wynee; Proc. Phys. Soc. London73 (1959) 777-787
- 2) M. Nunn and G. Wynee; Proc. Phys. Soc. London74 (1959) 316-329
- 3) D. S. Grey; J. Opt. Soc. Amer. 53 (1963) 672-676
- 4) G. K. Hearn; Proc. SPIE766 Recent Trends in Optical System Design; Computer Lens Design Workshop (1987) 283-284
- 5) G. K. Hearn; Proc. SPIE818 Current Developments in Optical Engineering II (1987) 258-264
- 6) G. W. Forbs and A. E. Jones: "Toward global optimization with adaptive simulated annealing", Proc. SPIE1354 International Lens Design Conference (1990) 144-153
- 7) G. W. Forbs and A. E. Jones: Opt Photonics News March (1992) 23-29
- 8) A. E. Jones and G. W. Forbs: J. Global Optim. 6 (1995) 1-37
- 9) T. G. Kuper and T. I. Harris: "A New look at global optimization for optical design", Photonics Spectra Jan. (1992) 151-160
- 10) 一色, 小野, 中盾: "エスケープ関数によるレンズ設計", 光学 24 (1995) 415-421
- 11) G. Elsner: J. Opt. Theory and Appl. 59 (1988) 165-172
- 12) E. Betensky: "Postmodern lens design", Opt. Engin. 32 (1993) 1750-1756
- 13) 中村: "帯域フィルター多層膜の最適設計", 光アライアンス 4 (2001) 26-29
- 14) 鈴木: "ODEPACの特徴", 光アライアンス 2月号 (2005)
- 15) 草川: "§5 自動設計機能(DLS)", TOLES 프로그램マニュアル
- 16) 牛山, 草川: シュミレーション光学, 東海大学出版会
- 17) 光設計研究グループ他監修: 回折光学素子入門, オプトロニクス社 (1997)
- 18) 松田, 奥野: "周期回折格子の電磁気解析", 光学 27 (1998) 626-631
- 19) 市川: "時間領域差分法", 光学 27 (1998) 647-654